



## **Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου**

**Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών  
Υπολογιστών**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕΤΑΞΟΤΥΠΙΑΣ ΣΤΗΝ  
ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΗΜΙΑΓΩΓΙΜΩΝ ΥΜΕΝΙΩΝ»**



**«THE METHOD OF SCREEN PRINTING FOR THE  
FABRICATION OF THIN SEMICONDUCTING  
FILMS»**

ΚΟΥΦΟΓΙΑΝΝΑΚΗΣ ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ Α.Μ. 7330

*Επιβλέπων Καθηγητής: Ηλίας Σταθάτος*

**ΠΑΤΡΑ 2024**

# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	4
Abstract.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> Θεωρητικό Μέρος.....	8
1.1 Εισαγωγή (Introduction).....	8
1.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο (Literature Review).....	8
1.3 Βασικές Αρχές της Μεταξοτυπίας .....	10
1.4 Εφαρμογές της Μεταξοτυπίας .....	11
1.5 Ημιαγωγοί .....	12
1.6 Παραδείγματα Ημιαγωγών .....	13
1.7 Χρήση των Ημιαγωγών στα Ηλεκτρονικά.....	16
Βιβλιογραφία 1 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου .....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> Μέθοδοι Εκτύπωσης Ηλεκτρονικών Διατάξεων.....	21
2.1 Inkjet Printing (Εκτύπωση με Ψεκάσμο Μελάνης).....	21
2.2 Gravure Printing (Βαθουτυπία).....	23
2.3 Flexographic Printing (Φλεξογραφία) .....	24
2.4 Photolithography (Φωτολιθογραφία) .....	26
Βιβλιογραφία 2 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου .....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> Η Μέθοδος Screen Printing .....	29
3.1 Ανάλυση της Μεθόδου Screen Printing .....	29
3.2 Χαρακτηριστικά και Επίδραση στην Εκτύπωση .....	30
3.3 Λόγοι επιλογής συγκεκριμένης μεθόδου .....	32
Βιβλιογραφία 3 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου .....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> Ερευνητικό Μέρος .....	36
4.1 Το Σύστημα που Μελετήθηκε.....	36
4.2 Περιγραφή Συστήματος.....	37
4.3 Χαρακτηριστικά .....	37
4.4 Μεθοδολογία (Methodology) .....	41
4.5 Αποτελέσματα .....	48
Βιβλιογραφία 4 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου .....	51
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	52
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	54
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: Διοξείδιο του Ζιρκονίου (ZrO <sub>2</sub> ) .....	57
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: Άνθρακας (Carbon) .....	59

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3: Διοξείδιο του Τιτανίου (TiO <sub>2</sub> ) .....	61
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4: Εξοπλισμός και Σπάτουλα Χρησιμοποιούμενη για την Εκτύπωση .....	64

## Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με τίτλο «Μελέτη Μεθόδου Μεταξοτυπίας στην Εκτύπωση Ημιαγώγιμων Υμενίων» επικεντρώνεται στη μελέτη και ανάλυση της μεθόδου μεταξοτυπίας (screen printing) για την απόθεση ημιαγώγιμων υμενίων σε αγωγίμο γυαλί. Η έρευνα αποτελεί μια πειραματική μελέτη που αξιοποιεί ποσοτικά και ποιοτικά δεδομένα και παρατηρήσεις για την αξιολόγηση της μεθόδου μεταξοτυπίας, εστιάζοντας στην εκτύπωση τριών διαφορετικών υλικών: οξειδίου του Ζιρκονίου ( $ZrO_2$ ), άνθρακα (Carbon) και διοξειδίου του Τιτανίου ( $TiO_2$ ). Σκοπός της μελέτης αυτής είναι να εξεταστούν οι επιδράσεις των παραμέτρων εκτύπωσης στην ποιότητα των υμενίων και ο καθορισμός των βέλτιστων εξ' αυτών.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται μια εισαγωγή στο αντικείμενο της μελέτης. Η μεταξοτυπία ως μέθοδος εκτύπωσης αναλύεται ως μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική με πλεονεκτήματα όπως η χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση και η μαζική παραγωγή, που την καθιστούν ιδανική για την εκτύπωση ημιαγώγιμων υμενίων. Το θεωρητικό υπόβαθρο περιλαμβάνει την ανάλυση των βασικών αρχών της μεταξοτυπίας και των εφαρμογών της σε ηλεκτρονικές διατάξεις, ενώ εξετάζονται και τα χαρακτηριστικά των ημιαγωγών. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι διάφορες μέθοδοι εκτύπωσης ηλεκτρονικών διατάξεων. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην συγκριτική ανάλυση της μεταξοτυπίας με άλλες τεχνικές εκτύπωσης, όπως η εκτύπωση έγχυσης μελάνης (inkjet printing), η βαθυτυπία (gravure printing) και η φλεξογραφία (flexographic printing). Καθεμία από τις μεθόδους αυτές παρουσιάζει μοναδικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που σχετίζονται με την ταχύτητα παραγωγής, την ακρίβεια και το κόστος. Το τρίτο κεφάλαιο εστιάζει στην ανάλυση της μεθόδου μεταξοτυπίας, περιγράφοντας τη διαδικασία και τις επιδράσεις των

παραμέτρων εκτύπωσης, όπως η πίεση, η ταχύτητα και το μέγεθος του πλέγματος (mesh). Επιπλέον, εξηγούνται οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκε η συγκεκριμένη μέθοδος για την εκτύπωση ημιαγωγικών υμενίων, καθώς και τα πλεονεκτήματά της σε βιομηχανικές εφαρμογές. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία της πειραματικής διαδικασίας. Περιγράφεται το σύστημα μεταξοτυπίας και οι παράμετροι εκτύπωσης που χρησιμοποιήθηκαν, όπως η πίεση της σπάτουλας, η ταχύτητα εκτύπωσης και η θερμοκρασία του υποστρώματος. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε αγώγιμο γυαλί (FTO ή ITO), και τα υλικά επίστρωσης ήταν το οξείδιο του Ζιρκονίου ( $ZrO_2$ ), ο άνθρακας (Carbon) και το διοξείδιο του Τιτανίου ( $TiO_2$ ). Μετά την εκτύπωση, τα υμένια υποβλήθηκαν σε θερμική επεξεργασία, και αξιολογήθηκε η ποιότητά τους μέσω οπτικής μικροσκοπίας και ηλεκτρικών μετρήσεων. Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων, όπου εξετάζονται οι επιδράσεις των παραμέτρων εκτύπωσης στην ποιότητα των υμενίων. Αναλύονται οι ιδιαιτερότητες κάθε υλικού και προτείνονται συγκεκριμένες βελτιώσεις για τη διαδικασία εκτύπωσης με τη μέθοδο της μεταξοτυπίας. Η ανάλυση της εργασίας αποκαλύπτει πως οι διάφορες παράμετροι εκτύπωσης, όπως η πίεση της σπάτουλας και η απόσταση του πλέγματος από το υπόστρωμα, παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ποιότητα των υμενίων.

Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα που αφορούν το πείραμα που διεξήχθη και γίνονται προτάσεις για τη μελλοντική χρήση της μεθόδου σε ηλεκτρονικές εφαρμογές.

**Λέξεις – Κλειδιά:** Μεταξοτυπία (Screen Printing), Ημιαγώγιμα Υμένια, Οξείδιο Ζιρκονίου ( $ZrO_2$ ), Διοξείδιο Τιτανίου ( $TiO_2$ ), Αγώγιμο Γυαλί

## **Abstract**

The present thesis, titled "Study of the Screen-Printing Method for the Deposition of Semiconducting Films", focuses on the study and analysis of the screen printing method for the deposition of semiconducting films on conductive glass. This research is an experimental study that uses quantitative and qualitative data and observations to evaluate the screen printing method, with a particular focus on the printing of three different materials: Zirconium Oxide ( $ZrO_2$ ), Carbon, and Titanium Dioxide ( $TiO_2$ ). The objective is to examine the effects of printing parameters on the quality of the films.

In the first chapter of the thesis, an introduction to the study is presented. Screen printing is analyzed as a widely used technique with advantages such as low energy consumption and mass production method, which is ideal for printing semiconducting films. The theoretical background includes an analysis of the basic principles of screen printing and its applications in electronic devices, while a reference in the properties of semiconductors is made. In the second chapter, a series of printing methods for electronic devices is analyzed. Special emphasis is given to the comparative analysis of screen printing with other techniques, such as inkjet printing, gravure printing, and flexographic printing. Each of these methods presents unique advantages and disadvantages concerning production speed, accuracy, and cost. The third chapter focuses on the analysis of the screen-printing method, describing the process and the effects of printing parameters such as pressure, speed, and mesh size. Additionally, the reasons for selecting this specific method for printing semiconducting films are explained, along with its advantages in industrial applications. In the fourth chapter, the methodology of the experimental process is presented. The screen-printing system

and the printing parameters used, such as squeegee pressure, printing speed, and substrate temperature, are described. The experiments were conducted on conductive glass (FTO or ITO), and the coating materials used were Zirconium Oxide ( $ZrO_2$ ), Carbon, and Titanium Dioxide ( $TiO_2$ ). After printing, the films underwent thermal treatment, and their quality was evaluated through optical microscopy and electrical measurements. In the final chapter, the results of the experiments are presented, examining the effects of printing parameters on the quality of the films. The specific properties of each material are analyzed, and specific improvements to the screen-printing process are proposed. The analysis of the thesis reveals that various printing parameters, such as squeegee pressure and the distance between the mesh and the substrate, play a crucial role in the quality of the films.

Finally, the conclusions are summarized and future directions about the use of the method in electronic applications are proposed.

**Keywords:** Screen Printing, Semiconducting Films, Zirconium Oxide ( $ZrO_2$ ), Titanium Dioxide ( $TiO_2$ ), Conductive Glass.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> Θεωρητικό Μέρος

## 1.1 Εισαγωγή (Introduction)

Η μεταξοτυπία είναι μια ευρέως διαδεδομένη τεχνική εκτύπωσης που χρησιμοποιείται σε διάφορους τομείς, από την κλωστοϋφαντουργία μέχρι την ηλεκτρονική. Η εργασία αυτή εστιάζει στην εφαρμογή της μεταξοτυπίας για την εκτύπωση ημιαγωγίμων υμενίων χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά υλικά: οξείδιο του ζirkονίου ( $ZrO_2$ ), άνθρακα (Carbon) και διοξείδιο του τιτανίου ( $TiO_2$ ), πάνω σε αγώγιμο γυαλί. Η μεταξοτυπία προσφέρει πλεονεκτήματα όπως η δυνατότητα μαζικής παραγωγής και η χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, τα οποία την καθιστούν ιδανική μέθοδο για την εκτύπωση ημιαγωγίμων υμενίων.

## 1.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο (Literature Review)

Η μεταξοτυπία, γνωστή και ως screen printing, είναι μια τεχνική εκτύπωσης όπου ένα μοτίβο μεταφέρεται σε ένα υπόστρωμα μέσω ενός πλέγματος. Η διαδικασία περιλαμβάνει την εφαρμογή μελάνης μέσα από το πλαίσιο, το οποίο έχει επιλεγμένα ανοίγματα που επιτρέπουν τη διέλευση της μελάνης μόνο στα επιθυμητά σημεία. Αυτή η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί για εκατοντάδες χρόνια και έχει προσαρμοστεί για διαφορετικές εφαρμογές, από την εκτύπωση σε υφάσματα έως την παραγωγή ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.

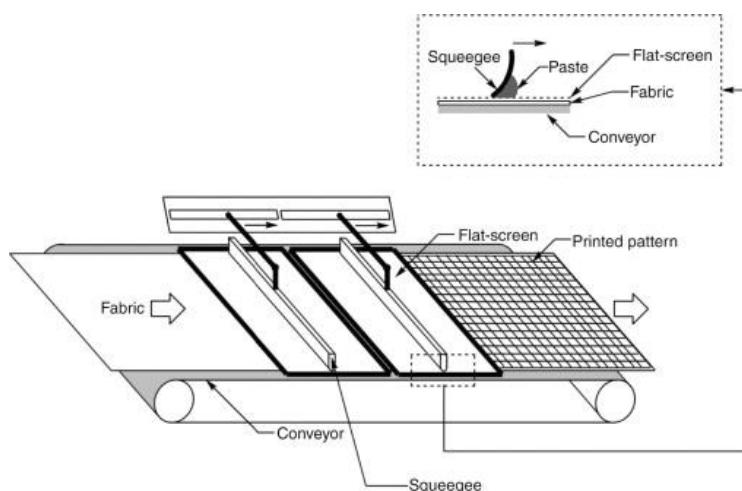
Η τεχνική αυτή πρωτοεμφανίστηκε στην Κίνα κατά τη διάρκεια της πρώτης χιλιετίας και χρησιμοποιήθηκε αρχικά για τη διακόσμηση υφασμάτων και κεραμικών. Στην Ευρώπη έφτασε τον 18ο αιώνα, αλλά άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως κατά τον 20ό



αιώνα λόγω της ευκολότερης πρόσβασης σε μετάξι, το οποίο αρχικά χρησιμοποιήθηκε ως πλέγμα για τη μεταξοτυπία [1].

Η διαδικασία της μεταξοτυπίας χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία για την παραγωγή υλικών με υψηλή ακρίβεια και ποιότητα. Στα ηλεκτρονικά, η μεταξοτυπία έχει αναπτυχθεί για την κατασκευή πυκνωτών, κυκλωμάτων και αισθητήρων, καθώς επιτρέπει την απόθεση ομογενών φιλμ, ρυθμιζόμενου πάχους, με υψηλή αγωγιμότητα. Κατά τη διάρκεια του 20ού αιώνα, η μέθοδος αυτή έγινε η κυρίαρχη τεχνολογία για την παραγωγή τυπωμένων κυκλωμάτων, παρέχοντας δυνατότητες μαζικής παραγωγής [2].

Η διαδικασία της μεταξοτυπίας περιλαμβάνει τη χρήση ενός πλέγματος και μιας σπάτουλας για την πίεση της μελάνης μέσω του πλέγματος και την απόθεση της σε ένα υπόστρωμα. Το πλέγμα μπορεί να είναι πολυεστέρας, πολυαμίδιο ή ανοξείδωτο ατσάλι, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Το μέγεθος του ανοίγματος του πλέγματος καθορίζει την ποσότητα της μελάνης που θα περάσει, ενώ η πυκνότητα ανοιγμάτων του πλέγματος επηρεάζει την ποιότητα και την ανάλυση της εκτύπωσης [1].



**Εικόνα 1:** Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας εκτύπωσης με την μέθοδο της μεταξοτυπίας.

Η παραπάνω Εικόνα 1 παρουσιάζει την αρχή λειτουργίας της μεταξοτυπίας. Το μελάνι (paste) εφαρμόζεται πάνω σε ένα πλέγμα (flat-screen), ενώ μια σπάτουλα (squeegee) πιέζει το μελάνι μέσω των ανοιγμάτων του πλέγματος για να δημιουργήσει το μοτίβο πάνω στο υπόστρωμα, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ύφασμα (fabric). Το ύφασμα μετακινείται μέσω ενός μεταφορικού ιμάντα (conveyor), εξασφαλίζοντας τη συνεχή εκτύπωση του μοτίβου.

Η χρήση της μεταξοτυπίας στα ηλεκτρονικά επιτρέπει την εκτύπωση αγωγίμων υλικών, όπως αργύρου ή άνθρακα, με ακρίβεια. Οι παράμετροι της διαδικασίας, όπως η ταχύτητα της σπάτουλας, η πίεση και η απόσταση του πλέγματος από το υπόστρωμα, επηρεάζουν καθοριστικά την ποιότητα των εκτυπωμένων στρωμάτων. Η διαδικασία αυτή έχει βελτιστοποιηθεί για την παραγωγή πυκνωτών, κυκλωμάτων και αισθητήρων, επιτρέποντας την παραγωγή ηλεκτρονικών εξαρτημάτων σε μεγάλη κλίμακα με υψηλή ακρίβεια [2].

### **1.3 Βασικές Αρχές της Μεταξοτυπίας**

Η μεταξοτυπία λειτουργεί βάσει μιας απλής αλλά αποδοτικής αρχής, κατά την οποία η μελάνη περνάει μέσα από ένα ειδικά σχεδιασμένο πλέγμα. Το πλαίσιο αυτό έχει συγκεκριμένες περιοχές που επιτρέπουν τη διέλευση της μελάνης και άλλες που την εμποδίζουν. Το υλικό, το οποίο πρόκειται να εκτυπωθεί, τοποθετείται κάτω από αυτό το πλαίσιο, ενώ η μελάνη πιέζεται με μια σπάτουλα (squeegee) για να περάσει στις ανοιχτές περιοχές και να δημιουργήσει το επιθυμητό μοτίβο. Η ποιότητα της εκτύπωσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η ταχύτητα και η δύναμη με την οποία χρησιμοποιείται η σπάτουλα, καθώς και το υλικό από το οποίο κατασκευάζεται το πλέγμα [3].

Στην προετοιμασία της εκτύπωσης, το πλαίσιο πρέπει να είναι εντελώς καθαρό. Η σωστή ρύθμιση του πλαισίου και η χρήση της σπάτουλας παίζουν καθοριστικό ρόλο για την επιτυχία της εκτύπωσης, καθώς επηρεάζουν άμεσα την ποσότητα και την ακρίβεια της μελάνης που εφαρμόζεται στο υπόστρωμα [4].

Επιπλέον, το υλικό του πλέγματος είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας. Συνήθως, χρησιμοποιούνται υλικά όπως ο πολυεστέρας και το ανοξείδωτο ατσάλι. Κάθε ένα από αυτά τα υλικά προσφέρει διαφορετικά επίπεδα ανθεκτικότητας και ευελιξίας. Για παράδειγμα, ο πολυεστέρας χρησιμοποιείται όταν το υπόστρωμα δεν είναι απόλυτα επίπεδο, ενώ το ανοξείδωτο ατσάλι προτιμάται σε περιπτώσεις που απαιτείται μεγάλη ακρίβεια και λεπτομέρεια στην εκτύπωση [5] (Johnson, 2021).

#### **1.4 Εφαρμογές της Μεταξοτυπίας**

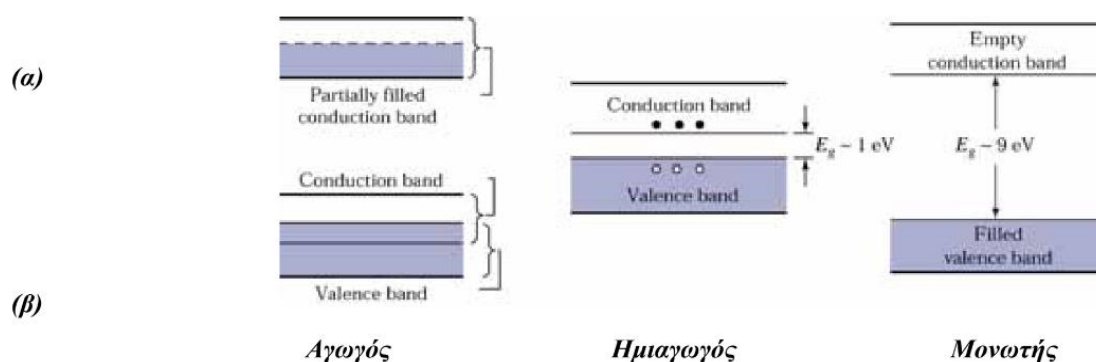
Η μεταξοτυπία έχει βρει πληθώρα εφαρμογών, αποτελώντας μια ιδιαίτερα διαδεδομένη τεχνική εκτύπωσης που χρησιμοποιείται σε διάφορους τομείς, όπως τα γραφικά, τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα, αλλά και στην παραγωγή ηλεκτρονικών συσκευών. Η ικανότητά της να αποδίδει πολύπλοκα σχέδια σε διαφορετικά υλικά, όπως ύφασμα, χαρτί και μέταλλο, με ακρίβεια και συνέπεια, έχει οδηγήσει στη συνεχή χρήση της σε βιομηχανικές και καλλιτεχνικές εφαρμογές [6].

Στην παραγωγή ηλεκτρονικών διατάξεων, η μεταξοτυπία αποτελεί μία από τις βασικές μεθόδους για την εκτύπωση ημιαγωγίμων υμενίων, προσφέροντας τη δυνατότητα εκτύπωσης σε μεγάλες επιφάνειες με υψηλή ακρίβεια. Το χαρακτηριστικό αυτό την καθιστά ιδανική για την παραγωγή πυκνωτών, αισθητήρων και άλλων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων που απαιτούν λεπτά και αγωγίμα στρώματα υλικών [7].

Επιπλέον, η χρήση της μεταξοτυπίας επεκτείνεται και στην εκτύπωση κεραμικών και πλακιδίων, όπου η ακρίβεια στην απόδοση των χρωμάτων και των σχεδίων είναι κρίσιμη για την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Οι παράμετροι της διαδικασίας, όπως η ταχύτητα της σπάτουλας και η πίεση που ασκείται κατά την εκτύπωση, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη συνοχή και στην ακρίβεια των αποχρώσεων [8].

## 1.5 Ημιαγωγοί

Οι ημιαγωγοί κατέχουν μια ξεχωριστή θέση στην ηλεκτρονική, καθώς διαθέτουν την ικανότητα να συμπεριφέρονται είτε ως αγωγοί είτε ως μονωτές, ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες. Αυτή η προσαρμοστικότητα οφείλεται στο ενεργειακό τους χάσμα (band gap), το οποίο τους επιτρέπει να ελέγχουν την κίνηση των ηλεκτρονίων όταν εκτίθενται σε διάφορες επιδράσεις, όπως είναι η θερμότητα, το φως ή ένα ηλεκτρικό πεδίο (Εικόνα 2). Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών, οι ημιαγωγοί χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευή κρίσιμων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, όπως είναι τα τρανζίστορ, οι φωτοδιόδοι και οι ηλιακοί συλλέκτες [9].



**Εικόνα 2:** Διάκριση των στερεών σε αγωγούς, ημιαγωγούς και μονωτές με βάση το διάγραμμα των ενεργειακών ζωνών τους. Οι μαύροι κύκλοι δηλώνουν ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας, ενώ οι άσπροι οπές της ζώνης σθένους [10].

Η βασική ιδιότητα των ημιαγωγών είναι η δυνατότητά τους να μεταβάλλουν την αγωγιμότητά τους μέσω της προσθήκης προσμείξεων (doping), μιας διαδικασίας που τροποποιεί τη ροή των ηλεκτρονίων στο υλικό. Αυτός ο έλεγχος της ροής επιτρέπει την αποτελεσματική ρύθμιση του ηλεκτρικού ρεύματος σε μια σειρά από ηλεκτρονικές συσκευές. Σε συνδυασμό με την ικανότητά τους να ανταποκρίνονται σε περιβαλλοντικές αλλαγές, όπως η θερμοκρασία και η ακτινοβολία, οι ημιαγωγοί παίζουν έναν καίριο ρόλο στις σύγχρονες τεχνολογικές εφαρμογές [11].

Ένα από τα πιο αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά των ημιαγωγών είναι η ευαισθησία τους σε εξωτερικά ερεθίσματα, όπως η θερμοκρασία και το φως. Για παράδειγμα, σε υψηλότερες θερμοκρασίες, η αγωγιμότητα τους αυξάνεται, γεγονός που τους καθιστά ιδανικούς για τη δημιουργία θερμικών και φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αυτή η ιδιότητα αξιοποιείται επίσης στα LED και σε άλλες ηλεκτρονικές διατάξεις που απαιτούν ακριβή έλεγχο της ροής του ρεύματος. Στο πλαίσιο της εκτύπωσης ημιαγωγικών υμενίων, η μέθοδος της μεταξοτυπίας επιτρέπει την απόθεση υλικών σε μεγάλες επιφάνειες με υψηλή ακρίβεια, καθιστώντας την ιδανική για τη μαζική παραγωγή λεπτών φιλμ σε διάφορες ηλεκτρονικές εφαρμογές [9].

## **1.6 Παραδείγματα Ημιαγωγών**

Οι ημιαγωγοί οξειδίων με ευρύ ενεργειακό χάσμα (π.χ. ZnO, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SnO<sub>2</sub> και Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) συνδυάζουν τις ιδιότητες της διαφάνειας στο ορατό φως, της υψηλής αγωγιμότητας και της υψηλής κινητικότητας ηλεκτρονίων σε ένα υλικό. Αυτές οι μοναδικές ιδιότητες προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε εμπορικές οπτοηλεκτρονικές συσκευές (Εικόνα 3). Για παράδειγμα, λεπτές μεμβράνες In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> που έχουν ντοπαρισθεί

με κασσίτερο (Sn) και αναπτύσσονται πάνω σε γυαλί, μπορούν να παρουσιάσουν υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα περίπου  $10^4 \text{ S cm}^{-1}$  και διαφάνεια άνω του 80% στην περιοχή του ορατού φωτός. Το ITO ( $\text{In}_2\text{O}_3$  ντοπαρισμένο με κασσίτερο) χρησιμοποιείται ευρέως ως διαφανής αγωγίμος ηλεκτρόδιο σε οθόνες επίπεδης προβολής, οθόνες αφής και ηλιακά κύτταρα [12].



**Εικόνα 3:** Μια ποικιλία εφαρμογών και αναδυόμενων τεχνολογιών που βασίζονται σε ημιαγωγούς οξειδίων μεγάλου ενεργειακού χάσματος.

Ένα παράδειγμα ημιαγωγού, με ευρεία χρήση σε τεχνολογικές και βιομηχανικές εφαρμογές αποτελεί το οξείδιο του ψευδαργύρου ( $\text{ZnO}$ ). Το ενεργειακό του χάσμα,

που είναι περίπου 3.3 eV, του δίνει τη δυνατότητα να ανταποκρίνεται σε συστήματα που απαιτούν υψηλή ευαισθησία στην υπεριώδη ακτινοβολία. Αυτή η ιδιότητα το καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο για οπτοηλεκτρονικές συσκευές, όπως αισθητήρες UV και LED που εκπέμπουν υπεριώδες φως [13].

Το ZnO δεν χρησιμοποιείται μόνο στις οπτοηλεκτρονικές συσκευές, αλλά και σε εφαρμογές ενεργειακής απόδοσης, όπως ηλιακά κύτταρα και πιεζοηλεκτρικά συστήματα. Χάρη στη σταθερότητα και τις εξαιρετικές μηχανικές του ιδιότητες, μπορεί να αντέξει σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών, ενώ η φιλική προς το περιβάλλον φύση του το καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο για προϊόντα όπως αντηλιακά και επιφάνειες προστασίας από την υπεριώδη ακτινοβολία [14].

Ένα ακόμα παράδειγμα σημαντικού ημιαγωγού ευρέως χάσματος είναι το διοξείδιο του τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ ), που συγκαταλέγεται στους πιο γνωστούς και χρήσιμους ημιαγωγούς που απαντώνται στη βιομηχανία, χάρη στις εξαιρετικές του φωτοκαταλυτικές ιδιότητες. Η ευρεία χρήση του καλύπτει πληθώρα τεχνολογικών τομέων, με έμφαση στα φωτοβολταϊκά συστήματα, όπως τα ηλιακά κύτταρα τύπου DSSC (Dye-Sensitized Solar Cells), καθώς και στους αισθητήρες αερίων. Το  $\text{TiO}_2$  ξεχωρίζει για το ευρύ ενεργειακό του χάσμα, που κυμαίνεται μεταξύ 3.0 και 3.2 eV, το οποίο του επιτρέπει να απορροφά με μεγάλη αποτελεσματικότητα την υπεριώδη ακτινοβολία. Αυτή η ιδιότητα το καθιστά εξαιρετικά πολύτιμο σε συστήματα που σχετίζονται με την παραγωγή ενέργειας και σε περιβαλλοντικούς αισθητήρες, όπου απαιτείται υψηλή απόδοση [15]. Εκτός από τις παραπάνω χρήσεις, το  $\text{TiO}_2$  έχει αξιοποιηθεί σε εφαρμογές που απαιτούν υλικά με εξαιρετική σταθερότητα και ανθεκτικότητα, όπως τα κεραμικά, οι καταλύτες και οι επιφάνειες αυτοκαθαρισμού. Η ικανότητά του να παράγει ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια όταν εκτίθεται στο

φως, το καθιστά απαραίτητο σε εφαρμογές φωτοκαταλυτικής δράσης, όπως η διάσπαση οργανικών ενώσεων, αλλά και ο καθαρισμός του αέρα και του νερού [16].

## **1.7 Χρήση των Ημιαγωγών στα Ηλεκτρονικά**

Οι ημιαγωγοί είναι θεμελιώδεις για τη σύγχρονη τεχνολογία, και η χρήση τους στα ηλεκτρονικά συστήματα καλύπτει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Από τα τρανζίστορ μέχρι τις διόδους λέιζερ, η δυνατότητα των ημιαγωγών να ελέγχουν και να ρυθμίζουν την ηλεκτρική ροή αποτελεί τον πυρήνα της λειτουργίας πολλών ηλεκτρονικών συσκευών.

### **Τρανζίστορ**

Τα τρανζίστορ είναι ο ακρογωνιαίος λίθος των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (ICs), τα οποία αποτελούν τη βάση των ηλεκτρονικών συστημάτων. Λειτουργώντας είτε ως διακόπτες είτε ως ενισχυτές, τα τρανζίστορ επιτρέπουν την αποθήκευση και την επεξεργασία δεδομένων σε υπολογιστές και άλλες συσκευές. Με τη χρήση ημιαγωγών όπως το πυρίτιο, τα τρανζίστορ επιτυγχάνουν υψηλή απόδοση και ταχύτητα στη διαχείριση ρεύματος, ενώ οι νεότερες εξελίξεις στην τεχνολογία τους επιτρέπουν τη συνεχή σμίκρυνση των διαστάσεων, οδηγώντας σε πιο ισχυρά και αποδοτικά συστήματα [17].

### **Διοδικές Συσκευές**

Οι διόδοι, οι οποίες επιτρέπουν τη ροή του ρεύματος προς μία μόνο κατεύθυνση, αποτελούν επίσης κρίσιμο κομμάτι της ηλεκτρονικής. Τα ημιαγωγικά υλικά, όπως το πυρίτιο και το γερμάνιο, χρησιμοποιούνται για την κατασκευή διαφόρων ειδών διόδων, συμπεριλαμβανομένων των LED και των ηλιακών κυψελών. Οι LED, για παράδειγμα, προσφέρουν υψηλή απόδοση φωτός με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας,



ενώ οι ηλιακές κυψέλες μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική με αποτελεσματικότητα, χρησιμοποιώντας ημιαγωγούς για να εκμεταλλευτούν την ηλιακή ακτινοβολία [18].

### **Ηλιακά Κύτταρα**

Στον τομέα της ανανεώσιμης ενέργειας, τα ηλιακά κύτταρα βασίζονται στις φωτοηλεκτρικές ιδιότητες των ημιαγωγών για να μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Το πυρίτιο είναι το πιο κοινό υλικό που χρησιμοποιείται στα ηλιακά κύτταρα λόγω της αποδοτικότητάς του και της σταθερότητάς του. Νέες τεχνολογίες, όπως οι κυψέλες με ευαισθητοποιημένες χρωστικές (DSSC), χρησιμοποιούν υλικά όπως το διοξείδιο του τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ ) για να επιτύχουν οικονομικότερες και αποδοτικότερες λύσεις σε συνθήκες χαμηλού φωτός [19].

### **Αισθητήρες**

Αισθητήρες αερίων που βασίζονται σε ημιαγωγούς όπως το οξείδιο του κασσίτερου ( $\text{SnO}_2$ ) εκμεταλλεύονται την ικανότητα αυτών των υλικών να μεταβάλλουν την αγωγιμότητά τους παρουσία διαφόρων αερίων. Αυτή η ιδιότητα καθιστά τους αισθητήρες αυτούς εξαιρετικά χρήσιμους σε εφαρμογές ανίχνευσης και μέτρησης, όπου απαιτείται ακριβής ανάλυση της συγκέντρωσης αερίων, όπως στη βιομηχανία ή σε περιβαλλοντικές εφαρμογές [20].

### **Δίοδοι Λείζερ (Laser Diodes)**

Οι δίοδοι λείζερ, βασισμένες σε ημιαγωγούς, αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της τεχνολογίας των οπτικών ινών, καθώς και συστημάτων αναγνώρισης και ιατρικών τεχνολογιών. Η ικανότητά τους να παράγουν ακτίνες λείζερ υψηλής ακρίβειας μέσω

της ηλεκτρικής διέγερσης των ημιαγωγών έχει επιτρέψει την ανάπτυξη συστημάτων επικοινωνίας μεγάλης ταχύτητας και ακρίβειας [21].

## Βιβλιογραφία 1<sup>ο</sup> Κεφαλαίου

- Chen, X., & Mao, S. S. (2015). Titanium Dioxide Nanomaterials: Synthesis, Properties, Modifications, and Applications. *Chemical Reviews*, 107(7), 2891–2959.
- Doelle, K. (2021). Paper for Screen Printing Applications – A Paper Development Study. *Journal of Engineering Research and Reports*, 21(9), 45–63. <https://doi.org/10.9734/JERR/2021/v21i917490>
- Gibbs, A., & Jarvis, D. (2018). Transistor Technology in Modern Electronics. *IEEE Transactions on Electronics*, 34(5), 123–140.
- Janotti, A., & Van de Walle, C. G. (2009). Fundamentals of Zinc Oxide as a Semiconductor. *Reports on Progress in Physics*, 72(12), 126501.
- Jain, S., & Huang, J. (2016). Laser Diodes: Principles and Applications. *Journal of Optical Engineering*, 45(7), 233–245.
- Johnson Screens. (2021). *Industrial Screens*. Aqseptence Group. [https://johnsonscreens.com/wp-content/uploads/2021/11/Johnson\\_Industrial\\_Screens.pdf](https://johnsonscreens.com/wp-content/uploads/2021/11/Johnson_Industrial_Screens.pdf)
- Kim, Y., & Hone, J. (2017). Materials Science: Screen Printing of 2D Semiconductors. *Nature*, 544, 167–168. <https://doi.org/10.1038/nature21908>
- Kuscer, D. (2020). Screen printing. In *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.12082-X>

- Martí, V., Penálver, J., Portolés, J., Negra, P., Barba, A., Giménez, S., & Monfort, E. (2020). Study of screen-printing application control variables and their influence on shades in tile. *Instituto de Tecnología Cerámica*.
- Mills, G., & Harper, R. (2020). The Role of Semiconductors in Energy-Efficient Devices. *Renewable Energy Journal*, 17(2), 55–67.
- Nathan Zavanelli and Woon-Hong Yeo. (2021). Advances in Screen Printing of Conductive Nanomaterials for Stretchable Electronics. *ACS Omega*, 6(14), 9344–9351. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00638>
- Ozgur, U., Alivov, Y. I., & Morkoc, H. (2010). Zinc Oxide Materials and Devices: A Review of Processing, Properties, and Applications. *Journal of Applied Physics*, 98(4), 041301.
- Penálver, J., Barba, A., & Giménez, S. (2019). Advanced screen-printing methods in ceramic tile decoration. *Ceramic World Review*, 129(3), 55–72.
- Potts, S.-J. (2020). Advanced Manufacture by Screen Printing (Thesis). *Swansea University*. <https://doi.org/10.23889/SUthesis.58460>
- Rao, P., Nair, R., & Kumar, V. (2018). Gas Sensors Based on Tin Oxide Semiconductors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 255(3), 831–843.
- Shi, J., Zhang, J., Yang, L., Qu, M., Qi, D.-C., & Zhang, K. H. L. (2021). Wide Bandgap Oxide Semiconductors: From Materials Physics to Optoelectronic Devices. *Advanced Materials*, 33, 2006230. <https://doi.org/10.1002/adma.202006230>
- Smith, B., Taylor, J., & Wilson, D. (2017). New Developments in Solar Cell Technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 159, 183–192.

- Δ. Σκαρλάτος. *Υλικά και Διατάξεις Μικροηλεκτρονικής*. Κεφάλαιο 3: Στερεοί Αγωγοί, Ημιαγωγοί και Μονωτές.
- Tomchenko, A. (2006). Printed chemical sensors: From screen-printing to microprinting. In *Encyclopedia of Sensors (Vol. 10, pp. 279–290)*. American Scientific Publishers.
- Wang, R., Hashimoto, K., & Fujishima, A. (2016). Light-Induced Amphiphilic Surfaces. *Nature*, 388, 431–432.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> Μέθοδοι Εκτύπωσης Ηλεκτρονικών

## Διατάξεων

Οι μέθοδοι εκτύπωσης ηλεκτρονικών διατάξεων περιλαμβάνουν διάφορες τεχνικές, καθεμία από τις οποίες έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι κύριες μέθοδοι είναι:

### 2.1 Inkjet Printing (Εκτύπωση με Ψεκασμό Μελάνης)

**Περιγραφή:** Η εκτύπωση με inkjet βασίζεται στη χρήση μικροσκοπικών σταγονιδίων μελάνης που ψεκάζονται απευθείας στο υπόστρωμα μέσω ακροφυσίων. Η εκτύπωση γίνεται χωρίς επαφή με το υπόστρωμα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή σύνθετων και υψηλής ακρίβειας σχεδίων. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει την εκτύπωση σε διάφορα υποστρώματα και τη χρήση πολλών τύπων μελανιών, συμπεριλαμβανομένων των αγωγίμων, μονωτικών και ενεργών μελανιών.

#### **Θετικά:**

- Υψηλή ακρίβεια και ανάλυση εκτύπωσης, ιδανική για μικρές και πολύπλοκες δομές.
- Ευέλικτη μέθοδος που δεν απαιτεί την προετοιμασία πλέγματος ή πλάκας.
- Ικανότητα εκτύπωσης πολλαπλών στρωμάτων και διαφορετικών υλικών στην ίδια διαδικασία.
- Μειωμένη χρήση υλικών και ελαχιστοποιημένα απόβλητα.

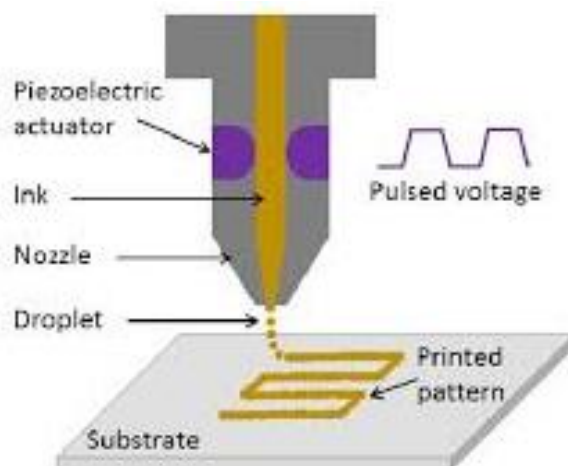
#### **Αρνητικά:**

- Χαμηλότερη ταχύτητα εκτύπωσης σε σύγκριση με άλλες τεχνικές, γεγονός που μπορεί να περιορίσει την αποδοτικότητα σε μεγάλες παραγωγές.

- Περιορισμοί στο πάχος των τυπωμένων στρωμάτων, που μπορεί να απαιτούν πολλαπλές περάσεις για επιθυμητό αποτέλεσμα.
- Ευαισθησία στο ιξώδες και τις ιδιότητες των μελανιών, που μπορεί να περιορίσει την επιλογή υλικών.

#### **Παραδείγματα Εφαρμογών:**

- Εκτύπωση οργανικών φωτοβολταϊκών κυττάρων και OLEDs.
- Εκτύπωση μικροκυκλωμάτων και διατάξεων RF.
- Παραγωγή βιοαισθητήρων και ιατρικών διατάξεων [22].



**Εικόνα 4:** Διαδικασία εκτύπωσης Ηλεκτρονικών Διατάξεων με την μέθοδο ψεκασμού μελάνης (inkjet printing).

Η παραπάνω Εικόνα 4 παρουσιάζει τη λειτουργία της μεθόδου εκτύπωσης inkjet για ηλεκτρονικές διατάξεις. Δείχνει πώς η μελάνη διοχετεύεται μέσω ενός ακροφυσίου με τη βοήθεια ενός πιεζοηλεκτρικού μηχανισμού, δημιουργώντας μικροσκοπικές σταγόνες που αποτίθενται σε ένα υπόστρωμα για την παραγωγή του επιθυμητού σχεδίου.

## 2.2 Gravure Printing (Βαθυτυπία)

**Περιγραφή:** Η βαθυτυπία είναι μια μέθοδος εκτύπωσης που βασίζεται στη χρήση κυλίνδρων χαραγμένων με το επιθυμητό σχέδιο. Το μελάνι τοποθετείται στους χαραγμένους κυλίνδρους και στη συνέχεια μεταφέρεται στο υπόστρωμα μέσω της επαφής του κυλίνδρου με το υλικό. Η τεχνική αυτή επιτρέπει την εκτύπωση μεγάλων ποσοτήτων με πολύ υψηλή ταχύτητα.

### **Θετικά:**

- Εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα εκτύπωσης, κατάλληλη για μαζική παραγωγή.
- Ικανότητα εκτύπωσης συνεχούς μοτίβου με σταθερή ποιότητα.
- Υψηλή αντοχή και διάρκεια των εκτυπωτικών κυλίνδρων, γεγονός που μειώνει το κόστος ανά μονάδα σε μεγάλες παραγωγές.

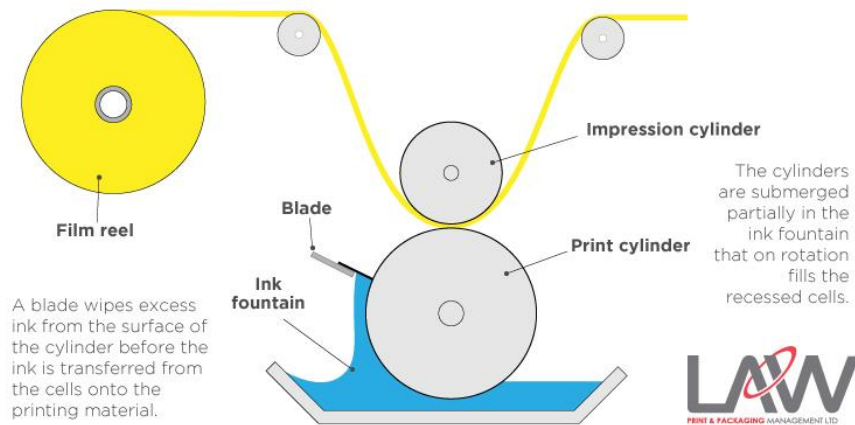
### **Αρνητικά:**

- Υψηλό αρχικό κόστος για την κατασκευή των χαραγμένων κυλίνδρων.
- Περιορισμοί στην αλλαγή σχεδίου, καθώς απαιτείται νέα χάραξη για κάθε νέο σχέδιο.
- Δυσκολία στην εκτύπωση πολύπλοκων και μικρών λεπτομερειών.

### **Παραδείγματα Εφαρμογών:**

- Εκτύπωση συσκευασιών και ετικετών με αγώγιμα μελάνια.
- Εκτύπωση λεπτών φιλμ για ευέλικτες οθόνες και ηλεκτρονικά.
- Παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων RFID tags [22].

## GRAVURE PRINTING



**Εικόνα 5:** Διάγραμμα Διαδικασίας Βαθυτυπίας (Gravure Printing).

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5, το μελάνι μεταφέρεται από χαραγμένα κύτταρα στον κύλινδρο εκτύπωσης προς το υπόστρωμα, ενώ η λεπίδα αφαιρεί την περίσσεια μελανιού πριν από τη μεταφορά.

### 2.3 Flexographic Printing (Φλεξογραφία)

**Περιγραφή:** Η Φλεξογραφία είναι μια μέθοδος εκτύπωσης που χρησιμοποιεί εύκαμπτες πλάκες εκτύπωσης για τη μεταφορά μελανιού στο υπόστρωμα. Οι πλάκες είναι συνήθως κατασκευασμένες από ελαστικό υλικό και χρησιμοποιούνται για την εκτύπωση σε διάφορα υλικά, συμπεριλαμβανομένων των χαρτιών, των πλαστικών και των μεταλλικών φύλλων.

#### Θετικά:

- Ικανότητα εκτύπωσης σε ένα ευρύ φάσμα υποστρωμάτων, συμπεριλαμβανομένων των ευέλικτων και διαφανών υλικών.
- Υψηλή ταχύτητα παραγωγής, κατάλληλη για μεγάλες ποσότητες.



- Χαμηλό κόστος παραγωγής ανά μονάδα σε μεγάλες κλίμακες.

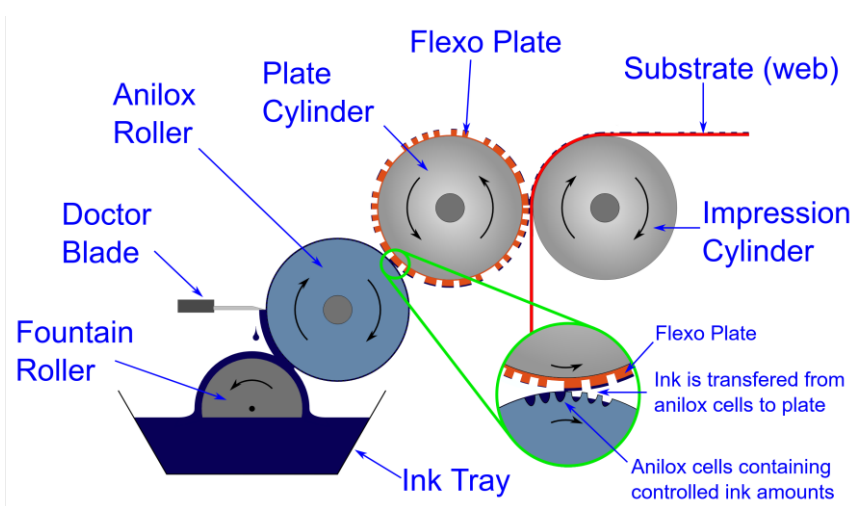
### Αρνητικά:

- Περιορισμένη ανάλυση και ακρίβεια σε σύγκριση με άλλες τεχνικές όπως το inkjet.
- Χρειάζεται προετοιμασία και συντήρηση των εύκαμπτων πλακών εκτύπωσης.
- Μειωμένη ευελιξία στη γρήγορη αλλαγή σχεδίων ή υλικών.

### Παραδείγματα Εφαρμογών:

- Εκτύπωση συσκευασιών και ετικετών με αγώγιμα μελάνια.
- Παραγωγή ευέλικτων ηλεκτρονικών όπως ευέλικτες οθόνες και διακόπτες.
- Εκτύπωση κυκλωμάτων σε πλαστικά φύλλα για χρήση σε έξυπνες κάρτες [23].

Η κάτωθι Εικόνα 6 παρουσιάζει τη λειτουργία της φλεξογραφίας, όπου το μελάνι μεταφέρεται από τον κύλινδρο anilox στην εύκαμπτη πλάκα (Flexo Plate) και στη συνέχεια στο υπόστρωμα (substrate) μέσω της επαφής με τον κύλινδρο πίεσης (impression cylinder).



**Εικόνα 6:** Διάγραμμα απεικόνισης Φλεξογραφικής εκτύπωσης (Flexographic Printing).

## 2.4 Photolithography (Φωτολιθογραφία)

**Περιγραφή:** Η φωτολιθογραφία είναι μια διαδικασία εκτύπωσης που χρησιμοποιείται κυρίως στη μικροηλεκτρονική για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί φως για να μεταφέρει το σχέδιο ενός κυκλώματος από μια μάσκα φωτογραφίας (photomask) στο υπόστρωμα (wafer), το οποίο έχει καλυφθεί με φωτοευαίσθητο υλικό (φωτοαντίσταση). Ακολουθεί η χάραξη (etching) για την απομάκρυνση των ανεπιθύμητων υλικών και τη δημιουργία του κυκλώματος.

### **Θετικά:**

- Εξαιρετικά υψηλή ανάλυση εκτύπωσης, ικανή για τη δημιουργία πολύ μικρών και σύνθετων δομών.
- Κατάλληλη για την παραγωγή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και άλλων υψηλής ακρίβειας ηλεκτρονικών συσκευών.
- Αποτελεσματική για την εκτύπωση σε μεγάλες ποσότητες με σταθερή ποιότητα.

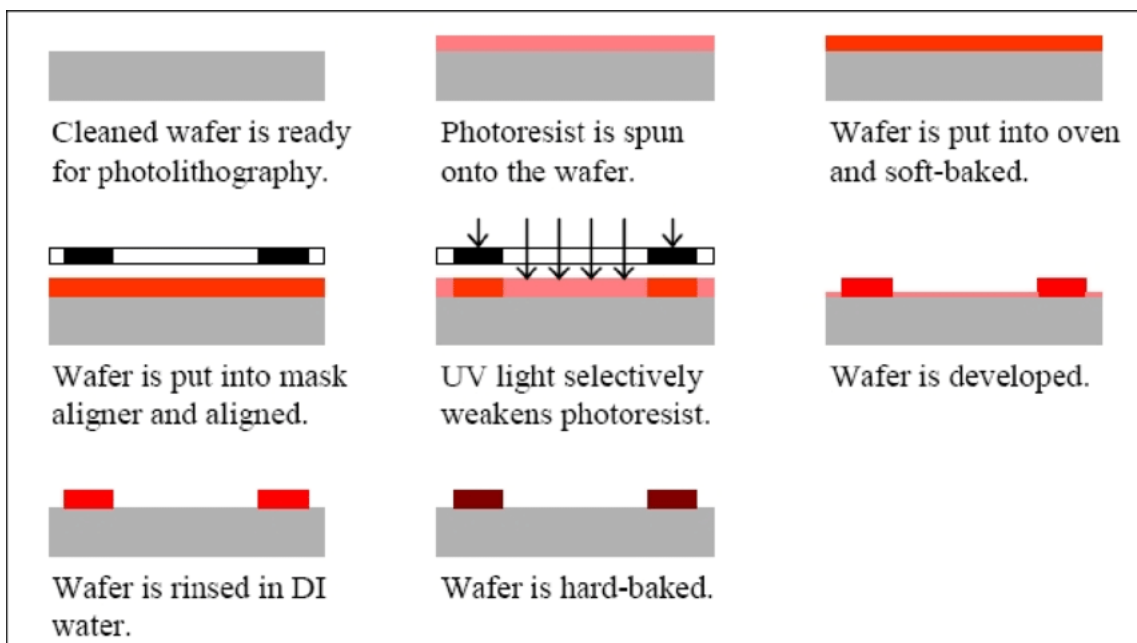
### **Αρνητικά:**

- Υψηλό κόστος εξοπλισμού και παραγωγής, που καθιστά τη μέθοδο αυτή οικονομικά αποδοτική μόνο σε μεγάλες κλίμακες.
- Περιορισμοί στο μέγεθος και τη γεωμετρία των δομών λόγω των φυσικών χαρακτηριστικών του φωτός (π.χ., διάθλαση).
- Σύνθετη διαδικασία που απαιτεί προσεκτικό έλεγχο των παραμέτρων.

### **Παραδείγματα Εφαρμογών:**

- Παραγωγή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (ICs).
- Κατασκευή μικροηλεκτρονικών συστημάτων και MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems).
- Παραγωγή μικροδομών για αισθητήρες και οπτικές συσκευές [24].

Παρακάτω η Εικόνα 7 παρουσιάζει τα βασικά στάδια της φωτολιθογραφίας, από την προετοιμασία του wafer, την επίστρωση φωτοαντίστασης, την έκθεση σε υπεριώδες φως μέσω μιας μάσκας, και τη διαμόρφωση των επιθυμητών μοτίβων μέχρι την τελική χάραξη και ανάλυση του wafer.



**Εικόνα 7:** Διαδικασία Φωτολιθογραφίας σε Βήματα.

## **Βιβλιογραφία 2<sup>ο</sup> Κεφαλαίου**

- DeSilva, M. (2014). Photolithography. In: Li, D. (Eds) Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-27758-0\\_1217-2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27758-0_1217-2).
- Shrestha, R., et al. (2021). Recent Progress in Manufacturing Techniques of Printed and Flexible Sensors: A Review. MDPI Materials, 14(5), 1243. <https://doi.org/10.3390/ma14051243>.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3° Η Μέθοδος Screen Printing**

### **3.1 Ανάλυση της Μεθόδου Screen Printing**

**Περιγραφή:** Η μέθοδος του screen printing, γνωστή και ως μεταξοτυπία, είναι μια διαδικασία εκτύπωσης όπου το μελάνι πιέζεται μέσα από ένα πλέγμα (mesh) πάνω στο υπόστρωμα. Το πλέγμα είναι καλυμμένο με ένα φωτοευαίσθητο υλικό που έχει ανοιχτές περιοχές στο επιθυμητό σχέδιο, επιτρέποντας στο μελάνι να περάσει μόνο μέσα από αυτές τις περιοχές. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη χρήση μιας σπάτουλας (squeegee) για να πιέσει το μελάνι μέσα από το πλέγμα και να το μεταφέρει στο υπόστρωμα.

#### **Θετικά:**

- Ικανότητα εκτύπωσης σε μεγάλη ποικιλία υποστρωμάτων (π.χ., γυαλί, πλαστικό, κεραμικό).
- Κατάλληλη για μαζική παραγωγή με υψηλή απόδοση.
- Ικανότητα εκτύπωσης παχύτερων στρωμάτων υλικού, κάτι που είναι χρήσιμο σε εφαρμογές όπως τα παχιά φιλμ.
- Χαμηλό κόστος παραγωγής σε μεγάλες ποσότητες.

#### **Αρνητικά:**

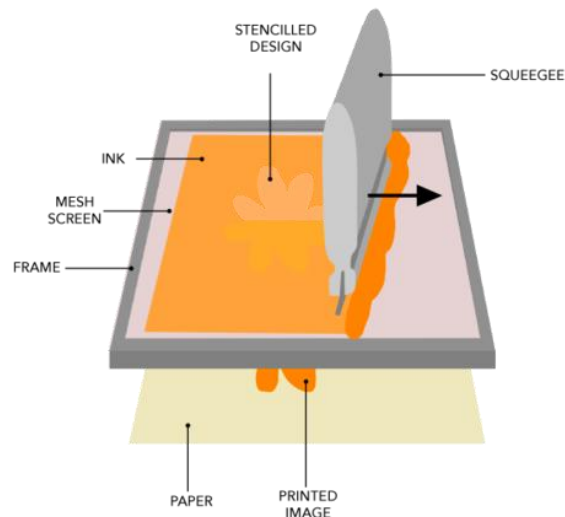
- Περιορισμένη ανάλυση εκτύπωσης, δυσκολία στην εκτύπωση πολύ μικρών δομών.
- Απαιτείται ακριβής προετοιμασία και συντήρηση των πλεγμάτων.
- Περιορισμένες δυνατότητες για την εκτύπωση σύνθετων και πολυεπίπεδων δομών.

#### **Παραδείγματα Εφαρμογών:**

- Εκτύπωση παχέων φιλμ για ηλεκτρονικές πλακέτες (PCB).
- Ηλεκτρόδια σε ηλιακά κύτταρα και οθόνες.

- Αισθητήρες αερίων και βιοαισθητήρες [25].

Στην Εικόνα 8 απεικονίζεται η χρήση της σπάτουλας για την πίεση του μελανιού μέσα από το πλέγμα, επιτρέποντας τη μεταφορά του σχεδίου στο υπόστρωμα.



**Εικόνα 8:** Διαδικασία Μεταξοτυπίας με Χρήση Σπάτουλας (Squeegee).

### **3.2 Χαρακτηριστικά και Επίδραση στην Εκτύπωση**

#### **Πίεση/Ταχύτητα**

Η πίεση και η ταχύτητα της σπάτουλας κατά την εκτύπωση είναι καθοριστικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ομοιομορφία και το πάχος της μελάνης που εφαρμόζεται στο υπόστρωμα. Όσο αυξάνονται η πίεση και η ταχύτητα, τόσο λεπτότερο και πιο ομοιογενές είναι το στρώμα της μελάνης που δημιουργείται. Αντίθετα, όταν η πίεση μειώνεται και η ταχύτητα της σπάτουλας είναι πιο αργή, δημιουργούνται παχύτερα στρώματα μελάνης, αλλά αυτό μπορεί να μειώσει την

ακρίβεια της εκτύπωσης. Αυτή η αλληλεπίδραση μεταξύ πίεσης και ταχύτητας είναι ζωτικής σημασίας για την τελική ποιότητα και τη διάρκεια ζωής των εκτυπωμένων στοιχείων, ιδιαίτερα σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ανάλυση ή μεγαλύτερο πάχος μελάνης. Επιπλέον, η επιλογή της μελάνης και οι ρεολογικές της ιδιότητες επηρεάζουν την απόδοση, καθώς ορισμένα υλικά ανταποκρίνονται καλύτερα σε διαφορετικές παραμέτρους εκτύπωσης [26].

### **Snap Off Distance**

Η απόσταση μεταξύ της σίτας και του υποστρώματος, γνωστή ως "snap-off distance", είναι ένας παράγοντας ζωτικής σημασίας για την ακρίβεια της εκτύπωσης. Αν η απόσταση είναι πολύ μεγάλη, υπάρχει αυξημένος κίνδυνος θολών ή ασαφών εκτυπώσεων. Μια μικρότερη απόσταση, από την άλλη, επιτρέπει μεγαλύτερη ακρίβεια και καθαρότητα στο τελικό αποτέλεσμα. Η ένταση της σίτας επίσης επηρεάζει το αποτέλεσμα, καθώς μια χαλαρή σίτα μπορεί να προκαλέσει παραμορφώσεις ή ατέλειες στο τελικό σχέδιο [26].

### **Σκληρότητα Σπάτουλας**

Η σκληρότητα της σπάτουλας είναι εξίσου σημαντική, καθώς καθορίζει την πίεση που ασκείται στη μελάνη κατά την εκτύπωση. Μια σκληρότερη σπάτουλα συνήθως παράγει λεπτότερα στρώματα μελάνης, ενώ μια πιο μαλακή σπάτουλα επιτρέπει τη δημιουργία παχύτερων στρωμάτων. Η επιλογή της σκληρότητας εξαρτάται από τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής, με τις σκληρότερες σπάτουλες να προτιμώνται για λεπτές γραμμές και πιο σύνθετα σχέδια, ενώ οι πιο μαλακές σπάτουλες είναι κατάλληλες για εκτυπώσεις που απαιτούν περισσότερο πάχος μελάνης [26].

### **Γάζα/Σίτα (Mesh Size and Density)**

Το μέγεθος των ανοιγμάτων της σίτας και η πυκνότητα του πλέγματος καθορίζουν την ποσότητα μελάνης που μεταφέρεται στο υπόστρωμα. Ένα πιο πυκνό πλέγμα χρησιμοποιείται για εκτυπώσεις με υψηλή λεπτομέρεια και ακρίβεια, ενώ ένα πιο αραιό πλέγμα είναι κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν παχύτερα στρώματα μελάνης. Η επιλογή του κατάλληλου πλέγματος εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής, είτε πρόκειται για εκτύπωση λεπτών γραφικών είτε για παχιά φιλμ [26].

### **Θερμοκρασία Υποστρώματος**

Τέλος, η θερμοκρασία του υποστρώματος επηρεάζει την ταχύτητα ξήρανσης της μελάνης και την προσκόλλησή της στην επιφάνεια. Υψηλότερες θερμοκρασίες επιταχύνουν τη διαδικασία ξήρανσης, γεγονός που μπορεί να αυξήσει την παραγωγική απόδοση, ενώ χαμηλότερες θερμοκρασίες μπορεί να απαιτήσουν περισσότερο χρόνο για την ολοκλήρωση της διαδικασίας. Αυτή η καθυστέρηση στη ξήρανση μπορεί να επιβραδύνει την παραγωγή, επηρεάζοντας την αποδοτικότητα της διαδικασίας [26].

## **3.3 Λόγοι επιλογής συγκεκριμένης μεθόδου**

### **Ευελιξία σε Υποστρώματα:**

Η μεταξοτυπία είναι γνωστή για την ικανότητά της να εκτυπώνει σε μια ποικιλία υποστρωμάτων, από γυαλί και κεραμικά μέχρι πλαστικά και μεταλλικά φύλλα. Αυτή η πολυχρηστικότητα καθιστά τη μέθοδο ιδανική για εφαρμογές σε ηλεκτρονικές διατάξεις, όπου απαιτείται η χρήση διαφόρων υλικών ανάλογα με τις συγκεκριμένες λειτουργικές απαιτήσεις κάθε συσκευής. Επιπλέον, η ευελιξία αυτή επιτρέπει τη χρήση της σε περιπτώσεις όπου οι συνθήκες χρήσης του τελικού προϊόντος απαιτούν



συγκεκριμένες ιδιότητες υποστρώματος, όπως αντοχή στη θερμότητα ή την υγρασία, όπως αναφέρεται σε μελέτες σχετικές με εκτυπώσεις πάνω σε διάφορα υποστρώματα [26].

### **Πάχος Επικάλυψης:**

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της μεταξοτυπίας είναι η δυνατότητα εφαρμογής παχύτερων στρωμάτων υλικού, κάτι που είναι κρίσιμο σε εφαρμογές όπως τα παχιά φιλμ. Για παράδειγμα, σε ηλεκτρονικές διατάξεις όπως τα ηλεκτρόδια ή τα αγώγιμα μονοπάτια, απαιτείται ένα συγκεκριμένο πάχος για τη βέλτιστη απόδοση της συσκευής. Η μεταξοτυπία είναι μια μέθοδος που επιτρέπει τον έλεγχο αυτού του πάχους με ακρίβεια, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί την ποιότητα και την ανθεκτικότητα της εκτυπωμένης επιφάνειας. Επιπλέον, με κατάλληλη προσαρμογή της πίεσης και της ταχύτητας της σπάτουλας, είναι εφικτό να δημιουργηθούν στρώματα υλικού με διαφορετικά πάχη για ποικίλες εφαρμογές [25].

### **Χαμηλό Κόστος Παραγωγής:**

Σε μεγάλες παραγωγές, η μεταξοτυπία προσφέρει ένα οικονομικά αποδοτικό μοντέλο παραγωγής. Η απλότητα της μεθόδου, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι απαιτείται ελάχιστος εξοπλισμός και προσαρμογές, μειώνει σημαντικά το κόστος ανά μονάδα προϊόντος. Επιπλέον, η χαμηλή κατανάλωση υλικών και η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των πλεγμάτων καθιστούν τη μεταξοτυπία προσιτή για βιομηχανίες που χρειάζονται μεγάλες ποσότητες προϊόντων χωρίς να αυξάνεται το κόστος παραγωγής [27].

### **Υψηλή Απόδοση Παραγωγής:**

Η μεταξοτυπία έχει την ικανότητα να εκτυπώνει μεγάλες ποσότητες προϊόντων με σταθερή ποιότητα, κάτι που την καθιστά ιδανική για βιομηχανικές εφαρμογές. Σε πολλές περιπτώσεις, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την παραγωγή εκατοντάδων ή χιλιάδων μονάδων ανά ώρα, διατηρώντας ταυτόχρονα την ακρίβεια και την αξιοπιστία της εκτύπωσης. Το χαμηλό ποσοστό απορρίψεων και η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των πλεγμάτων συμβάλλουν περαιτέρω στη μείωση του κόστους παραγωγής και στην αύξηση της απόδοσης της παραγωγής [26].

#### **Αντοχή και Σταθερότητα της Εκτύπωσης:**

Τα τυπωμένα στρώματα που δημιουργούνται με τη μέθοδο της μεταξοτυπίας χαρακτηρίζονται από αντοχή και σταθερότητα, ιδιότητες απαραίτητες για εφαρμογές σε ηλεκτρονικές διατάξεις που λειτουργούν σε δύσκολες συνθήκες. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται, όπως αγώγιμα μελάνια, διατηρούν την απόδοσή τους για μακροχρόνια χρήση, ακόμα και σε συνθήκες έντονης καταπόνησης, όπως υψηλές θερμοκρασίες ή εκτεταμένη χρήση. Αυτό καθιστά τη μεταξοτυπία μια από τις πιο αξιόπιστες μεθόδους για την παραγωγή ανθεκτικών ηλεκτρονικών διατάξεων [27].

#### **Απλότητα και Επαναληψιμότητα της Διαδικασίας:**

Η διαδικασία της μεταξοτυπίας είναι σχετικά απλή και επαναλαμβανόμενη, επιτρέποντας τη συνεπή παραγωγή με ελάχιστες παραμετροποιήσεις. Η πίεση, η ταχύτητα και το μέγεθος της σίτας μπορούν να ρυθμιστούν εύκολα, ενώ τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα και σταθερά σε κάθε εκτύπωση. Αυτό καθιστά τη μεταξοτυπία ιδανική για εφαρμογές όπου απαιτείται σταθερότητα και αξιοπιστία, ιδιαίτερα σε μεγάλες παραγωγές [25].

#### **Εφαρμογή Ποικιλίας Υλικών:**

Η μεταξοτυπία επιτρέπει την εκτύπωση διαφορετικών υλικών, όπως αγωγία μελάνια, μονωτικά στρώματα και ενεργά υλικά, σε μία μόνο διαδικασία. Αυτό την καθιστά ιδιαίτερα ευέλικτη, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή σύνθετων ηλεκτρονικών διατάξεων που απαιτούν την ακριβή τοποθέτηση πολλαπλών υλικών σε διαφορετικά στρώματα. Αυτή η δυνατότητα πολυστρωματικής εκτύπωσης είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε εφαρμογές όπως τα ηλιακά κύτταρα, τα OLED και οι βιοαισθητήρες [26].

### **Βιβλιογραφία 3<sup>ο</sup> Κεφαλαίου**

- Lorenz, A., Linse, M., Frintrup, H., et al. (2018). Screen Printed Thick-Film Metallization of Silicon Solar Cells - Recent Developments and Future Perspectives. 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. <https://doi.org/10.4229/35thEUPVSEC20182018-2DV.3.65>.
- Szentgyörgyvölgyi, R., Novotny, E., & Weimert, M. (2018). Determining and Selecting Screen Printing Form Parameters for Printing on Paper and Textile. *Journal of Graphic Engineering and Design*, 15(2), 189-197.
- Turunen, T., & Numakura, H. (2020). Advanced Screen-Printing Technologies and Material Properties. *Journal of Advanced Manufacturing and Materials*, 15(3), 245-259.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> Ερευνητικό Μέρος

### 4.1 Το Σύστημα που Μελετήθηκε

Το σύστημα που μελετήθηκε είναι η διάταξη εκτύπωσης υμενίων με την μέθοδο μεταξοτυπίας (**screen printer**), η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 9. Η διάταξη αυτή χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση μιας σειράς ημιαγωγίων υμενίων. Πρόκειται για τον εκτυπωτή, μοντέλο AT-P760 της εταιρείας Alraun. Το συγκεκριμένο σύστημα διαθέτει μέγεθος εκτύπωσης 300 x 250 mm.



**Εικόνα 9:** Φωτογραφία του εκτυπωτή μεταξοτυπίας που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα εργασία.

## 4.2 Περιγραφή Συστήματος

Το σύστημα screen printing είναι μία διαδικασία εκτύπωσης που βασίζεται στη χρήση πλέγματος, το οποίο κατασκευάζεται συνήθως από μεταλλικά ή συνθετικά υλικά, και διαμορφώνει το επιθυμητό σχέδιο. Η μελάνη ή η πάστα διέρχεται μέσω των οπών του πλέγματος με τη βοήθεια μιας σπάτουλας, αφήνοντας το αποτύπωμα στο επιλεγμένο υπόστρωμα.

### Κύρια μέρη του screen printer:

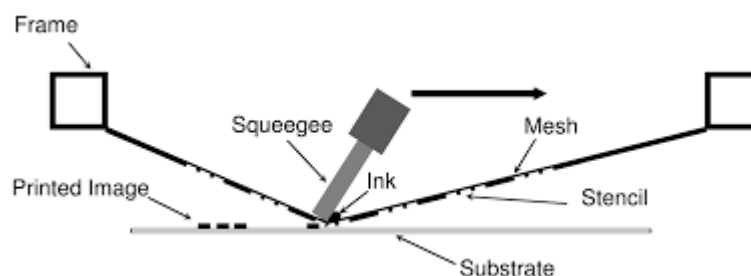
- **Πλέγμα (Mesh):** Ορίζει την ακρίβεια και το πάχος της εκτύπωσης.
- **Σπάτουλα (Squeegee):** Χρησιμοποιείται για να πιέσει τη μελάνη ή την πάστα μέσα από το πλέγμα ώστε να αποτυπωθεί στο υπόστρωμα. Για το συγκεκριμένο πείραμα, χρησιμοποιήθηκε σπάτουλα Triplex σκληρότητας 65/95/75 Shore.
- **Υπόστρωμα (Substrate):** Το υλικό πάνω στο οποίο γίνεται η εκτύπωση είναι το αγώγιο γυαλί FTO (Fluorine-doped Tin Oxide), το οποίο προσφέρει διαφάνεια και αγωγιμότητα, χαρακτηριστικά που το καθιστούν ιδανικό για εφαρμογές σε ηλιακά κύτταρα και ηλεκτρονικές συσκευές. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε FTO από την εταιρεία Pilkington, με αντίσταση 10 Ohm/square.

## 4.3 Χαρακτηριστικά

Τα κύρια χαρακτηριστικά της εκτύπωσης με τη μέθοδο screen printing είναι τα εξής:

- **Πίεση και Ταχύτητα Εκτύπωσης:** Η πίεση που εφαρμόζεται από τη σπάτουλα και η ταχύτητα με την οποία κινείται επηρεάζουν σημαντικά την ποσότητα της

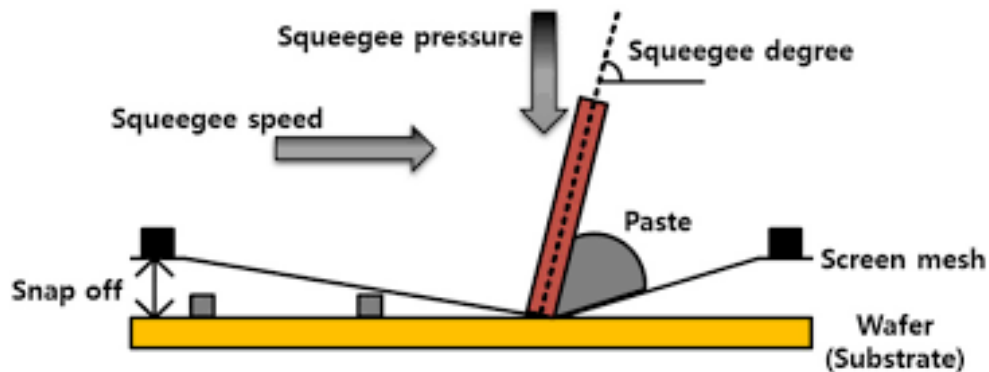
μελάνης που μεταφέρεται στο υπόστρωμα. Με τη σωστή ρύθμιση των παραμέτρων αυτών, εξασφαλίζεται ομοιόμορφη εφαρμογή της μελάνης ή της πάστας, βελτιώνοντας την ποιότητα της εκτύπωσης. Η αυξημένη πίεση μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολική εφαρμογή μελάνης, ενώ η χαμηλή πίεση μπορεί να μην επιτρέπει επαρκή κάλυψη.



**Εικόνα 10:** Διάγραμμα εκτύπωσης με σπάτουλα (Squeegee Hardness Diagram).

Η Εικόνα 10 απεικονίζει τη διαδικασία μεταξοτυπίας (screen printing) με τη χρήση σπάτουλας. Η μελάνη πιέζεται μέσω του πλέγματος με τη σπάτουλα πάνω στο υπόστρωμα. Το πλαίσιο, το πλέγμα και το υπόστρωμα (substrate) φαίνονται ξεκάθαρα μαζί με τη διαδρομή της σπάτουλας, η οποία επηρεάζει την ακρίβεια της εκτύπωσης.

- **Snap-Off Distance:** Πρόκειται για την απόσταση μεταξύ του πλέγματος και του υποστρώματος κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης. Η απόσταση αυτή ρυθμίζεται με ακρίβεια για να διασφαλιστεί η σωστή εφαρμογή της πάστας χωρίς αλλοιώσεις ή ασάφειες στο σχέδιο. Μια πολύ μεγάλη απόσταση μπορεί να προκαλέσει ανισοκατανομή της μελάνης, ενώ μια πολύ μικρή απόσταση ενδέχεται να δυσκολέψει την ομαλή εκτύπωση.



**Εικόνα 11:** Διάγραμμα Snap-off Distance στην Εκτύπωση με Μεταξοτυπία.

Το παραπάνω διάγραμμα (Εικόνα 11) απεικονίζει τη ρύθμιση του snap-off distance, δηλαδή της απόστασης μεταξύ του πλέγματος και του υποστρώματος κατά την εκτύπωση. Περιλαμβάνει επίσης τις παραμέτρους πίεσης, γωνίας και ταχύτητας της σπάτουλας, οι οποίες επηρεάζουν την ποιότητα και την ομοιομορφία της εκτύπωσης.

- **Σκληρότητα της Σπάτουλας:** Η σκληρότητα της σπάτουλας (Triplex σκληρότητας 65/95/75 Shore) επηρεάζει την εφαρμογή της πίεσης και, συνεπώς, την ποιότητα της εκτύπωσης. Μια σκληρή σπάτουλα προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια, ενώ μια πιο μαλακή μπορεί να επιτρέψει την καλύτερη ροή της μελάνης.
- **Μέγεθος και Πυκνότητα του Mesh:** Το μέγεθος των ανοιγμάτων του πλέγματος και η πυκνότητα τους καθορίζουν την ανάλυση και το επίπεδο λεπτομέρειας που μπορεί να αποτυπωθεί στην εκτύπωση. Ένα πυκνότερο πλέγμα επιτρέπει μεγαλύτερη ακρίβεια στις μικρές λεπτομέρειες του σχεδίου, ενώ ένα πιο αραιό πλέγμα επιτρέπει την εκτύπωση μεγαλύτερων επιφανειών σε μικρότερο χρόνο.

### **Επιστρώσεις πάνω σε Γυαλί**

Η διαδικασία εκτύπωσης πραγματοποιήθηκε σε αγώγιμο γυαλί, όπως το FTO (Fluorine-doped Tin Oxide) ή το ITO (Indium Tin Oxide). Αυτά τα υλικά

χρησιμοποιούνται ευρέως ως υποστρώματα σε ηλεκτρονικές διατάξεις, κυρίως λόγω της υψηλής διαφάνειας που επιτρέπουν στη διέλευση του φωτός και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας που παρέχουν για τη γρήγορη μεταφορά φορτίων. Το FTO και το ITO είναι απαραίτητα σε συσκευές όπως τα φωτοβολταϊκά πάνελ και οι αισθητήρες, καθώς συνδυάζουν τη διαφάνεια με την αγωγιμότητα, παρέχοντας μια λειτουργική και αποδοτική βάση για την κατασκευή ημιαγωγικών υμενίων.

### **Υλικά που Χρησιμοποιήθηκαν ως Υλικά Επίστρωσης**

**Διοξείδιο του Ζιρκονίου ( $ZrO_2$ ):** Το  $ZrO_2$  είναι ένα κεραμικό υλικό εξαιρετικής θερμικής και μηχανικής αντοχής. Χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικές εφαρμογές, ιδίως σε ηλεκτρονικές διατάξεις που απαιτούν ανθεκτικά υλικά. Το  $ZrO_2$  έχει εφαρμογές σε αισθητήρες, κεραμικές συσκευές και σε άλλες υψηλής αντοχής διατάξεις, καθώς μπορεί να αντέξει σε ακραίες θερμοκρασίες και περιβαλλοντικές συνθήκες χωρίς να αποδομείται, εξασφαλίζοντας μακροχρόνια σταθερότητα και απόδοση.

**Άνθρακας (Carbon):** Ο άνθρακας αποτελεί ένα από τα πιο ευέλικτα υλικά στην ηλεκτρονική βιομηχανία λόγω της εξαιρετικής του ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές όπως τα ηλεκτρόδια, τα οποία απαιτούν γρήγορη και σταθερή μεταφορά φορτίου. Στις ηλιακές κυψέλες και άλλες ενεργειακές συσκευές, ο άνθρακας χρησιμοποιείται ως στρώμα μεταφοράς φορτίων, καθώς είναι οικονομικός και παρέχει μακροχρόνια σταθερότητα χωρίς να απαιτεί πολύπλοκες διαδικασίες επεξεργασίας. Επιπλέον, η χρήση του άνθρακα επιτρέπει την κατασκευή συσκευών χαμηλού κόστους με υψηλή αποδοτικότητα και ανθεκτικότητα στον χρόνο [28].



**Διοξείδιο του Τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ ):** Το  $\text{TiO}_2$  είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή φωτοκαταλυτικών και ημιαγωγικών υμενίων. Χαρακτηρίζεται από την υψηλή του σταθερότητα και τις εξαιρετικές ηλεκτρονικές του ιδιότητες, οι οποίες το καθιστούν ιδανικό για εφαρμογές σε φωτοβολταϊκά και αισθητήρες. Το  $\text{TiO}_2$  απορροφά την ηλιακή ενέργεια και παράγει ηλεκτρικά ρεύματα, καθιστώντας το βασικό υλικό για την κατασκευή ενεργειακών συσκευών με υψηλή απόδοση και διάρκεια ζωής. Επιπλέον, η φωτοκαταλυτική του δράση το καθιστά κατάλληλο για περιβαλλοντικές εφαρμογές, όπως η επεξεργασία νερού και η απολύμανση επιφανειών.

Τα παραπάνω υλικά, όταν υποστούν σωστή εκτύπωση και θερμική επεξεργασία, μπορούν να σχηματίσουν υμένια με ημιαγωγικές ιδιότητες, καθιστώντας τα ιδανικά για εφαρμογές όπως σε φωτοβολταϊκά συστήματα, αισθητήρες και άλλες ηλεκτρονικές διατάξεις. Η εκτύπωση των υλικών αυτών πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο screen printing, ενώ η θερμική επεξεργασία που ακολούθησε, είχε σαν σκοπό την σταθεροποίηση των επιστρώσεων αλλά και την κρυστάλλωση των υλικών στην επιθυμητή κρυσταλλική φάση, εξασφαλίζοντας τη μέγιστη αποδοτικότητα των συσκευών.

## **4.4 Μεθοδολογία (Methodology)**

### **1. Προετοιμασία Υποστρωμάτων**

Τα υποστρώματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αγώγιμα γυαλιά, όπως το FTO (Fluorine-doped Tin Oxide) ή το ITO (Indium Tin Oxide), τα οποία επιλέχθηκαν λόγω των εξαιρετικών ηλεκτρικών και οπτικών ιδιοτήτων τους. Πριν την εκτύπωση, τα υποστρώματα υποβλήθηκαν σε προσεκτική διαδικασία καθαρισμού για την

απομάκρυνση κάθε είδους ρύπων και ακαθαρσιών, που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ποιότητα των εκτυπωμένων επιστρωμάτων και τη συνολική απόδοση των τελικών συσκευών.

Η διαδικασία καθαρισμού περιλάμβανε τα εξής βήματα:

- Πλύση με απιονισμένο νερό (Deionized Water): Αρχικά τα γυαλιά ξεπλύθηκαν με απιονισμένο νερό για την απομάκρυνση ακαθαρσιών και για να διασφαλιστεί ότι η επιφάνεια θα είναι εντελώς καθαρή και έτοιμη για την εκτύπωση. Το απιονισμένο νερό χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία για την αφαίρεση ιόντων και άλλων ακαθαρσιών από τις επιφάνειες.
- Πλύση με ισοπροπανόλη (Isopropanol): Χρησιμοποιήθηκε ισοπροπανόλη για την αφαίρεση οργανικών ρύπων και λιπαρών υπολειμμάτων από την επιφάνεια των γυαλιών. Η ισοπροπανόλη είναι ένα εξαιρετικό διαλυτικό μέσο που διασφαλίζει ότι δεν θα υπάρξουν κατάλοιπα που να επηρεάσουν τη διαδικασία εκτύπωσης.

Η χρήση της ισοπροπανόλης και του απιονισμένου νερού είναι απαραίτητες για τη διασφάλιση ότι τα υποστρώματα δεν θα έχουν υπολείμματα που θα μπορούσαν να δημιουργήσουν ανεπιθύμητες αντιδράσεις με τα υλικά επιστρώσεων όπως το Διοξείδιο του Τιτανίου ( $TiO_2$ ), το Διοξείδιο του Ζιρκονίου ( $ZrO_2$ ) και τον Άνθρακα (Carbon). Ο καθαρισμός αυτός βοηθά στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας εκτύπωσης και αυξάνει την πιθανότητα επίτευξης ομογενών υμενίων, χωρίς δομικές ατέλειες, σταθερότητα των επιστρώσεων.

## **2. Επιλογή Υλικών Επίστρωσης**

Για τη διαδικασία της μεταξοτυπίας επιλέχθηκαν τρία βασικά υλικά που πληρούν τις απαιτήσεις για λειτουργικές επικαλύψεις. Η επιλογή έγινε με κριτήριο τις ιδιαίτερες ιδιότητές τους, που καθιστούν τα υλικά αυτά ιδανικά για χρήση σε ηλεκτρονικές διατάξεις και συστήματα υψηλής απόδοσης.

Τα υλικά αυτά επιλέχθηκαν ώστε να εξασφαλιστεί η παραγωγή λειτουργικών υμενίων με υψηλή απόδοση. Ο συνδυασμός τους επιτρέπει τη δημιουργία συσκευών που παρουσιάζουν εξαιρετική θερμική και ηλεκτρική σταθερότητα, ενώ ταυτόχρονα διαθέτουν υψηλή φωτοκαταλυτική δράση.

### **3. Εκτύπωση με Μεταξοτυπία**

Η διαδικασία της εκτύπωσης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση screen printer που περιεγράφηκε παραπάνω. Τα βασικά βήματα ήταν τα εξής:

**Προετοιμασία της πάστας:** Κάθε υλικό επιστρώθηκε με τη μορφή πάστας ή μελάνης, η οποία παρασκευάστηκε μέσω ανάμειξης του κατάλληλου υλικού (όπως το διοξείδιο του ζirkονίου ( $ZrO_2$ ), το διοξείδιο του τιτανίου ( $TiO_2$ ) ή τον άνθρακα (Carbon)) με έναν διαλύτη και έναν συνδετικό παράγοντα.

- Για την παρασκευή της πάστας  $ZrO_2$ , αναμίχθηκαν 1 g διοξειδίου του ζirkονίου ( $ZrO_2$ , νανοσκόνη < 100 nm), 0.3 g διοξειδίου του τιτανίου ( $TiO_2$  Degussa P25), και 1.4 g σκόνης αιθυλοκυτταρίνης. Στη συνέχεια, προστέθηκαν 0.5 ml οξικού οξέος και 2 ml απεσταγμένου νερού. Κατόπιν, προστέθηκαν σταδιακά 12 ml απόλυτης αιθανόλης και 4.8 g τερπινεόλης. Το μείγμα ανακατεύτηκε για 5 λεπτά, ακολούθησε επεξεργασία υπερήχων για 1 λεπτό και ολοκληρώθηκε με επιπλέον ανάδευση για 5 λεπτά.

- Η πάστα άνθρακα (C) παρασκευάστηκε με ανάμιξη 9 g γραφίτη (μέγεθος σωματιδίων < 20 μm), 3 g carbon black (Cabot Corporation) και 1 g νανοσωματιδίων ZrO<sub>2</sub> σε μορφή σκόνης. Προστέθηκαν σταδιακά 18 g τερπινεόλης στο μείγμα, ενώ στο τέλος προστέθηκαν σταδιακά 15 g διαλύματος αιθυλοκυτταρίνης (10 wt%). Η διαδικασία ολοκληρώθηκε με επεξεργασία υπερήχων για 1 λεπτό και ακολούθησε μαγνητική ανάδευση για 5 λεπτά. Η προσθήκη του ZrO<sub>2</sub> ήταν απαραίτητη για να βελτιωθεί η πρόσφυση του άνθρακα στο υποκείμενο στρώμα ZrO<sub>2</sub> και να βελτιωθεί η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο υλικών.

Για τη διάλυση των υλικών, χρησιμοποιήθηκε ισοπροπανόλη (Isopropanol), ένας κοινός οργανικός διαλύτης που επιτρέπει την ομοιογενή διάλυση των υλικών, εξασφαλίζοντας ότι η πάστα έχει την κατάλληλη υφή για εκτύπωση. Η ισοπροπανόλη επιλέχθηκε για την ικανότητά της να εξατμίζεται γρήγορα και να μην αφήνει κατάλοιπα στην επιφάνεια.

Για τη σύνδεση των σωματιδίων της πάστας και τη διατήρηση της συνοχής της, χρησιμοποιήθηκε αιθυλοκυτταρίνη (Ethyl Cellulose). Αυτός ο παράγοντας παρέχει τη δυνατότητα σχηματισμού μιας ομοιόμορφης και σταθερής επικάλυψης, βοηθώντας στη διατήρηση της πάστας στη θέση της κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης. Η αιθυλοκυτταρίνη λειτουργεί ως συνδετικός παράγοντας που εξασφαλίζει τη συνοχή της πάστας, ακόμη και όταν ο διαλύτης εξατμίζεται, επιτρέποντας μια σταθερή επίστρωση.

**Εκτύπωση:** Η πάστα τοποθετήθηκε προσεκτικά πάνω στο πλέγμα του screen printer, και στη συνέχεια με τη χρήση σπάτουλας (squeegee) πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή

πίεσης ώστε να διέλθει η πάστα μέσα από το πλέγμα και να αποτυπωθεί ομοιόμορφα πάνω στο αγώγιμο γυαλί (όπως το FTO ή το ITO).

Για τη συγκεκριμένη διαδικασία χρησιμοποιήθηκε σπάτουλα Triplex σκληρότητας 65/95/75 Shore. Αυτή η σπάτουλα εξασφαλίζει την κατάλληλη εφαρμογή πίεσης και επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της ροής της πάστας.

#### **Παράμετροι Εκτύπωσης:**

**Πίεση σπάτουλας:** Η πίεση της σπάτουλας ρυθμίστηκε σε πίεση 5 N/cm<sup>2</sup>. Αυτή η τιμή επιλέχθηκε μετά από δοκιμές με διαφορετικές πιέσεις (από 3 N/cm<sup>2</sup> έως 7 N/cm<sup>2</sup>), καθώς προσέφερε την καλύτερη κατανομή της πάστας, χωρίς να δημιουργεί υπερβολική ροή υλικού, που θα μπορούσε να προκαλέσει παχύτερες επιστρώσεις ή ανισοκατανομή.

**Ταχύτητα εκτύπωσης:** Δοκιμάστηκαν ταχύτητες μεταξύ 150 mm/sec και 550 mm/sec και η επιλογή της εκάστοτε ταχύτητας καθορίστηκε από το υλικό, ώστε να εξασφαλιστεί η κατάλληλη ισορροπία μεταξύ πάχους και ομοιομορφίας της επίστρωσης, χωρίς να αφήνει σημάδια στην πάστα.

**Snap-off distance:** Η απόσταση μεταξύ του πλέγματος και του υποστρώματος ρυθμίστηκε σε 1.5 mm, μια τιμή που προέκυψε μετά από δοκιμές με αποστάσεις από 1 mm έως 2 mm. Το 1.5 mm παρείχε την καλύτερη ακρίβεια εκτύπωσης, αποφεύγοντας τόσο την υπερβολική επαφή που θα μπορούσε να προκαλέσει ανεπιθύμητη ροή πάστας όσο και την πολύ μεγάλη απόσταση, η οποία θα δυσκόλευε τη μεταφορά της πάστας.

#### **4. Θερμική Επεξεργασία**

Μετά την εκτύπωση, τα επιστρωμένα υποστρώματα υποβλήθηκαν σε θερμική επεξεργασία, προκειμένου να απομακρυνθούν οι διαλύτες και να στερεοποιηθεί η επίστρωση.

**Θερμοκρασία επεξεργασίας:** Κάθε υλικό υποβλήθηκε σε συγκεκριμένη θερμική κατεργασία, ανάλογα με τις φυσικοχημικές του ιδιότητες. Οι θερμοκρασίες που χρησιμοποιήθηκαν για τη θερμική επεξεργασία ήταν οι εξής:

- Για το διοξείδιο του ζirkονίου ( $ZrO_2$ ): Η θερμοκρασία επεξεργασίας ήταν  $450^{\circ}C$ , καθώς αυτή η θερμοκρασία επιτρέπει την απομάκρυνση των διαλυτών και την πλήρη κρυστάλλωση του υλικού, επιτυγχάνοντας υψηλή θερμική σταθερότητα.
- Για τον άνθρακα (Carbon): Η θερμική επεξεργασία πραγματοποιήθηκε στους  $400^{\circ}C$ , καθώς αυτή η θερμοκρασία είναι επαρκής για την απομάκρυνση των οργανικών συστατικών χωρίς να υποστεί ζημιά η αγωγιμότητα του υλικού.
- Για το διοξείδιο του τιτανίου ( $TiO_2$ ): Χρησιμοποιήθηκε θερμοκρασία  $500^{\circ}C$ , προκειμένου να επιτευχθεί πλήρης κρυστάλλωση του υλικού, στην ανατάση μορφή που αποδίδει τις βέλτιστες ηλεκτρικές ιδιότητες.

**Διάρκεια θερμικής επεξεργασίας:** Η διάρκεια της επεξεργασίας καθορίστηκε βάσει των ιδιοτήτων κάθε υλικού. Οι χρόνοι θερμικής επεξεργασίας ήταν οι εξής:

- Για το  $ZrO_2$ , η επεξεργασία διήρκεσε 20 λεπτά, καθώς αυτός ο χρόνος είναι επαρκής για την απομάκρυνση των διαλυτών και τη σταθεροποίηση της επίστρωσης.

- Ο άνθρακας υποβλήθηκε σε θερμική επεξεργασία για 20 λεπτά, προκειμένου να διατηρηθεί η αγωγιμότητά του και να αποφευχθεί η υπερβολική θερμική αλλοίωση του υλικού.
- Το  $TiO_2$  χρειάστηκε 30 λεπτά θερμικής επεξεργασίας για να εξασφαλιστεί η πλήρης κρυστάλλωση και η ενίσχυση των ηλεκτρονικών ιδιοτήτων του.

## 5. Αξιολόγηση των Υμενίων

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας εκτύπωσης και θερμικής επεξεργασίας, τα υμένα αξιολογήθηκαν βάσει διαφόρων παραμέτρων, ώστε να διασφαλιστεί η ποιότητα, η ομοιομορφία και η απόδοση των επιστρώσεων. Χρησιμοποιήθηκαν διάφορες μέθοδοι ανάλυσης για την αξιολόγηση των φυσικών και ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των υμενίων.

**Οπτική Μικροσκοπία:** Η επιφάνεια των υμενίων εξετάστηκε με οπτικό μικροσκόπιο για τον έλεγχο της ομοιομορφίας και της κατανομής της πάστας. Η ανάλυση της επιφάνειας επέτρεψε τον εντοπισμό τυχόν ατελειών ή ανωμαλιών, όπως φυσαλίδες αέρα ή ασυνεχείς επιστρώσεις, που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την τελική απόδοση των υμενίων.

**Ηλεκτρικές Μετρήσεις:** Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των υμενίων, όπως η αγωγιμότητα, προσδιορίστηκαν με τη χρήση ειδικών συσκευών μέτρησης. Μετρήθηκε η αντίσταση των υμενίων και η ικανότητά τους να μεταφέρουν ηλεκτρικό φορτίο, κρίσιμος παράγοντας για τις εφαρμογές που σχετίζονται με ηλεκτρονικές διατάξεις και φωτοβολταϊκά συστήματα.

**Προσδιορισμός πάχους υμενίου:** Το πάχος κάθε υμενίου μετρήθηκε με τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού, συγκεκριμένα ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (Scanning Electron Microscopy-SEM). Η ακριβής μέτρηση του πάχους είναι σημαντική για την αξιολόγηση της ομοιομορφίας και της αποτελεσματικότητας της επίστρωσης, καθώς οι επιστρώσεις που είναι είτε υπερβολικά λεπτές είτε υπερβολικά παχιές μπορεί να παρουσιάζουν μειωμένη απόδοση.

#### **4.5 Αποτελέσματα**

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών με τη μέθοδο της μεταξοτυπίας, χρησιμοποιήθηκαν διάφορα υλικά και διεξήχθησαν πολλαπλές δοκιμές για να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα στα υμένια. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν περιλάμβαναν την αραιώση του υλικού με διαφορετικούς διαλύτες, την ταχύτητα εκτύπωσης, την απόσταση του πλέγματος από το υπόστρωμα και τον αριθμό των περασμάτων της σπάτουλας. Οι παρατηρήσεις που ακολούθησαν επικεντρώθηκαν στην ομοιομορφία των υμενίων και την αποτελεσματική μεταφορά της πάστας μέσω του πλέγματος.

##### **Υλικό: Διοξείδιο του Τιτανίου (TiO<sub>2</sub>)**

Κατά τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με το διοξείδιο του τιτανίου (TiO<sub>2</sub>), εξετάστηκαν διάφορες αραιώσεις με τερπινεόλη και βουτανόλη για να επιτευχθεί η σωστή ροή της πάστας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι αραιώσεις με τερπινεόλη σε αναλογία 1:1 (Test 2) και 1:2 (Test 3 & Test 4) απέδωσαν καλύτερη ποιότητα εκτύπωσης σε σχέση με την εκτύπωση χωρίς αραιώση (Test 1). Τα δείγματα Test 3 και Test 4 παρουσίασαν ομοιόμορφη επιφάνεια, σε αντίθεση με το Test 5, όπου χρησιμοποιήθηκε βουτανόλη 1:1 και η επίστρωση ήταν λιγότερο ομοιογενής, ενώ δεν τεκμηριώθηκε με φωτογραφίες.



### **Υλικό: Διοξείδιο του Ζιρκονίου ( $ZrO_2$ )**

Για το διοξείδιο του ζιρκονίου ( $ZrO_2$ ), οι δοκιμές επικεντρώθηκαν στη χρήση αδιάλυτης πάστας. Η ταχύτητα εκτύπωσης και ο αριθμός των περασμάτων της σπάτουλας επηρέασαν αισθητά την ποιότητα των υμενίων. Το Test 2 παρείχε το καλύτερο αποτέλεσμα όσον αφορά την ομοιομορφία της επίστρωσης και τη ροή της πάστας μέσω του πλέγματος, σε σύγκριση με τα Test 1 και Test 3, τα οποία εμφάνισαν μικρότερη ομοιομορφία.

### **Υλικό: Άνθρακας (Carbon)**

Στις δοκιμές με τον άνθρακα (Carbon), το Test 3 απέδωσε τα πιο ομοιογενή αποτελέσματα, με το υμένιο να διατηρεί σταθερή ποιότητα μετά το ψήσιμο. Η απόσταση του πλέγματος ορίστηκε στα 1.5 mm για καλύτερη ροή της πάστας, ενώ η ταχύτητα εκτύπωσης ήταν 200 mm/sec. Σε αυτό το τεστ πραγματοποιήθηκε μόνο ένα πέρασμα της σπάτουλας, το οποίο ήταν επαρκές για την ομοιόμορφη κατανομή της πάστας στο υπόστρωμα.






Στο Test 3 για το διοξείδιο του τιτανίου ( $TiO_2$ ), η πάστα προετοιμάστηκε με τερπινολή σε αναλογία 1:2. Αυτή η αναλογία επελέγη για να εξασφαλιστεί η σωστή ρευστότητα της πάστας χωρίς υπερβολική ροή. Η ταχύτητα εκτύπωσης ήταν 450 mm/sec, εξασφαλίζοντας την ισορροπία ανάμεσα στην ποιότητα της εκτύπωσης και την παραγωγικότητα. Η απόσταση πλέγματος ήταν 0 mm, με τη σπάτουλα να εκτελεί ένα μόνο πέρασμα, που απέδωσε ομοιόμορφο αποτέλεσμα και σταθερό υμένιο μετά τη θερμική επεξεργασία.







Στο Test 3 για το διοξείδιο του ζιρκονίου ( $ZrO_2$ ), η πάστα δεν αραιώθηκε και η ταχύτητα εκτύπωσης διατηρήθηκε χαμηλή, στα 350 mm/sec, για τον έλεγχο της ροής της πάστας. Για να βελτιωθεί η ομοιομορφία, πραγματοποιήθηκαν 2 περάσματα της

σπάτουλας. Η επαναληπτική διαδικασία έδωσε καλύτερη κάλυψη επιφάνειας και βελτιωμένη σταθερότητα.

Όσον αφορά τον άνθρακα (Carbon), η πάστα χρησιμοποιήθηκε χωρίς αραιώση και η ταχύτητα εκτύπωσης ήταν 200 mm/sec. Η απόσταση snap-off ρυθμίστηκε στα 1.5 mm για να εξασφαλιστεί η ομαλή ροή της πάστας. Ένα μόνο πέρασμα της σπάτουλας ήταν αρκετό για την επίτευξη ομοιόμορφης επίστρωσης. Μετά την εκτύπωση και τη θερμική επεξεργασία, το Test 3 απέδωσε τα πιο σταθερά και ομοιογενή αποτελέσματα για τον άνθρακα.

**Πίνακας 1:** Παράμετροι Εκτύπωσης και Αποτελέσματα για Διοξείδιο του Τιτανίου ( $TiO_2$ ), Διοξείδιο του Ζιρκονίου ( $ZrO_2$ ) και Άνθρακα (Carbon).

		ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ						
	ΥΛΙΚΟ	ΑΡΑΙΩΣΗ	SPEED	GAP(mm)	No OF PASSES	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ	
TEST 1	TiO <sub>2</sub>	ΧΩΡΙΣ	1	0	1			TEST 1
TEST 2		ΤΕΡΠΙΝΟΛΗ 1:1	1	0	1			TEST 2
TEST 3		ΤΕΡΠΙ 1:2	7	0	1	Test 3 & 4 περισσότερο ομογενές από τις προηγούμενες αλλά και επόμενες προσπάθειες.		TEST 3
TEST 4		ΤΕΡΠΙ 1:2	9	0	1			TEST 4
TEST 5		ΒΟΥΤΑΝΟΛΗ 1:1	9	0	1		ΧΩΡΙΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ	TEST 5
TEST 6		ΒΟΥΤΑΝΟΛΗ 1:1	1	0	1			TEST 6

TEST 1		-	1	0	1			TEST 1
TEST 2	ZrO <sub>2</sub>	-	5	0	1	Test 2 το καλύτερο δείγμα λόγω ομοιομορφίας και εύκολης διέλευσης από την σίτα		TEST 2
TEST 3		-	1	0	2			TEST 3
TEST 1		-	1	0	1			TEST 1
TEST 2	CARBON	-	4	0	1	Test 3 βέλτιστο λόγω ομοιογένειας		TEST 2
TEST 3		-	2	1.5	1			TEST 3

## Βιβλιογραφία 4<sup>ο</sup> Κεφαλαίου

- Bidikoudi, M., Kalarakis, A. N., & Stathatos, E. (2021). A facile, low-cost and industrially feasible method to implement complex structured perovskites, in stable, C-based perovskite solar cells. *Solar Energy*, 220, 660-670. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.007>.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στα υλικά διοξείδιο του ζirkονίου ( $ZrO_2$ ), άνθρακα (Carbon) και διοξείδιο του τιτανίου ( $TiO_2$ ) οδήγησαν σε συγκεκριμένα συμπεράσματα όσον αφορά την ποιότητα και την ομοιομορφία των υμενίων. Μέσα από τις πολλαπλές δοκιμές εκτύπωσης και θερμικής επεξεργασίας, αναδείχθηκαν τα δείγματα που παρείχαν τα πιο σταθερά και ομοιογενή αποτελέσματα.

Για το διοξείδιο του ζirkονίου ( $ZrO_2$ ), το Test 2 αποδείχθηκε το πιο επιτυχημένο, κυρίως λόγω της ευκολίας με την οποία η πάστα διήλθε μέσω του πλέγματος και της ομοιόμορφης κατανομής της στην επιφάνεια. Οι συνθήκες που επιλέχθηκαν για αυτή τη δοκιμή περιλάμβαναν την απουσία αραίωσης, ταχύτητα εκτύπωσης 350 mm/sec, απόσταση του πλέγματος από το υπόστρωμα 0 mm και ένα πέρασμα της σπάτουλας. Αυτές οι συνθήκες εξασφάλισαν την ομοιομορφία και την ποιότητα της επίστρωσης.

Όσον αφορά τον άνθρακα (Carbon), το Test 3 παρήγαγε τα πιο ομοιογενή αποτελέσματα μετά τη θερμική επεξεργασία, επιβεβαιώνοντας ότι η σωστή απόσταση του πλέγματος και η ταχύτητα εκτύπωσης ήταν καθοριστικοί παράγοντες για την επίτευξη μιας σταθερής και ομοιόμορφης επιφάνειας. Οι συνθήκες περιλάμβαναν την απουσία αραίωσης, ταχύτητα εκτύπωσης 200 mm/sec, απόσταση του πλέγματος 1.5 mm και ένα πέρασμα της σπάτουλας. Η πάστα πέρασε ομαλά από το πλέγμα και κατανέμεται με ακρίβεια στο υπόστρωμα, διατηρώντας την ομοιομορφία της ακόμα και μετά το ψήσιμο.

Σχετικά με το διοξείδιο του τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ ), οι δοκιμές Test 3 και Test 4 κατέδειξαν πως η αραίωση της πάστας σε αναλογία 1:2 με τερπινεόλη, σε συνδυασμό με την κατάλληλη ταχύτητα εκτύπωσης, οδήγησε σε πιο ομοιογενείς επιστρώσεις σε σχέση με τις άλλες δοκιμές. Στο Test 3, η ταχύτητα εκτύπωσης ήταν 450 mm/sec, ενώ στο Test 4 ήταν 550 mm/sec, με απόσταση πλέγματος 0 mm και ένα πέρασμα της σπάτουλας. Η σταθερότητα και η ομοιομορφία των υμενίων αυτών ήταν σαφώς ανώτερες, υποδεικνύοντας ότι οι συνθήκες εκτύπωσης και αραίωσης ήταν ιδανικές για το  $\text{TiO}_2$ .

Για τη μελλοντική έρευνα, υπάρχουν αρκετοί τομείς που θα μπορούσαν να βελτιωθούν περαιτέρω. Μία από τις προτάσεις είναι να εξεταστεί η χρήση διαφορετικών διαλυτών και αραιώσεων, προκειμένου να διερευνηθεί αν θα μπορούσαν να βελτιώσουν τη ροή της πάστας και την ομοιομορφία των υμενίων. Η τερπινολή και η βουτανόλη απέδωσαν καλά αποτελέσματα, ωστόσο θα ήταν χρήσιμο να μελετηθούν και άλλοι διαλύτες για πιθανή περαιτέρω βελτιστοποίηση.

Μια ακόμη σημαντική κατεύθυνση για τη μελλοντική μελέτη είναι η διερεύνηση της επίδρασης διαφορετικών θερμικών προφίλ στην κρυσταλλοποίηση και τη σταθερότητα των υλικών. Η εφαρμογή θερμάνσεων σε στάδια, με σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας, θα μπορούσε να βελτιώσει την ποιότητα των υμενίων, ειδικά όσον αφορά την κρυσταλλική δομή και τις ηλεκτρικές ιδιότητες.

Επιπλέον, αξίζει να εξεταστεί η επίδραση διαφορετικών αριθμών περασμάτων της σπάτουλας κατά την εκτύπωση ή η χρήση σπάτουλας με διαφορετική σκληρότητα, καθώς αυτές οι παράμετροι μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την ομοιομορφία της επίστρωσης.

Τέλος, μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν να επικεντρωθούν στη δοκιμή νέων υλικών ή συνδυασμών των υφιστάμενων υλικών. Η διερεύνηση της συμπεριφοράς νέων χημικών ενώσεων ή η δημιουργία νέων συνδυασμών υλικών ενδέχεται να αποφέρει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα στις εφαρμογές ηλεκτρονικών διατάξεων και αισθητήρων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Kuscer, D. (2020). Screen printing. In *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.12082-X>.
- [2] Potts, S.-J. (2020). Advanced Manufacture by Screen Printing (Thesis). Swansea University. <https://doi.org/10.23889/SUthesis.58460>.
- [3] <https://www.harris-screenprint.co.uk/>
- [4] Nathan Zavanelli and Woon-Hong Yeo (2021). Advances in Screen Printing of Conductive Nanomaterials for Stretchable Electronics, *ACS Omega* **2021** 6 (14), 9344-9351doi: 10.1021/acsomega.1c00638.
- [5] Johnson Screens. (2021). *Industrial Screens*. Aqseptence Group. [https://johnsonscreens.com/wp-content/uploads/2021/11/Johnson\\_Industrial\\_Screens.pdf](https://johnsonscreens.com/wp-content/uploads/2021/11/Johnson_Industrial_Screens.pdf).
- [6] Doelle, K. (2021). Paper for Screen Printing Applications – A Paper Development Study. *Journal of Engineering Research and Reports*, 21(9), 45-63. <https://doi.org/10.9734/JERR/2021/v21i917490>.
- [7] Martí, V., Penálver, J., Portolés, J., Negra, P., Barba, A., Giménez, S., & Monfort, E. (2020). Study of screen-printing application control variables and their influence on shades in tile. *Instituto de Tecnología Cerámica*.
- [8] Penálver, J., Barba, A., & Giménez, S. (2019). Advanced screen-printing methods in ceramic tile decoration. *Ceramic World Review*, 129(3), 55-72.
- [9] Tomchenko, A. (2006). *Printed chemical sensors: From screen-printing to microprinting*. In *Encyclopedia of Sensors* (Vol. 10, pp. 279-290). American Scientific Publishers.

- [10] Δ. Σκαρλάτος, Υλικά και Διατάξεις Μικροηλεκτρονικής. Κεφάλαιο 3 : Στερεοί Αγωγοί, Ημιαγωγοί και Μονωτές.
- [11] Kim, Y., & Hone, J. (2017). Materials Science: Screen Printing of 2D Semiconductors. *Nature*, 544, 167-168. <https://doi.org/10.1038/nature21908>.
- [12] Shi J., Zhang J., Yang L., Qu M., Qi D.-C., Zhang K. H. L. Wide Bandgap Oxide Semiconductors: from Materials Physics to Optoelectronic Devices. *Adv.Mater.* 2021, 33,2006230. <https://doi.org/10.1002/adma.202006230>.
- [13] Janotti, A., & Van de Walle, C. G. (2009). Fundamentals of Zinc Oxide as a Semiconductor. *Reports on Progress in Physics*, 72(12), 126501.
- [14] Ozgur, U., Alivov, Y. I., & Morkoc, H. (2010). Zinc Oxide Materials and Devices: A Review of Processing, Properties, and Applications. *Journal of Applied Physics*, 98(4), 041301.
- [15] Chen, X., & Mao, S. S. (2015). Titanium Dioxide Nanomaterials: Synthesis, Properties, Modifications, and Applications. *Chemical Reviews*, 107(7), 2891-2959.
- [16] Wang, R., Hashimoto, K., & Fujishima, A. (2016). Light-Induced Amphiphilic Surfaces. *Nature*, 388, 431-432.
- [17] Gibbs, A., & Jarvis, D. (2018). Transistor Technology in Modern Electronics. *IEEE Transactions on Electronics*, 34(5), 123-140.
- [18] Mills, G., & Harper, R. (2020). The Role of Semiconductors in Energy-Efficient Devices. *Renewable Energy Journal*, 17(2), 55-67.
- [19] Smith, B., Taylor, J., & Wilson, D. (2017). New Developments in Solar Cell Technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 159, 183-192.
- [20] Rao, P., Nair, R., & Kumar, V. (2018). Gas Sensors Based on Tin Oxide Semiconductors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 255(3), 831-843.
- [21] Jain, S., & Huang, J. (2016). Laser Diodes: Principles and Applications. *Journal of Optical Engineering*, 45(7), 233-245.
- [22] Beedasy, V., & Smith, P. J. (2020). Printed Electronics as Prepared by Inkjet Printing. *Materials*, 13(3), 704. <https://doi.org/10.3390/ma13030704>.

- [23] Shrestha, R., et al. (2021). Recent Progress in Manufacturing Techniques of Printed and Flexible Sensors: A Review. *MDPI Materials*, 14(5), 1243. <https://doi.org/10.3390/ma14051243>.
- [24] DeSilva, M. (2014). Photolithography. In: Li, D. (Eds) *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-27758-0\\_1217-2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27758-0_1217-2).
- [25] Lorenz, A., Linse, M., Frintrup, H., et al. (2018). Screen Printed Thick-Film Metallization of Silicon Solar Cells - Recent Developments and Future Perspectives. *35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. <https://doi.org/10.4229/35thEUPVSEC20182018-2DV.3.65>.
- [26] Turunen, T., & Numakura, H. (2020). Advanced Screen-Printing Technologies and Material Properties. *Journal of Advanced Manufacturing and Materials*, 15(3), 245-259.
- [27] Szentgyörgyvölgyi, R., Novotny, E., & Weimert, M. (2018). Determining and Selecting Screen Printing Form Parameters for Printing on Paper and Textile. *Journal of Graphic Engineering and Design*, 15(2), 189-197.
- [28] Bidikoudi, M., Kalarakis, A. N., & Stathatos, E. (2021). A facile, low-cost and industrially feasible method to implement complex structured perovskites, in stable, C-based perovskite solar cells. *Solar Energy*, 220, 660-670. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.007>.

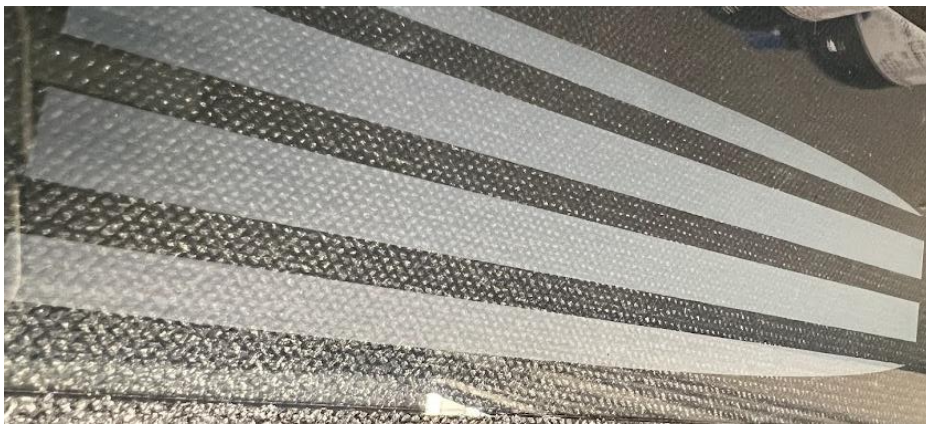


## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: Διοξείδιο του Ζιρκονίου (ZrO<sub>2</sub>)

**Πίνακας 2:** Παράμετροι Εκτύπωσης και Αποτελέσματα για Διοξείδιο του Ζιρκονίου (ZrO<sub>2</sub>)

ZrO <sub>2</sub>	TEST 1	TEST 2	TEST 3
SPEED(preset)	1	5	1
TIMES	1	1	2
GAP(mm)	0	0	0

Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν στις τρεις δοκιμές εκτύπωσης για το διοξείδιο του ζιρκονίου (ZrO<sub>2</sub>), συμπεριλαμβανομένων της ταχύτητας εκτύπωσης (preset speed), του πλήθους των περασμάτων της σπάτουλας και της απόστασης του πλέγματος από το υπόστρωμα (gap). Η καλύτερη ποιότητα επίστρωσης επιτεύχθηκε στο Test 2, όπως υποδεικνύουν τα δεδομένα.



**Εικόνα 10:** Αποτελέσματα εκτύπωσης στο Test 1 για το διοξείδιο του ζιρκονίου (ZrO<sub>2</sub>)



**Εικόνα 11:** Αποτελέσματα εκτύπωσης στο Test 2 για το διοξείδιο του ζirkονίου ( $ZrO_2$ )



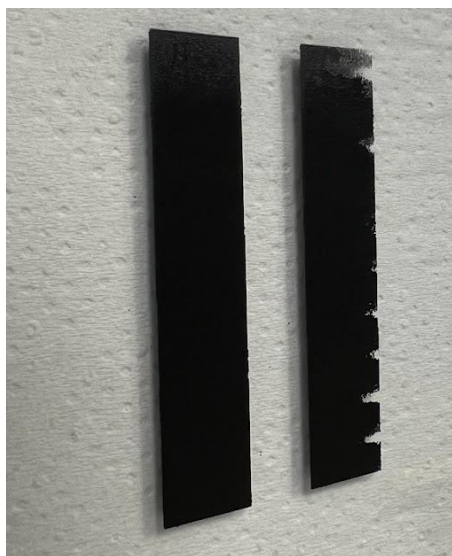
**Εικόνα 12:** Αποτελέσματα εκτύπωσης στο Test 3 για το διοξείδιο του ζirkονίου ( $ZrO_2$ )

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: Άνθρακας (Carbon)

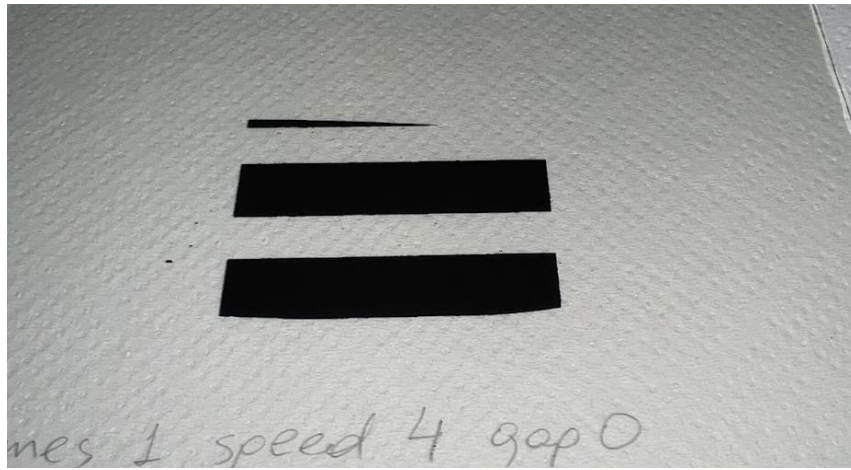
Πίνακας 3: Παράμετροι Εκτύπωσης και Αποτελέσματα για Άνθρακα (Carbon)

CARBON	TEST 1	TEST 2	TEST 3
SPEED(preset)	1	4	2
TIMES	1	1	1
GAP(mm)	0	0	1.5

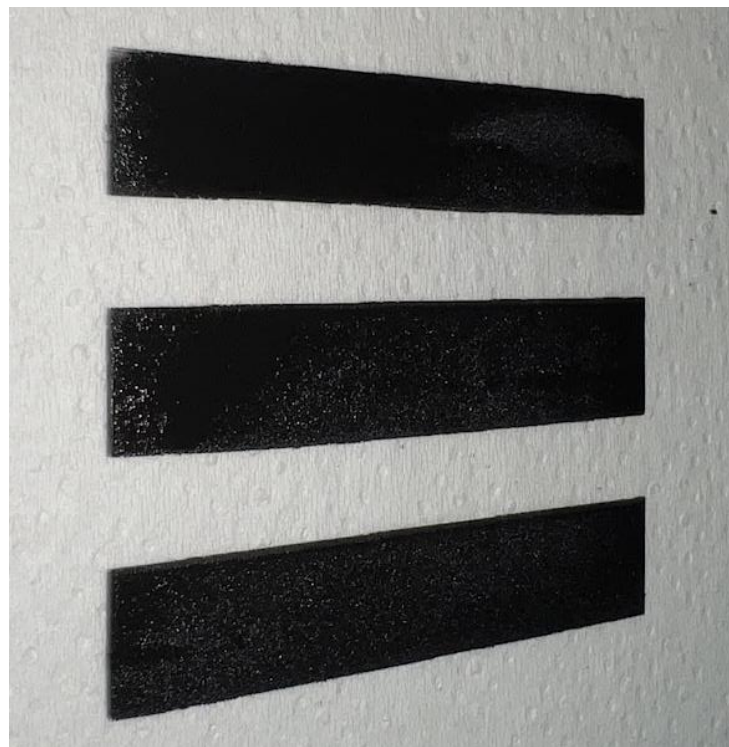
Ο πίνακας 3 παρουσιάζει τις παραμέτρους των δοκιμών εκτύπωσης για το υλικό άνθρακας (Carbon), συμπεριλαμβάνοντας την ταχύτητα εκτύπωσης, το πλήθος των περασμάτων της σπάτουλας και την απόσταση του πλέγματος από το υπόστρωμα (gap).



Εικόνα 13: Αποτελέσματα εκτύπωσης στο Test 1 για Άνθρακα (Carbon)



**Εικόνα 14:** Αποτελέσματα εκτύπωσης στο Test 2 για Άνθρακα (Carbon)



**Εικόνα 15:** Αποτελέσματα εκτύπωσης στο Test 3 για Άνθρακα (Carbon)

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3: Διοξείδιο του Τιτανίου (TiO<sub>2</sub>)

Πίνακας 4: Παράμετροι Εκτύπωσης και Αποτελέσματα για Διοξείδιο του Τιτανίου (TiO<sub>2</sub>)

TiO <sub>2</sub>	TEST 1 ΧΩΡΙΣ ΑΡΑΙΩΣΗ	TEST 2 1:1 ΤΕΡΠΙΝΟΛΗ	TEST 3 1:2 ΤΕΡΠΙΝΟΛΗ	TEST 4 1:2 ΤΕΡΠΙΝΟΛΗ	TEST 5 1:1 ΒΟΥΤΑΝΟΛΗ	TEST 6 1:1 ΒΟΥΤΑΝΟΛΗ
<b>SPEED</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>1</b>
<b>TIMES</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>GAP</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>



Εικόνα 16: Αποτελέσματα εκτύπωσης στο Test 1 για Διοξείδιο του Τιτανίου (TiO<sub>2</sub>)



**Εικόνα 17:** Αποτελέσματα εκτύπωσης στο Test 2 για Διοξείδιο του Τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ )



**Εικόνα 18:** Αποτελέσματα εκτύπωσης στο Test 3 για Διοξείδιο του Τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ )



**Εικόνα 19:** Αποτελέσματα εκτύπωσης στο Test 4 για Διοξείδιο του Τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ )



**Εικόνα 20:** Αποτελέσματα εκτύπωσης στο Test 6 για Διοξείδιο του Τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ )

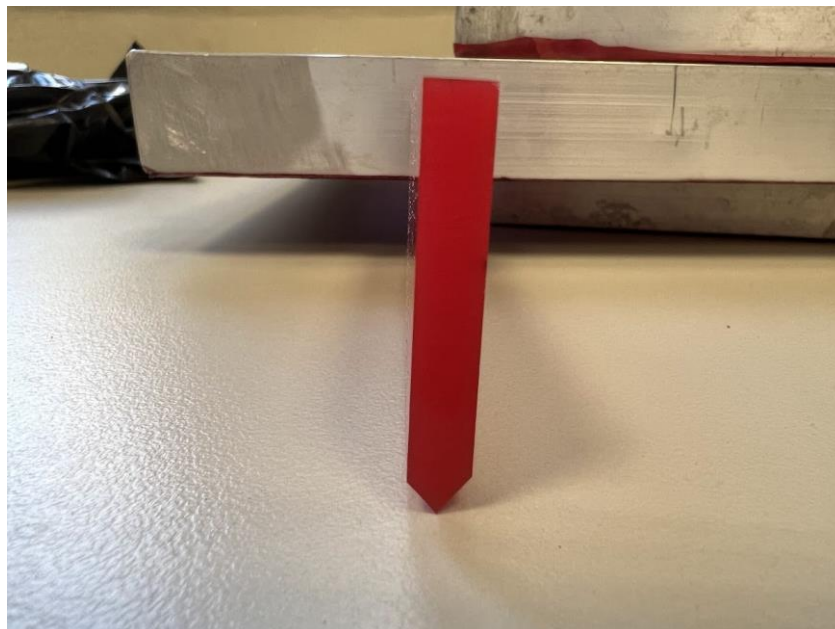
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4: Εξοπλισμός και Σπάτουλα

### Χρησιμοποιούμενη για την Εκτύπωση



**Εικόνα 21:** Σπάτουλα Σκληρότητας 65/95/75 Shore

Η Εικόνα 21 δείχνει την σπάτουλα που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές εκτύπωσης, με σκληρότητα 65/95/75 Shore, η οποία επηρέασε την ποιότητα και την κατανομή της πάστας.



**Εικόνα 22:** Πλευρική Όψη της Σπάτουλας

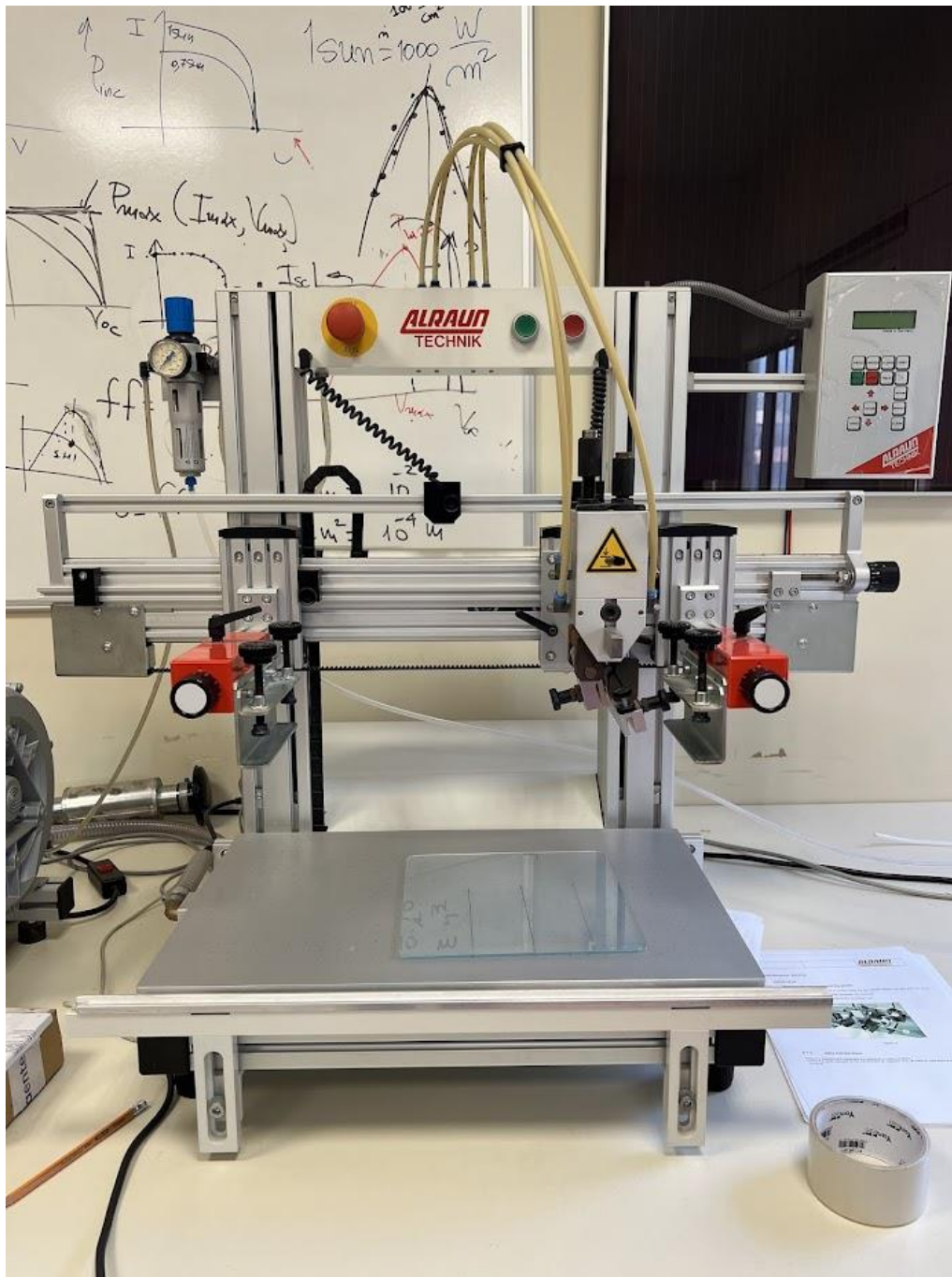


Η Εικόνα 22 παρουσιάζει την πλευρική όψη της ίδιας σπάτουλας, τονίζοντας τη σκληρότητά της και το μέγεθός της, το οποίο επηρέασε την κατανομή της πάστας κατά τη διαδικασία εκτύπωσης.



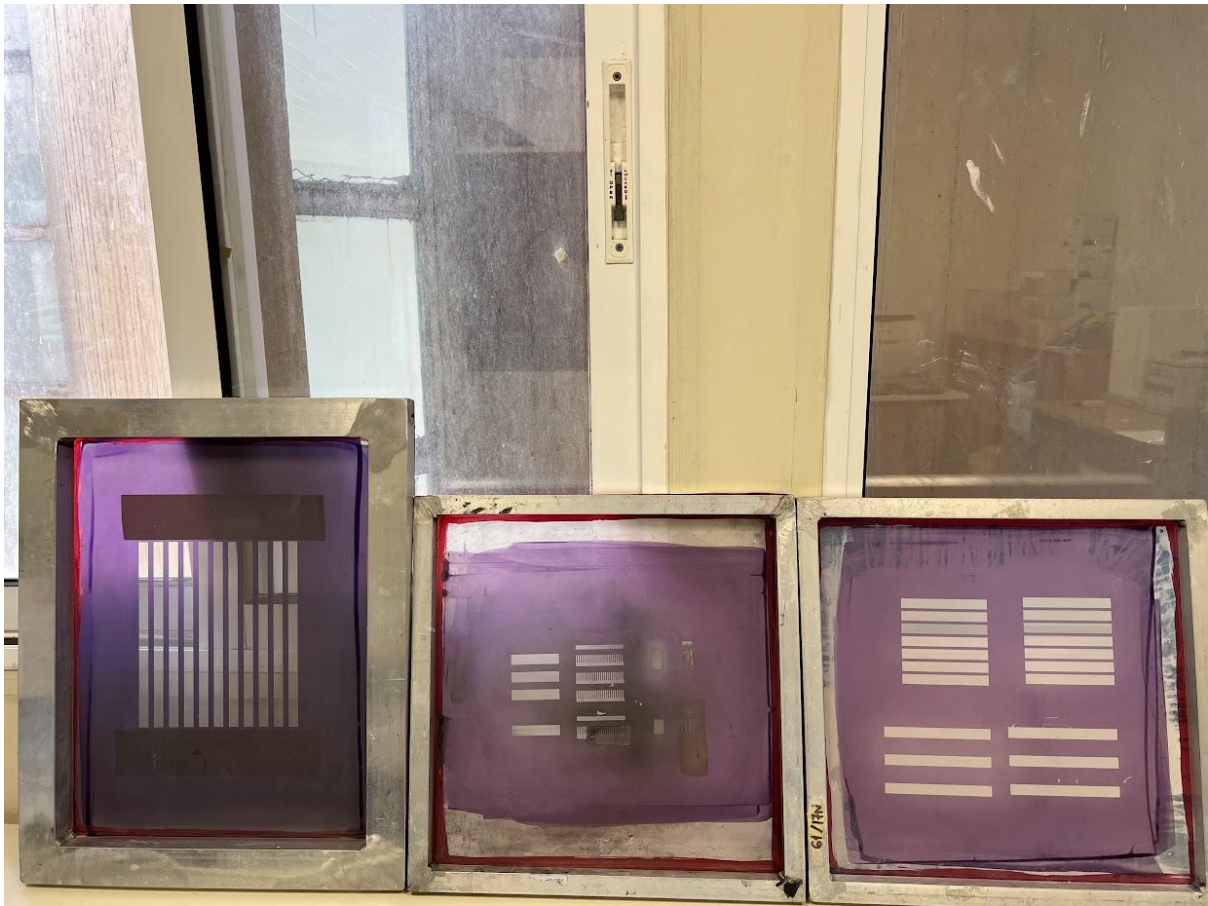
**Εικόνα 23:** Πάνω Όψη της Σπάτουλας

Η Εικόνα 23 δείχνει την πάνω όψη της σπάτουλας, δίνοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα της δομής και του μεγέθους της.



**Εικόνα 24:** Εξοπλισμός Εκτύπωσης Screen Printer (Πλήρης Όψη)

Η Εικόνα 24 δείχνει τον εξοπλισμό εκτύπωσης screen printer, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της πάστας πάνω στα υποστρώματα κατά τη διάρκεια των δοκιμών.



**Εικόνα 25:** Πλέγματα Εκτύπωσης Χρησιμοποιούμενα για τις Δοκιμές

Η Εικόνα 25 δείχνει τα πλέγματα εκτύπωσης που χρησιμοποιήθηκαν για τις διάφορες δοκιμές εκτύπωσης και την παραγωγή των επιστρώσεων. Τα πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε υλικό είναι ως εξής:  $ZrO_2$  (Αριστερά), Carbon (Μεσαία) και τέλος  $TiO_2$  (Δεξιά)