

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
National Technical University of Athens



Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχ. & Μηχ. Υπολογιστών
School of Electrical and Computer Engineering

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Division of Communication, Electronics and Computer Systems

Sensors Lab

Κατασκευή συσκευής **Spin Coating**
για Λιθογραφία

Διπλωματική Εργασία
του
Στέφανου Π. Κοντόπουλου

Επίβλεψη:

Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
National Technical University of Athens



Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχ. & Μηχ. Υπολογιστών
School of Electrical and Computer Engineering

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Division of Communication, Electronics and Computer Systems

Sensors Lab

Κατασκευή συσκευής **Spin Coating**
για Λιθογραφία

Διπλωματική Εργασία
του
Στέφανου Π. Κοντόπουλου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 7^η Οκτωβρίου 2022.

.....
Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου Κωνσταντίνος Πολιτόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αναπληρωτής Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Γκόνος
Αναπληρωτής Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

.....

Στέφανος Π. Κοντόπουλος

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

Copyright © - All rights reserved | Στέφανος Π. Κοντόπουλος, 2022

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματεύεται την ανάπτυξη μια συσκευής για τη δημιουργία λεπτών στρωμάτων πολυμερούς υλικού μέσω της τεχνικής: επίστρωση μέσω περιστροφής. Αρχικά, γίνεται μια ανασκόπηση της οπτικής λιθογραφίας που αποτελεί εφαρμογή αυτής της συσκευής. Έτσι γίνεται σαφής η χρησιμότητα της και στη συνέχεια αναλύεται η αρχή λειτουργίας της. Έπειτα, αφού κατασκευασθεί και παρουσιαστεί η διάταξη, ακολουθεί το πειραματικό μέρος όπου παρουσιάζεται στην πράξη η αποτελεσματικότητα της στη λιθογραφία. Αυτό περιλαμβάνει, πέρα από τη δημιουργία λεπτού στρώματος πολυμερούς ρητίνης πάνω σε δισκίο πυριτίου, την αποτύπωση μιας συστοιχίας πυκνωτή μέσω της έκθεσης σε υπεριώδη ακτινοβολία. Τέλος, τα αποτελέσματα του πειράματος κρίθηκαν αρκετά ικανοποιητικά, καθώς αποτυπώθηκε πλήρως το ζητούμενο κύκλωμα, λαμβάνοντας υπόψιν και τις συνθήκες στις οποίες πραγματοποιήθηκε.

Λέξεις Κλειδιά: Επίστρωση περιστροφής, Οπτική λιθογραφία, Μικροελεγκτής, Φωτοευαίσθητο πολυμερές, Λεπτά υμένα

Abstract

This Diploma Thesis deals with the development of a device for creating thin layers of polymer material through the spin coating technique. First, an optical lithography application of this device is reviewed. Thus, its usefulness becomes clear and then its operating principle is analysed. Then, after the device is manufactured and presented, the experimental part follows where its effectiveness in lithography is demonstrated in practice. This involves, in addition to creating a thin layer of polymer resin on a silicon wafer, imprinting a capacitor array through UV exposure. Finally, the results of the experiment were deemed quite satisfactory, as the requested circuit was fully printed, taking into account the conditions in which it was carried out.

Keywords: Spin coating lithography, Optical lithography, Microcontroller, Photosensitive polymer, Thin films

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου για την ευκαιρία που μου έδωσε να καταπιαστώ με την ανάπτυξη αυτής της, χρήσιμης για το εργαστήριο, συσκευής αλλά και για τη συνεχή του στήριξη καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Αντώνη Γεωργά για την άψογη συνεργασία μας στα πειράματα αλλά και σε κάθε δυσκολία που αντιμετώπιζα σε όλη τη διάρκεια της Διπλωματικής Εργασίας. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη του εργαστηρίου Αισθητήρων για την παρεχόμενη βοήθεια τους σε θέματα εργαστηρίου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αστείρευτη υποστήριξη και κατανόηση σε κάθε δυσκολία κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Στέφανος Π. Κοντόπουλος

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

Πίνακας Περιεχομένων

Λίστα Σχημάτων	xi
1 Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας	1
1.2 Οργάνωση της Διπλωματικής Εργασίας	1
2 Θεωρητικό Μέρος	3
2.1 Οπτική Λιθογραφία	3
2.2 Διαδικασία Οπτικής Λιθογραφίας	5
2.2.1 Μεθοδολογία Θετικής Λιθογραφίας	5
2.2.2 Μεθοδολογία Αρνητικής Λιθογραφίας	8
2.3 Βήματα Οπτικής Λιθογραφίας	10
2.4 Τεχνική Spin Coating	11
2.4.1 Εισαγωγικά	11
2.4.2 Θεωρητικό υπόβαθρο	12
2.4.3 Διαδικασία Spin Coating	15
2.4.4 Πρότυπη Διάταξη Spin Coater	16
2.5 Μικροελεγκτές	17
2.5.1 Εισαγωγικά	17
2.5.2 Arduino	18
2.6 Κινητήρες	20
2.6.1 ESC	22
2.7 Μέθοδοι Μέτρησης και Επιλογής Ταχύτητας Κινητήρα	22
2.8 Οπτικοί αισθητήρες	24
3 Πειραματικό Μέρος	27
3.1 Εισαγωγικά	27
3.2 Κατασκευή spin coater	27
3.2.1 Κινητήρας μηχανικού δίσκου	27
3.2.2 Συνδεσμολογία κυκλώματος αισθητήρα υπερύθρων	28
3.2.3 Συνδεσμολογία κυκλώματος ελέγχου	29
3.2.4 Πακετάρισμα διάταξης	32
3.2.5 Προγραμματισμός Arduino	32

3.3	Πειραματική διάταξη	33
3.4	Εκτέλεση πειράματος	35
4	Συμπεράσματα και μελλοντικά βήματα	44
4.1	Συμπεράσματα	44
4.2	Μελλοντικά Βήματα	44
	Βιβλιογραφία	46
5	Παράρτημα κώδικα	50

Λίστα Σχημάτων

2.1	Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου μιας σχεδιασμένης συσκευής οξειδίου [10].	4
2.2	Μεταλλικοί νανοκώνοι παρασκευασμένοι με προηγμένη τεχνική λιθογραφίας [15].	6
2.3	Περιγραφικό σχίτσο λιθογραφίας [16].	7
2.4	Θετική Λιθογραφία [11].	8
2.5	Αρνητική Λιθογραφία [11].	9
2.6	Αρχή διαδικασίας spin coating [31].	12
2.7	Μεταβολή της συγκέντρωσης σε χρόνο $t+dt$ [31].	13
2.8	Ανάπτυξη του φιλμ κατά το spin coating [31].	14
2.9	Στάδια spin coating [18].	15
2.10	Μοτέρ δίσκου [19].	16
2.11	Διάταξη spin coater [19]	17
2.12	Μικροελεγκτές "ATmega" [25].	17
2.13	Arduino UNO [22].	18
2.14	Breadboard και πλακέτα επέκτασης δικτύου.	19
2.15	Κινητήρας [36].	20
2.16	Συνδεσμολογία αστέρα.	21
2.17	ESC για έλεγχο κινητήρα [38].	21
2.18	Ανίχνευση θέσης με αισθητήρες Hall [38].	22
2.19	Ανίχνευση δυνάμεων [38].	23
2.20	Σχεδιάγραμμα.	23
2.21	Κύκλωμα αισθητήρα IR.	25
3.1	Συστοιχία πυκνωτών.	27
3.2	Τρυπάνι και διαμπερής οπή κινητήρα.	28
3.3	Συνδεσμολογία του αισθητήρα υπέρυθρων	29
3.4	Συνδεσμολογία ελέγχου κινητήρα.	30
3.5	Αχροδέκτες κινητήρα μηχανικού δίσκου.	31
3.6	Spin coater πριν την έναρξη πειράματος.	34
3.7	Μέρη spin coater.	35
3.8	Σύστημα ελέγχου κινητήρα.	36
3.9	Αισθητήρας υπέρυθρων.	37
3.10	Ποτενσιόμετρο ρύθμισης ταχύτητας.	38
3.11	Τροφοδοτικό διάταξης και σωληνάριο αντλίας κενού αέρος.	39

3.12	Αποτελέσματα λιθογραφίας.	40
3.13	Πρώτα στάδια λιθογραφίας.	41
3.14	Τελικά στάδια λιθογραφίας.	42
3.15	Τελικά αποτελέσματα λιθογραφίας.	43
5.1	Κώδικας μέτρησης RPM	50
5.2	Κώδικας ελέγχου ESC	51

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας (ΔΕ) είναι η κατασκευή ενός συστήματος **Spin Coating**, το οποίο μετά από την εναπόθεση ενός πολυμερούς υλικού, μπορεί να δημιουργεί λεπτές στρώσεις από αυτό το υλικό. Κάτι τέτοιο είναι από τα πρωταρχικά στάδια αποτύπωσης ενός κυκλώματος σε μια πλακέτα, όταν θέλουμε να το υλοποιήσουμε στην πράξη. Δηλαδή, ο τελικός στόχος του συστήματος αυτού είναι η δημιουργία της πλακέτας η οποία αποτυπώνει το κύκλωμα μας και στη συνέχεια θα εγχαραχτεί, ώστε να είναι πλήρως λειτουργική.

Η τελική συσκευή θα αποτελείται από:

1. ένα μοτέρ μηχανικού σκληρού δίσκου,
2. μια πλατφόρμα για το δισκίδιο στο οποίο θα γίνει η εναπόθεση,
3. αντλία κενού αέρος, ώστε να στερεώνεται το δισκίδιο

Αυτήν η διάταξη θα μπορεί να πετυχαίνει συγκεκριμένα πάχη υλικού πάνω σε επιφάνεια πυριτίου ή χαλκού, αξιοποιώντας τη φυγόκεντρο δύναμη που θα αναπτύσσεται από το μοτέρ, λόγω της περιστροφής μιας πλατφόρμας σε υψηλή ταχύτητα, μετρούμενη σε **RPM**. Μια ιδανική ταχύτητα είναι τα **7000 RPM**, που είναι και το ανώτερο όριο περιστροφής των μηχανικών σκληρών δίσκων, αλλά για τις ανάγκες της ΔΕ τα **4500 RPM** είναι αρκετά ικανοποιητικά.

Την ταχύτητα περιστροφής την επιλέγουμε μεταβάλλοντας την τάση του κινητήρα, δηλαδή αλλάζοντας την αντίσταση ενός ποτενσιόμετρου, ελέγχοντας την παράλληλα με αισθητήρα υπέρ ερυθρού φωτός και λαμβάνοντας τις μετρήσεις στον μικροελεγκτή **Arduino**.

1.2 Οργάνωση της Διπλωματικής Εργασίας

Για την ενδελεχή παρουσίαση της διάταξης αυτής, γίνεται αρχικά (Κεφάλαιο [2.1](#)) μια ιστορική αναφορά στην οπτική λιθογραφία και στη συνέχεια (Κεφάλαιο [2.2](#) και Κεφάλαιο [2.3](#)) λεπτομερής ανάλυση της διαδικασίας ως βιομηχανική μέθοδος παρασκευής ολοκληρωμένων ημιαγώγιμων διατάξεων. Η παρουσίαση αυτή αποσκοπεί στην κατανόηση της φωτολιθογραφίας, μέσω από την οποία γίνεται εμφανής η σημασία ενός ορθά

παρασκευασμένου υποστρώματος.

Στο Κεφάλαιο 2.4 παρουσιάζεται ολοκληρωμένα η τεχνική **spin coating**, που αποτελεί και το κύριο αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας αυτής. Εκτός από κάποια εισαγωγικά θεωρητικά στοιχεία, θα δούμε και μια συγκεκριμένη πρότυπη διάταξη, στην οποία βασίστηκε η παρούσα ΔΕ.

Στη συνέχεια γίνεται μια αναφορά σε μικροελεγκτές (Κεφάλαιο 2.5) και στο **Arduino** (Κεφάλαιο 2.5.2), αλλά και σε τεχνικές μέτρησης **RPM** με χρήση κάποιου αισθητήρα (Κεφάλαιο 2.7).

Στη συνέχεια στο Κεφάλαιο 3.1, θα δούμε την πειραματική διάταξη, τον τρόπο κατασκευής της και στο Κεφάλαιο 3.3 κάποια πειράματα λιθογραφίας και παρατηρήσεις σχετικά με το αν είναι αποδεκτά ή όχι τα αποτελέσματα.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 4.1 παρουσιάζονται κάποια συμπεράσματα της εργασίας όπως επίσης και κάποιες βελτιώσεις και άλλα μελλοντικά βήματα.

2 Θεωρητικό Μέρος

2.1 Οπτική Λιθογραφία

Στην κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, η φωτολιθογραφία ή οπτική λιθογραφία είναι μια συγκεκριμένη διαδικασία μικρολιθογραφίας, η οποία χρησιμοποιεί κάποια πηγή φωτός για την παραγωγή λεπτών επιστρώσεων πολυμερούς ή άλλου υλικού πάνω από ένα υπόστρωμα, όπως ένα δείγμα πυριτίου, για την προστασία επιλεγμένων περιοχών κατά τη διάρκεια των επακόλουθων διαδικασιών χάραξης. Αυτήν η πηγή φωτός, συνήθως, πρόκειται για υπεριώδης UV ακτινοβολία, η οποία συμβάλλει στη μεταφορά του σχεδίου από μια οπτική μάσκα λιθογραφίας πάνω στο φωτοευαίσθητο υλικό στην επιφάνεια του δείγματος.

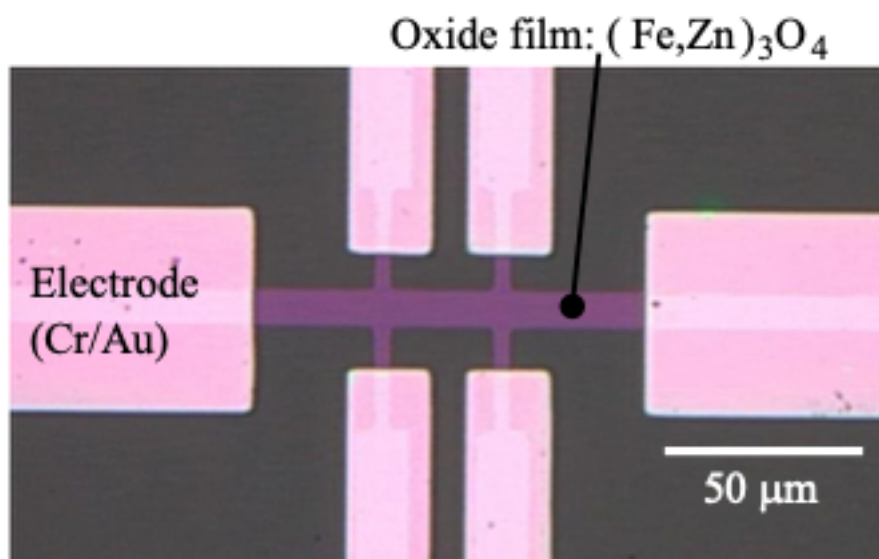
Η φωτολιθογραφία μοιράζεται ορισμένες θεμελιώδεις αρχές με τη φωτογραφία, καθώς το σχέδιο στο φωτοανθεκτικό δημιουργείται με την έκθεσή του στο φως, είτε απευθείας με προβολή μέσω φακού είτε φωτίζοντας μια μάσκα που τοποθετείται απευθείας πάνω από το υπόστρωμα. Η τεχνική μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως μια έκδοση υψηλής ακρίβειας της μεθόδου που χρησιμοποιείται για την κατασκευή πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων (*PCB*). Το όνομα προήλθε από αναλογία με την παραδοσιακή φωτογραφική μέθοδο παραγωγής πλακών για λιθογραφική εκτύπωση σε χαρτί [1], ωστόσο τα επόμενα στάδια της διαδικασίας έχουν περισσότερα κοινά με τη χάραξη παρά με την παραδοσιακή λιθογραφία.

Η φωτολιθογραφία είναι η πιο κοινή μέθοδος για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, όπως οι μνήμες στερεάς κατάστασης και οι μικροεπεξεργαστές. Μπορεί να δημιουργήσει εξαιρετικά μικρά σχέδια, μεγέθους έως και μερικές δεκάδες νανόμετρα. Παρέχει ακριβή έλεγχο του σχήματος και του μεγέθους των αντικειμένων που δημιουργεί και μπορεί να δημιουργήσει σχέδια σε ένα ολόκληρο δισκίο με ένα μόνο βήμα, γρήγορα και με σχετικά χαμηλό κόστος. Είναι επίσης σημαντική τεχνική για την κατασκευή μικροσκοπικών κατασκευών γενικά, όπως τα μικρο-ηλεκτρομηχανικά συστήματα (*MEMS*). Ωστόσο, η φωτολιθογραφία δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή μάσκας σε επιφάνειες που δεν είναι απόλυτα επίπεδες και όπως όλες οι διαδικασίες κατασκευής τσιπ, απαιτεί εξαιρετικά καθαρές συνθήκες λειτουργίας (καθαρό χώρο).

Πιο συγκεκριμένα, η φωτολιθογραφία χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία ημιαγωγών και σε μεγάλης κλίμακας μαζική παραγωγή συσκευών με βάση το πυρίτιο (*Si*) και έως αρκετές δεκάδες νανόμετρα. Επίσης, σε λειτουργικά οξείδια, έχει εφαρμοστεί στην παρασκευή πρωτοτύπων συσκευών: για παράδειγμα, διασταυρώσεις σήραγγας μαγνητικών

οξειδίων, τρανζίστορ φαινομένου πεδίου, και ούτω καθεξής [7, 8, 9]. Παραδείγματος χάριν, αυτή η τεχνική είναι απαραίτητη για την κατασκευή ηλεκτρονικών συσκευών οξειδίου. Το Σχήμα 2.1 δείχνει ένα παράδειγμα μιας συσκευής τρανζίστορ φαινομένου πεδίου μαγνητικού οξειδίου φερρίτη σπινελίου που χρησιμοποιεί αυτή την τεχνική [10]. Ωστόσο, είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί κατασκευή σε κλίμακα υπομικρού σε φιλμ οξειδίου, ειδικά σε ετεροδομές λόγω των χημικών τους ιδιοτήτων. Καθώς αναπτύσσεται η μελέτη των συσκευών οξειδίων μετάλλων μετάπτωσης, η ανάγκη για νανοκατασκευή και ενσωμάτωση μεγάλης περιοχής έχει αυξηθεί για την πρακτική χρήση τους.

Ωστόσο, η νανοκατασκευή μεμβρανών οξειδίου δεν είναι ιδιαίτερα εύκολη. Προς το παρόν, είναι απαιτητικό να κατασκευαστούν φιλμ οξειδίου των οποίων το πλευρικό μέγεθος είναι μικρότερο από $\sim 1\mu\text{m}$ χρησιμοποιώντας φωτολιθογραφία, μια μέθοδο για την κατασκευή επιφανειών πυριτίου μικρότερες από 100nm . Παρόλα αυτά, το βασικό πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου λιθογραφίας είναι η δυνατότητα παράλληλης παρασκευής μεγάλου όγκου, αρκετά σημαντικό για τη βιομηχανία ημιαγωγών [11].



Σχήμα 2.1: Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου μιας σχεδιασμένης συσκευής οξειδίου [10].

Όσον αφορά τα μειονεκτήματα, ένα από αυτά είναι ο περιορισμός που περιγράφεται στο κριτήριο *Abbe-Rayleigh* [12, 13] και είναι το εξής:

$$d_{min} = 0.61 \cdot \frac{\lambda}{n \cdot \sin \alpha} = 0.61 \cdot \frac{\lambda}{N \cdot A} \quad (2.1)$$

όπου d_{min} είναι το ελάχιστο μέγεθος μιας δομής που φωτίζεται με μια σημειακή πηγή φωτός με μήκος κύματος λ , n ο δείκτης διάθλασης του μέσου, α η γωνία του ανοίγματος του φακού και NA το αριθμητικό άνοιγμα φακού του συστήματος. Ως εκ τούτου, για μικρές κατασκευές, πρέπει να χρησιμοποιούνται υψηλά αριθμητικά ανοίγματα και μικρά μήκη κύματος. Ενώ για δομές άνω των $250nm$ αρκεί ένας λαμπτήρας υδραργύρου υψηλής πίεσης, για μεγέθη δομών μεταξύ 150 και $250nm$ απαιτούνται μικρότερα μήκη κύματος. Αυτά τα μήκη κύματος μπορούν να επιτευχθούν με λέιζερ excimer ($\lambda = 93nm$, $\lambda = 248nm$). Για ακόμη μικρότερες δομές με μεγέθη κάτω των $100 nm$, πρέπει να εφαρμοστεί φως με μήκος κύματος $\sim 150nm$. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με λιθογραφία ακραίας υπεριώδους (EUV), η οποία χρησιμοποιεί μήκη κύματος έως και $13.4nm$. Μια ανασκόπηση της λιθογραφίας EUV έχει δημοσιευτεί από τους Wu και Kumar [14].

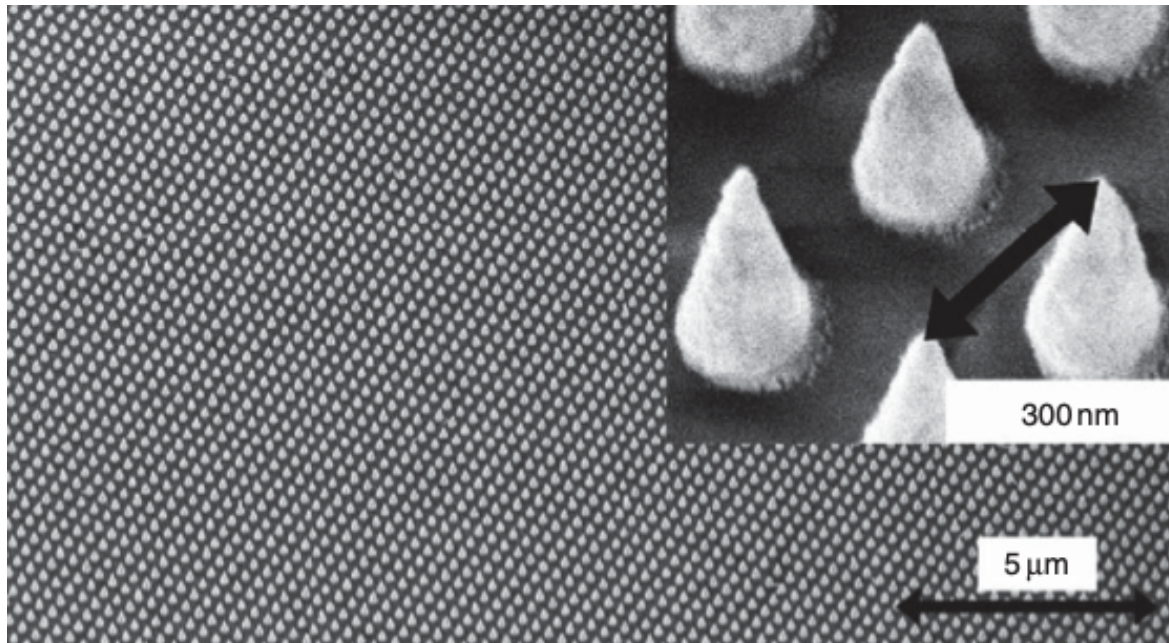
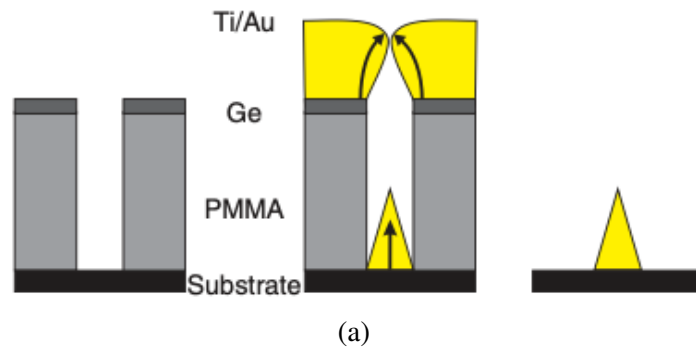
Ένας άλλος περιορισμός είναι ότι τα πλευρικά τοιχώματα των δημιουργούμενων δομών είναι συνήθως κάθετα στην επιφάνεια του υποστρώματος. Κάτι τέτοιο έχει αποτέλεσμα, ενώ πλευρικά το σχήμα μπορεί να επιλεγεί ελεύθερα, τα πλευρικά τοιχώματα δεν μπορούν. Για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, οι Kontio κ.ά. [15] εφάρμοσαν το εξής. Δημιούργησαν κωνικές μεταλλικές νανοδομές χρησιμοποιώντας μια λιθογραφική διαδικασία δύο σταδίων και εκμεταλλεύοντο το φαινόμενο σκίασης του εναποτιθέμενου μετάλλου. Το δεύτερο βήμα της διαδικασίας απεικονίζεται σχηματικά στο Σχήμα 2.2a. Μετά τη διαμόρφωση της αντίστασης του πολυμεθαακρυλικού μεθυλεστέρα (PMMA) και την επακόλουθη χάραξη αντιδραστικών ιόντων για τη δημιουργία οπών σε αυτό, εναποθέτουν το μέταλλο πάνω από τη δομή. Είναι γνωστό γενικά ότι το γερμάνιο χρησιμεύει μόνο ως προαγωγός πρόσφυσης. Οι βαθιές οπές που δημιουργούνται αρχίζουν να υπερκαλύπτονται από το μέταλλο κατά την εναπόθεση. Ως εκ τούτου, η καθαρή διατομή γίνεται μικρότερη και δημιουργούνται νανοκώννοι. Το τελευταίο βήμα είναι η αφαίρεση της μάσκας αντίστασης PMMA. Οι νανοκώννοι μπορούν να δημιουργηθούν με μεγάλη τάξη και δυνατότητα επαναληψιμότητας, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2b.

2.2 Διαδικασία Οπτικής Λιθογραφίας

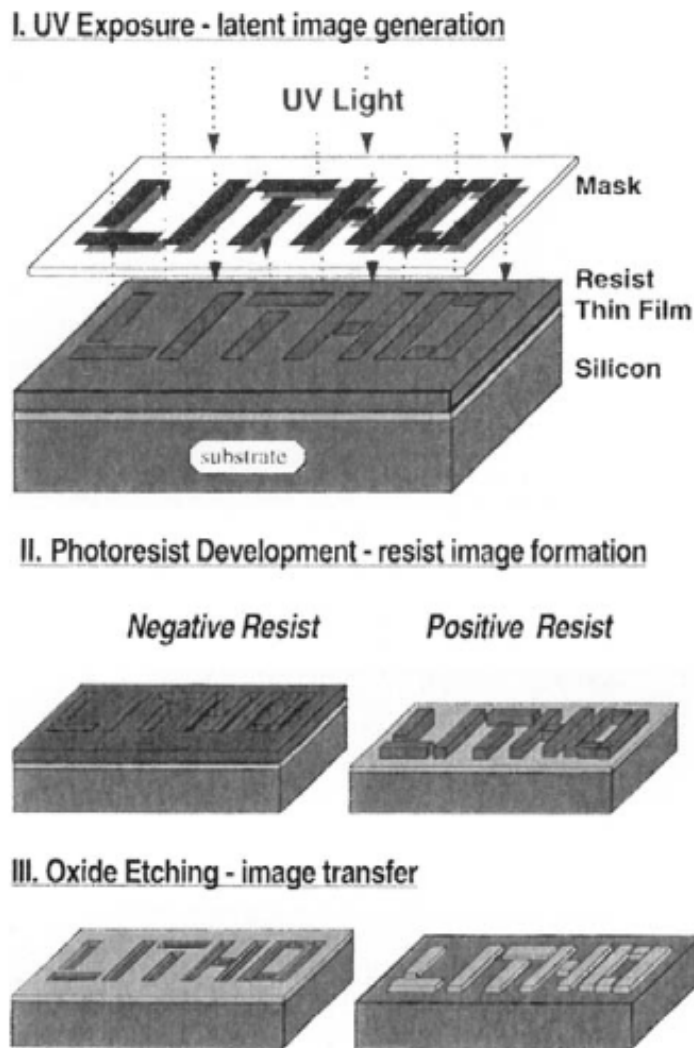
Για τη διαδικασία της οπτικής λιθογραφίας μπορούμε να επιλέξουμε τεχνική θετικής ή αρνητικής εμφάνισης του σχεδίου. Μια επεξηγηματική εικόνα φαίνεται και στο Σχήμα 2.3.

2.2.1 Μεθοδολογία Θετικής Λιθογραφίας

Η τυπική διαδικασία που χρησιμοποιεί μια θετική αντίσταση απεικονίζεται σχηματικά



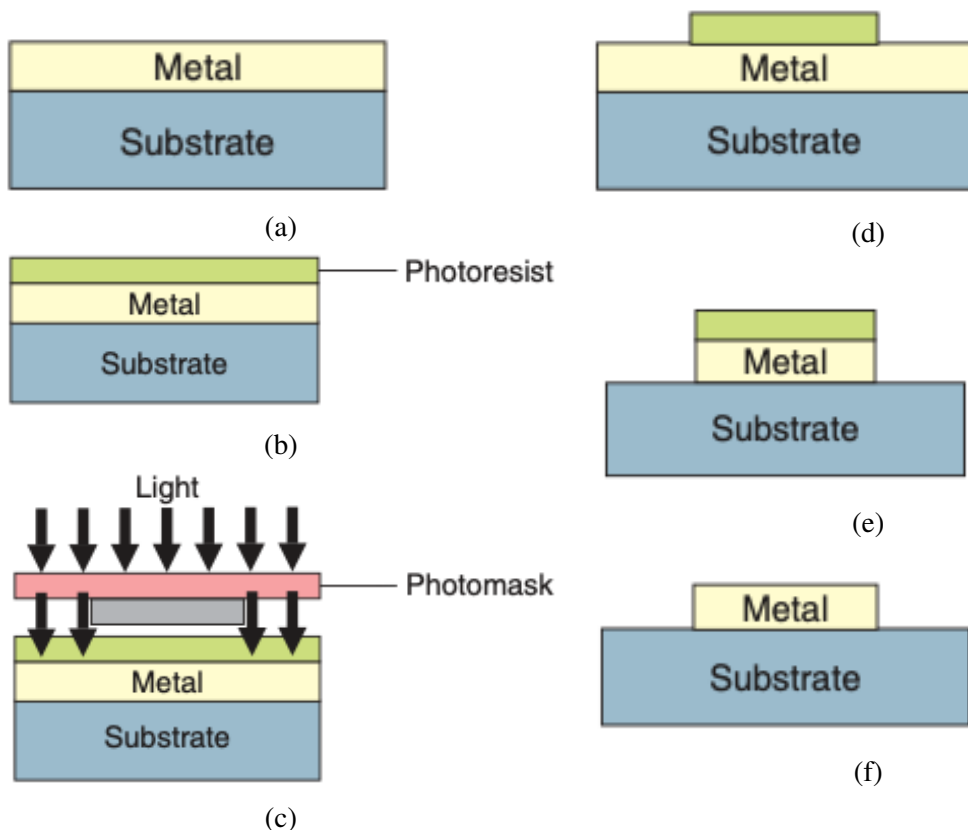
Σχήμα 2.2: Μεταλλικοί νανοκώνοι παρασκευασμένοι με προηγμένη τεχνική λιθογραφίας [15].



Σχήμα 2.3: Περιγραφικό σκίτσο λιθογραφίας [16].

στο Σχήμα 2.4. Αρχικά, μια μεταλλική επίστρωση εναποτίθεται στο υπόστρωμα 2.4a. Στη συνέχεια, ένα φωτοανθεκτικό επικαλύπτεται με περιστροφή στο δείγμα (*spin coating*) και ολοκληρώνεται με μια διαδικασία ψήσιματος (έως και 30 λεπτά σε θερμοκρασίες μεταξύ 60° και 100°C) της φωτοαντίστασης (ρητίνη), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4b.

Το δείγμα στη συνέχεια εκτίθεται σε υπεριώδη ακτινοβολία (UV) μέσω ειδικής μάσκας λιθογραφίας (Σχήμα 2.4c). Έτσι, η δομή της μάσκας απεικονίζεται στη φωτοαντίσταση (ρητίνη AZ5214) και προκαλεί φωτοχημικές αλλαγές σε αυτήν. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ανάπτυξη της αντίστασης μέσω ειδικού εμφανιστή (IMAH) και ψήνεται για 20–30 λεπτά σε θερμοκρασίες μεταξύ 120° και 180°C (Σχήμα 2.4d). Τέλος, οι ανοιχτές μεταλλικές περιοχές χαράσσονται (Σχήμα 2.4e) και το φωτοανθεκτικό αφαιρείται,

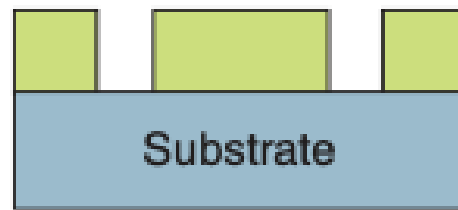


Σχήμα 2.4: Θετική Λιθογραφία [11].

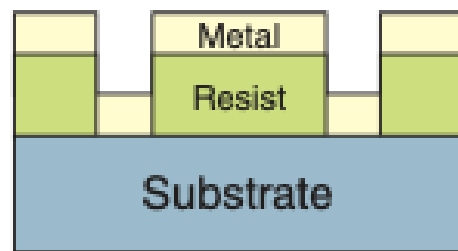
αφήνοντας τα μεταλλικά νανοσωματίδια στο υπόστρωμα (Σχήμα 2.4f).

2.2.2 Μεθοδολογία Αρνητικής Λιθογραφίας

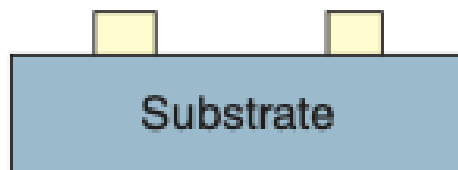
Η διαδικασία για την αρνητική αντίσταση παρουσιάζεται αρκετά απλοποιημένη στο Σχήμα 2.5. Για την παραγωγή νανοσωματιδίων με αρνητική αντίσταση, το φωτοανθεκτικό εναποτίθεται απευθείας στο υπόστρωμα και ψήνεται ελαφρά. Στη συνέχεια, η αντίσταση εκτίθεται μέσω της μάσκας με ακτινοβολία, αναπτύσσεται και ψήνεται. Έτσι δημιουργούνται κενά σημεία (Σχήμα 2.5a), τα οποία γεμίζονται μέσω της εναπόθεσης μετάλλου στο δείγμα (Σχήμα 2.5b). Τέλος, η υπολειπόμενη αντίσταση με το μέταλλο από πάνω αφαιρείται χημικά, αφήνοντας πίσω τις ζητούμενες μεταλλικές νανοδομές (Σχήμα 2.5c).



(a)



(b)



(c)

Σχήμα 2.5: Αρνητική Λιθογραφία [11].

2.3 Βήματα Οπτικής Λιθογραφίας

Η διεργασία της φωτολιθογραφίας αποτελείται από πολλά βήματα. Οι σύγχρονοι καθαροί χώροι χρησιμοποιούν αυτοματοποιημένα συστήματα για τον συντονισμό της διαδικασίας.

Η βασική διεργασία σε απλοποιημένα βήματα είναι η ακόλουθη:

- Καθαρισμός και λείανση επιφάνειας (wafer) πυριτίου [2]. Στόχος αυτού του αρχικού σταδίου είναι η προετοιμασία του δείγματος. Εφαρμόζεται υψηλή θερμοκρασία στο δισκίο για την απομάκρυνση οποιασδήποτε υγρασίας είναι πιθανό να υπάρχει. Επίσης, βασικό για την επιφάνεια είναι η απουσία χαραγματιών, οι οποίες είναι πιθανό να προέρχονται και από την αρχική κοπή και δημιουργία του δισκίου.
- Επίστρωση φωτοευαίσθητου στρώματος [3]. Το επόμενο στάδιο είναι η εφαρμογή μια φωτοευαίσθητης ρητίνης μέσω της διαδικασίας επίστρωσης με περιστροφή (spin coating).

Η μέθοδος **spin coating** χρησιμοποιείται ευρέως για την εναπόθεση ομοιόμορφων λεπτών υμενίων (*thin film*) από πολυμερή, συνήθως, υλικά, σε επίπεδα επιστρώματα (πυριτίου) [4, 5]. Πρόκειται για μία γρήγορη και με μικρό κόστος διαδικασία, η οποία επιφέρει υψηλής ποιότητας αποτελέσματα. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αξιοποίηση της κεντρομόλου δύναμης που αναπτύσσεται λόγω της περιστροφής της πλατφόρμας, πάνω στην οποία βρίσκεται το δείγμα. Εκεί εγχύεται μικρή ποσότητα ρητίνης, η οποία στη συνέχεια λόγω περιστροφής του δείγματος σε μεγάλη ταχύτητα, έως 10000 rpm, εξαπλώνεται σε όλη την επιφάνεια δημιουργώντας μια μικρή επίστρωση στο δείγμα [6].

- Εφαρμογή φωτο-μάσκας και έκθεση σε υπεριώδης ακτινοβολία. Σε αυτό το βήμα, εκτίθεται το, ζητούμενο προς αποτύπωση, σχέδιο σε UV ακτινοβολία, μέσω μάσκας λιθογραφίας. Αυτή η διαδικασία διαρκεί λίγα δευτερόλεπτα και απαιτεί ειδικές συνθήκες φωτισμού.
- Εμφάνιση του σχεδίου της μάσκας με χρήση εμφανιστή. Για να εμφανιστεί το αποτύπωμα του σχεδίου πάνω στη ρητίνη, γίνεται χρήση εμφανιστή IMAH. Η τεχνική αυτή μοιάζει αρκετά με τις εμφανίσεις φωτογραφιών.
- Απομάκρυνση εμφανιστή και φωτοευαίσθητου. Προτελευταίο στάδιο είναι το ξέπλυμα

του εμφανιστή με απιονισμένο νερό και ένα τελικό ψήσιμο του δισκίου για την απομάχρυνση της υγρασίας.

- Διεργασία χάραξης. Τώρα έχουμε στο δείγμα αποτυπωμένο το ζητούμενο κύκλωμα ή διάταξη. Αυτό που υπολείπεται είναι η εναπόθεση κάποιου αγώγιμου υλικού και ο καθαρισμός του εναπομένοντος υποστρώματος, ώστε να είναι λειτουργικό το κύκλωμα.

2.4 Τεχνική **Spin Coating**

2.4.1 Εισαγωγικά

Η επίστρωση μέσω περιστροφής είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την εξάπλωση ομοιόμορφων λεπτών μεμβρανών σε επίπεδα επιστρώματα χάρη στην αναπτυσσόμενη φυγόκεντρη δύναμη. Η συσκευή που χρησιμοποιείται για την επίστρωση με περιδίνηση ονομάζεται *spin coater*. Ένα διάλυμα υλικού διανέμεται στο κέντρο ενός δισκιδίου (*wafer*), το οποίο στη συνέχεια περιστρέφεται με υψηλή ταχύτητα.

Η περιστροφή συνεχίζεται έως ότου η περίσσεια του διαλύματος ξεκολλήσει από το δισκίο και παραμείνει το επιθυμητό πάχος της μεμβράνης. Ο διαλύτης που εφαρμόζεται είναι συνήθως πτητικός και εξατμίζεται κατά την εναπόθεση. Οι δύο κύριοι παράγοντες που καθορίζουν το πάχος του φιλμ είναι η ταχύτητα περιστροφής και το ιξώδες του διαλύματος. Άλλοι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη περιλαμβάνουν τον χρόνο περιστροφής του δείγματος, την πυκνότητα του διαλύματος, τον ρυθμό εξάτμισης του διαλύτη και τη διαβρεξιμότητα της επιφάνειας. Για μια τυπική περίπτωση απόθεσης φωτοανθεκτικού (π.χ. AZ3312, ιξώδες 18cP) [17], χρησιμοποιείται περιστροφή 2000 – 6000rpm για 30 – 60 δευτερόλεπτα για να παραχθεί μια λεπτή μεμβράνη πάχους 1.5 – 1μm. Το μαλακό ψήσιμο (μια διαδικασία ξήρανσης σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία ψήσιματος 100°C ή 110°C) εκτελείται συνήθως μετά την εναπόθεση για την εξάτμιση του υπολειπόμενου διαλύτη και την ανόπτηση της μηχανικής καταπόνησης.

Μετά τη διαδικασία μαλακού ψήσιματος, η φωτοανθεκτική επίστρωση γίνεται φωτοευαίσθητη. Το υπο-μαλακό ψήσιμο μπορεί να αφήσει μια σημαντική ποσότητα διαλύτη, η οποία εμποδίζει το φως της έκθεσης να αντιδράσει με το φωτοανθεκτικό. Από την άλλη πλευρά, το υπερβολικά μαλακό ψήσιμο μπορεί να μειώσει την ανάλυση των φωτοανθεκτικών είτε αλλάζοντας τη διαλυτότητα ανάπτυξης είτε καταστρέφοντας την αντίσταση.

Η επίστρωση περιστροφής είναι ένας από τους ευκολότερους τρόπους εναπόθεσης διαφόρων τύπων υλικών που βρίσκονται σε μορφή διαλύματος. Η εναπόθεση πολυμερών, νανοσωματιδίων και βιοϋλικών πραγματοποιείται συνήθως μέσω περιστροφής. Ανεξάρτητα από τα υλικά που εναποτίθενται, η επίστρωση περιστροφής συνήθως απαιτεί μια διαδικασία στεγνώματος ή ψησίματος.

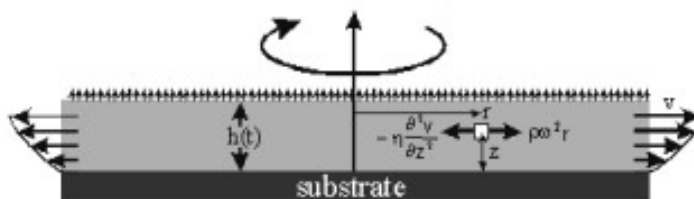
2.4.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαδικασία του *spin coating* σε μοριακό επίπεδο, όσον αφορά το μοριακό βάρος αλλά και τη συγκέντρωση του πολυμερούς υλικού προς περιδίνηση. Αναλυτικότερα, για διάλυμα μέτριας συγκέντρωσης, το πάχος της επίστρωσης είναι ευθέως ανάλογη με τη συγκέντρωση, αλλά παρατηρήθηκε απόκλιση από αυτήν την αναλογικότητα για μικρές και μεγάλες συγκεντρώσεις [30]. Οι ακόλουθες προσεγγίσεις παρουσιάστηκαν από τους Emslie κ.ά. [4] και Meyerhofer κ.ά. [5].

Ειδικότερα έχουμε την εξίσωση ισοροπίας για ένα στοιχείο όγκου να είναι:

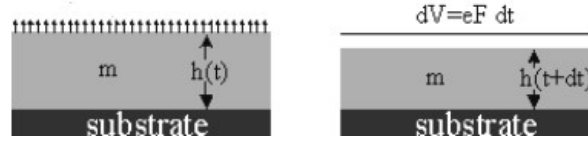
$$-\eta \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \rho \cdot \omega^2 \cdot r \quad (2.2)$$

όπου η είναι το ιξώδες, v είναι η ταχύτητα σε ακτινική κατεύθυνση και ρ είναι η πυκνότητα του διαλύματος.



Σχήμα 2.6: Αρχή διαδικασίας *spin coating* [31].

Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψιν την εξίσωση συνέχειας της ροής και των οριακών συνθηκών στο υπόστρωμα και στον υπόλοιπο ελεύθερο χώρο, αξιοποίησαν την ακόλουθη διαφορική εξίσωση και τη λύση αυτής.



Σχήμα 2.7: Μεταβολή της συγκέντρωσης σε χρόνο $t+dt$ [31].

$$-\frac{dh}{dt} = \frac{2\rho \cdot \omega^2}{3\eta} \cdot h^3 \quad (2.3)$$

$$[5] \Rightarrow h(t) = \frac{1}{\left(h_0^2 + \frac{4\rho\omega^2}{3\eta} \cdot t\right)^{1/2}} \quad (2.4)$$

όπου h_0 είναι το πάχος του φιλμ στην αρχή. Το πιο σημαντικό σημείο είναι ότι από την εξίσωση 2.4 για άπειρο χρόνο ($t \rightarrow \infty$) προκύπτει μηδενικό πάχος φιλμ. Αυτό είναι συνέπεια της μη συμπερίληψης της εξάτμισης του διαλύτη κατά τη διαδικασία περιστροφής. Για αυτό τον λόγο, ο Meyerhofer προσθέτει έναν παράγοντα e στο δεύτερο μέρος της εξίσωσης 2.3, που αντιπροσωπεύει την εξάρτιση αυτή.

Καταλήγει τελικά στην επόμενη εξάρτιση για το πάχος του φιλμ μετά από άπειρο χρόνο:

$$h_\infty \sim \omega^{-2/3} \cdot e^{1/3} \cdot \eta^{1/3} \cdot c_0 \quad (2.5)$$

την οποία απλοποίησαν οι Sparrow [33] και Bornside [32] ως εξής:

$$h_\infty \sim \omega^{1/3} \cdot \eta^{1/3} \cdot c_0, \quad \text{με } e \sim \omega^{1/2} \quad (2.6)$$

Μια διαφορετική προσέγγιση η οποία δείχνει και την εξάρτιση του πάχους από τον χρόνο παρουσιάζεται στη συνέχεια [31]. Σύμφωνα με το Σχήμα 2.8 είναι προφανές ότι η συγκέντρωση μέσα στο φιλμ πρέπει να παραμένει σταθερή μετά από χρόνο $t+dt$ και να υπακούει:

$$\dot{c} = \frac{e}{h} \cdot c \quad (2.7)$$

Η λύση της παραπάνω εξίσωσης είναι η γνωστή εκθετική, αλλά το πάχος h εξαρτάται και

από τον χρόνο περιστροφής. Έτσι για μικρά πάχη και άρα άπειρο χρόνο $h(t) \rightarrow h_\infty$:

$$c(t) = c_0 \exp\left(-\frac{e}{h_\infty t}\right) \quad (2.8)$$

Από αυτήν τη συγκέντρωση εξαρτάται το ιξώδες ενός πολυμερούς [4], και συγκεκριμένα:

$$\eta = \eta_0(1 + [\eta]c + \dots) \xrightarrow{[\eta]c \gg 1} \eta = \eta_0[\eta]c_0 \exp\left(-\frac{e}{h_\infty t}\right) \quad (2.9)$$

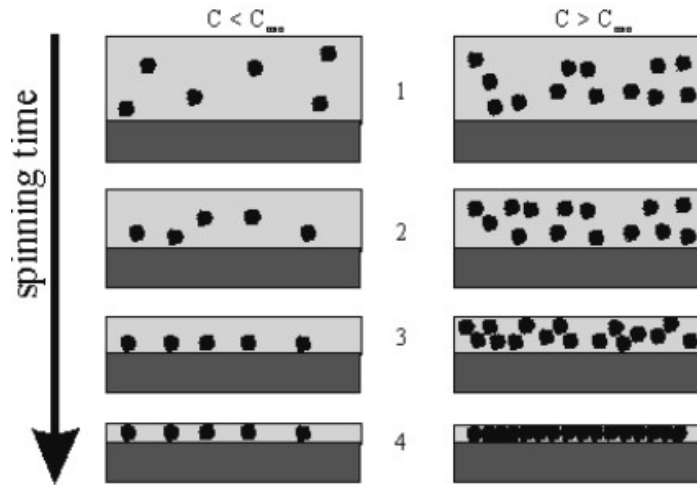
όπου η_0 είναι το ιξώδες του καθαρού διαλύτη και $[\eta]$ είναι το εγγενές ιξώδες.

Έτσι από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει η παρακάτω προσέγγιση [31]:

$$h_\infty \sim \omega^{-1/2} \cdot [\eta]^{1/3} \cdot \eta_0^{1/3} \cdot c_0 \quad (2.10)$$

Τελικά, αντικαθιστώντας και από την εξίσωση Mark-Houwink-Staudinger: $[\eta] = KM^\alpha$, με M το μοριακό βάρος και α , K οι παράμετροι του συγκεκριμένου συστήματος πολυμερούς-διαλύτη, καταλήγουν:

$$h_\infty \sim \omega^{-1/2} \cdot M^{a/3} \cdot c_0 \quad (2.11)$$



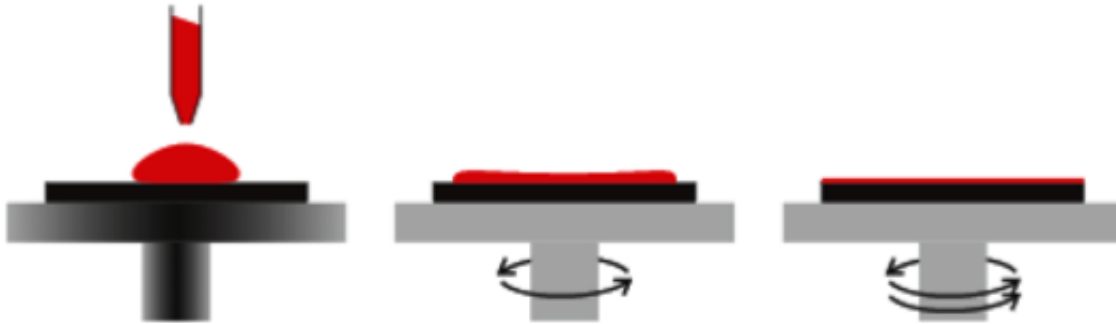
Σχήμα 2.8: Ανάπτυξη του φιλμ κατά το spin coating [31].

Στο Σχήμα 2.8 απεικονίζεται ένα καθεστώς μικρών συγκεντρώσεων, όπου είναι προφανές ότι κατά το spin coating και την εξάτμιση του διαλύτη, χρειάζεται μια ορισμένη ελάχιστη συγκέντρωση c_{min} για να επιτευχθεί επικάλυψη των αλυσίδων πολυμερούς. Για

να ληφθεί και αυτήν η περίπτωση υπόψιν αρκεί μια ελάχιστη τροποποίηση της παραπάνω εξίσωσης, δηλαδή να γίνει: $h_{\infty} \sim \omega^{-1/2} \cdot M^{a/3} \cdot (c_0 - c_{min})$.

2.4.3 Διαδικασία **Spin Coating**

Η μέθοδος **spin coating** αξιοποιεί τη φυγόκεντρη δύναμη, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Το οργανικό υλικό σε διάλυμα εναποτίθεται στο υπόστρωμα με μια πιπέτα (Σχήμα



Σχήμα 2.9: Στάδια **spin coating** [18].

2.9). Το υπόστρωμα στερεώνεται σε μια πλάκα με έναν αναρροφητή και περιστρέφοντας την πλάκα, σε συνθήκες μηδενικής ατμόσφαιρας, το υλικό απλώνεται ομοιόμορφα σε ολόκληρη την επιφάνεια του υποστρώματος. Η ταχύτητα περιστροφής και η επιτάχυνση της περιστρεφόμενης πλάκας είναι οι δύο κύριες παράμετροι που ελέγχουν το πάχος της οργανικής μεμβράνης. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται ουσιαστικά για την εναπόθεση πολυμερών [18].

Με τη μέθοδο **spin coating** μπορεί να επιτευχθεί επιθυμητό πάχος επίστρωσης. Αυτό εξαρτάται από πολλές διαφορετικές παραμέτρους και είναι σύμφωνο με την ακόλουθη εξίσωση [20]:

$$h = \left(1 - \frac{\rho_A}{\rho_{A_0}}\right) \cdot \left(\frac{3\eta \cdot m}{2\rho_{A_0} \cdot \omega^2}\right)^{1/3} \quad (2.12)$$

όπου h είναι το πάχος, ρ_A είναι η πυκνότητα του πτητικού υγρού, η είναι το ιξώδες του διαλύματος, m είναι ο ρυθμός εξάτμισης και ω η γωνιακή ταχύτητα. Καθώς ο ρυθμός εξάτμισης υπολογίζεται πειραματικά, έχει προταθεί μια απλούστερη εξίσωση όπως δίνεται παρακάτω:

$$h = A \cdot \omega^{-B} \quad (2.13)$$

όπου B είναι μια σταθερή και πειραματικά υπολογισμένη παράμετρος. Στις περισσότερες περιπτώσεις το B είναι κάπου μεταξύ 0.4 και 0.7. Από αυτή την εξίσωση, είναι σαφές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η γωνιακή ταχύτητα του υποστρώματος, τόσο πιο λεπτό θα είναι το φιλμ [21].



Σχήμα 2.10: Μοτέρ δίσκου [19].

Κάποια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου διακρίνονται στα εξής [18]:

Πλεονεκτήματα:

- Υπάρχουν λιγότερες απώλειες υλικών από ότι με την εναπόθεση ατμών.
- Είναι μια σχετικά φθηνή τεχνική, καθώς μια περιστρεφόμενη πλάκα είναι πολύ φθηνότερη από ένα σύστημα υπέρ υψηλού κενού.
- Εναποθέτουμε γρήγορα και εύκολα λεπτές στρώσεις.

Μειονεκτήματα:

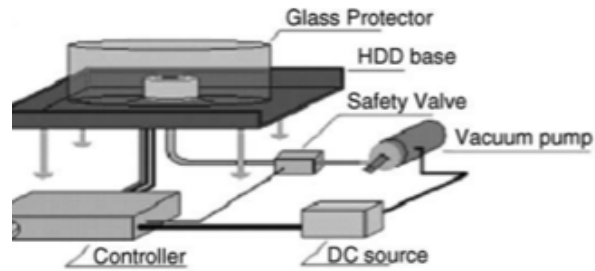
- Δυσκολία δημιουργίας πολυστρωματικών δομών.
- Αδυναμία δημιουργίας εξαιρετικά λεπτών φιλμ.
- Πιθανότητα παρουσίας ρύπων.

2.4.4 Πρότυπη Διάταξη Spin Coater

Οι Bianchi κ.α. [19] πρότειναν μια πρακτική, με μικρό κόστος κατασκευή μιας συσκευής spin coating. Ο συγκεκριμένος spin coater αξιοποιεί το μοτέρ ενός μηχανικού σκληρού δίσκου (HDD) (Σχήμα 2.10).

Υπεύθυνος για τη λειτουργία της συσκευής είναι ένας ελεγκτής, τον οποίον σχεδίασαν και υλοποίησαν με τον μικροελεγκτή PIC 16F877. Αυτός αποτελεί και το βασικό μέρος της κυκλωματικής διάταξης. Έτσι κατάφεραν ακριβές έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής του μοτέρ. Στο Σχήμα 2.11 φαίνεται και η ολοκληρωμένη διάταξη, αποτελούμενη από τον ελεγκτή, την αντλία κενού αέρος, την απαιτούμενη τροφοδοσία και τέλος μια ειδική βάση στην οποία είναι στερεωμένο το μοτέρ.

Η συγκεκριμένη διάταξη αποτελεί έναν οικονομικό spin coater με μεγάλο εύρος στροφών



Σχήμα 2.11: Διάταξη spin coater [19]

και αξιοπιστία στην ταχύτητα περιστροφής. Παρά τον αρκετά απλό χειρισμό του, είναι δυνατό να προσφέρει άρτια αποτελέσματα στη δημιουργία επιστρώσεων με μεγάλη ακρίβεια.

2.5 Μικροελεγκτές

2.5.1 Εισαγωγικά

Ένας μικροελεγκτής είναι ένας μικρός υπολογιστής σε ένα τσιπ ολοκληρωμένου κυκλώματος (IC) μονοξειδίου μετάλλου-ημιαγωγού (MOS). Γενικά μπορεί να περιέχει έναν ή περισσότερους επεξεργαστές (CPU) μαζί με μνήμη και προγραμματιζόμενα περιφερειακά εισόδου/εξόδου.

Στο τσιπ ενσωματώνεται επίσης μνήμη προγραμμάτων ROM, καθώς και μια μικρή ποσότητα RAM η οποία είναι αρκετή για τη λειτουργία του. Οι μικροελεγκτές έχουν σχεδιαστεί για ενσωματωμένες εφαρμογές, σε αντίθεση με τους μικροεπεξεργαστές που χρησιμοποιούνται σε προσωπικούς υπολογιστές ή άλλες εφαρμογές γενικής χρήσης που αποτελούνται από διάφορα διακριτά τσιπ.



Σχήμα 2.12: Μικροελεγκτές "ATmega" [25].

Στο Σχήμα 2.12 απεικονίζονται 2 μικροελεγκτές **ATmega** οι οποίοι χρησιμοποιούνται συχνά σε πληθώρα εφαρμογών.

Στη σύγχρονη ορολογία, ένας μικροελεγκτής είναι παρόμοιος, αλλά λιγότερο εξελιγμένος από ένα σύστημα σε τσιπ (SoC). Ένα SoC μπορεί να περιλαμβάνει έναν μικροελεγκτή ως ένα από τα στοιχεία του, αλλά συνήθως τον ενσωματώνει με προηγμένα περιφερειακά όπως μια μονάδα επεξεργασίας γραφικών (GPU), μια μονάδα Wi-Fi ή επιπλέον επεξεργαστές.

Ορισμένοι μικροελεγκτές μπορεί να χρησιμοποιούν λέξεις τεσσάρων bit και να λειτουργούν σε συχνότητες έως και 4 kHz για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (μονοψήφια mWatts ή μWatts). Έχουν γενικά τη δυνατότητα να διατηρούν τη λειτουργικότητα ενώ περιμένουν ένα συμβάν, όπως ένα πάτημα κουμπιού ή άλλη διακοπή. Η κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια του ύπνου (ρολόι CPU και τα περισσότερα περιφερειακά απενεργοποιημένα) μπορεί να είναι μόνο nWatts, καθιστώντας πολλά από αυτά κατάλληλα για εφαρμογές μπαταρίας μεγάλης διάρκειας.

Άλλοι μικροελεγκτές μπορεί να απαιτούν μέγιστη απόδοση λόγω του ρόλου τους, όπου μπορεί να χρειαστεί να λειτουργούν περισσότερο σαν επεξεργαστής ψηφιακού σήματος (DSP), με υψηλότερες ταχύτητες ρολογιού και κατανάλωση ενέργειας.

Οι μικροελεγκτές χρησιμοποιούνται σε αυτόματα ελεγχόμενα προϊόντα και συσκευές, όπως συστήματα ελέγχου κινητήρα αυτοκινήτου, εμφυτεύσιμες ιατρικές συσκευές, τηλεχειριστήρια, μηχανές γραφείου, συσκευές, ηλεκτρικά εργαλεία, παιχνίδια και άλλα ενσωματωμένα συστήματα. Μειώνοντας το μέγεθος και το κόστος σε σύγκριση με ένα σχέδιο που χρησιμοποιεί ξεχωριστό μικροεπεξεργαστή, μνήμη και συσκευές εισόδου/εξόδου, οι μικροελεγκτές καθιστούν οικονομικό τον ψηφιακό έλεγχο ακόμη περισσότερων συσκευών και διεργασιών. Οι μικροελεγκτές μικτού σήματος είναι κοινοί, οι οποίοι ενσωματώνουν αναλογικά στοιχεία που απαιτούνται για τον έλεγχο μη ψηφιακών ηλεκτρονικών συστημάτων. Τέλος, στο πλαίσιο του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT - Internet of Things), οι μικροελεγκτές είναι ένα οικονομικό και δημοφιλές μέσο συλλογής δεδομένων, ανίχνευσης και ενεργοποίησης του φυσικού κόσμου ως συσκευές αιχμής.



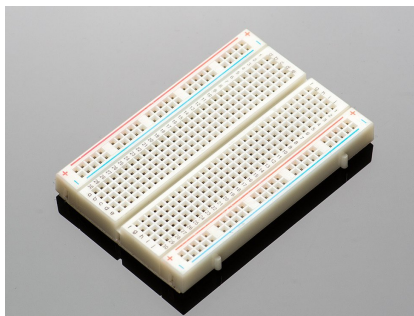
Σχήμα 2.13: Arduino UNO [22].

2.5.2 Arduino

Ένα παράδειγμα ενός ευρέως χρησιμοποιούμενου μικροελεγκτή είναι η ολοκληρωμένη πλακέτα **Arduino**, που χρησιμοποιεί κάποιον ATmega. Οι πλακέτες **Arduino** (Σχήμα 2.13) συναντώνται στο εμπόριο με μια ποικιλία μικροεπεξεργαστών και ελεγκτών, ανάλογα με τη χρήση που προορίζεται. Είναι εξοπλισμένες με σετ ψηφιακών και αναλογικών ακίδων

εισόδου/εξόδου (I/O) που μπορούν να συνδεθούν με διάφορες πλακέτες επέκτασης, οι λεγόμενες "ασπίδες" (shields) όπως στο Σχήμα 2.14b ή breadboard στο Σχήμα 2.14a (για την κατασκευή πρωτοτύπων) και άλλα κυκλώματα.

Οι πλακέτες διαθέτουν διασυνδέσεις σειριακής επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένου του Universal Serial Bus (USB) σε ορισμένα μοντέλα, οι οποίες χρησιμοποιούνται επίσης για τη φόρτωση προγραμμάτων. Οι συγκεκριμένοι μικροελεγκτές μπορούν να προγραμματιστούν χρησιμοποιώντας τις γλώσσες προγραμματισμού C και C++, χρησιμοποιώντας ένα τυπικό API που είναι επίσης γνωστό ως γλώσσα Arduino και χρησιμοποιείται με μια τροποποιημένη έκδοση του Processing IDE. Εκτός από τη χρήση παραδοσιακών εργαλείων μεταγλωττιστή, το Arduino παρέχει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) όπου επιτρέπει τη συγγραφή τμημάτων κώδικα (scripts) τα οποία τρέχει το Arduino και ένα εργαλείο γραμμής εντολών.



(a) Breadboard [23].



(b) Ethernet shield [24].

Σχήμα 2.14: Breadboard και πλακέτα επέκτασης δικτύου.

Συγκεκριμένα, όσον αφορά το **Arduino UNO** (Σχήμα 2.13), κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά είναι τα παρακάτω (με βάση την επίσημη ιστοσελίδα [22]).

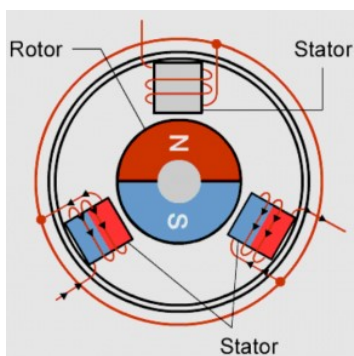
- Μικροελεγκτής: ATmega328P
- Τάση τροφοδοσίας: 7-12V
- Τάση λειτουργίας: 5V
- Ψηφιακές ακίδες I/O: 14

- Αναλογικές ακίδες I/O: 6
- Μνήμη Flash: 32 KB
- SRAM: 2 KB
- EEPROM: 1 KB
- Ταχύτητα Clock: 16 MHz

Αναφορικά με την επικοινωνία του **Arduino UNO** με υπολογιστή, παρέχεται σειριακή επικοινωνία UART TTL (5V) από τον ATmega328, η οποία είναι διαθέσιμη στις ψηφιακές ακίδες 0 (RX) και 1 (TX). Το ολοκληρωμένο ATmega16U2 διοχετεύει αυτήν τη σειριακή επικοινωνία μέσω USB και εμφανίζεται ως εικονική θύρα επικοινωνίας με το λογισμικό στον υπολογιστή. Το υλικολογισμικό 16U2 χρησιμοποιεί τα τυπικά προγράμματα οδήγησης USB COM και δε χρειάζεται εξωτερικό πρόγραμμα οδήγησης.

Το λογισμικό Arduino(IDE) περιλαμβάνει μια σειριακή οθόνη που επιτρέπει την αποστολή απλών δεδομένων κειμένου προς και από την πλακέτα. Μέσω αυτού γίνεται ο προγραμματισμός σε γλώσσα C, C++ που αναφέρθηκε και παραπάνω. Οι λυχνίες (LED) RX και TX στην πλακέτα θα αναβοσβήνουν όταν τα δεδομένα μεταδίδονται μέσω του τσιπ USB σε σειριακό και της σύνδεσης USB στον υπολογιστή [22].

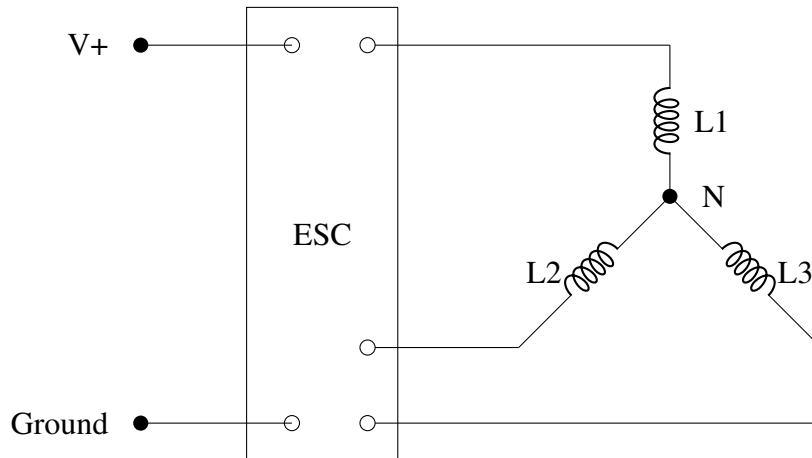
2.6 Κινητήρες



Σχήμα 2.15: Κινητήρας [36].

Ο κινητήρας που θα μας απασχολήσει στην παρούσα ΔΕ είναι ο σύγχρονος DC κινητήρας, καθώς τέτοιος είναι και ο κινητήρας που χρησιμοποιήσαμε για τις ανάγκες των πειραμάτων. Ένας σύγχρονος κινητήρας είναι ένας ηλεκτροκινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος στον οποίο, σε σταθερή κατάσταση, η περιστροφή του άξονα συγχρονίζεται με τη συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας. Ο σύγχρονος ηλεκτροκινητήρας περιλαμβάνει μόνιμο μαγνήτη στον ρότορα και πηνία διατεταγμένα στον στάτορα. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στο γεγονός ότι αν κάποιο ρεύμα διαπεράσει ένα πηνίο, τότε θα προκληθεί μαγνητικό πεδίο. Έτσι, εφαρμόζοντας το κατάλληλο ρεύμα σε ένα πηνίο, θα

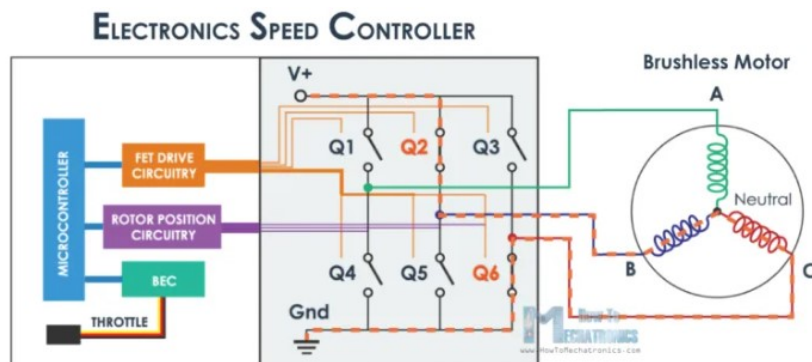
δημιουργηθεί έλξη μεταξύ του μαγνήτη του ρότορα και του στάτορα. Αναλογικά, αν διαπεράσει ρεύμα σειριακά όλα τα πηνία που έχει ο στάτορας, τότε θα προκληθεί περιστροφή του μαγνήτη του ρότορα, λόγω των αναπτυσσόμενων δυνάμεων [35]. Ένα απλουστευμένο αλλά επεξηγηματικό σκίτσο φαίνεται στο Σχήμα 2.15.



Σχήμα 2.16: Συνδεσμολογία αστέρα.

Στην περίπτωση που έχουμε έναν τετραπολικό κινητήρα, η παραπάνω περιγραφή μεταφράζεται κυκλωματικά όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.16. Τα πηνία αφορούν τα πηνία του στάτορα και συνδέονται σε συνδεσμολογία αστέρα. Όπου $L1, L2, L3$ μπορεί να περιγράφουν και σειριακή συνδεσμολογία πηνίων. Για παράδειγμα, $Z_{L1} = Z_{L1'} + Z_{L1''}$.

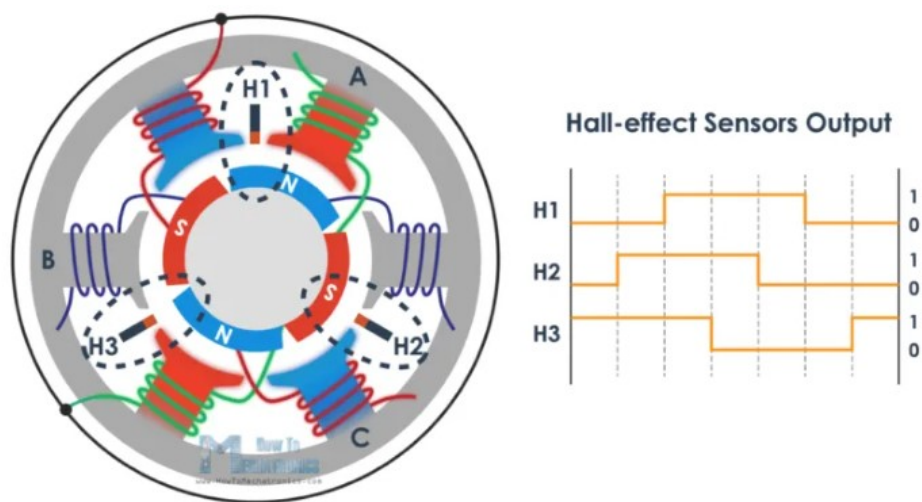
Το κύκλωμα ελέγχου στην παρούσα ΔΕ ενσωματώνει ένας μικροελεγκτής (**Electronic Speed Control** ή **ESC**). Το ESC ενσωματώνει τα απαιτούμενα **MOSFETs**, σε λειτουργία διακοπών, τα οποία χειρίζεται καταλλήλως ώστε όλα τα πηνία να διαρρέονται από ρεύμα σε ζεύγη και να περιστρέφεται ο κινητήρας (Σχήμα 2.17).



Σχήμα 2.17: ESC για έλεγχο κινητήρα [38].

2.6.1 ESC

Βασική λειτουργία του ESC είναι να ενεργοποιεί τα απαιτούμενα MOSFETs ώστε να παραχθεί περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο και να περιστραφεί ο κινητήρας. Για να γίνει όμως αυτό, πρέπει να γνωρίζουμε τη θέση του ρότορα κάθε στιγμή. Αυτήν μπορούμε να τη λάβουμε χρησιμοποιώντας αισθητήρες Hall, τοποθετημένους στον στάτορα ανά 120° ή 60° μοίρες. Έτσι με την περιστροφή του ρότορα, οι αισθητήρες έχουν έξοδο λογικό 0 για πόλο N ή λογικό 1 για πόλο S (Σχήμα 2.18).



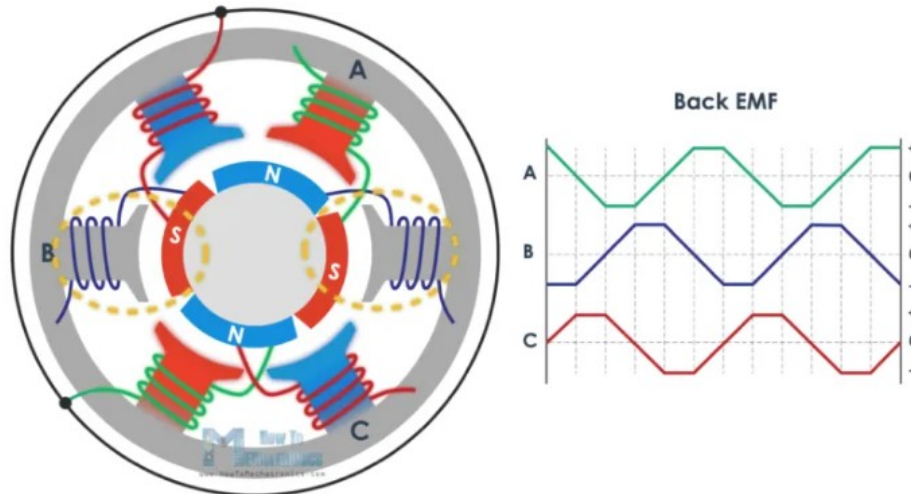
Σχήμα 2.18: Ανίχνευση θέσης με αισθητήρες Hall [38].

Μια άλλη τεχνική μέτρησης της θέσης του ρότορα είναι με την αντιηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται. Αυτήν η δύναμη είναι αποτέλεσμα του ρεύματος που παράγεται από την έλευση ενός πηνίου μέσα από ένα κινούμενο μαγνητικό πεδίο. Έτσι το ESC μπορεί να ανιχνεύσει το δυναμικό που θα αναπτυχθεί σε κάθε πηνίο και να υπολογίσει πότε θα αναπτυχθεί το επόμενο. Στην προκειμένη περίπτωση ανιχνεύει τρεις παλμούς, έναν για κάθε φάση, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.19.

Τελικά, η περιστροφή του κινητήρα γίνεται μέσω αυτής της δύναμης, όπου ανάλογα τα RPM περιστροφής αυξάνεται ή μειώνεται το πλάτος και η συχνότητα του τετραγωνικού παλμού που παράγει και στέλνει το ESC.

2.7 Μέθοδοι Μέτρησης και Επιλογής Ταχύτητας Κινητήρα

Στη συνέχεια θα δούμε τεχνικές μέτρησης των RPM ενός μοτέρ, κάτι αρκετά σημαντικό



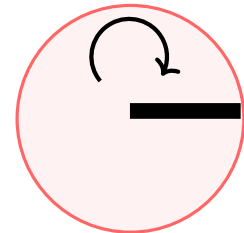
Σχήμα 2.19: Ανίχνευση δυνάμεων [38].

για τη Spin Coating συσκευή. Αρχικά, ο Wang [26] το 2011 πρότεινε ένα σύστημα μέτρησης το οποίο αξιοποιεί στον πυρήνα του ένα αισθητήρα Hall.

Το φαινόμενο Hall βασίζεται στην αρχή ότι αν ένα μέταλλο διερχόμενο από ρεύμα I εισαχθεί σε κάποιο μαγνητικό πεδίο, τότε θα αναπτυχθεί η τάση Hall U_H στα άκρα του. Αυτήν η τάση Hall ορίζεται:

$$U_H = K_H \times I \times B \quad (2.14)$$

όπου K_H είναι ο συντελεστής ευαισθησίας της συσκευής Hall, I είναι το ηλεκτρικό ρεύμα και B είναι η ένταση της μαγνητικής επαγωγής.



Έτσι αν ο αισθητήρας Hall τοποθετηθεί πολύ κοντά στον κινητήρα, θα επηρεαστεί από το μαγνητικό πεδίο λόγω των μαγνητών του και θα εξάγει παλμικό σήμα του οποίου η συχνότητα είναι ανάλογη της ταχύτητας [27], [28]. Τελικά, κατέληξε στην εξής σχέση για την ταχύτητα περιστροφής:

Σχήμα 2.20: Σχεδιάγραμμα.

$$n = \frac{60}{P \times T} \quad (2.15)$$

όπου n είναι η ταχύτητα του κινητήρα, P είναι ο αριθμός παλμού ενός γύρου για τον κινητήρα και T είναι η περίοδος του σήματος τετραγωνικού κύματος.

Μια άλλη τεχνική περιλαμβάνει έναν αισθητήρα υπέρυθρων [29]. Ο αισθητήρας υπέρυθρων είναι μια ηλεκτρονική συσκευή, που εκπέμπει φως για να ανιχνεύσει κάποιο αντικείμενο. Μπορεί να μετρήσει τη θερμότητα ενός αντικειμένου καθώς και να ανιχνεύσει την κίνηση. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην εκπομπή παλμών από τον αισθητήρα και την εύρεση του ενδιαμέσου χρόνου μέχρι ο παλμός να επιστρέψει και να αναγνωστεί από τον ίδιο αισθητήρα.

Η σχέση από την οποία καταλήγουμε στα μετρούμενα RPM είναι:

$$RPM = \frac{60000000}{t_{elapsed}} \quad (2.16)$$

όπου ο χρόνος $t_{elapsed}$ είναι μετρημένος σε us.

Στην περίπτωση που έχουμε στερεωμένο ένα δίσκο (όπως στο Σχήμα 2.20) στον κινητήρα, χρειάζεται ένα σταθερό σημείο (η μαύρη λωρίδα) ώστε ο χρόνος $t_{elapsed}$ (us) να αντιστοιχεί στην περίοδο ανάγνωσης της λωρίδας από τον αισθητήρα.

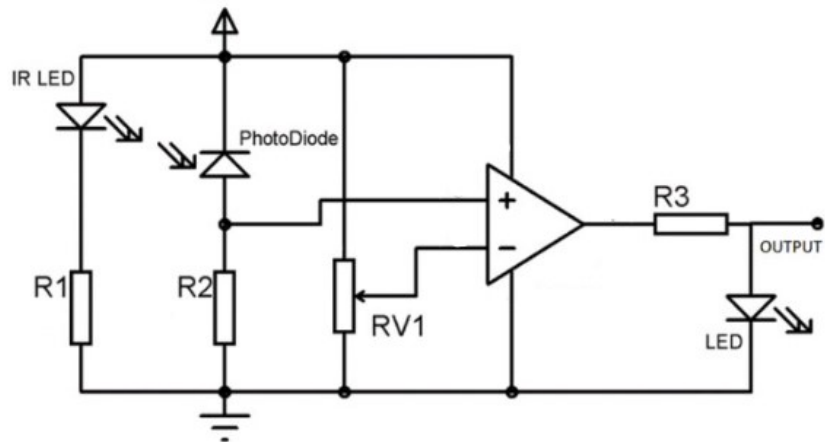
Σε αυτήν τη ΔΕ χρησιμοποιήθηκε η τελευταία τεχνική με τον αισθητήρα υπέρυθρων και το Arduino για τους απαραίτητους υπολογισμούς και την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, μέσω της κονσόλας εξόδου του Arduinio IDE.

2.8 Οπτικοί αισθητήρες

Οι οπτικοί αισθητήρες αποτελούνται από μια πηγή φωτεινής ακτινοβολίας και έναν ανιχνευτή ακτινοβολίας. Συνήθως η πηγή εκπέμπει φως στην περιοχή του υπέρ ερυθρού και όχι του ορατού φάσματος, ώστε να μην επηρεάζεται η λειτουργία του αισθητήρα από άλλες πηγές φωτός του περιβάλλοντος.

Ένας ανιχνευτής ακτινοβολίας μπορεί να είναι μια φωτοαντίσταση, φωτοδιόδος ή ένα φωτοτρανζίστορ. Η φωτοαντίσταση, πρακτικά, μεταβάλλει την τιμή της αντίστασης της ανάλογα με την ένταση της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτήν. Έτσι η μεταβολή της αντίστασης μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα το οποίο θα είναι ανάλογο με την ένταση της ακτινοβολίας [37].

Ένα απλουστευμένο κύκλωμα, φαίνεται στο Σχήμα 2.21. Το ποτενσιόμετρο στο κύκλωμα μεταβάλλει την ευαισθησία του αισθητήρα και η μέτρηση ουσιαστικά προκύπτει



Σχήμα 2.21: Κύκλωμα αισθητήρα IR.

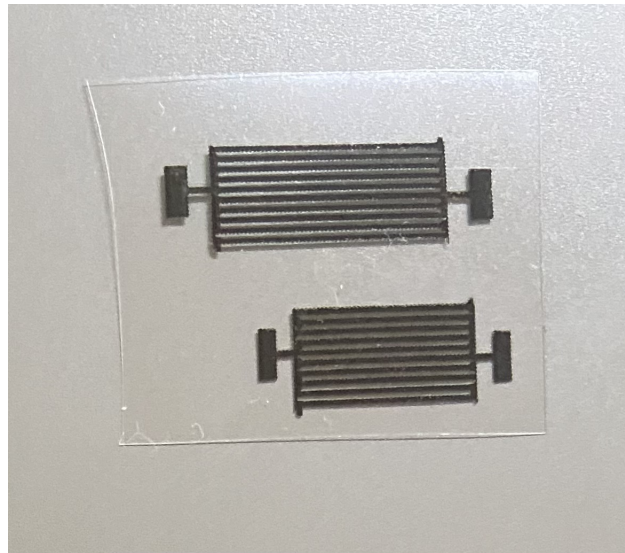
από την έξοδο του ενισχυτή. Η συνδεσμολογία συγκριτή του ενισχυτή επιτρέπει να βγάζει χαμηλή έξοδο (λίγο πάνω από 0V για τροφοδοσία 5V) όταν δεν ανιχνεύεται ακτινοβολία και υψηλή έξοδο (περίπου 3.3V για τροφοδοσία 5V) όταν ανιχνεύει ακτινοβολία, με αποτέλεσμα την αλλαγή τάσης στα άκρα της φωτοδιόδου και της αντίστασης R_2 . Έτσι, η έξοδος του ενισχυτή προκύπτει από τη σύγκριση των τάσεων στις δύο του εισόδους.

Είναι δυνατόν ένας αισθητήρας υπέρυθρων να χρησιμοποιηθεί και για μέτρηση ταχύτητας περιστροφής κινητήρα, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη υποενότητα. Σε αυτήν την περίπτωση, λαμβάνουμε την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα μετρώντας τον ενδιάμεσο χρόνο των μετρήσεων του αισθητήρα.

Στην παρούσα ΔΕ χρησιμοποιήθηκε η διάταξη αισθητήρα IR-08H που ενσωματώνει το ολοκληρωμένο PQZA27 (σε εναλλακτική έκδοση υπάρχει με το NE555), το οποίο παράγει τετραγωνικό παλμό 38kHz μέσω του οποίου φωτίζει το IR LED και ανιχνεύεται η αντανάκλαση του από τον αισθητήρα HS38BD. Οι δύο αντιστάσεις trimmer που φαίνονται και στο Σχήμα 3.9 χρησιμοποιούνται για την ένταση του led και για τυχόν μεταβολή της συχνότητας του παλμού [39].

3 Πειραματικό Μέρος

3.1 Εισαγωγικά



Σχήμα 3.1: Συστοιχία πυκνωτών.

Για το πειραματικό κομμάτι της ΔΕ χρειαζόμαστε τον κινητήρα και ένα τρόπο για να ελέγχουμε την ταχύτητα του. Θέλουμε δηλαδή κάποιον μικροελεγκτή που να μεταφράζει κάποια αλλαγή τιμής αντίστασης σε σήμα το οποίο αναγνωρίζει ο κινητήρας, ώστε να κινηθεί σε κατάλληλη ταχύτητα. Για αυτήν τη λειτουργία αξιοποιήσαμε ένα **Arduino UNO** και έναν ελεγκτή **ESC** ο οποίος είναι υπεύθυνος για την παροχή ρεύματος και τάσης συμβατά με τον κινητήρα που θα οδηγήσει.

Το πείραμα που χρειάζεται να πραγματοποιήσουμε ώστε να παρατηρήσουμε την αποτελεσματικότητα της συσκευής μας, είναι μια λιθογραφία. Συγκεκριμένα, θέλουμε να αποτυπώσουμε πάνω σε ένα κομμάτι πυριτίου μια συστοιχία πυκνωτών όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, πετυχαίνοντας πρώτα τη λιθογραφία και τέλος την έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία.

3.2 Κατασκευή **spin coater**

3.2.1 Κινητήρας μηχανικού δίσκου

Για την κατασκευή του **spin coater** χρησιμοποιήθηκε ένας παλιός και χαλασμένος (ο κινητήρας δουλεύει κανονικά) μηχανικός σκληρός δίσκος (**HDD**) που είχε στην διάθεση

του το εργαστήριο. Αυτό που χρειαζόμαστε από τον σκληρό δίσκο είναι ο κινητήρας του.

Το πρώτο πράγμα που πρέπει να γίνει για να απομονωθεί ο κινητήρας, είναι να ξεβιδωθεί το καπάκι του δίσκου. Έτσι θα έχουμε πρόσβαση σε όλα τα μέρη από τα οποία αποτελείται. Αφού αφαιρεθεί το καπάκι σειρά έχει η κεφαλή ανάγνωσης με το καλώδιο της και οι μαγνήτες νεοδυμίου, τα βασικά στοιχεία λειτουργίας ενός μηχανικού δίσκου. Έπειτα, από την ανάποδη πλευρά του δίσκου, αφαιρείται η πλακέτα ελέγχου και μένει ο κινητήρας στερεωμένος στο πλαίσιο του. Για τις ανάγκες του μετέπειτα πειράματος δεν χρειάζεται η απομάκρυνση του από αυτό.



Σχήμα 3.2: Τρυπάνι και διαμπερής οπή κινητήρα.

Στην συνέχεια χρειάζεται η μετατροπή του κινητήρα με τρόπο που θα επιτρέψει να εφαρμοστεί το σωληνάριο της αντλίας κενού. Για αυτόν τον λόγο χρειάστηκε μια οπή στον κεντρικό άξονα του κινητήρα. Όπως φάνηκε και στο Σχήμα 2.10 ήδη υπάρχει μια τέτοια οπή, αλλά αυτήν δεν είναι διαμπερής. Οπότε ανοίχτηκε περαιτέρω με ένα τρυπάνι καρβιδίου διατομής 2.5 χιλιοστών (Σχήμα 3.2).

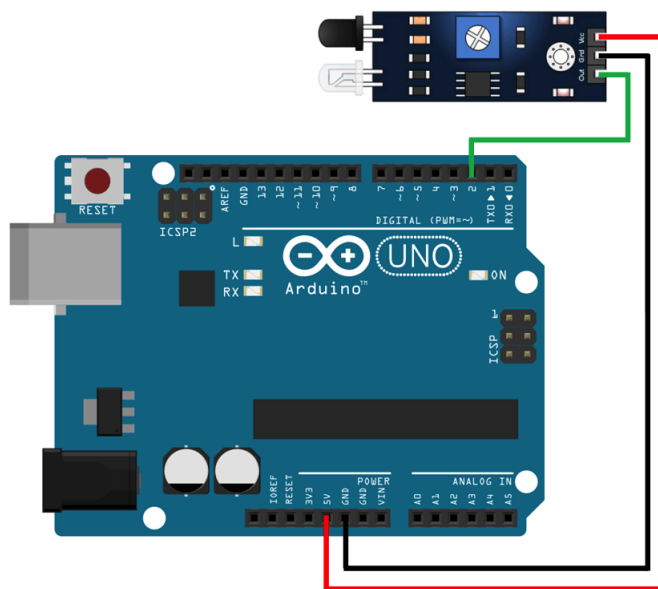
3.2.2 Συνδεσμολογία κυκλώματος αισθητήρα υπερύθρων

Η συνδεσμολογία του αισθητήρα υπερύθρων είναι αρκετά απλή και είναι η ακόλουθη:

- τροφοδοσία V_{cc} στα 5V του Arduino
- ground στη γείωση του Arduino

- out στην ψηφιακή είσοδο 2 του Arduino

Το Arduino τροφοδοτείται από τον υπολογιστή μέσω USB καλωδίου, το οποίο χρησιμοποιείται και για την επικοινωνία με το Arduino IDE. Η συνολική συνδεσμολογία μπορεί να φανεί στο διάγραμμα του Σχήματος 3.3.



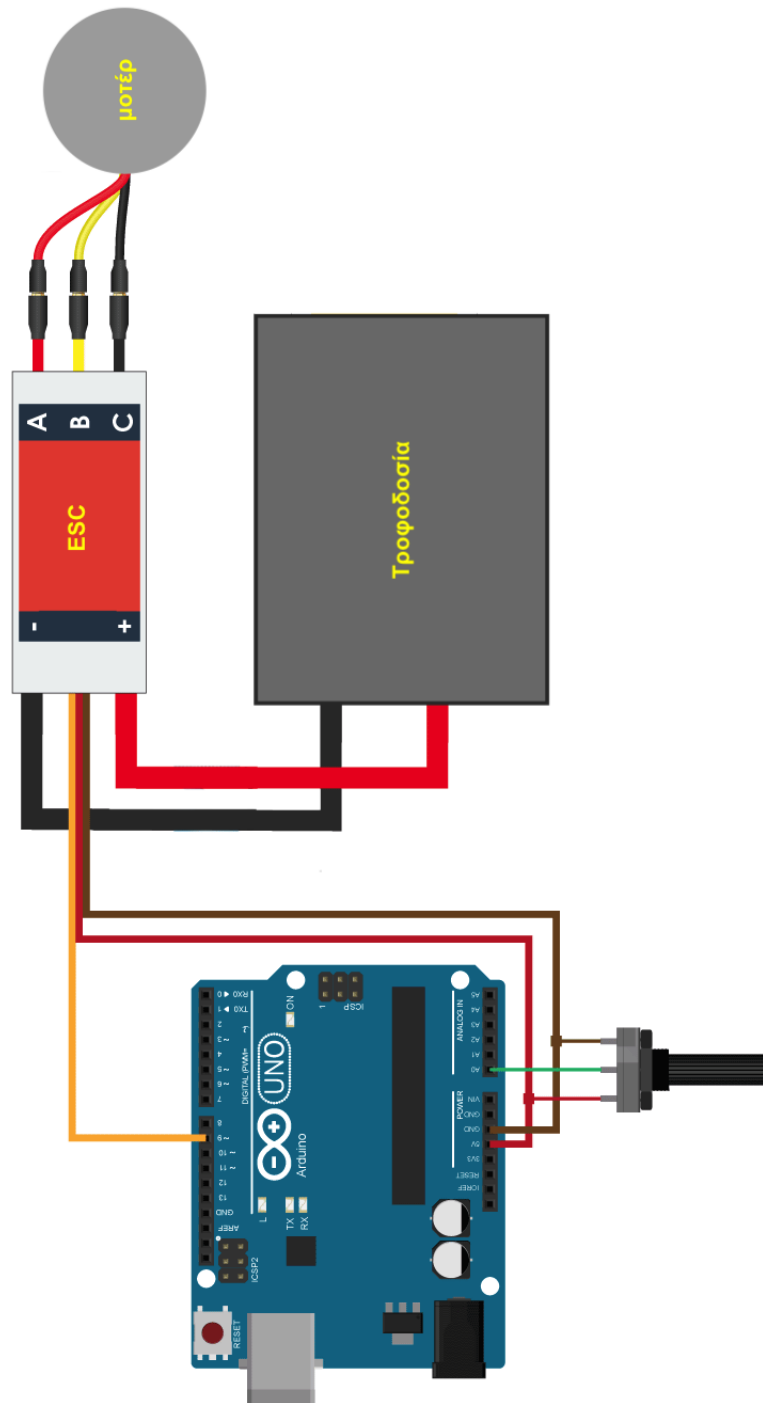
Σχήμα 3.3: Συνδεσμολογία του αισθητήρα υπερύθρων

3.2.3 Συνδεσμολογία κυκλώματος ελέγχου

Το κύκλωμα ελέγχου του κινητήρα αποτελείται από ένα Arduino και μια ESC μονάδα. Η συνδεσμολογία μεταξύ του μοτέρ και του Arduino γίνεται ως εξής:

- οι τρεις ακροδέκτες του μοτέρ συνδέονται με το ESC όπως στο Σχήμα 3.5
- το Arduino τροφοδοτείται με 5V από το ESC,
- η γείωση στο GND και
- ο ακροδέκτης ελέγχου στο pin 9.

Ο ESC ελεγκτής στέλνει κατάλληλους PWM παλμούς των 50kHz στον κινητήρα για τον έλεγχο του, όπως περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα.



Σχήμα 3.4: Συνδεσμολογία ελέγχου κινητήρα.

Για τη μεταβολή της ταχύτητας του κινητήρα αξιοποιούμε ένα ποτενσιόμετρο μέγιστης αντίστασης 20kΩ. Το ποτενσιόμετρο ουσιαστικά μεταβάλλει τη χρονική διαφορά και το πλάτος των παλμών που δέχεται ο κινητήρας, το οποίο μεταφράζεται σε διαφορετικές ταχύτητες.

Το ποτενσιόμετρο συνδέεται με στο **Arduino** ως εξής:

- ο μεσαίος ακροδέκτης συνδέεται στο **pin A0** του **Arduino**
- ο ένας ακραίος συνδέεται στην τροφοδοσία και
- ο άλλος στην γείωση

Η συνολική συνδεσμολογία μπορεί να φανεί στο διάγραμμα του Σχήματος 3.4.



Σχήμα 3.5: Ακροδέκτες κινητήρα μηχανικού δίσκου.

Για διευκόλυνση στη συνδεσμολογία των επιμέρους στοιχείων αλλά και για λόγους σταθερότητας των ακροδεκτών, χρησιμοποιήθηκε αυτοσχέδια πλακέτα επέκτασης (**shield**). Αυτήν κατασκευάστηκε παίρνοντας μια απλή διάτρητη πλακέτα και κολλώντας κεφαλές (**header pins**) στις κατάλληλες θέσεις. Έτσι οι συνδέσεις είναι πιο σταθερές αλλά και γίνεται

πιο εύκολα όποια αλλαγή σε αυτές χρειαστεί.

3.2.4 Πακετάρισμα διάταξης

Αφού γνωρίζουμε τη συνδεσμολογία μεταξύ όλων των στοιχείων του κυκλώματος ελέγχου του κινητήρα και τα έχουμε συνδέσει, τώρα απομένει η τοποθέτηση τους σε κάποιο κλειστό κουτί/πακέτο. Το πακετάρισμα αποτελεί ένα σημαντικό βήμα στη διαδικασία κατασκευής κάποιας διάταξης, αφού επιτρέπει τη μεταφορά αυτής για διεξαγωγή πειραμάτων αλλά και προστατεύει τα στοιχεία της από διάφορες φθορές.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική το πακετάρισμα είναι ιδιαίτερα πρότυπο, αλλά καλύπτει πλήρως τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Πρόκειται για ένα πλαστικό κουτί διαστάσεων $18cm \times 11cm \times 6.5cm$ όπου στον πάτο του έχει κολληθεί και στερεωθεί με ταινία διπλής όψης το ESC. Το Arduino δε χρειάζεται στερέωμα γιατί δεν είναι το ίδιο ευαίσθητο σαν κατασκευή και επειδή χρειάζεται συχνά συνδεσμολογία με υπολογιστή.

Ο κινητήρας και το ποτενσιόμετρο προσαρμόζονται πάνω στο κουτί και δε στερεώθηκαν σε μόνιμη θέση, καθώς το πλαίσιο του σκληρού δίσκου είναι αρκετά βαρύ και συμπαγές για να απορροφά κραδασμούς από τον κινητήρα και για το ποτενσιόμετρο είναι πιο γρήγορη η εναλλαγή μεταξύ διαφορετικών τιμών ποτενσιόμετρου, αν αυτό χρειαστεί. Τέλος, δημιουργήθηκε κατάλληλη οπή στο κουτί για την σύνδεση του τροφοδοτικού με το ESC.

Όσον αφορά τον αισθητήρα υπερύθρων για μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, έχει στερεωθεί σε κατάλληλη θέση στο πλαίσιο του δίσκου με κόλλα σιλικόνης. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή και επειδή η επιφάνεια του δίσκου είναι ομοιόμορφη, γυαλιστερή και καθρεπτίζουσα, επιβάλλεται να σχεδιαστεί μια μαύρη λωρίδα ανάγνωσης, όπως περιγράφηκε στην υποενότητα 2.7. Η γωνία στην οποία στερεώθηκε είναι τέτοια που επιτρέπει της ανάγνωσης της μαύρης λωρίδας και δεν επηρεάζει την λειτουργία του κινητήρα.

Μετά το πακετάρισμα η ολοκληρωμένη διάταξη είναι έτοιμη προς χρήση. Αυτό που χρειάζεται είναι η σύνδεση του Arduino για τη μέτρηση της ταχύτητας με υπολογιστή μέσω USB και η σύνδεση του τροφοδοτικού του ESC με μια πρίζα.

3.2.5 Προγραμματισμός Arduino

Για τον προγραμματισμό του Arduino που ελέγχει το ESC εφαρμόστηκε ο εξής αλγόριθμος:

Αλγόριθμος 1 ESC

- 1: Βήμα **1**: όρισμα pin επικοινωνίας με ESC
 - 2: Βήμα **2**: ανάγνωση αντίστασης ποτενσιόμετρου
 - 3: Βήμα **3**: κλιμάκωση της τιμής ανάμεσα σε 0 και 180 για τις ανάγκες της βιβλιοθήκης που χρησιμοποιήθηκε
 - 4: Βήμα **4**: αποστολή παλμού στο ESC
-

Για τον προγραμματισμό του **Arduino** που ελέγχει τον αισθητήρα υπερύθρων εφαρμόστηκε ο εξής αλγόριθμος:

Αλγόριθμος 2 Αισθητήρας υπερύθρων

- 1: Βήμα **1**: όρισμα συνθήκης διακοπής για σωστή μέτρηση χρόνου
 - 2: Βήμα **2**: όρισμα pin επικοινωνίας με **Arduino** και άρα διακοπής
 - 3: Βήμα **3**: υπολογισμός χρόνου
 - 4: Βήμα **4**: υπολογισμός ταχύτητας σε **RPM**
 - 5: Βήμα **5**: διατήρηση παρόντος χρόνου
 - 6: Βήμα **6**: μηδενισμός κατάστασης
 - 7: Βήμα **7**: και επανεκκίνηση μέτρησης χρόνου μεταξύ παλμών
-

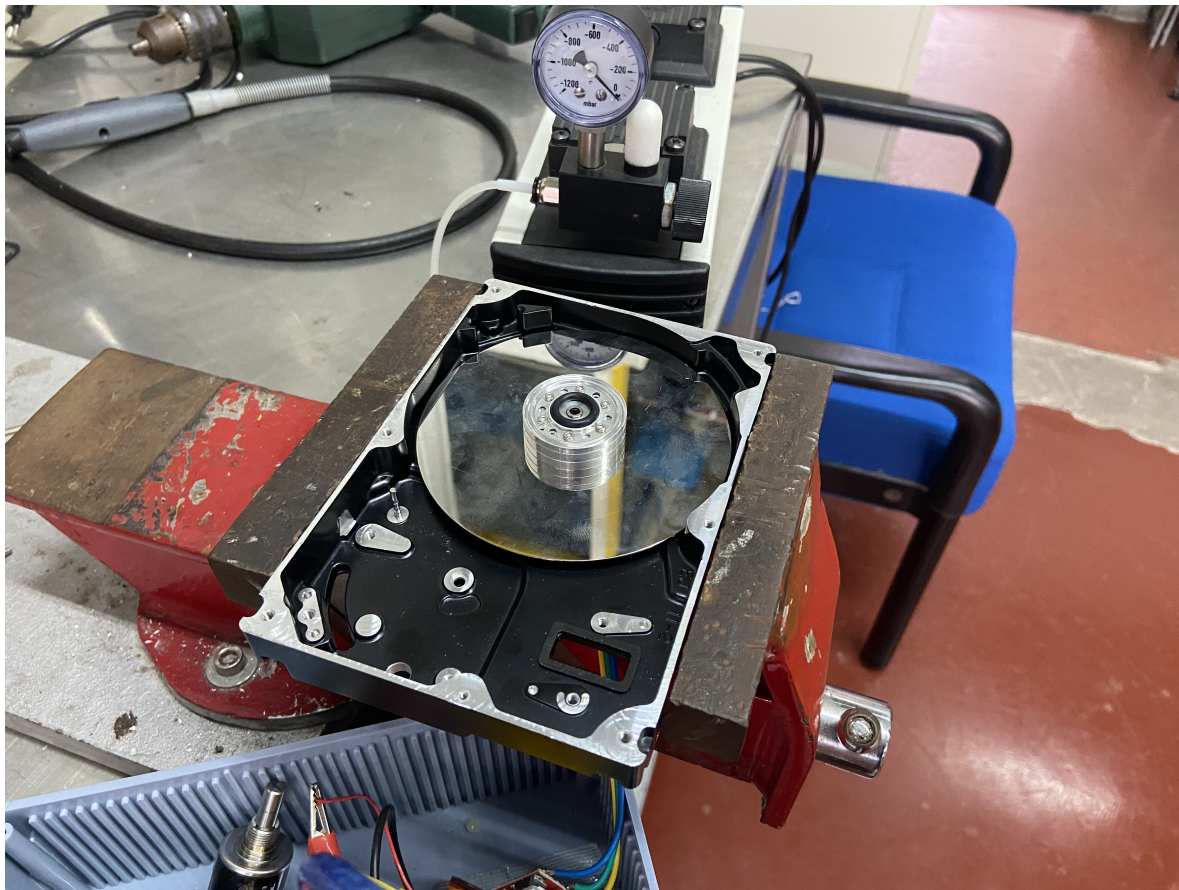
Οι πλήρεις κώδικες φαίνονται στα Σχήματα [5.1](#) και [5.2](#).

3.3 Πειραματική διάταξη

Παρακάτω (Σχήμα [3.6](#)) βλέπουμε την ολοκληρωμένη διάταξη που υλοποιήσαμε. Αποτελείται από πέντε (5) μέρη, τα οποία είναι:

- ο κινητήρας του μηχανικού δίσκου (Σχήμα [3.7a](#))
- αντλία κενού (Σχήμα [3.7b](#))
- ένας οδηγός για τον κινητήρα (ESC) (Σχήμα [3.8a](#))
- **Arduino UNO Rev3 + shield** (Σχήμα [3.8b](#))
- ποτενσιόμετρο για ρύθμιση ταχύτητας (Σχήμα [3.10](#))

Στο Σχήμα [3.9](#) βλέπουμε τον αισθητήρα μέτρησης των στροφών του κινητήρα. Μεταβάλλουμε την ταχύτητα του κινητήρα μέσω του ποτενσιόμετρου που φαίνεται στο Σχήμα [3.10](#).



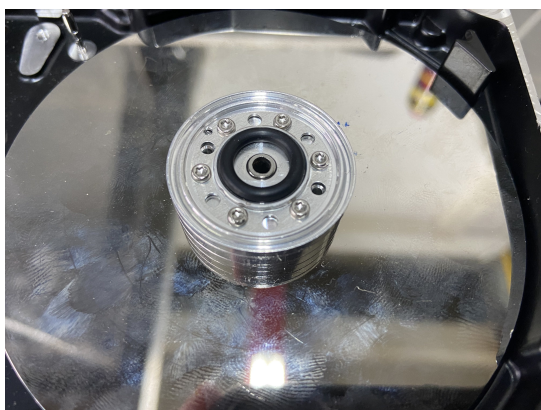
Σχήμα 3.6: Spin coater πριν την έναρξη πειράματος.

Η συσκευή μας τροφοδοτείται με 12V τάση και 0.5A ρεύμα μέσω του τροφοδοτικού που φαίνεται στο Σχήμα 3.11a. Η τάση παρέχεται απευθείας στον ESC, ο οποίος τροφοδοτεί τον κινητήρα αλλά και το Arduino.

Η διαδικασία εκκίνησης του κινητήρα είναι η εξής. Αρχικά συνδέουμε το τροφοδοτικό στην πρίζα και περιμένουμε να ακούσουμε έναν χαρακτηριστικό ήχο από το ESC. Βασική προϋπόθεση για να έχουμε επιτυχημένη εκκίνηση είναι να έχουμε ρυθμίσει το ποτενσιόμετρο στην αριστερή ακραία του τιμή, δηλαδή στα 0 Ohm.

Έπειτα, περιστρέφοντας δεξιόστροφα το ποτενσιόμετρο, αυξάνουμε σταδιακά την ταχύτητα μέχρι να δούμε στην κονσόλα του Arduino IDE (δηλαδή την έξοδο του αισθητήρα) ότι πιάσαμε τα επιθυμητά RPM (4500).

Στη συνέχεια ανοίγουμε την αντλία κενού αέρος, προετοιμάζουμε το δισκίο πυριτίου καθαρίζοντας το με ακετόνη και το τοποθετούμε πάνω στον κινητήρα. Κάτω από την



(a) Μοτέρ HDD.



(b) Αντλία κενού.

Σχήμα 3.7: Μέρη spin coater.

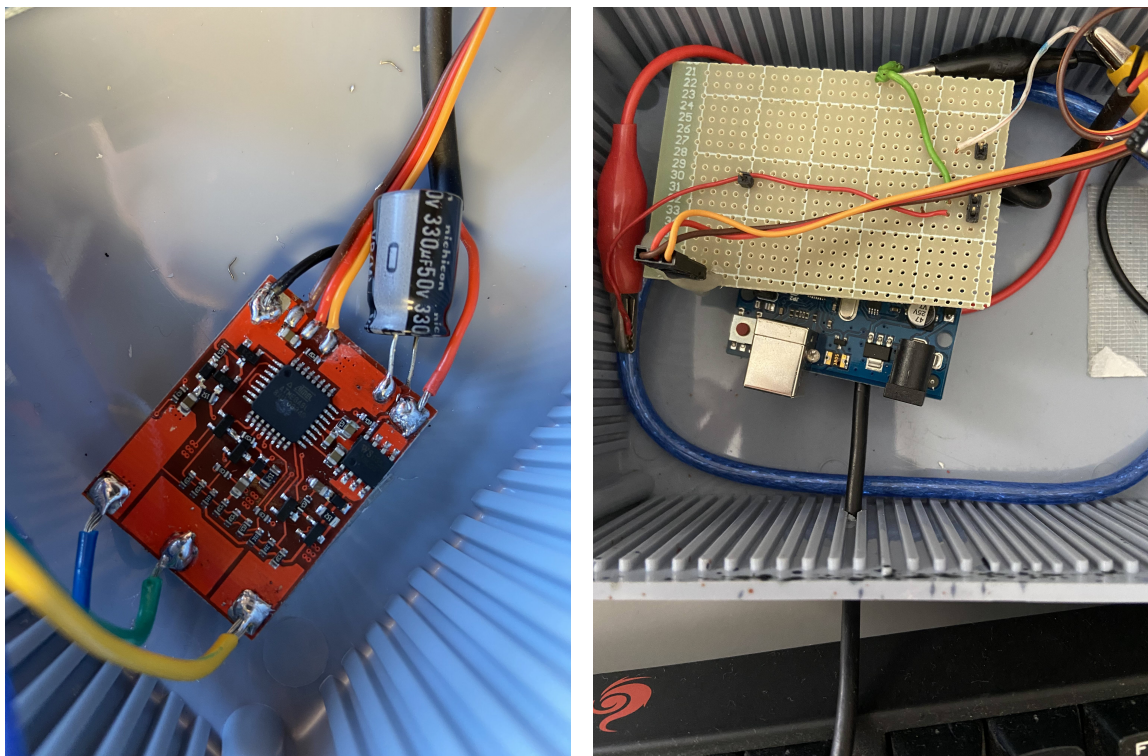
οπή στο κέντρο του κινητήρα στερεώνεται το σωληνάριο της αντλίας (Σχήμα 3.11b). Το κενό που δημιουργεί η αντλία βοηθάει στο να μένει σταθερό το δισκίο παρά τη γρήγορη περιστροφή του κινητήρα.

3.4 Εκτέλεση πειράματος

Αφού η διάταξη μας είναι έτοιμη προς χρήση, όπως περιγράφηκε προηγουμένως, μπορούμε να ξεκινήσουμε το πείραμα μας.

Η διαδικασία του πειράματος είναι η εξής:

1. Πλύση του δισκίου πυριτίου με διάλυμα ακετόνης-προπανόλης-νερού και στέγνωμα σε θερμαινόμενη επιφάνεια (Σχήμα 3.13a).
2. Τοποθέτηση του δισκίου στον κινητήρα (Σχήμα 3.13b) και έγχυση μικρής ποσότητας φωτοευαίσθητης ρητίνης AZ5214 (Σχήμα 3.14a).
3. Περιστροφή του δισκίου στα 4500 RPM για 45 δευτερόλεπτα.
4. Ψήσιμο σε θερμαινόμενη επιφάνεια στους 110°C για 90 δευτερόλεπτα.



(a) ESC.

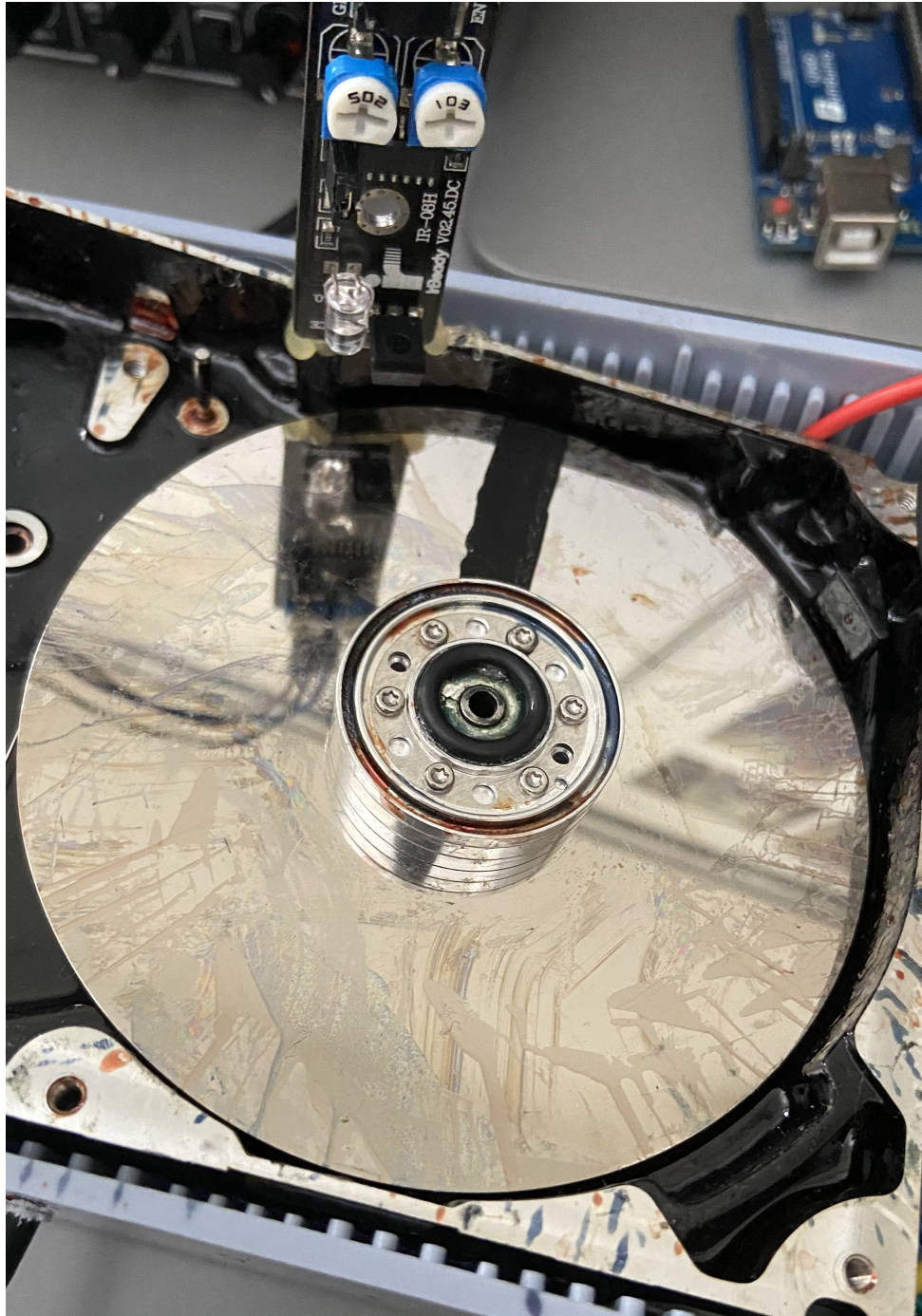
(b) Arduino + shield.

Σχήμα 3.8: Σύστημα ελέγχου κινητήρα.

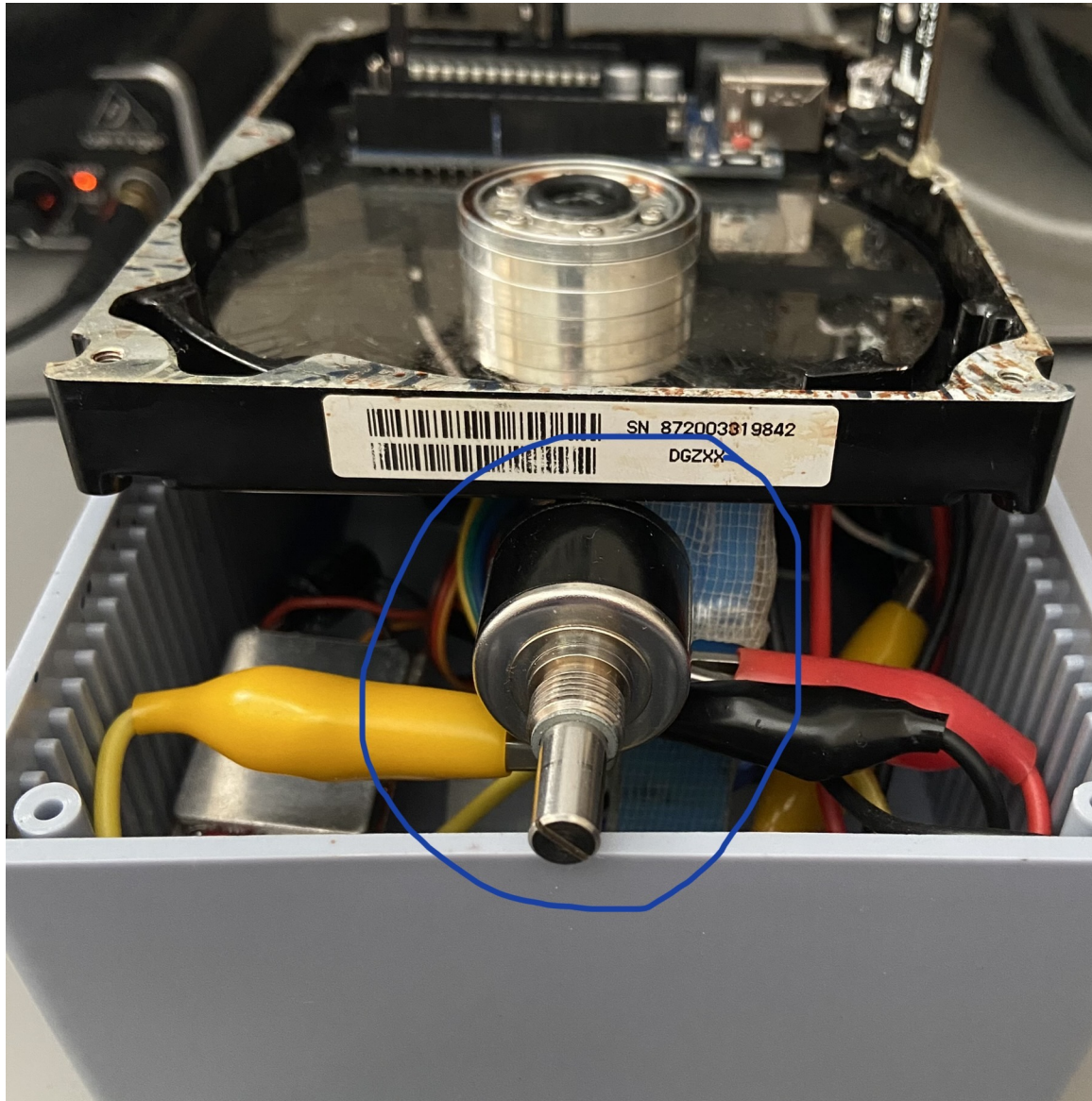
5. Έκθεση σε υπεριώδη (UV) ακτινοβολία για 10 λεπτά.
6. Ψήσιμο σε θερμαινόμενη επιφάνεια στους 125°C για 90 δευτερόλεπτα.
7. Εμφάνιση του σχεδίου με εμφανιστή IMAH για 1 λεπτό.
8. Τελικό ψήσιμο σε θερμαινόμενη επιφάνεια στους 125°C για 15 λεπτά ώστε να σκληρύνει το πολυμερές (Σχήμα 3.14b).

Το ζητούμενο κύκλωμα προς λιθογραφία (Σχήμα 3.1) σχηματίζεται στο βήμα 7 της παραπάνω διαδικασίας. Έπειτα και από το τελικό ψήσιμο μπορούμε να ελέγξουμε τα αποτελέσματα της λιθογραφίας με μικροσκόπιο.

Αυτά φαίνονται στο Σχήμα 3.12 και παρατηρούμε ότι δεν έχει αποτυπωθεί απόλυτα το σχέδιο, το οποίο στη συνέχεια, μετά την επιμετάλλωση, θα σχηματίσει μη αγώγιμους δρόμους κυκλωματικά.



Σχήμα 3.9: Αισθητήρας υπέρυθρων.



Σχήμα 3.10: Ποτενσιόμετρο ρύθμισης ταχύτητας.

Για αυτόν τον λόγο εκτελέσαμε ξανά το πείραμα σε περισσότερα δείγματα, με μόνη διαφορά τον χρόνο έκθεσης σε UV ακτινοβολία και εμφάνισης, που αυξήθηκαν σε 15 και 2 λεπτά αντίστοιχα.

Τα τελικά αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 3.15.

Πλέον μπορούμε να διακρίνουμε με κάθε λεπτομέρεια το αποτυπωμένο σχέδιο, όπως φαίνεται και στις εικόνες από μικροσκόπιο στο Σχήμα 3.15.

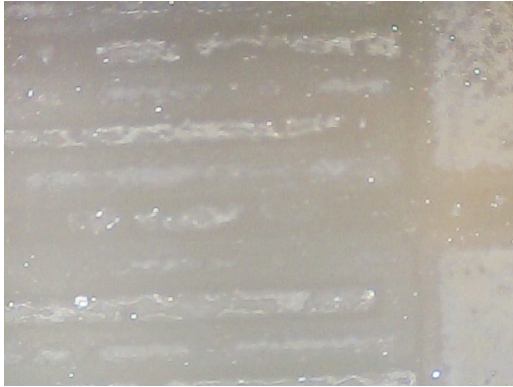


(a) Τροφοδοτικό για ESC και Arduino.

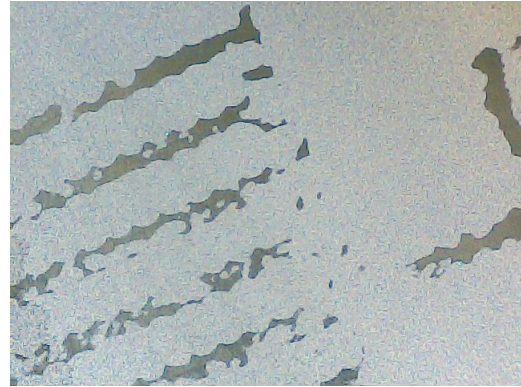


(b) Σωληνάριο αντλίας κενού.

Σχήμα 3.11: Τροφοδοτικό διάταξης και σωληνάριο αντλίας κενού αέρος.

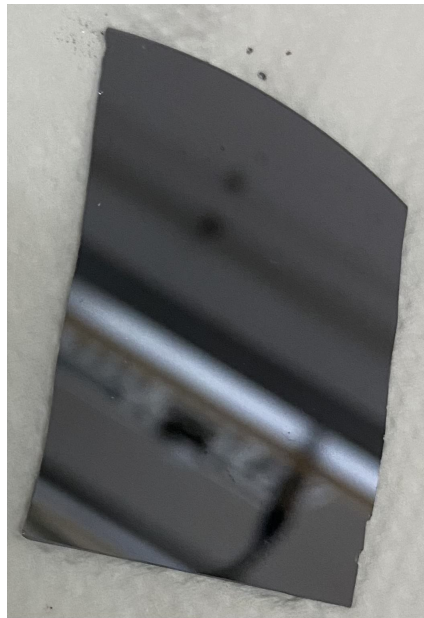


(a)

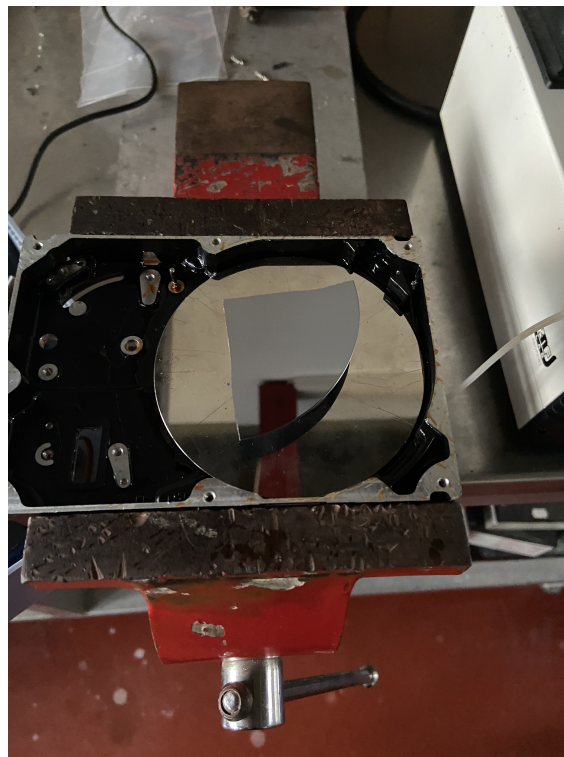


(b)

Σχήμα 3.12: Αποτελέσματα λιθογραφίας.

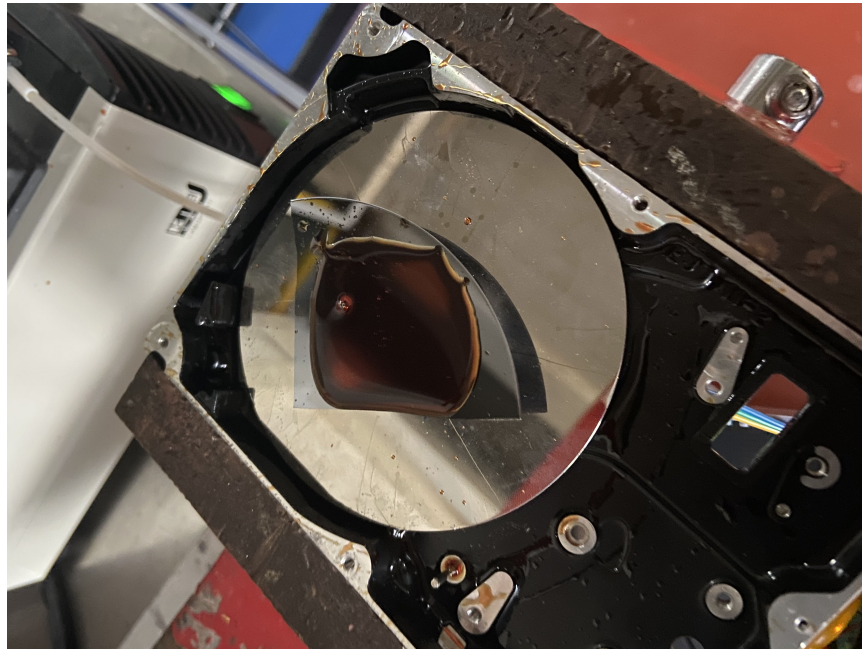


(a) Καθαρισμός δισκίου



(b) Τοποθέτηση δισκίου στον κινητήρα.

Σχήμα 3.13: Πρώτα στάδια λιθογραφίας.

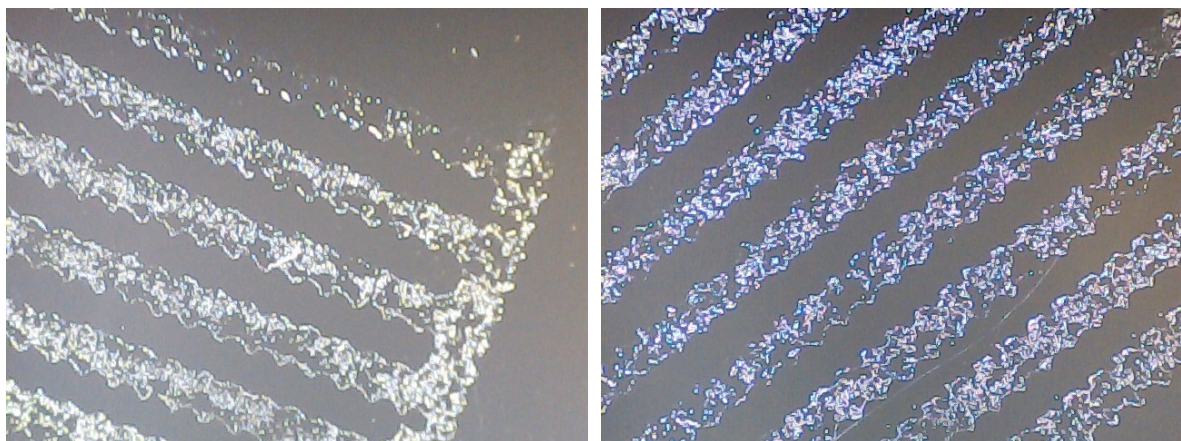
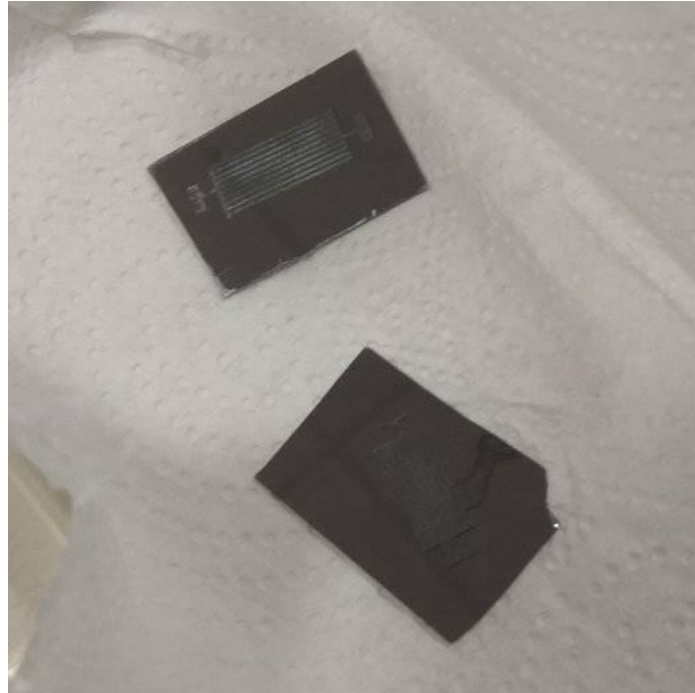


(a) Έγχυση φωτοευαίσθητης ρητίνης.



(b) Ψήσιμο δισκίου.

Σχήμα 3.14: Τελικά στάδια λιθογραφίας.



Σχήμα 3.15: Τελικά αποτελέσματα λιθογραφίας.

4 Συμπεράσματα και μελλοντικά βήματα

4.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία είχε στόχο την ανάπτυξη μια συσκευής *spin coating*, η οποία θα αναπτύσσει μια λεπτή στρώση πολυμερούς, με σκοπό την αποτύπωση κυκλώματος και τελικά τη δημιουργία μιας λειτουργικής πλακέτας. Καταφέραμε με τη συσκευή μας να αναπτύξουμε επίστρωση ρητίνης περίπου $1.2\mu m$ πάνω σε δισκίο πυριτίου και να κάνουμε λιθογραφία επιτυχώς. Επίσης, η εφαρμογή του δεύτερου πειράματος με διαφορετικούς χρόνους στην έκθεση σε ακτινοβολία και εμφάνιση του σχεδίου, κατέδειξε πόσο σημαντικός παράγοντας είναι ο χρόνος αλλά και οι συνθήκες του εργαστηρίου, όσον αφορά τον αποκλεισμό ανεπιθύμητου φωτός. Είναι, βέβαια, αναμενόμενο τα αποτελέσματα στη λιθογραφία να μην είναι βέλτιστα, καθώς τα πειράματα εκτελέστηκαν εκτός καθαρού χώρου και υπάρχουν αναπόφευκτα ανεπιθύμητες προσμίξεις, όπως σωματίδια σκόνης για παράδειγμα, που επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Για τις δεδομένες συνθήκες εκτέλεσης των πειραμάτων όμως, το τελικό αποτέλεσμα είναι πολύ ικανοποιητικό.

4.2 Μελλοντικά Βήματα

Μια εξέλιξη της ΔΕ θα μπορούσε να είναι η διακρίβωση και καταγραφή της ταχύτητας και του αντίστοιχου παραγόμενου πάχους πολυμερούς, για διαφορετικές ταχύτητες και χρόνους περιστροφής. Επίσης, όσον αφορά το πακετάρισμα της διάταξης, η κατασκευή μας είναι αρκετά πρότυπη και χρήζει βελτίωση. Μια σημαντική αναβάθμιση είναι η μεταφορά του κινητήρα σε κάποια διαφορετική πλατφόρμα, η οποία θα έχει τη δυνατότητα απομόνωσης με αεροστεγές καπάκι, ώστε να είναι ελεγχόμενο το κενό και να μένει καθαρό από σκόνες το δισκίο. Παράλληλα, η προσθήκη μικρής οθόνης που θα εμφανίζει την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, θα διευκόλυνε τον έλεγχο των στροφών. Τέλος, σαν συνέχεια του πειράματος θα μπορούσε να είναι η διαδικασία της επιμετάλλωσης μέσω θερμικής εξάχνωσης και του *lift-off*, έτσι ώστε να παραχθεί πλήρως κάποια λειτουργική πλακέτα.

Βιβλιογραφία

- [1] J. Lathrop. "Computer History Museum". www.computerhistory.org (Accessed May 9, 2022).
- [2] C. Mack. "The Basics of Microlithography." *Semiconductor Lithography (Photolithography) - The Basic Process*. <http://www.lithoguru.com/scientist/lithobasics.html> (Accessed May 9, 2022).
- [3] S. Arscott, "The limits of edge bead planarization and surface levelling in spin-coated liquid films", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 30, no. 2, pp. 025003, Jan. 2020. doi: [10.1088/1361-6439/ab60be](https://doi.org/10.1088/1361-6439/ab60be).
- [4] A. G. Emslie, F. T. Bonner and L. G. Peck, "Flow of a Viscous Liquid on a Rotating Disk", *Journal of Applied Physics*, vol. 29, no. 5, pp. 858–862, May 1958. doi: [10.1063/1.1723300](https://doi.org/10.1063/1.1723300).
- [5] D. Meyerhofer, "Characteristics of resist films produced by spinning", *Journal of Applied Physics*, vol. 49, no. 7, pp. 3993–3997, Feb. 1978. doi: [10.1063/1.325357](https://doi.org/10.1063/1.325357).
- [6] E. Cohen and E. J. Lightfoot, "Coating Processes", *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, John Wiley & Sons, Ltd, 2011, pp. 1-68. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/0471238961.1921182203150805.a01.pub3>. (accessed May 9, 2022)
- [7] Y. Lu, X. W. Li, G. Q. Gong, G. Xiao, A. Gupta, P. Lecoeur, J. Z. Sun, A. Gupta, P. Lecoeur, and J. Z. Sun, "Large magnetotunneling effect at low magnetic fields in micrometer-scale epitaxial $La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$ tunnel junctions", *Physical Review B*, vol. 54, no. 12, pp. R8357–R8360. Jul. 1996. doi: [10.1103/physrevb.54.r8357](https://doi.org/10.1103/physrevb.54.r8357).
- [8] M. Bowen, M. Bibes, A. Barthélémy, J. P. Contour, A. Anane, Y. Lemaitre and A. Fert, "Nearly total spin polarization in $La_{2/3}Sr_{1/3}MnO_3$ from tunneling experiments", *Applied Physics Letters*, vol. 82, no. 2, pp. 233–235, Jan. 2003. doi: [10.1063/1.1534619](https://doi.org/10.1063/1.1534619).
- [9] X. W. Li, A. Gupta, G. Xiao, W. Qian and V. P. Dravid, "Fabrication and properties of heteroepitaxial magnetite (Fe_3O_4) tunnel junctions", *Applied Physics Letters*, vol. 73, no. 22, pp. 3282–3284. Nov. 1998. doi: [10.1063/1.122745](https://doi.org/10.1063/1.122745).

- [10] A. N. Hattori, Y. Fujiwara, K. Fujiwara, Y. Murakami, D. Shindo and H. Tanaka, "Fabrication of three-dimensional epitaxial $(Fe, Zn)_3O_4$ nanowall wire structures and their transport properties", *Applied Physics Express*, vol. 7, no. 4, pp. 045201. Mar. 2014. doi: [10.7567/apex.7.045201](https://doi.org/10.7567/apex.7.045201).
- [11] F. Hubenthal, "Noble Metal Nanoparticles: Synthesis and Optical Properties", *Comprehensive Nanoscience and Technology*, Elsevier B.V, 2011, pp. 375–435. doi: [10.1016/b978-0-12-374396-1.00034-9](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-374396-1.00034-9).
- [12] E. Abbe, "Beiträge zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung", *Archiv für Mikroskopische Anatomie*, vol. 9, no. 1, pp. 413–468. Dec. 1873. doi: [10.1007/BF02956173](https://doi.org/10.1007/BF02956173).
- [13] Lord Rayleigh, F.R.S, "Investigations in optics, with special reference to the spectroscope", *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 8, no. 49, pp. 261–274. Oct. 1879. doi: [10.1080/14786447908639684](https://doi.org/10.1080/14786447908639684).
- [14] B. Wu, and A. Kumar, "Extreme ultraviolet lithography: A review", *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, vol. 25, no. 6, pp. 1743-1761. Oct. 2007. doi: [10.1116/1.2794048](https://doi.org/10.1116/1.2794048).
- [15] J. M. Kontio, H. Husu, J. Simonen, M. J. Huttunen, J. Tommila, M. Pessa and M. Kauranen, "Nanoimprint fabrication of gold nanocones with 10 nm tips for enhanced optical interactions", *Optics Letters*, vol. 34, no. 13, pp. 1979-1981. Jul. 2009. doi: [10.1364/ol.34.001979](https://doi.org/10.1364/ol.34.001979).
- [16] Y. Vladimirsky, "Lithography", in *Vacuum Ultraviolet Spectroscopy II*, Eds. J.A.Samson and D.L.Ederer, Academic Press, 1998, ch. 10, pp. 205–223. [Online]. Available: https://books.google.gr/books?id=p9ZLfupdchkC&pg=PA205&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. Accessed: May 21, 2022.
- [17] J. X.J. Zhang, K. Hoshino, "Fundamentals of Nano/Microfabrlcation and Effect of Scaling", in *Molecular Sensors and Nanodevices*, 2nd ed., Academic Press, 2019, ch. 2, pp. 43–111. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128148624000028>. Accessed: May 21, 2022.
- [18] A. Boudrioua, "Organic Light-emitting Diodes", in *An Introduction to Organic Lasers*,

- Elsevier, 2017, ch. 2, pp. 49–93. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978178548158150002X>. Accessed: May 21, 2022.
- [19] R.F. Bianchi, J. P. Lima, M. F. Pansiera, L. Yagura et al., "Spin coater based on brushless dc motor of hard disk drivers", *Progress in Organic Coatings*, vol. 57, pp. 33–36, Sep. 2006. doi: [10.1016/j.porgcoat.2006.05.004](https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2006.05.004)
- [20] A. Mishra, N. Bhat, A. K. Bajpai, "Nanostructured superhydrophobic coatings for solar panel applications", in *Nanomaterials-Based Coatings Fundamentals and Applications*, Elsevier, 2019, ch. 12, pp. 397–424, ISBN: 9780128158845
- [21] M.D. Tyona, "A theoretical study on spin coating technique", *Advances in material Research*, vol. 2, pp. 195-208. Dec. 2013. doi: [10.12989/amr.2013.2.4.195](https://doi.org/10.12989/amr.2013.2.4.195)
- [22] "Arduino Official Store." store.arduino.cc. <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3> (Accessed: Jul. 5, 2022).
- [23] "Half Sized Premium Breadboard - 400 Tie Points." adafruit.com. <https://www.adafruit.com/product/64> (Accessed: Jul. 5, 2022).
- [24] "Ethernet Shield W5100 Network Board For Arduino." hellasdigital.gr. <https://www.hellasdigital.gr/go-create/arduino-shields-and-accessories/ethernet-shield-w5100-network-expansion-board-for-arduino-uno-r3-mega-2560/> (Accessed: Jul. 5, 2022).
- [25] "Microcontrollers Atmega32 Atmega8." upload.wikimedia.org. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c8/Microcontrollers_Atmega32_Atmega8.jpg/440px-Microcontrollers_Atmega32_Atmega8.jpg (Accessed: Jul. 5, 2022).
- [26] W. Wang, "A Motor Speed Measurement System Based on Hall Sensor, in *Intelligent Computing and Information Science Communications in Computer and Information Science*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2011, doi: [10.1007/978-3-642-18129-0_69](https://doi.org/10.1007/978-3-642-18129-0_69)
- [27] J. B. Li, M. L. Liu,(2009) "Hall Sensor Based on the Speed Measurement System", in *Journal of Henan Institute of Science and Technology*, vol. 37, no. 3, pp. 54–56. 2009.
- [28] Z. Q. Ding, "Design of Motor Speed Measurement Device Based on Hall Effect Sensor",

- in *Journal of Agricultural Mechanization Research*, vol. 5, pp. 81–83. 2010.
- [29] ANKL. "Motor Speed Measurement Using Arduino." instructables.com. <https://www.instructables.com/Motor-Speed-Measurement-Using-Arduino/> (Accessed: Jun. 8, 2022).
- [30] D. W. Schubert, "Spin coating as a method for polymer molecular weight determination", in *Polymer Bulletin*, vol. 38, pp. 177–184. 1997. doi: [10.1007/s002890050035](https://doi.org/10.1007/s002890050035).
- [31] D. Schubert and T. Dunkel, "Spin coating from a molecular point of view: its concentration regimes, influence of molar mass and distribution.", in *Materials Research Innovations*, vol. 7, no. 5, pp. 314–321. Jan. 2001. doi: [10.1007/s10019-003-0270-2](https://doi.org/10.1007/s10019-003-0270-2).
- [32] D. E. Bornside, and R. A. Brown, "The effects of gas phase convection on mass transfer in spin coating", in *Journal of Applied Physics*, vol. 73, no. 2, pp. 585-600. 1993. doi: [10.1063/1.353368](https://doi.org/10.1063/1.353368).
- [33] E. M. Sparrow, J. L. Gregg, in *Journal of Heat Transfer*, vol. 82, no. 94. 1960.
- [34] J. Brandrup, E. H. Immergut, *Polymer handbook*, John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 1999. ISBN: 0-471-16628-6
- [35] Κ. Βουρνάς, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Συμμετρία, 2010.
- [36] Sosaley. "The Sosaley Motor Control Solutions (SMCS)." sosaley.com. <https://www.sosaley.com/products/integrated-starter-generator/> (Accessed: Jul. 25, 2022).
- [37] Κ. Καλοβρέκτης, Ν. Κατέβας, Αισθητήρες Μέτρησης και Ελέγχου, Εκδόσεις Τζιόλα, 2018.
- [38] Howtomechatronics. "How Brushless Motor and ESC Work" howtomechatronics.com. <https://howtomechatronics.com/how-it-works/how-brushless-motor-and-esc-work/> (Accessed: Jul. 25, 2022).
- [39] IR sensor. "IR Sensor for Obstacle Avoidance" irsensor.wizecode.com. <http://irsensor.wizecode.com/> (Accessed: Jul. 25, 2022).

5 Παράρτημα κώδικα

```
1
2 float value = 0;
3 float rev = 0;
4 int rpm;
5 int te=0;
6 int oldtime = 0;
7 int time;
8
9 void isr() //interrupt service routine
10 {
11     rev++;
12 }
13
14 void setup()
15 {
16     Serial.begin(115200);
17     attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), isr, RISING); //attaching the
18         interrupt
19 }
20 void loop()
21 {
22     delay(1000);
23     detachInterrupt(0); //detaches the interrupt
24     time = millis() - oldtime; //finds the time
25     rpm = (rev / time) * 60000; //calculates rpm
26     oldtime = millis(); //saves the current time
27     rev = 0;
28     Serial.println(rpm);
29     attachInterrupt(0, isr, RISING);
30 }
```

code/RPM.ino

Σχήμα 5.1: Κώδικας μέτρησης RPM.

```
1  /*
   *      Arduino Brushless Motor Control
   *      by Dejan, https://howtomechatronics.com
   */
5  #include <Servo.h>
   Servo ESC;      // create servo object to control the ESC
7  int potValue;   // value from the analog pin
   int motorValue;
9  void setup() {
   // Attach the ESC on pin 9
11  ESC.attach(9,1000,2000); // (pin, min pulse width, max pulse width in
   microseconds)
   Serial.begin(9600);
13 }
   void loop() {
15  potValue = analogRead(A0); // reads the value of the potentiometer (
   value between 0 and 1023)
17  motorValue = map(potValue, 0, 1023, 0, 180); // scale it to use it
   with the servo library (value between 0 and 180)
   ESC.write(motorValue); // Send the signal to the ESC
19  Serial.println(motorValue);
   }
```

code/esc30a_arduino.ino

Σχήμα 5.2: Κώδικας ελέγχου ESC.