

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



**INKJET PRINTING : ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΕΠΤΩΝ
ΥΜΕΝΙΩΝ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΓΙΑ
ΕΥΚΑΜΠΤΑ ΟΡΓΑΝΙΚΑ Φ/Β ΚΑΙ ΟΤFTs**

1459

**ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ ΚΟΥΜΠΟΥΡΑΣ 5692
ΕΠΟΠΤΕΥΟΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΗΛΙΑΣ ΣΤΑΘΑΤΟΣ**

ΠΑΤΡΑ 2019

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το αντικείμενο αυτής της πτυχιακής εργασίας εστιάζει στην εκτύπωση ηλεκτρονικών στοιχείων και συγκεκριμένα οργανικών φωτοβολταϊκών και τρανζίστορ λεπτών μεμβρανών (OTFT).

Στο πρώτο μέρος θα αναφέρουμε στοιχεία για την δομή των οργανικών υλικών, τότε χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στην επιστήμη των ηλεκτρονικών, την εξέλιξη τους μέσα από το πέρασμα των τελευταίων δεκαετιών (από το 1980) και πώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να κατασκευάζουμε ημιαγώγιμα στοιχεία. Στο δεύτερο μέρος θα αναφερθούμε στα συμβατικά φωτοβολταϊκά (Φωτοβολταϊκά πυριτίου) και ειδικότερα στα οργανικά φωτοβολταϊκά και στις εφαρμογές τους. Στη συνέχεια θα κάνουμε σύγκριση των δυο αυτών τρόπων κατασκευής ηλιακών κελιών, αναλύοντας τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους. Στο τρίτο μέρος θα ασχοληθούμε με τα ανόργανα διπολικά τρανζίστορ (BJT) και τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET) αλλά και με τα οργανικά τρανζίστορ, συγκεκριμένα με τη δομή και τις κατηγορίες οργανικών ημιαγωγών για την κατασκευή τρανζίστορ λεπτών υμενίων (OTFT). Στο τελευταίο μέρος της εργασίας θα παρουσιάσουμε συνοπτικά τις μεθόδους εναπόθεσης οργανικών υμενίων, όπως επίσης και του τρόπου εκτύπωσης για την κατασκευή ενεργών ή παθητικών ηλεκτρονικών συσκευών, όπως τρανζίστορ λεπτού φιλμ, φωτοβολταϊκών αλλά και αντιστάσεων. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι εκτύπωσης ηλεκτρονικών, όπως screen printing, flexography, gravure, offset lithography, και inkjet printing τον οποίο θα αναλύσουμε περισσότερο από όλους.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	iii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
Εισαγωγή	1
1.1 Δομή Οργανικών Υλικών και οι Ηλεκτρονικές τους Ιδιότητες	2
1.1.1 Γενικά	2
1.2 Ηλεκτρονικές Ιδιότητες Στερεών Υλικών	2
1.3 Χρήση Οργανικών Υλικών σε Εύκαμπτες Ηλεκτρονικές Διατάξεις	4
1.4 Οργανικοί Ημιαγωγοί	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο και Λειτουργία Συστήματος	8
2.1 Ιστορική Αναδρομή Φωτοβολταϊκού Φαινομένου	8
2.2 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο	9
2.3 Συμβατικά Φωτοβολταϊκά στοιχεία	10
2.4 Φωτοβολταϊκά Πυριτίου (Si)	15
2.5 Οργανικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία (OPV's)	19
2.5.1 Οργανικά Φ/Β Μονού Στρώματος (Single Layer OPV's)	21
2.5.2 Οργανικά Φ/Β Διπλού Στρώματος (Bi-Layer OPV's)	22
2.5.3 Οργανικά Φ/Β Διεσπαρμένης Ετεροεπαφής (Bulk Hetero-Junction OPV's)	22
2.5.4 Χαρακτηριστική I-V Οργανικού Φ/Β Κελιού	24
2.5.5 Εφαρμογές Οργανικών Φ/Β	26
2.6 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Οργανικών Φ/Β Κελιών	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
Ανόργανα-Οργανικά Τρανζίστορ και η Λειτουργία τους	30
3.1 Εισαγωγή-Ιστορική Αναδρομή Τρανζίστορ	30
3.2 Συμβατικές Ηλεκτρονικές Διατάξεις	32
3.3 Τρανζίστορ	32
3.3.1 Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής (BJT)	33
3.3.2 Τρανζίστορ Εγκάρσιου Πεδίου Επαφής	35
3.3.3 Αρχή Λειτουργίας Τρανζίστορ (FET)	36
3.4 Οργανικά Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου (OFET)	40
3.4.1 Δομή Οργανικών Τρανζίστορ Λεπτού Φίλμ (OTFT)	40
3.4.2 Αρχή Λειτουργίας Οργανικών Τρανζίστορ	43
3.4.3 Εφαρμογές Οργανικών Τρανζίστορ	45
3.5 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Οργανικών Τρανζίστορ Λεπτού Φίλμ	48

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Inkjet Printing – Ανάπτυξη Λεπτών Υμενίων	50
4.1 Εισαγωγή	50
4.2 Τεχνικές Εκτύπωσης-Εναπόθεσης Λεπτών Υμενίων	52
4.3 Inkjet Printing	61
4.3.1 Ιδιότητες Διαλύματος και Σχηματισμός Σταγόνων	62
4.3.2 Διαδικασία Ξήρανσης και Σχηματισμός Υμενίου	63
4.3.3 Εφαρμογές Inkjet Printing στην Κατασκευή OPV's	64
4.3.4 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Τεχνικής Inkjet Printing	66
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	67

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δομή της ύλης είναι η αιτία των ιδιοτήτων που εμφανίζονται στα διάφορα υλικά. Από το 600 π.Χ. οι Έλληνες είχαν ανακαλύψει ότι το ήλεκτρο (κεχριμπάρι) και το γυαλί αποκτούσαν με την τριβή διαφορετικούς τύπους ηλεκτρικών φορτίων. Το 1750 ο Franklin ονόμασε, εντελώς αυθαίρετα, τον πρώτο τύπο θετικό φορτίο και το δεύτερο τύπο αρνητικό φορτίο. Το 1898 ο Thomson ανακάλυψε το ηλεκτρόνιο και έδειξε ότι έχει αρνητικό φορτίο. Την ανακάλυψη του ηλεκτρονίου ακολούθησε η ανακάλυψη του πρωτονίου (θετικό φορτίο) και του νετρονίου (ουδέτερο φορτίο) και, σύμφωνα με τον Thomson, τα άτομα ήταν κομμάτια θετικά φορτισμένης ύλης εμπεριέχοντα ηλεκτρόνια όπως ένα κέικ με σταφίδες. Σήμερα γνωρίζουμε ότι κάθε άτομο αποτελείται από ένα μικρό πυρήνα πρωτονίων και νετρονίων και έναν αριθμό ηλεκτρονίων σε κάποια απόσταση απ'αυτά. Λόγω της ηλεκτρικής ουδετερότητας του ατόμου, ο αριθμός των ηλεκτρονίων είναι ίσος με τον αριθμό των πρωτονίων.

1.1 ΔΟΜΗ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΤΟΥΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

1.1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οργανική ένωση ονομάζεται κάθε μέλος μιας μεγάλης κατηγορίας αερίων, υγρών και στερεών χημικών ενώσεων, που περιέχουν άνθρακα. Η ύπαρξη του χημικού στοιχείου άνθρακα, είναι αναγκαία προϋπόθεση για να χαρακτηριστεί αυτή ως οργανική.

Τέτοιες ενώσεις είναι, μεταξύ άλλων, και ουσίες καθημερινής χρήσης, όπως η αιθανόλη, το προπάνιο και το βουτάνιο (που χρησιμοποιούνται ως καύσιμο στα γκαζάκια υγραερίου), τα πλαστικά, το καουτσούκ κ.λ.π. Επίσης, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, το υγραέριο, η βενζίνη, η κηροζίνη και άλλα ευρύτατα χρησιμοποιούμενα προϊόντα είναι μίγματα πολλών οργανικών ουσιών. Στις οργανικές ενώσεις (DNA, αμινοξέα, πρωτεΐνες κλπ.) στηρίζεται και το φαινόμενο της ζωής, τουλάχιστον όπως το γνωρίζουμε στη Γη, σε τέτοιο βαθμό που δεν είναι υπερβολή να πούμε ότι (σχεδόν) τα πάντα στηρίζονται στις οργανικές ενώσεις.

Από το 1950 ή τεχνολογία των ημιαγωγίων υλικών βασίζεται σε ανόργανους ημιαγωγούς όπως το πυρίτιο (Si), το αρсениούχο γάλλιο (GaAs), το γερμάνιο (Ge) και άλλα. Αυτού του είδους τα υλικά χρησιμοποιήθηκαν και μονιμοποιήθηκαν άμεσα σε τεχνολογικές εφαρμογές όπως Η/Υ, φωτοβολταϊκές κυψελίδες, οθόνες και άλλα.

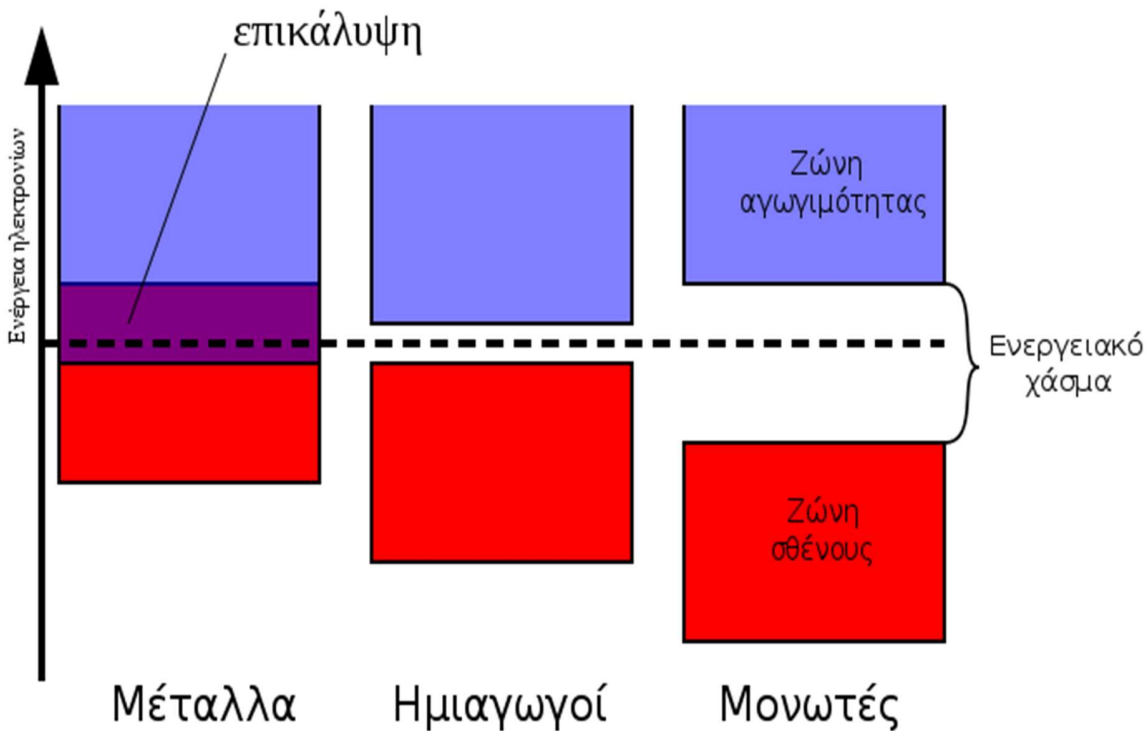
Με το πέρασμα των χρόνων, λόγω των αναγκών που δημιουργήθηκαν με την εξέλιξη της τεχνολογίας και τις απαιτήσεις των καιρών αναδείχθηκε η ανάγκη για νέα υλικά τα οποία θα ανταποκρίνονται στις προκλήσεις αυτές. Οι επιστημονικές έρευνες εστίασαν το ενδιαφέρον τους στην μελέτη οργανικών ημιαγωγών οι οποίοι είναι πολλά υποσχόμενοι για την ανάδειξη μιας νέας εποχής της τεχνολογίας, της νανο-τεχνολογίας και κατ' επέκταση της νανο-ηλεκτρονικής καθώς τα υλικά των ημιαγωγών αυτών είναι προϊόν νανοτεχνολογίας. Μόλις το 1980 εγκαινιάστηκαν οι πρώτες εφαρμογές οργανικών ηλεκτρονικών με τις οθόνες υγρών κρυστάλλων και τα τρανζίστορ FETs.

1.2 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα στερεά σώματα, ανάλογα με την ικανότητα τους να διαρρέονται η όχι ηλεκτρικό ρεύμα, μπορούν να χωριστούν σε δύο γενικές κατηγορίες: στους καλούς αγωγούς και στους κακούς αγωγούς ή μονωτές (insulators). Οι καλοί αγωγοί χωρίζονται και αυτοί με την σειρά τους στα μέταλλα, τα οποία χαρακτηρίζονται από την μεγάλη ευκολία τους να άγουν το ρεύμα, και στους ημιαγωγούς (semiconductors) [1].

Η κίνηση των ηλεκτρονίων στο εσωτερικό ενός υλικού καθορίζει και την αγωγιμότητα αυτού (πιο ελεύθερη η κίνηση των ηλεκτρονίων συνεπάγεται μεγαλύτερη αγωγιμότητα). Τα ηλεκτρόνια στην στοιβάδα σθένους καθορίζουν την ηλεκτρική, την μαγνητική και οπτική συμπεριφορά των υλικών. Ένα άτομο αποτελείται από τον πυρήνα και τα ηλεκτρόνια τα οποία περιστρέφονται γύρω από αυτόν σε προκαθορισμένες τροχιές οι οποίες ονομάζονται στοιβάδες, η στοιβάδα με την μεγαλύτερη απόσταση από τον πυρήνα (εξωτερική στοιβάδα) έχει και την μεγαλύτερη στάθμη ενέργειας. Με τον τύπο $2 \cdot n^2$ (όπου n η σειρά της στοιβάδας), εκφράζουμε τον αριθμό των ηλεκτρονίων που μπορούν να βρεθούν σε μία στοιβάδα.

Για την ηλεκτρική συμπεριφορά φέρουν μεγάλη ευθύνη η ζώνη σθένους και η ζώνη αγωγιμότητας, της οποίας τα ηλεκτρόνια είναι ελεύθερα και συμβάλουν στην αγωγιμότητα, καθώς και η απόσταση μεταξύ αυτών των ζωνών. Σήμερα, οι ιδιότητες των ημιαγωγών ερμηνεύονται με βάση την κβαντομηχανική και για τη διάκριση μεταξύ μετάλλων, ημιαγωγών και μονωτών χρησιμοποιούμε ακριβέστερο κριτήριο, την τιμή του ενεργειακού χάσματος. Οι ζώνες διαχωρίζονται μεταξύ τους από ενεργειακά χάσματα, δηλαδή απαγορευμένες τιμές ενέργειες στις οποίες δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια. Ως ενέργεια χάσματος, E_g (energy ή band gap) ορίζεται η ενεργειακή απόσταση, μετρημένη συνήθως σε eV, των γεμάτων από τις άδειες επιτρεπτές ηλεκτρονιακές στάθμες [2].



Σχ.1
Ενεργειακές ζώνες στερεών υλικών

1.3 ΧΡΗΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΕΥΚΑΜΠΤΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Αξιοσημείωτο είναι το ενδιαφέρον που έχει εκδηλωθεί τα τελευταία χρόνια για την ανάπτυξη υβριδικών διατάξεων (συνδυασμός ανόργανων και οργανικών υλικών), όπως σύνθετες δομές που αποτελούνται από αγωγικά πολυμερή και νανοσωματίδια. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των υλικών και της νανοτεχνολογίας έχουμε την δυνατότητα ανάπτυξης υλικών με ελεγχόμενες ιδιότητες. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η τεχνολογία αυτή είναι το χαμηλό κόστος, η απλή διαδικασία παρασκευής τους, η ικανότητα ανάπτυξης σε μεγάλες διαστάσεις, ακόμα και σε εύκαμπτα υποστρώματα, αλλά και η δυνατότητα επιλογής βασικών χαρακτηριστικών τους, όπως για παράδειγμα το φάσμα απορρόφησης.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως υποστρώματα στις εύκαμπτες ηλεκτρονικές διατάξεις πρέπει να ικανοποιούν συγκεκριμένα κριτήρια όπως:

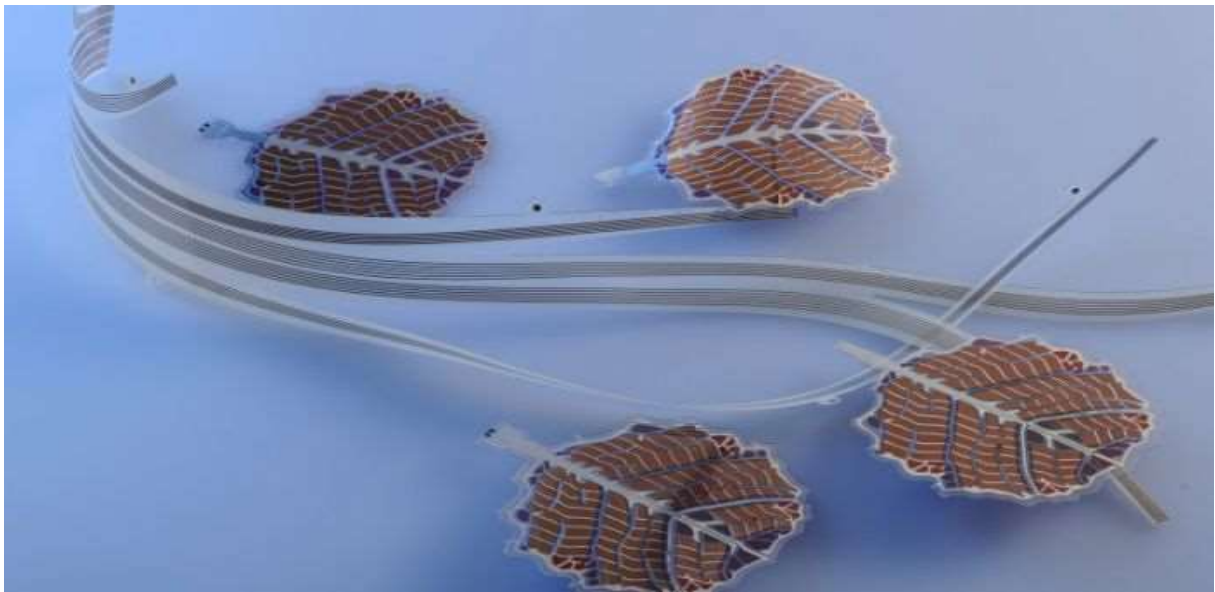
- 1) Να έχουν μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα
- 2) Να είναι ελαφριά
- 3) Να έχουν χαμηλό κόστος
- 4) Να είναι διαφανή
- 5) Να μην παρουσιάζουν ατέλειες δομής
- 6) Να καθίσταται δυνατή η επεξεργασία τους
- 7) Να είναι εύκαμπτο
- 8) Να είναι ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες
- 9) Να αντιστέκονται στην δράση διαλυτών

Πρόβλημα παρουσιάζεται στο χρόνο ζωής αυτών των εύκαμπτων ηλεκτρονικών διατάξεων καθώς τα οργανικά και πολυμερικά τους μέρη αλλοιώνονται σε συνθήκες περιβάλλοντος σε σύντομο χρονικό διάστημα. Αυτός είναι ένας από τους κύριους λόγους που εμποδίζεται η διάδοση της συγκεκριμένης τεχνολογίας και για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος προτείνεται η ενθυλάκωση τους με σκοπό την προστασία τους από εξωτερικούς παράγοντες όπως η υγρασία και το οξυγόνο που υπάρχει στο περιβάλλον.

Τα εύκαμπτα ηλεκτρονικά βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς. Μερικές από αυτές είναι στην κατασκευή οργανικών φωτοβολταϊκών (OPV's), σε εφαρμογές φωτισμού (OLED's) που εστιάζεται και το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας, στην κατασκευή εύκαμπτων οθονών, επεξεργαστών και βιο-αισθητήρων, καθώς επίσης και στην ενσωμάτωση τους σε προϊόντα ένδυσης.



Εικόνα 1
Εύκαμπτη οθόνη



Εικόνα 2
Εύκαμπτα οργανικά φωτοβολταϊκά σε σχήμα φύλλου

1.4 ΟΡΓΑΝΙΚΟΙ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ

Οι οργανικοί ημιαγωγοί – νέα μόρια με βάση τον άνθρακα που έχουν παρόμοιες ηλεκτρικές ιδιότητες με πιο συμβατικά ημιαγωγικά υλικά όπως το πυρίτιο και το γερμάνιο – είναι ένα πολύ ενδιαφέρον ερευνητικό θέμα διότι πρακτικοί και υψηλών επιδόσεων οργανικοί ημιαγωγοί θα ανοίξουν ολόκληρες νέες κατηγορίες μελλοντικών ηλεκτρονικών συσκευών. Φανταστείτε ένα «ψηφιακό χαρτί» σε μέγεθος ίσο μ' ένα μηνιαίο περιοδικό που θα μπορείτε να το αναδιπλώνετε και να το βάζετε στο πορτοφόλι σας ή τεράστια φύλλα με φωτοβολταϊκά κύτταρα τα οποία θα είναι πάμφθηνα διότι θα παράγονται στην ουσία από ink-jet εκτυπωτές αλλά και άλλα συστήματα όπως είναι οι οθόνες οι οποίες έχουν υπόστρωμα το γυαλί [4].

Οι οργανικοί ημιαγωγοί διακρίνονται σε :

- Μικρομόρια (Small Molecules) και
- Συζευγμένα Πολυμερή (Conjugated Polymers)

Τα συζυγή πολυμερή (**οργανικοί ημιαγωγοί**) συνδυάζουν τις οπτικές και ηλεκτρικές ιδιότητες ενός κλασσικού ημιαγωγού με τις εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες ενός πολυμερούς. Οι σχετικές διατάξεις αναπτύσσονται συνήθως από διάλυμα με διάφορες απλές σε διαδικασία τεχνικές εναπόθεσης όπως με σταγόνες (drop casting), με φυγοκέντριση (spin-coating) και με εκτύπωση (printing), τεχνικές που λειτουργούν σε θερμοκρασίες δωματίου. Παράλληλα, τα πολυμερικά φωτοβολταϊκά δεν εμπεριέχουν υγρά όπως τα αντίστοιχα ηλεκτροχημικά, υγρά τα οποία οδηγούν σε απαίτηση προστασίας από τον αέρα, ενώ μπορούν να εναποτεθούν εύκολα σε μεγάλες πλαστικές εύκαμπτες επιφάνειες [5].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

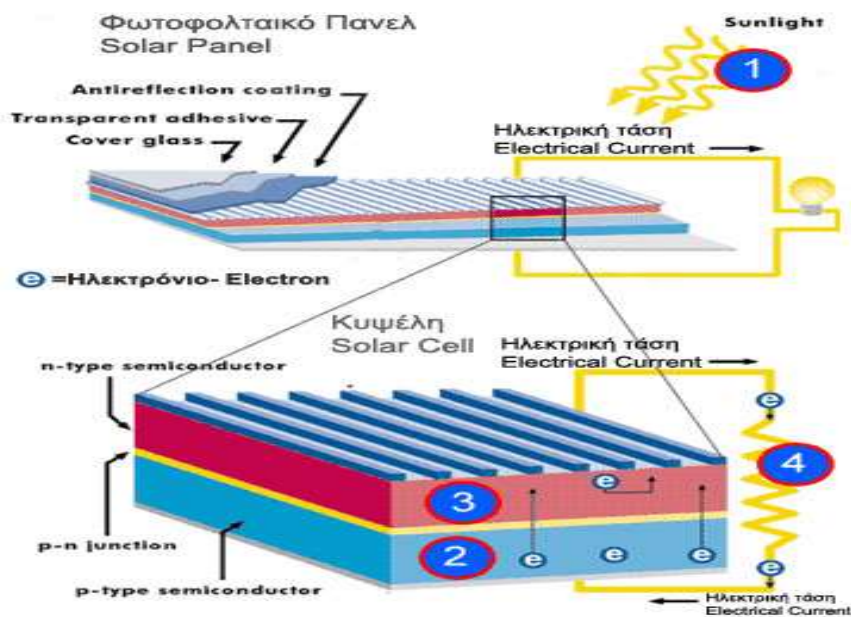
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τον Γάλλο Φυσικό Alexandre Edmond Becquerel το 1839, ο οποίος ανακάλυψε ότι μπορεί να παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα όταν συγκεκριμένες κατασκευές εκτεθούν στο φως. Οι Αμερικάνοι Adams και Day το 1876 χρησιμοποιώντας έναν κρύσταλλο σεληνίου είχαν κάνει επίδειξη αυτού του φαινομένου. Η απόδοση σε αυτή την περίπτωση ήταν μόνο 1%. Το 1905 ο Albert Einstein διατύπωσε την εξήγηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου (υπόθεση του φωτονίου). Το 1949 οι Αμερικάνοι Shockley, Bardeen και Brattain ανακάλυψαν το τρανζίστορ διευκρινίζοντας τη φυσική των p και n ενώσεων των ημιαγωγικών υλικών. Το πρώτο φωτοβολταϊκό κύτταρο με απόδοση κοντά στο 6% κατασκευάστηκε το 1956, ενώ αργότερα κατασκευάστηκε το φωτοβολταϊκό κύτταρο από πυρίτιο, το οποίο λειτουργούσε με απόδοση του 10%. Η γρήγορη ανάπτυξη της τεχνολογίας στην εξερεύνηση του διαστήματος διάνοιξε εξαιρετικές προοπτικές για την χρήση φωτοβολταϊκών κυττάρων. Το 1958, 108 ηλιακά κύτταρα είχαν σταλεί στο διάστημα για δοκιμή. Το 1970 η ετήσια παραγωγή φωτοβολταϊκών πλαισίων για διαστημικές εφαρμογές ήταν 500 m². Η επίγεια χρήση ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του '70, παίρνοντας δυναμική από την πετρελαϊκή κρίση του 1973-74 και δίνοντας ερεθίσματα για την εκπόνηση πληθώρας ερευνητικών μελετών. Η προσπάθεια της επιστημονικής κοινότητας ήταν να μειωθεί το κόστος των φωτοβολταϊκών πλαισίων, με την εύρεση νέων φθηνότερων υλικών. Σήμερα τα φωτοβολταϊκά έχουν γίνει κομμάτι της καθημερινής μας ζωής. Το φάσμα των εφαρμογών τους κυμαίνεται από μικρής κλίμακας συστήματα σε ρολόγια και υπολογιστές τσέπης, μέχρι εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος και ισχύος [6].

2.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και η λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος στηρίζεται στις βασικές ιδιότητες των ημιαγωγικών υλικών σε ατομικό επίπεδο, όταν ένα προσπίπτον φωτόνιο (πακέτο ενέργειας) κτυπά ένα ηλεκτρόνιο στη θεμελιώδη κατάσταση οι ανόργανοι ημιαγωγοί δημιουργούν ελεύθερα φορτία. Εάν φέρουμε σε επαφή δύο κομμάτια πυριτίου τύπου n (πλεόνασμα σε ηλεκτρόνια) και τύπου p (πλεόνασμα σε οπές) δημιουργείται μια δίοδος ή αλλιώς ένα ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των δύο υλικών το οποίο επιτρέπει την κίνηση ηλεκτρονίων προς μια κατεύθυνση (συνεχές ρεύμα). Τα φωτόνια όταν προσπίπτουν στην επιφάνεια ενός Φ/Β κελιού διαπερνούν την επαφή τύπου n και χτυπούν τα άτομα της επαφής τύπου p, της οποίας τα ηλεκτρόνια ξεκινούν και κινούνται μεταξύ των οπών ώσπου τελικά πλησιάζουν την περιοχή τύπου n και έλκονται από αυτήν και ξεπερνούν το ενεργειακό χάσμα της, έχοντας πλέον πληθώρα ελεύθερων ηλεκτρονίων στην επαφή τύπου n που έχουμε την δυνατότητα να εκμεταλλευτούμε τοποθετώντας για παράδειγμα ένα φορτίο ανάμεσα στις δύο επαφές (ένα ηλεκτρόδιο για κάθε επαφή). Η φωτοβολταϊκή διαδικασία αποτελείται από τέσσερα στάδια: Απορρόφηση φωτός, δημιουργία ηλεκτρικών φορτίων, μεταφορά ηλεκτρικών φορτίων και συλλογή ηλεκτρικών φορτίων (Forrest 2005).

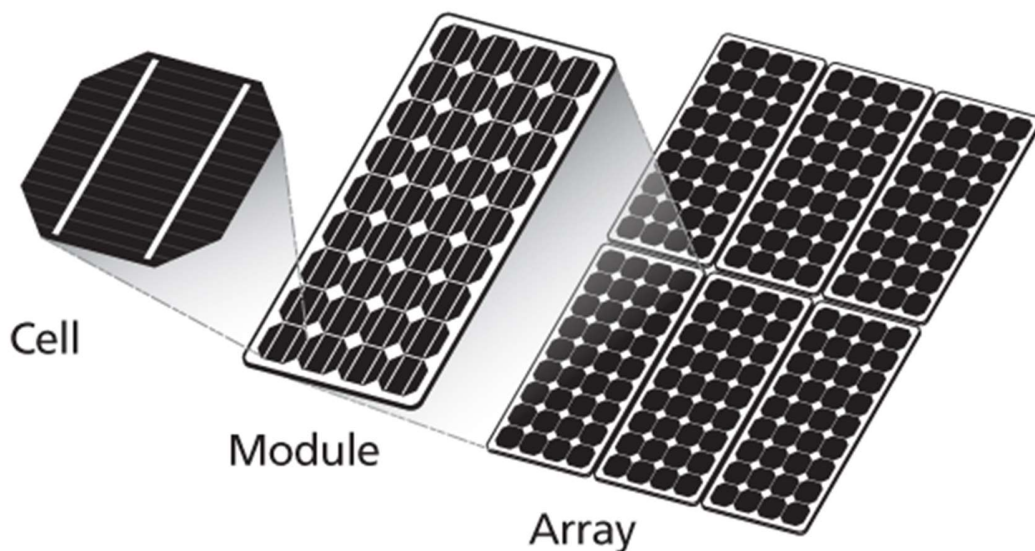


Εικόνα 3
Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια Φ/Β συστοιχία είναι συνεχούς ρεύματος (DC), και για το λόγο αυτό οι πρώτες χρήσεις των φωτοβολταϊκών αφορούσαν εφαρμογές DC τάσης: κλασικά παραδείγματα είναι ο υπολογιστής τσέπης («κομπιουτεράκι») και οι δορυφόροι. Με την προοδευτική αύξηση όμως του βαθμού απόδοσης, δημιουργήθηκαν ειδικές συσκευές – οι αναστροφείς (inverters) – που σκοπό έχουν να μετατρέψουν την έξοδο συνεχούς τάσης της Φ/Β συστοιχίας σε εναλλασσόμενη τάση. Με τον τρόπο αυτό, το Φ/Β σύστημα είναι σε θέση να τροφοδοτήσει μια σύγχρονη εγκατάσταση (κατοικία, θερμοκήπιο, μονάδα παραγωγής κλπ.) που χρησιμοποιεί κατά κανόνα συσκευές εναλλασσόμενου ρεύματος(AC) [7].

2.3 ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Τα συμβατικά φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι φτιαγμένα συνήθως από πυρίτιο (Si) ή γερμάνιο, για την κάλυψη των ενεργειακών μας αναγκών και την παραγωγή της απαιτούμενης ισχύος στις διάφορες καθημερινές μας απαιτήσεις αυτά τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (κελιά) ενώνονται μεταξύ τους για να δημιουργήσουν Φ/Β πλαίσια (modules) και αυτά με την σειρά τους δημιουργούν ολόκληρες Φ/Β συστοιχίες (arrays). Διότι όσο μεγαλύτερη η επιφάνεια της Φ/Β συστοιχίας, αυξάνεται το πλήθος των Φ/Β κελιών άρα τόσο μεγαλύτερη η ισχύς που παράγεται.



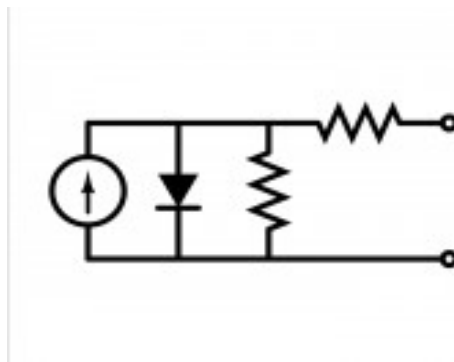
Εικόνα 4
Φ/Β στοιχείο, πλαίσιο και συστοιχία

Τα χαρακτηριστικά στα οποία πρέπει να δώσουμε προσοχή για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς, λειτουργίας και της απόδοσης ενός Φ/Β στοιχείου είναι τα εξής:

- Το ισοδύναμο κύκλωμα
- Χαρακτηριστική καμπύλη I/V
- Σημείο λειτουργίας Μέγιστης Ισχύος (ΣΜΙ)
- Ευθεία Φόρτου (ΕΦ)

- **Το ισοδύναμο κύκλωμα**

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου αποτελείται από μία πηγή σταθερού ρεύματος παράλληλα με μία πραγματική δίοδο, μία αντίσταση απωλειών διαρροής συνδεδεμένη παράλληλα με την δίοδο και μία αντίσταση απωλειών στον δρόμο ροής συνδεδεμένη σε σειρά με την δίοδο. Η παράλληλη αντίσταση (R_p) εκφράζει την διαρροή του ρεύματος στο εσωτερικό της επαφής p-n μεταξύ των σημείων που βρίσκονται σε διαφορά δυναμικού ίση με την τάση στα άκρα της διόδου και η εν σειρά αντίσταση (R_s) εκφράζει την ωμική αντίσταση μεταξύ του Φ/Β στοιχείου και των ηλεκτροδίων καθώς και την αντίσταση του ημιαγωγού.



Εικόνα 5
Ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β στοιχείου

Δύο συνθήκες οι οποίες πρέπει να δώσουμε προσοχή είναι το **ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc})** που ρέει όταν οι ακροδέκτες είναι βραχυκυκλωμένοι, και η **τάση ανοικτού κυκλώματος (V_{oc})** στα άκρα του Φ/Β στοιχείου όταν αυτά μένουν ανοικτά.

Αφού βραχυκυκλώσουμε τα άκρα το κυκλώματος τότε η δίοδος δεν θα διαρρέεται από ρεύμα διότι η τάση θα είναι ίση με μηδέν ($V=0$) άρα όλο το ρεύμα της πηγής σταθερού ρεύματος θα ρέει μέσα από τους βραχυκυκλωμένους ακροδέκτες (I_{sc}). Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι ανάλογο της ηλιακής έντασης.

Τύποι που εκφράζουν αυτές τις συνθήκες:

$$I_{sc} = I_0 \cdot (e^{(q \cdot V)/(k \cdot T)} - 1)$$

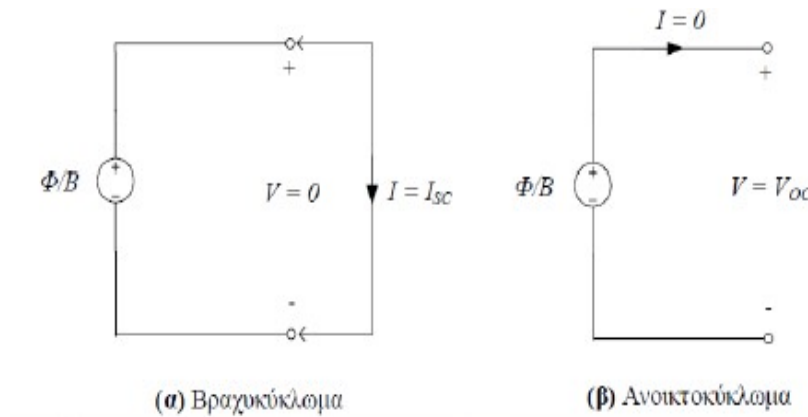
$$V_{oc} = (k \cdot T/q) \cdot \ln [(I_{sc}/I_0) + 1]$$

I_0 : είναι το ρεύμα κόρου (σε A)

q : είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου ($q=1,602 \cdot 10^{-19}$ C)

k : είναι η σταθερά Boltzmann ($k=1,381 \cdot 10^{-23}$ J/°K)

T : είναι η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin (°K)



Εικόνα 6

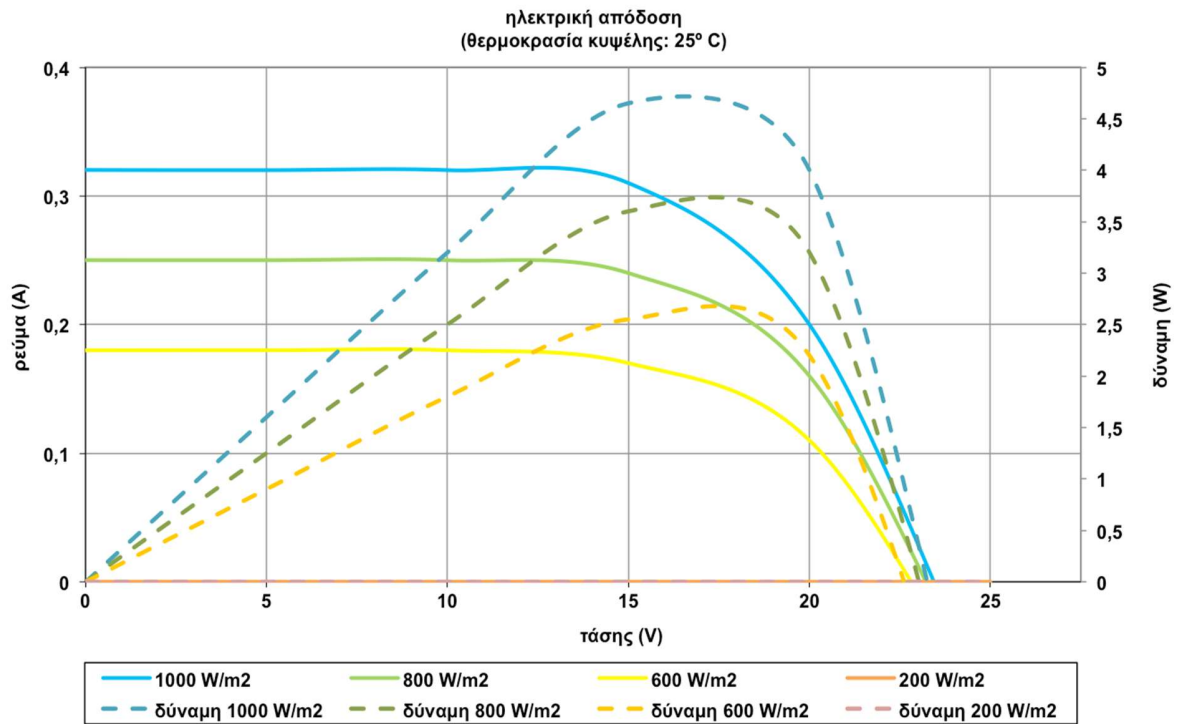
(α) Ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc})

(β) Τάση ανοικτού κυκλώματος (V_{oc})

- **Χαρακτηριστική καμπύλη I/V και Σημείο Μέγιστης Ισχύος**

Η χαρακτηριστική καμπύλη I/V μας βοηθά στην κατανόηση της συμπεριφοράς του Φ/B στοιχείου μας επιτρέπει να εντοπίσουμε τα I_{sc} και V_{oc} , οι οποίες είναι σημαντικές παράμετροι και σε συνδυασμό με την καμπύλη ισχύος εντοπίζουμε το σημείο μέγιστης ισχύος (ΣΜΙ), δηλαδή την καλύτερη δυνατή απόδοση του Φ/B στοιχείου. Όταν η τάση είναι μηδέν (που συνεπάγεται ότι έχουμε την τιμή I_{sc}) τότε δεν παράγεται ισχύς αφού $P=V \cdot I$ (Watt), όπως αντίστοιχα όταν το ρεύμα είναι μηδέν (που συνεπάγεται ότι έχουμε την τιμή V_{oc}), όταν όμως τοποθετηθεί στα άκρα του Φ/B στοιχείου κάποιο φορτίο τότε κάποια τάση και κάποιο ρεύμα θα προκύψουν ώστε να παραχθεί ισχύς η οποία θέλουμε να συμπίπτει με την μεγαλύτερη δυνατή τιμή της καμπύλης ισχύος.

Το σημείο μέγιστης ισχύος P_R αντιστοιχεί σε μία ονομαστική τάση V_R και ένα ονομαστικό ρεύμα I_R . Η χαρακτηριστική I/V εξαρτάται από την ηλιακή ένταση και την θερμοκρασία.



Εικόνα 7
Χαρακτηριστικές καμπύλες I/V (συνεχής γραμμές) και καμπύλες ισχύος (διακεκομμένες γραμμές) για διάφορες εντάσεις φωτός

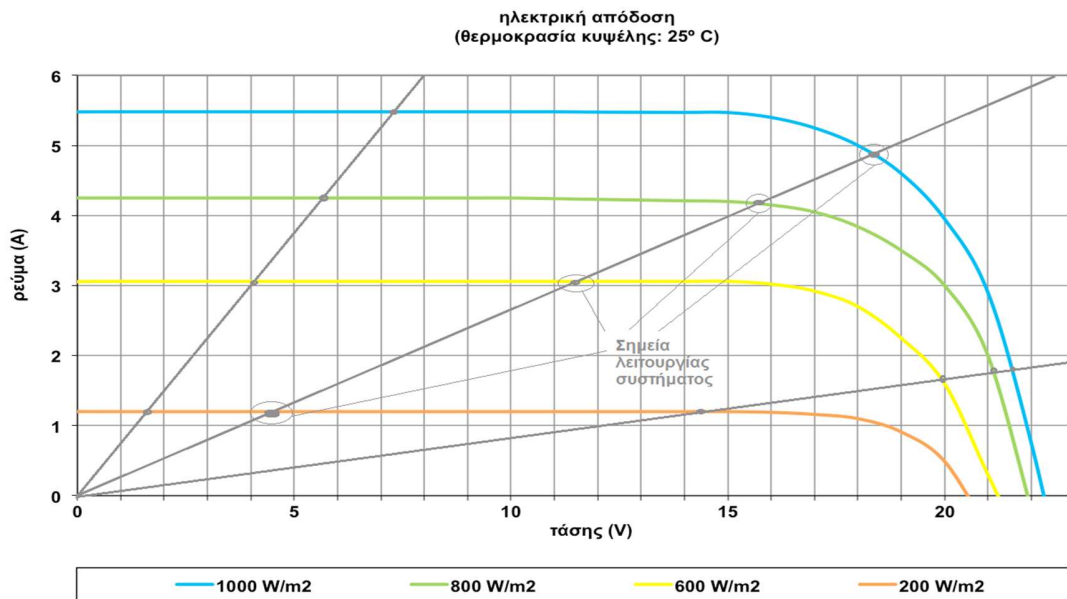
Ένας άλλος για να προσδιορίσουμε το σημείο μέγιστης ισχύος (ΣΜΙ) είναι με τον συντελεστή πλήρωσης FF (fill factor) ο οποίος δίνεται από την σχέση:

$$FF = P_R / (V_{oc} \cdot I_{sc}) = (V_R \cdot I_R) / (V_{oc} \cdot I_{sc})$$

- **Ευθεία Φόρτου**

Η ευθεία φόρτου (κατά προσέγγιση ευθεία) εκφράζει τις τιμές που παίρνει το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα του Φ/Β στοιχείου συναρτήσει της τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδο του κυκλώματος, $I = f(V)$. Στο σημείο στο οποίο εφάπτεται η ευθεία φόρτου με την χαρακτηριστική I/V , είναι το σημείο λειτουργίας του Φ/Β στοιχείου. Το οποίο θέλουμε να είναι όσο πιο κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος ή ακόμα και να συμπίπτει με το σημείο μέγιστης ισχύος, αυτό εξαρτάται από την καμπύλη I/V η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με την ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στο Φ/Β στοιχείο και από την ευθεία φόρτου η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με το φορτίο. Για παράδειγμα αν συμπίπτουν η ευθεία φόρτου και το ΣΜΙ και μεταβληθεί η ηλιακή ενέργεια πλέον η ευθεία φόρτου και το ΣΜΙ δεν θα συμπίπτουν διότι θα μεταβληθεί η χαρακτηριστική I/V , όπως αντίστοιχα το ίδιο θα συμβεί εάν μεταβληθεί το φορτίο θα μεταβληθεί η ευθεία φόρτου. Η ισχύς είναι που προσφέρεται στο φορτίο είναι το γινόμενο της τάσης και του ρεύματος θα υπάρχει πάντα μια συγκεκριμένη τιμή αντίστασης για την οποία θα έχουμε την μέγιστη ισχύ λειτουργίας :

$$R_m = V_m / I_m$$



Εικόνα 8

Χαρακτηριστική I/V και Ευθεία Φόρτου Φ/Β στοιχείου για διάφορες εντάσεις φωτός και ωμικής αντίστασης αντίστοιχα

Όπως βλέπουμε στην εικόνα 8 το σημείο λειτουργίας του συστήματος κινείται κατά μήκος της χαρακτηριστικής I/V ή της $E\Phi$ αναλόγως αν είναι σταθερή η ηλιακή ενέργεια ή το φορτίο του συστήματος αντίστοιχα, δηλαδή για σταθερή ηλιακή ενέργεια (π.χ για 1000 W/m^2) και μεταβαλλόμενο φορτίο το σημείο λειτουργίας κινείται κατά μήκος της χαρακτηριστικής I/V διότι : $I = (1/R) \cdot V$, δηλαδή η ευθεία φόρτου έχει κλίση $1/R$ οπότε όσο αυξάνεται η αντίσταση μειώνεται η κλίση της ευθείας άρα το σημείο λειτουργίας μετακινείται προς τα δεξιά, ενώ αν μειωθεί η αντίσταση το σημείο λειτουργίας θα μετακινηθεί προς τα αριστερά. Αν έχουμε σταθερό φορτίο (π.χ η μεσαία $E\Phi$) και μεταβαλλόμενη ηλιακή ενέργεια τότε το σημείο λειτουργίας μετακινείται κατά μήκος της ευθείας φόρτου. Όσο μειώνεται η ηλιακή ενέργεια το σημείο λειτουργίας μετακινείται προς τα αριστερά ενώ όσο αυξάνεται προς τα δεξιά αντίστοιχα.

2.4 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΥΡΙΤΙΟΥ (Si)

Το πυρίτιο είναι το πιο ευρύ διαδεδομένο υλικό για την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων στην παγκόσμια βιομηχανία, αφού αποτελεί την πρώτη ύλη για το 90% της αγοράς των φωτοβολταϊκών. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το υλικό αυτό είναι:

- Υπάρχει σε αφθονία στον πλανήτη, συγκεκριμένα είναι το δεύτερο μετά το οξυγόνο. Το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) ή κοινώς η άμμος και ο χαλαζίτης αποτελούν το 28% του φλοιού της γής και είναι φιλικό προς το περιβάλλον.
- Εύκολη μορφοποίηση και σχετικά εύκολη μετατροπή στην μονοκρυσταλλική του μορφή.
- Διατήρηση των ηλεκτρικών του ιδιοτήτων μέχρι τους $125 \text{ }^\circ\text{C}$ κάτι που επιτρέπει την χρήση πυριτίου σε δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες.
- Πολύ σημαντικό στοιχείο, που συνέβαλε στην γρήγορη ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών στοιχείων τα τελευταία χρόνια, ήταν η ήδη αναπτυγμένη τεχνολογία, στην βιομηχανία της επεξεργασίας του πυριτίου, στον τομέα της ηλεκτρονικής (υπολογιστές, τηλεοράσεις κλπ).

Τα Φ/Β πυριτίου διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες με την σειρά τους, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους όπως το πάχος και η δομή του ημιαγωγικού υλικού τους. Οι τύποι αυτοί αναφέρονται παρακάτω.

❖ Φ/Β πολυκρυσταλλικού πυριτίου

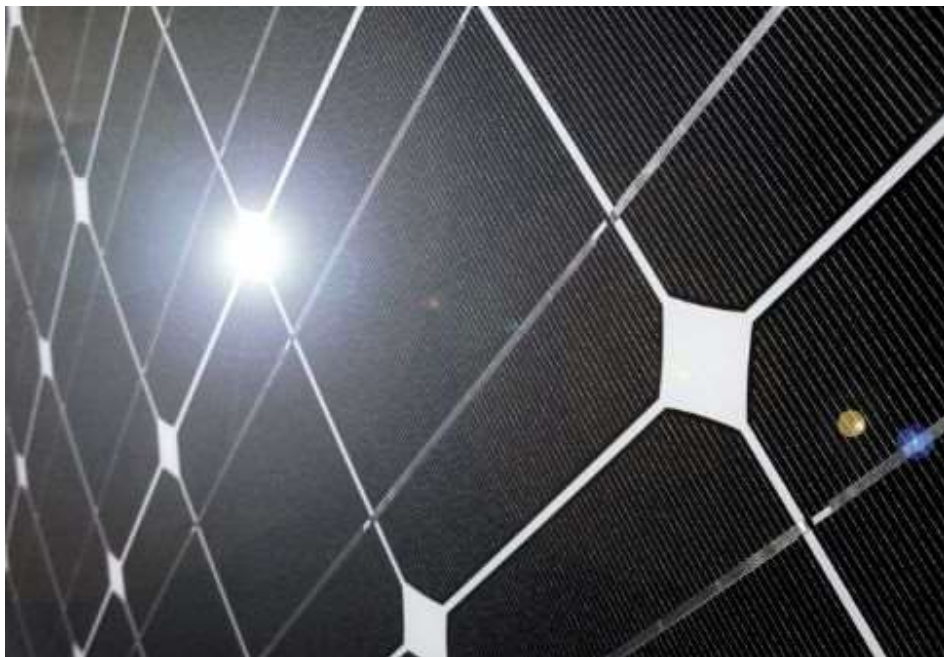
Τα πολυκρυσταλλικά Φ/Β κατασκευάζονται από ράβδους λιωμένου και επανακρυσταλλομένου πυριτίου. Για την παραγωγή τους οι ράβδοι του πυριτίου κόβονται σε λεπτά τμήματα από τα οποία κατασκευάζεται η κυψέλη του φωτοβολταϊκού. Η διαδικασία κατασκευής τους είναι απλούστερη από εκείνη των μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών με αποτέλεσμα το φθηνότερο κόστος παραγωγής. Παρουσιάζουν όμως σε γενικές γραμμές μικρότερη απόδοση. Το πάχος του είναι περίπου 0,3 χιλιοστά και επίσης είναι διακριτές οι κρυσταλλικές του επιφάνειες, οι οποίες όλες μαζί απαρτίζουν μια πολυκρυσταλλική επιφάνεια. Όσο μεγαλύτερες είναι οι επιφάνειες αυτές τόσο καλύτερη απόδοση έχει το Φ/Β στοιχείο, στο εμπόριο η απόδοση τους κυμαίνεται από 13% - 15%.



Εικόνα 9
Φ/Β πολυκρυσταλλικού πυριτίου

❖ Φ/Β μονοκρυσταλλικού πυριτίου

Τα Φ/Β μονοκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται από κυψέλες που έχουν κοπεί από έναν κυλινδρικό κρύσταλλο πυριτίου, αποτελούν τα πιο αποδοτικά Φ/Β με απόδοση 15% - 18% και την καλύτερη σχέση απόδοσης επιφάνειας σε σχέση με τα υπόλοιπα Φ/Β αλλά λόγω της πολύπλοκης κατασκευής τους που απαιτεί την κατασκευή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι υψηλό το κόστος της κατασκευής τους.



Εικόνα 10
Φ/Β μονοκρυσταλλικού πυριτίου

❖ Φ/Β άμορφου πυριτίου

Τα Φ/Β της κατηγορίας αυτής αποτελούνται από ένα λεπτό στρώμα πυριτίου εναποθεθεί ομοιόμορφα σε κατάλληλο υπόβαθρο, όπου σαν υπόβαθρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεγάλο φάσμα υλικών, από δύσκαμπτα μέχρι ελαστικά με αποτέλεσμα μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών ιδιαίτερα σε καμπύλες ή εύκαμπτες επιφάνειες. Το άμορφο πυρίτιο ενώ παρουσιάζει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στην απορρόφηση φωτός η απόδοσή του είναι 12% - 13%, χαμηλότερη από τα άλλα είδη αλλά το φθινό κόστος κατασκευής τους τα κάνει ιδανικά για εφαρμογές όπου δεν απαιτείται υψηλός βαθμός απόδοσης.



Εικόνα 11
Φ/Β άμορφου πυριτίου

2.5 ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (OPV's)

Βάση για την ανάπτυξη των οργανικών φωτοβολταϊκών αποτελεί η ανακάλυψη του φαινομένου αγωγιμότητας σε οργανικές ουσίες εμπλουτισμένες με αλογόνο το 1954. Στα χρόνια που ακολούθησαν πραγματοποιήθηκε συστηματική μελέτη γύρω από τις ιδιότητες μεταφοράς ηλεκτρικών φορτίων σε μικρά οργανικά μόρια. Κατά το τέλος της δεκαετίας του '70 και τις αρχές της δεκαετίας του '80 εδραιώθηκαν οι πρώτες ερευνητικές δραστηριότητες στο πεδίο των οργανικών ημιαγωγών [8].

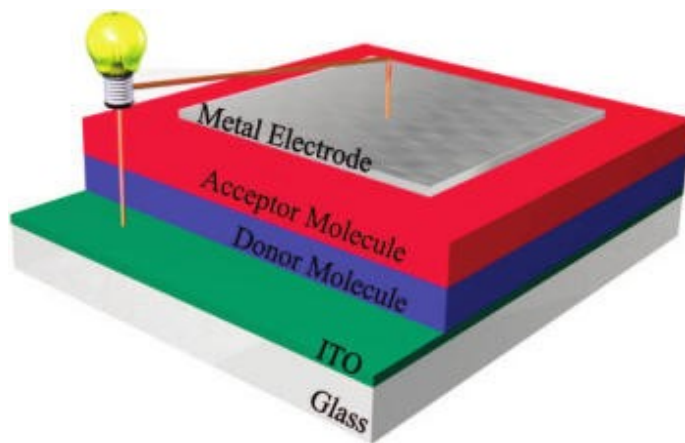
Η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ενός Φ/Β κελιού οργανικών υλικών είναι παρόμοια με αυτή ενός Φ/Β κελιού ανόργανων υλικών, η κύρια διαφορά των οργανικών Φ/Β διατάξεων από αυτές των ανόργανων Φ/Β διατάξεων είναι ότι η απορρόφηση φωτός δεν δημιουργεί ελεύθερους φορείς φορτίου αλλά δεσμευμένους. Η διαδικασία αυτή αποτελείται από δύο λειτουργίες που συμβαίνουν στο Φ/Β στοιχείο όταν προσπίπτει σε αυτό το ηλιακό φως, η πρώτη είναι η παραγωγή ηλεκτρικών φορτίων μέσω φωτός σε ένα ελαφρύ απορροφητικό υλικό και η δεύτερη ο διαχωρισμός των ηλεκτρικών φορτίων στην αγώγιμη επαφή η οποία θα τον μετατρέψει αυτόν τον διαχωρισμό σε διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού. Τα οργανικά Φ/Β είναι δίοδοι από ημιαγώγιμα υλικά που δέχονται την ηλιακή ενέργεια, η επαφή p-n καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειάς του. Όταν στην επιφάνεια του προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία τα φωτόνια τα οποία έχουν ίση ή μεγαλύτερη ενέργεια από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού (h) απορροφούνται σε χημικούς δεσμούς και ελευθερώνουν ηλεκτρόνια, δημιουργείται με αυτόν τον τρόπο πλεόνασμα σε ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές.

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οι οπές που κυκλοφορούν μέσα στο στερεό υπάρχει περίπτωση να βρεθούν στην περιοχή όπου ενώνονται οι περιοχές p-n όπου και θα είναι υπό την επίδραση του ηλεκτροστατικού πεδίου του υλικού στο οποίο τα ηλεκτρόνια θα έλκονται από την περιοχή τύπου n και οι οπές από την περιοχή τύπου p, έτσι έχουμε την εμφάνιση διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες. Ένα ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια με διαφορετικό έργο εξόδου στα διάφορα επίπεδα των φωτοβολταϊκών διατάξεων. Η τυπική δομή ενός οργανικού φωτοβολταϊκού αποτελείται από ένα διαφανές ηλεκτρόδιο καθόδου το φωτοενεργό στρώμα, το ηλεκτρόδιο ανόδου και το υπόστρωμα. Το ηλεκτρόδιο ανόδου χρησιμοποιείται για την απορρόφηση της ακτινοβολίας και είναι το σημείο κατά το οποίο συλλέγονται οι οπές. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρόδια ανόδου έχουν υψηλό έργο εξόδου (work function) και το ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό είναι το ITO. Το φωτοενεργό στρώμα βρίσκεται ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια και αποτελεί το μέσο στο οποίο δημιουργούνται τα ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών. Ένα πολυμερές λειτουργεί ως δότης (Donor, D) ηλεκτρονίων και ένα άλλο οργανικό υλικό ως δέκτης (Acceptor, A), δεδομένου ότι παίρνει στην πραγματικότητα το ηλεκτρόνιο από τον D.

Τα πλεονεκτήματα-στόχοι της συγκεκριμένης τεχνολογίας, η οποία βρίσκεται κυρίως σε ερευνητικό επίπεδο, με την χρήση των πολυμερικών στρωμάτων είναι τα εξής :

- Η παραγωγή μεγάλης επιφάνειας Φ/Β κελιού με χαμηλό κόστος.
- Το χαμηλό βάρος του Φ/Β κελιού, η ευελιξία και να είναι ημιδιάφανα.
- Η κατασκευή με διαδικασία συνεχούς εκτύπωσης.
- Η εύκολη ενσωμάτωση σε ηλεκτρικές συσκευές.
- Η καλή απόδοση.

Τα συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται στη κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι ανόργανα, παρόλα αυτά όμως έχει γίνει μεγάλη προσπάθεια τις τελευταίες δεκαετίες για την ανάπτυξη οργανικών φωτοβολταϊκών στοιχείων. Τα πολυμερή ηλιακά κύτταρα (πλαστικά ηλιακά κύτταρα) είναι ένας τύπος των οργανικών φωτοβολταϊκών (τυπικά 100nm) οργανικών ημιαγωγών όπως πολυμερή και ενώσεις μικρών μορίων. Δεδομένου ότι τα πολυμερή φωτοβολταϊκά κύτταρα είναι ασυναγώνιστα από την άποψη του κόστους, την ταχύτητα, την απλότητα και το θερμικό ισοζύγιο, είναι η μόνη φωτοβολταϊκή τεχνολογία που προσφέρει ενδεχομένως μια πειστική λύση στο πρόβλημα του υψηλού κόστους που αντιμετωπίζεται συνήθως στις κλασικές φωτοβολταϊκές τεχνολογίες [9]. Είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, η οποία εμφανίζεται με την μορφή λεπτού φιλμ. Η αρχική τους μορφή ήταν υγρή και στην πορεία των ερευνών έφτασε σε πηκτή, παχύρρευστη μορφή. Οι ερευνητές προσπαθούν να κατασκευάσουν όσο το δυνατόν πιο στερεά οργανικά στοιχεία, ώστε να σχηματιστεί το πάνελ. Λόγω της ρευστότητας της πρώτης ύλης (υγρό διάλυμα) τα οργανικά φωτοβολταϊκά παρουσιάζουν ευκαμψία. Επιπλέον, χαρακτηρίζονται από πολυχρωμία, λόγω των χρωστικών ουσιών στο διάλυμα. . Δεδομένου ότι είναι σε μεγάλο βαθμό από συνθετικά υλικά, σε αντίθεση με το παραδοσιακό πυρίτιο, η κατασκευαστική διαδικασία είναι οικονομικά αποδοτική (υλικό χαμηλότερου κόστους, υψηλή απόδοση παραγωγής) με περιορισμένες τεχνικές δυσκολίες (δεν απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες ή υψηλές συνθήκες κενού), γεγονός που επιτρέπει να θεωρείται δυνατή η αξιοποίησή τους ακόμα και με το μειονέκτημα του πολύ μικρότερου χρόνου ζωής τους σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Συνήθως το κύτταρο έχει μπροστά γυαλί, ένα διάφανο στρώμα επαφής από οξείδιο ινδίου και κασσίτερου (ITO), ένα αγωγίμο πολυμερές, ένα φωτοενεργό πολυμερές και τέλος το πίσω στρώμα επαφής (αλουμίνιο, άργυρος κ.α.). Λειτουργούν ικανοποιητικά τόσο με άμεση ακτινοβολία, όσο και σε συνθήκες διάχυτου φωτισμού.[9]



Εικόνα 12
Τυπική διάταξη οργανικού Φ/Β κελιού

Αν και η διαδικασία είναι φαινομενικά απλή, στην πραγματικότητα η δημιουργία ενός συστήματος, το οποίο και θα αποδίδει τα μέγιστα, δεν έχει ακόμα εφευρεθεί. Για αρχή η χρήση η χρήση πολυμερικών υλικών με μικρό ενεργειακό χάσμα (E_g) είναι επιτακτική επειδή τότε ο δότης ηλεκτρονίων απορροφάει μεγαλύτερο ποσοστό ηλιακής ακτινοβολίας επομένως και περισσότερη ενέργεια για το Φ/Β στοιχείο μας. Το συζυγιακό πολυμερές, το οποίο χαρακτηρίζεται ως δότης ηλεκτρονίων, θα πρέπει να έχει την ιδιότητα αυξημένης κινητικότητας των οπών για την συλλογή τους στο αντίστοιχο ηλεκτρόδιο. Αντίστοιχα ο δέκτης ηλεκτρονίων θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλότερο LUMO, για καλή απορρόφηση του διεγερμένου ηλεκτρονίου από τον δότη ηλεκτρονίων. Σημαντικό ρόλο στην απόδοση του Φ/Β παίζει επίσης η μορφολογία καθώς και η αναμιξιμότητα των δυο πολυμερών. Η μορφολογία παίζει σημαντικό ρόλο γιατί όταν ο δότης ηλεκτρονίων είναι διεγερμένος θα πρέπει να εμφανίζεται μικρού μήκους ετεροεπαφή μεταξύ δότη και δέκτη ώστε να βρεθούν «κοντά» και να αποφύγουμε την αποδιέγερση του ηλεκτρονίου. Τα συστήματα τα οποία δεν εμφανίζουν καλή ανάμιξη, μπορούμε να το πετύχουμε με την προσθήκη ενός επιπλέον πολυμερικού υλικού στο μίγμα, το οποίο θα παίζει το ρόλο του συμβατοποιητή επιτρέποντας την καλύτερη ανάμιξη των πολυμερών και να έχουμε την κατάλληλη μορφολογία [10].

Ένα τυπικό οργανικό Φ/Β κελί περιλαμβάνει ένα φωτοενεργό στρώμα μεταξύ δυο ηλεκτροδίων διαφορετικού δυναμικού. Το φωτοενεργό υλικό είναι βασισμένο σε single layer, bi-layer ή σε Bulk Hetero-junction (BHJ) δομές. Κατά την απορρόφηση φωτός δημιουργούνται ηλεκτρικά φορτία μέσα στο φωτοενεργό στρώμα και λόγω παρουσίας ηλεκτρικού πεδίου, το οποίο δημιουργείται λόγω των διαφορετικών δυναμικών που παρουσιάζουν τα ηλεκτρόδια, τα φορτία αυτά μεταφέρονται και συλλέγονται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα.

2.5.1 ΟΡΓΑΝΙΚΑ Φ/Β ΜΟΝΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ (Single Layer OPV's)

Τα πρώτα οργανικά Φ/Β κελιά αποτελούνταν από ένα και μόνο στρώμα ενός φωτοενεργού υλικού ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια διαφορετικού δυναμικού, ένα εκ των οποίων ήταν διάφανο ώστε να μπορεί να περνά η ηλιακή ακτινοβολία και να φτάνει στο φωτοευαίσθητο στρώμα, αυτού του είδους η δομή ονομάστηκε single layer δομή και δημιουργήθηκε από τον N. Marks et al το 1994 [11]. Σημαντικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης δομής είναι ότι η διάσπαση στην διεπιφάνεια πολυμερούς (οργανικό) / καθόδου (μέταλλο) δεν ήταν αρκετή. Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι αυτές οι δομές επιδείκνυαν χαμηλή ταχύτητα κίνησης των ηλεκτρικών φορτίων μέσα στην ενεργή περιοχή, με αποτέλεσμα μεγάλες απώλειες άρα και πολύ χαμηλές αποδόσεις μέχρι 0,1% [12].

2.5.2 ΟΡΓΑΝΙΚΑ Φ/Β ΔΙΠΛΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ (Bi-layer OPV's)

Η δομή αυτών των οργανικών Φ/Β περιλαμβάνει ένα επιπλέον στρώμα οργανικού υλικού με ιδιότητες μεταφοράς ηλεκτρικών φορτίων. Τα πρώτα υλικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη διάταξη ήταν indium tin oxide (ITO), cooper phthalocyanine (CuPc), perylene tetracarboxylic παράγωγο (PV), ασήμι (Ag) [13]. Η απόδοση της συγκεκριμένης δομής έφτασε το 1%, δηλαδή 10 φορές μεγαλύτερη από την απόδοση της δομής του μονού στρώματος, αυτή η αύξηση της απόδοσης οφείλεται στην προσθήκη του καινούργιου στρώματος το οποίο λειτουργούσε σαν δέκτης ηλεκτρονίων. Οι ενεργειακές ζώνες των δύο οργανικών στρωμάτων δημιουργούν ένα «ενεργειακό σκαλί» βοηθώντας την μεταφορά των φορτίων. Ωστόσο, οι αποδόσεις παρέμειναν σημαντικά μικρότερες από αυτές των ανόργανων Φ/Β κελιών. Με σκοπό την βελτίωση της απόδοσης οι ερευνητές χρησιμοποίησαν σαν δέκτη ηλεκτρονίων buckminsterfullerene C₆₀, με το οποίο ο P. Peumans et al πανω σε bi-layer δομή κατάφερε να φτασει απόδοση 3,5% [14].

2.5.3 ΟΡΓΑΝΙΚΑ Φ/Β ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΕΤΕΡΟΕΠΑΦΗΣ (Bulk Hetero-junction)

Οι περισσότερες εξελίξεις στον τομέα των οργανικών Φ/Β έχουν να κάνουν με τις bulk hetero-junction δομές. Η ιδέα πίσω από ένα hetero-junction είναι η χρήση δύο υλικών με διαφορετικές ηλεκτροσυγγένειες και δυναμικά ιονισμού. Η έννοια των bulk hetero-junction οργανικών Φ/Β πρωτοεμφανίστηκε το 1995 και στόχο έχει να περιγράψει ένα μίγμα δότη/δέκτη ηλεκτρονίων. Ένα υλικό ονομάζεται bulk hetero-junction αν από οποιοδήποτε σημείο μέσα στο υλικό και σε πολύ μικρή απόσταση (μερικά nm), συναντούμε διεπιφάνεια δότη/δέκτη ηλεκτρονίων (D/A) [15]. Σημαντική βελτίωση της σχετικά μικρής συλλογής φορτίων σημειώθηκε με την χρήση της συγκεκριμένης δομής. Ενώ τα bi-layer οργανικά Φ/Β συλλέγουν μία πολύ μικρή ποσότητα φωτονίων λόγω του περιορισμένου πάχους της ενεργής περιοχής, οι bulk hetero-junction δομές λόγω της ανάμιξης του δότη/δέκτη ηλεκτρονίων σε ένα στρώμα έχουν μεγαλύτερες διεπιφάνειες, πράγμα που συνεπάγεται τη δυνατότητα μεγαλύτερου πάχους της φωτοενεργής περιοχής και κατ' επέκταση μεγαλύτερη απορρόφηση φωτονίων. Στην D/A διεπιφάνεια όπου και γίνεται η διάσπαση του εξιτονίου, τότε το ηλεκτρόνιο συλλέγεται από το υλικό με την μεγαλύτερη ηλεκτροσυγγένεια και η οπή από το υλικό με το χαμηλότερο δυναμικό ιονισμού. Προϋπόθεση ώστε να γίνει αυτό είναι η διαφορά των δυναμικών των δύο υλικών του bulk hetero-junction να είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια σύζευξης του εξιτονίου ώστε αυτό να μπορεί διασπαστεί.

Ο διαχωρισμός του εξιτονίου γίνεται στις διεπιφάνειες των συζυγών πολυμερών και είναι πολύ πιο δύσκολος όταν υπάρχουν προσμίξεις (π.χ. οξυγόνο), όπου οι προσμίξεις λειτουργούν ως παγίδες ηλεκτρονίων, στις διεπιφάνειες πολυμερούς/μετάλλου. Απαιτούμενο χαρακτηριστικό για ένα αποδοτικό ηλεκτρόδιο είναι η επιλεκτική συλλογή φορτίων, η δημιουργία δηλαδή μιας ωμικής επαφής για το ένα φορτίο και ο ταυτόχρονος αποκλεισμός του άλλου. Ωστόσο το εξιτόνιο μπορεί να εκπέσει στο υλικό με το μικρότερο ενεργειακό διάκενο χωρίς διάσπαση των φορέων του. Μία συνήθεις τακτική είναι να χρησιμοποιείται ένα πολυμερές ανάμεσα στα συζυγή πολυμερή και το ηλεκτρόδιο καθόδου έτσι ώστε να αυξάνεται το φράγμα δυναμικού του ηλεκτροδίου. Αυτό το πολυμερές στην περίπτωση μας είναι το PEDOT:PSS, το οποίο σε στερεά κατάσταση μπορεί να θεωρηθεί ως μέταλλο και επομένως ως ημι-ηλεκτρόδιο. Έχει μεγάλη χρησιμότητα στις οργανικές Φ/Β διατάξεις, διότι ελαχιστοποιεί την ταχύτητα του ΙΤΟ και βελτιώνει την ηλεκτρική επαφή με το οργανικό υπόστρωμα.

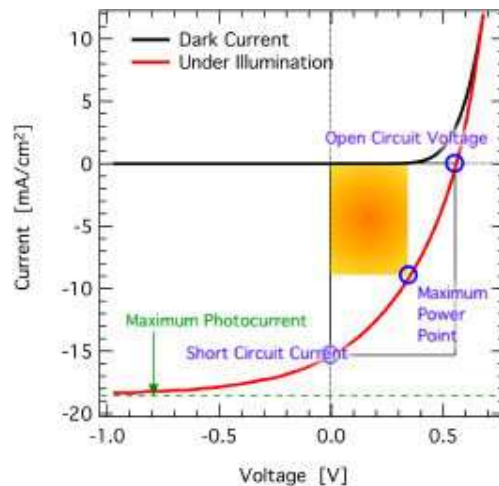
Το ηλεκτρόδιο καθόδου είναι το σημείο κατά το οποίο συλλέγονται τα ηλεκτρόνια και πρέπει να έχει χαμηλό έργο εξόδου. Συνήθως κατασκευάζονται από αλουμίνιο και το υπόστρωμα συνήθως αποτελείται από γυαλί.



Σχήμα 13
 (α)single layer δομή, (β)bi-layer δομή, (γ)BHJ δομή
 Οργανικών Φ/Β κελιών

2.5.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ I-V ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ Φ/Β ΚΕΛΙΟΥ

Όπως εξηγήσαμε και προηγουμένως στην υποενότητα 2.3, τα σημαντικότερα στοιχεία που περιγράφουν την απόδοση των Φ/Β κελιών είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης, η τάση ανοιχτού κυκλώματος και ο συντελεστής πλήρωσης. Ο συντελεστής πλήρωσης δίνεται από το πηλίκο της μέγιστης ισχύος του Φ/Β κελιού ως προς το γινόμενο της τάσης ανοιχτού κυκλώματος και του ρεύματος βραχυκύκλωσης, κίτρινο και λευκό ορθογώνιο αντίστοιχα. Η απόδοση (PCE), δηλαδή η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια, είναι ο λόγος της μέγιστης ισχύος του Φ/Β κελιού ως προς την ισχύ της ακτινοβολίας και μπορεί να υπολογίζεται επίσης από την πυκνότητα του ρεύματος σε σχέση με την τάση (J/V).



Εικόνα 14
Χαρακτηριστική I/V οργανικού Φ/Β κελιού
υπό συνθήκες σκοταδιού (μαύρη καμπύλη)
και υπό συνθήκες έκθεσης στο φώς (κόκκινη καμπύλη)

Αμα προσέξουμε την παραπάνω εικόνα θα παρατηρήσουμε ότι υπάρχει ένα σταθερό φωτορεύμα, αυτό είναι το ρεύμα που παράγεται από το οργανικό Φ/Β κελί λόγω του Φ/Β φαινομένου όπως εξηγήθηκε και παραπάνω. Όταν στο στοιχείο μας προσπίπτει φώς, κόκκινη καμπύλη δηλαδή, βλέπουμε ότι η βασική περιοχή λειτουργίας βρίσκεται στο τέταρτο τεταρτημόριο όπου και παρατηρούμε διάφορες παραμέτρους του στοιχείου που μας αφορούν όπως η τάση ανοιχτού κυκλώματος, το ρεύμα βραχυκύκλωσης και το σημείο μέγιστης ισχύος (ΣΜΙ). Οπότε η απόδοση μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$PCE = P_{max}/P_{light} = (I_M \cdot V_M) / P_{light} = (I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF) / P_{light}$$

FF: Ο συντελεστής πλήρωσης που είναι ο λόγος της μέγιστης πραγματικής ηλεκτρικής ενέργειας ($I_M \cdot V_M$) ως προς την μέγιστη θεωρητική ισχύ ($I_{sc} \cdot V_{oc}$).

P_{light} : Η πυκνότητα ισχύος όσον αφορά το φώς που προσπίπτει.

Οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την αποδοτικότητα των Φ/Β στοιχείων και πρέπει να δώσουμε περισσότερο προσοχή είναι το Σ.Μ.Ι. το οποίο είναι η μέγιστη τιμή λειτουργίας των στοιχείων μας, η απόδοση των στοιχείων (n), δηλαδή το ποσοστό της μετατρεπόμενης ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια και ο συντελεστής πλήρωσης (Fill Factor) που είναι ο λόγος του Σ.Μ.Ι προς το γινόμενο της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}) με το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}).

$$\text{Απόδοση: } n = P / (E \cdot \text{cm}^2)$$

P: η ισχύς του Φ/Β στοιχείου.

E: η τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας.

cm^2 : η επιφάνεια του Φ/Β στοιχείου.

$$\text{Συντελεστής πλήρωσης: } FF = P / (V_{oc} \cdot I_{sc}) = n \cdot E \cdot \text{cm}^2 / (V_{oc} \cdot I_{sc})$$

2.5.5

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ Φ/Β

Οι εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται τα οργανικά Φ/Β στοιχεία είναι οι εφαρμογές οι οποίες απαιτούν τον συνδυασμό της μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική και τις καταπληκτικές μηχανικές ιδιότητες των οργανικών υλικών. Δηλαδή σε στέγες σπιτιών ή και σε κάποιο κτίριο του οποίου η κατασκευή του αποτελείται κυρίως από γυαλί, σε θερμοκήπια, σε δορυφόρους, σε έξυπνα προϊόντα ενδυμασίας, στα μέσα μαζικής μεταφοράς, στην ναυτιλία κ.α.



Εικόνα 15

Διάφανο οργανικό Φ/Β στοιχείο με κυανή απόχρωση



Εικόνα 16
Στάση λεωφορείου αποτελούμενη από οργανικά Φ/Β στοιχεία



Εικόνα 17
Αθλητικό στάδιο του οποίου το σκέπαστρο αποτελείται από οργανικά Φ/Β στοιχεία

2.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ - ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ Φ/Β ΚΕΛΙΩΝ

- ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Οι οργανικοί ημιαγωγοί έχουν υψηλό συντελεστή απορρόφησης, δίνοντας μεγάλη απορρόφηση και σε πολύ λεπτές συσκευές.

-Χαμηλό κόστος παραγωγής.

-Απλοί τρόποι παραγωγής και επεξεργασίας σε σχέση με τους τρόπους παραγωγής και επεξεργασίας των συμβατικών Φ/Β στοιχείων, όπως spin coating, Doctor Blade techniques, Evaporation, Printing.

-Χρήσιμα μηχανικά χαρακτηριστικά όπως ευκαμψία, διαπερατότητα και πολυχρωμία.

-Υψηλή απόδοση παραγωγής.

-Λόγο της θετικής τιμής της θερμικής σταθεράς τους, η παραγόμενη ενέργεια τους αυξάνεται με πιο γρήγορο ρυθμό.

-Χαρακτηρίζονται από ελαφρότητα.

-Η δυνατότητα χρήσης ελαστικών υποστρωμάτων σε διαδικασίες εκτύπωσης υψηλών ταχυτήτων μπορεί εύκολα να μειώσει το κόστος ισοζυγίου των οργανικών Φ/Β στοιχείων πράγμα που οδηγεί σε πολύ μικρούς χρόνους απόσβεσης τόσο της ενέργειας παραγωγής όσο και του κόστους παραγωγής [16].

-Το χάσμα ζωνών των οργανικών υλικών μπορεί εύκολα να συντονιστεί με την ενσωμάτωση διαφορετικών λειτουργικών ομάδων.

-Λειτουργούν ικανοποιητικά τόσο σε άμεση ακτινοβολία όσο και σε συνθήκες διάχυτου φωτισμού.

-Παρατηρείται πολύ έντονη ερευνητική δραστηριότητα.

- **ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ**

-Μικρή διάρκεια ζωής σε σχέση με τα συμβατικά Φ/Β στοιχεία.

-Μικρή κινητικότητα των φορέων φορτίου (μερικές τάξεις μεγέθους μικρότερη από τα συμβατικά Φ/Β), η οποία έχει σοβαρές επιπτώσεις στην απόδοση των Φ/Β στοιχείων.

-Ενεργειακό χάσμα ζωνών γύρω στα 2eV, που είναι σημαντικά υψηλότερο από εκείνο του πυριτίου και έτσι περιορίζεται η ικανότητα απορρόφησης του ηλιακού φάσματος σε μεγάλο βαθμό.

-Χαμηλή απόδοση.

-Κακή λειτουργική σταθερότητα, τα οργανικά υλικά είναι ευαίσθητα στο οξυγόνο και την υγρασία.

-Παρουσία ισχυρής δύναμης για την διάσπαση του εξιτονίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΝΟΡΓΑΝΑ - ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΚΑΙ Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ

Όταν το 1883 ο Edison τοποθέτησε σε έναν λαμπτήρα πυρακτώσεως ένα επιπλέον ηλεκτρόδιο, δεν μπορούσε να φανταστεί τον δρόμο που άνοιγε στην σύγχρονη ηλεκτρονική. Με την κίνησή του αυτή επιθυμούσε να απομακρύνει τα αέρια που εξέπεμπε το πυρακτωμένο νήμα. Όταν το ηλεκτρόδιο ήταν θετικό, σε σχέση με το νήμα, διαρρέονταν από ένα ρεύμα, ενώ όταν ήταν αρνητικό δεν υπήρχε ρεύμα. Ο Edison αγνόησε αυτό το φαινόμενο (γνωστό ως φαινόμενο Edison) επειδή πίστευε ότι δεν είχε πρακτική αξία, στην ουσία όμως, χωρίς να το γνωρίζει, κατασκεύασε την πρώτη *δίοδο*, ένα στοιχείο που αναγνωρίζεται σαν η απαρχή της σύγχρονης ηλεκτρονικής. Από το 1883 μέχρι σήμερα, σαφώς έλαβαν χώρα συνταρακτικές για την κάθε εποχή ανακαλύψεις στον τομέα της ηλεκτρονικής, των ηλεκτρικών κυκλωμάτων και των εφαρμογών τους. Περί το 1904 εισήχθη από τον J.A. Fleming η πρώτη δίοδος κενού που στην συνέχεια οδήγησε στην εφεύρεση της τριόδου ηλεκτρονικής λυχνίας από τον Lee De Forest το 1906. Η κρυσταλλοδίοδος ανακαλύφθηκε πολύ αργότερα, το 1930, και αποτέλεσε το σταυροδρόμι που οδήγησε την τεχνολογία από τις ηλεκτρονικές λυχνίες κενού προς τα τρανζίστορ. Το 1949 ο Shockley διατύπωσε τη θεωρία του τρανζίστορ επαφής και δύο χρόνια αργότερα το 1951 κατασκευάστηκε το πρώτο τρανζίστορ. Για την ανακάλυψή του αυτή, ο Shockley τιμήθηκε με το βραβείο Nobel Φυσικής το 1956. Η επίδραση του τρανζίστορ στην ηλεκτρονική υπήρξε τεράστια. Εκτός από την τεράστια βιομηχανία ημιαγωγών, το τρανζίστορ οδήγησε σε πολλές σχετικές ανακαλύψεις, όπως τα ολοκληρωμένα κυκλώματα, οι οπτοηλεκτρονικές διατάξεις και οι μικροϋπολογιστές. Από νωρίς το τρανζίστορ αντικατέστησε στις περισσότερες εφαρμογές τη λυχνία κενού και επέτρεψε να υλοποιηθούν εφαρμογές που ήταν δύσκολο ή αδύνατο να γίνουν με τις λυχνίες. Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές στη βιομηχανία των υπολογιστών. Κατά γενική ομολογία, οι απόψεις των ιστορικών συγκλίνουν στην πεποίθηση ότι το τρανζίστορ δεν αναμόρφωσε απλώς τη βιομηχανία των υπολογιστών, αλλά την δημιούργησε.

Βασικό ‘συστατικό’ των ηλεκτρονικών διατάξεων είναι τα ημιαγώγιμα υλικά. Τα τελευταία 50 χρόνια, η τεχνολογία των ημιαγώγιμων υλικών στηρίζεται σε ανόργανους ημιαγωγούς, όπως το πυρίτιο (Si), το γερμάνιο (Ge) ή το αρσενιούχο γάλλιο (GaAs). Πολλές τεχνολογικές εφαρμογές που βασίζονται σε τέτοιους ημιαγωγούς βρήκαν εφαρμογή άμεσα στην τεχνολογία (χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, οι οθόνες, οι φωτοβολταϊκές κυψελίδες). Παρά την ευρεία εφαρμογή των υλικών αυτών στους διάφορους τομείς της τεχνολογίας, ανέκυψαν προβλήματα, όπως η διάρκεια ζωής, η απόδοση, η φιλικότητα στο περιβάλλον, η ευκολία στην επεξεργασία και την εφαρμογή, που έθεσαν μια νέα πρόκληση στην επιστημονική κοινότητα: τη δημιουργία διατάξεων και συσκευών που πληρούν τις παραπάνω προϋποθέσεις και ανταποκρίνονται στις σύγχρονες απαιτήσεις. Έτσι, η επιστημονική έρευνα επικεντρώθηκε στη μελέτη οργανικών ημιαγωγών που θα αντικαταστήσουν τα υπάρχοντα συμβατικά-ανόργανα υλικά. Η αρχή έγινε κατά τη δεκαετία του 1950, οι έρευνες όμως για τους οργανικούς ημιαγωγούς είχαν εμπιστευτικό χαρακτήρα μέχρι τη δεκαετία του 1980, όταν πραγματοποιήθηκε το πρώτο οργανικό τρανζίστορ λεπτής ταινίας (OTFT) το 1983. Από το 1986, δε, οι συσκευές που περιλαμβάνουν οργανικούς ημιαγωγούς άρχισαν να γίνονται ‘ελκυστικές’ για περαιτέρω έρευνα με σκοπό την εφαρμογή τους στη βιομηχανική παραγωγή λόγω του χαμηλού κόστους. Πλήθος ερευνών συντελέστηκε τα τελευταία 15 περίπου χρόνια, κάτι που γίνεται εμφανές αν ανατρέξουμε σε στατιστικά στοιχεία της διεθνούς βιβλιογραφίας. Όπως αναφέρεται στη δημοσίευση των Kelley, Baude, Gerlach, Ender, Muijers, Haase, Vogel και Theiss του ερευνητικού εργαστηρίου της Minnesota, αν το 1993 αναζητούσαμε στοιχεία-πληροφορίες για το οργανικό τρανζίστορ λεπτής ταινίας (OTFT), θα βρίσκαμε μόλις 12 δημοσιεύσεις, ενώ το 2003 θα βρίσκαμε πάνω από 300 δημοσιεύσεις. Αν μάλιστα στην αναζήτησή μας συμπεριλαμβάναμε και συσκευές που συνίστανται από OTFT, όπως φωτοβολταϊκά στοιχεία, μνήμες και οργανικές δίοδοι εκπομπής φωτός, τότε βρίσκουμε πάνω από 40.000 δημοσιεύσεις για την περίοδο 1998-2003.

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας υλικών και της νανοτεχνολογίας, άνοιξε ο ορίζοντας της ανάπτυξης υβριδικών διατάξεων (συνδυασμός ανόργανων και οργανικών υλικών) με ελεγχόμενες ιδιότητες και μεγάλο φάσμα εμπορικών εφαρμογών με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

3.2 ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Είναι εμφανές ότι οι ημιαγωγοί αποτελούν τον θεμέλιο λίθο της ηλεκτρονικής, από το μεγάλο φάσμα των εφαρμογών τους στις ηλεκτρονικές διατάξεις αποτελώντας συστατικό στοιχείο των τρανζίστορ, των διόδων αλλά και των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Όλες οι διατάξεις οι οποίες αποτελούνται από ημιαγωγούς βασίζονται στο γεγονός ότι η αγωγιμότητα του υλικού ελέγχεται με την συγκέντρωση των προσμίξεων, η οποία μπορεί να μεταβάλλεται σε μια μεγάλη περιοχή τιμών και να διαφοροποιείται από περιοχή σε περιοχή πάνω στην διάταξη. Ο συνδυασμός ημιαγωγών τύπου p και τύπου n με διάφορους τρόπους οδήγησε στην δημιουργία ημιαγωγικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην σύγχρονη ηλεκτρονική. Κάποια από αυτά είναι: η διάδος επαφής p-n, η διάδος varactor, η διάδος shottky, η διάδος zener, η διάδος σήραγγας, οι οπτοδιόδοι (φωτοδιόδοι και διόδοι εκπομπής φωτός) και το τρανζίστορ.

3.3 ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ

Το τρανζίστορ είναι μία διάταξη ημιαγωγών στερεάς κατάστασης που βρίσκει εφαρμογές στην ηλεκτρονική, βάζοντας τις βάσεις για την ανάπτυξη της, μερικές εκ των οποίων είναι η λειτουργία ως διακόπτης ή ως ωμική αντίσταση, η ενίσχυση, η σταθεροποίηση τάσης και η διαμόρφωση συχνότητας. Τα τρανζίστορ κατασκευάζονται είτε ως ξεχωριστά ηλεκτρονικά εξαρτήματα είτε ως τμήματα κάποιου ολοκληρωμένου κυκλώματος. Παρόλο που αρκετοί παραγωγοί παράγουν, μέχρι και σήμερα, μεμονωμένα τρανζίστορ, η μεγαλύτερη ποσότητα παράγεται μέσα σε ολοκληρωμένα κυκλωμένα (τσιπ) μαζί με διόδους, αντιστάσεις, πυκνωτές και άλλα ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Τα δύο είδη τρανζίστορ στα οποία θα επικεντρωθούμε είναι τα διπολικά τρανζίστορ επαφής (BJT, Bipolar Junction Transistor) και τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET, Field Effect Transistor).

3.3.1 ΔΙΠΟΛΙΚΟ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΑΦΗΣ (BJT)

Τα συμβατικά διπολικά τρανζίστορ επαφής, ανάλογα με το υλικό το οποίο έχουν κατασκευαστεί διακρίνονται σε τρανζίστορ πυριτίου (Si) και τρανζίστορ γερμανίου (Ge) και ποιο συγκεκριμένα είναι ένας κρύσταλλος με τρεις περιοχές εμπλουτισμένες με προσμίξεις, δηλαδή τρία διαδοχικά εναλλασσόμενα στρώματα ημιαγωγίου υλικού (sandwich υλικό), από τα οποία το ενδιάμεσο υλικό είναι είτε τύπου $-n$ (τρανζίστορ τύπου $-pnp$), είτε τύπου $-p$ (τρανζίστορ τύπου $-npn$). Οι περιοχές τύπου $-n$ είναι εμπλουτισμένες με ηλεκτρόνια ενώ οι περιοχές τύπου $-p$ είναι εμπλουτισμένες σε οπές. Οι τρεις αυτές περιοχές του τρανζίστορ έχουν διακεκριμένη λειτουργία η κάθε μία:

- Εκπομπός (Emitter), είναι μία έντονα εμπλουτισμένη περιοχή που εκπέμπει φορτία προς την βάση.
- Βάση (Base), η οποία είναι μία λεπτή περιοχή λιγότερο εμπλουτισμένη που επιτρέπει στα περισσότερα φορτία που εκπέμπονται από τον εκπομπό να φτάνουν στον συλλέκτη.
- Συλλέκτης (Collector), ο οποίος συλλέγει τα φορτία τα οποία καταφθάνουν από τον εκπομπό και το επίπεδο εμπλουτισμού του βρίσκεται μεταξύ αυτού του εκπομπού και της βάσης, ενώ η ισχύς που καταναλώνεται σε αυτόν είναι μεγαλύτερη από τις άλλες δύο περιοχές.

Μπορεί να θεωρηθεί ότι το διπολικό τρανζίστορ αποτελείται από δύο διόδους συνδεδεμένες σε αντίθετη φορά, δηλαδή μια μεταξύ βάσης-εκπομπού και μια μεταξύ βάσης-συλλέκτη. Οι φορείς πλειονότητας στον εκπομπό και στον συλλέκτη στο τρανζίστορ τύπου $-pnp$ είναι οπές, ενώ αντίστοιχα στο τρανζίστορ τύπου $-npn$ είναι ηλεκτρόνια. Αυτό σημαίνει ότι ο ένας τύπος τρανζίστορ είναι συμπληρωματικός του άλλου, δηλαδή κατά την λειτουργία τους θα έχουν ρεύματα και πολώσεις με αντίθετη φορά.

Όταν δεν εφαρμόζεται τάση επάνω στο τρανζίστορ τότε τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του εκπομπού και του συλλέκτη διαχέονται προς την βάση ενώ μέρος των οπών της βάσης από κάθε άκρο της αντίστοιχα διαχέονται προς τον εκπομπό και τον συλλέκτη, με αποτέλεσμα να δημιουργείται περιοχή απογύμνωσης σε κάθε επαφή του τρανζίστορ. Κατά μήκος κάθε επαφής αναπτύσσεται φράγμα δυναμικού, το οποίο στους 23 °C έχει ύψος 0.3V σε ημιαγωγό Ge και 0.7V σε ημιαγωγό Si.

Για να είναι σε θέση ο εκπομπός να εκπέμπει φορτία προς την βάση, πρέπει η διάδος εκπομπού να είναι ορθά πολωμένη και αντίστοιχα για να είναι εφικτή η συλλογή φορτίων από τον συλλέκτη πρέπει η διάδος συλλέκτη να είναι ανάστροφα πολωμένη (σε κάποιες ειδικές περιπτώσεις μόνο η επαφή συλλέκτη είναι ορθά πολωμένη). Ανάλογα με την τιμή της τάσης V_{BE} έχουμε και τις ανάλογες καταστάσεις του τρανζίστορ (Si), δηλαδή όταν η τάση $V_{BE} < 0.7V$ τότε δεν διέρχεται ρεύμα από την βάση προς τον εκπομπό και όταν η $V_{BE} > 0.7V$ υπάρχει ροή ελεύθερων ηλεκτρονίων από τον εκπομπό προς την βάση και ελεύθερων οπών από την βάση προς τον εκπομπό.

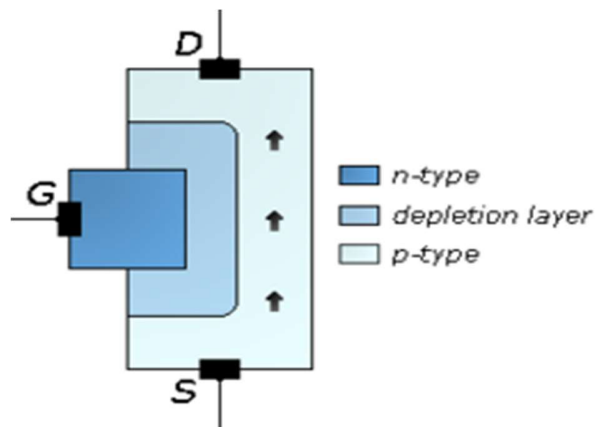
Η επαφή του συλλέκτη (ανάστροφα πολωμένη) περιορίζει σημαντικά το εύρος της βάσης, με αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού των ηλεκτρονίων που δεν θα παραμείνουν στο χώρο της βάσης αλλά θα εισέλθουν στο χώρο της επαφής του συλλέκτη. Σε γενικές γραμμές το ρεύμα συλλέκτη (I_C) είναι περίπου ίσο με το ρεύμα εκπομπού (I_E) και το ρεύμα βάσης (I_B) είναι πολύ μικρό. Γενικά ισχύει:

$$I_E = I_B + I_C$$

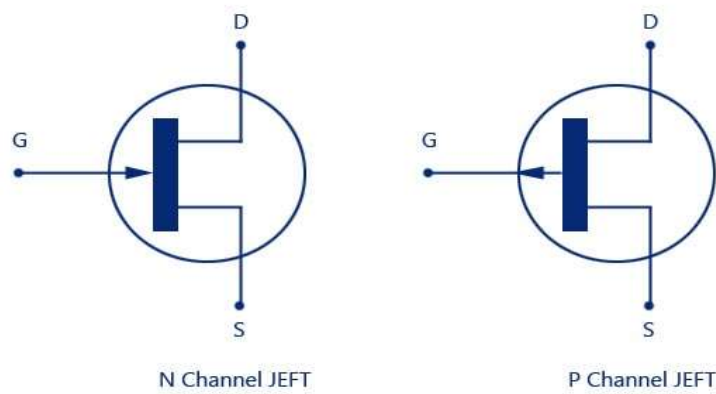
3.3.2 ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΓΚΑΡΣΙΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (FET)

Το τρανζίστορ εγκάρσιου πεδίου επαφής (Field Effect Transistor) είναι ένα μονοπολικό τρανζίστορ διότι η λειτουργία του βασίζεται σε ένα μόνο είδος φορέων, είτε σε ηλεκτρόνια είτε σε οπές, σε αντίθεση με το διπολικό τρανζίστορ το οποίο αναφέρθηκε παραπάνω που βασίζει την λειτουργία του και στα δύο είδη φορέων.

Ένα FET τρανζίστορ περιλαμβάνει την επιλογή ενός βασικού τμήματος ορισμένου τύπου ημιαγωγού (π.χ. τύπου $-n$), στις 2 πλευρές του οποίου προστίθενται περιοχές αντίθετου τύπου, στην προκειμένη περίπτωση τύπου $-p$, κάθε μια από αυτές τις προστιθέμενες περιοχές (τύπου $-p$) καλείται πύλη (gate) και τα δύο άκρα του βασικού ημιαγωγού καλούνται αντίστοιχα πηγή (source) και απαγωγός (drain). Ενώ το κομμάτι που βρίσκεται ανάμεσα στις πύλες ονομάζεται διάυλος (channel). Ο τύπος του FET ορίζεται ανάλογα με τον τύπο ημιαγωγού του καναλιού, δηλαδή έχουμε FET $-n$ καναλιού και FET $-p$ καναλιού, ένα FET μπορεί να έχει 1 ή 2 πύλες αλλά ευρύτερη εφαρμογή συναντούν οι διατάξεις με μία πύλη.



Εικόνα 18
FET τρανζίστορ τύπου -n μονής πύλης



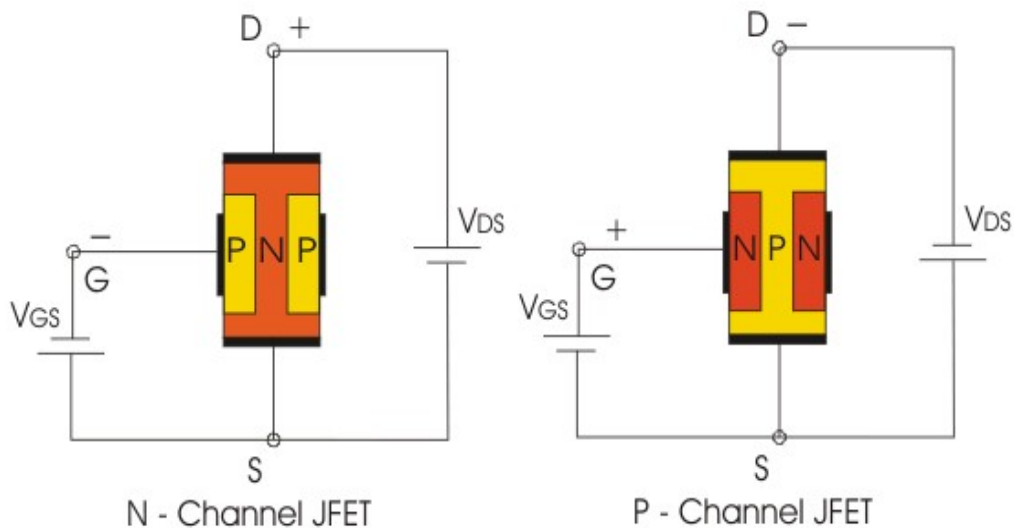
JFET-N-Channel and P-channel Schematic Symbol

Εικόνα 19
Κυκλωματικά σύμβολα των JFET
Τύπου -n και τύπου -p αντίστοιχα
G: πύλη, D: απαγωγός, S: πηγή

3.3.3 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ FET

Η λειτουργία του FET μίας πύλης βασίζεται στην επαφή πύλης-καναλιού (επαφή ή δίοδος πύλης).

Η περιοχή φορτίου χώρου της επαφής, η οποία είναι η περιοχή γύρω από το υλικό της πύλης, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της διατομής του καναλιού και τη μεταβολή της αντίστασης του, με τον τρόπο αυτό μέσω της (ανάστροφης) πόλωσης της δίοδου πύλης είναι δυνατή η ρύθμιση του εύρους της περιοχής φορτίου χώρου της επαφής και επομένως ο έλεγχος της αντίστασης του καναλιού και του ρεύματος που διαρρέει το FET. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή με τον όρο επίδραση πεδίου.



Εικόνα 20

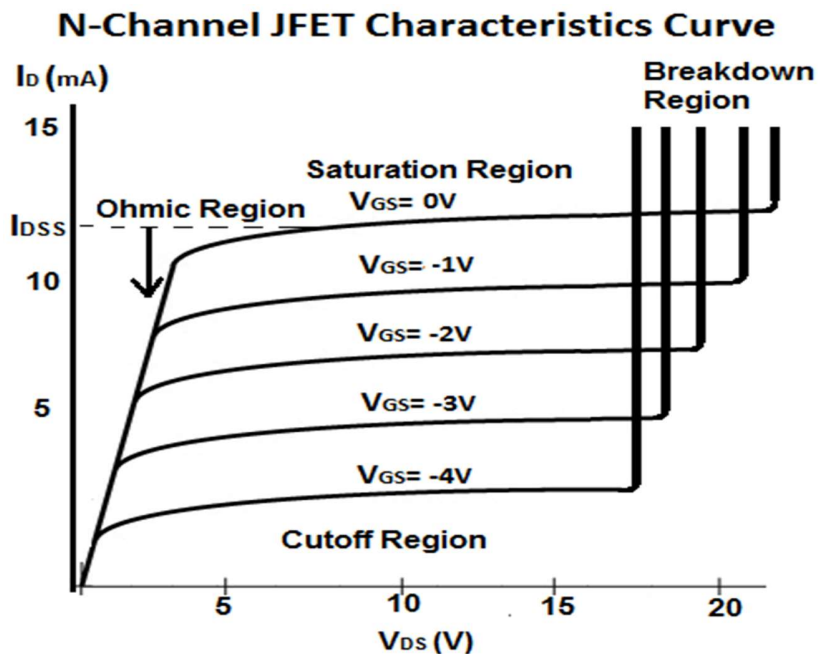
Κύκλωμα πόλωσης των τρανζίστορ τύπου -n και τύπου -p αντίστοιχα

Στα κυκλώματα της εικόνας 20 χρησιμοποιούνται δύο πηγές τάσεως, η μία πηγή συνδέεται μεταξύ απαγωγού και πηγής και παρέχει την τάση απαγωγού (V_{DS}) και η δεύτερη πηγή συνδέεται μεταξύ πύλης και πηγής και παρέχει την τάση πύλης (V_{GS}). Η τάση V_{GS} πολώνει ανάστροφα την δίοδο πύλης στο τρανζίστορ τύπου -n, με αποτέλεσμα το ρεύμα πύλης I_G να είναι πάρα πολύ μικρό και η αντίσταση εισόδου πάρα πολύ μεγάλη, δηλαδή η τάση της πύλης διαμορφώνει την αντίσταση του τρανζίστορ.

Διάφοροι τύποι FET είναι:

- Τα MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET) πύκνωσης (normally off)
- Τα MOSFET απογύμνωσης (normally on)
- Τα FET ένωσης η JFET πύκνωσης (normally off)
- Τα JFET απογύμνωσης (normally on)

Τα FET ένωσης (Junction FET) είναι τα πιο απλά τρανζίστορ, έχουν μεγάλη αντίσταση εισόδου και για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούνται στην είσοδο ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Χρησιμοποιούνται επίσης και ως ενισχυτές αλλά και ως διακόπτες. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του FET είναι ότι συχνά είναι απλούστερο να κατασκευαστεί και ότι καταλαμβάνει μικρότερο χώρο πάνω σε ένα μικροκύκλωμα (τσιπ) σε σύγκριση με ένα BJT. Έτσι, η πυκνότητα εξαρτημάτων πάνω σε ένα μόνο μικροκύκλωμα μπορεί να είναι εξαιρετικά μεγάλη και συχνά ξεπερνά τα 100.000 MOSFET ανά τσιπ. Μία άλλη σημαντική ιδιότητα είναι ότι οι διατάξεις MOS μπορούν να συνδεθούν είτε σαν αντιστάσεις, είτε σαν πυκνωτές ανάλογα με την χρήση που απαιτείται. Αυτό επιτρέπει την κατασκευή συστημάτων που αποτελούνται αποκλειστικά από MOSFET και όχι από άλλα εξαρτήματα. Αυτές οι ιδιότητες κάνουν τα MOSFET κυρίαρχη συσκευή σε συστήματα πολύ μεγάλης κλίμακας.



Εικόνα 21

Οικογένεια χαρακτηριστικών καμπυλών ρεύματος απαγωγού (I_D) συναρτήσει της τάσης απαγωγού (V_{DS}) για διάφορες τιμές της τάσης πύλης (V_{GS}).

Σε κάθε χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος απαγωγού διακρίνονται τα ακόλουθα χαρακτηριστικά και περιοχές λειτουργίας:

- **Κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης (shorted-gate):** Αντιστοιχεί σε μηδενισμό της τάσης πύλης (πύλη και πηγή βραχυκυκλώνουν). Χαρακτηρίζεται από το ρεύμα απαγωγού στην κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης (I_{DSS}), το οποίο είναι το μέγιστο ρεύμα απαγωγού σε κανονική λειτουργία του JFET.
- **Τάση συμπίεσης (pinch-off voltage):** Είναι η τάση απαγωγού (V_p), πέραν της οποίας το ρεύμα απαγωγού γίνεται περίπου σταθερό, στην κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης. Όταν η τάση απαγωγού γίνει ίση με V_p , το αγωγίμο κανάλι γίνεται εξαιρετικά στενό (συμπιέζεται) και οι περιοχές φορτίου χώρου σχεδόν εφάπτονται. Αν η τάση απαγωγού αυξηθεί κι άλλο, το ρεύμα του απαγωγού θα αυξηθεί ελάχιστα γιατί το εύρος του αγωγίμου καναλιού είναι πολύ μικρό και δεν μεταβάλλεται παρά ελάχιστα.

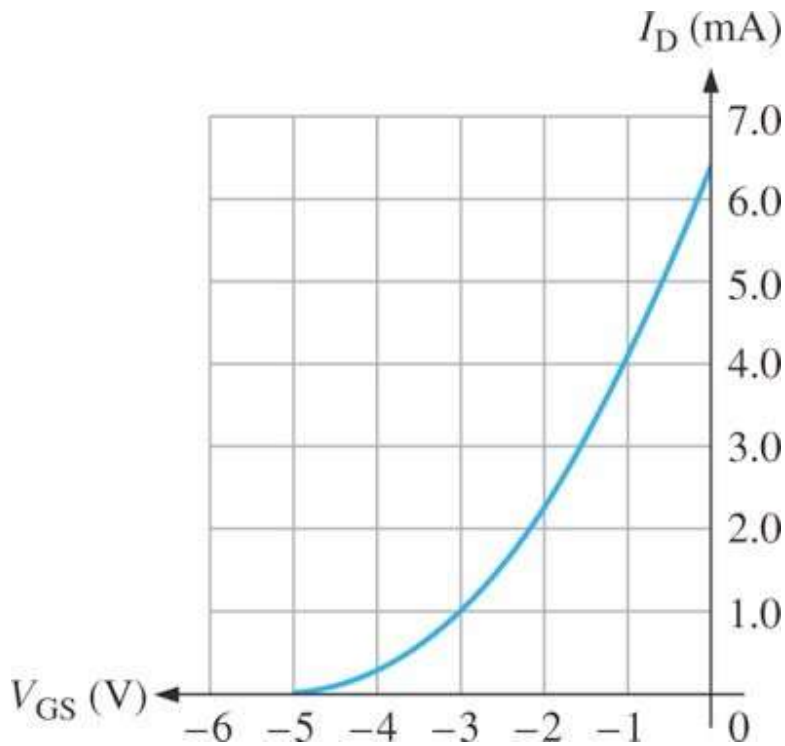
Με βάση την τάση συμπίεσης υφίστανται οι ακόλουθες περιοχές στη χαρακτηριστική ενός JFET:

- **Ενεργός περιοχή:** Αντιστοιχεί σε τιμές της τάσης απαγωγού μεγαλύτερες από την τάση συμπίεσης.
- **Ωμική περιοχή:** Εντοπίζεται σε τιμές της τάσης απαγωγού μικρότερες από την τάση συμπίεσης. Στην περιοχή αυτή, το ρεύμα απαγωγού πρακτικά δεν εξαρτάται από την τάση της πύλης. Επιπλέον η ωμική περιοχή αντιστοιχεί στην περιοχή κόρου των διπολικών τρανζίστορ, στην οποία η αντίσταση μεταξύ των ακροδεκτών απαγωγού και πηγής υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$R_{DS} = (V_p / I_{DSS})$$

- **Τάση αποκοπής πύλης – πηγής (gate cut-off voltage):** Είναι η τάση $V_{GS(off)}$, στην οποία αποκόπτεται το ρεύμα απαγωγού, λόγω της επαφής των περιοχών φορτίου χώρου και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_p = - V_{GS(off)}$$



Εικόνα 22
Χαρακτηριστική διαγωγιμότητας

Χαρακτηριστική διαγωγιμότητας: Η χαρακτηριστική διαγωγιμότητας (transconductance curve) ενός JFET τρανζίστορ είναι η γραφική παράσταση του ρεύματος απαγωγού συναρτήσει της τάσης πύλης όπως βλέπουμε στην εικόνα 22 παραπάνω. Οποιοδήποτε JFET τρανζίστορ έχει την ίδια μορφή στην χαρακτηριστική διαγωγιμότητας, δηλαδή είναι τμήμα παραβολής. Αυτό οφείλεται στην αρχή λειτουργίας των JFET τρανζίστορ. Η χαρακτηριστική διαγωγιμότητας περιγράφεται από την εξίσωση:

$$I_D = I_{DSS} \cdot (1 - (V_{GS}/V_{GS(off)}))^2$$

Η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί προσεγγιστικά για κάθε JFET τρανζίστορ και με την βοήθεια της εξίσωσης $V_P = -V_{GS(off)}$ μπορούν να υπολογιστούν το ρεύμα απαγωγού για κάθε τιμή της τάσης πύλης, όταν είναι γνωστό το μέγιστο ρεύμα απαγωγού και επίσης η τάση αποκοπής της πύλης-πυγής.

Τα MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET), διαθέτουν και αυτά πηγή, πύλη και απαγωγό με διαφορά ότι σε σχέση με τα JFET τρανζίστορ, η πύλη είναι ηλεκτρικά μονωμένη ως προς το κανάλι με αποτέλεσμα το ρεύμα πύλης να είναι πάρα πολύ μικρό ανεξάρτητα από την φορά τάσης που εφαρμόζεται μεταξύ πύλης και πηγής.

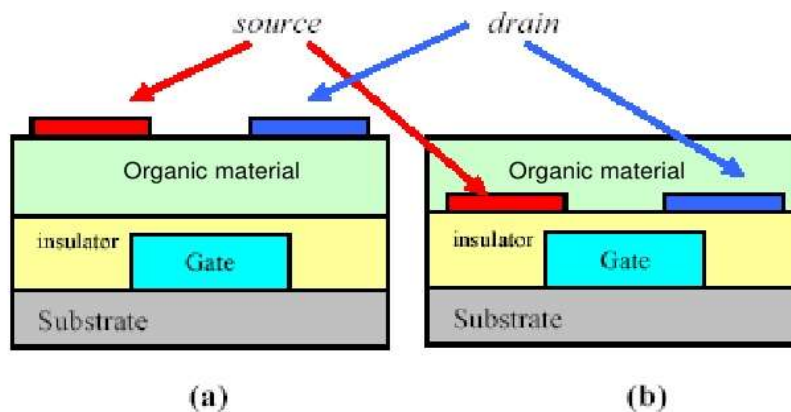
3.4 ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (OFET)

Για περισσότερο από μία δεκαετία, τα οργανικά τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (Organic Field Effect Transistors, OFET), θεωρούνται σαν μία βιώσιμη λύση συγκρινόμενα με τα πιο παραδοσιακά και περισσότερο χρησιμοποιούμενα τρανζίστορ (FET), τα οποία στηρίζονται στα ανόργανα υλικά. Υπάρχουν δυο κύριες κατηγορίες οργανικών ημιαγωγών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή οργανικών τρανζίστορ λεπτού φιλμ (thin-film transistors, OTFT): αυτή των μικρομορίων και αυτή των πολυμερών. Τα πολυμερή λόγω των χαρακτηριστικών τους έχουν την δυνατότητα σαν ηλεκτρονικά κυκλώματα να τυπώνονται σε διάφορες επιφάνειες χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ink jet ή άλλες μεθόδους τυπώματος. Τα transistors που βασίζονται σε μικρομόρια έχουν υψηλή κινητικότητα ηλεκτρονίων, αλλά για την εναπόθεσή τους πάνω σε άλλα υλικά απαιτούν συνθήκες διαφορετικές από αυτές του δωματίου (σε αντίθεση με τα πολυμερή υλικά). Όποιο τρόπο και να διαλέξει κάποιος ακόμη και σε αυτό το στάδιο της τεχνολογίας είναι πιο φθηνός από την τεχνολογία πυριτίου [17].

3.4.1 ΔΟΜΗ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΛΕΠΤΟΥ ΦΙΛΜ (OTFT)

Τα οργανικά τρανζίστορ μπορούν να περιλαμβάνουν ένα μοριακό ή πολυμερικό κανάλι που συνδέεται με τις επαφές απαγωγού και πηγής, ενώ ο μονωτής της πύλης μπορεί να είναι οργανικός ή ανόργανος. Αρχικά η πύλη τοποθετείται πάνω σε ένα μονωτικό υπόστρωμα όπως γυαλί ή πλαστικό και στη συνέχεια ακολουθεί η εναπόθεση του μονωτή των πυλών, ο οποίος αποτελείται είτε από μια οργανική είτε από μια ανόργανη διηλεκτρική ταινία (film). Τα ηλεκτρόδια πηγής και απαγωγού τοποθετούνται πάνω στη διηλεκτρική πύλη και το βήμα αυτό ακολουθείται από την εναπόθεση του λεπτού στρώματος καναλιών (thin film layer). Εναλλακτικά το λεπτό στρώμα καναλιών μπορεί να τοποθετηθεί πριν από τα ηλεκτρόδια πηγής απαγωγού. Εν τούτοις αυτό δεν προτιμάται λόγω του ότι το οργανικό στρώμα είναι ευαίσθητο στη φθορά που υπάρχει κατά την διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής [17].

Organic Thin Film Transistors (OTFTs)



Top contact (a) and bottom contact (b) transistors.

SAMI UR REHMAN
(sami-rehman.blogspot.com)

Haldun Küflüoğlu

Εικόνα 23

Τυπικές δομές οργανικού τρανζίστορ

- (a) εναπόθεση ηλεκτροδίων πηγής και απαγωγού μετά το οργανικό υλικό
- (b) εναπόθεση ηλεκτροδίων πηγής και απαγωγού πριν το οργανικό υλικό

Δηλαδή στην ουσία τρία είναι τα βασικά λειτουργικά υλικά που απαιτούνται για την κατασκευή ενός οργανικού τρανζίστορ είναι *ο αγωγός* (ηλεκτρόδια), *ο ημιαγωγός* (ενεργό τμήμα) και *το διηλεκτρικό* (μονωτής πύλης). Οι συνδυασμοί των υλικών, των οποίων χρησιμοποιούνται, διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με τις μεθόδους κατασκευής που χρησιμοποιούνται για τις οργανικές συσκευές και τα κυκλώματα διότι επηρεάζονται από αυτές σε μεγάλο βαθμό. Τέλος, το είδος του αγωγού και του διηλεκτρικού τα οποία θα επιλεγθούν εξαρτάται από την συμβατότητά τους με το ημιαγωγικό υλικό, το οποίο επιλέγεται με βάση τις ηλεκτρικές του επιδόσεις, τον τρόπο με τον οποίο επεξεργάζεται και την περιβαλλοντική του ευαισθησία.

- **Οργανικοί ημιαγωγοί:** Τα οργανικά ημιαγωγά υλικά αποτελούνται από άνθρακα, υδρογόνο και οξυγόνο. Οι κατηγορίες οργανικών ημιαγωγών οι οποίες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές των οργανικών τρανζίστορ είναι οι εξής: 1) τα μικρά μόρια, 2) συζευγμένα πολυμερή, 3) υβριδικές οργανικές-ανόργανες δομές και 4) μοριακοί ημιαγωγοί οι οποίοι χρησιμοποιούνται συχνότερα.
- **Διηλεκτρικά:** Τα διηλεκτρικά είναι από τα κυριότερα υλικά από τα οποία οφείλονται οι επιδόσεις των οργανικών τρανζίστορ. Οι ταινίες διηλεκτρικού απαιτούν χαμηλή πυκνότητα παγίδευσης (trapping density) στην επιφάνεια, χαμηλή τραχύτητα στην επιφάνεια, χαμηλή συγκέντρωση πρόσμειξης και πρέπει να είναι συμβατά με τους οργανικούς ημιαγωγούς. Οι κατηγορίες οι οποίες χρησιμοποιούνται στα οργανικά τρανζίστορ είναι δύο, τα οργανικά διηλεκτρικά και τα ανόργανα διηλεκτρικά, τα ανόργανα διηλεκτρικά παρουσιάζουν καθορισμένα και γνωστά χαρακτηριστικά σε αντίθεση με τις συσκευές οι οποίες χρησιμοποιούν οργανικά διηλεκτρικά που εξαρτώνται σημαντικά από το χρησιμοποιούμενο ημιαγωγά υλικό, την ποιότητα της διαδικασίας εναπόθεσης του διηλεκτρικού υλικού.
- **Αγωγοί:** Ως αγωγοί θεωρούνται τα ηλεκτρόδια, συνήθως τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται είναι ο χρυσός ή ο λευκόχρυσος που έχουν υποστεί εξάτμιση και με την κατάλληλη διαδικασία μπορούν να παραχθούν λεπτές ταινίες για την κατασκευή ηλεκτροδίων.
- **Υποστρώματα:** Τα άκαμπτα υποστρώματα πλεονεκτούν για την επιπεδότητά τους (planarity), την βέλτιστη ομαλότητα της επιφάνειας, την εύκολη επεξεργασία και την ικανότητα προσκόλλησης στον οργανικό ημιαγωγό από υψηλή θερμοκρασία. Τα δύο πρώτα χαρακτηριστικά σχετίζονται με την δομή των οργανικών τρανζίστορ λεπτής ταινίας (OTFT's), λόγω της απαίτησης να είναι τα στρώματα του τρανζίστορ πολύ λεπτά (της τάξεως των 100 Angstroms). Τα άκαμπτα υποστρώματα όπως το γυαλί και το πυρίτιο είναι πολύ καλές επιλογές για τα τρανζίστορ, τα εύκαμπτα υποστρώματα από την άλλη, όπως από πολυϊμίδια (polyimide), πολυεστέρες (polyester), χαρτί και ύφασμα είναι καλές επιλογές για την κατασκευή τρανζίστορ. Το χαμηλό κόστος υλικών, η δυνατότητα παραγωγής με υψηλή ταχύτητα μέσω διεργασιών εκτύπωσης ώστε να μειωθεί το κόστος κατασκευής και ο παράγοντας εύκαμπτης διαμόρφωσης είναι όλα τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Τα κριτήρια επιλογής εύκαμπτου υποστρώματος είναι η θερμική, η χημική και η μηχανική σταθερότητα, η τραχύτητα της επιφάνειας τους και το κόστος των ταινιών.

3.4.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ

Η αρχή λειτουργίας των οργανικών τρανζίστορ είναι απλή και συμβατή, χωρίς την εφαρμογή τάσης πύλης δεν υφίσταται ροή ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ των ηλεκτροδίων απαγωγού και πηγής, αφού κάτω από αυτές τις συνθήκες το ημιαγωγικό στρώμα δεν συμπεριφέρεται ως αγωγός. Όταν όμως εφαρμοστεί μία τάση πύλης τότε εξαιτίας της επιτάχυνσης των φορέων σχηματίζεται ένα αγωγικό κανάλι στην διεπιφάνεια μεταξύ ημιαγωγού και μονωτή με αποτέλεσμα το ρεύμα να κατευθύνεται από την πηγή στον απαγωγό.

Οι παράμετροι οι οποίοι χαρακτηρίζουν ένα οργανικό τρανζίστορ είναι η ευκινησία των φορέων του και ο λόγος ρεύματος ON/OFF, η ευκινησία εκφράζει την μέση ταχύτητα των φορτίων λόγω του ότι της επιβάλλεται μία εξωτερική τάση. Ανά μονάδα ηλεκτρικού πεδίου προκύπτει από την σχέση:

$$v_d = \mu \cdot E$$

v_d : η μέση ταχύτητα ολίσθησης των φορέων (σταθερή για μικρά πεδία).

μ : η ευκινησία των φορέων φορτίου.

E : το ηλεκτρικό πεδίο.

Η συχνότητα ON/OFF είναι ο ρυθμός μεταξύ της πηγής και του απαγωγού του οργανικού τρανζίστορ μεταξύ των ON και OFF καταστάσεων, αμφότερες οι παράμετροι εξαρτώνται ισχυρά από την τάση που εφαρμόζεται στην πύλη.

Οι περιορισμοί στην απόδοση των οργανικών τρανζίστορ οφείλονται κυρίως από την χαμηλή ευκινησία των ηλεκτρονίων ή των οπών στα υλικά του καναλιού. Σημαντικό ρόλο στην λειτουργία τους παίζουν επίσης οι ιδιότητες δύο ειδών διεπαφής, της διεπαφής μεταξύ του ημιαγωγού και των ηλεκτροδίων, όπου η έγχυση φορέων γίνεται από τα ηλεκτρόδια στους ημιαγωγούς και της διεπαφής μεταξύ του ημιαγωγού και του μονωτή, όπου η μεταφορά των φορτίων πραγματοποιείται στο στρώμα του ημιαγωγού. Οι ιδιότητες των διεπαφών αυτών καθορίζουν την απόδοση των οργανικών τρανζίστορ.

Υπολογίζεται πως η ευκινησία των οργανικών υλικών δεν θα ξεπεράσει κατά πολύ την τιμή της ευκινησίας του άμορφου πυριτίου, το όριο ευκινησίας στα πολυμερή είναι ακόμα μικρότερο. Επομένως τα οργανικά τρανζίστορ δεν ενδείκνυνται για εφαρμογές που απαιτούν πολύ μεγάλες ταχύτητες μεταγωγής ή αλλιώς μεγάλη διακοπτική συχνότητα (switching speeds).

Τα οργανικά τρανζίστορ μπορούν να φανούν ανταγωνιστικά για τις ήδη υπάρχουσες εφαρμογές η ακόμα και για νέες εφαρμογές των συμβατικών τρανζίστορ πυριτίου που απαιτούν μεγάλη επιφάνεια κάλυψης, ευκαμψία, χαμηλές θερμοκρασίες κατασκευής και κυρίως χαμηλό κόστος. Η επεξεργασία αυτών των υλικών μπορεί να γίνει σε χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω των 120 °C) με λίγο ή καθόλου κενό, ενώ τα ανόργανα ημιαγώγιμα υλικά απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες (άνω των 900 °C) και υψηλό κενό. Τα οργανικά τρανζίστορ λεπτής ταινίας με δεδομένο ότι το κανάλι αγωγιμότητας μεταξύ πηγής-απαγωγού χαρακτηρίζεται από το πλάτος **W** και το μήκος **L**, έχουν τρεις περιοχές λειτουργίας, που διαφέρουν μεταξύ τους στην έκφραση του ρεύματος του απαγωγού (I_D).

W: πλάτος καναλιού αγωγιμότητας.

L: μήκος καναλιού αγωγιμότητας.

Οι περιοχές αυτές είναι:

- Η περιοχή αποκοπής, όπου ισχύει:

$$I_d = I_0 \cdot W$$

- Η γραμμική περιοχή, όπου ισχύει:

$$I_{d(\text{linear})} = K \cdot \frac{W}{L} \cdot [|V_{gs} - V_t|^{2m+2} - |V_{gs} - V_t - V_{ds}|^{2m+2}]$$

Όπου

$$K = \mu_0 \frac{1}{2^m} \frac{C_{\text{die}}^{2m+1}}{(2m+1)(2m+2)(\epsilon kT)^m}$$

k: η σταθερά Boltzmann.

m: ο εκθετικός παράγοντας που συνδέει το ρεύμα του απαγωγού με τις τάσεις V_{GS} και V_{DS} .

μ_0 : η ευκινησία.

C_{die} : η χωρητικότητα του διηλεκτρικού.

ϵ : η διηλεκτρική σταθερά του οργανικού ημιαγωγού.

T: η απόλυτη θερμοκρασία.

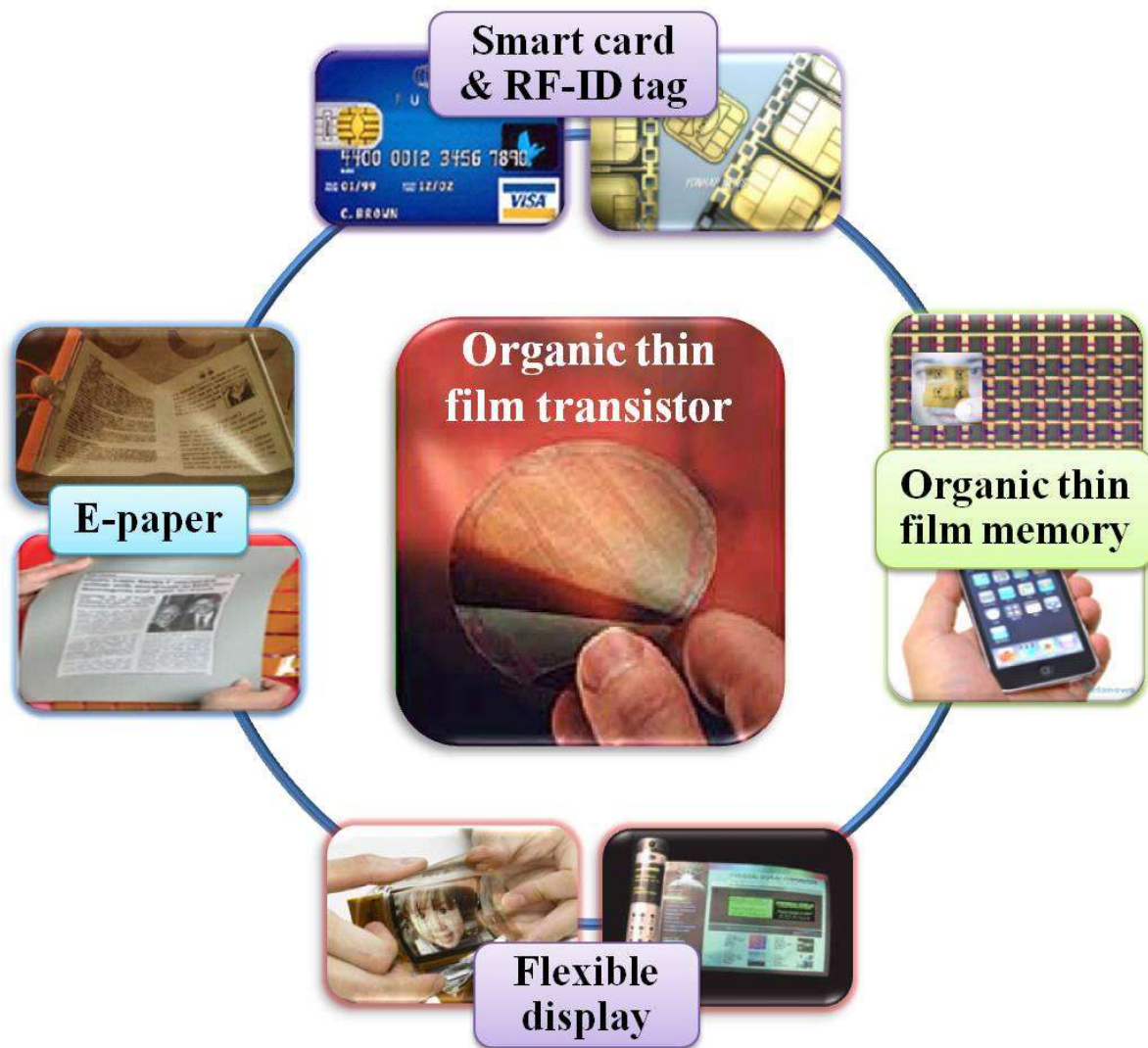
- Η περιοχή κόρου, όπου ισχύει:

$$I_{d(sat)} = K \cdot \frac{W}{L} \cdot |V_{gs} - V_t|^{2m+2} \cdot (1 + \lambda \cdot V_{ds})$$

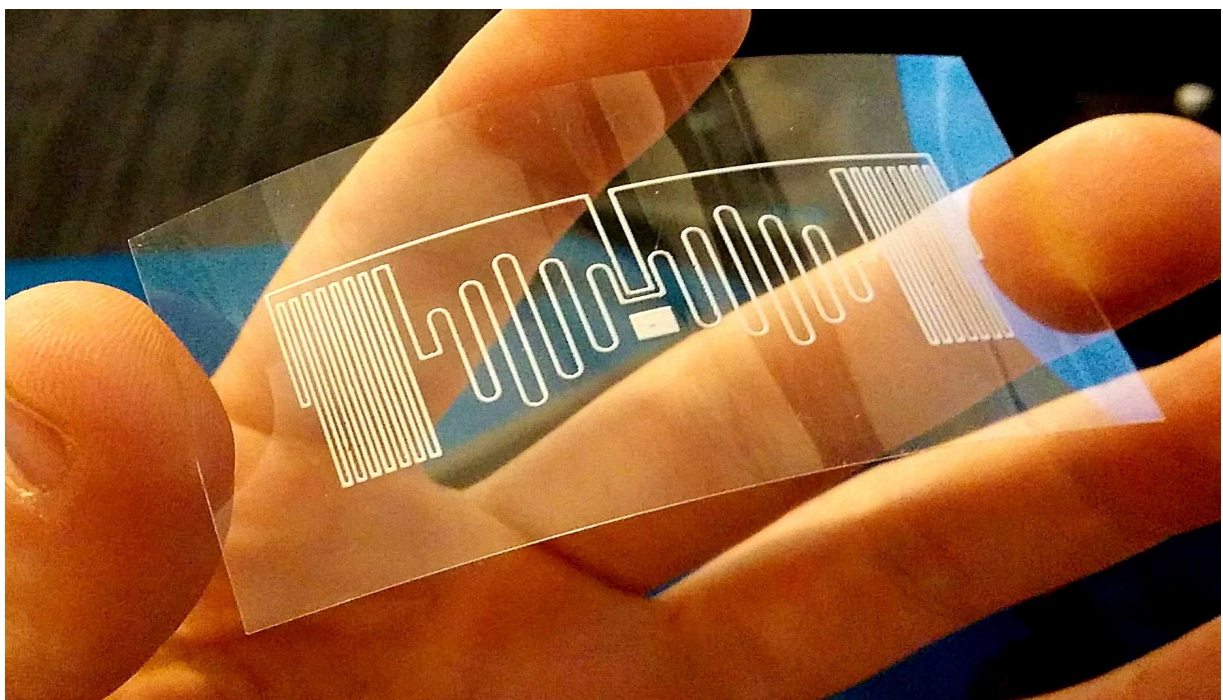
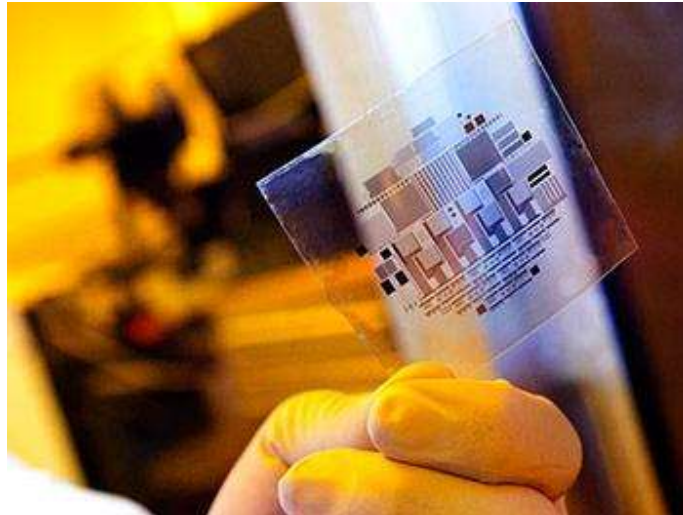
λ : η παράμετρος κανονικοποίησης του μήκους του καναλιού.

3.4.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ (OTFT's)

Τα τελευταία χρόνια η πολυπλοκότητα των κατασκευασμένων από οργανικά τρανζίστορ κυκλωμάτων έχει αυξηθεί σημαντικά και επίσης κατασκευάστηκαν και τα πρώτα μεγάλης κλίμακας (με πάνω από 800 τρανζίστορ) συμπληρωματικά κυκλώματα, και η συχνότητα λειτουργίας τους στα διάφορα κυκλώματα είναι ικανοποιητική της τάξης των kHz. Μια νέα αναδύομενη τεχνολογία είναι αυτή του ηλεκτρονικού χαρτιού (electronic paper), μία ανακάλυψη με βάση τα οργανικά τρανζίστορ ήταν το ηλεκτρονικό χαρτί ενεργής μήτρας (active-matrix electronic paper). Το ηλεκτρονικό χαρτί πρέπει να είναι εύκαμπτο και απαιτείται η επεξεργασία του σε σχετικά μεγάλες περιοχές και για αυτόν τον λόγο πλεονεκτεί η τεχνολογία των οργανικών τρανζίστορ, μία ακόμα σημαντική εφαρμογή των οργανικών τρανζίστορ είναι οι ετικέτες ηλεκτρονικής αναγνώρισης (RFID tags, Radio-Frequency IDentification tags), οι ετικέτες αυτές αντικαθιστούν ήδη τους γραμμωτούς κωδικούς (barcodes) που χρησιμοποιούνται ευρέως στις μέρες μας για τον προσδιορισμό της ταυτότητας των προϊόντων λιανικής πώλησης.



Εικόνα 24
Διάφορες εφαρμογές οργανικών τρανζίστορ λεπτού φιλμ



Εικόνα 25
Οργανικά τρανζίστορ λεπτού φιλμ πάνω σε ελαστική επιφάνεια (υπόστρωμα)

3.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΛΕΠΤΟΥ ΦΙΛΜ (OTFT's)

- **ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ**

- Υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης των οργανικών τρανζίστορ διότι βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο.
- Υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας μιας εφαρμογής η οποία δεν ήταν εφικτή με τις συμβατικές τεχνολογίες λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των οργανικών υλικών.
- Κατασκευάζονται με διαδικασίες εναπόθεσης χωρίς να μειώνονται οι επιδόσεις τους εφόσον κατασκευάζονται από οργανικά υλικά, προσφέροντας πληθώρα πλεονεκτημάτων έναντι της συμβατικής τεχνολογίας.
- Παρουσιάζουν συμβατότητα με υλικά με καλές μηχανικές ιδιότητες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υποστρώματα.
- Το πεδίο στο οποίο μπορούν να εφαρμοστούν είναι τεράστιο.
- Προτιμούνται διότι είναι αναλώσιμα και μπορούν να αντικατασταθούν εύκολα και ας έχουν κάποια υποδεέστερα χαρακτηριστικά.

- **ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ**

- Λειτουργούν συνήθως προς μια κατεύθυνση και όχι σε κατάσταση αντιστροφής.
- Παρουσιάζεται ιδιαίτερη ευαισθησία στην υγρασία καθώς με την έκθεση τους σε αυτήν προκαλείται ζημιά η και καταστροφή των οργανικών υλικών.
- Τα συμβατικά τρανζίστορ πυριτίου ξεπερνούν σε εξαιρετικό βαθμό τον αριθμό και την απόδοση των οργανικών τρανζίστορ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

INKJET PRINTING – ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΕΠΤΩΝ ΥΜΕΝΙΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάγκη για νέα, προηγμένα υλικά και συστήματα με νέες ιδιότητες και συμπεριφορά, οδήγησε προς τη Τεχνολογία των Λεπτών Υμενίων (Thin Film Technology). Ως βάση της τεχνολογίας αυτής θεωρείται η διαδικασία και οι μηχανισμοί της εναπόθεσης των ατόμων ή μορίων από την αέρια φάση στην επιφάνεια ενός στερεού υλικού. Λεπτό υμένιο ονομάζουμε την μικροδομή που δημιουργείται από τα ατομικά στρώματα ενός υλικού-εναποθέτη πάνω στην επιφάνεια ενός στερεού (bulk) υλικού και που η μια διάστασή του είναι τάξεις μεγέθους μικρότερη από τις άλλες δύο. Τα λεπτά υμένια, με πάχη που κυμαίνονται από λίγα nm έως και μερικά μm, έχουν ιδιότητες που είναι σημαντικά διαφορετικές από αυτές των στερεών υλικών και των επιφανειών. Στις περισσότερες τεχνικές εναπόθεσης, τα λεπτά υμένια εναποτίθενται στην επιφάνεια ενός υλικού σε θερμοκρασίες πολύ μικρότερες από το μισό της θερμοκρασίας τήξης του αντίστοιχου bulk υλικού ενώ η ανάπτυξη λαμβάνει χώρα κάτω από συνθήκες πολύ μακριά από τη θερμοδυναμική ισορροπία. Αυτές ακριβώς οι συνθήκες είναι υπεύθυνες για το σχηματισμό διαφόρων μετασταθών φάσεων, άμορφων και νανοδομικών υλικών (nanostructured materials). Η ανάπτυξη μονοστρωματικών ή πολυστρωματικών δομών λεπτών υμενίων, θα προσδώσει στο συνολικό σύστημα τις επιθυμητές ιδιότητες (φυσικές, χημικές, βιολογική δράση) που απαιτούνται για την συγκεκριμένη χρήση του αλλά και νέες εξαιρετικές ιδιότητες που θα επεκτείνουν το πεδίο εφαρμογών του και τη διάρκεια ζωής του.

Μερικοί από τους τομείς που βρίσκουν εφαρμογές τα Λεπτά Υμένια είναι οι εξής: μικροηλεκτρονική, ηλεκτρονικοί υπολογιστές, τηλεπικοινωνίες, αισθητήρες (sensors), Βιοϋλικά (βιοσυμβατές, αντι-μικροβιακές επικαλύψεις), Οπτοηλεκτρονική ,οπτική (ανακλαστικές, αντι-ανακλαστικές επικαλύψεις, απορροφητικές επικαλύψεις, κτλ), επιφανειακή κατεργασία-προστασία υλικών (surface engineering-materials protection), συσκευασία τροφίμων (food packaging), κατασκευή εύκαμπτων ηλεκτρονικών διατάξεων (επίπεδες οθόνες απεικόνισης, φωτοβολταϊκά στοιχεία), διακοσμητική κτλ.

Τα τελευταία χρόνια η ραγδαία ανάπτυξη του κλάδου επικεντρώνει τις προσπάθειές της στην αντικατάσταση των συμβατικών υλικών τα οποία χρησιμοποιούνται ως υποστρώματα για την κατασκευή ηλεκτρονικών διατάξεων με εύκαμπτα υλικά. Το αποτέλεσμα είναι η κατασκευή εύκαμπτων ηλεκτρονικών διατάξεων , που φέρουν πλήθος πλεονεκτημάτων και υπολογίζεται ότι θα αντικαταστήσουν πλήρως την παραδοσιακή τεχνολογία πυριτίου όσον αφορά τις ηλεκτρονικές διατάξεις και τα κυκλώματα.

Μία πολύ συνηθισμένη και βασική δομή που έχει μια εύκαμπτη διάταξη είναι ένα πολυμερικό υπόστρωμα πάνω στο οποίο εναποτίθεται ένα υμένιο φραγμού, ακολουθούν τα λειτουργικά στρώματα, στα οποία αναπτύσσεται ένα ακόμα υμένιο φραγμού και τέλος ενθυλακώνεται όλη η διάταξη. Μερικά από τα πλεονεκτήματα που προσδίδουν τα εύκαμπτα υποστρώματα στις ηλεκτρονικές διατάξεις είναι η ευκαμψία, η σημαντική μείωση του κόστους κατασκευής, η ελάττωση του βάρους των διατάξεων και δυνατότητα μαζικής παραγωγής μέσω των τεχνικών εκτύπωσης.

Όπως έχουμε επαναλάβει σε προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας, τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως υποστρώματα στις εύκαμπτες ηλεκτρονικές διατάξεις πρέπει να ικανοποιούν συγκεκριμένα κριτήρια:

- 1) Να έχουν μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα.
- 2) Να είναι ελαφριά.
- 3) Να έχουν χαμηλό κόστος.
- 4) Να είναι διαφανή.
- 5) Να μην παρουσιάζουν ατέλειες δομής.
- 6) Να καθίσταται δυνατή η επεξεργασία τους.
- 7) Να είναι εύκαμπτο.
- 8) Να είναι ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες.
- 9) Να αντιστέκονται στην δράση διαλυτών.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για εύκαμπτα ηλεκτρονικά είναι το γυαλί, το ανοξείδωτο ατσάλι και τα πολυμερή. Το γυαλί είναι εύκαμπτο σε μικρά πάχη, έχει καλές ιδιότητες φραγμού και έχει λεία επιφάνεια, το βασικό του μειονέκτημα είναι η δυσκολία στην κατεργασία του και το ότι είναι πολύ εύθραυστο. Το ανοξείδωτο ατσάλι είναι ανθεκτικό, εύκαμπτο και αντέχει στις υψηλές θερμοκρασίες με πολύ καλές ιδιότητες φραγμού αλλά βασικό του μειονέκτημα είναι το μεγάλο του κόστος. Τέλος τα πλαστικά φιλμ είναι μια πολύ καλή περίπτωση λόγω του χαμηλού κόστους και της ανθεκτικότητάς τους αλλά το κύριο μειονέκτημά τους είναι η διαπερατότητα τους στο οξυγόνο και την υγρασία. Τα κύρια υποψήφια υποστρώματα είναι ο πολυτερεφθαλικός αιθυλενεστέρας (PolyEthylene Terephthalate-PET) και ο πολυναφθαλενικός αιθυλενεστέρας (PolyEthylene Naphthalate-PEN).

4.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ – ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΛΕΠΤΩΝ ΥΜΕΝΙΩΝ

Ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται υπάρχουν και διαφορετικές τεχνικές εκτύπωσης-εναπόθεσης, τα πολυμερικά υλικά που έχουν την μορφή διαλύματος αναπτύσσονται σε υμένια με την μέθοδο της εναπόθεσης με σταγόνα (*drop casting*), της εναπόθεσης με περιστροφή (*spin coating*) και με την τεχνική της εκτύπωσης (*printing techniques*). Τα υμένια των μονομερών και τα υμένια μικρών οργανικών μορίων αναπτύσσονται με τις τεχνικές της τήξης και της εξάχνωσης.

Παρακάτω αναφέρονται κάποια χαρακτηριστικά μόρια οργανικών υλικών τα οποία αποτελούν αντικείμενο εκτενούς μελέτης και ήδη εφαρμόζονται στην μικροηλεκτρονική:

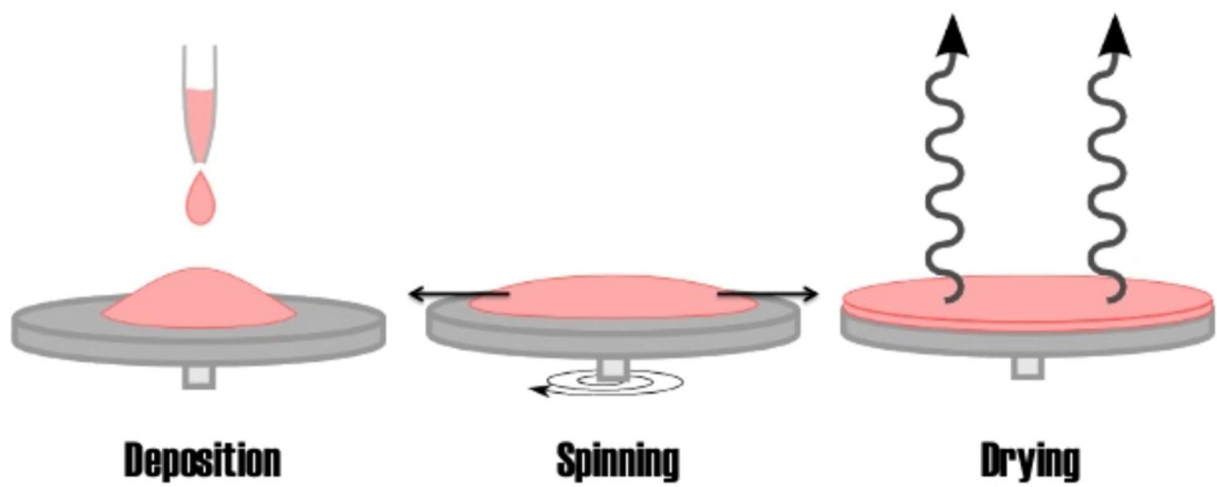
- Poly(para-phenylenevinylene) (PPV): Οι αξιόλογες οπτικές και ηλεκτρικές του ιδιότητες το καθιστούν ικανό για εφαρμογές ως ενεργό κανάλι και σε άλλες ηλεκτρονικές διατάξεις, όπως τρανζίστορ και ηλιακά στοιχεία.
- Polyfluorene (PFO): Έχει την μορφή άοσμων λευκών κρυσταλλιτών, είναι φθορίζον υλικό, αδιάλυτο στο νερό και διαλυτό σε οργανικούς διαλύτες.
- Poly(3-alkylthiophene) (P₃AT): Ανήκει στα πολυθειοφαίνια (PTs) των οποίων η αγωγιμότητα βελτιώνεται σημαντικά με προσθήκη κατάλληλων προσμίξεων, για αυτό και ονομάζονται συνθετικά μέταλλα (*synthetic metals*). Επίσης οι οπτικές τους ιδιότητες καθορίζονται σημαντικά από την παρουσία απεντοπισμένων ηλεκτρονιακών καταστάσεων και επηρεάζονται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και την επίδραση εξωτερικού δυναμικού. Οι μεταβαλλόμενες ηλεκτρικές και οπτικές τους ιδιότητες καθιστούν αυτά τα υλικά ελκυστικά για εφαρμογές σε ηλεκτρονικούς αισθητήρες, τρανζίστορ, διόδους, ηλιακά στοιχεία, φωτοχημικούς αντιστάτες και μπαταρίες.
- Tris(8-hydroxyquinoline) aluminium (Alq₃): Εμφανίζεται σε διάφορες κρυσταλλικές δομές και αποτελεί το πρώτο υλικό που εφαρμόστηκε σε OLED's το 1987 και αργότερα σε τρανζίστορ. Είναι το πρώτο υλικό στο οποίο παρατηρήθηκε ότι με αλλαγή των υποκαταστατών στους δακτυλίους του μορίου του μεταβάλλονται οι φωτοαγώγιμες ιδιότητές του και επηρεάζεται η λειτουργία της διάταξης, όπου αυτό εφαρμόζεται.
- Fullerene (C₆₀): Τα φουλλερένια ανακαλύφθηκαν το 1985 και είναι μόρια αποτελούμενα εξολοκλήρου από άνθρακα με δομή κοίλης σφαίρας, ελλειψοειδούς ή σωλήνα (γνωστοί ως νανοσωλήνες, *nanotubes*). Το C₆₀ λειτουργεί ως δέκτης ηλεκτρονίων σε διατάξεις με κανάλια οργανικών μορίων όπως είναι το PPV και τα παράγωγά του, όπου παρατηρείται ότι διευκολύνεται η μεταφορά του επαγόμενου φορτίου βελτιώνοντας την απόδοση της διάταξης.

- Pentacene: Είναι ένα μόριο πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονοανθράκων και έχει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον εξαιτίας των καλών ιδιοτήτων του στην διαδικασία μεταφοράς φορέων φορτίου. Αναπτύσσεται ομοιόμορφα σε υπέρλεπτα υμένια, ενώ με την μέθοδο της εναπόθεσης με εξάχνωση σε κενό παράγονται υπερκαθαρά υμένια τυ ολιγομερούς αυτού τα οποία και χρησιμοποιούνται σε διατάξεις μικροηλεκτρονικής (τρανζίστορ, ηλιακά στοιχεία).
- Rubrene: (5,6,11,12-Tetraphenyltetracene): Είναι ένας πολυκυκλικός αρωματικός υδρογονάνθρακας κόκκινου χρώματος σε μορφή κρυσταλλικής σκόνης, που χρησιμοποιείται ως οργανικός ημιαγωγός σε διόδους τρανζίστορ και αισθητήρες. Το ρουμπρένιο είναι ο οργανικός ημιαγωγός με την μεγαλύτερη ευκινήσια φορέων φορτίου που έχει αναφερθεί για εφαρμογή σε FET.
- Polyaniline (PANI): Η καθαρή πολυανιλίνη έχει ηλεκτρική αγωγιμότητα 100 S/cm ενώ η τιμή αυτή μεταβάλλεται από 10^{-10} μέχρι 10 S/cm ανάλογα με την διαδικασία παρασκευής που ακολουθείται [18].

Διάφορες τεχνικές εκτύπωσης – εναπόθεσης αναφέρονται παρακάτω:

➤ Spin Coating

Τα πρώτα οργανικά Φ/Β κελιά κατασκευάστηκαν το έτος 1995 με την μέθοδο εναπόθεσης spin coating. Με αυτή την τεχνική πάνω στο υπόστρωμα τοποθετείται συγκεκριμένη ποσότητα διαλύματος, το υπόστρωμα αρχίζει να περιστρέφεται και λόγω της κεντρομόλου επιτάχυνσης το διάλυμα απλώνεται πάνω στο υπόστρωμα και δημιουργείται ένα ομογενές φιλμ στην επιφάνεια του υποστρώματος. Οι παράμετροι που επηρεάζουν την εναπόθεση είναι η περιστροφική ταχύτητα (με μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής έχουμε λεπτότερα υμένια) και επιτάχυνση καθώς και η διάρκεια περιστροφής. Το πάχος του, προς δημιουργία υμενίου, και ποιότητα του επηρεάζονται επίσης και από την φύση του διαλύματος όσο αφορά το ιξώδες, το ρυθμό εξάτμισης του διαλύτη, τη συγκέντρωση του διαλλείματος και τις επιφανειακές τάσεις [19]. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι δεν είναι κατάλληλη για μαζική παραγωγή αλλά τα πλεονεκτήματά της είναι ότι είναι οικονομική, γρήγορη και εύκολη στον χειρισμό.



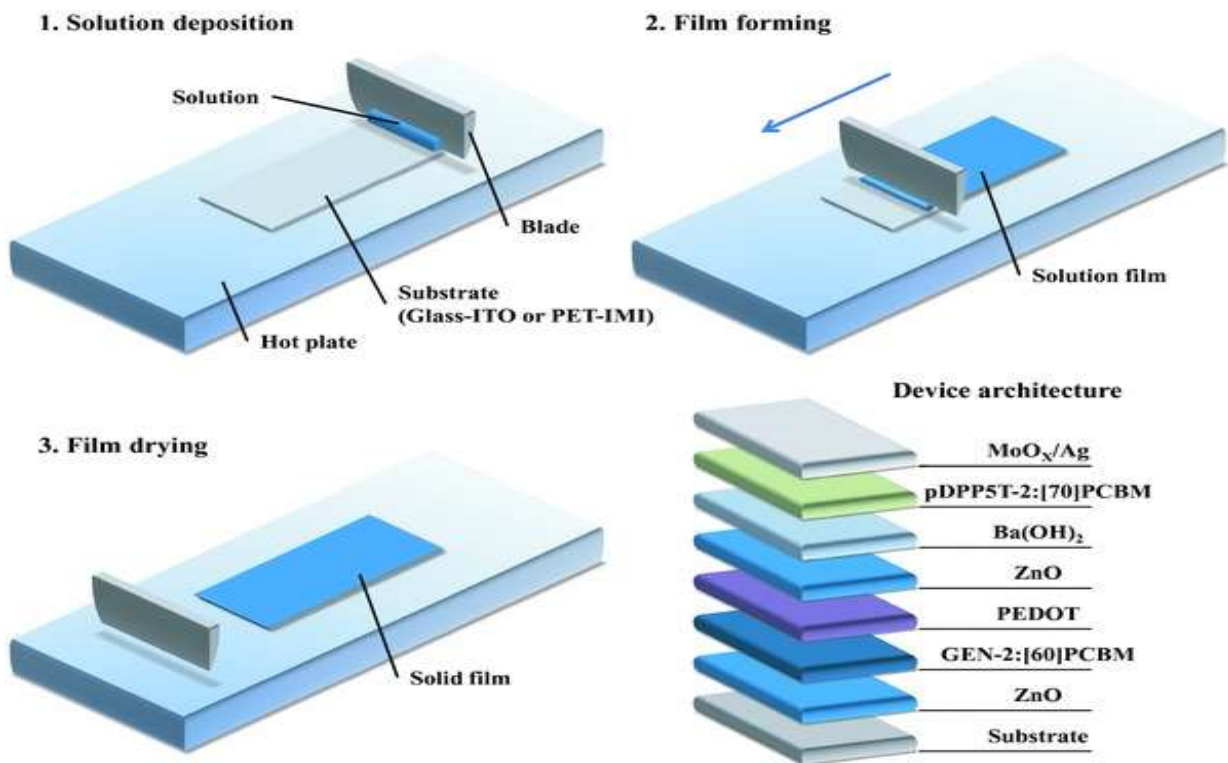
Εικόνα 26
Τεχνική εναπόθεσης spin coating



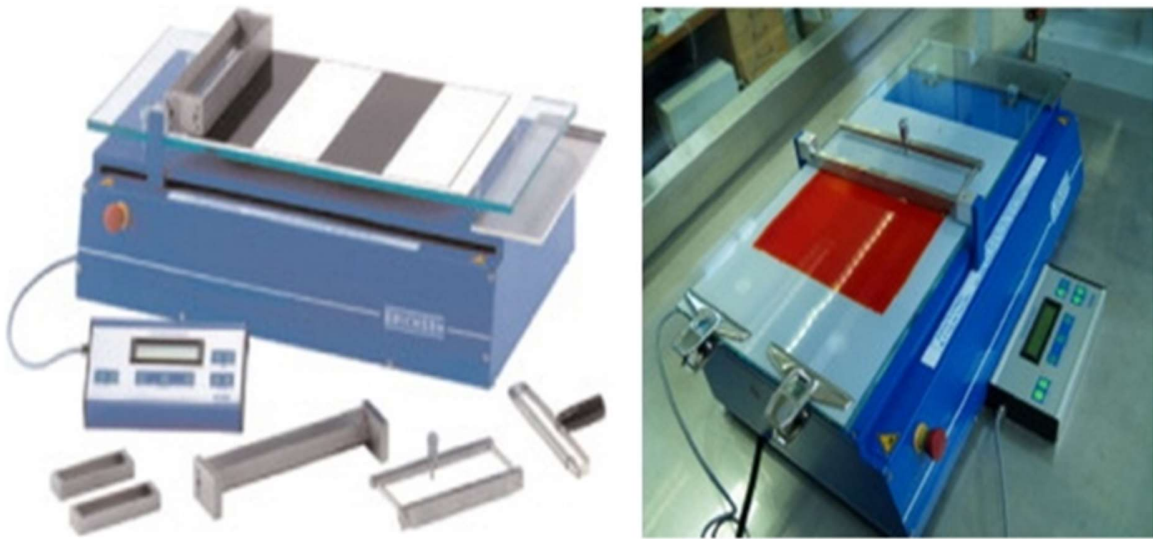
Εικόνα 27
Συσκευή spin coater

➤ Doctor Blading

Η τεχνική doctor-blading χρησιμοποιεί μια λεπίδα σε καθορισμένη απόσταση από το υπόστρωμα, μερικών δεκάδων μικρόμετρων, μπροστά από την οποία τοποθετείται το διάλυμα και με σταθερή ταχύτητα μετατόπισης, κατά μήκος του υποστρώματος, εναποθέτει το υμένιο κατευθείαν πάνω στο υπόστρωμα. Λόγω της ομοιότητας της λεπίδας με την ιατρική λεπίδα ονομάζεται doctor-blade. Το πάχος του υμενίου εξαρτάται τόσο από την φύση του διαλύματος όσο και από τις παραμέτρους του blading, όπως η συγκέντρωση και το ιξώδες του διαλύματος, η ταχύτητα της λεπίδας, η απόστασή της από το υπόστρωμα και η θερμοκρασία της θερμαινόμενης πλάκας.



Εικόνα 28
Τεχνική εναπόθεσης doctor-blading

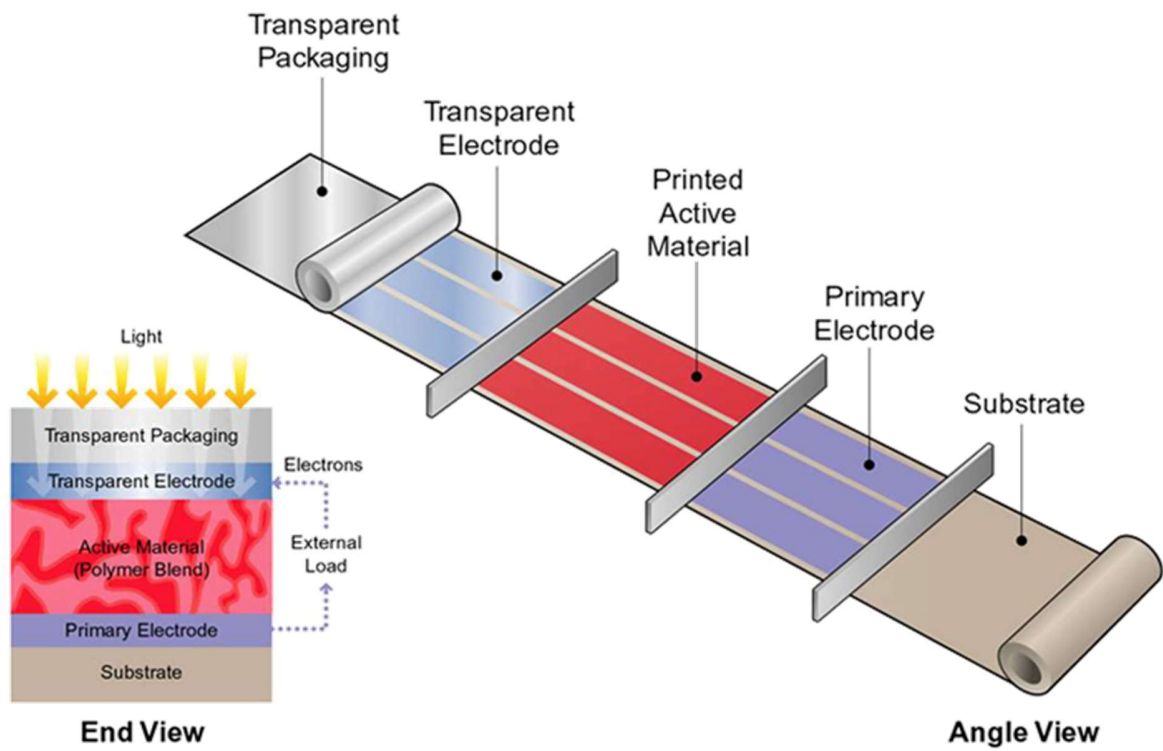


Εικόνα 29
Συσκευή doctor-blading

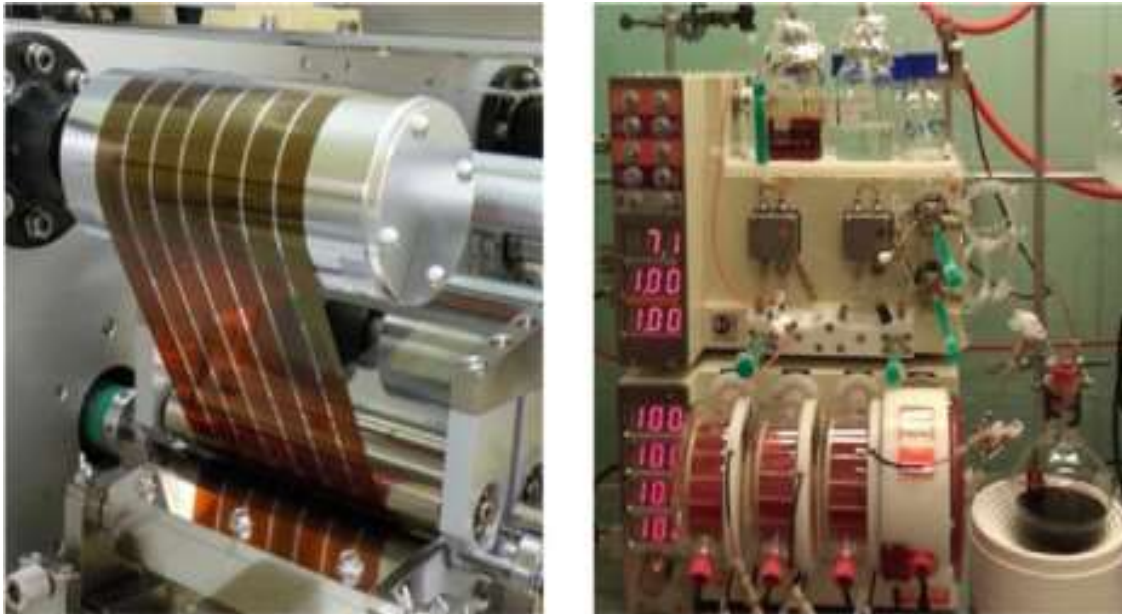
➤ **Roll-to-Roll processing**

Η Roll-to-Roll παραγωγή οργανικών φωτοβολταϊκών χρησιμοποιείται για μαζική, βιομηχανική παραγωγή, για κελιά μεγάλου μεγέθους. Με τη χρήση της μεθόδου αυτής δίνεται η δυνατότητα εναπόθεσης οργανικών υλικών πάνω σε εύκαμπτα υποστρώματα με μικρό βάρος. Η μέθοδος αυτή προσφέρει επίσης στους κατασκευαστές τη δυνατότητα για συνεχή και με γρήγορους ρυθμούς παραγωγή σε μεγάλους όγκους με χαμηλό κόστος [20].

Με την μέθοδο αυτή η εναπόθεση γίνεται σε ένα εύκαμπτο κινούμενο υπόστρωμα το οποίο κινεί μια μηχανή η οποία εκτελεί όλες τις φάσεις της τεχνικής συνεχόμενα. Στο τέλος της διαδικασίας το επικαλυμμένο υπόστρωμα επανακαλύπτεται. Η τεχνική αυτή έχει αρκετά υψηλό ρυθμό και εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές εναπόθεσης.



Εικόνα 20
Τεχνική Roll-to-Roll



Εικόνα 21
Συσκευή της τεχνικής Roll-to-Roll

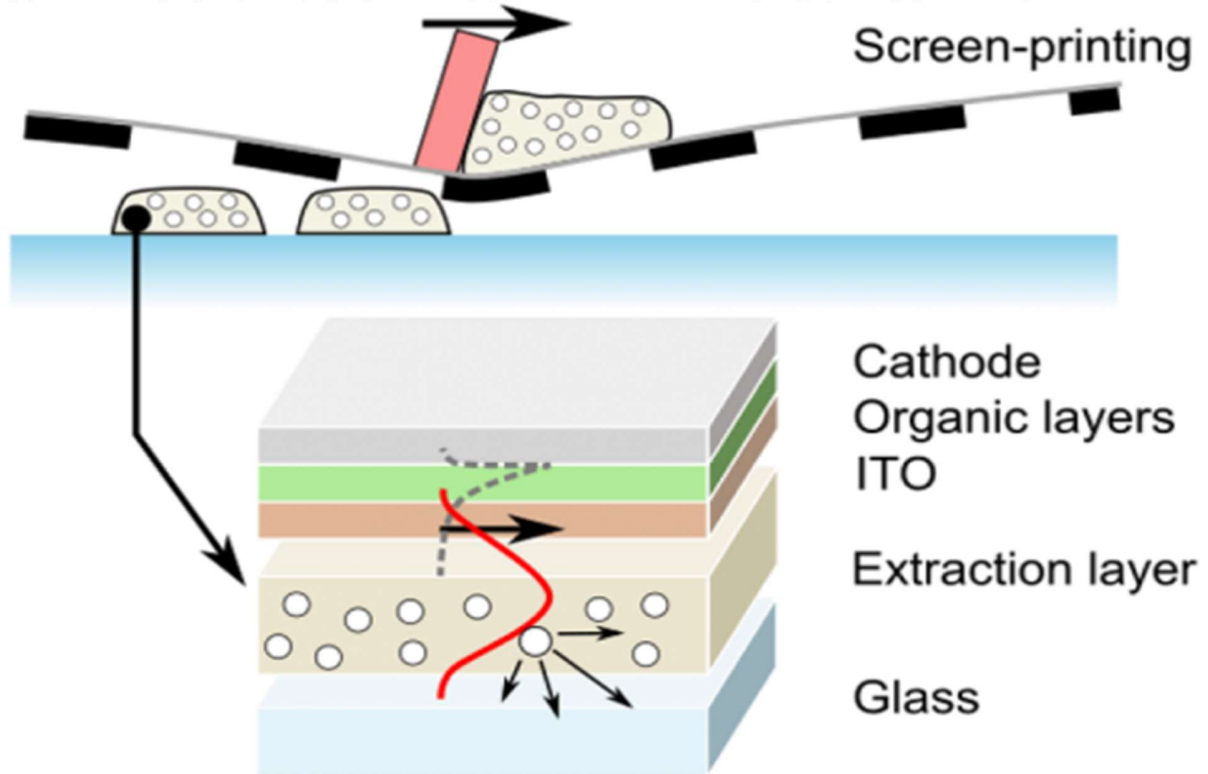
Οι διάφορες τεχνικές που εφαρμόζονται είναι οι slot-die coating και gravure coating. Στην τεχνική slot-die coating γίνεται εξαναγκασμένη κίνηση του μελανιού μέσω ενός συστήματος αντλίας με κατεύθυνση προς την κεφαλή, όπου με την ρύθμιση της ροής του υγρού επιτυγχάνεται το επιθυμητό πάχος της επίστρωσης. Ανάλογα με το ιξώδες χρησιμοποιείται είτε εμβολοφόρος αντλία, είτε αντλία με γρανάζια ή δεξαμενή πίεσης. Το πάχος των υμενίων καθορίζεται από κάποιες παραμέτρους όπως ο ρυθμός ροής, το πλάτος εναπόθεσης και η ταχύτητα. Τέλος πολλές παράμετροι μπορούν να μεταβληθούν σε πραγματικό χρόνο ώστε να ληφθεί το πραγματικό πάχος των στρωμάτων για τα Φ/Β στοιχεία.

Η τεχνική gravure coating αποτελείται από ένα πρότυπο μεταλλικό ρολό, με προσχεδιασμένο το κύκλωμα που επιθυμούμε, το οποίο συλλέγει το μελάνι από ένα δοχείο και κυλώντας το εναποθέτει πάνω στο υπόστρωμα αποτυπώνοντας ταυτόχρονα και το επιθυμητό κύκλωμα.

Μειονέκτημα της Roll-to-Roll τεχνικής αποτελεί το γεγονός ότι απαιτούνται υλικά που για επεξεργασία υπό ατμοσφαιρικές να παρουσιάζουν σταθερές ιδιότητες, κάτι το οποίο απαιτεί επιπλέον έρευνα, ενώ πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι οι μεγάλες παραγόμενες επιφάνειες με μικρό κόστος παραγωγής.

➤ Screen Printing

Η εκτύπωση επί της οθόνης (screen printing) είναι μια ευρύτατα διαδεδομένη τεχνική στην βιομηχανία για γρήγορη και φθηνή εναπόθεση υμενίων σε μεγάλες επιφάνειες. Συγκεκριμένα γίνεται εναπόθεση των βασικών στοιχείων της διάταξης σε μορφή διαλύματος μέσω ανοξείδωτων μηχανικών μασκών (stainless steel mechanical masks) [21]. Αυτό από μόνο του αρκεί για να θεωρηθεί μια πάρα πολύ καλή μέθοδος για την παραγωγή μεγάλων διαστάσεων οργανικών Φ/Β. Επίσης η διαδικασία της εκτύπωσης επί της οθόνης δίνει την δυνατότητα για εύκολη σχηματοποίηση ώστε να καθορίζεται ποια κομμάτια του υποστρώματος θα δεχτούν την εναπόθεση. Επίσης στην κατασκευή συστημάτων παραγωγής ενέργειας μεγάλων διαστάσεων είναι απαραίτητο να δημιουργούνται πολλά ξεχωριστά ηλιακά κελιά τα οποία συνδέονται μεταξύ τους. Με την μέθοδο αυτή ξεχωριστές συσκευές μπορούν εύκολα να καθοριστούν πάνω στο ίδιο υπόστρωμα για την βελτιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής ολόκληρου του συστήματος. Σε βιομηχανικό επίπεδο υμένια τα οποία φτιάχνονται με αυτή την τεχνική έχουν πάχος πάνω από 0,5mm το οποίο είναι πολύ παχύ για χρήση σε οργανικά Φ/Β αλλά υπάρχουν δουλείες που παρουσιάζουν την παρασκευή πολυμερικών υμενίων πάχους κάτω των 100nm που λειτουργούν σε στρώμα μεταφοράς σπών οργανικών διόδων εκπομπής φωτός (OLED's).



Εικόνα 22
Τεχνική screen printing

4.3 INKJET PRINTING

Όσον αφορά τη τεχνική inkjet printing έχει πραγματοποιηθεί αρκετή έρευνα, κυρίως από τη Motorola, τη Philips Electronics και τη Plastic Logic, ώστε να χρησιμοποιηθούν inkjet εκτυπωτές για την εναπόθεση οργανικού υλικού σε υπόστρωμα [22, 23]. Αντικαθιστώντας το μελάνι από τα δοχεία του εκτυπωτή με υψηλής ποιότητας (καθαρότητας) οργανικό υλικό και με τη βοήθεια ενός υπολογιστικού σχεδιαστικού προγράμματος (CAD) μπορούμε να σχεδιάσουμε μία εναπόθεση όπως την επιθυμούμε. Πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η δυνατότητα απευθείας εκτύπωσης πάνω σε μία διαφάνεια η οποία παίζει το ρόλο του υποστρώματος. Αυτή η πολλά υποσχόμενη τεχνολογία επιτρέπει στον καθένα να σχεδιάσει και να παράξει πρωτότυπα μοντέλα με ξεχωριστά και μοναδικά κυκλώματα. Αντίθετα, η τεχνική περιορίζεται από την υφιστάμενη inkjet τεχνολογία, όσον αφορά την ανάλυση. Επιπλέον, λόγω του αναπόφευκτου διαστήματος ανάμεσα στη κεφαλή του εκτυπωτή και του υποστρώματος παρατηρείται το φαινόμενο της διασποράς υποβαθμίζοντας περαιτέρω την τελική ανάλυση [23].

Από το σύνολο των τεχνικών εκτύπωσης, η τεχνική inkjet printing διαθέτει μοναδικά χαρακτηριστικά που την καθιστούν ιδανικό υποψήφιο για την κατασκευή εκτυπωμένων OPV's. Το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας είναι ιδιαίτερα έντονο στην περίπτωση αυτή, καθώς το inkjet printing συνδυάζει το χαμηλό κόστος λειτουργίας με την υψηλή επαναληψιμότητα των εκτυπώσεων [24]. Το βασικό της πλεονέκτημα είναι ο συνδυασμός της με το ψηφιακό σχέδιο (digital patterning), κάτι που την καθιστά κατάλληλη για ανάπτυξη μοτίβων (patterns) χωρίς την ύπαρξη φυσικού πρωτότυπου, π.χ μάσκας [24,25]. Επιπλέον, είναι μια non-contact τεχνική χωρίς ρύπανση του υποστρώματος, με ελάχιστη κατανάλωση υλικού και δυνατότητα εναπόθεσής του σε μικρές και μεγάλες επιφάνειες [24]. Είναι, επίσης, συμβατή με διαλύματα πολυμερών και μεταλλικών νανοσωματιδίων, με οργανικούς και ανόργανους διαλύτες και επιτρέπει την ακριβή, χωρικά, τοποθέτηση διαλυμάτων (σταγόνες όγκου pL) σε διάφορα υποστρώματα. Αν και απλοϊκά διατυπωμένος, ο ορισμός αυτός περικλείει ένα πλήθος φυσικών μηχανισμών που καθορίζουν και περιορίζουν, ταυτόχρονα, το inkjet printing[26].

Το θεωρητικό υπόβαθρο της σύγχρονης τεχνολογίας inkjet printing τέθηκε από τον Rayleigh, σε μια σειρά δημοσιεύσεών του για τους πίδακες υγρών και τις αστάθειές τους (Rayleigh 1878, Rayleigh 1879, Rayleigh 1882). Η διάσπαση ενός πίδακα-ροής υγρού σε σταγόνες μελετήθηκε πειραματικά από τον Plateau. Παρατήρησε ότι ένας κατακόρυφος πίδακας νερού (αρχικά σταθερής ακτίνας), υπό την επίδραση της βαρύτητας, χάνει το κυλινδρικό του σχήμα και διασπάται σε σταγόνες, αν το μήκος κύματός του είναι κατά 3.13-3.18 φορές μεγαλύτερο από τη διάμετρό του (Σχήμα 1.2α). Το φαινόμενο είναι γνωστό και ως αστάθεια Plateau-Rayleigh (Plateau-Rayleigh instability) και αποδίδεται στην επιφανειακή τάση.

Η πρώτη λειτουργική συσκευή inkjet printing κατασκευάστηκε το 1951 από τη Siemens-Elema (US Patent 2,566,433). Τη δεκαετία του '70 σχεδιάστηκε ο πρώτος εκτυπωτής ψεκασμού μελάνης (inkjet printer), τύπου piezo, από την εταιρεία Clevite (US Patent 3, 683, 212), ενώ η εταιρεία Canon εισήγαγε την τεχνολογία 'Bubblejet' (εκτυπωτές τύπου thermal).

Οι εκτυπωτές ψεκασμού μελάνης λειτουργούν με δύο βασικούς τρόπους: Συνεχώς (continuous) ή Drop-on-Demand (DOD).

- **Drop-on-Demand piezo inkjet printing:** Σε αυτό το είδος εκτυπωτή, η κεφαλή εκτύπωσης (printhead) φέρει μια σειρά ακροφυσίων-οπών (nozzles), κάθε ένα από τα οποία έχει ξεχωριστό πιεζοηλεκτρικό στοιχείο. Με εφαρμογή τάσης, το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο παραμορφώνεται μηχανικά και μια σταγόνα διαλύματος εξέρχεται από την οπή. Αυτή η μέθοδος εκτύπωσης επιτυγχάνεται με ένα ασπρόμαυρο αρχείο εικόνας, το οποίο καθορίζει το σχήμα και το μέγεθος του προς εκτύπωση αντικειμένου. Κάθε μαύρο pixel στο αρχείο της εικόνας αντιστοιχεί σε μία σταγόνα διαλύματος, η ανάλυση (resolution) του αρχείου εικόνας μπορεί να μεταβληθεί ώστε να ελέγχεται το πλήθος σταγόνων που χρησιμοποιούνται για να σχηματίσουν το αντίστοιχο αντικείμενο. Επίσης, ο εκτυπωτής αναγνωρίζει τα λευκά pixel ως περιοχές που δεν πρέπει να εκτυπωθούν, έτσι διάφορα σχήματα και σχέδια μπορούν να τυπωθούν με την τεχνική αυτή. Μεταβάλλοντας το ηλεκτρικό σήμα (κυματομορφή) στα nozzles, μπορεί κανείς να ελέγξει την παραμόρφωση του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και άρα, τον όγκο και την ταχύτητα των σταγόνων[27]. Ο σχηματισμός σταγόνων εξαρτάται σημαντικά από τις ιδιότητες του υγρού. Το βασικό πλεονέκτημα του inkjet printing είναι ο σχηματισμός, με ακρίβεια, πανομοιότυπων σταγόνων με καθορισμένο όγκο. Η συμβατότητα διαφόρων διαλυμάτων με την τεχνική inkjet printing εξαρτάται από τις φυσικές και ρεολογικές τους ιδιότητες, οι οποίες με τη σειρά τους καθορίζουν το σχηματισμό σταγόνων.

4.3.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΤΑΓΟΝΩΝ

Οι φυσικές ιδιότητες του διαλύματος, όπως η επιφανειακή τάση και το ιξώδες είναι κρίσιμες στην τεχνολογία inkjet printing. Η επιφανειακή τάση του διαλύματος είναι στενά συνδεδεμένη με το σχήμα της σταγόνας τη στιγμή εξόδου από το nozzle[25]. Αν το διάλυμα δεν έχει επιθυμητή επιφανειακή τάση, υπάρχει διαβροχή της κεφαλής (wetting) ή παγίδευση αέρα στο εσωτερικό των nozzles, με επιπτώσεις στο σχηματισμό σταγόνων[28]. Εξίσου σημαντική παράμετρος στη δυνατότητα ψεκασμού (jettability) διαφόρων διαλυμάτων είναι και η επιλογή του κατάλληλου διαλύτη. Ο διαλύτης επηρεάζει άμεσα τις ρεολογικές ιδιότητες του διαλύματος[29].

4.3.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΥΜΕΝΙΟΥ

Αρχικά, η κεφαλή κινείται κατά μήκος του υποστρώματος και εκτυπώνει γραμμές διαλύματος που αποτελούνται από διακριτές σταγόνες. Έπειτα, η κεφαλή κινείται κάθετα στη διεύθυνση εκτύπωσης χωρίς να τυπώσει διάλυμα και στη συνέχεια τυπώνει τη δεύτερη ομάδα γραμμών, προς την αντίθετη κατεύθυνση. Στην τεχνική inkjet printing, ο έλεγχος της ομογένειας των υμενίων κατά την ξήρανση είναι δύσκολος, καθώς τα φαινόμενα που εκδηλώνονται εξαρτώνται άμεσα από το εκάστοτε σύστημα διαλύματος-υποστρώματος και τις διαστάσεις. Οι inkjet-printed σταγόνες, με όγκο της τάξης των pL, ξηραίνονται σε κλάσματα δευτερολέπτου μετά την πρόσπτωση στο υπόστρωμα, ενώ η ταχύτητα drying ενός υμενίου διαρκεί έως και λεπτά και εξαρτάται έντονα από το πάχος του και άρα από το πλήθος των σταγόνων[30]. Η συμπύκνωση σταγόνων στο υπόστρωμα εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των σημείων (dot spacing), η οποία ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ των κέντρων διαδοχικών σταγόνων, και καθορίζει το τελικό εκτυπωμένο υμένιο[30]. Το υγρό υμένιο στερεοποιείται είτε μέσω εξάτμισης του διαλύτη, είτε με κρυστάλλωση ή χημικές αλλαγές. Η ξήρανση των σταγόνων στο υπόστρωμα συνοδεύεται, συνήθως, από ελάττωση του όγκου, όταν η στερεοποίηση συμβαίνει μέσω εξάτμισης διαλύτη. υπάρχουν και άλλες παράμετροι που επηρεάζουν την ποιότητα των εκτυπωμένων υμενίων, όπως η συγκέντρωση του διαλύματος, οι διαλύτες και η θερμοκρασία υποστρώματος. Η ρύθμιση, λοιπόν, των παραμέτρων εκτύπωσης για τους διαφορετικούς συνδυασμούς διαλυμάτων-υποστρωμάτων απαιτεί πρωταρχικό στόχο στην προσπάθεια κατασκευής εκτυπωμένων OPVs. Μεταβάλλοντας κατάλληλα τις συνθήκες, μπορεί κανείς να έχει έλεγχο της μορφολογίας και των ιδιοτήτων των εκτυπωμένων υμενίων και να εξασφαλίσει τη λειτουργικότητά τους[30].

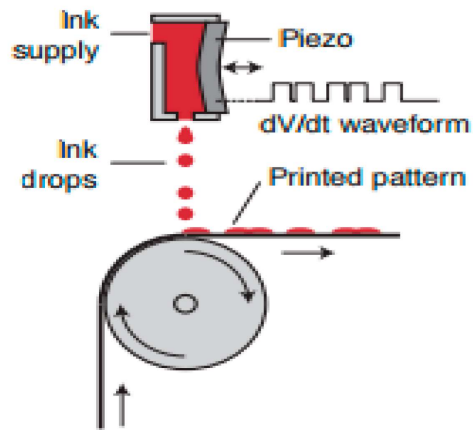
4.3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ INKJET PRINTING ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ OPV's

Η τεχνική inkjet printing μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέθοδος εναπόθεσης στην κατασκευή OPV's σε μαζική κλίμακα. Στην απλούστερη περίπτωση των OPV's με την αρχιτεκτονική bulk-heterojunction, το φωτοενεργό στρώμα αποτελείται από ένα μίγμα συζυγούς πολυμερούς (δότη ηλεκτρονίων) με ένα διαλυτό μοριακό υλικό (δέκτη ηλεκτρονίων). Το στρώμα αυτό παρεμβάλλεται μεταξύ του διαφανούς ηλεκτροδίου ανόδου (συνήθως Indium Tin Oxide-ITO) και του ηλεκτροδίου καθόδου[31]. Επίσης, μπορούν να εισαχθούν ενδιάμεσα στρώματα, που επιτελούν βοηθητικό ρόλο στη λειτουργία της διάταξης, μεταξύ της ανόδου και του φωτοενεργού στρώματος (Hole Transport Layer-HTL). Αυτά βελτιώνουν και σταθεροποιούν τη λειτουργία της διάταξης. Η διαδικασία μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική συνοψίζεται στα παρακάτω τρία στάδια:

- i) απορρόφηση φωτονίων και σχηματισμός εξιτονίων στο φωτοενεργό στρώμα
- ii) διάχυση των εξιτονίων στη διεπιφάνεια δότη/δέκτη και διαχωρισμός τους σε ελεύθερα φορτία
- iii) μεταφορά των φορέων φορτίου στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια, λόγω εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου και συλλογή τους[31].

Για να είναι λειτουργική η διάταξη, το φωτοενεργό στρώμα πρέπει να αποτελείται από ένα συνεχές αλληλοδιασταυρούμενο δίκτυο του δότη και του δέκτη, ώστε να μεγιστοποιείται η διεπιφάνεια μεταξύ τους και να υπάρχει αποτελεσματική διάχυση και διαχωρισμός των εξιτονίων και μεταφορά των φορέων φορτίου[31].

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αρκετές έρευνες στην κατασκευή OPVs με inkjet printing, με αποδόσεις στο 3.7%[19], σημαντικά χαμηλότερες από τις τιμές που αναφέρθηκαν για τα συμβατικά πολυμερικά φωτοβολταϊκά. Όταν εφαρμόζεται το inkjet printing στην κατασκευή OPV's, τόσο η προετοιμασία όσο και η βελτιστοποίηση αποτελούν σύνθετες διαδικασίες, καθώς η τεχνική και τα διαλύματα καθορίζουν την απόδοση της τελικής διάταξης. Για παράδειγμα, δεν είναι ακόμη ξεκάθαρο αν ο βασικός περιοριστικός παράγοντας στη λειτουργία των OPVs είναι η επιφανειακή τραχύτητα ή η νανομορφολογία του φωτοενεργού στρώματος. Αυτή η πληροφορία είναι καθοριστική για την επιλογή του κατάλληλου διαλύτη, καθώς οι διαλύτες με υψηλό σημείο ζέσεως οδηγούν σε αυξημένη επιφανειακή τραχύτητα[30].



Εικόνα 23
Τεχνική Inkjet Printing



Εικόνα 24
Συσκευή της τεχνική Inkjet Printing

4.3.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΕΧΝΙΚΗΣ INKJET PRINTING

- **ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ**

- Είναι μία μέθοδος εκτύπωσης όπου ο μηχανισμός εκτύπωσης του υλικού δεν έρχεται σε επαφή με το υπόστρωμα εναπόθεσης με αποτέλεσμα να προστατεύεται η επιφάνεια της διάταξης.
- Η επεξεργασία λαμβάνει τέλος όταν εναποτίθεται το υλικό, έτσι η διαδικασία επεξεργασίας είναι πιο απλή και η κατανάλωση των υλικών και της ενέργειας μειώνονται. Επίσης δεν είναι αναγκαία κάποια χημικά (π.χ. ρητίνες), τα οποία μειώνουν την απόδοση των οργανικών στρωμάτων.
- Η ταχύτητα εκτύπωσης ψεκασμού μελάνης είναι αρκετά υψηλή ώστε να χρησιμοποιηθεί αυτή η τεχνική για μαζική παραγωγή.
- Χαμηλό κόστος παραγωγής.
- Εκμετάλλευση των μηχανικών ιδιοτήτων των οργανικών υλικών.

- **ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ**

- Η τεχνική αυτή ωστόσο παρουσιάζει κάποιες δυσκολίες στην συμβατότητα μεταξύ των ιδιοτήτων του επιλεγμένου μελανιού (π.χ. τύπος διαλύτη, ιξώδες) και των ιδιοτήτων της επιφάνειας του υποστρώματος.
- Η απόδοση των κατασκευασμένων στοιχείων με αυτή την μέθοδο είναι χαμηλότερη σε σχέση με τα συμβατικά αντίστοιχα στοιχεία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <http://13epal-esp-thess.thess.sch.gr/info-pn5.htm>
- [2] Ελένη Κ. Παλούρα (θεσσαλονίκη 2008) “Φυσική Στερεάς Κατάστασης”, Στοιχεία Θεωρίας Ημιαγωγών. Τμήμα Φυσικής ΑΠΘ.
- [3] www.physics.ntua.gr
- [4] www.infogenesis.gr
- [5] edu.demokritos.gr
- [6] <http://helios.teiath.gr/pateogk/anadromh.htm>
- [7] <http://el.wikipedia.org>
- [8] Shirakawa H., Louis E., MacDiarmid A., Chiang C. & Heeger A. 1977, “Synthesis of Electrically Conducting Organic Polymers: Halogen Derivatives of Polyacetylene, (CH)_x, JCS Chem.”, comm., Vol. 474, pp. 578.
- [9] No I., Shin P., Kannappan S., Kumar P., & Ochiai S. (2012). “Fabrication and Characteristics of Organic Thin-Film Solar Cells with Active Layer of Interpenetrated Hetero-Junction Structure”. Applied Physics Research, 4(4), do: 10.5539/apr.v4n4p83.
- [10] S.P. Economopoulos, C.L. Chochos, V.G. Gregoriou, J.K. Kallitsis, S. Barrau and G. Hadziioannou, “Novel Brush-Type Copolymers Bearing Thiophene Backbone and Side Chain Quinoline Blocks. Synthesis and Their Use as a Compatibilizer in Thiophene-Quinoline Polymer Blends”, Macromolecules, 40, 921, 2007.
- [11] Knupfer M. 2003, “Exciton Binding Energies in Organic Semiconductors”, Applied Physics A: Materials Science & Processing, vol.77, no.5, pp.623-626.
- [12] Marks R., Halls J., Bradley D., Friend R. & Holmes A. 1994, “The Photovoltaic Response in Poly (p-Phenylene Vinylene) Thin-Film Devices”, Journal of Physics: Condensed Matter, vol.6, pp. 1379.
- [13] Tang C. 1986, “Two-Layer Organic Photovoltaic Cell”, Applied Physics Letters, vol.48, no.2, pp. 183-185.
- [14] Peumans P., Yamikov A. & Forrest S.R. 2003, “Small Molecular Weight Organic Thin-Film Photodetectors and Solar Cells”, Journal of Applied Physics, vol.93, pp. 36 93.

- [15] Sariciftci N.S., Smilowitz L., Heeger A.J. & Wudl F. 1992, "Photoinduced Electron Transfer from a Conducting Polymer to Buckminster Fullerene", *Science*, vol.258, no.5087, pp. 14 74.
- [16] Goetzberger A., Hebling C., & Schock H. (2003), "Photovoltaic Materials, History, Status and Outlook. Amsterdam: Elsevier.
- [17] "Organic Field Effect Transistors", Johannes Kepler, Universität Linz, Linz Institute for Organic Solar Cells, Institute of Physical Chemistry. www.icp.uni-linz.ac.at
- [18] Τσικριτζής Δ., 2010.
- [19] Krebs 2009.
- [20] Gregg, York & Strnad 2005.
- [21] Seung H. Ko, Heng Pan, Costas P. Grigoropoulos, Christine K. Luscombe, Jean M. J. Frechet, Dimos Poulidakos, "All-Inkjet-Printed Flexible Electronics Fabrication on a Polymer Substrate by Low-Temperature High-Resolution Selective Laser Sintering of Metal Nanoparticles", Publishing Ltd, pp. 345-202.
- [22] Moore S.K., "Just one Word-Plastics", *IEEE Spectrum* on-line (2002).
- [23] Speakman S.P., Rosenberg G.G., Clay K.J., Milne W.I., Ille A., Gardner I.A., Bresler E., Steinke J.H.G., "High Performance Organic Semiconducting Thin Films: Inkjet Printed Polythiophene [rr-P3HT]", *Organic Electronics*, vol.2, pp. 65-73 (2001).
- [24] Singh M., Haverinch H.M., Dhagat P. & Jabbour G.E., "Inkjet Printing-Process and its Applications", *Adv. Materials* 22, pp. 673-85 (2010).
- [25] Basiric Laura, "Inkjet Printing of Organic Transistor Devices", Phd Thesis, University of Cagliari (2012).
- [26] Derby B., "Inkjet Printing of Functional and Structural Materials: Fluid Property Requirements, Feature Stability and Resolution, *Annu. Rev. Mater. Res.* 40, pp. 395-414 (2010).
- [27] Wijshoff H., "The Dynamics of the Piezo Inkjet Print Head Operation", *Phys. Rep.* 491, pp. 77-177 (2010).
- [28] Jolke Perelaer, "Microstructures Prepared via Inkjet Printing and Embossing Techniques", Phd Thesis, Eindhoven (2009).
- [29] Weng B., Shepherd R.L., Crowley K., Killard A.J. & Wallace G.G., "Printing Conducting Polymers", *Analyst* 135, 2779-89 (2010).

- [30] B. Friedel, P. Keivanidis, T. Brenner, A. Abrusci, C. McNeil, R. Friend, N. Greenham, "Effects of Layer Thickness and Annealing of PEDOT:PSS Layers in Organic Photodetectors", *Macromolecules*, 42, pp. 6741-6747, (2009).
- [31] Fcchetti A., "Polymer Donor – Polymer Acceptor (All-Polymer) Solar Cells", *Mater. Today* 16, pp. 123-132, (2013).

