



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΗΛΕΚΤΡΟΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ  
ΥΛΙΚΩΝ

**ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ ΜΟΣ ΜΕ  
ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ  
ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ΜΕ LASER**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Λουκάς Κ. Καστάνης

ΑΘΗΝΑ

2021





NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF  
ATHENS  
SCHOOL OF ELECTRICAL AND COMPUTER  
ENGINEERING  
DIVISION OF ELECTROMAGNETICS,  
ELECTROOPTICS AND ELECTRONIC MATERIALS

**MOS STRUCTURE WITH LASER ANNEALED METAL  
NANOCRYSTALS NON-VOLATILE MEMORY**

PhD THESIS

Loukas K. Kastanis

ATHENS

2021





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΗΛΕΚΤΡΟΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ  
ΥΛΙΚΩΝ

## ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ ΜΟΣ ΜΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ΜΕ LASER

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Λουκάς Κ. Καστάνης

Συμβουλευτική Επιτροπή : Δημήτριος Μ. Τσαμάκης  
Ευάγγελος Κ. Ευαγγέλου  
Ιωάννης Π. Ξανθάκης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 6<sup>η</sup> Απριλίου 2021.

.....  
Ευάγγελος Ευαγγέλου,  
Αν. Καθηγητής ΠΙ

.....  
Ευάγγελος Χριστοφόρου,  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Κωνσταντίνος Πολιτόπουλος,  
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Χρήστος Τσάμης,  
Ερευνητής Α ΕΚΕΦΕ  
«Δημόκριτος»

.....  
Ηλίας Γλύτσης,  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Ιωάννης Παπανάνος,  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Νίκος Κονοφάος,  
Καθηγητής ΑΠΘ

ΑΘΗΝΑ

2021



©Λουκάς Κ. Καστάνης  
Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

©Ε.Μ.Π

*Στη μνήμη της Αγαπημένης μου Μαρίας*



*Copyright Λουκάς Κ. Καστάνης, 2021.  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής είναι, η κατασκευή μη πτητικών μνημών αποθήκευσης δεδομένων. Μελετάται η ανάπτυξη μεταλλικών νανοκρυστάλλων υψηλής πυκνότητας ομοιογενώς διεσπαρμένων και ομοιόμορφου μεγέθους, με τη χρήση laser. Η προσπάθεια επίτευξης βέλτιστων χαρακτηριστικών των μεταλλικών νανοκρυστάλλων, επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας συνδυαστικά, την ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας, καθώς και τον αριθμό των παλμών του laser. Απώτερος σκοπός είναι, η κατασκευή διατάξεων Μετάλλου-Οξειδίου-Ημιαγωγού (MOS) που εμπεριέχουν τους νανοκρυστάλλους από μέταλλο στην διεπιφάνεια  $\text{SiO}_2$  και ενός διηλεκτρικού στρώματος υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς. Μελετάται η μεταβολή των χαρακτηριστικών αυτών των δομών πριν και μετά την ακτινοβολήση, επίσης, η λειτουργία τους ως στοιχεία μνήμης, η διατήρηση του ηλεκτρικού φορτίου συναρτήσει του χρόνου (retention) καθώς και η αντοχή (endurance) σε διαδοχικούς κύκλους προγραμματισμού-διαγραφής.

Μεταλλικοί νανοκρύσταλλοι σχηματίζονται μετά από ανόπτηση με laser λεπτού μεταλλικού υμενίου, που έχει εναποτεθεί πάνω σε  $\text{SiO}_2$ . Τα μέταλλα τα οποία μελετήθηκαν για την κατασκευή των νανοκρυστάλλων είναι, ο άργυρος (Ag) και ο χρυσός (Au). Η ανάπτυξη του λεπτού μεταλλικού στρώματος, έγινε σε θάλαμο υψηλού κενού, με την τεχνική της ιοντοβολής (Sputtering).

Εξετάζεται η επιρροή των χαρακτηριστικών της δέσμης laser στα φυσικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των νανοκρυστάλλων, που δημιουργούνται κατά την ανόπτηση. Στη συνέχεια, κατασκευάζονται δομές MOS οι οποίες περιέχουν τους κατασκευασμένους με laser νανοκρυστάλλους και διερευνάται η λειτουργία των δομών αυτών ως στοιχείων μνήμης. Η ανάπτυξη των νανοκρυστάλλων, αποτελεί βασικό στάδιο, για την κατασκευή διατάξεων ενός ηλεκτρονίου, οι οποίες είναι πιθανό να αποτελέσουν τη βάση της νανοηλεκτρονικής τεχνολογίας στο μέλλον.

Η συγκεκριμένη μη πτητική μνήμη, βασίζεται στην αρχή λειτουργίας της μη πτητικής μνήμης αιωρούμενης πύλης (Floating gate). Η μνήμη αιωρούμενης πύλης αποτελείται, από την πλωτή πύλη (π.χ. poly-Si, μέταλλο), από ένα σχετικά παχύ στρώμα οξειδίου υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς (οξείδιο ελέγχου), την αιωρούμενη πύλη και ένα λεπτό στρώμα διοξειδίου του πυριτίου (οξείδιο της σήραγγας) πάνω σε n-Si/p-Si. Στη μνήμη MOS με νανοκρυστάλλους από μέταλλο, οι νανοκρύσταλλοι είναι ενσωματωμένοι στη διεπιφάνεια του οξειδίου ελέγχου και του οξειδίου της σήραγγας, με το διπλό στρώμα των οξειδίων να δημιουργεί έντονο ηλεκτρικό πεδίο στο οξείδιο της σήραγγας, με συνέπεια να ελαττώνεται η τάση λειτουργίας της διάταξης. Ένα άλλο πλεονέκτημα της διάταξης με μεταλλικούς νανοκρυστάλλους, είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεγάλη ποικιλία από μέταλλα. Τα μέταλλα έχουν μεγάλη ποικιλία στα έργα εξόδου, κάτι που επιτρέπει την μεταβολή του βάρους του φρεατίου δυναμικού, συνεπώς της παγίδευσης των φορτίων εντός των νανοκρυστάλλων. Τα χαρακτηριστικά της υστέρησης και ο χρόνος συγκράτησης φορτίου (retention) βελτιώνονται, εάν χρησιμοποιηθούν μέταλλα με μεγάλο έργο εξόδου.

Στη διατριβή παρουσιάζονται τα βήματα κατασκευής της μνήμης. Με ξηρή οξείδωση του πυριτίου κατασκευάζεται  $\text{SiO}_2$ . Τα οξείδια υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  και  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , κατασκευάζονται με τις μεθόδους, RF Magnetron Sputtering και της εναπόθεσης ατομικού στρώματος (ALD), αντίστοιχα. Η εναπόθεση αυτών των στρωμάτων γίνεται σε χαμηλή θερμοκρασία, για να αποφευχθεί η διάχυση των μεταλλικών νανοκρυστάλλων, καθώς και για αποφυγή της επίδρασης της ανάπτυξης των διηλεκτρικών αυτών στρωμάτων στη μορφολογία που έχει επιτευχθεί αρχικά με το laser.

Οι μνήμες έχουν δομή n-Si(100)/ $\text{SiO}_2$ /μεταλλικοί νανοκρύσταλλοι (NCs)/οξείδιο υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς/μέταλλο-πύλη. Επίσης κατασκευάστηκαν δείγματα αναφοράς που δεν περιέχουν νανοκρυστάλλους (MOS), για να διαβεβαιωθεί ότι η υστέρηση και τα χαρακτηριστικά μνήμης που μετριούνται οφείλονται στην παρουσία των νανοκρυστάλλων. Τα δομικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των δομών έχουν μελετηθεί εκτενώς, με σκοπό να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου ανόπτησης με laser, για την παραγωγή διατάξεων μνήμης που

βασίζονται σε μεταλλικούς νανοκρυστάλλους. Συγκεκριμένα, η ανόπτηση του λεπτού μεταλλικού στρώματος γίνεται με laser φθοριούχου κρυπτού (KrF), με μήκος κύματος 248nm που βρίσκεται στο βαθύ υπεριώδες, για να επιτευχθούν ομοιόμορφα κατανεμημένοι νανοκρυστάλλοι με μέση διάμετρο ~17nm. Καλύτερα αποτελέσματα για τους νανοκρυστάλλους χρυσού ελήφθησαν με τη χρήση ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας 200-500mJ/cm<sup>2</sup> και με μικρό αριθμό παλμών laser (1-6). Ο δομικός χαρακτηρισμός, με χρήση μικροσκοπίου SEM και ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός με μετρήσεις (C-V) και (I-V), αποκάλυψε καλή συμπεριφορά σε φόρτιση/εκφόρτιση και παράθυρο μνήμης γύρω στα 4V και 14V, για δομές με οξειδίο φραγής Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> αντίστοιχα. Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων έδειξε ότι η ανόπτηση με laser, είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική για την κατασκευή διατάξεων μνήμης.

Από τον ηλεκτρικό και δομικό χαρακτηρισμό των δομών που μελετήθηκαν, αποδεικνύεται ότι πράγματι λειτουργούν ως στοιχεία μνήμης, εμφανίζοντας μεγάλα παράθυρα μνήμης, καλά αποτελέσματα στην συγκράτηση του ηλεκτρικού φορτίου, όπως και σε διαδοχικούς κύκλους προγραμματισμού-διαγραφής. Έναντι των συνηθισμένων μνημών, οι δομές αυτές εμφανίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα, τα οποία απορρέουν από το γεγονός ότι η λειτουργία τους βασίζεται στη μετακίνηση και αποθήκευση εντός των νανοκρυστάλλων ενός πολύ μικρού αριθμού ηλεκτρικών φορτίων και όχι εκατοντάδων, όπως συμβαίνει στις συνηθισμένες μνήμες.

Στο 1ο Κεφάλαιο της Διατριβής, γίνεται σύντομη περιγραφή των υπαρχόντων δομών μνήμης, καθώς και η περιγραφή της λειτουργίας των δομών MOS με νανοκρυστάλλους ως στοιχεία μνήμης. Επίσης, αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δομών αυτών. Τέλος, τονίζονται τα πλεονεκτήματα εφαρμογής ανοπτημένων με laser μεταλλικών νανοκρυστάλλων, έναντι άλλων μεθόδων κατασκευής.

Στο 2ο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή του τρόπου κατασκευής των διατάξεων μνήμης, των πειραματικών διατάξεων και των συνθηκών που χρησιμοποιήθηκαν, τόσο για την ανάπτυξη των νανοκρυστάλλων, όσο και των δομών MOS που περιέχουν νανοκρυστάλλους στην διεπιφάνεια των οξειδίων(SiO<sub>2</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ή SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Επίσης, παρουσιάζεται η θερμική οξείδωση για να παραχθεί ένα λεπτό στρώμα SiO<sub>2</sub> καθώς και η εναπόθεση στρωμάτων Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Στο 3ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται ο δομικός χαρακτηρισμός των νανοκρυστάλλων, καθώς και των δομών που κατασκευάστηκαν. Ο δομικός χαρακτηρισμός έγινε με χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου διέλευσης (TEM). Επίσης γίνεται συσχέτιση του μεγέθους και της πυκνότητας των νανοκρυστάλλων, σε συνάρτηση με τις συνθήκες κατεργασίας με το laser.

Στο 4ο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός των παρασκευασθεισών δομών. Αρχικά μελετώνται οι χαρακτηριστικές χωρητικότητας-τάσης (C-V), καθώς και αγωγιμότητας-τάσης (G-V). Οι ληφθείσες χαρακτηριστικές, εμφανίζουν το φαινόμενο της υστέρησης, γεγονός το οποίο αποδεικνύει ότι οι συγκεκριμένες δομές λειτουργούν ως στοιχεία μνήμης. Επιπλέον, μελετάται ο χρόνος συγκράτησης του ηλεκτρικού φορτίου στους νανοκρυστάλλους, η αντοχή των δομών αυτών σε διαδοχικούς κύκλους προγραμματισμού-διαγραφής, ο μηχανισμός εγγραφής της πληροφορίας, καθώς και η τιμή της τάσης πύλης κατά την οποία πραγματοποιείται.

Σημαντικό αποτέλεσμα αυτής της εργασίας ήταν η επιτυχής κατασκευή νανοκρυστάλλων Au με χρήση laser, για να χρησιμοποιηθούν ως κέντρα παγίδευσης φορτίου σε δομές Si/SiO<sub>2</sub>/Au NCs/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ή Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Au ή Al. Η χρήση Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, λεπτότερου αρχικού στρώματος Au προς ανόπτηση (3nm), χαμηλής ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας (300mJ/cm<sup>2</sup>) και 6 παλμών laser, δίνει βέλτιστα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και χαμηλά ρεύματα διαρροής. Ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός έδειξε ότι η υψηλή ποιότητα και η ομοιογένεια των κατασκευασμένων με laser νανοκρυστάλλων, επιτρέπει τη χρήση τους σε διατάξεις μνήμης τύπου Flash.

**ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ:** Μη πτητικές μνήμες με μεταλλικούς νανοκρυστάλλους

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** Μη πτητικές μνήμες, Νανοκρυστάλλοι από μέταλλο, Ανόπτηση με laser, Νανοδομικά από μέταλλο, Φρεάτιο δυναμικού.

## ABSTRACT

The purpose of this doctoral thesis is to fabricate non-volatile data storage memories. The development of high-density, homogeneously dispersed and uniform in size metal nanocrystals is studied using a laser. The optimum characteristics of metallic nanocrystals are achieved by varying the fluence (energy per unit area) as well as the number of laser pulses. The ultimate goal is to fabricate MOS devices containing metal nanocrystals in the interface of SiO<sub>2</sub> and a dielectric layer with high dielectric constant. A study is conducted to investigate the changes in the characteristics of these structures before and after irradiation, their function as memory devices, the retention over time of the electrical charge, and the endurance in successive write-erase cycles.

Metal nanocrystals are formed via laser annealing (LA) of a thin metal layer deposited on SiO<sub>2</sub>. The metals studied for the fabrication of nanocrystals are silver (Ag) and gold (Au). The development of the thin metal layer was carried out in a high vacuum chamber via the Sputtering technique.

The influence of the laser beam characteristics on the physical and geometric characteristics of laser annealed nanocrystals is examined. Subsequently, Metal-Oxide-Semiconductor (MOS) structures containing laser-made nanocrystals are fabricated and the function of these structures as memory devices is investigated. The development of nanocrystals is a key step in the construction of electron devices that are likely to form the basis of nanoelectronics technology in the future.

This non-volatile memory is based on the principle operation of floating gate (FG) memory. The FG memory consists of the floating gate (e.g. poly-Si, metal), a relatively thick oxide layer of high dielectric constant (control oxide), the floating gate and a thin layer of silicon dioxide (tunnel oxide) on n-Si/p-Si. In the MOS memory with metal nanocrystals, nanocrystals are incorporated in the interface of the control oxide and the tunnel oxide, with the double layer of oxides creating a strong electric field in the tunnel oxide, thereby decreasing the operating voltage. Another advantage of structures with metal nanocrystals is that a wide variety of metals can be used. Metals have wide range of work functions which allow to alternate the depth of the potential well, therefore the entrapment of charges within the nanocrystals. The hysteresis characteristics and the retention time are improved if metals with high work function are used.

The thesis presents the steps of memory fabrication. Dry oxidation of silicon produces SiO<sub>2</sub>. High dielectric constant oxides, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, are fabricated by RF Magnetron Sputtering and Atomic Layer Deposition methods, respectively. These layers are deposited at low temperature to prevent the diffusion of metal nanocrystals, as well as to avoid the effect of the development of these dielectric layers on the morphology initially achieved with the laser.

Memory devices have the following structure: n-Si (100)/SiO<sub>2</sub>/metal nanocrystals (NCs)/high dielectric constant oxide/metal-gate. Reference samples, that do not contain nanocrystals (MOS), were also fabricated to assure that the measured hysteresis and memory characteristics were due to the presence of nanocrystals. Their structural and electrical characteristics have been extensively studied in order to investigate the use of laser annealing as an effective method to produce memory devices based on metal NCs. In particular, laser annealing of the thin metal layer was performed with krypton fluoride (KrF) laser, with a wavelength of 248nm located in the deep ultraviolet, in order to obtain uniformly spaced NCs with an average diameter of ~17nm. The best results for Au NCs were obtained using fluence 200-500mJ/cm<sup>2</sup> and a small number of laser pulses (1-6). The structural characterization, using an SEM microscope and the electrical characterization with (C-V) and (I-V) measurements revealed a good charging/discharging behavior and a memory window of around 4V and 14V for structures with Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> barrier oxide, respectively. The analysis of the experimental data showed that LA is a very promising annealing technique to realize devices with electrical characteristics suitable for future memory devices.

The electrical and structural characterization of the studied structures proves that they actually function as memory devices, displaying large memory windows, as well as good results in the electrical charge retention and successive program-erase cycles. Compared to conventional memories, these structures have significant advantages stemming from the fact that their function

is based on the movement and storage within the nanocrystals of a very small number of electrical charges rather than hundreds as in conventional memory.

Chapter 1 of this thesis briefly describes the existing memory structures and describes the function of MOS structures with nanocrystals as memory devices. The advantages and disadvantages of these structures are also mentioned. Finally, the advantages of laser annealed metal nanocrystals over other manufacturing methods are emphasized.

Chapter 2 provides a detailed description of how the memory devices are fabricated, the experimental devices and the conditions used to develop both the nanocrystals and the MOS structures containing nanocrystals at the interface of oxides ( $\text{SiO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$  or  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ). There is also a detailed description of the thermal oxidation to produce a thin layer of  $\text{SiO}_2$ , as well as the deposition of  $\text{Y}_2\text{O}_3$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  layers.

Chapter 3 presents the structural characterization of nanocrystals as well as the structures that were manufactured. The structural characterization was performed using scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM). The size and density of nanocrystals are also correlated with the laser treatment conditions.

Chapter 4 describes in detail the electrical characterization of fabricated structures. The capacitance-voltage (C-V) and the conductance-voltage (G-V) characteristics are initially studied. The attributes obtained show the hysteresis effect, which proves that these structures function as memory devices. In addition, retention time, endurance and programming mechanism as well as the value of the gate voltage at which it is carried out are studied.

The important result of this work was the demonstration of an effective and well performed use of Laser Annealing in fabricating Au nanocrystals to be used as trapping centers in Si/SiO<sub>2</sub>/Au NCs/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> or Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Au or Al MOS structures. The use of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, a thinner starting layer for annealing (3nm), low fluence (300mJ/cm<sup>2</sup>) and 6 laser pulses gives optimal electrical characteristics and low leakage currents. The electrical characterization showed that Au NCs fabricated via Laser Annealing can be used in Flash memory devices providing good electrical characteristics due to the creation of high quality and high homogeneity metal NCs.

**SUBJECT AREA:** Non-Volatile Memories with embedded Metal Nanocrystals

**KEYWORDS:** Non-volatile memories, Metal nanocrystals, Laser annealing, Metal nanoparticles, Potential well.

## ΛΙΣΤΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ

### *Διεθνή περιοδικά*

- [1] L. Kastanis, J.L. Spear, Ch. Sargentis, N. Konofaos, D. Tsamakias, D.C. Koutsogeorgis, E.K. Evangelou, Memory performance of MOS structure embedded with laser annealed gold NCs, *Solid State Electronics* 148 (2018) 63–69

### *Διεθνή συνέδρια*

- [1] Laser fabricated nanocrystals for memory devices, Materials Research Society (2015 MRS Fall Meeting & Exhibit) 29 November - 4 December 2015, USA (Boston). L. Kastanis, J.L. Spear, A. Angelou, N. Kalfagiannis, Ch. Sargentis, D.C. Koutsogeorgis, E.K. Evangelou, D. Tsamakias.
- [2] Memory devices with laser fabricated nanocrystals, 6th International Conference on NANOstructures and nanomaterials SElf-Assembly – NANOSEA 2016, 3 - 8 July 2016, Italy (Giardini Naxos). L. Kastanis, J.L. Spear, A. Angelou, N. Kalfagiannis, Ch. Sargentis, D.C. Koutsogeorgis, E.K. Evangelou, D. Tsamakias.
- [3] Electrical and structural characterization of memory devices with laser fabricated nanocrystals, XXXII Panhellenic Conference on Solid State Physics & Materials Science, 18 - 21 September 2016, Greece (Ioannina). L. Kastanis, J.L. Spear, A. Angelou, N. Kalfagiannis, Ch. Sargentis, D.C. Koutsogeorgis, E.K. Evangelou, D. Tsamakias.
- [4] Memory performance of MOS structure embedded with laser annealed gold NCs, International Semiconductor Device Research Symposium - ISDRS 2016, 7 - 9 December 2016, USA (Maryland). L. Kastanis, Ch. Sargentis, N. Konofaos, E.K. Evangelou, D. Tsamakias, D.C. Koutsogeorgis.
- [5] MOS structured memory devices with embedded laser annealed metal nanocrystals, XXXIII Panhellenic Conference on Solid State Physics & Materials Science, 17 - 19 September 2018, Nicosia, Cyprus. L. Kastanis, Ch. Sargentis, D.C. Koutsogeorgis, E.K. Evangelou, D. Tsamakias.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....</b>	<b>19</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....</b>	<b>25</b>
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>29</b>
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	31
1.2 Αναπτυσσόμενες τεχνολογίες μη πτητικών μνημών .....	32
1.2.1 Μνήμες μη βασισμένες σε ηλεκτρόνια .....	33
1.2.2 Μνήμες βασισμένες σε ηλεκτρόνια .....	35
1.3 Μνήμες ημιαγωγών .....	39
1.3.1 Πτητικές μνήμες.....	40
1.3.2 Μη πτητικές μνήμες.....	41
1.3.3 Μνήμες μικρών διαστάσεων με νανοκρυστάλλους .....	45
1.3.4 Τρανζίστορ MNOS .....	47
1.3.5 Τρανζίστορ SONOS.....	48
1.4 Ιδανικός πυκνωτής MOS .....	49
1.5 Πυκνωτής Μετάλλου-Οξειδίου-Ημιαγωγού (MOS).....	52
1.5.1 Χαρακτηριστικές χωρητικότητας συναρτήσει της τάσης .....	60
1.5.2 Η διαφορά έργων εξόδου .....	63
1.5.3 Διεπιφανειακές παγίδες και φορτία οξειδίων.....	63
1.6 Μεταφορά φορτίου σε πυκνωτή MOS.....	66
1.6.1 Βασικοί τρόποι αγωγής σε μονωτές.....	67
1.6.2 Δηλεκτρική κατάρρευση.....	69
1.7 Φαινόμενα αποκλεισμού Coulomb, κβαντικός περιορισμός και εφαρμογές .....	69
1.8 Μνήμες με NCs πυριτίου.....	72
<b>2. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΜΩΝ .....</b>	<b>77</b>
2.1 Εισαγωγή.....	77
2.2 Πειραματική ανάπτυξη των δομών.....	77
2.2.1 Καθαρισμός του δισκιδίου Si.....	79
2.2.2 Ανάπτυξη λεπτού οξειδίου με θερμική οξείδωση .....	79
2.2.3 Ανάπτυξη μεταλλικών νανοκρυστάλλων μέσω ανόπτησης με laser.....	80
2.2.4 Εναπόθεση οξειδίου φραγής .....	84
<b>3. ΔΟΜΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣΘΕΙΣΩΝ ΔΟΜΩΝ .....</b>	<b>91</b>
3.1 Εισαγωγή.....	91
3.2 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM/EDS) .....	91
3.3 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Διέλευσης (TEM) .....	92
3.3.1 Διεργασίες σε δείγματα όπου θα γίνει παρατήρηση εικόνων κάθετης τομής .....	93
3.4 Δομικός χαρακτηρισμός δομών μνήμης με μεταλλικούς νανοκρυστάλλους.....	94
3.4.1 Επιρροή των παραμέτρων ανάπτυξης νανοκρυστάλλων στη δομή με οξείδιο φραγής το $Y_2O_3$ .....	94

3.4.2	Επιρροή των παραμέτρων ανάπτυξης ναοκρυστάλλων στη δομή με οξείδιο φραγής το $Al_2O_3$ .....	101
3.4.3	Συμπεράσματα από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων για τα δυο οξείδια .....	110
<b>3.5</b>	<b>Μελέτη με μικροσκόπιο διέλευσης ηλεκτρονίων (TEM).....</b>	<b>110</b>
<b>3.6</b>	<b>Φασματοσκοπία Οπτικής Αντανάκλασεως.....</b>	<b>112</b>
3.6.1	Η επίδραση του μεγέθους στις οπτικές ιδιότητες .....	112
<b>3.7</b>	<b>Συμπεράσματα επιρροής συνθηκών ανάπτυξης στα χαρακτηριστικά των ναοκρυστάλλων .....</b>	<b>115</b>
<b>4.</b>	<b>ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣΘΕΙΣΩΝ ΔΟΜΩΝ.....</b>	<b>117</b>
<b>4.1</b>	<b>Εισαγωγή .....</b>	<b>117</b>
<b>4.2</b>	<b>Όργανα ηλεκτρικού χαρακτηρισμού .....</b>	<b>117</b>
<b>4.3</b>	<b>Μέθοδοι μετρήσεων .....</b>	<b>118</b>
I)	Μετρήσεις αντοχής των κυψελίδων μνήμης με ναοκρυστάλλους.....	118
II)	Μετρήσεις συγκράτησης φορτίου των κυψελίδων μνήμης με ναοκρυστάλλους .....	120
III)	Μετρήσεις C-V, G-V και I-V των δομών μνήμης .....	120
<b>4.4</b>	<b>Μετρήσεις C-V, G-V και I-V των δομών μνήμης.....</b>	<b>122</b>
4.4.1	Με οξείδιο φραγής το $Y_2O_3$ .....	122
4.4.2	Με οξείδιο φραγής το $Al_2O_3$ .....	134
4.4.3	Συμπεράσματα από τις μετρήσεις χωρητικότητας-τάσης για μνήμες με οξείδιο φραγής το $Y_2O_3$ και το $Al_2O_3$ 148	
<b>4.5</b>	<b>Μέτρηση συγκράτησης φορτίου μνημών.....</b>	<b>149</b>
4.5.1	Εισαγωγή .....	149
4.5.2	Πειραματικά αποτελέσματα διατήρησης του αποθηκευμένου φορτίου σε μνήμες με ναοκρυστάλλους χρυσού με οξείδιο φραγής $Y_2O_3$ .....	149
4.5.3	Πειραματικά αποτελέσματα διατήρησης του αποθηκευμένου φορτίου, σε μνήμες με ναοκρυστάλλους χρυσού, με οξείδιο φραγής $Al_2O_3$ .....	152
4.5.4	Συμπεράσματα από τις μετρήσεις συγκράτησης φορτίου, για μνήμες με οξείδιο φραγής το $Y_2O_3$ και το $Al_2O_3$ 154	
<b>4.6</b>	<b>Ταχύτητα εγγραφής και διαγράψης.....</b>	<b>154</b>
<b>4.7</b>	<b>Μελέτη διηλεκτρικών ιδιοτήτων.....</b>	<b>155</b>
4.7.1	Μελέτη διηλεκτρικών ιδιοτήτων στρώματος $Y_2O_3$ .....	155
4.7.2	Μελέτη διηλεκτρικών ιδιοτήτων στρώματος $Al_2O_3$ .....	157
4.7.3	Συμπεράσματα από τη μελέτη των διηλεκτρικών ιδιοτήτων στρωμάτων $Y_2O_3$ και $Al_2O_3$ .....	159
<b>4.8</b>	<b>Υπολογισμός παγίδων διεπαφής .....</b>	<b>159</b>
4.8.1	Υπολογισμός παγίδων διεπαφής με οξείδιο φραγής $Y_2O_3$ .....	159
4.8.2	Υπολογισμός παγίδων διεπαφής με οξείδιο φραγής $Al_2O_3$ .....	160
4.8.3	Συμπεράσματα από την μελέτη των παγίδων διεπαφής με οξείδιο φραγής το $Y_2O_3$ και το $Al_2O_3$ .....	161
<b>4.9</b>	<b>Μέτρηση αντοχής μνημών σε κύκλους φόρτισης διάταξης με οξείδιο φραγής <math>Y_2O_3</math>.....</b>	<b>162</b>
<b>4.10</b>	<b>Συμπεράσματα ηλεκτρικού χαρακτηρισμού .....</b>	<b>162</b>
<b>5.</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ .....</b>	<b>165</b>
	<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΩΝ.....</b>	<b>167</b>
	<b>ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....</b>	<b>169</b>



<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.....</b>	<b>171</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ.....</b>	<b>173</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ.....</b>	<b>175</b>
<b>ΦΥΣΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ .....</b>	<b>177</b>
<b>ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....</b>	<b>179</b>



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση σύγχρονης τεχνολογικής κατάστασης μη πτητικών μνημών, που βασίζονται ή δε βασίζονται στα ηλεκτρόνια.....	33
Εικόνα 2: Πλάγια όψη μνήμης RRAM αριστερά των Intel/Micron 3D XPoint™ (πηγή Micron Technology) και δεξιά της Crossbar (πηγή Crossbar).....	33
Εικόνα 3: Σχηματική αναπαράσταση των χαρακτηριστικών μεγεθών ενός FinFET (πηγή Semiconductor Engineering).....	37
Εικόνα 4: Διάγραμμα του αριθμού των τρανζίστορ ανά επιφάνεια συναρτήσει της χρονιάς εμφάνισης, όπου παρουσιάζονται οι περιοχές κλίμακας της αναπτυσσόμενης τεχνολογίας CMOS [39].....	37
Εικόνα 5: Διάγραμμα του αριθμού των τρανζίστορ MOS για τους μικροεπεξεργαστές (λογαριθμικής κλίμακας) συναρτήσει της χρονιάς εμφάνισης.....	38
Εικόνα 6: Κατηγοριοποίηση των κυριότερων μνημών.....	39
Εικόνα 7: Παραλλαγές μη πτητικών διατάξεων μνήμης: Διατάξεις πλωτής πύλης όπως (α) τρανζίστορ FAMOS και (b) τρανζίστορ πλωτής πύλης. Διατάξεις παγίδευσης φορτίου όπως (c) Τρανζίστορ MNOS και (d) τρανζίστορ SONOS.....	41
Εικόνα 8: Δομή MOSFET.....	44
Εικόνα 9: Κυψελίδα μνήμης Flash στη κατάσταση 1.....	44
Εικόνα 10: Κυψελίδα μνήμης Flash στη κατάσταση 0.....	45
Εικόνα 11: Εικόνα κυψελίδας μνήμης ενός ηλεκτρονίου.....	46
Εικόνα 12: Κυψελίδα μνήμης με νανοκρυστάλλους στη κατάσταση 0.....	46
Εικόνα 13: Ενεργειακό διάγραμμά κατά την εγγραφή και διαγραφή μνήμης με νανοκρυστάλλους.....	46
Εικόνα 14: Αναπαράσταση του τρόπου εγγραφής, διαγραφής και ανάγνωσης με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις τάσης-ρεύματος.....	47
Εικόνα 15: Επανεγγραφή της μνήμης MNOS. (α) Προγραμματισμός: τα ηλεκτρόνια με σήραγγα μεταφέρονται και παγιδεύονται στο νιτρίδιο μέσω του οξειδίου. (b) Διαγραφή: οι οπές με σήραγγα μεταφέρονται μέσω του οξειδίου για να εξουδετερώσουν τα παγιδευμένα ηλεκτρόνια και μεταφορά με σήραγγα των παγιδευμένων ηλεκτρονίων [49].....	48
Εικόνα 16: Διατομή πυκνωτή MOS.....	49
Εικόνα 17: Διάγραμμα ενεργειακής ζώνης ενός ιδανικού πυκνωτή MOS ημιαγωγού τύπου p σε $V=0$ .....	49
Εικόνα 18: Διαγράμματα ενεργειακών ζωνών και κατανομές φορτίου ενός ιδανικού πυκνωτή MOS στις περιπτώσεις (α) συσσώρευσης (accumulation), (b) απογύμνωσης (depletion) και (c) αντιστροφής (inversion) [49].....	51
Εικόνα 19: Ισοδύναμα κυκλώματα πυκνωτή MOS. (α) Όλες οι χωρητικότητες του πυριτίου περιλαμβάνονται στη $C_{Si}$ , (b) Η $C_{Si}$ χωρίζεται σε χωρητικότητα απογύμνωσης $C_d$ και χωρητικότητα αντιστροφής $C_i$ . Η χωρητικότητα απογύμνωσης προέρχεται από τους φορείς πλειονότητας, οι οποίοι μπορούν να ανταποκρίνονται σε σήματα υψηλής συχνότητας και χαμηλής συχνότητας. Η χωρητικότητα αντιστροφής προκύπτει από τους φορείς μειονότητας, οι οποίοι μπορούν να ανταποκριθούν μόνο σε σήματα χαμηλής συχνότητας. Η διακεκομμένη γραμμή στο (β) είναι παρατηρήσιμη μόνο σε χαμηλές συχνότητες, όπου οι φορείς μειονότητας μπορούν να ανταποκριθούν.....	56
Εικόνα 20: Διαγράμματα ενεργειακών ζωνών για ιδανικούς πυκνωτές MOS υπό διαφορετικές συνθήκες πόλωσης: (α) συσσώρευση, (β) επίπεδη ζώνη, (γ) απογύμνωση και (δ) αντιστροφή. .	59
Εικόνα 21: Διαγράμματα ενεργειακών ζωνών ιδανικού πυκνωτή MOS.....	60
Εικόνα 22: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας όπου φαίνονται οι περιοχές ασθενούς συσσώρευσης, ισχυρής συσσώρευσης, απογύμνωσης, ασθενούς αντιστροφής και ισχυρής αντιστροφής.....	61

Εικόνα 23: Γραφικές παραστάσεις τάσης-χωρητικότητας υψηλής και χαμηλής συχνότητας. Αριστερά για υπόστρωμα τύπου p και δεξιά για υπόστρωμα τύπου n. ....	62
Εικόνα 24: Γραφική παράσταση χωρητικότητας συναρτήσει της τάσης διάταξης MOS. Η τάση εφαρμόζεται στο μέταλλο όπου το υπόστρωμα είναι ημιαγωγός τύπου p. Αναπαριστάτε η μεταβολή της καμπύλης, με την αλλαγή της συχνότητας, από χαμηλή συχνότητα σε ενδιάμεση συχνότητα και σε υψηλή συχνότητα [49]. ....	62
Εικόνα 25 (a) Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών, ενός απομονωμένου μετάλλου και ενός απομονωμένου ημιαγωγού με ένα στρώμα οξειδίου μεταξύ τους. (b) Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών ενός πυκνωτή MOS σε θερμική ισορροπία [49]. ....	63
Εικόνα 26: Παγίδες φορτίων [49]. ....	64
Εικόνα 27: Οποιαδήποτε διεπιφανειακή παγίδα φορτίου αποτελείται, τόσο από καταστάσεις αποδέκτη όσο και από καταστάσεις δότη. Μπορεί να ερμηνευθεί με μια ισοδύναμη κατανομή με ένα ουδέτερο επίπεδο $E_0$ πάνω από το οποίο οι καταστάσεις είναι τύπου δέκτη και κάτω από το οποίο είναι τύπου του δότη. Όταν η $E_F$ είναι πάνω (κάτω) από την $E_0$ , το καθαρό φορτίο είναι - (+) ....	65
Εικόνα 28: Στη γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας παρουσιάζονται: (a) Η χαρακτηριστική C-V ενός ιδανικού πυκνωτή MOS τύπου p. (b) Παράλληλη μετατόπιση κατά μήκος του άξονα τάσης, λόγω των θετικών σταθερών φορτίων στο οξείδιο. (c) Μη παράλληλη μετατόπιση κατά μήκος του άξονα τάσης, λόγω διεπιφανειακών παγίδων φορτίου [49]. ....	66
Εικόνα 29: Διαγράμματα ενεργειακών ζωνών που παρουσιάζουν μηχανισμούς αγωγιμότητας (a) άμεσης σήραγγας (direct tunneling), (b) σήραγγας Fowler-Nordheim, (c) θερμιονική εκπομπή και (d) εκπομπή Frenkel-Poole. ....	67
Εικόνα 30: Γραφική παράσταση πυκνότητα ρεύματος συνάρτηση του 1000/θερμοκρασία σε Κέλβιν, για στρώματα $Si_3N_4$ , $Al_2O_3$ , και $SiO_2$ [49]. ....	68
Εικόνα 31: θεωρία διήθησης: κατάρρευση συμβαίνει όταν τυχαία ελαττώματα σχηματίζουν μια αλυσίδα μεταξύ της πύλης και του ημιαγωγού. ....	69
Εικόνα 32: Σχηματική αναπαράσταση τρανζίστορ ενός ηλεκτρονίου. ....	70
Εικόνα 33: Σχέδιο τρανζίστορ ενός ηλεκτρονίου. ....	70
Εικόνα 34: Παραδείγματα διεργασιών συνδυασμένης σήραγγας (a) ανελαστική συν-σήραγγα: η μεταφορά ενός ηλεκτρονίου μεταξύ των κορυφών, αφήνει πίσω ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής στην κβαντική τελεία, (b) ελαστική συν-σηράγγων, (c) ελαστική συν-σήραγγα με αντιστροφή του spin. ....	71
Εικόνα 35: Το διάγραμμα ενεργειακών ζωνών για μεταλλικούς νανοκρυστάλλους, που είναι ενσωματωμένοι μεταξύ του οξειδίου ελέγχου και του οξειδίου σήραγγας, κατά τη διάρκεια (αριστερά) εγγραφής και (δεξιά) συγκράτησης. ....	75
Εικόνα 36: Ενεργειακοί φραγμοί στην περίπτωση ενός μεταλλικού νανοκρυστάλλου με υψηλότερο έργο εξόδου από το πυρίτιο (περιοχή καναλιού). ....	75
Εικόνα 37: Δομή μνήμης MOS. ....	79
Εικόνα 38: Φωτογραφία laser διέγερσης που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή νανοκρυστάλλων. ....	81
Εικόνα 39: Σχηματική διάταξη του χρησιμοποιούμενου συστήματος ανόπτησης με KrF laser διέγερσης. ....	81
Εικόνα 40: Ανόπτηση με laser, όπου φαίνεται η διαδικασία κατασκευής νανοκρυστάλλων. ....	82
Εικόνα 41: Δείγμα μετά την εναπόθεση μετάλλου. Αριστερά το μισό είναι στρώμα αργύρου και το άλλο μισό στρώμα χρυσού, στο κάτω μέρος δεν έχει μέταλλο, για να κατασκευαστούν δείγματα αναφοράς. ....	82
Εικόνα 42: Δείγμα μετά από την ανόπτηση με laser. ....	83
Εικόνα 43: Δείγμα LKSW07, στο οποίο φαίνονται τα χαρακτηριστικά κατασκευής των μνημών. ....	83
Εικόνα 44: Αρχή λειτουργίας RF-sputtering (πηγές: αριστερά AdNaNoTek, δεξιά ALCA TECHNOLOGY). ....	85

Εικόνα 45: Φωτογραφίες a) του συστήματος ιοντοβολής, b) των ηλεκτρονικών: 1. Τροφοδοσία ραδιοσυχνότητας 2. Μετρητής πίεσης θαλάμου εναπόθεσης BARATRON (mTorr), 3. Οθόνη παρακολούθησης πάχους, 4. Μετρητής πίεσης θαλάμου εναπόθεσης BALZER TPG 300 (mbar), 5. Ρύθμιση ταχύτητας περιστροφικής περιστρεφόμενου υπόβαθρου συγκράτησης δειγμάτων, 6. τροφοδοσία laser παρακολούθησης της εξέλιξης της εναπόθεσης, 7, 8. Θέρμανση δείγματος. ..	86
Εικόνα 46: Δείγμα μετά από την εναπόθεση διηλεκτρικού στρώματος υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς, στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι $Y_2O_3$ . .....	86
Εικόνα 47: ALD που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή οξειδίου φραγής $Al_2O_3$ . .....	87
Εικόνα 48: Διάτρητη μεταλλική μάσκα για την κατασκευή της πύλης στις δομές. ....	88
Εικόνα 49: Τελικό δείγμα όπου έχουν κατασκευαστεί όλες οι επαφές. ....	89
Εικόνα 50: Φωτογραφία εξαχνωτή. ....	89
Εικόνα 51: Δείγμα μετά την εναπόθεση αλουμινίου για τη δημιουργία πίσω επαφής. ....	90
Εικόνα 52: Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης εκπομπής πεδίου, που χρησιμοποιείται για το δομικό χαρακτηρισμό των νανοκρυστάλλων. ....	92
Εικόνα 53: Εικόνα του μικροσκοπίου διέλευσης ηλεκτρονίων (TEM) τύπου Philips CM20, το οποίο χρησιμοποιείται για το δομικό χαρακτηρισμό των παρασκευασθεισών δομών. Με το συγκεκριμένο μικροσκόπιο έγινε παρατήρηση κάθετης τομής στοιχείου μνήμης, καθώς επίσης και παρατήρηση του τρόπου με τον οποίο είναι διατεταγμένα στον χώρο, τα διάφορα στρώματα των παρασκευασθεισών δομών. ....	93
Εικόνα 54: Εικόνες SEM από κατασκευή νανοκρυστάλλων από ανόπτηση με laser, μεταβάλλοντας την ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και τον αριθμό των παλμών του laser. ....	97
Εικόνα 55: Εικόνα SEM (a) στρώματος χρυσού όπως εναποτίθεται και μετά από ανόπτηση με laser του μεταλλικού στρώματος χρυσού όπου κατασκευάζονται και διαμορφώνονται νανοκρύσταλλοι στα $500mJ/cm^2$ με (b) έναν παλμό, (c) πέντε παλμούς και (d) δέκα παλμούς. .	98
Εικόνα 56: Ραβδόγραμμα των σχηματισμένων νανοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας laser φθοριούχου κρυπτού (KrF) με ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας $500mJ/cm^2$ με (a) 1 παλμό, (b) 5 παλμούς και (c) 10 παλμούς. Οι προσαρμοσμένες γραμμές είναι οδηγοί μόνο οπτικά. ....	100
Εικόνα 57: Εικόνες SEM από κατασκευή νανοκρυστάλλων από ανόπτηση με laser στρώματος χρυσού 3.18nm, μεταβάλλοντας την ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και τον αριθμό των παλμών του laser. ....	102
Εικόνα 58: Εικόνες SEM από κατασκευή νανοκρυστάλλων από ανόπτηση με laser στρώματος χρυσού 13.57nm, μεταβάλλοντας την ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και τον αριθμό των παλμών του laser. ....	103
Εικόνα 59: Ραβδόγραμμα των σχηματισμένων νανοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας laser φθοριούχου κρυπτού (KrF). Οι προσαρμοσμένη γραμμή είναι οδηγός μόνο οπτικά. Το αρχικό πάχος χρυσού προς ανόπτηση είναι 3.18nm. ....	106
Εικόνα 60: Ραβδόγραμμα των σχηματισμένων νανοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας laser φθοριούχου κρυπτού (KrF). Οι προσαρμοσμένη γραμμή είναι οδηγός μόνο οπτικά. Το αρχικό πάχος χρυσού προς ανόπτηση είναι 3.18nm. ....	106
Εικόνα 61: Ραβδόγραμμα των σχηματισμένων νανοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας laser φθοριούχου κρυπτού (KrF). Οι προσαρμοσμένη γραμμή είναι οδηγός μόνο οπτικά. Το αρχικό πάχος χρυσού προς ανόπτηση είναι 3.18nm. ....	107
Εικόνα 62: Ραβδόγραμμα των σχηματισμένων νανοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας laser φθοριούχου κρυπτού (KrF). Οι προσαρμοσμένη γραμμή είναι οδηγός μόνο οπτικά. Το αρχικό πάχος χρυσού προς ανόπτηση είναι 3.18nm. ....	107
Εικόνα 63: Ραβδόγραμμα των σχηματισμένων νανοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας laser φθοριούχου κρυπτού (KrF). Οι προσαρμοσμένη γραμμή είναι οδηγός μόνο οπτικά. Το αρχικό πάχος χρυσού προς ανόπτηση είναι 3.18nm. ....	108

Εικόνα 64: Ραβδόγραμμα των σχηματισμένων νανοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας laser φθοριούχου κρυπτού (KrF). Οι προσαρμοσμένη γραμμή είναι οδηγός μόνο οπτικά. Το αρχικό πάχος χρυσού προς ανόπτηση είναι 3.18nm. ....	108
Εικόνα 65: Ραβδόγραμμα των σχηματισμένων νανοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας laser φθοριούχου κρυπτού (KrF). Οι προσαρμοσμένη γραμμή είναι οδηγός μόνο οπτικά. Το αρχικό πάχος χρυσού προς ανόπτηση είναι 3.18nm. ....	109
Εικόνα 66: Ραβδόγραμμα των σχηματισμένων νανοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας laser φθοριούχου κρυπτού (KrF). Οι προσαρμοσμένη γραμμή είναι οδηγός μόνο οπτικά. Το αρχικό πάχος χρυσού προς ανόπτηση είναι 13.57nm. ....	109
Εικόνα 67: Ραβδόγραμμα των σχηματισμένων νανοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας laser φθοριούχου κρυπτού (KrF). Οι προσαρμοσμένη γραμμή είναι οδηγός μόνο οπτικά. Το αρχικό πάχος χρυσού προς ανόπτηση είναι 13.57nm. ....	110
Εικόνα 68: Εικόνες TEM πλάγιας όψης δείγματος μνήμης με νανοκρυστάλλους. ....	111
Εικόνα 69: Γραφική παράσταση ανακλαστικότητας συναρτήσει του μήκους κύματος για ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας 350mJ/cm <sup>2</sup> . ....	113
Εικόνα 70: Γραφική παράσταση ανακλαστικότητας συναρτήσει του μήκους κύματος για ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας 500mJ/cm <sup>2</sup> . ....	113
Εικόνα 71: Γραφική παράσταση ανακλαστικότητας συναρτήσει του μήκους κύματος για ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας 650mJ/cm <sup>2</sup> . ....	114
Εικόνα 72: Γραφική παράσταση ανακλαστικότητας συναρτήσει του μήκους κύματος για ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας 800mJ/cm <sup>2</sup> . ....	114
Εικόνα 73: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας δοκιμής αντοχής με εφαρμογή επαναλαμβανόμενων κύκλων προγραμματισμού/διαγραφής (P/E), για μέτρηση προγραμματισμού. ....	119
Εικόνα 74: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας δοκιμής αντοχής με εφαρμογή επαναλαμβανόμενων κύκλων διαγραφής/προγραμματισμού (E/P), για μέτρηση διαγραφής. ...	119
Εικόνα 75: Φωτογραφία των μετρητικών οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν για τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των δομών μνήμης. ....	121
Εικόνα 76: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας σε υψηλή συχνότητα, ιδανικού MOS (αριστερά) και μνήμη δομής MOS (δεξιά) όταν το υπόστρωμα είναι τύπου n. ....	121
Εικόνα 77: Δομή κυψελίδας μνήμης με νανοκρυστάλλους. ....	123
Εικόνα 78: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser με ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας 500mJ/cm <sup>2</sup> και 3 παλμούς. ....	124
Εικόνα 79: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας δείγματος MOS χωρίς νανοκρυστάλλους χρυσού. ....	124
Εικόνα 80: Γραφική παράσταση ηλεκτρικής τάσης-αγωγιμότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	125
Εικόνα 81: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	126
Εικόνα 82: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	126
Εικόνα 83: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	127
Εικόνα 84: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	127
Εικόνα 85: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	128
Εικόνα 86: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	128
Εικόνα 87: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	129

Εικόνα 88: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	129
Εικόνα 89: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	130
Εικόνα 90: Γραφική παράσταση ηλεκτρικής τάσης-αγωγιμότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	130
Εικόνα 91: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	131
Εικόνα 92: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	131
Εικόνα 93: Γραφική παράσταση τάσης-ρεύματος της διάταξης MOS με και χωρίς ναοκρυστάλλους χρυσού. ....	133
Εικόνα 94: Γραφικές παραστάσεις παραθύρου μνήμης συναρτήσεως του αριθμού των παλμών laser σε σταθερή ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας, αριστερά σε $500\text{mJ}/\text{cm}^2$ και δεξιά σε $600\text{mJ}/\text{cm}^2$ , για ανόπτηση στρώματος Au αρχικού πάχους $5\text{nm}$ . ....	133
Εικόνα 95: Δομή κυψελίδας μνήμης με ναοκρυστάλλους με οξειδίο φραγής $\text{Al}_2\text{O}_3$ . ....	134
Εικόνα 96: Γραφική παράσταση παραθύρου μνήμης συναρτήσεως του αριθμού παλμών για διαφορετική ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας για ανόπτηση στρώματος Au αρχικού πάχους $3.18\text{nm}$ . ....	134
Εικόνα 97: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser με ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας κάθε παλμού $300\text{mJ}/\text{cm}^2$ και 6 παλμούς. ....	135
Εικόνα 98: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας δείγματος MOS χωρίς ναοκρυστάλλους χρυσού. ....	136
Εικόνα 99: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	137
Εικόνα 100: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF. ....	138
Εικόνα 101: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	138
Εικόνα 102: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	139
Εικόνα 103: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	139
Εικόνα 104: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	140
Εικόνα 105: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	140
Εικόνα 106: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	141
Εικόνα 107: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	141
Εικόνα 108: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	142
Εικόνα 109: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	142
Εικόνα 110: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	143
Εικόνα 111: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	143
Εικόνα 112: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	144

Εικόνα 113: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	144
Εικόνα 114: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	145
Εικόνα 115: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	145
Εικόνα 116: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	146
Εικόνα 117: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	146
Εικόνα 118: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	147
Εικόνα 119: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser. ....	147
Εικόνα 120: Γραφική παράσταση χρόνου- $\Delta V_{fb}$ . Όπου φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες συγκράτησης φορτίου για διάταξη MOS που περιέχει ναοκρυστάλλους χρυσού, μετά από την ανόπτηση με laser με ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας $500\text{mJ}/\text{cm}^2$ και 3 παλμούς. ....	150
Εικόνα 121: Γραφική παράσταση χρόνου- $\Delta V_{fb}$ . Όπου φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες συγκράτησης φορτίου για διάταξη MOS, που περιέχει ναοκρυστάλλους χρυσού, μετά από ανόπτηση με laser, με ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας $300\text{mJ}/\text{cm}^2$ και 6 παλμούς. ....	153
Εικόνα 122: Γραφική παράσταση χρόνου-τάσης επίπεδης ζώνης για τον προσδιορισμό της απόκριση της δομής μνήμης σε παλμούς Εγγραφής (Διαγραφής) $+4.0\text{ V}$ ( $-4.0\text{ V}$ ). ....	155
Εικόνα 123: Γραφική παράσταση κύκλων προγραμματισμού/διαγραφής-παραθύρου μνήμης, για τον προσδιορισμό της αντοχής της μνήμης. ....	162



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Συγκριτικός πίνακας της πυκνότητας εγγραφής δεδομένων, της ταχύτητας και της πτητικότητας μνημών SRAM, DRAM, FLASH και μαγνητικών δίσκων. ....	39
Πίνακας 2: Στον πίνακα φαίνονται τα έργα εξόδου διαφόρων μετάλλων, καθώς και οι τιμές του ενεργειακού διακένου ημιαγωγών και οξειδίων υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς K, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή δομών MOS με NCs. ....	75
Πίνακας 3: Πίνακας παρασκευασθέντων δειγμάτων. ....	78
Πίνακας 4: Συνθήκες κατασκευής και χαρακτηριστικά ναοκρυστάλλων. ....	96
Πίνακας 5: Στατιστική ανάλυση των ναοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάστηκαν με ανόπτηση laser ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας $500\text{mJcm}^{-2}$ και διαφορετικό αριθμό παλμών laser. ....	99
Πίνακας 6: Παρουσίαση του χρόνου εναπόθεσης και του πάχους Au που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή ναοκρυστάλλων με σκοπό στη συνέχεια να γίνει έλεγχος της επιρροής του αρχικού στρώματος μετάλλου στα χαρακτηριστικά των ναοκρυστάλλων, που χρησιμοποιήθηκαν σε μνήμες με οξείδιο φραγής το $\text{Al}_2\text{O}_3$ . ....	101
Πίνακας 7: Στατιστική ανάλυση των ναοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάστηκαν με ανόπτηση laser, ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας από 250 έως $450\text{mJcm}^{-2}$ και διαφορετικό αριθμό παλμών laser από 1 έως 10 παλμούς, για την κατασκευή μνημών με οξείδιο φραγής το $\text{Al}_2\text{O}_3$ . ....	104
Πίνακας 8: Παράθυρα μνήμης δειγμάτων που κατασκευάστηκαν με αριθμό παλμών laser από 3 έως 15 και ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας κάθε παλμού από $500\text{mJ/cm}^2$ έως $600\text{mJ/cm}^2$ με οξείδιο φραγής το $\text{Y}_2\text{O}_3$ . ....	132
Πίνακας 9: Παράθυρα μνήμης δειγμάτων που κατασκευάστηκαν με αριθμό παλμών laser από 1 έως 6 και ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας κάθε παλμού από $225\text{mJ/cm}^2$ έως $450\text{mJ/cm}^2$ με οξείδιο φραγής το $\text{Al}_2\text{O}_3$ . ....	148
Πίνακας 10: Ορολογίες. ....	167
Πίνακας 11: Συντμήσεις – αρκτικόλεξα – ακρωνύμια. ....	169
Πίνακας 12: Βασικοί μηχανισμοί αγωγιμότητας σε μονωτές. ....	171
Πίνακας 13: Σύγκριση των χαρακτηριστικών των ναοκρυστάλλων (μέση διάμετρος, αριθμός ναοκρυστάλλων, διάμεσος, τυπική απόκλιση, επιφανειακή πυκνότητα), που κατασκευάζονται από διαφορετική ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και διαφορετικό αριθμό παλμών για το δείγμα LKSW07. ....	173
Πίνακας 14: Σύγκριση των χαρακτηριστικών των ναοκρυστάλλων (μέση διάμετρος, τυπική απόκλιση και %ομοιογένεια), σε σχέση με το αρχικό πάχος στρώματος χρυσού προς ανόπτηση, το πάχος του οξειδίου σήραγγας $\text{SiO}_2$ και το στρώμα οξειδίου φραγής ( $\text{SiO}_2$ ή $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), που κατασκευάζονται από διαφορετική ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και διαφορετικό αριθμό παλμών. ....	175
Πίνακας 15: Φυσικές σταθερές. ....	177



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Σχολή των «Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών» του Ε.Μ.Π. που μου έδωσε τη δυνατότητα να εκπονήσω την παρούσα Διδακτορική Διατριβή. Σημαντικό μέρος της διατριβής αυτής, πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο «Ηλεκτρονικών Υλικών και Νανοηλεκτρονικών Διατάξεων» της συγκεκριμένης σχολής.

Ευχαριστώ θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή Δ. Κουτσογεώργη, για την πολύ σημαντική συμβολή του στην κατασκευή δειγμάτων μνήμης, καθώς και την όλη συμβολή του στο εγχείρημα. Στο εργαστήριο του iSMART, στο Nottingham Trent University του Ηνωμένου Βασιλείου, κατασκευάστηκαν νανοκρύσταλλοι από λεπτό μεταλλικό στρώμα, με τη μέθοδο της ανόπτησης με laser. Τα τμήματα των δομών αναπτύχθηκαν με τις τεχνικές εναπόθεσης Sputtering και ALD. Τα υλικά που εναποτέθηκαν με αυτές τις τεχνικές ήταν, μέταλλα και διηλεκτρικά. Κατά την παραμονή μου στην Αγγλία με το πρόγραμμα ERASMUS<sup>+</sup> είχα βοήθεια για τη χρήση των οργάνων, από τον Υποψήφιο Διδάκτορα J.L. Spear και το Μεταδιδακτορικό Ερευνητή Ν. Καλφαγιάννη, που επίσης τους ευχαριστώ.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το «Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας» του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», για την δυνατότητα πραγματοποίησης στο Ινστιτούτο πειραμάτων, τα οποία αφορούσαν την ανάπτυξη των δομών, τον δομικό και τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των παραγόμενων δειγμάτων, της παρούσας διατριβής. Με το σύστημα ξηρής οξειδωσης αναπτύχθηκε λεπτό υμένιο διοξειδίου του πυριτίου. Δομικός χαρακτηρισμός πραγματοποιήθηκε με χρήση μικροσκοπίου διέλευσης ηλεκτρονίων-TEM και μικροσκοπίου σάρωσης ηλεκτρονίων-SEM. Ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός πραγματοποιήθηκε στο Probe Station.

Ευχαριστώ την οικογένειά μου και την Αγγελική, οι οποίοι μου συμπαραστάθηκαν και με στήριξαν σε αυτή τη δύσκολη προσπάθειά μου όλα αυτά τα χρόνια.

Ευχαριστώ τους επιβλέποντες μου, Ομότιμο Καθηγητή Δ. Τσαμάκη, τον Αναπληρωτή Καθηγητή Ε. Ευαγγέλου και τον Ομότιμο Καθηγητή Ι. Ξανθάκη, για τη συστηματική καθοδήγησή τους και την πολύτιμη βοήθειά τους όλα αυτά τα χρόνια.

Ευχαριστώ τον Μεταδιδακτορικό Ερευνητή Χ. Σαργέντη για την υποστήριξη και τη βοήθεια του καθ' όλη τη διάρκεια διεξαγωγής της Διδακτορικής Διατριβής, αναφορικά με τις μη πτητικές μνήμες με μεταλλικούς νανοκρυστάλλους.

Ευχαριστώ τον Κύριο Ερευνητή Π. Δημητράκη για την πολύτιμη βοήθεια του στην κατασκευή και το χαρακτηρισμό των δομών μνήμης, καθώς και για την καθοδήγηση του. Επίσης ευχαριστώ τον Ερευνητή Κ. Γιαννακόπουλο για την πολύτιμη βοήθειά του στο δομικό χαρακτηρισμό των δειγμάτων, καθώς και τον Ερευνητή Γ. Αποστολόπουλο για τις συμβουλές του αναφορικά με την επανεγκατάσταση του προγράμματος αυτοματισμού των μετρητικών οργάνων, με χρήση H/Y. Επίσης ευχαριστώ την Υποψήφιο Διδάκτορα Μ. Μακρυγιάννη, για τη συνεργασία μας στη συλλογή εικόνων με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης του τμήματος Φυσικής του ΕΜΠ, τον τεχνικό Κ. Κονιδάρη για τη βοήθειά του στη κατασκευή στήριξης των δειγμάτων στο Probe Station, που πραγματοποιήθηκαν οι ηλεκτρικές μετρήσεις των παρασκευασθεισών δειγμάτων, καθώς και τον μεταπτυχιακό φοιτητή Liam Miller για τη συμβολή του στην έρευνα.

Για την παρούσα Διδακτορική Διατριβή του ΕΜΠ μου χορηγήθηκε υποτροφία, ως Υποψήφιος Διδάκτορας, από τα διαθέσιμα του Ειδικού Λογαριασμού Κονδυλίων Έρευνας-ΕΛΚΕ.



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μνήμη Flash χρησιμοποιείται ευρέως σε σύγχρονες φορητές ηλεκτρικές διατάξεις, επιτρέποντας μεγάλες δυνατότητες αποθήκευσης σε δομές πολύ μικρής κλίμακας. Ο πυρήνας αυτών των μνημών αποτελείται από στοιχεία που περιέχουν διατάξεις πλωτής πύλης (floating gate), όπου φαινόμενα διαρροής καθώς και δομικά ελαττώματα, επιδεινώνουν την απόδοση των μνημών αυτών [1]. Για παράδειγμα, μειώνοντας την κλίμακα του στοιχείου μνήμης, οι συμβατικές μνήμες Flash πλωτής πύλης πολυκρυσταλλικού πυριτίου, αντιμετωπίζουν ένα σοβαρό πρόβλημα, όπου το λεπτότερο οξειδίο εκφυλίζει τα χαρακτηριστικά συγκράτησης φορτίου λόγω διαρροής ρεύματος, που οφείλεται στο φαινόμενο σήραγγας. Η χρήση νανοκρυστάλλων [2] στο εσωτερικό των οξειδίων στη θέση της πλωτής πύλης, έχει προταθεί ως μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος για την αύξηση της απόδοσης της διάταξης. Από τη στιγμή που προτάθηκε η πρώτη διάταξη νανοκρυστάλλων (NC) [3] τέτοιες διαμορφώσεις έχουν μελετηθεί εκτενώς ως υποψήφιες διατάξεις για τη μελλοντική γενιά μη πτητικών μνημών (NVM – Non-Volatile Memory). Μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τέτοιων διατάξεων είναι: Η ιοντοβολή (Sputtering) [4,5], η χημική εναπόθεση ατμών (CVD) [6] και η εναπόθεση ατομικού στρώματος (ALD) [7,8,9]. Ενώ η θερμική ανόπτηση, χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί καλή ομοιομορφία και πυκνότητα των σχηματισμένων νανοκρυστάλλων. Για την ανόπτηση χρησιμοποιούνται κυρίως, μέθοδοι ταχείας θερμικής ανόπτησης (RTA) [10], αλλά και μέθοδοι ανόπτησης με laser (LA) [11]. Η τελευταία είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική, διότι προσφέρει υψηλό βαθμό ελέγχου του σχηματισμού των μεταλλικών νανοκρυστάλλων, ενώ έχει πλεονεκτήματα στην ελαχιστοποίηση ατελειών στο οξειδίο ή στις διεπιφάνειες νανοκρυστάλλων-οξειδίου [11]. Επιπλέον, η ανόπτηση με laser μπορεί να παράγει μεταλλικούς νανοκρυστάλλους κάτω από την επιφάνεια του οξειδίου πύλης, παρέχοντας περαιτέρω ευελιξία και έλεγχο των ατελειών [12], τέλος είναι μια ταχεία μέθοδος κατασκευής.

Οι μεταλλικοί νανοκρυστάλλοι χρησιμοποιούνται συχνά επειδή προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα, όπως υψηλότερη απόδοση σε κύκλους εγγραφής-διαγραφής (Programming-Erasing – P-E), χαμηλότερη τάση λειτουργίας και μεγάλο εύρος στα έργα εξόδου [13,14], σε σύγκριση με τους νανοκρυστάλλους ημιαγωγών. Οι μεταλλικοί νανοκρυστάλλοι με μικρό έργο εξόδου, χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μνήμης υψηλής ταχύτητας εγγραφής-διαγραφής, ενώ μεταλλικοί νανοκρυστάλλοι με μεγάλο έργο εξόδου, χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μνήμης χαμηλότερης ταχύτητας εγγραφής-διαγραφής, με μεγαλύτερη χωρητικότητα φορτίων και υψηλότερο χρόνο συγκράτησης φορτίου [13]. Μεταλλικοί νανοκρυστάλλοι με μεγάλο έργο εξόδου, όπως η πλατίνα (Pt), το ασήμι (Ag) και ο χρυσός (Au) [14], είναι προτιμητέα υλικά, λόγω των βαθιών φρεατίων δυναμικού που δημιουργούν. Επιπλέον, έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα καταστάσεων γύρω από το επίπεδο Fermi, επομένως επηρεάζονται λιγότερο από την εισαγωγή ανεπιθύμητων προσμίξεων κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Η μεταβολή της ενέργειας Fermi σε μεταλλικούς νανοκρυστάλλους είναι αμελητέα, σε σύγκριση με το επίπεδο Fermi του αντίστοιχου bulk υλικού, ενώ οι νανοκρυστάλλοι ημιαγωγών παρουσιάζουν ένα διευρυμένο ενεργειακό χάσμα σε σχέση με τον αντίστοιχο κύριο ημιαγωγό. Ως εκ τούτου, η χρήση μεταλλικών νανοκρυστάλλων, εξακολουθεί να θεωρείται ως μια πολλά υποσχόμενη επιλογή, για τις μελλοντικές μη πτητικές μνήμες. Ωστόσο, η μετά την εναπόθεση κατεργασία ανόπτησης, είναι ακόμα ένα ανοιχτό ζήτημα και οι βέλτιστες συνθήκες για την ανόπτηση με laser, είναι ένα ενδιαφέρον θέμα, που χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση. Τα διαδοχικά στρώματα οξειδίων και νανοκρυστάλλων μπορούν να αυξήσουν την πυκνότητα νανοκρυστάλλων και να αυξήσουν τα παγιδευμένα ηλεκτρικά φορτία [15,16,17,18].

Οι κυψελίδες νανοκρυστάλλων θα μπορούσαν να είναι χρήσιμες για εφαρμογές μη πτητικής μνήμης, υψηλής πυκνότητας, δυο δυφίων (bit). Στη βιβλιογραφία [19,20] έχει παρατηρηθεί ότι μπορούν να σχηματιστούν ομοιόμορφοι νανοκρύσταλλοι πλατίνης, διαμέτρου κάτω από 2nm με Sputtering, ελέγχοντας τις συνθήκες εναπόθεσης. Επίσης, πολύ μικροί νανοκρύσταλλοι πυριτίου διαμέτρου 1nm [21], με μεγάλη ομοιομορφία, έχουν κατασκευαστεί με τη μέθοδο της ηλεκτροχημικής εγχάραξης του πυριτίου, όπου στη συνέχεια οι νανοκρύσταλλοι πυριτίου διαμέτρου 1nm διασπείρονται σε κολλοειδές διάλυμα.

Πλεονεκτήματα δομών μνήμης με νανοκρυστάλλους σε σύγκριση με “κλασικές” μνήμες.

- ❖ Η εγγραφή ή διαγραφή της πληροφορίας γίνεται με μετακίνηση μικρού αριθμού ηλεκτρονίων
- ❖ Καταναλώνουν μικρή ισχύ (μικρές τάσεις λειτουργίας)
- ❖ Έχουν πολύ μεγάλες ταχύτητες εγγραφής/διαγραφής
- ❖ Πολύ μεγάλη πυκνότητα εγγραφής
- ❖ Αυξημένη αξιοπιστία (το ηλεκτρικό φορτίο χάνεται μόνο από έναν νανοκρύσταλλο και όχι από ολόκληρο το στρώμα)

Οι ιδιότητες της μνήμης νανοκρυστάλλων επηρεάζονται από το μέγεθος, το σχήμα και τη διαμόρφωση των νανοκρυστάλλων. Οι νανοκρύσταλλοι σχηματίζονται με διακυμάνσεις, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη λειτουργία των μνημών. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οδικό Χάρτη Τεχνολογίας Ημιαγωγών (International Technology Roadmap for Semiconductors-ITRS 2009), το μέγεθος των κυψελίδων μνήμης, προβλέπεται να μειωθεί στα 1000nm<sup>2</sup> έως το 2020. Αυτό σημαίνει ότι μόνο δέκα νανοκρύσταλλοι μπορούν να περιέχονται σε κάθε κυψελίδα μνήμης. Σε τόσο μικρή κλίμακα, καθίσταται ολοένα και πιο δύσκολο οι νανοκρύσταλλοι να κατασκευαστούν με κατάλληλα υλικά, με ομοιόμορφο μέγεθος και σχήμα, όπως επίσης, να συγκροτηθούν σε καλά διατεταγμένες θέσεις.

Οι νανοκρύσταλλοι μικρού μεγέθους και υψηλής πυκνότητας, μπορούν να αποθηκεύσουν περισσότερα φορτία σε μια κυψελίδα μνήμης και να μετριάσουν την επίδραση των διακυμάνσεων, μεταξύ μεμονωμένων κυψελίδων. Ωστόσο, τα φορτία που αποθηκεύονται στους νανοκρυστάλλους, διαρρέουν ευκολότερα διαμέσου του περιβάλλοντος οξειδίου, σε συστήματα υψηλής πυκνότητας νανοκρυστάλλων. Εάν το περιβάλλον οξείδιο δεν μπορεί να απαγορεύσει αποτελεσματικά τη μεταφορά φορτίου μεταξύ νανοκρυστάλλων, η μνήμη νανοκρυστάλλων θα χάσει το πλεονέκτημα της ύπαρξης διακριτών κόμβων αποθήκευσης φορτίου. Δηλαδή, να αποτρέπει την απώλεια του συνολικού αποθηκευμένου φορτίου, μέσω μιας διαδρομής διαρροής, στο οξείδιο της σήραγγας. Ακόμα κι αν η παθητικοποίηση του περιβάλλοντος οξειδίου, μπορεί να μετριάσει τη μεταφορά φορτίου μεταξύ νανοκρυστάλλων, τελικά τα φορτία σε νανοκρυστάλλους θα διοχετεύονται απευθείας μέσω του λεπτού περιβάλλοντος οξειδίου, εάν η πυκνότητα νανοκρυστάλλων συνεχίσει να αυξάνεται.

Οι μεταλλικοί νανοκρύσταλλοι θεωρούνται οι πιο υποσχόμενοι για εμπορική παραγωγή, προκειμένου να επιτευχθούν ταυτόχρονα υψηλές ταχύτητες εγγραφής/διαγραφής και μεγάλοι χρόνοι συγκράτησης, χωρίς να θυσιάζονται άλλες ιδιότητες της μνήμης. Σε αυτή τη κατεύθυνση μελετάται η δημιουργία κατάλληλου φραγμού σήραγγας, η κατασκευή νανοκρυστάλλων πολλαπλών στρωμάτων, η επιλογή κατάλληλου έργου εξόδου (από το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί στους νανοκρυστάλλους) και η παθητικοποίηση του οξειδίου του περιβάλλοντος (μείωση όσο το δυνατόν των ατελειών). Ωστόσο, η μνήμη με νανοκρυστάλλους εξακολουθεί να αντιμετωπίζει

ορισμένες προκλήσεις κατά τη μείωση των διαστάσεων, όπως διακυμάνσεις από κυψελίδα σε κυψελίδα και διαρροή φορτίου σε υψηλή πυκνότητα. Είναι, επομένως, σημαντικός ο στρατηγικός σχεδιασμός μεθόδων κατασκευής στα όρια των διαστάσεων και με τις απαιτήσεις που έχει η βιομηχανία στις NVM.

Στην παρούσα εργασία, οι νανοκρύσταλλοι χρυσού (Au), που κατανέμονται ομοιόμορφα στη διεπιφάνεια μεταξύ ενός οξειδίου φραγής - άνω οξείδιο (40nm  $Y_2O_3$  ή 30-50nm  $Al_2O_3$ ) και ενός οξειδίου σήραγγας (3.5-3.7nm  $SiO_2$ ), κατασκευάζονται με ανόπτηση από laser λεπτού υμενίου χρυσού, το οποίο εναποτίθεται πάνω στο  $SiO_2$ . Στη διατριβή ερευνήθηκε το εύρος κατάλληλων συνθηκών στην ανόπτηση με laser για την κατασκευή νανοκρυστάλλων. Για την κατασκευή του οξειδίου του υτρίου ( $Y_2O_3$ ) και του οξειδίου του αργιλίου ( $Al_2O_3$ ), που αποτελούν στρώματα φραγής, χρησιμοποιήθηκε RF Magnetron Sputtering και Atomic Layer Deposition αντίστοιχα. Τέλος, χρυσός εναποτίθεται ως ηλεκτρόδιο πύλης για την ολοκλήρωση δομών MOS της μορφής n-Si/ $SiO_2$ /Au(NCs)/ $Y_2O_3$  ή  $Al_2O_3$ /Au. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο αλουμινίου ως πίσω επαφή του δισκίου πυριτίου. Στη συνέχεια, μελετήθηκαν τα ηλεκτρικά και δομικά χαρακτηριστικά των παραπάνω δομών.

Η παρούσα εργασία καλύπτει την απουσία, από τη βιβλιογραφία, μελέτης δομών μνήμης MOS με βάση το πυρίτιο, με μεταλλικούς νανοκρυστάλλους, ανεπτυγμένους με χρήση ακτινοβολίας laser.

## 1.1 Ιστορική αναδρομή

Η μνήμη τύπου Flash [22] είναι μια ηλεκτρονική μη πτητική μνήμη (στερεάς κατάστασης) αποθήκευσης δεδομένων υπολογιστή που μπορεί να διαγραφεί και να επαναπρογραμματιστεί ηλεκτρικά. Επινοήθηκε στην Toshiba το 1980, με βάση την τεχνολογία EEPROM (μνήμη ηλεκτρικά διαγράψιμη με δυνατότητα προγραμματισμού μόνο για ανάγνωση). Προέρχεται από την ανάπτυξη της τεχνολογίας των τρανζίστορ και κυρίως του MOSFET με πλωτή πύλη (FGMOS), γνωστό και ως τρανζίστορ πλωτής πύλης [22,23]. Το πρώτο τρανζίστορ MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor {Μετάλλο-Οξείδιο-Ημιαγωγός} Field-Effect Transistor {Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου}), γνωστό και ως τρανζίστορ MOS, επινοήθηκε από τον Αιγύπτιο μηχανικό Mohamed M. Atalla και τον Κορεάτη μηχανικό Dawon Kahng στα Bell Labs το 1959 [24]. Ο Kahng συνέχισε να αναπτύσσει μια παραλλαγή του, το MOSFET πλωτής πύλης, με τον Simon Min Sze στα Bell Labs το 1967. Ανακάλυψαν ότι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως κυψελίδα μνήμης πλωτής πύλης για την αποθήκευση πληροφοριών, που θα ήταν μια μορφή προγραμματιζόμενης μνήμης μόνο για ανάγνωση (PROM), η οποία είναι τόσο μη πτητική όσο και επαναπρογραμματιζόμενη.

Οι πρώτοι τύποι μνήμης πλωτής πύλης περιλάμβαναν, EPROM (διαγράψιμη PROM) και EEPROM (ηλεκτρικά διαγράψιμη PROM) στη δεκαετία του 1970. Ωστόσο, η πρώτη μνήμη πλωτής πύλης, απαιτούσε από τους μηχανικούς να κατασκευάσουν μια κυψελίδα μνήμης για κάθε bit δεδομένων, το οποίο αποδείχθηκε αργό και δαπανηρό, περιορίζοντας τη μνήμη πλωτής πύλης σε εξειδικευμένες εφαρμογές στη δεκαετία του 70, σε στρατιωτικό εξοπλισμό και σε πειραματικά κινητά τηλέφωνα.

Ο Fujio Masuoka, καθώς εργαζόταν για την Toshiba, πρότεινε έναν νέο τύπο μνήμης πλωτής πύλης που επέτρεψε την γρήγορη και εύκολη διαγραφή ολόκληρων τμημάτων μνήμης, με την εφαρμογή τάσης σε ένα μόνο καλώδιο συνδεδεμένο σε μια ομάδα κυψελίδων. Αυτό οδήγησε στην εφεύρεση της μνήμης Flash στη Toshiba από το Masuoka το 1980. Σύμφωνα με την Toshiba, το όνομα "Flash" προτάθηκε από τον συνάδελφο του Masuoka, Shōji Ariizumi, επειδή η διαδικασία διαγραφής της μνήμης του θύμιζε το Flash

μιας κάμερας. Ο Masuoka και οι συνάδελφοί του παρουσίασαν την εφεύρεση του NOR Flash το 1984, στη συνέχεια το NAND Flash στη Διεθνή Συνάντηση Ηλεκτρονικών Διατάξεων (IEDM) του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) το 1987 που διεξήχθη στο Σαν Φρανσίσκο. Η Toshiba κυκλοφόρησε εμπορικά τη μνήμη Flash NAND το 1987. Η εταιρεία Intel παρουσίασε το πρώτο εμπορικό τσιπ τύπου NOR το 1988. Οι δύο κύριοι τύποι μνήμης Flash ονομάζονται λογικές πύλες NAND και NOR. Οι μεμονωμένες κυψελίδες μνήμης Flash, αποτελούνται από MOSFETs πλωτών πυλών.

Η Toshiba εισήγαγε εμπορικά τη μνήμη Flash στην αγορά το 1987. Ενώ οι EPROM έπρεπε να διαγραφούν εντελώς πριν να ξαναγραφούν, η μνήμη Flash NAND μπορεί να διαγραφεί, να γραφτεί και να διαβαστεί σε μπλοκ τα οποία είναι γενικά πολύ μικρότερα από ολόκληρη τη διάταξη. Το Flash τύπου NOR επιτρέπει να γράφεται μια λέξη μηχανής (byte) - σε μια διαγραμμένη θέση - ή να διαβάζεται ανεξάρτητα. Μία διάταξη μνήμης Flash αποτελείται συνήθως από ένα ή περισσότερα τσιπ Flash μνήμης (κάθε ένα από τα οποία περιέχει πολλές κυψελίδες μνήμης Flash) μαζί με ένα χωριστό τσιπ ελεγκτή της μνήμης Flash.

Ο τύπος NAND βρίσκεται κυρίως σε κάρτες μνήμης, μονάδες Flash USB, μονάδες στερεάς κατάστασης-SSD (αυτές που έχουν παραχθεί το 2009 και αργότερα) και παρόμοια προϊόντα για γενική αποθήκευση και μεταφορά δεδομένων. Η μνήμη flash NAND ή NOR χρησιμοποιείται επίσης συχνά για την αποθήκευση δεδομένων σε πολλά ψηφιακά προϊόντα, μια εργασία που έγινε εφικτή μέσω της EEPROM ή της στατικής μνήμης RAM. Ένα βασικό μειονέκτημα της μνήμης Flash είναι, ότι μπορεί να αντέξει έναν σχετικά μικρό αριθμό κύκλων εγγραφής σε ένα συγκεκριμένο μπλοκ.

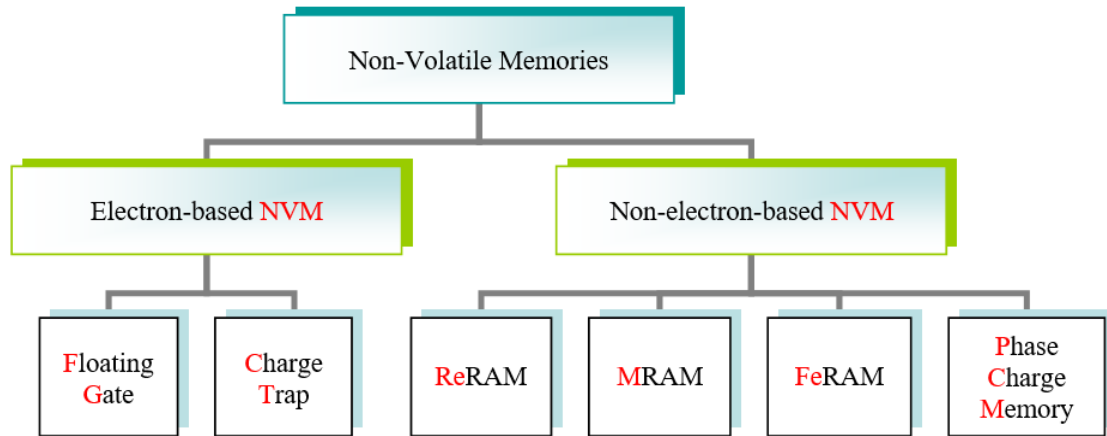
Παραδείγματα εφαρμογών της μνήμης Flash περιλαμβάνουν υπολογιστές, PDA, ψηφιακούς αναπαραγωγής ήχου, ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, κινητά τηλέφωνα, συνθεσάιζερ, βιντεοπαιχνίδια, επιστημονικά όργανα, βιομηχανική ρομποτική και ιατρική ηλεκτρονική. Εκτός από το γεγονός ότι είναι μη πτητική, η μνήμη Flash προσφέρει γρήγορους χρόνους πρόσβασης για ανάγνωση, αν και δεν είναι τόσο γρήγορη όσο η στατική μνήμη RAM ή ROM. Η αντοχή αυτών των μνημών σε μηχανικούς κραδασμούς, εξηγεί τη δημοτικότητά τους στους σκληρούς δίσκους σε φορητές συσκευές.

Παρόλο που η μνήμη Flash είναι τεχνικά ένας τύπος EEPROM, ο όρος "EEPROM" χρησιμοποιείται γενικά για συγκεκριμένες μη-Flash EEPROM που μπορούν να διαγραφούν κατά μικρά μπλοκ, τυπικά byte. Επειδή οι κύκλοι διαγραφής είναι αργοί, τα μεγάλου μεγέθους μπλοκ που χρησιμοποιούνται στη διαγραφή της μνήμης Flash, παρέχουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυξημένης ταχύτητας σε σχέση με τη μη-Flash EEPROM, όταν γράφονται μεγάλα ποσά δεδομένων. Από το 2019, η μνήμη Flash κοστίζει πολύ λιγότερο από την προγραμματιζόμενη μνήμη από byte EEPROM και είχε γίνει ο κυρίαρχος τύπος μνήμης όταν ένα σύστημα απαιτεί σημαντική ποσότητα μη πτητικής αποθήκευσης με μνήμη στερεάς κατάστασης.

## 1.2 Αναπτυσσόμενες τεχνολογίες μη πτητικών μνημών

Σκοπός μας στην παράγραφο αυτή είναι, να δοθεί μια πολύ σύντομη εικόνα των αναπτυσσόμενων τεχνολογιών [25,26] στον πολύ δυναμικό χώρο των μη πτητικών μνημών. Στην εικόνα 1 παρουσιάζονται δυο βασικές τεχνολογίες που εμφανίζονται στις μη πτητικές μνήμες. Ο διαχωρισμός γίνεται βάση της λειτουργίας τους, στην πρώτη κατηγορία είναι αυτές που βασίζονται στα ηλεκτρόνια και στη δεύτερη κατηγορία αυτές που δε βασίζονται στα ηλεκτρόνια. Περαιτέρω πληροφορίες βάση του διαγράμματος της εικόνας 1 για τους δυο τύπους μη πτητικών μνημών υπάρχει στις επόμενες δυο παραγράφους.



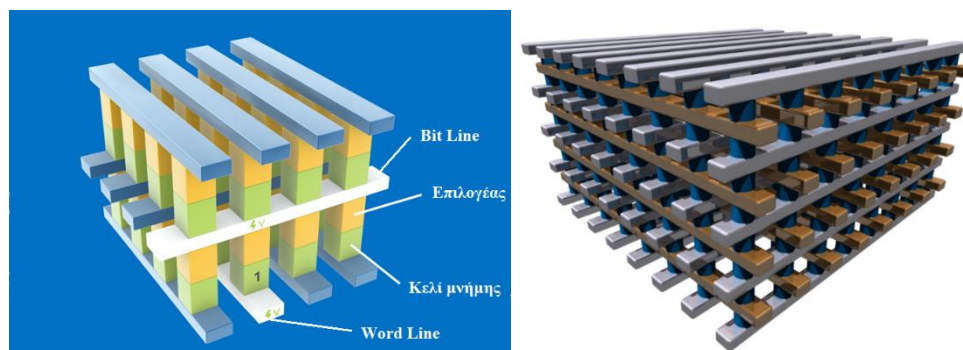


Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση σύγχρονης τεχνολογικής κατάστασης μη πτητικών μνημών, που βασίζονται ή δε βασίζονται στα ηλεκτρόνια.

### 1.2.1 Μνήμες μη βασισμένες σε ηλεκτρόνια

Έχει παραχθεί σημαντικό έργο σε μνήμες που δε βασίζονται σε ηλεκτρόνια. Ακολουθεί μια σύντομη διερεύνηση σε αυτό τον τομέα.

Η Resistive random-access memory (ReRAM ή RRAM) είναι ένας τύπος μη πτητικής μνήμης τυχαίας προσπέλασης (RAM), η οποία λειτουργεί με την αλλαγή της τιμής της αντίστασης σε ένα διηλεκτρικό υλικό στερεάς κατάστασης, συχνά αναφέρεται ως memristor [27]. Η ReRAM περιλαμβάνει τη δημιουργία ατελειών σε ένα λεπτό στρώμα οξειδίου, γνωστές ως κενές θέσεις (vacancies) οξυγόνου (θέσεις δεσμών οξειδίων όπου έχει απομακρυνθεί το οξυγόνο), οι οποίες στη συνέχεια μπορούν να κινηθούν και να φορτιστούν ή να εκφορτισθούν, με την βοήθεια ενός ηλεκτρικού πεδίου. Η κίνηση των ιόντων οξυγόνου και οι κενές θέσεις στο οξείδιο, είναι ανάλογες με την κίνηση των ηλεκτρονίων και των οπών σ' έναν ημιαγωγό. Η βασική ιδέα είναι ότι σε ένα διηλεκτρικό, το οποίο κανονικά είναι μονωτικό, μπορεί να δημιουργηθεί ένα αγωγίμο μονοπάτι, το οποίο σχηματίζεται μετά από την εφαρμογή υψηλής τάσης. Το αγωγίμο μονοπάτι μπορεί να προκύψει από διάφορους μηχανισμούς, συμπεριλαμβανομένης της μετακίνησης οπών ή ιόντων. Μόλις σχηματιστεί το μονοπάτι, μπορεί να καταστραφεί πάλι (σπάσει, με αποτέλεσμα υψηλή αντίσταση) ή να δημιουργηθεί ξανά (επαναμορφωθεί, με αποτέλεσμα μικρότερη αντίσταση) από άλλη τάση. Η εικόνα 2 παρουσιάζει 3D RRAM μνήμες που δε χρησιμοποιούν τρανζίστορ.



Εικόνα 2: Πλάγια όψη μνήμης RRAM αριστερά των Intel/Micron 3D XPoint™ (πηγή Micron Technology) και δεξιά της Crossbar (πηγή Crossbar).

Κάθε μνήμη έχει μια γραμμή που ονομάζεται word line, που χρησιμεύει για τον έλεγχο της κυψελίδας. Το σήμα που εφαρμόζεται στη word line αποκτά πρόσβαση στην κυψελίδα, είτε για ανάγνωση, είτε για εγγραφή δεδομένων. Κάθετη προς τη word line είναι η bit line. Η γραμμή αυτή χρησιμεύει στο να μπορούν να διαβαστούν τα δεδομένα που είναι γραμμένα.

Τα δεδομένα στη μνήμη MRAM [28] δεν αποθηκεύονται ως ηλεκτρικό φορτίο ή ρεύμα, αλλά σε μαγνητικά στοιχεία αποθήκευσης. Τα στοιχεία σχηματίζονται από δύο σιδηρομαγνητικές πλάκες, κάθε μια από τις οποίες μπορεί να μαγνητισθεί, οι πλάκες χωρίζονται με ένα λεπτό μονωτικό στρώμα. Η μία από τις δύο πλάκες είναι ένας μόνιμος μαγνήτης με συγκεκριμένη πολικότητα. Ο μαγνητισμός της άλλης πλάκας μπορεί να αλλάξει ώστε να ταιριάζει με εκείνον ενός εφαρμοζόμενου πεδίου, έτσι γίνεται η αποθήκευση στη μνήμη. Η απλούστερη μέθοδος ανάγνωσης επιτυγχάνεται με τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης της κυψελίδας μνήμης. Μια συγκεκριμένη κυψελίδα επιλέγεται με τροφοδοσία του σχετικού τρανζίστορ, που κάνει το ρεύμα να περάσει από τη γραμμή τροφοδοσίας, μέσω της κυψελίδας στη γείωση. Λόγω της μαγνητοαντίστασης σήραγγας, η ηλεκτρική αντίσταση της κυψελίδας αλλάζει με τον σχετικό προσανατολισμό της μαγνήτισης στις δύο πλάκες. Μέσω της μέτρησης του ρεύματος που εμφανίζεται, μπορεί να προσδιοριστεί η αντίσταση κάθε κυψελίδας και από αυτό η πολικότητα του μαγνητισμού της εγγράψιμης πλάκας. Τυπικά, αν οι δύο πλάκες έχουν την ίδια ευθυγράμμιση στη μαγνήτιση (κατάσταση χαμηλής αντίστασης), η κατάσταση αυτή θεωρείται "1", ενώ αν η ευθυγράμμιση είναι αντιπαράλληλη, η αντίσταση θα είναι υψηλότερη (κατάσταση υψηλής αντίστασης) που αντιστοιχεί στην κατάσταση "0".

Αυτή η προσέγγιση απαιτεί ένα αρκετά σημαντικό ρεύμα για τη δημιουργία πεδίου, έτσι, αυτό καθιστά τη μνήμη MRAM λιγότερο ενδιαφέρουσα για χρήσεις χαμηλής ισχύος. Επιπλέον, καθώς η διάταξη μειώνεται σε μέγεθος, έρχεται μια στιγμή που το επαγόμενο πεδίο, επικαλύπτει παρακείμενες κυψελίδες σε μια μικρή περιοχή, οδηγώντας σε πιθανές λάθος εγγραφές. Αυτό το πρόβλημα διαταραχής εγγραφής θέτει ένα αρκετά μεγάλο ελάχιστο μέγεθος για αυτόν τον τύπο κυψελίδας. Μια νεότερη τεχνική, η μεταφορά ροπής ιδιοπεριστροφής (Spin-Transfer Torque-STT) [29,30], χρησιμοποιεί ηλεκτρόνια με ευθυγραμμισμένη ιδιοπεριστροφή, για τη δημιουργία ροπής στα πεδία. Συγκεκριμένα, αν τα ηλεκτρόνια που ρέουν σε ένα στρώμα πρέπει να αλλάξουν την περιστροφή τους, αυτό θα δημιουργήσει μια ροπή, που θα μεταφερθεί στο κοντινότερο στρώμα. Αυτό μειώνει το ποσό του ρεύματος που απαιτείται για την εγγραφή της κυψελίδας, με αποτέλεσμα να είναι περίπου το ίδιο με τη διαδικασία ανάγνωσης. Υπάρχουν ανησυχίες ότι ο κλασικός τύπος κυψελίδας MRAM, θα έχει δυσκολία σε υψηλές πυκνότητες λόγω της ποσότητας του ρεύματος κατά τη διάρκεια της εγγραφής, ένα πρόβλημα το οποίο αποφεύγεται με τη χρήση της τεχνικής STT. Το μειονέκτημα είναι η ανάγκη διατήρησης της συνοχής της ιδιοπεριστροφής.

Οι συνήθεις μνήμες DRAM αποτελούνται από ένα πλέγμα από μικρούς πυκνωτές με τα αντίστοιχα τρανζίστορ σηματοδότησης και τις καλωδιώσεις. Κάθε στοιχείο αποθήκευσης (κυψελίδα), που αποτελείται από έναν πυκνωτή και ένα τρανζίστορ, γενικά αποκαλείται "1T-1C". Η μνήμη DRAM είναι συνήθως ένας τύπος μνήμης MOS, που κατασκευάζεται με την τεχνολογία CMOS. Σε μια μνήμη FeRAM [31] ο σχεδιασμός της κυψελίδας αποθήκευσης περιλαμβάνει έναν πυκνωτή και ένα τρανζίστορ πρόσβασης. Σε έναν πυκνωτή κυψελίδας DRAM χρησιμοποιείται ένα γραμμικό διηλεκτρικό, ενώ σε έναν πυκνωτή κυψελίδας FeRAM η διηλεκτρική δομή περιλαμβάνει σιδηροηλεκτρικό υλικό, συνήθως τιτανικό ζirkονικό μόλυβδο (PZT). Ένα σιδηροηλεκτρικό υλικό εμφανίζει μια μη γραμμική σχέση μεταξύ του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου και του αποθηκευμένου φορτίου. Συγκεκριμένα, το σιδηροηλεκτρικό χαρακτηριστικό έχει τη μορφή ενός βρόχου υστέρησης, το οποίο έχει παρόμοιο σχήμα με το βρόχο υστέρησης των σιδηρομαγνητικών υλικών. Η διηλεκτρική σταθερά ενός σιδηροηλεκτρικού υλικού είναι τυπικά πολύ

μεγαλύτερη από εκείνη ενός γραμμικού διηλεκτρικού λόγω των επιδράσεων των ημιμόνιμων ηλεκτρικών διπόλων, που σχηματίζονται στην κρυσταλλική δομή του σιδηροηλεκτρικού υλικού. Όταν εφαρμόζεται ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο διαμέσου ενός διηλεκτρικού, τα δίπολα τείνουν να ευθυγραμμίζονται με την κατεύθυνση του πεδίου, που παράγεται από μικρές μετατοπίσεις στις θέσεις των ατόμων και μετατοπίσεις στις κατανομές του ηλεκτρονικού φορτίου στην κρυσταλλική δομή. Αφού αφαιρεθεί το εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, τα δίπολα διατηρούν την κατάσταση πόλωσης. Τα δυαδικά ψηφία "0" και "1" αποθηκεύονται ως μία από τις δύο πιθανές ηλεκτρικές καταστάσεις πόλωσης σε κάθε κυψελίδα αποθήκευσης δεδομένων. Για παράδειγμα, η κατάσταση "1" κωδικοποιείται χρησιμοποιώντας την πόλωση της αρνητικής παραμένουσας πολικότητας και η κατάσταση "0" κωδικοποιείται χρησιμοποιώντας την θετική παραμένουσα πολικότητα.

Όσον αφορά τη λειτουργία, η FeRAM είναι παρόμοια με τη DRAM. Η εγγραφή επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ενός πεδίου διαμέσου του σιδηροηλεκτρικού στρώματος, με τη φόρτιση των πλακών στη κάθε πλευρά της, εξαναγκάζοντας τα άτομα σε προσανατολισμό προς τα πάνω ή προς τα κάτω (ανάλογα με την πολικότητα του φορτίου), δημιουργώντας την κατάσταση "1" ή "0". Η ανάγνωση, ωστόσο, είναι κάπως διαφορετική από αυτή της μνήμης DRAM. Το τρανζίστορ αναγκάζει την κυψελίδα σε μια συγκεκριμένη κατάσταση, π.χ. "0". Εάν η κυψελίδα κρατούσε ήδη "0", δεν θα συμβεί τίποτα στις γραμμές εξόδου. Αν η κυψέλη έχει "1", ο επαναπροσανατολισμός των ατόμων στο υλικό θα προκαλέσει έναν σύντομο παλμό ρεύματος στην έξοδο, καθώς θα ωθηθούν τα ηλεκτρόνια από το μέταλλο στην "κάτω" πλευρά. Η παρουσία αυτού του παλμού σημαίνει ότι η κυψελίδα διατηρεί την κατάσταση "1". Δεδομένου ότι αυτή η διαδικασία αντικαθιστά την κυψελίδα, η ανάγνωση της FeRAM είναι μια καταστρεπτική διαδικασία και απαιτεί την επανεγγραφή της κυψελίδας.

Η μνήμη αλλαγής φάσης (γνωστή και ως PCM, PCME, PRAM, PCRAM) είναι ένας τύπος μη πτητικής μνήμης τυχαίας προσπέλασης. Οι μνήμες PRAM εκμεταλλεύονται τη μοναδική συμπεριφορά του χαλκογενούς γυαλιού. Στην παλαιότερη γενιά PCM, η θερμότητα που παράγεται από τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος διαμέσου ενός θερμαντικού στοιχείου, κατασκευασμένου γενικά από TiN, χρησιμοποιήθηκε είτε για να θερμανθεί γρήγορα και να ψυχθεί το γυαλί, κάνοντάς το άμορφο, είτε να διατηρηθεί στην περιοχή θερμοκρασίας κρυστάλλωσης για κάποιο χρόνο, μετατρέποντάς το σε κρυσταλλικό. Η άμορφη κατάσταση είναι αυτή με την υψηλή αντίσταση και η κρυσταλλική με την χαμηλή αντίσταση. Η PCM έχει επίσης τη δυνατότητα να επιτύχει μια σειρά ξεχωριστών ενδιάμεσων καταστάσεων, έχοντας έτσι τη δυνατότητα να κρατά πολλαπλά bits σε μια μόνο κυψελίδα. Οι δυσκολίες προγραμματισμού των κυψελίδων με αυτόν τον τρόπο εμπόδισαν την εφαρμογή αυτών των δυνατοτήτων σε άλλες τεχνολογίες. Η νεότερη τεχνολογία στις μνήμες PCM τείνει σε δύο διαφορετικές κατευθύνσεις. Η μια κατεύθυνση είναι η αναζήτηση εναλλακτικών υλικών όπως το  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST). Η άλλη εναλλακτική είναι η χρήση του υπερπλέγματος του  $\text{GeTe-Sb}_2\text{Te}_3$  για να επιτύχει μη θερμικές αλλαγές φάσης απλώς αλλάζοντας την κατάσταση συντονισμού των ατόμων του γερμανίου με έναν παλμό laser. Αυτή η νέα μνήμη ονομάζεται Interfacial Phase-Change Memory (IPCM) [32].

### 1.2.2 Μνήμες βασισμένες σε ηλεκτρόνια

Οι μνήμες που βασίζονται σε ηλεκτρόνια ανήκουν στην τεχνολογία μνήμης ημιαγωγών που χρησιμοποιείται για την κατασκευή μη πτητικής μνήμης Flash NOR και NAND. Η μνήμη παγίδευσης φορτίων (Charge Trap) και η μνήμη πλωτής πύλης (Floating

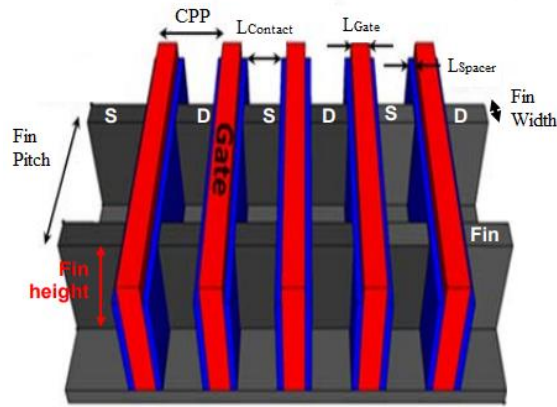
Gate) λειτουργεί με τη μεταφορά φορτίων από το κανάλι ενός MOSFET στο στρώμα νιτριδίου του πυριτίου (εικόνα 7.d) και στο ντοπαρισμένο πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (εικόνα 7.b) αντίστοιχα, όπου τα φορτία παγιδεύονται. Η μνήμη παγίδευσης φορτίων επιτρέπει στους κατασκευαστές μνήμης να μειώσουν το κόστος κατασκευής με τους ακόλουθους τρόπους: 1) Λιγότερα βήματα απαιτούνται για την κατασκευή τους. 2) Μπορούν να κατασκευαστούν μικρότερες γεωμετρίες (μειώνοντας έτσι το μέγεθος και το κόστος των τσιπ). 3) Πολλαπλά bits μπορούν να αποθηκευτούν σε μια μόνο κυψελίδα μνήμης Flash. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι έχουν βελτιωμένη αξιοπιστία και υψηλότερη απόδοση, δεδομένου ότι η παγίδευση του ηλεκτρικού φορτίου είναι λιγότερο ευαίσθητη σε σημειακά ελαττώματα στο στρώμα οξειδίου σήραγγας.

Οι μνήμες με νανοκρυστάλλους αποτελούν μια λύση των προβλημάτων που εμφανίζονται λόγω της σμίκρυνσης των διαστάσεων των μνημών. Παρά τις πολύ καλές επιδόσεις των μνημών με νανοκρυστάλλους, έχουν εμφανιστεί στη τρέχουσα τεχνολογία αιχμής και άλλοι τύποι μνημών, που αποτελούν σημαντικούς ανταγωνιστές αυτών των μνημών και αναφέρθηκαν παραπάνω.

Η εφεύρεση του MOSFET στα τέλη της δεκαετίας του 1960 δημιούργησε μια σταθερή βάση για τη βιομηχανία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ημιαγωγών. Η τολμηρή πρόβλεψη του Gordon Moore ότι ο αριθμός των τρανζίστορ θα διπλασιαζόταν ανά δύο χρόνια, σε συνδυασμό με τις οδηγίες κλίμακας του Robert Dennard, οδήγησε στην εκθετική ανάπτυξη της βιομηχανίας ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, καθώς οι διαστάσεις των τρανζίστορ συρρικνώνονταν μέχρι το 2000 [33,34]. Αυτή η περίοδος αναφέρεται συχνά ως η εποχή της Γεωμετρικής (ή Κλασικής) κλίμακας.

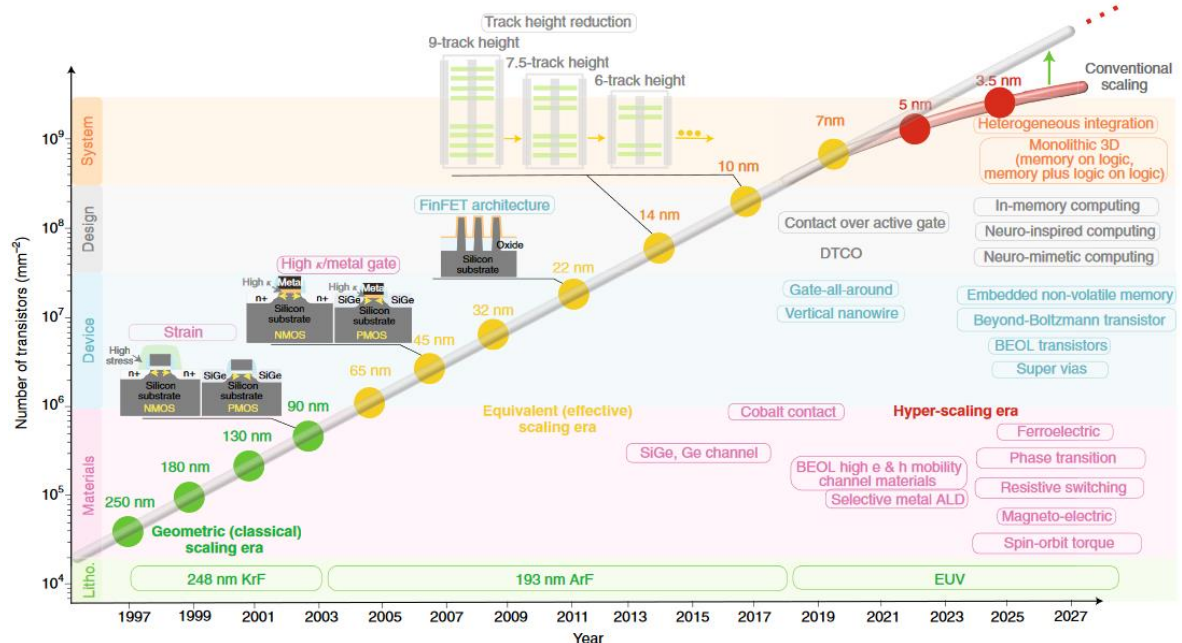
Μετά το έτος 2000, καθώς η Γεωμετρική κλίμακα επιβραδύνθηκε, προέκυψε μια δεύτερη εποχή Ισοδύναμης κλίμακας, υποβοηθούμενη από την εισαγωγή του πυριτίου υπό τάση και των καναλιών πυριτίου-γερμανίου, χρήση διηλεκτρικών φραγής υψηλού K (κάτω από το μεταλλικό ηλεκτρόδιο της πύλης) και μη-επίπεδα τρανζίστορ-FinFETs όπου η πύλη είναι τοποθετημένη σε δύο, τρεις, τέσσερις πλευρές του καναλιού ή είναι τυλιγμένη γύρω από το κανάλι, σχηματίζοντας μια δομή διπλής πύλης. Οι περιοχές πηγής και απαγωγού σχηματίζουν πτερύγια (Fins) στην επιφάνεια του πυριτίου (εικόνα 3). Οι διατάξεις FinFET έχουν σημαντικά γρηγορότερους χρόνους εναλλαγής και υψηλότερη πυκνότητα ρεύματος από το επίπεδο CMOS). Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, η ταχύτητα των ηλεκτρονίων και των οπών στο κανάλι αυξήθηκε [35], το πάχος του οξειδίου (διηλεκτρικό υψηλού K) μειώθηκε [36] και το πλάτος του τρανζίστορ ελάχιστου μεγέθους (fin height, fin pitch) αυξήθηκε [37]. Με αποτέλεσμα η βιομηχανία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων να συνεχίσει την εκθετική πορεία ανάπτυξης προς τα εμπρός, με διπλασιασμό του αριθμού των τρανζίστορ κάθε δύο χρόνια. Τα ψηλά πτερύγια υψηλής αναλογίας διαστάσεων, σε συνδυασμό με πλήρως αυτο-ευθυγραμμισμένες επαφές πηγής-απαγωγού και αυτο-ευθυγραμμισμένη επαφή πύλης, πάνω σε ενεργή περιοχή διάχυσης, επιτάχυναν περαιτέρω τον ρυθμό αύξησης της πυκνότητας των τρανζίστορ. Καινοτομίες τόσο στη διαδικασία κατασκευής όσο και στις προηγμένες τεχνικές διαμόρφωσης, επέτρεψαν στους σχεδιαστές να στοχεύουν σε τυπικά σχέδια κυψελών με χαμηλό ύψος διαδρομών [38]. Το ύψος της διαδρομής μιας τυπικής κυψέλης καθορίζεται από το βήμα των οριζόντιων μεταλλικών γραμμών επί τον αριθμό των μεταλλικών διαδρομών, που απαιτούνται για την τροφοδοσία και τη γείωση των γραμμών, για τα καρφιά εισόδου και εξόδου και για τη δρομολόγηση εντός της κυψέλης. Αναμένουμε ότι η εποχή της Ισοδύναμης κλίμακας θα συνεχιστεί έως το 2025, που θα επιτευχθεί με καινοτόμες προσπάθειες σχεδίασης-τεχνολογίας συν-βελτιστοποίησης (Design-Technology co-optimization - DTCO) και καινοτομίες στη διαδικασία κατασκευής, όπως θαμμένες γραμμές, ειδικό υλικό, αυτο-ευθυγραμμισμένη πολλαπλή κοπή, εισαγωγή ακραίας υπεριώδους (10-121nm) λιθογραφίας (Extreme UV Lithography - EUVL), και τελικά ακραία υπεριώδη λιθογραφία υψηλού αριθμητικού διαφράγματος (high-numerical aperture EUVL).

ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ MOS ME ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ  
ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ME LASER



Εικόνα 3: Σχηματική αναπαράσταση των χαρακτηριστικών μεγεθών ενός FinFET (πηγή Semiconductor Engineering).

Μετά το 2025, η κοινότητα ημιαγωγίων ηλεκτρονικών, αντιμετωπίζει μια μεγάλη πρόκληση, καθώς η κλίμακα πρέπει να εισέλθει σε μια μη διαγραμμένη περιοχή πέρα από τη γεωμετρική κλίμακα. Αυτή η αβεβαιότητα παρέχει μια μοναδική ευκαιρία να εννορηστρώσει μια αλλαγή στον τρόπο εφαρμογής των ηλεκτρονικών. Συγκεκριμένα, προτείνεται ότι τα ηλεκτρονικά θα εισέλθουν σε μια νέα (τρίτη) εποχή που ονομάζεται Υπερ-κλίμακα. Η Υπερκλίμακα αναφέρεται στην ικανότητα μιας τεχνολογίας να μεταβεί από μερικά δισεκατομμύρια σε ένα τρισεκατομμύριο κυψέλες σε ένα τσιπ, ανάλογα με τις απαιτήσεις του φόρτου εργασίας. Η εποχή της Υπερκλίμακας θα εκπληρωθεί από καινοτομίες σε τέσσερις σημαντικούς τομείς: εξέλιξη πέρα από τα τρανζίστορ Boltzmann, ενσωμάτωση μνημών υψηλής απόδοσης πέρα από τη στατική μνήμη τυχαίας προσπέλασης (SRAM) και τη δυναμική μνήμη τυχαίας προσπέλασης (DRAM), μονολιθική τρισδιάστατη ολοκλήρωση της λογικής, της μνήμης, αναλογικών & I/O τρανζίστορ και τέλος ετερογενή ολοκλήρωση λειτουργικά διαφορετικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που προσφέρουν μονολιθική απόδοση.

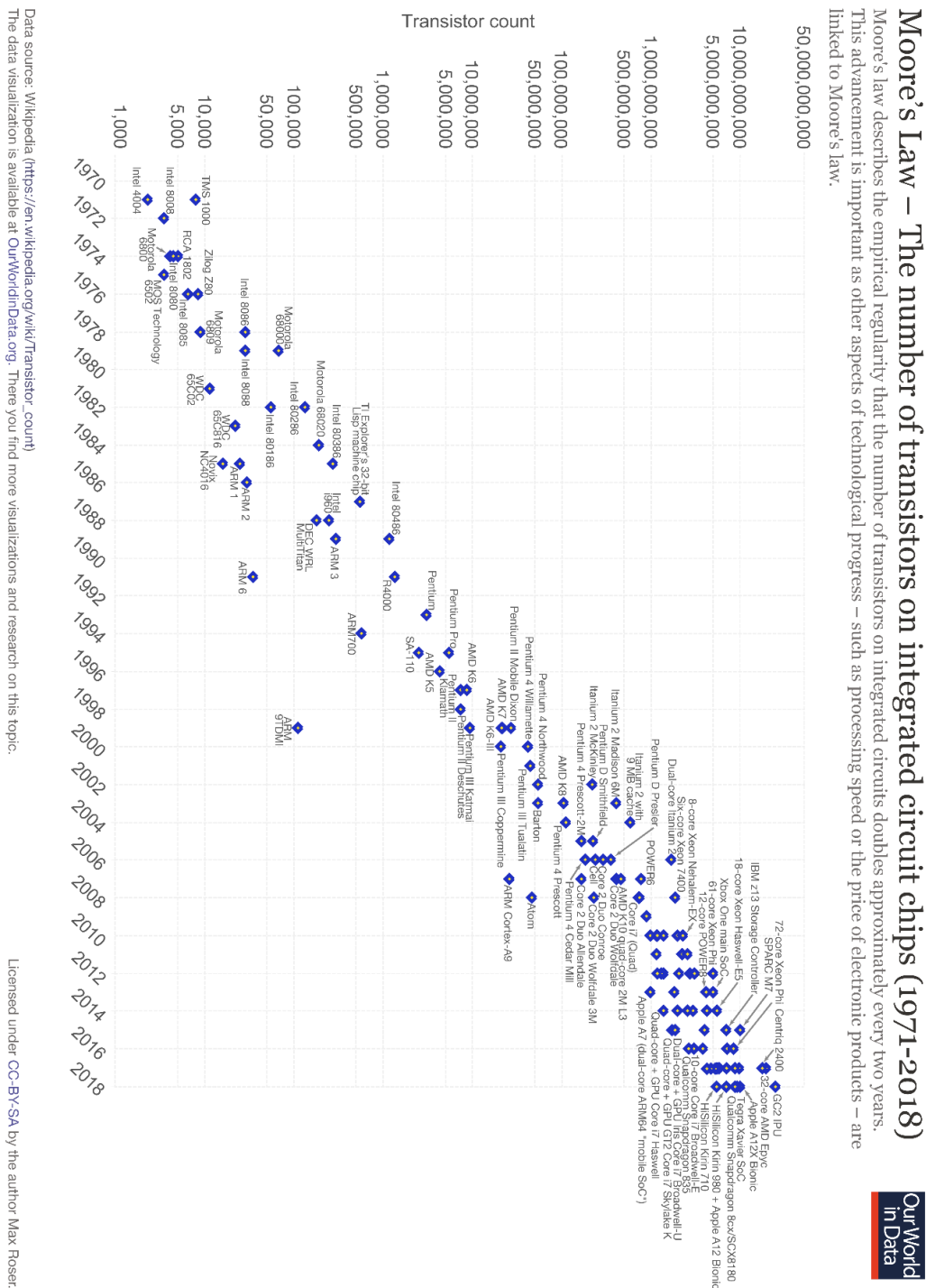


Εικόνα 4: Διάγραμμα του αριθμού των τρανζίστορ ανά επιφάνεια συναρτήσει της χρονιάς εμφάνισης, όπου παρουσιάζονται οι περιοχές κλίμακας της αναπτυσσόμενης τεχνολογίας CMOS [39].

Στην εικόνα 4 φαίνονται οι τρεις περιοχές κλίμακας της τεχνολογίας CMOS. Η προηγούμενη, η παρούσα και η μελλοντική τάση της κλίμακας της πυκνότητας των τρανζίστορ. Απεικονίζεται με τρεις ξεχωριστές χρονικές περιόδους κλίμακας: 1)

ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ MOS ME ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ  
ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ME LASER

Γεωμετρική κλίμακα. 2) Ισοδύναμη κλίμακα και 3) Υπερκλίμακα. Ανάλογα των χαρακτηριστικών των διαφόρων πτυχών του τρανζίστορ, όπως το οξειδίο της πύλης, οι κόμβοι, το ντόπινγκ καναλιών και το μήκος της φυσικής πύλης, που χαρακτήρισαν την εποχή της Γεωμετρικής κλίμακα σμίκρυνσης. Η Ισοδύναμη κλίμακα σμίκρυνσης εισήγαγε μη συμβατικά υλικά, όπως πυρίτιο-γερμάνιο, διηλεκτρικά υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς Κ όπως το HfO<sub>2</sub> και μη επίπεδες δομές διατάξεων όπως τα FinFETs, που μείωσαν την ενεργή κινητικότητα, το πάχος του οξειδίου πύλης και το ενεργό πλάτος του τρανζίστορ, αντίστοιχα. Στο μέλλον, οι καινοτομίες σε υλικά, διατάξεις με λειτουργίες λογικής και μνήμης όπως επίσης η ενσωμάτωση ετερογενών τεχνολογιών θα επηρεάσουν την εποχή της Υπερκλίμακας στα προηγμένα ηλεκτρονικά.

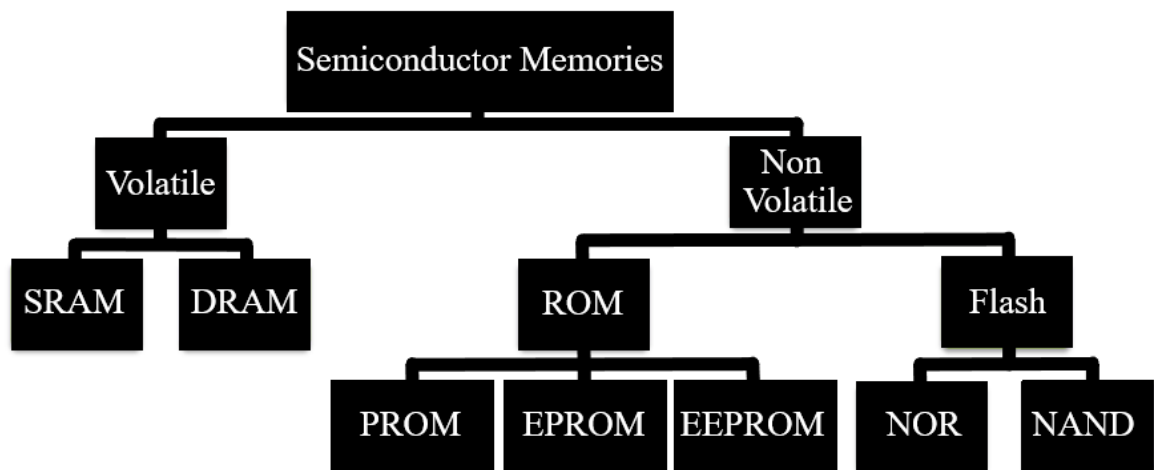


Εικόνα 5: Διάγραμμα του αριθμού των τρανζίστορ MOS για τους μικροεπεξεργαστές (λογαριθμικής κλίμακας) συναρτήσει της χρονιάς εμφάνισης.

Στην εικόνα 5 παρουσιάζεται η ραγδαία αύξηση του αριθμού των τρανζίστορ στα ολοκληρωμένα κυκλώματα από το 1971 έως το 2018. Αυτό επιτυγχάνεται κατά κύριο λόγο με τη μείωση των διαστάσεων. Ο νόμος του Moore περιγράφει τον εμπειρικό κανόνα ότι ο αριθμός των τρανζίστορ στα ολοκληρωμένα κυκλώματα διπλασιάζεται περίπου κάθε δύο χρόνια.

### 1.3 Μνήμες ημιαγωγών

Οι μνήμες ημιαγωγών μπορούν να ταξινομηθούν ως πτητικές και μη πτητικές. Οι πτητικές μνήμες, όπως οι δυναμικές μνήμες τυχαίας προσπέλασης (DRAM) και οι στατικές μνήμες τυχαίας προσπέλασης (SRAM), χάνουν τις αποθηκευμένες πληροφορίες τους εάν η παροχή ρεύματος αποσυνδεθεί. Οι μη πτητικές μνήμες, από την άλλη πλευρά, μπορούν να διατηρήσουν τις αποθηκευμένες πληροφορίες για μεγάλο χρονικό διάστημα. Σήμερα, η DRAM και η SRAM χρησιμοποιούνται εκτενώς σε προσωπικούς υπολογιστές και σταθμούς εργασίας, κυρίως λόγω κάποιων χαρακτηριστικών τους. Της υψηλής πυκνότητας και του χαμηλού κόστους της DRAM. Της υψηλής ταχύτητας της SRAM. Η μη πτητική μνήμη χρησιμοποιείται εκτεταμένα σε φορητά ηλεκτρονικά συστήματα, όπως το κινητό τηλέφωνο, η ψηφιακή φωτογραφική μηχανή και οι έξυπνες κάρτες IC, κυρίως λόγω των χαρακτηριστικών της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και της μη πτητικότητας. Στην εικόνα 6 που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των κυριότερων μνημών.



Εικόνα 6: Κατηγοριοποίηση των κυριότερων μνημών.

Ο πίνακας 1 συγκρίνει την πυκνότητα εγγραφής δεδομένων, την ταχύτητα και τη πτητικότητα μνημών SRAM, DRAM, FLASH και μαγνητικών δίσκων [29,40], όπου φαίνονται οι βασικές διαφορές στις διαφορετικές τεχνολογίες.

Μνήμες	SRAM	DRAM	FLASH	MAGNETIC
Πυκνότητα	Πολύ χαμηλή	Υψηλή	Υψηλή	Πολύ υψηλή
Ταχύτητα	Πολύ υψηλή	Μέση	Αργή	Πολύ αργή
	<1ns	~80ns	>10μs	~5ms
Μη πτητικές	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι

Πίνακας 1: Συγκριτικός πίνακας της πυκνότητας εγγραφής δεδομένων, της ταχύτητας και της πτητικότητας μνημών SRAM, DRAM, FLASH και μαγνητικών δίσκων.

### 1.3.1 Πτητικές μνήμες

#### 1.3.1.1 SRAM

Η SRAM αποτελείται από ένα πίνακα στατικών κυψελίδων διαστάσεων  $n \times n$ . Κάθε κυψελίδα αποτελείται από έξι τρανζίστορ (6T) και χρησιμοποιεί μια δισταθή δομή flip-flop για την αποθήκευση της λογικής κατάστασης. Το flip-flop αποτελείται από δύο σταυρωτά συζευγμένους μετατροπείς CMOS (T1, T3 και T2, T4). Η έξοδος του μετατροπέα συνδέεται στον κόμβο εισόδου του άλλου μετατροπέα. Αυτή η ρύθμιση ονομάζεται "κλειδωμένη". Δύο πρόσθετα MOSFETs n-καναλιών, T5 και T6, με τις πύλες τους συνδεδεμένες στη word line, χρησιμοποιούνται για πρόσβαση στην κυψελίδα SRAM. Η λειτουργία της SRAM είναι στατική, δεδομένου ότι η λογική κατάσταση διατηρείται όσο η ισχύς εφαρμόζεται. Επομένως, δεν απαιτείται ανανέωση της SRAM. Τα δυο MOSFET καναλιού p (T1 και T2) στους μετατροπείς χρησιμοποιούνται ως τρανζίστορ φορτίου. Δεν υπάρχει ουσιαστικά καμία ροή συνεχούς ρεύματος μέσω της κυψελίδας, εκτός κατά τη διάρκεια της εναλλαγής. Σε ορισμένες περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται πολυκρυσταλλικά TFTs ή πολυκρυσταλλικές αντιστάσεις αντί για MOSFET p-διαύλου. Αυτές οι πολυκρυσταλλικές διατάξεις φορτίσεως, μπορούν να κατασκευαστούν πάνω από τα n-MOSFET. Η 3-D ενσωμάτωση μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά την περιοχή της κυψελίδας και έτσι να αυξήσει την ικανότητα αποθήκευσης του τσιπ.

#### 1.3.1.2 DRAM

Η σύγχρονης τεχνολογίας DRAM αποτελείται από μια συστοιχία. Η κυψελίδα περιλαμβάνει ένα MOSFET και έναν πυκνωτή MOS [δηλ. Ένα τρανζίστορ/ένα πυκνωτή (1T/1C) στην κυψελίδα]. Το MOSFET λειτουργεί ως διακόπτης για τον έλεγχο των ενεργειών εγγραφής, ανανέωσης και ανάγνωσης της κυψελίδας. Ο πυκνωτής χρησιμοποιείται για την αποθήκευση φορτίου. Κατά τη διάρκεια του κύκλου εγγραφής το MOSFET είναι ενεργοποιημένο έτσι ώστε η λογική κατάσταση να μεταφερθεί στον πυκνωτή αποθήκευσης. Για πρακτικές εφαρμογές, τα φορτία που αποθηκεύονται στον πυκνωτή θα χαθούν βαθμιαία λόγω του μικρού, αλλά μη αμελητέου ρεύματος διαρροής του κόμβου αποθήκευσης. Κατά συνέπεια, η λειτουργία της DRAM είναι "δυναμική", δεδομένου ότι τα δεδομένα πρέπει να ανανεώνονται περιοδικά μέσα σε ένα σταθερό διάστημα, συνήθως 2-50ms. Η κυψελίδα 1T/1C DRAM έχει τα πλεονεκτήματα της πολύ απλής και μικρής έκτασης κατασκευής. Προκειμένου να αυξηθεί η πυκνότητα αποθήκευσης ενός τσιπ, είναι απαραίτητη η δραστική μείωση του μεγέθους της κυψελίδας. Ωστόσο, αυτό θα υποβαθμίσει την ικανότητα αποθήκευσης του πυκνωτή, καθώς η περιοχή του ηλεκτροδίου του πυκνωτή θα μειωθεί επίσης. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος απαιτούνται τρισδιάστατες δομές πυκνωτών (3-D). Υλικά υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν, για να αντικαταστήσουν τα συμβατικά σύνθετα στρώματα οξειδίου-νιτρίδιου, ως διηλεκτρικά υλικά πυκνωτών, προκειμένου να αυξηθεί η χωρητικότητα.

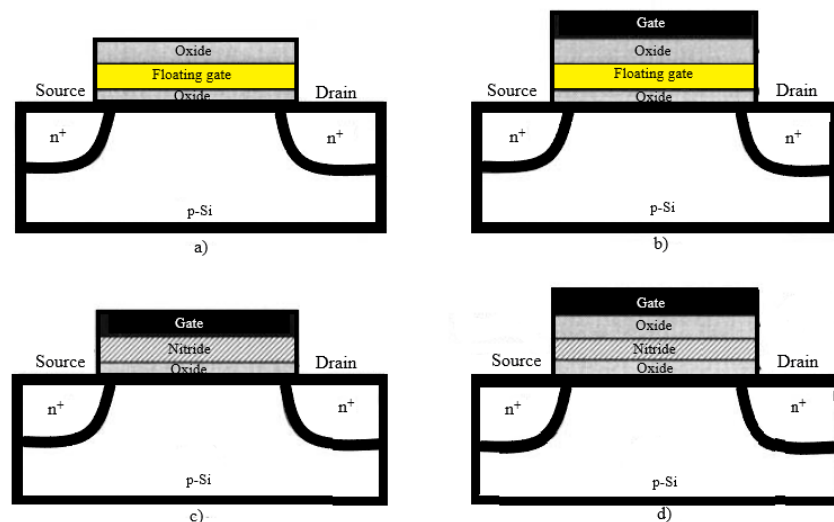
Τα δεδομένα της DRAM αποθηκεύονται ως παρουσία ή έλλειψη ηλεκτρικού φορτίου στον πυκνωτή, με την έλλειψη φόρτισης γενικά να αντιπροσωπεύει το "0". Η εγγραφή και διαγραφή επιτυγχάνεται ενεργοποιώντας το αντίστοιχο τρανζίστορ ελέγχου, φορτίζοντας την κυψελίδα που βρίσκεται στην κατάσταση "0", στέλνοντας ρεύμα σε αυτή από μια γραμμή τροφοδοσίας, μεταβαίνει στην κατάσταση "1". Η ανάγνωση είναι παρόμοιου χαρακτήρα, το τρανζίστορ ενεργοποιείται και πάλι, εκφορτίζοντας την κυψελίδα από έναν αισθητήρα ενίσχυσης. Εάν παρατηρηθεί παλμός φορτίου στον ενισχυτή, η κυψελίδα κρατούσε φορτίο και έτσι διαβάσει "1", η έλλειψη ενός τέτοιου



παλμού υποδεικνύει "0". Σημειώστε ότι αυτή η διαδικασία είναι καταστροφική, μόλις η κυψελίδα διαβαστεί. Αν είχε κρατήσει ένα "1", θα πρέπει να φορτιστεί στην τιμή αυτή ξανά. Δεδομένου ότι μια κυψελίδα χάνει τη φόρτιση της μετά από κάποιο χρονικό διάστημα λόγω ρευμάτων διαρροής, πρέπει να ανανεώνεται κατά διαστήματα.

### 1.3.2 Μη πτητικές μνήμες

Οι μη πτητικές διατάξεις μνήμης έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε ολοκληρωμένα κυκλώματα, όπως η διαγράψιμη προγραμματιζόμενη μνήμη μόνο για ανάγνωση (EPROM), η ηλεκτρικά διαγράψιμη προγραμματιζόμενη μνήμη μόνο για ανάγνωση (EEPROM) και η μνήμη Flash. Υπάρχουν δύο ομάδες μη πτητικών διατάξεων μνήμης, οι διατάξεις πλωτής πύλης και οι διατάξεις παγίδευσης φορτίου (εικόνα 7). Στους δύο αυτούς τύπους διατάξεων τα ηλεκτρικά φορτία εισάγονται από το υπόστρωμα πυριτίου μέσω του πρώτου μονωτικού οξειδίου και αποθηκεύονται στην πλωτή πύλη ή στο νιτρίδιο. Τα αποθηκευμένα φορτία προκαλούν μετατόπιση της τάσης κατωφλίου και η διάταξη μεταβαίνει σε κατάσταση υψηλού κατωφλίου (προγραμματισμένη ή λογική 0). Ο προγραμματισμός μπορεί να γίνει είτε με έγχυση θερμών φορέων είτε με διαδικασία σήραγγας Fowler-Nordheim [41]. Κοντά στον απαγωγό, το πλευρικό πεδίο βρίσκεται στο υψηλότερο επίπεδο. Τα ηλεκτρόνια του καναλιού αποκτούν ενέργεια από το πεδίο και γίνονται θερμά ηλεκτρόνια. Μερικά από τα θερμά ηλεκτρόνια με ενέργεια υψηλότερη από το ύψος φραγμού της ζώνης αγωγιμότητας  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  ( $\sim 3,2\text{eV}$ ), μπορούν να ξεπεράσουν το φράγμα και να εισέρθουν στην πλωτή πύλη. Ταυτόχρονα, το υψηλό πεδίο προκαλεί επίσης ιονισμό κρούσης στο οξείδιο. Αυτά τα δευτερεύοντα παραγόμενα θερμά ηλεκτρόνια μπορούν επίσης να εισέρθουν στην πλωτή πύλη. Σε μια καλά σχεδιασμένη διάταξη μνήμης ο χρόνος συγκράτησης του φορτίου μπορεί να είναι πάνω από 100 χρόνια και να διαθέτουν πολύ υψηλή αντοχή σε κύκλους προγραμματισμού-διαγραφής (συνήθως πάνω από 1.000.000 κύκλους). Για να επιστρέψει στην κατάσταση χαμηλού κατωφλίου (διαγραφή ή λογική 1), μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια πύλη ή άλλο μέσο (όπως το υπεριώδες φως) για τη διαγραφή των αποθηκευμένων φορτίων.



Εικόνα 7: Παραλλαγές μη πτητικών διατάξεων μνήμης: Διατάξεις πλωτής πύλης όπως (a) τρανζίστορ FAMOS και (b) τρανζίστορ πλωτής πύλης. Διατάξεις παγίδευσης φορτίου όπως (c) Τρανζίστορ MNOS και (d) τρανζίστορ SONOS.

Ένα μειονέκτημα αυτής της μνήμης είναι ότι με την απαίτηση για μείωση των διαστάσεων κατασκευάζονται όλο και λεπτότερα οξείδια σήραγγας, με αποτέλεσμα να

εμφανίζονται πολύ μεγάλα ρεύματα διαρροής. Επίσης η φορητότητα απαιτεί μικρή τάση εγγραφής. Οι μνήμες με νανοκρυστάλλους/νανοσωματίδια μπορούν να καλύψουν αυτές τις ανάγκες.

### 1.3.2.1 Διατάξεις ROM

Υπάρχουν διάφοροι τύποι διατάξεων πλωτής πύλης που διαφοροποιούνται από τους μηχανισμούς διαγραφής. Στην EPROM (διαγράψιμη προγραμματιζόμενη μνήμη μόνο για ανάγνωση), η οποία διαθέτει μόνο πλωτή πύλη και όχι πύλη ελέγχου, η διαγραφή γίνεται με υπεριώδη ακτινοβολία. Η EPROM έχει το πλεονέκτημα της μικρής περιοχής κυψελίδας, διότι είναι 1T (τρανζίστορ αποθήκευσης)/κυψελίδα. Παρόλα αυτά, η διαγραφή απαιτεί τη χρήση ακριβής διάταξης με παράθυρο χαλαζία. Επιπλέον, ο χρόνος διαγραφής είναι μεγάλος.

Η EPROM αποτελείται από ένα πλέγμα από τρανζίστορ, των οποίων η πύλη (ο «διακόπτης») προστατεύεται από υψηλής ποιότητας μονωτικό υλικό. «Σπρώχνοντας» ηλεκτρόνια στη βάση του με την εφαρμογή υψηλότερης από το συνηθισμένο τάσης, τα ηλεκτρόνια παγιδεύονται στην πύλη του τρανζίστορ πίσω από τον μονωτή, οπότε θέτουν μόνιμα το τρανζίστορ στη θέση «on» («1»). Η EPROM μπορεί να επανέρθει στην κατάσταση βάσης (όλα «1» ή όλα «0», εξαρτάται από τον σχεδιασμό) εφαρμόζοντας υπεριώδες φως (UV). Τα φωτόνια του υπεριώδους φωτός έχουν αρκετή ενέργεια, για να ωθήσουν τα ηλεκτρόνια μέσω του μονωτή και να επιστρέψουν στη βάση, στην αρχική κατάσταση. Στο σημείο αυτό η EPROM μπορεί να ξαναγραφεί από την αρχή.

Η βελτιωμένη έκδοση της EPROM, η EEPROM όπου το επιπλέον γράμμα «E» σημαίνει «electrically» (ηλεκτρικά), αναφέρεται στη δυνατότητα επαναφοράς της κατάστασης που έχει πλέον η μνήμη EEPROM με χρήση ηλεκτρισμού αντί για υπεριώδες φως, κάνοντας τις διατάξεις πολύ πιο εύχρηστες στην πράξη. Τα bit επαναφέρονται στην αρχική κατάσταση με την εφαρμογή ακόμα υψηλότερης τάσης, μέσω των άλλων ακροδεκτών του τρανζίστορ (συγκεκριμένα των ακροδεκτών source και drain). Αυτός ο παλμός υψηλής ισχύος, στην πράξη, απορροφά τα ηλεκτρόνια μέσω του μονωτή, επιστρέφοντας έτσι στην αρχική κατάσταση. Ωστόσο, αυτή η διαδικασία έχει το μειονέκτημα της μηχανικής φθοράς του τσιπ, οπότε τα συστήματα μνήμης, τα οποία είναι βασισμένα σε τρανζίστορ πλωτής πύλης, έχουν γενικά λίγους κύκλους εγγραφών. Η μνήμη EEPROM χρησιμοποιεί τη διαδικασία σήραγγας, για να διαγράψει τα αποθηκευμένα φορτία. Σε αντίθεση με τη διάταξη EPROM, στην οποία διαγράφονται όλες οι κυψελίδες κατά τη διάρκεια της διαγραφής, μια κυψελίδα σε μια EEPROM μπορεί να διαγραφεί μόνο αν είναι "επιλεγμένη". Αυτή η λειτουργία επιτυγχάνεται μέσω του τρανζίστορ επιλογής, που περιέχεται σε κάθε κυψελίδα. Αυτά τα χαρακτηριστικά "διαγράψιμου bit" καθιστούν την EEPROM πιο ευέλικτη. Ωστόσο, το χαρακτηριστικό 2T (ένα τρανζίστορ επιλογής συν ένα τρανζίστορ αποθήκευσης)/κυψελίδα της EEPROM περιορίζει την ικανότητα αποθήκευσης.

### 1.3.2.2 Μνήμη Flash

Η δομή της κυψελίδας της μνήμης Flash αποτελείται από τρία στρώματα πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Η κυψελίδα προγραμματίζεται από ένα μηχανισμό έγχυσης θερμού φορέα παρόμοιο με την EPROM. Η διαγραφή πραγματοποιείται με εκπομπή ηλεκτρονίων από την πλωτή πύλη σε μια πύλη διαγραφής. Η πύλη διαγραφής τροφοδοτείται με ενισχυμένη τάση που καθιστά δυνατή την εκπομπή πεδίου από την πλωτή πύλη. Η ταχύτητα διαγραφής είναι πολύ πιο γρήγορη από αυτή της EPROM, έτσι και το

όνομα "Flash". Οι κυψελίδες αποθήκευσης σε μια μνήμη Flash χωρίζονται σε διάφορους τομείς (ή μπλοκ). Η διαγραφή εκτελείται σε έναν επιλεγμένο τομέα με τη διαδικασία σήραγγας. Κατά τη διάρκεια της διαγραφής, όλες οι κυψελίδες στον επιλεγμένο τομέα διαγράφονται ταυτόχρονα. Το τρίτο στρώμα πολυκρυσταλλικού πυριτίου χρησιμοποιείται τόσο ως πύλη του τρανζίστορ επιλογής, όσο και ως πύλη ελέγχου της κυψελίδας και το χαρακτηριστικό  $1T/$ κυψελίδα καθιστά τη χωρητικότητα αποθήκευσης της μνήμης Flash υψηλότερη από αυτή της EEPROM.

Η βάση της μνήμης Flash είναι πανομοιότυπη με την EEPROM, αλλά διαφέρει πολύ η εσωτερική διάταξη. Η Flash επιτρέπει στη μνήμη της να γράφεται κατά μεγάλα κομμάτια, γεγονός που απλοποιεί την εσωτερική διασύνδεση και επιτρέπει μεγαλύτερη πυκνότητα. Η πυκνότητα της μνήμης αποθήκευσης είναι ο βασικός παράγοντας κόστους στα περισσότερα συστήματα υπολογιστών και λόγω της Flash έχει εξελιχθεί σε μια από τις χαμηλότερου κόστους διατάξεις solid-state μνήμης που υπάρχουν. Ξεκινώντας από το 2000, η ζήτηση για ολοένα και μεγαλύτερες ποσότητες Flash οδήγησε τους κατασκευαστές στη χρήση μόνο των πιο εξελιγμένων συστημάτων παραγωγής ώστε να αυξήσουν την πυκνότητα κατά το δυνατόν περισσότερο. Παρόλο που κάποια όρια στην κατασκευή αρχίζουν να μπαίνουν στο παιχνίδι, νέες τεχνικές «πολλαπλών bit» φαίνεται πως μπορούν να διπλασιάσουν ή να τετραπλασιάσουν την πυκνότητα ακόμα και στα υπάρχοντα πλάτη των γραμμών.

Η μνήμη Flash NOR έδωσε τη δυνατότητα κατασκευής ενός μη πτητικού μέσου αποθήκευσης για την αποθήκευση του κώδικα των προγραμμάτων, συμπεριλαμβάνοντας το BIOS του υπολογιστή και το λογισμικό για διάφορα καταναλωτικά προϊόντα. Η μνήμη Flash NOR αποτέλεσε επίσης τη βάση για τις πρώτες κάρτες μνήμης Flash και τις μη πτητικές μονάδες SSD.

Η μνήμη Flash NAND υποσχέθηκε χαμηλότερο κόστος ανά bit από τη μνήμη Flash NOR και ταχύτερη διαχείριση του προγραμματισμού και της διαγραφής. Σε αντίθεση με τη μνήμη Flash NOR που είναι οργανωμένη με βάση το byte ή λέξη, η μνήμη Flash NAND είναι οργανωμένη σε σελίδες και διαγράφεται με βάση το μπλοκ. Ένα μπλοκ αποτελείται από 64 ή περισσότερες σελίδες. Η οργάνωση της μνήμης Flash NAND συμβάλλει στη μείωση του κόστους ανά bit αλλά δεν είναι κατάλληλη για τυχαία προσπέλαση. Ως εκ τούτου, η μνήμη Flash NAND χρησιμοποιείται ως μέσο αποθήκευσης δεδομένων, παρόμοιο με τα οπτικά μέσα και τις μονάδες σκληρού δίσκου.

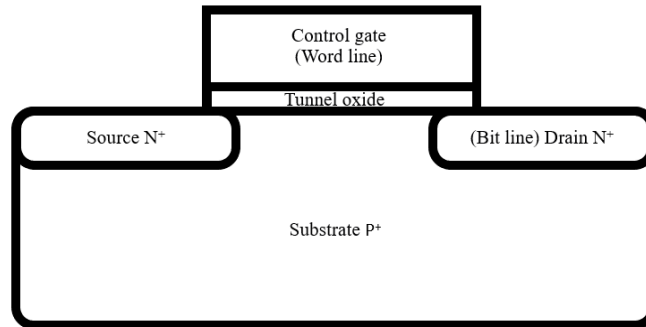
Η μνήμη Flash NOR χρησιμοποιεί μια παράλληλη αρχιτεκτονική πίνακα, όπου κάθε κυψελίδα μπορεί να έχει πρόσβαση μέσω μιας επαφής. Η άμεση πρόσβαση στην κυψελίδα είναι ο λόγος για την ανώτερη απόδοση τυχαίας πρόσβασης της μνήμης. Ο πίνακας NOR είναι κοινά γειωμένος.

Εν αντιθέσει οι κυψελίδες στη μνήμη Flash NAND οργανώνονται σειριακά. Η απόδοση της τυχαίας πρόσβασης είναι αργή λόγω του γεγονότος ότι δεν υπάρχουν επαφές, που να έχουν άμεση πρόσβαση στις κυψελίδες μνήμης. Ωστόσο, για παράδειγμα επειδή υπάρχουν μόνο δύο επαφές σε κάθε 32 κυψελίδες μνήμης, το ενεργό μέγεθος της κυψελίδας είναι πολύ μικρότερο από τη μνήμη Flash NOR, με αποτέλεσμα μικρότερου μεγέθους τσιπ και μικρότερο κόστος ανά bit. Το μέγεθος των κυψελίδων της μνήμης Flash NAND είναι γενικά στην περιοχή επιφάνειας  $4F^2$  όπου  $F$  είναι ο κανόνας σχεδιασμού του τσιπ. Λόγω της παράλληλης αρχιτεκτονικής της μνήμης Flash NOR, το μέγεθος των κυψελίδων είναι σχετικά μεγάλο με επιφάνεια περίπου στα  $10F^2$ . Η σειριακή αρχιτεκτονική και το μικρό μέγεθος των κυψελίδων κάνουν τη μνήμη Flash NAND να είναι βελτιστοποιημένη για μαζική αποθήκευση χαμηλού κόστους, ενώ η μνήμη Flash NOR είναι βελτιστοποιημένη για απόδοση σε αποθήκευση και εκτέλεση κώδικα [42].

Ακολουθεί η περιγραφή του τρόπου λειτουργίας της μνήμης Flash. Αρχικά παρουσιάζεται η δομή ενός τρανζίστορ στην εικόνα 8. Αποτελείται από την πύλη ελέγχου,

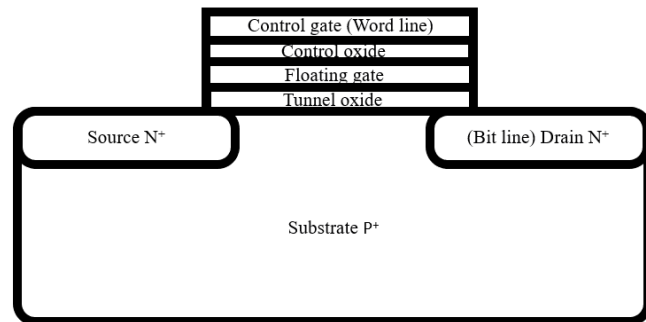
ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ MOS ME ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ  
ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ΜΕ LASER

το οξείδιο σήραγγας, το υπόστρωμα με υψηλή συγκέντρωση οπών, την πηγή και τον απαγωγό με υψηλή συγκέντρωση ηλεκτρονίων. Μια εφαρμογή μικρής τάσης στη πύλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ελέγξει τη ροή του ρεύματος μεταξύ πηγής και απαγωγού.



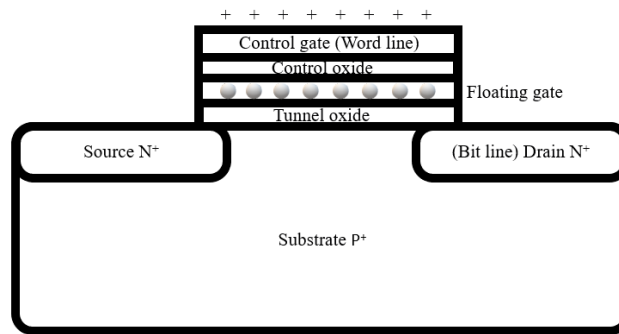
Εικόνα 8: Δομή MOSFET.

Μη πτητική μνήμη μπορεί να δημιουργηθεί αν στο τρανζίστορ προστεθεί μια δεύτερη πύλη που αποκαλείται πλωτή πύλη (διότι είναι μονωμένη γύρω γύρω) ντοπαρισμένου πολυκρυσταλλικού πυριτίου και ένα λεπτό στρώμα οξειδίου. Συνεπώς, ένα λεπτό στρώμα οξειδίου ελέγχου μονώνει την πύλη ελέγχου με την πλωτή πύλη, καθώς και το οξείδιο της σήραγγας μονώνει την πλωτή πύλη με το υπόστρωμα. Αρχικά, όσο δεν υπάρχουν φορτία στην πλωτή πύλη, η κυψελίδα μνήμης θεωρείται ότι αναπαριστά το δυαδικό 1. Στην εικόνα 9 παρουσιάζεται μια κυψελίδα μνήμης Flash στην κατάσταση 1.



Εικόνα 9: Κυψελίδα μνήμης Flash στη κατάσταση 1.

Με γείωση της πηγής και εφαρμόζοντας μια θετική τάση στον απαγωγό καθώς και στην πύλη (δημιουργώντας δηλαδή κανάλι n στον ημιαγωγό κοντά στη διεπαφή ημιαγωγού οξειδίου σήραγγας, μεταξύ πηγής και απαγωγού) προκαλείται διέλευση ηλεκτρονίων μέσω όλου του στρώματος του οξειδίου, με αποτέλεσμα τα ηλεκτρικά φορτία να παγιδεύονται στην πλωτή πύλη. Τα φορτία παραμένουν στην πλωτή πύλη ακόμα και μετά την αποσύνδεση της παροχής ρεύματος, εγγράφοντας τη μνήμη λόγω της ύπαρξης φορτισμένης κατάστασης. Σε αυτή την κατάσταση η κυψελίδα μνήμης θεωρείται ότι αναπαριστά το δυαδικό 0 που παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα 10, με γκρι σφαίρες αναπαριστούμε τα ηλεκτρόνια που έχουν πλέον μεταβεί στη πλωτή πύλη.



Εικόνα 10: Κυψελίδα μνήμης Flash στη κατάσταση 0.

Με γείωση της πύλης ελέγχου, αποσυνδέοντας τον απαγωγό και εφαρμόζοντας θετική τάση στην πηγή, η κυψελίδα μνήμης διαγράφεται (θεωρείται η κατάσταση που δεν υπάρχει φόρτιση), επανερχόμαστε δηλαδή στην αρχική κατάσταση, αναπαριστώντας το δυαδικό 1.

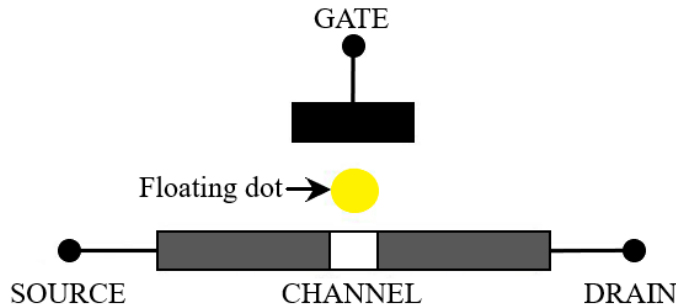
Γενικά όσον αφορά τη λειτουργία των μνημών σχετικά με το που θεωρούμε την κατάσταση 0 και 1, ισχύει ο κανόνας, ότι στην κατάσταση 1 έχουμε υψηλότερο μετρούμενο ρεύμα ή υψηλότερο από την 0 και στη κατάσταση 0 έχουμε μηδενικό ρεύμα ή χαμηλότερο από την κατάσταση 1. Σε τέτοιου τύπου μνήμες που αναλύουμε τώρα η παρουσία ηλεκτρονίων στην πλωτή πύλη δημιουργεί μεγαλύτερο εμπόδιο στη διέλευση του ρεύματος, άρα χαμηλότερο ρεύμα και συνεπώς θεωρείται η κατάσταση 0.

Για να διαβαστεί μια κυψελίδα, εφαρμόζεται τάση στην πύλη ελέγχου και επιχειρείται η ροή ρεύματος από την πηγή προς τον απαγωγό. Αν δεν υπάρχει ροή ρεύματος, σημαίνει ότι η πλωτή πύλη είναι φορτισμένη (δυαδικό 0). Εάν υπάρχει ροή ρεύματος, η πλωτή πύλη δεν είναι φορτισμένη (δυαδικό 1).

### 1.3.3 Μνήμες μικρών διαστάσεων με νανοκρυστάλλους

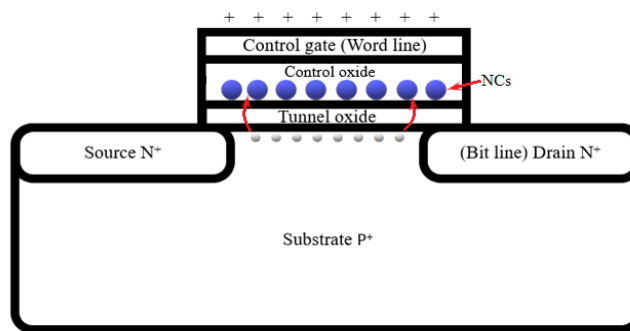
Μια σχετική δομή τέτοιας διάταξης είναι η κυψελίδα μνήμης ενός ηλεκτρονίου (SEMC), η οποία είναι μια ειδική περίπτωση της δομής πλωτής πύλης. Με τη μείωση του μήκους της πλωτής πύλης σε πολύ μικρές διαστάσεις, π.χ. 10nm, λαμβάνουμε τη SEMC. Μια όψη της διατομής μιας SEMC φαίνεται στην εικόνα 11. Η πλωτή τελεία πλέον αντιστοιχεί στην πλωτή πύλη της εικόνας 7 (b). Λόγω του μικρού μεγέθους της, η χωρητικότητα είναι επίσης πολύ μικρή (~1aF). Όταν ένα ηλεκτρόνιο με σήραγγα μεταφέρεται στη πλωτή τελεία, λόγω της μικρής χωρητικότητας, δημιουργείται ένα μεγάλο φράγμα σήραγγας για την αποτροπή της μεταφοράς ενός άλλου ηλεκτρονίου. Το SEMC είναι η απόλυτη κυψελίδα μνήμης πλωτής πύλης, δεδομένου ότι χρειαζόμαστε μόνο ένα ηλεκτρόνιο για αποθήκευση πληροφοριών. Μια μνήμη ενός ηλεκτρονίου με πυκνότητες τόσο υψηλές όσο 256terabits ( $256 \times 10^{12}$ bits), που μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοκρασία δωματίου, είναι δυνατόν να κατασκευαστεί.

Έχουν προταθεί διάφορα υλικά για κβαντικές τελείες όπως μέταλλα (έχει επιτευχθεί διάσταση νανοκρυστάλλου 1nm [20], που μπορεί να επιτύχει φόρτιση ενός μόνο ηλεκτρονίου, γενικά όσο αυξάνονται οι διαστάσεις των σωματιδίων, τόσο μεγαλύτερος αριθμός φορτίων μπορεί να αποθηκευτεί, αλλά υπάρχει και το αναδυόμενο πρόβλημα του ρεύματος διαρροής), ημιαγωγοί (συνήθως ενώσεις πυριτίου χρησιμοποιούνται) [43,44], γραφένιο [45,46], ακόμα και νανοσωλήνες άνθρακα [47].



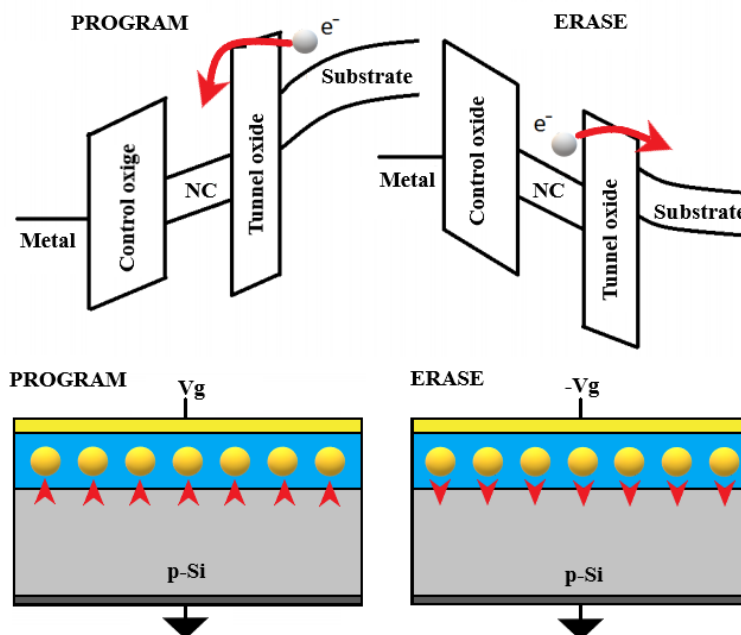
Εικόνα 11: Εικόνα κυψελίδας μνήμης ενός ηλεκτρονίου.

Ακολουθεί μια εικόνα της κατάστασης 0 (εικόνα 12) σε μνήμη τύπου Flash με νανοκρυστάλλους, οι μωβ σφαίρες είναι οι νανοκρύσταλλοι και οι γκρι τα ηλεκτρόνια όπου παρουσιάζεται η φόρτιση των νανοκρυστάλλων με ηλεκτρόνια, η εκφόρτιση των νανοκρυστάλλων από τα ηλεκτρόνια αντιστοιχεί στην κατάσταση 1.



Εικόνα 12: Κυψελίδα μνήμης με νανοκρυστάλλους στη κατάσταση 0.

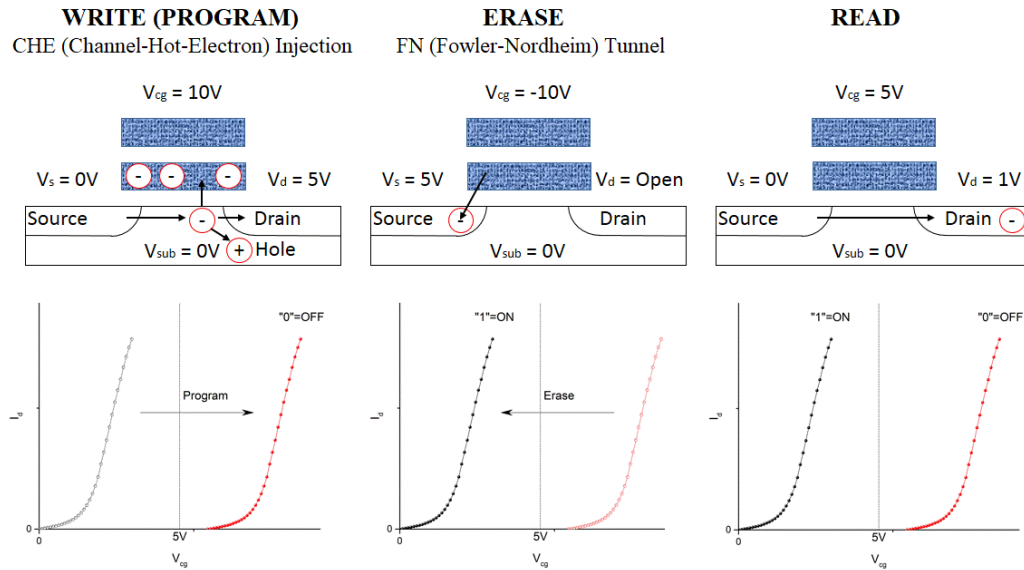
Σε μνήμες με νανοκρυστάλλους έχουμε εγγραφή της πληροφορίας, όταν ηλεκτρόνια από το υπόστρωμα μεταφέρονται διάμεσου του οξειδίου σήραγγας στους νανοκρυστάλλους και διαγραφή της πληροφορίας, όταν ηλεκτρόνια από τους νανοκρυστάλλους μεταφέρονται διάμεσου του οξειδίου σήραγγας στο υπόστρωμα. Η εικόνα 13 παρουσιάζει το ενεργειακό διάγραμμα κατά την εγγραφή και διαγραφή της μνήμης με νανοκρυστάλλους συνδυαστικά με την πραγματική εικόνα.



Εικόνα 13: Ενεργειακό διάγραμμά κατά την εγγραφή και διαγραφή μνήμης με νανοκρυστάλλους.

ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ MOS ME ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ  
ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ΜΕ LASER

Η εικόνα 14 συνοπτικά περιγράφει την όλη διαδικασία της εγγραφής, διαγραφής και ανάγνωσης, με εικονική αναπαράσταση, καθώς και τους μηχανισμούς φόρτισης και εκφόρτισης των νανοκρυστάλλων, συνδυαστικά με την καμπύλη ρεύματος - τάσης.



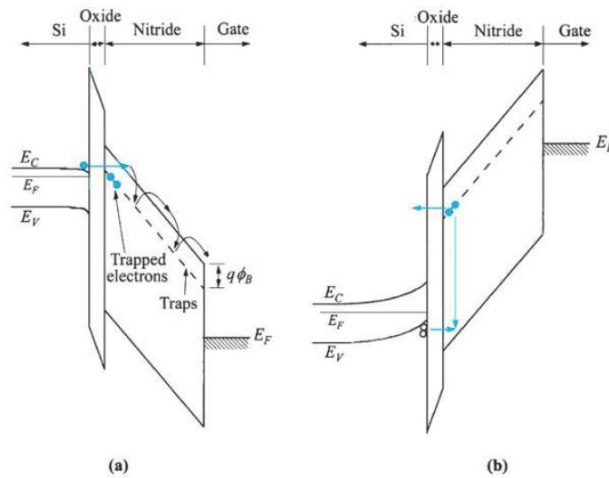
Εικόνα 14: Αναπαράσταση του τρόπου εγγραφής, διαγραφής και ανάγνωσης με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις τάσης-ρεύματος.

### 1.3.4 Τρανζίστορ MNOS

Στο τρανζίστορ MNOS όπως φαίνεται στην εικόνα 7 (c), το στρώμα νιτρίδιου του πυριτίου χρησιμοποιείται ως ένα αποτελεσματικό υλικό για την παγίδευση ηλεκτρονίων, καθώς το ρεύμα διέρχεται μέσω του διηλεκτρικού. Έχουν χρησιμοποιηθεί και άλλοι μονωτές, αντί του στρώματος νιτρίδιου του πυριτίου, όπως το οξείδιο του αργιλίου, το οξείδιο του τανταλίου και το οξείδιο του τιτανίου, αλλά δεν είναι τόσο συνηθισμένοι. Τα ηλεκτρόνια παγιδεύονται στο στρώμα νιτρίδιου κοντά στη διεπιφάνεια οξειδίου-νιτρίδιου. Η λειτουργία του οξειδίου είναι να παρέχει μια καλή διεπαφή στον ημιαγωγό και να εμποδίζει την οπίσθια σήραγγα του εγχυμένου φορτίου, για την καλύτερη συγκράτηση του φορτίου. Το πάχος του οξειδίου πρέπει να είναι ισορροπημένο, μεταξύ του χρόνου συγκράτησης σε σχέση με την τάση και τον χρόνο προγραμματισμού.

Η εικόνα 15 δείχνει το βασικό διάγραμμα ζωνών, για τις λειτουργίες προγραμματισμού και διαγραφής. Στη διαδικασία προγραμματισμού, μια μεγάλη θετική τάση εφαρμόζεται στην πύλη. Ηλεκτρόνια εκπέμπονται από το υπόστρωμα στην πύλη. Οι μηχανισμοί αγωγιμότητας του ρεύματος στα δύο διηλεκτρικά στρώματα είναι πολύ διαφορετικοί. Το ρεύμα μέσω του οξειδίου είναι με σήραγγα ηλεκτρονίων μέσω του τραπεζοειδούς φράγματος του οξειδίου, που ακολουθείται από τριγωνικό φράγμα στο νιτρίδιο. Αυτή η μορφή σήραγγας, έχει αναγνωριστεί ως τροποποιημένη σήραγγα Fowler-Nordheim, σε αντίθεση με τη σήραγγα Fowler-Nordheim μέσω ενός ενιαίου τριγωνικού φραγμού. Στη συνέχεια, τα ηλεκτρόνια διέρχονται από το στρώμα νιτρίδιου με τη μεταφορά Frenkel-Poole. Όταν αρχίσει να δημιουργείται αρνητικό φορτίο, το πεδίο του οξειδίου μειώνεται και η τροποποιημένη σήραγγα Fowler-Nordheim αρχίζει να περιορίζει το ρεύμα. Στη διαδικασία διαγραφής, μια μεγάλη αρνητική τάση εφαρμόζεται στην πύλη. Η διαδικασία εκφόρτισης, πιστεύεται ότι οφείλεται στη σήραγγα των παγιδευμένων

ηλεκτρονίων πίσω στο υπόστρωμα του πυριτίου. Νέα στοιχεία δείχνουν ότι η κύρια διαδικασία οφείλεται στη σήραγγα οπών από το υπόστρωμα, για την εξουδετέρωση των παγιδευμένων ηλεκτρονίων.



**Εικόνα 15:** Επανεγγραφή της μνήμης MNOS. (α) Προγραμματισμός: τα ηλεκτρόνια με σήραγγα μεταφέρονται και παγιδεύονται στο νιτρίδιο μέσω του οξειδίου. (β) Διαγραφή: οι οπές με σήραγγα μεταφέρονται μέσω του οξειδίου για να εξουδετερώσουν τα παγιδευμένα ηλεκτρόνια και μεταφορά με σήραγγα των παγιδευμένων ηλεκτρονίων [49].

Τα πλεονεκτήματα του τρανζίστορ MNOS, που είναι μη πτητική διάταξη RAM, περιλαμβάνουν τη λογική ταχύτητα προγραμματισμού και διαγραφής. Έχει επίσης υψηλή αντοχή στην ακτινοβολία, λόγω του ελαχίστου πάχους οξειδίου και της απουσίας πλωτής πύλης. Τα μειονεκτήματα του τρανζίστορ MNOS είναι οι μεγάλες τάσεις προγραμματισμού και διαγραφής, όπως επίσης η μη ομοιόμορφη τάση κατωφλίου από διάταξη σε διάταξη. Η διέλευση του ρεύματος σήραγγας, αυξάνει βαθμιαία την πυκνότητα των διεπιφανειακών παγίδων στην επιφάνεια του ημιαγωγού, επίσης προκαλεί απώλεια της ικανότητας παγίδευσης λόγω διαρροής ή σήραγγας των παγιδευμένων ηλεκτρονίων πίσω στο υπόστρωμα. Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός στενού παράθυρου τάσης κατωφλίου, μετά από πολλούς κύκλους προγραμματισμού και διαγραφής. Το κύριο πρόβλημα αξιοπιστίας του τρανζίστορ MNOS είναι η συνεχής απώλεια φορτίου μέσω του λεπτού οξειδίου. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι, αντίθετα από μια δομή πλωτής πύλης, το ρεύμα προγραμματισμού πρέπει να διέρχεται από ολόκληρη την περιοχή του καναλιού, έτσι ώστε το παγιδευμένο φορτίο να κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το κανάλι. Σε ένα τρανζίστορ πλωτής πύλης, η φόρτιση που εισάγεται στην πλωτή πύλη, μπορεί να αναδιανεμηθεί μέσα στο υλικό της πύλης και η έγχυση μπορεί να λάβει χώρα σε οποιοδήποτε σημείο του καναλιού.

### 1.3.5 Τρανζίστορ SONOS

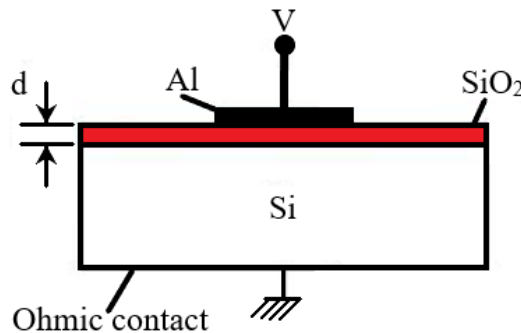
Το τρανζίστορ SONOS (πυρίτιο-οξείδιο-νιτρίδιο-οξείδιο-πυρίτιο) (εικόνα 7 (d)) ονομάζεται μερικές φορές το τρανζίστορ MONOS (μέταλλο-οξείδιο-νιτρίδιο-οξείδιο-πυρίτιο). Είναι παρόμοιο με ένα τρανζίστορ MNOS, εκτός από το ότι έχει μια πρόσθετη στρώση οξειδίου φραγής, τοποθετημένο μεταξύ της πύλης και της στρώσης νιτρίδιου, σχηματίζοντας μια στοιβάδα ONO (οξείδιο-νιτρίδιο-οξείδιο). Αυτό το ανώτερο στρώμα οξειδίου έχει συνήθως παρόμοιο πάχος με το στρώμα του οξειδίου του πυθμένα. Η λειτουργία του οξειδίου φραγής είναι να αποτρέπει την έγχυση ηλεκτρονίων από το μέταλλο στη στιβάδα νιτρίδιου κατά τη λειτουργία διαγραφής. Ως αποτέλεσμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα λεπτότερο στρώμα νιτρίδιου, που οδηγεί σε χαμηλότερη τάση



προγραμματισμού, καθώς και σε καλύτερη συγκράτηση φορτίου. Το τρανζίστορ SONOS αντικαθιστά την παλαιότερη διαμόρφωση MNOS, αλλά η αρχή λειτουργίας παραμένει η ίδια.

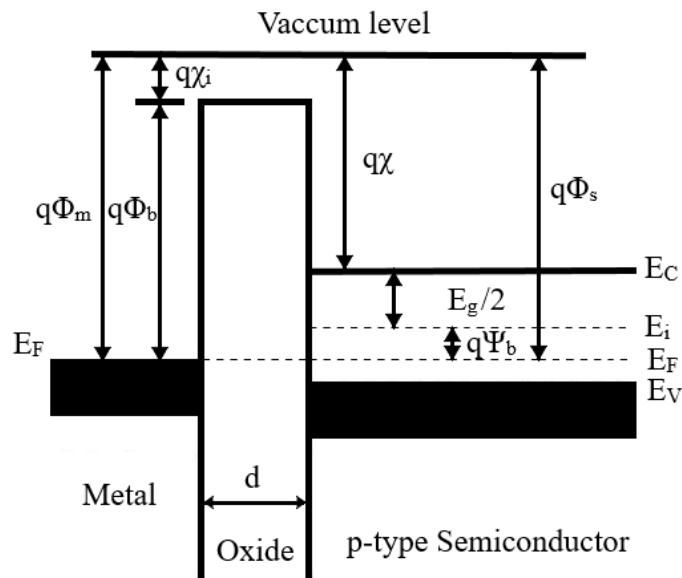
#### 1.4 Ιδανικός πυκνωτής MOS

Η διατομή της διάταξης MOS φαίνεται στην εικόνα 16, όπου  $d$  είναι το πάχος του οξειδίου και  $V$  είναι η εφαρμοζόμενη τάση επί της μεταλλικής πλάκας. Χρησιμοποιούμε τη σύμβαση ότι η τάση  $V$  είναι θετική, όταν η μεταλλική πλάκα είναι θετικά πολωμένη σε σχέση με την ωμική επαφή και ότι η τάση  $V$  είναι αρνητική, όταν η μεταλλική πλάκα είναι αρνητικά πολωμένη σε σχέση με την ωμική επαφή.



Εικόνα 16: Διατομή πυκνωτή MOS.

Το διάγραμμα ενεργειακών ζωνών ενός ιδανικού πυκνωτή MOS, ημιαγωγού τύπου p, σε τάση  $V=0$  φαίνεται στην εικόνα 17. Το έργο εξόδου είναι η ενεργειακή διαφορά μεταξύ του επιπέδου Fermi και του επιπέδου κενού (δηλαδή  $q\Phi_m$  για το μέταλλο και  $q\Phi_s$  για τον ημιαγωγό). Επίσης παρουσιάζεται η ηλεκτρονιακή συγγένεια  $q\chi$ , η οποία είναι η ενεργειακή διαφορά μεταξύ της ζώνης αγωγιμότητας και της στάθμης κενού στον ημιαγωγό,  $q\chi_i$  η ηλεκτρονιακή συγγένεια του οξειδίου,  $q\Phi_B$  το φράγμα ενέργειας μεταξύ του μετάλλου και του οξειδίου και  $q\psi_b$  η ενεργειακή διαφορά μεταξύ του επιπέδου Fermi  $E_F$  και του εγγενούς επιπέδου Fermi  $E_i$ .



Εικόνα 17: Διάγραμμα ενεργειακής ζώνης ενός ιδανικού πυκνωτή MOS ημιαγωγού τύπου p σε  $V=0$ .

Ένα ιδανικό MOS ορίζεται ως εξής: (α) Σε μηδενική εφαρμοζόμενη τάση, η ενεργειακή διαφορά μεταξύ του έργου εξόδου του μετάλλου  $q\phi_m$  και του έργου εξόδου του ημιαγωγού  $q\phi_s$  είναι μηδέν ή η διαφορά έργων εξόδου  $q\phi_{ms}$  είναι μηδέν:

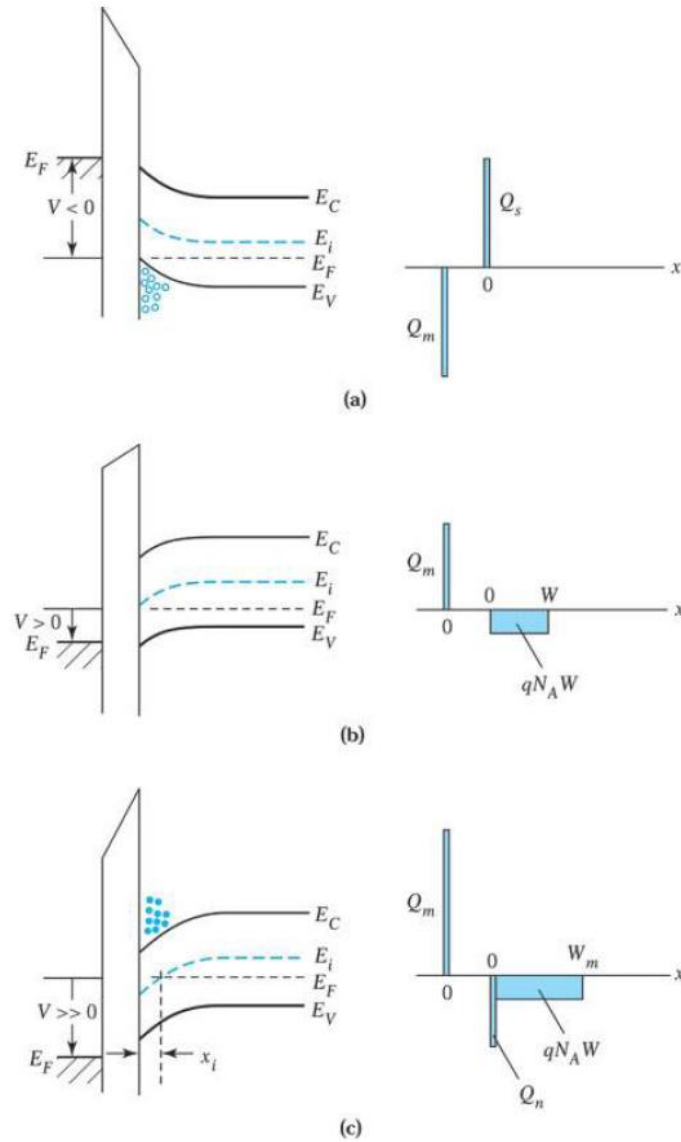
$$q\phi_{ms} \equiv q(\phi_m - \phi_s) = q\phi_m - \left( q\chi + \frac{E_g}{2} + q\psi_B \right) = 0 \quad (1)$$

Όπου το άθροισμα των τριών στοιχείων της παρένθεσης είναι ίσο με  $q\phi_s$ . Με άλλα λόγια, η ενεργειακή ζώνη είναι επίπεδη (κατάσταση επίπεδης ζώνης) όταν δεν υπάρχει εφαρμοζόμενη τάση. (β) Τα μόνα φορτία που μπορούν να υπάρξουν στη δομή κάτω από οποιαδήποτε κατάσταση πόλωσης, είναι εκείνα που βρίσκονται στον ημιαγωγό στην επιφάνειά του ή κοντά στην επιφάνειά του με το οξειδίο και εκείνα με ίσο και αντίθετο πρόσημο, που βρίσκονται στο μέταλλο και στη διεπιφάνεια του με το μονωτή. Δηλαδή δεν υπάρχουν παγίδες φορτίου στις διεπιφάνειες μετάλλο-μονωτή και μονωτή-ημιαγωγού ούτε κάποιο είδος φορτίου στο οξειδίο. (γ) Ο μονωτής (δηλαδή το οξειδίο) είναι ιδανικός, η αντίστασή του είναι άπειρη και επομένως δεν υπάρχει μεταφορά φορτίου διαμέσου του οξειδίου υπό συνθήκες συνεχούς (dc) πόλωσης.

Όταν σε ένα ιδανικό πυκνωτή MOS εφαρμόζονται θετικές ή αρνητικές τάσεις, τρεις περιπτώσεις μπορούν να εμφανιστούν στην επιφάνεια των ημιαγωγών. Για έναν ημιαγωγό τύπου p, όταν εφαρμόζεται αρνητική τάση ( $V < 0$ ) στη μεταλλική πλάκα, θα προκληθεί αύξηση θετικών φορέων (οπών) στη διεπιφάνεια  $\text{SiO}_2\text{-Si}$ . Στην περίπτωση αυτή, οι ενεργειακές ζώνες κοντά στην επιφάνεια του ημιαγωγού κάμπτονται προς τα πάνω, όπως φαίνεται στην εικόνα 18 (a). Σε έναν ιδανικό πυκνωτή MOS, δεν ρέει ρεύμα στη διάταξη ανεξάρτητα από την τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης, επομένως το επίπεδο Fermi στον ημιαγωγό παραμένει σταθερό. Η πυκνότητα φορέων στον ημιαγωγό εξαρτάται εκθετικά από τη διαφορά ενέργειας  $E_i - E_F$ , δηλαδή,

$$P_p = n_i e^{(E_i - E_F)/kT} \quad (2)$$

Η κάμψη προς τα πάνω της ενεργειακής ζώνης στην επιφάνεια του ημιαγωγού, προκαλεί αύξηση της ενέργειας  $E_i - E_F$ , η οποία με τη σειρά της προκαλεί αυξημένη συγκέντρωση ή συσσώρευση οπών, κοντά στη διεπιφάνεια οξειδίου ημιαγωγού. Αυτή ονομάζεται κατάσταση συσσώρευσης (accumulation). Η αντίστοιχη κατανομή φορτίου φαίνεται στη δεξιά πλευρά της εικόνας 18 (a), όπου  $Q_s$  είναι το θετικό φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας στον ημιαγωγό και  $Q_m$  είναι το αρνητικό φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας ( $|Q_m| = Q_s$ ) στο μέταλλο. Όταν μια μικρή θετική τάση ( $V > 0$ ) εφαρμόζεται σε έναν ιδανικό πυκνωτή MOS, οι ενεργειακές ζώνες κοντά στην επιφάνεια των ημιαγωγών κάμπτονται προς τα κάτω και οι φορείς πλειονότητας (οπές) εξαντλούνται (εικόνα 18 (b)). Αυτή ονομάζεται κατάσταση απογύμνωσης (depletion). Το χωρικό φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας,  $Q_{sc}$ , στον ημιαγωγό είναι ίσο με  $-qN_A W$ , όπου  $W$  είναι το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης.



Εικόνα 18: Διαγράμματα ενεργειακών ζωνών και κατανομές φορτίου ενός ιδανικού πυκνωτή MOS στις περιπτώσεις (a) συσσώρευσης (accumulation), (b) απογύμνωσης (depletion) και (c) αντιστροφής (inversion) [49].

Όταν εφαρμόζεται μεγαλύτερη θετική τάση, οι ενεργειακές ζώνες κάμπτονται προς τα κάτω ακόμη περισσότερο, έτσι ώστε το εγγενές επίπεδο  $E_i$  στην επιφάνεια να διασχίζει το επίπεδο Fermi, όπως φαίνεται στην εικόνα 18 (c). Ως αποτέλεσμα, η θετική τάση της πύλης αρχίζει να προκαλεί περίσσεια αρνητικών φορέων (ηλεκτρονίων) στη διεπιφάνεια  $\text{SiO}_2\text{-Si}$ . Η συγκέντρωση ηλεκτρονίων στον ημιαγωγό εξαρτάται εκθετικά από τη διαφορά ενέργειας  $E_F - E_i$ , και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$n_p = n_i e^{(E_F - E_i)/kT} \quad (3)$$

Στην περίπτωση που φαίνεται στην εικόνα 18 (c),  $(E_F - E_i) > 0$ . Επομένως, η συγκέντρωση ηλεκτρονίων  $n_p$ , στη διεπαφή είναι μεγαλύτερη από τη συγκέντρωση  $n_i$  και η συγκέντρωση οπών, που δίνεται από την εξίσωση 2 είναι μικρότερη από  $n_i$ . Ο αριθμός των ηλεκτρονίων (φορέων μειονότητας) στην επιφάνεια είναι μεγαλύτερος από τις οπές (φορείς πλειονότητας). Στην επιφάνεια έχουμε συγκέντρωση φορέων μειονότητας. Αυτή η κατάσταση ονομάζεται αντιστροφή.

Αρχικά, η επιφάνεια είναι σε κατάσταση ασθενούς αντιστροφής, καθώς η συγκέντρωση ηλεκτρονίων είναι μικρή. Καθώς οι ενεργειακές ζώνες κάμπτονται περαιτέρω, τελικά η άκρη της ζώνης αγωγιμότητας πλησιάζει στο επίπεδο Fermi. Η

εμφάνιση ισχυρής αντιστροφής συμβαίνει όταν η συγκέντρωση ηλεκτρονίων κοντά στη διεπιφάνεια SiO<sub>2</sub>-Si είναι ίση με το επίπεδο ντόπινγκ του υποστρώματος. Μετά από αυτό το σημείο τα περισσότερα πρόσθετα αρνητικά φορτία στον ημιαγωγό αποτελούν το φορτίο Q<sub>n</sub> (εικόνα 18 (c)) σε ένα πολύ στενό στρώμα αντιστροφής τύπου n, 0 ≤ x ≤ x<sub>i</sub>, όπου το x<sub>i</sub> είναι το πλάτος της περιοχής αντιστροφής. Τυπικά, η τιμή του x<sub>i</sub> κυμαίνεται από 1 έως 10 nm και είναι πάντοτε πολύ μικρότερη από το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης.

Μόλις παρουσιαστεί έντονη αντιστροφή, το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης φτάνει στο μέγιστο. Αυτό συμβαίνει επειδή, όταν οι ενεργειακές ζώνες κάμπτονται προς τα κάτω, αρκετά μακριά από το να εμφανισθεί ισχυρή αντιστροφή, ακόμη και μια πολύ μικρή αύξηση στην κάμψη της ενεργειακής ζώνης, που αντιστοιχεί σε μια πολύ μικρή αύξηση στο πλάτος του στρώματος απογύμνωσης, οδηγεί σε μεγάλη αύξηση του φορτίου Q<sub>n</sub> στο στρώμα αντιστροφής. Έτσι, υπό μία κατάσταση ισχυρής αντιστροφής, το φορτίο Q<sub>s</sub> στον ημιαγωγό είναι το άθροισμα του φορτίου Q<sub>n</sub> στο στρώμα αντιστροφής και του φορτίου Q<sub>sc</sub> στην περιοχή απογύμνωσης:

$$Q_s = Q_n + Q_{sc} = Q_n - qN_A W_m \quad (4)$$

όπου W<sub>m</sub> είναι το μέγιστο πλάτος της περιοχής απογύμνωσης.

## 1.5 Πυκνωτής Μετάλλου-Οξειδίου-Ημιαγωγού (MOS)

Ο πυκνωτής ή δίοδος μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού (Metal-Oxide-Semiconductor, MOS) ανήκει στην γενικότερη κατηγορία των δομών μετάλλου-μονωτή-ημιαγωγού (Metal-Insulator-Semiconductor, MIS). Μία δομή MIS είναι ένα σύστημα που αποτελείται από έναν ημιαγωγό (τύπου p ή n), πάνω στον οποίο έχει αναπτυχθεί ένα μονωτικό στρώμα και πάνω από αυτό ένα στρώμα μετάλλου. Συνήθως σαν ημιαγωγός χρησιμοποιείται το πυρίτιο (Si), σαν μονωτής το διοξείδιο του πυριτίου (SiO<sub>2</sub>) και σαν μέταλλο το αλουμίνιο (Al) ή το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (poly-Si) εμπλουτισμένο με υψηλής πυκνότητας προσμίξεις. Ο ημιαγωγός και το μέταλλο αποτελούν τους οπλισμούς του πυκνωτή, ενώ το οξείδιο είναι το διηλεκτρικό του.

Στη μελέτη αυτή σαν μέταλλο χρησιμοποιείται Au και σαν ημιαγωγός πυρίτιο τύπου n. Η εξωτερική τάση V<sub>gate</sub> εφαρμόζεται στο μέταλλο του πυκνωτή, που ονομάζεται και πύλη (gate) του πυκνωτή, με το υπόστρωμα γειωμένο. Θα χρησιμοποιήσουμε τη σύμβαση ότι η τάση V<sub>gate</sub> είναι θετική όταν το μέταλλο πύλης είναι θετικά πολωμένο αναφορικά με το ημιαγωγό υπόστρωμα και το υπόστρωμα είναι τύπου n.

Εάν εφαρμόσουμε στον πυκνωτή MOS συνεχή τάση V<sub>gate</sub>, τότε στην επιφάνεια του μονωτή που είναι σε επαφή με τον ημιαγωγό, αναπτύσσονται επαγωγικά φορτία του ίδιου προσήμου με την εξωτερική πόλωση (καθώς ο μονωτής δεν επιτρέπει κάτω από κανονικές συνθήκες τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος, δημιουργεί αυτά τα φορτία στις διεπιφάνειες του με άλλα υλικά με σκοπό να εξουδετερώσουν τα φορτία της πόλωσης και να διατηρήσουν τη διαφορά δυναμικού στο εσωτερικό του μονωτή μηδέν). Η παρουσία των επαγωγικών φορτίων έχει ως αποτέλεσμα την τροποποίηση της επιφανειακής συγκέντρωσης των φορέων στις διεπιφάνειες και την κάμψη των ενεργειακών ζωνών.

### *Διακρίνουμε τις ακόλουθες τρεις καταστάσεις εξωτερικής πόλωσης:*

#### **I. V<sub>gate</sub> > 0: Κατάσταση Συσσώρευσης (Accumulation)**

Η κατάσταση όταν το υπόστρωμα πυριτίου (Si) τύπου n είναι γειωμένο και μια θετική τάση εφαρμόζεται στο ηλεκτρόδιο πύλης, το μέταλλο αποκτά θετικό φορτίο στη διεπιφάνεια του με το οξείδιο. Ταυτόχρονα, με χωρητική δράση ηλεκτρόνια συσσωρεύονται στη διεπιφάνεια του ημιαγωγού (πυριτίου) με το οξείδιο (Si/SiO<sub>2</sub>).

Με αυτό το τρόπο το θετικό φορτίο της πύλης αντισταθμίζεται από ίση ποσότητα αρνητικού φορτίου στο υπόστρωμα, με αποτέλεσμα να κάμπτονται οι ενεργειακές ζώνες προς τα κάτω. Ο ημιαγωγός είναι Si τύπου n και η πυκνότητα ηλεκτρονίων είναι ίση με τη συγκέντρωση των ατόμων δοτών, σε όλο τον όγκο του ημιαγωγού, εκτός από την περιοχή της διεπιφάνειας του με το οξείδιο, όπου έχει δημιουργηθεί ένα στρώμα συσσώρευσης ηλεκτρονίων. Στην περίπτωση αυτή ο ημιαγωγός, βρίσκεται σε κατάσταση συσσώρευσης (accumulation condition). Η συσσώρευση επιπλέον ηλεκτρονίων στην επιφάνεια του Si, που πρόσκειται στο οξείδιο, οφείλεται στην έλξη αρνητικών φορτίων, από τον όγκο του ημιαγωγού προς την επιφάνειά του, που προκαλείται από την εφαρμογή θετικής τάσης στο ηλεκτρόδιο της πύλης. Επειδή σε ημιαγωγό τύπου n οι ευκίνητοι αρνητικοί φορείς, που υπάρχουν άφθονοι στον όγκο του, είναι τα ηλεκτρόνια, αυτά θα μετακινηθούν προς την επιφάνεια υπό την επίδραση της εφαρμοζόμενης θετικής τάσης στην πύλη του πυκνωτή. Αυτή η συσσώρευση συνεχίζεται μέχρι την εξίσωση των δύο φορτίων στις δύο περιοχές. Εξαιτίας της συσσώρευσης των ηλεκτρονίων στην επιφάνεια του ημιαγωγού, εμφανίζεται ένα δυναμικό  $\Psi_s$ , που ονομάζεται επιφανειακό δυναμικό και οδηγεί σε μία επιφανειακή πτώση τάσης στον ημιαγωγό. Συνεπώς η τάση  $V_{gate}$  στα άκρα του πυκνωτή, ισούται με την πτώση τάσης  $V_{ox}$  κατά μήκος του οξειδίου (δηλαδή του μονωτή του πυκνωτή) και την πτώση τάσης  $\Psi_s$  στην επιφάνεια του ημιαγωγού. Δηλαδή:

$$V_{gate} = V_{ox} + \psi_s \quad (5)$$

## II. $V_{gate} < 0$ : Κατάσταση Απογύμνωσης (Depletion)

Όταν στο μέταλλο πύλης εφαρμόζεται μικρή αρνητική τάση, τα ηλεκτρόνια (φορείς πλειοψηφίας στο Si) απωθούνται μακριά από την επιφάνεια του Si, που πρόσκειται στο οξείδιο, με αυτόν τον τρόπο μια περιοχή του ημιαγωγού, εύρους  $W$ , κοντά στην διεπιφάνεια ημιαγωγού/μονωτή (Si/SiO<sub>2</sub>) απογυμνώνεται από τους φορείς πλειοψηφίας. Η περιοχή αυτή ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης και ο πυκνωτής βρίσκεται τώρα στην κατάσταση απογύμνωσης (depletion condition).

Στην περιοχή αυτή έχουν απομείνει οι (θετικά) ιονισμένοι δότες, αφού τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια, που εξουδετέρωναν το φορτίο τους, έχουν απομακρυνθεί από την περιοχή, εξαιτίας της αρνητικής τάσης, που εφαρμόζεται στον πυκνωτή. Οι ιονισμένοι αυτοί δότες της περιοχής απογύμνωσης, παρέχουν το θετικό φορτίο του ημιαγωγικού οπλισμού του πυκνωτή, που η πυκνότητά του ανά μονάδα επιφανείας δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{sc} = -qN_A W \quad (6)$$

όπου  $q$  το φορτίο του ηλεκτρονίου και  $N_A$  η συγκέντρωση των ατόμων δοτών στο Si. Το πλάτος  $W$  της περιοχής απογύμνωσης δίνεται από τη σχέση:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \psi_s}{qN_A}} \quad (7)$$

Όπου  $\Psi_s$  είναι το επιφανειακό δυναμικό στην κατάσταση απογύμνωσης και  $\varepsilon_s$  η διηλεκτρική σταθερά του Si. Και στην περίπτωση αυτή εμφανίζεται επιφανειακό δυναμικό  $\Psi_s$  στον ημιαγωγό, ενώ εξακολουθεί να ισχύει η σχέση 5.

Οι ενεργειακές ζώνες στην περιοχή της διεπιφάνειας Si/SiO<sub>2</sub> κάμπτονται προς τα πάνω και η στάθμη Fermi  $E_F$  πλησιάζει το μέσο του ενεργειακού χάσματος  $E_i$ . Η διαδικασία σταματά όπως και προηγουμένως, δηλαδή μέχρι την εξίσωση ίσων ποσοτήτων φορτίων στις δύο περιοχές της διάταξης. Στην περιοχή της επιφάνειας

του Si και σε βάθος W το οποίο εξαρτάται από την τιμή της αναστροφής πόλωσης, οι προσμίξεις δοτών ιονίζονται.

### III. $V_{gate} \ll 0$ : Κατάσταση Αντιστροφής (Inversion)

Όταν αυξάνει η αρνητική τάση της πύλης, ολοένα και μεγαλύτερος αριθμός ηλεκτρονίων απωθείται από τη διεπιφάνεια του Si με το οξείδιο, το αποτέλεσμα είναι να διευρύνεται η περιοχή απογύμνωσης και το θετικό φορτίο της να αυξάνει. Μέχρις ότου η τάση της πύλης αποκτήσει τέτοια τιμή, ώστε να μπορεί να συγκρατήσει οπές στην επιφάνεια του Si, συνεχίζει η αύξηση του θετικού φορτίου. Οι οπές αρχίζουν να αυξάνουν στη διεπιφάνεια του Si με το οξείδιο και επιπλέον αύξηση της εφαρμοζόμενης αρνητικής τάσης στην πύλη ( $V_{gate}$ ), επιφέρει αύξηση της συγκέντρωσης των οπών στην επιφάνεια του ημιαγωγού, το αποτέλεσμα είναι η συγκέντρωση τους να γίνει υψηλότερη από αυτή των ηλεκτρονίων στην επιφάνεια. Η επιφάνεια του Si αντιστρέφεται και από τύπου n γίνεται τύπου p, γιατί τώρα υπερτερούν σε αυτή οι οπές έναντι των ηλεκτρονίων. Έτσι στον ημιαγωγό τύπου n έχουμε μία περιοχή της επιφάνειάς του με χαρακτηριστικά τύπου p, η οποία διαχωρίζεται από τον τύπου n όγκο του με μία περιοχή απογύμνωσης, εύρους W. Στην περίπτωση αυτή ο ημιαγωγός βρίσκεται σε κατάσταση αντιστροφής (inversion condition). Το επιφανειακό στρώμα ηλεκτρονίων ονομάζεται στρώμα αντιστροφής (inversion layer) με το εύρος του να είναι της τάξης των μερικών ατομικών διαμέτρων, το οποίο συμβολίζεται με  $W_i$ .

Στην ασθενή αντιστροφή (weak inversion) η συγκέντρωση των οπών στην επιφάνεια, αν και πολύ μεγαλύτερη από αυτή των ηλεκτρονίων στην επιφάνεια, είναι ακόμη μικρότερη από τη συγκέντρωση ηλεκτρονίων στον όγκο του ημιαγωγού. Όταν η  $V_{gate}$  φτάσει την τιμή  $V_T$ , τότε η πυκνότητα οπών στην επιφάνεια του ημιαγωγού είναι ίση με αυτή των ηλεκτρονίων στον όγκο του και τότε έχουμε ισχυρή αντιστροφή (strong inversion). Η τιμή της τάσης της πύλης, για την οποία επιτυγχάνεται ισχυρή αντιστροφή, ονομάζεται τάση κατωφλίου (threshold voltage,  $V_T$ ) του πυκνωτή MOS. Η περαιτέρω αύξηση της  $V_{gate}$  οδηγεί σε αύξηση των οπών, έτσι στο τέλος η συγκέντρωση των οπών στην επιφάνεια ξεπερνά τη συγκέντρωση των ηλεκτρονίων στον όγκο του πυριτίου. Στην κατάσταση αντιστροφής, το θετικό φορτίο του ημιαγωγικού οπλισμού του πυκνωτή, αποτελείται από τις θερμικά δημιουργούμενες “ελεύθερες” οπές στο στρώμα αντιστροφής και τους ιονισμένους δότες στο στρώμα απογύμνωσης. Στην περίπτωση αυτή το συνολικό φορτίο ανά μονάδα επιφανείας στην πλευρά του ημιαγωγού θα είναι:

$$Q_s = Q_p + Q_{sc} \quad (8)$$

Όπου  $Q_p$  είναι το ανά μονάδα επιφανείας φορτίο των οπών του στρώματος αντιστροφής και  $Q_{sc}$  το ανά μονάδα επιφανείας φορτίο των ιονισμένων δοτών στην περιοχή απογύμνωσης. Τη στιγμή που σχηματίζεται το στρώμα αντιστροφής, η περιοχή απογύμνωσης αποκτά το μέγιστο πλάτος της  $W_{max}$ . Αυτό συμβαίνει διότι η περαιτέρω αύξηση της αρνητικής τάσης στο μέταλλο πύλης οδηγεί πιο πολύ σε αντιστροφή παρά σε απογύμνωση, διότι το φορτίο (οπές) ισχυρής αντιστροφής κοντά στη διεπιφάνεια με το οξείδιο, είναι αρκετό και υψηλό θωρακίζοντας τον όγκο του ημιαγωγού από πρόσθετο φορτίο. Η συγκέντρωση οπών στο στρώμα αντιστροφής όπως προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$n_s = n_{0p} \exp\left(\frac{\psi_s}{k_B T}\right) \quad (9)$$

Όπου  $n_{0p}$ : η συγκέντρωση οπών στον όγκο του ημιαγωγού,  $\Psi_s$ : Το επιφανειακό δυναμικό στην κατάσταση αντιστροφής,  $k_B$ : Η σταθερά του Boltzman και T: Η

απόλυτη θερμοκρασία. Η συγκέντρωση των οπών στο στρώμα αντιστροφής αυξάνει εκθετικά με το επιφανειακό δυναμικό (ουσιαστικά με την αύξηση της  $V_{gate}$ , σχέση 5), ενώ το φορτίο  $Q_{sc}$  της περιοχής απογύμνωσης είναι ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας του επιφανειακού δυναμικού  $\Psi_s$  και επομένως πολύ μικρότερο του φορτίου  $Q_p$  του στρώματος αντιστροφής (σχέσεις 6 και 7). Συνεπώς στην ισχυρή αντιστροφή (strong inversion) το συνολικό φορτίο στην πλευρά του ημιαγωγού δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Q_s = Q_p + Q_{sc} = Q_p - qN_A W_{max} \quad (10)$$

Άρα, όσο πιο μεγάλη αρνητική τάση εφαρμόζεται στην πύλη τόσο μεγαλύτερη είναι η κάμψη των ζωνών, με αποτέλεσμα η  $E_F$  να τέμνει και να πηγαίνει κάτω από το ενδογενές επίπεδο Fermi  $E_i$  κοντά στην περιοχή της διεπιφάνειας μονωτή /ημιαγωγού. Εφόσον το πεδίο γίνεται ισχυρότερο με μεγαλύτερη διείδυση στον ημιαγωγό, αυξάνεται το φορτίο  $Q_{sc}$ . Η συσσώρευση φορτίου  $Q_{sc}$  φτάνει σε ένα σημείο που δεν είναι εύκολη η περαιτέρω αύξηση του με συνέχιση της αύξηση του στρώματος απογύμνωσης, καθιστώντας ενεργειακά προτιμητέα την έλξη των οπών μέσα στο στρώμα απογύμνωσης και τη δημιουργία κοντά στην επιφάνεια ενός πολύ λεπτού στρώματος οπών, πλάτους  $W_i$ . Περαιτέρω αύξηση της τάσης δε μεταβάλλει το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης  $W_d$ , αλλά αυξάνει τη συγκέντρωση των οπών στην περιοχή πάχους  $W_p$ . Ορισμένες από τις οπές έλκονται από το κύριο σώμα του ημιαγωγού, όπου ήταν φορείς μειονότητας, οι περισσότερες δημιουργούνται θερμικά από τη ρήξη των δεσμών Si-Si στην περιοχή απογύμνωσης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίου-οπής και το διαχωρισμό τους από το πεδίο. Η επανασύνδεση των οπών με άλλους φορείς αποτρέπεται διότι το στρώμα απογύμνωσης περιέχει πολύ λίγους φορείς. Οι παγίδες φορτίου στο οξειδίου καθώς και στη διεπιφάνειας Si/SiO<sub>2</sub> επηρεάζουν καθοριστικά τις ηλεκτρικές ιδιότητες και τη λειτουργία των κυκλωμάτων που κατασκευάζονται με βάση τη δομή MOS. Για το σκοπό αυτό είναι απαραίτητος ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός, τόσο του διοξειδίου SiO<sub>2</sub>, όσο και της επιφάνειας του ημιαγωγού. Ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός μπορεί να γίνει με μετρήσεις χωρητικότητας-τάσης (C-V). Οι μετρήσεις των χαρακτηριστικών C-V περιλαμβάνουν την εφαρμογή μικρών σημάτων, δηλαδή η εφαρμοζόμενη τάση αποτελείται από μια συνεχή συνιστώσα, (dc) εξωτερική τάση  $V_{gate}$ , πάνω στην οποία υπερτίθεται μια εναλλασσόμενη τάση (ac) μικρού πλάτους (της τάξης των  $k_B T/q=25mV$ ). Η τάση  $V_{gate}$  καθορίζει σε ποια κατάσταση βρίσκεται η δίοδος (συσσώρευση, απογύμνωση, αντιστροφή), ενώ η ac συνιστώσα είναι επιφορτισμένη με το να προκαλεί μεταβολές στο φορτίο, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της χωρητικότητας του συστήματος σε κάθε περίπτωση πόλωσης.

Η συνολική χωρητικότητα C ενός πυκνωτή MOS ορίζεται από τη σχέση [48]:

$$C_{gate} = \frac{d(-Q_s)}{dV_{gate}} \quad (11)$$

Το (-) στην παραπάνω έκφραση υποδηλώνει ότι το φορτίο, που εμφανίζεται στον ημιαγωγό, είναι πάντα αντιθέτου προσήμου από την εφαρμοζόμενη τάση.

Δεδομένου ότι η εξωτερικά εφαρμοζόμενη τάση εμφανίζεται εν μέρει στο οξείδιο ( $V_{ox}$ ) και εν μέρει στον ημιαγωγό ( $\Psi_s$ ) έχουμε ότι:

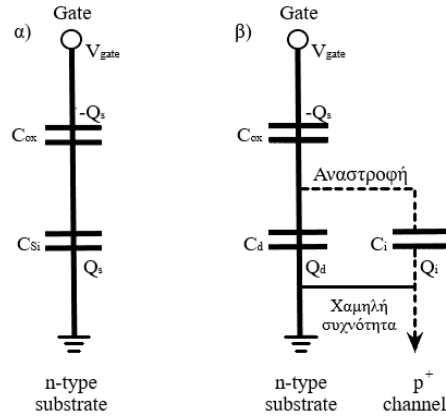
$$V_{gate} = V_{ox} + \psi_s = \frac{-Q_s}{C_{ox}} + \psi_s \quad (12)$$

Όπου η χωρητικότητα του οξειδίου ανά μονάδα επιφάνειας είναι  $C_{ox} = \epsilon_{ox}/d$ , όπου  $\epsilon_{ox}$  η διηλεκτρική σταθερά του SiO<sub>2</sub> και d το πάχος του. Επειδή η χωρητικότητα του ημιαγωγού

ανά μονάδα επιφανείας είναι  $C_S = d(-Q_S)/d\psi_S$  παραγωγίζοντας την εξίσωση 12 ως προς  $d(-Q_S)$  προκύπτει ότι:

$$\frac{dV_{gate}}{d(-Q_S)} = \frac{dV_{ox}}{d(-Q_S)} + \frac{d\psi_S}{d(-Q_S)} \Rightarrow \frac{1}{C_{gate}} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_S} \quad (13)$$

Επομένως το σύστημα ισοδυναμεί με δύο σε σειρά χωρητικότητες, όπως φαίνεται στην εικόνα 19 α, αυτή του μονωτή ( $C_{ox}$ ) και αυτή του ημιαγωγού ( $C_S$ ) [48].



**Εικόνα 19:** Ισοδύναμα κυκλώματα πυκνωτή MOS. (α) Όλες οι χωρητικότητες του πυριτίου περιλαμβάνονται στη  $C_{Si}$ , (b) Η  $C_{Si}$  χωρίζεται σε χωρητικότητα απογύμνωσης  $C_d$  και χωρητικότητα αντιστροφής  $C_i$ . Η χωρητικότητα απογύμνωσης προέρχεται από τους φορείς πλειονότητας, οι οποίοι μπορούν να ανταποκρίνονται σε σήματα υψηλής συχνότητας και χαμηλής συχνότητας. Η χωρητικότητα αντιστροφής προκύπτει από τους φορείς μειονότητας, οι οποίοι μπορούν να ανταποκριθούν μόνο σε σήματα χαμηλής συχνότητας. Η διακεκομμένη γραμμή στο (β) είναι παρατηρήσιμη μόνο σε χαμηλές συχνότητες, όπου οι φορείς μειονότητας μπορούν να ανταποκριθούν.

Η τάση  $V_{gate}$  καθορίζει σε ποια κατάσταση βρίσκεται η διόδος (συσσώρευση, απογύμνωση, αντιστροφή), η συμβολή της ac συνιστώσας είναι στο να μετράται η χωρητικότητα σε κάθε περίπτωση πόλωσης καθώς μεταβάλλει το φορτίο κατά  $d(Q_S)$ . Μπορεί να γίνει μια διάκριση στη μέτρηση της χωρητικότητας του πυκνωτή MOS στις διάφορες καταστάσεις του (συσσώρευση, απογύμνωση, αντιστροφή), την οποία θα αναφέρουμε πιο κάτω, στη μια περίπτωση η (μικρού πλάτους) εναλλασσόμενη τάση εφαρμόζεται με μικρές συχνότητες ( $\leq 100\text{Hz}$ ) στην πύλη του πυκνωτή και στην άλλη περίπτωση εφαρμόζεται με μεγάλες συχνότητες ( $> 100\text{Hz}$ ).

- (i) **Κατάσταση συσσώρευσης:** Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα ισοδυναμεί με έναν πυκνωτή με οπλισμούς του το μέταλλο και τον ημιαγωγό και το εσωτερικό του το διηλεκτρικό (το διοξείδιο του πυριτίου). Η χωρητικότητα του συστήματος αναμένεται να ισοδυναμεί με αυτή του διηλεκτρικού  $C_{ox}$ . Η χωρητικότητα  $C_{gate}$  του πυκνωτή σε αυτή την περίπτωση δίνεται από την ακόλουθη σχέση [48]:

$$\frac{1}{C_{gate}} = \frac{1}{C_{ox}} \left[ 1 + \frac{2k_B T/q}{|V_{gate} + V_{FB} + \psi_S|} \right] \quad (14)$$

Επειδή σε θερμοκρασία δωματίου ( $2k_B T/q$ )  $\approx 0.052\text{V}$  και στη συσσώρευση  $\psi_S \approx -0.1$  με  $-0.3\text{V}$ , η χωρητικότητα  $C_{gate}$  της δομής MOS πλησιάζει γρήγορα αυτή του οξειδίου  $C_{ox}$ , όταν η τάση της πύλης  $V_{gate}$  γίνεται όλο και πιο θετική. Αυτό συμβαίνει, γιατί για τιμές της  $V_{gate}$  μεγαλύτερες του 1 με 2V ο δεύτερος όρος του παρονομαστή της εξίσωσης 14 (λύνοντας ως προς  $C_{gate}$ ) γίνεται αμελητέος, με αποτέλεσμα να είναι  $C \approx C_{ox}$  σταθερό. Καθώς η  $V_{gate}$  πλησιάζει το 0, ο δεύτερος όρος του παρονομαστή δεν είναι πια αμελητέος, η χωρητικότητα του συστήματος είναι μικρότερη από την  $C_{ox}$  και φθίνει καθώς το σύστημα εισέρχεται στην κατάσταση απογύμνωσης. Το φορτίο στους οπλισμούς του πυκνωτή κατά τη



συσσώρευση είναι αρνητικό στον ημιαγωγικό οπλισμό και θετικό στο μέταλλο. Η  $V_{gate}$  ουσιαστικά είναι αυτή, που έχει οδηγήσει τον πυκνωτή σε κατάσταση συσσώρευσης και στη δημιουργία του φορτίου στους οπλισμούς του. Για να είναι δυνατή η μέτρηση της χωρητικότητας του πυκνωτή (δυναμική μέτρηση) σε σχέση με την εφαρμοζόμενη (συνεχή) τάση  $V_{gate}$  σε όλες τις περιοχές λειτουργίας του, θα πρέπει (σύμφωνα με τη σχέση 11) να μπορούν να προκαλούνται μεταβολές του φορτίου  $Q_s$  με πολύ μικρή μεταβολή της τάσης, που εφαρμόζεται στην πύλη, στην κατάσταση που βρίσκεται ο πυκνωτής (στη συσσώρευση για τη συγκεκριμένη περίπτωση). Αυτό μπορεί να γίνει εφικτό με την εφαρμογή μιας εναλλασσόμενης τάσης μικρού πλάτους ταυτόχρονα με την εφαρμογή της συνεχούς τάσης  $V_{gate}$ , που πολώνει τον πυκνωτή. Η μεταβολή του φορτίου του πυκνωτή στη μέτρηση της χωρητικότητάς ισχύει και για τις άλλες καταστάσεις του πυκνωτή, που αναπτύσσονται στη συνέχεια.

- (ii) **Κατάσταση επίπεδης ζώνης:** Όταν η τάση στη πύλης είναι μηδέν, ο πυκνωτής MOS βρίσκεται κοντά στην κατάσταση της επίπεδης ζώνης, επομένως  $q\psi_s/k_B T \ll 1$ . Η χωρητικότητα επίπεδης ζώνης ανά επιφάνεια δίνεται από την ακόλουθη σχέση [48]:

$$\frac{1}{C_{FB}} = \frac{1}{C_{ox}} + \sqrt{\frac{k_B T}{\epsilon_{Si} q^2 N_A}} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{L_D}{\epsilon_{Si}} \quad (15)$$

- (iii) **Κατάσταση απογύμνωσης:** Στην περίπτωση αυτή το φορτίο του ημιαγωγού είναι το φορτίο χώρου (ακίνητο φορτίο) της περιοχής απογύμνωσης. Το φορτίο αυτό αποτελείται από τα ιονισμένα ( $N_A^+$ ) άτομα δοτών. Στην περίπτωση αυτή προκύπτει ότι η χωρητικότητα του συστήματος MOS δίνεται από τον τύπο [49]:

$$C_{gate} = \frac{C_{ox}}{\sqrt{1 - \frac{2\epsilon_{ox}^2 V_{gate}}{q N_A \epsilon_s d^2}}} \quad (16)$$

Από την εξίσωση 16 φαίνεται ότι η χωρητικότητα του πυκνωτή μειώνεται, καθώς η αρνητική τάση  $V_{gate}$  της πύλης αυξάνεται, μέχρις ότου το σύστημα εισέλθει στην περιοχή αντιστροφής. Αυτό είναι αναμενόμενο, γιατί, καθώς το σύστημα εισέρχεται στην κατάσταση αντιστροφής, η συνεισφορά της περιοχής απογύμνωσης μειώνεται, μιας και το πλάτος της τείνει να σταθεροποιηθεί σε μία μέγιστη τιμή.

- (iv) **Κατάσταση αντιστροφής:** Στην κατάσταση αντιστροφής το φορτίο αντιστροφής είναι φορτίο ευκίνητων φορέων μειονότητας στον ημιαγωγό τύπου n. Οι φορείς μειονότητας σε έναν ημιαγωγό παρουσιάζουν μεγάλο χρόνο απόκρισης στις μεταβολές της τάσης που εφαρμόζεται (εν προκειμένω της ac τάσης). Το φορτίο αντιστροφής εμφανίζεται όταν τουλάχιστον εξισωθεί με το φορτίο της περιοχής απογύμνωσης, που οφείλεται στους ιονισμένους δότες. Ο χρόνος που απαιτείται για το σχηματισμό ενός τέτοιου στρώμα είναι σχετικά μικρός. Ισχύει η ακόλουθη σχέση  $Q_{sc}/J_R = (N_A/n_i)\tau$ , όπου  $Q_{sc}$  είναι το φορτίο του στρώματος απογύμνωσης,  $J_R$  είναι η πυκνότητα του ρεύματος γένεσης-επανασύνδεσης οπών-ηλεκτρονίων και  $\tau$  ο χρόνος ζωής των φορέων μειονότητας ( $10^{-4} \text{sec} - 10^{-9} \text{sec}$  ανάλογα με την ποιότητα του υποστρώματος πυριτίου) [48]. Συνεπώς, ο χρόνος σχηματισμού του στρώματος απογύμνωσης είναι 0.1-1sec και είναι μία εκτίμηση του χρόνου απόκρισης των φορέων του στρώματος αντιστροφής. Αυτό μας δείχνει ότι για συχνότητες της ac τάσης μεγαλύτερες των 100Hz το φορτίο αντιστροφής δεν ανταποκρίνεται στο εφαρμοζόμενο εναλλασσόμενο σήμα. Έτσι προκύπτει ένας διαχωρισμός της

ανάλυσης στην κατάσταση αντιστροφής στις περιπτώσεις χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων.

- i. Σε χαμηλές συχνότητες (1Hz-100Hz): Σε αυτή την περίπτωση το φορτίο του στρώματος αντιστροφής ακολουθεί τις μεταβολές της ac τάσεως και υπερισχύει του φορτίου απογύμνωσης, το οποίο στη συγκεκριμένη φάση είναι της τάξεως του φορτίου, που αντιστοιχεί σε  $V_{gate} = -0.7V$  με  $-1V$ . Στην περίπτωση της αντιστροφής ισχύει μία σχέση ανάλογη της 14, για την αρχική περιοχή ασθενούς αντιστροφής, που προκύπτει από αντίστοιχη ανάλυση με αυτή της κατάστασης συσώρευσης. Αυξάνοντας την τάση  $V_{gate}$  σε τιμές μεγαλύτερες από  $-2V$  με  $-3V$ , το σύστημα εισέρχεται στην περιοχή ισχυρής αντιστροφής, όπου η χωρητικότητα  $C_{gate}$  του συστήματος γίνεται περίπου ίση με αυτήν του μονωτή  $C_{ox}$  (δεν είναι σε χαμηλότερο επίπεδο όπως στη μέτρηση σε υψηλή συχνότητα). Έτσι στις χαμηλές συχνότητες το φορτίο που συνεισφέρει στην χωρητικότητα είναι αυτό του στρώματος αντιστροφής.
- ii. Σε υψηλές συχνότητες (100Hz-1MHz): Σε αυτή την περίπτωση, παρά το ότι έχουμε σχηματισμό στρώματος αντιστροφής, αυτό δεν ακολουθεί τις μεταβολές της ac τάσης και το φορτίο της περιοχής απογύμνωσης καθορίζει την χωρητικότητα του ημιαγωγού. Το μέγιστο εύρος της περιοχής απογύμνωσης αποκτάται και η χωρητικότητα ανά μονάδα επιφανείας αποκτά την ελάχιστη τιμή της, η οποία προκύπτει από τη σχέση [49]:

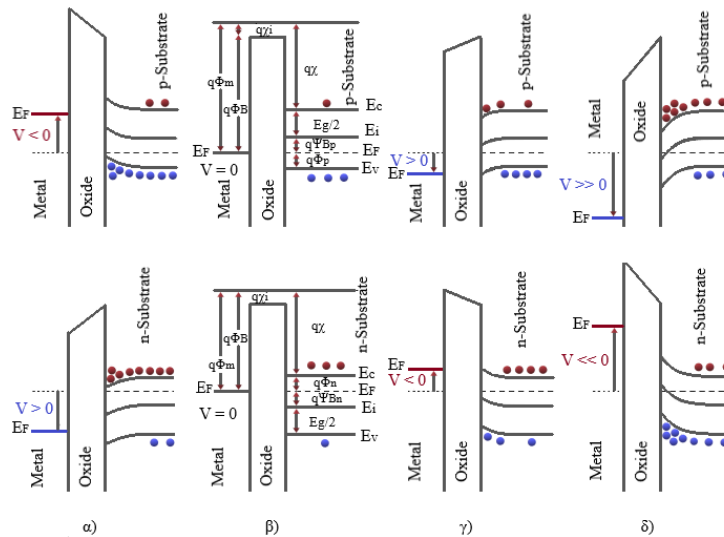
$$C_{min} = \frac{\epsilon_{ox}}{d + \left(\frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_s}\right) W_m} \quad (17)$$

Έτσι για να ισοροπηθεί το φορτίο της πύλης που μεταβάλλεται αλλάζει το φορτίο της περιοχής απογύμνωσης. Έχουμε και στην περίπτωση αυτή σύστημα δύο πυκνωτών σε σειρά. Όταν η αντιστροφή είναι ισχυρή, η περιοχή απογύμνωσης αποκτά το μέγιστο βάθος. Η ελάχιστη εξωτερική πόλωση που απαιτείται για την περίπτωση αυτή υπολογίζεται από τη σχέση [49]:

$$\begin{aligned} V_T &\cong -\frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A |2\psi_B|}}{C_{ox}} + 2\psi_B \\ &= -\frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A |2\psi_B|}}{C_{ox}} - \frac{2k_B T}{q} \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right) \end{aligned} \quad (18)$$

Η τιμή της πόλωσης αυτής, για την οποία η αντίστοιχη χωρητικότητα της διάταξης παίρνει την ελάχιστη τιμή, καλείται τάση κατωφλίου (threshold voltage). Καθώς εφαρμόζεται ένας γρήγορο ρυθμό μεταβολής της τάσης για υψηλή συχνότητα, δεν παρατηρείται δημιουργία στρώματος αντιστροφής, αλλά εμφανίζεται το φαινόμενο της βαθιάς απογύμνωσης (deep depletion). Αυτό συμβαίνει διότι δεν προλαβαίνει να δημιουργηθεί αντιστροφή και το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης ξεπερνάει τη μέγιστη τιμή του με την ολοένα αυξανόμενη, κατά απόλυτη τιμή, τάση πύλης. Το άμεσο αποτέλεσμα είναι η να επέρχεται μεγαλύτερη μείωση στη χωρητικότητα, κάτω από το  $C_{min}$ . Η περιοχή απογύμνωσης δεν επηρεάζει την διάταξη και η ολική χωρητικότητα ισούται με αυτή του οξειδίου. Μια πραγματική δίοδος MOS περιέχει φορτία ή προσμίξεις τόσο στο εσωτερικό του οξειδίου της, όσο και στην περιοχή της διεπιφάνειας Si/SiO<sub>2</sub>. Η είσοδος των προσμίξεων αυτών πραγματοποιείται κυρίως κατά τη διάρκεια των διαδικασιών της ανάπτυξης του οξειδίου. Η παρουσία αυτών των φορτίων προκαλεί μετατόπιση της χαρακτηριστικής C-V και της τάσης κατωφλίου της διάταξης MOS.

ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ MOS ΜΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ  
ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ΜΕ LASER



**Εικόνα 20:** Διαγράμματα ενεργειακών ζωνών για ιδανικούς πυκνωτές MOS υπό διαφορετικές συνθήκες πόλωσης: (α) συσσώρευση, (β) επίπεδη ζώνη, (γ) απογύμνωση και (δ) αντιστροφή.

Στην εικόνα 20 παρουσιάζονται οι μεταβολές των ενεργειακών ζωνών σε ιδανικούς πυκνωτές τύπου n και p με την εφαρμογή πόλωσης. Τα προκύπτοντα φορτία κάμπτονται τις ζώνες προς τα κάτω κοντά στη διεπαφή του οξειδίου/υποστρώματος (μονωτή/ημιαγωγού) εάν η  $V > 0$  και προς τα πάνω εάν  $V < 0$  (σε ημιαγωγό τύπου n και αντίστοιχα κάμπτονται οι ζώνες σε ημιαγωγό τύπου p). Τα επίπεδα ενέργειας και τα δυναμικά σημειώνονται για την κατάσταση επίπεδης ζώνης ( $V=0$ ), με  $\phi_{ms}$  να δηλώνει το δυναμικό Fermi σε σχέση με το επίπεδο κενού,  $\chi_i$  και  $\chi_s$  ως συγγένεια ηλεκτρονίων για το οξείδιο και το υπόστρωμα, αντίστοιχα και  $E_g$  το ενεργειακό διάκενο στο υπόστρωμα. Πάνω: Για έναν ημιαγωγό τύπου p (nMOS) ισχύει ότι  $\phi_{ms} = \phi_m - (\chi + E_g/q - \phi_p) = 0$ , όπου τα  $\psi_{Bp}$  και  $\phi_p$  αντιπροσωπεύουν τα δυναμικά Fermi σε σχέση με την εγγενή ενεργειακή ζώνη  $E_i$  και τη ζώνη σθένους  $E_v$ . Κάτω: Για έναν ημιαγωγό τύπου n (pMOS) όπου ισχύει  $\phi_{ms} = \phi_m - (\chi + \phi_n) = 0$  με  $\phi_n$  και  $\psi_{Bn}$  ως δυναμικά Fermi σε σχέση με τη ζώνη αγωγιμότητας  $E_c$  και την εγγενή ενεργειακή ζώνη  $E_i$  (οι κόκκινες και οι μπλε σφαίρες συμβολίζουν τα ηλεκτρόνια και τις οπές αντίστοιχα).

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του πυκνωτή MOS (μέταλλο-SiO<sub>2</sub>-Si) προσεγγίζουν αυτά του ιδανικού πυκνωτή MOS (εικόνα 21). Ωστόσο, για τα μεταλλικά ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται συνήθως, το έργο εξόδου  $q\phi_{ms}$  γενικά δεν είναι μηδέν και υπάρχουν διάφορα φορτία εντός του οξειδίου ή στη διεπιφάνεια SiO<sub>2</sub>-Si που με τον ένα ή τον άλλο τρόπο επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του ιδανικού MOS.

Σε ημιαγωγό τύπου p μπορούν να διακριθούν οι ακόλουθες περιοχές επιφανειακού δυναμικού:

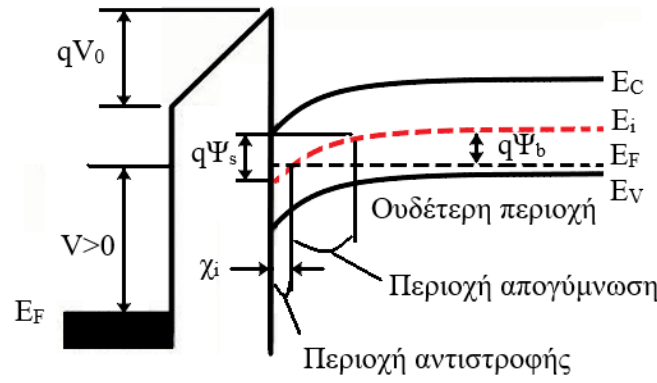
$\psi_s < 0$  Συσσώρευση οπών (οι ενεργειακές ζώνες κάμπτονται προς τα πάνω).

$\psi_s = 0$  Κατάσταση επίπεδης ζώνης.

$\psi_B > \psi_s > 0$  Εξάντληση οπών (οι ενεργειακές ζώνες κάμπτονται προς τα κάτω).

$\psi_s = \psi_B$  Μέσο χάσματος με  $n_s = n_p = n_i$  (εγγενής συγκέντρωση).

$\psi_s > \psi_B$  Αντιστροφή (οι ενεργειακές ζώνες κάμπτονται προς τα κάτω).



Εικόνα 21: Διαγράμματα ενεργειακών ζωνών ιδανικού πυκνωτή MOS.

Το επιφανειακό δυναμικό  $\psi_s$  δίνεται από την σχέση στην παρακάτω εξίσωση:

$$\psi_s^{inv} = \frac{qN_A W^2}{2\epsilon_s} \quad (19)$$

Η επιφάνεια αντιστρέφεται όταν το δυναμικό  $\psi_s$  είναι μεγαλύτερο από το  $\psi_B$ . Ωστόσο, χρειαζόμαστε ένα κριτήριο για την εμφάνιση ισχυρής αντιστροφής, μετά από το οποίο τα φορτία στο στρώμα αντιστροφής γίνονται σημαντικά. Ένα κριτήριο είναι ότι η συγκέντρωση ηλεκτρονίων στην επιφάνεια είναι ίση με τη συγκέντρωση προσμίξεων του υποστρώματος, δηλ.,  $n_s = N_A$ . Δηλαδή:

$$n_i e^{q(\psi_s - \psi_B)/kT} = n_i e^{q\psi_B/kT} \Rightarrow \psi_s^{inv} \cong 2\psi_B = \frac{2kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \quad (20)$$

Το επιφανειακό στρώμα απογύμνωσης φθάνει στο μέγιστο, όταν η επιφάνεια είναι ισχυρά ανεστραμμένη. Συνεπώς, το μέγιστο πλάτος της περιοχής απογύμνωσης  $W_m$ , δίνεται από την εξίσωση 21.

$$W_m = 2 \sqrt{\frac{\epsilon_s kT \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)}{q^2 N_A}} \quad (21)$$

Όπου  $\epsilon_s$  η διηλεκτρική σταθερά (η σχετική διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r$  για το πυρίτιο είναι 11.7, για το διοξείδιο του πυριτίου είναι 3.9. Ισχύει ότι  $\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0$  όπου  $\epsilon_0$  η διηλεκτρική σταθερά του κενού, που ισούται με  $8,854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ),  $q$  είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου  $1.602 \times 10^{-19} \text{Cb}$ ,  $k$  είναι η σταθερά Boltzmann  $8.617 \times 10^{-5} \text{eV/K}$ ,  $T$  είναι η θερμοκρασία και τέλος  $N_A$  είναι η συγκέντρωση των προσμίξεων.

$$Q_{sc} = qN_A W_m \cong \sqrt{2q\epsilon_s N_A (2\psi_B)} \quad (22)$$

### 1.5.1 Χαρακτηριστικές χωρητικότητας συναρτήσει της τάσης

Η εφαρμοζόμενη τάση θα εμφανιστεί εν μέρει στο οξειδίο και εν μέρει στον ημιαγωγό όπως φαίνεται στην εξίσωση 5.

Η τάση  $V_{ox}$  είναι το δυναμικό σε όλο το οξειδίο και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_{ox} = E_{ox} d = \frac{|Q_s| d}{\epsilon_{ox}} = \frac{|Q_s|}{C_{ox}} \quad (23)$$

Όπου  $E_{ox}$  είναι το πεδίο στο οξειδίο,  $Q_s$  είναι το φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας στον ημιαγωγό, και  $C_{ox}$  ( $=\epsilon_{ox}/d$ ) είναι η χωρητικότητα του οξειδίου ανά μονάδα επιφάνειας. Η συνολική χωρητικότητα  $C$  του πυκνωτή MOS είναι ένας συνδυασμός σε σειρά της χωρητικότητας του οξειδίου  $C_{ox}$  και της χωρητικότητας του στρώματος απογύμνωσης του ημιαγωγού  $C_j$ :

$$C = \frac{C_{ox}C_j}{C_{ox} + C_j} \quad F/cm^2 \quad (24)$$

όπου  $C_j = \epsilon_s/W$ .

Από τις εξισώσεις 5, 19, 23 και 24, μπορούμε να εξαλείψουμε το  $W$  και να λάβουμε τον τύπο για την χωρητικότητα:

$$\frac{C}{C_{ox}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2\epsilon_{ox}^2 V}{qN_A \epsilon_s d^2}}} \quad (25)$$

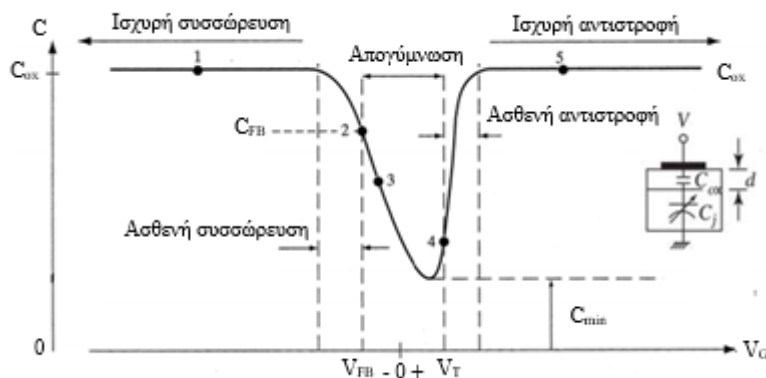
Η σχέση προβλέπει ότι η χωρητικότητα θα μειωθεί με την αύξηση της τάσης στη μεταλλική πλάκα, ενώ η επιφάνεια απογυμνώνεται. Όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι αρνητική, δεν υπάρχει περιοχή απογύμνωσης και δημιουργείται συσσώρευση οπών στην επιφάνεια του ημιαγωγού. Ως αποτέλεσμα, η συνολική χωρητικότητα είναι κοντά στην χωρητικότητα του οξειδίου  $\epsilon_{ox}/d$ .

Στο άλλο άκρο, όταν συμβαίνει ισχυρή αντιστροφή, το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης, δεν θα αυξηθεί με μια περαιτέρω αύξηση στην εφαρμοζόμενη τάση. Αυτή η κατάσταση συμβαίνει όταν εφαρμοστεί τάση στη μεταλλική πλάκα, που κάνει το επιφανειακό δυναμικό  $\psi_s$  να φτάσει το  $\psi_s^{(inv)}$ , όπως δίνεται στην εξίσωση 20. Αντικαθιστώντας την  $\psi_s^{(inv)}$  στην εξίσωση 5 και σημειώνοντας ότι το αντίστοιχο φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας είναι το  $qN_A W_m$ , που οδηγεί την τάση της μεταλλικής πλάκας στην αρχή της ισχυρής αντιστροφής. Αυτή η τάση ονομάζεται τάση κατωφλίου:

$$V_T = \frac{qN_A W_m}{C_{ox}} + \psi_s^{(inv)} \cong \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A (2\psi_B)}}{C_{ox}} + 2\psi_B \quad (26)$$

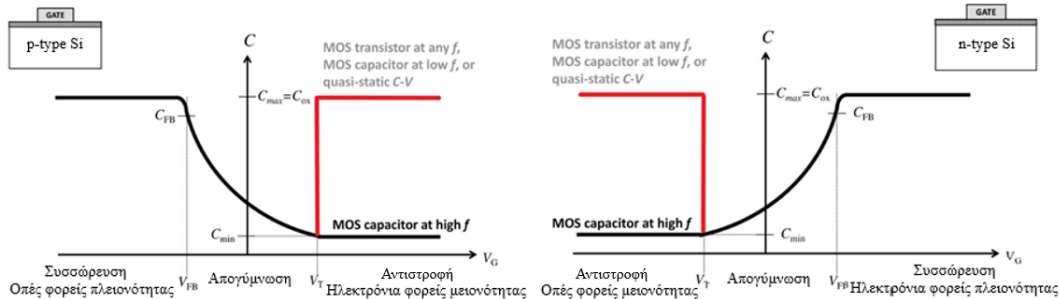
$$= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A (2\psi_B)}}{C_{ox}} + \frac{2k_B T}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

Μόλις γίνει η ισχυρή αντιστροφή, η συνολική χωρητικότητα θα παραμείνει σε μια ελάχιστη τιμή, που δίνεται από την εξίσωση 24 με  $C_j = \epsilon_s/W_m$ , καταλήγοντας στην εξίσωση 17.

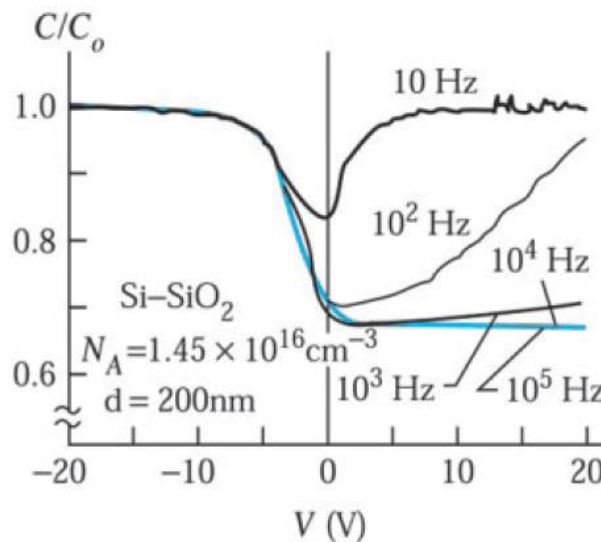


Εικόνα 22: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας όπου φαίνονται οι περιοχές ασθενούς συσσώρευσης, ισχυρής συσσώρευσης, απογύμνωσης, ασθενούς αντιστροφής και ισχυρής αντιστροφής.

Στην εικόνα 22 παρουσιάζονται οι περιοχές συσσώρευσης, ισχυρής συσσώρευσης, απογύμνωσης, ισχυρής αντιστροφής και αντιστροφής. Αν το υπόστρωμα είναι τύπου n ή p θα έχει διαφορά στις χαρακτηριστικές καμπύλες χωρητικότητας-τάσης, δηλαδή θα έχουν την ίδια μορφή, αλλά θα είναι κατοπτρικά είδωλα το ένα του άλλου, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 23. Η τάση κατωφλίου είναι μια αρνητική ποσότητα για έναν ιδανικό πυκνωτή MOS σε ένα υπόστρωμα τύπου n και θετική αντίστοιχα σε υπόστρωμα τύπου p.



Εικόνα 23: Γραφικές παραστάσεις τάσης-χωρητικότητας υψηλής και χαμηλής συχνότητας. Αριστερά για υπόστρωμα τύπου p και δεξιά για υπόστρωμα τύπου n.

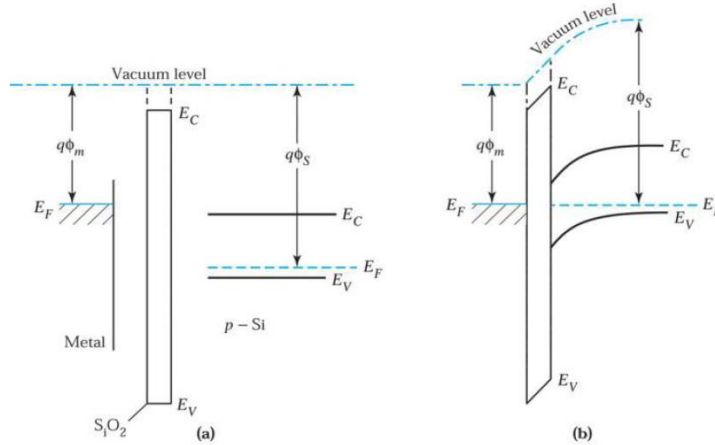


Εικόνα 24: Γραφική παράσταση χωρητικότητας συναρτήσει της τάσης διάταξης MOS. Η τάση εφαρμόζεται στο μέταλλο όπου το υπόστρωμα είναι ημιαγωγός τύπου p. Αναπαριστάτε η μεταβολή της καμπύλης, με την αλλαγή της συχνότητας, από χαμηλή συχνότητα σε ενδιάμεση συχνότητα και σε υψηλή συχνότητα [49].

Όταν η μέτρηση γίνεται σε υψηλή συχνότητα παρατηρείται διαφορά στη μετρούμενη χωρητικότητα (μικρότερη χωρητικότητα), στην περιοχή της αντίστοιχης τάσης που δημιουργούνται φορείς μειονότητας (στη θετική τάση για υπόστρωμα τύπου p και στην αρνητική τάση για υπόστρωμα τύπου n), από ότι αν η μέτρηση γίνεται σε χαμηλή συχνότητα. Εάν η συχνότητα μέτρησης είναι αρκετά χαμηλή, ώστε οι ρυθμοί δημιουργίας και επανασύνδεσης ηλεκτρονίων και οπών στην επιφάνεια της περιοχής απογύμνωσης να είναι ίση ή μεγαλύτερη από την μεταβολή της τάσης, τότε η συγκέντρωση ηλεκτρονίων (φορείς μειονότητας) μπορεί να ακολουθεί το σήμα εναλλαγής ρεύματος (AC) και να οδηγήσει σε ανταλλαγή φορτίων με το στρώμα αντιστροφής σε βήμα αντίστοιχο με το σήμα της μέτρησης. Ως αποτέλεσμα, η χωρητικότητα σε ισχυρή αντιστροφή θα είναι αυτή του στρώματος οξειδίου και μόνο. Η εικόνα 24 δείχνει τις πραγματικές μετρημένες καμπύλες C-V MOS σε διαφορετικές συχνότητες. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο ιδανικός πυκνωτής MOS έχει τάση επίπεδης ζώνης,  $V_{FB}$ , 0V. Στην εικόνα 24 φαίνεται η μεταβολή της καμπύλης χωρητικότητας-τάσης με τη μεταβολή της συχνότητας.

### 1.5.2 Η διαφορά έργων εξόδου

Το έργο εξόδου ενός ημιαγωγού  $q\phi_s$ , που είναι η ενεργειακή διαφορά μεταξύ της στάθμης κενού και του επιπέδου Fermi, διαφέρει ανάλογα με τη συγκέντρωση του ντόπινγκ. Για ένα δεδομένο μέταλλο με σταθερό έργο εξόδου  $q\phi_m$  αναμένεται ότι η διαφορά έργων εξόδου  $q\phi_{ms} \equiv (q\phi_m - q\phi_s)$  θα διαφέρει ανάλογα με το ντόπινγκ του ημιαγωγού. Ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μεταλλικά ηλεκτρόδια είναι το αλουμίνιο, με  $q\phi_m = 4,1\text{eV}$ . Ένα άλλο υλικό που χρησιμοποιείται επίσης εκτεταμένα είναι το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (polysilicon) με υψηλό αριθμό προσμίξεων. Το έργο εξόδου για τα  $n^+$ - και  $p^+$ - polysilicon είναι  $4,05\text{ eV}$  και  $5,05\text{ eV}$ , αντίστοιχα.

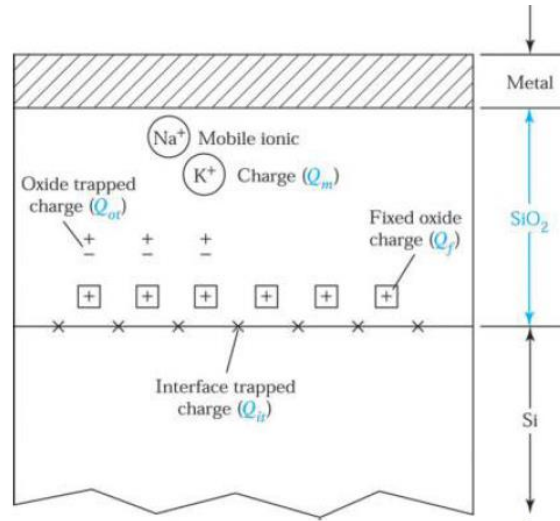


Εικόνα 25 (α) Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών, ενός απομονωμένου μετάλλου και ενός απομονωμένου ημιαγωγού με ένα στρώμα οξειδίου μεταξύ τους. (β) Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών ενός πυκνωτή MOS σε θερμική ισορροπία [49].

Για να κατασκευάσουμε το διάγραμμα ενεργειακών ζωνών ενός πυκνωτή MOS, ξεκινάμε με ένα απομονωμένο μέταλλο και ένα απομονωμένο ημιαγωγό με ένα στρώμα οξειδίου να βρίσκεται ανάμεσά τους (εικόνα 25 (α)). Σε αυτή την απομονωμένη κατάσταση, όλες οι μπάντες είναι επίπεδες. Αυτή είναι η κατάσταση επίπεδης ζώνης. Σε θερμική ισορροπία, το επίπεδο Fermi πρέπει να είναι σταθερό και η στάθμη κενού πρέπει να είναι συνεχής. Στην προσαρμογή της διαφοράς των έργων εξόδου, οι λωρίδες των ημιαγωγών κάμπτονται προς τα κάτω, όπως φαίνεται στην εικόνα 25 (β). Έτσι, το μέταλλο είναι θετικά φορτισμένο και η επιφάνεια του ημιαγωγού είναι αρνητικά φορτισμένη, σε θερμική ισορροπία. Για να επιτευχθεί η ιδανική κατάσταση επίπεδης ζώνης, πρέπει να εφαρμόσουμε τάση ίση με τη διαφορά των έργων εξόδου  $q\phi_{ms}$ . Αυτό αντιστοιχεί ακριβώς στην κατάσταση που φαίνεται στην εικόνα 25 (α), όπου πρέπει να εφαρμόσουμε στο μέταλλο αρνητική τάση  $V_{FB}$ , που ονομάζεται τάση επίπεδης ζώνης ( $V_{FB} = \phi_{ms}$ ).

### 1.5.3 Διεπιφανειακές παγίδες και φορτία οξειδίων

Εκτός από τη διαφορά έργων εξόδου, ο πυκνωτής MOS επηρεάζεται από φορτίσεις στο οξείδιο και παγίδες στη διεπαφή  $\text{SiO}_2\text{-Si}$ . Η βασική ταξινόμηση αυτών των παγίδων και φορτίσεων παρουσιάζεται στην εικόνα 26. Πρόκειται για διεπιφανειακά παγιδευμένα φορτία, ακίνητα φορτία του οξειδίου, παγιδευμένα φορτία του οξειδίου και ευκίνητα φορτία ιόντων.



Εικόνα 26: Παγίδες φορτίων [49].

Διεπιφανειακά παγιδευμένα φορτία  $Q_{it}$  δημιουργούνται λόγω της διακοπής της περιοδικής δομής του πλέγματος στη διεπιφάνεια  $SiO_2-Si$  και εξαρτώνται από τη χημική σύσταση αυτής της διεπαφής. Οι παγίδες εντοπίζονται στη διεπαφή  $SiO_2-Si$  με ενεργειακές στάθμες στη ζώνη του απαγορευμένου ενεργειακού χάσματος. Η πυκνότητα των διεπιφανειακών παγίδων φορτίου, δηλαδή ο αριθμός των διεπιφανειακών παγίδων ανά μονάδα περιοχής και ανά eV, εξαρτάται από τον προσανατολισμό. Σε  $\langle 100 \rangle$  προσανατολισμό, η πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων είναι περίπου μια τάξη μεγέθους μικρότερη από αυτή του προσανατολισμού  $\langle 111 \rangle$ . Οι πυκνωτές MOS με θερμικά αναπτυγμένο διοξείδιο του πυριτίου πάνω σε πυρίτιο έχουν παθητικοποιημένες διεπιφανειακές παγίδες φορτίου από την ανόπτηση του υδρογόνου σε χαμηλή θερμοκρασία ( $450^\circ C$ ). Η τιμή του  $Q_{it}/q$  για το πυρίτιο με προσανατολισμό  $\langle 100 \rangle$  μπορεί να είναι χαμηλή  $10^{10} cm^{-2}$ , η οποία ανέρχεται σε περίπου ένα διεπιφανειακά παγιδευμένο φορτίο ανά  $10^5$  επιφανειακά άτομα. Για το πυρίτιο με προσανατολισμό  $\langle 111 \rangle$ , το  $Q_{it}/q$  είναι περίπου  $10^{11} cm^{-2}$ .

Παρόμοια με τις ανεπιθύμητες προσμίξεις που μπορούν να υπάρχουν σε όλο το υλικό, μια διεπιφανειακή παγίδα φορτίου θεωρείται δωρητής εάν είναι ουδέτερη και μπορεί να φορτιστεί θετικά δίνοντας ένα ηλεκτρόνιο. Έτσι, η κατάσταση δότη υπάρχει συνήθως στο κάτω μισό του ενεργειακού διακένου, όπως φαίνεται στην εικόνα 27. Επειδή εφαρμόζεται αρνητική τάση, το επίπεδο Fermi κινείται προς τα κάτω σε σχέση με τα επίπεδα της διεπιφανειακής παγίδας και η διεπιφανειακή παγίδα φορτίζεται θετικά. Μια διεπιφανειακή παγίδα δέκτη είναι ουδέτερη και καθίσταται αρνητικά φορτισμένη με την αποδοχή ενός ηλεκτρονίου. Έτσι, η κατάσταση αποδέκτη συνήθως υπάρχει στο άνω μισό του ενεργειακού διακένου, που φαίνεται επίσης στην εικόνα 27.

Η πυκνότητα των διεπιφανειακών παγίδων  $D_{it}$  και το  $Q_{it}$  είναι τα ενεργά φορτία ανά μονάδα επιφάνειας (δηλαδή  $C/cm^2$ ). Τα επίπεδα διεπιφανειακών παγίδων κατανέμονται σε όλο το ενεργειακό διάκενο και η πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων δίνεται από:

$$D_{it} = \frac{1}{q} \frac{dQ_{it}}{dE} \frac{\text{Αριθμός παγίδων}}{cm^2 eV} \quad (27)$$

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί για τον πειραματικό προσδιορισμό του  $D_{it}$  τη μεταβολή του  $Q_{it}$  σε συνάρτηση με την μεταβολή της  $E_F$  ή του επιφανειακού δυναμικού  $\psi_s$ . Η εξίσωση 27 δε μπορεί να διακρίνει αν οι διεπιφανειακές παγίδες είναι τύπου δότη ή τύπου δέκτη, αλλά καθορίζει μόνο το μέγεθος  $D_{it}$ . Όταν εφαρμόζεται τάση, το επίπεδο Fermi μετακινείται προς τα επάνω ή προς τα κάτω σε σχέση με τα επίπεδα των διεπιφανειακών



παγίδων και εμφανίζεται μια αλλαγή φορτίου στις διεπιφανειακές παγίδες. Αυτή η αλλαγή φόρτισης επηρεάζει τη χωρητικότητα MOS και αλλάζει την ιδανική καμπύλη MOS.

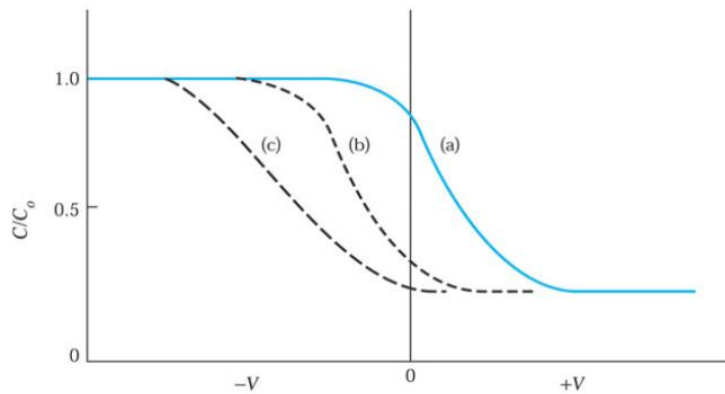
Το σταθερό φορτίο  $Q_f$  βρίσκεται περίπου 3nm εντός της διεπιφάνειας SiO<sub>2</sub>-Si στην περιοχή του διοξειδίου του πυριτίου. Αυτή η φόρτιση είναι σταθερή και δε μπορεί να φορτιστεί ή να αποφορτιστεί σε ένα μεγάλο εύρος μεταβολής του επιφανειακού δυναμικού  $\psi_s$ . Γενικά, το  $Q_f$  είναι θετικό και εξαρτάται από τις συνθήκες οξείδωσης και ανόπτησης και τον προσανατολισμό του πυριτίου. Όταν η οξείδωση διακόπτεται, ιόντα πυριτίου αφήνονται κοντά στη διεπαφή. Αυτά τα ιόντα, μαζί με μη συμπληρωμένους δεσμούς πυριτίου (π.χ. δεσμούς Si-Si ή Si-O) στην επιφάνεια, μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα θετικό φορτίο στη διεπαφή,  $Q_f$ . Το  $Q_f$  μπορεί να θεωρηθεί ως φύλλο φόρτισης που βρίσκεται στη διεπιφάνεια SiO<sub>2</sub>-Si. Τυπικές πυκνότητες σταθερού φορτίου στο οξείδιο για προσεκτικά επεξεργασμένη διεπιφάνεια SiO<sub>2</sub>-Si είναι περίπου  $10^{10} \text{cm}^{-2}$  για την <100> και περίπου  $5 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$  για την <111>. Λόγω των χαμηλότερων τιμών των  $Q_{it}$  και  $Q_f$ , ο προσανατολισμός <100> προτιμάται στα MOSFETs πυριτίου.



**Εικόνα 27:** Οποιαδήποτε διεπιφανειακή παγίδα φορτίου αποτελείται, τόσο από καταστάσεις αποδέκτη όσο και από καταστάσεις δότη. Μπορεί να ερμηνευθεί με μια ισοδύναμη κατανομή με ένα ουδέτερο επίπεδο  $E_0$  πάνω από το οποίο οι καταστάσεις είναι τύπου δέκτη και κάτω από το οποίο είναι τύπου του δότη. Όταν η  $E_F$  είναι πάνω (κάτω) από την  $E_0$ , το καθαρό φορτίο είναι - (+).

Τα παγιδευμένα φορτία του οξειδίου  $Q_{oi}$  σχετίζονται με ελαττώματα στο διοξείδιο του πυριτίου. Αυτά τα φορτία μπορούν να δημιουργηθούν, για παράδειγμα, με ακτινοβολία ακτίνων X ή βομβαρδισμό με ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας. Οι παγίδες κατανέμονται μέσα στο στρώμα οξειδίου. Το μεγαλύτερο μέρος του  $Q_{oi}$  μπορεί να αφαιρεθεί με ανόπτηση χαμηλής θερμοκρασίας.

Τα ευκίνητα φορτία ιόντων  $Q_m$ , όπως το νάτριο ή άλλα ιόντα αλκαλίων, κινούνται εντός του οξειδίου υπό υψηλή θερμοκρασία (π.χ.  $>100^\circ\text{C}$ ) και σε υψηλά ηλεκτρικά πεδία. Η μόλυνση από ιόντα αλκαλίων, μπορεί να προκαλέσει προβλήματα σταθερότητας σε διατάξεις ημιαγωγών, που λειτουργούν υπό συνθήκες υψηλής τάσης και υψηλής θερμοκρασίας. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, τα ευκίνητα φορτία ιόντων, μπορούν να μετακινηθούν εμπρός και πίσω μέσω του στρώματος οξειδίου και να προκαλέσουν μετατοπίσεις των καμπυλών C-V κατά μήκος του άξονα τάσης. Επομένως, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην εξάλειψη των ευκίνητων ιόντων στην κατασκευή διατάξεων.



Εικόνα 28: Στη γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας παρουσιάζονται: (a) Η χαρακτηριστική C-V ενός ιδανικού πυκνωτή MOS τύπου p. (b) Παράλληλη μετατόπιση κατά μήκος του άξονα τάσης, λόγω των θετικών σταθερών φορτίων στο οξειδίο. (c) Μη παράλληλη μετατόπιση κατά μήκος του άξονα τάσης, λόγω διεπιφανειακών παγίδων φορτίου [49].

Η καμπύλη στην εικόνα 28 (a) δείχνει τη χαρακτηριστική C-V ενός ιδανικού πυκνωτή MOS. Λόγω των μη μηδενικών  $\phi_{ms}$ ,  $Q_f$ ,  $Q_m$  ή  $Q_{ot}$ , η καμπύλη C-V θα μετατοπιστεί κατά ένα ποσό που δίνεται από την εξίσωση 28. Η παράλληλη μετατόπιση της καμπύλης C-V απεικονίζεται στην εικόνα 28 (b). Αν, επιπλέον υπάρχουν μεγάλες ποσότητες από διεπιφανειακά παγιδευμένα φορτία ( $Q_{it}$ ), τα φορτία στις διεπιφανειακές παγίδες θα μεταβάλλονται ανάλογα με το δυναμικό της επιφάνειας. Η καμπύλη C-V θα μετατοπιστεί κατά μια ποσότητα που αλλάζει από μονή της με το δυναμικό της επιφάνειας. Συνεπώς, η καμπύλη στην εικόνα 28 (c) παραμορφώνεται καθώς μετατοπίζεται λόγω των φορτίων που έχουν παγιδευτεί στη διεπαφή.

$$V_{FB} = \phi_{ms} - \frac{Q_f + Q_m + Q_{ot}}{C_{ox}} \quad (28)$$

Η υποβοηθούμενη σήραγγα από παγίδες είναι ένα θέμα στις διατάξεις οξειδίου του πυριτίου. Συγκεκριμένα, σε μνήμες οι παγίδες φορτίου μπορούν να υποβοηθήσουν τη σήραγγα να συμβεί σε χαμηλό ηλεκτρικό πεδίο. Οι παγίδες στα διηλεκτρικά ελαχιστοποιούνται με γρήγορη θερμική ανόπτηση (RTA) μετά το τελικό στάδιο της κατασκευής της μνήμης, σε forming gas το οποίο είναι αδρανές αέριο (συνήθως αέριο μείγμα  $H_2/N_2$ ), σε θερμοκρασία μεταξύ  $300^\circ C$  και  $450^\circ C$ . Η ανόπτηση εξαλείφει τις καταστροφές και ιδιαίτερα τις διεπιφανειακές καταστάσεις που εισάγονται από τα προηγούμενα βήματα των διεργασιών. Επίσης, η ανόπτηση με laser, με κατάλληλες παραμέτρους, ελαχιστοποιεί τις παγίδες στο διηλεκτρικό ( $SiO_2$ ), με αφαίρεση προσμίξεων που σχετίζονται με το νερό και την αποκατάσταση των δεσμών πυριτίου-οξυγόνου στο δίκτυο Si-O-Si [11].

## 1.6 Μεταφορά φορτίου σε πυκνωτή MOS

Σε έναν ιδανικό πυκνωτή MOS, η αγωγιμότητα του μονωτικού στρώματος θεωρείται μηδενική. Οι πραγματικοί μονωτές, ωστόσο, δείχνουν κάποιο βαθμό αγωγιμότητας, όταν το ηλεκτρικό πεδίο ή η θερμοκρασία είναι υψηλή.

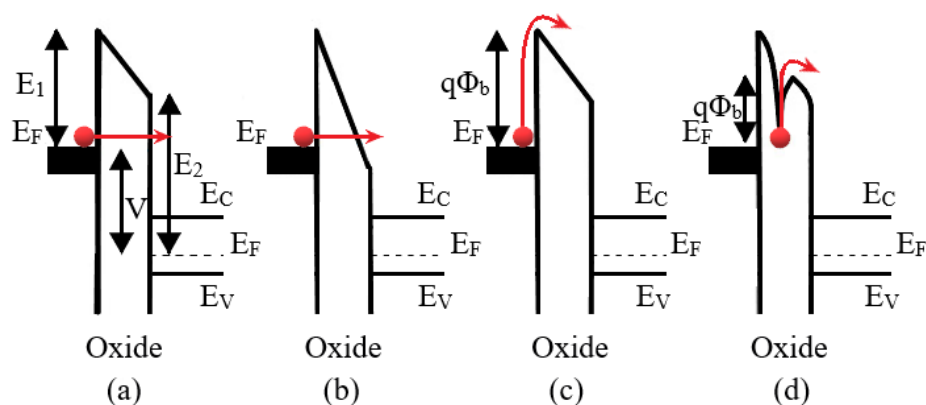
### 1.6.1 Βασικοί τρόποι αγωγής σε μονωτές

Η σήραγγα (tunneling) είναι ο μηχανισμός αγωγιμότητας διαμέσου μονωτών υπό υψηλά πεδία. Η εκπομπή σήραγγας είναι αποτέλεσμα της κβαντικής μηχανικής μέσω της οποίας η κυματοσυνάρτηση ηλεκτρονίου, μπορεί να διεισδύσει σε ένα φραγμό δυναμικού. Η πυκνότητα ρεύματος σήραγγας είναι ανάλογη του συντελεστή μετάδοσης  $\exp(-2\beta d)$ , όπου  $d$  είναι το πάχος του μονωτή και  $\beta \sim (qV_0 - E)^{1/2} \sim \{[E_1 + (E_2 - qV)]/2\}^{1/2}$ . Ο όρος  $[E_1 + (E_2 - qV)]/2$  είναι το μέσο ύψος του φραγμού δυναμικού, όπου τα  $E_1$  και  $E_2$  είναι τα ύψη των φραγμών και  $V$  είναι η εφαρμοζόμενη τάση. Όταν αυξάνεται η τάση το  $\beta$  μειώνεται, ο συντελεστής μετάδοσης καθώς και η πυκνότητα ρεύματος σήραγγας αυξάνουν. Συνεπώς, η πυκνότητα ρεύματος εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη τάση, αλλά είναι ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία. Η εικόνα 29 (a) δείχνει άμεση σήραγγα (direct tunneling), δηλαδή σήραγγα διαμέσου του πλήρους πλάτους του μονωτή. Στο παράρτημα I παρουσιάζονται οι εκφράσεις της πυκνότητας ρεύματος για τους μηχανισμούς αγωγιμότητας.

Η εικόνα 29 (b) δείχνει σήραγγα Fowler-Nordheim στην οποία ο φορέας πραγματοποιεί σήραγγα, μόνο σε ένα μέρος του πλάτους του φράγματος. Σε αυτή την περίπτωση, τόσο το ύψος του φραγμού δυναμικού όσο και η απόσταση σήραγγας μειώνονται, σε σχέση με το ύψος του φραγμού δυναμικού και την απόσταση σήραγγας της άμεσης σήραγγας.

Η θερμιοδική εκπομπή (thermionic emission-Schottky emission), είναι η μεταφορά ηλεκτρονίων με ενέργειες επαρκείς για να ξεπεραστεί ο φραγμός του μετάλλου-μονωτή ή ο φραγμός μονωτή-ημιαγωγού, όπως φαίνεται στην εικόνα 29 (c). Η πυκνότητα ρεύματος θερμιοδικής εκπομπής είναι ανάλογη με την πυκνότητα ηλεκτρονίων, με ενέργειες πάνω από το ύψος του φραγμού, δηλαδή  $q\chi$  για διεπαφή ημιαγωγού-κενού ή  $q\phi_B$  για διεπαφή μετάλλου-μονωτή. Για τον πυκνωτή MOS η πυκνότητα ρεύματος είναι ανάλογη του  $\exp(-q\phi_B/kT)$ . Συνεπώς, αυξάνεται εκθετικά με τη μείωση του ύψους του φραγμού και την αύξηση της θερμοκρασίας.

Η εκπομπή Frenkel-Poole, που φαίνεται στην εικόνα 29 (d), οφείλεται στην εκπομπή παγιδευμένων ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας μέσω θερμικής διέγερσης. Η εκπομπή είναι παρόμοια με αυτή της εκπομπής Schottky. Το ύψος του φραγμού, ωστόσο, είναι το βάθος του φρεατίου δυναμικού.



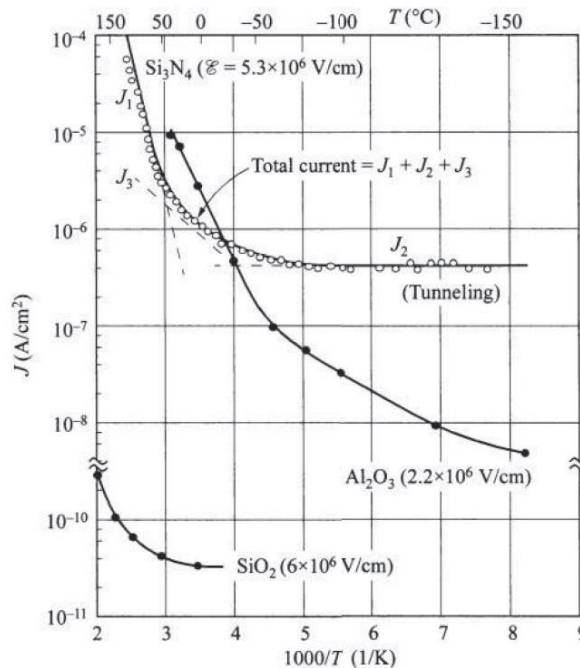
**Εικόνα 29:** Διαγράμματα ενεργειακών ζωνών που παρουσιάζουν μηχανισμούς αγωγιμότητας (a) άμεσης σήραγγας (direct tunneling), (b) σήραγγας Fowler-Nordheim, (c) θερμιοδική εκπομπή και (d) εκπομπή Frenkel-Poole.

Σε χαμηλή τάση και υψηλή θερμοκρασία, το ρεύμα μεταφέρεται με θερμικά διεγερμένα ηλεκτρόνια, που μετακινούνται από τη μία απομονωμένη κατάσταση στην άλλη. Ο ωμικός (ohmic) μηχανισμός αποδίδει ένα ωμικό χαρακτηριστικό, εκθετικά εξαρτώμενο από τη θερμοκρασία.

Η αγωγιμότητα ιόντων (ionic conduction) είναι παρόμοια με τη διαδικασία της διάχυσης. Γενικά, η DC ιοντική αγωγιμότητα μειώνεται κατά τη διάρκεια της εφαρμογής του ηλεκτρικού πεδίου, επειδή τα ιόντα δεν μπορούν να εγχυθούν εύκολα ή να εξαχθούν από τον μονωτή. Μετά από μια αρχική ροή ρεύματος, θετικά και αρνητικά φορτία του χώρου θα συσσωρευτούν κοντά στις διεπαφές μετάλλου-μονωτή και ημιαγωγού-μονωτή, προκαλώντας παραμόρφωση στην κατανομή δυναμικού. Όταν αφαιρεθεί το εφαρμοσμένο πεδίο, παραμένουν μεγάλα εσωτερικά πεδία που προκαλούν, ορισμένα αλλά όχι όλα, τα ιόντα να επιστρέψουν προς τη θέση ισορροπίας τους. Αυτό θα οδηγήσει σε I-V με υστέρηση.

Το space-charge-limited ρεύμα προκύπτει από φορείς, που εγχέονται σε ελαφρώς ντοπαρισμένους ημιαγωγούς ή σε μονωτές, όπου δεν υπάρχει φορτίο αντιστάθμισης. Η πυκνότητα ρεύματος είναι ανάλογη του τετραγώνου της εφαρμοζόμενης τάσης.

Για έναν δεδομένο μονωτή, κάθε διαδικασία αγωγιμότητας μπορεί να κυριαρχεί σε ένα ορισμένο εύρος θερμοκρασίας και τάσης. Για παράδειγμα στους μονωτές  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και  $\text{SiO}_2$  (στην εικόνα 30 παρουσιάζεται η πυκνότητα ρεύματος σε συνάρτηση με το  $1000/T$ ), η πυκνότητα ρεύματος μπορεί να χωριστεί σε τρεις κλίμακες θερμοκρασίας. Σε υψηλές θερμοκρασίες (και σε υψηλά πεδία), η πυκνότητα ρεύματος  $J_1$  οφείλεται στην εκπομπή Frenkel-Poole. Σε ενδιάμεση θερμοκρασία, η πυκνότητα ρεύματος  $J_3$  είναι ωμικής φύσης. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, η αγωγή είναι με σήραγγα και η πυκνότητα ρεύματος  $J_2$  δεν είναι ευαίσθητη στη θερμοκρασία. Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί, ότι το ρεύμα σήραγγας εξαρτάται έντονα από το ύψος του φράγματος, το οποίο σχετίζεται με το ενεργειακό χάσμα των μονωτών ( $\text{Si}_3\text{N}_4$  (4,7 eV) <  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (8,8 eV) <  $\text{SiO}_2$  (9 eV)). Όσο μεγαλύτερο είναι το ενεργειακό χάσμα, τόσο μικρότερο είναι το ρεύμα.



Εικόνα 30: Γραφική παράσταση πυκνότητα ρεύματος συνάρτηση του  $1000/\text{θερμοκρασία}$  σε Κέλβιν, για στρώματα  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , και  $\text{SiO}_2$  [49].

Οι δύο κυρίαρχοι μηχανισμοί σήραγγας είναι ο Fowler-Nordheim και η άμεση σήραγγα. Η τάση στο οξειδίο εμφανίζει τους δυο αυτούς μηχανισμούς διαρροής. Για  $V_{\text{ox}} > \chi/q$ , όπου  $\chi$  η ηλεκτρική συγγένεια του πυριτίου σε eV και  $q$  το ηλεκτρικό φορτίο, τα ηλεκτρόνια του υποστρώματος βλέπουν ένα τριγωνικό φραγμό δυναμικού και το ρεύμα διαρροής της πύλης οφείλεται στο μηχανισμό σήραγγας Fowler-Nordheim. Για  $V_{\text{ox}} < \chi/q$  τα ηλεκτρόνια βλέπουν όλο το πάχος του οξειδίου και ο μηχανισμός που επικρατεί είναι η άμεση σήραγγα. Το διαχωριστικό όριο ανάμεσα στους δυο αυτούς μηχανισμούς είναι η

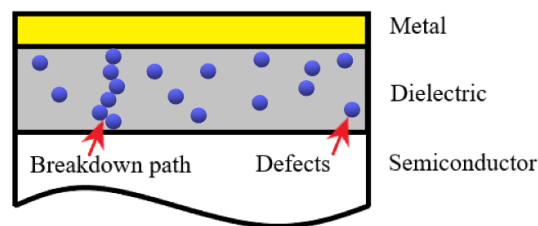
τάση  $V_{ox}=\chi/q$ , η οποία είναι περίπου 3.2V για την επαφή SiO<sub>2</sub>-Si. Απαραίτητη προϋπόθεση για να έχουμε διέλευση φορέων λόγω φαινομένου σήραγγας είναι να έχουμε αρκετά υψηλό ηλεκτρικό πεδίο ( $E_{ox}=V_{ox}/t_{ox}$ ) στο οξειδίο.

Για πάχος οξειδίου 4nm ή μικρότερου, απευθείας σήραγγα είναι η επικρατέστερη. Σε αυτό το πάχος οξειδίου χαμηλότερα ηλεκτρικά πεδία επαρκούν για τη διέλευση των φορέων μέσω του οξειδίου. Καθώς αυξάνεται το πάχος του οξειδίου ξεκινά η σήραγγα Fowler-Nordheim. Υψηλά ηλεκτρικά πεδία αυξάνουν την κάμψη της ζώνης αγωγιμότητας του οξειδίου και επιτρέπουν στα ηλεκτρόνια να διέλθουν με σήραγγα μέσω του οξειδίου και να φορτίσουν τους νανοκρυστάλλους.

## 1.6.2 Διηλεκτρική κατάρρευση

Μικροσκοπικά, η θεωρία διήθησης (percolation theory) που φαίνεται στην εικόνα 31 χρησιμοποιείται για να εξηγήσει την κατάρρευση. Υπό μεγάλο φορτίο τάσης, κάποιο ρεύμα άγεται διαμέσου του μονωτή. Όταν φορείς μετακινούνται διαμέσου του μονωτή, ελαττώματα παράγονται τυχαία στο κύριο μέρος του διηλεκτρικού στρώματος. Όταν τα ελαττώματα είναι αρκετά πυκνά για να σχηματίσουν μια συνεχή αλυσίδα που συνδέει την πύλη με τον ημιαγωγό, δημιουργείται μια διαδρομή αγωγιμότητας και συμβαίνει καταστροφική κατάρρευση. Ρεύμα διαρροής που προκαλείται από τη φόρτιση (Stress Induced Leakage Current-SILC) είναι το ρεύμα που χάνεται από ελαττώματα στο διηλεκτρικό που δημιουργούν οι συνεχείς φορτίσεις.

Ένα μέτρο για την ποσοτικοποίηση της αξιοπιστίας είναι ο χρόνος μέχρι τη κατάρρευση ( $t_{BD}$ ), ο οποίος είναι ο συνολικός χρόνος φόρτισης έως ότου συμβεί η κατάρρευση. Ο  $t_{BD}$  είναι συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης. Ακόμη και μια μικρή τάση που εφαρμόζεται για μεγάλο χρονικό διάστημα μπορεί να προκαλέσει κατάρρευση. Διαφορετικά, ένα μεγάλο πεδίο μπορεί να διατηρηθεί για πολύ μικρό χρονικό διάστημα χωρίς να επέρθει κατάρρευση. Σε δομές που έχουμε νανοκρυστάλλους αντί για πλωτή πύλη που έχουμε συνεχές στρώμα, η κατάρρευση θα επέλθει σε έναν νανοκρύσταλλο, με αποτέλεσμα η μνήμη να μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί με τους υπόλοιπους νανοκρυστάλλους.



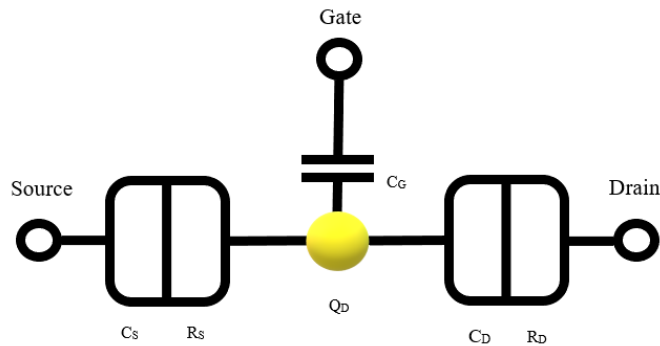
Εικόνα 31: θεωρία διήθησης: κατάρρευση συμβαίνει όταν τυχαία ελαττώματα σχηματίζουν μια αλυσίδα μεταξύ της πύλης και του ημιαγωγού.

## 1.7 Φαινόμενα αποκλεισμού Coulomb, κβαντικός περιορισμός και εφαρμογές

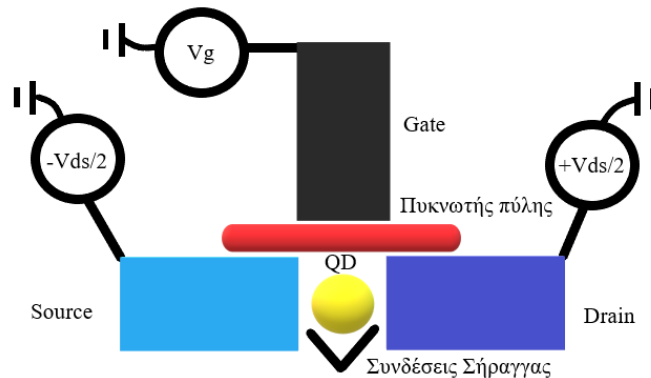
Ένα τρανζίστορ ενός ηλεκτρονίου (SET) [50,51,52] είναι μια ευαίσθητη ηλεκτρονική διάταξη (εικόνα 32) βασισμένη στο φαινόμενο αποκλεισμού Coulomb. Σε αυτή τη διάταξη τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσω μιας σύνδεσης μεταξύ πηγής/απαγωγού και με σήραγγα σε μια κβαντική τελεία [53] (νανοκρύσταλλο). Επιπλέον, το ηλεκτρικό δυναμικό της κβαντικής τελείας μπορεί να ρυθμιστεί από ένα τρίτο ηλεκτρόδιο, γνωστό ως πύλη, η

οποία είναι χωρητικά συνδεδεμένη με την κβαντική τελεία. Η αγώγιμη κβαντική τελεία είναι τοποθετημένη ανάμεσα σε δύο συνδέσεις σήραγγας, οι οποίες προσομοιάζονται από έναν πυκνωτή ( $C_D$  και  $C_S$ ) και μια αντίσταση ( $R_D$  και  $R_S$ ), παράλληλα συνδεδεμένων.

Το τρανζίστορ ενός ηλεκτρονίου έχει, όπως και το τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET), τρία ηλεκτρόδια: πηγή, απαγωγός και πύλη. Η κύρια τεχνολογική διαφορά μεταξύ των δυο τύπων τρανζίστορ είναι στην έννοια του καναλιού. Ενώ το κανάλι αλλάζει από μονωμένο σε αγώγιμο με εφαρμογή τάσης στην πύλη στο FET, το τρανζίστορ ενός ηλεκτρονίου είναι πάντοτε μονωμένο. Η πηγή και ο απαγωγός συνδέονται μέσω δύο συνδέσεων σήραγγας, διαχωρισμένων από μια κβαντική τελεία (QD), από μέταλλο ή ημιαγωγό (εικόνα 33). Το ηλεκτρικό δυναμικό της κβαντικής τελείας μπορεί να ρυθμιστεί με το χωρητικά συνδεδεμένο ηλεκτρόδιο πύλης, για να μεταβάλει την αντίσταση, εφαρμόζοντας μια θετική τάση, η κβαντική τελεία, θα αλλάξει την κατάσταση από αποκλεισμού σε μη αποκλεισμού και τα ηλεκτρόνια θα ξεκινήσουν να διαδίδονται με σήραγγα στην κβαντική τελεία. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως αποκλεισμός Coulomb [54].



Εικόνα 32: Σχηματική αναπαράσταση τρανζίστορ ενός ηλεκτρονίου.



Εικόνα 33: Σχέδιο τρανζίστορ ενός ηλεκτρονίου.

Το ρεύμα,  $I$ , από την πηγή προς τον απαγωγό ακολουθεί το νόμο του Ohm, όταν εφαρμόζεται τάση  $V_{SD}$  είναι ίσο με το  $V_{SD}/R$  όπου  $R$  η κύρια συμβολή της αντίστασης, που προέρχεται από το φαινόμενο σήραγγας, όταν τα ηλεκτρόνια κινούνται από την πηγή στην κβαντική τελεία και από την κβαντική τελεία στον απαγωγό. Η  $V_G$  ρυθμίζει την αντίσταση της κβαντικής τελείας, η οποία ρυθμίζει το ρεύμα. Αυτή η συμπεριφορά είναι ακριβώς η ίδια με το FET. Ωστόσο, όταν απομακρυνόμαστε από τη μακροσκοπική κλίμακα, τα κβαντικά φαινόμενα θα επηρεάσουν το ρεύμα  $I$ .

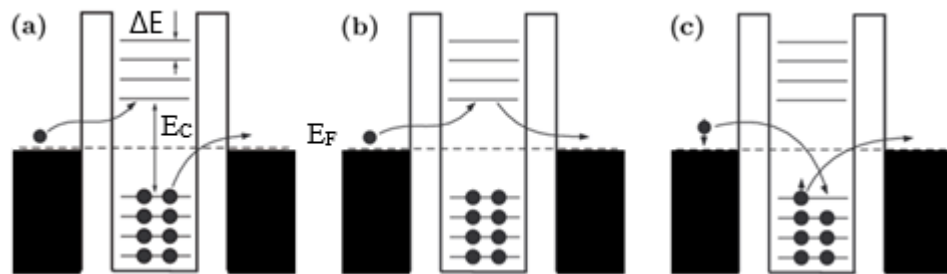
Στην κατάσταση αποκλεισμού όλα τα κατώτερα επίπεδα ενέργειας καταλαμβάνονται στην κβαντική τελεία και κανένα μη κατειλημμένο επίπεδο δεν βρίσκεται μέσα στην περιοχή σήραγγας των ηλεκτρονίων που προέρχονται από την πηγή (source). Όταν ένα ηλεκτρόνιο φτάσει στην κβαντική τελεία, στην κατάσταση μη αποκλεισμού, θα γεμίσει το χαμηλότερο διαθέσιμο επίπεδο κενής ενέργειας, το οποίο θα

αυξήσει το ενεργειακό φράγμα της κβαντικής τελείας, που θα αποτρέψει κάποιο άλλο ηλεκτρόνιο να καταλάβει κάποιο επίπεδο ενέργειας. Το ηλεκτρόνιο θα συνεχίσει τη σήραγγα μέσω της δεύτερης σύνδεσης σήραγγας, μετά από την οποία θα διασκορπιστεί ανελαστικά και θα φτάσει το επίπεδο Fermi του ηλεκτροδίου απαγωγού.

Τα ενεργειακά επίπεδα των κβαντικών τελειών είναι ομοιόμορφα κατανομημένα με ένα διαχωρισμό  $\Delta E$ . Αυτό δημιουργεί μια αυτο-χωρητικότητα  $C$  της κβαντικής τελείας, που ορίζεται ως:  $C=e^2/\Delta E$ . Για να επιτευχθεί ο αποκλεισμός του Coulomb, πρέπει να πληρούνται τρία κριτήρια [53]:

- i. Η τάση πόλωσης πρέπει να είναι μικρότερη από τη στοιχειώδη φόρτιση διαιρεμένη με την αυτο-χωρητικότητα της κβαντικής τελείας:  $V_{\text{bias}} < e/C$
- ii. Η θερμική ενέργεια στην επαφή της πηγής συν τη θερμική ενέργεια της κβαντικής τελείας, δηλαδή  $k_B T$  πρέπει να είναι κάτω από την ενέργεια φόρτισης:  $k_B T \ll e^2/2C$ , διαφορετικά το ηλεκτρόνιο θα μπορεί να περάσει τη κβαντική τελεία μέσω θερμικής διέγερσης.
- iii. Η αντίσταση της σήραγγας  $R_t$ , θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από  $h/e^2$ , η οποία προέρχεται από την αρχή αβεβαιότητας του Heisenberg.  $\Delta E \Delta t = (e^2/2C)(R_t C) > h$  όπου το  $R_t C$  αντιστοιχεί στο χρόνο σήραγγας  $\tau$  και εμφανίζεται ως  $C_S R_S$  και  $C_D R_D$  στην εικόνα 32. Ο χρόνος ( $\tau$ ) της σήραγγας ηλεκτρονίων μέσω του φράγματος είναι αμελητέα μικρός σε σύγκριση με τις άλλες χρονικές κλίμακες. Η παραδοχή αυτή ισχύει για φράγματα σήραγγας που χρησιμοποιούνται σε διατάξεις ενός ηλεκτρονίου, όπου  $\tau \approx 10^{-15} \text{s}$ .

Εάν η αντίσταση όλων των φραγμών σήραγγας του συστήματος είναι πολύ υψηλότερη από την κβαντική αντίσταση  $R_t = h/e^2 = 25.813 \text{k}\Omega$ , αρκεί να περιορίσει τα ηλεκτρόνια στη κβαντική τελεία και είναι ασφαλές να αγνοήσουμε τις συνεκτικές κβαντικές διαδικασίες που αποτελούνται από αρκετά ταυτόχρονα γεγονότα σήραγγας (co-tunnelling).



Εικόνα 34: Παραδείγματα διεργασιών συνδυασμένης σήραγγας (a) ανελαστική συν-σήραγγα: η μεταφορά ενός ηλεκτρονίου μεταξύ των κορυφών, αφήνει πίσω ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής στην κβαντική τελεία, (b) ελαστική συν-σήραγγα, (c) ελαστική συν-σήραγγα με αντιστροφή του spin.

Στον μηχανισμό ανελαστικής συν-σήραγγας, ένα ηλεκτρόνιο με σήραγγα μεταφέρεται από την κορυφή σε ένα από τα κενά επίπεδα της κβαντικής τελείας, ενώ ένα ηλεκτρόνιο καταλαμβάνει κάποια άλλη στάθμη που με σήραγγα έχει εξέρθει από την κβαντική τελεία. Η μεταφορά του φορτίου του ηλεκτρονίου ( $e$ ) μεταξύ των κορυφών συνοδεύεται από ταυτόχρονη δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής στην κβαντική τελεία. Αυτή και άλλες δυο περιπτώσεις φαίνονται στην εικόνα 34.

Σε έναν ιδανικό κόσμο τα φορτία θα παρέμεναν στους νανοκρυστάλλους παγίδευσης για ένα απεριόριστο χρονικό διάστημα, αλλά αυτό δεν συμβαίνει, τα φαινόμενα αποκλεισμού Coulomb και ο κβαντικός περιορισμός, δεν επιτρέπουν στην τέλεια, μη πτητική συμπεριφορά και αυτό είναι ο κύριος λόγος προβλημάτων στο χρόνο συγκράτησης και στα ρεύματα σήραγγας.

Ο αποκλεισμός Coulomb συνδέεται με την αύξηση της δυναμικής ενέργειας σε όλους τους νανοκρυστάλλους. Όταν ένα ηλεκτρόνιο αποθηκεύεται σε μια παγίδα, η ηλεκτροστατική ενέργεια των παγίδων αρχίζει να αυξάνεται, κατά συνέπεια τα ηλεκτρόνια που μπορεί να διέλθουν με σήραγγα στις παγίδες, πρέπει να έχουν μεγαλύτερη ενέργεια για να το κάνουν, καθώς είναι αδύνατο να συνεχίσουν να διέρχονται φορτία με σήραγγα σε ήδη φορτισμένες καταστάσεις παγίδευσης, η πυκνότητα του ρεύματος στο οξειδίο αρχίζει να μειώνεται. Οι κύριοι παράγοντες αύξησης της δυναμικής ενέργειας στον νανοκρυστάλλο σχετίζονται με τον αριθμό των φορτίων, που μπορούν να αποθηκευτούν σε αυτόν, έτσι το μέγεθος των νανοκρυστάλλων και ο αριθμός τους είναι βασικά σημεία για να ρυθμίσεις αυτό το φαινόμενο σε αυτό το είδος διατάξεων. Έτσι θέλουμε να μην είναι πολύ κοντά οι νανοκρυστάλλοι μεταξύ τους, για να μη μεταφέρεται φορτίο από νανοκρυστάλλο σε νανοκρυστάλλο, να είναι ομοιόμορφου μεγέθους και να μην είναι πολύ μεγάλη η διάμετρος (διάσταση των NCs), για να αποφεύγεται η διαρροή ρεύματος.

Όταν υπάρχουν ελαττώματα, ο κβαντικός περιορισμός αρχίζει να αποκτά σημαντικό βάρος στη παγίδευση φορτίου, η ανοδική μετατόπιση στη ζώνη αγωγιμότητας του νανοκρυστάλλου μειώνει την μετατόπιση της ζώνης αγωγιμότητας μεταξύ του νανοκρυστάλλου και του περιβάλλοντος οξειδίου, σε αυτές τις συνθήκες, οι πιθανότητες τα φορτία να επιστρέφουν πίσω με σήραγγα αυξάνονται, μειώνοντας την επίδοση της διάταξης στη συγκράτηση φορτίου.

Ο κβαντικός περιορισμός είναι η αλλαγή των ηλεκτρικών και οπτικών ιδιοτήτων, όταν το υλικό που λαμβάνεται ως δείγμα είναι αρκετά μικρού μεγέθους- συνήθως 10nm ή λιγότερο. Το ενεργειακό χάσμα αυξάνεται καθώς το μέγεθος της νανοδομής μειώνεται. Συγκεκριμένα, το φαινόμενο προκύπτει από τα ηλεκτρόνια και τις οπές που συμπιέζονται σε μια διάσταση που πλησιάζει μια κρίσιμη κβαντική μονάδα, που ονομάζεται exciton ακτίνα του Bohr.

## 1.8 Μνήμες με NCs πυριτίου

Η σμίκρυνση των μνημών Flash ολοκληρώθηκε με την μείωση των χαρακτηριστικών μεγεθών (δηλαδή το μήκος της πύλης) και με ταυτόχρονη μείωση του πάχους του οξειδίου σήραγγας [55]. Οι διατάξεις αντιμετωπίζουν τον περιορισμό ότι, όλα τα αποθηκευμένα φορτία θα διαρρεύσουν πίσω στο κανάλι μέσω της διαδρομής που σχηματίζεται κατά την επαναλαμβανόμενη λειτουργία εγγραφής/διαγραφής. Όταν το μέγεθος της πύλης φθάνει κάτω από τα 25nm, η περαιτέρω συρρίκνωση της διάταξης παρεμποδίζεται από:

- ❖ την σημαντική παρεμβολή της μιας κυψελίδας μνήμης με την άλλη, καθώς η απόσταση μεταξύ πλωτών πυλών, έχει πλέον γίνει συγκρίσιμη με το μέγεθος των κυψελίδων μνήμης και
- ❖ από την μη περαιτέρω μείωση του πάχους του οξειδίου σήραγγας, λόγω της αναξιόπιστης συγκράτησης φορτίου.

Η χρήση των νανοκρυστάλλων ως κόμβων παγίδευσης φορτίου, θα βοηθήσει τόσο στην ελαχιστοποίηση των παρεμβολών, όσο και στην ενίσχυση της αξιοπιστίας μέσω της διαμερισματοποίησης των φορτίων.

Η μνήμη νανοκρυστάλλων θεωρείται ως μια εναλλακτική προσέγγιση για την αντικατάσταση της παραδοσιακής επίπεδης πλωτής πύλης για την αποθήκευση πληροφοριών. Η μνήμη των νανοκρυστάλλων διαθέτει πολλά πλεονεκτήματα. Η ενσωμάτωση νανοκρυστάλλων Si [56], είναι ένα παράδειγμα στοιχείων αποθήκευσης φορτίου σε μη πτητικές διατάξεις μνήμης. Οι μνήμες που βασίζονται σε νανοκρυστάλλους



πλεονεκτούν, λόγω των μειωμένων πλευρικών διαδρομών εκφόρτισης και υπόσχονται μεγαλύτερο χρόνο συγκράτησης φορτιού (retention time), χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και ταχύτερη λειτουργία. Επιπλέον, αντιμετωπίζει το πρόβλημα της σμίκρυνσης των διαστάσεων των συμβατικών μνημών πλωτής πύλης. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις μη πτητικές μνήμες με νανοκρυστάλλους ημιαγωγού είναι, το πυρίτιο (Si) [57], γερμάνιο (Ge) [57], Ge-Si πυρήνας-κέλυφος [58], Ge/Si ετερο-νανοκρυστάλλο [59]. Οι μνήμες νανοκρυστάλλων που βασίζονται σε Si και Ge έχουν διερευνηθεί εκτενώς, επειδή το πυρίτιο (Si) και το γερμάνιο (Ge) είναι πλήρως συμβατά με την βιομηχανία ημιαγωγών. Η NC-NVM ημιαγωγού (με βάση το πυρίτιο) είναι συμβατή με την βιομηχανία με την τεχνολογία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

## 1.9 Μνήμες με μεταλλικούς NCs

Οι μεταλλικοί νανοκρυστάλλοι χρησιμοποιούνται ως κόμβοι, για την παγίδευση φορτιού στις μνήμες φλας τύπου πλωτής πύλης [60]. Τα κύρια πλεονεκτήματα των μεταλλικών νανοκρυστάλλων έναντι των νανοκρυστάλλων ημιαγωγών περιλαμβάνουν:

- ❖ Υψηλότερη πυκνότητα καταστάσεων γύρω από το επίπεδο Fermi.
- ❖ Είναι πιο εύκολο να σχεδιαστούν νανοδιατάξεις μνήμης με ελεγχόμενες ιδιότητες, οι οποίες περιέχουν μεταλλικούς νανοκρυστάλλους σε σχέση με αντίστοιχες νανοδιατάξεις με ημιαγωγίμους.
- ❖ Ευέλικτη διαστασιακή διαμόρφωση των νανοκρυστάλλων.
- ❖ Ευρύ φάσμα διαθέσιμων έργων εξόδου, μεγαλύτερη ελευθερία για ταίριασμα χρόνου διατήρησης του φορτίου και της ταχύτητας εγγραφής-διαγραφής της πληροφορίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι, χρησιμοποιώντας μέταλλα με μεγάλο έργο εξόδου και λεπτά οξειδία σήραγγας είναι δυνατόν να επιτευχθούν υψηλές ταχύτητες εγγραφής/διαγραφής χωρίς μείωση του χρόνου διατήρησης της πληροφορίας, διότι η παγίδευση και η ταχύτητα είναι μεγέθη αντιστρόφως ανάλογα.
- ❖ Καλύτερη επίδοση όσο η τεχνολογία οδεύει σε πάρα πολύ μικρές διαστάσεις. Στους ημιαγωγίμους νανοκρυστάλλους η σμίκρυνση τους έχει σαν αποτέλεσμα, την ελάττωση του βάθους του φρεατίου δυναμικού του νανοκρυστάλλου με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας, να μεταβαίνουν ευκολότερα πίσω στο κανάλι. Στην περίπτωση των μεταλλικών νανοκρυστάλλων, δεν εμφανίζετε τόσο έντονα το φαινόμενο, καθώς υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση ηλεκτρονίων, εξαιτίας του μεγάλου αριθμού ενεργειακών καταστάσεων γύρω από το επίπεδο Fermi.
- ❖ Μικρότερες διαταραχές ενέργειας λόγω του περιορισμού του φορέα [61,62].
- ❖ Πεδία ενισχυμένων πλάσμων: ενισχύουν σημαντικά τα ηλεκτρικά πεδία μεταξύ του νανοκρυστάλλου και του καναλιού ανίχνευσης, που δημιουργείται από την πόλωση της πύλης ελέγχου, με αποτέλεσμα, την πολύ μεγαλύτερη απόδοση στις λειτουργίες χαμηλής τάσης εγγραφής/διαγραφής.
- ❖ Η μεταβολή στην ενέργεια Fermi στους μεταλλικούς νανοκρυστάλλους είναι ελάχιστη, σε σχέση με το επίπεδο Fermi των αντίστοιχων μετάλλων, ενώ οι ημιαγωγίμοι νανοκρυστάλλοι εμφανίζουν διευρυμένο ενεργειακό διάκενο, σε σχέση με τους αντίστοιχους ημιαγωγούς.

- ❖ Δομή ασύμμετρου φραγμού για βελτιωμένη απόδοση της εγγραφής και διατήρησης δεδομένων. Επίσης, η θερμοκρασία σχηματισμού οξειδωσης του NC μπορεί να μειωθεί με μίγμα μετάλλου/πυριτίου.
- ❖ Βαθύτερο φρεάτιο δυναμικού ( $d_{\text{eff}}$ ) στους κόμβους αποθήκευσης λόγω του μεγαλύτερου έργου εξόδου. Η διαρροή φορτίου μπορεί να αποτραπεί βελτιώνοντας τη διεπιφάνεια NCs/διηλεκτρικού.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις μη πτητικές μνήμες με νανοκρυστάλλους μετάλλου είναι μέταλλα και πυριτίδια μετάλλου. Έχουν κατασκευαστεί και μελετηθεί ως προς το φαινόμενο μνήμης νανοκρυστάλλοι Ag [63], Au [64], Pt [65], W [66], Co [67], Ni [68], NiSi<sub>2</sub> [69], Ni<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub> [70], Hf [71], TiN [72] και Al [73] (στις αναφορές χρησιμοποιούνται άλλες μέθοδοι για την κατασκευή νανοκρυστάλλων).

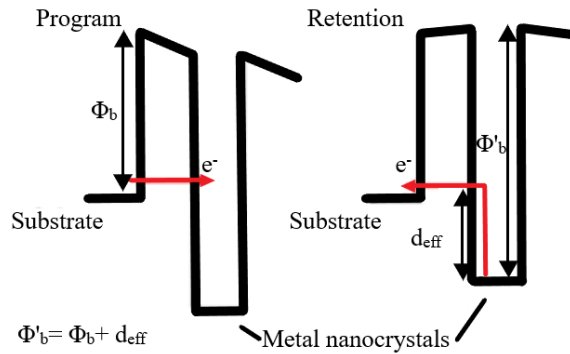
Τα μειονεκτήματα των μνημών μεταλλικών νανοκρυστάλλων είναι:

- ❖ Η ενθυλάκωση του μετάλλου στο SiO<sub>2</sub> απαιτεί κατεργασία σε υψηλή θερμοκρασία >400°C.
- ❖ Η διαρροή φορτίου από τους μεταλλικούς νανοκρυστάλλους.
- ❖ Η υψηλή θερμοκρασία ανόπτησης, μπορεί να προκαλέσει διάχυση των μεταλλικών νανοκρυστάλλων στα περιβάλλοντα στρώματα.
- ❖ Στην περίπτωση δημιουργίας νανοκρυστάλλων μετά από ανόπτηση με laser, η υψηλή ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας, σε συνδυασμό με το πλάτος του παλμού, καθώς και τη χρονική διάρκεια μεταξύ των παλμών, μπορεί να επηρεάσει το στρώμα οξειδίου σήραγγας, με αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου συγκράτησης του φορτίου στους νανοκρυστάλλους.
- ❖ Δυσκολία στον έλεγχο της επιφανειακής πυκνότητας, της ομοιομορφίας και των διαστάσεων των νανοκρυστάλλων.
- ❖ Η μη αποδεδειγμένη ακόμα συμβατότητα των δομών, που τους περιέχουν με τις κλασσικές διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Η παρουσία ενός μετάλλου μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα, γιατί η διάχυση του μετάλλου μπορεί να μολύνει τον καθαρό χώρο (π.χ. τους φούρνους οξειδωσης).

Επιπλέον όλων των προαναφερθέντων, η ηλεκτροστατική μοντελοποίηση (τόσο από την ανάλυση όσο και από την αριθμητική προσομοίωση), έχει δείξει ότι οι μεταλλικοί νανοκρυστάλλοι ενισχύουν σημαντικά το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ του νανοκρυστάλλου και του καναλιού ανίχνευσης που δημιουργείται από την πόλωση της πύλης ελέγχου και επομένως ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να επιτύχει πολύ μεγαλύτερη απόδοση σε χαμηλής τάσης λειτουργία εγγραφής/διαγραφής. Στην τεχνολογία κατασκευών μεταλλικών νανοκρυστάλλων, η απόδοση εγγραφής και η διατήρηση δεδομένων, μπορούν να βελτιωθούν με την κατασκευή μιας ασύμμετρης δομής φραγμού. Επίσης, η θερμοκρασία σχηματισμού οξειδωσης των NCs, μπορεί να μειωθεί με μίγμα μετάλλου/πυριτίου.

Το βάθος του φρεατίου δυναμικού ( $d_{\text{eff}}$ ) στους κόμβους αποθήκευσης, εξαρτάται από το υλικό του μετάλλου, που συσχετίζεται με το έργο εξόδου του μετάλλου. Δημιουργείται ασύμμετρο φράγμα μεταξύ του υποστρώματος και των κόμβων αποθήκευσης (νανοκρυστάλλων), δηλαδή ένα μικρό φράγμα για εγγραφή και ένα μεγάλο φράγμα για συγκράτηση. Η εικόνα 35 δείχνει το διάγραμμα ενεργειακών ζωνών για μεταλλικούς νανοκρυστάλλους, που είναι ενσωματωμένοι μεταξύ του οξειδίου ελέγχου και του οξειδίου σήραγγας, κατά τη διάρκεια (αριστερά) εγγραφής και (δεξιά) συγκράτησης. Ο πίνακας 2 παρουσιάζει το έργο εξόδου διαφόρων υλικών για μεταλλικούς νανοκρυστάλλους, καθώς και το ενεργειακό χάσμα κάποιων ημιαγωγών και οξειδίων

υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς K, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή δομών MOS με NCs.

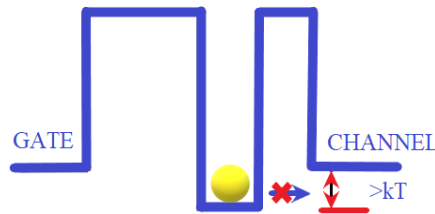


Εικόνα 35: Το διάγραμμα ενεργειακών ζωνών για μεταλλικούς νανοκρυστάλλους, που είναι ενσωματωμένοι μεταξύ του οξειδίου ελέγχου και του οξειδίου σήραγγας, κατά τη διάρκεια (αριστερά) εγγραφής και (δεξιά) συγκράτησης.

Οι μεταλλικοί νανοκρυστάλλοι έχουν πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις δομές του πυριτίου, καθώς έχουν υψηλότερη ηλεκτρονιακή συγγένεια, γεγονός που επιτρέπει την κατασκευή ενός ασύμμετρου φράγματος, μεταξύ του καναλιού Si και των κόμβων αποθήκευσης (εικόνα 36). Αυτή η ασυμμετρία επιτρέπει να αυξηθούν οι χρόνοι συγκράτησης χωρίς να καταστραφούν οι ταχύτητες εγγραφής/διαγραφής.

Μέταλλο	Έργο εξόδου (eV)	Ημιαγωγός	$E_g$ (eV)	Οξείδιο	K	$E_g$ (eV)	$\Delta E_c$ στο Si	$\Delta E_v$ στο Si
Al	4.1	Si	1.11	SiO <sub>2</sub>	3.9	9	3.5	4.4
Au	5.1	Ge	0.67	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9	8.8	2.8	4.9
Ag	4.26	GaAs	1.42	TiO <sub>2</sub>	80	3.5	0	2.4
Pt	5.65	GaP	2.26	ZrO <sub>2</sub>	23	5.8	1.4	3.3
Ni	5.15	InP	1.35	HfO <sub>2</sub>	24	5.8	1.5	3.4
Pd	5.12	InAs	0.35	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15	6	2.3	2.6

Πίνακας 2: Στον πίνακα φαίνονται τα έργα εξόδου διαφόρων μετάλλων, καθώς και οι τιμές του ενεργειακού διακένου ημιαγωγών και οξειδίων υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς K, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή δομών MOS με NCs.



Εικόνα 36: Ενεργειακοί φραγμοί στην περίπτωση ενός μεταλλικού νανοκρυστάλλου με υψηλότερο έργο εξόδου από το πυρίτιο (περιοχή καναλιού).

Αυτή η μορφή φραγμού διευκολύνει τη λειτουργία εγγραφής, δημιουργώντας ένα υψηλότερο ενεργειακό φράγμα προς την πίσω κατεύθυνση για το ηλεκτρόνιο, ο οποίος ευνοεί τα χαρακτηριστικά συγκράτησης. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας διαγραφής, το επίπεδο Fermi του νανοκρυστάλλου πάει πάνω από το άκρο της ζώνης αγωγιμότητας του Si, επιτρέποντας υψηλό ρεύμα διαγραφής μέσω του οξειδίου σήραγγας. Η υψηλή πυκνότητα καταστάσεων γύρω από το επίπεδο Fermi σε ένα μεταλλικό νανοκρυστάλλο, μειώνει την επίδραση των παγίδων στη διεπαφή νανοκρυστάλλου/οξειδίου, κάτι που φαίνεται ότι δεν συμβαίνει με τους νανοκρυστάλλους Si. Ο κβαντικός περιορισμός καθορίζει τις συνθήκες συγκράτησης φορτίου στους νανοκρυστάλλους πυριτίου,

δεδομένου ότι οι έντονα περιορισμένες ηλεκτρονιακές καταστάσεις του νανοκρυστάλλου βρίσκονται σε υψηλότερη ενέργεια από την άκρη της ζώνης αγωγιμότητας στο υπόστρωμα πυριτίου και διευκολύνουν τη σήραγγα.

### 1.10 Μνήμη με NCs οξειδίων υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς K

Στις μη πτητικές μνήμες νανοκρυστάλλων, έχει διερευνηθεί η κατασκευή νανοκρυστάλλων οξειδίων υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς K, όπως HfO<sub>2</sub> [74] και CeO<sub>2</sub> [75], οι οποίοι ενσωματωμένοι σε SiO<sub>2</sub> μπορούν να συγκρατήσουν τα αποθηκευμένα φορτία μετά από μια δοκιμή αντοχής (endurance).

Τα μειονεκτήματα των μνημών αυτών περιλαμβάνουν

- ❖ Υψηλό ρεύμα διαρροής από οξείδια μετάλλων.
- ❖ Σταθερές παγίδες φορτίου ατελειών παράγονται από νανοκρυστάλλους υψηλού K σε διηλεκτρικό στρώμα. Αυτές οι σταθερές παγίδες φορτίου ατελειών, θα αποτελέσουν ανεπιθύμητη θωράκιση, με την παρεμπόδιση των κινούμενων φορτίων, στην φόρτιση και εκφόρτιση του τρανζίστορ μνήμης.

### 1.11 Ανόπτηση με Laser ή Ταχεία θερμική ανόπτηση, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Η ανάπτυξη μεταλλικών νανοσωματιδίων στις δομές MOS, με χρήση της μεθόδου ανόπτησης με laser (LA), υπερέρχει σημαντικά της κλασσικής μεθόδου θερμικής ανόπτησης (RTA) [76], κυρίως για τους εξής λόγους:

- I. **Ταχύτητα Θέρμανσης.** Η ανόπτηση με laser προσφέρει εξαιρετικά γρήγορη θερμική επεξεργασία, η οποία είναι ταχύτερη από την RTA (της τάξης των ns αντί για ms ή sec).
- II. **Τοπική θέρμανση με σάρωση του μεταλλικού υμενίου έναντι καθολικής.** Η RTA υποβάλλει ολόκληρο το υπόστρωμα σε θερμική ανόπτηση, το πλεονέκτημα της ανόπτησης με laser είναι ότι μπορεί να εφαρμοσθεί επιλεκτικά (με τρόπο «γραφής με laser»).
- III. **Στην ανόπτηση με laser το μέταλλο δεν διαχέεται στα γειτονικά στρώματα,** χρησιμοποιώντας ανόπτηση με laser σε χαμηλή ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας [11].

## 2. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΜΩΝ

### 2.1 Εισαγωγή

Το μεγαλύτερο πλήθος δειγμάτων κατασκευάστηκε στο Nottingham Trent University του Ηνωμένου Βασιλείου και στο εργαστήριο iSMART (Innovations in Surfaces Materials And Related Technologies). Μέρος της κατασκευής έγινε στο Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας (INN) του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» και στο εργαστήριο Ηλεκτρονικών Υλικών και Νανοηλεκτρονικών Διατάξεων του τομέα Ηλεκτρομαγνητικών Εφαρμογών Ηλεκτροοπτικής και Ηλεκτρονικών Υλικών του ΕΜΠ.

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζεται ο τρόπος κατασκευής των δομών MOS (μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού) με μεταλλικούς νανοκρυστάλλους στο εσωτερικό των οξειδίων (δηλαδή μεταξύ του οξειδίου σήραγγας και του οξειδίου πύλης), καθώς και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία αυτών των διατάξεων. Η πρακτική εφαρμογή αυτών των δομών, είναι η χρήση τους ως μνήμες αποθήκευσης δεδομένων. Το φαινόμενο μνήμης σε αυτές τις διατάξεις, οφείλεται στην παγίδευση ηλεκτρικού φορτίου εντός των μεταλλικών νανοκρυστάλλων. Οι νανοκρυστάλλοι δρουν ως φρεάτια δυναμικού και συγκρατούν το ηλεκτρικό φορτίο.

### 2.2 Πειραματική ανάπτυξη των δομών

Κατασκευάστηκαν τρία είδη δομών: i) δομή MOS χωρίς μέταλλο ii) δομή MOS με μέταλλο μεταξύ των οξειδίων (φαινομένου σήραγγας και φραγμού) και iii) δομή Si n-type/SiO<sub>2</sub>/μέταλλο. Τα δείγματα των ομάδων i,ii κατασκευάστηκαν για ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των δομών, ενώ τα δείγματα της ομάδας iii κατασκευάστηκαν για δομικό χαρακτηρισμό με μικροσκόπιο. Στο δομικό χαρακτηρισμό μελετώνται, οι μεταλλικοί νανοκρυστάλλοι, το σχήμα, το μέγεθος, η ομοιομορφία και η απόσταση μεταξύ τους. Ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός έγινε με μετρήσεις C-V, I-V κ.λπ. όπου μελετώνται τα φαινόμενα υστέρησης, που αποδεικνύουν το φαινόμενο μνήμης, η συγκράτηση του φορτίου και η αντοχή σε κύκλους εγγραφής/διαγραφής. Για τις ανάγκες της έρευνας κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν 18 ομάδες δειγμάτων στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, από αυτά τα πιο σημαντικά, που θα δείξουμε και αργότερα μετρήσεις, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 3.

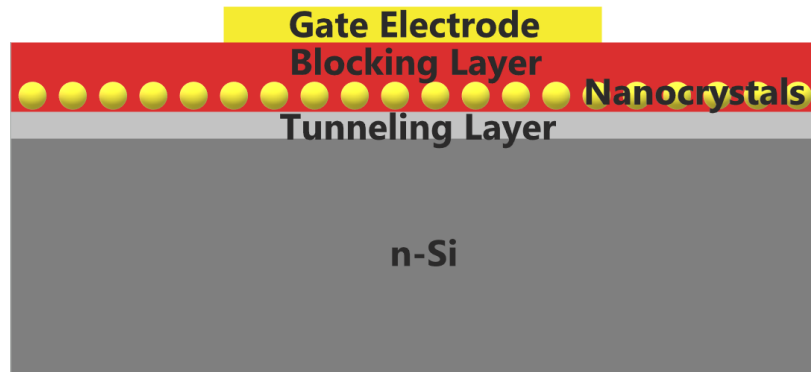
ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ MOS ΜΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ  
ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ΜΕ LASER

Δείγμα (κωδική ονομασία)	Σχόλια	Ιδιότητα
LKSW01	Si n-type (100) Resistivity (1-10ohm.cm) / SiO <sub>2</sub> (5nm) / Ag (10nm) / Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (40nm). Πύλη (gate): Au. Πίσω επαφή (back contact): Ag. Laser annealing του στρώματος μετάλλου.	Δείγμα μνήμης MOS με νανοκρυστάλλους
LKSW05	Si n-type (100) Resistivity (1-10ohm.cm) / SiO <sub>2</sub> (5nm) / Ag (5nm) / Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (40nm). Πύλη (gate): Au. Πίσω επαφή (back contact): Al. Laser annealing του στρώματος μετάλλου.	Δείγμα μνήμης MOS με νανοκρυστάλλους
LKSW06	Si n-type (100) Resistivity (1-10ohm.cm) / SiO <sub>2</sub> (5nm) / Ag (2.5nm) / Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (40nm). Πύλη (gate): Au. Πίσω επαφή (back contact): Al. Laser annealing του στρώματος μετάλλου.	Δείγμα μνήμης MOS με νανοκρυστάλλους
LKSW07	Si n-type (100) Resistivity (1-5ohm.cm) / SiO <sub>2</sub> (3,72nm) έγινε στο ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ / Ag (5nm) ή Au (5nm) / Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (40nm). Πύλη (gate): Au. Πίσω επαφή (back contact): Al. Laser annealing του στρώματος μετάλλου. Χρήση μάσκας στην εναπόθεση του στρώματος μετάλλου που μετατρέπουμε σε νανοκρυστάλλους με laser annealing, για την απομόνωση των στοιχείων μνήμης μεταξύ τους.	Δείγμα μνήμης MOS με νανοκρυστάλλους
LKSW09	Si n-type (100) Resistivity (1-10ohm.cm) / SiO <sub>2</sub> (5nm) / μισό wafer Ag (5nm) και το άλλο μισό Ag (2.5nm). Laser annealing του στρώματος μετάλλου.	Δείγμα για παρατήρηση των νανοκρυστάλλων σε μικροσκόπιο
LKSW10	Si n-type (100) / SiO <sub>2</sub> (5nm) Resistivity (1-10ohm.cm) / μισό wafer Au (5nm) και το άλλο μισό Au (2.5nm). Laser annealing του στρώματος μετάλλου.	Δείγμα για παρατήρηση των νανοκρυστάλλων σε μικροσκόπιο
LKSW13	Si n-type (100) Resistivity (1-10ohm.cm) / SiO <sub>2</sub> (3.7nm) / Ag (5nm) / Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (40nm). Πύλη (gate): Au. Πίσω επαφή (back contact): Al. Laser annealing του στρώματος μετάλλου.	Δείγμα μνήμης MOS με νανοκρυστάλλους
LKSW14	Si n-type (100) Resistivity (1-10ohm.cm) / SiO <sub>2</sub> (5nm) / Ag (5nm) / Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (40nm). Πύλη (gate): Au. Πίσω επαφή (back contact): Al. Laser annealing του στρώματος μετάλλου.	Δείγμα μνήμης MOS με νανοκρυστάλλους
LKSW15	Si n-type (100) Resistivity (1-10ohm.cm) / SiO <sub>2</sub> (3.7nm) / Ag (5nm) / Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (40nm). Πύλη (gate): Au. Πίσω επαφή (back contact): Al. Laser annealing του στρώματος μετάλλου. Χρήση μάσκας στην εναπόθεση του στρώματος μετάλλου που μετατρέπουμε σε νανοκρυστάλλους με laser annealing, για την απομόνωση των στοιχείων μνήμης μεταξύ τους.	Δείγμα μνήμης MOS με νανοκρυστάλλους
LKSW16	Si n-type (100) Resistivity (0.1-1ohm.cm) / SiO <sub>2</sub> (3.7nm) / Ag (5nm) / Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (40nm). Πύλη (gate): Au. Πίσω επαφή (back contact): Al. Laser annealing του στρώματος μετάλλου. Χρήση μάσκας στην εναπόθεση του στρώματος μετάλλου που μετατρέπουμε σε νανοκρυστάλλους με laser annealing, για την απομόνωση των στοιχείων μνήμης μεταξύ τους.	Δείγμα μνήμης MOS με νανοκρυστάλλους
LKSW17	Si n-type (100) Resistivity (1-5ohm.cm) / SiO <sub>2</sub> (3.5nm) / Au (4nm) / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (30nm). Πύλη (gate): Al. Πίσω επαφή (back contact): Al. Laser annealing του στρώματος μετάλλου.	Δείγμα μνήμης MOS με νανοκρυστάλλους
LKSW18	Si n-type (100) Resistivity (1-5ohm.cm) / SiO <sub>2</sub> (3.5nm) / Au (3.18nm) / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (40nm). Πύλη (gate): Al. Πίσω επαφή (back contact): Al. Laser annealing του στρώματος μετάλλου.	Δείγμα μνήμης MOS με νανοκρυστάλλους

**Πίνακας 3: Πίνακας παρασκευασθέντων δειγμάτων.**

Οι παρασκευασθείσες δομές μνήμης έχουν τη μορφή MOS, πιο συγκεκριμένα αποτελούνται:

Πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού (100) τύπου n αναπτύσσεται ένα λεπτό στρώμα SiO<sub>2</sub> πάχους 3.7nm που δια μέσου φαινομένου σήραγγας, φορτίζει τους μεταλλικούς νανοκρυστάλλους και για το λόγο αυτό, θα αποκαλείται από εδώ και στο εξής οξειδίο σήραγγας. Πάνω σε αυτό εναποτίθεται ένα λεπτό στρώμα μετάλλου (Au ή Ag), που μετά την ανόπτηση με laser, δημιουργεί νανοκρυστάλλους. Μετά τη δημιουργία των νανοκρυστάλλων, αναπτύσσεται ένα παχύτερο οξειδίο μεγάλης διηλεκτρικής σταθεράς (στην περίπτωσή μας είναι είτε Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> πάχους 40nm είτε Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> πάχους 30nm ή 40nm), που λειτουργεί σαν οξειδίο φραγής, εμποδίζοντας τη διαρροή φορτίου προς το άνω μεταλλικό ηλεκτρόδιο πύλης. Σαν μέταλλο για το ηλεκτρόδιο πύλης χρησιμοποιήθηκε χρυσός ή αλουμίνιο. Σχηματικό διάγραμμα της ολοκληρωμένης διάταξης φαίνεται στο ακόλουθη εικόνα 37.



Εικόνα 37: Δομή μνήμης MOS.

Τα κατασκευαστικά στάδια της δομής περιγράφονται στη συνέχεια.

### 2.2.1 Καθαρισμός του δισκιδίου Si

Το Si είναι ένα στοιχείο που έχει την τάση να αναπτύσσει πολύ γρήγορα, με την έκθεση του στην ατμόσφαιρα, το αυτοαναπτυσσόμενο οξείδιο του πυριτίου (native oxide,  $\text{SiO}_x$ ). Η απομάκρυνση του μη επιθυμητού αυτού οξειδίου, πραγματοποιείται, πριν την ξηρή θερμική οξείδωση των υποστρωμάτων, μέσω χημικού καθαρισμού. Για τον καθαρισμό των υποστρωμάτων, η χημική μέθοδος καθαρισμού, που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται συνοπτικά παρακάτω:

- ❖ Τα υποστρώματα καθαρίζονται με απιονισμένο νερό (DI).
- ❖ Έπειτα τα υποστρώματα εμβαπτίζονται σε διάλυμα HF (2% v/v) για ένα λεπτό.
- ❖ Μετά το πέρας ενός λεπτού τοποθετούνται τα υποστρώματα πάλι σε τρεχούμενο απιονισμένο-υπερκάθαρο νερό (DI).
- ❖ Ένδειξη της επιτυχούς απομάκρυνσης του αυτοαναπτυσσόμενου οξειδίου είναι η μετατροπή της επιφάνειας του υποστρώματος, από υδρόφιλη σε υδρόφοβη.
- ❖ Τέλος, για να στεγνώσουν τα υποστρώματα, έτσι ώστε, να είναι έτοιμα για την οξείδωση ψεκάζονται με αέριο άζωτο. Επίσης αέριο άζωτο χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό της επιφάνειας του υποστρώματος στα ενδιάμεσα στάδια της κατασκευής των μνημών, για να φύγουν τυχόν ανεπιθύμητες προσμίξεις από την επιφάνεια.

### 2.2.2 Ανάπτυξη λεπτού οξειδίου με θερμική οξείδωση

Πάνω σε δισκίδιο n-Si (100) με ειδική αντίσταση  $\rho=1-5\Omega\text{cm}$  κατασκευάζεται λεπτό στρώμα  $\text{SiO}_2$ , πάχους 3,5nm (οξείδιο σήραγγας), με τη μέθοδο της ξηρής θερμικής οξείδωσης. Ο τύπος του φούρνου που χρησιμοποιείται είναι θερμικός ατμοσφαιρικός (thermal atmospheric furnace) με σωλήνα χαλαζία (quartz tube). Η οξείδωση γίνεται στους  $850^\circ\text{C}$ , υπό ροή μοριακού οξυγόνου ( $\text{O}_2$ ) 10scem. Η δημιουργία του συγκεκριμένου πάχους διαρκεί περίπου 10min. Ακολουθεί ανόπτηση στους  $920^\circ\text{C}$  σε αδρανές περιβάλλον αζώτου ( $\text{N}_2$ ) για 20min. Μετά την ανάπτυξη του υμενίου οξειδίου στο επιθυμητό πάχος, στα δισκία γίνεται ανόπτηση, συνήθως σε αδρανές περιβάλλον σε θερμοκρασία που είναι ίδια ή λίγο

υψηλότερη από την θερμοκρασία οξειδωσης, ακριβώς πριν βγουν από τον φούρνο. Αυτή η διεργασία ονομάζεται ανόπτηση μετά την οξείδωση (Post-Oxidation Anneal, POA) και είναι απαραίτητη, ώστε να βελτιωθούν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του υμενίου του οξειδίου. Η ανόπτηση έχει ως σκοπό να μειωθεί, όσο είναι δυνατόν, ο αριθμός παγίδων στη διεπιφάνεια Si/SiO<sub>2</sub>, καθώς και στο εσωτερικό του διηλεκτρικού. Η καθαρότητα των αερίων είναι 99,99%. Για την καθαρότητα του χώρου χρησιμοποιούνται ειδικά φίλτρα. Το πάχος του οξειδίου μετριέται στο τέλος με ελλειψόμετρο.

### 2.2.3 Ανάπτυξη μεταλλικών νανοκρυστάλλων μέσω ανόπτησης με laser

Πάνω στο οξείδιο σήραγγας εναποτίθεται με τη μέθοδο του sputtering μεταλλικό στρώμα Au ή Ag με ονομαστικό πάχος 5nm. Σε αυτό το πάχος το μέταλλο έχει τη μορφή νησίδων (islands). Για λόγους σύγκρισης, διατάξεις που δεν έχουν μεταλλικούς νανοκρυστάλλους, έχουν επίσης κατασκευασθεί για να χρησιμοποιηθούν ως δομές αναφοράς.

Η ομοιομορφία της ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας (fluence) στο ίχνος του laser που επικεντρώνεται η δέσμη στο δείγμα είναι καλύτερη από 2%. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση του ομογενοποιητή. Μεταβολή (αύξηση ή μείωση) πάνω από 10% στην ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας, είναι απαραίτητη προκειμένου να υπάρξει διακύμανση στους νανοκρυστάλλους, όπως ελέγχεται μέσω φασματοσκοπίας οπτικής ανάκλασης (μια τεχνική εξαιρετικά ευαίσθητη στη διακύμανση του νανοκρυστάλλου, καθώς βασίζεται στον συντονισμό τοπικών επιφανειακών πλασμονίων των νανοκρυστάλλων).

Η περιορισμένη επιφάνεια του ίχνους της ακτινοβολία του laser, προσφέρει στη διαδικασία της ανόπτησης την τοπική επιλεκτικότητα στην επιθυμητή περιοχή, αυξάνει τις δυνατότητες της κατασκευής. Τα συστήματα γρήγορης σάρωσης έχουν ήδη γίνει αποδεκτά και χρησιμοποιούνται πράγματι σε γραμμές παραγωγής (τα τρανζίστορ λεπτών υμενίων (TFTs) σε οθόνες υγρών κρυστάλλων (LCD), είναι ένα παράδειγμα). Τέτοια συστήματα μπορεί να είναι συστήματα «ιπτάμενης οπτικής» ('flying optics') ή «ανίχνευσης ράστερ» ('raster scan') τα οποία μπορούν εύκολα να καλύψουν μεγάλες επιφάνειες κατά την επεξεργασία κατά παρτίδες ή ακόμη και την επεξεργασία ιστού - web processing (roll to roll).

Το μέταλλο είναι το υλικό που μετατρέπεται σε νανοκρυστάλλους μετά από την ανόπτηση με KrF laser. Για την δημιουργία μικρών διαστάσεων, σχετικά πυκνών, ομοιογενών και ομοιόμορφων νανοκρυστάλλων οι μεταβλητές παράμετροι που αλλάζουμε στην ανόπτηση με laser είναι, η ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας (laser fluence) και ο αριθμός των παλμών (number of laser pulses).

Η ανόπτηση με laser πραγματοποιήθηκε με ένα σύστημα laser διέγερσης (excimer laser system) της Lambda Physik LPX 305i (εικόνα 38), που είναι ικανό να εκπέμψει μη πολωμένο φως (πλάτος παλμού 25ns) με ενέργεια έως 1200mJ ανά παλμό σε μήκος κύματος 248nm (KrF) και με ενέργεια 600mJ ανά παλμό σε μήκος κύματος 193nm (ArF). Στην κατασκευή νανοκρυστάλλων χρησιμοποιήθηκε δέσμη φθοριούχου κρυπτού με μήκος κύματος 248nm, επίσης το σύστημα περιλαμβάνει έναν εξασθενητή δέσμης (με ανακλαστική πλάκα και έναν αντισταθμιστή) για τη ρύθμιση της ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας, έναν ομογενοποιητή (Exitech Ltd. Type EX-HS-700D), οπτικά προβολής (φακός πεδίου και φακός προβολής σε μεγέθυνση x5), ενώ μια βάση τοποθέτησης δειγμάτων ελεγχόμενης κίνησης στα επίπεδα X-Y-Z από ηλεκτρονικό υπολογιστή, χρησιμοποιήθηκε για να χειριστεί το δείγμα και να επιτρέψει στο laser να

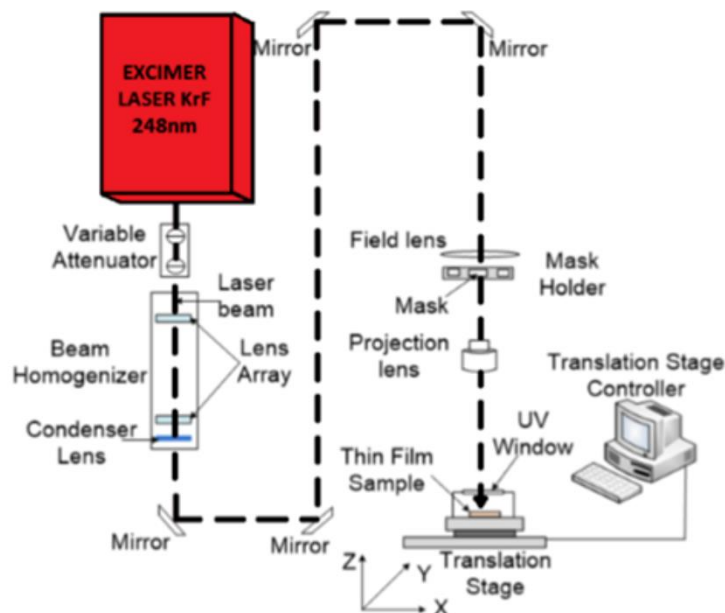


ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ MOS ΜΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ  
ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ΜΕ LASER

επεξεργαστεί διαφορετικές περιοχές στην επιφάνειά του. Ένα σχέδιο της όλης διάταξης φαίνεται στην εικόνα 39. Η διάταξη που παρουσιάζεται στην εικόνα έχει κατασκευαστεί, για να μπορέσει η δέσμη να μετατραπεί από οριζόντια, που βγάζει το laser (το οποίο είναι μεγάλων διαστάσεων και δεν είναι εύκολα διαχειρίσιμο), σε κάθετη με τις όσο το δυνατό μικρότερες απώλειες, στην ομοιογένεια, την ένταση και ταυτόχρονα να είναι μια πιο εύχρηστη θέση για το χειρισμό των δειγμάτων. Ρυθμίζοντας τον εξασθενητή, επιτυγχάνεται διαφορετική ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας στο σημείο εστίασης στην επιφάνεια του δείγματος. Επιπλέον, ο αριθμός των παλμών μεταβάλλεται με στόχο να επιτευχθούν ομοιόμορφα διεσπαρμένοι νανοκρύσταλλοι όμοιου μεγέθους. Το ίχνος που αφήνει το laser στα δείγματα ρυθμίζεται με κατάλληλη μάσκα (μπορεί να μεταβληθεί το μέγεθος και το σχήμα του ίχνους), ώστε να είναι τετράγωνο  $2.5 \times 2.5 \text{mm}^2$ . Με τη μεταβολή της ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας του σημείου του laser (από τα  $150 \text{mJcm}^{-2}$  στα  $600 \text{mJcm}^{-2}$  ανά παλμό) και του αριθμού παλμών (από 1 έως 150 παλμούς), είναι δυνατό να ελεγχτεί η πυκνότητα, η ομοιομορφία και το μέγεθος των μεταλλικών νανοκρυστάλλων [77].



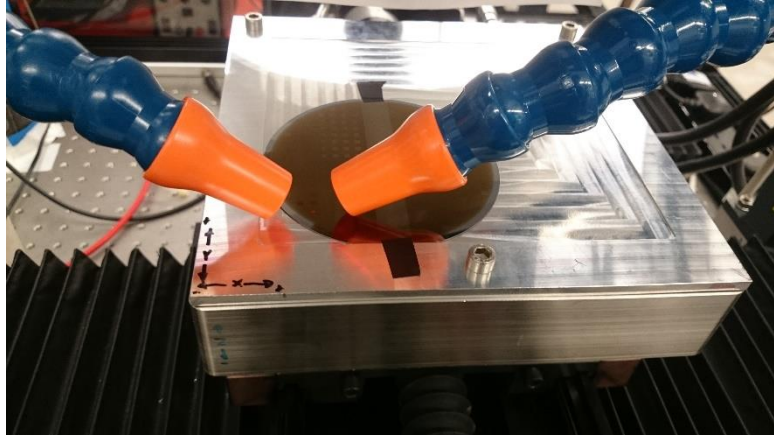
Εικόνα 38: Φωτογραφία laser διέγερσης που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή νανοκρυστάλλων.



Εικόνα 39: Σχηματική διάταξη του χρησιμοποιούμενου συστήματος απόπτωσης με KrF laser διέγερσης.

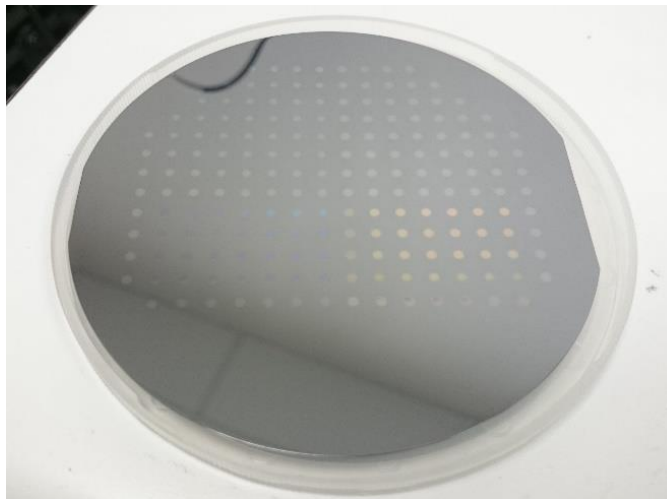
ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ MOS ΜΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ  
ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ΜΕ LASER

Στην εικόνα 40 παρουσιάζεται η διαδικασία κατασκευής νανοκρυστάλλων. Οι σωλήνες τραβούν ότι αέριο δημιουργείται από την ανόπτηση. Η κόκκινη κουκίδα πάνω στο δείγμα μας δείχνει που θα χτυπήσει το laser. Στην συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποια δείγματα από αυτά που κατασκευάστηκαν, η μελέτη βασίστηκε σε νανοκρυστάλλους χρυσού, που έδειχναν καλύτερα ηλεκτρικά αποτελέσματα.



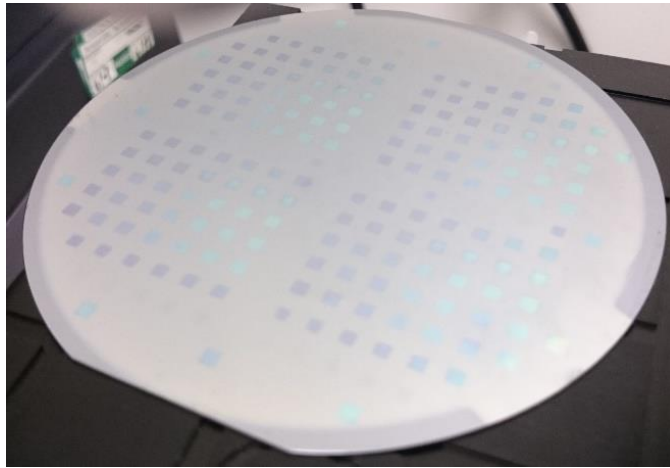
**Εικόνα 40:** Ανόπτηση με laser, όπου φαίνεται η διαδικασία κατασκευής νανοκρυστάλλων.

Η εικόνα 41 παρουσιάζει δείγμα, στο οποίο έχει γίνει εναπόθεση δυο μετάλλων, χρυσού και αργύρου με μάσκα, έτσι ώστε να υπάρχει ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ των διατάξεων μνήμης. Επίσης υπάρχει χώρος που δεν έχει μέταλλο, για να κατασκευαστούν σκέτα MOS, τα οποία χρησιμοποιούνται ως δείγματα αναφοράς. Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια δείγματα, από αυτά που κατασκευάστηκαν για να φανούν τα βήματα. Η εικόνα 42 παρουσιάζει την εικόνα των δειγμάτων μετά την ανόπτηση με laser.



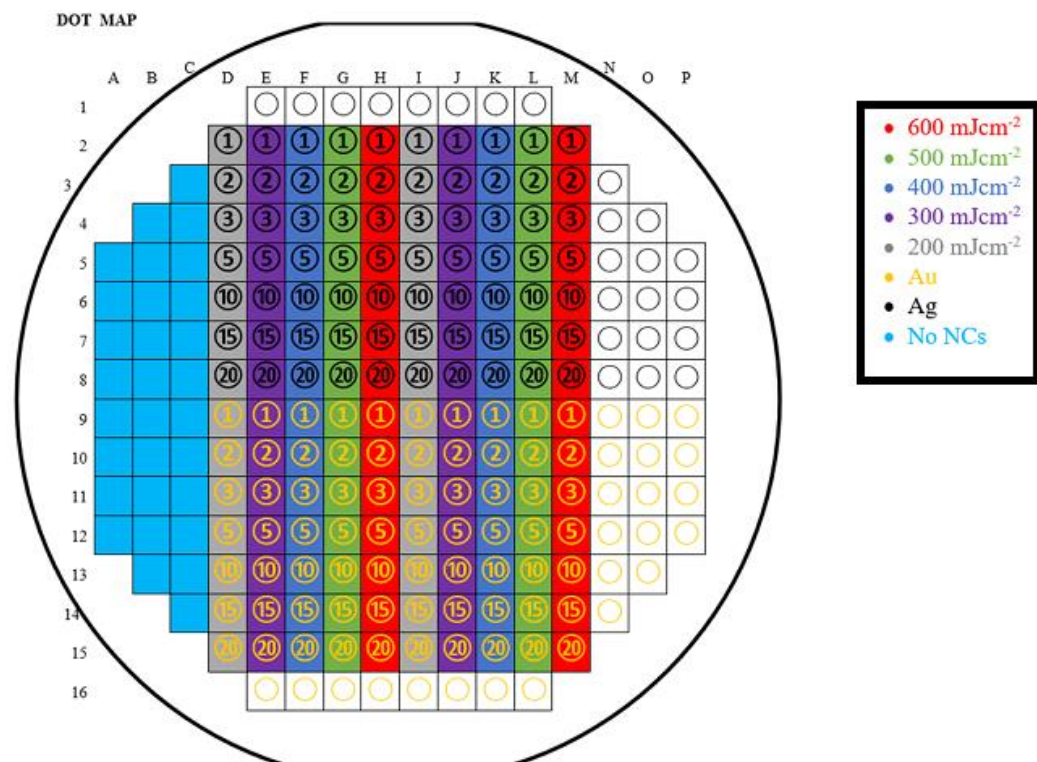
**Εικόνα 41:** Δείγμα μετά την εναπόθεση μετάλλου. Αριστερά το μισό είναι στρώμα αργύρου και το άλλο μισό στρώμα χρυσού, στο κάτω μέρος δεν έχει μέταλλο, για να κατασκευαστούν δείγματα αναφοράς.

ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ MOS ΜΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ  
ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ΜΕ LASER



Εικόνα 42: Δείγμα μετά από την ανόπτηση με laser.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η εικόνα του δείγματος LKSW07, που κατασκευάστηκε για τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των μνημών (εικόνα 43), το αρχικό πάχος του μετάλλου σε αυτό το δείγμα είναι 5nm. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το υλικό που είναι κατασκευασμένοι οι νανοκρύσταλλοι (με ένα κύκλο, αν είναι μαύρος είναι άργυρος και αν είναι χρυσαφί είναι χρυσός), οι αριθμοί υποδηλώνουν τον αριθμό των παλμών που εφαρμόστηκαν, αν δεν υπάρχουν αριθμοί σημαίνει ότι η εναπόθεση μετάλλου υπάρχει, αλλά δεν έχει γίνει ανόπτηση με το laser, τα χρώματα δείχνουν την ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας που εφαρμόστηκε σε μονάδες  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ . Τέλος το ανοιχτό γαλάζιο, υποδηλώνει ότι δεν έχει γίνει εναπόθεση μετάλλου, για σχηματισμό νανοκρυστάλλων, δηλαδή έχουμε διάταξη MOS (τέτοια στοιχεία χρησιμοποιούνται ως δείγματα αναφοράς).



Εικόνα 43: Δείγμα LKSW07, στο οποίο φαίνονται τα χαρακτηριστικά κατασκευής των μνημών.

#### 2.2.4 Εναπόθεση οξειδίου φραγής

Η ανάπτυξη των δομών, δηλαδή η εναπόθεση οξειδίων και μετάλλων, γίνεται κατά κύριο λόγο με φυσική εναπόθεση πλάσματος, σε θάλαμο υψηλού κενού ( $\sim 10^{-7}$  mbar). Πιο συγκεκριμένα, με RF magnetron sputtering κατασκευάζεται οξείδιο του υτρίου ( $Y_2O_3$ ) και με Εναπόθεση Ατομικού Στρώματος (ALD - Atomic Layer Deposition) κατασκευάζεται οξείδιο του αλουμινίου ( $Al_2O_3$ ), που είναι διηλεκτρικά υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς  $K$  και χρησιμοποιούνται σαν οξείδια φραγής. Επίσης με ιοντοβολή (sputtering) γίνεται η εναπόθεση μετάλλων. Τα μέταλλα που χρησιμοποιήθηκαν ως λεπτό μεταλλικό στρώμα, που στη συνέχεια τους εφαρμόζεται ανόπτηση με laser για τη κατασκευή νανοκρυστάλλων, είναι ο άργυρος (Ag), ο χρυσός (Au) και η πλατίνα (Pt). Η πάνω επαφή ή πύλη του MOS κατασκευάστηκε από Au ή Al με ιοντοβολή. Τέλος, η πίσω επαφή των δομών MOS γίνεται με εξάχνωση, που είναι πολύ ταχεία διαδικασία εναπόθεσης.

Εκτός από το οξείδιο του υτρίου, το οποίο παρατηρήθηκε να αναπτύσσεται με δενδριτική μορφή πάνω στους νανοκρυστάλλους, που επηρεάζει αρνητικά τη συγκράτηση φορτιού, χρησιμοποιήθηκε και οξείδιο του αλουμινίου ως οξείδιο φραγής, για να βελτιώσει τα χαρακτηριστικά των μνημών, καθώς από την ανάπτυξή του με το ALD κατασκευάζεται άμορφο, δημιουργώντας καλύτερη μόνωση συνεπώς μικρότερο ρεύμα διαρροής.

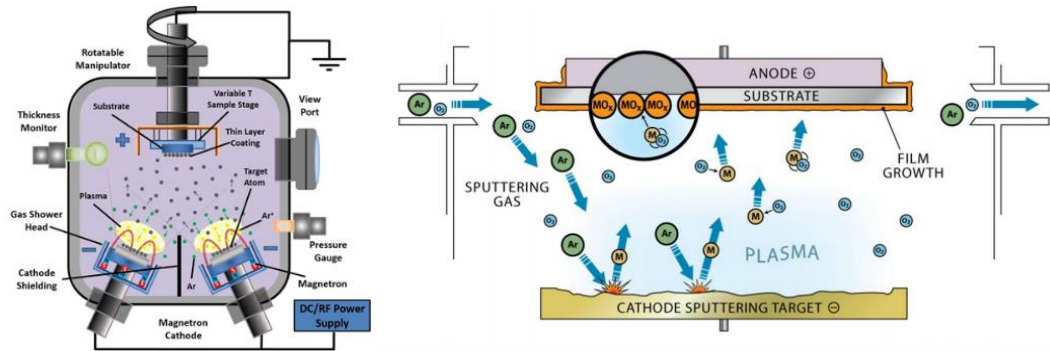
#### I) $Y_2O_3$ με τη μέθοδο εναπόθεσης RF magnetron sputtering

Στην παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος εναπόθεσης RF magnetron sputtering για την κατασκευή λεπτού στρώματος  $Y_2O_3$  πάνω σε διάφορες επιφάνειες (νανοκρυστάλλους χρυσού, στρώμα μετάλλου και  $SiO_2$ ). Με τον όρο ιοντοβολή (sputtering) περιγράφεται το φαινόμενο κατά το οποίο η επιφάνεια ενός υλικού στόχου βομβαρδίζεται με επιταχυνόμενα ιόντα, αποκολλώντας άτομα από την επιφάνεια του υλικού-στόχου. Πάνω από το στόχο υπάρχει το περιστρεφόμενο υπόβαθρο συγκράτησης των υποστρωμάτων, στο οποίο επικάθονται τα αποκολλημένα άτομα του στόχου και τελικά σχηματίζουν το επιθυμητό υμένιο. Όλη η διαδικασία λαμβάνει χώρα μέσα σε ένα θάλαμο κενού. Στον θάλαμο εισέρχεται αδρανές αέριο, στην περίπτωσή μας αργό (Ar), το οποίο ιονίζεται με την εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης μεταξύ των ηλεκτροδίων και δημιουργεί πλάσμα.

Ένας μόνιμος μαγνήτης ορίζει γραμμές μαγνητικής ροής κάθετες στο εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο από την πηγή ραδιοσυχνότητας και παράλληλες προς την επιφάνεια του στόχου. Το μαγνητικό πεδίο εντοπίζεται και ενισχύει το πλάσμα στο σημείο ακριβώς πάνω από τον στόχο, παγιδεύοντας ηλεκτρόνια κοντά στην επιφάνεια του στόχου. Αυτή η μαγνητική επίδραση (magnetron effect) ενισχύει την σύγκρουση των ιόντων του αργού με το στόχο αυξάνοντας τον ρυθμό εναπόθεσης. Ενώ τα ιόντα του αργού συγκρούονται με τον στόχο του  $Y_2O_3$  και άτομα αποκολλώνται από την επιφάνειά του, αν στο θάλαμο εισαγόταν ένα ενεργό αέριο, για παράδειγμα το οξυγόνο (reactive sputtering), θα μπορούσε να αυξηθεί η ήδη καλή στοιχειομετρία του οξειδίου του υτρίου. Η ροή του αργού ελέγχεται από έναν ελεγκτή ροής μάζας (mass flow controller). Η ισχύς της διαδικασίας προσαρμόζεται αναλόγως, ώστε να ελέγχεται ο ρυθμός εναπόθεσης του υλικού. Ελέγχοντας την ποσότητα του υλικού που αποκολλάται από τον στόχο και το αέριο που βρίσκεται μέσα στο θάλαμο, η σύνθεση και το πάχος του φιλμ μπορεί να επιτευχθεί με μεγάλη ακρίβεια. Επίσης θα μπορούσαν να γίνουν εναποθέσεις με προσμίξεις τοποθετώντας ένα δεύτερο στόχο μέσα στον θάλαμο. Το επιθυμητό ποσοστό των προσμίξεων μπορεί να επιτευχθεί με ακρίβεια ελέγχοντας το σχετικό μέγεθος των στόχων και την ισχύ. Όταν γίνεται με συνεχές ρεύμα (DC sputtering), χρησιμοποιούνται τάσεις 3-

ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ MOS ME ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ  
ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ΜΕ LASER

5 kV. Όταν γίνεται με εναλλασσόμενο ρεύμα (RF sputtering), οι συχνότητες κυμαίνονται γύρω στα 14MHz. Η απόδοση του sputtering εξαρτάται από πολλά πράγματα: τη γωνία με την οποία τα ιόντα συγκρούονται με την επιφάνεια του υλικού, με πόση ενέργεια προσκρούουν, τις μάζες τους, τις μάζες των ατόμων στόχων και την ενέργεια δέσμευσης της επιφάνειας του στόχου. Εάν ο στόχος διαθέτει κρυσταλλική δομή, ο προσανατολισμός των αξόνων του σε σχέση με την επιφάνεια είναι ένας σημαντικός παράγοντας. Στην εικόνα 44 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας συστήματος RF Sputtering. Ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτής της τεχνικής σχετικά με το οξείδιο του υτρίου είναι ο αργός ρυθμός εναπόθεσης.

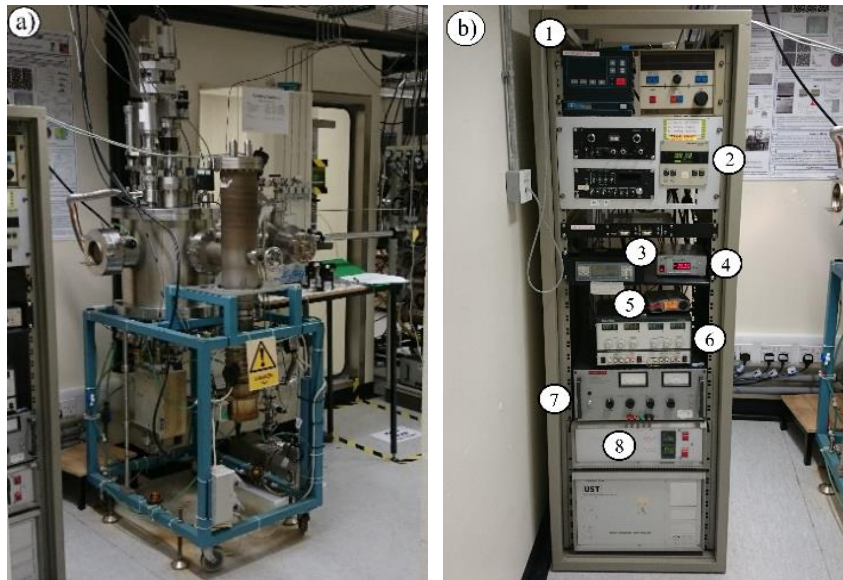


Εικόνα 44: Αρχή λειτουργίας RF-sputtering (πηγές: αριστερά AdNaNoTek, δεξιά ALCA TECHNOLOGY).

Στην εικόνα 45 παρουσιάζεται το σύστημα ιοντοβολής που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των στρωμάτων μετάλλου και οξειδίου. Το δείγμα μπαίνει πάνω στην αρπάγη στο προθάλαμο. Αφού κλείσει η πόρτα και φτάσει σε ικανοποιητικό κενό ο προθάλαμος, ανοίγεται η βαλβίδα μαχαιριού και το δείγμα μεταφέρεται στο εσωτερικό του κύριου θαλάμου με τη μαγνητική αρπάγη. Η αρπάγη αφήνει το δισκίδιο του πυριτίου σε περιστρεφόμενο υπόβαθρο συγκράτησης στον κύριο θάλαμο. Η ροή του αργού (Ar) στο θάλαμο είναι 4sccm. Στη συνέχεια ρυθμίζεται η περιστροφή του δείγματος στο περιστρεφόμενο υπόβαθρο συγκράτησης στα 12RPM. Το δείγμα αρχικά θερμαίνεται στους 700°C προκειμένου να απομακρυνθούν τυχόν ανεπιθύμητα σωματίδια από την επιφάνεια του SiO<sub>2</sub>. Η θερμοκρασία του υποστρώματος ρυθμίζεται με τη βοήθεια νήματος πυράκτωσης που υπάρχει στο θάλαμο, ενώ μετριέται με θερμοστοιχείο. Ο ρυθμός εξάχνωσης των υλικών προς το υπόστρωμα μετριέται με αισθητήρες κρυστάλλου χαλαζία. Όλες οι εναποθέσεις γίνονται σε θερμοκρασία δωματίου. Το επόμενο βήμα είναι η εναπόθεση μετάλλου με ισχύ δημιουργίας πλάσματος 40W, το μεταλλικό στρώμα μετέπειτα υποβάλλεται σε ανόπτηση με laser για την κατασκευή νανοκρυστάλλων. Μετά την εναπόθεση μετάλλου το δείγμα βγαίνει από το θάλαμο, με την αντίστροφη πορεία, χωρίς να διαταράσσεται πολύ το κενό του κύριου θαλάμου. Το επόμενο στάδιο είναι η ανόπτηση με το laser που θα περιγραφεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.

Μεταγενέστερα, μετά την κατασκευή νανοκρυστάλλων, το δείγμα ξαναμπαίνει στο θάλαμο για την εναπόθεση του διηλεκτρικού υψηλής σταθεράς, με τον ίδιο τρόπο και συνθήκες που περιγράφηκαν προηγουμένως, με τη διαφορά ότι στο Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> η ισχύς δημιουργίας πλάσματος είναι 120W.

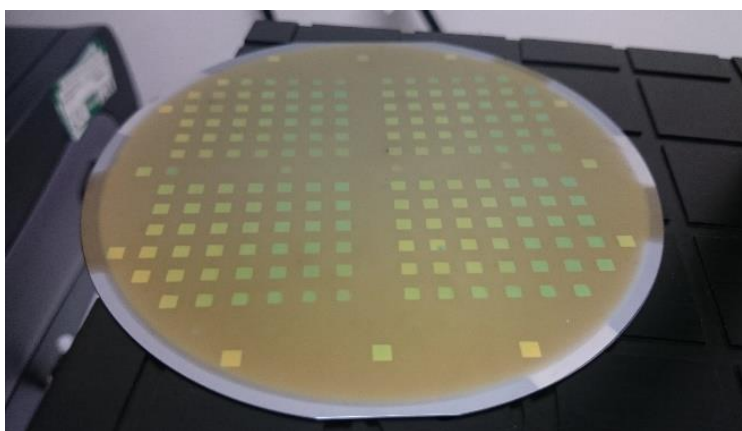
ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ MOS ME ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ  
ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ΜΕ LASER



Εικόνα 45: Φωτογραφίες α) του συστήματος ιοντοβολής, β) των ηλεκτρονικών: 1. Τροφοδοσία ραδιοσυχνότητας 2. Μετρητής πίεσης θαλάμου εναπόθεσης BARATRON (mTorr), 3. Οθόνη παρακολούθησης πάχους, 4. Μετρητής πίεσης θαλάμου εναπόθεσης BALZER TPG 300 (mbar), 5. Ρύθμιση ταχύτητας περιστροφικής περιστρεφόμενου υπόβαθρου συγκράτησης δειγμάτων, 6. τροφοδοσία laser παρακολούθησης της εξέλιξης της εναπόθεσης, 7, 8. Θέρμανση δείγματος.

Για την παρακολούθηση της εξέλιξης της εναπόθεσης χρησιμοποιείται μια τυπική διάταξη φασματοφωτομετρικού συστήματος μέτρησης των συντελεστών φασματικής ανάκλασης που αποτελείται από τα εξής βασικά τμήματα: μία φωτεινή-πηγή, η οποία είναι ένα laser κόκκινου χρώματος και έναν ανιχνευτή. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τη φωτεινή πηγή, η οποία είναι μια ομογενής δέσμη συγκεκριμένου μήκους κύματος, διέρχεται μέσω παραθύρου στο θάλαμο κενού και προσπίπτει στην επιφάνεια του υποστρώματος που πραγματοποιείται εναπόθεση. Η ανακλώμενη ακτινοβολία συλλέγεται από έναν ανιχνευτή, ο οποίος είναι συνήθως ένας φωτοπολλαπλασιαστής ή μία συστοιχία φωτοδιόδων, που λαμβάνει τη φασματική ισχύ ακτινοβολίας που ανακλάται από το υπόστρωμα. Ένας υπολογιστής που συνδέεται με τον ανιχνευτή χρησιμοποιείται για την ανάλυση, επεξεργασία και απεικόνιση των δεδομένων.

Στην εικόνα 46 φαίνεται το δείγμα μετά την εναπόθεση οξειδίου του υτρίου.



Εικόνα 46: Δείγμα μετά από την εναπόθεση διηλεκτρικού στρώματος υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς, στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι  $Y_2O_3$ .

## II) $\text{Al}_2\text{O}_3$ με τη μέθοδο εναπόθεσης ατομικού στρώματος

Κατά την εναπόθεση στρώματος με τη μέθοδο εναπόθεσης ατομικού στρώματος (Atomic Layer Deposition-ALD) σε ένα υπόστρωμα, εκτίθεται η επιφάνεια του υποστρώματος σε εναλλασσόμενα είδη αερίων (αναφέρονται ως πρόδρομα). Σε κάθε έναν από αυτούς τους παλμούς τα πρόδρομα μόρια αντιδρούν με την επιφάνεια με αυτοπεριοριστικό τρόπο, έτσι ώστε η αντίδραση να τερματίζεται μόλις καταναλωθούν όλες οι θέσεις αντίδρασης στην επιφάνεια. Συνεπώς, η μέγιστη ποσότητα υλικού που εναποτίθεται στην επιφάνεια μετά από μία και μόνη έκθεση σε όλα τα πρόδρομα αέρια (αυτός αποκαλείται κύκλος ALD) προσδιορίζεται από τη φύση της αλληλεπίδρασης προδρόμου-επιφάνειας. Με την αύξηση του αριθμού των κύκλων είναι δυνατό να αναπτυχθούν υλικά ομοιόμορφα και με μεγάλη ακρίβεια στο πλέγμα ξεκινώντας από ένα στρώμα, ακόμα και ενός ατόμου, σε πολύπλοκα και μεγάλα υποστρώματα. Η εικόνα 47 παρουσιάζει το σύστημα ALD που χρησιμοποιείται.



Εικόνα 47: ALD που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή οξειδίου φραγής  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Η ανάπτυξη ενός υλικού με τη μέθοδο ALD γίνεται μέσω κύκλων εναπόθεσης (deposition cycles) ακολουθώντας τέσσερα κύρια βήματα:

1. Στο πρώτο βήμα το υπόστρωμα εκτίθεται σε “παλμό” (χρονικής διάρκειας msec) οξειδωτικού μέσου, που είναι συνήθως το νερό, με αποτέλεσμα την πλήρη επικάλυψη της επιφάνειας του υποστρώματος με υδρατμούς.
2. Στο δεύτερο βήμα (χρονικής διάρκειας της τάξης των sec), εισάγεται αέριο-μεταφορέας στο θάλαμο των αντιδράσεων για να απομακρύνει τα μόρια υδρατμών που δεν έχουν προσροφηθεί στην επιφάνεια του υποστρώματος. Το ρόλο του αερίου-μεταφορέα παίζει ένα ευγενές ή αδρανές αέριο που συνήθως είναι  $\text{N}_2$  πολύ υψηλής καθαρότητας.
3. Στο τρίτο βήμα (χρονικής διάρκειας της τάξης των msec), το υπόστρωμα εκτίθεται στον “παλμό” της πρόδρομης ένωσης. Η ένωση αυτή αντιδρά με τους υδρατμούς της επιφάνειας του υποστρώματος για να σχηματιστεί το ατομικό στρώμα του επιθυμητού υμενίου.
4. Στο τέταρτο και τελευταίο βήμα του κύκλου (χρονικής διάρκειας της τάξης των sec), εισάγεται εκ νέου αέριο-μεταφορέας στο θάλαμο αντιδράσεων για την απομάκρυνση των παραπροϊόντων της αντίδρασης και των μορίων της πρόδρομης ένωσης που δεν αντέδρασαν με τους υδρατμούς.

### 2.2.5 Κατασκευή ωμικών επαφών

Εφόσον έχουν κατασκευαστεί οι νανοκρύσταλλοι και έχει γίνει και η εναπόθεση του διηλεκτρικού υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς, για την πραγματοποίηση ηλεκτρικών μετρήσεων, κατασκευάζονται μεταλλικές επαφές πάνω και κάτω στο δείγμα.

#### I) Πάνω επαφή

Η πάνω επαφή-πύλη (top contact-gate) κατασκευάζεται με μεταλλική μάσκα έτσι η εναπόθεση της πύλης γίνεται με ιοντοβολή πάνω στο οξείδιο υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς, αυτό είναι το σημείο που ακουμπά η ακίδα των μετρητικών οργάνων και καθιστά δυνατή την μέτρηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των δομών. Στην ακόλουθη εικόνα 48 παρουσιάζεται η διάτρητη μεταλλική μάσκα που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία κυκλικών μεταλλικών επαφών διαμέτρου ενός χιλιοστού (1mm). Η μάσκα σκιάς τοποθετείται πάνω στο δείγμα και η εναπόθεσή περνά μέσα από τις οπές. Οι πυκνωτές MOS που κατασκευάζονται με DC sputtering έχουν εμβαδόν  $0.785\text{mm}^2$ .



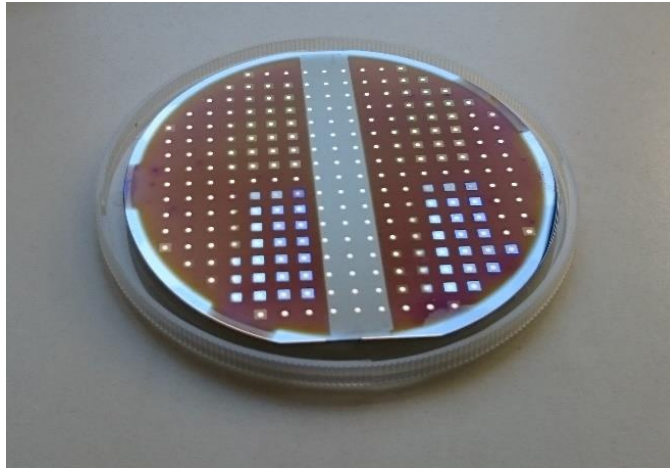
Εικόνα 48: Διάτρητη μεταλλική μάσκα για την κατασκευή της πύλης στις δομές.

Σημαντικό ρόλο στην κατασκευή των επαφών παίζουν:

- ❖ η καλή ευθυγράμμιση με τις τετραγωνικές περιοχές (ίχνος που αφήνει η ανόπτηση με laser και περιέχουν τους μεταλλικούς νανοκρυστάλλους), πάνω στην επιφάνεια του δείγματος, που έχουν υποστεί ανόπτηση
- ❖ και η καλή επαφή της μάσκας με το δείγμα έτσι ώστε η πύλη να έχει σαφές κυκλικό σχήμα.

Οι επαφές που κατασκευάστηκαν με την τεχνική της ιοντοβολής. Τα μέταλλα που χρησιμοποιήθηκαν για πύλες, είναι ο χρυσός (Au) ή το αλουμίνιο (Al). Το τελικό δείγμα με τις επαφές για να γίνουν ηλεκτρικές μετρήσεις παρουσιάζεται στην εικόνα 49.

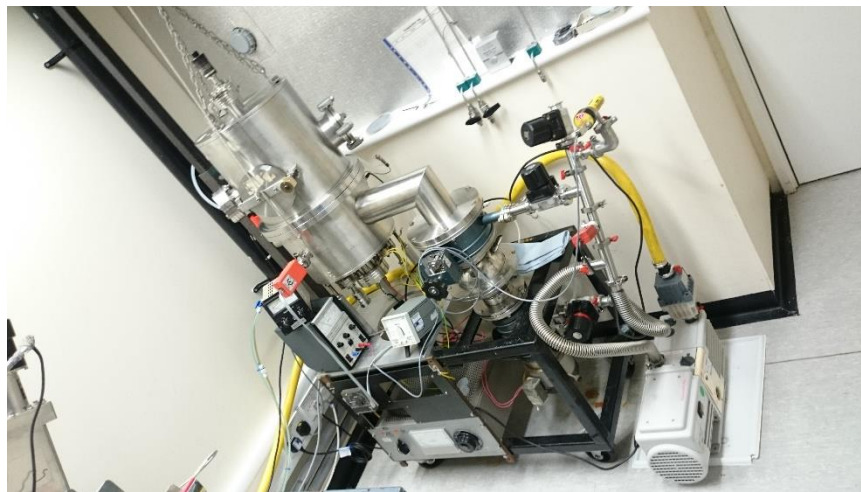




Εικόνα 49: Τελικό δείγμα όπου έχουν κατασκευαστεί όλες οι επαφές.

## II) Κάτω επαφή

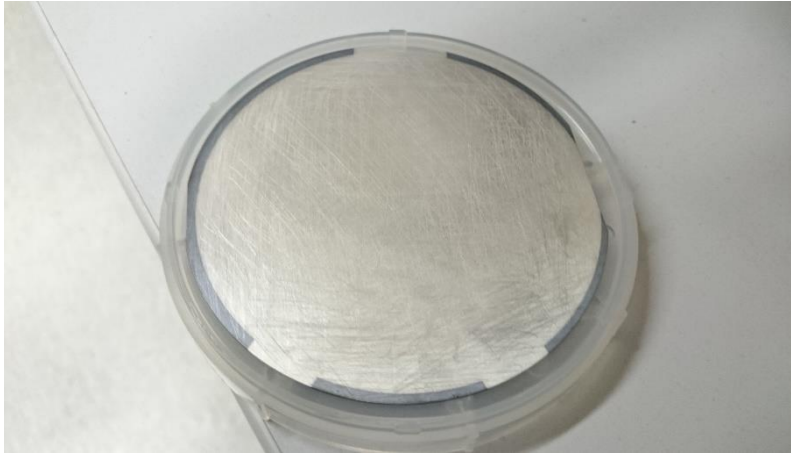
Η κατασκευή της κάτω επαφής (back contact) με τον θερμικό εξαχνωτή (εικόνα 50) γίνεται στο τελευταίο στάδιο της κατασκευής, όπου κατευθείαν, με μεγάλη ταχύτητα εξαχνώνεται όλη η ποσότητα του τοποθετημένου υλικού. Για την πίσω επαφή χρησιμοποιείται αλουμίνιο που δημιουργεί ωμική επαφή στο πυρίτιο.



Εικόνα 50: Φωτογραφία εξαχνωτή.

Στην εικόνα 51 παρουσιάζεται δείγμα που βρίσκεται στο τελικό στάδιο κατασκευής έχοντας εναποτεθειμένο αλουμίνιο την πίσω πλευρά.

ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ ΜΟS ΜΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ  
ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ΜΕ LASER



**Εικόνα 51:** Δείγμα μετά την εναπόθεση αλουμινίου για τη δημιουργία πίσω επαφής.

### 3. ΔΟΜΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣΘΕΙΣΩΝ ΔΟΜΩΝ

#### 3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει συσχετισμός των συνθηκών ανάπτυξης των δομών με νανοκρυστάλλους με το μέγεθος, την πυκνότητα και το σχήμα τους. Αυτός ο συσχετισμός θα γίνει από την μελέτη εικόνων κάτοψης (plan-view) και κάθετης τομής (cross-section), με τη βοήθεια ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης και διέλευσης. Αρχικά θα γίνει σύντομη περιγραφή του μικροσκοπίου σάρωσης και διέλευσης ηλεκτρονίων, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή.

#### 3.2 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM/EDS)

Η Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy) είναι μια τεχνική που επιτρέπει την απεικόνιση αντικειμένων στην μικρο- και νάνο-κλίμακα. Είναι μια από τις πιο γνωστές τεχνικές για την μελέτη επιφανειακής μορφολογίας και τοπογραφίας. Σε ένα σύστημα SEM μια εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει όλη την επιφάνεια του δείγματος παράγοντας δευτερογενή ηλεκτρόνια, ηλεκτρόνια οπισθοσκέδασης και χαρακτηριστικές ακτίνες X. Τα σήματα αυτά συλλέγονται από ανιχνευτές και συνθέτουν εικόνες του δείγματος. Η ανελαστική σκέδαση ηλεκτρονίων που προκαλείται από την αλληλεπίδραση μεταξύ των ηλεκτρονίων του δείγματος και των προσπιπτόντων ηλεκτρονίων της δέσμης, καταλήγει στην εκπομπή ηλεκτρονίων χαμηλής ενέργειας κοντά στην επιφάνεια του δείγματος. Τα ηλεκτρόνια αυτά που εκπέμπονται από την επιφάνεια του δείγματος είναι γνωστά ως δευτερογενή ηλεκτρόνια. Η απεικόνιση δευτερογενών ηλεκτρονίων παρέχει μια εικόνα υψηλής ανάλυσης της επιφανειακής μορφολογίας. Τα ηλεκτρόνια οπισθοσκέδασης παράγονται από τις ελαστικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ του δείγματος και της προσπίπτουσας δέσμης ηλεκτρονίων.

Κάποια από τα προσπίπτοντα ηλεκτρόνια μπορεί να συγκρουστούν με κάποιον ατομικό πυρήνα και να αναπηδήσουν. Συγκρίνοντας με τα δευτερογενή ηλεκτρόνια, τα ηλεκτρόνια αυτά έχουν υψηλότερη ενέργεια και είναι γνωστά ως ηλεκτρόνια οπισθοσκέδασης. Η απεικόνιση ηλεκτρονίων οπισθοσκέδασης χρησιμοποιείται για στοιχειακή ανάλυση, καθώς και για επιφανειακή τοπογραφία. Οι παραγόμενες ακτίνες X αποτελούν την βάση της φασματοσκοπίας ακτίνων X ενεργειακής διασποράς (Energy-dispersive X-ray spectroscopy EDS/EDX). Το EDS είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της στοιχειακής σύνθεσης ενός υλικού. Χρησιμοποιείται σχεδόν πάντα σε συνδυασμό με το SEM. Τα περισσότερα από τα χημικά στοιχεία μπορούν να ταυτοποιηθούν μέσω του EDS. Οι ακτίνες X παράγονται σε μια περιοχή περίπου σε βάθος 2μm. Ο μόνος ίσως περιορισμός είναι το κατά πόσον ο συγκεκριμένος τύπος ανιχνευτή μπορεί και καταγράφει μαλακές ακτίνες X (10nm–0.10nm, 0.12eV–12keV) των ελαφρών στοιχείων. Για την περίπτωση μη αγωγίμων δειγμάτων, μια αγωγή επιστροφή είναι απαραίτητη πάνω από το υλικό για να αποφεύγεται η φόρτιση. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με τη μικροσκοπία ηλεκτρονικής σάρωσης εκπομπής πεδίου (Field Emission Scanning Electron Microscope - FESEM). Στο FESEM, η πηγή ηλεκτρονίων είναι μια κάθοδος εκπομπής πεδίου η οποία παρέχει μια στενότερη δέσμη, με αποτέλεσμα τόσο τη βελτιωμένη χωρική ανάλυση, καθώς και την ελαχιστοποίηση φόρτισης του δείγματος. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε σύστημα FESEM (FEI Nova NanoSEM 200 (εικόνα 52) καθώς και άλλα μικροσκόπια σάρωσης τέτοιου τύπου, στο Ηνωμένο Βασίλειο καθώς και

στον τομέα Φυσικής της ΣΕΜΦΕ), με τάση επιτάχυνσης 2-15kV και δευτερογενή ή/και ηλεκτρόνια οπισθοσκέδασης ανάλογα με το υπό μελέτη υλικό.



Εικόνα 52: Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης εκπομπής πεδίου, που χρησιμοποιείται για το δομικό χαρακτηρισμό των νανοκρυστάλλων.

### 3.3 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Διέλευσης (TEM)

Η Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Διέλευσης (Transmission Electron Microscopy -TEM) λειτουργεί με δέσμη ηλεκτρονίων, όπου τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται υπό τάση 200kV. Κατόπιν η δέσμη εστιάζεται από δύο συγκεντρωτικούς φακούς και διέρχεται μέσα από το υπό μελέτη δείγμα (πάχους ~100nm). Τέλος, το σχηματιζόμενο είδωλο εστιάζεται και μεγεθύνεται από ένα αντικειμενικό και δύο προβολικούς φακούς και προβάλλεται είτε σε φθορίζουσα οθόνη, είτε σε ένα CCD. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου στηρίζεται στο φαινόμενο της περίθλασης και συγκεκριμένα στο νόμο του Bragg. Οι γκρίζες αποχρώσεις σε μία φωτογραφία TEM αποδίδονται στις διαφορετικές σκεδάσεις των ηλεκτρονίων μέσα στην υπό μελέτη δομή. Συνεπώς, μέσω της τεχνικής αυτής δύναται να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τη φάση των υλικών που απαρτίζουν την υπό μελέτη δομή (άμορφη, πολυκρυσταλλική, κρυσταλλική κτλ.), το πάχος τους καθώς και τη διεπιφάνεια που σχηματίζουν (επίπεδη ή μη) μεταξύ τους. Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το μικροσκόπιο Philips CM20, το οποίο βρίσκεται στο Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας (INN) του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος». Στην εικόνα 53 που ακολουθεί φαίνεται το μικροσκόπιο που χρησιμοποιείται για το δομικό χαρακτηρισμό των δομών μνήμης.

Σημειώνεται ότι το συγκεκριμένο μικροσκόπιο είναι εφοδιασμένο με σύστημα EDX (Energy dispersive X-ray analysis) και με σύστημα EELS (Electron Energy Loss Spectroscopy) με τη βοήθεια των οποίων είναι δυνατή η χημική ανάλυση δειγμάτων σε νανομετρική κλίμακα. Προκειμένου να γίνει δομικός χαρακτηρισμός των δειγμάτων σε κάθετη τομή, με χρήση του μικροσκοπίου διέλευσης ηλεκτρονίων, απαιτείται να γίνει ειδική επεξεργασία των δειγμάτων. Παρακάτω αναφέρονται οι διεργασίες που απαιτούνται για την επεξεργασία των δειγμάτων αυτών, προκειμένου αυτά να είναι κατάλληλα για δομικό χαρακτηρισμό από το μικροσκόπιο διέλευσης ηλεκτρονίων.



**Εικόνα 53:** Εικόνα του μικροσκοπίου διέλευσης ηλεκτρονίων (TEM) τύπου Philips CM20, το οποίο χρησιμοποιείται για το δομικό χαρακτηρισμό των παρασκευασθεισών δομών. Με το συγκεκριμένο μικροσκόπιο έγινε παρατήρηση κάθετης τομής στοιχείου μνήμης, καθώς επίσης και παρατήρηση του τρόπου με τον οποίο είναι διατεταγμένα στον χώρο, τα διάφορα στρώματα των παρασκευασθεισών δομών.

### 3.3.1 Διεργασίες σε δείγματα όπου θα γίνει παρατήρηση εικόνων κάθετης τομής

Προκειμένου να παρατηρηθούν οι δομές με το μικροσκόπιο διέλευσης ηλεκτρονίων, απαιτείται μία διαδικασία προετοιμασίας των δειγμάτων η οποία χωρίζεται σε διάφορα στάδια. Στόχος της προετοιμασίας αυτής είναι η μείωση του πάχους των υπό μελέτη δομών ( $<1000\text{\AA}$ ), ώστε να γίνεται διαπερατή από τα ηλεκτρόνια δέσμης.

- i. Χρησιμοποιείται υγρό άζωτο για πάγωμα της δομής, έτσι ώστε να μη τραβηχτεί ο χρυσός, αλλά να κοπεί κάθετα για να μη καλύψει τη δομή που θα δούμε στο μικροσκόπιο. Από το δείγμα κόβονται δυο πολύ μικρά κομμάτια και τοποθετούνται σε δακτύλιο τιτανίου (Ti), έτσι ώστε οι πλευρές με τα λεπτά υμένια, να βρίσκονται σε καλή επαφή και σε πλήρη ευθυγράμμιση η μία ακριβώς απέναντι από την άλλη. Η σύνδεση μεταξύ των δύο κομματιών και της βάσης από τιτάνιο επιτυγχάνεται μέσω μίας κόλλας.
- ii. Στη συνέχεια γίνεται λέπτυνση των δειγμάτων, έως τα  $100\mu\text{m}$  πάχους, με μηχανικό τρόπο με χρήση τριβείου. Τα χαρτιά που χρησιμοποιούνται στο τριβείο αποτελούνται από SiC.
- iii. Ακολουθεί λείανση με χρήση της ίδιας συσκευής αλλά εφοδιασμένη με χαρτιά μικρότερης τραχύτητας.
- iv. Με χρήση της συσκευής “Dimpler” γίνεται τοπικά περαιτέρω λέπτυνση, από την πίσω πλευρά του δείγματος, μέχρι το δείγμα να αποκτήσει τοπικά πάχος  $10\mu\text{m}$ , σχηματίζοντας στην επιφάνεια της δομής κατάλληλο κοίλο σχήμα (το επονομαζόμενο σχήμα Dimple).
- v. Η περεταίρω μείωση του πάχους δεν μπορεί να επιτευχθεί με μηχανικό τρόπο, οπότε το δείγμα εισάγεται σε συσκευή δέσμης ιόντων, όπου γίνεται λέπτυνση τοπικά, στην αντίθετη πλευρά του Dimple, με χρήση της δέσμης αυτής έως ότου στη δομή παρουσιαστεί οπή. Στα σύνορα της οπής αυτής, έχει επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος ( $<1000\text{\AA}$ ).

Το δείγμα μετά από αυτές τις διεργασίες είναι έτοιμο για παρατήρηση στο μικροσκόπιο διέλευσης ηλεκτρονίων-TEM.

### 3.4 Δομικός χαρακτηρισμός δομών μνήμης με μεταλλικούς νανοκρυστάλλους

Η διαδικασία κατασκευής των δομών που έχει ήδη περιγραφεί προηγουμένως στο κεφάλαιο 2 χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή μίας ποικιλίας διατάξεων μνήμης, που έχουν τη δομή n-Si(100)/SiO<sub>2</sub>/Au(NCs)/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ή Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), με διαφορετικές διαμορφώσεις νανοκρυστάλλων λόγω της διαφορετικής επεξεργασίας που πραγματοποιείται από διάφορες παραμέτρους στην ανόπτηση με το laser, καθώς και στο διαφορετικό αρχικό πάχος του στρώματος μετάλλου προς ανόπτηση. Επίσης εξετάζεται η επιρροή του οξειδίου φραγής στη δομή των νανοκρυστάλλων.

#### 3.4.1 Επιρροή των παραμέτρων ανάπτυξης νανοκρυστάλλων στη δομή με οξείδιο φραγής το Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Η εναπόθεση αργύρου και χρυσού έγινε με Sputtering, το δείγμα περιστρεφόταν κατά την εναπόθεση, για μεγαλύτερη ομοιομορφία του δημιουργούμενου λεπτού στρώματος.

Οι παράγοντες που μελετήθηκαν είναι, το πάχος του εξαχνομένου μετάλλου, η ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας που έχει η δέσμη του laser στην επιφάνεια, καθώς και ο αριθμός των παλμών του laser, όπου η δέσμη ξαναπέφτει πάνω στο δείγμα επαναλαμβανόμενα.

Οι εικόνες SEM επικεντρώθηκαν περισσότερο σε δείγματα με νανοκρυστάλλους χρυσού, αντί για άργυρο (στις ηλεκτρικές μετρήσεις χωρητικότητας-τάσης δε σχηματιζόταν βρόχος υστέρησης στα μετρούμενα δείγματα), παρατηρήθηκε καλύτερη ηλεκτρική συμπεριφορά στα δείγματα μνήμης που κατασκευάστηκαν με χρυσό. Στον πίνακα 4 παρουσιάζονται δείγματα που κατασκευάστηκαν με άργυρο και χρυσό για την μελέτη με μικροσκόπιο των χαρακτηριστικών των μεταλλικών νανοκρυστάλλων.

Όταν έχουμε αρχικό πάχος αργύρου 5nm η μέση διάμετρος είναι 17.98nm (α/α 1), σε αρχικό στρώμα αργύρου 2.5nm βλέπουμε μέση διάμετρο 10.46nm (α/α 5). Δηλαδή, η μείωση στο αρχικό πάχος κατά 2.5nm επιφέρει μείωση κατά 42% της διαμέτρου των τελικών νανοκρυστάλλων.

Επειδή υπήρχε συνύπαρξη νανοκρυστάλλων μεγάλης και μικρής διαμέτρου, αποφασίστηκε να χωριστεί η ανάλυση σε δύο περιοχές. Δηλαδή αντί σε όλους τους νανοκρυστάλλους να υπολογιστεί η μέση διάμετρος, χωρίσαμε μια περιοχή με διαμέτρους  $\leq 20$ nm και μια περιοχή με διαμέτρους  $> 20$ nm.

Σε ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας 500mJ/cm<sup>2</sup> με 10, 15 και 20 παλμούς, στα δείγματα χρυσού, παρατηρείται ότι, περίπου το 70% των νανοκρυστάλλων να έχουν διάμετρο  $\leq 20$ nm, όπως φαίνεται στον πίνακα του παραρτήματος II.

Για αρχικό πάχος μεταλλικού στρώματος χρυσού 5nm από τους συνδυασμούς παλμών και ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας δεν επετεύχθη κατασκευή πολύ μικρών ομοιομορφων νανοκρυστάλλων κάτω από 10 nm.

Στην εικόνα 54 φαίνονται εικόνες από μικροσκόπιο SEM στρώματος χρυσού 5nm στο οποίο γίνεται ανόπτηση με laser. Από τις εικόνες SEM διερευνάται η επιρροή στους νανοκρυστάλλους, από την μεταβολή στην ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα

επιφάνειας και από την μεταβολή στον αριθμό των παλμών του laser. Με αύξηση της ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας αυξάνεται ο αριθμός των νανοκρυστάλλων. Με τον αριθμό των παλμών έχουμε δυο φάσεις, με ένα παλμό σχηματίζονται μικροί και ομοιόμορφοι νανοκρυστάλλοι, μέχρι περίπου τους 10 παλμούς έχουμε συνύπαρξη μικρών και μεγάλων με επικράτηση των μεγάλων νανοκρυστάλλων και πάνω από περίπου 10 παλμούς έχουμε συνύπαρξη μικρών και μεγάλων με αύξηση του ποσοστού των μικρών νανοκρυστάλλων.

Όπως φαίνεται στον συγκεντρωτικό πίνακα στο παράρτημα III, που δείχνει τα χαρακτηριστικά των νανοκρυστάλλων που κατασκευάζονται από την ανόπτηση με KrF laser (αρχικού στρώματος χρυσού προς ανόπτηση 5nm, σε υπόστρωμα SiO<sub>2</sub> 5nm [κατασκευασμένο σε φούρνο υψηλής θερμοκρασίας στο NTU]), οι συνθήκες ανόπτησης που αποφέρουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά στους νανοκρυστάλλους (με κριτήριο την μεγάλη ομοιογένεια, την μικρή μέση διάμετρο και την μικρή τυπική απόκλιση) είναι με ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας 500mJcm<sup>-2</sup> με 1, 10, 15 και 20 παλμούς.

Από τα πειράματα προέκυψε ότι τα χαρακτηριστικά των νανοκρυστάλλων που κατασκευάζονται επηρεάζονται κυρίως ως εξής.

Στον άργυρο:

- Με την μεταβολή στο αρχικό πάχος μετάλλου που γίνεται εναπόθεση με Sputtering, παρατηρείται ότι μείωση του αρχικού πάχους στο μισό επιφέρει μείωση 42% στη μέση διάμετρο.
- Ο άργυρος έχει πιο μικρή μέση διάμετρο σε αντίστοιχες συνθήκες σε σχέση με το χρυσό.

Στο χρυσό:

- Με υψηλότερη ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας κατασκευάζονται περισσότερα σε πλήθος μικρά σωματίδια.
- Με 1 παλμό βλέπουμε ότι δημιουργούνται μικρά και ομοιόμορφα σωματίδια, με την αύξηση των παλμών παρατηρείται μια αύξηση της μέσης διαμέτρου περίπου μέχρι τους 10 παλμούς laser και στην συνέχεια μειώνεται ξανά η μέση διάμετρος.
- Η αύξηση στην ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας επιφέρει μείωση στη μέση διάμετρο και αύξηση της επιφανειακής πυκνότητας των νανοκρυστάλλων.

Ο χρόνος μεταξύ των παλμών laser θα πρέπει να είναι μεγάλος, καθώς και η διάρκεια του παλμού laser μικρή για να μην αναπτύσσεται μεγάλη θερμοκρασία. Κάποιες προτάσεις για την κατασκευή μικρών ομοιόμορφων νανοκρυστάλλων, που δεν διερευνήθηκαν, είναι η εξέταση διαφορετικών χρόνων μεταξύ παλμών laser, διαφορετικής διάρκειας παλμών laser καθώς και η χρήση μίξης με διάφορες ακτινοβολούμενες ενέργειες ανά μονάδα επιφάνειας στο ίδιο δείγμα.

Με τις μεταβολές στις παραμέτρους του laser (εδώ παίζει ρόλο και η ομοιομορφία της δέσμης, δηλαδή σε κάθε σημείο του spot να υπάρχει η ίδια ένταση) και του αρχικού πάχους του στρώματος μετάλλου προς ανόπτηση, μπορούν να κατασκευαστούν μικρής διαμέτρου νανοκρυστάλλοι, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δομές ως κόμβοι αποθήκευσης δεδομένων, όπως θα δούμε στο κεφάλαιο 4.

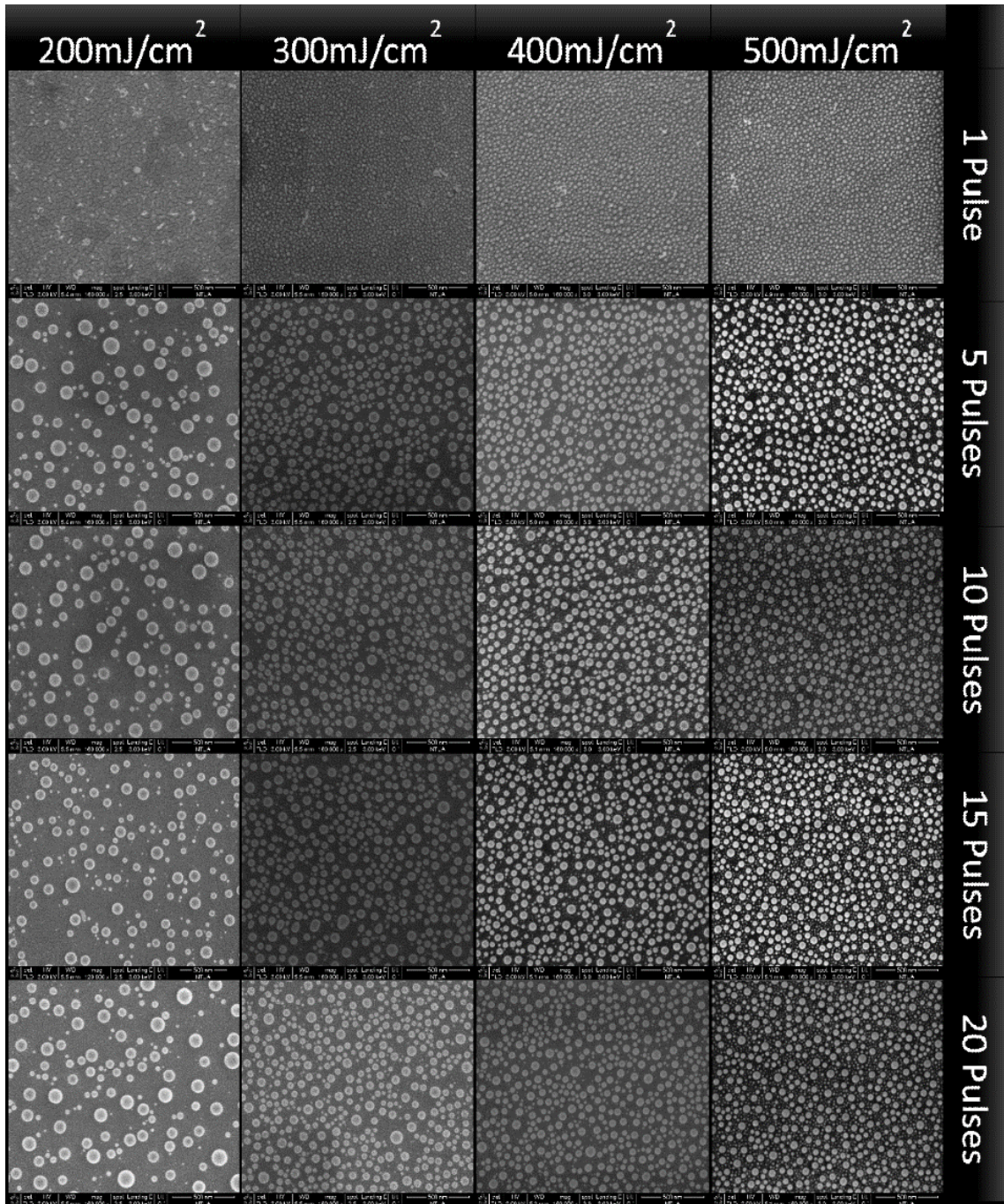
ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ ΜΟΣ ΜΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ  
ΑΝΟΙΓΘΗΜΕΝΟΥΣ ΜΕ LASER

A/A	ΔΕΙΓΜΑ (ΚΩΔΙΚΗ ΟΝΟΜΑΣΙΑ)	SiO <sub>2</sub> (nm)	ΜΕΤΑΛΛΟ	ΠΑΧΟΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥ (nm)	FLUENCE (mJ/cm <sup>2</sup> )	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΑΛΜΩΝ	ΜΕΣΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (nm)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΙ/ cm <sup>2</sup> )
1	LKSW09	5 (NTU)	Ag	5	400	1	17.98	1.21 x 10 <sup>11</sup>
2	LKSW09	5 (NTU)	Ag	5	400	15	21.72	7.79 x 10 <sup>10</sup>
3	LKSW09	5 (NTU)	Ag	5	500	1	17.90	9.33 x 10 <sup>10</sup>
4	LKSW09	5 (NTU)	Ag	5	500	5	18.76	2.47 x 10 <sup>10</sup>
5	LKSW09	5 (NTU)	Ag	2.5	400	1	10.46	3.07 x 10 <sup>11</sup>
6	LKSW10	5 (NTU)	Au	5	200	5	42.82	7.82 x 10 <sup>9</sup>
7	LKSW10	5 (NTU)	Au	5	200	10	42.36	8.31 x 10 <sup>9</sup>
8	LKSW10	5 (NTU)	Au	5	200	15	47.31	5.50 x 10 <sup>9</sup>
9	LKSW10	5 (NTU)	Au	5	200	20	42.85	7.52 x 10 <sup>9</sup>
10	LKSW10	5 (NTU)	Au	5	300	1	22.21	8.85 x 10 <sup>10</sup>
11	LKSW10	5 (NTU)	Au	5	300	5	36.18	2.48 x 10 <sup>10</sup>
12	LKSW10	5 (NTU)	Au	5	300	10	38.65	2.32 x 10 <sup>10</sup>
13	LKSW10	5 (NTU)	Au	5	300	15	38.20	2.38 x 10 <sup>10</sup>
14	LKSW10	5 (NTU)	Au	5	300	20	36.70	2.41 x 10 <sup>10</sup>
15	LKSW10	5 (NTU)	Au	5	400	1	23.71	7.44 x 10 <sup>10</sup>
16	LKSW10	5 (NTU)	Au	5	400	5	34.94	2.95 x 10 <sup>10</sup>
17	LKSW10	5 (NTU)	Au	5	400	10	35.61	2.77 x 10 <sup>10</sup>
18	LKSW10	5 (NTU)	Au	5	400	15	33.13	3.03 x 10 <sup>10</sup>
19	LKSW10	5 (NTU)	Au	5	400	20	32.59	3.12 x 10 <sup>10</sup>
20	LKSW10	5 (NTU)	Au	5	500	1	22.30	7.98 x 10 <sup>10</sup>
21	LKSW10	5 (NTU)	Au	5	500	5	32.74	3.10 x 10 <sup>10</sup>
22	LKSW10	5 (NTU)	Au	5	500	10	19.71	6.50 x 10 <sup>10</sup>
23	LKSW10	5 (NTU)	Au	5	500	15	20.25	6.24 x 10 <sup>10</sup>
24	LKSW10	5 (NTU)	Au	5	500	20	19.47	6.82 x 10 <sup>10</sup>

Πίνακας 4: Συνθήκες κατασκευής και χαρακτηριστικά νανοκρυστάλλων.



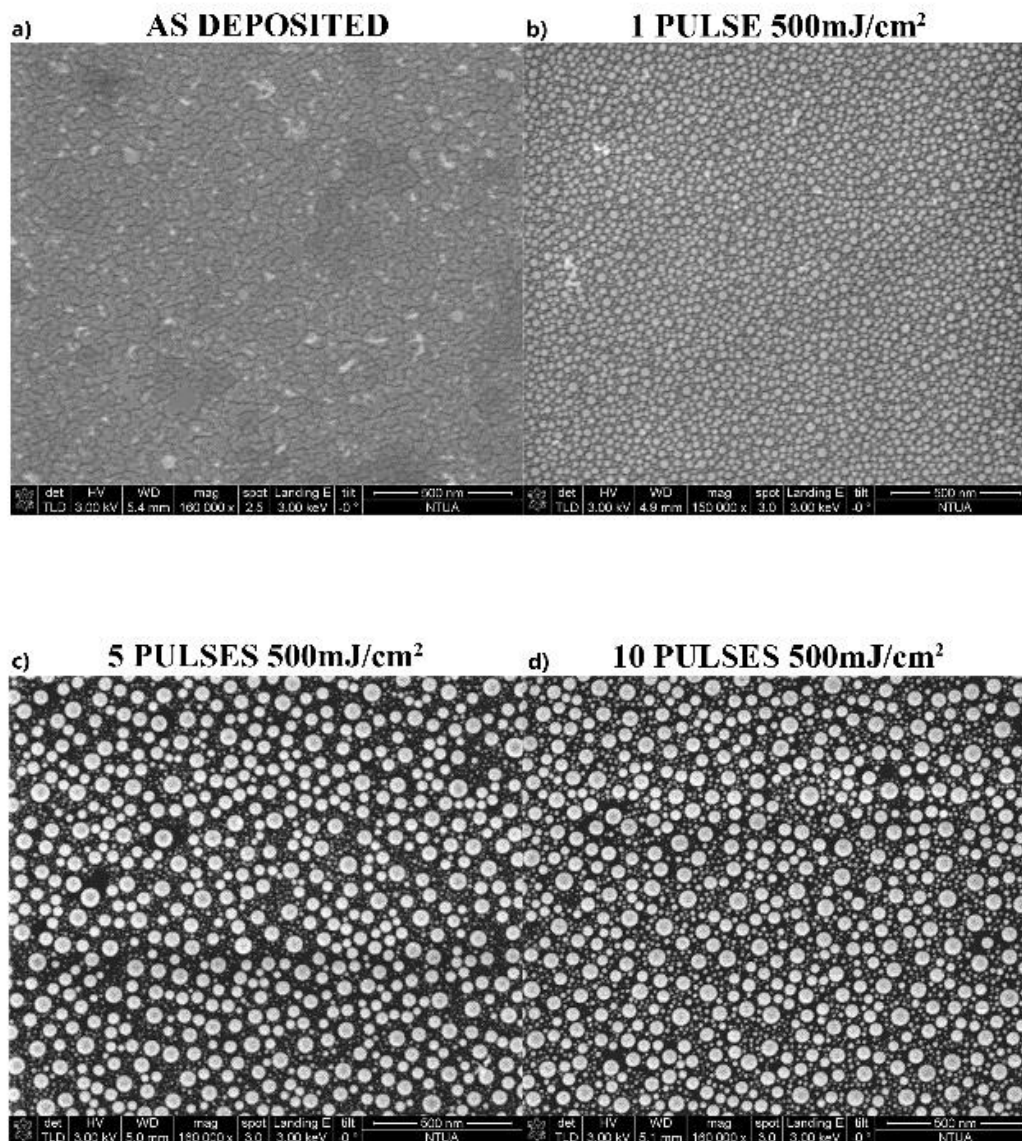
ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ MOS ΜΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ  
ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ΜΕ LASER



Εικόνα 54: Εικόνες SEM από κατασκευή νανοκρυστάλλων από ανόπτηση με laser, μεταβάλλοντας την ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και τον αριθμό των παλμών του laser.

ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ MOS ΜΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ  
ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ΜΕ LASER

Στην εικόνα 55 (a-d) απεικονίζονται για σύγκριση οι ληφθείσες εικόνες SEM εναποτεθειμένου στρώματος χρυσού αρχικού πάχους 5nm, καθώς και των νανοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάζονται από την ανόπτηση του στρώματος αυτού με το laser, με την ίδια ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας ( $500\text{mJcm}^{-2}$ ) και 1, 5 ή 10 παλμούς laser αντίστοιχα. Το λεπτό στρώμα Au δείχνει σχηματισμό μερικών νησιών και πλήρη κάλυψη της επιφάνειας  $\text{SiO}_2$ . Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά που ελήφθησαν για τον ίδιο αριθμό παλμών και ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας που κυμαίνεται από  $300\text{mJcm}^{-2}$  έως  $500\text{mJcm}^{-2}$ .



Εικόνα 55: Εικόνα SEM (a) στρώματος χρυσού όπως εναποτίθεται και μετά από ανόπτηση με laser του μεταλλικού στρώματος χρυσού όπου κατασκευάζονται και διαμορφώνονται νανοκρυστάλλοι στα  $500\text{mJ/cm}^2$  με (b) έναν παλμό, (c) πέντε παλμούς και (d) δέκα παλμούς.

ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ MOS ME ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ  
ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ME LASER

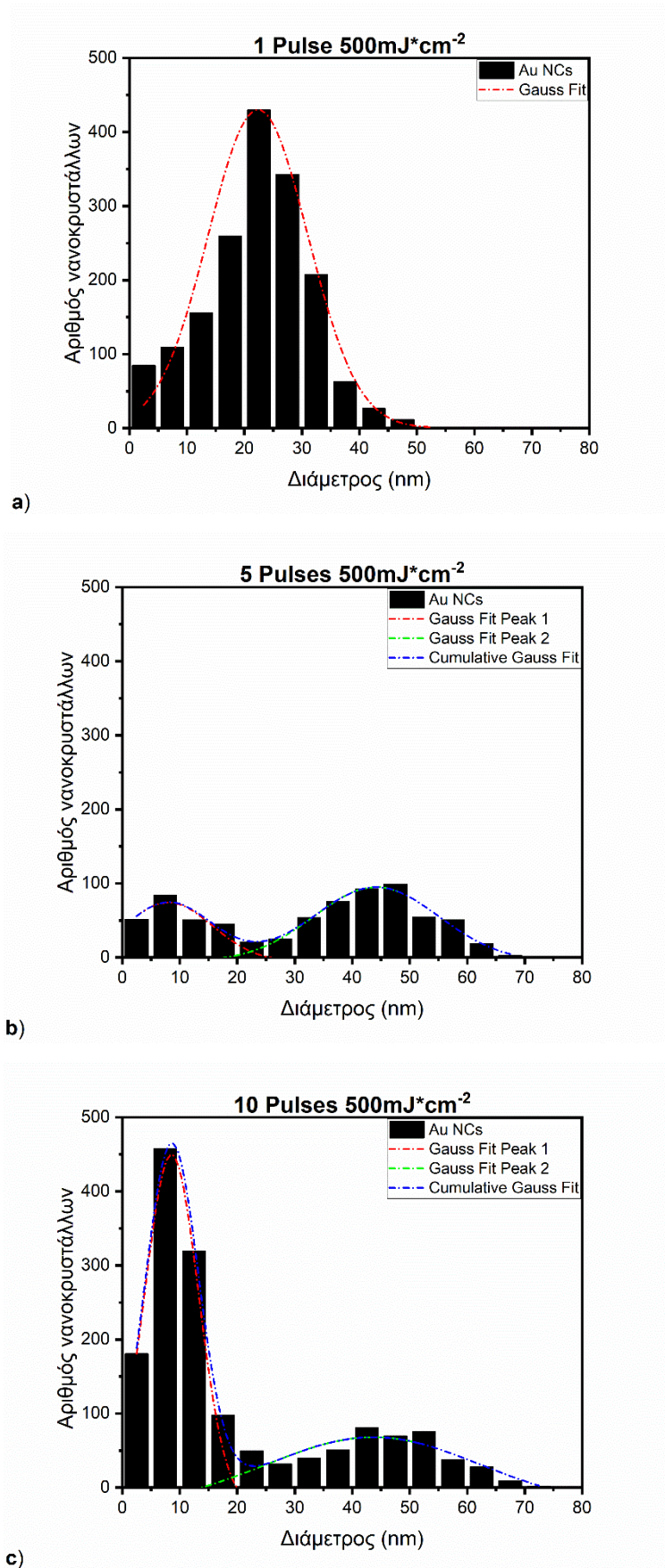
Η ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας βρέθηκε να είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος καθώς παρατηρήθηκε ότι χρησιμοποιώντας πολύ χαμηλή ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας ( $200\text{mJcm}^{-2}$ ) και μόνο έναν παλμό laser, δε μπορούν να δημιουργηθούν νανοκρύσταλλοι. Για ορισμένο αριθμό παλμών ανόπτησης με laser και υψηλότερη ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας σχηματίζεται μια ευρεία διασπορά στις διαμέτρους των νανοκρυστάλλων (από 1nm έως 70nm), οδηγώντας έτσι σε διτροπική κατανομή. Από την άλλη πλευρά, αυξάνοντας τον αριθμό των παλμών ανόπτησης, για μια δεδομένη ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας της δέσμης laser, σχηματίζεται ένας μεγαλύτερος αριθμός μικρών νανοκρυστάλλων χωρίς την πλήρη εξάλειψη των μεγαλύτερων. Ως εκ τούτου, ένας μικρός (1-2) αριθμός παλμών βρέθηκε να είναι πιο αποτελεσματικός για την αποφυγή της συνύπαρξης πολύ μικρών και μεγάλων νανοκρυστάλλων.

Η στατιστική ανάλυση των διαστάσεων των νανοκρυστάλλων, που πραγματοποιήθηκε με επεξεργασία των εικόνων SEM με το λογισμικό ImageJ, παρουσιάζεται στον πίνακα 5 ενώ οι γραφικές παραστάσεις φαίνονται στην εικόνα 56 (a-c). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για ανόπτηση με laser με 1 παλμό (εικόνα 56 a) η μέση διάμετρος των νανοκρυστάλλων είναι 22.3nm, ενώ νανοκρύσταλλοι μεγαλύτερου μεγέθους παρατηρούνται πολύ σπάνια. Ωστόσο, η χρήση 5 και 10 παλμών laser (εικόνα 56 b,c) παράγει ταυτόχρονα μεγάλους (διαμέτρου έως 70nm) και μικρούς (διαμέτρου 1-5nm) νανοκρυστάλλους χρυσού.

Ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας $500\text{mJ/cm}^2$	1 Παλμός	5 Παλμοί		10 Παλμοί	
		Πρώτη κορυφή	Δεύτερη κορυφή	Πρώτη κορυφή	Δεύτερη κορυφή
Μέση διάμετρος (nm)	22.3	8	44.2	8.6	43.7
Τυπική απόκλιση (nm)	8.7	7.6	10.9	4.7	18.6
Συντελεστής Μεταβολής ή Ομοιογένειας %	39		25	55	43
Επιφανειακή Πυκνότητα (#NCs/cm <sup>2</sup> )	$7.98 \times 10^{10}$	$3.10 \times 10^{10}$		$6.50 \times 10^{10}$	

**Πίνακας 5:** Στατιστική ανάλυση των νανοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάστηκαν με ανόπτηση laser ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας  $500\text{mJcm}^{-2}$  και διαφορετικό αριθμό παλμών laser.

Οι διατάξεις που έχουν ανόπτηση με laser με ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας μεταξύ  $300\text{mJcm}^{-2}$  και  $600\text{mJcm}^{-2}$  και 1-5 παλμούς, έδειξαν τα καλύτερα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, ως εκ τούτου, αυτά τα αποτελέσματα συζητούνται στη συνέχεια στον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό.



Εικόνα 56: Ραβδόγραμματα των σχηματισμένων νανοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας laser φοριούχου κρυστού (KrF) με ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας 500mJ/cm<sup>2</sup> με (a) 1 παλμό, (b) 5 παλμούς και (c) 10 παλμούς. Οι προσαρμοσμένες γραμμές είναι οδηγοί μόνο οπτικά.

### 3.4.2 Επιρροή των παραμέτρων ανάπτυξης νανοκρυστάλλων στη δομή με οξείδιο φραγής το $\text{Al}_2\text{O}_3$

Για να διαπιστωθεί η επιρροή του πάχους του αρχικού στρώματος χρυσού στα χαρακτηριστικά των νανοκρυστάλλων, κατασκευάστηκαν δείγματα με τέσσερα διαφορετικά πάχη. Προτιμήθηκε να γίνει η κατασκευή του στρώματος διοξειδίου του πυριτίου με ξηρή οξείδωση με πάχος 3.5nm και όχι 5nm σε φούρνο υψηλής θερμοκρασίας (με έλεγχο μόνο της θερμοκρασίας και όχι της ατμόσφαιρας), γιατί τα δείγματα που κατασκευάστηκαν έτσι παρουσίασαν πιο αξιόπιστα και καλύτερα ηλεκτρικά αποτελέσματα. Το στρώμα του οξειδίου σήραγγας ( $\text{SiO}_2$ ) είναι ένας παράγοντας στην κατασκευή των νανοκρυστάλλων, διότι το στρώμα μετάλλου προς ανόπτηση (Au) είναι εναποτεθειμένο πάνω στο  $\text{SiO}_2$ . Η μέθοδος που ακολουθήθηκε είναι να ελεγχθεί ένα μεγάλο εύρος από αρχικά πάχη μετάλλου, για να εκτιμηθεί πού κατασκευάζονται μικρότεροι νανοκρυστάλλοι με καλή ομοιομορφία. Τα δείγματα στην παρατήρηση με SEM έχουν την ακόλουθη στρωματική δομή n-Si(100)/ $\text{SiO}_2$ /Au(NCs), η διερεύνηση γίνεται μεταβάλλοντας το πάχος του αρχικού στρώματος Au και σε κάθε πάχος στρώματος Au μεταβάλλουμε τις παραμέτρους του laser, για την ανόπτηση, που οδηγεί στη κατασκευή των νανοκρυστάλλων, πιο συγκεκριμένα μεταβάλλουμε τον αριθμό των παλμών και την ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας του κάθε παλμού. Στον ακόλουθο πίνακα 6 παρουσιάζονται τα πάχη του μετάλλου (Au) που γίνεται ανόπτηση με το laser για το σχηματισμό νανοκρυστάλλων

<i>Χρόνος εναπόθεσης (s)</i>	<i>Πάχος Au (nm)</i>
8	3.18
16	7.42
24	9.5
32	13.57

**Πίνακας 6:** Παρουσίαση του χρόνου εναπόθεσης και του πάχους Au που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή νανοκρυστάλλων με σκοπό στη συνέχεια να γίνει έλεγχος της επιρροής του αρχικού στρώματος μετάλλου στα χαρακτηριστικά των νανοκρυστάλλων, που χρησιμοποιήθηκαν σε μνήμες με οξείδιο φραγής το  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά τα χαρακτηριστικά των νανοκρυστάλλων, καθώς και στη συνέχεια στις ηλεκτρικές μετρήσεις των διατάξεων μνήμης, παρατηρήθηκαν σε αρχικό πάχος χρυσού 3.18nm, με συνέπεια να εστιάσουμε περισσότερο σε αυτά τα δείγματα στην ανάλυση που ακολουθεί.

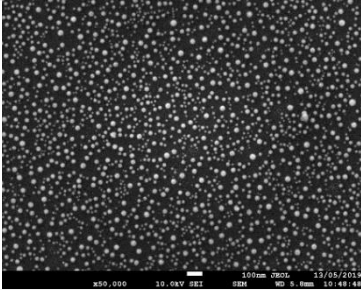
Οι εικόνες 57 και 58 απαρτίζονται από εικόνες SEM παρουσιάζοντας τους νανοκρυστάλλους Au, που κατασκευάζονται όταν το αρχικό στρώμα χρυσού προς ανόπτηση έχει πάχος 3.18nm (εναπόθεση διάρκειας 8s) ή 13.57nm (εναπόθεση διάρκειας 32s), αντίστοιχα. Η ανόπτηση του στρώματος χρυσού με laser πραγματοποιείται εφαρμόζοντας διαφορετικό αριθμό παλμών (από 1 έως 10 παλμούς) και διαφορετική ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας (από  $150\text{mJcm}^{-2}$  έως  $450\text{mJcm}^{-2}$ ), με συνέπεια να μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά των νανοκρυστάλλων.

ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ MOS ΜΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ  
ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ΜΕ LASER

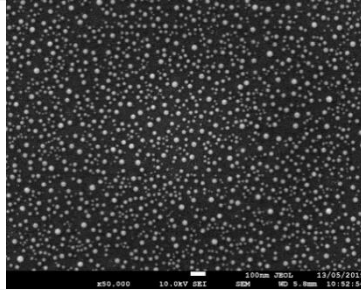
8s deposition:

250mJcm<sup>-2</sup>

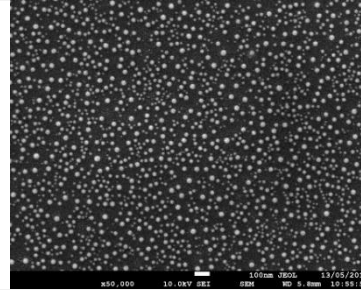
1 pulse



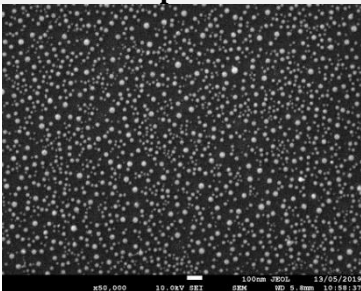
2 pulse



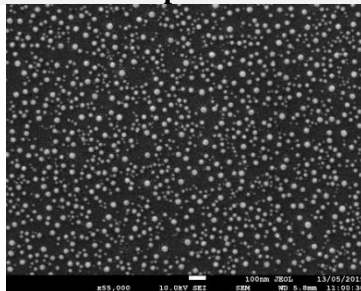
4 pulse



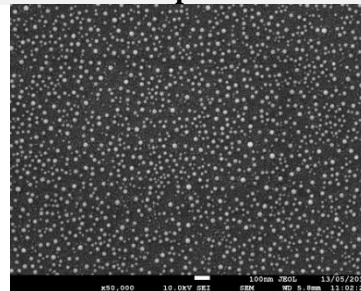
6 pulse



8 pulse

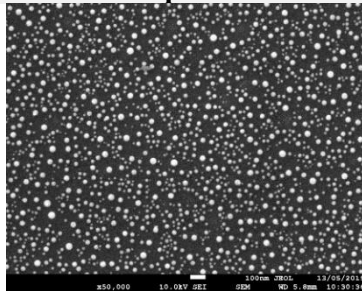


10 pulse



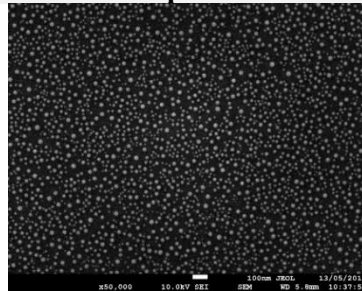
300mJcm<sup>-2</sup>

1 pulse



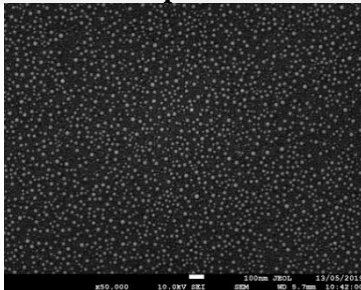
400mJcm<sup>-2</sup>

4 pulse



450mJcm<sup>-2</sup>

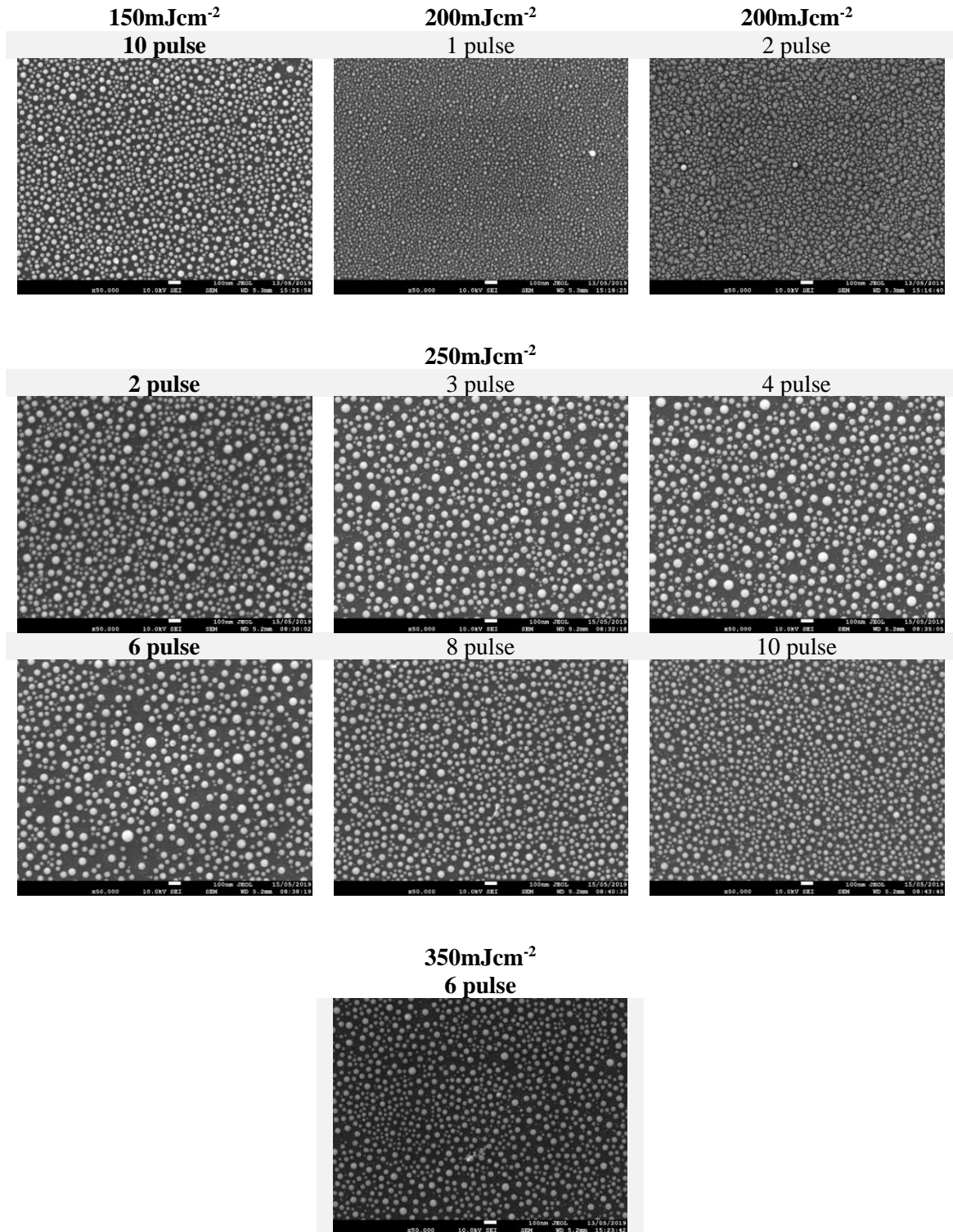
4 pulse



Εικόνα 57: Εικόνες SEM από κατασκευή νανοκρυστάλλων από ανόπτηση με laser στρώματος χρυσού 3.18nm, μεταβάλλοντας την ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και τον αριθμό των παλμών του laser.

ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ MOS ΜΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ  
ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ΜΕ LASER

32s deposition:



Εικόνα 58: Εικόνες SEM από κατασκευή νανοκρυστάλλων από απόπτωση με laser στρώματος χρυσού 13.57nm, μεταβάλλοντας την ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και τον αριθμό των παλμών του laser.

ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ MOS ΜΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ  
ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ΜΕ LASER

Ο πίνακας 7 παρουσιάζει συγκεντρωτικά την στατιστική ανάλυση, των χαρακτηριστικών των νανοκρυστάλλων από επίλεκτες εικόνων SEM από τις εικόνες 57 και 58. Από τη σύγκριση προκύπτουν συμπεράσματα για την μεταβολή των χαρακτηριστικών των νανοκρυστάλλων μεταβάλλοντας τις παραμέτρους.

Τα δείγματα που μελετώνται είναι:

- Αρχικό πάχος στρώματος χρυσού προς ανόπτηση 3.18nm, με συνθήκες ανόπτησης: 1 παλμού στα 250mJcm<sup>-2</sup>, 1 παλμού στα 300mJcm<sup>-2</sup>, 2 παλμούς στα 250mJcm<sup>-2</sup>, 4 παλμούς στα 400mJcm<sup>-2</sup>, 4 παλμούς στα 450mJcm<sup>-2</sup>, 6 παλμούς στα 250mJcm<sup>-2</sup> και τέλος 10 παλμούς στα 250mJcm<sup>-2</sup>.
- Αρχικό πάχος στρώματος χρυσού προς ανόπτηση 13.57nm με συνθήκες ανόπτησης: 1 παλμού στα 200mJcm<sup>-2</sup> και 10 παλμούς στα 250mJcm<sup>-2</sup>.

Κάθε παλμός έχει σταθερή ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας.

	8s_1P_250mJcm <sup>-2</sup>	8s_1P_300mJcm <sup>-2</sup>	8s_2P_250mJcm <sup>-2</sup>	8s_4P_400mJcm <sup>-2</sup>	8s_4P_450mJcm <sup>-2</sup>	8s_6P_250mJcm <sup>-2</sup>	8s_10P_250mJcm <sup>-2</sup>	32s_1P_200mJcm <sup>-2</sup>	32s_10P_250mJcm <sup>-2</sup>
Μέση Διάμετρος (nm)	20.136	20.583	20.521	18.380	16.929	20.771	19.500	19.173	29.155
Αριθμός Νανοκρυστάλλων (NCs)	1955	1695	1751	2607	2601	1838	1881	4106	1555
Διάμεσος (nm)	19.928	18.905	19.963	18.871	17.856	19.963	19.963	18.949	29.556
Τυπική απόκλιση (nm)	8.552	9.273	8.011	6.602	6.150	8.298	6.899	8.056	10.855
Ελάχιστη διάμετρος (nm)	6.302	6.302	6.313	6.291	6.313	6.313	6.313	6.313	6.302
Μέγιστη διάμετρος (nm)	58.098	67.580	44.194	40.762	33.403	53.190	39.926	79.067	58.437
Περιοχή που καλύπτεται από νανοκρυστάλλους (x10 <sup>5</sup> nm <sup>2</sup> )	7.348	6.784	6.673	7.809	6.626	7.221	6.320	13.95	11.82
Επιφάνεια (x10 <sup>6</sup> nm <sup>2</sup> )	3.961	3.916	3.930	3.934	3.939	3.962	3.952	3.917	3.940
% περιοχή που καλύπτεται από νανοκρυστάλλους	18.55	17.32	16.98	19.85	16.82	18.23	15.99	35.61	30.00
Επιφανειακή πυκνότητα (x10 <sup>10</sup> #NCs/cm <sup>2</sup> )	4.936	4.328	4.456	6.626	6.603	4.639	4.759	10.48	3.947
Συντελεστής Μεταβολής ή Ομοιογένειας (%)	42.47	45.05	39.04	35.92	36.33	39.95	35.38	42.02	37.23

Πίνακας 7: Στατιστική ανάλυση των νανοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάστηκαν με ανόπτηση laser, ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας από 250 έως 450mJcm<sup>-2</sup> και διαφορετικό αριθμό παλμών laser από 1 έως 10 παλμούς, για την κατασκευή μνημών με οξειδίο φραγής το Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Από τον πίνακα 7 παρατηρούμε ότι σε πάχος 13.57nm αρχικού στρώματος Au και συνθήκες ανόπτησης 1 παλμού στα 200mJcm<sup>-2</sup>, έχουμε τον μεγαλύτερης διαμέτρου νανοκρυστάλλο να εμφανίζεται στη διασπορά, με την διάμετρό του να είναι 79.07nm (υπάρχει μια αμφιβολία αν είναι νανοκρυστάλλος ή ξένο σώμα (εικόνα 58), ο αμέσως επόμενος μεγαλύτερος νανοκρυστάλλος αυτού του δείγματος βρέθηκε να έχει διάμετρο 64.72nm), μεγαλύτερη επιφάνεια να καλύπτεται από νανοκρυστάλλους καθώς και ότι επετεύχθη η μεγαλύτερη επιφανειακή πυκνότητα. Ωστόσο, καλύτερα χαρακτηριστικά



στους νανοκρυστάλλους παρουσιάζονται όταν το αρχικό πάχος χρυσού προς ανόπτηση είναι 3.18nm, όπου εμφανίζεται η χαμηλότερη μέση διάμετρος των νανοκρυστάλλων που είναι 16.9nm (η τιμή αυτή είναι χαμηλότερη από 19.47nm που επετεύχθη με αρχικό πάχος χρυσού προς ανόπτηση 5nm, με τις συνθήκες κατασκευής των νανοκρυστάλλων να είναι 20 παλμοί των  $500\text{mJcm}^{-2}$ , όπως φαίνεται στον πίνακα 4) και τυπική απόκλιση 6.2nm, οι συνθήκες κατασκευής των νανοκρυστάλλων σε αυτή την περίπτωση είναι 4 παλμοί των  $450\text{mJcm}^{-2}$ . Μεγαλύτερη ομοιογένεια 35.38% παρατηρήθηκε σε 10 παλμούς των  $250\text{mJcm}^{-2}$  σε πάχος 3.18nm. Σε γενικές γραμμές μπορούμε να πούμε ότι, με την αύξηση της ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας κατασκευάζονται μικρότεροι νανοκρυστάλλοι και με την αύξηση του αριθμού των παλμών εμφανίζονται δυο καταστάσεις. Με ένα παλμό έχουμε μικρής διαμέτρου νανοκρυστάλλους, με αύξηση των παλμών αρχίζει να αυξάνει η μέση διάμετρος έως έναν αριθμό παλμών (εδώ βλέπουμε να συμβαίνει μέχρι 6 παλμούς, η επόμενη μέτρηση όμως πραγματοποιείτε στους 10 παλμούς) και από έναν αριθμό παλμών και πάνω αρχίζει να μειώνεται ξανά η μέση διάμετρος.

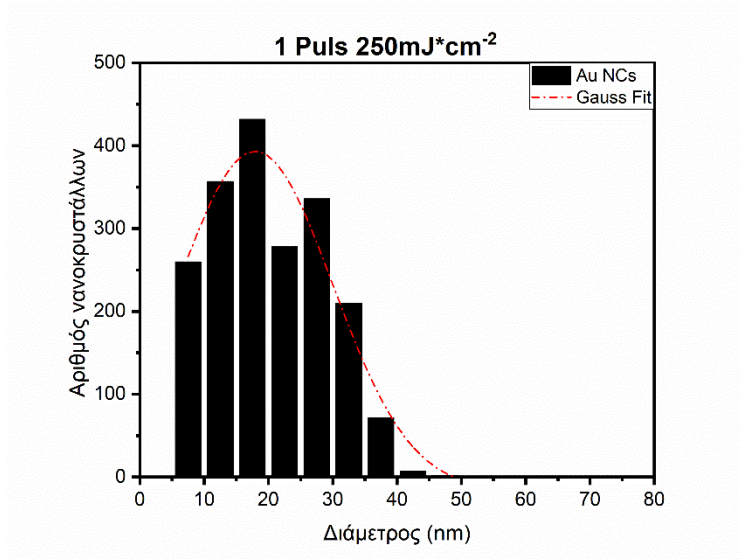
Όπως φαίνεται στον συγκεντρωτικό πίνακα στο παράρτημα III και τον πίνακα 7, που συγκρίνει τα χαρακτηριστικά των νανοκρυστάλλων που κατασκευάζονται από την ανόπτηση με KrF laser (αρχικού στρώματος χρυσού προς ανόπτηση 3.2nm, σε υπόστρωμα  $\text{SiO}_2$  3.5nm [κατασκευασμένο με ξηρή οξειδωση στο ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος”]), οι συνθήκες ανόπτησης που αποφέρουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά στους νανοκρυστάλλους (με κριτήριο την μεγάλη ομοιογένεια, την μικρή μέση διάμετρο και την μικρή τυπική απόκλιση) είναι με ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας  $450\text{mJcm}^{-2}$  και 4 παλμούς.

Στη συνέχεια ακολουθούν για κάθε δείγμα που παρουσιάζεται στον πίνακα 7 τα ραβδογράμματα που προκύπτουν από την ανάλυση των επίλεκτων εικόνων SEM από τις εικόνες 57 και 58, δηλαδή σχεδιάζεται το πλήθος των νανοκρυστάλλων σε συνάρτηση με τη διάμετρο των νανοκρυστάλλων, στις εικόνες 59 με 67.

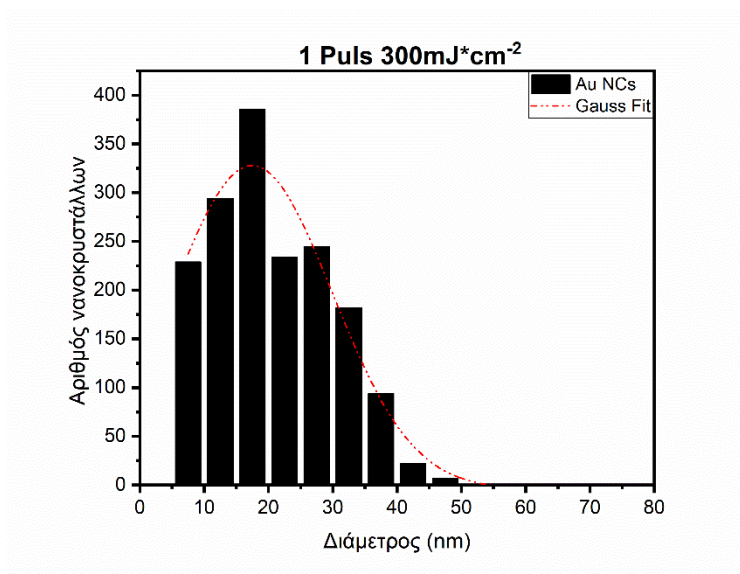
Από τα ραβδογράμματα που ακολουθούν έχουμε, μια εικόνα από το ύψος των ράβδων για το πλήθος των νανοκρυστάλλων και από την θέση στον οριζόντιο άξονα σε ποια διάμετρο εμφανίζονται οι αντίστοιχοι πληθυσμοί. Στην εικόνα 67 βλέπουμε ότι η μέση διάμετρος έχει μετατοπιστεί στα 29.16nm, το οποίο μας δείχνει ότι το υψηλό πάχος του αρχικού στρώματος προς ανόπτηση αυξάνει την μέση διάμετρο, το γεγονός αυτό επιφέρει επίσης κακές ηλεκτρικές ιδιότητες και στις καμπύλες χωρητικότητας-τάσης καθώς και στη συγκράτηση φορτίου. Οι κόκκινες γραμμές είναι ενδεικτικές και προέρχονται από προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων σε κατανομή Gauss, στις περισσότερες των περιπτώσεων βλέπουμε να υπάρχει απόκλιση από αυτή την κατανομή.

Η απόδοση της μνήμης με νανοκρυστάλλους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα δομικά στοιχεία των NCs, δηλαδή κυρίως από το μέγεθος, την επιφανειακή πυκνότητα, την ομοιογένεια και την % ομοιομορφία. Καθώς ο σχηματισμός των NCs είναι μια διαδικασία αυτοοργάνωσης, ο έλεγχος των στατιστικών των νανοκρυστάλλων δεν είναι εύκολος. Αυτό το γεγονός μπορεί να προκαλέσει μεταβλητότητα από δομή σε δομή που κατασκευάζεται, η οποία θα ήταν ακόμη πιο εμφανής με την συρρίκνωση των διαστάσεων των επιμέρους στοιχείων της διάταξης, όπου οποιαδήποτε μικρή διακύμανση στον αριθμό των αποθηκευμένων ηλεκτρονίων, θα προκαλούσε μεγάλη αλλαγή στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της διάταξης, αυξάνοντας το παράθυρο μνήμης και μειώνοντας τη συγκράτηση φορτίου λόγω διαρροής ρεύματος. Η επιτυχημένη μείωση των διαστάσεων της πλωτής πύλης στα 20nm [78] έχει θέσει αυστηρές απαιτήσεις στην κατανομή των νανοκρυστάλλων.

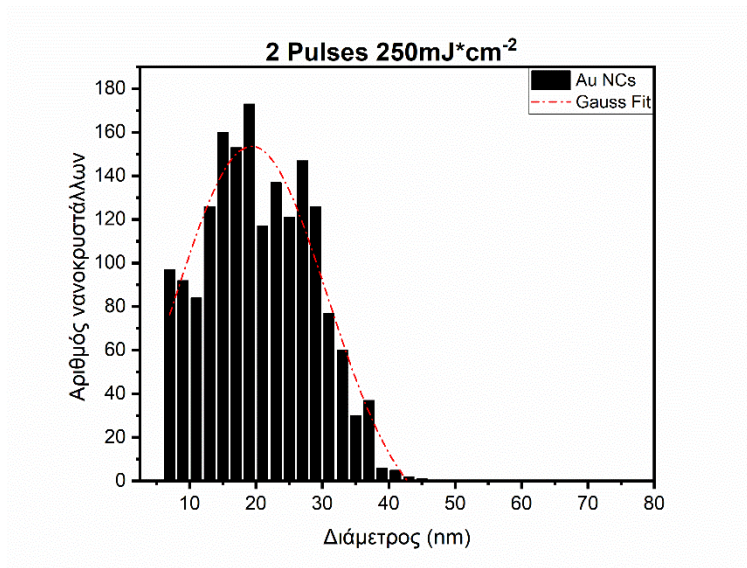
Προκειμένου να μειωθεί η μεταβλητότητα μεταξύ κυψελών, απαιτείται σχετικά υψηλή πυκνότητα NCs με μικρή διακύμανση στο μέγεθος των NCs. Ωστόσο, με υψηλή πυκνότητα η απόσταση NC με NC μειώνεται σημαντικά. Είναι επιθυμητή η πυκνότητα να είναι τόσο ούτως ώστε, να μην είναι επιτρεπτή η μεταφορά από νανοκρύσταλλο σε νανοκρύσταλλο των ηλεκτρικών φορτίων, έτσι ώστε να υπάρχει απομόνωση και να μην εμφανιστεί ηλεκτρική συμπεριφορά συνεχής οριζόντιας ηλεκτρικής αγωγιμότητας.



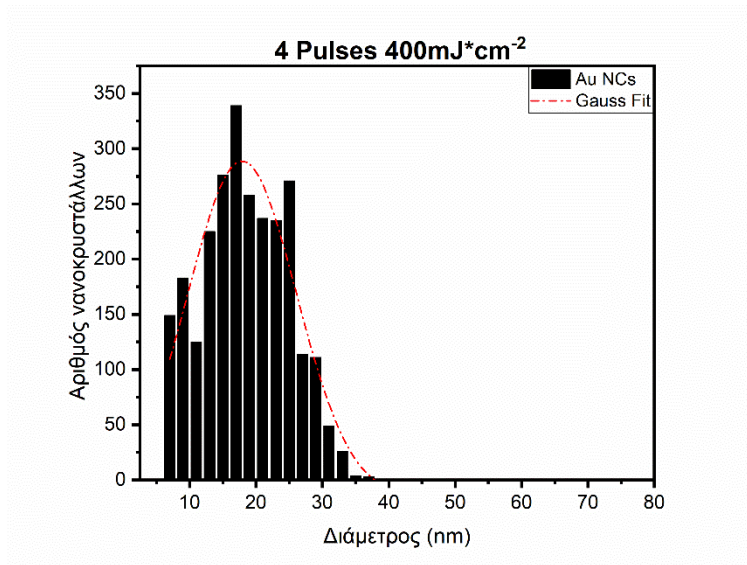
Εικόνα 59: Ραβδόγραμμα των σχηματισμένων νανοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας laser φθοριούχου κρυπτού (KrF). Οι προσαρμοσμένη γραμμή είναι οδηγός μόνο οπτικά. Το αρχικό πάχος χρυσού προς ανόπτηση είναι 3.18nm.



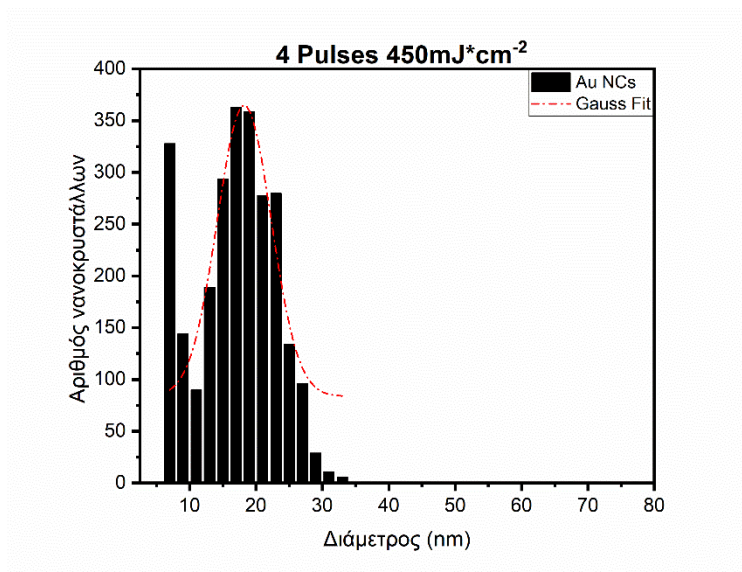
Εικόνα 60: Ραβδόγραμμα των σχηματισμένων νανοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας laser φθοριούχου κρυπτού (KrF). Οι προσαρμοσμένη γραμμή είναι οδηγός μόνο οπτικά. Το αρχικό πάχος χρυσού προς ανόπτηση είναι 3.18nm.



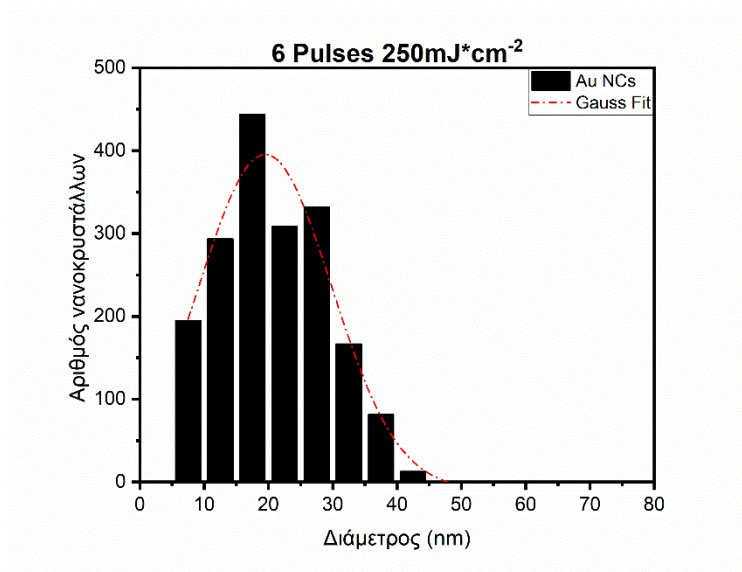
Εικόνα 61: Ραβδόγραμμα των σχηματισμένων νανοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας laser φθοριούχου κρυπτού (KrF). Οι προσαρμοσμένη γραμμή είναι οδηγός μόνο οπτικά. Το αρχικό πάχος χρυσού προς απόπτωση είναι 3.18nm.



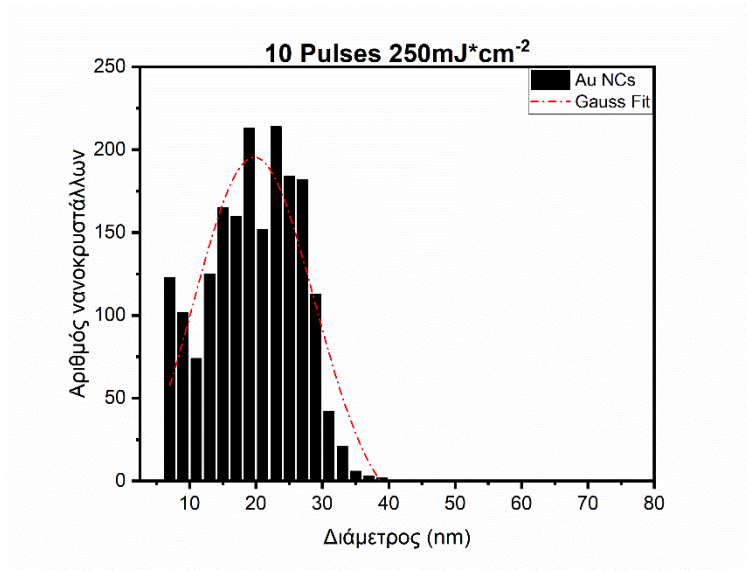
Εικόνα 62: Ραβδόγραμμα των σχηματισμένων νανοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας laser φθοριούχου κρυπτού (KrF). Οι προσαρμοσμένη γραμμή είναι οδηγός μόνο οπτικά. Το αρχικό πάχος χρυσού προς απόπτωση είναι 3.18nm.



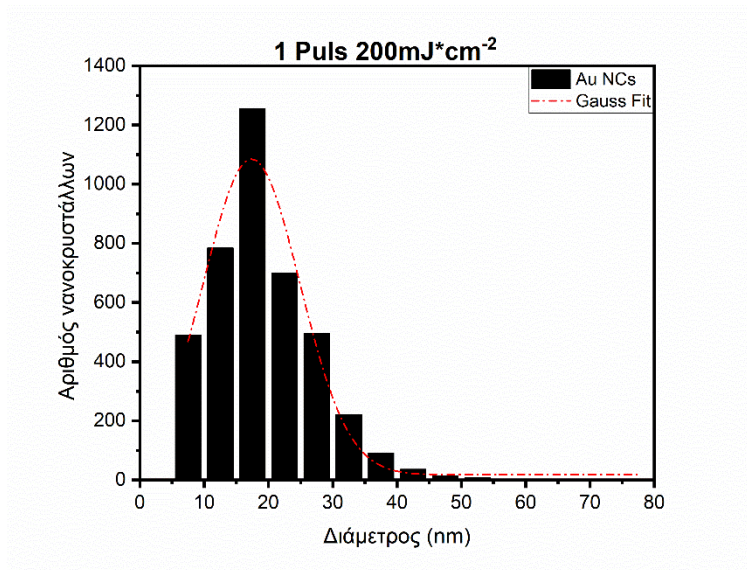
Εικόνα 63: Ραβδόγραμμα των σχηματισμένων νανοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας laser φθοριούχου κρυπτού (KrF). Οι προσαρμοσμένη γραμμή είναι οδηγός μόνο οπτικά. Το αρχικό πάχος χρυσού προς απόπτωση είναι 3.18nm.



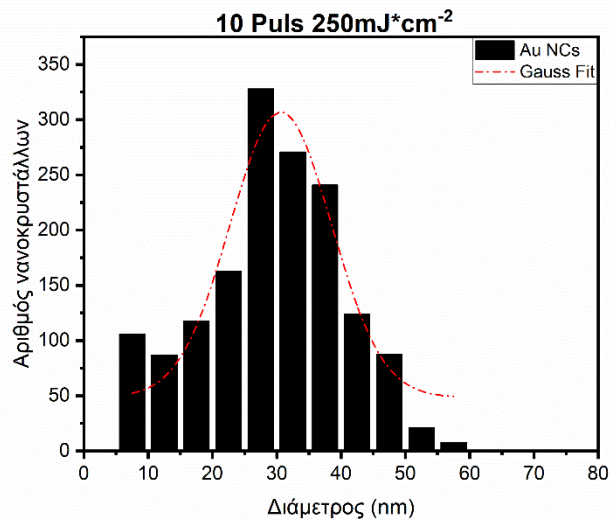
Εικόνα 64: Ραβδόγραμμα των σχηματισμένων νανοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας laser φθοριούχου κρυπτού (KrF). Οι προσαρμοσμένη γραμμή είναι οδηγός μόνο οπτικά. Το αρχικό πάχος χρυσού προς απόπτωση είναι 3.18nm.



Εικόνα 65: Ραβδόγραμμα των σχηματισμένων νανοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας laser φθοριούχου κρυπτού (KrF). Οι προσαρμοσμένη γραμμή είναι οδηγός μόνο οπτικά. Το αρχικό πάχος χρυσού προς ανόπτηση είναι 3.18nm.



Εικόνα 66: Ραβδόγραμμα των σχηματισμένων νανοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας laser φθοριούχου κρυπτού (KrF). Οι προσαρμοσμένη γραμμή είναι οδηγός μόνο οπτικά. Το αρχικό πάχος χρυσού προς ανόπτηση είναι 13.57nm.



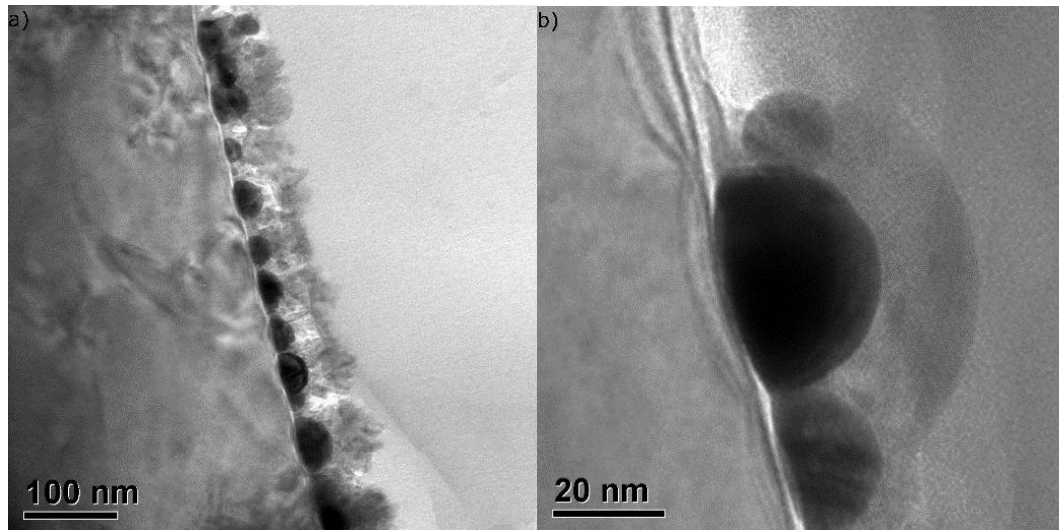
Εικόνα 67: Ραβδόγραμμα των σχηματισμένων νανοκρυστάλλων χρυσού που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας laser φθοριούχου κρυπτού (KrF). Οι προσαρμοσμένη γραμμή είναι οδηγός μόνο οπτικά. Το αρχικό πάχος χρυσού προς ανόπτηση είναι 13.57nm.

### 3.4.3 Συμπεράσματα από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων για τα δυο οξείδια

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων (πίνακες στο παράρτημα II και III καθώς και τον πίνακα 7, που φαίνονται τα χαρακτηριστικά από τους νανοκρυστάλλους, που χρησιμοποιήθηκαν στις μνήμες), για δείγματα με διαφορετικά οξείδια φραγής ( $Y_2O_3$  και  $Al_2O_3$ , με δεδομένο ότι η εναπόθεση των οξειδίων έγινε μετά από την ανάπτυξη των νανοκρυστάλλων), ίδιες συνθήκες ανάπτυξης των νανοκρυστάλλων Au, με μόνη διαφορά τη μείωση του πάχους του αρχικού στρώματος Au προς ανόπτηση, προκύπτει βελτίωση των χαρακτηριστικών των νανοκρυστάλλων. Συγκεκριμένα, μειώνεται η μέση διάμετρος, αυξάνει η % ομοιογένεια αλλά μειώνεται και η επιφανειακή πυκνότητα.

### 3.5 Μελέτη με μικροσκόπιο διέλευσης ηλεκτρονίων (TEM)

Παρατήρηση της πλάγιας όψης των στοιχείων μνήμης με μικροσκόπιο TEM (εικόνα 68), πραγματοποιήθηκε με σκοπό να διαπιστωθεί το σχήμα και η θέση των νανοκρυστάλλων, τα χαρακτηριστικά των στρωμάτων καθώς και αν υπάρχει επιρροή του laser στα κάτω στρώματα. Όπως φαίνεται και στις εικόνες το  $Y_2O_3$  που εναποτέθηκε με Magnetron Sputtering, αναπτύσσεται πάνω στους νανοκρυστάλλους χρυσού με μια δενδριτική δομή, επίσης είναι πολυκρυσταλλικό και επηρεάζει αρνητικά τις δομές μνήμης, αυξάνοντας το ρεύμα διαρροής και μειώνοντας την ικανότητα αποθήκευσης ηλεκτρικού φορτίου. Οι νανοκρυστάλλοι που προκύπτουν έχουν μεγαλύτερες διαστάσεις από τις επιθυμητές, που είναι κάτω από 10nm, προσεγγίζοντας σφαιρικό σχήμα. Οι εικόνες μπορεί να έχουν κάποιο ποσοστό παραμόρφωσης το οποίο μπορεί να οφείλεται στην μηχανική κατεργασία των δειγμάτων ούτως ώστε να αποκτήσουν τις κατάλληλες διαστάσεις και το κατάλληλο πάχος, για να μπορέσουν να διέλθουν τα ηλεκτρόνια από τη δομή και να εμφανιστούν οι εικόνες στο μικροσκόπιο TEM.



Εικόνα 68: Εικόνες TEM πλάγιας όψης δείγματος μνήμης με νανοκρυστάλλους.

Το εντοπισμένο επιφανειακό πλάσμονιο (LSP), είναι το αποτέλεσμα του περιορισμού ενός επιφανειακού πλάσμονίου σε ένα νανοσωματίδιο με μέγεθος συγκρίσιμο ή μικρότερο από το μήκος κύματος του φωτός, που χρησιμοποιείται για να διεγείρει το πλάσμονιο. Όταν ένα μικρό σφαιρικό μεταλλικό νανοσωματίδιο ακτινοβολείται με φως, το ταλαντούμενο ηλεκτρικό πεδίο αναγκάζει τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας να ταλαντεύονται συνεκτικά. Όταν το νέφος των ηλεκτρονίων μετατοπίζεται σε σχέση με την αρχική του θέση, προκύπτει μια δύναμη αποκατάστασης από την έλξη Coulomb μεταξύ ηλεκτρονίων και πυρήνων. Αυτή η δύναμη προκαλεί την ταλάντωση του νέφους ηλεκτρονίων. Η συχνότητα ταλάντωσης καθορίζεται από την πυκνότητα των ηλεκτρονίων, την ενεργή μάζα των ηλεκτρονίων το μέγεθος και το σχήμα της κατανομής φορτίου [79]. Το LSP έχει δύο σημαντικά αποτελέσματα: τα ηλεκτρικά πεδία κοντά στην επιφάνεια του σωματιδίου ενισχύονται σημαντικά και η οπτική απορρόφηση του σωματιδίου έχει μέγιστο στη συχνότητα συντονισμού του πλάσμονίου. Οι ταλαντώσεις μεγιστοποιούνται όταν η συχνότητα του φωτός ταιριάζει με την εγγενή συχνότητα ταλάντωσης των νανοκρυστάλλων. Η θέση, η ένταση και το πλάτος της ζώνης LSPR (Localized Surface Plasmon Resonance) εξαρτάται από το υλικό των νανοκρυστάλλων, τα μεγέθη και τα σχήματα τους, καθώς και από τα χαρακτηριστικά του τοπικού διηλεκτρικού περιβάλλοντος [79,80,81,82]. Ο συντονισμός του επιφανειακού πλάσμονίου μπορεί να μετατοπιστεί σε αλλά μήκη κύματος με βάση το σχήμα του νανοκρυστάλλου [79] ή να τροποποιηθεί από την κατανομή διαμέτρων των νανοκρυστάλλων [82]. Η ενίσχυση πέφτει γρήγορα με την απόσταση από την επιφάνεια και για νανοσωματίδια ευγενών μετάλλων (όπως ο χρυσός), ο συντονισμός εμφανίζεται σε μήκη κύματος του ορατού φάσματος [83].

Οι νανοκρύσταλλοι σχηματίζονται με μια διαδικασία απότομης υψηλής τοπικής ακτινοβολίας μικρής διάρκειας, ως εκ τούτου η διάχυση (diffusion) μετάλλου στο διηλεκτρικό περιβάλλον δημιουργεί ένα σοβαρό ζήτημα, το οποίο στη παρούσα μελέτη έδειξε να μην παρουσιάζεται. Επίσης ένα άλλο σοβαρό ζήτημα που αντιμετωπίστηκε από την ερμηνεία των εικόνων TEM είναι, η τοπική υψηλή αύξηση της θερμοκρασίας λόγω συντονισμού ενέργειας από την παρουσία των νανοκρυστάλλων (δεν έγινε εκτεταμένη έρευνα πάνω σε αυτό το θέμα), με συνέπεια την επιρροή του οξειδίου κάτω από τους NCs που χρησιμοποιείται για την μεταφορά φορτίων με σήραγγα. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η πιθανότητα εκφόρτισης των νανοκρυστάλλων, με επιστροφή φορτίων στο υπόστρωμα. Ο περιορισμός του φαινομένου αυτού επιτεύχθηκε με μείωση της ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας. Η τοπική αύξηση της θερμότητας μπορεί να προέλθει

από συγκρούσεις ηλεκτρονίων με άτομα, άλλα ηλεκτρόνια ή προσμίξεις. Αυτές οι συγκρούσεις προκαλούν αντίσταση και παράγουν θερμότητα. Στη μελέτη των νανοκρυστάλλων χρυσού η μέγιστη απορρόφηση συμβαίνει σε μήκη κύματος περίπου 500-550nm [84]. Το μήκος κύματος του KrF laser είναι 248nm, συνεπώς βρισκόμαστε αρκετά μακριά από το μέγιστο της απορρόφησης. Η μείωση της έντασης της ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας μπορεί να μικρύνει την τοπική αύξηση της θερμοκρασίας και την αρνητική επιρροή στα χαρακτηριστικά της μνήμης [11].

### 3.6 Φασματοσκοπία Οπτικής Αντανακλάσεως

Οι νανοκρύσταλλοι χρυσού μπορούν να χαρακτηριστούν και με φασματοσκοπία οπτικής ανακλάσεως. Οι νανοκρύσταλλοι απορροφούν και διασκορπίζουν το φως με εξαιρετική απόδοση. Η ισχυρή αλληλεπίδραση τους με το φως συμβαίνει επειδή, τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας των μεταλλικών νανοκρυστάλλων υφίστανται μια ταλάντωση, όταν διεγείρονται από το φως σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Αυτή η ταλάντωση είναι γνωστή ως επιφανειακός συντονισμός πλασμονίου, αυτό έχει ως αποτέλεσμα η απορρόφηση και σκέδαση από τους νανοκρυστάλλους χρυσού να είναι πολύ υψηλότερη. Οι ιδιότητες απορρόφησης και διασποράς των νανοκρυστάλλων χρυσού, μπορούν να τροποποιηθούν ελέγχοντας το μέγεθος των σωματιδίων, το σχήμα και τον τοπικό δείκτη διάθλασης κοντά στην επιφάνεια των σωματιδίων.

#### 3.6.1 Η επίδραση του μεγέθους στις οπτικές ιδιότητες

Οι οπτικές ιδιότητες των σφαιρικών νανοκρυστάλλων χρυσού εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη διάμετρο των νανοκρυστάλλων. Οι μικρότεροι νανοκρύσταλλοι ανακλούν κυρίως το φως και έχουν κορυφές κοντά στα 460nm, ενώ οι μεγαλύτεροι νανοκρύσταλλοι έχουν υψηλότερες κορυφές και μετακινούνται προς μεγαλύτερα μήκη κύματος (γνωστό ως red-shifting).

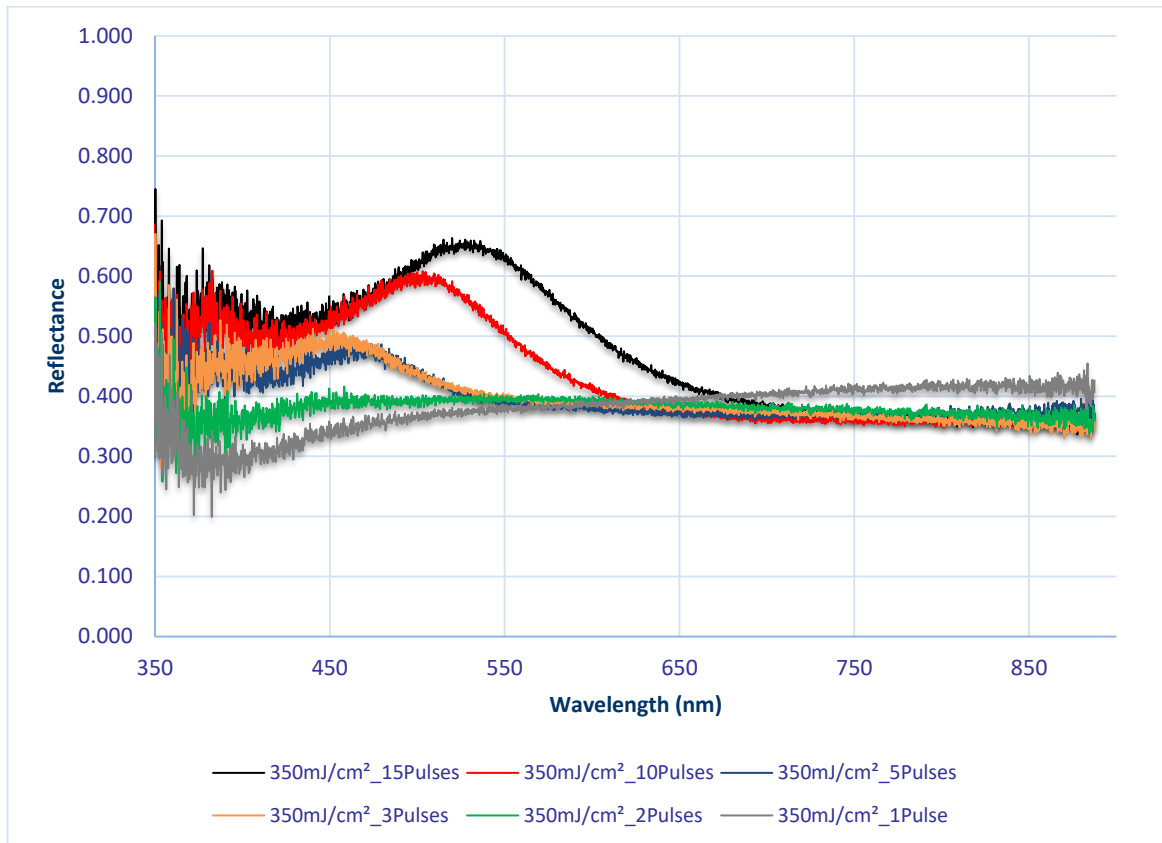
Η ανακλαστικότητα υπολογίζεται ως εξής: Από τον τύπο  $R_{TF}=I_{TF}/I_0$  και από τον τύπο  $R_{Si}=I_{Si}/I_0 \Rightarrow I_0=I_{Si}/R_{Si}$  καταλήγουμε τελικά στην εξής σχέση  $R_{TF}=R_{Si} \cdot (I_{TF}/I_{Si})$ , συνυπολογίζοντας και τη διόρθωση λόγω background καταλήγουμε στην τελική σχέση που χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό της ανακλαστικότητας  $R_{TF}=R_{Si} \cdot [(I_{TF}-I_{DARK})/(I_{Si}-I_{DARK})]$ .

Από τις εικόνες ανακλαστικότητας (69, 70, 71, 72) συναρτήσει του μήκους κύματος παρατηρούμε ότι, οι μικρότεροι νανοκρύσταλλοι κατασκευάζονται με λίγους παλμούς. Επίσης από τις εικόνες SEM παρατηρούμε ότι, με λίγους παλμούς σε ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας  $200\text{mJ}/\text{cm}^2$  κατασκευάζονται μεγάλοι νανοκρύσταλλοι. Αυξάνοντας πολύ την ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας, αρχίζει να γίνεται μικρότερη η επιρροή του αριθμού των παλμών, επίσης από  $650\text{mJ}/\text{cm}^2$  η αύξηση του αριθμού των παλμών επιφέρει μείωση στην μέση διάμετρο. Γενικά οι αριθμοί των παλμών και η ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας, έχει μια σύνθετη συμπεριφορά. Τα εργαλεία που έχουμε για την κατασκευή μικρών και ομοιόμορφων νανοκρυστάλλων με εφαρμογή της ανόπτησης με laser, είναι το λεπτό αρχικό πάχος μετάλλου, που θα μας εκκινήσει από ένα καλό σημείο, ο χαμηλός αριθμός παλμών και η μικρή ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας, κάτω από  $600\text{mJ}/\text{cm}^2$ . Ιδιαίτερη

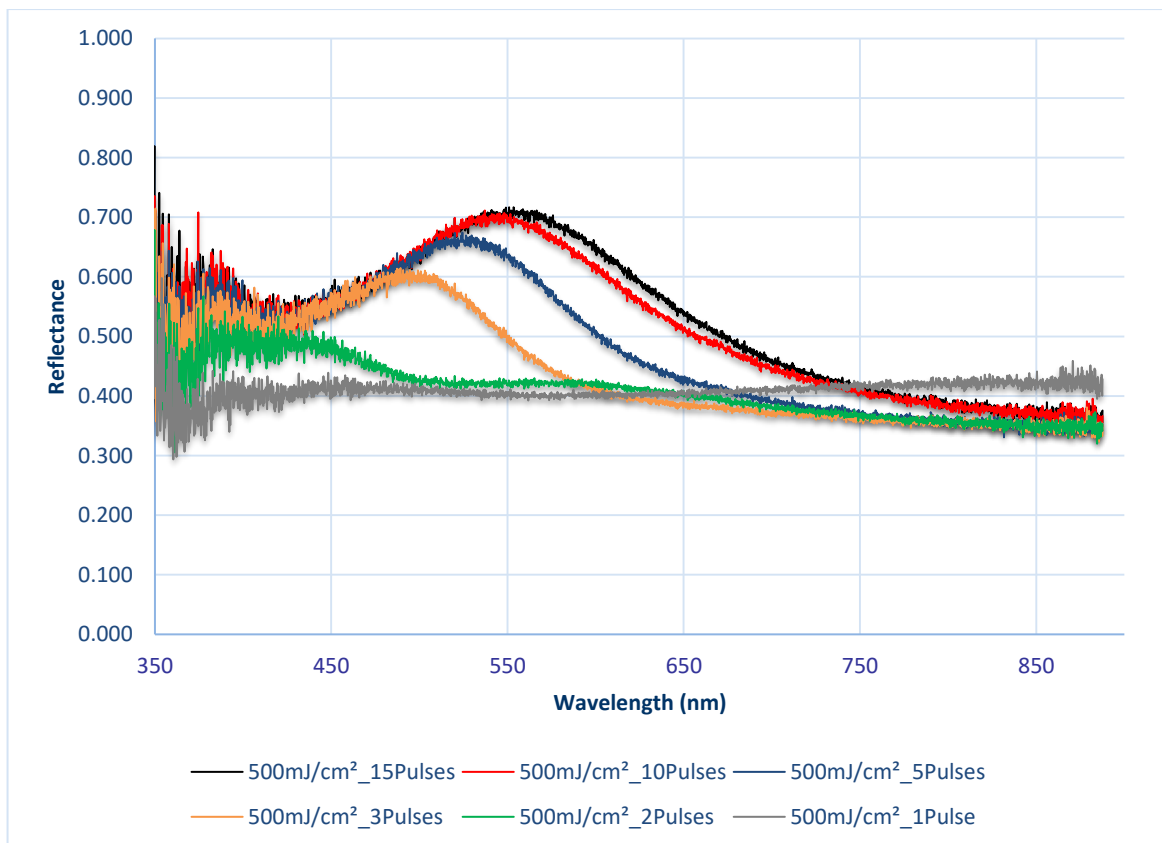


ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ MOS ΜΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ  
ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ΜΕ LASER

έμφαση δόθηκε και στην εφαρμογή πάρα πολλών παλμών για την κατασκευή νανοκρυστάλλων, που θα μας δώσουν χαμηλής διαμέτρου νανοκρυστάλλους.

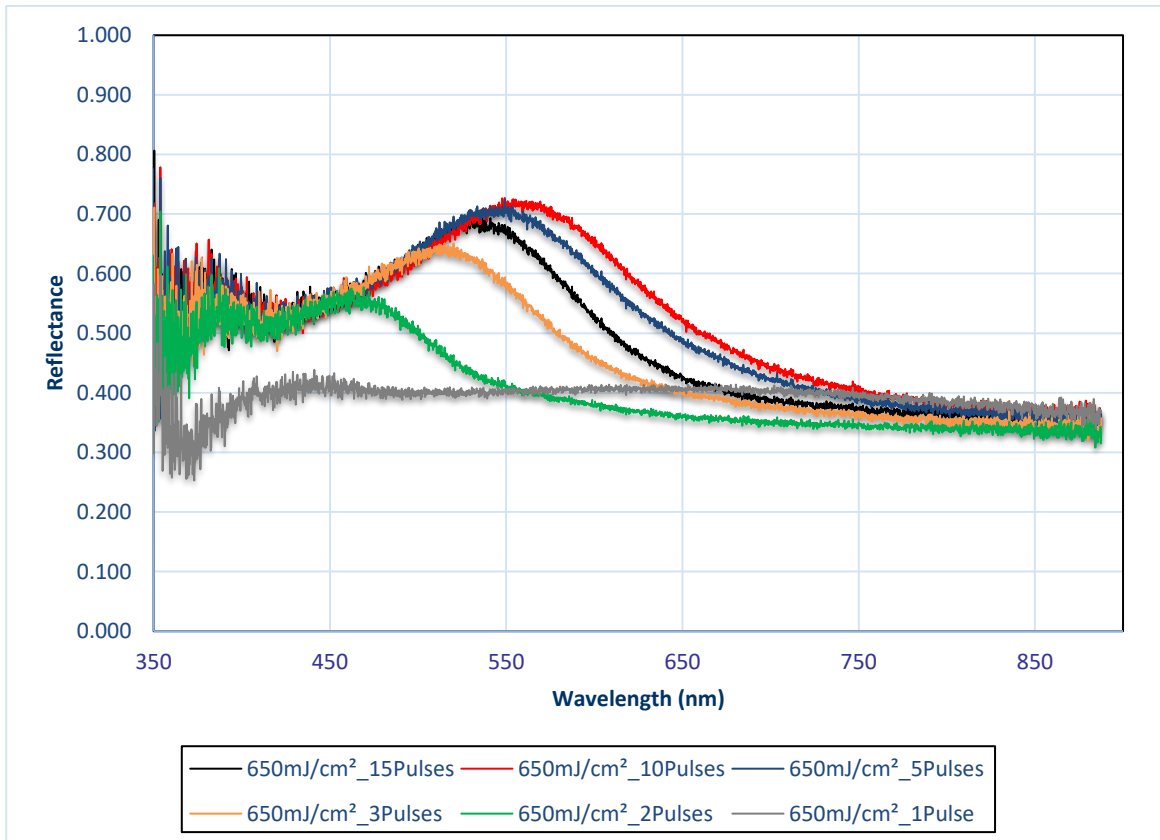


Εικόνα 69: Γραφική παράσταση ανακλαστικότητας συναρτήσει του μήκους κύματος για ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας  $350\text{mJ}/\text{cm}^2$ .

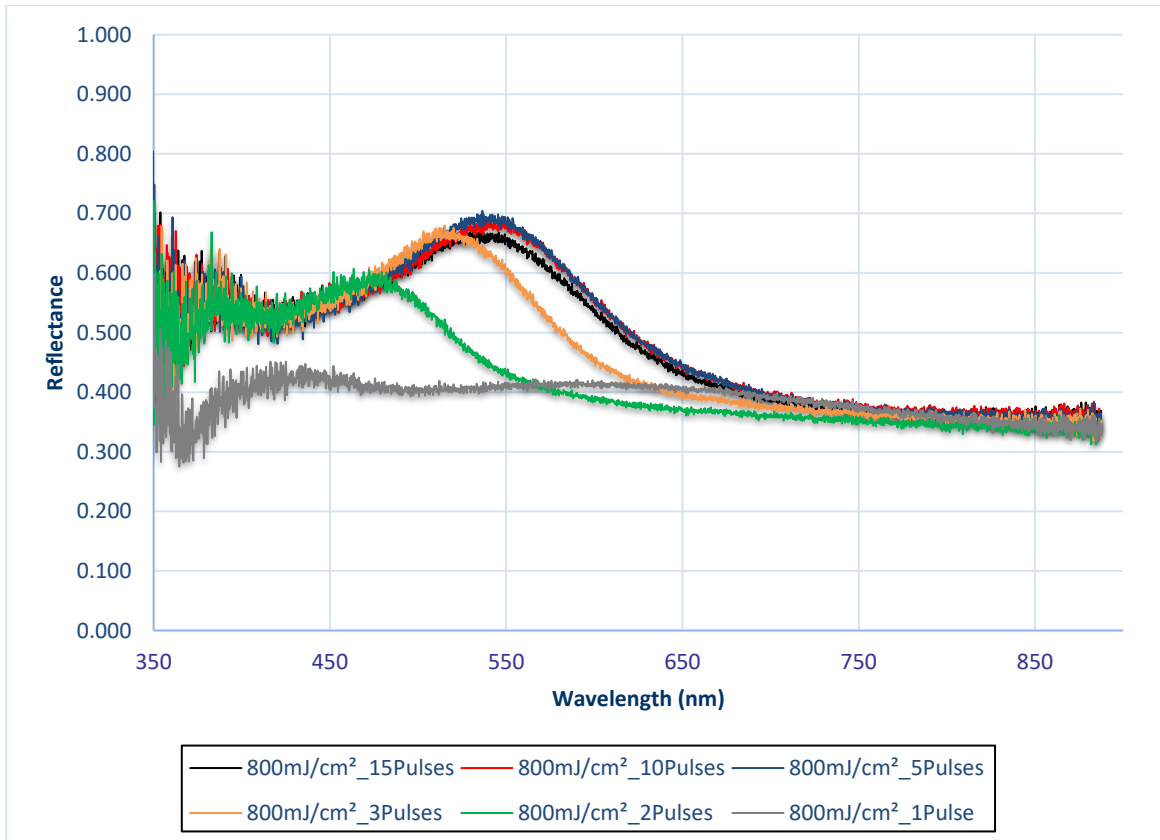


Εικόνα 70: Γραφική παράσταση ανακλαστικότητας συναρτήσει του μήκους κύματος για ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας  $500\text{mJ}/\text{cm}^2$ .

ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ MOS ΜΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ  
ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ΜΕ LASER



Εικόνα 71: Γραφική παράσταση ανακλαστικότητας συναρτήσει του μήκους κύματος για ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας 650mJ/cm<sup>2</sup>.



Εικόνα 72: Γραφική παράσταση ανακλαστικότητας συναρτήσει του μήκους κύματος για ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας 800mJ/cm<sup>2</sup>.

### 3.7 Συμπεράσματα επιρροής συνθηκών ανάπτυξης στα χαρακτηριστικά των νανοκρυστάλλων

Από τα παραπάνω πειράματα καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα τα οποία μας βοηθούν να μπορούμε να ελέγχουμε τα χαρακτηριστικά των νανοκρυστάλλων που κατασκευάζουμε.

- I. Η χρήση διαφορετικού μετάλλου προς ανόπτηση με laser (κάθε υλικό απορροφά ενέργεια σε συγκεκριμένα μήκη κύματος αλλιώς η ακτινοβολία διέρχεται χωρίς να απορροφάτε) έχει διαφορά ως προς τα χαρακτηριστικά των τελικών νανοκρυστάλλων, αλλά η κατασκευή διέπεται από τις ίδιες γενικές αρχές. Ο άργυρος έχει πιο μικρή μέση διάμετρο σε αντίστοιχες συνθήκες ανόπτησης σε ίδιο αρχικό πάχος μετάλλου, σε σχέση με το χρυσό (η έρευνα επικεντρώθηκε στους νανοκρυστάλλους χρυσού, διότι έχει μεγαλύτερο έργο εξόδου και έχει καλύτερη συμπεριφορά στη παγίδευση φορτίων, άρα ως NVM).
- II. Μείωση του αρχικού πάχους του στρώματος μετάλλου προς ανόπτηση με laser δίνει μικρότερους νανοκρυστάλλους. Όταν πάμε σε αρχικό στρώμα αργύρου 2.5nm βλέπουμε μέση διάμετρο 10.46nm σε σχέση με αρχικό πάχος αργύρου 5nm όπου η μέση διάμετρος είναι 17.98nm. Δηλαδή, η μείωση στο αρχικό πάχος κατά 50% επιφέρει μείωση κατά 42% της μέσης διαμέτρου των τελικών νανοκρυστάλλων στην περιοχή πάχους που μετρήσαμε. Συνεπώς, για την κατασκευή μικρότερων και πιο ομοιόμορφων σε μέγεθος νανοκρυστάλλων απαιτείται λεπτό αρχικό μεταλλικό στρώμα. Επίσης το μικρότερο αρχικό πάχος μετάλλου επιφέρει και μείωση στην επιφανειακή πυκνότητα λόγω λιγότερου υλικού. Όταν το αρχικό πάχος χρυσού προς ανόπτηση είναι 3.18nm, εμφανίζεται η χαμηλότερη μέση διάμετρος των νανοκρυστάλλων που μελετήθηκαν και είναι 16.9nm. Τέλος φαίνεται να υπάρχει μια συσχέτιση του πάχους του αρχικού στρώματος μετάλλου προς ανόπτηση, με την ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας, όπου η μείωση του αρχικού στρώματος απαιτεί χαμηλότερη ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας, για την κατασκευή νανοκρυστάλλων με βέλτιστα χαρακτηριστικά.
- III. Η μεταβολή της ενέργειας ανά τετραγωνικό εκατοστό και η μεταβολή του αριθμού των παλμών επηρεάζει τα χαρακτηριστικά των νανοκρυστάλλων. Οι μετρήσεις δείχνουν ότι με 1 παλμό έχουμε τη μικρότερη μέση διάμετρο. Καθώς αυξάνει ο αριθμός των παλμών αυξάνει και η μέση διάμετρος (σχετίζεται με την ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας μέχρι πόσους παλμούς αυξάνει), από έναν αριθμό παλμών και πάνω βλέπουμε μείωση της μέσης διαμέτρου. Επίσης η αύξηση του αριθμού των παλμών δεν εξαλείφει την παρουσία μεγάλων νανοκρυστάλλων. Η αύξηση της ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας αυξάνει τον αριθμό των μικρών νανοκρυστάλλων μικραίνοντας τη μέση διάμετρο.
- IV. Βέλτιστα χαρακτηριστικά, δηλαδή νανοκρυστάλλοι με μικρότερη διάμετρο, ομοιόμορφοι και ομοιογενείς κατασκευάστηκαν κυρίως με 1 έως 6 παλμούς και ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας 200-500mJ/cm<sup>2</sup>. Η υψηλή ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας παρατηρήθηκε ότι έχει επιρροή στο στρώμα σήραγγας (το συμπέρασμα προκύπτει από τις εικόνες TEM) και αποφεύγεται για την ορθή λειτουργία της μνήμης.
- V. Τα δομικά χαρακτηριστικά δεν είναι ικανοποιητικά για τη χρήση τους σε μνήμες υψηλών προδιαγραφών και είναι αναγκαία η περαιτέρω μελέτη των συνθηκών κατασκευής για τη βελτιστοποίηση των δομικών χαρακτηριστικών των δομών.

- VI. Το  $\text{Al}_2\text{O}_3$  παρουσιάζει βελτιωμένη μονωτική συμπεριφορά, καθώς κατασκευάζεται άμορφο με την τεχνική ALD που μειώνει τις ατέλειες δομής. Το  $\text{Y}_2\text{O}_3$  όπως φαίνεται στην εικόνα 68 είναι πολυκρυσταλλικό και αναπτύσσεται πάνω στους νανοκρύσταλλους με μια δενδριτική δομή που μειώνει τη μονωτική του ιδιότητα αυξάνοντας το ρεύμα διαρροής.
- VII. Υψηλή ομοιομορφία στην κατανομή των νανοσωματιδίων, καθώς δεν υπήρχαν περιοχές συσσώρευσης ή έλλειψης νανοσωματιδίων. Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ομορφιά είναι η ομοιόμορφη εναπόθεση του αρχικού στρώματος Au προς απόπτωση καθώς και η ομοιομορφία της δέσμης laser.

## 4. ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣΘΕΙΣΩΝ ΔΟΜΩΝ

### 4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των παρασκευασθεισών δομών. Αρχικά παρουσιάζεται ο τρόπος κατασκευής των πυκνωτών MOS με νανοκρυστάλλους καθώς και των διατάξεων MOS χωρίς νανοκρυστάλλους (δείγματα αναφοράς), που χρησιμοποιήθηκαν για τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των δομών. Στη συνέχεια γίνεται μελέτη της αγωγιμότητας των δομών, των χαρακτηριστικών χωρητικότητας-τάσης (C-V), της αγωγιμότητας-τάσης (G-V) και του χρόνου διατήρησης του φορτίου στους νανοκρυστάλλους (Retention).

Όταν οι νανοκρύσταλλοι ενθέτονται μέσα στο μονωτικό στρώμα του πυκνωτή μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού (MOS), ο πυκνωτής παρουσιάζει υστέρηση στη χαρακτηριστική C-V που υποδηλώνει ένα χαρακτηριστικό ηλεκτρονικής μνήμης. Το στοιχείο μνήμης παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά που εξαρτώνται από το εάν υπάρχουν για παράδειγμα αρνητικά φορτία (μετατόπιση της καμπύλης C-V προς τα δεξιά) ή αν εξουδετερωθούν (μετατόπιση της καμπύλης C-V προς τα αριστερά) τα φορτία στους νανοκρυστάλλους και έτσι μπορεί να λειτουργήσει ως στοιχείο μνήμης. Πολλές μελέτες, θεωρητικές [41,85,86,87,88,89,90] και πρακτικές [91,92,93,94,95,96,97,100], έχουν γίνει πάνω σε αυτό το μοντέλο, καθώς και στα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως νανοκρύσταλλοι, που εκτός από μέταλλο έχει εφαρμοστεί ημιαγωγός, γραφένιο [8] και νανοσωλήνες άνθρακα [98]. Μελέτη έγινε για την κατανόηση, ποσοτικοποίηση και χρήση αυτού του ενδιαφέροντος φαινομένου, δηλαδή της παγίδευσης φορτίου που δημιουργεί μνήμες. Αντικείμενο της μελέτης των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών είναι η μέτρηση των επιδόσεων των δομών, η συσχέτισή τους με τις παραμέτρους κατασκευής των νανοκρυστάλλων από το laser, καθώς και η επίτευξη των βέλτιστων δυνατών χαρακτηριστικών, μεταβάλλοντας παραμέτρους στην κατασκευή των νανοκρυστάλλων. Πειραματικά στοιχεία του φαινομένου της υστέρησης, που προέρχονται από την παγίδευση φορτίου στους νανοκρυστάλλους, ελήφθησαν από τον πυκνωτή MOS που στη διεπιφάνεια των οξειδίων υπάρχουν νανοκρύσταλλοι χρυσού, καθώς επίσης παρουσιάζεται σύγκριση με δομή MOS χωρίς νανοκρυστάλλους.

Η μετρούμενη καμπύλη χωρητικότητας συναρτήσει της τάσης έδειξε να μετατοπίζεται τόσο προς τα αριστερά όσο και προς τα δεξιά, εξαρτώμενη από τη φορά σάρωσης των τάσεων, παρουσιάζοντας δεξιόστροφο βρόχο υστέρησης. Ο βρόχος υστέρησης μεγαλώνει, καθώς το εύρος των εφαρμοζόμενων τάσεων από αρνητική σε θετική τάση και επιστροφή αυξάνει. Οι χαρακτηριστικές των στοιχείων μνήμης με ενσωματωμένους νανοκρυστάλλους ή χωρίς, αναλύθηκαν και συγκρίθηκαν για να μπορέσει να επιβεβαιωθεί ότι, το φαινόμενο της υστέρησης οφείλεται στην παρουσία των μεταλλικών νανοκρυστάλλων, επίσης έγιναν μετρήσεις συγκράτησης φορτίου συναρτήσει του χρόνου, για να επιβεβαιωθεί η δυνατότητα διατήρησης φορτίου στις δυο καταστάσεις, φόρτισης και εκφόρτισης (0 και 1), ούτως ώστε να είναι εφαρμόσιμες ως μη πτητικές μνήμες.

### 4.2 Όργανα ηλεκτρικού χαρακτηρισμού

Για τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των παρασκευασθεισών μνημών χρησιμοποιήθηκαν τα εξής μετρητικά όργανα:

α) Αναλυτές σύνθετης αντίστασης (LCR meters) HP 4275 και Agilent 4284A με τα οποία γίνεται μέτρηση της χωρητικότητας (C) καθώς και της αγωγιμότητας (G) συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης πύλης ( $V_{gate}$ ), δημιουργώντας καμπύλες C-V και G-V. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιούνται για ένα πλήθος συχνοτήτων εναλλασσόμενης τάσης από συχνότητα  $f=10\text{Hz}$  έως  $10\text{MHz}$ . Το πλάτος του ac σήματος τάσης σε όλες τις μετρήσεις είναι σταθερό και ίσο με  $25\text{mV}$  p-p. Τα όργανα είναι εφοδιασμένα με εσωτερική πηγή τάσης η οποία εφαρμόζεται στην πύλη ( $V_{gate}$ ).

β) Το ηλεκτρόμετρο Keithley 617 μαζί με μία πηγή τάσης Keithley 230 όπως και το όργανο HP 4140 B με ενσωματωμένο πικοαμπερόμετρο και πηγή συνεχούς τάσης της Hewlett-Packard, χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή για μέτρηση των χαρακτηριστικών I-V. Η μέτρηση γίνεται επιλέγοντας την λειτουργία “staircase mode” η οποία αυξάνει την εφαρμοζόμενη τάση στη πύλη με σταθερό βήμα, το οποίο επιλέγεται από το χρήστη, μετρώντας στη συνέχεια την ένταση του ρεύματος (I), έπειτα από χρονική καθυστέρηση (καθορίζεται και αυτή από τον χρήστη). Η χρονική αυτή καθυστέρηση εξασφαλίζει την εξασθένιση του μεταβατικού χαρακτήρα του ρεύματος που προκαλεί η μεταβολή της τάσης. Επίσης με το ίδιο όργανο μετριέται η ημιστατική χωρητικότητα ( $C_{quasistatic}$ ). Για τη μέτρηση της χωρητικότητας μεταβάλλουμε την τάση στη πύλη σε ένα συγκεκριμένο εύρος τάσεων με ένα συγκεκριμένο ρυθμό. Η χωρητικότητα του πυκνωτή MOS δίνεται από τον τύπο:

$$C = \left| \frac{dQ_{gate}}{dV_{gate}} \right| \quad (29)$$

γ) Γεννήτρια παλμών HP 3488A, χρησιμοποιείται προκειμένου να διαπιστωθεί η δυναμική λειτουργία των παρασκευασθεισών δομών μνήμης. Συγκεκριμένα στην πύλη εφαρμόζεται ένας παλμός συγκεκριμένης χρονικής διάρκειας (πλάτους) από  $1\mu\text{s}$  έως  $1\text{ms}$  μεταβάλλοντας την τάση (ύψος) του παλμού από  $-20\text{V}$  έως  $+20\text{V}$ , με αυτόν τον τρόπο μετριέται η αποτελεσματικότητα παράγερσης.

### 4.3 Μέθοδοι μετρήσεων

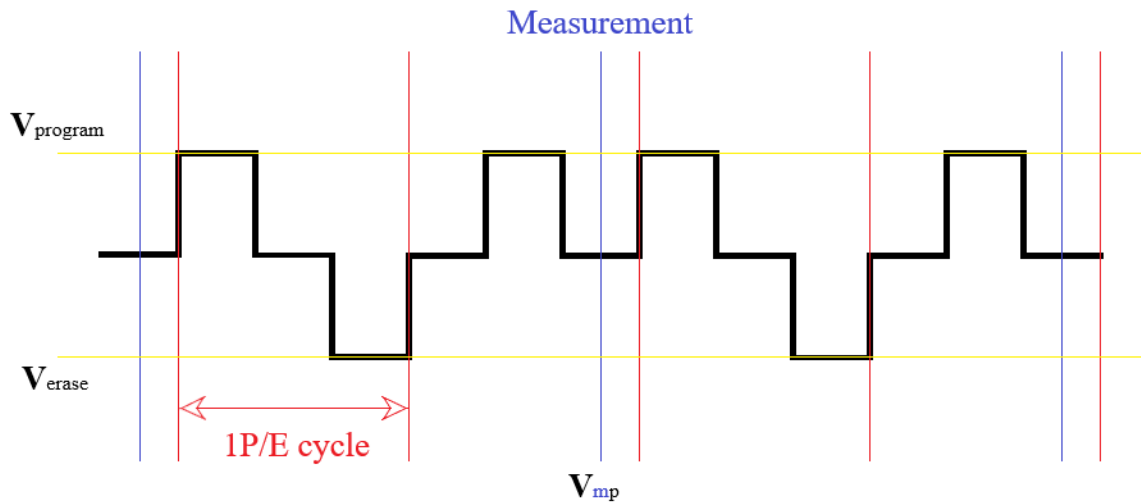
Βασικοί τρόποι για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των διατάξεων NVM με νανοκρυστάλλους περιλαμβάνουν: (α) την αντοχή σε επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης εγγραφής/διαγραφής (P/E), είναι πολύ σημαντικό η διάταξη μνήμης να έχει την ικανότητα να μπορεί να αντέχει ένα μεγάλο αριθμό (τυπικά εκατομμύρια ή περισσότερους) κύκλους P/E και (β) τον χρόνο συγκράτησης φορτίου (ή δεδομένων), συνήθως αναφέρεται και ως  $t_R$ , ο οποίος αντιπροσωπεύει ένα μέτρο της διάρκειας ζωής των αποθηκευμένων πληροφοριών όταν εγγράφεται ή διαγράφεται η διάταξη μνήμης. Τέλος είναι πολύ σημαντικό η διάταξη μνήμης να έχει την ικανότητα να διατηρεί το αποθηκευμένο φορτίο για ένα χρονικό διάστημα τουλάχιστον 10 ετών για να μπορεί να θεωρηθεί μη πτητική.

Μια άλλη μέτρηση, για να διαπιστωθεί η απόδοση της μνήμης εφαρμόζεται στη πύλη ένας παλμός συγκεκριμένης τάσης (ύψους) μεταβάλλοντας την χρονικής διάρκεια (πλάτος) του παλμού, έτσι υπολογίζεται η ταχύτητα της μνήμης.

#### I) Μετρήσεις αντοχής των κυψελίδων μνήμης με νανοκρυστάλλους

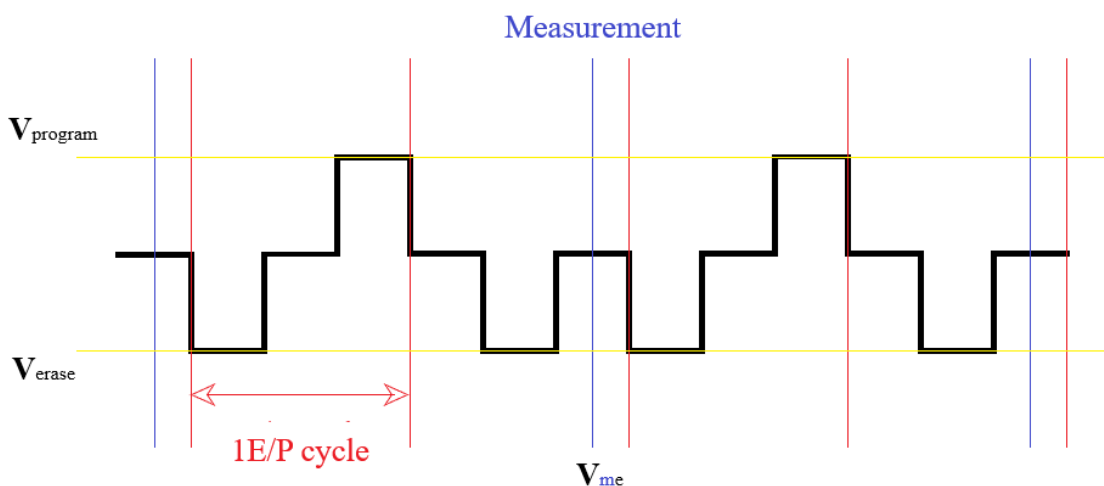
Η αστοχία αντοχής των κυψελίδων μη πτητικών μνημών με νανοκρυστάλλους σε επαναλαμβανόμενους κύκλους λειτουργίας προγραμματισμού/διαγραφής, οφείλεται

κυρίως στην υποβάθμιση του διηλεκτρικού στρώματος πύλης ή του διηλεκτρικού στρώματος σήραγγας, με αποτέλεσμα τα φορτία να μην παγιδεύονται στους νανοκρυστάλλους και να διαρρέουν προς το ηλεκτρόδιο πύλης ή προς το υπόστρωμα, αντίστοιχα.



Εικόνα 73: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας δοκιμής αντοχής με εφαρμογή επαναλαμβανόμενων κύκλων προγραμματισμού/διαγραφής (P/E), για μέτρηση προγραμματισμού.

Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας δοκιμής της αντοχής, με εφαρμογή επαναλαμβανόμενων κύκλων προγραμματισμού/διαγραφής και διαγραφής/προγραμματισμού φαίνεται στην εικόνα 73 (μέτρηση προγραμματισμού) και στην εικόνα 74 (μέτρηση διαγραφής), αντίστοιχα. Σε αυτές τις μετρήσεις το παράθυρο μνήμης πρέπει να παραμένει σταθερό όταν αρχίζει να μικραίνει αρχίζει να επέρχεται φθορά. Η μέτρηση της τάσης πραγματοποιείται στην τάση επίπεδης ζώνης  $V_{FB}$ . Πρέπει να παραμένει ένα ικανοποιητικό παράθυρο μνήμης, για να υπάρχει διάκριση των καταστάσεων προγραμματισμού και διαγραφής.



Εικόνα 74: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας δοκιμής αντοχής με εφαρμογή επαναλαμβανόμενων κύκλων διαγραφής/προγραμματισμού (E/P), για μέτρηση διαγραφής.

## II) Μετρήσεις συγκράτησης φορτίου των κυψελίδων μνήμης με νανοκρυστάλλους

Η διατήρηση φορτίων (ή δεδομένων) είναι ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά μιας διάταξης μνήμης. Η διατήρηση του φορτίου αποτελεί τον τέταρτο τρόπο λειτουργίας μιας διάταξης μνήμης, λαμβάνοντας υπόψη ότι μια πληροφορία πρέπει να μπορεί να εγγραφεί, να διαγραφεί και να διαβαστεί από τη μνήμη.

Κατά την διαδικασία της δοκιμής αποθήκευσης ηλεκτρονίων σε κυψελίδες μνήμης με νανοκρυστάλλους δεν εφαρμόζεται εξωτερική τάση και μετρώντας στην τάση επίπεδης ζώνης ( $V_{FB}$ ) βλέπουμε τη συγκράτηση των φορτίων στους νανοκρυστάλλους.

## III) Μετρήσεις C-V, G-V και I-V των δομών μνήμης

Η καλή ηλεκτρική συμπεριφορά της δομής MOS είναι ένδειξη ότι το τρανζίστορ λειτουργεί σωστά και αποδοτικά. Από τα πειραματικά αποτελέσματα των ηλεκτρικών μετρήσεων μιας δομής MOS, είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικών με τα χαρακτηριστικά των υμενίων, τις ατέλειες που υπάρχουν σε αυτή και τη φύση των διεπιφανειών που σχηματίζονται. Ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός μιας δομής MOS, γίνεται με τη μελέτη καμπυλών ρεύματος-τάσης (I-V) της εξάρτησης της χωρητικότητας από την τάση (χαρακτηριστική C-V), της αγωγιμότητας από την τάση (χαρακτηριστική G-V) και της εξάρτησης της χωρητικότητας από τη συχνότητα (χαρακτηριστική C-f) μέσω της οποίας λαμβάνεται η χαρακτηριστική  $G_p/\omega$  συναρτήσεως της συχνότητας, όπου  $G_p$  είναι η αγωγιμότητα και  $\omega$  η κυκλική συχνότητα. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου σε σκοτεινό θωρακισμένο σταθμό μετρήσεων (Probe Station Dark Box).

Αρχικά στον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό μιας διάταξης MOS είναι απαραίτητη η λήψη πειραματικών μετρήσεων χωρητικότητας-τάσης της δομής. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται με παράμετρο τη συχνότητα της υπερτιθέμενης εναλλασσόμενης τάσης. Η κάθε περιοχή της χαρακτηριστικής C-V, δηλαδή οι περιοχές της συσσώρευσης, της απογύμνωσης και της αντιστροφής, παρέχει διαφορετικές πληροφορίες για το σύστημα.

Από την τιμή της χωρητικότητας στην περιοχή της συσσώρευσης, γνωρίζοντας τη διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού υλικού, είναι δυνατός ο υπολογισμός του πάχους του, ή αντίστροφα. Επιπλέον, εάν εμφανίζεται διασπορά των καμπυλών με παράμετρο τη συχνότητα, δηλαδή διαφορετικές τιμές  $C_{acc}$  για κάθε συχνότητα, αποδίδεται σε σειριακές αντιστάσεις που υπάρχουν στη δομή [100], ή σε ρεύματα διαρροής, ή σε παρασιτικά φαινόμενα που σχετίζονται με τις επαφές της δομής ή τέλος σε εξάρτηση της διηλεκτρικής σταθεράς από τη συχνότητα της εφαρμοζόμενης τάσης. Αν η διασπορά εμφανίζεται στην περιοχή της απογύμνωσης, τότε η μελετώμενη δομή έχει μεγάλο πλήθος διεπιφανειακών καταστάσεων.

Οι μετρήσεις της αγωγιμότητας συναρτήσεως της τάσης (χαρακτηριστικές G-V), δείχνουν το ενεργειακό επίπεδο πληρότητας των παγίδων διεπιφάνειας. Η μεταβολή της G συναρτήσεως της τάσης συνδέεται με απώλεια ενέργειας, η οποία συμβαίνει λόγω της κίνησης των φορέων αλλάζοντας την πληρότητα των παγίδων διεπιφάνειας. Οι παγίδες της διεπιφάνειας είναι ατέλειες που βρίσκονται στη διεπιφάνεια Si/SiO<sub>2</sub>.

Σε όλες τις πειραματικές διατάξεις η ηλεκτρική διασύνδεση των μετρητικών οργάνων με τον πυκνωτή MOS, έγινε μέσω ομοαξονικών καλωδίων. Οι επαφές πάνω στον



πυκνωτή MOS έγιναν με τη βοήθεια ακίδων βολφραμίου, καθώς και με τη βοήθεια συστήματος οπτικού μικροσκοπίου, το οποίο είναι τοποθετημένο στο εσωτερικό του μεταλλικού κουτιού (σκοτεινό κουτί), το οποίο παρέχει προστασία στη ραδιοσυχνότητα, στα παρασιτικά ρεύματα ηλεκτροστατικής φύσης και από το φως, με σκοπό τη λήψη μετρήσεων χαμηλού ρεύματος και ευαισθησίας στο φως. Για την αυτόματη συλλογή των πειραματικών δεδομένων καθώς και τον έλεγχο των μετρητικών οργάνων χρησιμοποιείται καλώδιο ελέγχου GPIB USB που μπορεί να συνδεθεί σε υπολογιστή. Στην εικόνα 75 παρουσιάζεται φωτογραφία των πειραματικών διατάξεων και των μετρητικών οργάνων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των δειγμάτων μνήμης.

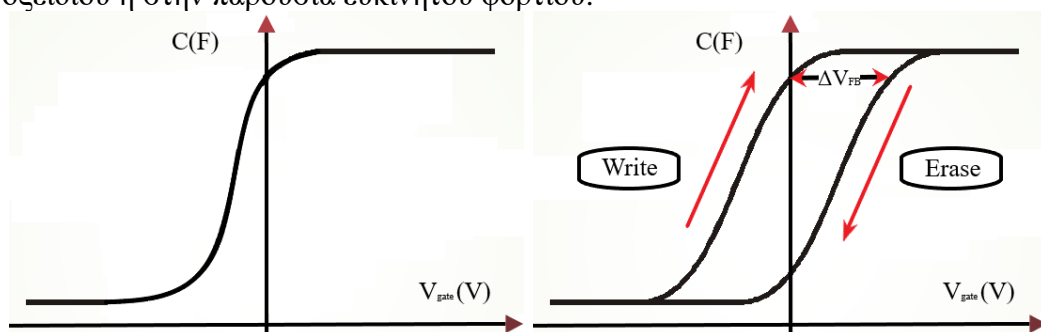
Σε ένα βρόχο υστέρησης, για να είναι σωστή η λειτουργία της μνήμης, ο βρόχος πρέπει να είναι δεξιόστροφος, καθώς γίνεται η μέτρηση από την αντιστροφή στη συσσώρευση για υπόστρωμα πυριτίου τύπου n (αντίστοιχα αριστερόστροφος για ημιαγωγό τύπου p). Στη μελέτη αυτή ως μέταλλο χρησιμοποιείται Au και ως ημιαγωγός πυρίτιο τύπου n. Η εξωτερική τάση  $V_{gate}$  εφαρμόζεται στο μέταλλο του πυκνωτή, που ονομάζεται και πύλη (gate) του πυκνωτή, με το υπόστρωμα γειωμένο.



Εικόνα 75: Φωτογραφία των μετρητικών οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν για τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των δομών μνήμης.

Στην εικόνα 76 αριστερά παρουσιάζεται η ιδανική χαρακτηριστική χωρητικότητας-τάσης σε υψηλή συχνότητα και δεξιά παρουσιάζεται η καμπύλη χωρητικότητας-τάσης σε υψηλή συχνότητα όπου σημειώνονται η εγγραφή, η διαγραφή και το παράθυρο της μνήμης.

Δεξιόστροφη διαγραφή του βρόχου (εικόνα 76 δεξιά) αποδίδεται σε έγχυση φορέων και μάλιστα ηλεκτρονίων, από το υπόστρωμα στον όγκο του οξειδίου. Αντίστοιχα, αριστερόστροφη διαγραφή βρόχου αποδίδεται σε έγχυση οπών από το μέταλλο στον όγκο του οξειδίου ή στην παρουσία ευκίνητου φορτίου.



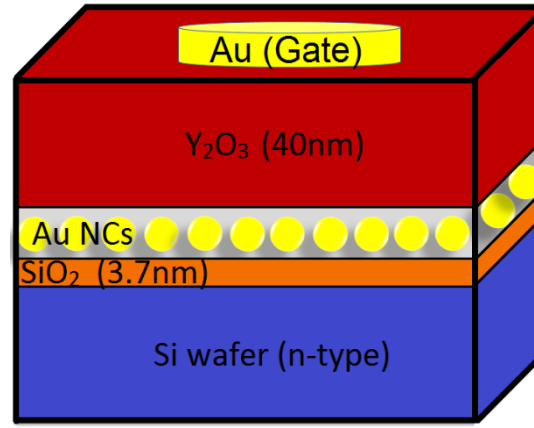
Εικόνα 76: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας σε υψηλή συχνότητα, ιδανικού MOS (αριστερά) και μνήμη δομής MOS (δεξιά) όταν το υπόστρωμα είναι τύπου n.

#### 4.4 Μετρήσεις C-V, G-V και I-V των δομών μνήμης

Μετρήσεις χωρητικότητας-τάσης ( $C_{\text{hf}}-V$ ) και αγωγιμότητας-τάσης σε υψηλή συχνότητα καθώς και καμπύλες ρεύματος-τάσης, χρησιμοποιήθηκαν για την εξέταση των ιδιοτήτων μνήμης, μέσω της μελέτης εγγραφής/διαγράψης, σε διαφορετικές περιοχές εύρους εφαρμοζόμενων τάσεων στη πύλη. Διατάξεις ελέγχου με το ίδιο πάχος οξειδίων αλλά χωρίς ναοκρυστάλλους επίσης μετρήθηκαν, για να διακριθούν οι μοναδικές ιδιότητες που προσφέρουν οι ναοκρυστάλλοι.

##### 4.4.1 Με οξείδιο φραγής το $Y_2O_3$

Τα αποτελέσματα ηλεκτρικών μετρήσεων χωρητικότητας-τάσης σε διατάξεις που έχουν τη δομή n-Si(100)/SiO<sub>2</sub>/Au (NCs)/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (εικόνα 77, δείγμα LKSW07), στα 100kHz φαίνονται στην εικόνα 78, που είναι διατάξεις MOS με ναοκρυστάλλους χρυσού και στην εικόνα 79 χωρίς ναοκρυστάλλους χρυσού (χωρίς να υπάρχει καθόλου μέταλλο μεταξύ των οξειδίων φραγμού και σήραγγας), που είναι το δείγμα αναφοράς. Όσον αφορά τα δείγματα που περιέχουν ναοκρυστάλλους, τα χαρακτηριστικά των καμπυλών C-V δείχνουν ένα παράθυρο υστέρησης (μνήμης) κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού, το οποίο διευρύνεται σε υψηλότερες εφαρμοζόμενες τάσεις. Το φαινόμενο της υστέρησης δηλώνει ότι τα φορτία παγιδεύονται στους μεταλλικούς ναοκρυστάλλους και οι υψηλότερες εφαρμοζόμενες τάσεις στην πύλη οδηγούν σε μεγαλύτερη φόρτιση των ναοκρυστάλλων, γεγονός που οδηγεί σε ευρύτερους βρόχους υστέρησης. Η C(V) μετατοπίζεται ανάλογα με τη φορά της εφαρμοζόμενης πόλωσης. Συγκεκριμένα, μια αύξηση της αρνητικής εφαρμοζόμενης τάσης στη πύλη μετατοπίζει τις καμπύλες C-V προς πιο αρνητικές τιμές V (άξονα x), υποδεικνύοντας ότι σπές με φαινόμενο σήραγγας, μεταφέρονται από το υπόστρωμα πυριτίου τύπου n στους ναοκρυστάλλους χρυσού, όπου και παγιδεύονται. Από την άλλη πλευρά, μια αύξηση της θετικής τάσης στην πύλη, μετατοπίζει τις καμπύλες C-V προς πιο θετικές τιμές V, που υποδεικνύουν ότι ηλεκτρόνια με φαινόμενο σήραγγας μεταφέρονται από το υπόστρωμα πυριτίου τύπου n και αποθηκεύονται στους ναοκρυστάλλους χρυσού. Αντίθετα, οι διατάξεις ελέγχου χωρίς ναοκρυστάλλους που παρουσιάζονται στην εικόνα 79 δεν έδειξαν καθόλου βρόχο υστέρησης, πράγμα που αποτελεί σαφή ένδειξη, ότι τα στρώματα οξειδίου είναι απαλλαγμένα από τυχόν φορτία, που μπορούν να εισαχθούν κατά την κατασκευή τους στις διεπιφάνειες ή στο εσωτερικό τους. Επομένως, το παράθυρο μνήμης που παρατηρείται στις διατάξεις που περιέχουν ναοκρυστάλλους χρυσού, μπορεί να συσχετιστεί μόνο με την παρουσία των ναοκρυστάλλων.



Εικόνα 77: Δομή κυπελίδας μνήμης με νανοκρυστάλλους.

Από την εικόνα 79 και τη σχέση [48,49]:

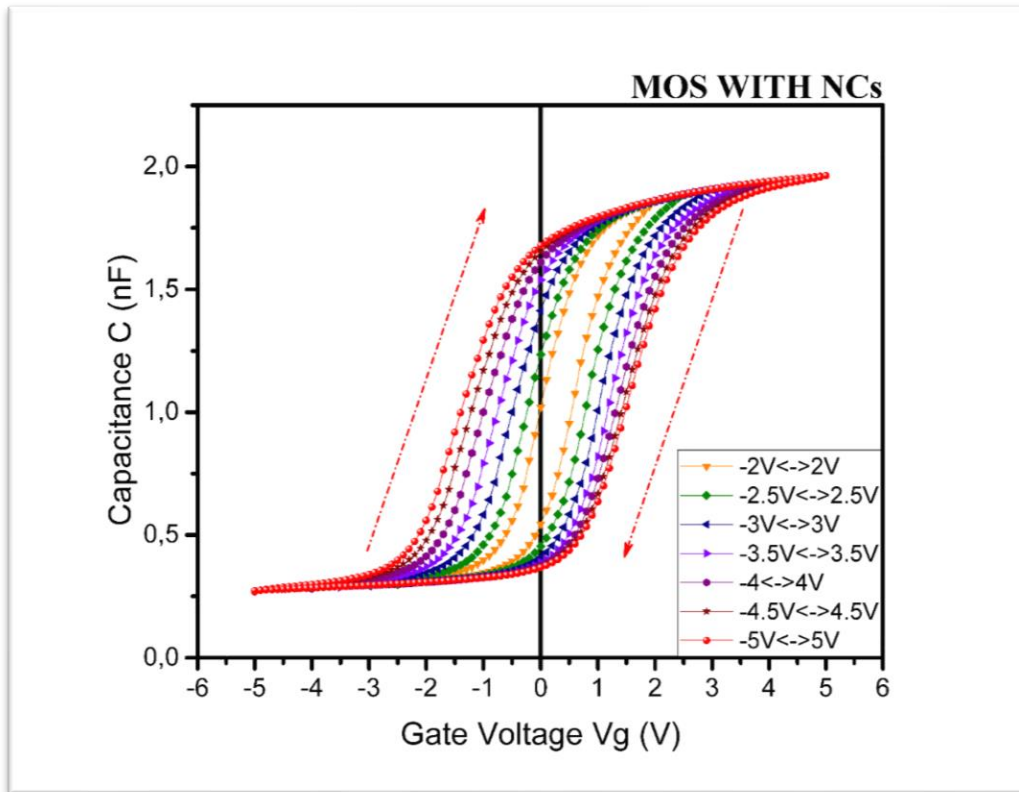
$$K_{Y_2O_3} = \frac{d_{Y_2O_3}}{\frac{\epsilon_0 A}{C_{ma} \left[ 1 + \left( \frac{G_{ma}}{\omega C_{ma}} \right)^2 \right]} - \frac{d_{SiO_2}}{4}} \quad (30)$$

Η διηλεκτρική σταθερά ( $K$ ) του  $Y_2O_3$  υπολογίστηκε ότι είναι σχεδόν 15, η οποία είναι κοντά στις τιμές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία [99,101] για υμένα κατασκευασμένα με την τεχνική sputtering. Ένα άλλο ενδιαφέρον θέμα σχετικά με την ποιότητα των εναποτιθέμενων στρωμάτων και την επίδραση της ανόπτησης με laser στις παγίδες φορτίου στις διεπιφάνειες και το κυρίως σώμα ελήφθησαν από μια προσεκτική μέτρηση των διατάξεων ελέγχου και αυτών που περιέχουν νανοκρυστάλλους.

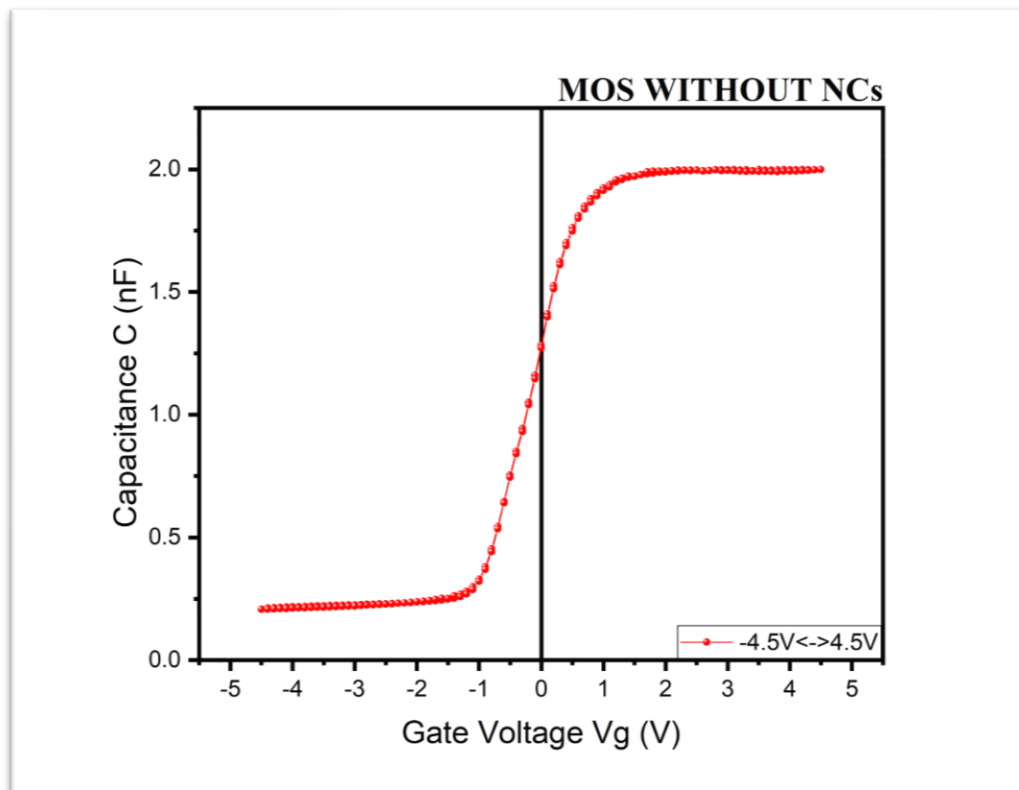
Η θεωρητική τάση επίπεδης ζώνης ( $V_{FB}$ ) για MOS με επαφή χρυσού, γνωρίζοντας το έργο εξόδου του χρυσού  $\Phi_{Au}=5.1eV$ , το ενεργειακό χάσμα του πυριτίου  $E_g=1.14eV$ , την ηλεκτρονική συγγένεια του πυριτίου  $\chi=4.01eV$ , τη σταθερά Boltzmann  $k_B=8.62 \times 10^{-5} eV/K$ , την θερμοκρασία  $T=300K$ , την πυκνότητα προσμίξεων πυριτίου τύπου n  $N_D=5 \times 10^{15} cm^{-3}$  και  $n_i \sim 10^{10} cm^{-3}$  η ενδογενής συγκέντρωση φορέων του πυριτίου, υπολογίζεται ως εξής [102]:

$$V_{FB} = \frac{\varphi_{ms}}{q} = \frac{\varphi_m - \varphi_s}{q} = \frac{\varphi_m - \chi - \frac{E_g}{2} + k_B T \ln \left( \frac{N_D}{n_i} \right)}{q} \quad (31)$$

Συνεπώς, η τάση επίπεδης ζώνης είναι  $+0.86V$  [103]. Όπως φαίνεται στην εικόνα 79 (η οποία επιλέχθηκε ως τυπική διάταξη αναφοράς) η τάση επίπεδης ζώνης των διατάξεων ελέγχου είναι ίση με  $+0.75V$  και συμφωνεί με τη διαφορά έργων εξόδου μετάλλου-ημιαγωγού (Au/n-Si) [102]. Για τις διατάξεις που περιέχουν νανοκρυστάλλους χρυσού πάντοτε γίνεται μέτρηση της μη φορτισμένης καμπύλης C-V σε συχνότητα  $f=100kHz$  η ονομαζόμενη “fresh” καμπύλη. Η εφαρμοζόμενη περιοχή τάσεων πύλης κατά τη διάρκεια αυτής της μέτρησης ήταν πάντοτε από  $-1.5 V$  έως  $+1.5 V$  και καταγράφεται η τάση  $V_{FB}$ .

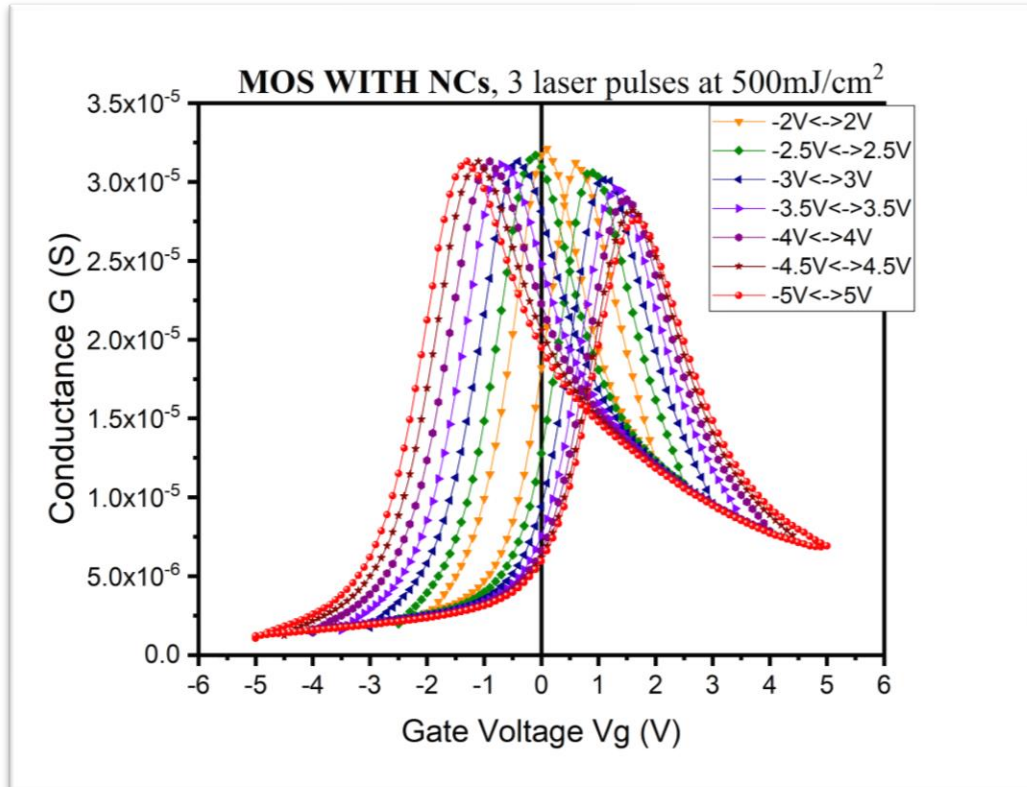


Εικόνα 78: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser με ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας  $500\text{mJ}/\text{cm}^2$  και 3 παλμούς.



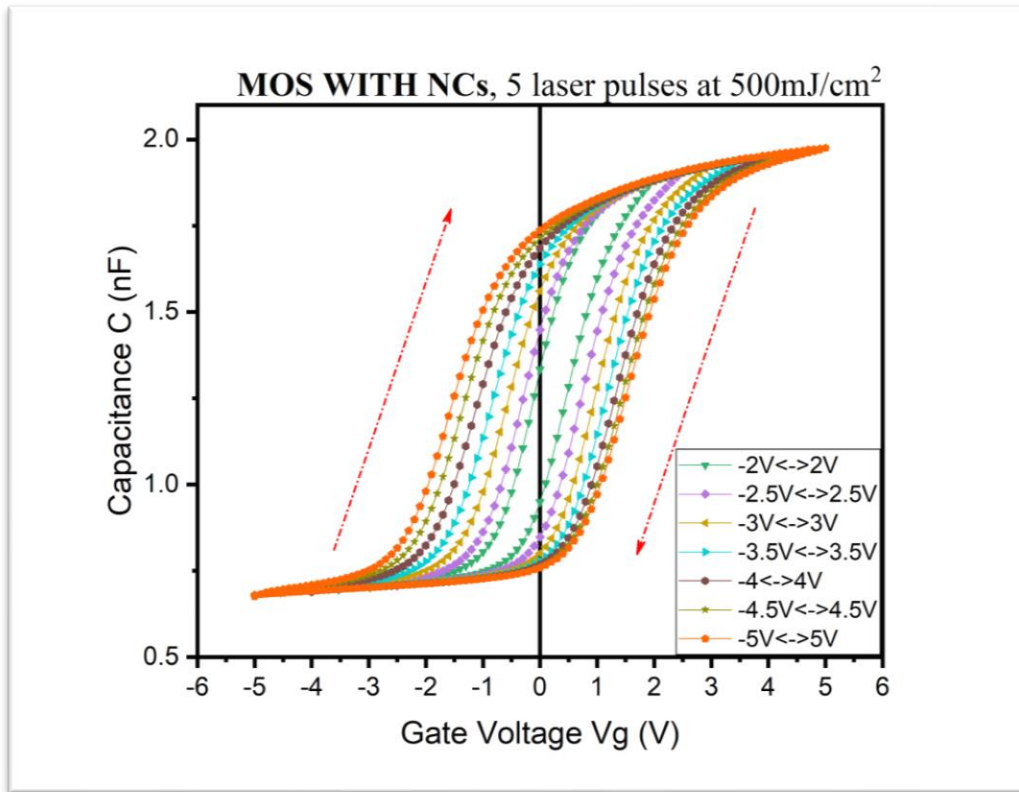
Εικόνα 79: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας δείγματος MOS χωρίς νανοκρυστάλλους χρυσού.

Στην εικόνα 80 φαίνεται η καμπύλη ηλεκτρικής αγωγιμότητας-τάσης διάταξης MOS όπου οι νανοκρύσταλλοι έχουν κατασκευαστεί με 3 παλμούς laser, που η ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας κάθε παλμού είναι  $500\text{mJ}/\text{cm}^2$ . Η ηλεκτρική αγωγιμότητα παραμένει σε χαμηλά επίπεδα ακόμα και στις ακραίες καταστάσεις φόρτισης.

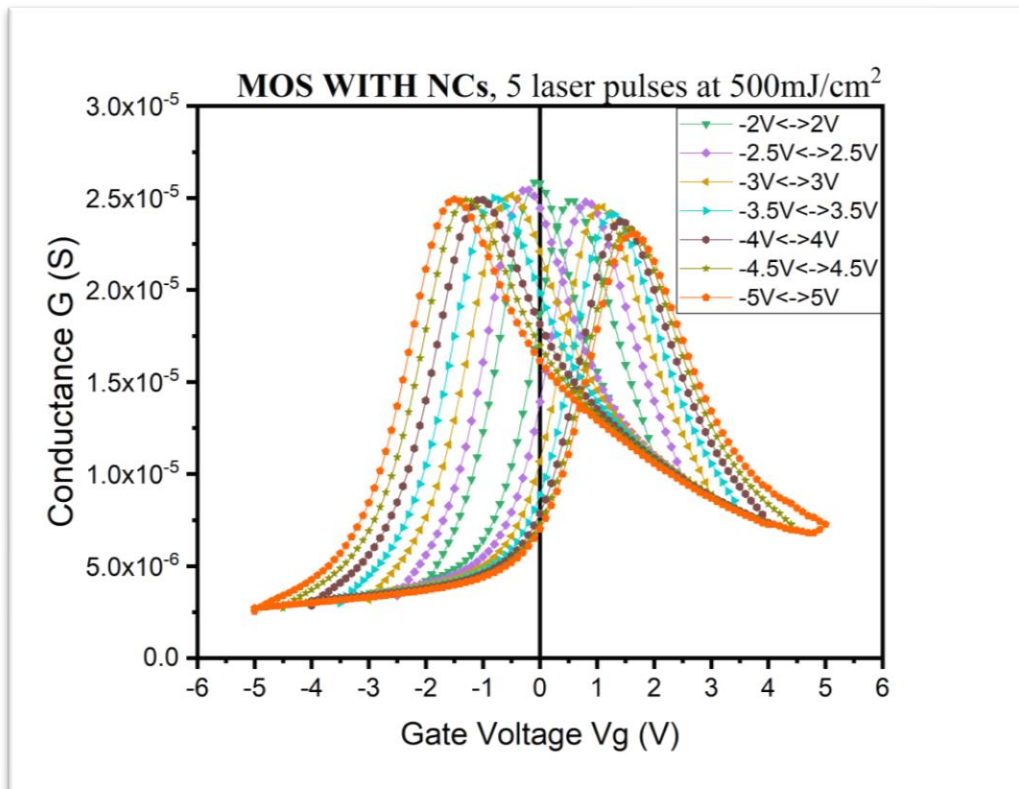


Εικόνα 80: Γραφική παράσταση ηλεκτρικής τάσης-αγωγιμότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.

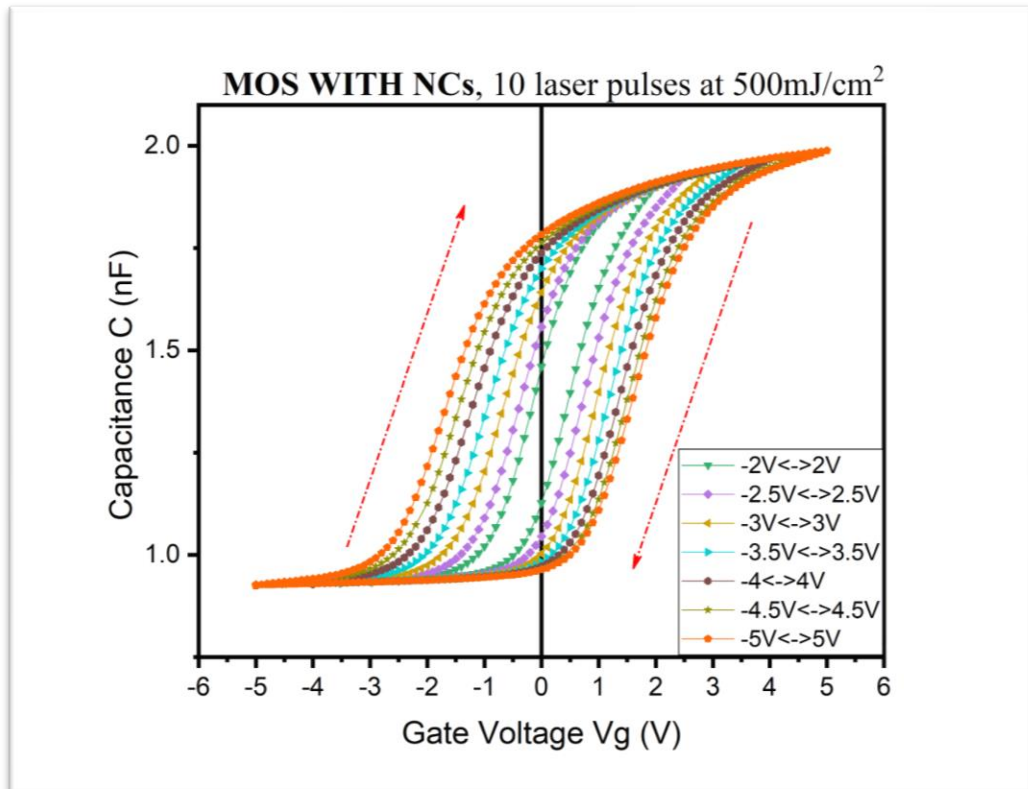
Στη συνέχεια, για διαφορετικές συνθήκες κατασκευής των νανοκρυστάλλων με το laser (μεταβάλλοντας την ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και τον αριθμό παλμών), παρουσιάζονται και άλλες γραφικές παραστάσεις χωρητικότητας τάσης (εικόνες 81, 83, 85, 87, 89, 91) όπου εμφανίζεται η διεύρυνση του παραθύρου μνήμης και ηλεκτρικής αγωγιμότητας-τάσης (εικόνες 82, 84, 86, 88, 90, 92) όπου παρατηρείται διατήρηση της αγωγιμότητας σε χαμηλά επίπεδα κατά τη διάρκεια των κύκλων φόρτισης. Στο δείγμα που παρουσιάζεται στην εικόνα 90 φαίνεται ότι η αγωγιμότητα παραμένει σε υψηλά επίπεδα στη θετική πόλωση, το γεγονός αυτό είναι μια ένδειξη κακής λειτουργίας, που οδηγεί στην υψηλή διαρροή ρεύματος σε περεταίρω μικρή αύξηση της θετικής τάσης.



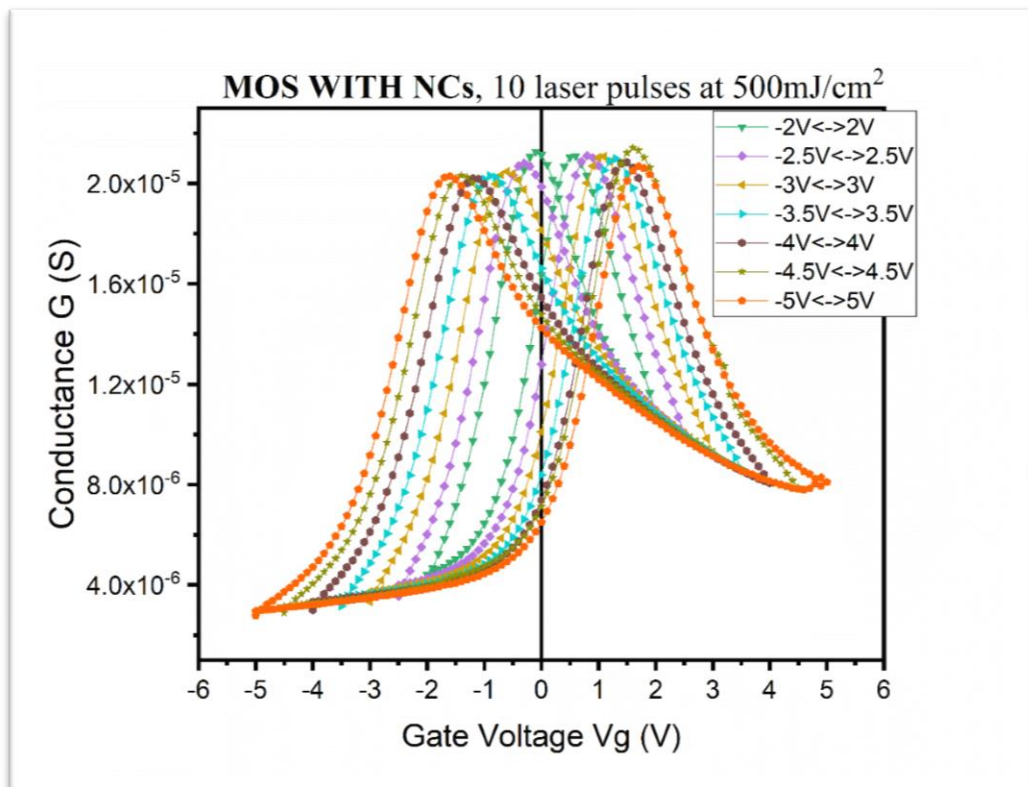
Εικόνα 81: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.



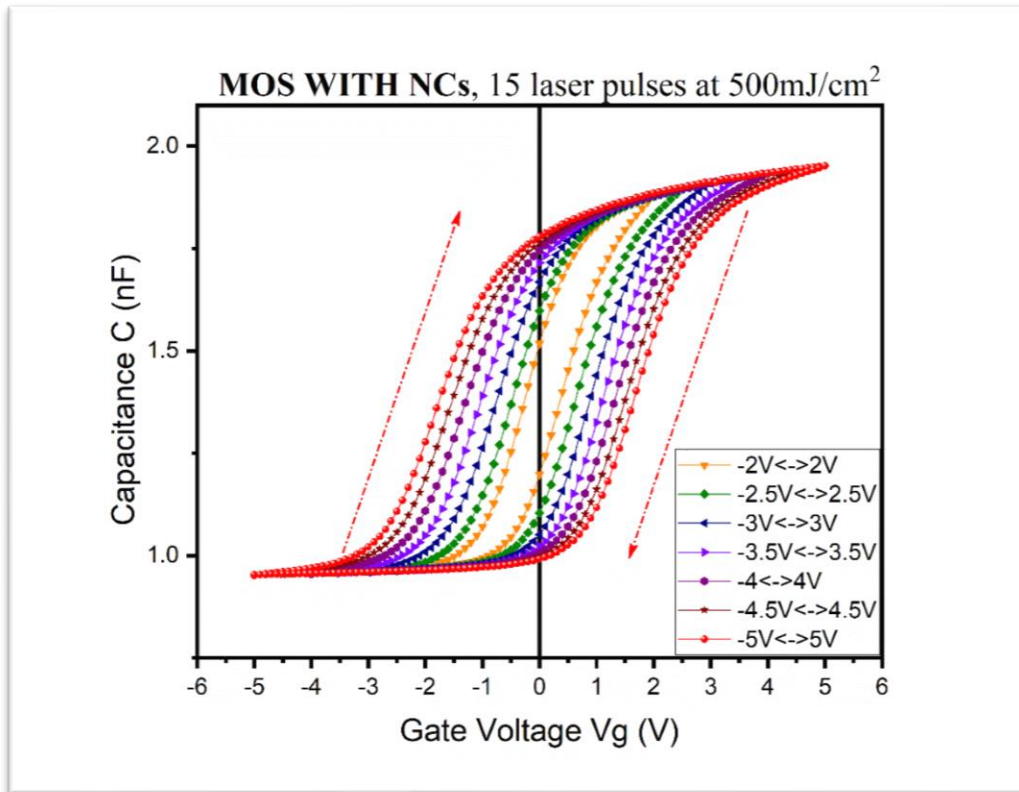
Εικόνα 82: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.



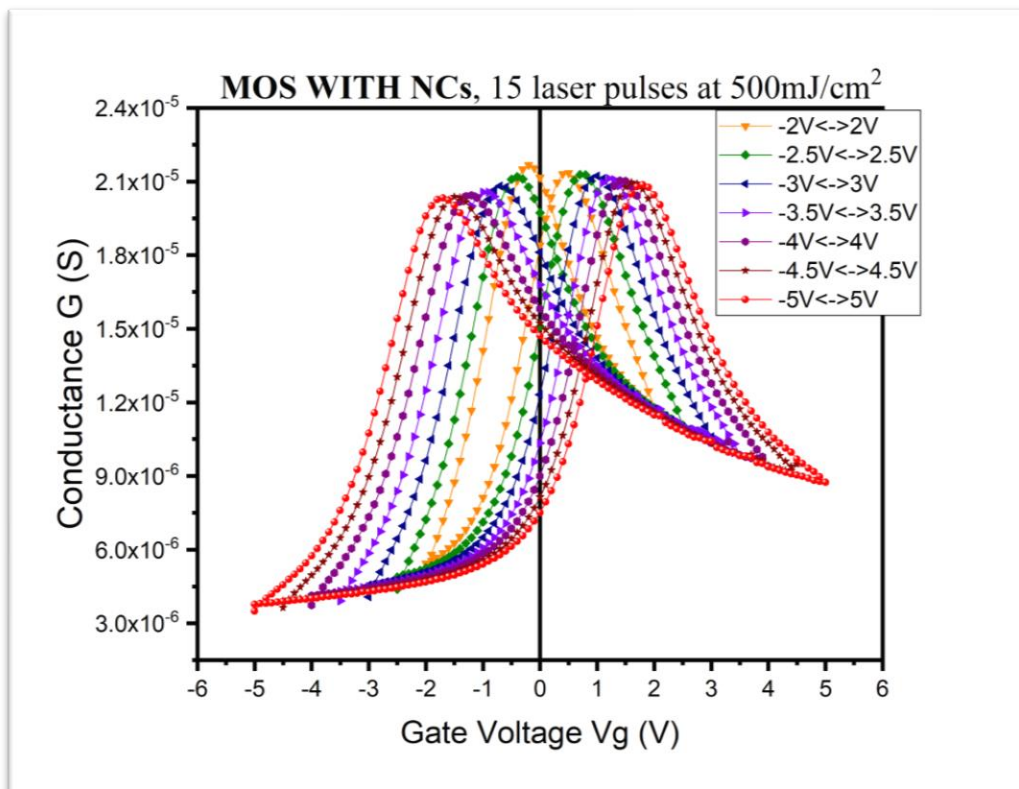
Εικόνα 83: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.



Εικόνα 84: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.

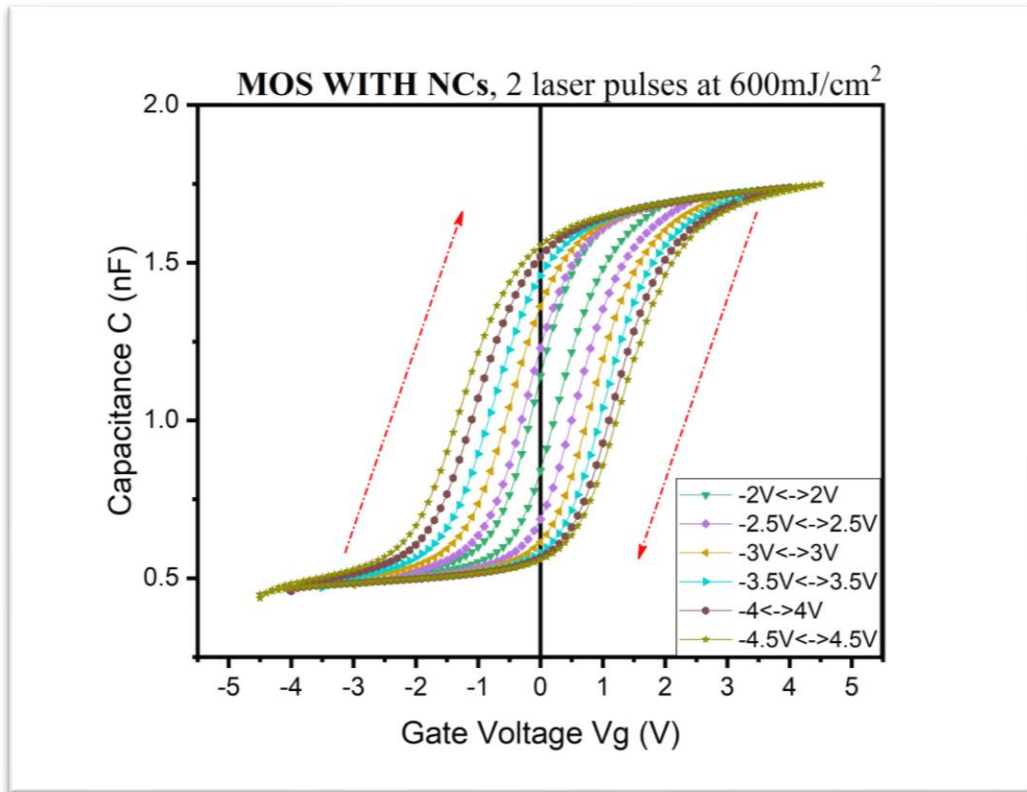


Εικόνα 85: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.

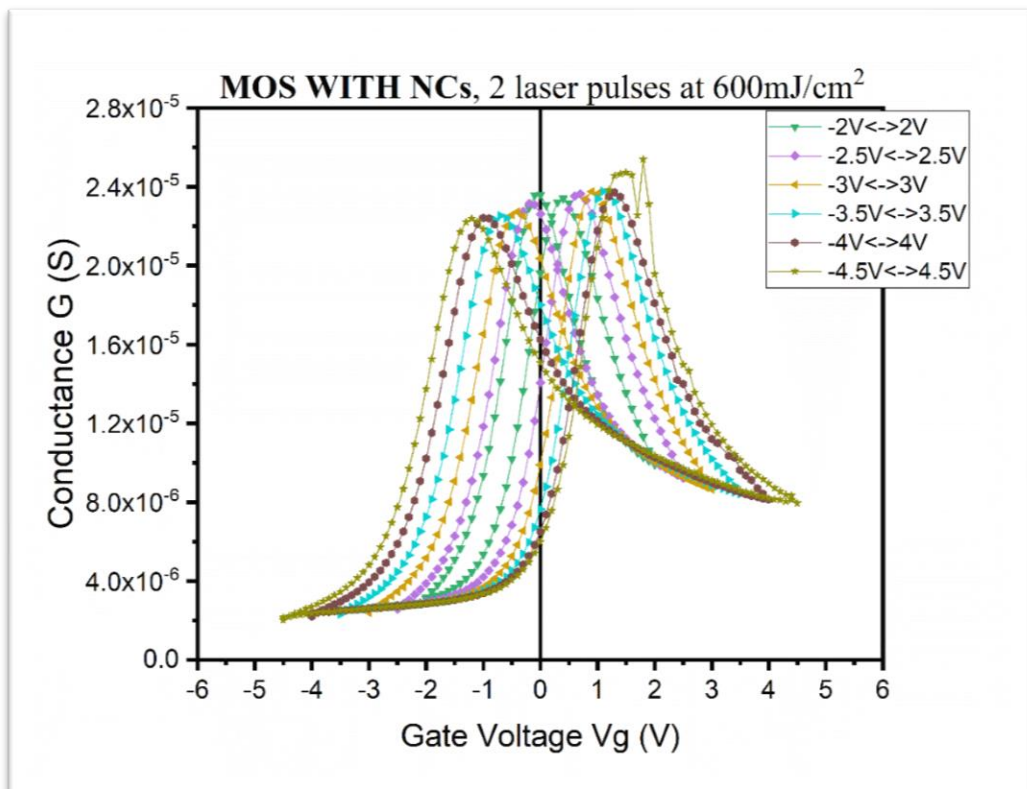


Εικόνα 86: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.

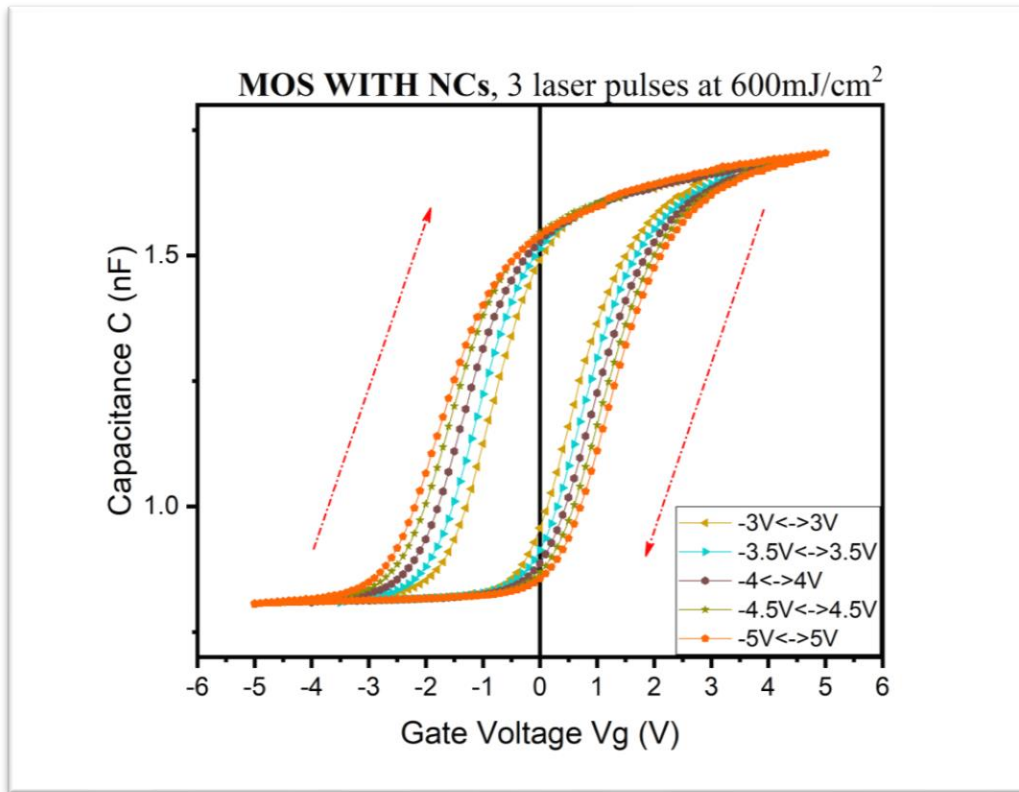




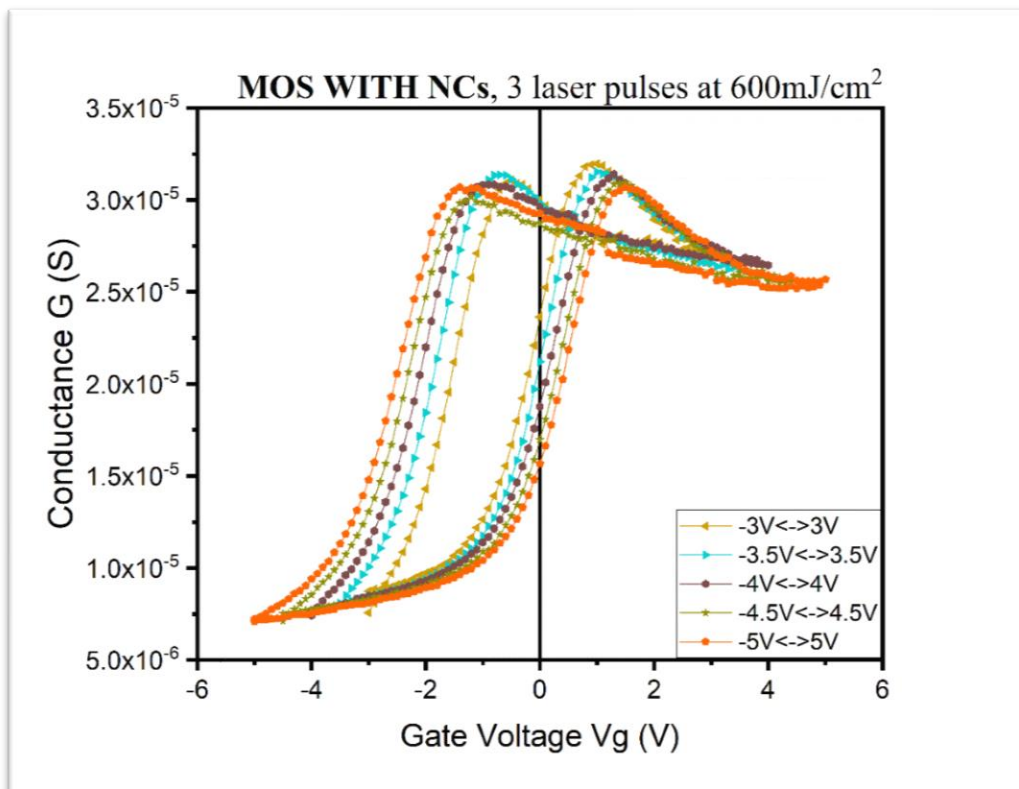
Εικόνα 87: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.



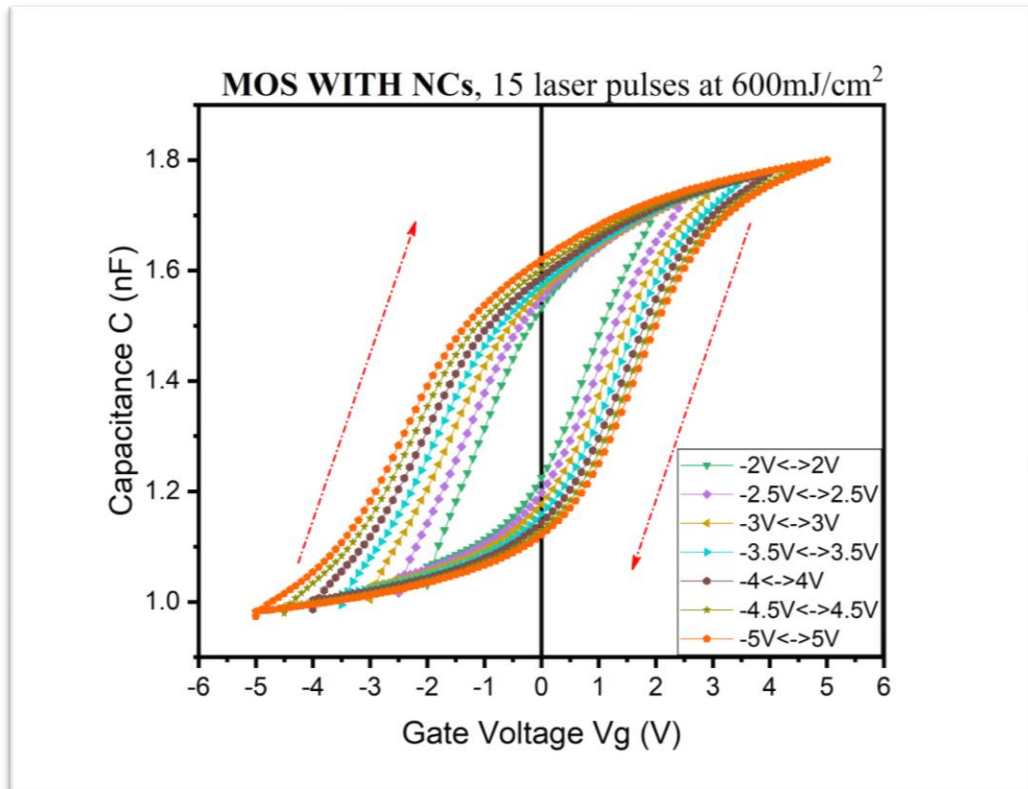
Εικόνα 88: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.



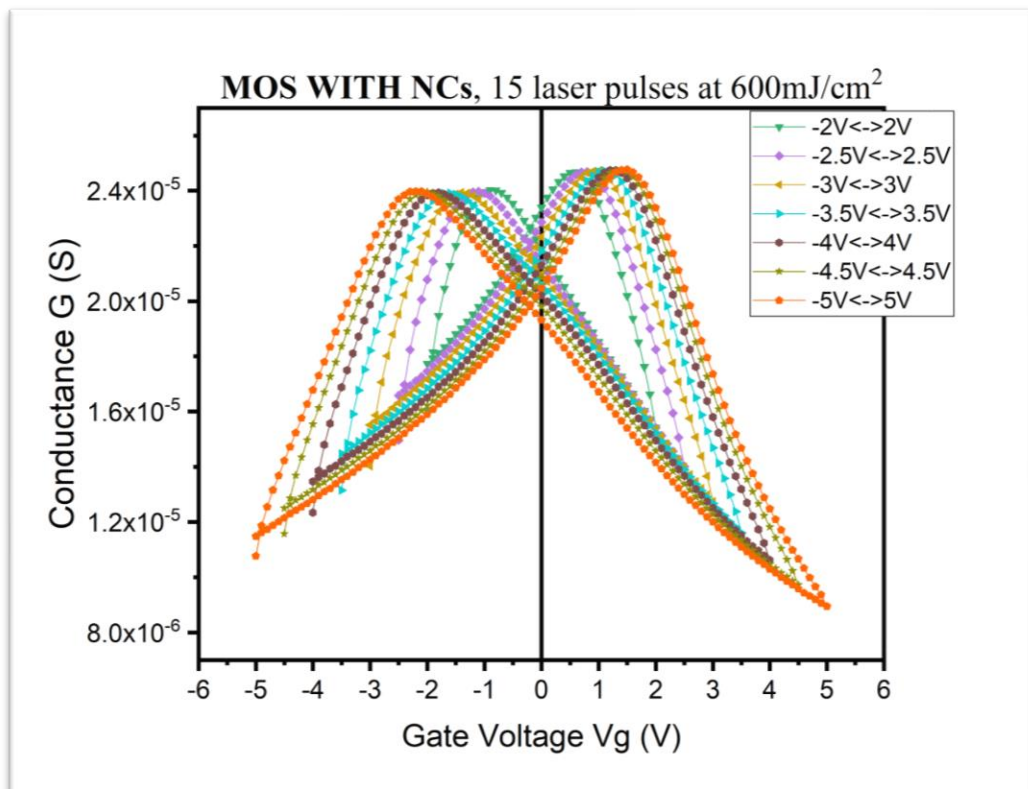
Εικόνα 89: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.



Εικόνα 90: Γραφική παράσταση ηλεκτρικής τάσης-αγωγιμότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.



Εικόνα 91: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.



Εικόνα 92: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.

Στον ακόλουθο συγκριτικό πίνακα 8 παρατηρούμε μια αύξηση του εύρους του παραθύρου μνήμης με τον αριθμό των παλμών, καθώς και με την αύξηση της ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας.

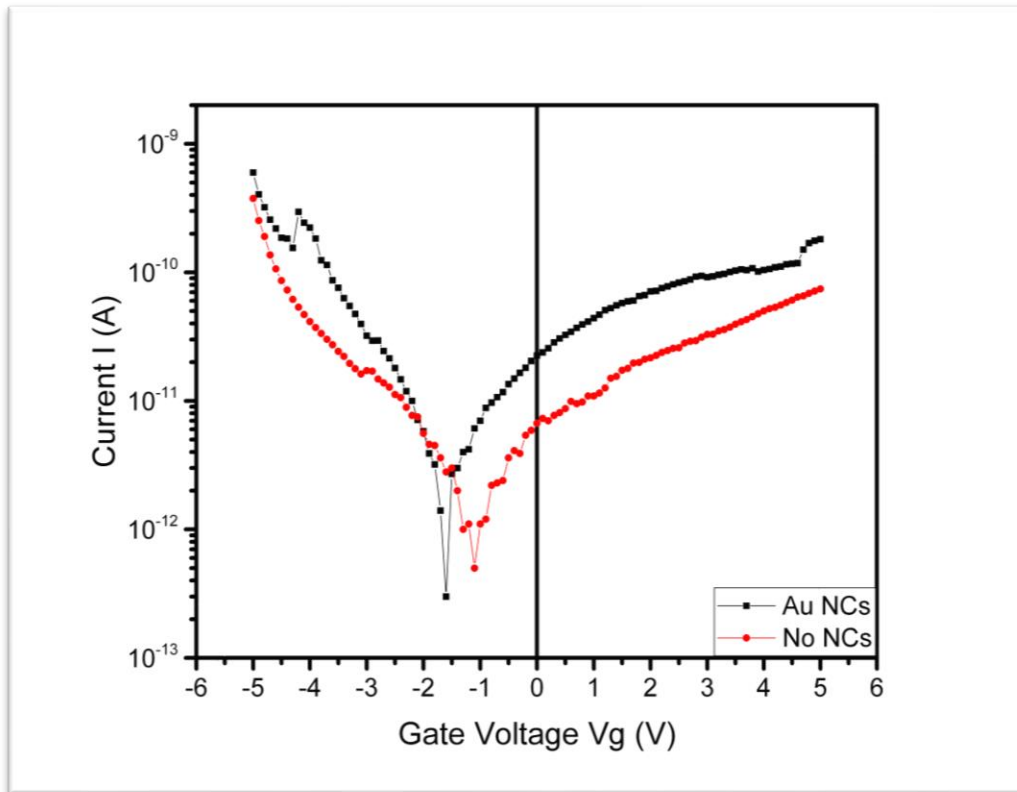
Δείγμα		Μέγιστο παράθυρο μνήμης (V)
Ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας (mJ/cm <sup>2</sup> )	Παλμοί του laser	
500	3	2.89
500	5	3.02
500	10	3.27
500	15	3.45
600	2	2.56
600	3	2.88
600	15	3.65

**Πίνακας 8:** Παράθυρα μνήμης δειγμάτων που κατασκευάστηκαν με αριθμό παλμών laser από 3 έως 15 και ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας κάθε παλμού από 500mJ/cm<sup>2</sup> έως 600mJ/cm<sup>2</sup> με οξείδιο φραγής το Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Οι μονωτικές ιδιότητες των οξειδίων και οι μηχανισμοί αγωγής του ρεύματος των αντίστοιχων διατάξεων MOS διερευνήθηκαν μέσω μετρήσεων ρεύματος-τάσης (I-V). Τα τυπικά χαρακτηριστικά των καμπυλών I-V παρουσιάζονται στην εικόνα 93, για την διάταξη που παρουσιάστηκε στις μετρήσεις C-V της εικόνας 78. Ο μηχανισμός αγωγιμότητας του ρεύματος των διατάξεων που περιείχαν νανοκρυστάλλους ήταν κυρίως όγκου από φορείς φορτίου που εισάγονται από την πάνω επαφή και αποδόθηκε στην πολυκρυσταλλική φύση του στρώματος Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [99,104]. Εδώ, πρέπει να υπογραμμιστεί ότι το Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> δεν ανοπτήθηκε μετά την εναπόθεση, καθώς ο κύριος στόχος αυτής της εργασίας ήταν να μελετηθούν οι νανοκρυστάλλοι χρυσού που παράγονται μετά από ανόπτηση με laser, πριν από οποιοδήποτε επιπλέον στάδιο ανόπτησης.

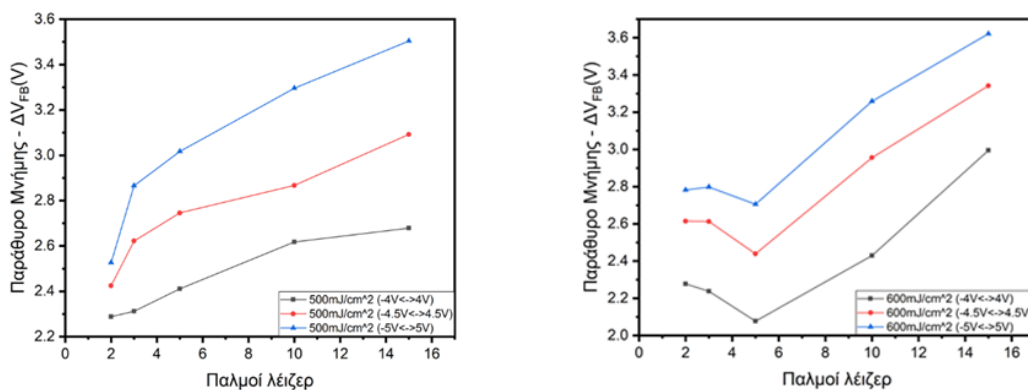
Στη γραφική παράσταση της εικόνας 93 έχουμε τις καμπύλες I-V για δίοδο με Au NCs και χωρίς Au-NCs-layer. Οι μετρήσεις έγιναν από 0V σε -5V και μετά από 0V σε 5V για το κάθε δείγμα. Το ρεύμα διαρροής είναι μικρό και αυξάνεται λίγο στο δείγμα με Au NCs, λόγω της προσθήκης των νανοκρυστάλλων, στο δείγμα χωρίς το υμένιο Au.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 93 οι διατάξεις που έχουν υποστεί ανόπτηση με laser παρουσιάζουν μια σαφή αρνητική μετατόπιση της V<sub>g</sub> (σε σύγκριση με τις διατάξεις ελέγχου) η οποία οφείλεται στους θετικά φορτισμένους νανοκρυστάλλους, καθώς οι διατάξεις αρχικά φορτίζονται αρνητικά (αντιστροφή).



Εικόνα 93: Γραφική παράσταση τάσης-ρεύματος της διάταξης MOS με και χωρίς νανοκρυστάλλους χρυσού.

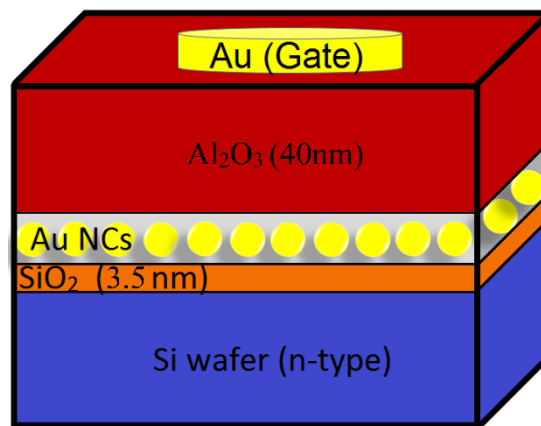
Στην εικόνα 94 παρουσιάζεται η μεταβολή του παραθύρου μνήμης συναρτήσει του αριθμού των παλμών Laser σε σταθερή ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας  $500\text{mJ}/\text{cm}^2$  και  $600\text{mJ}/\text{cm}^2$ , αντίστοιχα. Οι γραφικές παραστάσεις δείχνουν μια αυξητική τάση του παραθύρου μνήμης με την αύξηση του αριθμού των παλμών, ο αριθμός των παλμών βελτιώνει το παράθυρο μνήμης (σε κάποιες ακτινοβολούμενες ενέργειες ανά μονάδα επιφάνειας, αρχικά η αύξηση των παλμών μπορεί να χειροτερεύει το παράθυρο μνήμης, εξαρτάται από το τι νανοκρυστάλλους δημιουργούμε, αν υπάρχουν μεγάλοι νανοκρυστάλλοι επηρεάζουν αρνητικά. Για παράδειγμα στην εικόνα 94 αριστερά είναι έντονο το φαινόμενο της μείωσης του παραθύρου μνήμης με την αύξηση του αριθμού των παλμών Laser πάνω από δυο, έχοντας ελάχιστο στους 5 παλμούς), η αύξηση της ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας σε γενικές γραμμές μεγαλώνει το παράθυρο μνήμης.



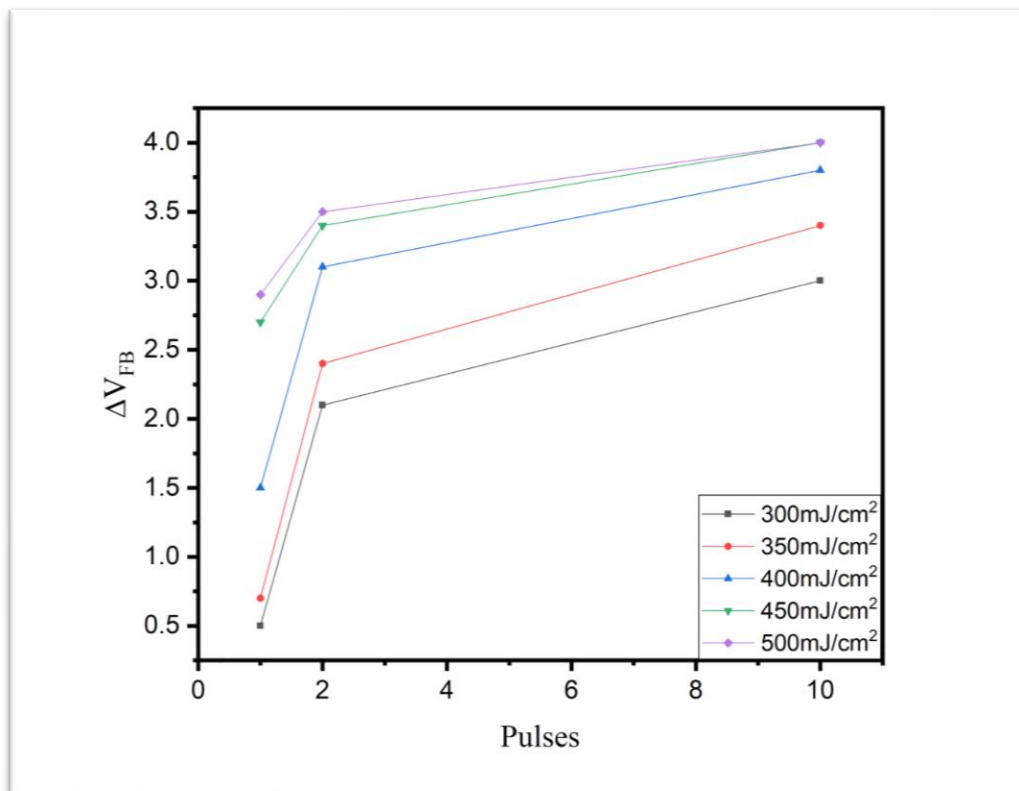
Εικόνα 94: Γραφικές παραστάσεις παραθύρου μνήμης συναρτήσει του αριθμού των παλμών Laser σε σταθερή ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας, αριστερά σε  $500\text{mJ}/\text{cm}^2$  και δεξιά σε  $600\text{mJ}/\text{cm}^2$ , για απόπτωση στρώματος Au αρχικού πάχους  $5\text{nm}$ .

#### 4.4.2 Με οξείδιο φραγής το $\text{Al}_2\text{O}_3$

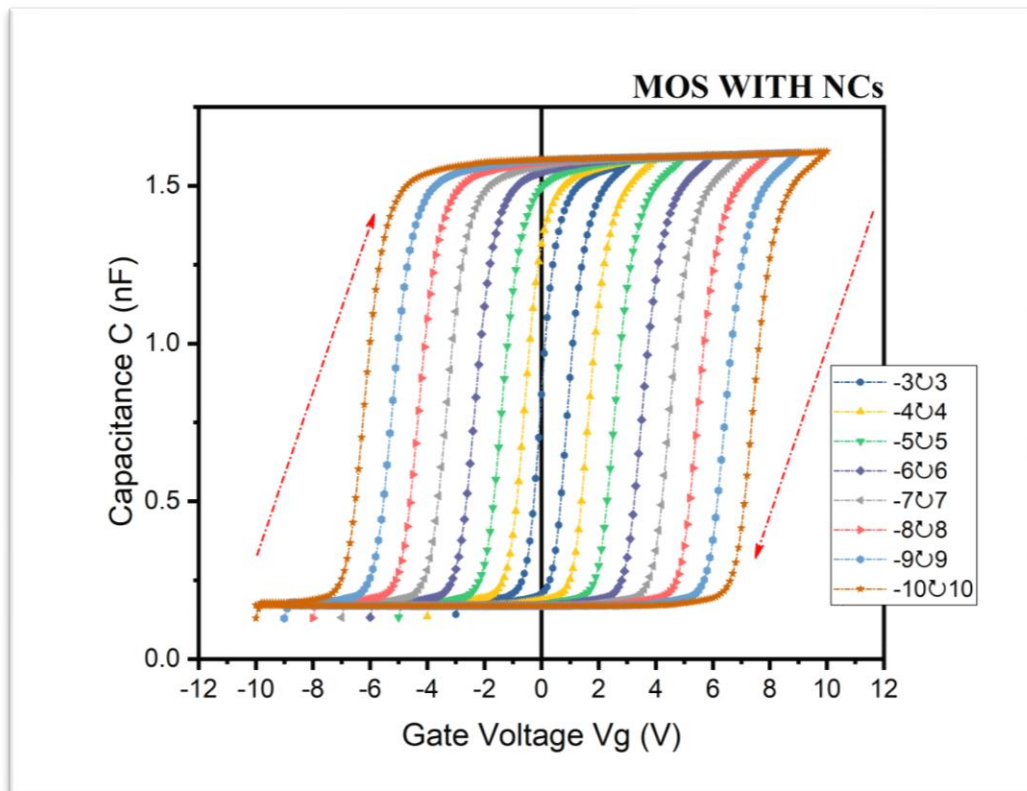
Τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών μετρήσεων του παραθύρου μνήμης σε συνάρτηση με τους παλμούς laser διαφορετικής ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας, σε διατάξεις που έχουν τη δομή n-Si(100)/ $\text{SiO}_2$ /Au (NCs)/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  (εικόνα 95, δείγμα LKSW18), φαίνονται στην εικόνα 96 όπου παρατηρείτε αύξηση του παραθύρου μνήμης συναρτήσει του αριθμού παλμών και συναρτήσει της ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας, για πάχος αρχικού στρώματος Au 3.18nm.



Εικόνα 95: Δομή κυψελίδας μνήμης με νανοκρυστάλλους με οξείδιο φραγής  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .



Εικόνα 96: Γραφική παράσταση παραθύρου μνήμης συναρτήσει του αριθμού παλμών για διαφορετική ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας για ανόπτηση στρώματος Au αρχικού πάχους 3.18nm.



**Εικόνα 97:** Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser με ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας κάθε παλμού  $300\text{mJ}/\text{cm}^2$  και 6 παλμούς.

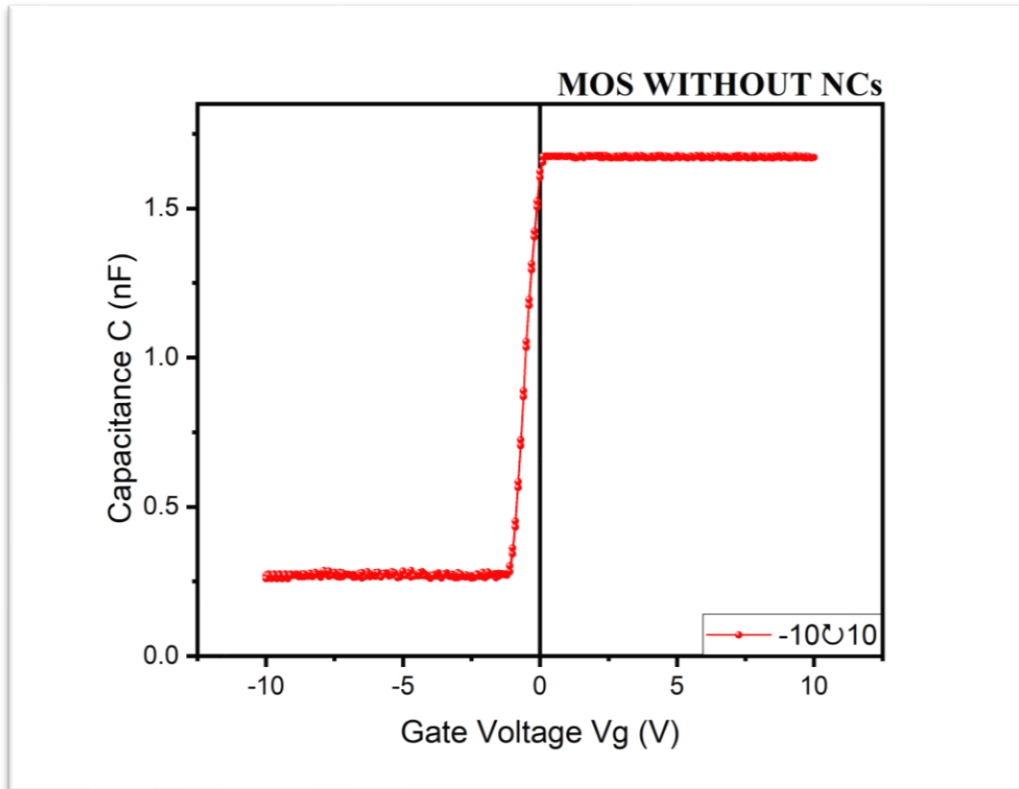
Τα αποτελέσματα ηλεκτρικών μετρήσεων χωρητικότητας-τάσης σε διατάξεις που έχουν τη δομή n-Si(100)/SiO<sub>2</sub>/Au (NCs)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (δείγμα LKSW17), στα 100kHz, φαίνονται στην εικόνα 97, που είναι διατάξεις MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού και στην εικόνα 98 χωρίς νανοκρυστάλλους χρυσού (χωρίς να υπάρχει καθόλου μέταλλο μεταξύ των οξειδίων φραγμού και σήραγγας), που είναι το δείγμα αναφοράς. Όσον αφορά τα δείγματα που περιέχουν νανοκρυστάλλους, τα χαρακτηριστικά των καμπυλών C-V δείχνουν ένα παράθυρο υστέρησης (μνήμης) κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού, το οποίο διευρύνεται σε υψηλότερες εφαρμοζόμενες τάσεις. Η παγίδευση των φορτίων στους μεταλλικούς νανοκρυστάλλους και οι υψηλότερες εφαρμοζόμενες τάσεις στη πύλη (μεγάλη ροή φορτίων στους νανοκρυστάλλους) οδηγούν σε μεγαλύτερη φόρτιση των νανοκρυστάλλων, γεγονός που οδηγεί σε ευρύτερους βρόχους υστέρησης. Οι διατάξεις ελέγχου χωρίς νανοκρυστάλλους που παρουσιάζονται στην εικόνα 98 δεν έδειξαν καθόλου βρόχο υστέρησης, πράγμα που αποτελεί σαφή ένδειξη ότι τα στρώματα οξειδίων είναι απαλλαγμένα από τυχόν φορτία που μπορούν να εισαχθούν κατά την κατασκευή τους στις διεπιφάνειες ή στο εσωτερικό τους. Επομένως, το παράθυρο μνήμης που παρατηρείται στις διατάξεις που περιέχουν νανοκρυστάλλους χρυσού μπορεί να συσχετιστεί μόνο με την παρουσία των νανοκρυστάλλων.

Η διηλεκτρική σταθερά (K) του Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> υπολογίστηκε από τη γραφική παράσταση της εικόνας 98 ότι είναι σχεδόν 9.1, η οποία είναι κοντά στις τιμές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία [101] για υμένα κατασκευασμένα με την τεχνική ALD.

Από την εικόνα 97 βλέπουμε ότι η αντικατάσταση του Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> με Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> έχει επιφέρει διεύρυνση του παραθύρου μνήμης που έφτασε τα 13.7V, με δυνατότητα εφαρμογής μεγαλύτερου εύρους τάσεων από -10V έως +10V δυνατότητα αποθήκευσης μεγαλύτερου φορτίου λόγω του μικρότερου ρεύματος διαρροής προς την πύλη, που προσφέρει το οξειδίο φραγής.

Από μια σχέση αντίστοιχης της 39, αντικαθιστώντας το  $Y_2O_3$  με  $Al_2O_3$ , το πάχος του οξειδίου του αλουμινίου υπολογίζεται να είναι 28.8nm που είναι πάρα πολύ κοντά στην αναμενόμενη τιμή (30nm).

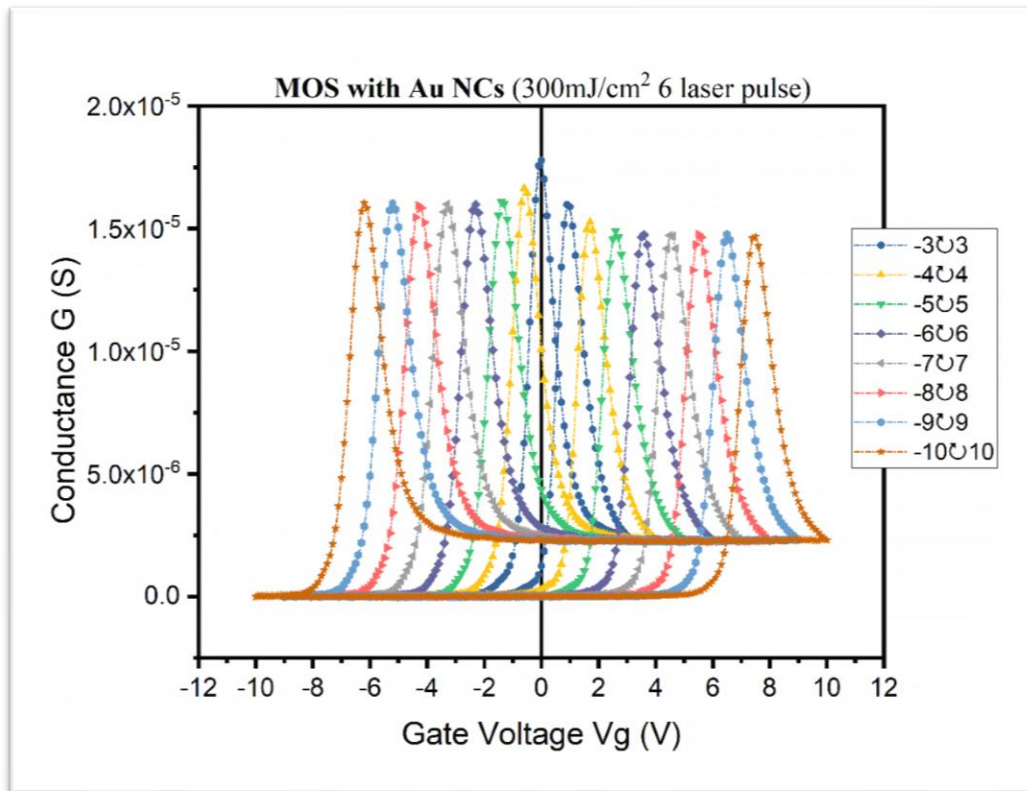
Η τάση επίπεδης ζώνης από τη σχέση 31 για  $\Phi_{Al}=4.1eV$  είναι -0.14V [103]. Όπως φαίνεται στην εικόνα 98 (η οποία επιλέχθηκε ως τυπική διάταξη αναφοράς) η τάση επίπεδης ζώνης των διατάξεων ελέγχου είναι ίση με -0.1V και συμφωνεί με τη διαφορά έργων εξόδου μετάλλου-ημιαγωγού Al/n-Si [102].



Εικόνα 98: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας δείγματος MOS χωρίς νανοκρυστάλλους χρυσού.

Στην εικόνα 99 φαίνεται η καμπύλη ηλεκτρικής αγωγιμότητας-τάσης διάταξης MOS όπου οι νανοκρυστάλλοι έχουν κατασκευαστεί με 6 παλμούς laser, που η ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας κάθε παλμού είναι  $300mJ/cm^2$ . Η ηλεκτρική αγωγιμότητα παραμένει σε χαμηλά επίπεδα ακόμα και στις ακραίες καταστάσεις φόρτισης.

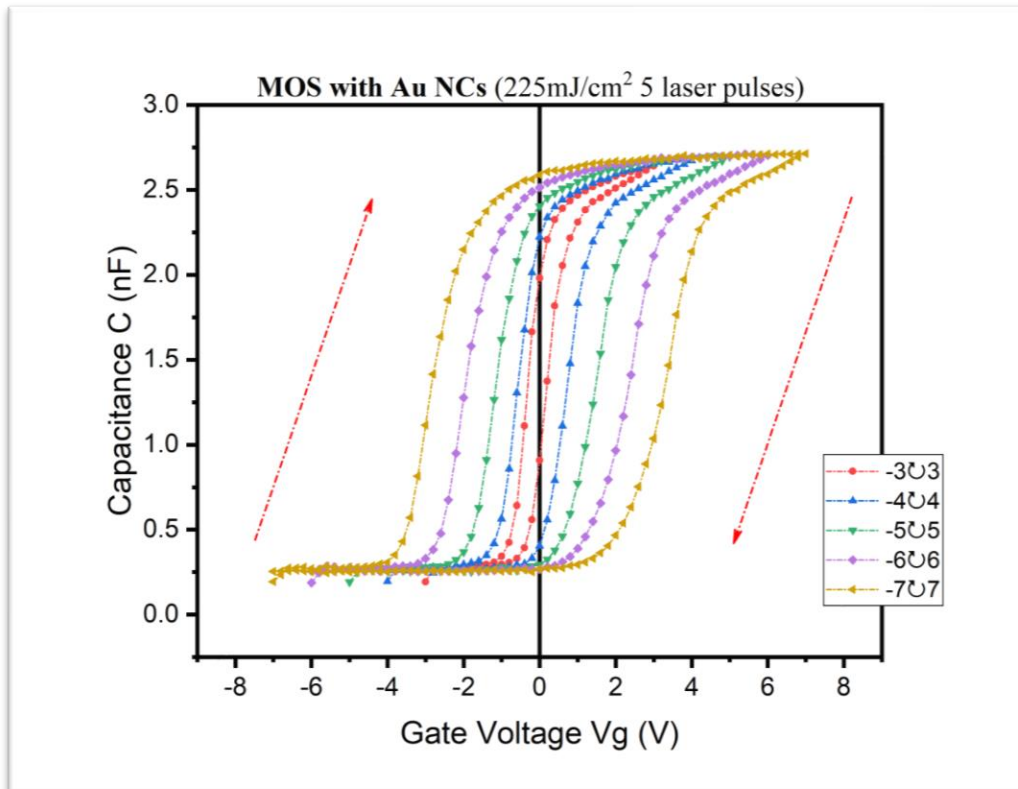




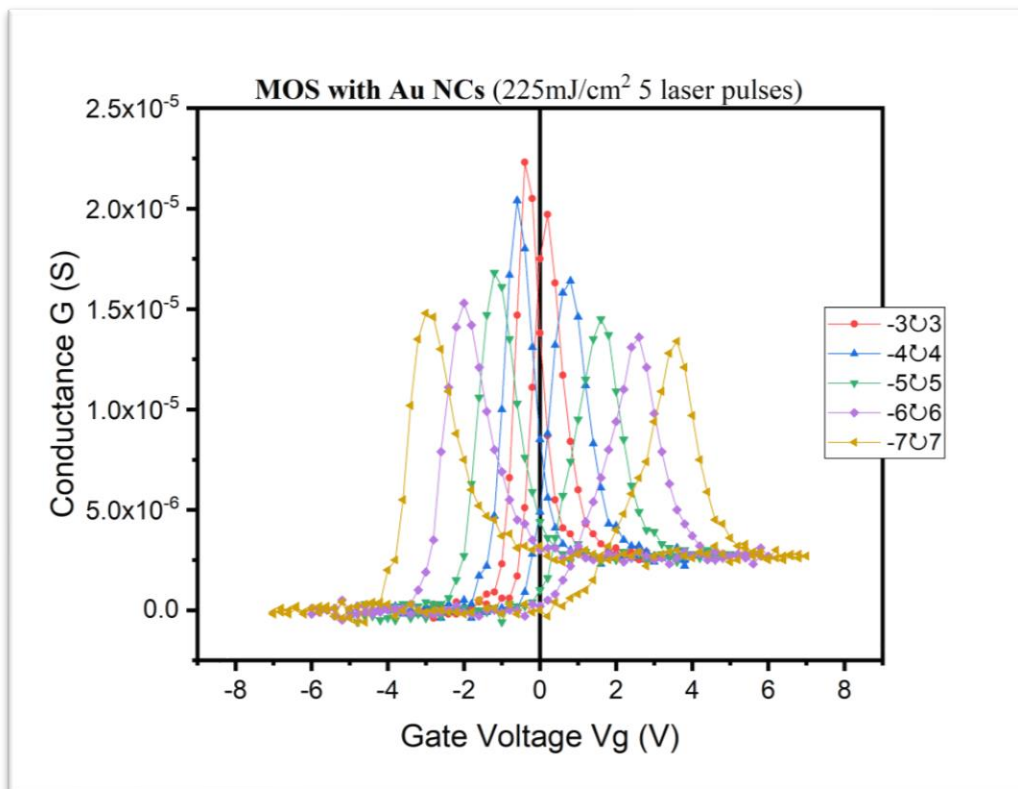
Εικόνα 99: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικά γραφήματα χωρητικότητας-τάσης (εικόνες 100, 102, 104, 106, 108, 110, 112, 114, 116, 118) που δείχνουν τους βρόχους υστέρησης των κατασκευασμένων δομών. Επίσης παρουσιάζονται γραφικές παραστάσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας-τάσης (εικόνες 101, 103, 105, 107, 109, 111, 113, 115, 117, 119) όπου παρατηρείτε μια διατήρηση της αγωγιμότητας σε χαμηλά επίπεδα κατά τη διάρκεια των κύκλων φόρτισης. Από τα αποτελέσματα αναδεικνύεται η βελτίωση που επέφερε η αλλαγή του οξειδίου φραγής  $Y_2O_3$  με  $Al_2O_3$ . Στο δείγμα που παρουσιάζεται στην εικόνα 113 φαίνεται ότι η αγωγιμότητα αρχίζει να επηρεάζεται, με αύξηση της, στον κύκλο φόρτισης από  $-6V$  σε  $6V$  και πίσω. Το γεγονός αυτό είναι μια ένδειξη κακής λειτουργίας, που οδηγεί σε υψηλή διαρροή ρεύματος σε περεταίρω μικρή αύξηση της θετικής τάσης.

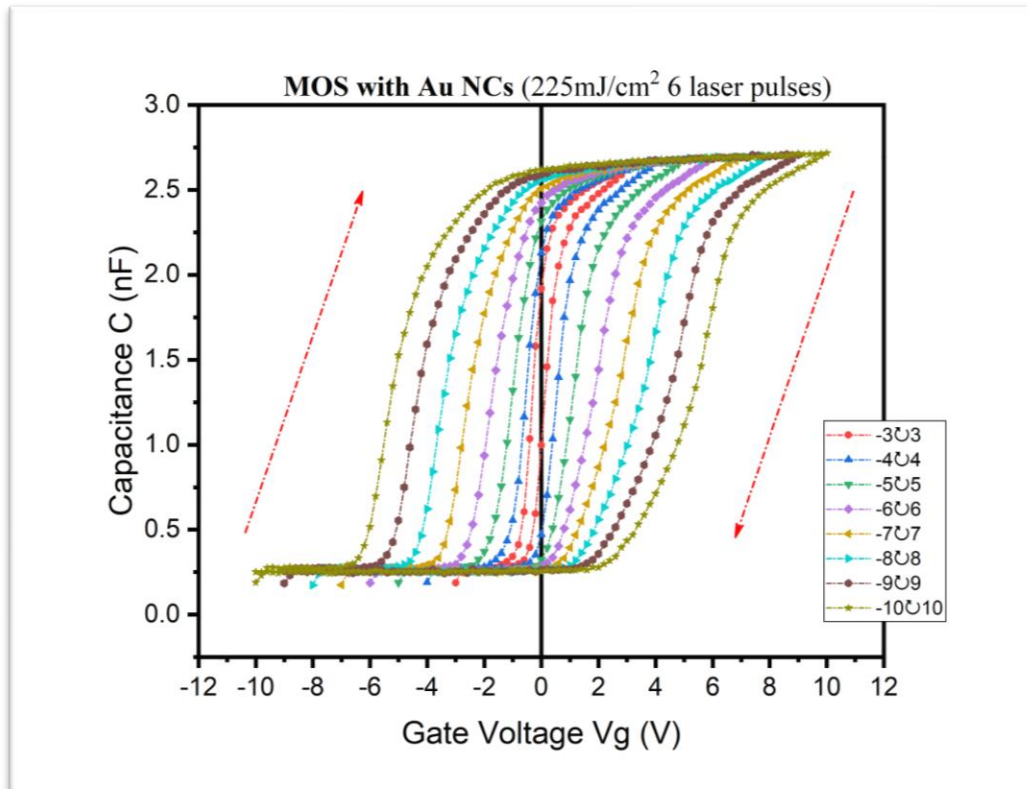
Στην εικόνα 106 βλέπουμε ότι σε ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας  $300mJ/cm^2$  με 1 παλμό laser παρατηρείται παρόμοια εικόνα με της εικόνας 97, που η μονή διαφορά έγκειται στον αριθμό παλμών που σε αυτή τη περίπτωση είναι 6 οι παλμοί laser που έχουν εφαρμοστεί. Από τη σύγκριση των καμπυλών χωρητικότητας-τάσης το παράθυρο μνήμης με 1 παλμό έφτασε τα  $12.8V$ , με εφαρμογή μεγαλύτερου εύρους τάσεων από  $-11V$  έως  $+11V$ , το ότι μετρήθηκε παράθυρο μνήμης σε τόσο υψηλό εύρος τάσεων οφείλετε στο μικρότερο ρεύμα διαρροής που προσφέρει το οξείδιο φραγής, ενώ με 6 παλμούς το παράθυρο μνήμης φτάνει τα  $13.7V$ .



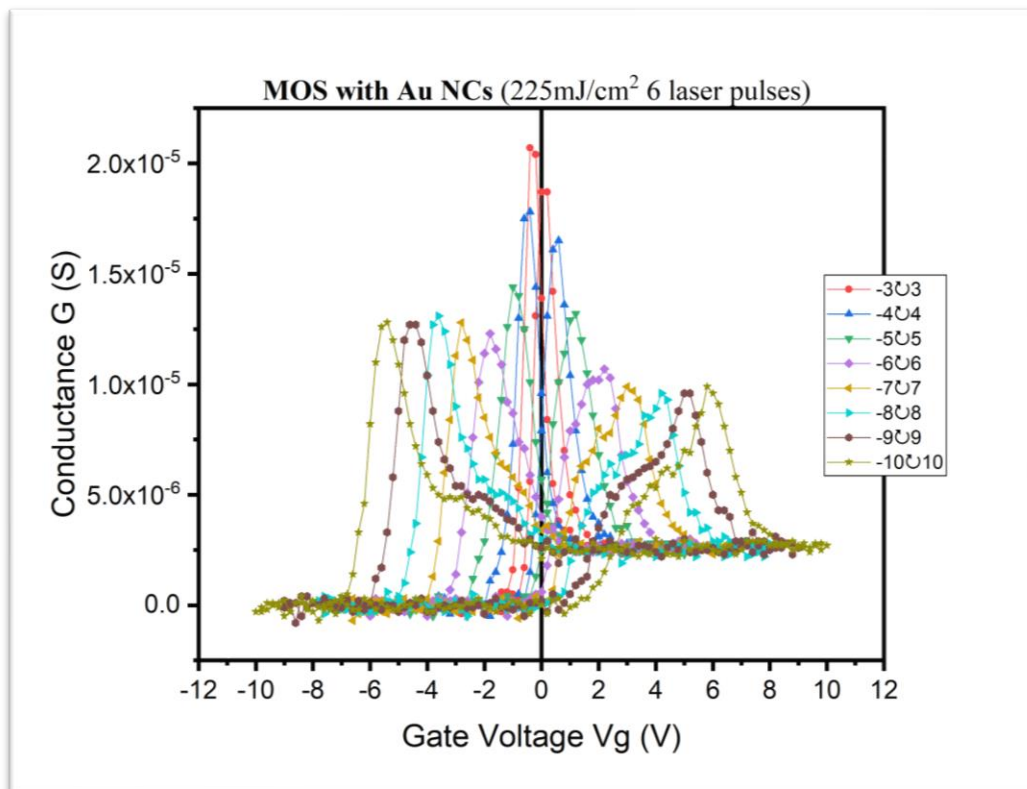
Εικόνα 100: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF.



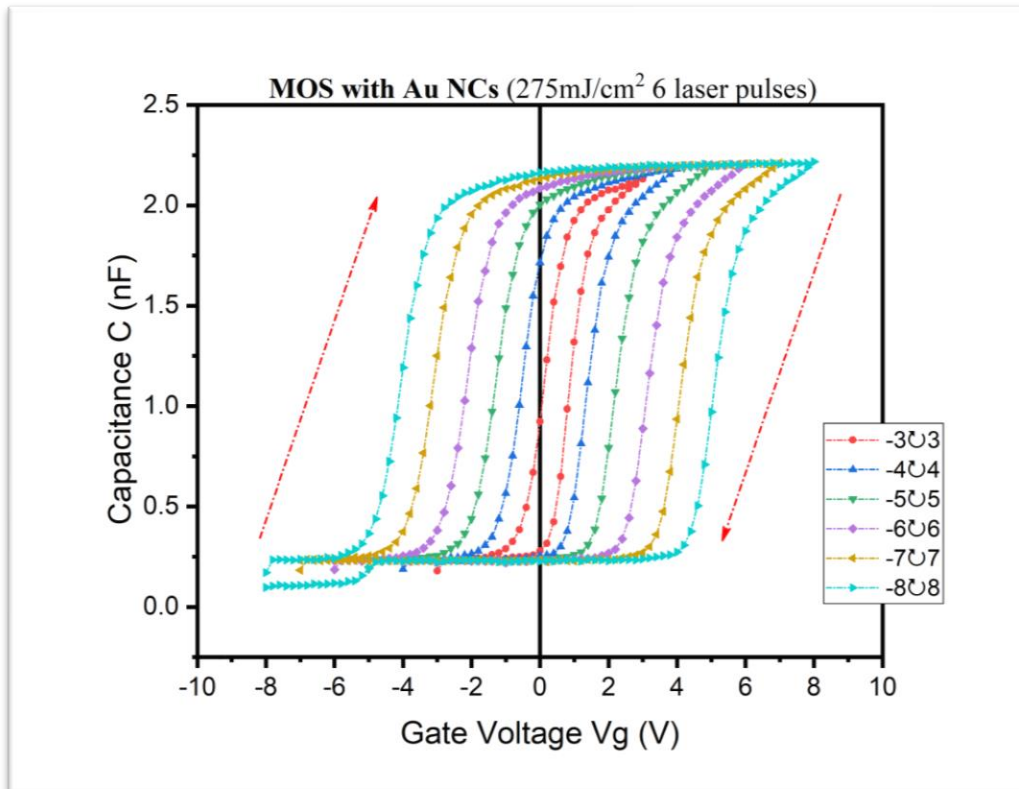
Εικόνα 101: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.



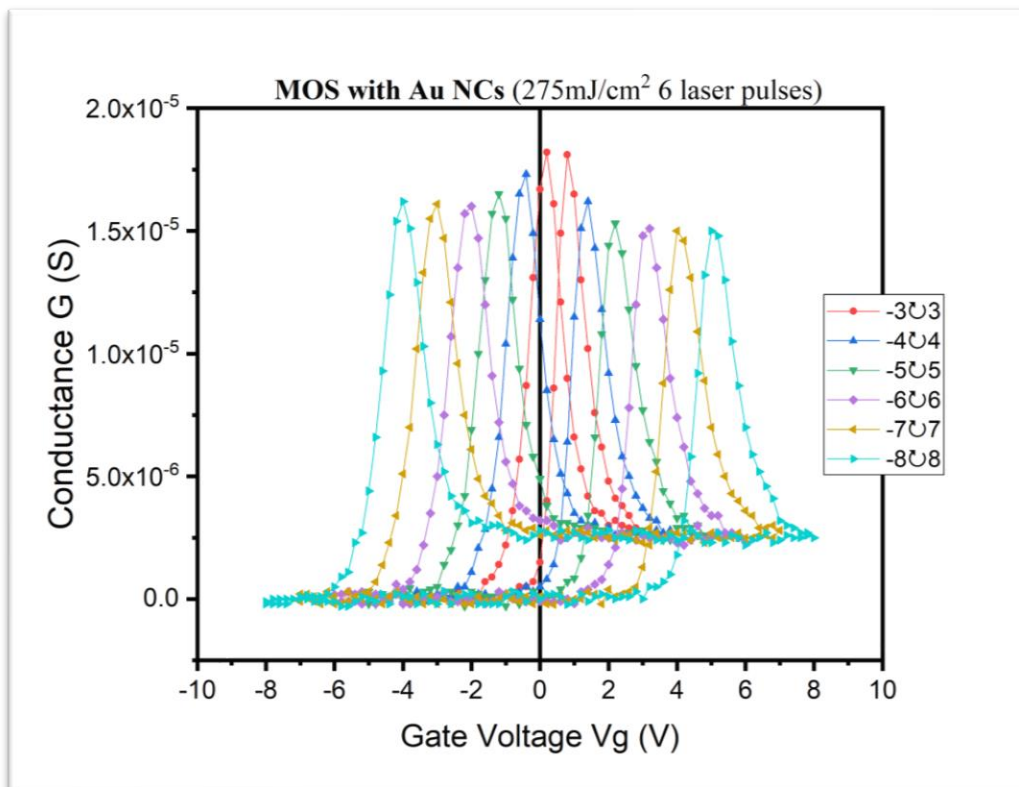
Εικόνα 102: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.



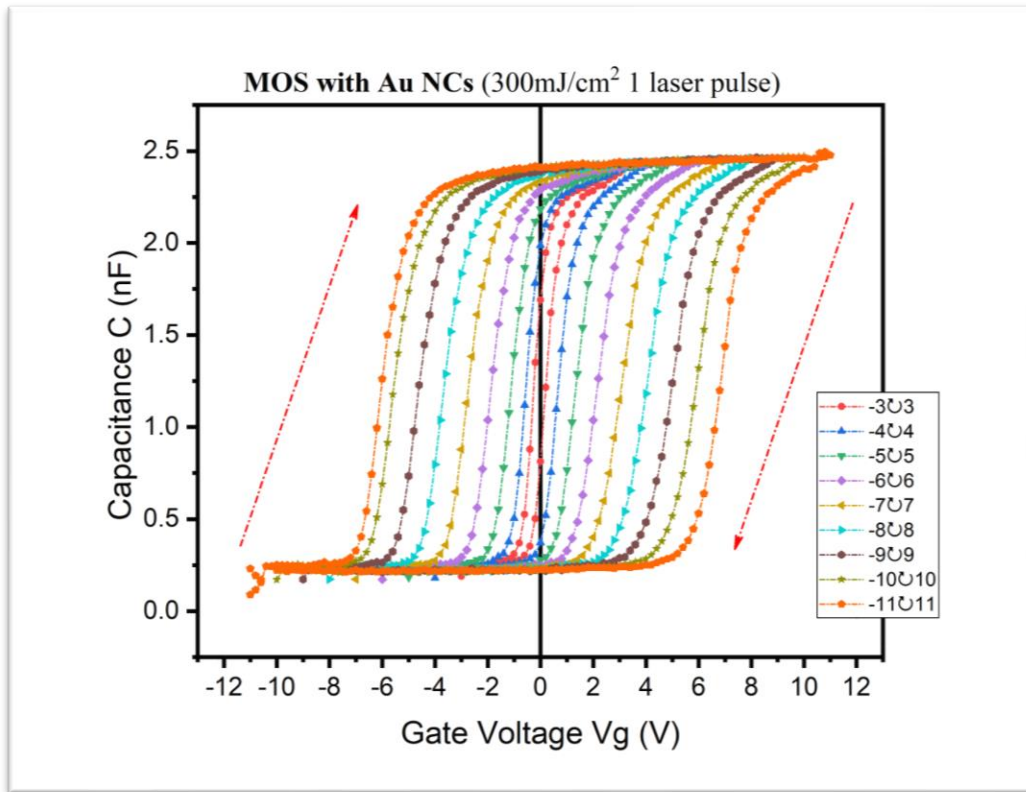
Εικόνα 103: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.



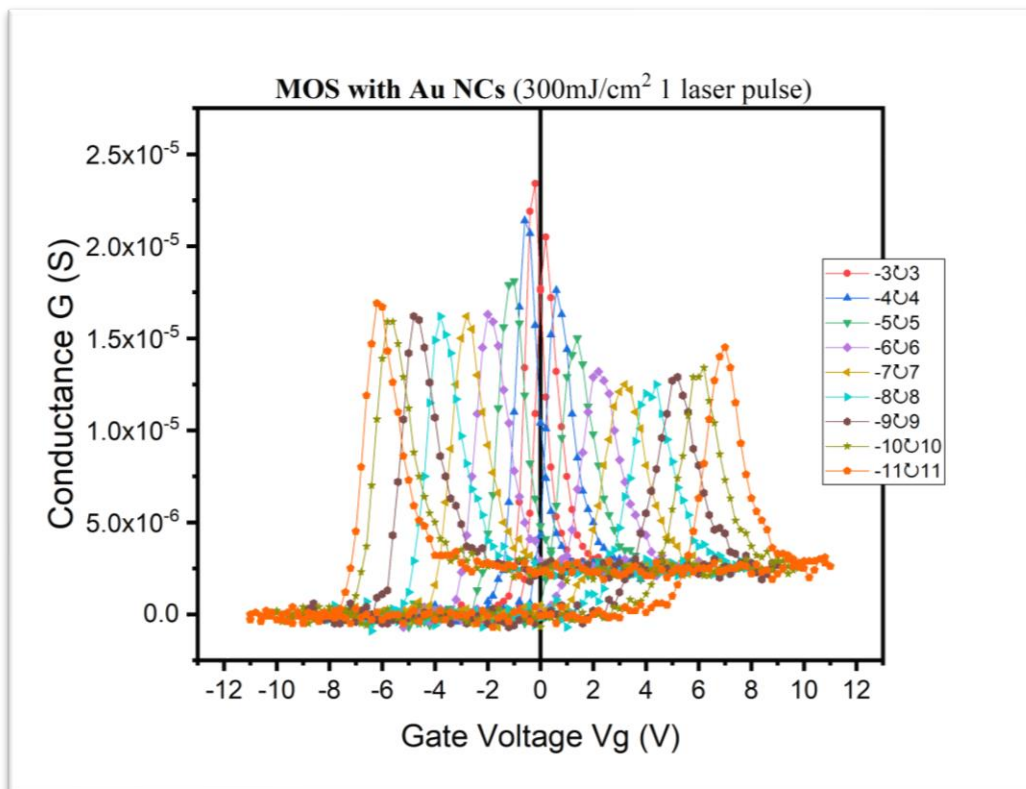
Εικόνα 104: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.



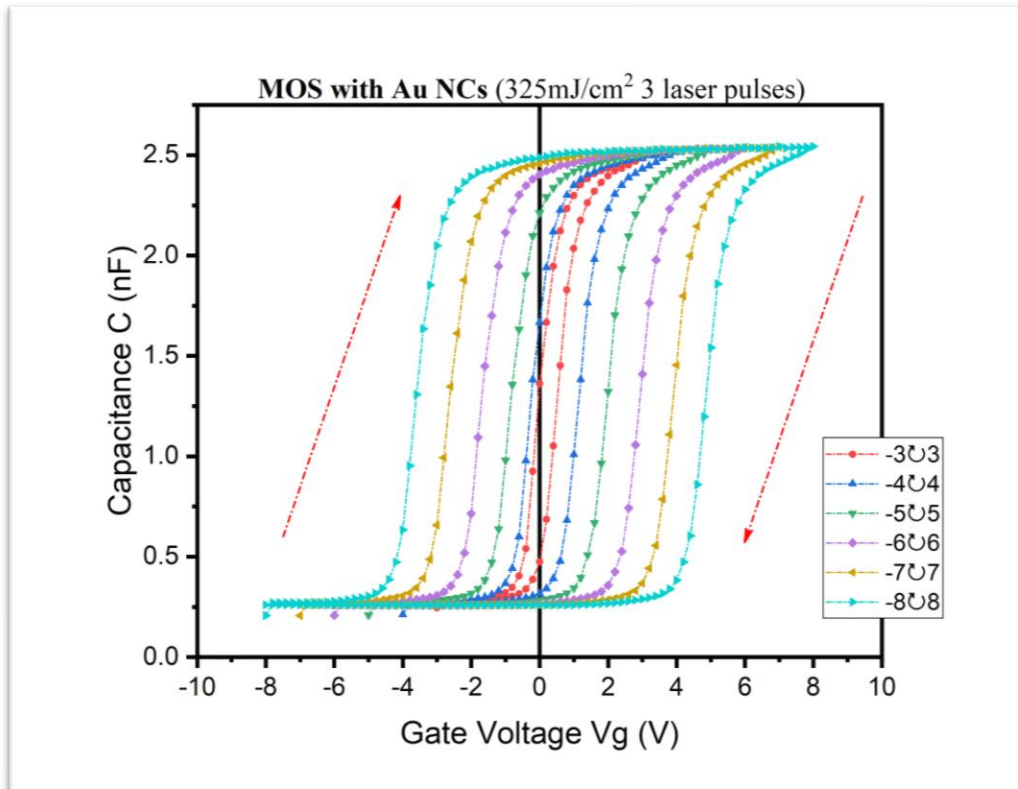
Εικόνα 105: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.



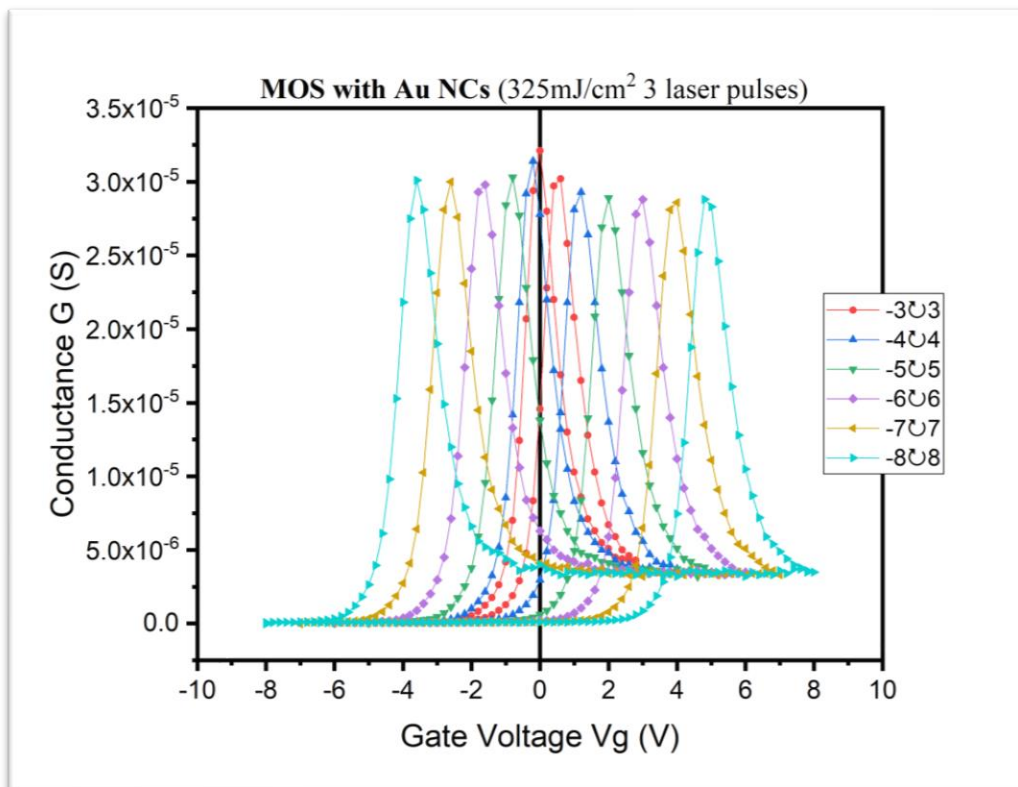
Εικόνα 106: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.



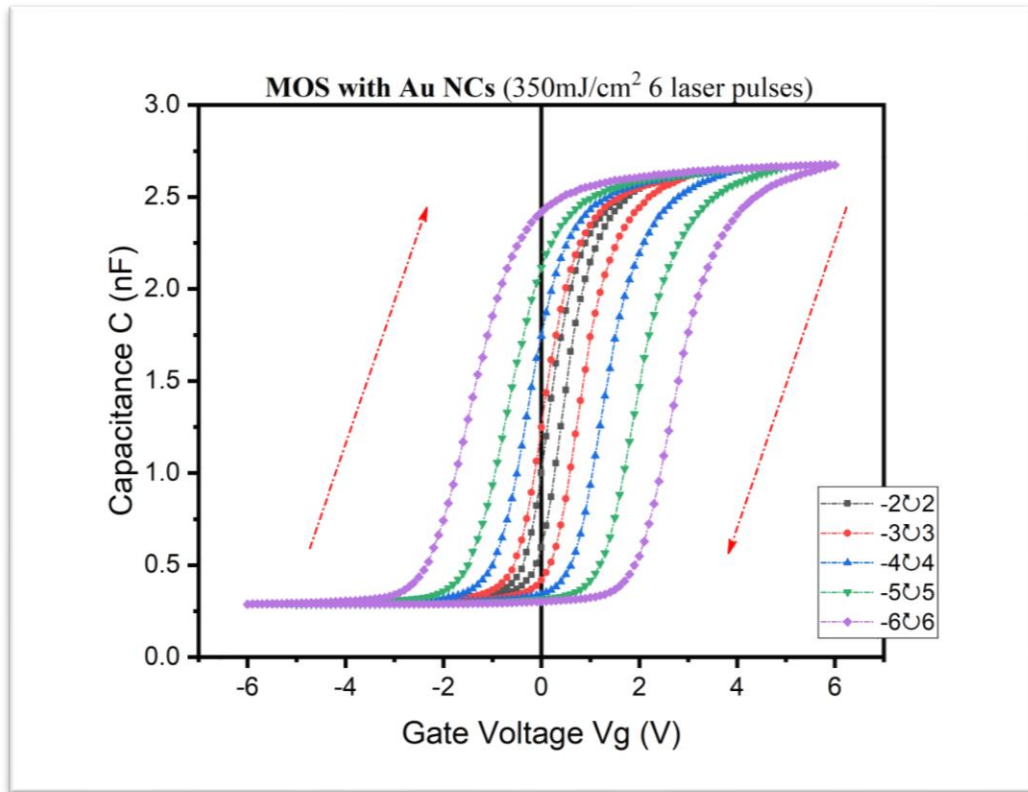
Εικόνα 107: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.



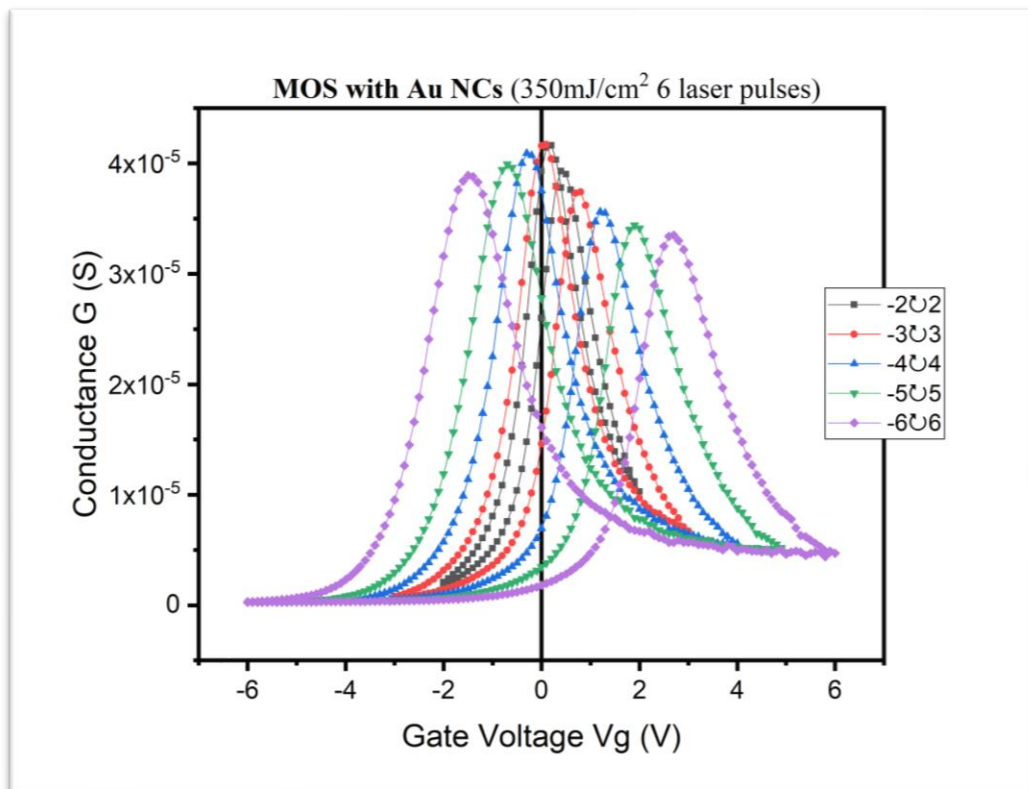
Εικόνα 108: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.



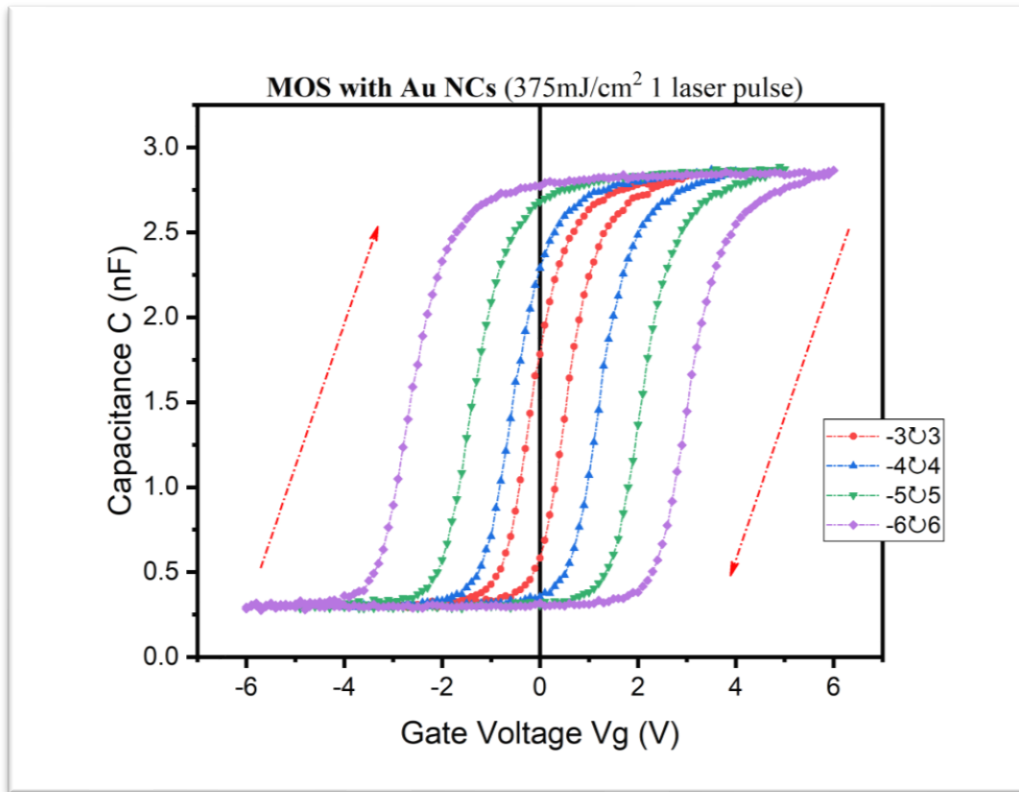
Εικόνα 109: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.



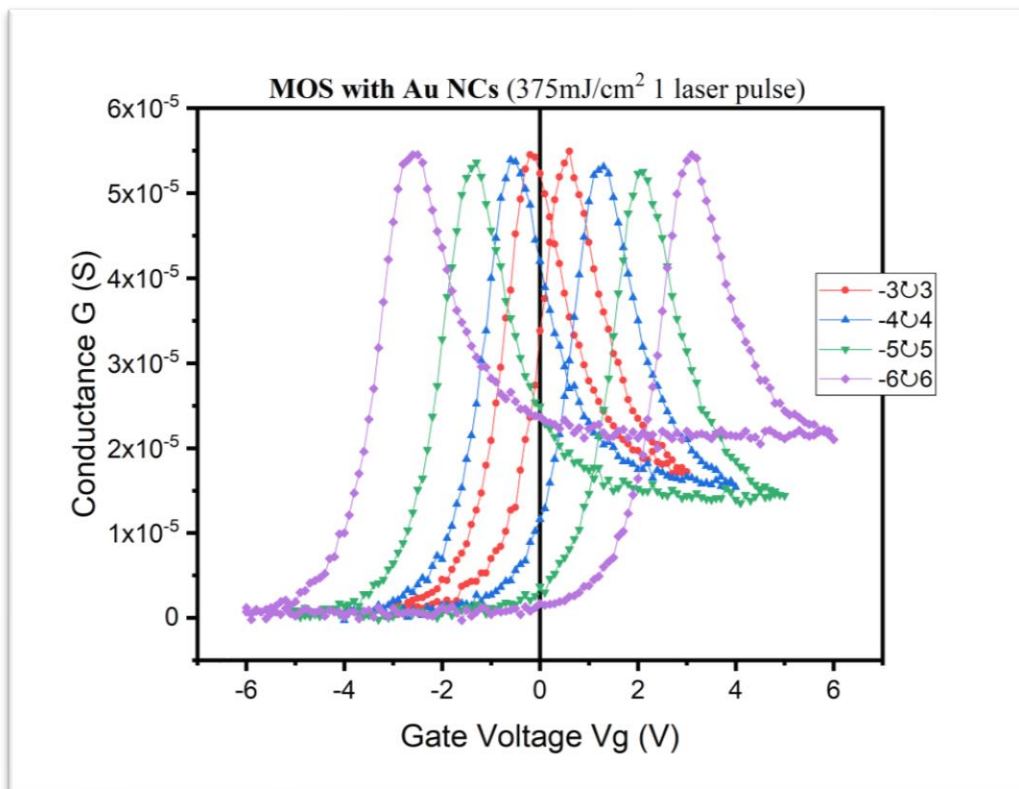
Εικόνα 110: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.



Εικόνα 111: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.

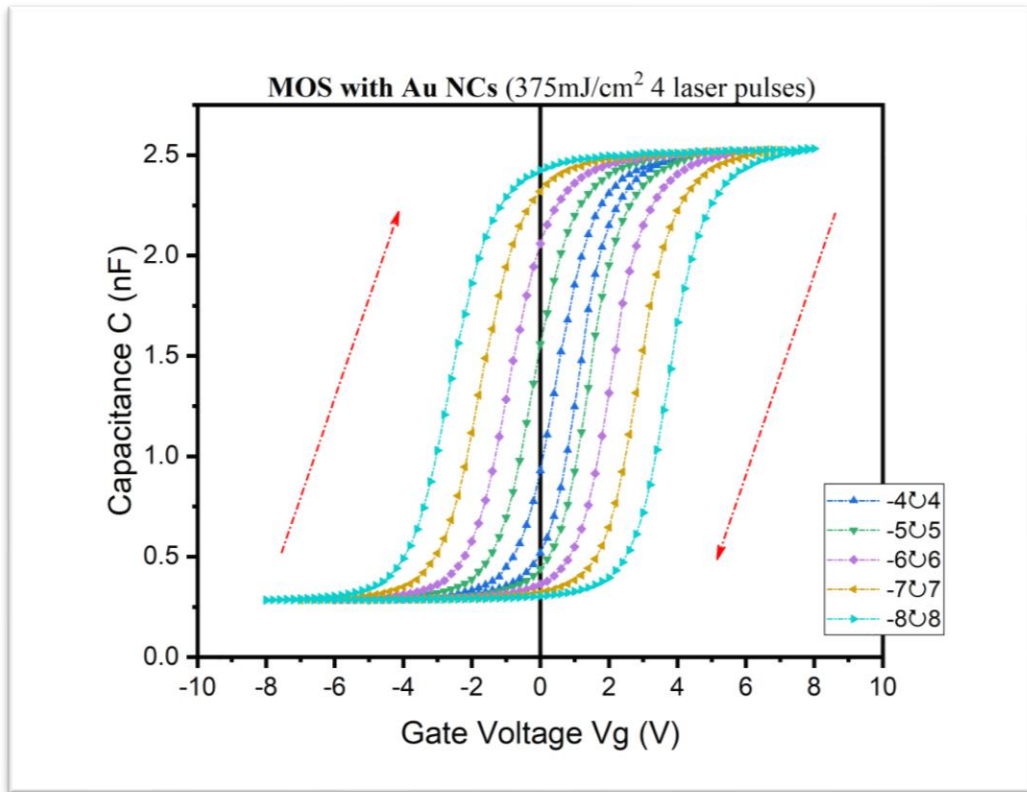


Εικόνα 112: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.

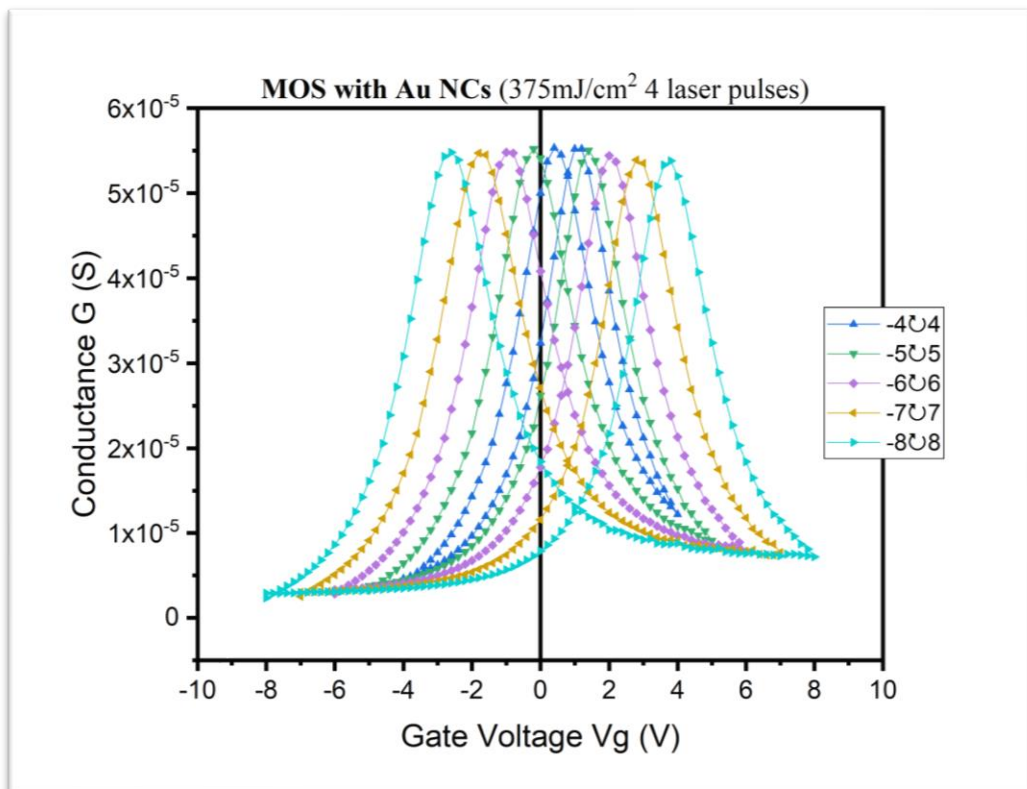


Εικόνα 113: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.

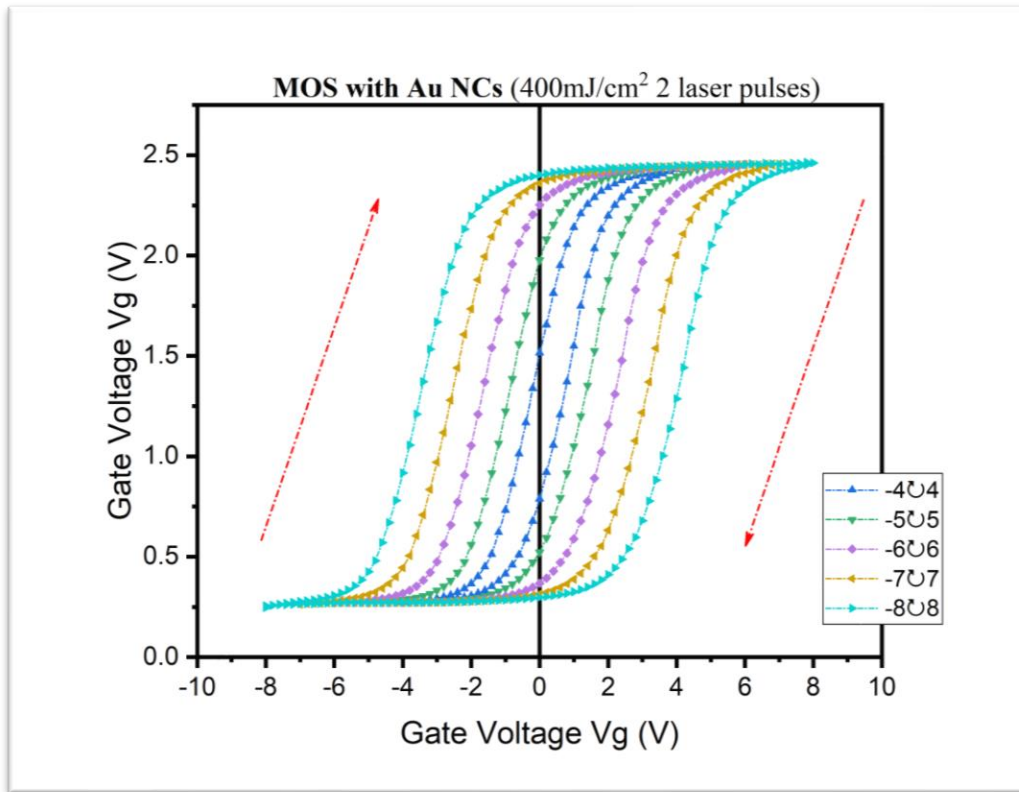




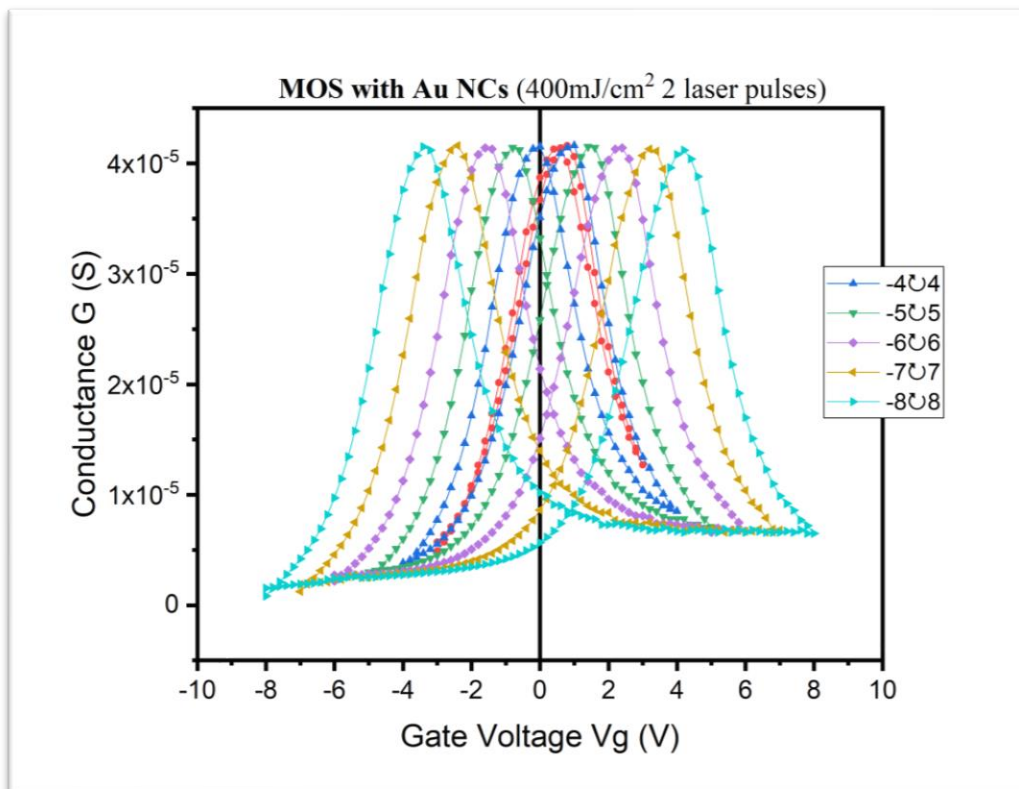
Εικόνα 114: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.



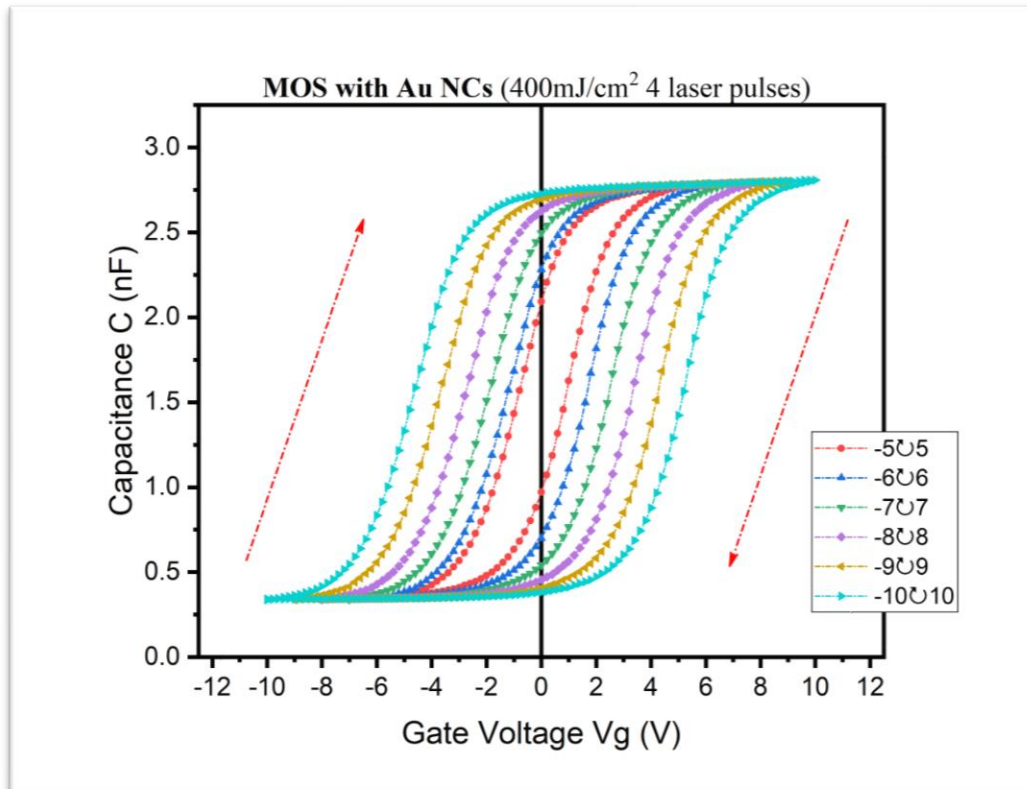
Εικόνα 115: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.



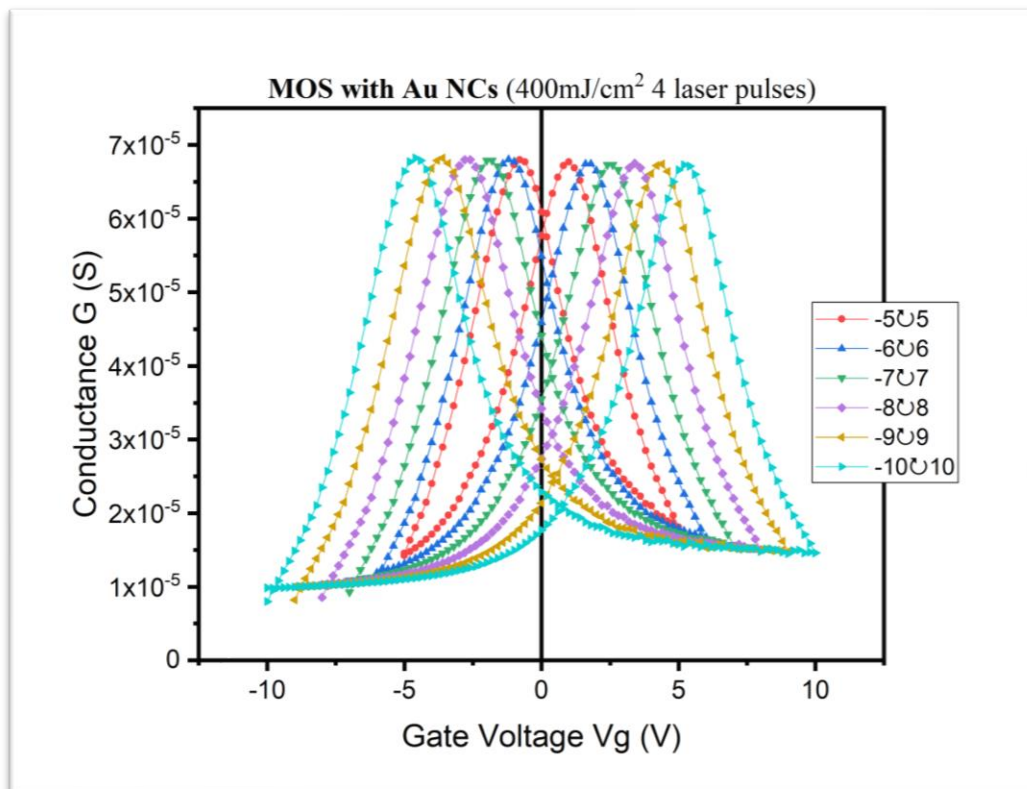
Εικόνα 116: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.



Εικόνα 117: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.



Εικόνα 118: Γραφική παράσταση τάσης-χωρητικότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.



Εικόνα 119: Γραφική παράσταση τάσης-ηλεκτρικής αγωγιμότητας διάταξης MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού κατασκευασμένους με KrF laser.

Στον πίνακα 9 παρουσιάζεται μια συγκριτική εικόνα των δειγμάτων που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες γραφικές παραστάσεις χωρητικότητας-τάσης που εστιάζει στην μεταβολή του παραθύρου μνήμης με το εύρος των εφαρμοζόμενων τάσεων

καθώς και στο μέγιστο παράθυρο μνήμης που επετεύχθη. Από τον πίνακα φαίνεται ότι βέλτιστο παράθυρο 13.7V επετεύχθη για ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας 300mJ/cm<sup>2</sup> και 6 παλμούς laser.

Δείγμα		Μέγιστο παράθυρο μνήμης (V)	Παράθυρο μνήμης σε loop από -5V σε +5V (V)
Ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας (mJ/cm <sup>2</sup> )	Παλμοί του laser		
225	5	6.04	2.57
225	6	10.31	2.10
275	6	9.21	3.57
300	1	12.77	2.45
300	6	13.65	3.98
325	3	8.46	2.83
350	6	4.19	2.65
375	1	5.68	3.46
375	4	6.43	1.66
400	2	7.49	2.22
400	4	9.92	1.87

Πίνακας 9: Παράθυρα μνήμης δειγμάτων που κατασκευάστηκαν με αριθμό παλμών laser από 1 έως 6 και ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας κάθε παλμού από 225mJ/cm<sup>2</sup> έως 450mJ/cm<sup>2</sup> με οξείδιο φραγής το Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

#### 4.4.3 Συμπεράσματα από τις μετρήσεις χωρητικότητας-τάσης για μνήμες με οξείδιο φραγής το Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και το Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Από την συνολική εικόνα των δειγμάτων που κατασκευάστηκαν με αριθμό παλμών laser από 1 έως 6 και ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας κάθε παλμού από 150mJ/cm<sup>2</sup> έως 450mJ/cm<sup>2</sup> με οξείδιο φραγής το Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε σύγκριση με τα δείγματα που κατασκευάστηκαν με αριθμό παλμών laser από 1 έως 15 και ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας κάθε παλμού από 200mJ/cm<sup>2</sup> έως 600mJ/cm<sup>2</sup> με οξείδιο φραγής το Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> διαπιστώθηκε ότι, η αντικατάσταση του Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> με Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> βελτίωσε την ηλεκτρική συμπεριφορά των διατάξεων μνήμης, επιτρέποντας την εφαρμογή υψηλότερων (κατά απόλυτη τιμή) τάσεων, χωρίς να παρουσιάζεται διαρροή φορτίου προς τις επαφές και πιο συγκεκριμένα την πάνω επαφή. Όπως φαίνεται στους πίνακες 8 και 9 σε δείγμα με οξείδιο φραγής το Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> έχει επιτευχθεί μεγαλύτερο παράθυρο μνήμης περίπου 14V ενώ σε δείγμα με οξείδιο φραγής το Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> έχει επιτευχθεί μέγιστο παράθυρο μνήμης περίπου 4V.

Η διαφορά στο μέγιστο της χωρητικότητας καθώς και κάποιες μικρές διαφορές στα αποτελέσματα των μετρήσεων μπορεί να οφείλονται στις μικρές διαφορές στα πάχη των οξειδίων φραγμού (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), στις διαφορές στις διαστάσεις των διόδων (επιφάνεια πάνω επαφής) και στις διαστάσεις των νανοκρυστάλλων.

## 4.5 Μέτρηση συγκράτησης φορτίου μνημών

### 4.5.1 Εισαγωγή

Η διατήρηση του φορτίου για όσο το δυνατό μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, σε μη πτητικές μνήμες (NVM) αποθήκευσης δεδομένων χωρίς την εφαρμογή τάσης είναι πολύ σημαντική και προτέρημα των μνημών. Τα πειραματικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό, τη σύγκριση και την αξιολόγηση μιας μη πτητικής μνήμης είναι: i) ο ρυθμός απώλειας του αποθηκευμένου φορτίου και ii) ο χρόνος διατήρησης του φορτίου. Η επιτρεπτή απώλεια φορτίου που μπορεί να έχει μια μνήμη σχετίζεται άμεσα με τη λειτουργία της μνήμης. Συγκεκριμένα για να λειτουργεί μια μνήμη, πρέπει να είναι διακριτές οι καταστάσεις εγγραφής και διαγραφής. Μη αναγνώσιμη διαφορά των δυο καταστάσεων καθιστά τη μνήμη μη λειτουργική. Για τις εμπορικές μνήμες υπάρχουν πρότυπα τα οποία πρέπει να πληρούνται και περιλαμβάνουν ελέγχους της συγκράτησης φορτίου με τη θερμοκρασία [105,106]. Η παρουσία ηλεκτρικού πεδίου στο οξειδίο σήραγγας και το οξειδίο ελέγχου οφείλεται στο εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο που παράγεται από τα αποθηκευμένα φορτία. Οι μηχανισμοί εκφόρτισης είναι οι ακόλουθοι: (1) Θερμική αποπαγίδευση ηλεκτρονίων από τα βαθιά φρεάτια δυναμικού μέσα στους νανοκρυστάλλους, (2) σήραγγα F-N, (3) με άμεση σήραγγα ή σήραγγα υποβοηθούμενη από παγίδες, και (4) σήραγγα από νανοκρύσταλλο σε νανοκρύσταλλο. Ειδικότερα η απώλεια του αποθηκευμένου φορτίου χωρίζεται σε δυο είδη [107]: i) Η φυσιολογική αποπαγίδευση των ηλεκτρικών φορέων [107] (σε αυτή την περίπτωση η παγίδευση θα είχε πάρα πολύ μεγάλη διάρκεια γιατί δεν θα υπήρχε κάποιο αίτιο αποπαγίδευσης του φορτίου), καθώς και ii) η ύπαρξη ατελειών στο οξειδίο φραγής ή το οξειδίο σήραγγας, οι ατέλειες μπορεί να είναι διεπιφανειακές ή στον όγκο των οξειδίων [107,108]. Ο χρόνος διατήρησης του φορτίου επηρεάζεται από τον αριθμό των κύκλων φόρτισης εγγραφής/διαγραφής, καθώς και από τη θερμοκρασία, που η αύξηση τους ευνοεί την αποπαγίδευση και την αύξηση των ατελειών, όλα αυτά λαμβάνονται υπόψη στις κατασκευές μνημών και μετρούνται για να επιτευχθούν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά.

Στις μετρήσεις συγκράτησης φορτίου αρχικά μετριέται η καμπύλη fresh. Μετά εφαρμόζεται ένας παλμός θετικής τάσης (τάση εγγραφής -  $V_{write}$ ) για ένα μικρό χρονικό διάστημα, επαναλαμβάνονται μετρήσεις χωρητικότητας σε τακτά χρονικά διαστήματα στην τάση επίπεδης ζώνης στην περιοχή απογύμνωσης (Depletion). Αντίστοιχα το ίδιο γίνεται για την διαγραφή, όπου σε αυτή την διαδικασία εφαρμόζεται ένας αρνητικός παλμός (τάση διαγραφής -  $V_{erase}$ ) πάλι για ένα μικρό χρονικό διάστημα (διάρκεια παλμού = εφαρμογή τάσης εγγραφής ή διαγραφής για ένα χρονικό διάστημα) και επαναλαμβάνονται μετρήσεις χωρητικότητας σε τακτά χρονικά διαστήματα στην τάση επίπεδης ζώνης στην περιοχή απογύμνωσης. Οι τάσεις εγγραφής και διαγραφής βρίσκονται από αντιστοίχιση των μετρούμενων τιμών C σε τιμές V βάση της καμπύλης αναφοράς fresh.

### 4.5.2 Πειραματικά αποτελέσματα διατήρησης του αποθηκευμένου φορτίου σε μνήμες με νανοκρυστάλλους χρυσού με οξειδίο φραγής $Y_2O_3$

Προκειμένου να ελεγχθεί η απόδοση στην συγκράτηση του φορτίου των διατάξεων με νανοκρυστάλλους χρυσού, οι διατάξεις MOS αρχικά υποβλήθηκαν σε τάση +4V για 30s και στην συνέχεια μετρήθηκαν σε τάση επίπεδης ζώνης ( $V_{FB}$ ) μετρώντας την μεταβολή της χωρητικότητας με το χρόνο, σε αυτή την περίπτωση μειώνεται η χωρητικότητα με το χρόνο.

Τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται με σήραγγα από το υπόστρωμα πυριτίου μέσα από το φράγμα SiO<sub>2</sub> και παγιδεύονται στο φρεάτιο δυναμικού των νανοκρυστάλλων χρυσού. Όταν στην διάταξη εφαρμοστεί τάση -4V (αντιστροφή) για 30s, η μείωση της χωρητικότητας με το χρόνο παρακολούθηθηκε στην τάση επίπεδης ζώνης.

Η χωρητικότητα επίπεδης ζώνης (C<sub>FB</sub>) υπολογίζεται από την εξίσωση 32 [48,49,102]. Στη συνέχεια, η τάση επίπεδης ζώνης (V<sub>FB</sub>) μετριέται από τη γραφική παράσταση C-V όπως αυτή που αντιστοιχεί σε χωρητικότητα ίση με C<sub>FB</sub>.

$$C_{FB} = \frac{C_{ox}C_{FBS}}{C_{ox} + C_{FBS}} \quad (32)$$

$$C_s = \frac{\epsilon_s}{L_D} \quad (33)$$

Όπου

C<sub>FB</sub> = Η χωρητικότητα επίπεδης ζώνης (F)

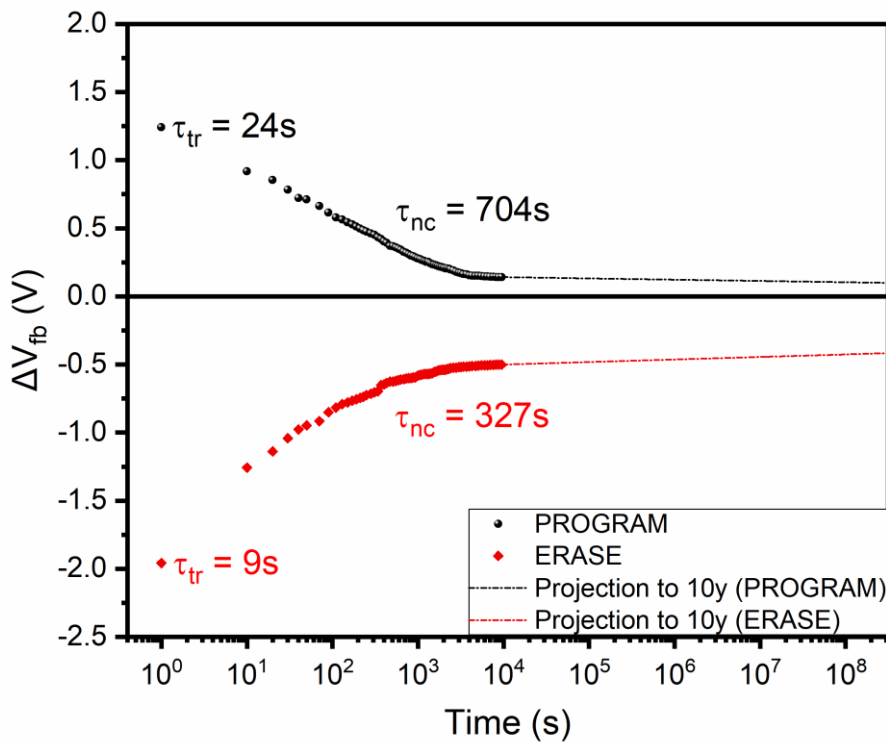
C<sub>ox</sub> = Η χωρητικότητα του οξειδίου (F)

ε<sub>s</sub> = Η διηλεκτρική σταθερά του υλικού υποστρώματος (F/cm)

L<sub>D</sub> = Το μήκος Debye, δίνεται από τον τύπο:  $L_D = \sqrt{\frac{K_B T \epsilon_s}{N_D e^2}}$  (cm)

C<sub>s</sub> = Η χωρητικότητα επίπεδης ζώνης του υποστρώματος Si (F/cm<sup>2</sup>).

Πολλαπλασιάζοντας τη C<sub>s</sub> με το εμβαδόν του πυκνωτή MOS προκύπτει η C<sub>FBS</sub> σε F.



Εικόνα 120: Γραφική παράσταση χρόνου- $\Delta V_{fb}$ . Όπου φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες συγκράτησης φορτίου για διάταξη MOS που περιέχει νανοκρυστάλλους χρυσού, μετά από την ανόπτηση με laser με ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας 500mJ/cm<sup>2</sup> και 3 παλμούς.

Εναλλακτικά, χρησιμοποιήθηκε μια περιοδική εφαρμογή ενός στενού φάσματος τάσεων στην πύλη (πάντα στην περιοχή απογύμνωσης και κοντά στην αναμενόμενη τιμή της  $V_{FB}$ ) προκειμένου να παρακολουθείται η αλλαγή της  $V_{FB}$  με το χρόνο. Και οι δύο μετρήσεις απέδωσαν σχεδόν πανομοιότυπα αποτελέσματα, όσον αφορά τις μετρούμενες χρονικές σταθερές. Στην εικόνα 120 παρουσιάζεται ο χρόνος συγκράτησης μιας δομής πυκνωτή MOS με ενσωματωμένους νανοκρυστάλλους χρυσού, όπου απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά εγγραφής/διαγραφής (P/E). Όπως φαίνεται, μετά από μια χρονική περίοδο, κατά την αρνητική εφαρμογή τάσης, η  $V_{FB}$  του πυκνωτή MOS μειώνεται κατά κάποιο βαθμό, γεγονός που υποδηλώνει ότι η ηλεκτρική κατάσταση του πυκνωτή MOS έχει αλλάξει. Δεδομένου ότι, η υψηλότερη θετική τάση αντιστοιχεί στην κατάσταση φόρτισης με ηλεκτρόνια των νανοκρυστάλλων χρυσού και η χαμηλότερη αρνητική τάση αντιστοιχεί στη κατάσταση εκφόρτισης ηλεκτρονίων από τους νανοκρυστάλλους, η τάση μείωσης της καμπύλης  $V_{FB}$ -t μπορεί να μεταφραστεί ως συμπεριφορά απώλειας φορτίου των νανοκρυστάλλων χρυσού.

Τα χαρακτηριστικά συγκράτησης για τα ηλεκτρόνια (εγγραφή) αλλά και για τις σπές (διαγραφή) μπορούν να εξηγηθούν με συμπεριφορά δύο σταδίων: Ένα αρχικό στάδιο που είναι ταχέως φθίνουσα και ένα επακόλουθο στάδιο που είναι βραδέως φθίνουσα. Αυτά τα δύο στάδια μπορούν να αποδοθούν σε δύο διαφορετικούς μηχανισμούς που δρουν ταυτόχρονα: Η αργή εκφόρτιση συμβαίνει λόγω των ηλεκτρονίων που παγιδεύονται βαθιά μέσα στους νανοκρυστάλλους χρυσού, ενώ η γρήγορη εκφόρτιση οφείλεται σε φορτία που μετακινούνται μέσα ή έξω από άλλες παγίδες που υπάρχουν στη διάταξη. Αυτές οφείλονται είτε στις κενές θέσεις οξυγόνου που υπάρχουν στο στρώμα  $Y_2O_3$ , είτε στις επιφανειακές καταστάσεις στους νανοκρυστάλλους ή στις καταστάσεις που βρίσκονται στη διεπιφάνεια μεταξύ των δύο οξειδίων. Όλες αυτές οι παγίδες δρουν σαν μονοπάτια διαρροής για να διαφύγουν εύκολα τα φορτία [11,14,77,99]. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί για πυκνωτές MOS που περιέχουν είτε μεταλλικούς [109,110,111,112] είτε ημιαγωγικούς [113,114,115,116,117] νανοκρυστάλλους. Για να διερευνηθούν και να διαφοροποιηθούν οι επιδράσεις της διεργασίας ανόπτησης με laser χαμηλής εκπομπής (Low Emission-Excimer Laser Annealing, LEM-ELA) σε νανοκρυστάλλους χρυσού και σε παγίδες στο οξείδιο, υιοθετήθηκε μια ανάλυση βασισμένη στην εκφόρτιση, σύμφωνα με παρόμοιες αναλύσεις που αναφέρονται σε παραπλήσιες δομές [11,14]. Οι διάφοροι μηχανισμοί εκφόρτισης ελήφθησαν από προσαρμογή των καμπυλών διατηρούμενης τάσης επίπεδης ζώνης σε συνάρτηση με το χρόνο με μια εξίσωση διπλής εκφορτίσεως της ακόλουθης μορφής:

$$V_{FB}^{retained} = V_1 \exp\left(\frac{-t}{\tau_{NC}}\right) + V_2 \exp\left(\frac{-t}{\tau_{traps}}\right) \quad (34)$$

όπου  $\tau_{NC}$  είναι η χρονική σταθερά εκφόρτισης των φορτίων που παγιδεύονται στους νανοκρυστάλλους χρυσού και  $\tau_{traps}$  η αντίστοιχη χρονική σταθερά όλων των άλλων, κυρίως σώματος, επιφανειακές και διεπιφανειακές παγίδες. Θα πρέπει να αναφερθεί εδώ ότι η αλλαγή του  $V_{FB}$  με το χρόνο σχετίζεται άμεσα με το φορτίο που παγιδεύεται μέσω της πολύ γνωστής εξίσωσης [102].

$$Q_{tr} = C_{ox} \Delta V_{FB} \quad (35)$$

Συνεπώς, οι σταθερές χρόνου που υπολογίζονται από τις γραφικές παραστάσεις στην εικόνα 120 περιγράφουν τα χαρακτηριστικά συγκράτησης φορτίου των διατάξεων. Το γράφημα του χρόνου συγκράτησης φορτίου χαρακτηρίζεται από δύο καθεστώτα εκφόρτισης: αρχικά ταχεία και επακόλουθα βραδεία εκφόρτιση. Οι σταθερές χρόνου γρήγορης εκφόρτισης μεταβάλλοντας την ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και τον αριθμό παλμών, κυμαίνονται από 10s έως 80s. Αντίθετα, οι σταθερές χρόνου αργής εκφόρτισης είναι στην περιοχή των 200-1000s. Για την περίπτωση που φαίνεται στην εικόνα 120 το γρήγορο στάδιο έχει χρονική σταθερά 24s για εγγραφή και 9s

για την κατάσταση διαγραφής. Τα αντίστοιχα αργά τμήματα έχουν σταθερές χρόνου 704s και 327s. Το αργό μέρος, το οποίο σχετίζεται με τη παγίδευση φορτίων στους νανοκρυστάλλους, είναι αρκετά καλό, ενώ το γρήγορο μέρος χρειάζεται βελτίωση, με θέρμανση σε κατάλληλη ατμόσφαιρα [118] κατά την εναπόθεση των οξειδίων, ή να υποβληθεί σε ανόπτηση των οξειδίων μετά την εναπόθεση, για να απομακρυνθεί/αποκατασταθεί το μεγαλύτερο μέρος των ζημιών, που οφείλονται στην ανόπτηση με laser [11].

Με την αυξανόμενη ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας της δέσμης laser, σε σταθερό αριθμό παλμών, η εκφόρτιση επιβραδύνθηκε και βελτιώθηκε η απόδοση συγκράτησης. Ωστόσο, σε πείραμα σταθερής ακτινοβολούμενης ενέργειας, ανά μονάδα επιφάνειας, αυξάνοντας τον αριθμό των παλμών, η απόδοση της διάταξης επιδεινώνεται. Αυτό μπορεί να αποδοθεί, στο μεγάλο αριθμό μικρών νανοκρυστάλλων που περιβάλλουν τους μεγαλύτερους νανοκρυστάλλους, γεγονός που δημιουργεί μονοπάτια διαρροής για να ξεφύγει το φορτίο. Επομένως, είναι πολύ σημαντικό, να συνδυάζεται η μέθοδος ανόπτησης με laser, με ένα βήμα αποκατάστασης μετά την ανόπτηση με laser, για να ενισχυθούν οι διηλεκτρικές ιδιότητες των οξειδίων και να απομακρυνθούν τυχόν ανεπιθύμητες παγίδες, οι οποίες μειώνουν τους χρόνους συγκράτησης των διατάξεων.

Από την εικόνα 120 παρατηρήθηκε μείωση, για μεγάλους χρόνους, του αρχικού παραθύρου μνήμης από 2.984V σε 0.393V. Η προεκβολή των δεδομένων μέχρι τα 10 χρόνια δείχνει ότι το αρχικό παράθυρο μνήμης πέφτει στα 0.279V σε θερμοκρασία δωματίου. Προτείνουμε, οι κακές ιδιότητες συγκράτησης σε σύγκριση με τις τιμές τελευταίας τεχνολογίας που αναφέρονται αλλού [119,120], προκύπτουν από το σχετικά μεγάλο μέγεθος των νανοκρυστάλλων και την πολυκρυσταλλικότητα του στρώματος φραγής ( $Y_2O_3$ ), το οποίο δεν υπέστη ανόπτηση.

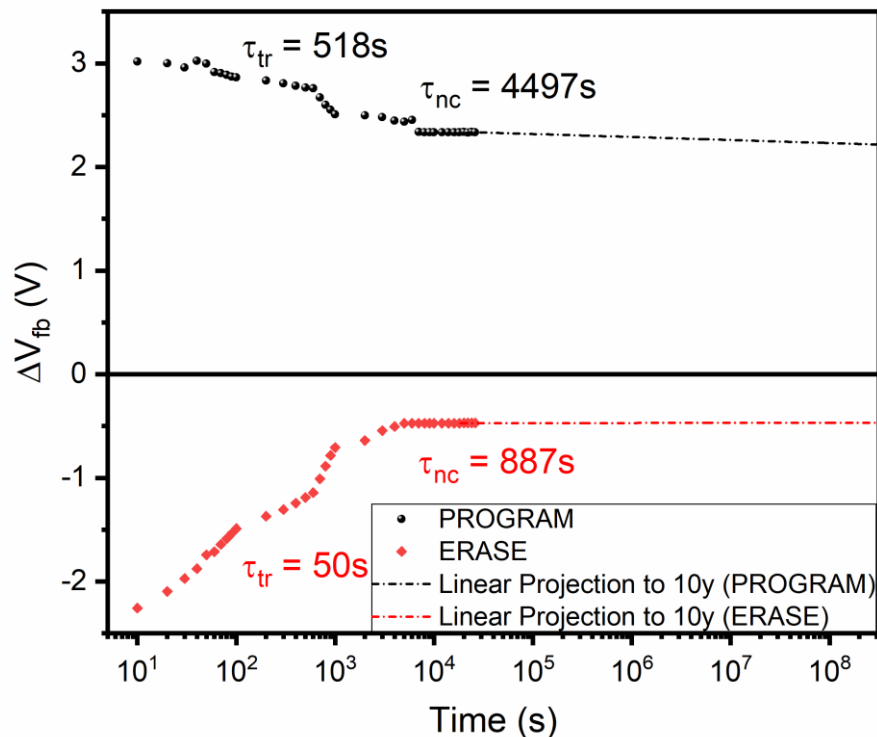
#### 4.5.3 Πειραματικά αποτελέσματα διατήρησης του αποθηκευμένου φορτίου, σε μνήμες με νανοκρυστάλλους χρυσού, με οξείδιο φραγής $Al_2O_3$

Προκειμένου να ελεγχθεί η απόδοση στη συγκράτηση του φορτίου των διατάξεων με νανοκρυστάλλους χρυσού, οι διατάξεις MOS αρχικά υποβλήθηκαν σε τάση +4V (συσσώρευση) για 30s και στη συνέχεια μέτρηση στην τάση επίπεδης ζώνης ( $V_{FB}$ ) σε σχέση με το χρόνο, μετρώντας τη μεταβολή της χωρητικότητας με το χρόνο. Όταν στη διάταξη εφαρμοστεί τάση -4V (αντιστροφή) για 30s, παρακολουθείται η μείωση της χωρητικότητας με το χρόνο στην τάση επίπεδης ζώνης.

Η χωρητικότητα επίπεδης ζώνης ( $C_{FB}$ ) υπολογίζεται από την εξίσωση 32. Στη συνέχεια, η τάση επίπεδης ζώνης ( $V_{FB}$ ), μετριέται από την γραφική παράσταση C-V, ως αυτή που αντιστοιχεί σε χωρητικότητα ίση με  $C_{FB}$ .

Στην εικόνα 121 παρουσιάζεται ο χρόνος συγκράτησης μιας δομής πυκνωτή MOS με ενσωματωμένους νανοκρυστάλλους χρυσού, όπου απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά εγγραφής/διαγραφής (P/E). Όπως φαίνεται, μετά από μια χρονική περίοδο, κατά την αρνητική εφαρμογή τάσης, η  $V_{FB}$  του πυκνωτή MOS μειώνεται κατά κάποιο βαθμό, γεγονός που υποδηλώνει, ότι η ηλεκτρική κατάσταση του πυκνωτή MOS έχει αλλάξει. Η αντικατάσταση του  $Y_2O_3$  με  $Al_2O_3$ , καθώς και το μικρότερο πάχος αρχικού στρώματος χρυσού, βελτίωσε τη συγκράτηση φορτίου. Δεδομένου ότι η υψηλότερη τάση, αντιστοιχεί στην κατάσταση φόρτισης με ηλεκτρόνια των νανοκρυστάλλων χρυσού και η χαμηλότερη τάση, αντιστοιχεί στη κατάσταση εκφόρτισης ηλεκτρονίων από τους νανοκρυστάλλους. Η τάση μείωσης της καμπύλης  $V_{FB}$ -t, μπορεί να μεταφραστεί, ως συμπεριφορά απώλειας φορτίου των νανοκρυστάλλων χρυσού.





Εικόνα 121: Γραφική παράσταση χρόνου- $\Delta V_{fb}$ . Όπου φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες συγκράτησης φορτίου για διάταξη MOS, που περιέχει νανοκρυστάλλους χρυσού, μετά από ανόπτηση με laser, με ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας  $300\text{mJ}/\text{cm}^2$  και 6 παλμούς.

Τα χαρακτηριστικά συγκράτησης, για τα ηλεκτρόνια (εγγραφή) αλλά και για τις οπές (διαγραφή), μπορούν να εξηγηθούν με συμπεριφορά δύο σταδίων (όπως αναφέραμε στην παράγραφο 4.5.2, για μνήμη MOS με νανοκρυστάλλους Au όπου το οξείδιο φραγής είναι το οξείδιο του υτρίου): Ένα αρχικό στάδιο όπου η τάση επίπεδης ζώνης με το χρόνο είναι ταχέως φθίνουσα και σε δεύτερο στάδιο εξελίσσεται σε βραδέως φθίνουσα (και για τις δυο καταστάσεις, εγγραφής-διαγραφής). Αυτά τα δύο στάδια μπορούν να αποδοθούν, σε δύο διαφορετικούς μηχανισμούς, που δρουν ταυτόχρονα: Η αργή εκφόρτιση συμβαίνει λόγω των ηλεκτρονίων που παγιδεύονται βαθιά μέσα στους νανοκρυστάλλους χρυσού, ενώ η γρήγορη εκφόρτιση, οφείλεται σε φορτία που μετακινούνται μέσα ή έξω από άλλες παγίδες, που υπάρχουν στη διάταξη. Όλες αυτές οι παγίδες δρουν σαν μονοπάτια διαρροής, για να διαφύγουν εύκολα τα φορτία. Οι διάφοροι μηχανισμοί εκφόρτισης ελήφθησαν από προσαρμογή των καμπυλών διατηρούμενης τάσης επίπεδης ζώνης, σε συνάρτηση με το χρόνο, σύμφωνα με την εξίσωση 34 διπλής εκφορτίσεως.

Οι σταθερές χρόνου που υπολογίζονται από τις γραφικές παραστάσεις στην εικόνα 121, περιγράφουν τα χαρακτηριστικά συγκράτησης φορτίου των διατάξεων. Το γράφημα του χρόνου συγκράτησης φορτίου, χαρακτηρίζεται από δύο καθεστάτα εκφόρτισης: Αρχικά ταχεία και επακόλουθα βραδεία εκφόρτιση. Το γρήγορο στάδιο έχει χρονική σταθερά 518s για εγγραφή και 50s για την κατάσταση διαγραφής. Τα αντίστοιχα αργά τμήματα έχουν σταθερές χρόνου 4497s και 887s. Η εγγραφή έχει καλή συγκράτηση φορτίου, ενώ έχει πιο απότομη απώλεια φορτίου στη διαγραφή.

Από την εικόνα 121 επίσης παρατηρήθηκε μείωση, για μεγάλους χρόνους, του αρχικού παραθύρου μνήμης από 5.273V σε 2.807V. Η προεκβολή των δεδομένων μέχρι τα 10 χρόνια, δείχνει ότι το αρχικό παράθυρο μνήμης πέφτει στα 2.683V σε θερμοκρασία δωματίου.

Η ταχεία εκφόρτιση μέχρι τα 1000s είναι μια αρνητική ένδειξη, υποδεικνύοντας μεγάλη απώλεια φορτίου σε μικρό χρονικό διάστημα, ενώ βελτίωση της παγίδευσης των φορτίων, μπορεί να επιτευχθεί, κατασκευάζοντας νανοκρυστάλλους που βρίσκονται όλοι κάτω από τα 10nm σε διάμετρο.

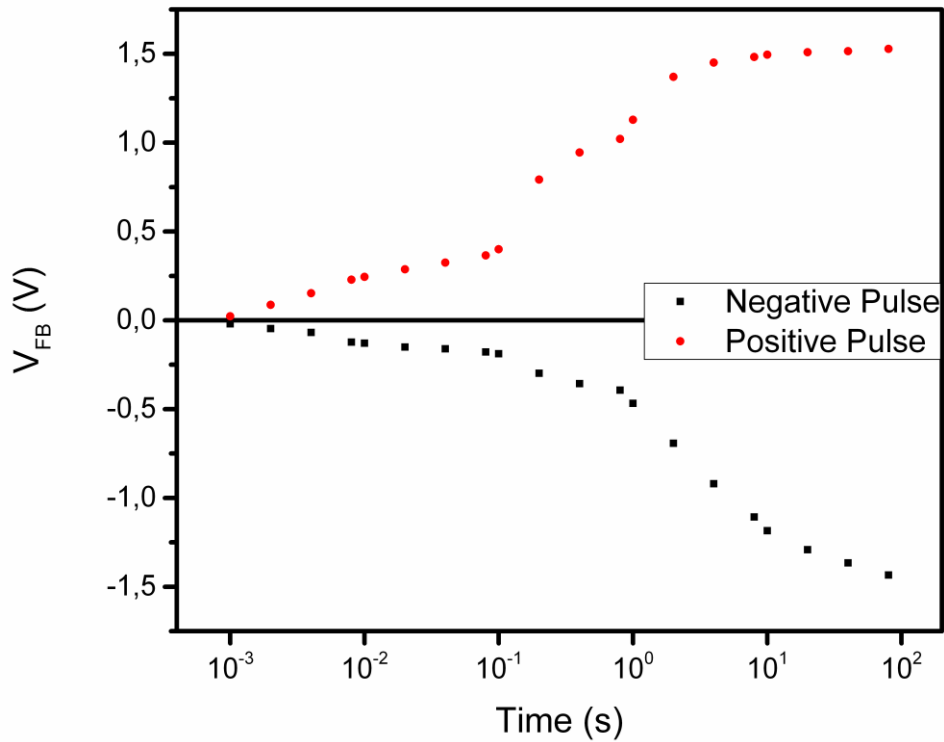
#### 4.5.4 Συμπεράσματα από τις μετρήσεις συγκράτησης φορτίου, για μνήμες με οξειδίο φραγής το $Y_2O_3$ και το $Al_2O_3$

Από τις μετρήσεις συγκράτησης φορτίου, παρατηρείται μια σαφής βελτίωση στο εύρος του παραθύρου μνήμης, συνεχίζει όμως να υπάρχει ταχεία εκφόρτιση μέχρι περίπου τα 1000s. Το  $Al_2O_3$  βελτίωσε τη συμπεριφορά των μνημών διότι κατασκευάστηκε άμορφο και μπόρεσε να καλύψει καλύτερα τους νανοκρυστάλλους, όπως επίσης μπόρεσε να καλύψει τα κενά μεταξύ των νανοκρυστάλλων. Εν αντιθέσει με το  $Y_2O_3$  το οποίο εμφάνισε μια δενδριτική δομή ανάπτυξης πάνω στους νανοκρυστάλλους, που επηρεάζει τις μονωτικές ιδιότητες του οξειδίου, με το σχηματισμό μονοπατιών διαρροής των φορτίων.

#### 4.6 Ταχύτητα εγγραφής και διαγράψης

Σε δείγματα με οξειδίο φραγής το  $Y_2O_3$  μελετήθηκε η απόκριση ως προς την εγγραφή και διαγραφή εφαρμόζοντας παλμό σταθερού ύψους ( $\pm 4V$ ) και μεταβάλλοντας την διάρκεια (πλάτος), με σκοπό την εύρεση της διάρκειας του παλμού που επιτυγχάνει μέγιστη απόκριση.

Στην εικόνα 122 απεικονίζεται η μεταβολή της τάσης επίπεδης ζώνης, με την εφαρμογή θετικών και αρνητικών παλμών, εγγραφής και διαγραφής, αντίστοιχα. Στην εγγραφή (διαγραφή) βλέπουμε την απόκριση της έγχυσης ηλεκτρονίων (οπών), από το πυρίτιο στους μεταλλικούς νανοκρυστάλλους, κάτω από υψηλές συνθήκες εγγραφής (διαγραφής)  $+4,0V$  ( $-4,0V$ ), για διατάξεις με τα χαρακτηριστικά συγκράτησης που φαίνονται στην εικόνα 120 (ανόπτηση με laser με ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας  $500mJcm^{-2}$  και 3 παλμούς). Τα χαρακτηριστικά της ταχύτητας είναι σχετικά αργής απόκρισης, διότι οι διατάξεις χρειάζονται παλμούς μεγαλύτερους από 10 δευτερόλεπτα για να φτάσουν στο μέγιστο παράθυρο μνήμης. Αυτά τα αποτελέσματα συμφωνούν με τα ευρήματα ενός πολύ γρήγορου μηχανισμού εκφόρτισης, λόγω των ατελειών στο κυρίως σώμα ή στις διεπιφάνειες των οξειδίων.



Εικόνα 122: Γραφική παράσταση χρόνου-τάσης επίπεδης ζώνης για τον προσδιορισμό της απόκριση της δομής μνήμης σε παλμούς Εγγραφής (Διαγραφής) +4.0 V (-4.0 V).

## 4.7 Μελέτη διηλεκτρικών ιδιοτήτων

### 4.7.1 Μελέτη διηλεκτρικών ιδιοτήτων στρώματος Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Στην παράγραφο αυτή μελετάται η διηλεκτρική σταθερά του στρώματος Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, το οποίο αναπτύχθηκε πάνω σε άμορφο στρώμα SiO<sub>2</sub>, με την τεχνική του Sputtering. Η ανάπτυξη έγινε σε θάλαμο υψηλού κενού, όπως περιγράφεται αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η διηλεκτρική σταθερά (K) του στρώματος του Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> υπολογίζεται από τη μελέτη των ιδιοτήτων των δομών αναφοράς, που παρουσιάζονται στην εικόνα 79, από μετρήσεις των χαρακτηριστικών C-V και G-V. Οι καμπύλες ελήφθησαν για τάσεις πύλης από την κατάσταση αντιστροφής έως την κατάσταση συσσώρευσης και αντίστροφα. Η μετρούμενη ολική χωρητικότητα στην περιοχή της συσσώρευσης είναι το αποτέλεσμα δυο χωρητικοτήτων σε σειρά, μια οφειλόμενης στο στρώμα SiO<sub>2</sub> και μιας οφειλόμενης στο στρώμα Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

$$d_{SiO_2} = 3.7nm = 3.7 \times 10^{-9}m$$

$$d_{Y_2O_3} = 40nm = 4 \times 10^{-8}m$$

$$K_{SiO_2} = 3.9$$

$$C_{ma} = 2.00 \times 10^{-9}F$$

$$G_{ma} = 7.40 \times 10^{-6}S$$

Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις και τη βοήθεια των παρακάτω τύπων [102], υπολογίζεται η σειριακή αντίσταση ( $R_{serial}$ ) καθώς και η διορθωμένη τιμή της συνολικής χωρητικότητας των δυο οξειδίων ( $C_{ox\_corrected}$ ):

$$R_{serial} = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + \omega^2 C_{ma}^2} \quad (36)$$

$$R_{serial} = 4.69 \times 10^{-2} \Omega$$

$$C_{ox\_corrected} = C_{ma} \left[ 1 + \left( \frac{G_{ma}}{\omega C_{ma}} \right)^2 \right] \quad (37)$$

$$C_{ox\_corrected} = 2.00 \times 10^{-9} F$$

Ο υπολογισμός της χωρητικότητας επίπεδης ζώνης μπορεί να γίνει με τον ακόλουθο τύπο:

$$C_{FB} = \frac{C_{ma} \left[ 1 + \left( \frac{G_{ma}}{\omega C_{ma}} \right)^2 \right]}{1 + \frac{L_D}{\epsilon_s} C_{ma} \left[ 1 + \left( \frac{G_{ma}}{\omega C_{ma}} \right)^2 \right]} \quad (38)$$

Όπου  $G_{ma}$  η μετρούμενη αγωγιμότητα στην περιοχή συσσώρευσης,  $C_{ma}$  η μετρούμενη χωρητικότητα στην περιοχή συσσώρευσης και  $\omega = 2\pi f$ , όπου  $f$  = συχνότητα εναλλασσόμενου ρεύματος.

Τα δύο στρώματα οξειδίου  $37 \text{ \AA} \text{ SiO}_2 / 400 \text{ \AA} \text{ Y}_2\text{O}_3$  αποτελούν 2 χωρητικότητες σε σειρά με βάση τον γνωστό τύπο:

$$\frac{1}{C_{ox\_corrected}} = \frac{d_{SiO_2}}{K_{SiO_2} \cdot \epsilon_0 \cdot A} + \frac{d_{Y_2O_3}}{K_{Y_2O_3} \cdot \epsilon_0 \cdot A} \quad (39)$$

όπου  $d$  το πάχος του αντίστοιχου στρώματος οξειδίου,  $A$  το εμβαδό του πυκνωτή ( $A = 0,785 \text{ mm}^2$ ).

Η διηλεκτρική σταθερά  $K$  του στρώματος του  $Y_2O_3$  από τη σχέση 30 είναι:

$$K_{Y_2O_3} = 15.67$$

η οποία είναι κοντά στις τιμές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία [99,101].

Χρησιμοποιώντας δείγμα με νανοκρυστάλλους (εικόνα 78) έχουμε:

$$C_{ma} = 1.96 \times 10^{-9} F$$

$$G_{ma} = 6.93 \times 10^{-6} S$$

$$R_{serial} = 4.56 \Omega$$

$$C_{ox\_corrected} = 1.96 \times 10^{-9} F$$

Η χωρητικότητα επίπεδης ζώνης του υποστρώματος Si ( $C_S$ ) υπολογίζεται με βάση τον τύπο 33:

$$C_S = 1.03 \times 10^{-3} F/m^2$$

$$C_{FBS} = 812 pF$$

$L_D$  το μήκος Debye το οποίο δίνεται από τον τύπο:

$$L_D = \sqrt{\frac{K_B T \epsilon_{Si}}{N_D e^2}} \quad (40)$$

$$L_D = 3.34 \times 10^{-8} m$$

όπου  $K_B$  η σταθερά Boltzmann ( $K_B=8,617 \times 10^{-5} eV/K$ ), η συγκέντρωση δοτών του υποστρώματος Si  $N_D=5 \times 10^{15} cm^{-3}$ .

Η ολική χωρητικότητα επίπεδης ζώνης ( $C_{FB}$ ) με βάση τον τύπο 32 είναι:

$$C_{FB} = 575 pF$$

Από την τιμή της  $C_{FB}$  φέρνοντας παράλληλες προς τους άξονες μετρίεται η τιμή της τάσης επίπεδης ζώνης ( $V_{FB}$ ).

Με βάση τους παρακάτω τύπους υπολογίζεται ο μέσος αριθμός ηλεκτρικών φορτίων ανά νανοκρύσταλλο

$$\Delta V_{FB} = \frac{-\Delta Q}{C_{ox}} \quad (41)$$

$$\Delta Q = 5.54 \times 10^{-9} FV$$

και

$$Q = e \bar{N}_d(t) N \quad (42)$$

όπου  $Q$  το συνολικό αποθηκευμένο ηλεκτρικό φορτίο στους νανοκρυστάλλους,  $\bar{N}_d(t)$ : ο μέσος αριθμός φορτίων αποθηκευμένων σε ένα νανοκρύσταλλο και  $N$ : ο συνολικός αριθμός νανοκρυστάλλων στο εσωτερικό της πύλης,  $e$  το φορτίο του ηλεκτρονίου. Η επιφανειακή πυκνότητα των νανοκρυστάλλων τους οποίους περιέχει η δομή είναι  $3.100 \times 10^{10}$  νανοκρυστάλλοι/cm<sup>2</sup>.

$$\bar{N}_d(t) = 142.1 \text{ φορτία/νανοκρύσταλλο}$$

Ο υπολογισμένος μέσος αριθμός φορτίων που αποθηκεύτηκαν ανά νανοκρύσταλλο είναι 142. Η πιο συνηθισμένη τιμή για αυτές τις δομές είναι ένα ή δύο φορτία ανά νανοκρύσταλλο. Παρατηρούμε ότι ο αριθμός των φορτίων που αποθηκεύονται ανά νανοκρύσταλλο, που έχουμε υπολογίσει, είναι πολύ υψηλότερος σε σύγκριση με άλλες δημοσιεύσεις. Αυτό που επηρεάζει και δίνει αυτό το αποτέλεσμα είναι η ύπαρξη σχετικά μεγάλης μέσης διαμέτρου νανοκρυστάλλων. Για το λόγο αυτό, οι αποθηκευτικές δυνάμεις Coulomb μεταξύ των φορτίων στο νανοκρύσταλλο έχουν μικρή τιμή (μικρό ηλεκτρικό πεδίο).

#### 4.7.2 Μελέτη διηλεκτρικών ιδιοτήτων στρώματος Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Στην παράγραφο αυτή μελετάται η διηλεκτρική σταθερά του στρώματος Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> το οποίο αναπτύχθηκε πάνω σε άμορφο στρώμα SiO<sub>2</sub> με την τεχνική του ALD. Η ανάπτυξη έγινε σε θάλαμο υψηλού κενού όπως περιγράφεται αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η διηλεκτρική σταθερά ( $K$ ) του στρώματος του Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> υπολογίζεται από τη μελέτη των ιδιοτήτων των δομών αναφοράς, που παρουσιάζονται στην εικόνα 98, από μετρήσεις των χαρακτηριστικών C-V και G-V. Οι καμπύλες ελήφθησαν για τάσεις πύλης από την κατάσταση αντιστροφής έως την κατάσταση συσσώρευσης και αντίστροφα. Η μετρούμενη ολική χωρητικότητα στην περιοχή της συσσώρευσης είναι το αποτέλεσμα δυο χωρητικοτήτων σε σειρά, μια οφειλόμενης στο στρώμα SiO<sub>2</sub> και μιας οφειλόμενης στο στρώμα Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

$$d_{SiO_2} = 3.5nm = 3.5 \times 10^{-9}m$$

$$d_{Al_2O_3} = 30nm = 3 \times 10^{-8}m$$

$$K_{SiO_2} = 3.9$$

$$C_{ma} = 1.67 \times 10^{-9}F$$

$$G_{ma} = 2.2 \times 10^{-6}S$$

Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις και τη βοήθεια των τύπων υπολογίζεται η σειριακή αντίσταση ( $R_{serial}$ ) καθώς και η διορθωμένη τιμή της συνολικής χωρητικότητας των δυο οξειδίων ( $C_{ox-corrected}$ )

Από την εξίσωση 36 έχουμε:

$$R_{serial} = 2\Omega$$

Από την εξίσωση 37 έχουμε:

$$C_{ox\_corrected} = 1.67 \times 10^{-9}F$$

Τα δύο στρώματα οξειδίου  $35\text{\AA} SiO_2/300\text{\AA} Al_2O_3$  αποτελούν 2 χωρητικότητες σε σειρά με βάση τον γνωστό τύπο:

$$\frac{1}{C_{ox\_corrected}} = \frac{d_{SiO_2}}{K_{SiO_2} \cdot \epsilon_0 \cdot A} + \frac{d_{Al_2O_3}}{K_{Al_2O_3} \cdot \epsilon_0 \cdot A}$$

όπου  $d$  το πάχος του αντίστοιχου στρώματος οξειδίου. Το εμβαδό του πυκνωτή  $A$  είναι ίσο με  $0,785mm^2$ .

Η διηλεκτρική σταθερά  $K$  του στρώματος του  $Al_2O_3$  από τη σχέση 30 είναι:

$$K_{Al_2O_3} = 9.1$$

η οποία είναι κοντά στις τιμές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία [101].

Χρησιμοποιώντας δείγμα με νανοκρυστάλλους (εικόνα 97) έχουμε:

$$C_{ma} = 1.61 \times 10^{-9}F$$

$$G_{ma} = 2.03 \times 10^{-6}S$$

$$R_{serial} = 2.25\Omega$$

$$C_{ox\_corrected} = 1.61 \times 10^{-9}F$$

Η χωρητικότητα επίπεδης ζώνης του υποστρώματος Si ( $C_S$ ) υπολογίζεται με βάση τον τύπο 33:

$$C_S = 1.04 \times 10^{-3}F/m^2$$

$$C_{FBS} = 812pF$$

$L_D$  το μήκος Debye το οποίο δίνεται από τον τύπο:

$$L_D = \sqrt{\frac{K_B T \epsilon_{Si}}{N_D e^2}}$$

$$L_D = 3.34 \times 10^{-8}m$$

όπου  $K_B$  η σταθερά Boltzmann, η συγκέντρωση δοτών του υποστρώματος Si  $N_D = 5 \times 10^{15}cm^{-3}$ .

Η ολική χωρητικότητα επίπεδης ζώνης ( $C_{FB}$ ) με βάση τον τύπο 32 είναι:

$$C_{FB} = 540pF$$

Από την τιμή της  $C_{FB}$  φέρνοντας παράλληλες προς τους άξονες υπολογίζεται η τιμή της τάσης επίπεδης ζώνης ( $V_{FB}$ ).

Με βάση τους παρακάτω τύπους υπολογίζεται ο μέσος αριθμός ηλεκτρικών φορτίων ανά νανοκρύσταλλο

$$\Delta V_{FB} = \frac{-\Delta Q}{C_{ox}}$$

$$\Delta Q = 2.20 \times 10^{-8} FV$$

και

$$Q = e\bar{N}_d(t)N$$

όπου  $Q$  το συνολικό αποθηκευμένο ηλεκτρικό φορτίο στους νανοκρυστάλλους,  $\bar{N}_d(t)$ : ο μέσος αριθμός φορτίων αποθηκευμένων σε ένα νανοκρύσταλλο και  $N$ : ο συνολικός αριθμός νανοκρυστάλλων στο εσωτερικό της πύλης,  $e$  το φορτίο του ηλεκτρονίου. Η επιφανειακή πυκνότητα των νανοκρυστάλλων τους οποίους περιέχει η δομή είναι  $4.639 \times 10^{10}$  νανοκρυστάλλοι/cm<sup>2</sup>.

$$\bar{N}_d(t) = 377.3 \text{φορτία/νανοκρύσταλλο}$$

Ο υπολογισμένος μέσος αριθμός φορτίων που αποθηκεύτηκαν ανά νανοκρύσταλλο είναι 377. Η πιο συνηθισμένη τιμή για αυτές τις δομές είναι ένα ή δύο φορτία ανά νανοκρύσταλλο. Παρατηρούμε ότι ο αριθμός των φορτίων που αποθηκεύονται ανά νανοκρύσταλλο, που έχουμε υπολογίσει, είναι πολύ υψηλότερος σε σύγκριση με άλλες δημοσιεύσεις. Αυτό που επηρεάζει και δίνει αυτό το αποτέλεσμα είναι η ύπαρξη σχετικά μεγάλης μέσης διαμέτρου νανοκρυστάλλων. Για το λόγο αυτό, οι αποθηκευτικές δυνάμεις Coulomb μεταξύ των φορτίων στο νανοκρύσταλλο έχουν μικρή τιμή (μικρό ηλεκτρικό πεδίο).

#### 4.7.3 Συμπεράσματα από τη μελέτη των διηλεκτρικών ιδιοτήτων στρωμάτων $Y_2O_3$ και $Al_2O_3$

Οι διηλεκτρικές σταθερές των οξειδίων,  $Y_2O_3$  και  $Al_2O_3$ , είναι πολύ κοντά στις θεωρητικά αναμενόμενες τιμές. Παρατηρήθηκε ότι δομές με οξείδιο φραγής το  $Al_2O_3$  και κατασκευασμένους νανοκρυστάλλους με ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας κάθε παλμού  $300mJ/cm^2$  και 6 παλμούς είχαν 2.7 φορές μεγαλύτερο φορτίο/νανοκρύσταλλο, από ότι δομές με οξείδιο φραγής το  $Y_2O_3$  και κατασκευασμένους νανοκρυστάλλους με ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας κάθε παλμού  $500mJ/cm^2$  και 3 παλμούς. Το οποίο είναι λογικό εφόσον το παράθυρο μνήμης που σχηματίστηκε σε δομές με οξείδιο φραγής το  $Al_2O_3$  είναι πολύ μεγαλύτερο.

### 4.8 Υπολογισμός παγίδων διεπαφής

#### 4.8.1 Υπολογισμός παγίδων διεπαφής με οξείδιο φραγής $Y_2O_3$

Μία μέθοδος για τον υπολογισμό της πυκνότητας των διεπιφανειακών καταστάσεων, είναι η μέθοδος που αναπτύχθηκε από τους Hill-Coleman (εξίσωση 43). Ο υπολογισμός των διεπιφανειακών καταστάσεων από αυτή τη μέθοδο γίνεται μέσω της

καμπύλης της χωρητικότητας και της αγωγιμότητας συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης σε μία συχνότητα. Η πυκνότητα καταστάσεων διεπαφής [121] μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 43.

$$D_{it} = \frac{2}{eA} \frac{G_{m.max}/\omega}{\left(\frac{G_{m.max}}{\omega C_{ox}}\right)^2 + \left(1 - \frac{C_m}{C_{ox}}\right)^2} \quad (43)$$

Όπου  $e$  το φορτίο του ηλεκτρονίου,  $A$  το εμβαδόν των οπλισμών του πυκνωτή,  $\omega$  η κυκλική συχνότητα,  $G_{m.max}$  το μέγιστο που εμφανίζει η καμπύλη της αγωγιμότητας στη συχνότητα  $\omega$ ,  $C_{ox}$  η τιμή της χωρητικότητας στη περιοχή της συσσώρευσης ( $C_{acc}$ ),  $C_m$  η πειραματικά μετρούμενη τιμή της χωρητικότητας για τάση ίδια με αυτή στην οποία εμφανίζεται το μέγιστο στην καμπύλη της αγωγιμότητας.

$$C_{Y_2O_3} = \frac{A\varepsilon_{Y_2O_3}}{T_{Y_2O_3}} = 2.61 \times 10^{-9} F$$

$$C_{SiO_2} = \frac{A\varepsilon_{SiO_2}}{T_{SiO_2}} = 7.33 \times 10^{-9} F$$

$$C_{ox} = \frac{C_{SiO_2}C_{Y_2O_3}}{C_{SiO_2} + C_{Y_2O_3}} = 1.92 \times 10^{-9} F$$

Για MOS

$$C_m = 2.00 \times 10^{-9} F$$

$$G_{m.max} = 7.40 \times 10^{-6} S$$

$$D_{it} = 1.08 \times 10^{12} \frac{1}{eV \cdot cm^2}$$

Για MOS με νανοκρυστάλλους

$$C_m = 1.96 \times 10^{-9} F$$

$$G_{m.max} = 6.93 \times 10^{-6} S$$

$$D_{it} = 3.50 \times 10^{12} \frac{1}{eV \cdot cm^2}$$

Τα δείγματα ελέγχου έδειξαν μια μέση τιμή πυκνότητας διεπιφανειακών καταστάσεων (στο μέσο χάσμα, μέσω της μεθόδου Hill-Colemann),  $D_{it\_control} = 10^{12} 1/eVcm^2$ . Οι αντίστοιχες τιμές  $D_{it}$  των διατάξεων με νανοκρυστάλλους ήταν υψηλότερες (τυπικές τιμές  $D_{it\_NCs} = 4 \times 10^{12} 1/eVcm^2$ ).

Οι διατάξεις που μελετήθηκαν δεν ανοπτήθηκαν (πριν ή μετά την ανόπτηση με laser) για τη μείωση των παγίδων στο οξειδίου και τις διεπαφές.

#### 4.8.2 Υπολογισμός παγίδων διεπαφής με οξείδιο φραγής $Al_2O_3$



Με μέθοδο Hill-Coleman γίνεται υπολογισμός της πυκνότητας των διεπιφανειακών καταστάσεων από την εξίσωση 43.

$$C_{Al_2O_3} = \frac{A\varepsilon_{Al_2O_3}}{T_{Al_2O_3}} = 2.09 \times 10^{-9} F$$

$$C_{SiO_2} = \frac{A\varepsilon_{SiO_2}}{T_{SiO_2}} = 7.75 \times 10^{-9} F$$

$$C_{ox} = \frac{C_{SiO_2}C_{Y_2O_3}}{C_{SiO_2} + C_{Y_2O_3}} = 1.64 \times 10^{-9} F$$

Για MOS

$$C_{ma} = 1.67 \times 10^{-9} F$$

$$G_{ma} = 2.2 \times 10^{-6} S$$

$$D_{it} = 1.67 \times 10^{12} \frac{1}{eV \cdot cm^2}$$

Για MOS με νανοκρυστάλλους

$$C_{ma} = 1.61 \times 10^{-9} F$$

$$G_{ma} = 2.03 \times 10^{-6} S$$

$$D_{it} = 1.54 \times 10^{12} \frac{1}{eV \cdot cm^2}$$

Τα δείγματα ελέγχου έδειξαν μια μέση τιμή πυκνότητας διεπιφανειακών καταστάσεων (στο μέσο χάσμα, με τη μέθοδο Hill-Colemann),  $D_{it\_control} = 1.67 \times 10^{12} 1/eVcm^2$ . Οι αντίστοιχες τιμές  $D_{it}$  των διατάξεων με νανοκρυστάλλους ήταν περίπου στα ίδια επίπεδα (τυπικές τιμές  $D_{it\_NCs} = 1.54 \times 10^{12} 1/eVcm^2$ ). Μέσα στα πλαίσια του πειραματικού σφάλματος η  $D_{it\_control}$  και η  $D_{it\_NCs}$ , μπορούν να θεωρηθούν ίσες.

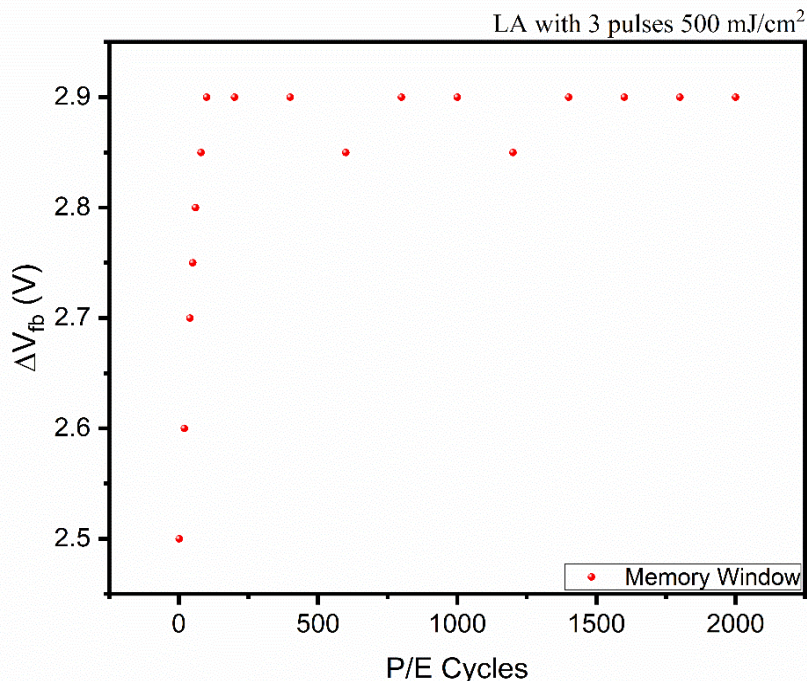
Οι διατάξεις που μελετήθηκαν δεν ανοπτήθηκαν (πριν ή μετά την ανόπτηση με laser) για τη μείωση των παγίδων στο οξειδίου και τις διεπαφές.

#### 4.8.3 Συμπεράσματα από την μελέτη των παγίδων διεπαφής με οξείδιο φραγής το $Y_2O_3$ και το $Al_2O_3$

Σε δομή με οξείδιο φραγής το  $Y_2O_3$  και νανοκρυστάλλους έχουμε αισθητή την αύξηση του  $D_{it}$  ενώ σε δομές με οξείδιο φραγής το  $Al_2O_3$  δε φαίνεται να υπάρχει επιρροή σε δομές με ή χωρίς νανοκρυστάλλους. Συνεπώς η ισχυρή δέσμη από τα  $500mJ/cm^2$  και πάνω επηρεάζει την διεπιφάνεια, διότι στη δομή με οξείδιο φραγής το  $Y_2O_3$  οι νανοκρυστάλλοι κατασκευάστηκαν με ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας  $500mJ/cm^2$  ενώ στη δομή με οξείδιο φραγής το  $Al_2O_3$  οι νανοκρυστάλλοι κατασκευάστηκαν με ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας  $300mJ/cm^2$ .

#### 4.9 Μέτρηση αντοχής μνημών σε κύκλους φόρτισης διάταξης με οξείδιο φραγής $Y_2O_3$

Ο γρήγορος μηχανισμός εκφόρτισης ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη διαρροή φορτίου αποδόθηκε στο όχι τόσο καλής ποιότητας οξείδιο του  $Y_2O_3$ , στη διηλεκτρική κατάρρευση του  $SiO_2$  που μπορεί να προκληθεί με μεγάλο αριθμό μετρήσεων και την εφαρμογή υψηλών τάσεων καθώς και στην όχι τόσο μικρή διάσταση των νανοκρυστάλλων, που ο στόχος ήταν να είναι κάτω από 10nm και βέλτιστα 1nm. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο μηχανισμός αυτός δεν επηρεάστηκε σημαντικά από τον αριθμό των κύκλων προγραμματισμού/διαγραφής. Στην εικόνα 123 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αντοχής σε 2000 κύκλους προγραμματισμού διαγραφής. Το παράθυρο μνήμης είναι σταθερό και τα χαρακτηριστικά συγκράτησης (μετά από 2000 κύκλους P/E). Προγραμματισμός και διαγραφή επιτεύχθηκε με παλμό 10 δευτερολέπτων στα  $\pm 4V$  αντίστοιχα.



Εικόνα 123: Γραφική παράσταση κύκλων προγραμματισμού/διαγραφής-παράθυρου μνήμης, για τον προσδιορισμό της αντοχής της μνήμης.

#### 4.10 Συμπεράσματα ηλεκτρικού χαρακτηρισμού

Η έρευνα απέφερε πολύ σημαντικά και ενδιαφέροντα αποτελέσματα.

- I. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των δομών με μεταλλικούς νανοκρυστάλλους δείχνουν ότι κυρίως οι δομές που περιέχουν NCs Au μπορούν να αξιοποιηθούν ως στοιχεία μη πτητικής μνήμης.
- II. Βελτίωση χαρακτηριστικών στο βρόχο υστέρησης μειώνοντας τις διαστάσεις των νανοκρυστάλλων και οξείδιο φραγής το  $Al_2O_3$ . Από τις καμπύλες χωρητικότητας-τάσης διατάξεων MOS με νανοκρυστάλλους χρυσού βλέπουμε ότι το παράθυρο

μνήμης των δομών έφτασε τα 13.7V χρησιμοποιώντας  $Al_2O_3$  ως οξειδίο φραγής και μέγιστη επιτρεπόμενη εφαρμοζόμενη τάση στη διάταξη  $\pm 10V$  ενώ στην περίπτωση χρήσεις  $Y_2O_3$  ως οξειδίο φραγής το παράθυρο μνήμης των δομών έφτασε τα 2.9V και μέγιστη επιτρεπόμενη εφαρμοζόμενη τάση στη διάταξη  $\pm 5V$ . Έχοντας συγκρίσιμα αποτελέσματα με της δημοσίευσης [11] (λαμβάνοντας υπόψιν το εύρος των εφαρμοζόμενων τάσεων, καθώς η υψηλή διαρροή ρεύματος του  $Y_2O_3$  δεν επέτρεψε την εφαρμογή υψηλών τάσεων).

- III. Η ανθεκτικότητα της μνήμης με το χρόνο (memory endurance) κυμαίνεται σε αποδεκτά επίπεδα, ειδικά μετά την αντικατάσταση του  $Y_2O_3$  με  $Al_2O_3$ .
- IV. Καλύτερες μονωτικές ιδιότητες με οξειδίο φραγής  $Al_2O_3$ . Η αντικατάσταση του οξειδίου φραγής  $Y_2O_3$  με  $Al_2O_3$  βελτίωσε την ηλεκτρική συμπεριφορά των διατάξεων μνήμης επιτρέποντας την εφαρμογή υψηλότερων (κατά απόλυτη τιμή) τάσεων χωρίς να παρουσιάζεται διαρροή φορτίου προς τις επαφές και πιο συγκεκριμένα την πάνω επαφή. Η υψηλή διαρροή ρεύματος στις μετρήσεις χωρητικότητας τάσης (πάνω από τα 5V) καθώς και σε ένα βαθμό η απότομη πτώση του αποθηκευμένου φορτίου στις μετρήσεις συγκράτησης της αποθηκευμένης πληροφορίας υποδεικνύουν ότι η ποιότητα του  $Y_2O_3$  σε συνδυασμό με την ύπαρξη μεγάλων νανοκρυστάλλων χρυσού δεν προσέφεραν τον απαιτούμενο φραγμό στη διάταξη.
- V. Οι μετρήσεις του χρόνου συγκράτησης της πληροφορίας δεν εμφάνισαν καλή παγίδευση των φορτίων στους νανοκρυστάλλους εμφανίζοντας απότομη πτώση του αποθηκευμένου φορτίου. Στην απότομη πτώση του φορτίου συμβάλουν κυρίως οι παγίδες φορτίων.
- VI. Η κατασκευή νανοκρυστάλλων κάτω από τα 10 nm, όπου ισχύει ο κβαντικός περιορισμός σύμφωνα με τη θεωρία, μπορεί να προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα ως προς τη συγκράτηση του φορτίου και συνεπώς ως προς τη λειτουργία μιας μη πτητικής μνήμης.
- VII. Οι ηλεκτρικές μετρήσεις είναι επαναλήψιμες και αξιόπιστες καθώς τα μετρούμενα μεγέθη είχαν μικρή απόκλιση κατά την επανάληψη των μετρήσεων.

ΔΟΜΗ ΜΗ ΠΤΗΤΙΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ ΜΟS ΜΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΝΑΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ  
ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ΜΕ LASER

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή πραγματεύεται την ανάπτυξη μεταλλικών νανοκρυστάλλων πάνω σε άμορφο στρώμα SiO<sub>2</sub> καθώς και την εφαρμογή αυτών σε στοιχεία μνήμης.

Το σημαντικό αποτέλεσμα αυτής της έρευνας ήταν η παρουσίαση μιας αποτελεσματικής και καλά εκτελεσθείσας χρήσης της ανόπτησης με laser, για την παραγωγή νανοκρυστάλλων χρυσού, για να χρησιμοποιηθούν ως κέντρα παγίδευσης στις δομές MOS Si/SiO<sub>2</sub>/Au NCs/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ή Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ Au ή Al. Η τεχνική της κατασκευής με laser έδειξε ότι χρησιμοποιώντας υψηλότερη ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας (200-500mJ/cm<sup>2</sup>) και από 1 έως 6 παλμούς του KrF laser δίνουν τα βέλτιστα αποτελέσματα όσον αφορά την ομοιομορφία των νανοκρυστάλλων, τα χαμηλά ρεύματα διαρροής, το παράθυρο μνήμης, την συγκράτηση φορτίου και την αντοχή των μνημών. Ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός έδειξε ότι νανοκρυσταλλοί χρυσού κατασκευασμένοι μέσω ανόπτησης με laser μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διατάξεις μνήμης Flash που παρέχουν καλά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, λόγω της δημιουργίας υψηλής ποιότητας και υψηλής ομοιογένειας μεταλλικών νανοκρυστάλλων. Μετρήσεις των δυνατοτήτων ανάγνωσης/εγγραφής/διαγραφής της διάταξης, εμφάνισαν παράθυρο μνήμης περίπου 14V.

Παρασκευάστηκαν μεταλλικοί νανοκρυσταλλοί με μεγάλη επιφανειακή πυκνότητα και με ομοιόμορφο μέγεθος από Ag και Au με ανόπτηση με laser λεπτού μεταλλικού “στρώματος”. Με τη συγκεκριμένη μέθοδο, ρυθμίζοντας είτε την ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας, είτε το πάχος του εξαχνόμενου μεταλλικού “στρώματος”, είτε τον αριθμό των παλμών, μπορεί να ελεγχθεί με ακρίβεια η επιφανειακή πυκνότητα και το μέγεθος των νανοκρυστάλλων. Με τη συγκεκριμένη μέθοδο κατέστη δυνατό να παρασκευαστούν μεταλλικοί νανοκρυσταλλοί μεγάλης πυκνότητας και ομοιόμορφου μεγέθους σε θερμοκρασία δωματίου (θερμοκρασία υποστρώματος), χωρίς να γίνει επιπλέον ανόπτηση. Αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί μειώνει τον χρόνο (και το κόστος) κατασκευής των νανοκρυστάλλων, καθώς και των δομών που τους περιέχουν.

Γνωρίζοντας με ακρίβεια τον τρόπο ανάπτυξης των μεταλλικών νανοκρυστάλλων πάνω σε άμορφο στρώμα SiO<sub>2</sub>, παρασκευάστηκαν με επιτυχία δομές MOS οι οποίες περιέχουν νανοκρυστάλλους Au. Το στρώμα ελέγχου (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) παρασκευάστηκε σε χαμηλή θερμοκρασία (250 °C), με τον τρόπο αυτό μειώνεται η θερμική καταπόνηση ολόκληρης της δομής MOS καθώς και η πιθανότητα μετακίνησης των παρασκευασθεισών νανοκρυστάλλων. Με χρήση μικροσκοπίου διέλευσης ηλεκτρονίων TEM διαπιστώθηκε ότι οι νανοκρυσταλλοί βρίσκονται στην διεπιφάνεια μεταξύ του οξειδίου σήραγγας και του οξειδίου ελέγχου. Με ηλεκτρικές μετρήσεις βρέθηκε ότι οι δομές αυτές εμφανίζουν φαινόμενο μνήμης, αφού οι χαρακτηριστικές καμπύλες C-V και G-V παρουσιάζουν υστέρηση. Η ύπαρξη υστέρησης δηλώνει ότι στις δομές αυτές έχουμε φόρτιση και εκφόρτιση των μεταλλικών νανοκρυστάλλων με ηλεκτρικά φορτία. Υπολογίστηκε ότι ο κάθε νανοκρυσταλλός φορτίζεται με σχετικά μεγάλο αριθμό ηλεκτρονίων (οπές), λόγω της σχετικά μεγάλης διαμέτρου των νανοκρυστάλλων. Η κατασκευή μικρότερων νανοκρυστάλλων δίνει την δυνατότητα σε κάθε νανοκρυσταλλό να αποθηκεύεται μικρός αριθμός φορτίων, που προσφέρει πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα, αφού είναι δυνατόν να κατασκευαστούν στοιχεία μνήμης με υψηλές ταχύτητες εγγραφής και με πολύ μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Οι δομές που παρασκευάστηκαν παρουσιάζουν στις χαρακτηριστικές C-V και G-V ευρύ παράθυρο μνήμης (μεγάλη τιμή ΔV<sub>FB</sub>) κάτι το οποίο είναι σημαντικό, αφού οι λογικές καταστάσεις “1” και “0” σε μια τέτοια περίπτωση είναι εύκολα διακριτές. Οι συγκεκριμένες δομές είδαμε επίσης ότι παρουσιάζουν σημαντικούς χρόνους διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου στους νανοκρυστάλλους, για το συγκεκριμένο πάχος οξειδίου σήραγγας, κάτι το οποίο τις καθιστά κατάλληλες, για την κατασκευή δομών μόνιμης αποθήκευσης. Η λειτουργία των δομών αυτών ως στοιχείων μνήμης, επιβεβαιώθηκε με την φόρτιση των νανοκρυστάλλων κατά την εφαρμογή

παλμών τάσης με διάρκεια 1s. Λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα αποτελέσματα, η κατασκευασμένες μνήμες έχουν καλή λειτουργία.

Οι μελλοντικές τάσεις στην ερευνα δομής μη πτητικής μνήμης MOS με μεταλλικούς νανοκρυστάλλους ανοπτημένους με laser είναι οι ακόλουθες:

- Μελέτη για μικρότερη επιρροή του στρώματος SiO<sub>2</sub> (οξειδίου σήραγγας) από την ανόπτηση με laser.
- Χρήση μεταλλικών νανοκρυστάλλων άλλων υλικών, για να βελτιωθούν οι ιδιότητες συγκράτησης, σε εφαρμογές NVM.
- Μελέτη άλλων υλικών για οξείδιο φραγής. Χρήση διηλεκτρικού υλικού καλής στοιχειομετρίας, όχι πολυκρυσταλλικού που στα όρια των κόκκων μπορούν να παγιδεύονται φορτία. Στόχος είναι να χρησιμοποιηθεί για οξείδιο πύλης άμορφο οξείδιο όπως το οξείδιο του αφνίου (HfO<sub>2</sub>).
- Εφαρμογή πολύ μεγάλου αριθμού παλμών για τη βελτίωση της ομοιομορφίας και την κατασκευή μικρής διαμέτρου νανοκρυστάλλων.
- Η μελλοντική εργασία απαιτεί περαιτέρω μελέτη των παραμέτρων της ανόπτησης με laser, όπως η διάρκεια του παλμού, η χρονική διάρκεια μεταξύ των παλμών, καθώς και η εφαρμογή συνδυασμού διαφορετικής ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας. Για τη δημιουργία καλύτερα τελειοποιημένων νανοκρυστάλλων, μικρότερων, ομοιόμορφου μεγέθους (χωρίς συνύπαρξη μεγαλύτερων) και με μεγαλύτερη επιφανειακή πυκνότητα, ξεκινώντας από λεπτά ομοιόμορφα στρώματα μετάλλου. Έτσι θα επιτευχθεί βελτίωση της απόδοσης στο χρόνο συγκράτησης του φορτίου. Η βελτιστοποίηση της τεχνικής είναι ο στόχος μιας τέτοιας εργασίας.

### ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΩΝ

<b>Ξενόγλωσσος όρος</b>	<b>Ελληνικός Όρος</b>
<b>Reliability</b>	Αξιοπιστία
<b>Editor</b>	Επιμελητής
<b>Recommendations</b>	Υποδείξεις
<b>Scaling</b>	Σμίκρυνση
<b>Tunneling</b>	Φαινόμενο σήραγγος
<b>In situ</b>	Εσωτερικά
<b>Native oxide</b>	Φυσικό οξείδιο
<b>e-gun evaporator</b>	Εξαχνωτής ηλεκτρονιακής δέσμης
<b>Cathodization</b>	Εφαρμογή θετικής τάσης
<b>Anodization</b>	Εφαρμογή αρνητικής τάσης (Ανοδίωση)
<b>Floating Gate</b>	Αιωρούμενης Πύλης
<b>Source</b>	Πηγή
<b>Drain</b>	Αποστράγγιση
<b>Gate</b>	Πύλη
<b>Annealing</b>	Ανόπτηση
<b>Probe Station</b>	Σταθμός ηλεκτρικών μετρήσεων με ακίδες

Πίνακας 10: Ορολογίες.





**ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ**

EMΠ-NTUA	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο - National Technical University of Athens
ΠΙ-ΥΙ	Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων - University of Ioannina
NCs	Nanocrystals-Νανοκρύσταλλοι
RF	Radio Frequency - Ραδιοσυχνότητα
MOS	Metal Oxide Semiconductor – Μέταλλο Οξείδιο Ημιαγωγός
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy
IR	InfraRed Spectroscopy
RT	Room Temperature
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
SOI	Silicon on Insulator
C-V	Capacitance versus Voltage characteristics
G-V	Conductance versus Voltage characteristics
C <sub>FB</sub>	Flat Band Capacitance
V <sub>FB</sub>	Flat Band Voltage
VLSI	Very Large-Scale Integration
ULSI	Ultra Large-Scale Integration
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
LOCOS	Local Oxidation of Silicon
CVD	Chemical Vapour Deposition
PVD	Physical Vapour Deposition
BNC	Bayonet Neill–Concelman, radio frequency connector used for coaxial cable
Triax	Triaxial connectors, maximum RF shielding and minimum noise radiation is required
ALD	Atomic Layer Deposition
NVM	Non-volatile memory
LSPR	Localized Surface Plasmon Resonance

**Πίνακας 11: Συντμήσεις – αρκτικόλεξα – ακρωνύμια.**



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Ο πίνακας 10 δίνει αναλυτικά και συγκεντρωτικά τις εκφράσεις της πυκνότητας ρεύματος για όλους τους μηχανισμούς αγωγιμότητας που εμφανίζονται στους μονωτές καθώς και την εξάρτηση που εμφανίζουν από την εφαρμοζόμενη τάση και τη θερμοκρασία.

Μηχανισμός	Έκφραση πυκνότητας ρεύματος	Εξάρτηση από V και T
<i>Thermionic emission</i>	$J = A \cdot T^2 \exp \left[ \frac{-q(\phi_B - \sqrt{qE/4\pi\epsilon_r\epsilon_0})}{k_B T} \right]$	$T^2 \exp \left[ \frac{q}{k_B T} (a\sqrt{V} - \phi_B) \right]$
<i>Frenkel-Poole</i>	$J \propto E \exp \left[ \frac{-q(\phi_T - \sqrt{qE/4\pi\epsilon_r\epsilon_0})}{k_B T} \right]$	$V \exp \left[ \frac{q}{k_B T} (2a\sqrt{V} - \phi_B) \right]$
<i>Tunneling</i>	$J \propto E^2 \exp \left[ -\frac{4\sqrt{2m^*}(q\phi_B)^{3/2}}{3qhE} \right]$	$V^2 \exp \left( -\frac{b}{V} \right)$
<i>Space charge limited</i>	$J = \frac{9\epsilon_r\epsilon_0\mu V^2}{8d^3}$	$V^2$
<i>Ohmic</i>	$J \propto E \exp \left[ \frac{-\Delta E_{ac}}{k_B T} \right]$	$V \exp \left( -\frac{c}{T} \right)$
<i>Ionic</i>	$J \propto \frac{E}{T} \exp \left[ -\frac{\Delta E_{ai}}{k_B T} \right]$	$\frac{V}{T} \exp \left( -\frac{l}{T} \right)$

Πίνακας 12: Βασικοί μηχανισμοί αγωγιμότητας σε μονωτές

\*όπου E το ηλεκτρικό πεδίο μέσα στο διηλεκτρικό,  $q\phi_B$  η τιμή του φράγματος δυναμικού, T η απόλυτη θερμοκρασία,  $k_B$  η σταθερά Boltzmann,  $A = (4\pi q m^* k_B^2)/h^3$  η σταθερά Richardson,  $\epsilon_r$  η διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού υλικού,  $\epsilon_0$  η διηλεκτρική σταθερά του κενού, q το φορτίο του ηλεκτρονίου,  $V = Ed$  με d το πάχος του διηλεκτρικού υμενίου και h η σταθερά του Plank.  $a = \sqrt{q/(4\pi\epsilon_r\epsilon_0 d)}$ ,  $\mu$  η ευκινησία των ηλεκτρονίων στο διηλεκτρικό, m η μάζα του ηλεκτρονίου και  $m^*$  η ενεργός μάζα του ηλεκτρονίου.  $\Delta E_{ac} = (E_C - E_F)$  η ενέργεια ενεργοποίησης των ηλεκτρονίων.  $\Delta E_{ai}$  ενέργεια ενεργοποίησης των ιόντων, b, c και l σταθερές [49,122,123].



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

Fluence Number of pulses	200nm/cm <sup>2</sup> 1p	200nm/cm <sup>2</sup> 5p	200nm/cm <sup>2</sup> 5p	200nm/cm <sup>2</sup> 5p	200nm/cm <sup>2</sup> 10p	200nm/cm <sup>2</sup> 10p	200nm/cm <sup>2</sup> 10p	200nm/cm <sup>2</sup> 10p	200nm/cm <sup>2</sup> 15p	200nm/cm <sup>2</sup> 15p	200nm/cm <sup>2</sup> 15p	200nm/cm <sup>2</sup> 15p	200nm/cm <sup>2</sup> 20p	200nm/cm <sup>2</sup> 20p	200nm/cm <sup>2</sup> 20p
Average (nm)	42.8	48.4	58.1	9.1	42.4	56.5	9.2	47.3	47.3	60.8	10.0	42.8	57.0	9.4	
Count (NCS)	215.0	148.0	148.0	67.0	204.0	143.0	61.0	230.0	42.8	159.0	61.0	139.0	140.0	59.0	
MEDIAN (nm)	38.4	60.7	8.0	8.0	40.4	57.5	8.2	42.8	63.6	67.0	10.7	38.3	57.0	9.2	
ST DEV (nm)	29.6	32.8	5.1	5.1	28.5	31.7	5.0	31.4	34.7	34.7	5.0	29.2	32.4	5.1	
Surface (cm <sup>2</sup> )	2.748E-08	2.748E-08	2.748E-08	5.764E-11	2.456E-08	4.195E-09	5.176E-11	4.179E-08	4.179E-08	4.179E-08	5.793E-11	2.647E-08	2.647E-08	2.647E-08	
Area covered by NCS (cm <sup>2</sup> )	4.569E-09	4.511E-09	16.42	0.21	4.170E-09	4.119E-09	0.21	5.822E-09	5.822E-09	5.766E-09	0.14	4.196E-09	4.142E-09	5.321E-11	
% area covered by NCS	16.63	16.42	0.21	0.21	16.98	16.77	0.21	13.93	13.80	13.80	0.14	15.85	15.65	0.20	
Επιφανειακή πυκνότητα (νανοκρυστάλλοι/cm <sup>2</sup> )	7.823E+09	1.00	0.69	0.31	8.308E+09	1.00	0.30	5.504E+09	1.00	0.73	0.27	7.518E+09	1.00	0.70	
Fluence	300nm/cm <sup>2</sup> 1p	300nm/cm <sup>2</sup> 5p	300nm/cm <sup>2</sup> 5p	300nm/cm <sup>2</sup> 5p	300nm/cm <sup>2</sup> 10p	300nm/cm <sup>2</sup> 10p	300nm/cm <sup>2</sup> 10p	300nm/cm <sup>2</sup> 10p	300nm/cm <sup>2</sup> 15p	300nm/cm <sup>2</sup> 15p	300nm/cm <sup>2</sup> 15p	300nm/cm <sup>2</sup> 15p	300nm/cm <sup>2</sup> 20p	300nm/cm <sup>2</sup> 20p	
Average (nm)	22.2	36.2	48.4	9.4	38.7	48.9	10.1	38.2	47.9	10.4	36.7	46.9	10.2		
Count (NCS)	1940.0	546.0	375.0	171.0	557.0	410.0	147.0	464.0	344.0	120.0	559.0	403.0	156.0		
MEDIAN (nm)	21.7	47.6	47.6	9.0	41.0	48.7	10.1	46.0	47.9	9.7	38.3	46.4	9.4		
ST DEV (nm)	9.5	22.3	25.8	5.2	21.7	25.3	5.2	21.5	21.5	25.0	20.9	24.6	5.2		
Surface (cm <sup>2</sup> )	2.192E-08	2.203E-08	2.203E-08	2.203E-08	2.405E-08	2.405E-08	2.405E-08	1.952E-08	1.952E-08	1.952E-08	2.323E-08	2.323E-08	2.323E-08		
Area covered by NCS (cm <sup>2</sup> )	8.879E-09	7.946E-09	7.595E-09	1.515E-10	8.597E-09	8.447E-09	1.493E-10	7.001E-09	6.877E-09	1.241E-10	7.823E-09	7.674E-09	1.553E-10		
% area covered by NCS	40.51	35.16	34.47	0.69	35.74	35.12	0.62	35.86	35.22	0.64	33.71	33.04	0.67		
Επιφανειακή πυκνότητα (νανοκρυστάλλοι/cm <sup>2</sup> )	8.850E+10	2.478E+10	1.00	0.69	2.316E+10	1.00	0.26	2.377E+10	1.00	0.74	0.26	2.407E+10	1.00		
Fluence	400nm/cm <sup>2</sup> 1p	400nm/cm <sup>2</sup> 5p	400nm/cm <sup>2</sup> 5p	400nm/cm <sup>2</sup> 5p	400nm/cm <sup>2</sup> 10p	400nm/cm <sup>2</sup> 10p	400nm/cm <sup>2</sup> 10p	400nm/cm <sup>2</sup> 10p	400nm/cm <sup>2</sup> 15p	400nm/cm <sup>2</sup> 15p	400nm/cm <sup>2</sup> 15p	400nm/cm <sup>2</sup> 15p	400nm/cm <sup>2</sup> 20p	400nm/cm <sup>2</sup> 20p	
Average (nm)	23.7	34.9	45.5	10.4	35.6	46.7	10.6	33.1	45.6	10.7	32.6	43.8	10.2		
Count (NCS)	1337.0	695.0	486.0	209.0	718.0	497.0	221.0	760.0	488.0	272.0	757.0	504.0	253.0		
MEDIAN (nm)	24.1	37.6	45.3	10.3	39.7	47.6	10.3	35.7	46.2	10.6	34.0	44.0	9.7		
ST DEV (nm)	9.6	19.5	23.4	5.5	20.0	24.1	5.6	19.8	24.2	5.8	19.2	23.1	5.6		
Surface (cm <sup>2</sup> )	1.798E-08	2.359E-08	2.359E-08	2.359E-08	2.588E-08	2.588E-08	2.588E-08	2.513E-08	2.513E-08	2.513E-08	2.426E-08	2.426E-08	2.426E-08		
Area covered by NCS (cm <sup>2</sup> )	6.872E-09	8.729E-09	8.512E-09	2.178E-10	9.398E-09	9.160E-09	2.360E-10	8.891E-09	8.599E-09	2.916E-10	8.496E-09	8.243E-09	2.597E-10		
% area covered by NCS	38.23	37.01	36.08	0.92	36.30	35.39	0.91	35.38	34.22	1.16	35.02	33.97	1.05		
Επιφανειακή πυκνότητα (νανοκρυστάλλοι/cm <sup>2</sup> )	7.436E+10	2.946E+10	1.00	0.30	2.774E+10	1.00	0.69	3.025E+10	1.00	0.64	0.36	6.242E+10	1.00		
Fluence	500nm/cm <sup>2</sup> 1p	500nm/cm <sup>2</sup> 5p	500nm/cm <sup>2</sup> 5p	500nm/cm <sup>2</sup> 5p	500nm/cm <sup>2</sup> 10p	500nm/cm <sup>2</sup> 10p	500nm/cm <sup>2</sup> 10p	500nm/cm <sup>2</sup> 15p	500nm/cm <sup>2</sup> 15p	500nm/cm <sup>2</sup> 15p	500nm/cm <sup>2</sup> 15p	500nm/cm <sup>2</sup> 20p	500nm/cm <sup>2</sup> 20p		
Average (nm)	22.1	32.7	43.6	9.5	19.7	43.3	9.1	20.3	43.4	9.5	19.5	42.1	9.8		
Count (NCS)	1695.0	728.0	496.0	232.0	1534.0	477.0	158.0	1518.0	482.0	106.0	1810.0	543.0	1267.0		
MEDIAN (nm)	22.8	37.4	44.0	5.2	11.5	43.8	8.7	12.4	44.5	9.2	42.1	42.1	5.7		
ST DEV (nm)	9.1	18.1	21.9	5.2	17.6	21.1	5.4	17.3	21.1	5.7	16.4	20.2	9.7		
Surface (cm <sup>2</sup> )	2.123E-08	2.352E-08	2.352E-08	2.352E-08	2.360E-08	2.360E-08	2.360E-08	2.432E-08	2.432E-08	2.432E-08	2.656E-08	2.656E-08	2.656E-08		
Area covered by NCS (cm <sup>2</sup> )	7.604E-09	8.006E-09	7.798E-09	2.088E-10	8.398E-09	7.573E-09	8.525E-10	8.457E-09	7.573E-09	8.820E-10	9.199E-09	8.064E-09	1.135E-09		
% area covered by NCS	35.8	34.0	33.2	0.9	35.6	32.1	3.5	34.8	31.1	3.6	34.6	30.4	4.3		
Επιφανειακή πυκνότητα (νανοκρυστάλλοι/cm <sup>2</sup> )	7.984E+10	3.096E+10	1.00	0.86	6.590E+10	1.00	0.31	6.242E+10	1.00	0.31	0.86	6.816E+10	1.00		

Πίνακας 13: Σύγκριση των χαρακτηριστικών των νανοκρυστάλλων (μέση διάμετρος, αριθμός νανοκρυστάλλων, διάμεσος, τυπική απόκλιση, επιφανειακή πυκνότητα), που κατασκευάζονται από διαφορετική ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και διαφορετικό αριθμό παλμών για το δείγμα LKSW07.



**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ**

	Δείγμα	Πάχος χρυσού (nm)	Πάχος SiO <sub>2</sub> (nm)	Μέση Διάμετρος (nm)	Τυπική απόκλιση (nm)	Ομοιογένεια (%)
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	200mJ/cm <sup>2</sup> 5 pulses	5 (NTU)	5 (NTU)	42.8	29.6	69.1
	200mJ/cm <sup>2</sup> 10 pulses	5 (NTU)	5 (NTU)	42.4	28.5	67.3
	200mJ/cm <sup>2</sup> 15 pulses	5 (NTU)	5 (NTU)	47.3	31.4	66.5
	200mJ/cm <sup>2</sup> 20 pulses	5 (NTU)	5 (NTU)	42.8	29.2	68.1
	300mJ/cm <sup>2</sup> 1 pulse	5 (NTU)	5 (NTU)	22.2	9.5	42.6
	300mJ/cm <sup>2</sup> 5 pulses	5 (NTU)	5 (NTU)	36.2	22.3	61.7
	300mJ/cm <sup>2</sup> 10 pulses	5 (NTU)	5 (NTU)	38.7	21.7	56.2
	300mJ/cm <sup>2</sup> 15 pulses	5 (NTU)	5 (NTU)	38.2	21.5	56.3
	300mJ/cm <sup>2</sup> 20 pulses	5 (NTU)	5 (NTU)	36.7	20.9	57.0
	400mJ/cm <sup>2</sup> 1 pulse	5 (NTU)	5 (NTU)	23.7	9.6	40.5
	400mJ/cm <sup>2</sup> 5 pulses	5 (NTU)	5 (NTU)	34.9	19.5	55.7
	400mJ/cm <sup>2</sup> 10 pulses	5 (NTU)	5 (NTU)	35.6	20.0	56.1
	400mJ/cm <sup>2</sup> 15 pulses	5 (NTU)	5 (NTU)	33.1	19.8	59.8
	400mJ/cm <sup>2</sup> 20 pulses	5 (NTU)	5 (NTU)	32.6	19.2	58.8
	500mJ/cm <sup>2</sup> 1 pulses	5 (NTU)	5 (NTU)	22.1	9.1	41.1
	500mJ/cm <sup>2</sup> 5 pulses	5 (NTU)	5 (NTU)	32.7	18.1	55.4
	500mJ/cm <sup>2</sup> 10 pulses	5 (NTU)	5 (NTU)	19.7	17.6	89.1
	500mJ/cm <sup>2</sup> 15 pulses	5 (NTU)	5 (NTU)	20.3	17.3	85.5
500mJ/cm <sup>2</sup> 20 pulses	5 (NTU)	5 (NTU)	19.5	16.4	84.1	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	250mJ/cm <sup>2</sup> 1 pulse	3.2 (NTU)	3.5 (NCSR DEMOKRITOS)	20.1	8.6	42.5
	300mJ/cm <sup>2</sup> 1 pulse	3.2 (NTU)	3.5 (NCSR DEMOKRITOS)	20.6	9.3	45.1
	250mJ/cm <sup>2</sup> 2 pulses	3.2 (NTU)	3.5 (NCSR DEMOKRITOS)	20.5	8.0	39.0
	400mJ/cm <sup>2</sup> 4 pulses	3.2 (NTU)	3.5 (NCSR DEMOKRITOS)	18.4	6.6	35.9
	450mJ/cm <sup>2</sup> 4 pulses	3.2 (NTU)	3.5 (NCSR DEMOKRITOS)	16.9	6.2	36.3
	250mJ/cm <sup>2</sup> 6 pulses	3.2 (NTU)	3.5 (NCSR DEMOKRITOS)	20.8	8.3	40.0
	250mJ/cm <sup>2</sup> 10 pulses	3.2 (NTU)	3.5 (NCSR DEMOKRITOS)	19.5	6.9	35.4
	200mJ/cm <sup>2</sup> 1 pulse	13.6 (NTU)	3.5 (NCSR DEMOKRITOS)	19.2	8.1	42.0
	250mJ/cm <sup>2</sup> 10 pulses	13.6 (NTU)	3.5 (NCSR DEMOKRITOS)	29.2	10.9	37.2

**Πίνακας 14:** Σύγκριση των χαρακτηριστικών των νανοκρυστάλλων (μέση διάμετρος, τυπική απόκλιση και %ομοιογένεια), σε σχέση με το αρχικό πάχος στρώματος χρυσού προς ανόπτηση, το πάχος του οξειδίου σήραγγας SiO<sub>2</sub> και το στρώμα οξειδίου φραγής (SiO<sub>2</sub> ή Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), που κατασκευάζονται από διαφορετική ακτινοβολούμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και διαφορετικό αριθμό παλμών.





## ΦΥΣΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ

<i>Σύμβολο</i>	<i>Ποσότητα</i>	<i>Τιμή</i>	<i>Μονάδα</i>
$\epsilon_0$	Διαπερατότητα κενού	$8,854 \times 10^{-12}$	F/m
$e, q$	Στοιχειώδες φορτίο	$1.602 \times 10^{-19}$	C
$k_B$	Σταθερά Boltzmann	$1.381 \times 10^{-23}$	J/K
$m_0$	Μάζα ελευθέρου ηλεκτρονίου	$9.109 \times 10^{-31}$	kg
$h$	Σταθερά Planck	$6.626 \times 10^{-34}$	J·sec
$\hbar$	Σταθερά Planck δια $2\pi$	$1.055 \times 10^{-34}$	J·sec
$c$	Ταχύτητα του φωτός στο κενό	299792458	m/sec

Πίνακας 15: Φυσικές σταθερές.



## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Pavan et al., FLASH MEMORY CELLS-AN OVERVIEW, PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 85, NO. 8, AUGUST 1997. <https://doi.org/10.1109/5.622505>.
- [2] Munir Nayfeh, Fundamentals and Applications of Nano Silicon in Plasmonics and Fullerenes Current and Future Trends, Elsevier, 2018. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-00112-2>.
- [3] Tiwari S, Rana F, et al. A silicon nanocrystals based memory. Appl Phys Lett 1996; 68:1377. <https://doi.org/10.1063/1.116085>.
- [4] Lee JH, Choi JS, Hong S, Hwang I, Kim Y, Ahn SJ, Park BH, et al. Fabrication and memory effect of Zr nanocrystals embedded in ZrO<sub>2</sub> dielectric layer. Jpn J Appl Phys 2007; 46:L1246–8. <https://doi.org/10.1143/JJAP.46.L1246>.
- [5] Sungsu K, Kyoungah C, Kiyool K, Sangsig K. Memory characteristics of Pt nanoparticle-embedded MOS capacitors fabricated at room temperature. Trans Electr Electron Mater 2012; 13:162–4. <https://doi.org/10.4313/TEEM.2012.13.3.162>.
- [6] Mederos M, Mestanza SNM, Lang R, Doi I, Diniz JA. Germanium nanoparticles grown at different deposition times for memory device applications. Thin Solid Films 2016; 611:39–45. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.05.026>.
- [7] Sargentis Ch, Giannakopoulos K, Travlos A, Tsamakis D. Study of charge storage characteristics of memory devices embedded with metallic nanoparticles. Superlat Microstruct 2008; 44:483–8. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2008.03.003>.
- [8] El-Atab N, Turgut BB, Okyay AK, Nayfeh M, Nayfeh A. Enhanced non-volatile memory characteristics with quattro-layer graphene nanoplatelets vs. 2.85-nm Si nanoparticles with asymmetric Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/HfO<sub>2</sub> tunnel oxide. Nanoscale Res Lett 2015, 10, 1–7. <https://doi.org/10.1186/s11671-015-0957-5>.
- [9] Eun HH, Seung MB, Chan RP, Heesun Y, Jin HH. Fabrication of nano-floating gate memories through atomic layer deposition incorporated with chemically-synthesized ZnO-nanocrystals. Curr Appl Phys 2011; 11:1354–8. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2011.04.002>.
- [10] Feng Li-Wei, et al. Formation and composition of titanium oxinitride nanocrystals synthesized via nitridizing titanium oxide for nonvolatile memory applications. Thin Solid Films 2011; 519:7977–81. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.05.042>.
- [11] Shen Kuan-Yuan, et al. Applying low-energy multipulse excimer laser annealing to improve charge retention of Au nanocrystals embedded MOS capacitors. J Phys D Appl Phys 2015; 48:055101. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/5/055101>.
- [12] Siozios A, Koutsogeorgis DC. Optical encoding by plasmon-based patterning: hard and inorganic materials become photosensitive. Nano Lett 2012;12(1):259–63. <https://doi.org/10.1021/nl2034738>.
- [13] Wang Terry Tai-Jui, Chu Chang-Lung, et al. Formation of iridium nanocrystals with highly thermal stability for the applications of nonvolatile memory device with excellent trapping ability. Appl Phys Lett 2010; 97:143507. <https://doi.org/10.1063/1.3498049>.
- [14] Sargentis Ch, Giannakopoulos K, Travlos A, Tsamakis D. Electrical characterization of MOS memory devices containing metallic nanoparticles and a high-k control oxide layer. Surface Sci 2007;601(13):2859–63. <https://doi.org/10.1016/j.susc.2006.11.064>.
- [15] Ramalingam Balavinayagam, Zheng Haisheng, Gangopadhyay Shubhra. Layer-by-layer charging in non-volatile memory devices using embedded sub-2nm platinum nanoparticles. Appl Phys Lett 2014, 104:143103 <https://doi.org/10.1063/1.4870765>.
- [16] Yun Minseong, Ramalingam Balavinayagam, Gangopadhyay Shubhra. Multi-layer Pt nanoparticle embedded high density non-volatile memory devices. J Electrochem Soc 2012;159(4):H393–9. <https://doi.org/10.1149/2.036204jes>.
- [17] V. Mikhelashvili, B. Meyler, S. Yofis, J. Salzman, M. Garbrecht, T. Cohen-Hyams, W. D. Kaplan and G. Eisensteina, A Nonvolatile Memory Capacitor Based on a Double Gold Nanocrystal Storing Layer and High-k Dielectric Tunneling and Control Layers, Journal of The Electrochemical Society, 157 (4) H463-H469, 2010. <https://doi.org/10.1149/1.3302003>.
- [18] F. M. Yang, T. C. Chang, P. T. Liu, P. H. Yeh, U. S. Chen, Y. C. Yu, J. Y. Lin, S. M. Sze, and J. C. Lou, Using double layer CoSi<sub>2</sub> nanocrystals to improve the memory effects of nonvolatile memory devices, Applied Physics Letters 90, 212108 (2007). <http://doi.org/10.1063/1.2742573>.

- [19] Yun Minseong, Ramalingam Balavinayagam, Gangopadhyay Shubhra. Room temperature observation of size dependent single electron tunneling in a sub-2 nm size tunable Pt nanoparticle embedded metal-oxide-semiconductor structure, *Nanotechnology*, 2011, 22:465201. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/46/465201>.
- [20] Minseong Yun, David W. Mueller, Maruf Hossain, Veena Misra, and Shubhra Gangopadhyay, Sub-2 nm Size-Tunable High-Density Pt Nanoparticle Embedded Nonvolatile Memory, *IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS*, VOL. 30, NO. 12, 2009. <https://doi.org/10.1109/LED.2009.2033618>.
- [21] Osama M. Nayfeh, Dimitri A. Antoniadis, Kevin Mantey, and Munir H. Nayfeh, Memory effects in metal-oxide-semiconductor capacitors incorporating dispensed highly monodisperse 1 nm silicon nanoparticles, *Applied Physics Letters* 90, 153105 (2007). <http://doi.org/10.1063/1.2721145>.
- [22] *Nonvolatile Memory Technologies with Emphasis on Flash: A Comprehensive Guide to Understanding and Using Flash Memory Devices*, 1st Edition, Joe Brewer, Manzur Gill, Wiley-IEEE Press, January 9, 2008.
- [23] Bez, R.; Pirovano, A. (2019). *Advances in Non-Volatile Memory and Storage Technology*. Woodhead Publishing. ISBN 9780081025857.
- [24] "1960 - Metal Oxide Semiconductor (MOS) Transistor Demonstrated". *The Silicon Engine*. Computer History Museum.
- [25] Meena et al.: Overview of emerging nonvolatile memory technologies. *Nanoscale Research Letters* 2014 9:526. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-526>.
- [26] Simone Bertolazzi et al., Nonvolatile Memories Based on Graphene and Related 2D Materials, *Adv.Mater.*2019, 1806663. <https://doi.org/10.1002/adma.201806663>.
- [27] Hussein Nili et al., Donor-Induced Performance Tuning of Amorphous SrTiO<sub>3</sub> Memristive Nanodevices: Multistate Resistive Switching and Mechanical Tunability, *Adv. Funct. Mater.*, 2015, 25, 3172-3182. <https://doi.org/10.1002/adfm.201501019>.
- [28] Sabpreet Bhatti, Rachid Sbiaa, Atsufumi Hirohata, Hideo Ohno, Shunsuke Fukami and S.N. Piramanayagam, Spintronics based random access memory: a review, *Materials Today*, 2017. <http://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.007>.
- [29] Welser J., Wolf S.A., Avouris P., Theis T. (2011) *Applications: Nanoelectronics and Nanomagnetism*. In: *Nanotechnology Research Directions for Societal Needs in 2020*. Science Policy Reports, vol 1. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1168-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1168-6_9).
- [30] R. Sbiaa, H. Meng and S. N. Piramanayagam, Materials with perpendicular magnetic anisotropy for magnetic random access memory, *Phys. Status Solidi RRL* 5, No. 12, 413-419, 2011. <https://doi.org/10.1002/pssr.201105420>.
- [31] D. Takashima, 11th Annual Non-Volatile Memory Technology Symposium Proceeding, Shanghai, Overview of FeRAMs: Trends and perspectives, 2011, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/NVMTS.2011.6137107>.
- [32] R. E. Simpson, P. Fons, A. V. Kolobov, T. Fukaya, M. Krbal, T. Yagi and J. Tominaga, Interfacial phase-change memory, *NATURE NANOTECHNOLOGY*, VOL 6, 2011. <https://doi.org/10.1038/NNANO.2011.96>.
- [33] G. E. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits, Reprinted from *Electronics*, volume 38, number 8, April 19, 1965, pp.114 ff.," in *IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter*, vol. 11, no. 3, pp. 33-35, 2006. <https://doi.org/10.1109/N-SSC.2006.4785860>.
- [34] R. H. Dennard, F. H. Gaensslen, H. Yu, V. L. Rideout, E. Bassous and A. R. LeBlanc, "Design of ion-implanted MOSFET's with very small physical dimensions," in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 9, no. 5, pp. 256-268, 1974. <https://doi.org/10.1109/JSSC.1974.1050511>.
- [35] S. E. Thompson et al., "A logic nanotechnology featuring strained-silicon," in *IEEE Electron Device Letters*, vol. 25, no. 4, pp. 191-193, 2004. <https://doi.org/10.1109/LED.2004.825195>.
- [36] R. Chau, S. Datta, M. Doczy, B. Doyle, J. Kavalieros and M. Metz, "High-k/metal-gate stack and its MOSFET characteristics," in *IEEE Electron Device Letters*, vol. 25, no. 6, pp. 408-410, 2004, <https://doi.org/10.1109/LED.2004.828570>.
- [37] B. S. Doyle et al., "High performance fully-depleted tri-gate CMOS transistors," in *IEEE Electron Device Letters*, vol. 24, no. 4, pp. 263-265, 2003, <https://doi.org/10.1109/LED.2003.810888>.
- [38] S. M. Y. Sherazi et al., Low track height standard cell design in iN7 using scaling boosters. *Proc. of SPIE* Vol. 10148 101480Y-1, 2017. <https://doi.org/10.1117/12.2257658>.

- [39] Sayeef Salahuddin, Kai Ni and Suman Datta, The era of hyper-scaling in electronics, nature electronics, VOL 1, AUGUST 2018, 442–450 <https://doi.org/10.1038/s41928-018-0117-x>.
- [40] J. S. Vetter and S. Mittal, "Opportunities for Nonvolatile Memory Systems in Extreme-Scale High-Performance Computing," in Computing in Science & Engineering, vol. 17, no. 2, pp. 73-82, Mar.-Apr. 2015, <https://doi.org/10.1109/MCSE.2015.4>.
- [41] Ganguly et al., Three-dimensional analytical modeling of nanocrystal memory electrostatics, J. Appl. Phys. 99, 114516 (2006). <https://doi.org/10.1063/1.2202695>.
- [42] Rino Micheloni, Luca Crippa, Alessia Marelli, Inside NAND Flash Memories, ©Springer Science+Business Media B.V. 2010, ISBN 978-90-481-9430-8.
- [43] Huimei Zhou, Bei Li, Zheng Yang, Ning Zhan, Dong Yan, Roger K. Lake, Senior and Jianlin Liu, TiSi<sub>2</sub> Nanocrystal Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor Memory, IEEE TRANSACTIONS ON NANOTECHNOLOGY, VOL. 10, NO. 3, MAY 2011. <https://doi.org/10.1109/tnano.2010.2049271>.
- [44] Jin Lu, Ting-Chang Chang, Yu-Ting Chen, Jheng-Jie Huang, Po-Chun Yang, Shih-Ching Chen, Hui-Chun Huang, Der-Shin Gan, New-Jin Ho, Yi Shi and Ann-Kuo Chu, Enhanced retention characteristic of NiSi<sub>2</sub>/SiN<sub>x</sub> compound nanocrystal memory, Applied Physics Letters 96, 262107 (2010). <http://doi.org/10.1063/1.3457870>.
- [45] Simone Bertolazzi Daria Krasnozhan and Andras Kis, Nonvolatile Memory Cells Based on MoS<sub>2</sub>/Graphene Heterostructures, ACS Nano, 2013, 7, 4, 3246-3252. <https://doi.org/10.1021/nn3059136>.
- [46] Shuai Wang, Jing Pu, Daniel S. H. Chan, Byung Jin Cho and Kian Ping Loh, Wide memory window in graphene oxide charge storage nodes, Applied Physics Letters 96, 143109 (2010). <http://doi.org/10.1063/1.3383234>.
- [47] X. B. Lu and J. Y. Dai, Memory effects of carbon nanotubes as charge storage nodes for floating gate memory applications, Applied Physics Letters 88, 113104 (2006), <https://doi.org/10.1063/1.2179374>.
- [48] Yuan Taur - T. H. Ning: "Fundamentals of Modern VLSI Devices", Cambridge University Press, (2009).
- [49] S. M. SZE & M. K. LEE, Semiconductor Devices Physics and Technology JOHN WILEY & SONS, INC, 3RD EDITION, 2012.
- [50] Ken Uchida Ken Uchida et al, "Analytical Single-Electron Transistor (SET) Model for Design and Analysis of Realistic SET Circuits". Japanese Journal of Applied Physics. 39 (Part 1, No. 4B): 2321–2324, 2000. <https://doi.org/10.1143/JJAP.39.2321>.
- [51] Patel, R., Agrawal, Y. & Parekh, R. Single-electron transistor: review in perspective of theory, modelling, design and fabrication. Microsyst Technol (2020). <https://doi.org/10.1007/s00542-020-05002-5>.
- [52] S. Mahapatra, V. Vaish, C. Wasshuber, K. Banerjee and A. M. Ionescu, "Analytical modeling of single electron transistor for hybrid CMOS-SET analog IC design," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 51, no. 11, pp. 1772-1782, Nov. 2004, <https://doi.org/10.1109/TED.2004.837369>.
- [53] Charles P. Poole Jr., Frank J. Owens, Introduction to Nanotechnology, John Wiley and Sons, 2003.
- [54] Averin, D.V., Likharev, K.K. Coulomb blockade of single-electron tunneling, and coherent oscillations in small tunnel junctions. J Low Temp Phys 62, 345–373 (1986). <https://doi.org/10.1007/BF00683469>.
- [55] Mori et al., THICKNESS SCALING LIMITATION FACTORS OF ONO INTERPOLY DIELECTRIC, IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 43, NO. 1, JANUARY 1996. <https://doi.org/10.1109/16.477592>.
- [56] Dimitrakis Panagiotis. Charge-Trapping Non-Volatile Memories: Volume 1 – Basic and Advanced Devices. NY: Springer; 2015.
- [57] C. Bonafos et al., Si and Ge nanocrystals for future memory devices, Materials Science in Semiconductor Processing 15 (2012) 615–626. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2012.09.004>.
- [58] H. Liu et al., "Core-Shell Germanium–Silicon Nanocrystal Floating Gate for Nonvolatile Memory Applications," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 55, no. 12, pp. 3610-3614, 2008, <https://doi.org/10.1109/TED.2008.2006889>.
- [59] H.G. Yang et al., Nonvolatile memory based on Ge/Si hetero-nanocrystals, Applied Surface Science 224 (2004) 394–398. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2003.08.079>.
- [60] Dimitrakis Panagiotis. Charge-Trapping Non-Volatile Memories, vol. 2. NY: Springer; 2017.

- [61] A. Chandra and B. M. Clemens, Gold nanoparticles via alloy decomposition and their application to nonvolatile memory, *Appl. Phys. Lett.* 87, 253113 (2005). <https://doi.org/10.1063/1.2149512>.
- [62] W. Guan et al., "Analysis of Charge Retention Characteristics for Metal and Semiconductor Nanocrystal Non-volatile Memories," 2007 IEEE Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits, Tainan, 2007, pp. 141-144. <https://doi.org/10.1109/EDSSC.2007.4450082>.
- [63] D. Biswas et al., Size and density-controlled Ag nanocluster embedded MOS structure for memory applications, *Materials Science in Semiconductor Processing* 63 (2017) 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2017.01.015>.
- [64] Tang, R., Huang, K., Lai, H. et al. Charge storage characteristics of Au nanocrystal memory improved by the oxygen vacancy-reduced HfO<sub>2</sub> blocking layer. *Nanoscale Res Lett* 8, 368 (2013). <https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-368>.
- [65] P. K. Singh, G. Bisht, R. Hofmann, K. Singh, N. Krishna and S. Mahapatra, "Metal Nanocrystal Memory with Pt Single- and Dual-Layer NC with Low-Leakage Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Blocking Dielectric," in *IEEE Electron Device Letters*, vol. 29, no. 12, pp. 1389-1391, Dec. 2008. <https://doi.org/10.1109/LED.2008.2007308>.
- [66] Chen et al., Tungsten nanocrystal memory devices improved by supercritical fluid treatment, *Appl. Phys. Lett.* 91, 232104, 2007. <https://doi.org/10.1063/1.2803937>.
- [67] Yang et al., Memory characteristics of Co nanocrystal memory device with HfO<sub>2</sub> as blocking oxide, *Appl. Phys. Lett.* 90, 132102 (2007). <https://doi.org/10.1063/1.2716845>.
- [68] Tan et al., Self-assembly of Ni nanocrystals on HfO<sub>2</sub> and N-assisted Ni confinement for nonvolatile memory application, *Appl. Phys. Lett.* 86, 013107(2005). <http://dx.doi.org/10.1063/1.1846952>.
- [69] Yeh et al., Low-power memory device with NiSi<sub>2</sub> nanocrystals embedded in silicon dioxide layer, *Appl. Phys. Lett.* 87, 193504 (2005). <https://doi.org/10.1063/1.2126150>.
- [70] J. H. Kim et al., Formation and electrical properties of Ni<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub> nanocrystals embedded in a polyimide layers for applications as nonvolatile flash memories, *Appl. Phys. Lett.* 86, 032904 (2005). <https://doi.org/10.1063/1.1850194>.
- [71] W. Banerjee and S. Maikap, "High-k Hf-Based Nanocrystal Memory Capacitors with IrOx Metal Gate for NAND Application," 2009 IEEE International Workshop on Memory Technology, Design, and Testing, Hsinchu, 2009, pp. 31-33. <https://doi.org/10.1109/MTDT.2009.15>.
- [72] Y. Wu, L. Chen, Y. Lin, C. Chang, J. Huang and G. Yu, "Nonvolatile Memory with TiN Nanocrystals Three-Dimensionally Embedded in Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Formed by Spinodal Phase Segregation," in *IEEE Electron Device Letters*, vol. 30, no. 6, pp. 617-619, June 2009. <https://doi.org/10.1109/LED.2009.2020612>.
- [73] B. Park et al., Memory characteristics of Al nanocrystals embedded in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layers, *Microelectronic Engineering* 84 (2007) 1627–1630. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2007.01.203>.
- [74] Yu-Hsien Lin, Chao-Hsin Chien, Ching-Tzung Lin, Chun-Yen Chang and Tan-Fu Lei, "High-performance nonvolatile HfO<sub>2</sub> nanocrystal memory," in *IEEE Electron Device Letters*, vol. 26, no. 3, pp. 154-156, 2005. <https://doi.org/10.1109/LED.2004.842727>.
- [75] S. Yang et al., "High Charge Storage Characteristics of CeO<sub>2</sub> Nanocrystals for Non-volatile Memory Applications," 2008 International Symposium on VLSI Technology, Systems and Applications (VLSI-TSA), Hsinchu, 2008, pp. 48-49, <https://doi.org/10.1109/VTSA.2008.4530792>.
- [76] Ch. Sargentis et al., Fabrication and electrical characterization of a MOS memory device containing self-assembled metallic nanoparticles, *Physica E* 38 (2007) 85–88. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2006.12.024>.
- [77] Kalfagiannis N, Siozios A, Bellas DV, Toliopoulos D, Bowen L, Pliatsikas N, Wayne MC, Kosmodis C, Koutsogeorgis DC, Lidorikis E, Patsalas P. Selective modification of nanoparticle arrays by laser-induced self-assembly (MONA-LISA): putting control into bottom-up plasmonic nanostructuring. *Nanoscale* 2016; 8:8236–44. <https://doi.org/10.1039/C5NR09192F>.
- [78] D. Wellekens et al., "An Ultra-Thin Hybrid Floating Gate Concept for Sub-20nm NAND Flash Technologies," 2011 3rd IEEE International Memory Workshop (IMW), Monterey, CA, 2011, pp. 1-4, <https://doi.org/10.1109/IMW.2011.5873198>.
- [79] K. Lance Kelly, Eduardo Coronado, Lin Lin Zhao, and George C. Schatz, The Optical Properties of Metal Nanoparticles: The Influence of Size, Shape, and Dielectric Environment, *The Journal of Physical Chemistry B*, 107 (3), 668-677, 2003. <https://doi.org/10.1021/jp026731y>.
- [80] Gu, X., Qiu, T., Zhang, W. et al., Light-emitting diodes enhanced by localized surface plasmon resonance, *Nanoscale Res Lett* 6, 199, 2011. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-199>.

- [81] Jiang L, Zou CJ, Zhang DH et al, Synergistic modulation of surface interaction to assemble metal nanoparticles into two-dimensional arrays with tunable plasmonic properties, *Small*, 2013 <https://doi.org/10.1002/sml.201302126>.
- [82] M A Garcia. Surface plasmons in metallic nanoparticles: fundamentals and applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing, 2011, 44 (28), pp.283001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/28/283001>.
- [83] Matthew Rycenga, Claire M. Cobley, Jie Zeng, Weiyang Li, Christine H. Moran, Qiang Zhang, Dong Qin, and Younan Xia, Controlling the Synthesis and Assembly of Silver Nanostructures for Plasmonic Applications, *Chemical Reviews*, 111 (6), 3669-3712, 2011. <https://doi.org/10.1021/cr100275d>.
- [84] A.R. Shafiq et al, Nanoparticle Optical Properties: Size Dependence of a Single Gold Spherical Nanoparticle, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1083 012040, 2018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1083/1/012040>.
- [85] Izraeli Tzipora Yael, Non-Volatile Memory based on MOS Capacitors and Metallic Nanoparticles M.Sc Thesis, Technion - Israel Institute of Technology 2016.
- [86] Talbo et al., PHYSICAL SIMULATION OF SILICON-NANOCRYSTAL-BASED SETs, *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES*, VOL. 58, NO. 10, OCTOBER 2011. <https://doi.org/10.1109/TED.2011.2161611>.
- [87] Gay et al., PERFORMANCE AND MODELING OF Si-nc MEMORY DEVICES, *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES*, VOL. 59, NO. 4, APRIL 2012. <https://doi.org/10.1109/TED.2012.2182769>.
- [88] A. Anastassopoulos et al., A 3-dimensional Wentzel–Krammers–Brillouin calculation of the charging and retention times of metal nanoparticles in a dielectric matrix, *Thin Solid Films* 543 (2013) 177–179. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2012.12.108>.
- [89] Amretashis Sengupta, Semi-analytical modeling of Ag and Au nanoparticles and fullerene (C60) embedded gate oxide compound semiconductor MOSFET memory devices, *J Comput Electron* (2012) 11:303–314. <http://dx.doi.org/10.1007/s10825-012-0406-y>.
- [90] P. Singaraju, R. Venkat, Modeling of programming time of nanocrystal flash memory cells, *Physica E* 40 (2008) 2851–2858. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2007.12.033>.
- [91] De Sousa et al., SINGLE-ELECTRON CHARGING AND DISCHARGING ANALYSES IN Ge NCs, *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES*, VOL. 58, NO. 2, FEBRUARY 2011. <https://doi.org/10.1109/TED.2010.2091959>.
- [92] Akeed A. Pavel and Naz Islam, On the Choice of High-κ Dielectrics for Metal Nanocrystal Memory to Improve Data Retention, *IEEE TRANSACTIONS ON NANOTECHNOLOGY*, VOL. 9, NO. 3, MAY 2010. <https://doi.org/10.1109/TNANO.2010.2041934>.
- [93] V. Mikhelashvili et al., A nonvolatile memory capacitor based on Au nanocrystals with HfO<sub>2</sub> tunneling and blocking layers, *Applied Physics Letters* 95, 023104 (2009). <https://doi.org/10.1063/1.3176411>.
- [94] Singh et al., PERFORMANCE AND RELIABILITY STUDY OF FLASH MEMORY DEVICES UNDER NANDIEEE *TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES*, VOL. 57, NO. 8, AUGUST 2010. <https://doi.org/10.1109/TED.2010.2050961>.
- [95] Cheng et al.: STUDY OF MEMORY PERFORMANCE AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS FOR METAL NANOCRYSTAL MEMORIES, 164 *IEEE TRANSACTIONS ON NANOTECHNOLOGY*, VOL. 11, NO. 1, JANUARY 2012. <https://doi.org/10.1109/TNANO.2011.2169278>.
- [96] V. Mikhelashvili et al., Nonvolatile low-voltage memory transistor based on SiO<sub>2</sub> tunneling and HfO<sub>2</sub> blocking layers with charge storage in Au nanocrystals, *Appl. Phys. Lett.* 98, 212902 (2011). <https://doi.org/10.1063/1.3595484>.
- [97] B. De Salvo et al., "How far will silicon nanocrystals push the scaling limits of NVMs technologies?" *IEEE International Electron Devices Meeting 2003*, Washington, DC, USA, 2003, pp. 26.1.1-26.1.4. <https://doi.org/10.1109/IEDM.2003.1269352>.
- [98] Ryu, Huang, and Choi, Vertically standing carbon nanotubes as charge storage nodes for an ultimately scaled nonvolatile memory application, *Appl. Phys. Lett.* 91, 063110, 2007. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2767211>.
- [99] E. K. Evangelou, C. Wiemer, and M. Fanciulli, Electrical and structural characteristics of yttrium oxide films deposited by rf-magnetron sputtering on n-Si, *Journal of Applied Physics* 94, 318 (2003). <https://doi.org/10.1063/1.1580644>.

- [100] J Jang et al., Design of gate stacks for improved program/erase speed, retention and process margin aiming next generation metal nanocrystal memories, *Semicond. Sci. Technol.* 24 (2009) 115009. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/24/11/115009>.
- [101] Robertson J. High dielectric constant oxides. *Eur Phys J Appl Phys* 2004; 28:265–91. <https://doi.org/10.1051/epjap:2004206>.
- [102] Nicollian EH, Brews JR. Bell Laboratories Murray Hill, New Jersey, A John Wiley & Sons, MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology; 1982.
- [103] S. KAR, DETERMINATION OF Si-METAL WORK FUNCTION DIFFERENCES BY MOS CAPACITANCE TECHNIQUE, *Solid-State Electronics*, 1975, Vol. 18, pp. W-181. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(75\)90100-8](https://doi.org/10.1016/0038-1101(75)90100-8).
- [104] Dimoulas et al., Structural and electrical quality of the high-k dielectric Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on Si (001): Dependence on growth parameters, *Journal of Applied Physics* 92, 426 (2002). <https://doi.org/10.1063/1.1483379>.
- [105] JEDEC STANDARD, JESD47, Stress-Test-Driven Qualification of Integrated Circuits, 2018.
- [106] JEDEC STANDARD, JESD22-A117E, ELECTRICALLY ERASABLE PROGRAMMABLE ROM (EEPROM) PROGRAM/ERASE ENDURANCE AND DATA RETENTION TEST, 2018.
- [107] A. Modelli, Reliability of thin dielectric for non-volatile applications, *Microelectronic Engineering* 48 (1999) 403-410. [https://doi.org/10.1016/S0167-9317\(99\)00414-1](https://doi.org/10.1016/S0167-9317(99)00414-1).
- [108] Jae-Duk Lee, Jeong-Hyuk Choi, Donggun Park and Kinam Kim, "Effects of interface trap generation and annihilation on the data retention characteristics of flash memory cells," in *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 4, no. 1, pp. 110-117, 2004. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2004.824360>.
- [109] Sargentis Ch, et al. Dynamic behavior of charge in MOS devices embedded with Pt and Au nanoparticles. *Mater Sci Semicond Process* 2009; 12:57–63. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2009.09.002>.
- [110] Guan Weihua, Long Shibing, Liu Ming, Li Zhigang, Yuan Hu, Qi Liu J, et al. Fabrication and charging characteristics of MOS capacitor structure with metal nanocrystals embedded in gate oxide. *J Phys D: Appl Phys* 2007; 40:2754–8. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/9/012>.
- [111] Stella Meiyu, Huang, Suresh Vignesh, Chan Mei Yin, Ma Yu Wei, Lee Pooi See, Krishnamoorthy Sivashankar, Srinivasan MP. Multi-layered metal nanocrystals in a sol-gel spin-on-glass matrix for flash memory applications. *Mater Chem Phys* 2017; 186:36–43. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2016.10.023>.
- [112] Qian Shi-Bing, Wang Yong-Ping, Shao Yan, Liu Wen-Jun, Ding Shi-Jin. Plasma-assisted atomic layer deposition of high-density Ni nanoparticles for amorphous In-Ga-Zn-O thin film transistor memory. *Nanoscale Res Lett* 2017;12:138. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-1925-z>.
- [113] Koh BH, Kan EWH, Chim WK, Choi WK, Antoniadis DA, Fitzgerald EA. Traps in germanium nanocrystal memory and effect on charge retention: modeling and experimental measurements. *J Appl Phys* 2005;97:124305. <https://doi.org/10.1063/1.1931031>.
- [114] Dimitrakis P, Normand P, Ioannou-Sougleridis V, Bonafos C, Schamm-Chardon S, Ben Assayagand G, Iliopoulos E, Quantum dots for memory applications, *Phys Status Solidi* 2013; A 210(8):1490–504. <https://doi.org/10.1002/pssa.201300029>.
- [115] Rao RA, et al., Silicon nanocrystal based memory devices for NVM and DRAM applications, *Solid-State Electron* 2004;48:1463–73. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2004.03.021>.
- [116] Busseret C, Ferraton S, Montes L, Zimmermann J., A three charge-states model for silicon nanocrystals nonvolatile memories, *IEEE Trans Electron Dev* 2006;53:1. <https://doi.org/10.1109/TED.2005.860630>.
- [117] Busseret C, Souifi A, Baron T, Guillot G, Discharge mechanisms modeling in LPCVD silicon nanocrystals using C-V and capacitance transient techniques, *Superlattices Microstruct* 2000;28:493–500. <https://doi.org/10.1006/spmi.2000.0953>.
- [118] S.-C. Chen et al., Nonvolatile memory effect of tungsten nanocrystals under oxygen plasma treatments, *Thin Solid Films* 518 (2010) 7339–7342. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.04.107>.
- [119] Bei Li, Jianlin Liu, Gann Reuben D, Yarmoff Jory A, Zhu Yu, Vapor–Solid–Solid growth of NiSi<sub>2</sub> nanocrystals for memory application, *IEEE Trans Nanotechnol* 2011;10(5). <https://doi.org/10.1109/TNANO.2011.2112774>.



- [120] Tsung-Yu Chiang, Tien-Sheng Chao, Yi-Hong Wu, Wen-Luh Yang, High-program/erase-speed SONOS with in situ silicon nanocrystals, IEEE Electron Dev Lett; 2008 29(10). <https://doi.org/10.1109/LED.2008.2002944>.
- [121] Shulong Wang, Yuhai Chen, Hongxia Liu, and Hailin Zhang, The performance of  $Y_2O_3$  as interface layer between  $La_2O_3$  and p-type silicon substrate, AIP Advances 6, 115309 (2016), <https://doi.org/10.1063/1.4967507>.
- [122] Fu-Chien Chiu, A Review on Conduction Mechanisms in Dielectric Films, Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2014, Article ID 578168, 18 pages, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/578168>.
- [123] M. Lenzlinger and E. H. Snow, Fowler-Nordheim Tunneling into Thermally Grown  $SiO_2$ , J. Appl. Phys. 40, 278 (1969). <https://doi.org/10.1063/1.1657043>.