



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

**Σχεδιασμός και κατασκευή κυκλώματος παραγωγής παλμών υψηλής
ενέργειας και μικρής χρονικής διάρκειας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χαράλαμπος Α. Τσιούστας

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Πολιτόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Σχεδιασμός και κατασκευή κυκλώματος παραγωγής παλμών υψηλής ενέργειας και μικρής χρονικής διάρκειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χαράλαμπος Α. Τσιούστας

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Πολιτόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τον Μάρτιο 2017.

.....
Κωνσταντίνος Πολιτόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Καμπουράκης
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γιώργος Ματσόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2018

.....
Χαράλαμπος Α. Τσιούστας

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Χαράλαμπος Α. Τσιούστας, 2018.

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 ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή κύκλωματος παλμών υψηλής έντασης και μικρής χρονικής διάρκειας, για την τροφοδοσία ενός διοδικού Laser, με στόχο τη δημιουργία nanosecond φωτεινών παλμών υψηλής έντασης. Οι φωτεινοί αυτοί παλμοί είναι αναγκαίοι στην Βιοϊατρική και μπορούν να συμβάλλουν στην κατασκευή συστημάτων, για την ανίχνευση ή και για την καταστροφή καρκινικών κυττάρων (Φωτοδυναμική θεραπεία - PDT).

Η παρούσα εργασία εστιάζει στο ηλεκτρονικό κύκλωμα οδήγησης ενός διοδικού Laser. Ο απαιτούμενος φωτεινός παλμός υψηλής έντασης, χρειάζεται να είναι της τάξης των nanosecond. Αυτό από την πλευρά της Ηλεκτρονικής δημιουργεί απαιτήσεις παλμών ρεύματος της τάξης των 10 Ampere. Αναφέρουμε ότι ο λόγος που θέλουμε ισχυρό παλμό, είναι για να μπορέσουν τα φωτόνια να φτάσουν σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βάθος, τα οποία θα είναι δυνατόν να προκαλέσουν φωτοδυναμική θεραπεία. Θέλουμε παλμό μικρής χρονικής διάρκειας έτσι ώστε η συνολική απορροφηθείσα ενέργεια να είναι πολύ μικρή, ώστε να μην αλλοιωθεί ο βιολογικός ιστός.

Η δημιουργία ενός παλμού αυτής της τάξης των ρευμάτων και των χρόνων, παρουσιάζει πολλά κατασκευαστικά προβλήματα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά στοιχεία εμπορίου για να μπορεί να κατασκευαστεί το κύκλωμα και αυτό μας περιορίζει τις ευελιξίες σχεδιασμού.

Το βασικό κύκλωμα οδήγησης αποτελείται από τα εξής στάδια: το προενισχυτικό στάδιο, τον ενισχυτή ρεύματος και το τελικό στάδιο οδήγησης Laser. Το προενισχυτικό στάδιο συνδέει έναν Driver τύπου LVPECL, ο οποίος δημιουργεί τον παλμό με τον ενισχυτή ρεύματος. Ο ενισχυτής ρεύματος δημιουργείται με power mosfet transistor και δημιουργεί έναν ικανοποιητικό παλμό για την οδήγηση του τελικού σταδίου. Το τελικό στάδιο λειτουργεί με πολλαπλά παράλληλα συνδεδεμένα power mosfet τα οποία συμπεριφέρονται ως διακόπτες για την οδήγηση του Laser. Παράλληλα με τα παραπάνω τμήματα υπάρχει έλεγχος της θερμοκρασίας των ηλεκτρονικών στοιχείων λόγω των υψηλών ρευμάτων. Το τελικό αποτέλεσμα του σχεδιασμού είναι η δημιουργία παλμών 1.8 – 40 nanosecond με ρεύματα της τάξης από 1 – 17 Ampere.

Στα πρώτα κεφάλαια περιγράφονται τα φυσικά φαινόμενα της επίδρασης του φωτός με την ύλη, την χρήση τους στην Βιοϊατρική τεχνολογία και στην λειτουργία των Laser. Τα φαινόμενα αυτά αναλύονται για να αναδειχθεί η χρησιμότητα της δημιουργίας του ηλεκτρονικού συστήματος. Στα επόμενα αναφερόμαστε στο ηλεκτρονικό κύκλωμα, την ανάλυση και τον σχεδιασμό του.

Λέξεις Κλειδιά

Κύκλωμα οδήγησης παλμικού Laser, τροφοδοτικό παλμού υψηλής έντασης πολύ μικρής χρονικής διάρκειας, nanosecond παλμοί ρεύματος

Abstract

The purpose of this diploma thesis is to design and manufacture a circuit with high-intensity and short-time pulses, for the supply of a diode Laser, for the purpose of generating nanoseconds luminous pulses of high intensity. These luminous pulses are necessary in Biomedicine and may contribute to the construction of systems, for the detection and / or destruction of cancer cells (PDT).

This paper focuses on the electronics circuitry for the drive of a laser diode. The required light pulse of high intensity, needs to be of the order of nanoseconds. This from the point of view of electronics generates the requirements for current pulses of 10 Ampere. We mention that the reason we want a powerfull pulse, is to allow the photons to reach as much depth as possible, which can cause photodynamic therapy. We want a short duration pulse so that the total absorbed energy is too small, so that the biological tissue does not deteriorate.

The creation of a pulse of this class of currents and times, presents many structural problems. In the present work electronic commerce elements are used to make the circuitry and this limits our design flexibility.

The basic driving circuit consists of the following stages: the preamplifier stage, the current amplifier and the final laser driving stage. The preamplifier stage connects a LVPECL Driver, which generates the pulse with the current amplifier. The current amplifier is generated by power mosfet transistor and generates a satisfactory pulse to drive the final stage. The final stage works with multiple parallel power mosfet transistor that act as switches for driving the Laser. Along with the above parts there is a control of the temperature of the electronic components due to the high currents. The final result of the design is the generation of pulses of 1.8 - 40 nanoseconds with currents ranging from 1 - 17 Ampere.

The first chapters describe the physical phenomena of the effect of light on matter, its use in Biomedical Technology and the operation of Laser. These phenomena are analyzed to show the usefulness of creating the electronic system. In the next we refer to the electronic circuit, its analysis and its design.

Key words

Laser pulse drive circuit, high intensity and very short duration pulse power supply, nanosecond current pulses

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Πολιτόπουλο για την ευκαιρία εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής και για την πολύτιμη καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Η άρτια συνεργασία μας αποτέλεσε βασικό συστατικό της ευχάριστης διεκπεραίωσης της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης στον υποψήφιο διδάκτορα του εργαστηρίου Βιοϊατρικής Οπτικής και Εφαρμοσμένης Βιοφυσικής Αναστάσιο Γεωργακόπουλο, για τις κρίσιμες συμβουλές του και τη διαθεσιμότητά του να με υποστηρίξει όποτε του ζητήθηκε.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου, συμφοιτητές και μη, για τον ξεχωριστό ρόλο του καθενός στο να κυλήσουν τόσο ευχάριστα τα χρόνια των σπουδών μου.

Επίσης, οφείλω να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στη Γκέλυ, για τη βοήθεια και την συμπαράσταση της. Η παρουσία της μετέτρεψε όλα αυτά τα χρόνια, σε ένα όμορφο ταξίδι.

Τέλος, δεν μπορώ παρά να εκφράσω την αμέτρητη ευγνωμοσύνη μου προς τους γονείς μου, Ανδρέα και Έλενα που με καθοδήγησαν πάντα με αγάπη, για την κάθε λογής στήριξη που αδιάκοπα μου προσέφεραν.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract.....	7
Ευχαριστίες.....	9
Περιεχόμενα.....	11
Ευρετήριο Εικόνων.....	13
1. Ενδομοριακές διεργασίες λόγω απορρόφησης φωτός.....	16
1.1. Εισαγωγή.....	16
1.2. Φωταύγεια.....	16
1.3. Ενδομοριακές διεργασίες.....	17
1.3.1. Διαγράμματα Jablonski.....	17
1.3.2. Απορρόφηση.....	18
1.3.3. Εσωτερική μετάβαση.....	19
1.3.4. Φθορισμός.....	19
1.3.5. Φωσφορισμός.....	20
1.3.6. Διεσωτερική μετατροπή.....	20
2. Ο ρόλος των φωτοευαίσθητοποιητών στον εντοπισμό και την καταστροφή των καρκινικών κυττάρων.....	22
2.1. Εισαγωγή.....	22
2.2. Καρκινικά κύτταρα.....	22
2.3. Φωτοευαίσθητοποιητές.....	23
2.3.1. Εντοπισμός καρκινικών κυττάρων.....	23
2.3.2. Φωτοδυναμική θεραπεία.....	24
3. Laser.....	26
3.1. Εισαγωγή.....	26
3.2. Η λειτουργία των Laser.....	26
3.2.1. Αντιστροφή πληθυσμών.....	28
3.2.2. Οπτική ανατροφοδότηση.....	29
3.3. Τα διοδικά Laser.....	29
4. Κατασκευή κυκλώματος.....	31
4.1. Εισαγωγή.....	31
4.2. Προβλήματα κατά την πορεία της κατασκευής του κυκλώματος.....	31
4.3. Εξάρτηση των ηλεκτρονικών στοιχείων από τη θερμοκρασία.....	33
4.4. Block Διάγραμμα του κυκλώματος.....	36
4.5. Βασικά ηλεκτρονικά στοιχεία του κυκλώματος.....	37
4.5.1. Η λειτουργία του power pmos ως διακόπτης.....	37

4.5.2. Η λειτουργία των BJT transistor ως διακόπτες.....	41
4.5.3. Η χρήση Driver με ECL λογική.....	43
4.6. Η λειτουργία του κυκλώματος.....	44
4.6.1. Το προενισχυτικό στάδιο.....	44
4.6.2. Ενισχυτής ρεύματος.....	47
4.6.3. Ελεγκτής.....	49
4.6.4. Το στάδιο οδήγησης του Laser.....	52
4.7. Το συνολικό κύκλωμα.....	55
4.8. Τελικά αποτελέσματα.....	56
4.9. Παραλλαγές.....	61
4.10. Τα βέλτιστα αποτελέσματα.....	65
5. Συμπεράσματα – Μελλοντική εργασία.....	68
5.1. Μελλοντική έρευνα.....	69
Βιβλιογραφία.....	70

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1.1: Διάγραμμα Jablonski.....	17
Εικόνα 1.2: Απορρόφηση.....	18
Εικόνα 1.3: Δονητική χαλάρωση και εσωτερική μετάβαση.....	19
Εικόνα 1.4: Φθορισμός.....	20
Εικόνα 1.5: Ενδομοριακές Διεργασίες λόγω απορρόφησης φωτός.....	21
Εικόνα 2.1: Α – κανονική διαίρεση κυττάρων, Β – καρκινική διαίρεση κυττάρων, 1 – απόπτωση, 2 – κατεστραμμένο κύτταρο.....	21
Εικόνα 2.2: Κακοήθεια πριν και μετά την χορήγηση φωτοευαισθητοποιητή και την έκθεσή του σε μπλε φως.....	23
Εικόνα 2.3: Καρκίνωμα βασικών κυττάρων πριν και μετά την χορήγηση φωτοευαισθητοποιητή και την έκθεσή του σε μπλε φως.....	24
Εικόνα 2.4: Ενεργειακό διάγραμμα για φωτοδυναμική θεραπεία μέσω παραγωγής μονήρους οξυγόνου $^1\text{O}_2$	25
Εικόνα 2.5: Τυπικό βάθος διείσδυσης του φωτός σε ιστούς σε συνάρτηση με το μήκος κύματος..	25
Εικόνα 3.1: Διοδικό Laser (Diomed 630) – Metal halide lamp (Waldmann PDT 1200).....	26
Εικόνα 3.2: Οι διεργασίες της απορρόφησης (α), της αυθόρμητης εκπομπής (β) και της εξαναγκασμένης εκπομπής (γ).....	27
Εικόνα 3.3: Πληθυσμός ενός ενεργειακού συστήματος δύο επιπέδων (α) σε θερμική ισορροπία και (β) αφού έχει επιτευχθεί αντιστροφή πληθυσμών.....	28
Εικόνα 3.4: Ενεργειακό διάγραμμα Laser τεσσάρων στάθμεων.....	28
Εικόνα 3.5: Συνήθεις συνδυασμοί κατόπτρων κοιλότητας Laser.....	29
Εικόνα 3.6: Διοδικό Laser GaAs ομοεπαφής.....	29
Εικόνα 3.7: Οι ενεργειακές ζώνες ενός ημιαγωγού σε θερμική ισορροπία (α). Δημιουργία και επανασύνδεση ζευγών ηλεκτρονίων – οπών (β).....	30
Εικόνα 4.1: Διαδικασίες για την τελική ανίχνευση καρκινικών κυττάρων.....	31
Εικόνα 4.2: Αργή φόρτιση και εκφόρτιση πυκνωτή.....	32
Εικόνα 4.3: Ηλεκτρικό ανάλογο.....	34
Εικόνα 4.4: Αναλυτικότερο ηλεκτρικό μοντέλο.....	34
Εικόνα 4.5: Γειωμένο θερμικό μοντέλο.....	34
Εικόνα 4.6: Θερμοκρασία ηλεκτρονικών στοιχείων σε συνάρτηση με τον χρόνο.....	35
Εικόνα 4.7: Ο παλμός οδήγησης Laser (κόκκινο) και ο παλμός εισόδου (μπλε).....	36

Εικόνα 4.8: Block Διάγραμμα του κυκλώματος.....	36
Εικόνα 4.9: Mosfet ισχύος (α) I_D - V_{GS} χαρακτηριστική (β) ισοδύναμο κυκλωματικό μοντέλο για λειτουργία ως διακόπτης.....	37
Εικόνα 4.10: Λειτουργία ως διακόπτης (α) κύκλωμα (β) V_{GS} και V_{DS} κυματομορφές.....	38
Εικόνα 4.11: Φορτίο στο Gate (α) Test Κύκλωμα (β) Gate και Drain κυματομορφές.....	39
Εικόνα 4.12: I-V χαρακτηριστικές των power nmos.....	40
Εικόνα 4.13: Λειτουργία στην περιοχή αποκοπής για ένα e-MOSFET αντιστοιχεί σε έναν ανοικτό διακόπτη.....	40
Εικόνα 4.14: Λειτουργία στην περιοχή κορεσμού για ένα e-MOSFET αντιστοιχεί σε έναν κλειστό διακόπτη.....	41
Εικόνα 4.15: Κύκλωμα κοινού εκπομπού.....	41
Εικόνα 4.16: Ισοδύναμο κυκλωματικό μοντέλο του κορεσμένου transistor.....	42
Εικόνα 4.17: Προενισχυτικό στάδιο.....	44
Εικόνα 4.18: Οι τάσεις συλλέκτης-βάση (πράσινο), βάση-συλλέκτης (κόκκινο) του προενισχυτικού σταδίου και V_{in} (μπλε).....	45
Εικόνα 4.19: Η τάση εισόδου V_{in} (μπλε) και η τάση εξόδου V_1 (κόκκινο) του προενισχυτικού σταδίου και το ρεύμα συλλέκτη I_C (πράσινο) του κάθε transistor.....	46
Εικόνα 4.20: Ενισχυτής ρεύματος.....	47
Εικόνα 4.21: Οι τάσεις V_{in} (πράσινο), V_1 (κόκκινο) και V_2 (μπλε).....	48
Εικόνα 4.22: Η είσοδος V_{in} (πράσινο) και το ρεύμα I_D (κόκκινο) του mosfet ισχύος του ενισχυτή ρεύματος.....	48
Εικόνα 4.23: Ελεγκτής θερμοκρασίας των ηλεκτρονικών στοιχείων και ενισχυτής ρεύματος.....	49
Εικόνα 4.24: Οι τάσεις V_{in} (πράσινο), V_{bias} (κόκκινο), V_{BE} (μπλε) και V_{CB} (κίτρινο) του transistor U_7	50
Εικόνα 4.25: Οι τάσεις V_{in} (πράσινο), V_{bias} (κόκκινο), V_C (μπλε) του transistor U_7 και το ρεύμα I_D (γαλάζιο) του mosfet ισχύος U_5	51
Εικόνα 4.26: Το στάδιο οδήγησης του Laser.....	52
Εικόνα 4.27: Η τάση V_2 και η τάση v_D των transistor U_8 , U_9 , U_{10} και U_{11}	53
Εικόνα 4.28: Το ρεύμα I_D του transistor U_5 πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) την αντικατάσταση του πυκνωτή C_5 από το στάδιο οδήγησης του Laser.....	53
Εικόνα 4.29: Το συνολικό κύκλωμα.....	55
Εικόνα 4.30: Ο παλμός οδήγησης του Laser για V_{in} με pulse width=40ns.....	56
Εικόνα 4.31: Ο παλμός οδήγησης του Laser για V_{in} με pulse width=20ns.....	57

Εικόνα 4.32: Ο παλμός οδήγησης του Laser για V_{in} με pulse width=10ns.....	58
Εικόνα 4.33: Ο παλμός οδήγησης του Laser για V_{in} με pulse width=5ns.....	59
Εικόνα 4.34: Ο παλμός οδήγησης του Laser για V_{in} με pulse width=10ns στο χρονικό διάστημα 0.8-2.2us.....	60
Εικόνα 4.35: Το προενισχυτικό στάδιο της πρώτης παραλλαγής.....	61
Εικόνα 4.36: Σύγκριση των παλμών οδήγησης Laser μεταξύ του βασικού κυκλώματος (κόκκινο) και της πρώτης παραλλαγής (μπλε).....	62
Εικόνα 4.37: Σύγκριση των παλμών οδήγησης Laser μεταξύ του βασικού κυκλώματος (κόκκινο) και της δεύτερης παραλλαγής (μπλε).....	63
Εικόνα 4.38: Σύγκριση των παλμών οδήγησης Laser μεταξύ του βασικού κυκλώματος (κόκκινο) και της τρίτης παραλλαγής (μπλε) , V_{in1} (γαλάζιο) και V_{in2} (πράσινο).....	64
Εικόνα 4.39: Παλμός οδήγησης Laser χρονικής διάρκειας 3ns και πλάτους 4.6A.....	65
Εικόνα 4.40: Παλμός οδήγησης Laser χρονικής διάρκειας 2ns και πλάτους 1.4A.....	66
Εικόνα 4.41: Παλμός οδήγησης Laser με πλάτος 1A και χρονικής διάρκειας 1.85ns.....	67

Κεφάλαιο 1

Ενδομοριακές διεργασίες λόγω απορρόφησης φωτός

1.1 Εισαγωγή

Αυτή η διπλωματική εργασία έχει ως απώτερο σκοπό το σχεδιασμό και την κατασκευή κυκλώματος παλμών υψηλής ενέργειας και μικρής χρονικής διάρκειας, για την τροφοδοσία ενός διοδικού Laser. Το κύκλωμα αυτό έχει στόχο να χρησιμοποιηθεί για διάγνωση καρκινικών μορφωμάτων σε ιστό με τη χρήση Laser. Με χρήση του φαινομένου του φθορισμού είναι δυνατή η ανίχνευση καρκινικών κυττάρων. Λόγω του ότι το φαινόμενο του φθορισμού – αυτοφθορισμού, ιδίως των βιολογικών μορίων, είναι πολύ μικρό, για το λόγο αυτό πολλές φορές χρησιμοποιούνται ειδικές φωτοευαίσθητες ουσίες. Με την χρήση αυτών των ουσιών πολλές φορές μπορεί να επιτευχθεί όχι μόνο διάγνωση αλλά και θεραπεία (φωτοδυναμική θεραπεία PDT).

Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται στον γενικό όρο της φωταύγειας και στο φαινόμενο του φθορισμού, ο οποίος είναι μία από τις ενδομοριακές διαδικασίες που μπορεί να ακολουθηθεί από ένα μόριο ώστε να επανέλθει στην βασική του κατάσταση μετά από μία διαδικασία απορρόφησης. Για την καλύτερη κατανόηση των ιδιοτήτων του φθορισμού θα περιγράψουμε αναλυτικά τις διεργασίες που ακολουθούν την απορρόφηση ενέργειας από ένα μόριο και το πως αυτή κατανέμεται στα διάφορα ενεργειακά επίπεδα του μορίου.

1.2 Φωταύγεια

Φωταύγεια [1] είναι ο γενικός όρος που χρησιμοποιείται για την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από ένα υλικό, χωρίς θέρμανση, όταν σε αυτό επιδρά κάποια άλλη μορφή ενέργειας. Παρακάτω αναφέρονται διάφοροι τύποι φωταύγειας [2][3] ανάλογα με τον τρόπο διέγερσής τους:

- Βιοφωταύγεια, η διέγερση γίνεται με βιοχημική αντίδραση.
- Ηλεκτροφωταύγεια, η διέγερση είναι αποτέλεσμα της εφαρμογής ηλεκτρικού πεδίου (το οποίο μπορεί να είναι εναλλασσόμενο ή συνεχές).
- Καθοδοφωταύγεια, η διέγερση γίνεται βομβαρδίζοντας το υλικό με μία δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας.
- Ραδιοφωταύγεια, η διέγερση γίνεται με έκθεση σε ιοντίζουσα ακτινοβολία.
- Τριβοφωταύγεια, η διέγερση γίνεται με συνεχή τριβή.
- Φωτοφωταύγεια, η διέγερση γίνεται με την απορρόφηση φωτονίων.
- Χημифωταύγεια, η διέγερση γίνεται με χημικές αντιδράσεις.

Κατά την διέγερση του υλικού έχουμε μία ηλεκτρονιακή μετάβαση από ένα χαμηλό ενεργειακό επίπεδο E_1 σε ένα υψηλότερο E_2 . Ανεξάρτητα με τον τρόπο διέγερσης, το αποτέλεσμα είναι το ίδιο, έχουμε εκπομπή ακτινοβολίας μήκους κύματος λ_0 :

$$\lambda_0 = \frac{hc}{(E_2 - E_1)}$$

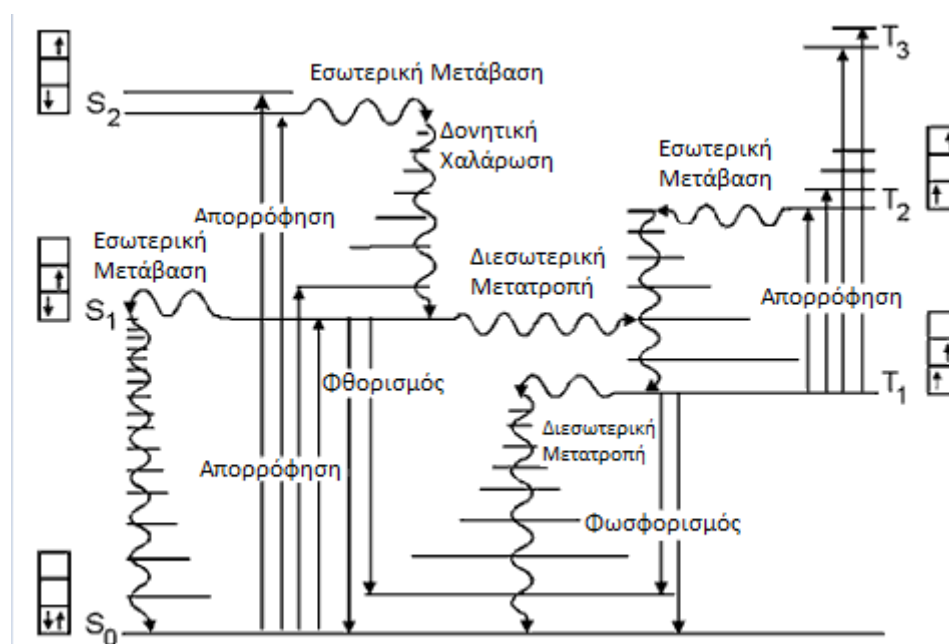
όπου h η σταθερά του Planck, $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec}$

1.3 Ενδομοριακές διεργασίες

1.3.1 Διαγράμματα Jablonski

Στην ενότητα αυτή θα επιχειρήσουμε να περιγράψουμε τι συμβαίνει κατά τη διάρκεια διέγερσης και αποδιέγερσης των μορίων, με τη βοήθεια των Jablonski διαγραμμάτων, τα οποία ονομάστηκαν προς τιμήν του Πολωνού φυσικού Aleksander Jablonski.

Τα διαγράμματα Jablonski [4] είναι ενεργειακά διαγράμματα, με τον κάθετο άξονα να περιγράφει την ενέργεια. Το σχήμα της εικόνας 1.1 περιγράφει τις διάφορες ενδομοριακές διεργασίες, που ξεκινούν μετά την απορρόφηση ενός φωτονίου από το μόριο. Το κουτάκι δίπλα σε κάθε ενεργειακό επίπεδο καταδεικνύει την κατανομή των ηλεκτρονίων και των ηλεκτρονιακών spin του μοριακού τροχιακού. Απεικονίζονται μόνο οι ανώτερες ενεργειακές στάθμες, στις οποίες μπορεί να βρεθεί ένα ηλεκτρόνιο όταν προσλάβει ενέργεια.



Εικόνα 1.1: Διάγραμμα Jablonski.

Επίσης φαίνονται μόνο δύο ηλεκτρόνια, μιας και τα άλλα θεωρούνται ότι είναι ζυγός αριθμός και είναι ζευγαρωμένα ώστε η ολική γωνιακή στροφορμή λόγω spin να ισούται με μηδέν.

Όταν τα ηλεκτρόνια αυτά έχουν αντιπαράλληλα spin, το συνολικό spin είναι μηδέν και η πολλαπλότητα M της κατάστασης είναι 1 ($M=2S+1$) και αυτή η κατάσταση ονομάζεται μονήρης (singlet). Αν τα ηλεκτρόνια έχουν παράλληλα spin, τότε το ολικό spin είναι 1 και η πολλαπλότητα της κατάστασης είναι 3, αυτή η κατάσταση ονομάζεται τριπλή (triplet).

Τα ενεργειακά επίπεδα στα αριστερά αντιστοιχούν σε μονήρεις καταστάσεις, ενώ στα δεξιά απεικονίζονται οι τριπλές(ή πολλαπλές) καταστάσεις. Συνήθως οι τριπλές καταστάσεις βρίσκονται πάντα λίγο χαμηλότερα από τις αντίστοιχες μονήρεις. Οι πενταπλές καταστάσεις αν και υπαρκτές και ενδιαφέρουσες φασματογραφικά δεν απεικονίζονται για λόγους απλότητας.

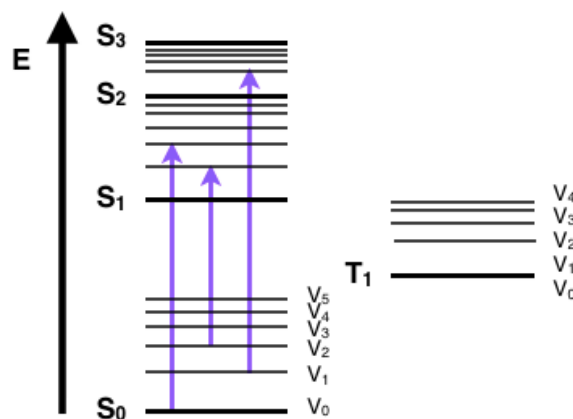
Οι καθαρές ηλεκτρονιακές καταστάσεις αναπαρίστανται με έντονες γραμμές. Με λεπτές γραμμές αναπαρίστανται οι δονητικές καταστάσεις, αυτές αποτελούνται από ένα ή περισσότερα κβάντα δονητικής ενέργειας ενός ή περισσότερων δονητικών ρυθμών υπερτιθέμενων στην καθαρή ηλεκτρονιακή κατάσταση.

Σημειώνουμε ότι οι χρόνοι ζωής που αναφέρουμε δεν είναι οι χρόνοι για να μεταβεί το ηλεκτρόνιο από μια ενεργειακή κατάσταση σε μία άλλη. Οι χρόνοι αυτοί είναι της τάξης 10^{-15} second, μη μετρήσιμοι αλλά υποθετικοί. Οι χρόνοι οι οποίοι αναφερόμαστε είναι οι χρόνοι που απαιτούνται για να μειωθεί ο πληθυσμός στο $1/e$, η μοντελοποίηση αυτών των χρόνων γίνεται με την κατανομή Poisson και ο χρόνος είναι η μέση τιμή της κατανομής.

1.3.2 Απορρόφηση

Το φαινόμενο που θα οδηγήσει ένα ηλεκτρόνιο να μεταβεί σε διαφορετική ενεργειακή θέση είναι η ανταλλαγή ενέργειας. Αν προσδοθεί ενέργεια στο ηλεκτρόνιο τότε λέμε ότι έχουμε απορρόφηση. Αυτό αναπαρίσταται από ένα ευθύγραμμο βέλος που έχει κατεύθυνση προς τα πάνω. Η απορρόφηση είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα ηλεκτρόνιο μεταφέρεται από τη βασική ενεργειακή στάθμη S_0 σε μία υψηλότερη ενεργειακή στάθμη S_i , το άτομο που βρίσκεται πλέον σε αυτή τη κατάσταση ονομάζεται διεγερμένο και η διαδικασία διέγερση. Εάν η ενέργεια αποδοθεί υπό μορφή φωτεινής ακτινοβολίας τότε μόνο ορισμένα μήκη κύματος είναι δυνατά για να πραγματοποιηθεί αυτή μετάβαση, δηλαδή, μήκη κύματος που έχουν ενέργειες που σχετίζονται με τη διαφορά ενέργειας των δύο ενεργειακών καταστάσεων του μορίου, για παράδειγμα για να μεταβεί ένα ηλεκτρόνιο στην αμέσως επόμενη ενεργειακή κατάσταση πρέπει να του δοθεί ενέργεια συχνότητας $\nu = \frac{E_1 - E_0}{h}$.

Η απορρόφηση προς την τριπλή κατάσταση έχει πιθανότητα εμφάνισης πολύ μικρή. Η απορρόφηση είναι μια πολύ γρήγορη μετάβαση, της τάξεως των 10^{-15} second. Η διαδικασία της απορρόφησης φαίνεται στην εικόνα 1.2:



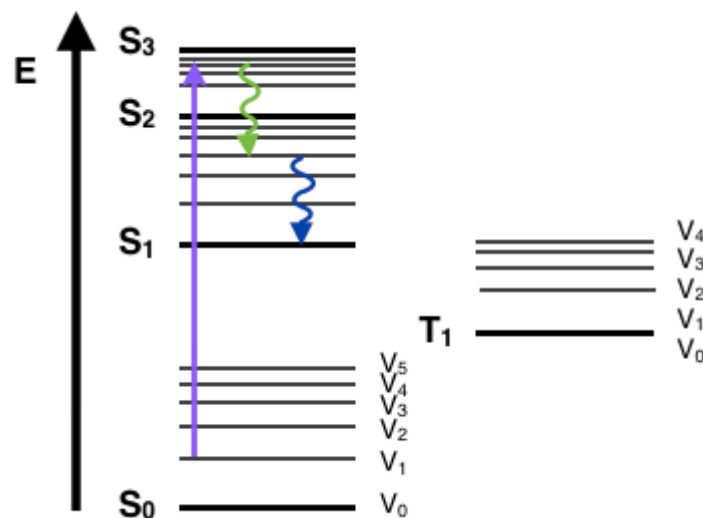
Εικόνα 1.2: Απορρόφηση.

1.3.3 Εσωτερική μετάβαση

Η εσωτερική μετάβαση είναι μία διαδικασία μεταξύ ενεργειακών καταστάσεων ίδιας πολλαπλότητας, για παράδειγμα $S_m \rightarrow S_n$ ή $T_m \rightarrow T_n$. Οι μεταβάσεις αυτές είναι υπερταχείς της τάξεως των 10^{-12} second. Από την πρώτη μονήρη διεγερμένη S_1 στην βασική κατάσταση S_0 , συνήθως η εσωτερική μετάβαση είναι αρκετά πιο αργή της τάξεως των 10^{-6} έως 10^{-12} sec.

Ένας τρόπος διασκόρπισης της ενέργειας μετά την διέγερση του ηλεκτρονίου είναι η δονητική χαλάρωση, η οποία είναι μία μη ακτινοβολούσα διαδικασία και υφίσταται όταν ένα φωτόνιο προσφέρει την ενέργεια του σε ένα ηλεκτρόνιο, το οποίο στην συνέχεια την μεταβιβάζει σε επιμέρους δονητικές κινήσεις ως κινητική ενέργεια. Η κινητική ενέργεια μπορεί να παραμείνει στο συγκεκριμένο μόριο ή να μεταφερθεί στα γειτονικά μόρια. Η δονητική χαλάρωση είναι μία πολύ γρήγορη διαδικασία της τάξεως των 10^{-12} έως και 10^{-10} δευτερόλεπτα.

Οι διαδικασίες της εσωτερικής μετάβασης και της δονητικής χαλάρωσης απεικονίζονται στα διαγράμματα Jablonski ως καμπύλες γραμμές και φαίνονται στην εικόνα 1.3 με πράσινη και μπλε γραμμή αντίστοιχα, ενώ η απορρόφηση με μοβ:



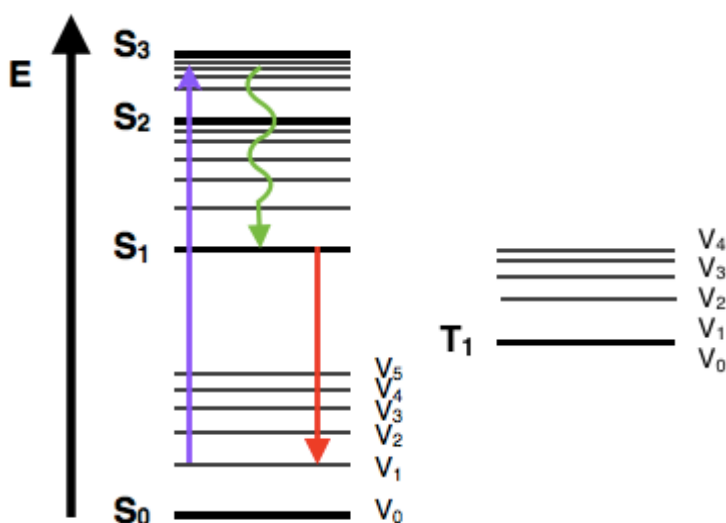
Εικόνα 1.3: Δονητική χαλάρωση και Εσωτερική μετάβαση.

1.3.4 Φθορισμός

Η διαδικασία του φθορισμού προκαλείται από την ακτινοβολούσα μετάβαση μεταξύ καταστάσεων της ίδιας πολλαπλότητας και είναι μία γρήγορη διαδικασία της τάξεως 10^{-9} έως 10^{-6} sec. Η πιο συνήθης μετάβαση φθορισμού στα πολυατομικά μόρια είναι η $S_1 \rightarrow S_0$ αν και ενίοτε παρατηρείται και ο φθορισμός από την $S_2 \rightarrow S_0$.

Αξίζει να σημειωθεί, πως η ενέργεια των εκπεμπόμενων φωτονίων είναι μικρότερη από την ενέργεια που χρειάστηκε για να διεγερθεί το άτομο. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα διότι η μετάβαση κατά την αποδιέγερση συνήθως μεταπίπτει σε ανώτερες δονητικές καταστάσεις v_2, v_3 .

Η διαδικασία του φθορισμού φαίνεται στην εικόνα 1.4, με μπλε ευθεία γραμμή φαίνεται η απορρόφηση και στην συνέχεια με πράσινη κυματιστή γραμμή η εσωτερική μετάβαση, ενώ με κόκκινη ευθεία γραμμή ο φθορισμός.



Εικόνα 1.4: Φθορισμός.

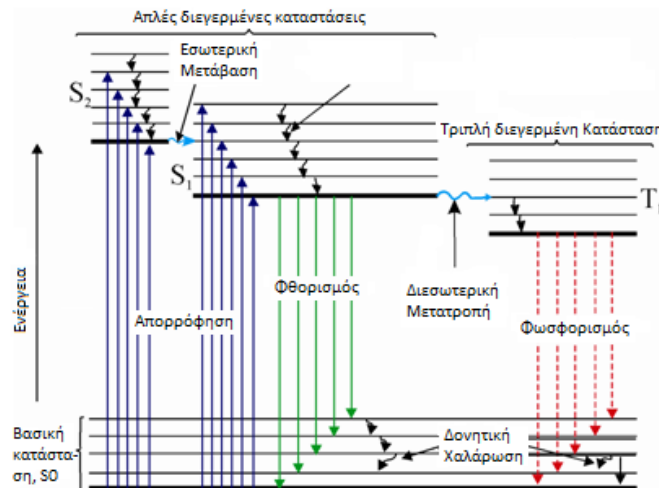
1.3.5 Φωσφορισμός

Ο φωσφορισμός είναι το αποτέλεσμα μετάβασης, μεταξύ σταθμών με διαφορετική πολλαπλότητα και είναι μία ακτινοβολούσα μετάβαση, και κυρίως $T_1 \rightarrow S_0$. Η μετάβαση $T_n \rightarrow S_0$, είναι πιο σπάνια. Η διαδικασία του φωσφορισμού είναι πολύ πιο αργή από τον φθορισμό και είναι της τάξεως 10^{-4} έως 10^3 second.

1.3.6 Διεσωτερική μετατροπή

Η διεσωτερική μετατροπή λαμβάνει χώρα μεταξύ σταθμών με διαφορετική πολλαπλότητα. Η μη ακτινοβολούσα απενεργοποίηση της χαμηλότερης τριπλής ενεργειακής κατάστασης ($T_1 \rightarrow S_0$) συναγωνίζεται με τον φωσφορισμό. Η διεσωτερική μετατροπή ($S_1 \rightarrow T_1$) είναι η κύρια διαδικασία εποίκισης των τριπλών καταστάσεων. Η $S_n \rightarrow T_n$ έχει παρατηρηθεί, αλλά είναι σπάνια. Η $T_1 \rightarrow S_1$ για να λάβει χώρα, χρειάζεται θερμική ενεργοποίηση της T_1 σε ένα δονητικό επίπεδο ισοενεργειακό με την S_1 .

Στην εικόνα 1.5 είναι φανερές οι διαδικασίες της διεσωτερικής μετατροπής και του φωσφορισμού, καθώς και όλες οι διαδικασίες που αναφέραμε παραπάνω. Ακόμα στον πίνακα 1.1 αναφέρεται ο χρόνος ζωής των διαδικασιών:



Εικόνα 1.5: Ενδομοριακές διεργασίες λόγω απορρόφησης φωτός.

Διαδικασία	Μετάβαση	Χρόνος Ζωής (sec)
Απορρόφηση	$S_0 \rightarrow S_n$	10^{-15}
Εσωτερική Μετατροπή	$S_n \rightarrow S_1$	10^{-12}
Δονητική Χαλάρωση	$S_n^* \rightarrow S_n$	$10^{-12} - 10^{-10}$
Φθορισμός	$S_1 \rightarrow S_0$	$10^{-9} - 10^{-6}$
Φωσφορισμός	$T_1 \rightarrow S_0$	$10^{-4} - 10^3$
Διεσωτερική Μετάβαση	$S_1 \rightarrow T_1$	$10^{-11} - 10^{-6}$

Πίνακας 1.1 Χρόνος ζωής διαδικασιών.

Κεφάλαιο 2

Ο ρόλος των φωτοευαίσθητοποιητών στον εντοπισμό και την καταστροφή των καρκινικών κυττάρων

2.1 Εισαγωγή

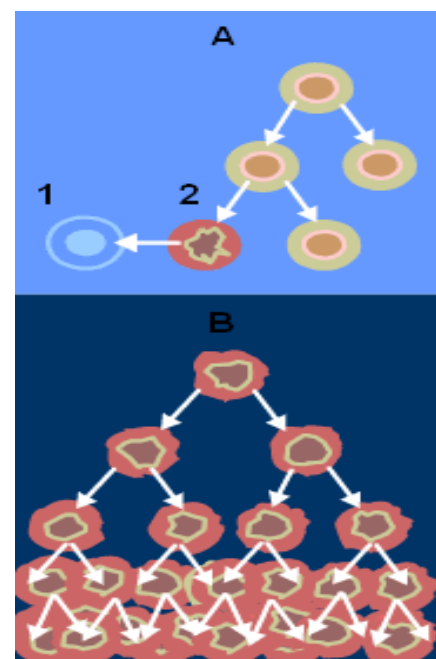
Σε αυτό το κεφάλαιο θα επιχειρήσουμε να περιγράψουμε τα καρκινικά κύτταρα και να εξηγήσουμε τι είναι ο φωτοευαίσθητοποιητής και πως αυτός συμβάλλει στον εντοπισμό και την καταστροφή αυτών. Τέλος θα αναδειχθεί ο ρόλος του φαινομένου του φθορισμού σε αυτή τη διαδικασία και θα γίνει πιο κατανοητή η χρησιμότητά του.

2.2 Καρκινικά κύτταρα

Ο όρος “καρκίνος” [5] δεν αποδίδεται σε μία και μόνο ασθένεια, αλλά σε μία ομάδα ασθενειών που το χαρακτηριστικό τους είναι ο ανεξέλεγκτος πολλαπλασιασμός των κυττάρων.

Τα φυσιολογικά κύτταρα αυξάνονται, διαιρούνται και πεθαίνουν με έναν αυστηρά ελεγχόμενο τρόπο, ενώ τα καρκινικά κύτταρα διαφέρουν διότι συνεχίζουν να διαιρούνται ανεξέλεγκτα, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας μάζας κυττάρων, που ονομάζεται όγκος. Οι όγκοι μπορεί να είναι καλοήθεις ή κακοήθεις. Στην περίπτωση δημιουργίας ενός όγκου, δημιουργούνται νέα αγγεία, τα οποία αποδίδουν τροφή στα καρκινικά κύτταρα. Τα καρκινικά κύτταρα έχουν ως χαρακτηριστικό ότι:

- αντιστέκονται στην απόπτωση.
- πολλαπλασιάζονται παρουσία ή μη αυξητικών παραγόντων.
- αντιστέκονται σε σήματα που σταματούν τον κυτταρικό πολλαπλασιασμό.
- αντιστέκονται στον μηχανισμό γήρανσης.
- κάνουν μεταστάσεις.



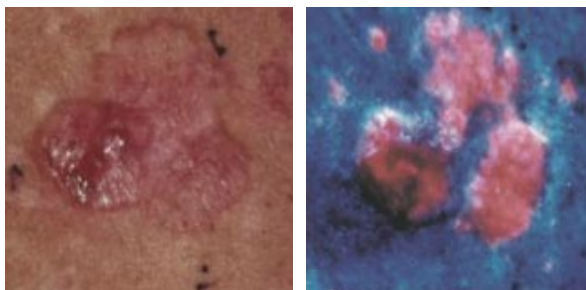
Εικόνα 2.1: A – κανονική διαίρεση κυττάρων, B - καρκινική διαίρεση κυττάρων 1 - απόπτωση, 2 - κατεστραμμένο κύτταρο.

2.3 Φωτοευαισθητοποιητές

Φωτοευαισθητοποιητές ονομάζονται οι χημικές ουσίες, οι οποίες όταν απορροφούν φως προκαλούν φυσικές και χημικές αντιδράσεις.

2.3.1 Εντοπισμός καρκινικών κυττάρων

Πολλές φορές οι γιατροί για να θεραπεύσουν κακοήθεις ιστούς [6] χρειάζεται να γνωρίζουν την έκταση τους καθώς και τα όρια μεταξύ καλοήθους και κακοήθους ιστού πριν προχωρήσουν στην θεραπεία. Για να αποκτήσουν μία πιο ευρεία εικόνα για το τι έχουν να αντιμετωπίσουν χρησιμοποιούν φωτοευαισθητοποιητές. Στην εικόνα 2.2 φαίνεται στα αριστερά μία κακοήθεια, ενώ από τα δεξιά φαίνεται η ίδια κακοήθεια αφού πρώτα έχει χορηγηθεί ο φωτοευαισθητοποιητής και έχει φωτιστεί με μπλε φως, αυτό προκαλεί τον φθορισμό του φωτοευαισθητοποιητή. Οι περιοχές του ροζ-κόκκινου φθορισμού καθορίζουν την έκταση της κακοήθους περιοχής.



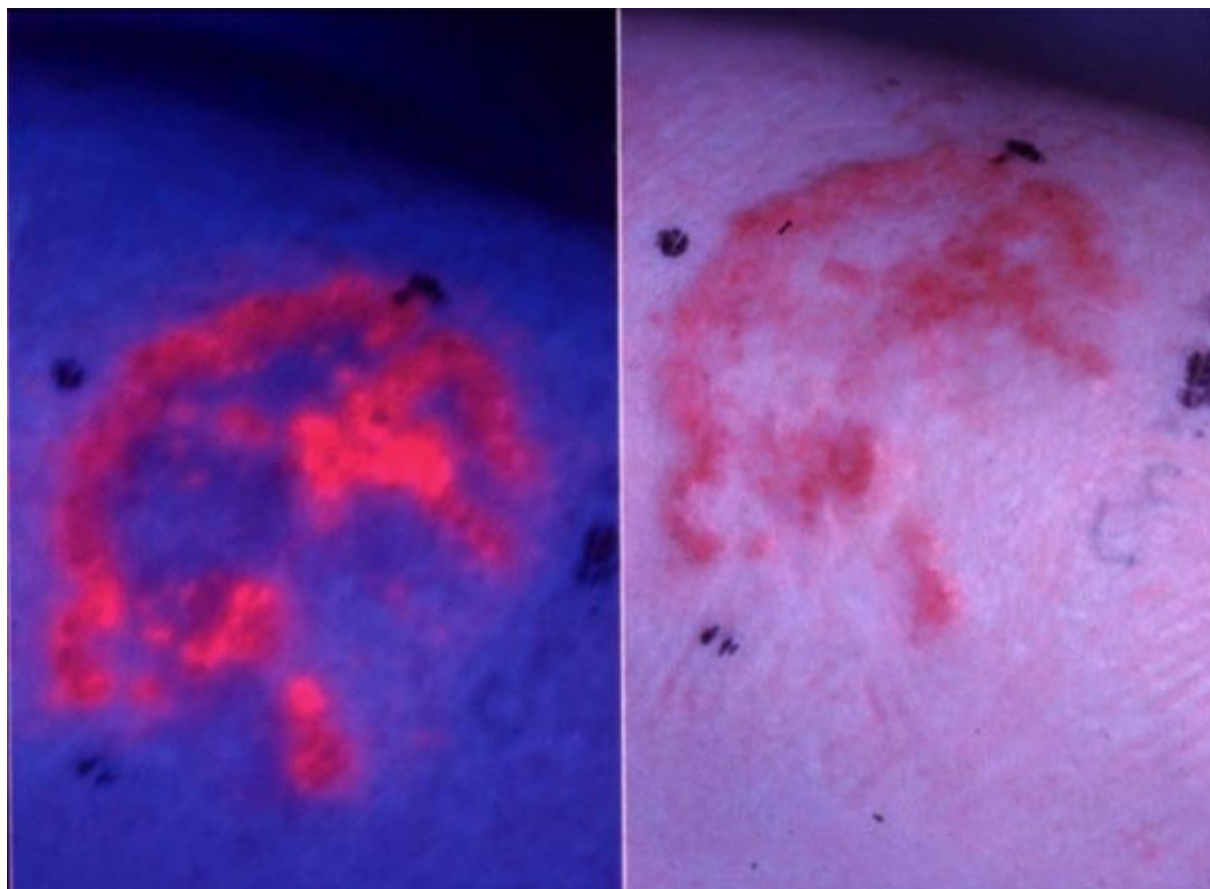
Εικόνα 2.2: Κακοήθεια πριν και μετά την χορήγηση φωτοευαισθητοποιητή και την έκθεση του σε μπλε φως.

Οι περισσότεροι φωτοευαισθητοποιητές απορροφούν μία ποσότητα ενέργειας και στην συνέχεια εκπέμπουν ένα μέρος της ενέργειας από την πρώτη διεγερμένη ενεργειακή κατάσταση μέσω της διαδικασίας του φθορισμού. Το εκπεμπόμενο φως όπως έχουμε αναφέρει είναι συνήθως μικρότερης ενέργειας σε σύγκριση με το απορροφόμενο, επομένως το εκπεμπόμενο φως έχει μεγαλύτερο μήκος κύματος καθώς η ενέργεια ενός φωτονίου είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μήκος κύματος.

Όταν μελετούνται οι φθορίζουσες ιδιότητες των φωτοευαισθητοποιητών, συνήθως δύο διαφορετικά φάσματα μετρούνται, το φάσμα διέγερσης φθορισμού και το φάσμα εκπομπής. Τα φάσμα διέγερσης φθορισμού λαμβάνεται όταν η εκπομπή ανιχνεύεται σε ένα μήκος κύματος και το μήκος κύματος διέγερσης ποικίλλει. Για τους φωτοευαισθητοποιητές που είναι στη μονομερή τους μορφή (μη αδρανείς), το φάσμα διέγερσης φθορισμού και το φάσμα απορρόφησης έχουν το ίδιο σχήμα. Οι αδρανείς φωτοευαισθητοποιητές εμφανίζουν συνήθως χαμηλό ή καθόλου φθορισμό. Ένα φάσμα εκπομπής φθορισμού λαμβάνεται όταν το μήκος κύματος διέγερσης διατηρείται σταθερό και το μήκος κύματος για την ανίχνευση φθορισμού ποικίλλει.

Οι φθορίζουσες ιδιότητες των φωτοευαισθητοποιητών μπορούν να εφαρμοσθούν για την ανίχνευση καρκίνων. Πολλοί φωτοευαισθητοποιητές συσσωρεύονται κατά προτίμηση σε νεοπλασματικούς ιστούς και οι φθορίζουσες ιδιότητες τους μπορεί να είναι ευεργετικές στην ανίχνευση και διάγνωση τέτοιων κακοηθών περιοχών.

Στην εικόνα 2.3 φαίνεται από τα δεξιά ένα καρκίνωμα βασικών κυττάρων, ενώ από τα αριστερά φαίνεται το ίδιο καρκίνωμα αφού του έχει χορηγηθεί φωτοευαισθητοποιητής και έχει εκτεθεί σε μπλε φως.



Εικόνα 2.3: Καρκίνωμα βασικών κυττάρων πριν και μετά την χορήγηση φωτοευαισθητοποιητή και την έκθεση του σε μπλε φως.

2.3.2 Φωτοδυναμική θεραπεία

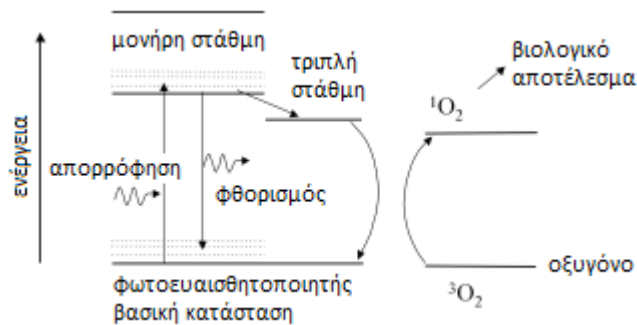
Η φωτοδυναμική θεραπεία [7] είναι η θεραπευτική χρήση φωτοευαισθητοποιητών, με τα εξής επιθυμητά χαρακτηριστικά:

- μεγάλη επιλεκτικότητα, δηλαδή να απορροφώνται αποκλειστικά από καρκινικά κύτταρα και όχι από υγιή.
- να μην είναι τοξικοί όταν δεν πραγματοποιείται ακτινοβολήση.
- ταχεία απόρριψη από τον οργανισμό μετά την επέμβαση.

Υπάρχουν τρία βασικά βήματα που οδηγούν στο θεραπευτικό αποτέλεσμα και φαίνονται στην εικόνα 2.4.

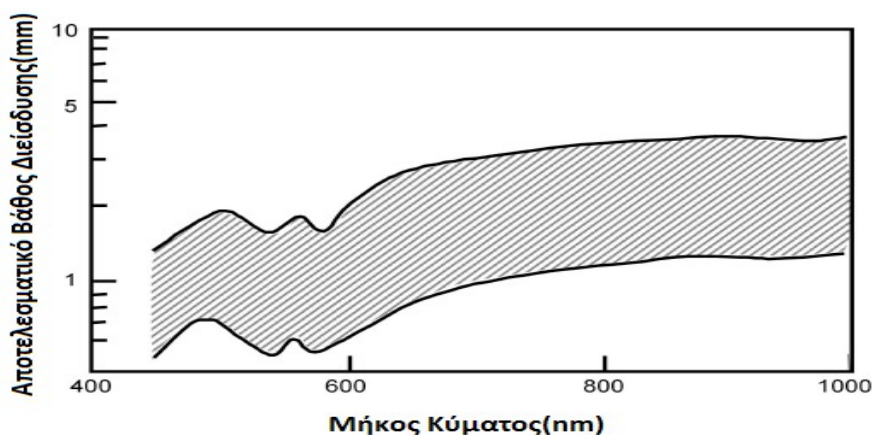
Αρχικά χορηγείται η ουσία στον ασθενή, ένα ποσοστό της οποίας απορροφάται από τα καρκινικά κύτταρα και το υπόλοιπο αποβάλλεται. Στη συνέχεια δίνουμε κατάλληλη φωτεινή ενέργεια στην καρκινική περιοχή (πιθανή), η φωτεινή ενέργεια διεγείρει την φωτοευαίσθητη ουσία, με αποτέλεσμα τη μετάβαση της σε υψηλή ενεργειακή κατάσταση. Μέρος του πληθυσμού των διεγερ-

μένων ουσιών μεταβαίνει από τη βασική σε τριπλή στάθμη. Η αποδιέγερση αυτού του μορίου προκαλεί χημική διάσπαση, η οποία παράγει είτε ενεργό μονήρες οξυγόνο $^1\text{O}_2$ είτε αρνητικές ρίζες. Οι αρνητικές ρίζες και το και το ενεργό μονήρες οξυγόνο $^1\text{O}_2$ αντιδρούν με το περιβάλλον και μέσω της οξειδωσης καταστρέφονται οι ουσίες του κυττάρου, όπου βρίσκεται ο φωτοευαίσθητοποιητής. Μέρος της διεγερμένης φωτοευαίσθητης ουσίας είναι πιθανό να αποδιεγερθεί από την S_2 στην S_0 δημιουργώντας φθορισμό. Ανιχνεύοντας τον φθορισμό αυτό, μπορούμε να εντοπίσουμε την καρκινική περιοχή.



Εικόνα 2.4: Ενεργειακό διάγραμμα για φωτοδυναμική θεραπεία μέσω παραγωγής μονήρους οξυγόνου $^1\text{O}_2$.

Για να επιτευχθεί η θεραπεία των καρκινικών όγκων, πρέπει οι φωτοευαίσθητοποιητές να ενεργοποιούνται από φωτόνια με μεγάλα μήκη κύματος, προκειμένου να αυξηθεί το βάθος διείσδυσης στους ιστούς. Καλό θα ήταν να έχουμε υψηλή απορροφητικότητα στο “οπτικό παράθυρο” των ιστών, που βρίσκεται μεταξύ 630nm – 1300 nm, διότι στο φάσμα αυτό η απορρόφηση από τα συστατικά του αίματος είναι πολύ μικρή και συνεπώς το βάθος διείσδυσης γίνεται μέγιστο. Όσο αυξάνεται το μήκος κύματος, τόσο περισσότερο αυξάνεται το βάθος διείσδυσης. Στην εικόνα 2.5 φαίνεται η εξάρτηση του μήκους κύματος από το βάθος διείσδυσης του φωτός στους ιστούς. Για μερικές ασθένειες, η χρήση φωτός μικρού μήκους κύματος μπορεί να είναι ωφέλιμη.



Εικόνα 2.5: Τυπικό βάθος διείσδυσης του φωτός σε ιστούς σε συνάρτηση με το μήκος κύματος.

Συνοψίζοντας, η ακτινοβολία των φωτοευαίσθητοποιητών οδηγεί στον εντοπισμό ή ακόμη και την καταστροφή των καρκινικών κυττάρων. Η ακτινοβολία γίνεται με τη χρήση πηγών φωτός, κυρίως Laser.

Κεφάλαιο 3

Laser

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, θα αναπτύξουμε την λειτουργία των laser, καθώς αυτά είναι που θα χρησιμοποιήσουμε για να ακτινοβολήσουμε τους φωτοευαίσθητοποιητές. Όπως αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο υπάρχουν διάφορες πηγές φωτός, που χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες laser και μη-laser [8]. Η επιλογή ανάμεσα στις δύο κατηγορίες εξαρτάται από τη θέση του όγκου, την επιθυμητή δόση φωτός και την επιλογή του φωτοευαίσθητοποιητή. Επί το πλείστον η ακτινοβολία των φωτοευαίσθητοποιητών γίνεται με laser, διότι αποτελούν μία μονοχρωματική πολύ ισχυρή πηγή φωτός ενώ οι λάμπες φωτός, που ανήκουν στη μη-laser οικογένεια πηγών φωτός, παρέχουν ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος. Επιπροσθέτως τα laser είναι οι μόνες πηγές φωτός που μπορούν να θεραπεύσουν τις κακοήθεις περιοχές που βρίσκονται σε τέτοια σημεία όπου είναι απαραίτητη η βοήθεια οπτικών ινών (όπως το δέρμα ή η στοματική κοιλότητα).

Ο σχεδιασμός του κυκλώματος στηρίχθηκε στο να οδηγήσει ένα laser για να ακτινοβολήσει τον φωτοευαίσθητοποιητή και πιο συγκεκριμένα να οδηγήσει ένα διοδικό laser, γι αυτό στο κεφάλαιο αυτό θα αναφέρουμε και τα βασικά χαρακτηριστικά των διοδικών laser.



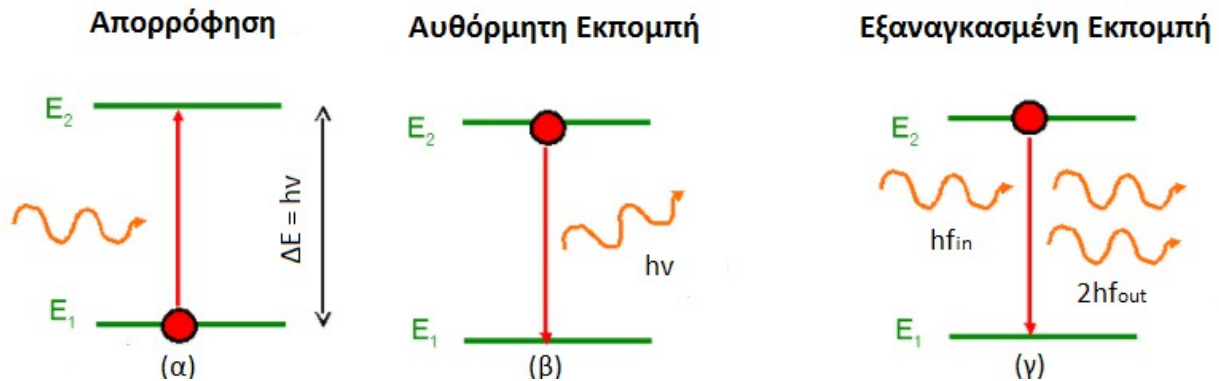
Εικόνα 3.1: Διοδικό laser (Diomed 630) - Metal halide lamp (Waldmann PDT 1200).

3.2 Η λειτουργία των Laser

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέραμε ότι για να πετύχουμε μεταβάσεις ενός ηλεκτρονίου μεταξύ δύο ενεργειακών επιπέδων, πρέπει να πραγματοποιηθεί εκπομπή ή απορρόφηση ενός φωτονίου. Θεωρώντας [1][9] δύο ενεργειακά επίπεδα E_1 και E_2 , με $E_1 < E_2$, για να μεταβεί ένα ηλεκτρόνιο από το χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο στο υψηλότερο πρέπει να γίνει απορρόφηση ενός φωτονίου ενέργειας ίσης με την ενεργειακή διαφορά των δύο ενεργειακών επιπέδων ($E_2 - E_1$). Εναλλακτικά εάν το ηλεκτρόνιο βρίσκεται στο επίπεδο E_2 , τότε μπορεί να επιστρέψει στο επίπεδο E_1 με την εκπομπή

ενός φωτονίου. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- μέσω αυθόρμητης εκπομπής, κατά την οποία το ηλεκτρόνιο επιστρέφει στη βασική ενεργειακή κατάσταση, μια μετάπτωση που δεν προκαλείται από την ακτινοβολία.
- Μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής, η οποία εξαρτάται από την πυκνότητα ακτινοβολίας. Εάν ένα φωτόνιο αλληλεπιδράσει με ένα άτομο όταν αυτό βρίσκεται στη στάθμη E_2 , το ηλεκτρικό πεδίο που σχετίζεται με αυτό το φωτόνιο μπορεί να εξαναγκάσει ή να επιφέρει μία ατομική εκπομπή, τέτοια ώστε το εκπεμπόμενο φωτόνιο να ταλαντώνεται σε φάση με το προσπίπτον φωτόνιο και να κινείται στην ίδια κατεύθυνση, είναι δηλαδή σε συμφωνία.



Εικόνα 3.2: Οι διεργασίες της απορρόφησης (α), της αυθόρμητης εκπομπής (β) και της εξαναγκασμένης εκπομπής (γ).

Με τη διαδικασία της εξαναγκασμένης εκπομπής το πλάτος του προσπίπτοντος κύματος μπορεί να αυξηθεί, καθώς περνάει από μια συλλογή διεγερμένων ατόμων με μια διαδικασία καθαρής ενίσχυσης.

Για να πετύχουμε την ενίσχυση αυτή, θεωρούμε αρχικά ένα σύνθετο σύστημα ατόμων και ακτινοβολίας σε θερμική ισορροπία υπό θερμοκρασία T . Οι πληθυσμοί N_1 και N_2 (όπου N_j είναι άτομα ανά μονάδα όγκου στην ενεργειακή στάθμη j) των ενεργειακών σταθμών E_1 και E_2 ικανοποιούν τη σχέση του Boltzmann:

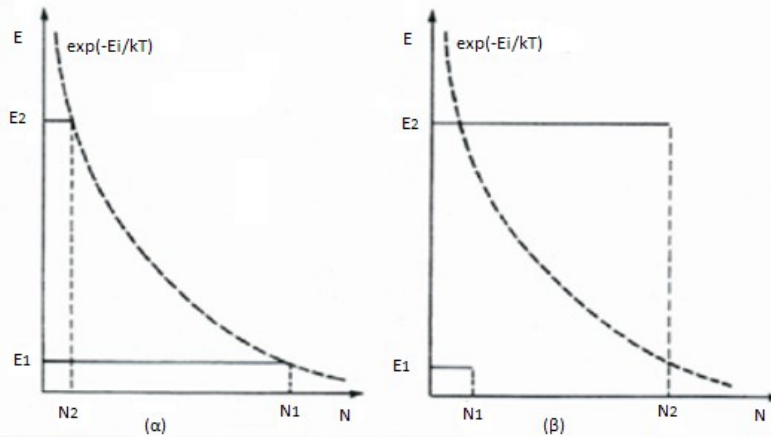
$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{g_1}{g_2} \exp[(E_2 - E_1)/kT] = \frac{g_1}{g_2} \exp(h\nu/kT)$$

όπου g_j είναι ο εκφυλισμός του επιπέδου j .

Σε ένα τέτοιο σύστημα οι ρυθμοί των προς τα άνω και προς τα κάτω μεταβάσεων είναι ίσοι και επομένως η διαδικασία της εξαναγκασμένης εκπομπής ανταγωνίζεται τις διαδικασίες της αυθόρμητης εκπομπής και της απορρόφησης. Για να ενισχύσουμε μια δέσμη φωτός με την εξαναγκασμένη εκπομπή, θα πρέπει να αυξήσουμε τον ρυθμό αυτής της διαδικασίας και να μειώσουμε τον ρυθμό των άλλων, δηλαδή θα πρέπει να αυξήσουμε την πυκνότητα της ακτινοβολίας αλλά και την πυκνότητα πληθυσμού N_2 του ανώτερου επιπέδου σε σχέση με την πυκνότητα πληθυσμού N_1 του κατώτερου επιπέδου. Αυτό ουσιαστικά μεταφράζεται στο να δημιουργήσουμε συνθήκες τέτοιες ώστε να ισχύει $N_2 > (g_2/g_1)N_1$ ακόμα και με $E_2 > E_1$, δηλαδή να πετύχουμε αντιστροφή πληθυσμών.

3.2.1 Αντιστροφή πληθυσμών

Για ένα σύστημα που βρίσκεται σε θερμική ισορροπία ισχύει η κατανομή Boltzmann [1] που αναφέρθηκε παραπάνω και φαίνεται στην εικόνα 3.3(α). Με N_j να αποτελεί την πυκνότητα πληθυσμού του ενεργειακού επιπέδου E_j , παρατηρούμε ότι καθώς το E_j αυξάνεται, μειώνεται το N_j για μια σταθερή θερμοκρασία. Για να δημιουργήσουμε μια αντιστροφή πληθυσμών όπως αυτή φαίνεται στην εικόνα 3.3(β), πρέπει να προσφέρουμε μία μεγάλη ποσότητα ενέργειας, ώστε να διεγείρουμε άτομα στο ανώτερο ενεργειακό επίπεδο E_2 . Αυτή η διαδικασία διέγερσης ονομάζεται άντληση και παράγει μία κατάσταση εκτός θερμικής ισορροπίας.

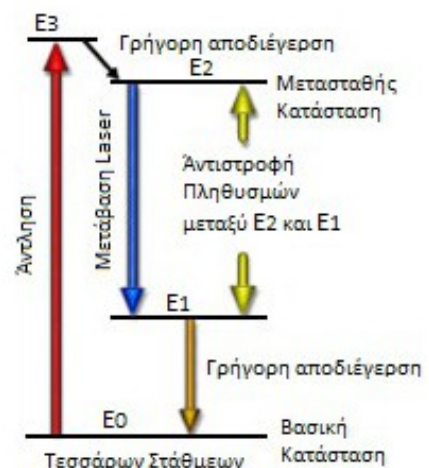


Εικόνα 3.3: Πληθυσμός ενός ενεργειακού συστήματος δύο επιπέδων (α) σε θερμική ισορροπία και (β) αφού έχει επιτευχθεί αντιστροφή πληθυσμών.

Η ενίσχυση δεν μπορεί να επιτευχθεί για συστήματα δύο ενεργειακών στάθμεων, διότι τα συστήματα αυτά δεν μπορούν να υποστηρίξουν μία αντιστροφή πληθυσμών. Στην καλύτερη περίπτωση, με εξαιρετικά ισχυρή οπτική άντληση μπορούμε να αυξήσουμε τον πληθυσμό της ανώτερης στάθμης μέχρις ότου αυτός να εξισωθεί με τον πληθυσμό της χαμηλότερης στάθμης. Για να μπορέσουμε να πετύχουμε αντιστροφή των πληθυσμών, πηγαίνουμε σε ενεργειακές στάθμες ανώτερες της βασικής στάθμης, αυτό συνεπάγεται την ανάγκη για συστήματα με τρεις ή περισσότερες στάθμες. Συνήθως τα πραγματικά συστήματα έχουν περισσότερες από τέσσερις στάθμες.

Στο σύστημα τεσσάρων στάθμεων, που φαίνεται στην εικόνα 3.4, αντλούμε ηλεκτρόνια από την βασική κατάσταση E_0 στην E_3 και μέσω γρήγορης αποδιέγερσης μεταπίπτουν στην μετασταθής κατάσταση E_2 , δημιουργείται γρήγορα αντιστροφή πληθυσμών μεταξύ των επιπέδων E_2 και E_1 . Αν οι χρόνοι ζωής των μεταβάσεων $E_3 \rightarrow E_2$ και $E_1 \rightarrow E_0$ είναι μικροί σε σχέση με τον χρόνο $E_2 \rightarrow E_1$, έχοντας ικανοποιητική άντληση, η αντιστροφή των πληθυσμών μεταξύ των επιπέδων E_2 και E_1 μπορεί να διατηρηθεί και να έχουμε συνεχή παραγωγή ακτινοβολίας Laser.

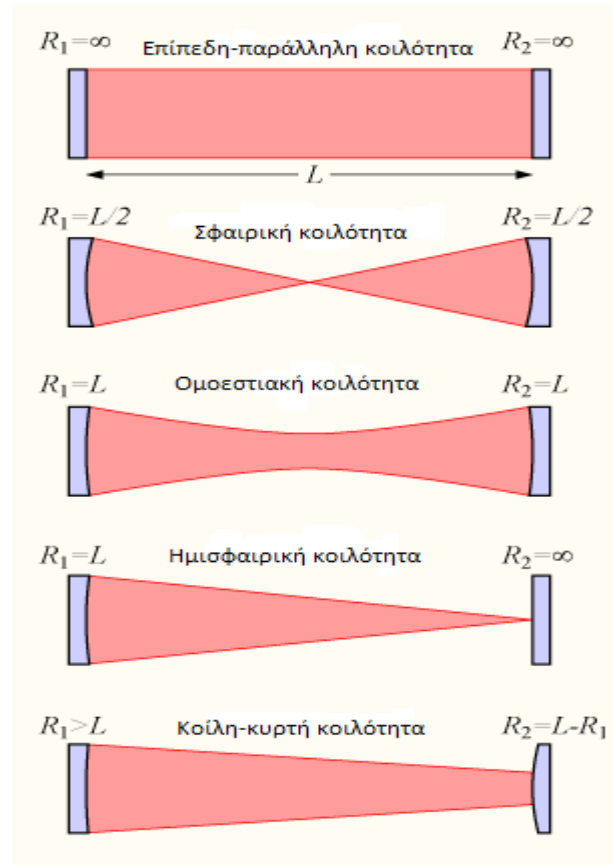
Ενεργειακό διάγραμμα Laser τεσσάρων στάθμεων



Εικόνα 3.4: Ενεργειακό διάγραμμα Laser τεσσάρων στάθμεων.

3.2.2 Οπτική Ανατροφοδότηση

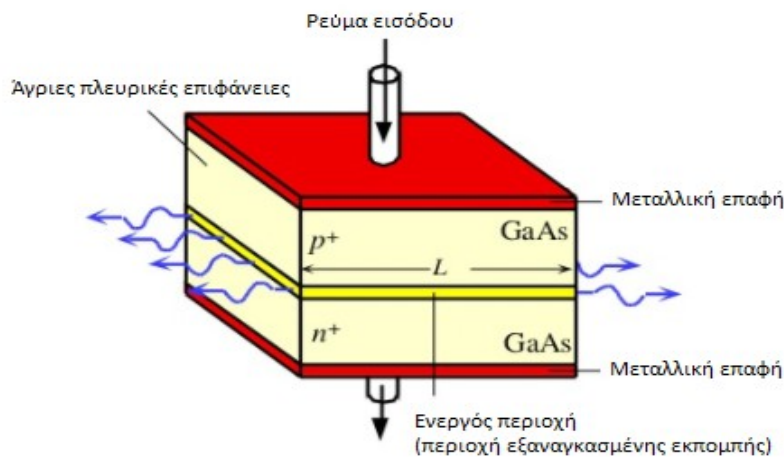
Για να έχουμε ισχυρή δέσμη, συνήθως τοποθετούνται κάτοπτρα στα άκρα του μέσου του laser, έτσι ώστε τα φωτόνια να μπορούν να κάνουν πολλαπλές διελεύσεις μέσα από το laser. Συνεπώς το laser μπορεί να θεωρηθεί ως ένα οπτικό αντηχείο ή ταλαντωτής, με δύο αντίθετα ανακλαστικά κάτοπτρα τοποθετημένα κάθετα στη δέσμη του laser. Η ταλάντωση πραγματοποιείται από ένα επίπεδο κύμα που ανακλάται πέρα δώθε ανάμεσα στα κάτοπτρα. Τα αντιθέτως κινούμενα επίπεδα κύματα, με τη σειρά τους, δημιουργούν ένα αυστηρά μονο-χρωματικό στάσιμο κύμα, το οποίο είναι πιο ισχυρό στον συντονισμό, όταν ένας ακέραιος αριθμός ημιμηκών κύματος προσαρμόζεται ανάμεσα στους ανακλαστές. Για να μπορέσουμε να εξά-γουμε μια ισχυρά ευθυγραμμισμένη δέσμη από το laser, ένα από τα κάτοπτρα κατασκευάζεται ελαφρά διαπερατό, έτσι ώστε ένα μικρό ποσό της ενέργειας να διαφεύγει προς τα έξω από την κοιλότητα. Στην εικόνα 3.5 φαίνονται μερικοί από τους πιο συνηθισμένους συνδυασμούς κατόπτρων κοιλότητας laser.



Εικόνα 3.5: Συνήθεις συνδυασμοί κατόπτρων κοιλότητας laser.

3.3 Διοδικά Laser

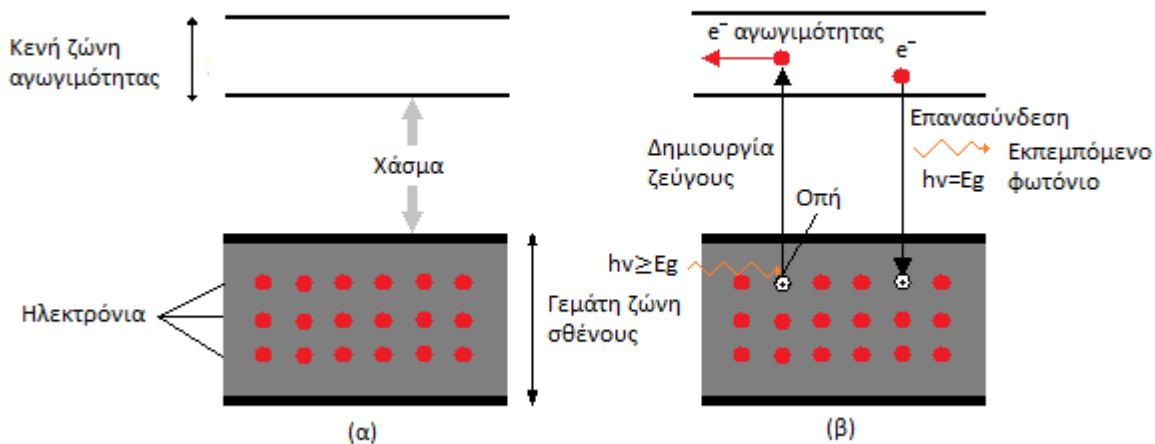
Μια από τις πιο σημαντικές φωτεινές πηγές είναι τα διοδικά laser ή laser ημιαγωγών [9]. Αυτά τα laser είναι κατάλληλα για επικοινωνίες με οπτικές ίνες λόγω του μικρού τους μεγέθους, της υψηλής τους απόδοσης, της απλότητάς τους, του μεγάλου χρόνου ζωής, της ευκολίας διαμόρφωσης και της γρήγορης απόκρισής τους (η οποία εκτείνεται αρκετά μέσα στην περιοχή των GHz).



Εικόνα 3.6: Διοδικό Laser GaAs ομοεπαφής.

Τα laser ημιαγωγών είναι παρόμοια με τα άλλα laser καθώς και σ' αυτά πρέπει να δημιουργηθεί μια αντιστροφή πληθυσμών μεταξύ κβαντικών ενεργειακών σταθμών ώστε να έχουμε μετάβαση laser. Διαφέρουν όμως από τα άλλα laser στο ότι οι διακριτές ενεργειακές στάθμες γίνονται ενεργειακές ζώνες στους ημιαγωγούς και στο ότι η οπτική άντληση και η άντληση με εκκένωση των συνηθισμένων laser αντικαθίσταται από άντληση έγχυσης. Αυτό συνίσταται στη διέλευση ισχυρού ρεύματος ορθής φοράς μέσα στη δίοδο του laser και στην έγχυση ηλεκτρονίων και οπών στις περιοχές p και n αντίστοιχα, όπου επανασυνδέονται με φορείς αντίθετου τύπου, εκπέμποντας ακτινοβολία.

Σε έναν ημιαγωγό που βρίσκεται σε θερμική ισορροπία η ζώνη σθένους είναι πλήρης με ηλεκτρόνια και η ζώνη αγωγιμότητας, όπου τα ηλεκτρόνια είναι ελεύθερα να κινηθούν, είναι κενή. Οι δύο ζώνες χωρίζονται από μια απαγορευμένη περιοχή ενέργειας που ονομάζεται ενεργειακό χάσμα και λίγα ηλεκτρόνια έχουν αρκετή ενέργεια ώστε να υπερπηδήσουν το ενεργειακό χάσμα και να καταστούν φορείς αγωγιμότητας. Κατα την εφαρμογή ορθής τάσης στη δίοδο, είναι δυνατόν τα ηλεκτρόνια να μεταβούν στην ζώνη αγωγιμότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό οπών κατά την μετάβαση του ηλεκτρονίου από την ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Οι οπές συμπεριφέρονται σαν θετικά φορτία τα οποία κινούνται σε αντίθετη κατεύθυνση από τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας, αυτή η διεργασία δημιουργίας ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής ονομάζεται δημιουργία ζεύγους. Ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας μπορεί να συναντήσει μια οπή και να επανασυνδεθεί με αυτήν, με αποτέλεσμα την εκπομπή ενός φωτονίου ενέργειας ίσης με το ενεργειακό χάσμα. Οι διεργασίες αυτές φαίνονται στην εικόνα 3.7:



Εικόνα 3.7: Οι ενεργειακές ζώνες ενός ημιαγωγού σε θερμική ισορροπία (α). Δημιουργία και επανασύνδεση ζευγών ηλεκτρονίων-οπών(β).

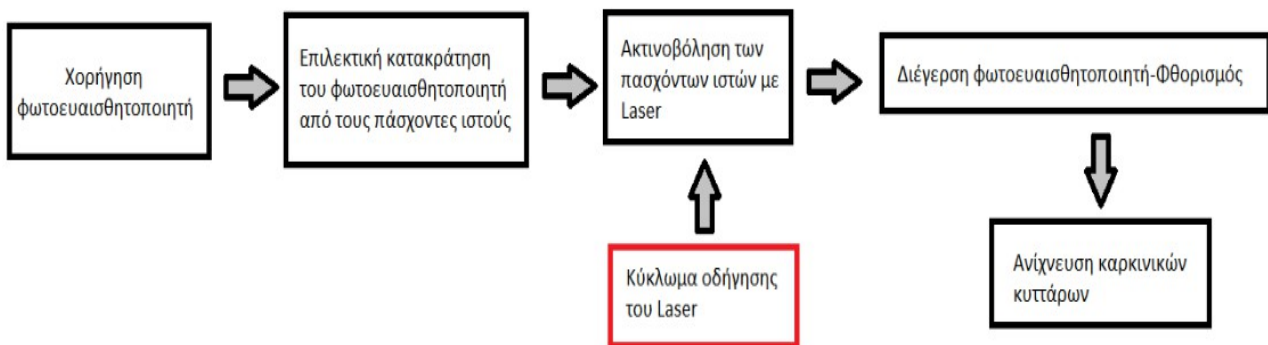
Τα διοδικά laser [10] χρησιμοποιούν σαν ενεργό υλικό την περιοχή απογύμνωσης μεταξύ της ζώνης αγωγιμότητας και της ζώνης σθένους. Για να παραχθεί ακτινοβολία laser είναι απαραίτητο να δημιουργηθεί αντιστροφή πληθυσμών, ώστε ο αριθμός ηλεκτρονίων στην ζώνη αγωγιμότητας να είναι πολύ μεγαλύτερος από των αριθμό οπών στη ζώνη σθένους. Αυτό επιτυγχάνεται με την έγχυση ισχυρού ρεύματος ορθής φοράς που οδηγεί σε συνθήκες αντιστροφής πληθυσμών. Αν δεν επιτευχθεί αντιστροφή πληθυσμών η εκπομπή ακτινοβολίας δεν είναι εξαναγκασμένη και ο ημιαγωγός λειτουργεί σαν δίοδος LED.

Κεφάλαιο 4

Κατασκευή του κυκλώματος

4.1 Εισαγωγή

Έχοντας αναπτύξει στα προηγούμενα κεφάλαια τα απαραίτητα χαρακτηριστικά της συνολικής διαδικασίας που έχει στόχο την ανίχνευση των καρκινικών κυττάρων, σε αυτό το κεφάλαιο προχωράμε στην κατασκευή και τον σχεδιασμό του κυκλώματος.



Εικόνα 4.1: Διαδικασίες για την τελική ανίχνευση καρκινικών κυττάρων.

Επομένως σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε την κατασκευή του κυκλώματος οδήγησης Laser και τα αποτελέσματα που πετύχαμε, αφού πρώτα κάνουμε μία αναφορά στα προβλήματα που αντιμετωπίσαμε αρχικά καθώς και την εξάρτηση της διόδου laser από την θερμοκρασία. Αναφέρουμε ότι ο λόγος που θέλουμε ισχυρό παλμό, είναι για να μπορέσουν τα φωτόνια να φτάσουν σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βάθος, τα οποία θα είναι δυνατόν να προκαλέσουν φωτοδυναμική θεραπεία όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Θέλουμε παλμό μικρής χρονικής διάρκειας έτσι ώστε η συνολική απορροφηθείσα ενέργεια να είναι πολύ μικρή, ώστε να μην αλλοιωθεί ο βιολογικός ιστός.

4.2 Προβλήματα κατά την πορεία της κατασκευής του κυκλώματος

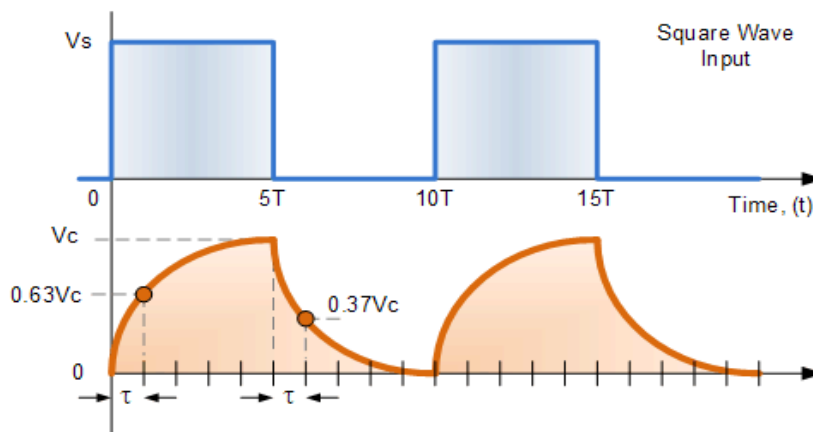
Για να επιτευχθεί ακτινοβολία Laser πρέπει να τροφοδοτηθεί η δίοδος Laser με ισχυρό ρεύμα. Στην πορεία όμως συναντήσαμε μια σειρά από προβλήματα τα οποία στάθηκαν εμπόδιο στον αρχικό σκοπό της κατασκευής παλμών της τάξης των subnanosecond, αναγκάζοντας μας να φτιάξουμε παλμούς των nanosecond και πιο συγκεκριμένα να πετύχουμε παλμούς που να φτάνουν μέχρι και 2ns. Φυσικά στην κατασκευή μας χρειάζεται ισχυρό ρεύμα της τάξης μερικών Ampere αλλά και να είναι μοναδικός παλμός. Θα μπορούσαμε να κατασκευάσουμε έναν ταλαντωτή που να μας παρέχει πολλά Ampere και να δουλεύει σε υψηλές συχνότητες της τάξεως των GHz, αλλά δεν θα μας έδινε μοναδικό παλμό, με συνέπεια η συνολική απορροφηθείσα ενέργεια να προκαλέσει καταστροφικά αποτελέσματα στον ιστό.

Σε αυτό συνετέλεσε η έλλειψη ηλεκτρονικών υλικών, διαθέσιμα στο εμπόριο, που να συνδυάζουν τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά που θέλουμε. Πιο συγκεκριμένα δεν υπήρχαν transistor που να μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές συχνότητες, περίπου στα 10 GHz και ταυτόχρονα να έχουν ένα ικανοποιητικό rise/fall time σε υψηλά ρεύματα. Επιπροσθέτως αρκετά transistor που ήταν ικανά να λειτουργήσουν στις υψηλές συχνότητες, δεν παρείχαν ικανοποιητικό κέρδος τάσης/ρεύματος για να μπορέσουμε να τροφοδοτήσουμε την δίοδο Laser.

Η ανάγκη να εργαστούμε σε υψηλότερες συχνότητες, καθιστά τα BJT transistor ιδανικά για χρήση και πιο συγκεκριμένα ο συνδυασμός npn και pnp, όμως ενώ βρήκαμε ικανοποιητικά npn BJT transistor και nmos transistor ισχύος, δεν καταφέραμε να βρούμε αντίστοιχα pnp και pmos transistor. Λόγω των οποίων η κινητικότητα είναι πολύ μικρότερη, καθιστώντας την δυαδική λογική που θέλαμε ανέφικτη.

Επιπλέον από τα transistor που βρήκαμε θέλαμε να ελέγξουμε την συμπεριφορά τους αλλά και να δούμε πως συμπεριφέρεται το συνολικό κύκλωμα, γι' αυτό χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα προσομοίωσης spice. Το πρόβλημα που προέκυψε ήταν ότι πολλά από τα transistor που βρήκαμε είτε δεν είχαν μοντέλο προσομοίωσης είτε δινόντουσαν μόνο οι S-parameters, οι οποίες δεν είναι κατάλληλες για μοναδικό παλμό, διότι περιγράφουν την AC συμπεριφορά, η οποία είναι μία μόνιμη κατάσταση.

Λόγω της απαίτησης πολλών Ampere χρησιμοποιήσαμε στο τελικό στάδιο οδήγησης του Laser, mosfet ισχύος transistor, τα οποία έχουν μεγάλη χωρητικότητα C_{gs} . Έτσι λόγω της μεγάλης C_{gs} είμαστε αναγκασμένοι να δημιουργήσουμε έναν παλμό ισχυρού ρεύματος στο gate των transistor, για να “ανοίξει” και να “κλείσει” γρήγορα το τελικό στάδιο. Σε όλη την διαδικασία υπερέχει η φόρτιση και η εκφόρτιση του πυκνωτή C_{gs} .



Εικόνα 4.2: Αρχή φόρτιση και εκφόρτιση πυκνωτή.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί, ότι για να προσεγγίσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο τις πραγματικές συνθήκες σε περίπτωση κατασκευής της πλακέτας, θέλαμε τυχόν επαγωγικά φαινόμενα που θα υπεισέρχονταν να συμπεριληφθούν. Γι' αυτό σε όλες τις συνδέσεις με την τροφοδοσία τοποθετήσαμε πηνία μεγέθους 1nH για να ληφθούν υπόψη τα τυχόν επαγωγικά φαινόμενα των καλωδίων, έτσι ώστε η προσομοίωση να είναι πιο ρεαλιστική.

4.3 Εξάρτηση των ηλεκτρονικών στοιχείων από την θερμοκρασία

Τα ηλεκτρονικά στοιχεία του κυκλώματος [11] εξαρτώνται από την θερμοκρασία και είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη, διότι όχι μόνο μπορεί να επηρεάσει έντονα την απόδοση του κυκλώματος, αλλά και να οδηγήσει σε πιθανή καταστροφή τους.

Ο λόγος της θερμότητας ΔQ που προσφέρεται από σε ένα σώμα προς της αντίστοιχη αύξηση της θερμοκρασίας του ΔT ονομάζεται θερμοχωρητικότητα c .

$$c = \Delta Q / \Delta T$$

Επίσης ο ρυθμός μεταβολής της θερμότητας είναι ανάλογος της διαφοράς της θερμοκρασίας.

$$\frac{dQ}{dt} = k \Delta T$$

Ξαναγράφοντας τις παραπάνω εξισώσεις εισάγοντας την μεταβλητή του χρόνου έχουμε:

$$T(t) - T_0 = \frac{1}{c} \int_0^t \frac{dQ}{dt} dt$$

$$\frac{dQ}{dt} = k(T(t) - T_0)$$

Υπάρχει μία ηλεκτρική αναλογία, η διαφορά θερμοκρασίας αντιστοιχεί σε διαφορά δυναμικού ενώ ο ρυθμός μεταβολής της θερμότητας αντιστοιχεί στο ρεύμα ή αλλιώς η θερμότητα αντιστοιχεί στο φορτίο. Με βάση αυτές τις αντιστοιχίες μπορούμε να συμπεράνουμε ότι:

$$V(t) - V_0 = \frac{1}{c} \int_0^t I dt$$

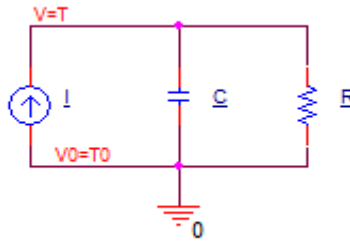
$$I = k(V(t) - V_0)$$

και επομένως να έχουμε ένα ηλεκτρικό μοντέλο με τις εξής αντιστοιχίες:

T(θερμοκρασία)	↔	V(διαφορά δυναμικού)
Q(θερμότητα)	↔	q(φορτίο)
dQ/dt(ρυθμός μεταβολής της θερμότητας)	↔	I(ρεύμα)
c(θερμοχωρητικότητα)	↔	C(πυκνωτής)
1/k	↔	R(αντίσταση)

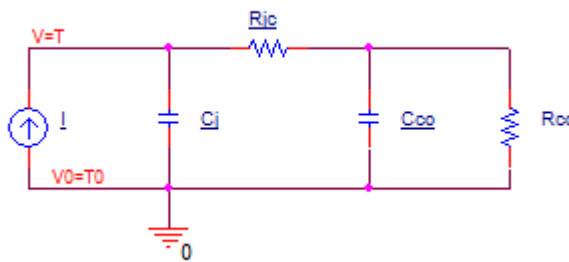
Πίνακας 4.1: Αντιστοιχίες.

Το παραπάνω ηλεκτρικό μοντέλο φαίνεται στην εικόνα 4.3:



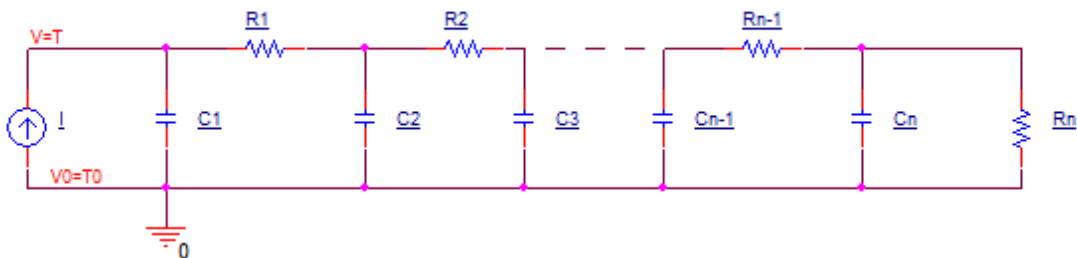
Εικόνα 4.3: Ηλεκτρικό ανάλογο.

Ένα εναλλακτικό ηλεκτρικό μοντέλο φαίνεται παρακάτω με την αντίσταση R_{jc} να αντιστοιχεί στη πτώση της θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας και της εξωτερικής πλευράς του περιβλήματος και την αντίσταση R_{co} να αντιπροσωπεύει την πτώση της θερμοκρασίας μεταξύ της εξωτερικής πλευράς του περιβλήματος και του περιβάλλοντος.



Εικόνα 4.4: Αναλυτικότερο ηλεκτρικό μοντέλο.

Τέλος ένα γενικευμένο μοντέλο [12] για να παρακολουθήσουμε την θερμική συμπεριφορά ενός ολοκληρωμένου, δίνεται από το γειωμένο θερμικό μοντέλο που φαίνεται στην εικόνα 4.5. Κάθε θερμική χωρητικότητα αντιπροσωπεύεται από μία χωρητικότητα στο θερμικό περιβάλλον.



Εικόνα 4.5: Γειωμένο θερμικό μοντέλο.

Χρησιμοποιώντας το γειωμένο θερμικό μοντέλο και θεωρώντας ότι οι πυκνωτές $C_1, C_2 \dots C_{n-1}$ είναι αμελητέοι επιστρέφουμε στο ηλεκτρικό μοντέλο της εικόνας 4.3.

Ας υποθέσουμε ότι στέλνουμε ένα παλμό ρεύματος σε κάποιο ηλεκτρονικό στοιχείο, τότε η θερμοκρασία του θα ξεκινήσει να αυξάνεται. Αν σταματήσουμε την παροχή ρεύματος τότε η θερμοκρασία του ηλεκτρονικού στοιχείου θα ξεκινήσει να μειώνεται, αυτό με βάση το ηλεκτρικό μοντέλο μεταφράζεται ως εκφόρτιση του πυκνωτή. Επομένως θα ισχύει:

$$V_c = -C \frac{dV_c}{dt} R \Rightarrow \frac{dV_c}{V_c} = -\frac{1}{RC} dt \Rightarrow \ln(V_c) = \frac{-t}{RC} + c_1 \Rightarrow V_c = \exp\left(\frac{-t}{RC} + c_1\right) \Rightarrow V_c = c_2 \exp\left(\frac{-t}{RC}\right)$$

όπου $c_2 = e^{c_1}$.

Θεωρώντας ότι την χρονική στιγμή $t=0$ η $V_c = V_d$ έχουμε:

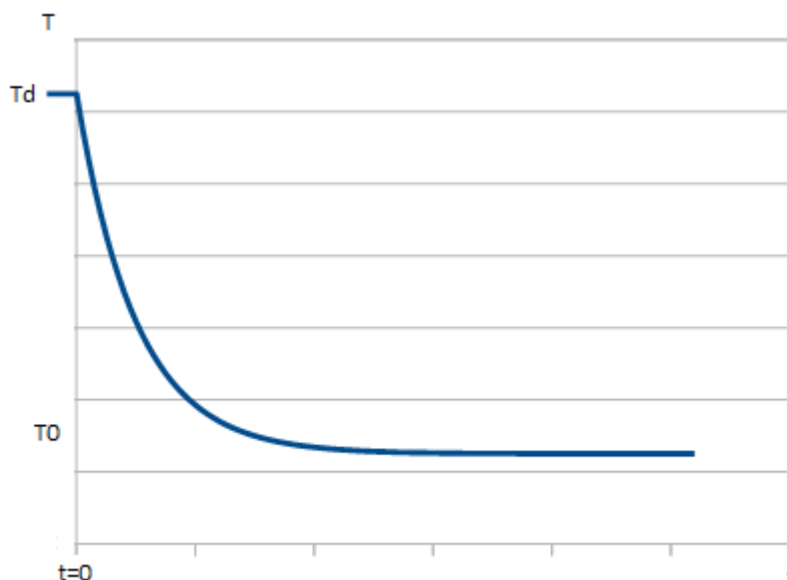
$$V_c = V_d \exp\left(\frac{-t}{RC}\right)$$

και μετατρέποντας την παραπάνω σχέση που εκφράζει την εξάρτηση του δυναμικού με τον χρόνο σε σχέση θερμοκρασίας του ηλεκτρονικού στοιχείου με τον χρόνο καταλήγουμε:

$$T = T_d \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right)$$

όπου τ η σταθερά χρόνου.

Στην παρακάτω γραφική παράσταση φαίνεται πως μεταβάλλεται η θερμοκρασία του ηλεκτρονικού στοιχείου στον χρόνο, θεωρώντας ότι όταν σταματάμε την παροχή ρεύματος η θερμοκρασία του έχει τιμή T_d , αλλά και πως καθώς ο χρόνος μεγαλώνει η θερμοκρασία δεν μηδενίζεται αλλά τείνει στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος T_0 .

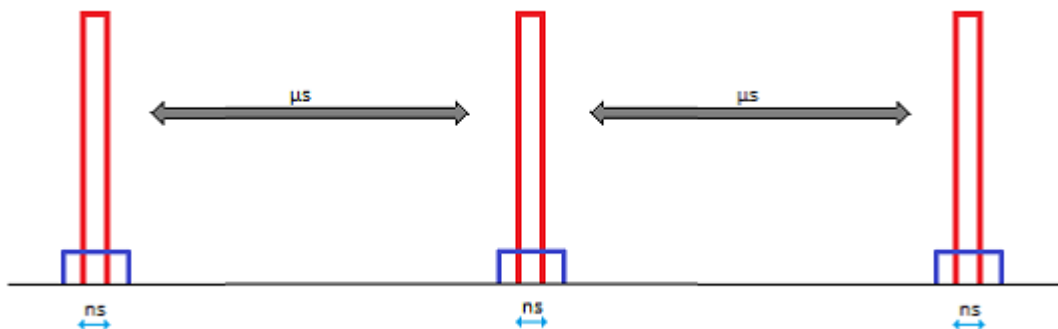


Εικόνα 4.6: Θερμοκρασία ηλεκτρονικών στοιχείων σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία των ηλεκτρονικών στοιχείων μειώνεται εκθετικά με τον χρόνο. Επομένως μπορούμε να “ανοίγουμε” τα ηλεκτρονικά μας στοιχεία, για πολύ μικρά χρονικά διαστήματα με παλμούς μεγάλου πλάτους και στην συνέχεια να τα αφήνουμε να ηρεμούν και να επανέρχονται στη θερμοκρασία δωματίου. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στα ηλεκτρονικά στοιχεία να αρχίσει να μειώνεται σε αυτά τα διαστήματα ηρεμίας, μέχρι να έρθει ο επόμενος παλμός.

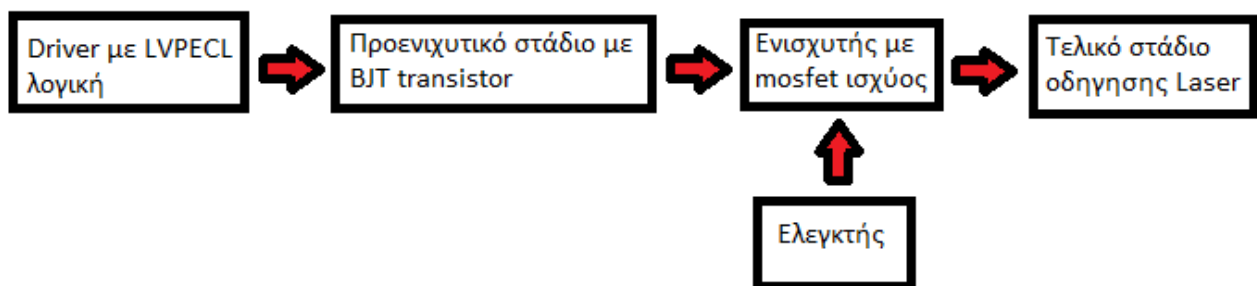
Πιο συγκεκριμένα τα διάφορα ηλεκτρονικά στοιχεία του κυκλώματος θα μένουν “ανοιχτά” για ορισμένα ns και στην συνέχεια θα ηρεμούν για κάποια μs μέχρι να έρθει ο επόμενος παλμός, πετυχαίνοντας την μη καταστροφή τους και την ροή της θερμότητας στο περιβάλλον.

Παρακάτω φαίνεται ο επιθυμητός παλμός που περιγράψαμε:



Εικόνα 4.7: Ο παλμός οδήγησης Laser (κόκκινο) και ο παλμός εισόδου (μπλε).

4.4 Block Διάγραμμα του κυκλώματος



Εικόνα 4.8: Block Διάγραμμα του κυκλώματος.

Στην εικόνα 4.8 φαίνεται ένα Block διάγραμμα του κυκλώματος που σχεδιάσαμε και θα υλοποιήσουμε.

Αρχικά το σήμα το παίρνουμε από έναν Driver ρολογιού, ο οποίος χρησιμοποιεί low voltage emitter-coupled λογική, με πολλαπλές συγχρονισμένες εξόδους. Στην συνέχεια το σήμα αυτό, συνυπολογίζοντας την αντίσταση του Driver, που είναι 50Ω και θεωρώντας την ως αντίσταση πηγής την εφαρμόζουμε σε ένα προενισχυτικό στάδιο, το οποίο το έχουμε υλοποιήσει χρησιμοποιώντας Bipolar RF transistor.

Η ανάγκη όμως να τροφοδοτήσουμε με ένα ισχυρό ρεύμα το τελικό στάδιο οδήγησης Laser, που περιλαμβάνει τα mosfet ισχύος και τη δίοδο Laser, μας υποχρεώνει να κατασκευάσουμε άλλο ένα στάδιο ενίσχυσης ρεύματος με mosfet ισχύος. Τέλος χρησιμοποιούμε έναν ελεγκτή, ο οποίος όπως αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα δημιουργεί ένα χρονικό παράθυρο, πολύ μικρού χρόνου, για να θέσουμε το κύκλωμα σε λειτουργία, χωρίς να υπάρχει έτσι κίνδυνος καταστροφής των ηλεκτρονικών στοιχείων.

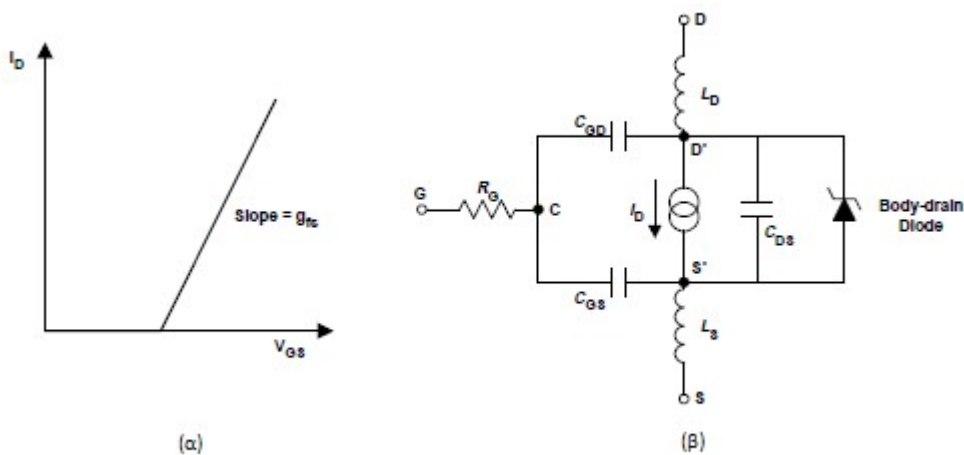
4.5 Βασικά ηλεκτρονικά στοιχεία του κυκλώματος

Προτού προχωρήσουμε στον σχεδιασμό αλλά και την συνολική λειτουργία του κυκλώματος, είναι απαραίτητο να περιγράψουμε τα βασικά ηλεκτρονικά στοιχεία που χρησιμοποιήσαμε και την λειτουργία που θέλαμε να επιτελούν στο κύκλωμα. Γι' αυτό στην ενότητα αυτή θα επιχειρήσουμε μία σύντομη ανάλυση αυτών.

4.5.1 Η λειτουργία του power nmos ως διακόπτης

Τα power nmos ή enhancement-mode MOSFET μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πολύ αποδοτικοί διακόπτες με υπερβολικά γρήγορες ταχύτητες [13][15].

Όταν το MOSFET χρησιμοποιείται ως διακόπτης, η βασική του λειτουργία είναι να ελέγχει το ρεύμα του Drain μέσω της τάσης στην πύλη. Το σχήμα 4.9(α) δείχνει την I_D-V_{GS} χαρακτηριστική και το σχήμα 4.9(β) είναι ένα ισοδύναμο μοντέλο κυκλώματος που χρησιμοποιείται συχνά, για την ανάλυση της συμπεριφοράς του ως διακόπτης.



Εικόνα 4.9: Mosfet ισχύος (α) I_D-V_{GS} χαρακτηριστική (β) ισοδύναμο κυκλωματικό μοντέλο για λειτουργία ως διακόπτης.

Η διακοπτική λειτουργία μιας συσκευής καθορίζεται από τον χρόνο που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί μία μεταβολή τάσης πάνω στις χωρητικότητες. Η R_G είναι η κατανεμημένη αντίσταση της πύλης και είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη με την ενεργό περιοχή. Οι L_S και L_D είναι οι βασικές επαγωγές του Source και του Drain αντίστοιχα και είναι μερικές δεκάδες nH. Οι τυπικές τιμές των χωρητικότητων εισόδου C_{iss} , εξόδου C_{oss} και αντίστροφης μεταφοράς C_{rss} που δίνονται στα datasheet, χρησιμοποιούνται από τους σχεδιαστές κυκλωμάτων ως σημείο εκκίνησης για τον προσδιορισμό των τιμών των εξαρτημάτων του κυκλώματος.

Οι χωρητικότητες των datasheet καθορίζονται με όρους ισοδύναμων κυκλωματικών χωρητικοτήτων ως:

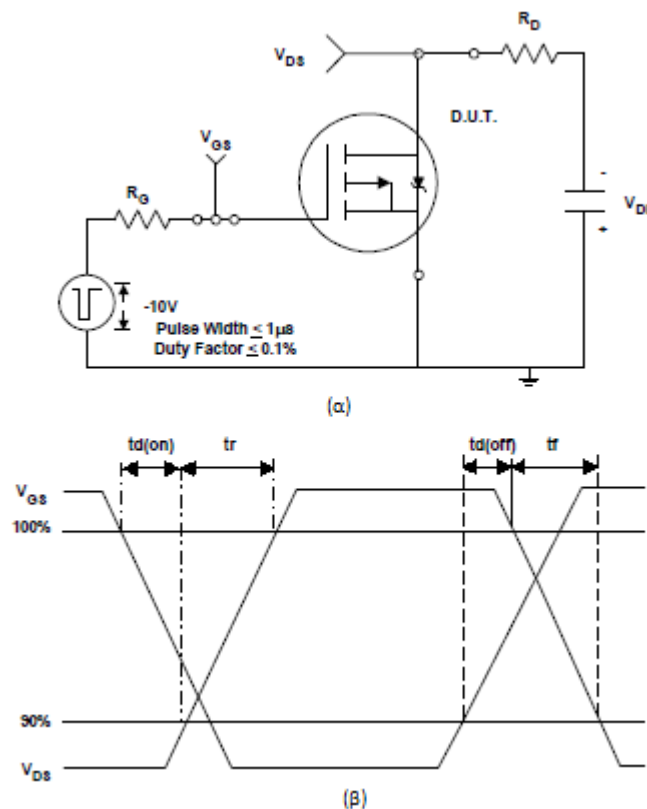
$$C_{iss} = C_{GS} + C_{GD} \quad , \text{ για } C_{DS} \text{ βραχυκυκλωμένη}$$

$$C_{rss} = C_{GD}$$

$$C_{oss} = C_{DS} + C_{GD}$$

Η χωρητικότητα μεταξύ Gate και Drain, C_{GD} , είναι μία μη-γραμμική συνάρτηση της τάσης και είναι η σημαντικότερη παράμετρος, επειδή παρέχει ένα βρόχο ανάδρασης μεταξύ της εξόδου και της εισόδου του κυκλώματος. Η χωρητικότητα C_{GD} ονομάζεται χωρητικότητα Miller, διότι προκαλεί τη συνολική δυναμική χωρητικότητα εισόδου να γίνει μεγαλύτερη από το άθροισμα των στατικών χωρητικοτήτων.

Το σχήμα 4.10 δείχνει τον τυπικό χρόνο για μια διακοπτική λειτουργία του κυκλώματος. Επίσης φαίνονται τα στοιχεία των rise και fall time σε σύγκριση με τις V_{GS} και V_{DS} κυματομορφές.

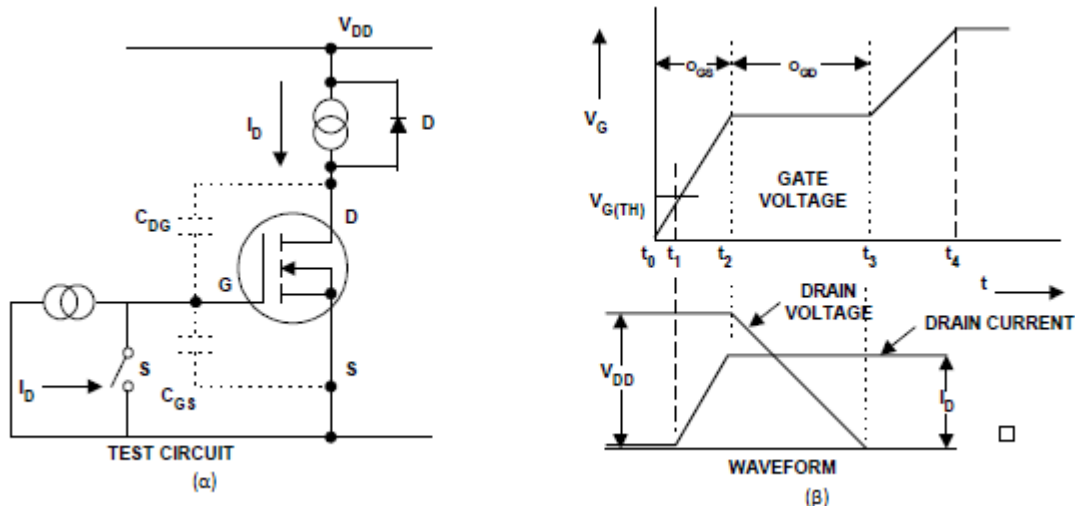


Εικόνα 4.10: Λειτουργία ως διακόπτης
(α) κύκλωμα (β) V_{GS} και V_{DS} κυματομορφές.

Turn-on καθυστέρηση, $t_{d(on)}$, είναι ο χρόνος που απαιτείται για να φορτίσει η χωρητικότητα εισόδου πριν αρχίσουμε να έχουμε ρεύμα στο Drain. Ομοίως, turn-off καθυστέρηση, $t_{d(off)}$, είναι ο χρόνος που απαιτείται για να εκφορτίσει η χωρητικότητα μετά την απενεργοποίηση.

Παρόλο που οι τιμές της χωρητικότητας εισόδου είναι χρήσιμες, δεν παρέχουν ακριβή αποτελέσματα όταν συγκρίνονται οι διακοπτικές επιδόσεις δύο συσκευών από διαφορετικούς κατασκευαστές. Η επίδραση του μεγέθους της συσκευής και της επαγωγής κάνουν τις συγκρίσεις πιο δύσκολες. Μία πιο χρήσιμη παράμετρος είναι το φορτίο του Gate αντί της χωρητικότητας, διότι μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε τη ποσότητα ρεύματος που απαιτείται για να οδηγήσουμε το κύκλωμα σε μία κατάσταση on. Στην εικόνα 4.11 φαίνεται η κυματομορφή ενός τυπικού φορτίου Gate και το κύκλωμα πάνω στο οποίο γίνεται το test.

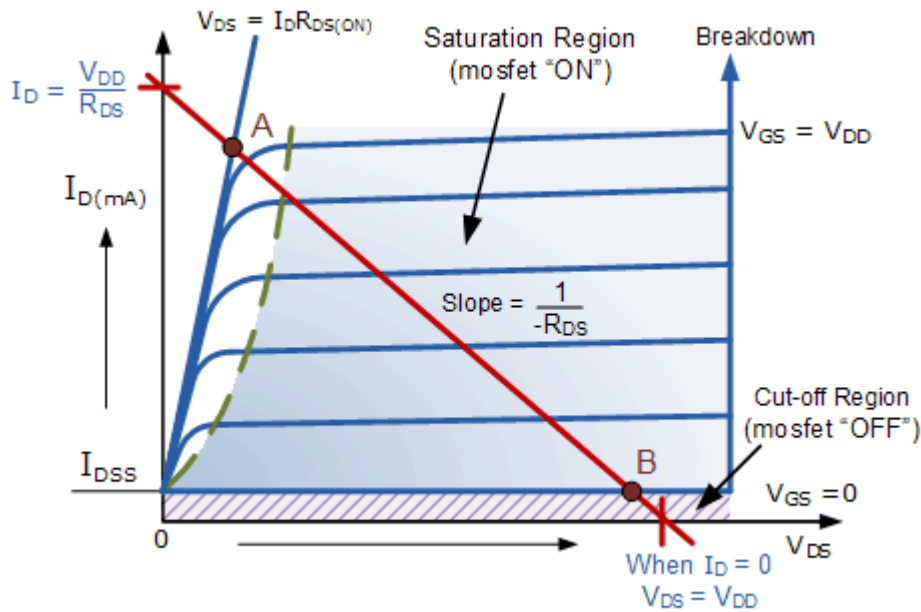
Όταν η πύλη είναι συνδεδεμένη στην τροφοδοσία, η τάση V_{GS} αρχίζει να αυξάνεται μέχρι να φτάσει στην τιμή V_{th} , στο σημείο αυτό το ρεύμα του Drain αρχίζει να ρέει και η χωρητικότητα αρχίζει να φορτίζεται. Κατά την χρονική περίοδο t_1 έως t_2 , η χωρητικότητα C_{GS} συνεχίζει να φορτίζεται, η τάση στην πύλη συνεχίζει να αυξάνεται και το ρεύμα στο Drain αυξάνεται ανάλογα. Την χρονική στιγμή t_2 , η χωρητικότητα C_{GS} είναι πλήρως φορτισμένη και το ρεύμα στο Drain παραμένει σταθερό καθώς το δυναμικό στο Drain ξεκινά να μειώνεται. Στην εικόνα 4.11 φαίνεται ότι η χωρητικότητα είναι πλήρως φορτισμένη την χρονική στιγμή t_2 , η τάση V_{GS} παραμένει σταθερή και το ρεύμα ξεκινά να φορτίζει την χωρητικότητα Miller, C_{GD} . Αυτό συνεχίζεται μέχρι την χρονική στιγμή t_3 .



Εικόνα 4.11: Φορτίο στο Gate (α) Test Κύκλωμα (β) Gate και Drain κυματομορφές.

Ο χρόνος φόρτισης της χωρητικότητας Miller είναι μεγαλύτερος από τον χρόνο φόρτισης της χωρητικότητας C_{GS} , εξαιτίας της γρήγορης μεταβολής της τάσης του drain, στο χρονικό διάστημα t_2 έως t_3 . Όταν και οι δύο χωρητικότητες έχουν φορτιστεί πλήρως, η τάση V_{GS} ξεκινά πάλι να αυξάνεται μέχρι να φτάσει την τιμή της τάσης τροφοδοσίας, την χρονική στιγμή t_4 . Το φορτίο στο Gate, $Q_{GS}+Q_{GD}$, που αντιστοιχεί στην χρονική στιγμή t_3 είναι το ελάχιστο φορτίο που απαιτείται για να λειτουργήσει σαν κλειστός διακόπτης. Για να πετύχουμε καλή σχεδίαση χρησιμοποιούμε υψηλότερη τάση στο Gate από το ελάχιστο απαιτούμενο όριο που αντιστοιχεί στην χρονική στιγμή t_4 .

Για να μελετήσουμε την λειτουργία του e-MOSFET ως διακόπτες χρειαζόμαστε την βοήθεια των I-V χαρακτηριστικών, που φαίνονται στην εικόνα 4.12:

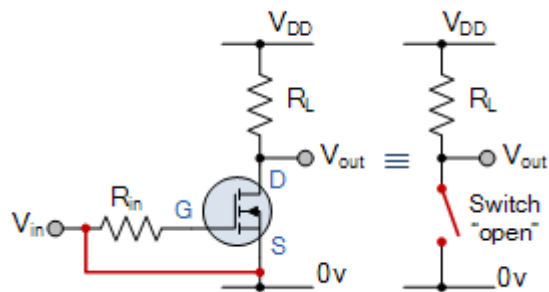


Εικόνα 4.12: I-V χαρακτηριστικές των power nmos.

Όταν η τάση εισόδου V_{in} στην πύλη ενός transistor είναι μηδέν, τότε το transistor δεν διαρρέεται από ρεύμα $I_D=0$ και η τάση εξόδου είναι ίση με την τάση τροφοδοσίας $V_D=V_{DD}$ και το transistor βρίσκεται στην περιοχή αποκοπής, λειτουργώντας ως ανοικτός διακόπτης “OFF”.

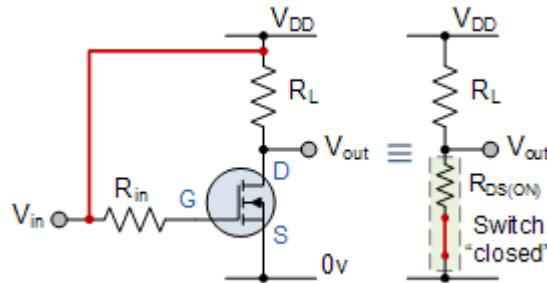
Όταν η τάση εισόδου V_{in} πάρει υψηλές τιμές ή τιμές κοντά στην τάση τροφοδοσίας τότε το σημείο λειτουργίας Q αρχίζει να μετακινείται από το σημείο B στο σημείο A της γραμμής φόρτου. Το ρεύμα I_D αρχίζει να αυξάνεται μέχρι να φτάσει την μέγιστη τιμή του $I_{Dmax}=V_{DD}/R_L$ λόγω της μείωσης της $R_{DS(on)}$. Το ρεύμα I_D γίνεται ανεξάρτητο της τάσης τροφοδοσίας V_{DD} και εξαρτάται μόνο από την V_{GS} . Το transistor συμπεριφέρεται σαν κλειστός διακόπτης αλλά η αντίσταση $R_{DS(on)}$ δεν μηδενίζεται αλλά παίρνει πολύ μικρές τιμές.

Η λειτουργία στην περιοχή αποκοπής για ένα e-MOSFET με πολύ μικρή τάση V_{in} σχεδόν μηδενική το αναγκάζει να λειτουργεί σαν ανοικτός διακόπτης με μηδενικό ρεύμα I_D και τάση εξόδου $V_{DS}=V_{DD}$.



Εικόνα 4.13: Λειτουργία στην περιοχή αποκοπής για ένα e-MOSFET αντιστοιχεί σε έναν ανοικτό διακόπτη.

Προχωρώντας στη λειτουργία στην περιοχή του κορεσμού με V_{in} ιδιαίτερα υψηλή θα αναγκάσει το transistor να λειτουργήσει σαν κλειστός διακόπτης καθώς η $R_{DS(on)}$ γίνεται ιδιαίτερα μικρή (χωρίς όμως να μηδενίζεται) με αυτό να συνεπάγεται τη μείωση της τάσης εξόδου $V_{out}=V_{DS}\approx 0.2\text{Volt}$ και το ρεύμα να αυξάνεται στη μέγιστη τιμή του $I_{dmax}=V_{DD}/R_L$.



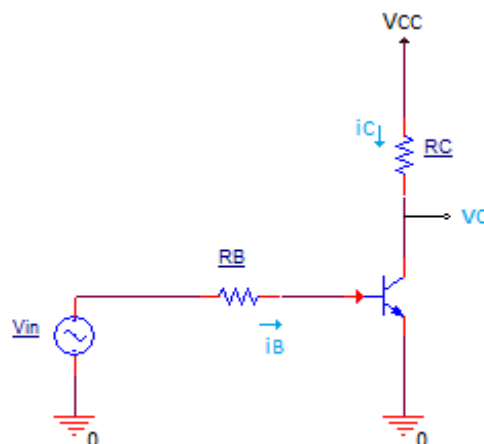
Εικόνα 4.14: Λειτουργία στην περιοχή κορεσμού για ένα e-MOSFET αντιστοιχεί σε έναν κλειστό διακόπτη.

Η λειτουργία λοιπόν ενός power mosfet στις περιοχές αποκοπής και κορεσμού αντιστοιχεί σε ένα διακόπτη, προσφέροντας μας υψηλές ταχύτητες.

4.5.2 Η λειτουργία των BJT transistor ως διακόπτες

Αναφέραμε παραπάνω ότι για να λειτουργήσει το power mosfet ως κλειστός διακόπτης πρέπει να έχει στη πύλη του ένα υψηλό σήμα, κοντά στην τάση της V_{DD} και εδώ εισέρχεται η ανάγκη της κατασκευής αυτού του σήματος. Έχοντας στην διάθεση μας ικανοποιητικά Bipolar RF transistor, θα τα χρησιμοποιήσουμε για να κατασκευάσουμε ένα υψηλό σήμα για να τροφοδοτήσουμε το power mosfet.

Για να λειτουργήσουμε το transistor σαν διακόπτη, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε δύο περιοχές, την αποκοπή και τον κορεσμό [14]. Με τη βοήθεια του κυκλώματος κοινού εκπομπού που φαίνεται στην εικόνα 4.15 θα περιγράψουμε την λειτουργία του Bipolar RF transistor σαν διακόπτης, καθώς μεταβάλλεται το σήμα εισόδου v_{in} .



Εικόνα 4.15: Κύκλωμα κοινού εκπομπού.

Όταν η τάση V_{BE} γίνει μικρότερη από 0.7Volt, το transistor θα είναι σε αποκοπή και επομένως, $i_B=0$, $i_C=0$ και $v_C=V_{CC}$ δηλαδή ο συλλέκτης θα είναι αποσυνδεδεμένος από τη γείωση και το transistor θα λειτουργεί σαν ανοικτός διακόπτης.

Για να μεταφερθούμε σε κατάσταση αγωγής η V_{BE} θα πρέπει να είναι περίπου 0.7Volt, τότε το ρεύμα βάσης θα είναι $i_b = \frac{(v_{in} - V_{BE})}{R_B}$ και το ρεύμα συλλέκτη θα είναι $i_C = \beta i_B$ και θα βρισκόμαστε στην ενεργό περιοχή λειτουργίας και θα πρέπει επίσης να ισχύει $v_{CB} > -0.4Volt$. Η τάση του συλλέκτη δίνεται από τη σχέση $v_C = V_{CC} - R_C \cdot i_C$.

Καθώς αυξάνεται η τάση v_{in} το ρεύμα i_B και i_C θα αυξηθούν, ενώ η τάση v_C θα μειωθεί. Το οριακό σημείο στο οποίο θα ισχύει $v_{CB} < -0.4Volt$, το transistor θα εξέλθει από την ενεργό περιοχή λειτουργίας και θα μπει στον κορεσμό. Αυτό το οριακό σημείο ονομάζεται edge of saturation και ορίζεται:

$$I_{C(EOS)} = \frac{(V_{CC} - 0.3)}{R_C} \quad \text{και} \quad I_{B(EOS)} = \frac{I_{C(EOS)}}{\beta} \quad \text{θεωρώντας ότι } V_{BE} = 0.7Volt.$$

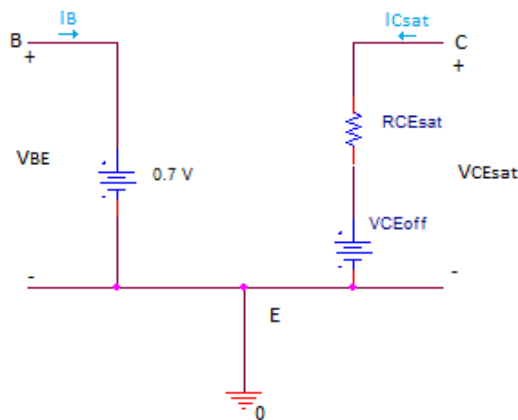
Μπορούμε να βρούμε την τιμή της v_{in} που απαιτείται για να βρεθούμε στο edge of saturation μέσω της σχέσης:

$$V_{in(EOS)} = I_{B(EOS)} R_B + V_{BE}$$

Περαιτέρω αύξηση της v_{in} πάνω από την $V_{in(EOS)}$ θα οδηγήσει σε αύξηση του ρεύματος βάσης και το transistor θα μπει βαθύτερα στον κορεσμό. Παρόλα αυτά η τάση συλλέκτη-εκπομπού μειώνεται ελάχιστα. Μια εύλογη προσέγγιση που μπορούμε να κάνουμε συνήθως βασίζεται στην υπόθεση ότι, για ένα κορεσμένο transistor, $V_{CEsat} \approx 0.2Volt$. Αυτό συνεπάγεται ότι το ρεύμα του συλλέκτη παραμένει σχεδόν σταθερό στην τιμή:

$$I_{Csat} = \frac{(V_{CC} - V_{CEsat})}{R_C}$$

Το transistor λειτουργεί σαν κλειστός διακόπτης με χαμηλή αντίσταση R_{CEsat} και μικρή τάση εκτροπής V_{CEoff} .



Εικόνα 4.16: Ισοδύναμο κυκλωματικό μοντέλο του κορεσμένου transistor.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι στον κορεσμό μπορούμε να υποχρεώσουμε το transistor να λειτουργήσει σε οποιαδήποτε επιθυμητή τιμή του β κάτω από την κανονική τιμή του και δίνεται από την σχέση $\beta_{\text{επιβαλλόμενο}} = \frac{I_{C\text{sat}}}{I_B}$.

Για να πετύχουμε αρκετά υψηλές ταχύτητες θα χρησιμοποιήσαμε τα BJT transistor στην αποκοπή και στην ενεργό περιοχή λειτουργίας κοντά στο σημείο edge of saturation (λίγο πριν μπει το transistor στο κορεσμό).

4.5.3 Η χρήση Driver με ECL λογική

Το σήμα εισόδου το παίρνουμε από έναν Driver που χρησιμοποιεί emitter-coupled (ECL) λογική. Η ECL λογική είναι μια λογική οικογένεια διπολικών transistor ολοκληρωμένου κυκλώματος. Η ECL χρησιμοποιεί ένα διαφορικό ενισχυτή BJT με single-ended είσοδο και περιορισμένο ρεύμα εκπομπού για να αποφευχθεί η λειτουργία στην περιοχή κορεσμού.

Στην ECL λογική, τα transistor δεν είναι ποτέ κορεσμένα, οι τάσεις εισόδου/εξόδου έχουν ένα μικρό swing (0.8Volt), η αντίσταση εισόδου είναι υψηλή και η αντίσταση εξόδου είναι χαμηλή με αποτέλεσμα τα transistor να αλλάζουν τις καταστάσεις γρήγορα και οι καθυστερήσεις στις πύλες να είναι χαμηλές. Επιπλέον η ουσιαστική σταθερή λήψη ρεύματος των διαφορικών ενισχυτών ελαχιστοποιεί τις καθυστερήσεις και τις δυσλειτουργίες που εισέρχονται λόγω των αυτεπαγωγών και των χωρητικότητων των γραμμών τροφοδοσίας και οι συμπληρωματικές έξοδοι μειώνουν τον χρόνο διάδοσης ολόκληρου του κυκλώματος μειώνοντας τον αριθμό των μετατροπών.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα της ECL λογικής είναι ότι κάθε πύλη τραβά συνεχώς ρεύμα, πράγμα που σημαίνει ότι απαιτεί σημαντικά περισσότερη ισχύ σε σχέση με άλλες λογικές οικογένειες, όπως η TTL οικογένεια. Η λογική transistor-transistor (TTL) είναι μία κλάση ψηφιακών κυκλωμάτων κατασκευασμένων από διπολικά transistor και αντιστάσεις και ονομάζεται λογική transistor-transistor επειδή τα transistor εκτελούν τόσο τη λογική λειτουργία όσο και τη λειτουργία ενίσχυσης. Η λογική TTL χρησιμοποιεί λιγότερη ενέργεια από τη λογική ECL και έχει ευκολότερους κανόνες σχεδιασμού, αλλά είναι σημαντικά πιο αργή.

Τα κυκλώματα ECL λειτουργούν συνήθως με αρνητικές πηγές τροφοδοσίας (το θετικό άκρο της τροφοδοσίας συνδέεται με τη γείωση) σε αντίθεση με άλλες λογικές οικογένειες στις οποίες είναι γειωμένο το αρνητικό τέλος της παροχής. Η θετική emitter-coupled λογική, που ονομάζεται επίσης ψευδό-ECL (PECL) είναι μία περαιτέρω εξέλιξη της της ECL χρησιμοποιώντας μια θετική τροφοδοσία 5Volt αντί για μια αρνητική τροφοδοσία. Η χαμηλή τροφοδοσία θετική emitter-coupled λογική (LVPECL) είναι μια έκδοση με βελτιωμένη ισχύ PECL, χρησιμοποιώντας θετική τροφοδοσία 3.3Volt αντί για 5Volt. Τα PECL και LVPECL είναι συστήματα διαφορικού σήματος και χρησιμοποιούνται κυρίως σε κυκλώματα υψηλής ταχύτητας και διανομής ρολογιού.

Το σήμα εισόδου μας είναι ένας Driver, ο οποίος όπως αναφέραμε χρησιμοποιεί ECL λογική και πιο συγκεκριμένα είναι LVPECL.

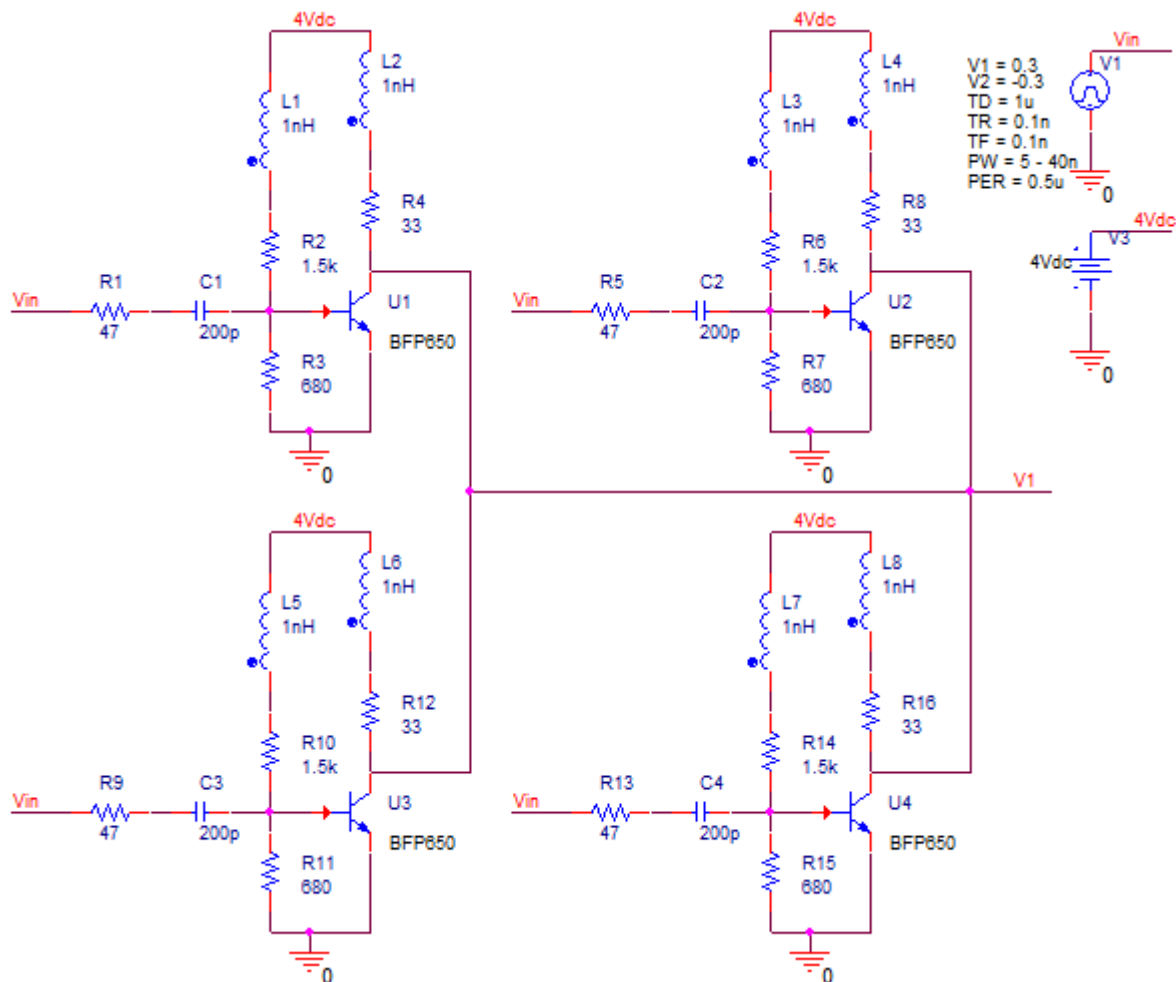
4.6 Η λειτουργία του κυκλώματος

Στην ενότητα αυτή θα αναλύσουμε τη λειτουργία του κυκλώματος και για να γίνει πιο κατανοητή “σπάμε” το συνολικό κύκλωμα σε τρία επιμέρους υποκυκλώματα και στον ελεγκτή θερμοκρασίας των ηλεκτρονικών στοιχείων. Θα μελετήσουμε το κάθε υποκύκλωμα ξεχωριστά για να γίνει πιο ευδιάκριτη η λειτουργία που επιτελεί, αλλά και την επικοινωνία του κάθε υποκυκλώματος με τα άλλα.

4.6.1 Το προενισχυτικό στάδιο

Το πρώτο υποκύκλωμα αποτελεί ένα πρώτο στάδιο ενίσχυσης της τάσης και του ρεύματος, που λαμβάνουμε από την είσοδο μας. Η είσοδος μας, όπως αναφέραμε είναι η έξοδος ενός Driver ρολογιού που βασίζεται σε LVPECL λογική και ο οποίος εμπεριέχει τέσσερις συγχρονισμένες εξόδους.

Το προενισχυτικό στάδιο του κυκλώματος φαίνεται στην εικόνα 4.17:

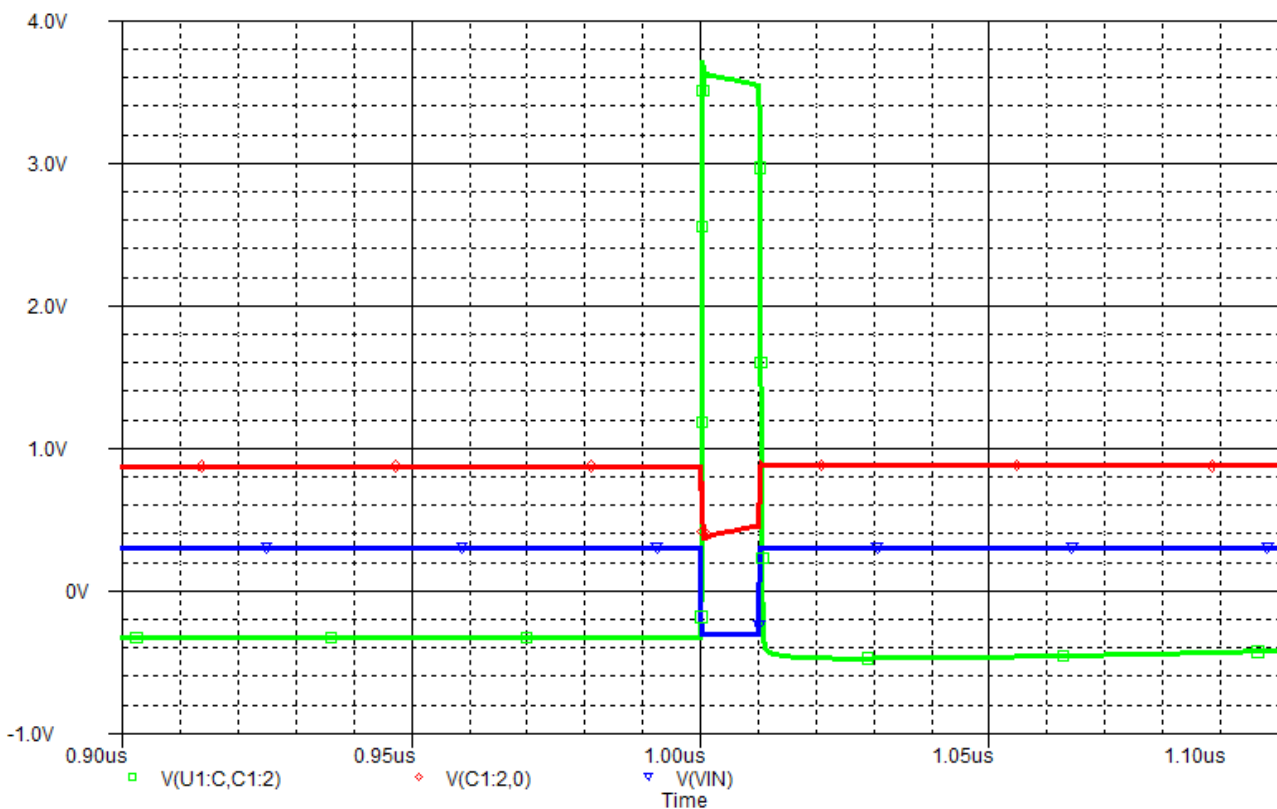


Εικόνα 4.17: Προενισχυτικό στάδιο.

Το σήμα εισόδου V_{in} ενισχύεται από τέσσερα πανομοιότυπα BJT transistor με κοινή έξοδο V_1 . Αρχικά οι αντιστάσεις R_1 , R_5 , R_9 και R_{13} αποτελούν την αντίσταση εξόδου του Driver (πηγή εισόδου). Ο παλμός εισόδου αποτελεί ένα τετραγωνικό σήμα που βρίσκεται στην τιμή $V_{high} = 0.3\text{V}$ και μεταβαίνει για μικρό χρονικό διάστημα (από 5 έως 40 ns) στην τιμή $V_{low} = -0.3\text{V}$. Πολώνουμε το transistor έτσι ώστε όταν η V_{in} βρίσκεται στην V_{high} τιμή το transistor να βρίσκεται στην ενεργό περιοχή λειτουργίας, οριακά πριν μπει σε κορεσμό με τάση $V_1 = V_C$ πολύ μικρή, για το περισσότερο χρόνο, ενώ όταν η V_{in} παίρνει την V_{low} τιμή της για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα το transistor να βρίσκεται σε αποκοπή (off κατάσταση) και η τάση $V_1 = V_C = 4\text{V}$. Το ρεύμα του συλλέκτη I_C επειδή βρίσκεται κοντά στο edge of saturation μπορούμε να το υπολογίσουμε από την σχέση που αναφέραμε στην ενότητα 4.4.2:

$$I_C \approx I_{C(EOS)} = \frac{(V_{CC} - 0.3)}{R_C} = \frac{4 - 0.3}{33} \approx 110\text{mA}$$

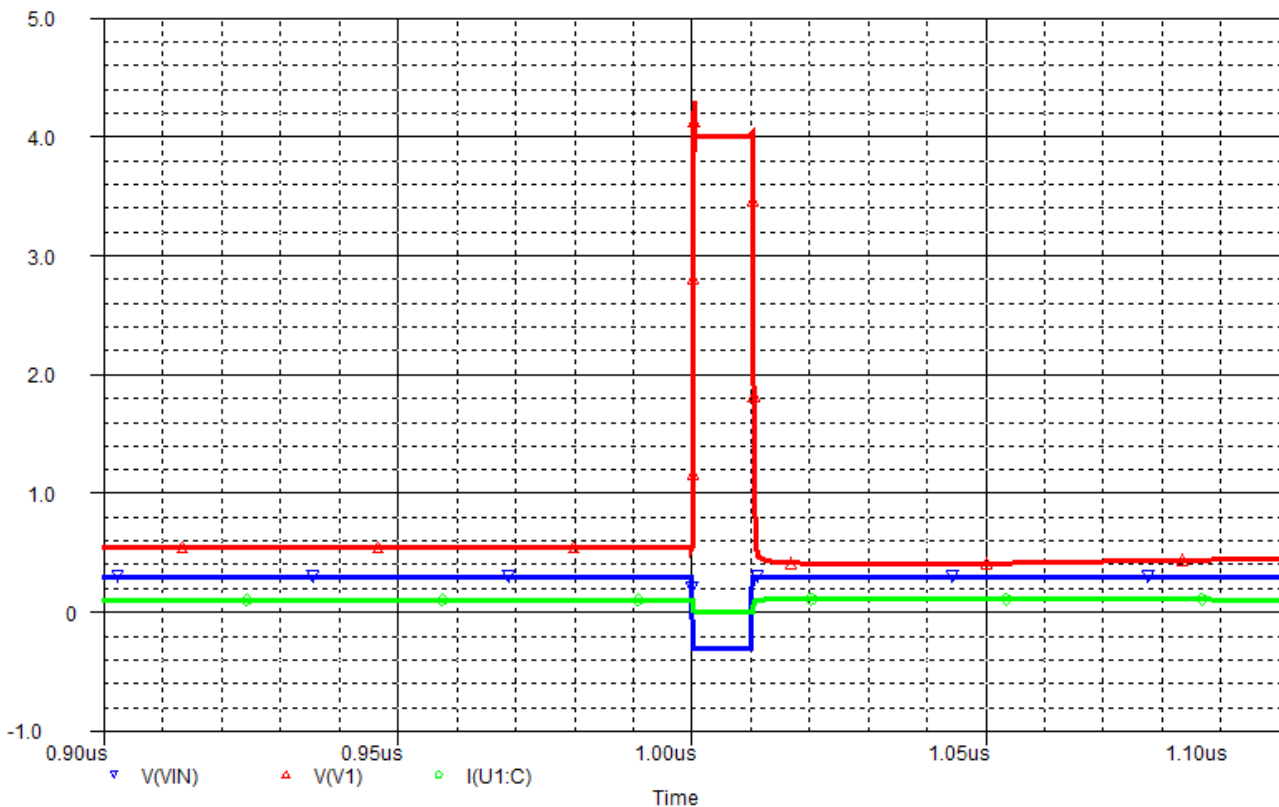
Παρακάτω φαίνονται οι τάσεις v_{CB} και v_{BE} των transistor για V_{in} που διατηρεί την τιμή V_{low} για 10ns:



Εικόνα 4.18: Οι τάσεις συλλέκτης-βάση (πράσινο), βάση-εκπομπός (κόκκινο) και V_{in} (μπλε).

Είναι φανερό ότι όταν η V_{in} βρίσκεται στην $V_{high} = 0.3\text{V}$ τιμή της η τάση $v_{CB} > -0.4\text{V}$ και επομένως το transistor είναι στην ενεργό περιοχή λειτουργίας, πολύ κοντά στο edge of saturation. Όταν η V_{in} μεταβαίνει από την V_{high} τιμή της στην $V_{low} = -0.3\text{V}$ η τάση v_{BE} γίνεται μικρότερη από 0.7 Volt και το transistor μεταβαίνει στην αποκοπή. Εκεί παρατηρείτε επίσης μία μικρή εκφόρτιση των πυκνωτών C_1 , C_2 , C_3 και C_4 , που δεν επηρεάζουν όμως το κύκλωμα, αυτό φαίνεται από τις τάσεις v_{CB} και v_{BE} .

Στην εικόνα 4.19 φαίνεται η έξοδος του προενισχυτικού σταδίου V_1 σε σύγκριση με την είσοδο V_{in} καθώς και το ρεύμα I_C του κάθε transistor:



Εικόνα 4.19: Η τάση εισόδου V_{in} (μπλε) και η τάση εξόδου V_1 (κόκκινο) του προενισχυτικού σταδίου και το ρεύμα συλλέκτη I_C (πράσινο) του κάθε transistor.

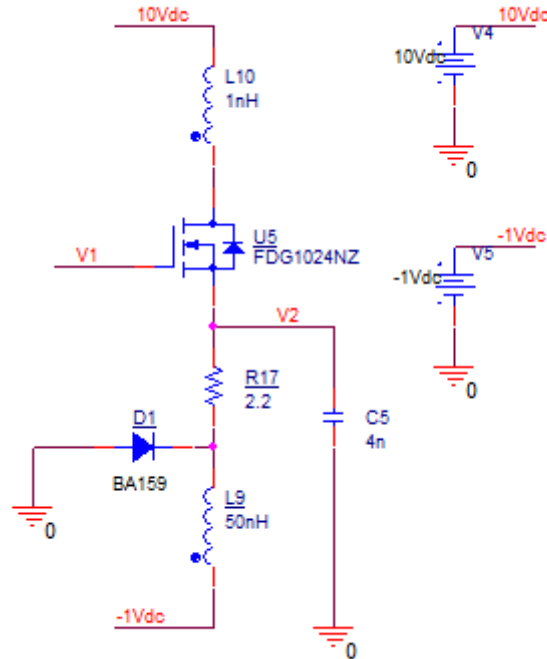
Το transistor βρίσκεται στην ενεργό περιοχή λειτουργίας και όχι στον κορεσμό και αυτό μπορεί να γίνει ορατό μέσω της τάσης εξόδου $V_1 = V_C = V_{CE}$ που είναι πολύ μικρή, αλλά όχι μηδενική, το ρεύμα του συλλέκτη $I_C \approx 110\text{mA}$ όπως αναμέναμε, ενώ όταν το transistor είναι σε off κατάσταση η έξοδος λαμβάνει την τιμή της τροφοδοσίας και το ρεύμα του συλλέκτη είναι μηδενικό.

Η τροφοδοσία V_{CC} ρυθμίζεται στα 4Volt διότι είναι η μέγιστη διαφορά δυναμικού συλλέκτη-εκπομπού που μπορούμε να έχουμε με βάση το datasheet του BFP650 που χρησιμοποιούμε.

Τέλος τα πηνία που χρησιμοποιούμε, είναι για να προσομοιώσουμε τα επαγωγικά φαινόμενα των καλωδίων.

4.6.2 Ενισχυτής ρεύματος

Την έξοδο V_1 του προενισχυτικού σταδίου την εφαρμόζουμε σαν είσοδο σε έναν ενισχυτή ρεύματος που φαίνεται στην εικόνα 4.20:



Εικόνα 4.20: Ενισχυτής ρεύματος.

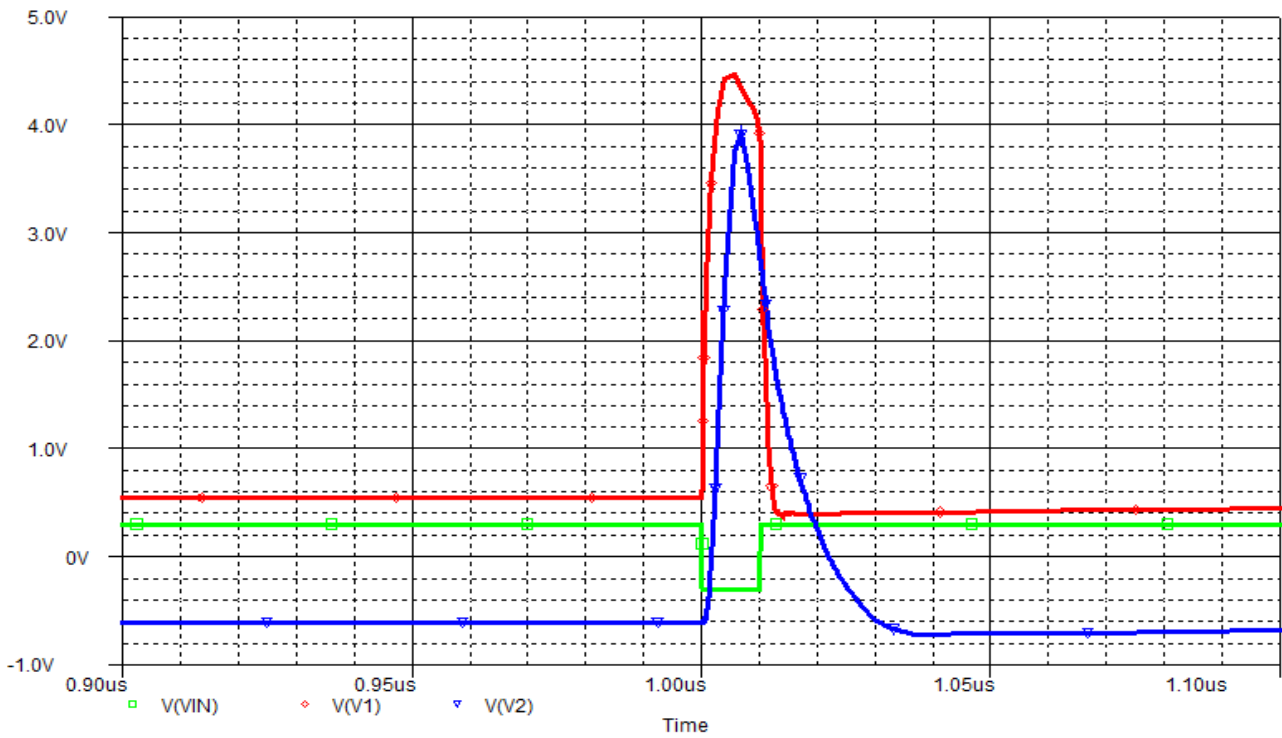
Στον ενισχυτή ρεύματος λαμβάνουμε την έξοδο V_2 από το Source. Το σήμα εισόδου του ενισχυτή ρεύματος V_1 , όπως αναφέραμε αποτελεί την έξοδο του προενισχυτικού σταδίου. Για να καταφέρουμε να ενισχύσουμε το ρεύμα και ταυτόχρονα να διατηρήσουμε την γρήγορη ταχύτητα που έχουμε στις μεταβάσεις από χαμηλές σε υψηλές τιμές, το mosfet ισχύος εδώ δεν το χρησιμοποιούμε ως διακόπτη. Για πολύ μικρές τιμές της τάσης V_1 το transistor είναι οριακά σε κορεσμό και όταν η V_1 τείνει να αυξηθεί απότομα το transistor εισέρχεται βαθύτερα σε κορεσμό.

Το πηνίο L_9 βοηθά στην απότομη άνοδο ενώ το πηνίο L_{10} χρησιμοποιείται για να προσομοιώσουμε τυχόν επαγωγικά φαινόμενα.

Η αντίσταση R_{17} είναι το φορτίο μας το οποίο θέλουμε να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο για να πετύχουμε εξίσου απότομη κάθοδο, αλλά είναι απαραίτητο λόγω του πηνίου L_9 και η χρήση ενός χωρητικού φορτίου και αυτός είναι ο ρόλος του πυκνωτή C_5 .

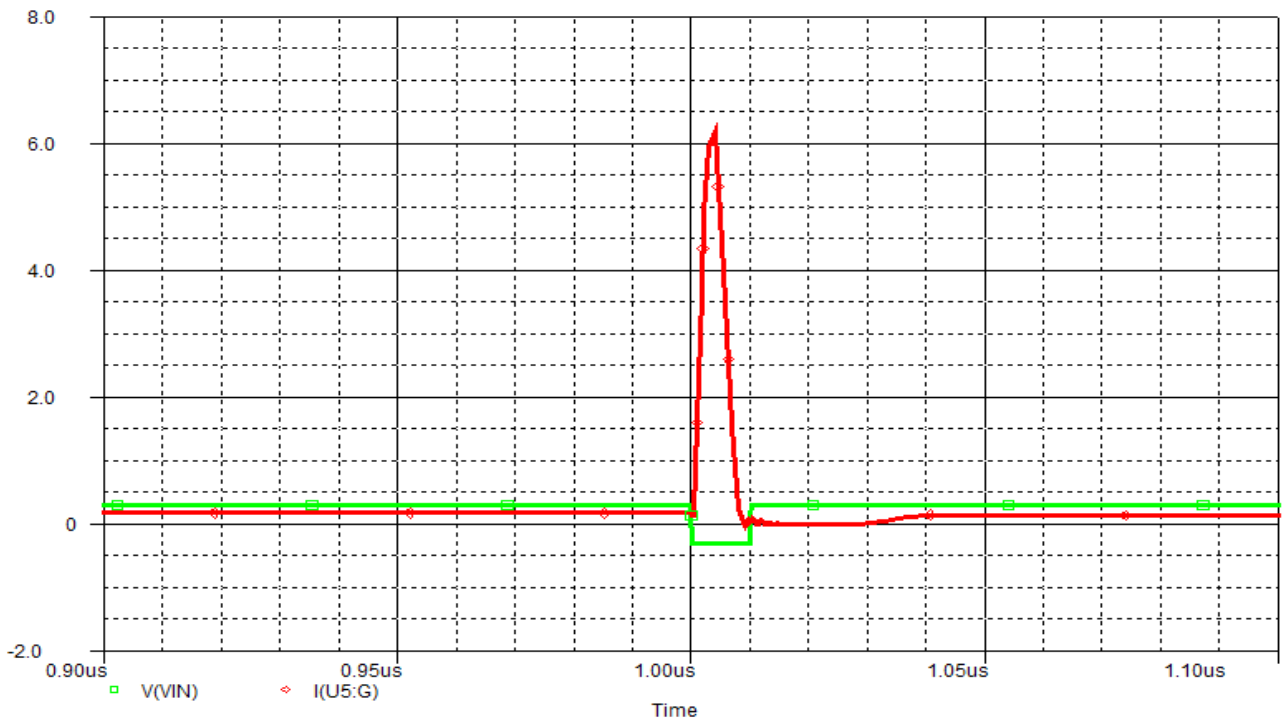
Τέλος η διάδος D_1 χρησιμοποιείται για να κρατήσει τη διαφορά δυναμικού στα άκρα του πηνίου όσο το δυνατόν πιο σταθερή, για να αποφύγουμε ανωμαλίες και ταλαντώσεις.

Στην εικόνα 4.21 φαίνεται η είσοδος V_1 και η έξοδος V_2 του ενισχυτή ρεύματος για V_{in} που διατηρεί την τιμή V_{low} για 10ns:



Εικόνα 4.21: Οι τάσεις V_{in} (πράσινο), V_1 (κόκκινο) και V_2 (μπλε).

Παρατηρούμε ότι όταν εφαρμόσαμε την V_1 σαν είσοδο στον ενισχυτή ρεύματος, ο πυκνωτής C_{gs} συνέβαλε στην αλλοίωση του παλμού καθώς λόγω της αργής φόρτισης του πυκνωτή η V_1 δεν είναι το ίδιο απότομη με πριν, χωρίς όμως να επηρεάζει ιδιαίτερα το ρεύμα I_D του mosfet ισχύος και φαίνεται στην εικόνα 4.22. Στο σημείο αυτό, γίνεται κατανοητή η ανάγκη να αποφύγουμε όσο το δυνατόν τη χρήση πυκνωτών που μας επηρεάζουν το rise time.



Εικόνα 4.22: Η είσοδος V_{in} (πράσινο) και το ρεύμα I_D (κόκκινο) του mosfet του ενισχυτή ρεύματος.

Η αργή εκφόρτιση της τάσης εξόδου οφείλεται στον πυκνωτή C_5 , πράγμα που δεν επηρεάζει το κύκλωμα καθώς στην συνέχεια θα τροφοδοτήσουμε το τελικό υποκύκλωμα και ουσιαστικά θα αντικατασταθεί από ένα σύνθετο χωρητικό φορτίο (θα μπορούσαμε να πούμε ότι το αυτό το σύνθετο χωρητικό φορτίο είναι 4 πυκνωτές C_{gs} , όπως θα φανεί στην ενότητα 4.5.4, συνδεδεμένοι παράλληλα και είναι περίπου 4nF).

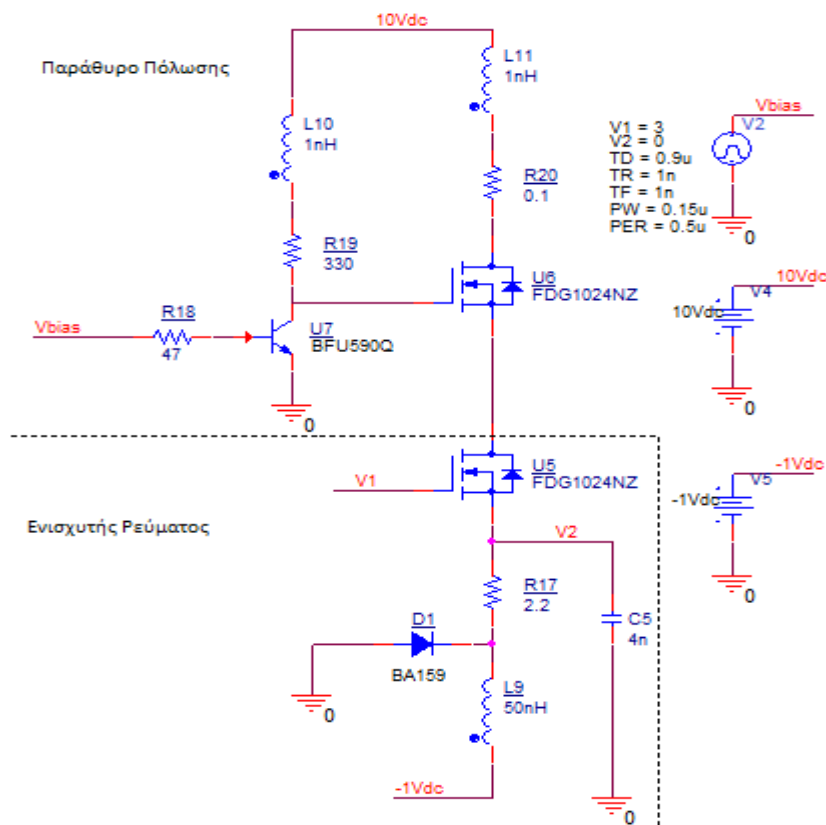
Η τάση V_2 δεν ενισχύθηκε σημαντικά σε σχέση με την τάση V_1 , το ρεύμα όμως I_D του mosfet ισχύος ενισχύθηκε σημαντικά και φτάνει σχεδόν τα 6A, ενώ ταυτόχρονα έχει ένα ικανοποιητικό rise και fall time.

Το μειονέκτημα του είναι ότι απαιτεί ένα σημαντικό DC ρεύμα στην ηρεμία του, το οποίο φτάνει τα 175mA ενώ ταυτόχρονα η διαφορά τάσης V_{DS} πάνω στο transistor είναι 10.6Volt. Το ρεύμα αυτό είναι ικανό να καταστρέψει το transistor και γι αυτό το λόγο πρέπει να κατασκευάσουμε ένα παράθυρο πόλωσης, έτσι ώστε το transistor να βρίσκεται σε μια off κατάσταση και λίγο πριν έρθει το σήμα εισόδου V_{in} να πολώνουμε το transistor, για να μην έχουμε μεγάλη κατανάλωση ισχύος αλλά και για να προστατέψουμε το transistor από μια ενδεχόμενη καταστροφή.

4.6.3 Ελεγκτής

Για να μην καταστρέψουμε το transistor U_5 , πρέπει να δημιουργήσουμε ένα παράθυρο πόλωσης πολύ μικρού χρόνου που θα μας επιτρέψει να πολώσουμε το transistor. Αυτό το παράθυρο πόλωσης το δημιουργούμε 0.1us πριν ξεκινήσει ο παλμός V_{in} και διαρκεί στο σύνολο του 0.15us. Σε τόσο μικρό χρόνο το ρεύμα που απαιτούσε το transistor παύει να είναι επικίνδυνο.

Παρακάτω φαίνεται ο ελεγκτής θερμοκρασίας των ηλεκτρονικών στοιχείων, που θα μας δημιουργήσει το παράθυρο πόλωσης και ο ενισχυτής ρεύματος:



Εικόνα 4.23: Ελεγκτής θερμοκρασίας των ηλεκτρονικών στοιχείων και ενισχυτής ρεύματος.

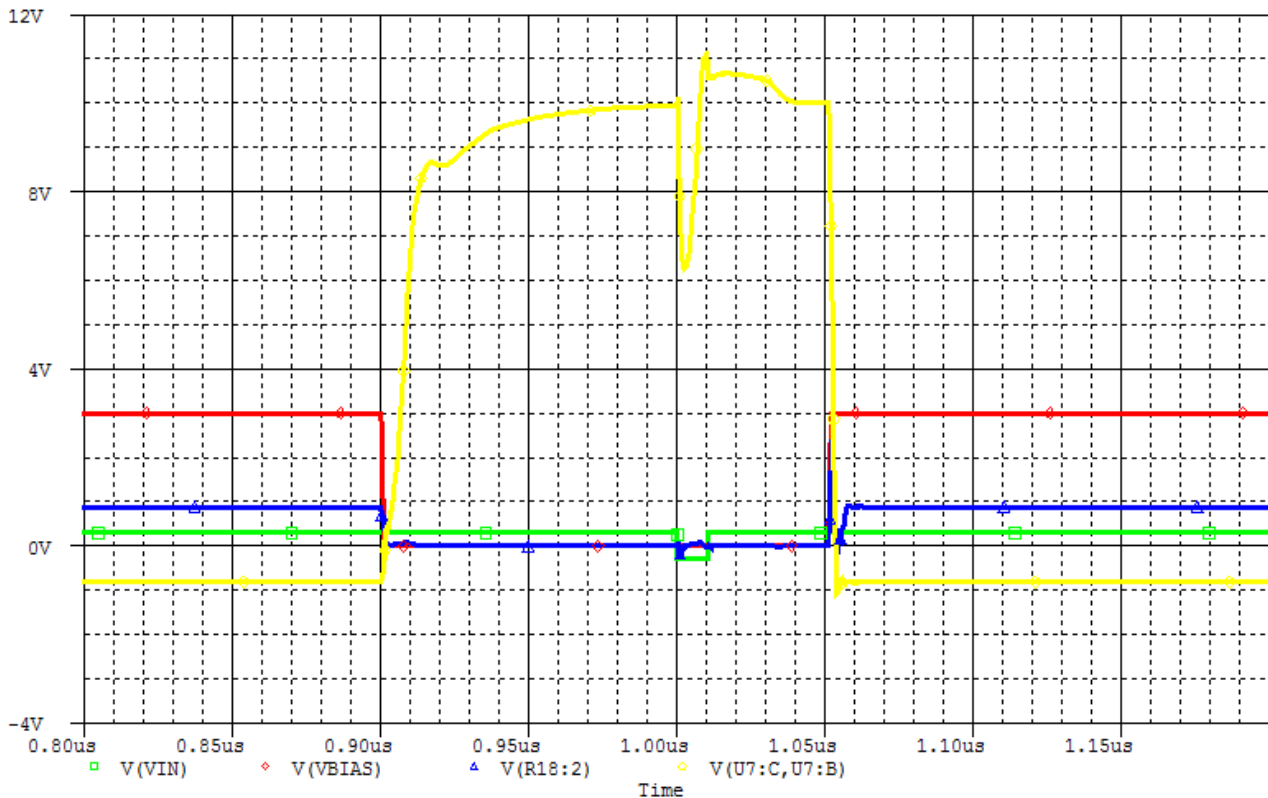
Το transistor U_7 βρίσκεται αρχικά σε κορεσμό και όταν η V_{bias} μεταβεί από την $V_{high}=3V$ τιμή της στην $V_{low}=0V$ τιμή της το transistor εισέρχεται στην αποκοπή. Αυτό φαίνεται στην εικόνα 4.24 όπου η $V_{CB}<-0.4V$ το οποίο όπως αναφέραμε σηματοδοτεί ότι το transistor λειτουργεί αρχικά στον κορεσμό, ενώ στην συνέχεια η τάση $V_{BE}=0V$ και το transistor μεταβαίνει σε κατάσταση αποκοπής. Αξίζει να σημειώσουμε ότι η επιθυμία για γρήγορη απόκριση, δεν είναι αναγκαία σε αυτό το σημείο καθώς όπως αναφέραμε δεν μας ενδιαφέρουν οι γρήγορες μεταβάσεις αλλά η δημιουργία ενός μικρού χρονικά παραθύρου πόλωσης για το transistor U_5 .

Με την αντίσταση $R_{19}=330\Omega$ επιτυγχάνουμε το ρεύμα I_C του transistor U_7 να παραμένει μικρό όταν αυτό βρίσκεται στον κορεσμό, προστατεύοντας το transistor.

Σύμφωνα με την σχέση της ενότητας 4.4.2, για ένα BJT transistor που λειτουργεί στον κορεσμό:

$$I_{Csat} = \frac{(V_{CC} - V_{CEsat})}{R_C} = \frac{10 - 0.2}{330} = 30mA$$

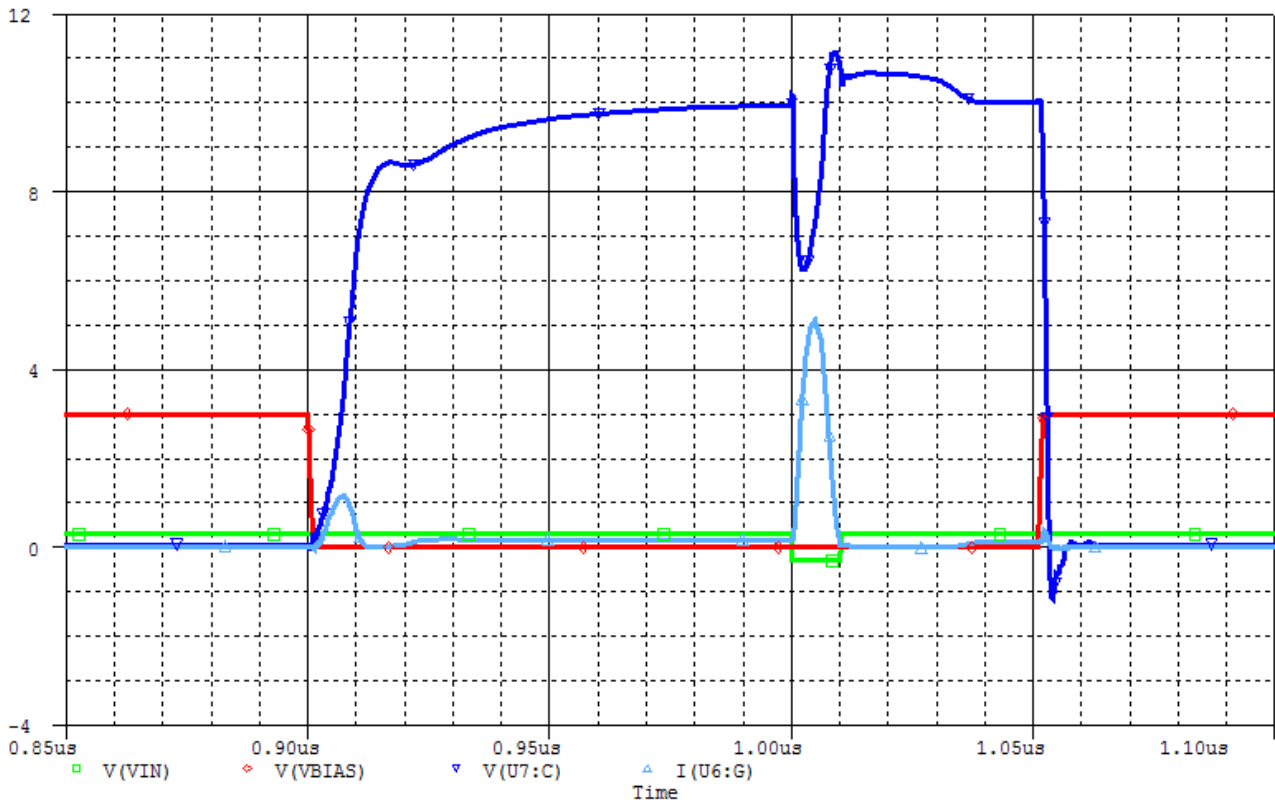
Η αντίσταση $R_{18}=47\Omega$ χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει την αντίσταση πηγής V_{bias} , ενώ τα πηνία L_{10} και L_{11} χρησιμοποιούνται για να ληφθούν υπόψη τυχόν επαγωγικά φαινόμενα.



Εικόνα 4.24: Οι τάσεις V_{in} (πράσινο), V_{bias} (κόκκινο), V_{BE} (μπλε) και V_{CB} (κίτρινο) του transistor U_7 .

Η έξοδος V_C του transistor U_7 , που φαίνεται στην εικόνα 4.25, εφαρμόζεται στο Gate ενός power mosfet U_6 αναγκάζοντας το να λειτουργεί στον κορεσμό, για αυτό το παράθυρο πόλωσης, επιτρέποντας έτσι στο power mosfet U_5 να καταναλώνει ένα ρεύμα για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

Στην εικόνα 4.25 φαίνονται οι τάσεις V_{in} και V_{bias} καθώς και η τάση εξόδου V_C του transistor U_7 , που εφαρμόζεται στο Gate του mosfet ισχύος αλλά και το ρεύμα I_D του transistor U_5 :



Εικόνα 4.25: Οι τάσεις V_{in} (πράσινο), V_{bias} (κόκκινο), V_C (μπλε) του transistor U_7 και το ρεύμα I_D (γαλάζιο) του mosfet ισχύος U_5 .

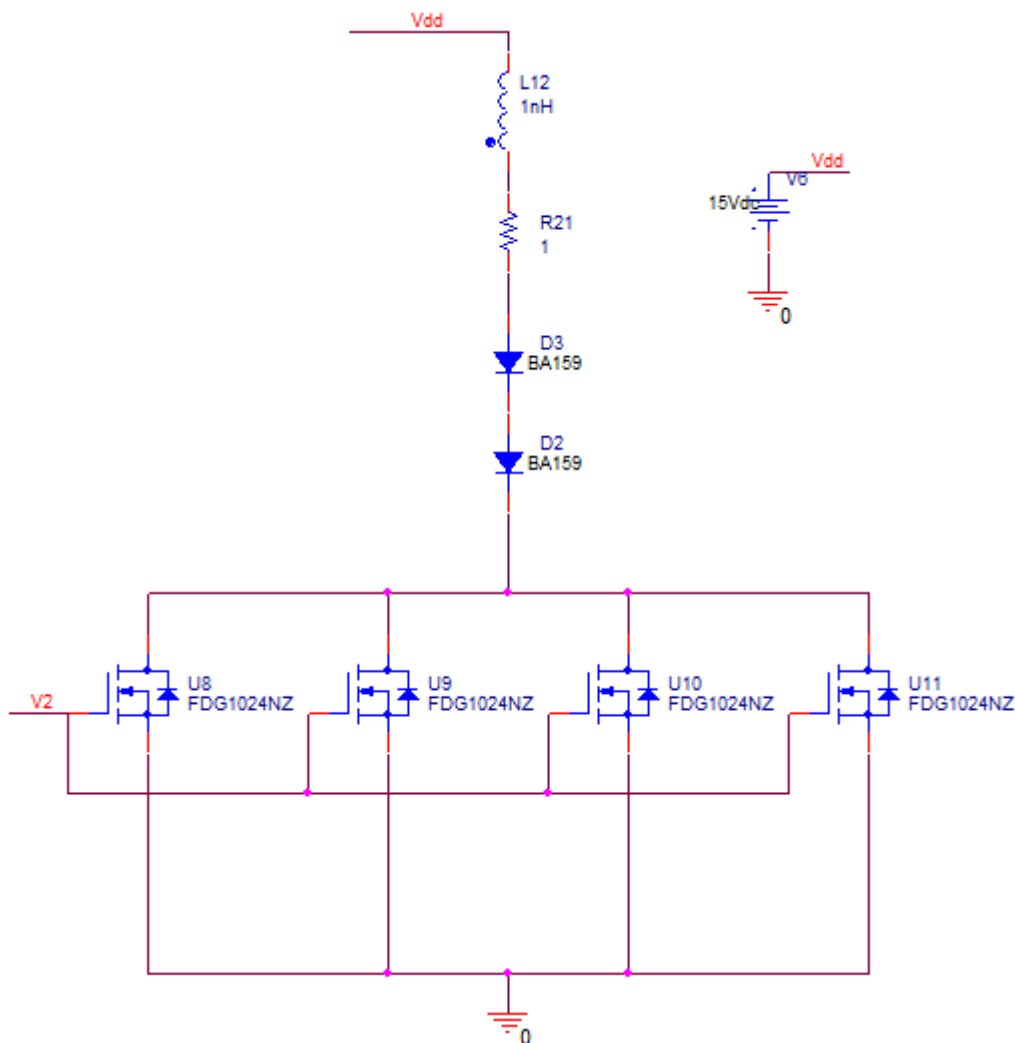
Παρατηρούμε ότι το ρεύμα I_D του mosfet ισχύος U_5 πολώνεται και παίρνει την τιμή 175mA περίπου, μέσα στο παράθυρο πόλωσης. Εκτός του παραθύρου αυτού, υπάρχει ένα πολύ μικρό ρεύμα 25mA το οποίο είναι ακίνδυνο για το transistor.

Επιπροσθέτως το pick του ρεύματος I_D μειώθηκε στα 5A, ενώ ταυτόχρονα έγινε πιο συμμετρικός.

Η έξοδος V_2 μαζί με το ρεύμα I_D είναι ικανά να τροφοδοτήσουν το τελικό στάδιο, αφού πλέον δεν υπάρχει κανένας κίνδυνος, και να οδηγήσουν το Laser.

4.6.4 Το στάδιο οδήγησης του Laser

Την έξοδο V_2 του ενισχυτή ρεύματος την εφαρμόζουμε σαν είσοδο στο στάδιο οδήγησης του Laser, που φαίνεται στην εικόνα 4.26 και αφαιρούμε το χωρητικό φορτίο C_5 .



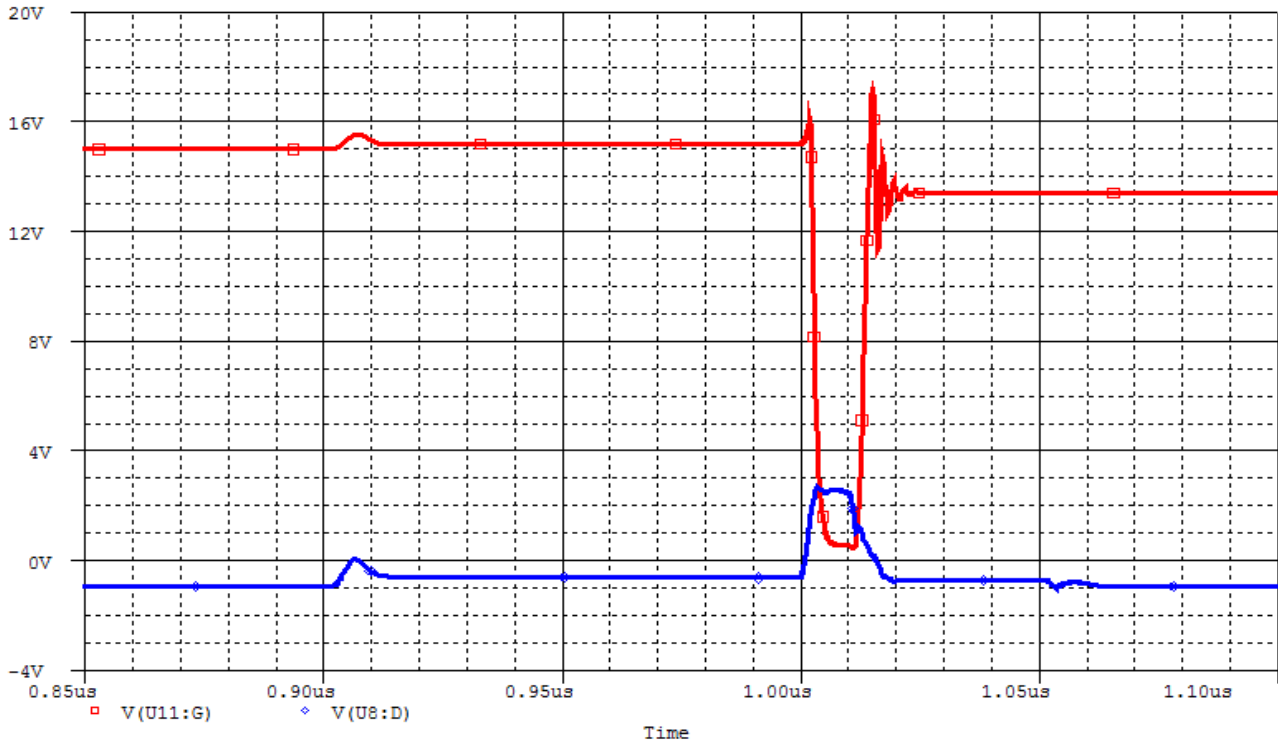
Εικόνα 4.26: Το στάδιο οδήγησης του Laser.

Στην εικόνα 4.26 φαίνεται ότι η τάση τροφοδοσίας είναι 15 Volt, μπορούμε όμως να τη μεταβάλλουμε και να παίρνει τιμές μέχρι και 20 Volt, με βάση το datasheet του mosfet ισχύος FDG1024NZ.

Οι δύο δίοδοι χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουμε το Laser, ενώ το πηνίο L8 για να ληφθούν υπόψη τυχόν επαγωγικά φαινόμενα.

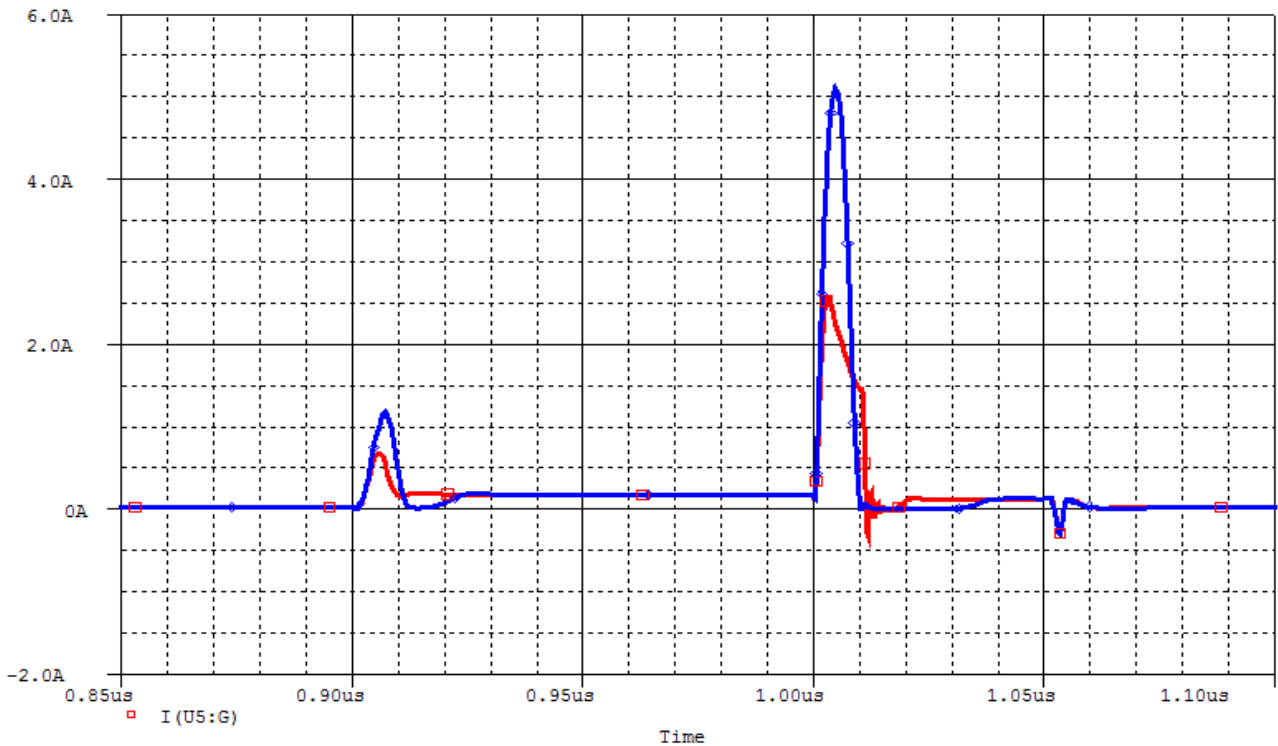
Ο πυκνωτής C_5 του ενισχυτή ρεύματος που αφαιρέθηκε, στην ουσία αντικαταστήθηκε από το σύνθετο χωρητικό φορτίο των τεσσάρων mosfet ισχύος που είναι συνδεδεμένα παράλληλα μεταξύ τους. Τα transistor U_8 , U_9 , U_{10} και U_{11} επιτρέπουν να οδηγούμε το Laser με περισσότερο ρεύμα. Τέλος τα transistor αυτά τα χρησιμοποιούμε σαν διακόπτες, αρχικά είναι σε μία κατάσταση off και η v_D έχει τιμή την τάση της τροφοδοσίας V_{DD} και έπειτα μεταβαίνει σε κατάσταση on, όπου τείνει να γίνει μηδενική.

Στην εικόνα 4.27 φαίνονται οι τάσεις V_2 και v_D :



Εικόνα 4.27: Η τάση V_2 και η τάση v_D των transistor U_8, U_9, U_{10} και U_{11} .

Πριν προχωρήσουμε στην παρουσίαση του συνολικού κυκλώματος, πρέπει να μελετήσουμε την μεταβολή στο ρεύμα I_D του transistor U_5 , πριν και αφού αντικαταστήσουμε τον πυκνωτή C_5 με το στάδιο οδήγησης του Laser και φαίνεται στην εικόνα 4.28 για V_{in} διάρκειας (διατηρεί την V_{low} τιμή της) 10ns και $V_{dd}=15V$:

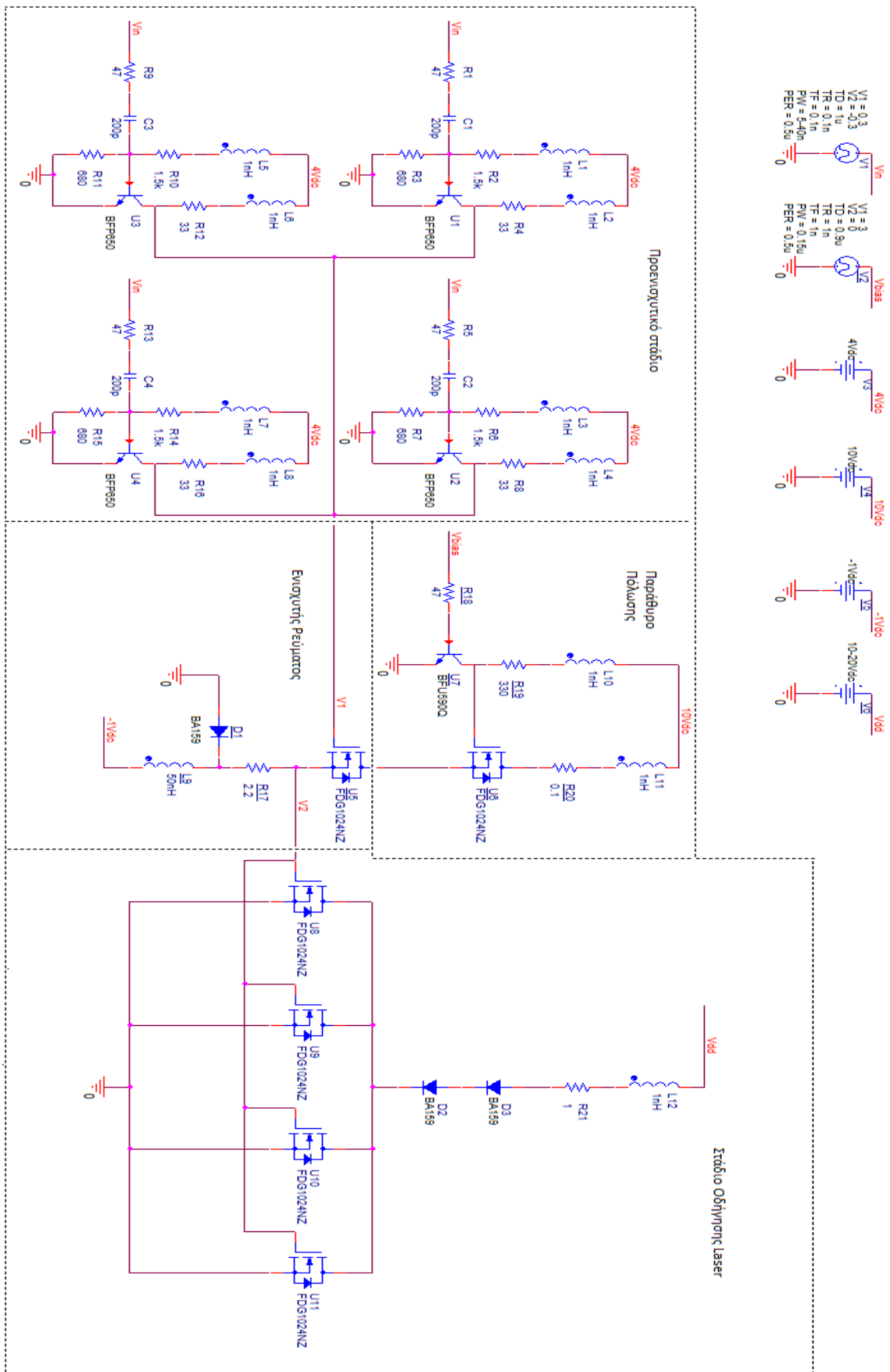


Εικόνα 4.28: Το ρεύμα I_D του transistor U_5 πριν(μπλε) και μετά(κόκκινο) την αντικατάσταση του πυκνωτή C_5 από το στάδιο οδήγησης του Laser.

Παρατηρούμε ότι το πλάτος του ρεύματος έχεις μειωθεί και αυτό οφείλεται στο ότι πιθανόν χρησιμοποιήσαμε μεγαλύτερο χωρητικό φορτίο από το σύνθετο χωρητικό φορτίο του σταδίου οδήγησης του Laser. Επίσης όταν το ρεύμα I_D πάρει την μέγιστη τιμή του, στην περίπτωση που ο πυκνωτής C_5 έχει αντικατασταθεί πλέον, τότε ο πυκνωτής $4C_{gs}$ αρχίζει να φορτίζεται και στην συνέχεια φτάνει σε ένα σημείο πλήρους φόρτισης και προσπαθεί να αντιδράσει, περνώντας το ρεύμα μέσα από το πηνίο L_9 .

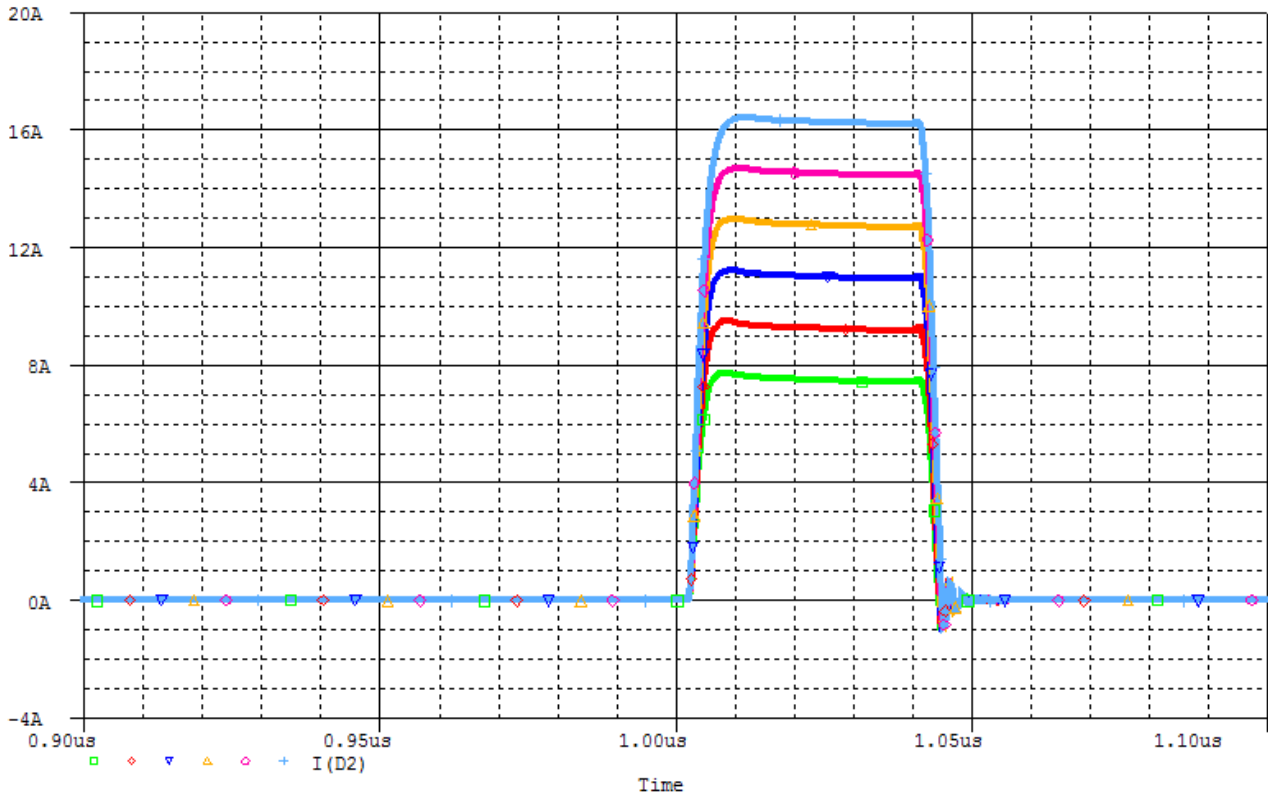
Έχοντας πλέον αναλύσει το ρόλο και την λειτουργία του κάθε υποκυκλώματος, προχωράμε στην παράθεση ορισμένων αποτελεσμάτων, αλλά και στην παρουσίαση του συνολικού κυκλώματος.

4.7 Το συνολικό κύκλωμα



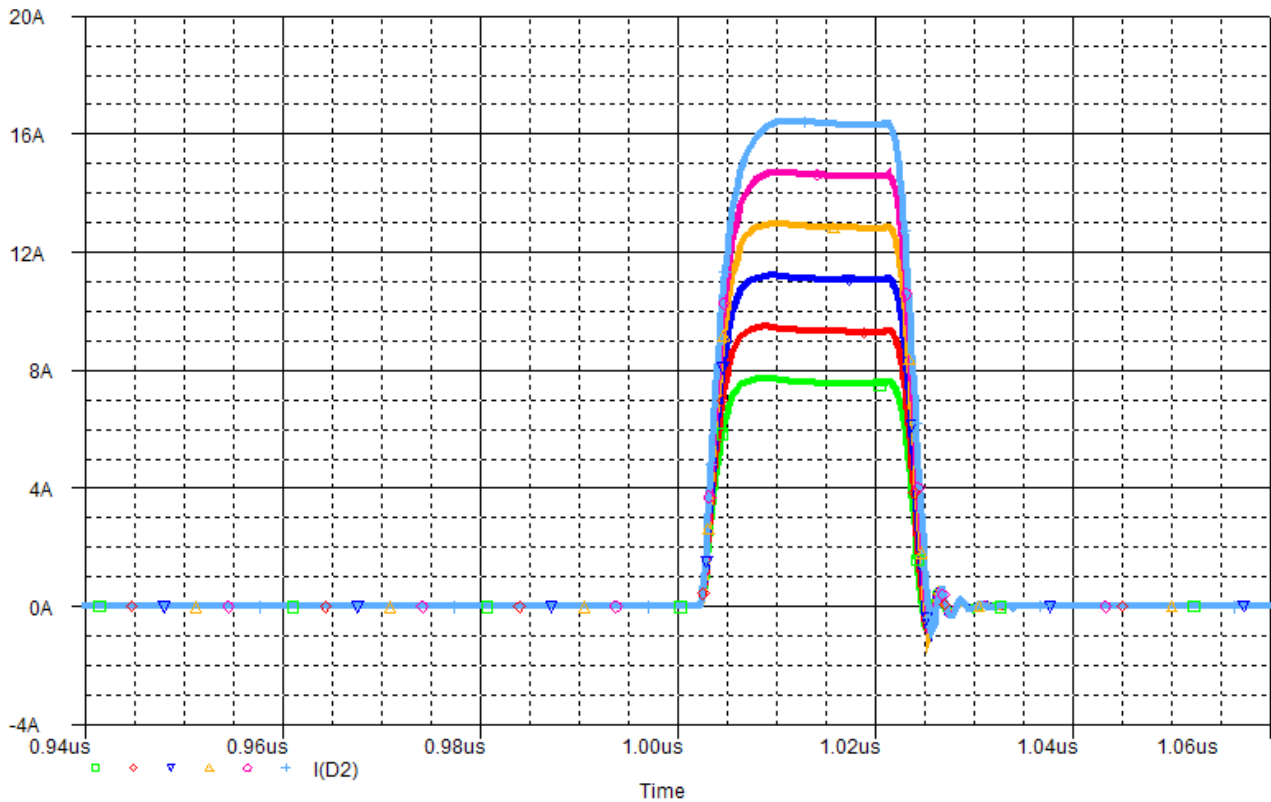
4.8 Τελικά αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή παραθέτουμε ορισμένα αποτελέσματα για τάση εισόδου V_{in} χρονικής διάρκειας (παίρνει την V_{low} τιμή της) 5ns, 10ns, 20ns και 40ns, ξεκινώντας αντίστροφα, καθώς η τάση τροφοδοσίας V_{dd} μεταβάλλεται από 10 – 20 Volt με βήμα 2Volt.



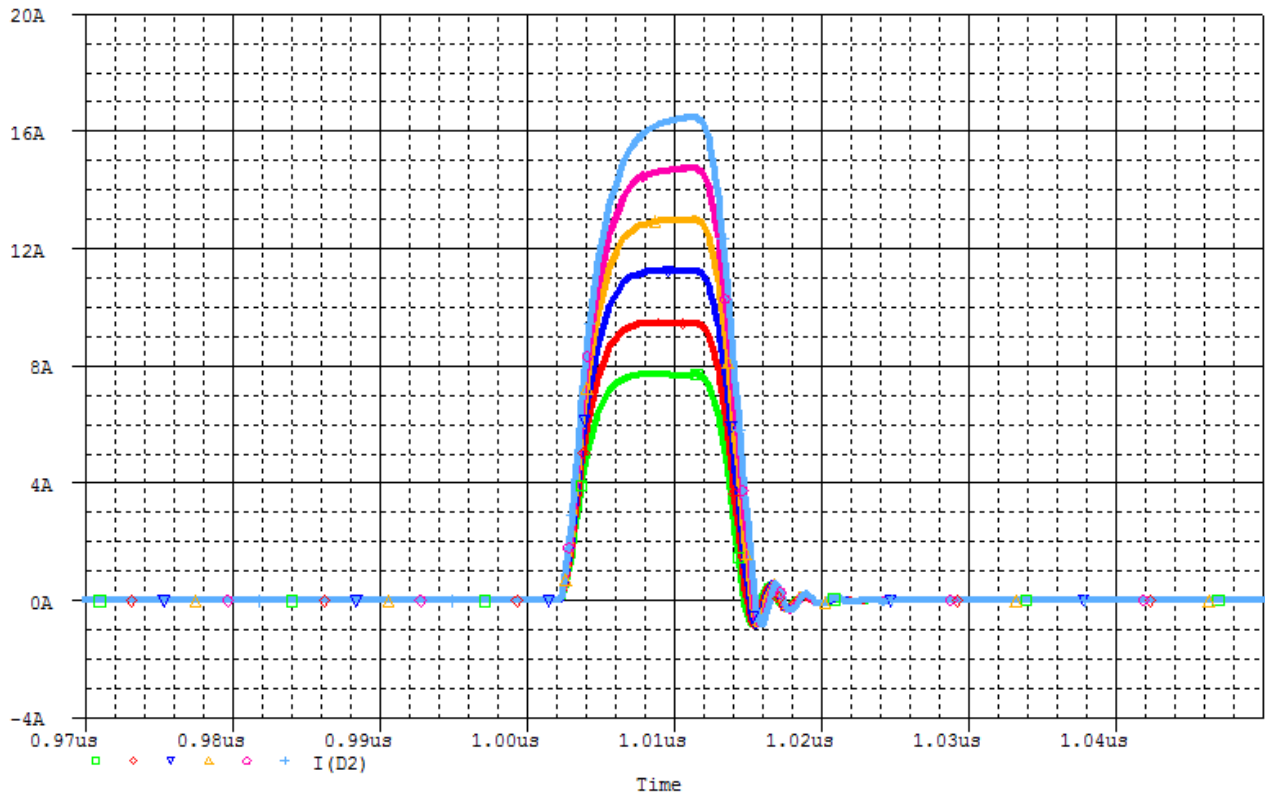
Εικόνα 4.30: Ο παλμός οδήγησης του Laser για V_{in} με $pulse\ width=40ns$.

Παρατηρούμε ότι για $V_{dd}=20\text{Volt}$ έχουμε έναν συμμετρικό παλμό χρονικής διάρκειας 42ns και πλάτους 16.3A, ενώ για $V_{dd}=10\text{Volt}$ έχουμε πάλι έναν συμμετρικό παλμό χρονικής διάρκειας 42.5ns και πλάτους 7.6A. Για V_{dd} 18 και 20 Volt κερδίσαμε 1.7A λειτουργώντας στην ανώτερη τροφοδοσία που επιτρέπεται με βάση το datasheet του FDG1024NZ.



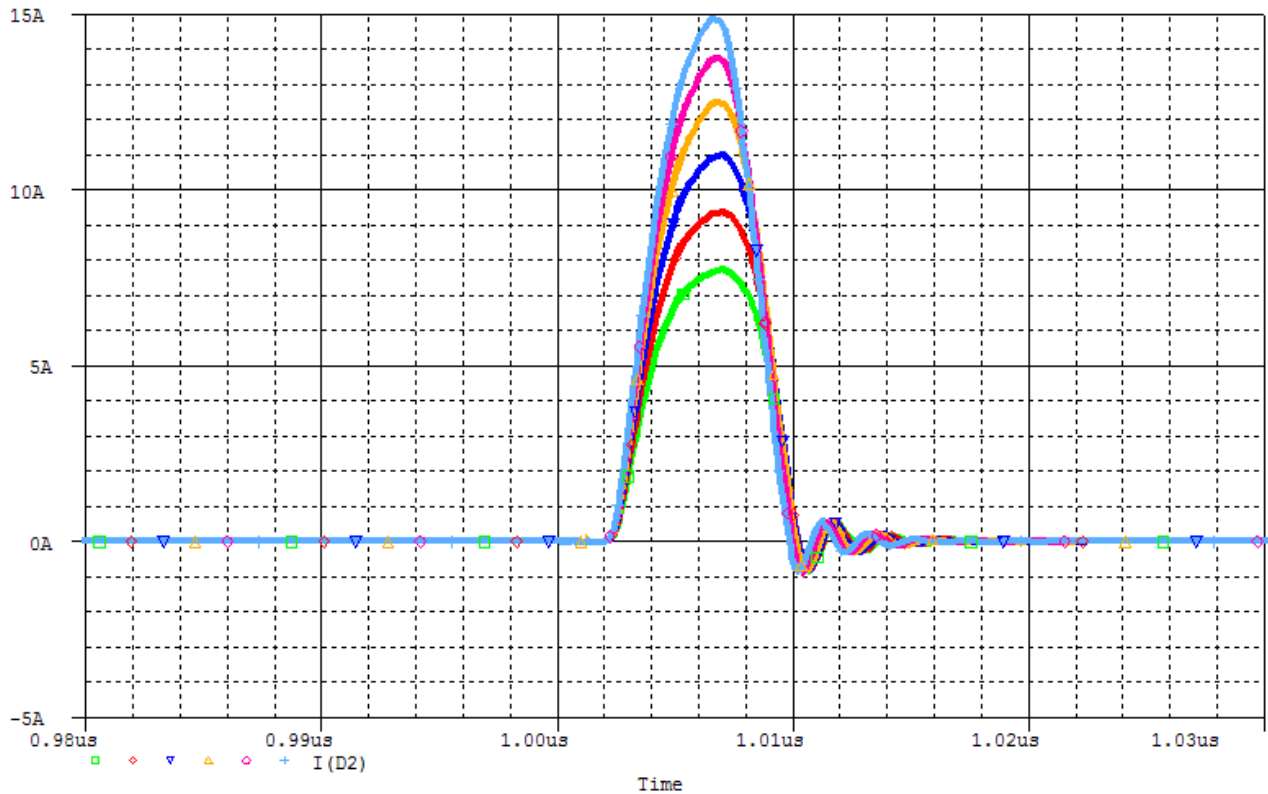
Εικόνα 4.31: Ο παλμός οδήγησης του Laser για V_{in} με $pulse\ width=20ns$.

Παρατηρούμε πάλι ότι για $V_{dd}=20Volt$ έχουμε έναν συμμετρικό παλμό χρονικής διάρκειας 23ns και πλάτους 16.3A, ενώ για $V_{dd}=10Volt$ έχουμε πάλι έναν συμμετρικό παλμό χρονικής διάρκειας 22.5ns και πλάτους 7.6A. Επομένως δεν άλλαξε τίποτα σε επίπεδο ρεύματος και ο χρόνος είχε τις αναμενόμενες μετατροπές.



Εικόνα 4.32: Ο παλμός οδήγησης του Laser για V_{in} με $pulse\ width=10ns$.

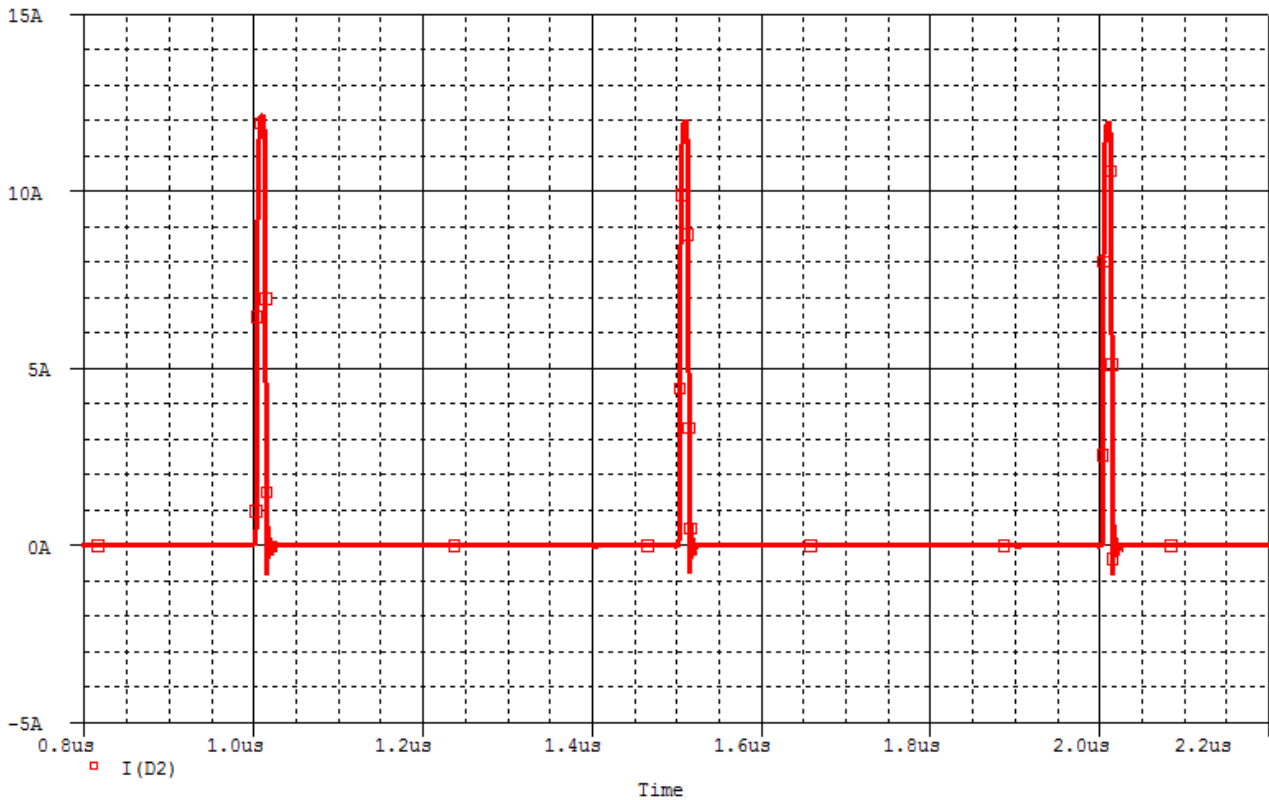
Για V_{dd} να παίρνει τιμές από 10 έως 16Volt τα αποτελέσματα παρέμειναν τα ίδια και πιο συγκεκριμένα στην πρώτη περίπτωση ο παλμός έχει χρονική διάρκεια 12.5ns και πλάτος 7.7A και είναι τελείως συμμετρικός, ενώ για τάση τροφοδοσίας V_{dd} άνω των 16V οι παλμοί απέκτησαν λίγο πιο αργή μεταβατική απόκριση στην άνοδο και πιο συγκεκριμένα ο παλμός για $V_{dd}=20V$ μεγάλωσε κατά 0.5ns από το αναμενόμενο και έχει χρονική διάρκεια 13.5ns με πλάτος 16.2A.



Εικόνα 4.33: Ο παλμός οδήγησης του Laser για V_{in} με $pulse\ width=5ns$.

Παρατηρούμε ότι για $V_{dd}=20V$ ο παλμός είναι τελείως συμμετρικός, έχει peak στα 15A και χρονική διάρκεια 8ns και είναι προφανώς προτιμότερος από τον παλμό που προκύπτει για $V_{dd}=10V$ ο οποίος είναι ελαφρώς μεγαλύτερος από 8ns και έχει πλάτος 7.7A. Επομένως όταν θα αναζητήσουμε κυρίως το βέλτιστο χρονικά αλλά και κατά πλάτος αποτέλεσμα, θα εφαρμόσουμε τη μέγιστη τάση τροφοδοσίας $V_{dd}=20V$.

Στην συνέχεια παραθέτουμε την εικόνα που θα έχει ο επιθυμητός παλμός για οδήγηση Laser και θα συνεχίσουμε αναφέροντας ορισμένες παραλλαγές που προέκυψαν κατά την κατασκευή του παλμού οδήγησης και θα καταλήξουμε στο βέλτιστο αποτέλεσμα που πετύχαμε.



Εικόνα 4.34: Ο παλμός οδήγησης του Laser για V_{in} με $pulse\ width=10ns$ στο χρονικό διάστημα $0.8 - 2.2us$.

Παρατηρούμε ότι όπως περιγράψαμε στην ενότητα 4.3 ο επιθυμητός παλμός της εικόνας 4.7, προσεγγίζει πολύ καλά το αποτέλεσμα που πετύχαμε με βάση το κύκλωμα που κατασκευάσαμε και φαίνεται στην παραπάνω εικόνα 4.34.

4.9 Παραλλαγές

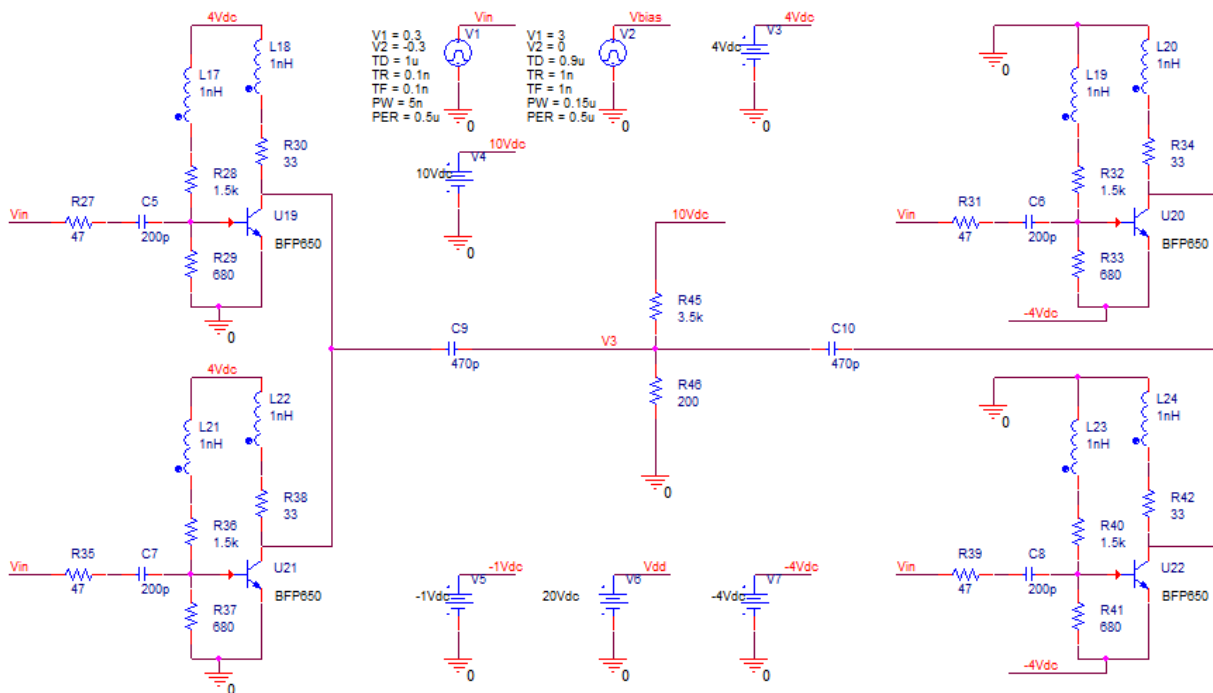
Κατά τον σχεδιασμό του κυκλώματος, μελετήσαμε διάφορα σχέδια και παραλλαγές με σκοπό την αναζήτηση του βέλτιστου παλμού κυρίως χρονικά, αλλά και ενός ικανοποιητικού πλάτους για να οδηγήσει το Laser.

Αξίζει να αναφέρουμε τις παραλλαγές αυτές με τις οποίες ασχοληθήκαμε και να τις συγκρίνουμε με το παραπάνω κύκλωμα και να αναφέρουμε την ειδοποιό διαφορά, που εν τέλει προτιμήσαμε το κύκλωμα που περιγράψαμε και αναλύσαμε παραπάνω.

Μια παραλλαγή είναι αυτή, που η διαφορά της με το παραπάνω κύκλωμα έγκειται στο στάδιο του προενισχυτή, όπου δεν χρησιμοποιήσαμε τέσσερα transistor παράλληλα, αλλά δημιουργήσαμε δύο διαφορετικά στάδια τροφοδοσίας. Τα στάδια τροφοδοσίας, είναι το πρώτο μεταξύ 0 έως 4 Volt και χρησιμοποιούμε δύο transistor παράλληλα και το δεύτερο από -4 έως 0 Volt όπου χρησιμοποιούμε άλλα δυο transistor παράλληλα, για να ενισχύσουμε το σήμα εισόδου V_{in} που παίρνουμε από την έξοδο του Driver.

Όλο το υπόλοιπο κύκλωμα παραμένει αυτούσιο χωρίς καμία αλλαγή-μετατροπή, με την μόνη εξαίρεση να χρειάζεται μία πόλωση όταν εφαρμόζουμε την έξοδο του προενισχυτικού σταδίου σαν είσοδο στον ενισχυτή ρεύματος. Σε αυτό το σημείο η πόλωση που πραγματοποιείται είναι ίση με την DC συνιστώσα που είχαμε στο κύκλωμα που αναλύσαμε και πιο συγκεκριμένα 546mV.

Στην εικόνα 4.35 φαίνεται το προενισχυτικό στάδιο γι' αυτήν την παραλλαγή:



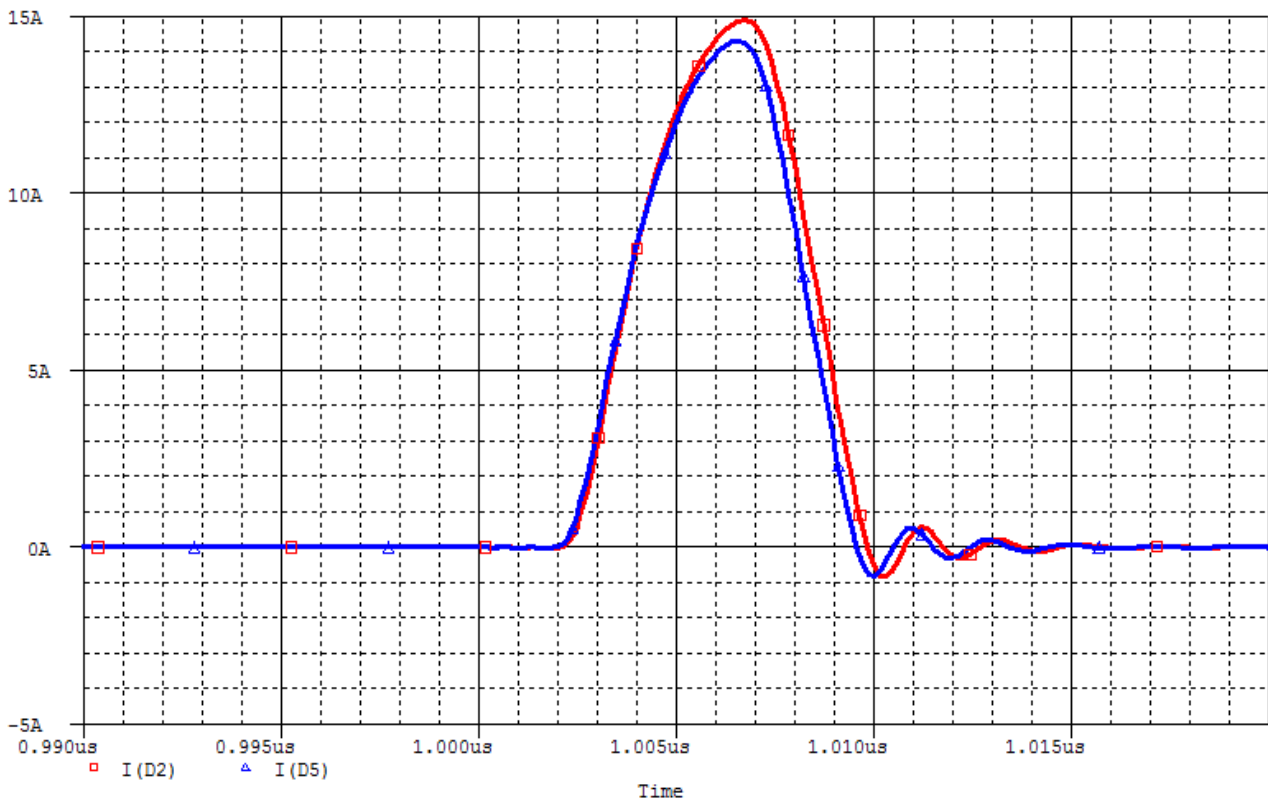
Εικόνα 4.35: Το προενισχυτικό στάδιο της πρώτης παραλλαγής.

Από τα αριστερά φαίνεται το πρώτο στάδιο τροφοδοσίας μεταξύ 0 έως 4 Volt και από τα δεξιά το δεύτερο στάδιο τροφοδοσίας μεταξύ -4 έως 0 Volt. Τα δύο αυτά στάδια συνδέονται στην έξοδο V_3 του προενισχυτικού σταδίου μέσω ενός πυκνωτή C_9 και C_{10} και ο καθένας έχει τιμή 470pF.

Στην συνέχεια πολώνουμε αυτό το σημείο μέσω των αντιστάσεων R_{45} και R_{46} έτσι ώστε να έχει DC συνιστώσα 546mV περίπου και το εφαρμόζουμε σαν είσοδο στον ενισχυτή ρεύματος.

Τα υποκυκλώματα ενισχυτής ρεύματος, παράθυρο πόλωσης και το τελικό στάδιο οδήγησης Laser παραμένουν χωρίς αλλαγές.

Στην εικόνα 4.36 φαίνονται συγκριτικά οι δύο παλμοί οδήγησης Laser, του κυκλώματος μας και αυτής της πρώτης παραλλαγής, για είσοδο V_{in} χρονικής διάρκειας 5ns και τάση τροφοδοσίας $V_{dd}=20\text{Volt}$.



Εικόνα 4.36: Σύγκριση των παλμών οδήγησης Laser μεταξύ του βασικού κυκλώματος (κόκκινο) και της πρώτης παραλλαγής (μπλε).

Παρατηρούμε ότι ενώ το κύκλωμα της πρώτης παραλλαγής ξεκινά πρώτο από το βασικό μας κύκλωμα, το δεύτερο έχει καλύτερη μεταβατική απόκριση με αποτέλεσμα να το φτάνει πριν προλάβει να φτάσει στο pick και να το ξεπερνά στην προσπάθεια του αυτή. Επίσης είναι ορατό πως το βασικό μας κύκλωμα έχει ένα pick μεγαλύτερο από την πρώτη παραλλαγή κατά 0.5A. Ακόμα το βασικό μας κύκλωμα καθυστερεί στο κλείσιμο κατά 200ps από το κύκλωμα της πρώτης παραλλαγής.

Τέλος το πιο βασικό πλεονέκτημα του βασικού μας κυκλώματος, που επίτηδες δεν αναφέραμε από την αρχή είναι πως τα τέσσερα παράλληλα transistor, που βρίσκονται υπό την ίδια τροφοδοσία σε αντίθεση με την πρώτη παραλλαγή που χρησιμοποιεί δύο διαφορετικά επίπεδα, μας επιτρέπουν μεγαλύτερη ευκολία στο να ρυθμίσουμε την πόλωση των transistor.

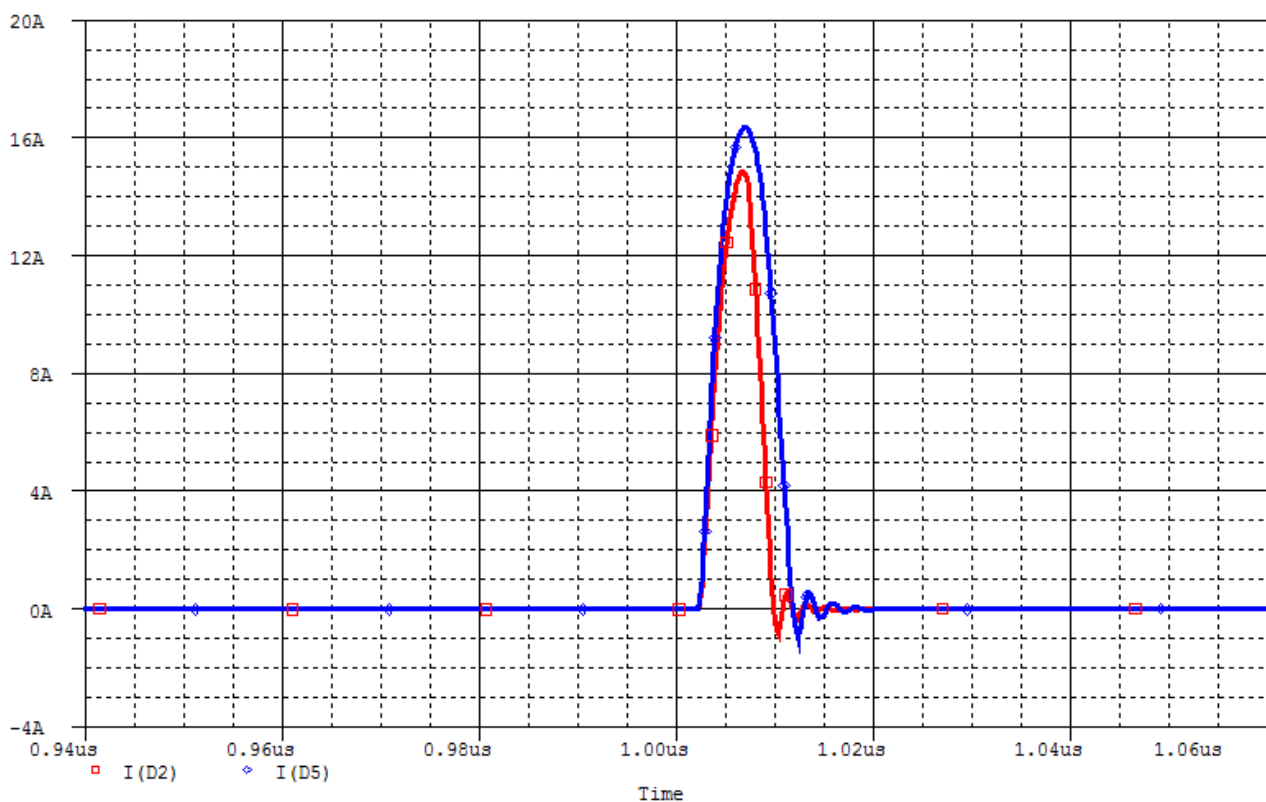
Συνοψίζοντας, η ευκολία ρύθμισης του σημείου πόλωσης είναι προφανώς το μεγαλύτερο πλεονέκτημα, αλλά και σε επίπεδο παλμού η υστέρηση στο κλείσιμο του παλμού κατά 200ps, είναι

αποδεκτή αφού κερδίζουμε σε καλύτερη μεταβατική απόκριση στο άνοιγμα και κερδίζουμε 0.5A στο πλάτος του παλμού.

Προχωράμε στην δεύτερη παραλλαγή, με την οποία ασχοληθήκαμε και ουσιαστικά είναι η ανάγκη να τροφοδοτήσουμε το τελικό στάδιο οδήγησης Laser με ισχυρότερο ρεύμα, για να πετύχουμε καλύτερο άνοιγμα των mosfet ισχύος, αλλά και να αυξήσουμε το πλάτος του παλμού οδήγησης του Laser.

Για να το πετύχουμε αυτό, χρησιμοποιούμε οχτώ transistor αντί τεσσάρων στο προενισχυτικό στάδιο και έξι mosfet ισχύος αντί τεσσάρων στο στάδιο οδήγησης του Laser, ενώ όλο το υπόλοιπο κύκλωμα παραμένει ως έχει, χωρίς αλλαγές-μετατροπές.

Στην εικόνα 4.37 φαίνονται συγκριτικά οι δύο παλμοί οδήγησης Laser, του κυκλώματος μας και αυτής της δεύτερης παραλλαγής, για είσοδο V_{in} χρονικής διάρκειας 5ns και τάση τροφοδοσίας $V_{dd}=20V$:



Εικόνα 4.37: Σύγκριση των παλμών οδήγησης Laser μεταξύ του βασικού κυκλώματος (κόκκινο) και της δεύτερης παραλλαγής (μπλε).

Παρατηρούμε ότι η ιδέα να δημιουργήσουμε ισχυρότερο ρεύμα για να τροφοδοτήσουμε το τελικό στάδιο οδήγησης του παλμού, είχε σαν αποτέλεσμα να πετύχουμε εμφανώς καλύτερη μεταβατική απόκριση στην άνοδο και υψηλότερο pick ρεύματος κατά 1.5A περίπου, αλλά και διεύρυνση του παλμού κατά 2ns.

Συνοψίζοντας, η δεύτερη παραλλαγή είχε σαφώς καλύτερα αποτελέσματα, αλλά όπως ήδη έχει διατυπωθεί, ο κυριότερος στόχος μας είναι η επίτευξη ενός παλμού οδήγησης Laser με όσο το δυνατόν μικρότερη χρονική διάρκεια και η αμέσως επόμενη προτεραιότητα είναι ένα ικανοποιητικό πλάτος του παλμού.

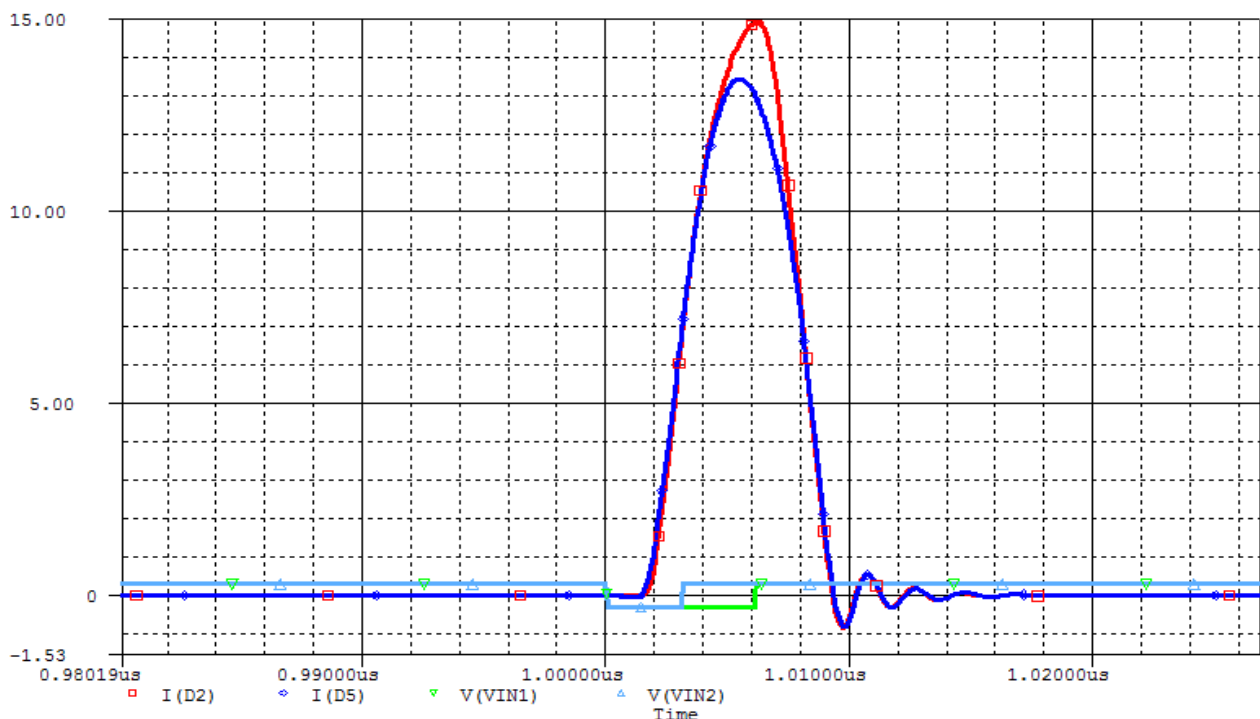
Επομένως μπορεί να κερδίσαμε, στην δεύτερη παραλλαγή, σε πλάτος και να πετύχαμε καλύτερη μεταβατική απόκριση, όμως ο κυριότερος στόχος μας δεν ικανοποιήθηκε καθώς ο παλμός ήταν μεγαλύτερος σε χρονική διάρκεια κατά 2ns, που είναι ένας χρόνος συγκρίσιμος με τον βέλτιστο παλμό που πετύχαμε και θα αναφερθεί στην επόμενη ενότητα.

Τέλος το γεγονός ότι στην δεύτερη παραλλαγή, χρειαζόμαστε έξι transistor παραπάνω, δεν αποτελεί και την πιο οικονομική σχεδίαση του κυκλώματος.

Μία ακόμη παραλλαγή που εξετάστηκε, είναι αυτή κατά την οποία δεχόμαστε δύο σήματα από τον Driver ρολογιού V_{in1} και V_{in2} . Το σήμα V_{in1} εφαρμόζεται στα transistor U_1 και U_2 του προενισχυτικού σταδίου και το σήμα V_{in2} εφαρμόζεται στα U_3 και U_4 αντίστοιχα. Η V_{in1} καθυστερεί κατά την μετάβαση από την V_{low} τιμή της στην V_{high} τιμή της κατά 2 – 3ns σε σχέση με την V_{in2} . Ουσιαστικά, οι τέσσερις συγχρονισμένες εξόδοι του Driver ρολογιού, εφαρμόζονται την ίδια χρονική στιγμή στα τέσσερα transistor (και θα βρίσκονται στην ενεργό περιοχή λειτουργίας, οριακά πριν μπου σε κορεσμό, όπως αναφέραμε), μεταβαίνουν ταυτόχρονα στην V_{low} τιμές τους (και τα τέσσερα transistor μεταβαίνουν σε αποκοπή), αλλά οι δύο από τις τέσσερις εξόδους διατηρούν την V_{low} τιμή τους για περισσότερο χρονικό διάστημα, 2 – 3ns (επομένως τα αντίστοιχα δύο transistor διατηρούνται στην αποκοπή για περισσότερο χρονικό διάστημα). Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να κλείσει πολύ πιο γρήγορα ο παλμός ρεύματος της διόδου Laser.

Στα δύο transistor που εφαρμόζεται ο παλμός V_{in2} χρησιμοποιούμε αντιστάσεις $R_{12}=R_{16}=18\Omega$, ενώ όλο το υπόλοιπο κύκλωμα παραμένει αυτούσιο χωρίς καμία αλλαγή-μετατροπή, με την μόνη εξαίρεση να χρειάζεται μία πόλωση όταν εφαρμόζουμε την έξοδο του προενισχυτικού σταδίου σαν είσοδο στον ενισχυτή ρεύματος. Σε αυτό το σημείο η πόλωση που πραγματοποιείται είναι ίση με την DC συνιστώσα που είχαμε στο κύκλωμα που αναλύσαμε και πιο συγκεκριμένα 546mV.

Στην εικόνα 4.38 φαίνονται συγκριτικά οι δύο παλμοί οδήγησης Laser, του κυκλώματος μας και αυτής της τρίτης παραλλαγής, για είσοδο V_{in} χρονικής διάρκειας 5ns, V_{in1} χρονικής διάρκειας 6ns, V_{in2} χρονικής διάρκειας 3ns και τάση τροφοδοσίας $V_{dd}=20\text{Volt}$.



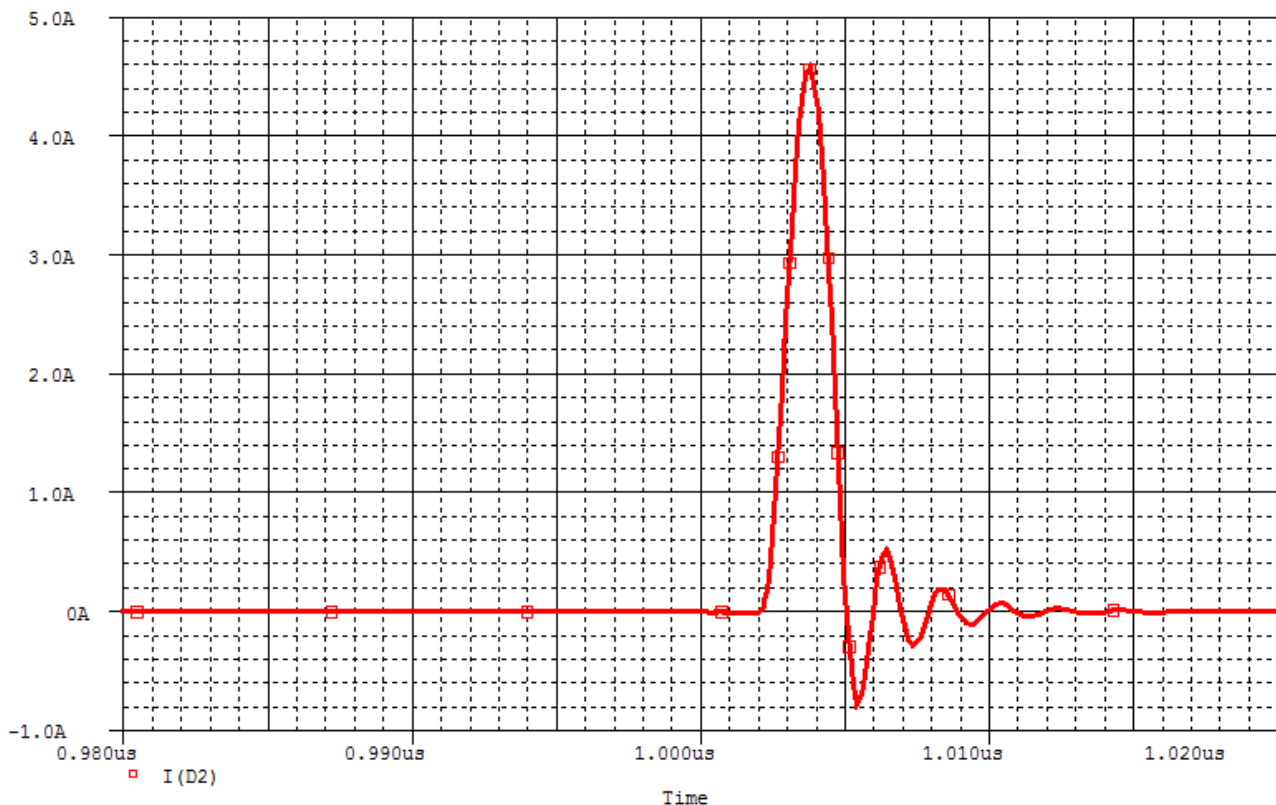
Εικόνα 4.38: Σύγκριση των παλμών οδήγησης Laser μεταξύ του βασικού κυκλώματος (κόκκινο) και της τρίτης παραλλαγής (μπλε), V_{in1} (γαλάζιο) και V_{in2} (πράσινο).

Παρατηρούμε ότι ενώ το κύκλωμα της τρίτης παραλλαγής ξεκινά πρώτο από το βασικό μας κύκλωμα, το δεύτερο έχει καλύτερη μεταβατική απόκριση. Ο παλμός ρεύματος του βασικού μας κυκλώματος είναι συμμετρικός, σε αντίθεση με τον παλμό της τρίτης παραλλαγής. Επίσης είναι ορατό πως το βασικό μας κύκλωμα έχει ένα pick μεγαλύτερο από την πρώτη παραλλαγή κατά 1.5A, περίπου. Το κλείσιμο των δύο παλμών είναι πανομοιότυπο και πιο συγκεκριμένα το κλείσιμο της τρίτης παραλλαγής καθυστερεί αρκετά, σχεδόν 1.5ns να πάρει την κλίση την οποία θέλαμε να πετύχει. Τέλος καθίσταται εμφανής η ανωτερότητα του βασικού μας κυκλώματος σε σχέση με το κύκλωμα της τρίτης παραλλαγής, όσον αφορά το κλείσιμο του παλμού, του πλάτους ρεύματος, της συμμετρικότητας και της μεταβατικής απόκρισης.

Σαν τελευταία σημείωση, αναφέρουμε ότι σε μία ακόμα παραλλαγή, επιχειρήθηκε το κλείσιμο του transistor U5 να γίνει με διαφορετικό κύκλωμα, για να πετύχουμε καλύτερα αποτελέσματα και κατά το άνοιγμα και κατά το κλείσιμο του τελικού παλμού οδήγησης Laser. Το διαφορετικό κύκλωμα αυτό, είχε ως στοιχεία power mos ισχύος και είχε την ίδια λογική και φιλοσοφία που ακολουθήσαμε, δηλαδή έπρεπε να το οδηγήσουμε και αυτό. Εν τέλει το συνολικό κύκλωμα θα κατέληγε να είναι πολύ μεγάλο, πράγμα που δεν θα ήταν επιθυμητό, κατά την πορεία της κατασκευής.

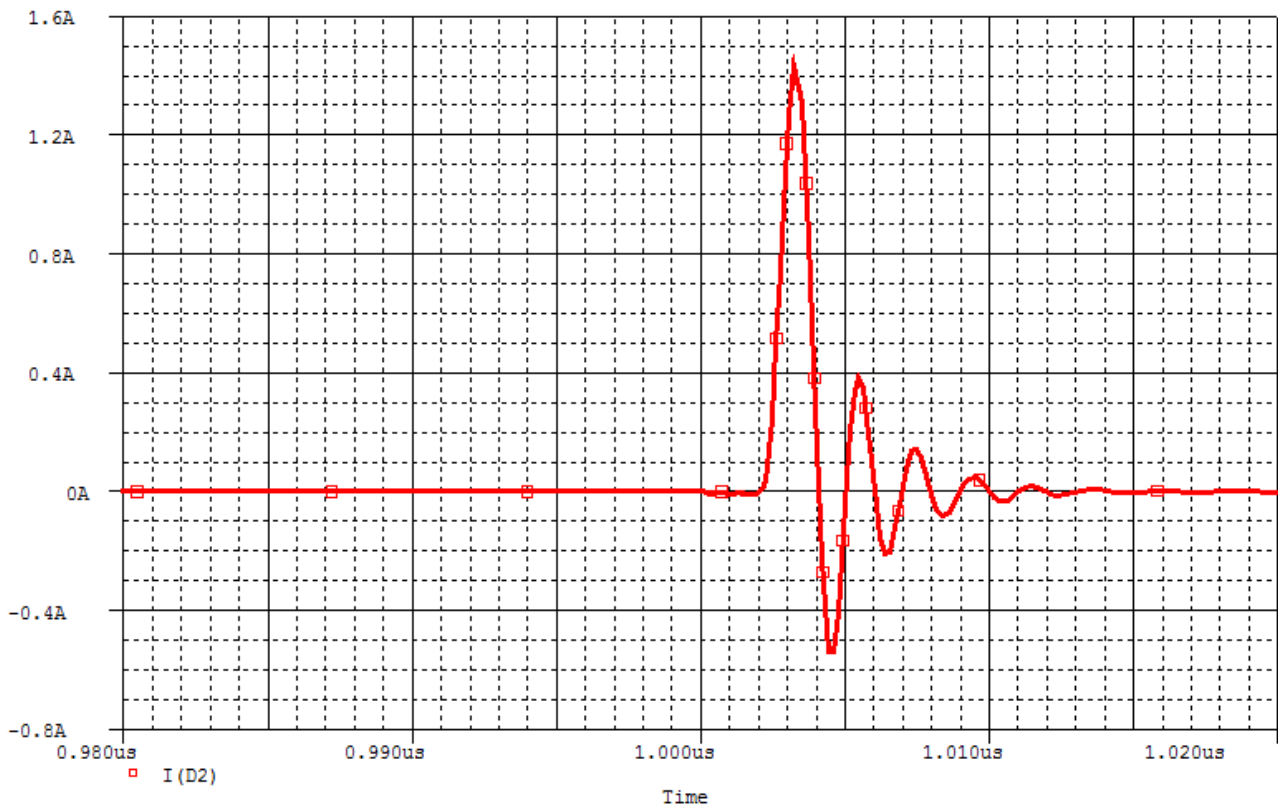
4.10 Βέλτιστα αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή παραθέτουμε τα καλύτερα αποτελέσματα που πετύχαμε με το παραπάνω κύκλωμα. Αρχικά αναζητάμε το παλμό οδήγησης Laser που να ικανοποιεί τις απαιτήσεις μας τόσο σε επίπεδο χρόνου όσο και σε επίπεδο πλάτους ρεύματος και συνεχίζουμε με τον παλμό που “σπάει” το φράγμα των 2ns. Τέλος αναζητούμε τον παλμό, ο οποίος φτάνει σε pick το 1A, με σκοπό να βρεθούν τα όρια της χρονικής του διάρκειας που αποτέλεσε τον κυριότερο στόχο μας.



Εικόνα 4.39: Παλμός οδήγησης Laser χρονικής διάρκειας 3ns και πλάτους 4.6A.

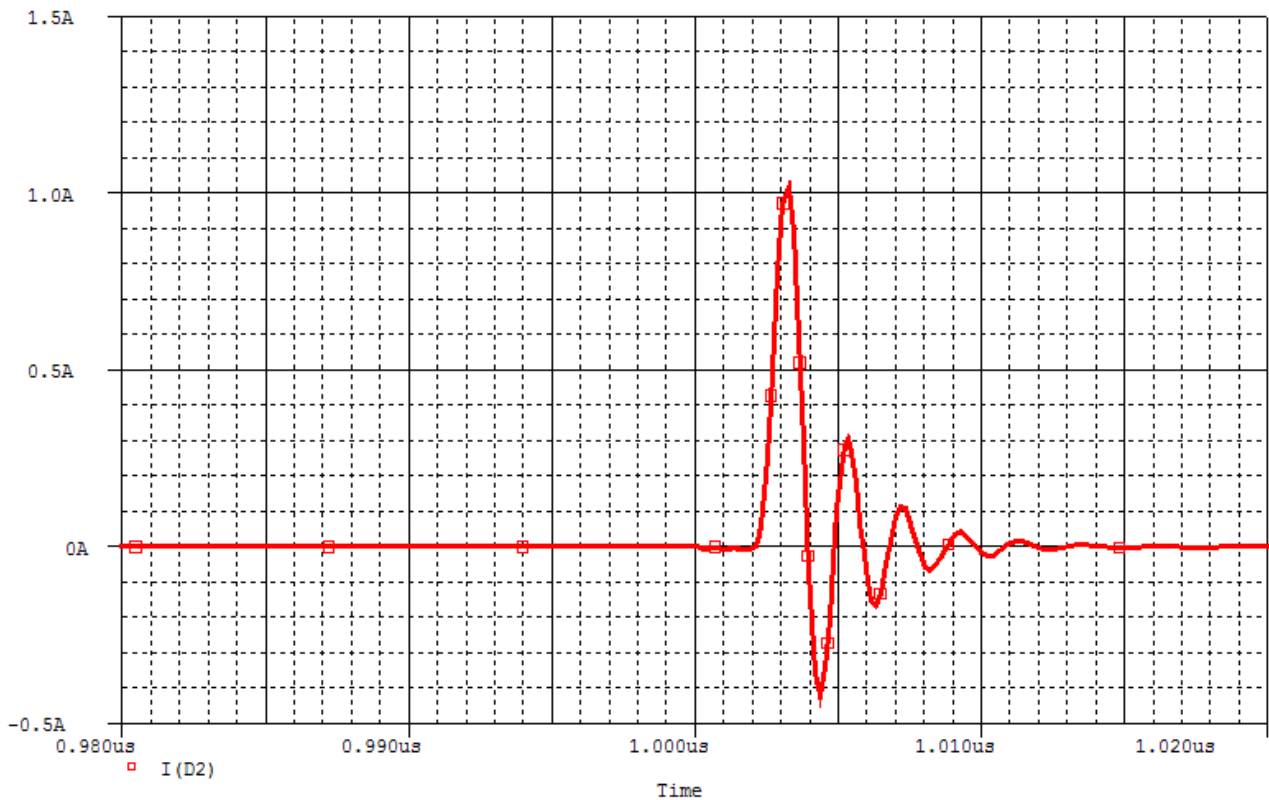
Ο παλμός που φαίνεται στην εικόνα 4.39 είναι ένας παλμός που ικανοποιεί τόσο τις βασικές απαιτήσεις μας σε χρόνο όσο και σε πλάτος. Έχει χρονική διάρκεια 3ns και πλάτος 4.6A.



Εικόνα 4.40: Παλμός οδήγησης Laser χρονικής διάρκειας 2ns και πλάτους 1.4A.

Ο παλμός της εικόνας 4.40 είναι ένας παλμός οδήγησης Laser που όπως αναφέραμε έχει χρονική διάρκεια 2ns και φτάνει τα 1.4A σε πλάτος. Είναι ορατό ότι πλέον εισέρχονται ανεπιθύμητες ταλαντώσεις, που αν και υπήρχαν και στον παλμό της εικόνας 4.39 πλέον οι δευτερογενείς παλμοί που εισέρχονται είναι συγκρίσιμοι του βασικού παλμού και φτάνουν το 1/3 του πλάτους του.

Τέλος αναζητούμε τον παλμό με πλάτος 1A με σκοπό να υπολογίσουμε την ελάχιστη δυνατή χρονική διάρκεια που μπορούμε να πετύχουμε με αυτό το κύκλωμα.



Εικόνα 4.41: Παλμός οδήγησης Laser με πλάτους 1A και χρονικής διάρκειας 1.85ns.

Επομένως ο ελάχιστος δυνατός παλμός που πετύχαμε με την παραπάνω σχεδίαση του κυκλώματος, είναι κάτω από 2ns και πιο συγκεκριμένα είναι 1.85ns σε χρονική διάρκεια, έχοντας πλάτος ρεύματος 1A.

Όπως αναφέραμε οι ανεπιθύμητες ταλαντώσεις που υπεισέρχονται είναι ακόμα πιο αισθητές, πράγμα που σηματοδοτεί ότι δεν μπορούμε να πέσουμε κάτω από αυτό το χρόνο.

Καταφέραμε να φτιάξουμε παλμούς που αγγίζουν τα 2ns και πέφτουν σε χρόνο ακόμα πιο κάτω. Εν τέλει προσεγγίσαμε σε μεγάλο βαθμό τον αρχικό μας στόχο.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα – Μελλοντική εργασία

Στην εργασία αυτή καταφέραμε να σχεδιάσουμε και να κατασκευάσουμε ένα κύκλωμα οδήγησης Laser. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα του τελευταίου κεφαλαίου, το κύκλωμα λειτουργεί ικανοποιητικά, δημιουργώντας παλμούς των ns με ένα αρκετά μεγάλο πλάτος και προσεγγίζει τον αρχικό μας στόχο. Έτσι, αποδεικνύεται η εγκυρότητα των σχεδιαστικών επιλογών που λάβαμε.

Η συμβολή της εργασίας συνοψίζεται στα εξής:

- Μελετήσαμε την συμπεριφορά των ηλεκτρονικών στοιχείων σε σχέση με την θερμοκρασία και προχωρήσαμε σε μία ανάλυση που θα μας επέτρεπε να λειτουργήσουμε, χωρίς να μπαίνει σε κίνδυνο το κύκλωμα.
- Αποφύγαμε την χρήση πυκνωτών που σε συνδυασμό με την χωρητικότητα C_{gs} θα επέφερε στο κύκλωμα αλλοίωση και καθυστέρηση του παλμού λόγω της αργής φόρτισης και εκφόρτισης των πυκνωτών. Επίσης επιχειρήσαμε να προσομοιάσουμε τα επαγωγικά φαινόμενα που θα υπεισέρχονταν λόγω των καλωδίων τοποθετώντας πηνία στα σημεία σύνδεσης με την τροφοδοσία.
- Σε συνδυασμό με το παραπάνω αποδείχτηκε ότι η οικονομική σχεδίαση είναι και η βέλτιστη, όταν μελετήσαμε την δεύτερη παραλλαγή.
- Πραγματοποιήσαμε έλεγχο σε όλα τα ηλεκτρονικά στοιχεία έτσι ώστε κανένα να μην καταναλώνει περισσότερο από 300mW σε κατάσταση ηρεμίας, διότι πιθανόν να καταστρέφονταν και θα έθεταν στη συνέχεια το υπόλοιπο κύκλωμα σε κίνδυνο. Αυτός ο έλεγχος οδήγησε στην κατεύθυνση μας, να δημιουργήσουμε έναν ελεγκτή που θα μας προσέδιδε ένα παράθυρο πόλωσης για να λειτουργήσει το mosfet ισχύος U_5 . Είναι δηλαδή φανερό η προσέγγιση μας, να μελετηθεί το κύκλωμα υπό ρεαλιστικές διαδικασίες.
- Τέλος καθίσταται ορατό ότι η ανάγκη να τροφοδοτήσουμε το τελικό στάδιο οδήγησης Laser, αλλά και τα επιμέρους στάδια, με ένα ισχυρό ρεύμα έχει ως αποτέλεσμα ένα αντίστοιχο πολύ ισχυρό ρεύμα στην έξοδο, που παρόλο δεν αποτελούσε τον κύριο στόχο αυτής της εργασίας κατέδειξε, ότι κατά την διαδικασία αναζήτησης του ελάχιστου δυνατού χρόνου για ρεύμα εξόδου πλάτους 1A, το πλάτος του ρεύματος πέφτει απότομα καθώς ο χρόνος μειώνεται. Το ισχυρό ρεύμα λοιπόν, που είχαμε δημιουργήσει μας επέτρεψε να φτάσουμε στα 1.85ns.

5.1 Μελλοντική έρευνα

Μελλοντική έρευνα και ανάλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί με σκοπό την δημιουργία ηλεκτρονικών υλικών, διαθέσιμων στο εμπόριο, που να είναι ικανά να λειτουργούν σε πολύ υψηλές συχνότητες, για να μας επιτρέψουν να πετύχουμε μία τάξη μεγέθους μικρότερη στο χρονικό διάστημα. Επίσης θα πρέπει να παρέχουν ένα ικανοποιητικό κέρδος τάσης/ρεύματος και να έχουν πολύ μικρές εσωτερικές πυκνότητες σε συνδυασμό με την ύπαρξη των αντίστοιχων μοντέλων προσομοίωσης τους. Τέλος αναφερόμαστε ότι θα ήταν ιδιαίτερα εποικοδομητικό να δημιουργήσουμε δικά μας ολοκληρωμένα και transistor, για να κατασκευάσουμε ένα καλύτερο κύκλωμα. Η τεχνολογία, ήδη μας παρέχει transistor με f_t της τάξης των 300GHz, αλλά όλα αυτά είναι ακόμη σε ερευνητικό στάδιο και όχι στην παραγωγή και το εμπόριο.

Βιβλιογραφία

1. Wilson, J., JohnHawkes, J. (2004). “*Οπτοηλεκτρονική: μια εισαγωγή*”. Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π, τρίτη αγγλική έκδοση
2. Kasap, S. O. (2004). “*Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και Διατάξεων*”. Αθήνα: Παπασωτηρίου, δεύτερη έκδοση
3. <https://el.wikipedia.org/wiki/Φωταύγεια>
4. [https://chem.libretexts.org/Textbook_Maps/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Map/s/Map%3A_Physical_Chemistry_\(McQuarrie_and_Simon\)/15%3A_Lasers%2C_Laser_Spectroscopy%2C_and_Photochemistry/15.1%3A_Electronically_Excited_Molecules_can_Relax_by_a_Number_of_Processes](https://chem.libretexts.org/Textbook_Maps/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Map/s/Map%3A_Physical_Chemistry_(McQuarrie_and_Simon)/15%3A_Lasers%2C_Laser_Spectroscopy%2C_and_Photochemistry/15.1%3A_Electronically_Excited_Molecules_can_Relax_by_a_Number_of_Processes)
5. <https://el.wikipedia.org/wiki/Καρκίνος>
6. Berg, K. (2009). “*Photosensitizers in Medicine*”.
7. Wilson, B.C. (2002). “*Photodynamic therapy for cancer: Principles*”, Can J Gastroenterol 2002, 16(6):393-396
8. Brancalion, L., Moseley H. (2002) “*Laser and Non-laser Light Sources for Photodynamic Therapy*”, Lasers Med Sci, 17:173-186
9. Serway, R. A., Moses, C. J., Moyer, C. A (2013) “*Σύγχρονη Φυσική*”, Κρήτη: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης
10. X. Γεμενετζής, X., Παπαγιάννης, Α., Σεραφετινίδης, Α., Τσακνάκης, Γ. (2005). “*Εργαστηριακές Ασκήσεις Οπτοηλεκτρονικής – Φυσικής και Τεχνολογίας των Lasers*”, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ε.Μ.Φ.Ε, Τομέας Φυσικής,
11. Γεωργακόπουλος, Π. Α. (2013). “*Σχεδιασμός και Κατασκευή Κυκλώματος Παλμών Υψηλής Ισχύος για Τροφοδοσία Laser*”, Αθήνα
12. <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/HBD856-D.PDF>
13. https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_7.html
14. Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith (2011). “*Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα*”, Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου, πέμπτη έκδοση
15. <https://www.infineon.com/dgdl/mosfet.pdf?fileId=5546d462533600a4015357444e913f4f>
16. <http://www.mouser.com/ds/2/149/FDG1024NZ-1007537.pdf>

17. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BFP650-DS-v01_01-en.pdf?fileId=db3a30431400ef6801142743b0330715

18. <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/BFU590Q.pdf>

