

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

Πτυχιακή Εργασία

**Οργανικές Φωτοдиодοι και Τρανζίστορ ως
εναλλακτικές διατάξεις στη σύγχρονη
τεχνολογία ηλεκτρονικών εξαρτημάτων»**

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ:

Αγησίλαος Κουλόπουλος

Α.Μ.:5024

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ:

ΣΤΑΘΑΤΟΣ Α. ΗΛΙΑΣ

Δρ. Φυσικός

Αναπληρωτής Καθηγητής ΑΤΕΙ Πατρών

Πάτρα 2011

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες	4
Περίληψη	5
Λίστα Σχημάτων	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο – ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1 Αντικείμενο της εργασίας	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο – ΟΡΓΑΝΙΚΟΙ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ	12
2.1 Εισαγωγή	12
2.2 Οργανικά Πολυμερή	13
2.3 Διηλεκτρικά Πολυμερή – Σύνθεση και Ιδιότητες	16
2.4 Οργανικοί και Πολυμερείς Ημιαγωγοί	18
2.4.1 Οργανικοί Ημιαγωγοί p-καναλιού	18
2.4.2 Οργανικοί Ημιαγωγοί n-καναλιού	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο – ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ (OFET)	22
3.1 Εισαγωγή	22
3.2 Τεχνολογία των OFET	22
3.3 Τρόπος λειτουργίας των OFET	26
3.3.1 Προσομοίωση	34
3.3.2 Λόγος on/off	36
3.4 Οργανικοί αισθητήρες Τρανζίστορ λεπτού φιλμ	39
3.5 Υλικά και τρόποι κατασκευής	43
3.5.1 Υποστρώματα και ηλεκτρόδια	44
3.5.2 Εναπόθεση στο μονωτή	45
3.5.3 Εναπόθεση στο ενεργό κανάλι	46
3.6 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα	46
Κεφάλαιο 4 ^ο - Οργανικές Φωτοδιόδοι (OLED)	48
4.1 Εισαγωγή	48
4.2 Δομή των OLEDs	48
4.3 Μηχανισμός Λειτουργίας των OLEDs	50
4.4 Υλικά Ανόδου και Καθόδου	54
4.4.1 Υλικά Ανόδου	54
4.4.2 Υλικά Καθόδου	56
4.5 Πολυμερισμένα LEDs (Polymer LEDs - PLEDs)	59
4.6 Στοιβαγμένα OLEDs (Stacked OLEDs - SOLEDs)	60
4.7 OLED Παθητικής Μήτρας (Passive Matrix OLED-PMOLED)	61
4.8 OLED Ενεργής Μήτρας (Active Matrix OLED-AMOLED)	62

4.9 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα.....	64
Κεφάλαιο 5 ^ο - Ποιοτικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των OLEDs	66
5.1 Εισαγωγή.....	66
5.2 Απαιτήσεις μίας OLED Πηγής Φωτός.....	66
5.3 Ποιότητα Φωτισμού	67
5.3.1 Χρώμα	67
5.3.2 Χρωματική απόδοση	68
5.3.3 Φωτεινότητα.....	69
5.4 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των OLEDs.....	69
5.5 Οπτικά χαρακτηριστικά των OLEDs.....	75
Κεφάλαιο 6 ^ο - Εφαρμογές, Αντοχή, Κόστος.....	80
6.1 Εφαρμογές των OFET	80
6.2 Εφαρμογές των OLEDs	80
6.2.1 Εικόνα Υψηλής Ποιότητας με Χρήση OLEDs	80
6.2.2 Απεικόνιση με Υψηλή Ζωντάνια με Χρήση OLEDs	82
6.2.3 Φορητές Εφαρμογές με Χρήση OLEDs.....	83
6.2.4 Απεικόνιση Χαμηλής Κατανάλωσης Ισχύος	83
6.3 Χρόνος Ζωής.....	85
6.4 Κόστος.....	86
Κεφάλαιο 7 ^ο - Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επιδιώξεις.....	88
Αναφορές - Βιβλιογραφία	90

Ευχαριστίες

Η εργασία αυτή ξεκίνησε και τελείωσε μέσα στο ακαδημαϊκό έτος 2010-2011 σύμφωνα με τον υπάρχον κανονισμό του τμήματος Ηλεκτρολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πατρών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Δρ. Σταθάτο Ηλία για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε δίνοντας μου τη δυνατότητα να εκπονήσω την πτυχιακή μου εργασία στον επιστημονικό τομέα που επιθυμούσα. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τη διάθεση του να με βοηθήσει και να μου λύσει οποιαδήποτε απορία οποιαδήποτε στιγμή το χρειαζόμουν.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην Νόνα Στέλλα, τελειόφοιτη στου τμήματος Διερμηνείας και Μετάφρασης στο Πανεπιστημίου Κέρκυρας, για τη βοήθεια της στη μετάφραση χωρίων της εργασίας όλο αυτό τον καιρό. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για την ηθική και οικονομική συμπαράσταση όχι μόνο κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη των Οργανικών Φωτοδιόδων (Organic Light Emitting Diodes – OLEDs) και των Οργανικών Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου (Organic Field Effect Transistors – OFETs) και η παρουσίαση του ρόλου που μπορούν να παίξουν ως εξαρτήματα, στις σύγχρονες τεχνολογίες ηλεκτρονικών εφαρμογών. Βασικός στόχος της μελέτης μας είναι η έκθεση στον αναγνώστη και η κατανόηση από αυτόν, των κυριότερων τεχνικών και λειτουργικών παραμέτρων, που χαρακτηρίζουν τις προαναφερθείσες οργανικές συσκευές. Η πτυχιακή μας εργασία θα αναπτυχθεί σε επτά κεφάλαια το πρώτο εκ των οποίων αποτελεί και την εισαγωγική της παρουσίαση.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά και ανάλυση στους Οργανικούς Ημιαγωγούς. Πραγματοποιούμε εκτενή παρουσίαση της δομής και της σύνθεσης των διηλεκτρικών πολυμερών και αναδεικνύουμε χαρακτηριστικές μορφές αυτών. Αναφερόμαστε στη διάκριση των οργανικών ημιαγωγών σε τύπου-p και τύπου-n και παρουσιάζουμε αντιπροσωπευτικά σχήματα των ενώσεων που συνθέτουν τη δομή τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιούμε μια εκτενή αναφορά στα Οργανικά FET. Παρουσιάζουμε την τεχνολογία στην οποία βασίζονται, τον τρόπο λειτουργίας τους και τον τρόπο δόμησης τους. Γίνεται αναφορά στην τεχνική με την οποία κατασκευάζονται και στα απαραίτητα υλικά που πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Κλείνοντας το κεφάλαιο παρουσιάζουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των Οργανικών FET κατά τη λειτουργία τους στις διάφορες ηλεκτρονικές διατάξεις.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζουμε τα Οργανικά LED, τα οποία καλύπτουν και το μεγαλύτερο κομμάτι της εργασίας μας. Πραγματοποιούμε αναλυτική μελέτη της δομής τους και του τρόπου λειτουργίας τους και εκθέτουμε τα βασικότερα υλικά κατασκευής τους. Γίνεται αναφορά και παρουσίαση των κυριότερων κατηγοριών OLED, όπως είναι τα OLED παθητικής και ενεργής μήτρας. Επίσης μελετάμε δομές πολυμερισμένων και στοιβαγμένων OLEDs.

Στο τέλος του κεφαλαίου απαριθμούμε και τεκμηριώνουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των OLED.

Το πέμπτο κεφάλαιο αποτελεί συνέχεια της αναφοράς μας στα Οργανικά LED. Επιχειρούμε να κάνουμε μία ποιοτική και λειτουργική ανάλυση αυτών των διατάξεων. Αναφέρουμε τις απαραίτητες προϋποθέσεις για τη σωστή λειτουργία τους και καταφεύγουμε σε ανάλυση παραμέτρων τους, όπως το χρώμα τους, η φωτεινότητα τους και η χρωματική τους απόδοση. Κατόπιν πραγματοποιούμε αναλυτική παρουσίαση των ηλεκτρονικών και οπτικών χαρακτηριστικών τους.

Στο κεφάλαιο έξι εκθέτουμε μερικές σημαντικές εφαρμογές των Οργανικών FET αλλά και των Οργανικών LED. Ιδιαίτερη μνεία γίνεται σε εφαρμογές των OLEDs που έχουν να κάνουμε με την παραγωγή εικόνας, καθώς και με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά αυτής. Αξιοσημείωτες επίσης είναι οι εφαρμογές φορητότητας των Οργανικών LED. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζουμε εκτιμήσεις που αφορούν το χρόνο ζωής, την ανθεκτικότητα, αλλά και το κόστος λειτουργίας και υλοποίησης αυτών των διατάξεων.

Ολοκληρώνοντας την εργασία μας στο έβδομο κεφάλαιο παραθέτουμε τα συμπεράσματα μας για τα OLED και τα OFET και παρουσιάζουμε τις εκτιμήσεις μας όσον αφορά τη μελλοντική χρήση και λειτουργία τους ως βασικά εξαρτήματα μεταγενέστερων ηλεκτρονικών συσκευών.

Λίστα Σχημάτων

Κεφάλαιο 2°

Σχήμα 2.1 - Κατηγορίες αγώγιμων πολυμερών: Polythiophenes, Polypyrroles και Polyanilines [3]. (15)

Σχήμα 2.2 - Διηλεκτρικά πολυμερή: Parylene, Silicon network polymer, Poly(methyl methacrylate), Polyimide, Poly(vinyl phenol) Polystyrene, Polyvinyl alcohol [3]. (16)

Σχήμα 2.3 - Δομή του 1,1-difluoroethylene με προσθήκη συμμοномерών στις αλυσίδες του πολυμερούς [3]. (19)

Σχήμα 2.4 - Μοριακοί ημιαγωγοί με λιωμένους δακτύλιους (pentacene, benzodithiophene, dif-tesadt) [3]. (20)

Σχήμα 2.5 - Ολιγομερείς αλυσίδες δαχτυλίων [3]. (21)

Σχήμα 2.6 - Θερμικά εξατμιζόμενες λεπτές μεμβράνες [3]. (22)

Κεφάλαιο 3°

Σχήμα 3.1 - Δομή OFET και καμπύλες ρεύματος τάσης απαγωγού για διάφορες τιμές της τάσης πύλης [3]. (25)

Σχήμα 3.2 - καμπύλες ρεύματος τάσης απαγωγού για διάφορες τιμές της τάσης πύλης και καμπύλες τετραγωνικής ρίζας του ρεύματος απαγωγού ως συνάρτηση του δυναμικού πύλης [6]. (25)

Σχήμα 3.5 - Κατανομή φορτίων σε OFET με $V_g = V_s = V_d = 0$ [2]. (29)

Σχήμα 3.7 - Ενεργειακό διάγραμμα λειτουργίας OFET με μηδενικό δυναμικό πύλης[6]. (30)

Σχήμα 3.9 - Κατανομή φορτίων σε OFET με $V_s = V_d = 0, V_g < 0$ [2]. (30)

Σχήμα 3.13 - Ενεργειακό διάγραμμα λειτουργίας OFET με αρνητικό δυναμικό πύλης [6]. (32)

Σχήμα 3.14 - Κατανομή φορτίων σε OFET με $V_s = V_d = 0, V_g > 0$ [2]. (32)

Σχήμα 3.16 - Ενεργειακό διάγραμμα λειτουργίας OFET με θετικό δυναμικό πύλης [6]. (34)

Σχήμα 3.17 - Κατανομή φορτίων σε OFET με $V_s = 0$, $V_g < V_d < 0$ [2]. (35)

Σχήμα 3.18 - Κατανομή φορτίων σε OFET με $V_s = 0$, $V_d < V_g < 0$ [2]. (35)

Σχήμα 3.19 - Κατανομή φορτίων σε OFET με $V_s = 0$, $V_g = 0$, $V_d < 0$ [2]. (36)

Σχήμα 3.20 - Κατανομή φορτίων σε OFET με $V_s = 0$, $V_g = 0$, $V_d \ll 0$ [2]. (36)

Σχήμα 3.23 - Βασικό σχήμα για τον υπολογισμό επιμέρους μεγεθών [2]. (37)

Σχήμα 3.39- Αισθητήρες OFET δύο στρωμάτων με χειραλικές ομάδες [3].(43)

Σχήμα 3.40 - Ολοκληρωμένο OFET [6]. (46)

Σχήμα 3.41 - Εναπόθεση στο μονωτή [2]. (46)

Σχήμα 3.42 - Εναπόθεση στο ενεργό κανάλι [2]. (46)

Σχήμα 3.43 - Επαφή πύλης με ισχυρά νοθευμένα δισκία πυριτίου [2]. (47)

Σχήμα 3.44 - Σχηματισμός επαφής με αλληλεπικαλυπτόμενα ηλεκτρόδια (48)

Κεφάλαιο 4^ο

Σχήμα 4.1 - Τυπική δομή ενός OLED [1]. (52)

Σχήμα 4.2 - Στάδια λειτουργίας των OLEDs [1]. (53)

Σχήμα 4.3 - Βήματα σχηματισμού ενός singlet εξιτονίου και τριών triplet εξιτονίων [7]. (54)

Σχήμα 4.4 - Ενεργειακό διάγραμμα OLED μονής διαστρωμάτωσης [7]. (55)

Σχήμα 4.5 - Ενεργειακό διάγραμμα OLED διπλής διαστρωμάτωσης [7]. (55)

Σχήμα 4.6 - Δομή PLED [1]. (61)

Σχήμα 4.7 - Δομή SOLED [7]. (62)

Σχήμα 4.8 - Δομή PMOLED [7]. (64)

Σχήμα 4.9 - Δομή AMOLED [7]. (65)

Κεφάλαιο 5^ο

Σχήμα 5.1 - Δομή ενός OLED (a) Δύο Στρωμάτων (Double Layer - DL), (b) Τριών Στρωμάτων (Triple Layer - TL) και (c) Πολλαπλών Στρωμάτων (Multi Layer – ML) [9]. (72)

Σχήμα 5.2 - Χαρακτηριστικές Ρεύματος - Τάσης για OLED ενός στρώματος τα οποία έχουν ως βάση μονοκρύσταλλους από (a) anthracene και (b) tetracene [9]. (73)

Σχήμα 5.3 - Μονοπολικό ρεύμα ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με το ηλεκτρικό πεδίο για ένα μονοκρύσταλλο από naphthalene [9]. (74)

Σχήμα 5.4 - Αρχιτεκτονική και ενεργειακές στάθμες ενός OLED τεσσάρων στρωμάτων [9]. (75)

Σχήμα 5.5 - Χαρακτηριστικά Ρεύματος - Τάσης ενός OLED τεσσάρων στρωμάτων με εφαρμογή παλμικού δυναμικού πόλωσης στις υψηλές πυκνότητες ρεύματος [9]. (75)

Σχήμα 5.6 - Πυκνότητα ρεύματος σε συνάρτηση με το ηλεκτρικό πεδίο για ένα OLED τεσσάρων στρωμάτων [9]. (76)

Σχήμα 5.7 (a) - Φάσμα εκπομπής OLED στην υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού κύματος [9]. (78)

Σχήμα 5.7 (b) - Φάσμα εκπομπής OLED στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού κύματος [9]. (79)

Σχήμα 5.7 (c) - Φάσμα εκπομπής OLED στην υπεριώδη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού κύματος [9]. (79)

Σχήμα 5.8 (a) - Κανονικοποιημένο φάσμα ηλεκτροφωταύγειας (electroluminescence - EL) και κανονικοποιημένο φάσμα φωτοφωταύγειας (photoluminescence - PL) για Οργανικά LED δύο στρωμάτων (Double Layer - DL) από ITO ή Alq₃ ή Mg ή Ag [9]. (80)

Σχήμα 5.8 (b) - Κανονικοποιημένο φάσμα ηλεκτροφωταύγειας (electroluminescence - EL) και κανονικοποιημένο φάσμα φωτοφωταύγειας (photoluminescence - PL) για Οργανικά LED δύο στρωμάτων (Double Layer - DL) από ITO ή Alq_3 ή Ca [9]. **(81)**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Τον 21^ο αιώνα πραγματοποιείται μία επανάσταση που αφορά τον ηλεκτρονικό τρόπο απεικόνισης πληροφοριών. Οι απεικονίσεις οργανικής ηλεκτρονικής φωτοβολίας πρόκειται να παίξουν πολύ σημαντικό, αν όχι κύριο ρόλο στις απεικονίσεις με χρήση επίπεδης οθόνης και αναμένεται να κυριαρχήσουν στην αγορά μέσα στα επόμενα χρόνια. Στις μέρες μας έχουν ήδη διεισδύσει στην αγορά, σε σημαντικό βαθμό, απεικονίσεις οργανικής ηλεκτρονικής φωτοβολίας παθητικής και ενεργής μήτρας. Πρόκειται για λεπτές διατάξεις μικρού μεγέθους που μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν σε πολλές ηλεκτρονικές συσκευές. Το εντυπωσιακό σε αυτή την τεχνολογική εξέλιξη είναι ότι οι οργανικές συσκευές ηλεκτρονικής εκπομπής φωτός εκπέμπουν φως εξαιρετικής ποιότητας και αποτελούν τεχνολογική εξέλιξη που προσφέρει καλή απόδοση, αξιοπιστία, μεγαλύτερο χρόνο ζωής και σχετικά χαμηλό κόστος. Η κατασκευή τους βασίζεται σε οργανικά υλικά. Ένα ακόμα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους είναι ότι εκπέμπουν φως με την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου σε οργανικά υλικά.

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι να εισάγει τον αναγνώστη στην τεχνολογία των οργανικών ηλεκτρονικών. Αρχικά γίνεται μία σύντομη αναφορά στους οργανικούς ημιαγωγούς ως βάση των οργανικών ηλεκτρονικών διατάξεων. Ο κύριος όγκος της πτυχιακής εργασίας αναλώνεται στα Οργανικά Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου (Organic Field Effect Transistors OFETs) και στις Οργανικές Διόδους LED (Organic Light Emitting Diodes – OLEDs). Θα γίνει ανάλυση της δομής και του μηχανισμού λειτουργίας τους, καθώς και αναφορές σε διάφορες εφαρμογές τους.

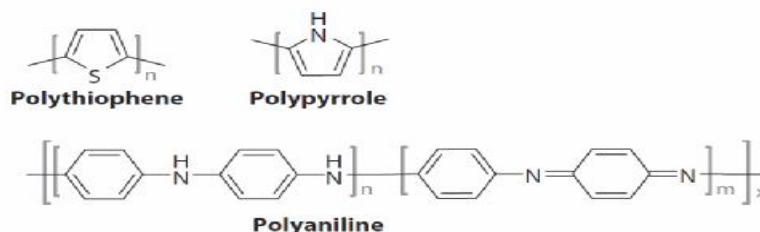
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο – ΟΡΓΑΝΙΚΟΙ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ

2.1 Εισαγωγή

Πολλά ηλεκτρονικά στοιχεία κατασκευασμένα από οργανικά υλικά αποτελούν τμήμα CMOS κυκλωμάτων. Παθητικά στοιχεία όπως αγώγιμοι οδηγοί, κεραίες, διηλεκτρικές πύλες, διηλεκτρικά ενδιάμεσου στρώματος και πυκνωτές μπορούν να κατασκευαστούν από αγώγιμα ή διηλεκτρικά πολυμερή ή και συνδυασμούς αυτών. Τρανζίστορ, δίοδοι, αισθητήρες, μετατροπείς και στοιχεία μνήμης είναι δυνατό να έχουν ενσωματωμένους ημιαγωγούς αποτελούμενους από οργανικά μόρια στερεών, ημιαγωγικά πολυμερή ή και συνδυασμούς αυτών. Συσκευές αυτού του είδους βρίσκουν εφαρμογή σε κυκλώματα μέτριας πολυπλοκότητας όπως τα προγράμματα οδήγησης οθόνης, τα προγράμματα αναγνώρισης ραδιοσυχνοτήτων ή τα προγράμματα χαρτογράφησης. Μερικές εκδόσεις φορητών ή ευέλικτων απεικονίσεων που προέρχονται από οργανικά υλικά είναι ήδη διαθέσιμες ή πρόκειται να κυκλοφορήσουν σύντομα στο εμπόριο. Τα οργανικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις συσκευές μπορούν να ομαδοποιηθούν σε αγωγούς και μονωτές, σε ημιαγωγούς και σε υλικά με πρόσθετες λειτουργίες πέρα από την απλή μεταγωγή, όπως η αναγνώριση χημικών, ο πιεζοηλεκτρισμός και η υστέρηση. Αυτά τα υλικά έχουν μελετηθεί διεξοδικά, οπότε έχουν προβλέψιμη συμπεριφορά όταν χρησιμοποιούνται ως υλικά κατασκευής κάποιας συσκευής και συνδυάζονται αποτελεσματικά ώστε να πραγματοποιήσουν πολύπλοκες λειτουργίες. Η επεξεργασία των επιλογών και η μηχανική ευελιξία των οργανικών υλικών δίνει νέες δυνατότητες όσον αφορά τη χρήση τους σε ασυνήθιστες τοπολογίες. Οι δίοδοι εκπομπής φωτός με οργανικά υλικά εκπομπής έχουν ήδη μελετηθεί και κυκλοφορούν στο εμπόριο. Ηλεκτρόνια και οπές εγχέονται από ηλεκτρόδια χαμηλού και υψηλού δυναμικού αντίστοιχα και επανασυνδέονται σε μοριακό επίπεδο με υψηλή πιθανότητα εκπομπής από τη διεγερμένη τους κατάσταση.[3]

2.2 Οργανικά Πολυμερή

Τα αγώγιμα πολυμερή προτιμώνται ως υλικά για τα σύρματα και τις επαφές των οργανικών συσκευών. Υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες αγώγιμων πολυμερών που χρησιμοποιούνται στα οργανικά ηλεκτρονικά. Αυτά είναι οι Polythiophenes και οι Polypyrroles, οι Polyanilines και μονωτικά πολυμερή γεμάτα αγώγιμες νανοδομές (Σχήμα 2.1).[3]



Σχήμα 2.1 - Κατηγορίες αγώγιμων πολυμερών: Polythiophenes, Polypyrroles και Polyanilines [3]

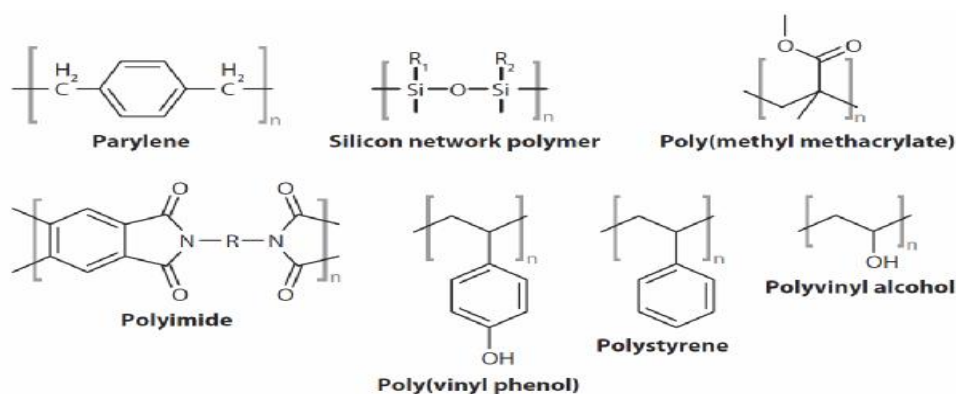
Παρά το γεγονός ότι τα υλικά αυτά είναι γνωστά εδώ και δεκαετίες εξακολουθούν να καταβάλλονται προσπάθειες για τη βελτιστοποίηση της επεξεργασίας, της αγωγιμότητας και της διαφάνειας τους. Η επεξεργασία αφορά παράγοντες όπως το ιξώδες και την ενέργεια κατωφλίου που διέπουν την πιστότητα των υλικών. Η Poly(ethylenedioxythiophene) (PEDOT) είναι ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα αγώγιμα πολυμερή, για επαφές οργανικών ηλεκτρονικών συσκευών. Η PEDOT έχει χρησιμοποιηθεί ως πηγή και ως καταβόθρα σε τρανζίστορ. Εξαιτίας της ανάγκης για μεγαλύτερη αγωγιμότητα, μεγαλύτερη διαφάνεια, χαμηλότερη ενέργεια κατωφλίου, υψηλότερο ιξώδες και μεγαλύτερη χημική ομοιογένεια, είναι επιθυμητές βελτιωμένες εκδόσεις. Για αυτό το λόγο πολλές ερευνητικές ομάδες έχουν παράγει χημικές παραλλαγές της PEDOT.[3]

Η Polyaniline είναι ένας ακόμα πολυμερής αγωγός. Ανάλογα με την οξειδωτική κατάσταση, τον τύπο και το επίπεδο του υλικού πρόσμιξης, τα πρόσθετα, το υλικό μπορεί να λειτουργήσει ως αγωγός οπής, αγωγός πρωτονίου ή ως αγωγός και των δύο. Μπορεί να συνδυαστεί με μονωτικές πολυμερείς μήτρες και να αποφέρει συνθέσεις με τις επιθυμητές μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες. Η μορφολογία των επιμέρους δομών της Polyaniline μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με την προτεινόμενη μέθοδο εναπόθεσης και

την ανάγκη για υποστήριξη της μήτρας. Πολυάριθμα άλλα αγωγικά υλικά όπως ο χρυσός και η πλατίνα, κβαντικοί ημιαγωγοί, μεταλλικά οξειδία και αιθάλη έχουν προστεθεί στην Polyaniline. Κάποιοι ερευνητές θεώρησαν ότι η Polyaniline δεν είναι ούτε αρκετά σταθερή ούτε αρκετά αγωγική ώστε να χρησιμοποιηθεί σε οργανικά τρανζίστορ και για αυτό πρότειναν τον Άργυρο ως μία ανόργανη εναλλακτική λύση. Αυτό το υλικό χρησιμοποιήθηκε σε τρανζίστορ επαφής βασισμένα σε πολυμερείς ημιαγωγούς και παρουσίασε χαμηλή αντίσταση επαφής και αγωγιμότητα χιλιάδες Siemens ανά εκατοστό. Η ανόπτηση για θερμοκρασίες πάνω από 150°C είναι υποχρεωτική, πράγμα το οποίο περιορίζει τη χρήση πλαστικών υποστρωμάτων. Η ανάγκη για Άργυρο υψηλότερης αγωγιμότητας, στη θέση ενός αγωγικού πολυμερούς θα έχει πιθανότατα μεγαλύτερη εξάρτηση από τις διαστάσεις του εξαρτήματος.[3]

2.3 Διηλεκτρικά Πολυμερή – Σύνθεση και Ιδιότητες

Ο πιο σημαντικός ρόλος για τα μονωτικά πολυμερή στις οργανικές συσκευές περιλαμβάνει τη διηλεκτρική πύλη (Gate) των Οργανικών Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου (Organic Field Effect Transistors - OFETs). Μερικά αντιπροσωπευτικά διηλεκτρικά πολυμερή που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό παρουσιάζονται παρακάτω (Σχήμα 2.2).[3]



Σχήμα 2.2 – Διηλεκτρικά πολυμερή: Parylene, Silicon network polymer, Poly(methyl methacrylate), Polyimide, Poly(vinyl phenol) Polystyrene, Polyvinyl alcohol [3]

Πρόκειται για λύση βασισμένη στην προτυποποίηση των στρωμάτων επικάλυψης, συμπεριλαμβανομένων ημιαγωγών και επαφών και διευκολύνεται από τη χρήση πολυμερών διηλεκτρικών. Τα πολυμερή χρησιμοποιούνται μερικές φορές ως ένα από τα δύο διηλεκτρικά στρώματα, το ένα εκ των οποίων χρησιμοποιείται ώστε να προσδώσει διηλεκτρική αντοχή ή χωρητικότητα, ενώ το άλλο έχει ως στόχο να σχηματίσει μία διεπαφή για την ανάπτυξη ενός οργανικού ημιαγωγού.

Η ποιότητα της λεπτής μεμβράνης των οργανικών διηλεκτρικών καθορίζεται από την τραχύτητα, το ιξώδες, την πόλωση και την υδροφοβία των πολυμερών διηλεκτρικών. Ιδιαίτερη πρόκληση παρουσιάζει ο σχεδιασμός πολυμερών διηλεκτρικών διατηρώντας παράλληλα τα φυσικά και ηλεκτρονικά στοιχεία που οδηγούν σε τρανζίστορ υψηλής απόδοσης. Οι βασικές ιδιότητες των οργανικών διηλεκτρικών συνοψίζονται παρακάτω:

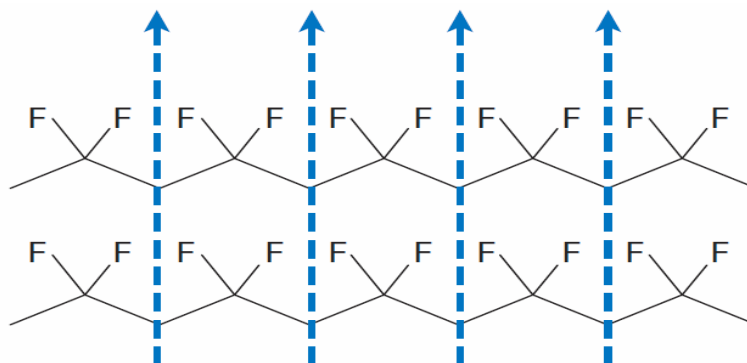
- Είναι εύκολη η επεξεργασία και η προσαρμογή της χρήσης τους ανάλογα με τη λύση που πρέπει να προσφέρουν.
- Μπορούν να δώσουν λεία φιλμ σε υποστρώματα από διαφανές γυαλί ή πλαστικό.
- Είναι κατάλληλα για οπτοηλεκτρονικές διατάξεις όπως τα OFETs εξαιτίας της υψηλής οπτικής τους διαφάνειας.
- Παρουσιάζουν σταθερότητα στις υψηλές θερμοκρασίες και έχουν σχετικά μικρό συντελεστή θερμικής διαστολής.
- Έχουν σχετικά υψηλή διηλεκτρική σταθερά. [6]

Ο όμιλος BASF πραγματοποίησε πρόσφατα μία συνεργασία για την παραγωγή κυκλωμάτων τρανζίστορ με χρήση υλικών, συμπεριλαμβανομένων και των διηλεκτρικών πολυμερών ως διηλεκτρικά της πύλης (Gate) του τρανζίστορ. Συσκευές και κυκλώματα υψηλότερης απόδοσης παράγονται με λιθογραφικές μεθόδους υψηλότερης ακρίβειας. Για κυκλώματα που έχουν ως βάση πολλαπλές στρώσεις μετάλλων απαιτείται πρόσθετη σχεδιαστική πολυπλοκότητα. Η επικοινωνία μεταξύ των στρωμάτων πραγματοποιείται μέσω χαραγών που ανοίγονται στο εσωτερικό των διηλεκτρικών. Για αυτό το

λόγο οι διηλεκτρικές επιστρώσεις πρέπει να είναι δεκτικές σε επιλεκτική χάραξη στον κατακόρυφο άξονα. Μία πιο παθητική εφαρμογή των διηλεκτρικών πολυμερών, τα οποία είναι βέβαια ζωτικής σημασίας για τη διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας, είναι η χρήση τους ως μονωτές/διαχωριστές στους πυκνωτές αποθήκευσης. Τα υδροφοβα πολυμερή επιλέγονται λόγω της υψηλής αντοχής τους, λαμβάνοντας υπόψη ότι πολλές εναλλακτικές πολώσεις παρουσιάζουν υψηλότερες διηλεκτρικές σταθερές. Ανόργανες και νανοδομημένες πρόσθετες ύλες όπως σιδηροηλεκτρικά οξειδία και νανοσωλήνες άνθρακα, προστίθενται συχνά ώστε να παράγουν σύνθετα με ακόμα μεγαλύτερες διηλεκτρικές σταθερές. Μέρος των εξαρτημάτων τέτοιων συστημάτων μπορεί να προκύψει από την πόλωση των διεπαφών μεταξύ των πολυμερών και των προσθετικών φάσεων.[3]

Μια πιο ενεργή χρήση των διηλεκτρικών πολυμερών περιλαμβάνει εφαρμογές τους ως αισθητήρες πίεσης κατά τις οποίες μετατρέπουν τη μηχανική μετατόπιση σε ηλεκτρικό σήμα και αναφέρονται ως πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες και εφαρμογές τους ως ενεργοποιητές κατά τις οποίες μετατρέπουν διαφορές δυναμικού σε μηχανικές στρεβλώσεις και αναφέρονται ως τεχνητοί μύες. Πολυμερή τα οποία έχουν ευθυγραμμισιμες διπολικές μονομερείς μονάδες, εμφανίζουν συχνά σιδηροηλεκτρικές μεταβάσεις και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τέτοιες συσκευές. Μόλις ευθυγραμμιστεί η λεπτή μεμβράνη ενός τέτοιου πολυμερούς, παρουσιάζει σταθερή τάση στα άκρα. Η διατήρηση αυτής της τάσης εν όψει της αλλαγής στο πάχος, απαιτεί ρεύμα το οποίο οδηγείται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα λόγω της αλλαγής στη χωρητικότητα. Αν δεν υπάρχει ροή ρεύματος τότε η διαφορά δυναμικού πρέπει να αλλάξει επειδή η πόλωση διατηρείται σταθερή. Η πόλωση μπορεί να διαβαστεί απευθείας ως ένα σήμα τάσης ως απάντηση στην αλλαγή διαστάσεων, ή μπορεί να ενισχυθεί αν μεταβάλλει την τάση κατωφλίου ενός τρανζίστορ. Κάθε επανευθυγράμμιση των συστοιχιών των δίπολων ως απάντηση στο εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο, οδηγεί σε μία μεγάλη αλλαγή της ηλεκτρικής πόλωσης του πολυμερούς και συνεπώς συνδέεται με μία μεγάλη διηλεκτρική σταθερά. Η ενέργεια που αποθηκεύεται κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας ευθυγράμμισης αντιπροσωπεύει άλλη μία εφαρμογή των πολυμερών αυτής της κατηγορίας. Τα πιο γνωστά παραδείγματα

πιεζοηλεκτρικών/σιδηροηλεκτρικών πολυμερών βασίζονται σε μονομερή του 1,1-difluoroethylene, έχοντας μερικές φορές προσθήκη συμμονομερών στις αλυσίδες του πολυμερούς. Τέτοιες δομές απεικονίζονται στο Σχήμα 2.3 που ακολουθεί.[3]



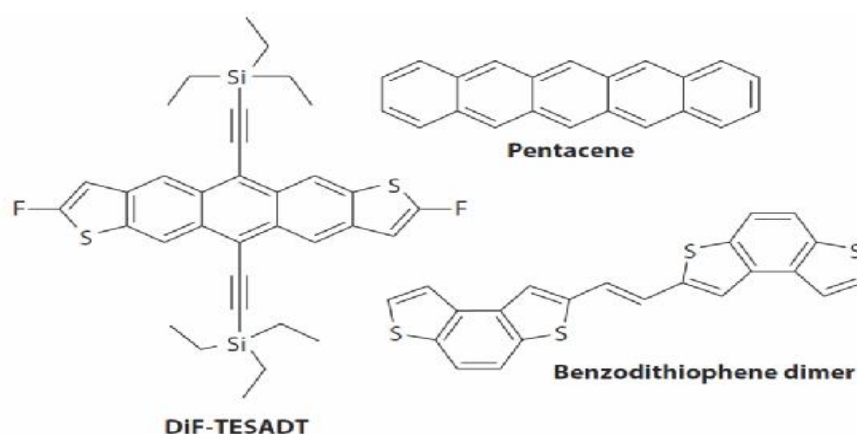
Σχήμα 2.3 - Δομή του 1,1-difluoroethylene με προσθήκη συμμονομερών στις αλυσίδες του πολυμερούς [3]

Πολυμερή χιαστί συνδεδεμένα με αγώγιμα πρόσθετα κάτω από το κατώφλι διήθησης μπορούν χρησιμοποιηθούν στη θέση των πιεζοηλεκτρικών ως αισθητήρες της εφαρμοζόμενης πίεσης. Τόσο η εναλλαγή της πόλωσης όσο και η υψηλή χωρητικότητα έχουν χρησιμοποιηθεί ώστε να δώσουν τάσεις συντονισμού και χαμηλές τάσεις αφής, τη στιγμή που χρησιμοποιούνται σιδηροηλεκτρικά πολυμερή ως διηλεκτρικά πύλης οργανικών τρανζίστορ. Πρόσφατες έρευνες έχουν καταφέρει σε πολυμερή διηλεκτρικά πύλης για τα οργανικά τρανζίστορ στα οποία το στατικό φορτίο άλλαξε την κατάσταση πόλωσης. Έτσι κατασκευάζονται διακριτά τρανζίστορ από πανομοιότυπα υλικά και με πανομοιότυπες διατάξεις μπορούν να πραγματοποιήσουν διαφορετικές λειτουργίες σε κυκλώματα εξαιτίας των συντονιζόμενων τάσεων αφής τους. Για δεδομένη τάση κατωφλίου η στατική φόρτιση μπορεί να αλλάξει το ρεύμα εξόδου κατά δύο τάξεις μεγέθους και την εξαρτώμενη από την κινητικότητα τάση κατά μία τάξη μεγέθους. Οι διαφορές στις καταστάσεις αυτών των τρανζίστορ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως στοιχείο μνήμης ή ως ένα εργαλείο συντονισμού του κυκλώματος.[3]

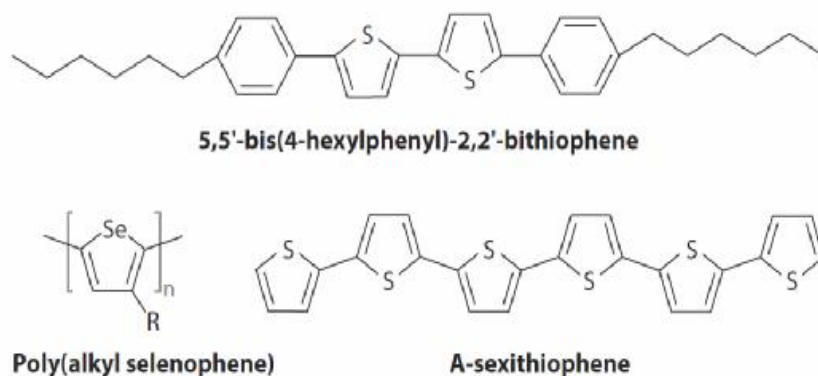
2.4 Οργανικοί και Πολυμερείς Ημιαγωγοί

2.4.1 Οργανικοί Ημιαγωγοί p-καναλιού

Ο αριθμός των ερευνητικών ομάδων που αφιερώθηκαν στη σύνθεση των οργανικών ημιαγωγών έχει αυξηθεί κατά αρκετές δεκάδες μέχρι σήμερα. Στις μέρες μας υπάρχουν εκατοντάδες ενώσεις που είναι αποδεδειγμένα ημιαγωγοί μεταφοράς οπών (p-καναλιού) στα Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου (Field Effect Transistor – FET). Η προτίμηση για τις οπές καθορίζεται από τα ενεργειακά επίπεδα των υψηλότερων κατειλημμένων μοριακών τροχιακών. Θα ήταν άσκοπο να απαριθμήσει κανείς όλες τις ενώσεις επειδή κάθε μήνα καταγράφονται και νέες. Πολλές ιδιότητες και λειτουργίες των FET σχετίζονται με το άμορφο πυρίτιο (Si), το οποίο αποτελεί μεταφορέα ηλεκτρονίων και χρησιμοποιείται ως ένας σχετικά φθηνός ημιαγωγός για εφαρμογές απεικόνισης. Οι κύριες κατηγορίες μοριακών ημιαγωγών οι οποίοι μεταφέρουν οπές περιλαμβάνουν λιωμένους δακτύλιους (pentacene, thienothiophene, benzodithiophene, dithienoanthracene, και tetracene), μικρές ολιγομερείς αλυσίδες δακτυλίων (συνδυασμοί από thiophenes, phenylenes, thiazoles και pyrroles), ομάδες από ethylene και ethynylene και selenophenes. Τέτοιες δομές απεικονίζονται στα Σχήματα 2.4 και 2.5 που ακολουθούν.[3]



Σχήμα 2.4 – Μοριακοί ημιαγωγοί με λιωμένους δακτύλιους (pentacene, benzodithiophene, dif-tesadt) [3]



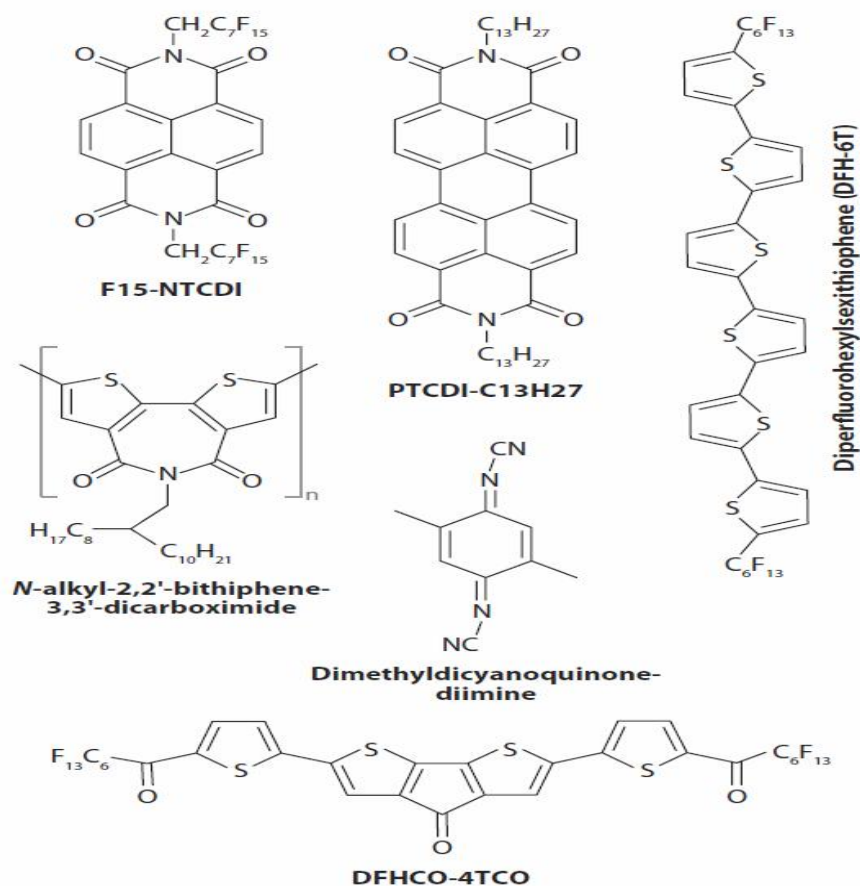
Σχήμα 2.5 - Ολιγομερείς αλυσίδες δαχτυλίων [3]

Οι πλευρικές αλυσίδες παρέχουν επιπρόσθετα δυνατότητα ελέγχου της μορφολογίας, της μεταποίησης και της αξιοπιστίας. Μερικά πρόσφατα παραδείγματα οργανικών ημιαγωγών p-καναλιού αφορούν τις νεότερες πρακτικές εφαρμογές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία και περιγράφουν την ποικιλία των οργανικών δομών. Έχει σημειωθεί επίσης μεγάλη πρόοδος στο σχεδιασμό πολυμερών ημιαγωγών μεταφοράς οπών, που έχουν ως βάση τη thiophene πολυμερισμένη είτε με απλά συμμονομερή ή με λιωμένους δαχτυλίους συμμονομερών. Οι δομές των συμμονομερών μαζί με την ορθολογική διαστασιολόγηση και τοποθέτηση των πλευρικών αλυσίδων σχηματίζουν αυτοσυνδεόμενες αλυσίδες που διευκολύνουν τη μεταφορά φορτίων μεταξύ τους και συνεπώς αυξάνουν την κινητικότητα των φορτίων.[3]

2.4.2 Οργανικοί Ημιαγωγοί n-καναλιού

Οι μοριακές δομές που έχουν χαρακτηριστεί ως ημιαγωγοί τρανζίστορ και μεταφέρουν ρεύμα ηλεκτρονίων (n-καναλιού) είναι αρκετά λιγότερες, αν και έχουν αυξηθεί ραγδαία τα τελευταία δύο χρόνια και στις μέρες μας έχουν φτάσει περίπου τις εκατό ενώσεις. Οι οργανικοί ημιαγωγοί τύπου-n μπορούν να επωφεληθούν από την υψηλότερη απόδοση ισχύος των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων των τρανζίστορ καθώς και να συνθέσουν συσκευές που βασίζονται στις επαφές p-n, όπως οι θερμοηλεκτρικές μονάδες και τα ηλιακά κύτταρα. Ως βάση για τους οργανικούς ημιαγωγούς τύπου-n χρησιμοποιούνται κατάλληλα πλαίσια τα οποία παρέχουν επαρκή σταθερότητα έγχυσης ηλεκτρονίων. Ο βασικός στόχος, ο οποίος καθορίζει την επιλογή των υλικών είναι η αποφυγή του τυχαίου ντοπαρίσματος τους από

περιβαλλοντικούς παράγοντες, πράγμα το οποίο θα τα καθιστούσε μόνιμως αγωγίμα. Τα χαμηλότερα ελεύθερα ενεργειακά επίπεδα μοριακών τροχιακών των περισσότερων συζευγμένων οργανικών ενώσεων, βρίσκονται έξω από την προτιμώμενη ακτίνα μεταφοράς ηλεκτρονίων. Το 2000 αποδείχτηκε ότι θερμικά εξατμιζόμενες λεπτές μεμβράνες καταδεικνύουν τον υψηλό βαθμό επίδρασης που ασκεί το πεδίο στην κινητικότητα των ηλεκτρονίων τόσο στο κενό όσο και στον αέρα. Κατάλληλες ενώσεις απεικονίζονται στο Σχήμα 2.6 που ακολουθεί.[3]



Σχήμα 2.6 - Θερμικά εξατμιζόμενες λεπτές μεμβράνες [3]

Αυτά τα υλικά απεικονίζουν την κινητικότητα ακόμα και στον αέρα. Οι απομακρυσμένες από τον πυρήνα αλυσίδες βοηθούν ώστε να αξιοποιηθούν οι ενώσεις που μπορούν να λειτουργήσουν στον αέρα, αν και ο ακριβής μηχανισμός παραμένει ανεξιχνίαστος. Ακόμα και μία μεμονωμένη ομάδα CF_3 σε μικρή πλευρική αλυσίδα όπως η benzyl μπορεί να αυξήσει σημαντικά τη σταθερότητα του αέρα. Πιο πρόσφατα άλλοι ερευνητές έχουν παρουσιάσει την υψηλή κινητικότητα σε πλευρικές αλυσίδες μεγάλης διατομής, με χρήση

PTCDI καθώς και με αντικατάσταση του πυρήνα του NTCDI και ανάκληση ομάδων ηλεκτρονίων για την αύξηση της θερμοδυναμικής σταθερότητας των ριζικών των ανιόντων. Είναι αξιοσημείωτο επίσης ότι οι καρβονυλικές ομάδες επιδρούν αποτελεσματικά στη μείωση της ενέργειας των εγγεόμενων ηλεκτρονίων, ενώ κάποιες άλλες ομάδες όπως τα νιτρίδια και τα οξειδία παρουσιάζονται λιγότερο αποτελεσματικές.[3]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ (ΟFET)

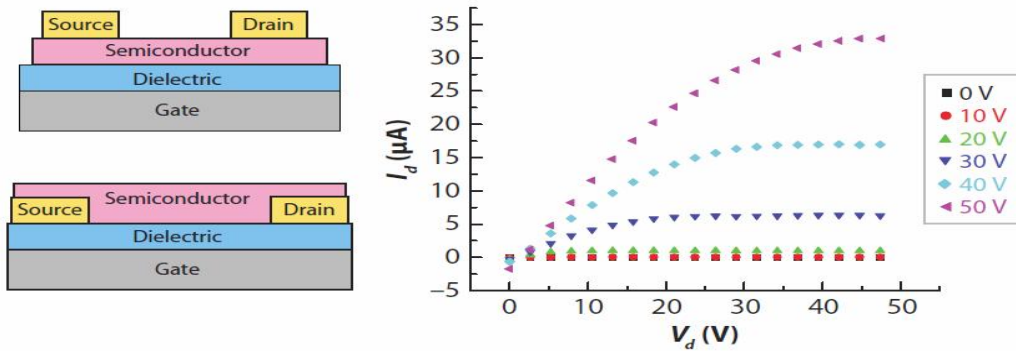
3.1 Εισαγωγή

Τα Οργανικά Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου (Organic Field Effect Transistor – OFET) αποτελούν μία πιο ανθεκτική λύση σε σύγκριση με τα απλά Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου (Field Effect Transistor – FET), τα οποία έχουν ως βάση κατασκευής τα ανόργανα υλικά. Οι δύο βασικές κατηγορίες οργανικών ημιαγωγών που αποτελούν και τη βάση κατασκευής των OFET είναι τα μικρομόρια και τα πολυμερή. Η μέθοδος κατασκευής με μικρομόρια προσδίδει υψηλή κινητικότητα ηλεκτρονίων. Αντίστοιχα η μέθοδος κατασκευής με πολυμερή λόγω των ιδιοτήτων που παρουσιάζουν αυτά, δίνει τη δυνατότητα να τυπώνονται σαν ηλεκτρονικά κυκλώματα σε πλειάδα επιφανειών. Όποιο και από τα δύο υλικά κι αν επιλεγεί ως βασικό υλικό κατασκευής ενός OFET, το κόστος θα είναι χαμηλότερο σε σχέση με το κόστος για την κατασκευή ενός FET πυριτίου (Si). Οι δύο πιο σημαντικές παράμετροι οι οποίες χαρακτηρίζουν την απόδοση ενός OFET είναι η ευκινησία των φορτίων (μ) και ο λόγος τις τιμής του ρεύματος όταν αυτό είναι σε κατάσταση on προς την αντίστοιχη τιμή ρεύματος όταν αυτό είναι σε κατάσταση off, ή πιο απλά ο λόγος on/off. Η ευκινησία των φορτίων (μ) χαρακτηρίζει τη μέση ταχύτητα των φορτίων ύστερα από την επιβολή εξωτερικής τάσης. Ο λόγος on/off εκφράζει το ρυθμό εναλλαγής μεταξύ της κατάστασης λειτουργίας on και της κατάστασης λειτουργίας off του τρανζίστορ. Και οι δύο παράμετροι εξαρτώνται από τη διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται στην πύλη.[5]

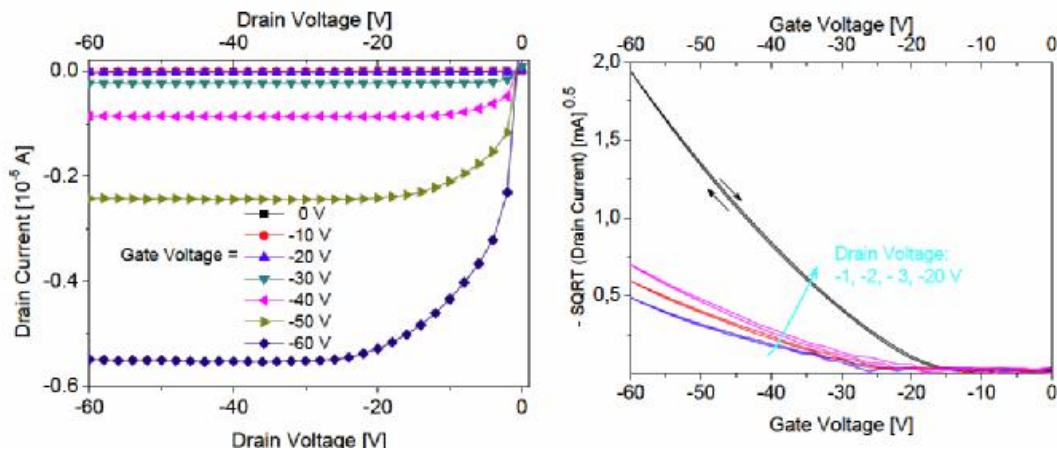
3.2 Τεχνολογία των OFET

Ένα Οργανικό Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου (Organic Field Effect Transistor – OFET) είναι στην ουσία ένας πυκνωτής, με μία δομή σε σάντουιτς που αποτελείται από την Πύλη (Gate), διηλεκτρικό υλικό και στρώματα ημιαγωγών. Δύο μεταλλικές επαφές, το ηλεκτρόδιο της Πηγής (Source) και του Απαγωγού ή Καταβόθρας (Drain), συνδέονται ηλεκτρικά στο λεπτό

στρώμα του ημιαγωγού όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1. Στα Σχήματα 3.1 και 3.2 απεικονίζονται και οι καμπύλες του ρεύματος απαγωγού σε συνάρτηση με την τάση στον απαγωγό για διάφορες τιμές της τάσης πύλης ενός τυπικού OFET. Επίσης στο δεύτερο μέρος του Σχήματος 3.2 απεικονίζεται η γραφική παράσταση της τετραγωνικής ρίζας του ρεύματος απαγωγού ως συνάρτηση του δυναμικού πύλης.



Σχήμα 3.1- Δομή OFET και καμπύλες ρεύματος τάσης απαγωγού για διάφορες τιμές της τάσης πύλης [3]



Σχήμα 3.2 – καμπύλες ρεύματος τάσης απαγωγού για διάφορες τιμές της τάσης πύλης και καμπύλες τετραγωνικής ρίζας του ρεύματος απαγωγού ως συνάρτηση του δυναμικού πύλης [6]

Αυτή η δομή αναπτύχθηκε αρχικά για τρανζίστορ άμορφου πυριτίου (Si). Για δοκιμαστικούς σκοπούς χρησιμοποιείται ένα αγωγίμο υπόστρωμα ως μηχανική υποστήριξη, το οποίο δρα ταυτόχρονα ως ηλεκτρόδιο. Μονωτικά οξειδία ή μονωτικά πολυμερή όντας επικαλυμμένα στην πύλη, με ή χωρίς

επιφανειακή επεξεργασία, λειτουργούν ως διηλεκτρικά στρώματα. Τα OFETs λειτουργούν συνήθως ως συσσωρευτές με την πηγή πάντα γειωμένη. Χωρίς εφαρμογή τάσης V_g στην πύλη η αγωγιμότητα των περισσότερων οργανικών ημιαγωγών είναι χαμηλή. Όταν εφαρμοστεί τάση V_d μεταξύ πηγής-απαγωγού, το ρεύμα που περνάει από τον ημιαγωγό είναι αμελητέο και τότε λέμε ότι η διάταξη είναι στην κατάσταση off. Όταν εφαρμόζεται μία τάση κατωφλίου V_g στην πύλη, δημιουργείται ένα φράγμα στη δομή του πυκνωτή και τα φορτία συσσωρεύονται στη διεπαφή διηλεκτρικού-ημιαγωγού. Τα περισσότερα από αυτά τα φορτία είναι κινούμενα και οδηγούν στο σχηματισμό καναλιών μεταξύ πηγής-απαγωγού. Τα φορτία κινούνται εξαιτίας της εφαρμοζόμενης τάσης V_d και τότε λέμε ότι το τρανζίστορ είναι στην κατάσταση on. Οι περισσότεροι οργανικοί ημιαγωγοί δεν είναι ντοπαρισμένοι εκ προθέσεως, οπότε τα φορτία εγχέονται και εξάγονται από τα ηλεκτρόδια της πηγής και του απαγωγού. Στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχει αντιστοιχία μεταξύ της στάθμης Fermi των μεταλλικών ηλεκτροδίων και των υψηλότερων κατειλημμένων μοριακών τροχιακών (p-καναλιού) ή των χαμηλότερων κενών μοριακών τροχιακών (n-καναλιού), η οποία προκαλεί εμπόδια στην έγχυση των φορτίων. Μία μη μηδενική τάση V_g απαιτείται ώστε να ολισθήσουν τα ενεργειακά επίπεδα των μοριακών τροχιακών των ημιαγωγών προς τα πάνω ή προς τα κάτω, έτσι ώστε τα μοριακά τροχιακά να γίνουν ανάλογα της στάθμης Fermi μεταλλικών ηλεκτροδίων και να μειώσουν τα εμπόδια που δυσκολεύουν την έγχυση των φορτίων. Επιπρόσθετα υπάρχουν κενές καταστάσεις στα film των ημιαγωγών που προκαλούνται από προσμίξεις και ελαττώματα καθώς και μόρια όπως του H_2O και του O_2 που απορροφώνται από το περιβάλλον. Μία μη μηδενική τάση V_g πρέπει να εφαρμοστεί ώστε να συμπληρωθούν αυτές οι παγιδευμένες καταστάσεις πριν μπορέσουν τα φορτία να μεταφερθούν στα film του ημιαγωγού. Η τάση κατωφλίου V_t ορίστηκε ώστε να προσδιοριστούν αυτά τα αποτελέσματα. Με άλλα λόγια η τάση κατωφλίου V_t είναι η ελάχιστη απαιτούμενη τάση που απαιτείται ώστε να ενεργοποιηθεί το οργανικό τρανζίστορ. Με την προσέγγιση σταδιακού καναλιού το ρεύμα I_d μεταξύ πηγής και καταβόθρας του οργανικού τρανζίστορ δίνεται από τη Σχέση 3.3

$$I_d = \frac{W}{L} C_i \mu \left[(V_g - V_t) - \frac{V_d}{2} \right] V_d \quad (3.3)$$

όπου μ είναι η ευκινησία των φορτίων, C_i είναι η χωρητικότητα του διηλεκτρικού ανά μονάδα επιφάνειας, W είναι το πλάτος του καναλιού και L είναι το μήκος του καναλιού.[3],[6]

Όταν $V_d \ll (V_g - V_t)$ τότε ο όρος $V_d/2$ είναι αμελητέος και το I_d είναι ανάλογο του V_d οπότε η συσκευή λειτουργεί στη γραμμική περιοχή λειτουργίας. Όταν το V_d αυξάνεται και γίνεται συγκρίσιμο με το V_g , δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά δυναμικού μεταξύ της πύλης και του ημιαγωγού που βρίσκεται κοντά στο ηλεκτρόδιο του απαγωγού και οι κινήσεις των φορτίων στην περιοχή εξαντλούνται. Περαιτέρω αυξήσεις του V_d προκαλούν ακόμα μεγαλύτερη ελάττωση των κινήσεων των φορτίων στο κανάλι αγωγιμότητας και η τιμή του ρεύματος μεταξύ πηγής και απαγωγού οδηγείται στον κόρο και δεν αυξάνεται περαιτέρω με την αύξηση του V_d . Σε αυτή την περίπτωση η συσκευή λειτουργεί στην περιοχή κόρου. Αυτή η κατάσταση περιγράφεται από τη Σχέση 3.4 η οποία προκύπτει από τη Σχέση 3.3 υποθέτοντας ότι $V_g = V_d - V_t$. Οπότε το ρεύμα κόρου το οποίο θα είναι το ρεύμα κόρου μεταξύ πηγής και απαγωγού θα συμβολίζεται με $I_{d,sat}$ και θα δίνεται από τη Σχέση 3.4 που ακολουθεί στην επόμενη σελίδα. [3]

$$I_{d,sat} = \frac{W}{2L} C_i \mu (V_g - V_t)^2 \quad (3.4)$$

Η κινητικότητα των φορτίων μ ορίζει την ταχύτητα ανά μονάδα, που εφαρμόζεται στο ηλεκτρικό πεδίο των φορέων του φορτίου. Η κινητικότητα των φορτίων μ είναι συνήθως συνάρτηση της τάσης της πύλης. Αν και ο μηχανισμός μεταφοράς των φορτίων δεν έχει γίνει ακόμα πλήρως κατανοητός στους οργανικούς ημιαγωγούς, πολλά μοντέλα έχουν εξελιχθεί ώστε να ερμηνεύσουν την εξάρτηση της τάσης κατωφλίου από την κινητικότητα. Γενικά υπάρχουν κενά που κατανέμονται στο εσωτερικό των οργανικών ημιαγωγών. Όταν η τάση της πύλης αυξάνεται, όλο και περισσότερα κενά γεμίζουν από τα εγχεόμενα φορτία, αφήνοντας λιγότερα κενά να καθυστερούν την κίνηση των φορτίων. Ως εκ τούτου τα φορτία κινούνται γρηγορότερα όταν αυξάνει το δυναμικό της πύλης, πράγμα το οποίο συνδυάζεται με το γεγονός ότι η κινητικότητα αυξάνει με την αύξηση του δυναμικού της πύλης για τα περισσότερα OFETs. Σε περιπτώσεις στις οποίες η κινητικότητα δεν

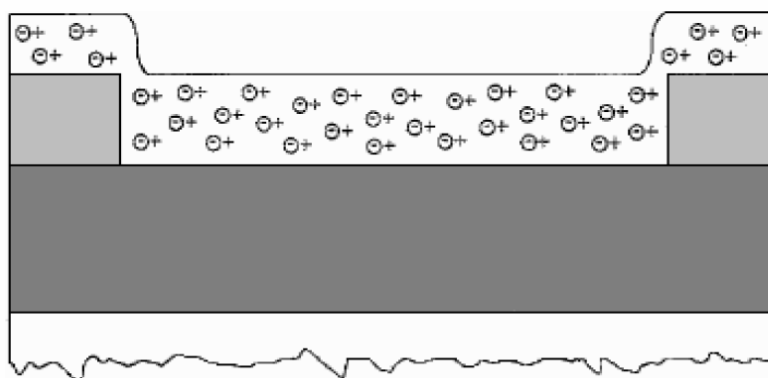
αυξάνεται με την αύξηση του δυναμικού της πύλης, η αντίσταση επαφής μπορεί να έχει πιο ισχυρή επίδραση στα ρεύματα εξόδου για υψηλότερα δυναμικά πύλης μειώνοντας την κινητικότητα.[3]

3.3 Τρόπος λειτουργίας των OFET

Τα OFET κατασκευάζονται κυρίως από πολυμερή και μικρούς μοριακούς οργανικούς ημιαγωγούς, οι οποίοι εμφανίζουν χαμηλή ευκινησία και αυτός είναι ο κυριότερος λόγος που τα OFET δε μπορούν να συναγωνιστούν τα απλά FET σε απόδοση, αν και έχουν υπάρξει εντυπωσιακές βελτιώσεις στις επιδόσεις τους τα τελευταία χρόνια. Η κατασκευή των απλών FET έχει ως βάση το πυρίτιο (Si) και το γερμάνιο (Ge) τα οποία είναι ανόργανοι μονοκρυσταλλικοί ημιαγωγοί και παρουσιάζουν ευκινησία φορτίου (μ) μεγαλύτερη κατά τρεις τάξεις μεγέθους από αυτή των απλών FET. Στην πορεία τα OFET εξελίχθηκαν και άρχισαν να χρησιμοποιούνται με χαμηλό κόστος σε μία μεγάλη ποικιλία ηλεκτρονικών προϊόντων. Η κύρια κατάσταση λειτουργίας των οργανικών τρανζίστορ είναι η λειτουργία τους σαν τρανζίστορ επαύξησης σε κατάσταση συσσώρευσης. Στην ιδανική κατάσταση λειτουργίας οι επαφές της Πηγής (Source) και του Απαγωγού ή Καταβόθρας (Drain) εμφανίζουν ωμικά χαρακτηριστικά για τους φορείς πλειονότητας του οργανικού ημιαγωγού. Αντιστοίχως τα ανόργανα τρανζίστορ λειτουργούν ως επί το πλείστον σε αναστροφή. Η κυριότερη διαφορά μεταξύ των οργανικών ημιαγωγών (είτε είναι τύπου-p είτε είναι τύπου-n) και των αντίστοιχων ανόργανων (είτε είναι τύπου-p είτε είναι τύπου-n) είναι ότι οι οργανικοί ημιαγωγοί χαρακτηρίζονται ανάλογα με το πρόσημο του δυναμικού πύλης κατά το οποίο τίθενται σε λειτουργία, ενώ οι ανόργανοι ημιαγωγοί χαρακτηρίζονται από τον τύπο των φορέων πλειονότητας. Ο βασικός τρόπος κατάταξης των οργανικών ημιαγωγών έχει να κάνει με τα χαρακτηριστικά, με τον τρόπο δόμησης και με τα υλικά των απλών FET. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα λεπτά υμένα δεν κατασκευάζονται σε συνθήκες κενού και ότι έρχονται σε επαφή με τον αέρα του περιβάλλοντος και το συνδυάσουμε με το γεγονός ότι το δυναμικό αναγωγής του οξυγόνου διαφέρει από το δυναμικό οξειδωσίας ενός οργανικού ημιαγωγού κάτι λιγότερο από 1 Volt, τότε γίνεται εύκολα

αντιληπτό ότι περιμένουμε να υπάρξει νόθευση με οξυγόνο. Επίσης από τη στιγμή που οι οργανικές ενώσεις που θα χρησιμοποιήσουμε είναι τύπου-p, είναι λόγω νόθευσης με τον αέρα είτε ενδογενώς, θα τις εξετάζουμε να ήταν οργανικοί ημιαγωγοί τύπου-p. [2],[6]

Στο Σχήμα 3.5 που ακολουθεί παρουσιάζουμε ένα OFET στο οποίο εφαρμόζουμε μηδενική τάση στους ακροδέκτες του. Το κανάλι του ημιαγωγού είναι νοθευμένο, οπότε εμφανίζονται ιόντα αντιστάθμισης τα οποία προέρχονται από τα ιονισμένα άτομα των αποδεκτών.[2]



Σχήμα 3.5 - Κατανομή φορτίων σε OFET με $V_g = V_s = V_d = 0$ [2]

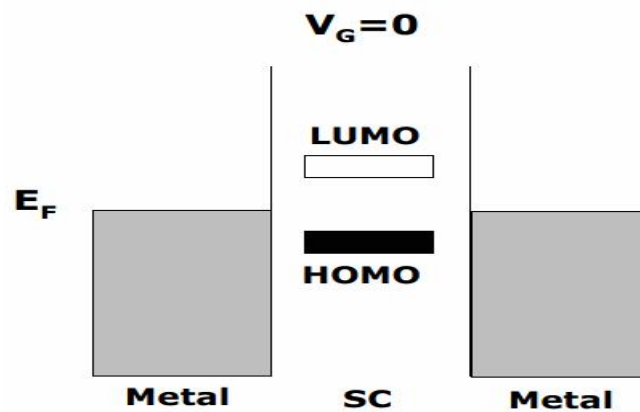
Σε περίπτωση που εφαρμόσουμε τάση V_d στον απαγωγό χαμηλής τιμής, τότε η τιμή ωμικού ρεύματος I_{sd} μεταξύ πηγής και απαγωγού θα είναι σχετικά μικρή, ανάλογη με την αγωγιμότητα (σ) του φιλμ και θα δίνεται από τη Σχέση 3.6.

$$\sigma \cong \frac{W}{L t} \frac{I_{sd}}{V_d} \quad \text{με } V_g = 0 \text{ και } V_d \rightarrow 0 \quad (3.6)$$

όπου W είναι το πλάτος του καναλιού, L είναι το μήκος του και t είναι το αντίστοιχο πάχος του οξειδίου.

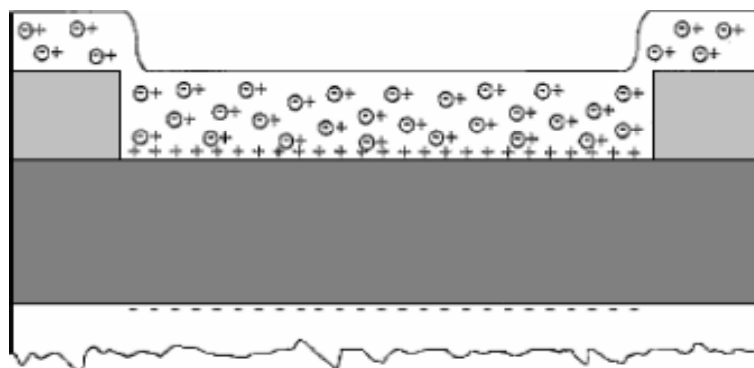
Για την καλύτερη κατανόηση της αρχής λειτουργίας των OFETs παραθέτουμε ένα απλοποιημένο διάγραμμα ενεργειακών σταθμών για τη στάθμη Fermi του μεταλλικού ηλεκτροδίου μεταξύ πηγής και απαγωγού και για τις στάθμες Υψηλότερου Κατειλημμένου Μοριακού Τροχιακού (Highest Occupied Molecular Orbital – HOMO) και Χαμηλότερου Κενού Μοριακού Τροχιακού (Lowest Unoccupied Molecular Orbital – LUMO) του ημιαγωγού. Ειδικότερα για την περίπτωση μηδενικού δυναμικού πύλης ($V_g = 0$), κατά την οποία

όπως προείπαμε δε λαμβάνει χώρα μεταφορά φορτίων, το αντίστοιχο ενεργειακό διάγραμμα απεικονίζεται στο Σχήμα 3.7 της επόμενης σελίδας. Ο μόνος τρόπος ο οποίος μπορεί να οδηγήσει σε ροή ρεύματος στον οργανικό ημιαγωγό είναι η απευθείας έγχυση από τα ηλεκτρόδια πηγής και απαγωγού.[6]



Σχήμα 3.7 - Ενεργειακό διάγραμμα λειτουργίας OFET με μηδενικό δυναμικό πύλης[6]

Αν εφαρμόσουμε αρνητική τάση στην πύλη ($V_g < 0$) (Σχήμα 3.9), τότε παρατηρούμε ότι σε όλο το μήκος του οξειδίου και στη διεπιφάνεια μεταξύ οξειδίου και ημιαγωγού, εμφανίζεται μία πτώση τάσης. Η εμφάνιση αυτής της πτώσης τάσης έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει κάμψη των ζωνών στον ημιαγωγό στην περιοχή που παρατηρείται η συσσώρευση. Το πλεονάζον θετικό φορτίο που συγκεντρώνεται στην περιοχή αυτή έχει ως προέλευση τις ωμικές επαφές μεταξύ πηγής και απαγωγού. Με αυτό τον τρόπο σχηματίζεται τελικά μία θετική ζώνη συσσώρευσης.[2]



Σχήμα 3.9 - Κατανομή φορτίων σε OFET με $V_s = V_d = 0$, $V_g < 0$ [2]

Εφόσον το μονωτικό υλικό προσομοιώνεται ως πυκνωτής με χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας C_i , τότε φορτίο που συσσωρεύεται θα είναι $V_g C_i$, με την παραδοχή όμως ότι στον ημιαγωγό έχουμε αμελητέα πτώση τάσης. Ταυτόχρονα αποθηκεύεται ίση ποσότητα αρνητικού φορτίου στη διεπιφάνεια μεταξύ πύλης και μονωτή. Εξαιτίας της νόθευσης και του φαινομένου του πεδίου, αφού και τα δύο μαζί δημιουργήσαν το στρώμα συσσώρευσης, ο οργανικός ημιαγωγός θα περιέχει πλέον θετικά φορτία. Όταν εφαρμόζεται μία μικρή τιμή τάσης στον απαγωγό, το μετρούμενο ρεύμα θα έχει μεγαλύτερη τιμή από αυτή του ωμικού, από τη στιγμή που τα φορτία συσσώρευσης θα είναι ευκίνητα. Από τα παραπάνω καταλαβαίνουμε ότι η ευκινησία των φορτίων (μ) είναι από τις πλέον σημαντικές παραμέτρους, αφού χαρακτηρίζει την ευκολία με την οποία κινούνται οι φορείς κάτω από την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου.[2]

Αν αυξήσουμε κατά δV_g την τάση V_g της πύλης, τότε η τιμή του φορτίου ανά μονάδα επιφάνειας θα αυξηθεί κατά $C_i \delta V_g$. Αντιστοίχως η τιμή του φορτίου σε όλο το κανάλι θα αυξηθεί κατά $L W C_i \delta V_g$. Συνεπώς θα υπάρξει και μία αντίστοιχη αύξηση της τιμής του ρεύματος σύμφωνα με τη Σχέση 3.10

$$\delta I_{sd} = \frac{L}{W} \mu C_i V_d \delta V_g \quad (3.10)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το ρεύμα στον απαγωγό το μετράμε ως συνάρτηση του δυναμικού της πύλης (για μικρές τιμές της τάσης απαγωγού V_d), η διαγωγιμότητα θα δίνεται από τη Σχέση 3.11

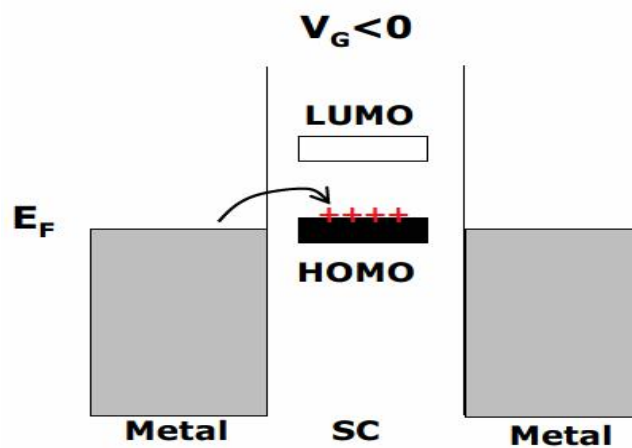
$$g_m = \frac{\delta I_{sd}}{\delta V_d} = \frac{L}{W} \mu C_i V_d \quad \mu \varepsilon V_d \rightarrow 0 \quad (3.11)$$

Σε αυτή την περίπτωση η ευκινησία των φορτίων (μ) θα είναι συνάρτηση του δυναμικού πύλης και θα δίνεται από τη Σχέση 3.12

$$\mu = \mu(V_g) = \left(\frac{W}{L C_i V_d} \right) \frac{\delta I_{sd}}{V_d} \quad \mu \varepsilon V_d \rightarrow 0 \quad (3.12)$$

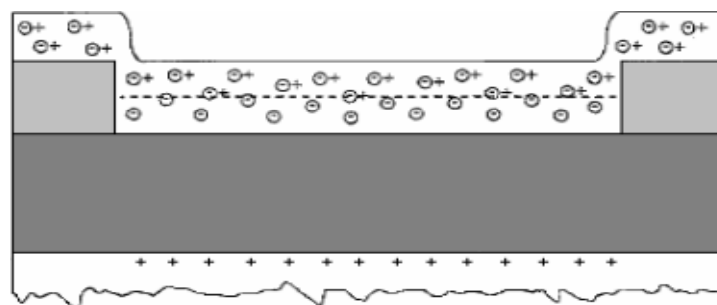
Στην επόμενη σελίδα ακολουθεί το αντίστοιχο απλοποιημένο διάγραμμα ενεργειακών σταθμών για τη στάθμη Fermi του μεταλλικού ηλεκτροδίου

μεταξύ πηγής και απαγωγού και για τις στάθμες HOMO και LUMO του ημιαγωγού, για $V_g < 0$ (Σχήμα 3.13). Εδώ έχουμε το σχηματισμό ενός καναλιού τύπου-p. Τα θετικά φορτία που υπάρχουν στο εσωτερικό του οργανικού ημιαγωγού πρόσκεινται στο διηλεκτρικό πύλης. Αν η στάθμη Fermi του μετάλλου πηγής-απαγωγού είναι κοντά στη στάθμη HOMO του οργανικού ημιαγωγού, τότε με την εφαρμογή τάσης V_{sd} μεταξύ πηγής και απαγωγού θα έχουμε εξαγωγή θετικών φορτίων από τα ηλεκτρόδια.[6]



Σχήμα 3.13 - Ενεργειακό διάγραμμα λειτουργίας OFET με αρνητικό δυναμικό πύλης [6]

Σε περίπτωση που εφαρμοστεί θετική τάση στην πύλη ($V_g > 0$), τότε στον ημιαγωγό και συγκεκριμένα στη διεπιφάνεια με το μονωτή θα υπάρχει ανάποδη κάμψη των ζωνών. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να υπάρξει απογύμνωση από το φορτίο (Σχήμα 3.14). Τότε τα θετικά φορτία θα εγκαταλείψουν τη συσκευή από τις ωμικές επαφές μεταξύ πηγής και απαγωγού.[2]



Σχήμα 3.14 – Κατανομή φορτίων σε OFET με $V_s = V_d = 0$, $V_g > 0$ [2]

Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται στην ουσία μία ζώνη απογύμνωσης. Οι διακεκομμένες γραμμές οριοθετούν το εύρος της περιοχής.

Αν αυξήσουμε περαιτέρω το δυναμικό της πύλης, τότε η έκταση της ζώνης απογύμνωσης θα αυξάνεται συνεχώς στο εσωτερικό του ημιαγωγού έως ότου απογυμνωθεί πλήρως ο ημιαγωγός. Το εύρος M της ζώνης απογύμνωσης θα δίνεται από τη Σχέση 3.15

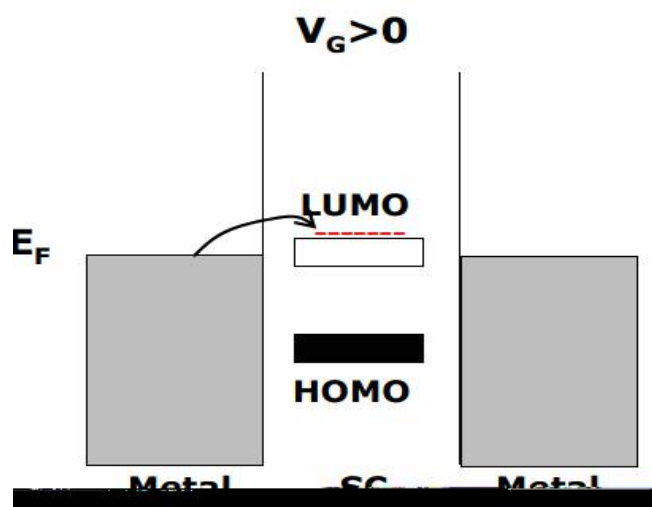
$$M = \frac{\epsilon_s}{C_i} \left[\left(1 + \frac{2 C_i^2 V_g}{q N_A \epsilon_s} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (3.15)$$

Καταλαβαίνουμε ότι για μικρές τιμές της τάσης απαγωγού V_d το ρεύμα I_{sd} μεταξύ πηγής και απαγωγού θα ελαττώνεται με την αύξηση του θετικού δυναμικού πύλης, διότι θα έχουμε μείωση του συνολικού φορτίου του ημιαγωγού. Για δεδομένο πάχος οξειδίου (t) η Σχέση 3.15 μπορεί να καθίσταται χρήσιμη ώστε να υπολογιστεί ένα ανώτατο όριο της πυκνότητας των φορέων φορτίου.[2]

Στα τύπου-n MOSFET πυριτίου και όταν το δυναμικό της πύλης λαμβάνει υψηλές θετικές τιμές, έχουμε στον ημιαγωγό και συγκεκριμένα στη διεπιφάνεια μεταξύ ημιαγωγού και μονωτή, την παραγωγή ενός στρώματος αναστροφής με αρνητικό φορτίο. Κάτι αντίστοιχο δεν παρατηρείται στα οργανικά MISFET, διότι αυτά έχουν ηλεκτρόδια από χρυσό τα οποία δεν αποτελούν ωμικές επαφές ώστε να πραγματοποιείται έγχυση ηλεκτρονίων στους οργανικούς ημιαγωγούς. Επιπρόσθετα ο ρυθμός θερμικής γένεσης φορέων, είναι κατά αρκετές τάξεις μεγέθους μικρότερος από τον αντίστοιχο του πυριτίου, διότι οι οργανικοί ημιαγωγοί παρουσιάζουν από τη φύση τους μεγαλύτερο ενεργειακό χάσμα.[2]

Για την καλύτερη επεξήγηση της περίπτωσης εφαρμογής θετικής τάσης πύλης ($V_g > 0$) παραθέτουμε και το αντίστοιχο απλοποιημένο διάγραμμα ενεργειακών σταθμών για τη στάθμη Fermi του μεταλλικού ηλεκτροδίου μεταξύ της πηγής και του απαγωγού και για τις στάθμες HOMO και LUMO του ημιαγωγού, στο Σχήμα 3.16 της επόμενης σελίδας. Σε αυτή την περίπτωση σχηματίζεται ένα κανάλι τύπου-n. Δημιουργούνται αρνητικά φορτία στη

διηλεκτρική επαφή του οργανικού ημιαγωγού. Αν η στάθμη Fermi του μετάλλου πηγής-απαγωγού είναι μακριά από τη στάθμη LUMO ώστε η έκθεση ή η εξαγωγή ηλεκτρονίων να μη συγκεντρώνει πολλές πιθανότητες, τότε θα έχουμε την εμφάνιση μικρού ρεύματος I_{sd} μεταξύ πηγής και απαγωγού εξαιτίας των υψηλών φραγμάτων δυναμικού. Αν η στάθμη Fermi του μετάλλου πηγής-απαγωγού είναι κοντά στη στάθμη LUMO του οργανικού ημιαγωγού, τότε εφαρμόζοντας τάση μεταξύ V_{sd} μεταξύ πηγής και απαγωγού θα έχουμε εξαγωγή και έγχυση αρνητικών φορτίων από τα ηλεκτρόδια.[6]

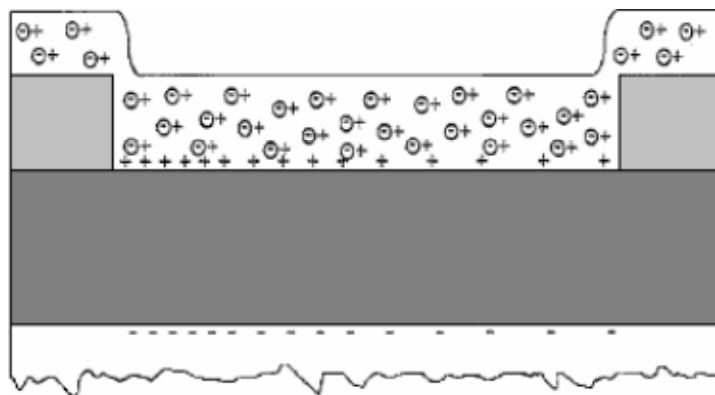


Σχήμα 3.16 - Ενεργειακό διάγραμμα λειτουργίας OFET με θετικό δυναμικό πύλης [6]

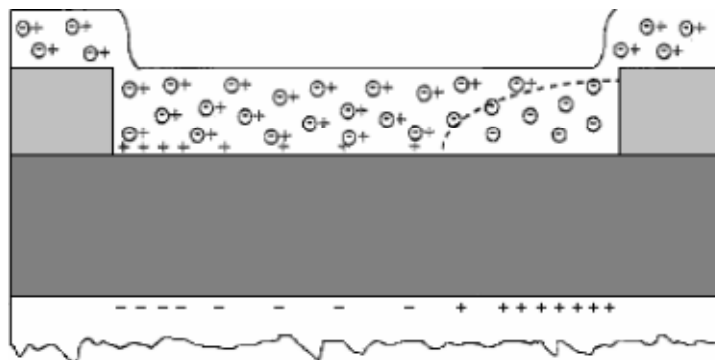
Σε περίπτωση που θελήσουμε να καθορίσουμε την ευκινησία και την αγωγιμότητα θα πρέπει να πραγματοποιήσουμε μετρήσεις σε χαμηλό δυναμικό απαγωγού V_d . Δε πρέπει όμως να παραβλέψουμε ότι τα τρανζίστορ χρησιμοποιούνται πρακτικά στην περιοχή των υψηλών δυναμικών V_d . Αν θέσουμε αρχικά ένα υψηλά αρνητικό δυναμικό πύλης V_g σε συνδυασμό με ένα χαμηλό δυναμικό απαγωγού V_d , θα δημιουργηθεί ένα ομοιογενές συσσωρευμένο φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας σε όλο το μήκος του καναλιού. Όσο όμως υποπίπτει η τάση του απαγωγού V_d σε όλο και αρνητικότερες τιμές, η πτώση τάσης στο μονωτή και στον ημιαγωγό αποκτά άμεση εξάρτηση από τη θέση μέσα στο κανάλι. Τότε στην πηγή η πτώση τάσης και το συσσωρευμένο φορτίο δε θα μεταβάλλονται. Αντίστοιχα στον απαγωγό έχουμε μείωση της πτώσης τάσης, συνεπώς και μείωση της πυκνότητας του

συσσωρευμένου φορτίου. Τελικά η πτώση τάσης θα είναι διαφορετική από περιοχή σε περιοχή μέσα στο κανάλι και η τιμή της θα εναλλάσσεται διαρκώς μεταξύ των δύο ακραίων τιμών. Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η πυκνότητα του συσσωρευμένου φορτίου θα ελαττώνεται από την πηγή προς τον απαγωγό (Σχήμα 3.17). Έτσι θα έχουμε ανομοιομορφία στην πυκνότητα φορέων στο κανάλι.[2]

Στην περίπτωση που το δυναμικό του απαγωγού γίνει αρνητικότερο από το δυναμικό της πύλης, τότε θα έχουμε την εμφάνιση μίας ζώνης απογύμνωσης στην επαφή του απαγωγού η οποία θα μεγαλώνει συνεχώς (Σχήμα 3.17).



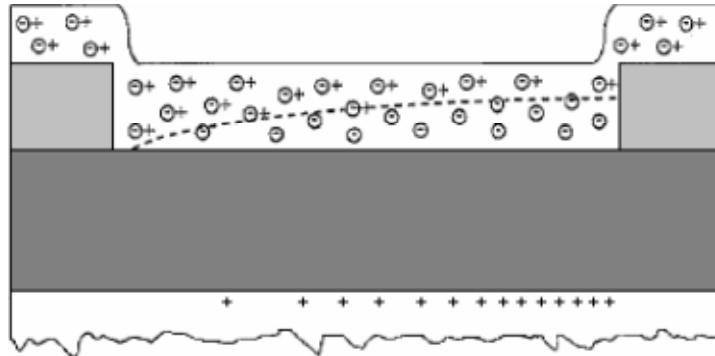
Σχήμα 3.17 – Κατανομή φορτίων σε OFET με $V_s = 0$, $V_g < V_d < 0$ [2]



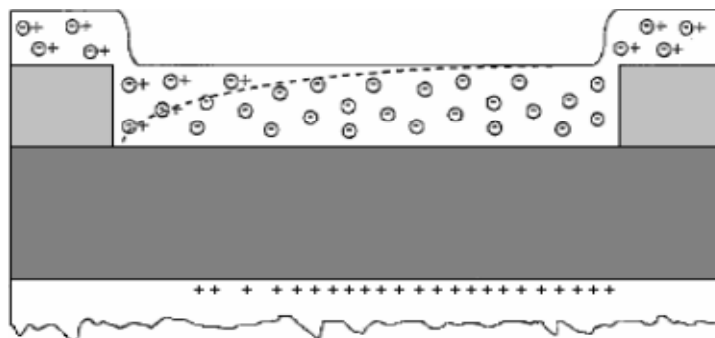
Σχήμα 3.18 – Κατανομή φορτίων σε OFET με $V_s = 0$, $V_d < V_g < 0$ [2]

Στα Σχήμα 3.19 και 3.20 που ακολουθούν στην επόμενη σελίδα απεικονίζεται η μεταβολή του εύρους της ζώνης απογύμνωσης καθώς αυξάνεται το αρνητικό δυναμικό απαγωγού V_d . Και από τα δύο σχήματα παρατηρούμε ότι η

ζώνη απογύμνωσης διευρύνεται καθώς το δυναμικό απαγωγού παίρνει όλο και αρνητικότερες τιμές, ενώ το δυναμικό πύλης παραμένει στο μηδέν.[2]



Σχήμα 3.19 – Κατανομή φορτίων σε OFET με $V_s = 0$, $V_g = 0$, $V_d < 0$ [2]



Σχήμα 3.20 – Κατανομή φορτίων σε OFET με $V_s = 0$, $V_g = 0$, $V_d \ll 0$ [2]

3.3.1 Προσομοίωση

Για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων των κυκλωμάτων θα πρέπει να υπολογίσουμε όλα τα χαρακτηριστικά του τρανζίστορ για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς του δυναμικού της πύλης V_g και του δυναμικού του απαγωγού V_d . Θα πρέπει να είναι γνωστό τόσο το εύρος του αρνητικού δυναμικού της πύλης V_g , όσο και το εύρος του αρνητικού δυναμικού του απαγωγού V_d . Πραγματοποιώντας σάρωση του δυναμικού πύλης V_g για πολύ μικρές τιμές του δυναμικού του απαγωγού V_d , το ρεύμα μεταξύ πηγής και απαγωγού θα είναι συνάρτηση του δυναμικού της πύλης V_g ($I_{sd} = I_{sd}(V_g)$).

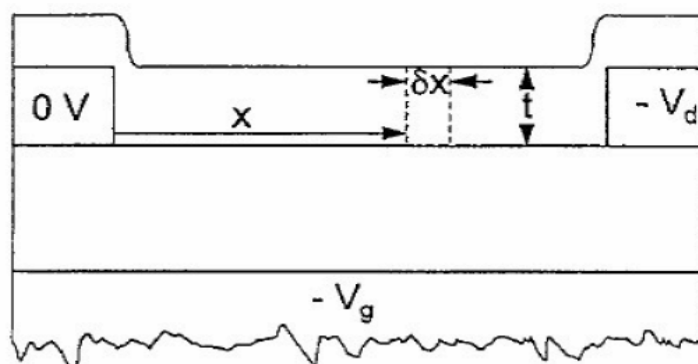
Τότε η αγωγιμότητα φύλλου ανά τετραγωνικό G θα εξαρτάται άμεσα από το δυναμικό της πύλης V_g σύμφωνα με τη σχέση:

$$G = \frac{I_{sd}(V_g)W}{L V_d} \quad (3.21)$$

Όταν το δυναμικό του απαγωγού πάρει αρνητική τιμή, τότε είναι εφικτό να προσομοιωθεί το κανάλι ως ένα σύνολο στοιχειωδών καναλιών με διαφορετική αγωγιμότητα φύλλου ανά τετραγωνικό G το κάθε ένα, επειδή επικρατούν διαφορετικά τοπικά δυναμικά. Στο Σχήμα 3.23 που ακολουθεί στην επόμενη σελίδα απεικονίζεται η σχηματική παράσταση του τρανζίστορ. Με τη βοήθεια αυτού του σχήματος θα πραγματοποιήσουμε όλους τους επιμέρους υπολογισμούς που αφορούν την αγωγιμότητα, την αντίσταση, την πτώση τάσης και το ρεύμα μεταξύ πηγής και απαγωγού.[2]

Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 3.23 θεωρούμε ένα στοιχειώδες μήκος δx σε απόσταση x από την επαφή της πηγής. Έστω ότι στην επιφάνεια αυτού του κομματιού αναπτύσσεται μία τάση V_x . Τότε η αγωγιμότητα φύλλου G στο σημείο αυτό θα είναι:

$$G = G (V_g - V_x) \quad (3.22)$$



Σχήμα 3.23 - Βασικό σχήμα για τον υπολογισμό επιμέρους μεγεθών [2]

Αν το τρανζίστορ έχει πλάτος καναλιού L, τότε η αντίσταση του στοιχείου θα είναι:

$$L G (V_g - V_x) \delta \chi \quad (3.24)$$

Αν έχουμε ρεύμα I_{sd} μεταξύ της πηγής και του απαγωγού, τότε θα έχουμε πτώση τάσης στο στοιχείο η οποία θα δίνεται από τη Σχέση 3.25

$$\delta V_x = \frac{I_d \delta \chi}{L G (V_g - V_x)} \quad (3.25)$$

Αν λάβουμε υπόψη ότι η συνολική πτώση τάσης μεταξύ πηγής και απαγωγού είναι V_d και το κανάλι έχει συνολικό μήκος W , τότε το ρεύμα μεταξύ πηγής και απαγωγού θα είναι:

$$I_{sd} = \left(\frac{L}{W}\right) \int_0^{V_d} G (V_g - V_x) dV_x = \left(\frac{L}{W}\right) \int_{V_g - V_d}^{V_g} G (V_g) dV_g \quad (3.26)$$

Επομένως αν το δυναμικό πύλης V_g παίρνει τιμές στο πεδίο $-R \leq V_g \leq +R$, για μικρές τιμές του δυναμικού απαγωγού V_d και η αγωγιμότητα φύλλου ανά τετραγωνικό G είναι συνάρτηση του δυναμικού πύλης V_g , τότε μπορούμε να υπολογίσουμε όλες τις τιμές του ρεύματος για όλες τις τιμές του δυναμικού πύλης V_g εντός της περιοχής $-R \leq V_g \leq 0$ και για όλες τις τιμές του δυναμικού απαγωγού V_d εντός της περιοχής $-R \leq V_d \leq 0$. Βασικότερη προϋπόθεση για τα παραπάνω είναι να μην εξαρτάται η ευκινησία των φορτίων (μ) από το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ πηγής και απαγωγού. Στα OFETs η ευκινησία των φορτίων (μ) παρουσιάζει εξάρτηση από το ηλεκτρικό πεδίο, για ηλεκτρικά πεδία έντασης $10^5 \frac{\text{Volts}}{\text{cm}}$ και άνω.[2]

3.3.2 Λόγος on/off

Ο λόγος on/off είναι το πηλίκο του ρεύματος που διαρρέει το τρανζίστορ όταν αυτό βρίσκεται σε κατάσταση «on» ($V_g < 0$, $V_d < 0$) προς το πηλίκο του ρεύματος που το διαρρέει όταν αυτό βρίσκεται σε κατάσταση «off» ($V_g = 0$, $V_d < 0$), για καθορισμένη αρνητική τιμή δυναμικού στον απαγωγό V_d . [2]

Με βάση το Σχήμα 3.22 εξετάζουμε ένα στοιχείο στην τυχαία θέση x . Η διαφορά δυναμικού στην επιφάνεια μεταξύ ημιαγωγού και μονωτή θα είναι $-V_x$.

Αν ισχύει $V_x > V_g$ τότε η πυκνότητα του συσσωρευμένου φορτίου ανά μονάδα επιφάνειας θα ισούται με $C_i (V_g - V_0 - V_x)$. Με το μέγεθος V_0 περιγράφουμε την τάση, που αντισταθμίζει το ενεργειακό χάσμα μεταξύ της στάθμης Fermi και της πύλης στο εσωτερικό του ημιαγωγού. Η τιμή της τάσης V_0 είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με την τιμή των τάσεων λειτουργίας του τρανζίστορ. Αν η πυκνότητα των φορέων που νοθεύουν τον ημιαγωγό είναι N_A τότε η αντίσταση του στοιχείου θα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\frac{\delta x}{[N_A e \mu L t + C_i (V_g - V_0 - V_x)L]} \quad (3.27)$$

Στην παραπάνω σχέση t είναι το πάχος του ημιαγωγού και L είναι το πλάτος του τρανζίστορ.

Αν $V_x < V_g$ τότε έχουμε το σχηματισμό μίας ζώνης απογύμνωσης M σύμφωνα με τη Σχέση 3.15, απλά στη θέση του V_g έχουμε $(V_g - V_0 - V_x)$. Αν μεταξύ πηγής και απαγωγού έχουμε ρεύμα I_{sd} τότε η πτώση τάσης στο στοιχείο για συσσώρευση δV_x θα είναι:

$$V_1 = I_{sd} \delta x \left[\frac{1}{N_A e \mu L t} + \frac{1}{C_i \mu (V_g - V_0 - V_x)L} \right] \quad (3.28)$$

Αντίστοιχα η πτώση τάσης στο απογυμνωμένο στοιχείο θα είναι:

$$V_2 = I_{sd} \delta x L (t - M) N_A e \mu \quad (3.29)$$

Συνεπώς το συνολικό ρεύμα μεταξύ πηγής και απαγωγού θα δίνεται από τη σχέση:

$$I_{sd} = \frac{L}{W} \int_0^{V_2} N_A e t \mu + C_i \mu (V_g - V_0 - V_x) dV_x + \frac{L}{W} \int_{V_2}^{V_d} (t - W) N_A e \mu dV_x \quad (3.30)$$

Αν θεωρήσουμε αμελητέα την επίδραση της απογύμνωσης κοντά στην επαφή του απαγωγού παίρνουμε για το I_{sd} τη Σχέση (3.31):

$$I_{sd} = \frac{L\mu C_i}{W} \left(V_g - V_{\theta} - \frac{V_d}{2} \right) V_d + \frac{\sigma L t}{W} V_d \quad (3.31)$$

Η παραπάνω μορφή του I_{sd} αποτελεί τη συνηθισμένη εξίσωση που περιγράφει το ρεύμα σε ένα FET. [2]

Αν $V_g = V_d$ και $V_{\theta} \ll V_g$ θα έχουμε:

$$I_{sd} = \frac{L\mu C_i}{2W} V_g^2 + \frac{\sigma L t}{W} V_g \quad (3.32)$$

Αν $V_g = 0$ η απογύμνωση εξαπλώνεται σε ολόκληρο το κανάλι (Σχήμα 3.5). Από τη στιγμή που είτε το $V_d \rightarrow 0$ είτε το $V_g \rightarrow 0$, δηλαδή η απογύμνωση είναι πολύ μικρή και το ποσοστό νόθευσης πολύ μεγάλο, τότε η εξίσωση 3.30 μετασχηματίζεται στην εξίσωση 3.33 που ακολουθεί, η οποία είναι στην ουσία ίδια με την εξίσωση 3.6.

$$I_{sd} = \frac{L\sigma t}{W} \quad (3.33)$$

Αν θεωρήσουμε ότι η απογύμνωση δεν είναι αμελητέα, τότε το ρεύμα I_{sd} παίρνει τη μέγιστη τιμή του όταν έχουμε τάση στραγγαλισμού V_p :

$$V_p = \frac{qNT}{2C_s} \left(1 + 2 \frac{C_s}{C_i} \right) \quad (3.34)$$

Η V_p αντιστοιχεί σε πλήρη απογύμνωση του φιλμ στην επαφή με τον αγωγό. Οπότε για τη μέγιστη τιμή του ρεύματος I_{sd} όταν $V_d \geq V_p$ θα έχουμε:

$$I_{sd} = \frac{L\mu C_i}{W} \left(V_g - V_g - \frac{V_d}{2} \right) V_d + \frac{\sigma L t}{W} V_d \quad (3.35)$$

Συνεπώς για τον υπολογισμού του λόγου on/off υπάρχουν δύο ακραίες περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση είναι να είναι αμελητέα η απογύμνωση και ο ημιαγωγός να είναι νοθευμένος σε πολύ μεγάλο ποσοστό.

Τότε θα ισχύει:

$$\frac{I_{on}}{I_{off}} = \frac{\frac{L\mu C_i}{2W} V_g^2 + \frac{\sigma Lt}{W} V_d}{\frac{\sigma Lt}{W} V_d} = 1 + \left(\frac{\mu}{\sigma}\right) \frac{C_i V_d}{2t} \quad (3.36)$$

Η δεύτερη περίπτωση είναι η απογύμνωση να είναι ολοκληρωτική και ο αγωγός λίγο νοθευμένος. Τότε θα ισχύει:

$$\frac{I_{on}}{I_{off}} = \frac{\frac{L\mu C_i}{2W} V_g^2 + \frac{\sigma Lt}{W} V_d}{\frac{L\sigma q N_A t^2}{6WC_s} \left(1 + 3\frac{C_s}{C_i}\right)} = \frac{\frac{\mu C_i}{2} V_d^2 + \sigma t V_d}{\frac{\sigma q N_A t^2}{6C_s} \left(1 + 3\frac{C_s}{C_i}\right)} \quad (3.37)$$

Αν ισχύει $\frac{\mu C_i}{2} V_d^2 \gg \sigma t V_d$ και $\rightarrow \gg 1$ τότε θα έχουμε:

$$\frac{I_{on}}{I_{off}} = \left(\frac{\mu}{\sigma}\right) \frac{C_i^2}{q N_A t^2} V_d^2 \quad (3.38)$$

Από τη Σχέση 3.37 παρατηρούμε ότι για να επιτύχουμε υψηλή τιμή του λόγου on/off θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μονωτές με μεγάλη πυκνότητα ανά μονάδα επιφάνειας, υλικά με υψηλή τιμή του λόγου ευκινησία φορτίων προς αγωγιμότητα και φιλμ ημιαγωγών με πολύ μικρό πάχος. Από τη Σχέση 3.38 παρατηρούμε ότι τα φιλμ με χαμηλό ποσοστό νόθευσης θα δίνουν μεγαλύτερο λόγο on/off επειδή ρεύμα στην κατάσταση off θα λαμβάνει πολύ χαμηλές τιμές εξαιτίας της απογύμνωσης.[2]

3.4 Οργανικοί αισθητήρες Τρανζίστορ λεπτού φιλμ

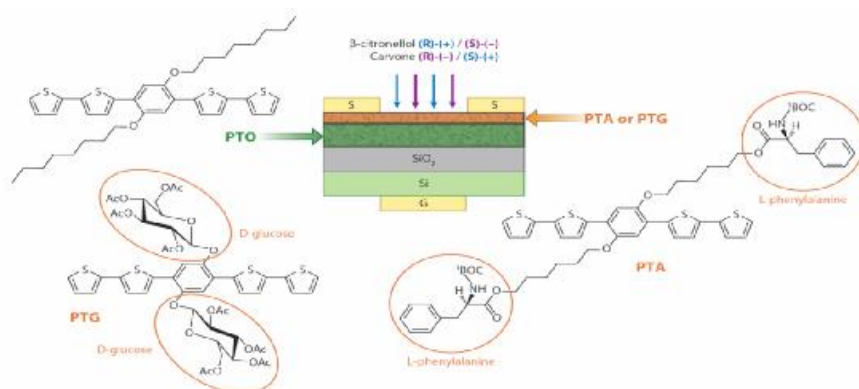
Τα OFETs λεπτού φιλμ είναι ικανά να χρησιμεύσουν σε μία πλειάδα εφαρμογών, όπως σε χημικούς και βιολογικούς αισθητήρες, σε περιβαλλοντικές εφαρμογές, σε βιομηχανικές κατασκευές, σε ιατρικές και βιολογικές εξετάσεις. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα που προσφέρουν αυτές οι δομές, είναι το χαμηλό κόστος, η εύκολη επεξεργασία και η συμβατότητα με πλαστικά υποστρώματα. Ένα άλλο βασικό πλεονέκτημα είναι ότι οι αισθητήρες που είναι δομημένοι σε OFETs λεπτού φιλμ διαμορφώνουν χημικά λειτουργικούς οργανικούς ημιαγωγούς λόγω των ομοιοπολικών

δεσμών με πλευρικές ομάδες στοιχείων. Σε σύγκριση με τις ανόργανες διατάξεις οι οργανικές προσφέρουν μεγαλύτερη ποικιλία επιλογών όσον αφορά την εισαγωγή πλευρικών ομάδων στοιχείων, οι οποίες μπορούν να αυξήσουν την ευαισθησία του αισθητήρα. Υπάρχουν δύο τύποι αισθητήρων που έχουν μελετηθεί διεξοδικά. Ο πρώτος αφορά αισθητήρες βασισμένους σε OFETs και ο δεύτερος αισθητήρες βασισμένους σε Οργανικά Ηλεκτροχημικά Τρανζίστορ (Organic Electrochemical Transistors – OECTs).[3]

Για τους αισθητήρες OFET τα μόρια εισέρχονται σε όρια των κόκκων του φιλμ του ημιαγωγού και αλληλεπιδρούν με τους ημιαγωγούς στο κανάλι αγωγιμότητας. Αυτά τα μόρια είναι δυνατό να επιφέρουν σημαντικά αποτελέσματα στα OFETs, όπως ντοπάρισμα, μεταβολές στην πυκνότητα των φορτίων, κενά και καθυστέρηση στην κίνηση των φορτίων. Αυτές οι μεταβολές προκαλούν αλλαγή στις τάσεις κατωφλίου και την ευκινησία των φορτίων των συσκευών, οπότε οδηγούν σε μεταβολή της ροής, μέσω των λεπτών φιλμ των οργανικών ημιαγωγών, μεταξύ των ηλεκτροδίων πηγής και απαγωγού.[3]

Έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες προσεγγίσεις με στόχο να βελτιωθεί η ευαισθησία, η επιλεκτικότητα, η σταθερότητα και η ταχύτητα απόκρισης των OFET αισθητήρων. Πολλοί λεπτοί αισθητήρες OFET με διάφορα υμένα ως ημιαγωγίμα στρώματα, παρουσίασαν αυξημένη ευαισθησία και αυξημένη ταχύτητα απόκρισης μεγαλύτερης τάξη μεγέθους από τα OFETs συμβατικού πάχους. Τα πρώτα μοριακά επίπεδα των οργανικών ημιαγωγών ορίζουν τα κανάλια αγωγιμότητας των OFETs. Για αισθητήρες OFETs με λίγα μόνο ημιαγωγίμα μοριακά επίπεδα, τα κανάλια αγωγιμότητας είναι εκτεθειμένα στο περιβάλλον. Μερικά μόρια αλληλεπιδρούν άμεσα με το κανάλι αγωγιμότητας, χωρίς να πρέπει να διαχέονται μέσα από ένα παχύ ημιαγωγίμο φιλμ. Με αυτό τον τρόπο βελτιώνεται η ευαισθησία και η ταχύτητα απόκρισης των αισθητήρων OFET κατά μερικές τάξεις μεγέθους. Εκτός από τη βελτίωση της ευαισθησίας και της επιλεκτικότητας των αισθητήρων OFET, η χρήση πολύ λεπτών ημιαγωγικών φιλμ οδήγησε στη βελτίωση της σταθερότητας των αισθητήρων.[3]

Η κύρια πρόκληση για τους αισθητήρες OFET είναι να εξασφαλίσουν επιλεκτική και συγκεκριμένη ανίχνευση. Οργανικά τρανζίστορ με λειτουργικά υποστρώματα αποδέκτη διαδραματίζουν κυρίαρχο ρόλο στη βελτίωση της επιλεκτικότητας των αισθητήρων OFET. Επίσης αισθητήρες OFET δύο στρωμάτων προσφέρουν μία βελτιωμένη λύση, σε σύγκριση με συσκευές ενός στρώματος χωρίς λειτουργικά στρώματα αποδέκτη. Παρά τις τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για την αύξηση της επιλεκτικότητας των αισθητήρων OFET, η περαιτέρω ανίχνευση μορίων με παρόμοια χημική δομή και φυσικές ιδιότητες παραμένει ένα ανοιχτό κεφάλαιο. Πρόσφατα αποδείχτηκε ότι αισθητήρες OFET δύο στρωμάτων σε συνδυασμό με χειραλικές (chiral) ομάδες παρουσιάζουν διαφορετική απόκριση μετά την έκθεση σε οπτικά ισομερή όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.39.[3]



Σχήμα 3.39 - Αισθητήρες OFET δύο στρωμάτων με χειραλικές ομάδες [3]

Στο Σχήμα 3.39 οι χειραλικές (chiral) ομάδες τονίζονται με πορτοκαλί κύκλους. Εδώ το στρώμα του αποδέκτη παίζει κυρίαρχο ρόλο στην επίτευξη χειραλικής (chiral) διαφορικής ανίχνευσης. Συστοιχίες αισθητήρων με διαφορετικές ευαισθησίες και αποκρίσεις σε μεμονωμένα μόρια, έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης για τη βελτίωση της επιλεκτικότητας των αισθητήρων. Αμέταλλες phthalocyanines και phthalocyanines με επιμετάλλωση Co, Ni, Cu χρησιμοποιήθηκαν ως ενεργά υλικά χημικών αισθητήρων και παρουσίασαν αντιθέσεις οξειδωτικής και αναγωγικής συμπεριφοράς σε σχέση με το H₂O₂, εξαιτίας της σημαντικής οξειδοαναγωγικής αντίθεσης στην περιοχή του αισθητήρα.[3]

Η υγρασία είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει τους αισθητήρες OFET. Τα περισσότερα OFET παρουσιάζουν μειωμένη απόδοση παρουσία υγρασίας. Γι αυτό το λόγο παραμένει μεγάλη πρόκληση η κατασκευή αισθητήρων OFET κατάλληλων για συνθήκες υγρασίας. Πρόσφατα παρουσιάστηκε ένας τρόπος ώστε να παρακαμφθεί αυτό το πρόβλημα ασυμβατότητας με την υγρασία που παρουσιάζουν τα OFETs, χρησιμοποιώντας πολύ λεπτά στρώματα διηλεκτρικών πύλης και οργανικούς ημιαγωγούς που περιέχουν aliphatic πλευρικές ομάδες. Τα πολύ λεπτά πολυμερή των διηλεκτρικών πύλης επιτρέπουν τη λειτουργία του τρανζίστορ με χαμηλή τάση σε υδάτινα μέσα. Αντίστοιχα οι οργανικοί ημιαγωγοί που περιέχουν aliphatic πλευρικές ομάδες μεγάλου μήκους θα είναι λιγότερο ευαίσθητοι στο νερό εξαιτίας των υδρόφοβων επιφανειών τους. Οι OFET αισθητήρες αυτής της τεχνολογίας παρουσιάζουν σταθερότητα λειτουργίας σε υδάτινα μέσα και εξαιρετική ικανότητα ανίχνευσης.[3]

Αν και οι περισσότεροι αισθητήρες OFET χρησιμοποιούν κρυσταλλικά φιλμ οργανικών ημιαγωγών, τα OFETs που λειτουργούν με άμορφα ημιαγωγικά πολυμερή μπορούν να ανιχνεύσουν το NO₂. Περισσότερο η τάση κατωφλίου παρά η κινητικότητα των φορτίων, παρουσιάζει ισχυρότερη αισθητήρια απόκριση η οποία αποδίδεται στην απουσία ορίων των κόκκων. Πρόσφατη αναφορά στην παραγωγή οργανικών πολυμερών αισθητήρων με πολυμερή ημιαγωγό και ηλεκτρόδια από χρυσό, έδειξε ότι κατασκευάζονται ταυτόχρονα με χρήση λιθογραφικών τεχνικών οι οποίες συνδυάζουν νανομεταφερόμενη εκτύπωση και αδιάλυτο πολυμερισμό εντός των καναλιών.[3]

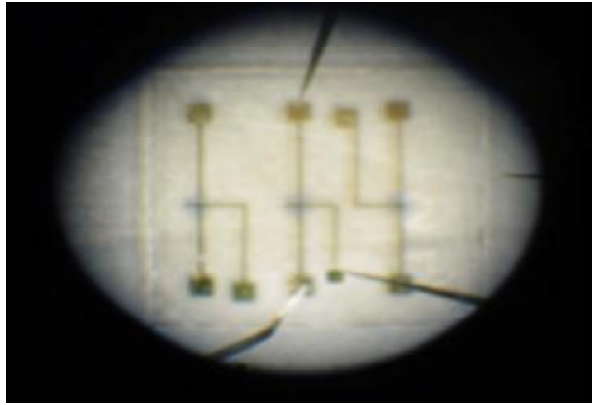
Το μέγεθος των αισθητήρων OFET παίζει σημαντικό ρόλο στη χημική ανίχνευση ατμών. Υπάρχουν αναφορές που καταδεικνύουν κλιμακωτή συμπεριφορά στην αισθητήρια απόκριση. Όταν η διάσταση των αισθητήρων OFETs μειώνεται σε επίπεδο νανοκλίμακας, τότε ο αισθητήρας παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά από τις συσκευές υψηλής κλίμακας. Αισθητήρες OFET με μεγάλο μήκος καναλιού παρουσίασαν μείωση του ρεύματος I_{sd} μεταξύ πηγής και απαγωγού μετά από έκθεση σε ατμούς. Αντίστοιχα παρατηρήθηκε αύξηση του ρεύματος I_{sd} σε συσκευές με μήκος καναλιού μικρότερο από 150 nm.[3]

Οι αισθητήρες OFET οι οποίοι βασίζονται σε OECTs έχουν μελετηθεί ευρέως ως βιολογικοί αισθητήρες. Για τους αισθητήρες OECT ένα ηλεκτρολυτικό επίπεδο στη θέση του μονωτικού επιπέδου που υπάρχει συνήθως στα OFETs, εισάγεται μεταξύ του στρώματος του οργανικού ημιαγωγού και του ηλεκτροδίου της πύλης. Το ρεύμα I_{sd} μεταξύ πηγής και απαγωγού διαμορφώνεται από το ηλεκτροχημικό ντοπάρισμα ή ξεντοπάρισμα του ημιαγωγού από ιόντα του ηλεκτρολυτικού στρώματος. Μία μικρή μεταβολή στη συγκέντρωση των ιόντων μπορεί να προκαλέσει μία μεγάλη μεταβολή του ρεύματος I_{sd} . [3]

3.5 Υλικά και τρόποι κατασκευής

Όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενα εδάφια για την κατασκευή των OFET είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν μοριακά υλικά ως ενεργά στοιχεία των μικροηλεκτρονικών συσκευών. Βασικό κριτήριο στην επιλογή των κατάλληλων υλικών είναι η ικανότητα που παρουσιάζουν στο σχηματισμό ενός ενεργού καναλιού. Για αυτό το λόγο θεωρείται επιβεβλημένη η χρήση υποστρωμάτων πυριτίου στα MISFET. Έτσι γίνεται χρήση ισχυρά ντοπαρισμένων δισκίων πυριτίου n^{++} στην επαφή της πύλης με το διηλεκτρικό διοξείδιο του πυριτίου πάνω στο οποίο εναποθέτονται ηλεκτρόδια από χρυσό. Ο χρυσός παρουσιάζει συμπεριφορά ωμικής επαφής με τα οργανικά στοιχεία. Μία άλλη λύση είναι η χρήση υποστρωμάτων που έχουν ως βάση το πολυαιθυλένιο. Για τη δημιουργία των ηλεκτροδίων πηγής και απαγωγού χρησιμοποιούνται λιθογραφικές μέθοδοι. [2]

Τα OFETs μπορούν να παραχθούν σε μια ποικιλία από διάφορες γεωμετρίες ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε συσκευής. Στο Σχήμα 3.40 που ακολουθεί στην επόμενη σελίδα παρουσιάζουμε σε φωτογραφία ένα ολοκληρωμένο OFET.



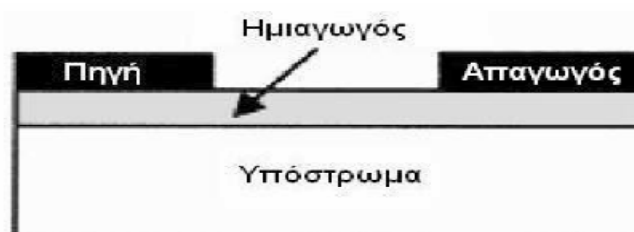
Σχήμα 3.40 - Ολοκληρωμένο OFET [6]

3.5.1 Υποστρώματα και ηλεκτρόδια

Για την επιλογή του κατάλληλου υποστρώματος επηρεαζόμαστε από το πάχος του διηλεκτρικού, από την ομοιομορφία και το πάχος του φιλμ και από τον τρόπο κρυστάλλωσης του στοιχείου. Οι βασικοί τύποι ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται είναι δύο. Ο πρώτος τύπος προϋποθέτει εναπόθεση στο μονωτή (Σχήμα 3.41) και ο δεύτερος εναπόθεση στο ενεργό κανάλι (Σχήμα 3.42).



Σχήμα 3.41 - Εναπόθεση στο μονωτή [2]

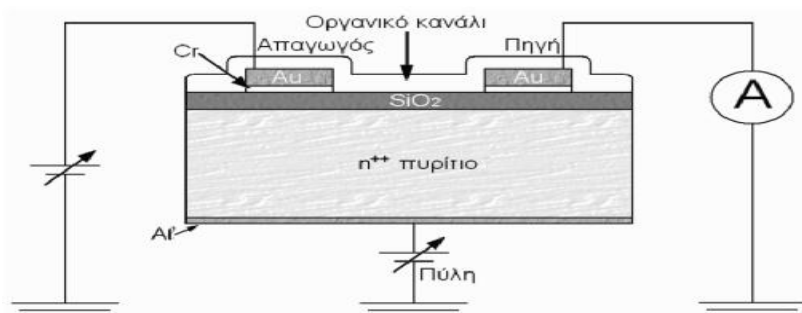


Σχήμα 3.42 - Εναπόθεση στο ενεργό κανάλι [2]

Πριν χρησιμοποιήσουμε το κάθε υπόστρωμα πραγματοποιούμε εκτεταμένο έλεγχο ώστε να βρούμε αν υπάρχει κάποια διαρροή. Για το σκοπό αυτό εφαρμόζουμε στην πύλη δυναμικό 50 Volts και μετράμε είτε το ρεύμα I_{sd} μεταξύ πηγής και απαγωγού, είτε το ρεύμα I_{sg} μεταξύ πηγής και πύλης.[2]

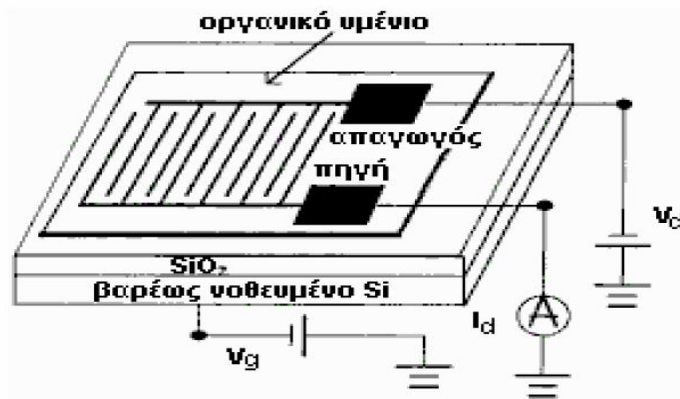
3.5.2 Εναπόθεση στο μονωτή

Ο σχηματισμός ενός ενεργού καναλιού είναι το κυρίαρχο ζήτημα. Για αυτό το λόγο η επιλογή των υλικών γίνεται με κυρίαρχο κριτήριο τη συμβατότητα τους στο σχηματισμό ενεργών καναλιών. Το πιο συνηθισμένο υλικό για την κατασκευή υποστρωμάτων είναι το πυρίτιο. Συνήθως χρησιμοποιούμε στην επαφή πύλης ισχυρά νοθευμένα δισκία πυριτίου n^{++} όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.43. Ακριβώς πάνω από το n^{++} παρατηρούμε ότι υπάρχει λεπτό μονωτικό στρώμα διοξειδίου του πυριτίου SiO_2 με πάχος από 40 έως 100 nm, πάνω στο οποίο υπάρχει μικρή ποσότητα χρωμίου Cr. Τα ηλεκτρόδια είναι κατασκευασμένα από χρυσό Au πάχους 80 nm και συμπεριφέρονται ως ωμικές επαφές. Τόσο η επαφή της πηγής όσο και η επαφή του απαγωγού κατασκευάζονται με λιθογραφικές τεχνικές.



Σχήμα 3.43 – Επαφή πύλης με ισχυρά νοθευμένα δισκία πυριτίου [2]

Οι επαφές σχηματίζονται με αλληλεπικαλυπτόμενα ηλεκτρόδια (Σχήμα 3.44). Έτσι σχηματίζεται η συσκευή η οποία έχει πολύ μικρή επιφάνεια. Με αυτό τον τρόπο εξαλείφονται οι ατέλειες στο SiO_2 μεγαλώνει ο λόγος $\frac{L}{W}$ του μήκους προς το πλάτος του καναλιού. Το κενό μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι 2μm, 5μm, 10μm και 30μm. Στο τέλος της διαδικασίας εναποθέτουμε το οργανικό κανάλι.[2]



Σχήμα 3.44 - Σχηματισμός επαφής με αλληλεπικαλυπτόμενα ηλεκτρόδια [2]

3.5.3 Εναπόθεση στο ενεργό κανάλι

Σε ορισμένες περιπτώσεις οι διατάξεις με ηλεκτρόδια πάνω στο μονωτή δε παρουσιάζουν την προσδοκώμενη απόδοση. Αυτό μπορεί για παράδειγμα να συμβεί επειδή δημιουργούνται ασυνέχειες στο κρυσταλλικό φιλμ με αποτέλεσμα οι συσκευές να διαρρέονται από ρεύμα με τιμή στα όρια του θορύβου. Έτσι οι επιστήμονες μπήκαν στη λογικά να αναζητήσουν μία εναλλακτική λύση και κατέληξαν σε διατάξεις με ηλεκτρόδια πάνω στο ενεργό κανάλι. Αυτές οι δομές χρησιμοποιούν διάφορα είδη υποστρωμάτων είτε από γυαλί είτε από πλαστικό. Επίσης χρησιμοποιούνται υποστρώματα από πυρίτιο Si σε συνδυασμό με σε συνδυασμό με μονωτικό υλικό από SiO₂. Τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται συνήθως από χρυσό Au, από λευκόχρυσο Pt ή από Αργίλιο Al. Τέλος είναι πιθανό να χρησιμοποιηθούν ενώσεις που προκαλούν μεταβολές στην υδροφιλία της επιφάνειας.[2]

3.6 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

Λόγοι για τους οποίους τα νέα σύγχρονα και εξελίξιμα OFET θα μπορούσαν να προτιμηθούν ως στοιχεία ηλεκτρονικών διατάξεων αντί των ήδη γνωστών μας FET από πυρίτιο Si ή γερμάνιο Ge.

1. Τα OFET παρουσιάζουν καλύτερες επιδόσεις και μεγαλύτερη ευρύτητα εφαρμογών σε σύγκριση με τα απλά FET.

2. Τα OFET είναι εφικτό να κατασκευαστούν σε πιο χαμηλές θερμοκρασίες από ότι τα απλά FET και παρουσιάζουν μεγαλύτερη επιδεκτικότητα σε τροποποιήσεις και περεταίρω επεξεργασία.
3. Παρουσιάζουν ικανοποιητική συμβατότητα και λειτουργία σε συνδυασμό με πλαστικές ενώσεις.
4. Μπορούν να κατασκευαστούν με τεχνικές εναπόθεσης, είναι πιο αναλώσιμα από τα OFET και εφόσον είναι επιθυμητό μπορούν να αντικατασταθούν πιο εύκολα.
5. Κατασκευάζονται από οργανικά υλικά τα οποία κατά κανόνα κοστίζουν λιγότερο.[5]

Εκτός όμως από τα πλεονεκτήματα τα OFETs παρουσιάζουν και λίγα μειονεκτήματα.

1. Οι επιδόσεις τους μειώνονται αισθητά σε συνθήκες αυξημένης υγρασίας.
2. Δε μπορούν να λειτουργήσουν στην περιοχή αντίστροφης λειτουργίας.
3. Οι διατάξεις με OFETs παρουσιάζουν μικρότερη διάρκεια ζωής σε σύγκριση με αυτές που περιλαμβάνουν απλά FET.[1]

Κεφάλαιο 4^ο - Οργανικές Φωτοδίοδοι (OLED)

4.1 Εισαγωγή

Τα Οργανικά LEDs (Organic Light Emitting Diodes - OLEDs) είναι διατάξεις οι οποίες εκπέμπουν φως. Χρησιμοποιούνται σε μία πλειάδα εφαρμογών της καθημερινότητας μας καταναλώνοντας πολύ μικρά ποσά ενέργειας. Πρόκειται για ηλεκτρονικές πηγές φωτός πολύ μικρών διαστάσεων οι οποίες κατασκευάζονται ως επί το πλείστον από οργανικούς ημιαγωγούς. Όταν ένας οργανικός ημιαγωγός αμελητέου πάχους, τοποθετηθεί σε μία απλή δίοδο LED σαν ένα πολύ λεπτό και ευέλικτο φιλμ, τότε σχηματίζεται μία δίοδος OLED. Αν εφαρμόσουμε ηλεκτρικό πεδίο σε ένα οργανικό ημιαγωγό, τότε αυτός θα αρχίσει να εκπέμπει φως. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως ηλεκτροφωταύγεια (electroluminescence) και είναι αυτό στο οποίο στηρίζεται κυρίως η εκπομπή φωτός από τα οργανικά LED. Η ιδέα να χρησιμοποιηθούν τα Οργανικά LED ως νέες πηγές φωτός προήλθε από Γερμανούς ερευνητές οι οποίοι εκτίμησαν δέοντος τις ενεργειακές τους ικανότητες. Με την πάροδο των ετών υπήρξαν διάφορες εξελίξεις προς αυτή την κατεύθυνση. Ακόμα και στις μέρες μας τα Οργανικά Led παρουσιάζουν τεράστιο ερευνητικό ενδιαφέρον ανά την υφήλιο.

4.2 Δομή των OLEDs

Οι διατάξεις των Οργανικών LED κατασκευάζονται πάνω σε ένα υπόστρωμα το οποίο μπορεί να είναι μεταλλικό, πλαστικό, γυάλινο ή από κεραμικό υλικό. Το υπόστρωμα έχει ως κύρια αρμοδιότητα την παροχή μηχανικής υποστήριξης. Η συνολική δομή μοιάζει με μία στοίβα πολλαπλών επιπέδων. Τα διάφορα επίπεδα της στοίβας είναι από οργανικό υλικό και βρίσκονται ανάμεσα σε δύο μεγάλες πλάκες. Οι δύο αυτές πλάκες είναι το ηλεκτρόδιο της ανόδου και το ηλεκτρόδιο της καθόδου. Όταν εφαρμόσουμε στα άκρα της ανόδου κατάλληλη τάση, τότε αυτή είτε προκαλεί την αφαίρεση ηλεκτρονίων από το πεδίο αγωγής είτε την έγχυση οπών σε αυτό. Η κάθοδος είναι επιφορτισμένη να προκαλεί την έγχυση ηλεκτρονίων στο πεδίο εκπομπής. Το

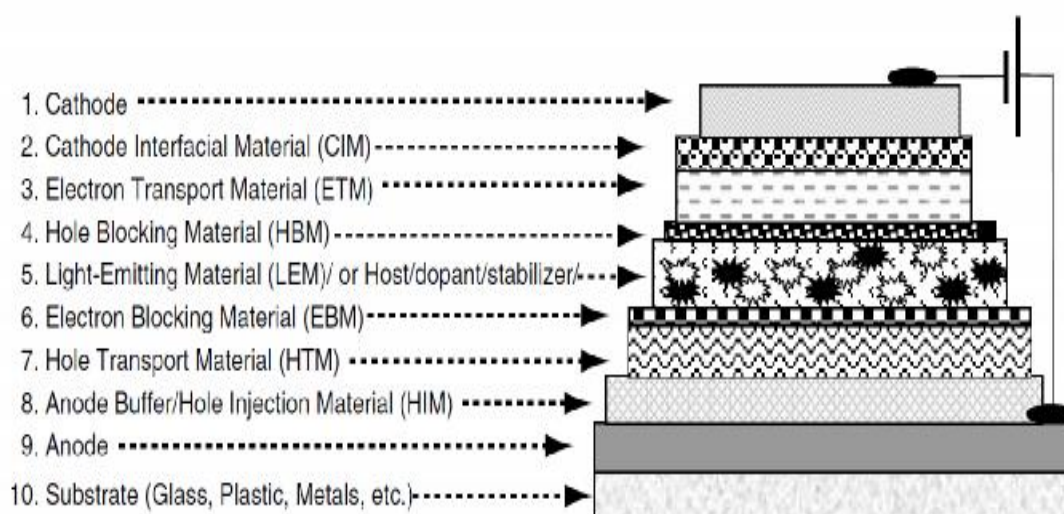
αρνητικό ηλεκτρόδιο συνήθως είναι από μέταλλο. Το πάχος του είναι 100 nm περίπου. Το θετικό κατασκευάζεται συνήθως από διαφανές υλικό όπως είναι το οξείδιο του Ίνδιου και του Κασσίτερου (ITO), ώστε να είναι εφικτό να το διαπερνά το φως. Το υλικό του θετικού ηλεκτροδίου είναι απαραίτητο να είναι διαφανές ώστε να είμαστε σίγουροι ότι δεν πρόκειται να απορροφηθεί από το υλικό μέρος τις εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Το πάχος του είναι περίπου 1000 nm.[7]

Επειδή το φως αποτελεί αναμφίβολα μορφή ενέργειας, καταλαβαίνουμε ότι για να εκπέμψει φως ένα μόριο θα πρέπει πρώτα να έχει απορροφήσει ενέργεια από κάποια πηγή. Ένα ηλεκτρόνιο το οποίο βρίσκεται στο εσωτερικό ενός μορίου είναι πολύ πιθανό να απορροφήσει ποσό ενέργειας τέτοιο που να το κάνει να μεταβεί σε μία διεγερμένη κατάσταση. Εφόσον το ηλεκτρόνιο βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση μπορεί να αποδιεγερθεί με μία πλειάδα μηχανισμών ένας εκ των οποίων προκαλεί και την εκπομπή φωτός.[7]

Τα στρώματα ενός OLED που βρίσκονται μεταξύ του ηλεκτροδίου της ανόδου και του ηλεκτροδίου της καθόδου συνήθως είναι:

- Το στρώμα έγχυσης οπών (Hole Injection Layer - HIL).
- Το στρώμα μεταφοράς οπών (Hole Transport Layer - HTL).
- Το στρώμα μπλοκαρίσματος ηλεκτρονίων (Electron Blocking Layer).
- Το στρώμα εκπομπής φωτός (Light Emitting Layer).
- Το στρώμα μπλοκαρίσματος οπών (Hole Blocking Layer).
- Το στρώμα μεταφοράς ηλεκτρονίων (Electron Transport Layer - ETL).
- Το στρώμα καθοδικής διεπιφάνειας (Cathode Interfacial Layer).

Η δομή ενός τυπικού Οργανικού LED απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1 που ακολουθεί:



Σχήμα 4.1 - Τυπική δομή ενός OLED [1]

Η δομή ενός τυπικού Οργανικού LED μπορεί να περιέχει ποικιλία στρωμάτων, όποτε δεν είναι απαραίτητο ότι θα βρούμε όλα τα παραπάνω στρώματα σε όλες τις αρχιτεκτονικές δομές των OLEDs που θα συναντήσουμε. Ένα μεγάλο μέρος των ερευνητικών δραστηριοτήτων που αφορούν τα OLEDs εστιάζει στην ανίχνευση των απλούστερων αρχιτεκτονικών δομών οι οποίες να μπορούν να προσφέρουν το βέλτιστο των δυνατοτήτων απόδοσης της συσκευής.[1]

4.3 Μηχανισμός Λειτουργίας των OLEDs

Ο μηχανισμός παραγωγής φωτός από ένα OLED μπορεί να συνοψιστεί στα παρακάτω τρία στάδια:

- Έγχυση ηλεκτρονίων και οπών από την κάθοδο και την άνοδο.

Όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ του ηλεκτροδίου της ανόδου και του ηλεκτροδίου της καθόδου, έχουμε έγχυση ηλεκτρονίων και οπών από την κάθοδο και από την άνοδο αντίστοιχα, προς τα οργανικά στρώματα. Με ένα επιλεγμένο ενεργειακό φράγμα μεταξύ του επιπέδου έγχυσης ηλεκτρονίων και

του επιπέδου έγχυσης οπών και μεταξύ της ανόδου και της καθόδου, τα ηλεκτρόνια και οι οπές εγχέονται αποτελεσματικά προς τα στρώματα ETL και HTL.

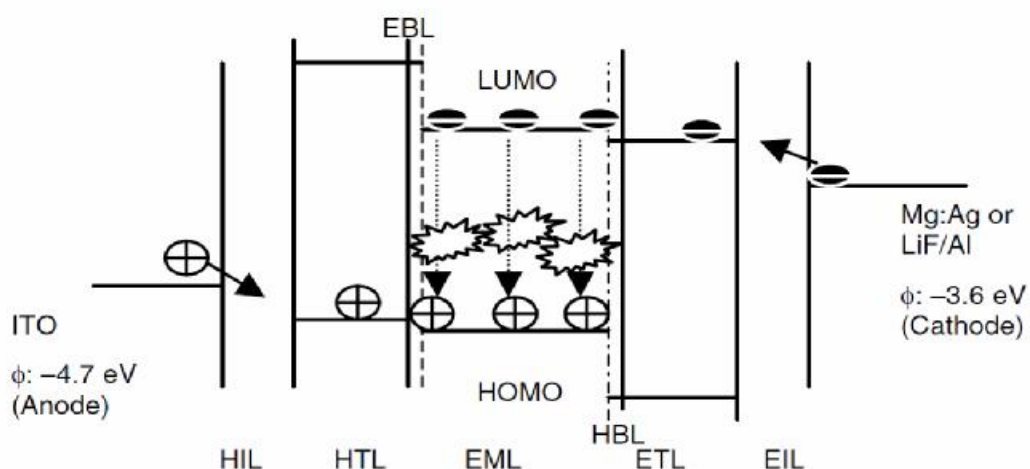
- Μετανάστευση ηλεκτρονίων και οπών μέσω των στρωμάτων μεταφοράς ηλεκτρονίων (ETL) και μεταφοράς οπών (HTL).

Μόλις αρχίσει η έγχυση των ηλεκτρονίων και των οπών, μεταναστεύουν στα στρώματα ETL και HTL σχηματίζοντας διεγερμένες καταστάσεις. Αυτές οι διεγερμένες καταστάσεις δημιουργούν ένα μηχανισμό φόρτισης μέσω των υλικών μεταφοράς ηλεκτρονίων και οπών (ETM και HTM), τα οποία διαθέτουν συνήθως καλές ιδιότητες ευκινησίας φορτίων, καταλήγοντας τελικά στο στρώμα EML.[1]

- Επανασύνδεση φορέων.

Τα φορτία συναντιόνται στο οργανικό EML και η συσκευή βελτιστοποιεί τη λειτουργία της, αφού προσαρμόζεται στον αριθμό των ηλεκτρονίων και των οπών που προέρχονται από το EBL και το HBL αντίστοιχα. Όταν επανασυνδεθούν τα αντίθετα φορτία σχηματίζεται ένα εξιτόνιο και ανάλογα με τη φύση των υλικών εκπομπής σε συνδυασμό με κατάλληλους κανόνες επιλογής εκπέμπεται ακτινοβολία.[1]

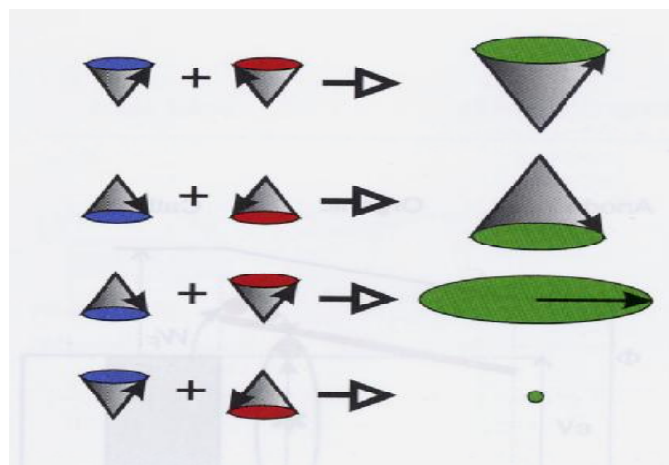
Τα στάδια λειτουργίας των OLEDs που περιγράψαμε παραπάνω απεικονίζονται στο Σχήμα 4.2 που ακολουθεί:



Σχήμα 4.2 - Στάδια λειτουργίας των OLEDs [1]

Τα εξιτόνια που σχηματίζονται είναι πιθανό να είναι δύο ειδών. Το πρώτο είδος σχηματιζόμενων εξιτονίων είναι τα singlet εξιτόνια και το δεύτερο τα triplet εξιτόνια. Για κάθε τέσσερα ζευγάρια οπών ηλεκτρονίων που εισέρχονται στην περιοχή όπου σχηματίζονται τα εξιτόνια στο εσωτερικό των OLEDs, παράγεται ένα singlet και ένα triplet εξιτόνιο. Τα singlet εξιτόνια έχουν αντισυμμετρικά spin, ενώ τα triplet συμμετρικά. Πρέπει να τονίσουμε επίσης ότι η αποδιέγερση των singlet εξιτονίων είναι ταχύτερη και έχει υψηλή απόδοση (Φθορισμός), σε αντίθεση με την αποδιέγερση των triplet εξιτονίων η οποία είναι βραδύτερη και χαμηλότερης απόδοσης (Φωσφορισμός).[7]

Στο Σχήμα 4.3 που ακολουθεί παρουσιάζουμε τη διαδικασία σχηματισμού ενός singlet εξιτονίου και τριών triplet εξιτονίων (πράσινο χρώμα) με διαφορετική πολικότητα περιστροφής. Τα ηλεκτρόνια συμβολίζονται με κόκκινο χρώμα και οι οπές με μπλε.



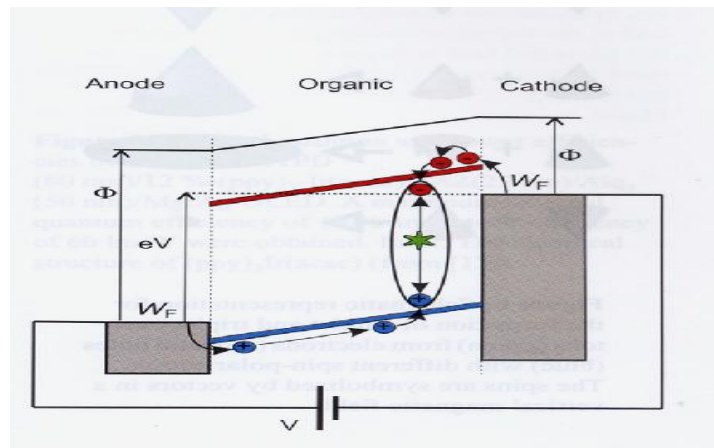
Σχήμα 4.3 – Βήματα σχηματισμού ενός singlet εξιτονίου και τριών triplet εξιτονίων [7]

Για τη βελτιστοποίηση της λειτουργικής απόδοσης των OLEDs πρέπει να πληρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- Πρέπει να υπάρχει ισορροπία κατά τη μεταφορά τόσο των οπών όσο και των ηλεκτρονίων. Η ισορροπία φορτίων είναι δύσκολο να επιτευχθεί σε Οργανικά LED με ένα μόνο στρώμα.
- Οι ρυθμοί μεταφοράς πρέπει να είναι ιδιαίτερα υψηλοί και οι διαφορές δυναμικού πολύ χαμηλές.

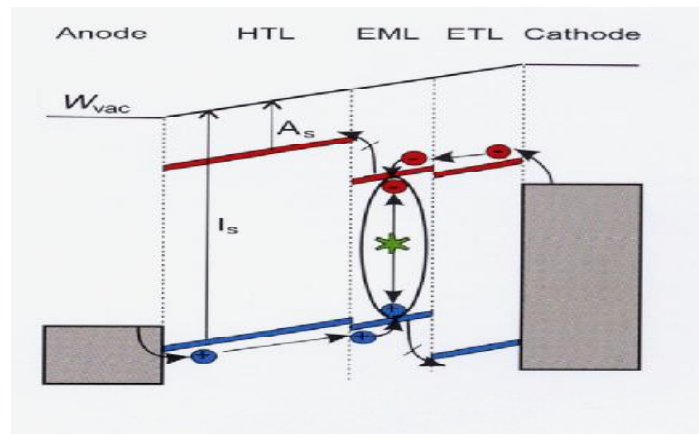
- Η απόδοση σχηματισμού εξιτονίων πρέπει να είναι ιδιαίτερα υψηλή.
- Η αποσύνθεση των εξιτονίων και η συνεπαγόμενη εκπομπή ακτινοβολίας πρέπει έχουν πολύ υψηλά επίπεδα απόδοσης.[7]

Στο Σχήμα 4.4 που ακολουθεί παρουσιάζουμε το ενεργειακό διάγραμμα ενός OLED μονής διαστρωμάτωσης στο οποίο εξωτερικά, εφαρμόζεται τάση V .



Σχήμα 4.4 - Ενεργειακό διάγραμμα OLED μονής διαστρωμάτωσης [7]

Στο Σχήμα 4.5 που έπεται απεικονίζεται το ενεργειακό διάγραμμα ενός OLED διπλής διαστρωμάτωσης στο οποίο εφαρμόζεται εξωτερική τάση V .



Σχήμα 4.5 - Ενεργειακό διάγραμμα OLED διπλής διαστρωμάτωσης [7]

Τα ενδιάμεσα στρώματα συνεισφέρουν στην αύξηση της απόδοσης των OLEDs διότι βοηθούν να ταιριάξουν όσο το δυνατό καλύτερα τα ενεργειακά διαγράμματα.[7]

4.4 Υλικά Ανόδου και Καθόδου

Στα εδάφια που ακολουθούν θα κάνουμε εκτενή αναφορά σε όλα τα υλικά που είναι κατάλληλα και μπορούν χρησιμοποιηθούν στα στρώματα ανόδου και καθόδου των OLEDs που έχουμε ήδη αναφέρει. Ο στόχος των ερευνητών είναι ο όσο το δυνατόν αποδοτικότερος χειρισμός των κατάλληλων υλικών στις νεότερες, περίπλοκες και κομψές, αρχιτεκτονικές των σύγχρονων OLEDs. Η διαδικασία περιλαμβάνει την προσθήκη νέων υλικών και νέων στρωμάτων με καινούργιους τρόπους λειτουργίας. Επειδή το συγκεκριμένο πεδίο της επιστήμης είναι ραγδαία εξελισσόμενο οι αναθεωρήσεις και οι αναδημοσιεύσεις ερευνών είναι σύνηθες φαινόμενο.

4.4.1 Υλικά Ανόδου

Το υλικό της ανόδου είναι και το πιο χαρακτηριστικό και συνήθως είναι διαφανής επικάλυψη από οξειδίο του Ίνδιου και του Κασσίτερου (ITO) σε γυάλινο ή πλαστικό υπόστρωμα. Οι γενικότερες προϋποθέσεις που πρέπει να καλύπτουν τα υλικά ώστε να είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της ανόδου:

- Πρέπει να έχουν πολύ υψηλή αγωγιμότητα ώστε να παρουσιάζεται μείωση στην αντίσταση επαφής.
- Θα πρέπει να έχουν υψηλό έργο εξαγωγής ($>4,1\text{eV}$) ώστε να διευκολύνεται αποδοτικά η έγχυση οπών.
- Τα κατάλληλα οργανικά υλικά θα πρέπει να είναι ικανά να σχηματίσουν λεπτά ομοιογενή φιλμ με ικανοποιητικές ως προς την υγρασία ιδιότητες ώστε να εξασφαλίζεται η καλή επικοινωνία με τα παρακείμενα οργανικά στρώματα.
- Είναι απαραίτητο να εμφανίζουν σταθερότητα τόσο σε θερμικό όσο και σε χημικό επίπεδο.
- Αν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε OLEDs υψηλής εκπομπής πρέπει να παρουσιάζουν διαφάνεια ή πολύ υψηλή ανακλαστικότητα.

Σαφέστατα σε κάθε συσκευή εκπομπής φωτός το φως πρέπει να εξάγεται από τη συσκευή. Στα OLED το παράθυρο μέσω του οποίου συμβαίνει αυτό δημιουργείται από το υλικό της ανόδου ITO. Το ITO είναι ένας εκφυλισμένος ημιαγωγός τύπου-n με ιδιαίτερα υψηλή αγωγιμότητα. Είναι διαφανές στο ορατό φάσμα λόγω του μεγάλου χάσματος που παρουσιάζει στην ενεργειακή του ζώνη για ποσά ενέργειας άνω των 4 eV. Υπάρχουν και άλλα διαφανή και αγωγιμα υλικά ηλεκτροδίων όπως για παράδειγμα το Οξειδίο του Κασσιτέρου ντοπαρισμένο με Φθόριο (FTO) και το Οξειδίο του Ψευδαργύρου ντοπαρισμένο με Αλουμίνιο (AZO). Όμως η άμεση διαθεσιμότητα στο εμπόριο γυάλινων υποστρωμάτων τα οποία είναι προ-διαμορφωμένα και προ-επικαλυμμένα με ITO όπως απαιτείται, καθιστούν το ITO ως το συνηθέστερο υλικό επιλογής.

Αν και το ITO έχει πολλές από τις επιθυμητές ιδιότητες, πρέπει να αναγνωρίσουμε ότι έχει και μερικές αδυναμίες. Πιο συγκεκριμένα το ITO παρουσιάζει σχετικά υψηλή αντίσταση (περίπου $2 \cdot 10^{-4} \Omega \text{ cm}$), μέτρια τραχύτητα επιφάνειας (περίπου 2nm), έχει χημικά αντιδραστική επιφάνεια η οποία μπορεί να προκαλέσει μετανάστευση ιόντων στο εσωτερικό της συσκευής). Επίσης το ITO εμφανίζει χαμηλό, ευμετάβλητο έργο εξαγωγής (4,5 – 4,8 eV) που μπορεί σε συνδυασμό με κάποια υλικά να προκαλέσει δυσκολίες όσον αφορά την έγχυση οπών. Η τιμή του έργου εξαγωγής του ITO επηρεάζεται ιδιαίτερα από τις διαδικασίες καθαρισμού στις οποίες υποβάλλεται η συσκευή κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής της. Οι τεχνικές εναπόθεσης που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή λεπτών υμενίων από ITO με πάχος γύρω στα 100 nm απαιτούν συνήθως ψεκασμό κάνοντας χρήση ενός παλμικού λέιζερ. Σε πολλές περιπτώσεις η εναπόθεση πρέπει να συνδυάζεται με απόπτωση του φιλμ σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες (>200°C), ώστε να μειώνεται η αντίσταση σε αποδεκτά επίπεδα. Οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες απόπτωσης δε συνιστανται για πλαστικά υποστρώματα διότι οδηγούν σε υπέρμετρα φτωχές τιμές αντιστάσεων. Έχουν γίνει εκτεταμένες προσπάθειες ώστε να βρεθούν προσεγγιστικοί τρόποι για την κατασκευή ανόδων από ITO, αλλά δυστυχώς και πάλι απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες απόπτωσης για τη μείωση της αντίστασης. Η φτωχή αγωγιμότητα του ITO είναι ένα συνηθισμένο φαινόμενο

και περιορίζει το μέγεθος της παθητικής μήτρας στις οθόνες που χρησιμοποιούν OLED. Παρ όλα αυτά έχουν αναπτυχθεί πρόσφατα νέες τεχνικές για την εναπόθεση ITO σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και την παραγωγή λεπτών υμενίων από ITO σε πλαστικά υποστρώματα όπως το PET και το PEN.

Άλλα υλικά όπως είναι ο χρυσός (έργο εξαγωγής 4,9 eV), το αλουμίνιο (έργο εξαγωγής 4,2 eV), Οξειδίο του Ψευδαργύρου ντοπαρισμένο με Ίνδιο, Οξειδίο Μαγνησίου Ίνδιου, Οξειδίο Νικελίου Βολφραμίου ή άλλα διαφανή αγώγιμα οξειδία μελετήθηκαν ως υλικά ανόδου των OLEDs. Επιπλέον πρέπει να αναφέρουμε ότι το έργο εξαγωγής του ITO είναι πιθανό να ποικίλλει ανάλογα με τις επιφανειακές διεργασίες που μπορεί να πραγματοποιηθούν, όπως για παράδειγμα με την εφαρμογή πολύ λεπτού στρώματος από Χρυσό (Au), Λευκόχρυσο (Pt), Παλλάδιο (Pd) ή Άνθρακα (C), όξυνες ή βασικές προσθήκες. Τα υλικά ανόδου εναποθέτονται συνήθως με εξάτμιση, επιμετάλλωση ή με χημικές μεθόδους εναπόθεσης ατμού. Κατά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί και άλλες μέθοδοι όπως η μεταξοτυπία, η επικόλληση με τη βοήθεια laser και η ηλεκτροχημική εναπόθεση.[1]

4.4.2 Υλικά Καθόδου

Οι περιορισμοί που συναντάμε κατά την επιλογή των υλικών καθόδου είναι πολύ λιγότεροι σε σχέση με τους περιορισμούς που συναντήσαμε κατά τη διαδικασία επιλογής των υλικών ανόδου επειδή το ηλεκτρόδιο καθόδου δεν είναι απαραίτητο να είναι διαφανές. Σε ορισμένες περιπτώσεις που απαιτούνται πλήρως διαφανή OLED (π.χ. απεικονίσεις heads-up), μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ITO ως υλικό καθόδου αφού πρώτα γίνουν οι κατάλληλες τροποποιήσεις. Σε γενικές γραμμές τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της καθόδου είναι καθαρά μέταλλα ή κράματα μετάλλων. Οι βασικότερες προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούν τα υλικά ώστε να είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της καθόδου είναι οι ακόλουθες:

- Τα κατάλληλα υλικά πρέπει σίγουρα να χαρακτηρίζονται από υψηλή αγωγιμότητα.
- Πρέπει να έχουν χαμηλό έργο εξαγωγής ώστε να διευκολύνουν την έγχυση ηλεκτρονίων.
- Είναι απαραίτητο να μπορούν να δώσουν ομογενή λεπτά φιλμ με ικανοποιητικές ως προς την υγρασία ιδιότητες ώστε να είναι εξασφαλισμένη η καλή επικοινωνία με τα παρακείμενα οργανικά στρώματα.
- Είναι πολύ σημαντικό να εμφανίζουν ικανοποιητική σταθερότητα.
- Πρέπει να χαρακτηρίζονται από υψηλή ανακλαστικότητα ή διαφάνεια αν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε OLEDs υψηλής εκπομπής.[1]

Συνήθως η κάθοδος είναι ένα μέταλλο ή κράμα με χαμηλό έργο εξαγωγής όπως το Μαγνήσιο (Mg), το Ασβέστιο (Ca), το Βάριο (Ba) και το Αργίλιο (Al). Είναι σαφές ότι το χαμηλότερο έργο εξαγωγής διευκολύνει την έγχυση ηλεκτρονίων προς τα χαμηλότερα κενά μοριακά τροχιακά (Lowest Unoccupied Molecular Orbital - LUMO) στο στρώμα του ETL. Ωστόσο χαμηλό έργο εξαγωγής συνεπάγεται υψηλή χημική δραστηριότητα και γι αυτό είναι πιθανό να επέλθουν προβλήματα με άμεση χημική αναγωγή των οργανικών υλικών τα οποία έρχονται σε επαφή με μέταλλα που έχουν τόσο χαμηλό έργο εξαγωγής. Αν και η παραγωγή τέτοιων δομών μπορεί να καταστεί επιζήμια για την απόδοση της συσκευής, υπάρχει πιθανότητα υπό ευνοϊκές περιπτώσεις να συνεισφέρουν πραγματικά στην έγχυση φορτίων. Ο οξειδωτικός χαρακτήρας των μετάλλων και των κραμάτων με χαμηλό έργο εξαγωγής μπορεί να οδηγήσει σε δυσκολίες, αφού οι παραγόμενες συσκευές μπορεί να αποδειχτούν πολύ ευαίσθητες στις προσμίξεις οξυγόνου και την υγρασία. Μία πολύ προσιτή λύση στο πρόβλημα του χαμηλού έργου εξαγωγής είναι η δημιουργία δύο καθοδικών στρωμάτων που αποτελούνται από ένα λεπτό στρώμα (πάχος < 5 nm) ατμών Φθοριδίου του Λιθίου (LiF) επάνω σε Αργίλιο (Al). Αυτή η μορφή καθόδου οφείλει την ανακάλυψη της στην εταιρία Kodak, η οποία έδειξε ότι αυτός ο συνδυασμός σε επαφή με αναγωγικά στοιχεία στο στρώμα ETL οδηγεί στη δημιουργία ανιόντων. Αυτό το επιλεκτικό ντοπάρισμα

στο ηλεκτρόδιο και στη διεπαφή του στρώματος ETL οδηγεί στη βελτίωση της έγχυσης φορτίων, η οποία μοιάζει σε αποτελεσματικότητα με την περίπτωση χρήσης μετάλλων με χαμηλό έργο εξαγωγής ως υλικά καθόδου. Η ίδια αρχή λειτουργίας χρησιμοποιείται και για τη δημιουργία άλλων υβριδικών συστημάτων καθόδου, αν και τα περισσότερα συστήματα χρησιμοποιούν συνήθως αλκαλικό μέταλλο, αλκαλικές γαίες ή άλατα σπάνιων γαιών ή οξειδία σε συνδυασμό με Αργίλιο.[1]

Συχνά η φύση των μετάλλων καθόδου απαιτεί οι συσκευές OLED να έχουν υψηλή απόδοση στεγανότητας και σε πολλές περιπτώσεις η αδυναμία που παρουσιάζει η συσκευή εξαιτίας ανεπαρκούς στεγανοποίησης εμφανίζεται με τη μορφή μαύρων κουκίδων στη συσκευή ως αντίκτυπο της επίδρασης του αέρα και της υγρασίας στο μέταλλο καθόδου. Μία καλή λύση για την επίλυση αυτού του προβλήματος να ενσωματωθεί στο εσωτερικό της συσκευής κατάλληλο προστατευτικό υλικό ικανό να εμποδίσει τη διάβρωση της καθόδου από την υγρασία και το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα. Τα πιο δημοφιλή υλικά καθόδου είναι:

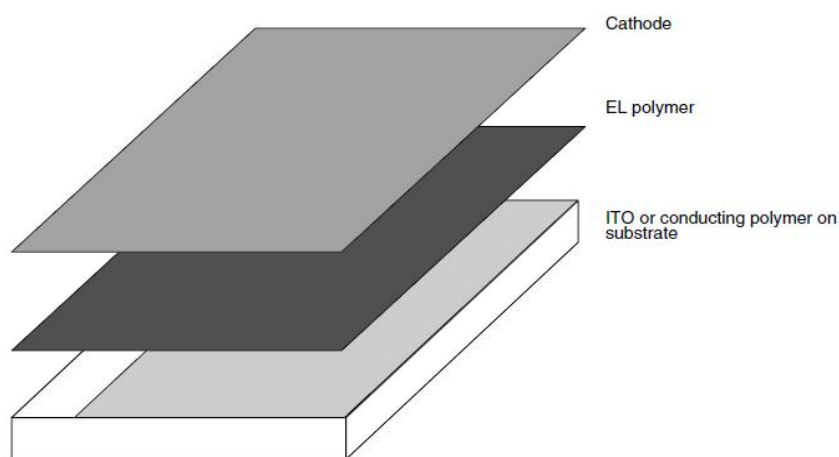
- Το Αργίλιο (Al) με έργο εξαγωγής 4,2 eV.
- Το Φθορίδιο του Λιθίου (LiF) σε συνδυασμό με Αργίλιο (Al) με έργο εξαγωγής 3,6 και 3,8 eV αντίστοιχα.
- Το Ασβέστιο (Ca) σε συνδυασμό με Αργίλιο (Al) με έργο εξαγωγής 3,8 eV. Όταν το Ασβέστιο συνοδεύεται με Αργίλιο αυξάνει και ο χρόνος ζωής της συσκευής.
- Το Μαγνήσιο (Mg) σε συνδυασμό με Άργυρο (Ag) με έργο εξαγωγής 2,9 eV.
- Το Βάριο (Ba) σε συνδυασμό με Αργίλιο (Al) με έργο εξαγωγής 2,60 eV.

Ακόμα πιο χαμηλό έργο εξαγωγής μπορούμε να επιτύχουμε με καθοδικό υλικό το Υπέρβιο (Yb) το οποίο έχει έργο εξαγωγής 2,4 eV, το οποίο όμως έχει εξαιρετικά χαμηλό δείκτη ανακλαστικότητας πράγμα το οποίο το καθιστά λιγότερο κατάλληλο για τις διάφορες εφαρμογές των OLED. Είναι

αξιοσημείωτο ότι το έργο εξαγωγής των μετάλλων μπορεί να επηρεαστεί από την καθαρότητα τους, τις μεθόδους εναπόθεσης, τη δομή της επιφάνειάς τους και τον προσανατολισμό των κρυστάλλων τους. Περαιτέρω έρευνες σχετικές με τα κατάλληλα υλικά καθόδου επικεντρώνονται στη μείωση της υψηλής χημικής δραστηριότητας μετάλλων με χαμηλό έργο εξαγωγής, στην αύξηση της χημικής σταθερότητας και στη βελτίωση του συντελεστή επιδεκτικότητας σε συγκόλληση των υλικών των παρεμβαλλόμενων στρωμάτων.[1]

4.5 Πολυμερισμένα LEDs (Polymer LEDs - PLEDs)

Τα Πολυμερισμένα LEDs (Polymer Light Emitting Diodes – PLEDs) έχουν ως κεντρικό στοιχείο στη δομή τους ένα αγώγιμο πολυμερές, το οποίο εκπέμπει φως όταν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Το λεπτό στρώμα του αγώγιμου πολυμερούς βρίσκεται ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια επαφής όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6 που ακολουθεί:



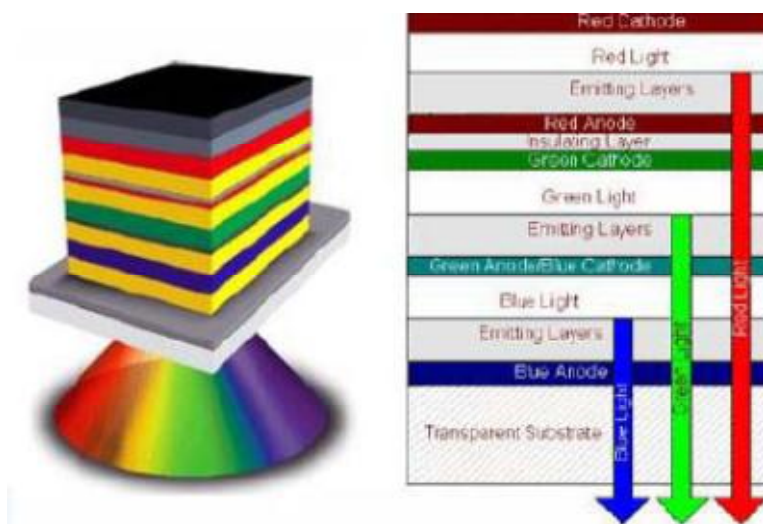
Σχήμα 4.6 - Δομή PLED [1]

Η συσκευή κατασκευάζεται πάνω σε ένα γυάλινο υπόστρωμα ή πάνω σε λεπτό πλαστικό φιλμ με διαφανή ηλεκτρόδια (π.χ. από ITO). Ένα λεπτό αγώγιμο φιλμ με ικανότητα εκπομπής φωτός έχει πάχος συνήθως από 50 έως 200 nm. Η δομή της συσκευής συμπληρώνεται με την εναπόθεση μετάλλου με χαμηλό έργο εξαγωγής (π.χ. Ασβέστιο - Ca) ως ηλεκτρόδιο καθόδου. Στις χρωματικές απεικονίσεις πλήρους φάσματος τα αγώγιμα πολυμερή

χρησιμοποιούνται σε λεπτά φιλμ και δε χρειάζονται μεγάλα ποσά ενέργειας ώστε να εκπέμπουν. Επίσης είναι εφικτή η εναπόθεση υλικών στο υπόστρωμα με τεχνική απλού Inkjet χωρίς να είναι απαραίτητη η ύπαρξη συνθηκών κενού αέρος. Το υπόστρωμα μπορεί να είναι από εύκαμπτο υλικό όπως το PET, γι αυτό και τα PLED είναι ικανά να δίνουν εύκαμπτες απεικονίσεις χωρίς μεγάλο κόστος. Τα πολυμερή που χρησιμοποιούνται συνήθως στις δομές των PLEDs είναι παράγωγα της poly-fluorine και της poly-vinylene και παρέχουν τη δυνατότητα καθαρισμού του παραγόμενου φωτός ανάλογα με τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται ως αντικαταστάτες στις πλευρικές αλυσίδες των πολυμερών αυτών.[1], [7]

4.6 Στοιβαγμένα OLEDs (Stacked OLEDs - SOLEDs)

Τα Στοιβαγμένα OLEDs (Stacked Organic Light Emitting Diodes - SOLEDs) έχουν δομή η οποία στηρίζεται στην κατακόρυφη τοποθέτηση πολλών μονοχρωματικών οργανικών φωτοδιόδων. Οι φωτοδιόδοι τοποθετούνται η μία πάνω στην άλλη σε μορφή που μοιάζει με στοίβα και χαρακτηρίζονται από διαφάνεια. Στο Σχήμα 4.7 που ακολουθεί παρουσιάζουμε τη δομή ενός SOLED.



Σχήμα 4.7 - Δομή SOLED [7]

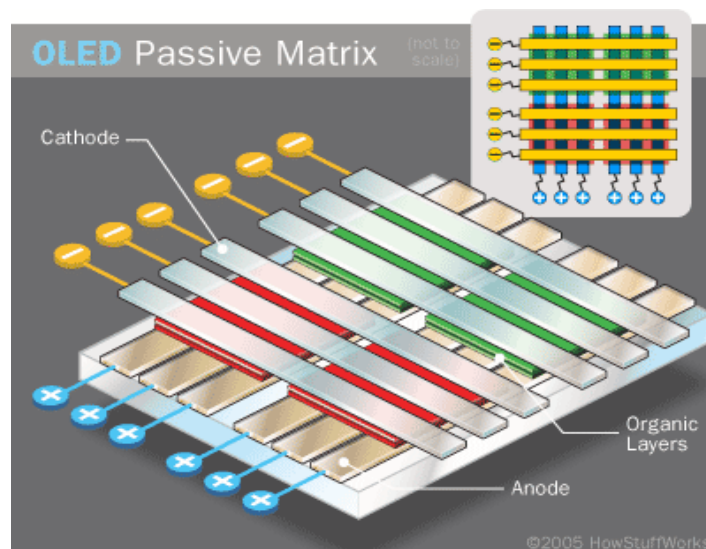
Σε αυτή την τεχνική χρησιμοποιείται μία νέα μορφή αρχιτεκτονικής εικονοστοιχείων (pixel). Η λειτουργική δομή της συσκευής στηρίζεται στο ότι

τα κόκκινα (RED), πράσινα (Green) και μπλε (Blue) υπο-pixel (subpixel) τοποθετούνται το ένα πάνω από το άλλο, ενώ σε προηγούμενες δομές ήταν τοποθετημένα το ένα δίπλα στο άλλο. Με αυτό τον τρόπο βελτιώνεται σημαντικά η ποιότητα απεικόνισης. Αν εφαρμόσουμε εξωτερικά διαφορετική τάση στο κάθε υπο-pixel μπορούμε να επηρεάσουμε την ποιότητα εκπομπής του. Αυτό επιτυγχάνεται διότι κάθε υπο-pixel πολώνεται ανεξάρτητα. Η εκπομπή φωτός από τα SOLED δίνει τη δυνατότητα νέων χρωματικών αποχρώσεων επειδή τα SOLEDs συνδυάζονται δημιουργώντας μία κατακόρυφη στοίβα και συλλέγουν τα οπτικά αποτελέσματα πολλών μικρών οπτικών κοιλοτήτων από τα πολυάριθμα διηλεκτρικά και τα στρώματα επαφής που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη δομή. Το πιο σημαντικό πρόβλημα που παρουσιάζουν τα SOLEDs είναι ότι έχουν υπερβολικά πολύπλοκη δομή με αποτέλεσμα να καθίσταται η κατασκευή τους δύσκολη και εξαιρετικά ακριβή. Επιπρόσθετα είναι δύσκολο να καλωδιωθούν κάποια ενδιάμεσα στρώματα στην εσωτερική σύνθεση των SOLEDs.[4], [7]

4.7 OLED Παθητικής Μήτρας (Passive Matrix OLED-PMOLED)

Τα OLED παθητικής μήτρας (Passive Matrix OLED – PMOLED) κατασκευάζονται συνήθως από οργανικά υλικά που έχουν ως βάση τον Άνθρακα (C) και εκπέμπουν φως όταν εφαρμοστεί σε αυτά ηλεκτρική ενέργεια. Οι απεικονίσεις με PMOLED είναι αρκετά αποτελεσματικές και χαρακτηρίζονται από φωτεινές εικόνες, ευρείες γωνίες θέασης και γρήγορη απόκριση. Η ονομασία των PMOLEDs προέρχεται από τον τρόπο ελέγχου της απεικόνισης. Τα PMOLED ελέγχονται από διακόπτες σε σειρές και στήλες, ώστε να φωτοβολεί στη συνέχεια το pixel (εικονοστοιχείο) της διασταύρωσης. Πιο συγκεκριμένα αποτελούνται από λωρίδες καθόδου, οργανικά στρώματα και λωρίδες ανόδου. Οι διασταυρώσεις των λωρίδων καθόδου με τις λωρίδες ανόδου δημιουργούν pixel, τα οποία εκπέμπουν φως. Χρησιμοποιούνται εξωτερικά κυκλώματα ρεύματος για τις λωρίδες ανόδου και καθόδου, ώστε να εντοπιστούν και να ενεργοποιηθούν τα pixel αλλά και στη συνέχεια να παραμείνουν ενεργά. Η ένταση της φωτοβολίας κάθε pixel είναι ανάλογη με

την ένταση του εφαρμοζόμενου ρεύματος. Η δομή ενός PMOLED απεικονίζεται στο Σχήμα 4.8 που ακολουθεί.



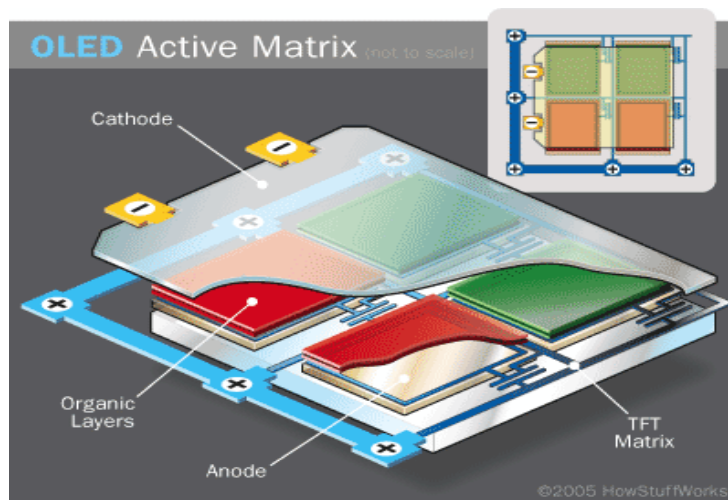
Σχήμα 4.8 - Δομή PMOLED [7]

Τα PMOLED χαρακτηρίζονται από ευκολία κατασκευής και προσιτό κόστος, καταναλώνουν όμως περισσότερη ενέργεια εξαιτίας της ύπαρξης των εξωτερικών κυκλωμάτων και είναι σχετικά αργά. Οι απεικονίσεις των PMOLEDs είναι συνήθως πολύ μικρές (γύρω στις 3 ίντσες). Συνήθως χρησιμοποιούνται για την εμφάνιση κειμένων ή μικρών εικονιδίων σε συσκευές αναπαραγωγής ήχου (MP3 - PDA) και σε κινητά τηλέφωνα. Ένα από τα πλέον χαρακτηριστικά γνωρίσματα των απεικονίσεων των PMOLEDs είναι η διαφάνεια και η ευελιξία.[4]

4.8 OLED Ενεργής Μήτρας (Active Matrix OLED-AMOLED)

Μία απεικόνιση OLED ενεργής μήτρας (Active Matrix OLED – AMOLED) αποτελείται από ένα πλέγμα εικονοστοιχείων (pixel) που δημιουργούν φως έχοντας ενεργοποιηθεί ηλεκτρικά, αφού έχουν εναποτεθεί ή ενσωματωθεί σε ένα τρανζίστορ λεπτού φιλμ (Thin Film Transistor - TFT), το οποίο λειτουργεί σε μία σειρά διακοπών για τον έλεγχο της ροής του ρεύματος σε κάθε pixel ξεχωριστά. Το υλικό που μας προσφέρει ηλεκτροφωταύγεια αποτελείται από οργανικές ενώσεις. Συνήθως η συνεχής ροή ρεύματος ελέγχεται σε κάθε pixel

από 2 τουλάχιστον TFTs. Το ένα TFT είναι υπεύθυνο για τη φόρτιση και εκφόρτιση ενός πυκνωτή αποθήκευσης. Το δεύτερο TFT είναι υπεύθυνο για την παροχή μίας πηγής τάσης στην επιθυμητή τιμή βάση των αναγκών, ώστε να δημιουργηθεί σταθερό ρεύμα για την τροφοδοσία του pixel. Με αυτό τον τρόπο εξαλείφεται και η ανάγκη δημιουργίας πολύ υψηλών ρευμάτων που συνήθως απαιτούνται για τη σωστή λειτουργία ενός AMOLED. Η backplane τεχνολογία των TFTs διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην κατασκευή των AMOLEDs. Οι δύο πρωτογενείς τεχνολογίες backplane TFT που χρησιμοποιούνται σήμερα στα AMOLEDs βασίζονται στο πολυκρυσταλλικό και στο άμορφο Πυρίτιο (Si). Αυτές οι δύο τεχνικές δίνουν τη δυνατότητα να κατασκευαστεί η βασική πλακέτα της ενεργού μήτρας ενός AMOLED σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ($< 150^{\circ}\text{C}$). Η κατασκευή μπορεί να γίνει σε εύκαμπτο πλαστικό υπόστρωμα. Οι κατασκευαστές έχουν αναπτύξει μία ενιαία διαδικασία κατασκευής ενσωματώνοντας στα AMOLEDs συστοιχίες χωρητικών αισθητήρων. Η τυπική δομή ενός AMOLED απεικονίζεται στο σχήμα 4.9 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.9 - Δομή AMOLED [7]

Τα AMOLEDs καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια συγκριτικά με τα PMOLEDs επειδή η δική τους συστοιχία από TFTs χρειάζεται μικρότερα ποσά ενέργειας από εξωτερικά ηλεκτρονικά κυκλώματα ώστε να είναι πιο αποτελεσματικά όταν χρησιμοποιούνται σε μεγάλες οθόνες. Τα AMOLEDs διαθέτουν επίσης μικρότερες συχνότητες ανανέωσης, στοιχείο που τα κάνει πιο κατάλληλα για απεικονίσεις video. Τα AMOLEDs χρησιμοποιούνται συνήθως σε οθόνες

ηλεκτρονικών υπολογιστών, σε μεγάλες τηλεοπτικές οθόνες και σε ηλεκτρονικές διαφημιστικές πινακίδες. Μπορεί να φανούν ιδιαίτερα χρήσιμα σε φορητές εφαρμογές επειδή προσφέρουν δομές οι οποίες χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλή κατανάλωση ισχύος.[4]

4.9 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

Η τεχνοτροπία των OLED παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα βάσει των οποίων κερδίζει την προτίμηση πολλών κατασκευαστών και χρησιμοποιείται σε πολλές σύγχρονες ηλεκτρονικές συσκευές.

- § Οι οργανικές φωτοδιόδους είναι αυτόφωτα στοιχεία και μπορούν να λειτουργούν στις διάφορες εφαρμογές πολύ ικανοποιητικά χωρίς να έχουν την ανάγκη υποβοήθησης με οπίσθιο φωτισμό.
- § Παρουσιάζουν εξαιρετικές δυνατότητες απεικόνισης επειδή τα εικονοστοιχεία των OLEDs εκπέμπουν άμεσα φως. Χαρακτηρίζονται από ευρύτερες γωνίες θέασης, πιο φωτεινά και ζωντανά χρώματα και υψηλότερη αντίθεση στις απεικονίσεις. Ενδεικτικό είναι επίσης ότι χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα χαμηλή απόκριση η οποία μπορεί να είναι της τάξης του 0,01 ms.
- § Παρουσιάζουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά λειτουργίας, αφού απαιτούν χαμηλή τάση τροφοδοσίας για να λειτουργήσουν σωστά. Επίσης προσφέρουν ενεργειακή οικονομία και πολύ καλή λειτουργία σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών.
- § Οι διαδικασίες που απαιτούνται για την κατασκευή τους χαρακτηρίζονται από απλότητα και ευκολία.
- § Τα OLEDs μπορούν να τυπωθούν σε οποιοδήποτε συμβατό υπόστρωμα, πράγμα που τα καθιστά ιδιαίτερα προσιτά και φθηνά για πλειάδα εφαρμογών.
- § Είναι ιδιαίτερα προσιτά για τους χρήστες επειδή είναι εύκαμπτα, πολύ λεπτά και έχουν χαμηλό βάρος.[4], [7], [8]

Εκτός από τα πλεονεκτήματα τα OLEDs παρουσιάζουν και λίγα μεν αλλά χαρακτηριστικά μειονεκτήματα.

- § Δεν είναι τόσο ανθεκτικά όσο προηγούμενες τεχνολογίες επειδή έχουν ως βάση παρασκευής τους τα οργανικά υλικά τα οποία είναι σαφώς πιο ευαίσθητα στις διάφορες επιδράσεις.
- § Είναι πολύ πιο ευαίσθητα στην υγρασία αφού τα οργανικά υλικά μπορούν να διαβρωθούν πιο εύκολα υπό την επίδραση του νερού. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος οι διαδικασίες αποτελεσματικής στεγανοποίησης των OLEDs παίζουν πάρα πολύ σημαντικό ρόλο.
- § Σε αντίθεση με τις κοινές πηγές φωτός η φωτεινότητα κάθε pixel στα OLED μπορεί να παρουσιάζει εξασθένιση ανάλογα με το περιεχόμενο της απεικόνισης. Μπορεί να υπάρξει διαφορά στην ένταση της φωτεινότητας μεταξύ των pixel κόκκινης πράσινης και μπλε απόχρωσης. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε παραμονή ενός ειδώλου στην εικόνα χαρακτηριστικό γνωστό και ως burn-in.[4], [7], [8]

Κεφάλαιο 5^ο - Ποιοτικά και λειτουργικά χαρακτηρίστηκα των OLEDs

5.1 Εισαγωγή

Την τελευταία δεκαετία έχουν γίνει τεράστια βήματα προόδου όσον αφορά την επιστημονική και τεχνολογική εξέλιξη των Οργανικών Φωτοδιόδων. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής προόδου οφείλεται στο ενδιαφέρον για την εξέλιξη επίπεδων απεικονίσεων που βασίζονται σε αυτή την τεχνολογία. Αν αυτός ο ρυθμός προόδου συνεχιστεί εντός της επόμενης δεκαετίας η τεχνολογία των Οργανικών Φωτοδιόδων θα έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο σε απεικονίσεις, αλλά και γενικότερα σε εφαρμογές φωτισμού. Ειδικότερα μια Οργανική Φωτοδίοδος που παράγει λευκό φως, μπορεί να μετατραπεί σε μία σταθερή πηγή παραγωγής φωτός και να ολοκληρωθεί σε απόδοση και κόστος αν συνδυαστεί με τις συμβατικές τεχνικές παροχής φωτός. Έχοντας ως δεδομένο ότι τα OLED παρέχον διάχυτο φωτισμό, ο απώτερος στόχος για τη χρήση τους ως πηγές σταθερού φωτισμού είναι η τεχνολογική τους εξέλιξη σε βαθμό που να είναι ανώτερα τεχνολογικά από τις αντίστοιχες τεχνολογίες φθορισμού. Μία πιθανή εκδοχή υλοποίησης βασίζεται στη δημιουργία ενός μηχανισμού παραγωγής λεπτών φύλλων φωτισμού, με ικανότητα προσαρμογής σε κάθε επιφάνεια και δυνατότητα παροχής φωτισμού υψηλής απόδοσης, με μία αυτοματοποιημένη διαδικασία χαμηλού κόστους. Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφουμε τα απαραίτητα χαρακτηριστικά που διαθέτουν τα OLED και τα καθιστούν ικανά να χρησιμοποιηθούν ως πηγές παροχής φωτός σε μία πλειάδα εφαρμογών.[4]

5.2 Απαιτήσεις μίας OLED Πηγής Φωτός

Η δυνατότητα που έχουν τα OLEDs να παρουσιάζουν μηχανική ευελιξία και προσαρμοστικότητα, καθιστά εφικτή την εισαγωγή νέων παραμέτρων στα τεχνολογικά χαρακτηριστικά τους οι οποίες κάνουν τα OLED ελκυστικά και χρηστικά σε πολλές εφαρμογές. Στην πραγματικότητα ακόμα και χωρίς τη δυνατότητα μηχανικής ευελιξίας, αρκετές εφαρμογές φωτισμού είναι

τεχνολογικά βιώσιμες ακόμα και με την υπάρχουσα μηχανική υποδομή. Αυτές οι εφαρμογές δεν είναι ακόμα εμπορικά διαδεδομένες εξαιτίας ελλείψεων στην υποδομή των διαδικασιών παραγωγής των OLEDs. Με δεδομένο ότι η τρέχουσα αγορά των OLED απεικονίσεων επεκτείνεται, και βελτιώνεται ολοένα και περισσότερο η υποδομή των διαδικασιών παραγωγής, αυξάνεται η πιθανότητα να γίνουν εμπορικά διαθέσιμα νέα εξειδικευμένα προϊόντα φωτισμού. Στη συνέχεια θα επικεντρωθούμε στις τεχνολογικές απαιτήσεις ώστε τα OLEDs να καθιερωθούν ως βασικές πηγές σταθερού φωτισμού, εκτοπίζοντας τις υπάρχουσες τεχνολογίες φθορισμού. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά απόδοσης που πρέπει να πληρούν τα OLEDs έχουν να κάνουν με την Ποιότητα Φωτισμού, την Αποτελεσματικότητα, τη Φωτεινότητα, το Χρόνο Ζωής και το Κόστος.[4]

5.3 Ποιότητα Φωτισμού

Προκειμένου μια συσκευή εκπομπής φωτός να χρησιμοποιηθεί ως πηγή φωτισμού, είναι σαφές ότι πρέπει να παρέχει φως «ευχάριστο» για το μέσο άνθρωπο. Έπειτα από πολυετείς έρευνες η βιομηχανία φωτισμού διαπίστωσε ότι τα κυριότερα χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν μία «ευχάριστη» και καλής ποιότητας πηγή φωτός είναι το Χρώμα του φωτισμού, η Χρωματική Απόδοση και η Φωτεινότητα.[4]

5.3.1 Χρώμα

Έχει ανακαλυφθεί ότι για να χρησιμοποιηθεί μία πηγή φωτός σε εφαρμογές φωτισμού πρέπει να διαθέτει λευκό χρώμα και θερμοκρασία blackbody εκπομπού μεταξύ 2800 και 6500 Kelvin. Γι αυτό το χρώμα μίας πηγής φωτός χαρακτηρίζεται με βάση τη θερμοκρασία του blackbody εκπομπού. Αξίζει να σημειώσουμε ότι μία χαμηλή θερμοκρασία αντιστοιχεί σε ένα εντονότερο χρώμα, επειδή τότε παρουσιάζεται πιο έντονο το κόκκινο χρώμα στο φάσμα εκπομπής. Αντίστοιχα μία υψηλή θερμοκρασία αντιστοιχεί σε ένα ασθενέστερο χρώμα επειδή τότε παρουσιάζεται πιο έντονο το μπλε χρώμα στο φάσμα εκπομπής. Μια πηγή φωτός χαρακτηρίζεται συνήθως από τη

Συσχετισμένη Θερμοκρασία Χρώματος (Correlated Color Temperature - CCT). Η CCT ορίζεται ως η θερμοκρασία χρώματος που είναι περισσότερο κοντά στο χρώμα της πηγής.[4]

5.3.2 Χρωματική απόδοση

Μετά από το Χρώμα η πιο σημαντική παράμετρος που χαρακτηρίζει μία πηγή φωτός είναι η Χρωματική Απόδοση. Η Χρωματική απόδοση αντιστοιχεί στο πόσο καλά φαίνονται αντικείμενα διαφορετικών χρωμάτων όταν φωτίζονται από τη φωτεινή πηγή. Αυτό εξαρτάται κατά ένα περίπλοκο τρόπο από την κατανομή της φασματικής ισχύος της φωτεινής πηγής, από τη φασματική ανελαστικότητα του έγχρωμου αντικειμένου που μας ενδιαφέρει και από την ανθρώπινη αντίληψη. Η έννοια της χρωματικής απόδοσης πρέπει να γίνει κατανοητή ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία του χρώματος, επειδή δεν υπάρχει αντιστοιχία ένα προς ένα μεταξύ των χρωματικών συντεταγμένων και της κατανομής της φασματικής ισχύος μίας φωτεινής πηγής. Έτσι δύο φωτεινές πηγές με διαφορετικές κατανομές φασματικής ισχύος μπορεί να έχουν την ίδια θερμοκρασία χρώματος όμως να χαρακτηρίζονται εν γένει από διαφορετικές ιδιότητες Χρωματικής Απόδοσης.

Υπάρχει μία γενικά αποδεκτή ποσοτική μέτρηση της Χρωματικής Απόδοσης που ονομάζεται Δείκτης Χρωματικής Απόδοσης (Color Rendering Index - CRI). Αυτός ο δείκτης βασίζεται στο σκεπτικό ότι για κάθε χρωματική θερμοκρασία υπάρχει προκαθορισμένα μία πηγή φωτός που παρέχει ιδανική Χρωματική Απόδοση. Αυτή η προκαθορισμένη πηγή μπορεί να είναι εφικτό να υλοποιηθεί με φυσικές μεθόδους μπορεί και όχι, όμως η φασματική κατανομή ισχύος της θα είναι πάντα καλά ορισμένη. Για μία δοθείσα φωτεινή πηγή ο δείκτης CRI προσπαθεί να εκτιμήσει πόσο διαφορετικά απεικονίζεται ένα σύνολο από διαφορετικά δοκιμαστικά χρώματα.

Τα OLEDs παρουσιάζουν τεράστια ευελιξία στο φασματικό συντονισμό, εξαιτίας της ποικιλίας που παρουσιάζει η χημική τους δομή η οποία μπορεί να τροποποιήσει ακόμα και τη δομή ολόκληρης της συσκευής. Ως εκ τούτου πρέπει να περιμένουμε ότι η απαίτηση για εκπομπή φωτός υψηλής ποιότητας

δε θα σταθεί εμπόδιο στην εξέλιξη και τη γενικευμένη χρήση των OLEDs στις σύγχρονες τεχνολογίες ηλεκτρονικών διατάξεων.[4]

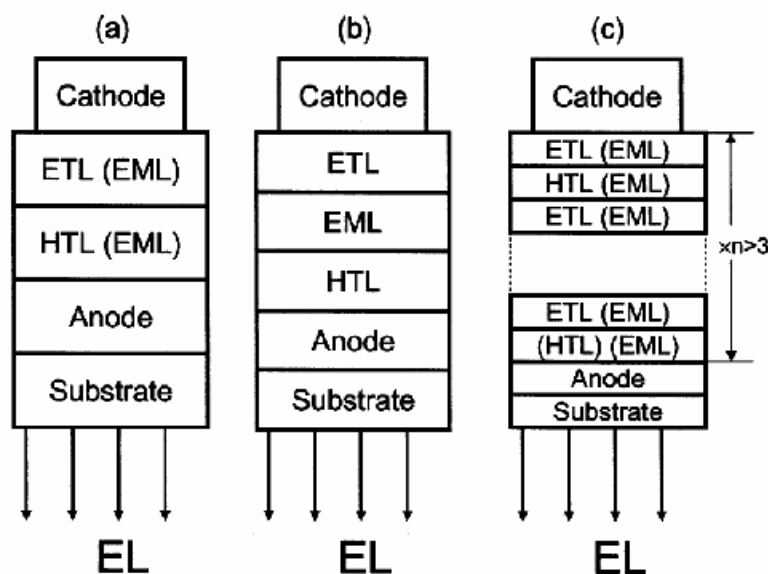
5.3.3 Φωτεινότητα

Ο αντικειμενικός στόχος μίας φωτεινής πηγής είναι να φωτίσει μία περιοχή. Για μία φωτεινή πηγή OLED η εκπομπή φωτός μπορεί να επιτευχθεί είτε αξιοποιώντας μία πολύ μικρή περιοχή λειτουργίας στην οποία ένα OLED λειτουργεί παρέχοντας υψηλή Φωτεινότητα, είτε αξιοποιώντας μια μεγαλύτερη περιοχή λειτουργίας στην οποία ένα OLED φωτοβολεί λιγότερο έντονα. Επιπρόσθετα είναι πιθανό διαφορετικές εφαρμογές να έχουν διαφορετικές ανάγκες σε Φωτεινότητα. Γι αυτό το λόγο δεν υπάρχει προκαθορισμένη απαίτηση Φωτεινότητας για μία OLED πηγή φωτός. Ωστόσο υπάρχουν σίγουρα τεχνικοί συμβιβασμοί όσον αφορά τη Φωτεινότητα. Ένας από αυτούς είναι μεταξύ Φωτεινότητας και Χρόνου Ζωής. Όσο η Φωτεινότητα ενός OLED αυξάνεται τόσο ο Χρόνος Ζωής του θα μειώνεται. Οι λεπτομέρειες αυτού του τεχνικού συμβιβασμού δεν έχουν γίνει πλήρως κατανοητές μέχρι σήμερα. Δε φαίνεται να υπάρχει μία συνάρτηση για όλα τα OLED που να συνδέει Χρόνο Ζωής και Φωτεινότητα. Σε αρκετές περιπτώσεις όμως ο Χρόνος Ζωής μειώνεται ταχύτερα από γραμμικά με την αύξηση της Φωτεινότητας. Αυτό είναι ένα επιχείρημα που ωθεί τους μελετητές να σχεδιάζουν OLEDs με χαμηλότερη Φωτεινότητα. Από την άλλη χαμηλότερη Φωτεινότητα συνεπάγεται ότι και περισσότερα τμήματα της συσκευής θα είναι απαραίτητα για τη βέλτιστη λειτουργία της με αποτέλεσμα να αυξάνεται σημαντικά το κόστος.[4]

5.4 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των OLEDs

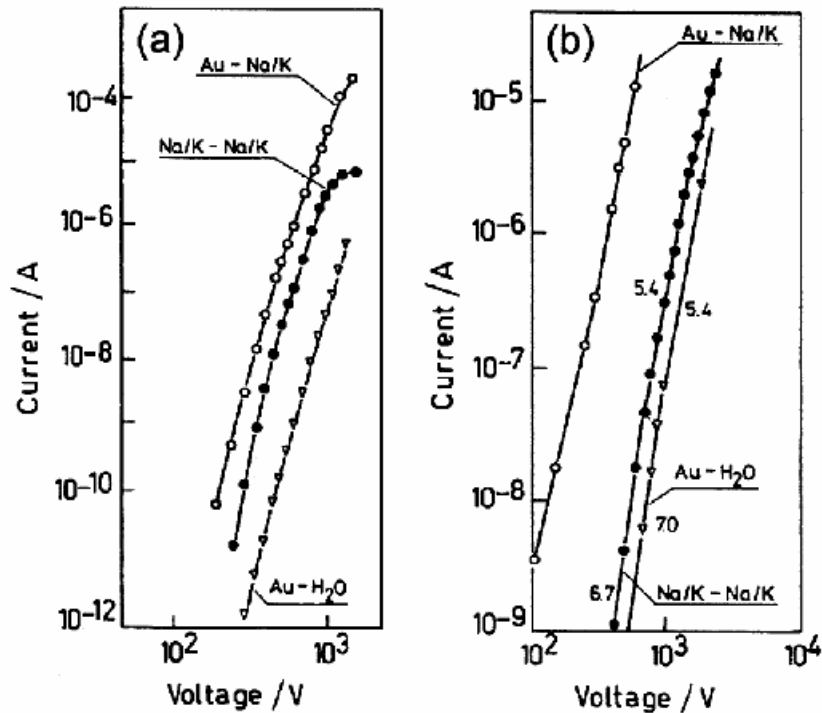
Η εκπομπή φωτός από ένα λεπτό φιλμ Οργανικού LED οφείλεται σε ένα πολύπλοκο συνδυασμό διάφορων ηλεκτρονικών διαδικασιών, όπως η έγχυση φορτίων και η ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από τη συσκευή. Μελετώντας τη χαρακτηριστική Ρεύματος-Τάσης ενός OLED παρατηρούμε ότι το κύριο χαρακτηριστικό που εμφανίζει είναι η μη γραμμικότητα, ανεξαρτήτως πλήθους

και διάταξης οργανικών στρωμάτων. Αυτό σχετίζεται με το γεγονός ότι το ρεύμα που διαρρέει τα OLED οφείλεται σε έγχυση φορτίων στα ηλεκτρόδια (οπές στην άνοδο και ηλεκτρόνια στην κάθοδο). Στο Σχήμα 5.1 που ακολουθεί παρουσιάζουμε τη δομή ενός OLED (a) Δύο Στρωμάτων (Double Layer - DL), (b) Τριών Στρωμάτων (Triple Layer - TL) και (c) Πολλαπλών Στρωμάτων (Multi Layer – ML).[9]



Σχήμα 5.1 - Δομή ενός OLED (a) Δύο Στρωμάτων (Double Layer - DL), (b) Τριών Στρωμάτων (Triple Layer - TL) και (c) Πολλαπλών Στρωμάτων (Multi Layer – ML) [9].

Οι γραφικές παραστάσεις σε λογαριθμική κλίμακα του ρεύματος σε συνάρτηση με την εφαρμοζόμενη τάση μας διευκολύνουν να διακρίνουμε τη συμπεριφορά των δύο αυτών παραμέτρων. Τα χαρακτηριστικά της τάσης σε OLED ενός στρώματος (SL) στο πεδίο τιμών ($10 \text{ V/cm} - 10^6 \text{ V/cm}$) παρουσιάζουν αρκετές καταστάσεις. Οι χαρακτηριστικές Ρεύματος - Τάσης για OLED ενός στρώματος τα οποία έχουν ως βάση μονοκρύσταλλους από (a) anthracene και (b) tetracene με μονοπολικές και διπολικές επαφές έγχυσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.2 που ακολουθεί.



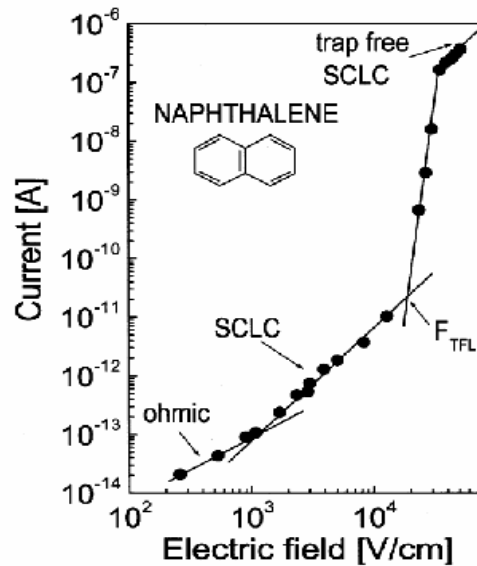
Σχήμα 5.2 - Χαρακτηριστικές Ρεύματος - Τάσης για OLED ενός στρώματος τα οποία έχουν ως βάση μονοκρύσταλλους από (a) anthracene και (b) tetracene [9].

Για τα επιμέρους στοιχεία ισχύει:

- Na/K – Na/K: Έγχυση μόνο αρνητικών φορέων.
- Au – H₂O: Έγχυση μόνο θετικών φορέων.
- Au – Na/K: Διπλή έγχυση.

Το πάχος των κρυστάλλων είναι 98 μm για anthracene και 108 μm για tetracene αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 5.3 που ακολουθεί απεικονίζεται το μονοπολικό ρεύμα ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με το ηλεκτρικό πεδίο για ένα μονοκρύσταλλο από naphthalene με πάχος 0,1 cm. Στο Σχήμα αυτό απεικονίζεται η Ωμική Αγωγιμότητα που εμφανίζεται στις μικρές τιμές του πεδίου, η Space Charge Limited Current (SCLC) αγωγιμότητα εξαιτίας της παρουσίας κενών ακολουθούμενη από την αγωγιμότητα κενών που έχουν συμπληρωθεί η οποία εμφανίζεται στις μεγαλύτερες τιμές του ηλεκτρικού πεδίου.[9]



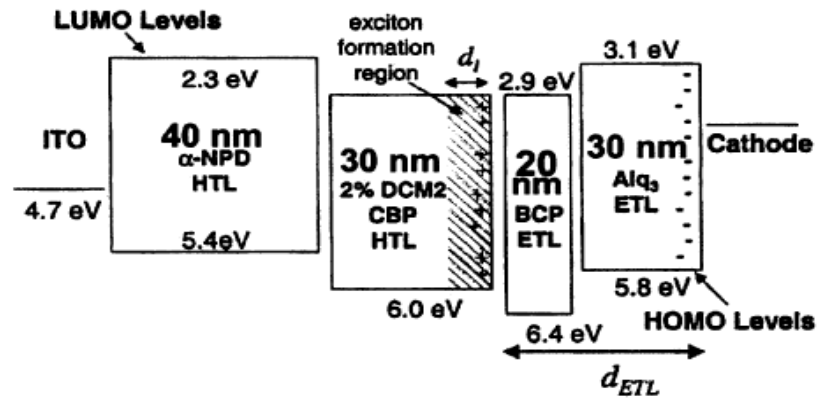
Σχήμα 5.3 - Μονοπολικό ρεύμα ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με το ηλεκτρικό πεδίο για ένα μονοκρυστάλλο από naphthalene [9].

Στο Σχήμα αυτό διακρίνουμε αρκετές διαφορετικές καταστάσεις στην έγχυση του ρεύματος:

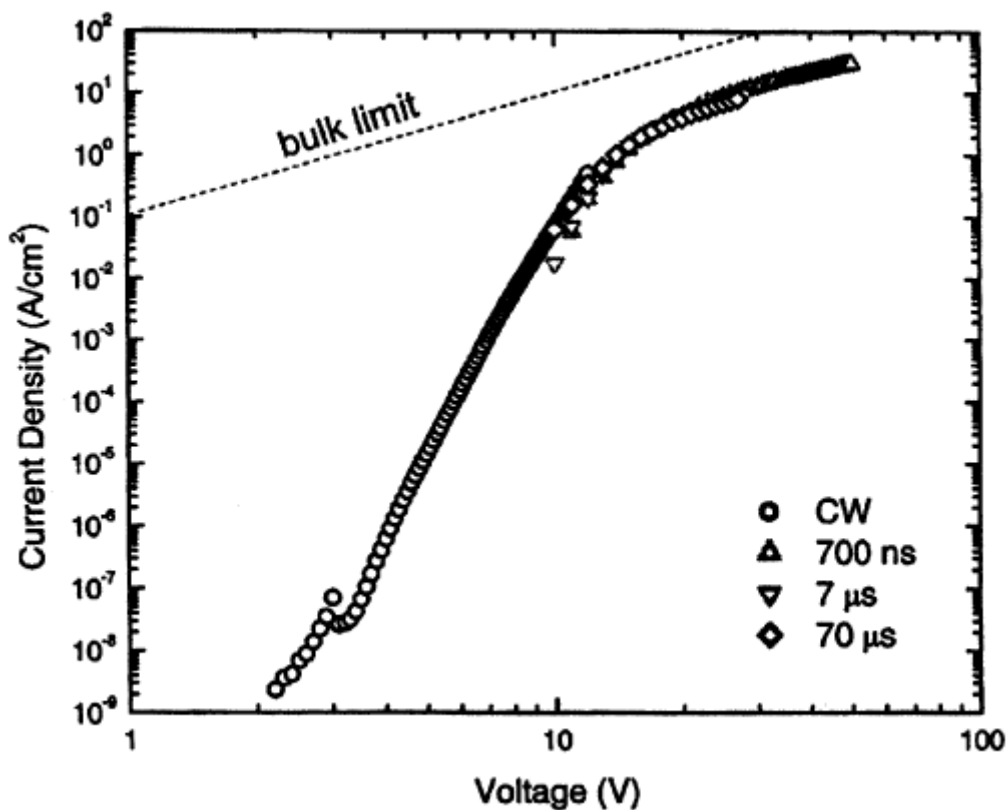
- Για μικρές τιμές του πεδίου παρατηρούμε γραμμική αύξηση του ρεύματος (Ωμική κατάσταση).
- Το Περιορισμένο Ρεύμα Φορτίων Χώρου (Space Charge Limited Current - SCLC) με παρουσία κενών αυξάνεται γραμμικά με ταχύτερο ρυθμό από το Ωμικό.
- Η Οριακή τιμή Ηλεκτρικού Πεδίο μετά από την οποία αρχίζουν να συμπληρώνονται τα κενά (Trap Filled Limit – F_{TFL}) προκαλεί ρεύμα το οποίο αυξάνεται γραμμικά με ακόμα εντονότερο ρυθμό.
- Το Περιορισμένο Ρεύμα Φορτίων Χώρου (Space Charge Limited Current - SCLC) με συμπληρωμένα κενά συνεχίζει μεν αυξάνεται γραμμικά αλλά με όχι τόσο έντονο ρυθμό.

Παρόμοια συμπεριφορά έχει παρατηρηθεί σε Οργανικά Συστήματα λεπτού φιλμ. Αυτά τα συστήματα τοποθετούνται σε συνδυασμό με Ωμικά ηλεκτρόδια τα οποία προκαλούν έγχυση μέσω μίας περιοχής εκθετικά κατανομημένων κενών. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα τέτοιου Οργανικού Συστήματος μπορεί

να είναι ένα Οργανικό LED τεσσάρων στρωμάτων. Η αρχιτεκτονική και οι ενεργειακές στάθμες ενός OLED τεσσάρων στρωμάτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.4 που ακολουθεί.[9]

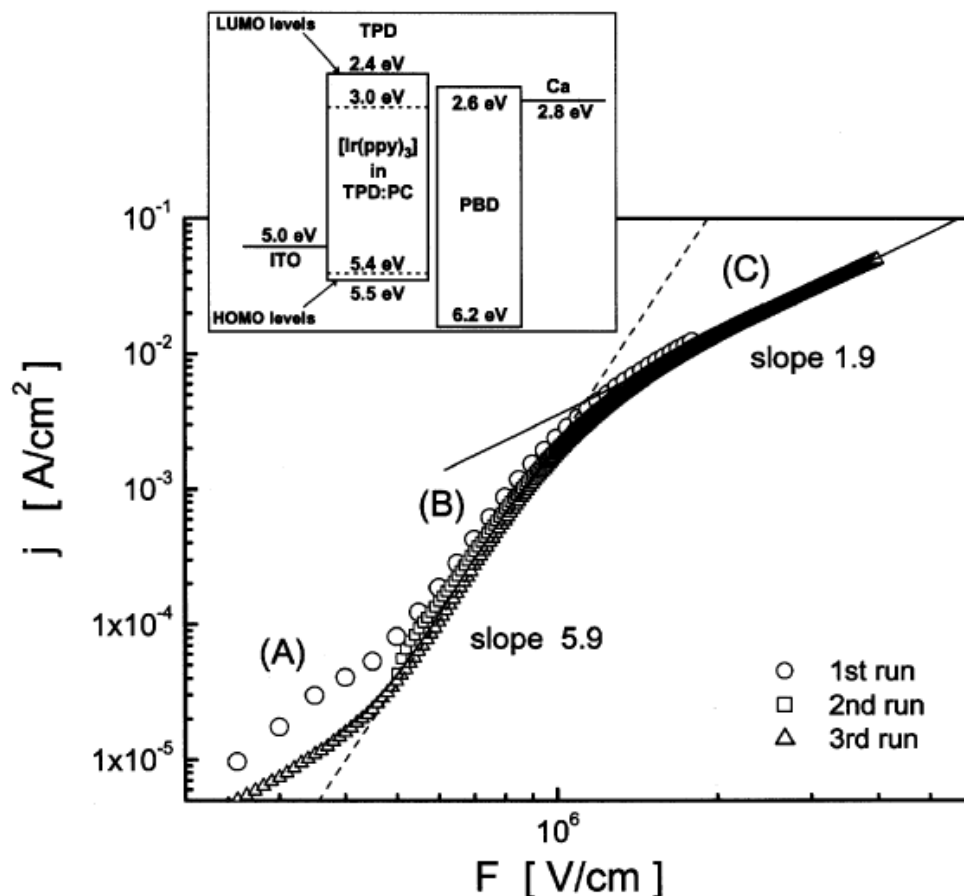


Σχήμα 5.4 - Αρχιτεκτονική και ενεργειακές στάθμες ενός OLED τεσσάρων στρωμάτων [9].



Σχήμα 5.5 - Χαρακτηριστικά Ρεύματος - Τάσης ενός OLED τεσσάρων στρωμάτων με εφαρμογή παλμικού δυναμικού πόλωσης στις υψηλές πυκνότητες ρεύματος [9].

Στο Σχήμα 5.5 που ακολουθεί παρουσιάζουμε τα χαρακτηριστικά Ρεύματος - Τάσης της συσκευής με εφαρμογή παλμικού δυναμικού πόλωσης στις υψηλές πυκνότητες ρεύματος.



Σχήμα 5.6 - Πυκνότητα ρεύματος σε συνάρτηση με το ηλεκτρικό πεδίο για ένα OLED τεσσάρων στρωμάτων [9].

Στο Σχήμα 5.6 που ακολουθεί στην επόμενη σελίδα παρουσιάζουμε την πυκνότητα του ρεύματος σε συνάρτηση με το ηλεκτρικό πεδίο για ένα OLED τεσσάρων στρωμάτων. Σε αυτό το σχήμα διακρίνουμε τρεις καταστάσεις.

- A. Το ρεύμα περιορισμένης διαρροής ή διάχυσης.
- B. Ρεύμα ελεγχόμενου όγκου με εκθετική κατανομή κενών.
- C. Ρεύμα ελεγχόμενου όγκου με συμπληρωμένα κενά.

Οι καμπύλες της πυκνότητας του ρεύματος σε συνάρτηση με το ηλεκτρικό πεδίο είναι σχεδιασμένες με μεγάλη ακρίβεια, εκτός από την περιοχή

χαμηλών τιμών του πεδίου όπου το υπάρχον ηλεκτρικό πεδίο έχει συγκρίσιμη τιμή με το εφαρμοζόμενο δυναμικό πόλωσης εξαιτίας της διαφοράς που παρουσιάζεται στο έργο εξαγωγής των ηλεκτροδίων.[9]

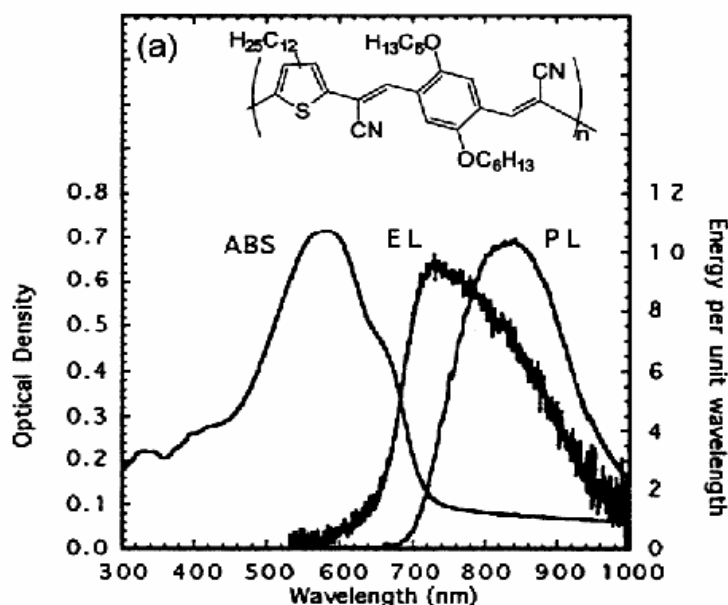
Παρατηρούμε ότι υπάρχει μία ενδιαφέρουσα διαφορά στις καμπύλες Ρεύματος - Τάσης ενός μονοκρύσταλλου (Σχήμα 5.3) και ενός OLED λεπτού φιλμ (Σχήματα 5.5 και 5.6). Στις καμπύλες Ρεύματος - Τάσης ενός μονοκρύσταλλου εμφανίζεται ένα «πήδημα» του ρεύματος το οποίο δεν εμφανίζεται στα OLED λεπτού φιλμ. Αν και θα ήταν καλό να πραγματοποιηθούν περαιτέρω μελέτες ώστε να εξηγηθεί με βεβαιότητα η αιτία αυτής της διαφοράς, η ισχυρή εξάρτηση των χαρακτηριστικών Ρεύματος - Τάσης από τη θερμοκρασία και η γραμμική της μεταβολή τόσο για τα OLED ενός στρώματος όσο και για τα OLED δύο στρωμάτων αναγκάζουν το ρεύμα της συσκευής να παρουσιάζει περιορισμένη έγχυση.[9]

5.5 Οπτικά χαρακτηριστικά των OLEDs

Στα Οργανικά LED η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται κατευθείαν σε φως. Γι αυτό το λόγο η αξιολόγηση της συνολικής παραγωγής φωτός και της σχέσης που τη συνδέει με το ρεύμα οδήγησης έχει τεράστιο ενδιαφέρον. Η κατανόηση και η προσαρμογή του χρώματος εκπομπής έγκειται στη φυσική της συσκευής και σε προβλήματα πρακτικών εφαρμογών. Το μεγαλύτερο μέρος των ερευνητικών προσπαθειών κινείται προς την κατεύθυνση αξιολόγησης και προετοιμασίας των υλικών, καθώς και στη μέτρηση του φάσματος εκπομπής τους ελπίζοντας να βρεθούν νέα υλικά για την κατασκευή Οργανικών εκπομπών (Emitters) για OLED. Η σύνθεση και το πλήθος των διεγερμένων καταστάσεων που οδηγούν σε εκπομπή και συναντάμε σε συσκευές πολλαπλών στρωμάτων ποικίλλει ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας τους. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε διάφορους τύπους φασμάτων συσχετίζοντας τις οπτικές ιδιότητες των Οργανικών LED με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους. Η μορφή του φάσματος εκπομπής θα παρουσιαστεί με τη βοήθεια κατάλληλα επιλεγμένων παραδειγμάτων Οργανικών LED.

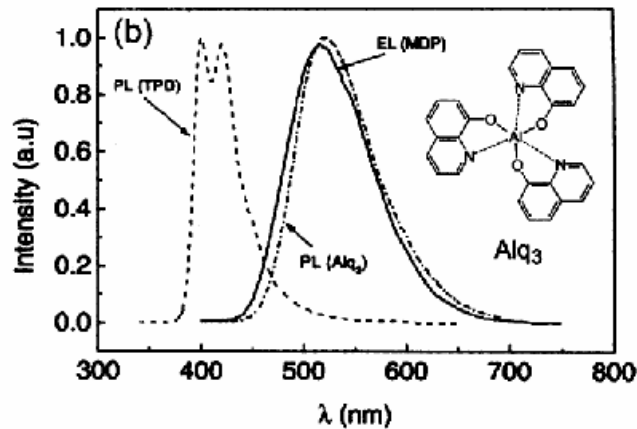
Τα είδη γνωστά φάσματα εκπομπής των Οργανικών LED καταλαμβάνουν ένα φασματικό εύρος από τις υπέρυθρες ακτίνες ως τις υπεριώδεις και παρουσιάζουν χαρακτηριστικό σχήμα διασκορπισμένων μορίων σε ένα ηλεκτρικά ουδέτερο μέσο. Επίσης παρουσιάζουν ευρύτατα μέγιστα από διαταραγμένους εκπομπούς που σχετίζονται με δυάδες μορίων σε διεγερμένες καταστάσεις ή στενές γραμμές οι οποίες καταδεικνύουν τη διέγερση των ιόντων των μετάλλων σε σύμπλοκα τους με οργανικές ενώσεις. Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζουμε διάφορα στιγμιότυπα από το φάσμα εκπομπής των Οργανικών LED.

Στο Σχήμα 5.7 (a) παρουσιάζουμε το φάσμα εκπομπής στην υπέρυθρη περιοχή, στο Σχήμα 5.7 (b) στην ορατή περιοχή και στο Σχήμα 5.7 (c) στην υπεριώδη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Ειδικότερα στο Σχήμα 5.7 (a) της οπτικής πυκνότητας σε συνάρτηση με το μήκος κύματος για δεδομένη ενέργεια ανά μονάδα μήκους κύματος, διακρίνουμε τρεις φασματικές περιοχές. Το φάσμα απορρόφησης (absorption - ABS), το φάσμα φωτοφωταύγειας (photoluminescence - PL) και το φάσμα ηλεκτροφωταύγειας (electroluminescence – EL) που λαμβάνουμε από τα επικαλυμμένα στρώματα ενός συμπολυμερούς thienylene phenylene με υποκαταστάτη cyano.[9]

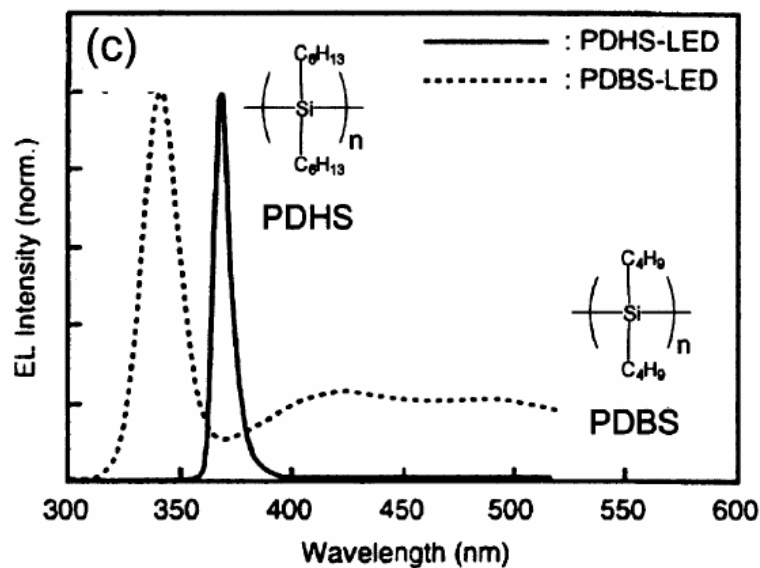


Σχήμα 5.7 (a) - Φάσμα εκπομπής OLED στην υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού κύματος [9].

Στο Σχήμα 5.7 (b) της έντασης σε συνάρτηση με το μήκος κύματος διακρίνουμε το φάσμα φωτοφωταύγειας (photoluminescence - PL) για λεπτό φιλμ από Alq_3 και Telescopic Pixel Display (TPD) και το φάσμα ηλεκτροφωταύγειας (electroluminescence – EL) του Alq_3 διεσπαρμένου σε TPD.



Σχήμα 5.7 (b) - Φάσμα εκπομπής OLED στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού κύματος [9].

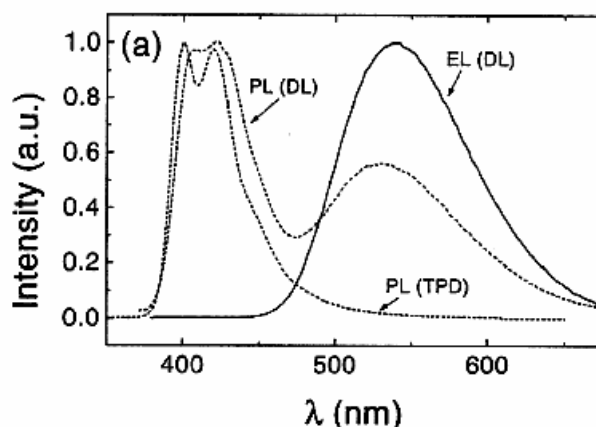


Σχήμα 5.7 (c) - Φάσμα εκπομπής OLED στην υπεριώδη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού κύματος [9].

Στο Σχήμα 5.7 (c) της έντασης σε συνάρτηση με το μήκος κύματος διακρίνουμε το φάσμα ηλεκτροφωταύγειας (electroluminescence – EL) των dialkylpolysilanes.[9]

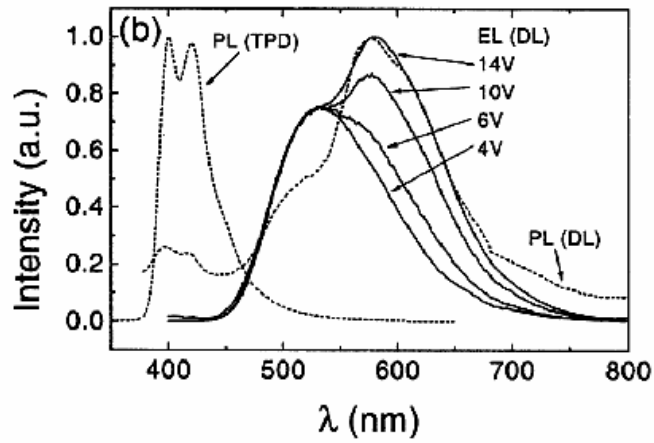
Στα Σχήματα 5.8 (a) και (b) που ακολουθούν παρουσιάζουμε το κανονικοποιημένο φάσμα ηλεκτροφωταύγειας (electroluminescence - EL) και το κανονικοποιημένο φάσμα φωτοφωταύγειας (photoluminescence - PL) για Οργανικά LED δύο στρωμάτων (Double Layer - DL). Τα φάσματα ηλεκτροφωταύγειας που λαμβάνονται σε διαφορετικές τάσεις μεταξύ 8 και 15 Volts δε διαφέρουν μεταξύ τους. Η ηλεκτροφωταύγεια εξελίσσεται με την εφαρμοζόμενη τάση. Όλα τα φάσματα φωτοφωταύγειας διεγείρονται μέσω της ανόδου με μήκος κύματος $\lambda = 350$ nm.

Το OLED το φάσμα του οποίου απεικονίζεται στο Σχήμα 5.8 (a) είναι κατασκευασμένο είτε από ITO (75% TPD) είτε από Alq_3 . Επίσης μπορεί να είναι κατασκευασμένο από Μαγνήσιο (Mg) ή από Άργυρο (Ag).[9]



Σχήμα 5.8 (a) - Κανονικοποιημένο φάσμα ηλεκτροφωταύγειας (electroluminescence - EL) και κανονικοποιημένο φάσμα φωτοφωταύγειας (photoluminescence - PL) για Οργανικά LED δύο στρωμάτων (Double Layer - DL) από ITO ή Alq_3 ή Mg ή Ag [9].

Το OLED το φάσμα του οποίου απεικονίζεται στο Σχήμα 5.8 (a) είναι κατασκευασμένο είτε από ITO (70% TPD), είτε από Alq_3 . Επίσης είναι πιθανό να είναι κατασκευασμένο από Ασβέστιο (Ca).



Σχήμα 5.8 (b) - Κανονικοποιημένο φάσμα ηλεκτροφωταύγειας (electroluminescence - EL) και κανονικοποιημένο φάσμα φωτοφωταύγειας (photoluminescence - PL) για Οργανικά LED δύο στρωμάτων (Double Layer - DL) από ITO ή Alq_3 ή Ca [9].

Κεφάλαιο 6^ο - Εφαρμογές, Αντοχή, Κόστος

6.1 Εφαρμογές των OFET

Οι συσκευές στις οποίες χρησιμοποιούνται τα Οργανικά Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου (Organic Field Effect Transistor – OFET) μπορεί να είναι συσκευές μεταγωγής (switching devices) οι οποίες χρησιμεύουν σε επίπεδες απεικονίσεις (Flat Panel Displays – FPD). Οι FPD είναι πιθανό να είναι δομημένες είτε με εικονοστοιχεία (pixels) υγρών κρυστάλλων (οθόνες LCD – Liquid Crystal Displays) είτε με Οργανικές Φωτοδιόδους (OLED). Ακόμα τα OFET μπορούν να φανούν χρήσιμα ως εξαρτήματα υποστρωμάτων σε επίπεδες οθόνες η οποίες είναι δομημένες με εικονοστοιχεία (pixels) στα οποία συγκεντρώνονται ηλεκτροφόρες μικροκάψουλες μελάνης. Επίσης τα OFET χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε εφαρμογές όχι ιδιαίτερα υψηλής ταχύτητας μεταγωγής όπως οι έξυπνες κάρτες (smart cards) και οι ετικέτες ηλεκτρονικής ταυτοποίησης.[2]

6.2 Εφαρμογές των OLEDs

Τα OLED χρησιμοποιούνται σε μία πλειάδα συσκευών που συναντάμε στην καθημερινότητα μας. Μερικές από αυτές είναι τα κινητά τηλέφωνα, τα mp3 player, οι ψηφιακές κορνίζες, ηχοσυστήματα αυτοκινήτων, κάμερες. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε διεξοδικότερα διάφορους τύπους εφαρμογών στους οποίους χρησιμοποιούμε OLED.[4]

6.2.1 Εικόνα Υψηλής Ποιότητας με Χρήση OLEDs

Για απεικονίσεις υψηλής ποιότητας οι οποίες χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή ανάλυση εικόνας απαιτείται πλήθος από OLED μεγάλου μεγέθους. Ο στόχος μίας ηλεκτρονικής απεικόνισης όσον αφορά την ανάλυση της εικόνας, είναι να μπορεί να φτάσει τη συχνότητα του ανθρώπινου ματιού (80 μm) σε μία ακτίνα γύρω στα 30 cm. Αυτό συνεπάγεται χρήση περίπου 10 εκατομμυρίων εικονοστοιχείων (pixels), αν και αυτό εξαρτάται από το μέγεθος

της οθόνης απεικόνισης και την απόσταση θέασης. Εφαρμογές στις 40 με 50 ίντσες σε απεικονίσεις τηλεοράσεων υψηλής ανάλυσης εικόνας (High Definition Television – HDTV), αλλά και οι γιγαντιαίες απεικονίσεις με χρήση video-προβολέων έχουν συνήθως τις μεγαλύτερες απαιτήσεις για εικόνα υψηλής ποιότητας. Η πραγματοποίηση απεικονίσεων με μεγάλες οθόνες βασισμένες σε OLED είναι μία μεγάλη πρόκληση εξαιτίας κυρίως των δυσκολιών που παρουσιάζονται στην κατασκευή τους. Μία πρώτη λογική προσέγγιση θα είναι οι οθόνες που βασίζονται σε OLED να συναγωνίζονται σε μέγεθος τις οθόνες LCD.

Τέτοια μεγέθη απεικονίσεων μπορούν εύκολα να επιτευχθούν χρησιμοποιώντας μία μεταλλική μάσκα επισκίασης. Το όριο του πλευρικού ρυθμού ανάπτυξης των RGB (Red Green Blue) εκπομπών καθορίζεται με χρήση μεταλλικής μάσκας σκίασης σε ένα χώρο από 40 έως 50 μm . Το όριο ανάλυσης ενός RGB εικονοστοιχείου (pixel) καταλαμβάνει χώρο από 120 έως 150 περίπου μm . Όσο πιο μεγάλο είναι το γυάλινο υπόστρωμα τόσο πιο δύσκολο είναι να επιτύχουμε την καλύτερη δυνατή ανάλυση σε αριθμό εικονοστοιχείων (pixels) λόγω της κυμάτωσης που παρουσιάζει η μεταλλική μάσκα, διότι είναι δύσκολο να διατηρηθεί σταθερή η απόσταση μεταξύ του υποστρώματος και της μεταλλικής μάσκας σε μεγάλες περιοχές. Ακόμα και στην περίπτωση που απαιτείται απεικόνιση υψηλής ανάλυσης, ο λευκός οπίσθιος (backlight) φωτισμός που προσφέρει ένα OLED πλεονεκτεί σε σχέση με τις τυποποιημένες μεθόδους απεικόνισης πλήρους χρώματος. Επειδή οι τεχνικές εναπόθεσης ενός χρώματος στο υπόστρωμα είναι ευρύτατα δοκιμασμένες στη βιομηχανική παραγωγή LCD απεικονίσεων, τα OLED κατασκευάζονται εναποθέτοντας μικρά κομμάτια από ITO στο υπόστρωμα.

Συνεπώς είναι εύκολο να δημιουργηθούν συστοιχίες πολύ λεπτών εικονοστοιχείων (pixels) χρησιμοποιώντας λευκά ή μπλε μονοχρωματικά OLED. Επί του παρόντος οι μόνες μέθοδοι για παραγωγή υψηλής ανάλυσης και πλήρους χρώματος απεικονίσεων είναι οι inkjet εκτυπώσεις και η χρήση λευκού οπίσθιου φωτισμού (backlight). Επιπλέον για την αποτελεσματική χρήση μίας απεικόνισης παθητικής μήτρας μεγάλου μεγέθους, είναι απαραίτητα μία υψηλή τιμή δυναμικού και ένα μεγάλο ρεύμα οδήγησης. Σε

μία OLED απεικόνιση παθητικής μήτρας οι στήλες παρέχουν το σήμα των δεδομένων και οι γραμμές διευθυνσιοδοτούν ένα τέτοιο σήμα μέσα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Η ροή του ρεύματος μέσω μίας επιλεγμένης γραμμής απαιτεί μία μέγιστη στιγμιαία τιμή ρεύματος πολύ μεγαλύτερη από τη μέση στάθμη του ρεύματος και σε πλήρη αναλογία με το συνολικό αριθμό γραμμών της απεικόνισης. Ενώ είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση μίας ενεργής μήτρας στις απεικονίσεις μεγάλου μεγέθους, το λεπτό άμορφο Πυρίτιο (Si) το οποίο χρησιμοποιείται στις απεικονίσεις LCD δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την αποτελεσματική χρήση των OLEDS συσκευών διότι τα φορτία του παρουσιάζουν χαμηλή κινητικότητα. Από την άλλη κατασκευάστηκαν λεπτά φιλμ από χαμηλής θερμοκρασίας Πολυπυρίτιο (Polysilicon - p-Si) και χρησιμοποιήθηκαν σε μεγάλα υποστρώματα για LCD απεικονίσεις. Οι εταιρίες Sanyo και Eastman-Kodak παρουσίασαν απεικονίσεις OLED ενεργού μήτρας βασισμένες σε p-Si. Οι απεικονίσεις OLED οι οποίες έχουν ως βάση το p-Si παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις απεικονίσεις OLED παθητικής μήτρας, οι οποίες χαρακτηρίζονται από χαμηλή κατανάλωση ισχύος και υψηλό χρόνο ζωής.[4]

6.2.2 Απεικόνιση με Υψηλή Ζωντάνια με Χρήση OLEDs

Για εικόνα με υψηλή ζωντάνια ή όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ρεαλισμό είναι απαραίτητες τόσο οθόνες μεγάλου μεγέθους όσο και η χρήση τεχνολογίας 3-D. Μία εφαρμογή η οποία μας παρέχει πολύ μεγάλη οθόνη βασίζεται στη χρήση ενός βιντεοπροβολέα. Τα εργαστήρια της Seiko Epson και της Toyota Central R&D παρουσίασαν ένα πρότυπο τρόπο δημιουργίας απεικονίσεων με χρήση βιντεοπροβολέα χρησιμοποιώντας OLEDs για κάθε RGB πηγή φωτός. Όταν χρησιμοποιείται ένα OLED σαν πηγή φωτός, το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μία μικρή οπτική συσκευή χωρίς την υποβοήθεια οπίσθιου (backlight) φωτισμού και διαφέρει εντελώς συγκριτικά με ένα σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί την RGB εκπομπή μίας λευκής πηγής οπίσθιου (backlight) φωτισμού. Ωστόσο η απεικόνιση αυτού του είδους απαιτεί OLEDs με ιδιαίτερα υψηλή ικανότητα φωτισμού. Το ερευνητικό τμήμα

της IBM και της eMagin έχουν αναπτύξει απεικονίσεις βασισμένες σε micro-OLEDs πάνω σε chip από Πυρίτιο (Si) οι οποίες προορίζονται για απεικονίσεις άμεσης θέασης. Αυτού του είδους η απεικόνιση είναι ικανή να δώσει εικόνες πολύ υψηλής ανάλυσης με μία πυκνότητα κατανομής των εικονοστοιχείων (pixels) γύρω στα 740 pixels ανά ίντσα σε μία VGA απεικόνιση των 740x480 pixels. Χρησιμοποιώντας αυτό το είδος μικροαπεικόνισης είναι εφικτό να χρησιμοποιήσουμε μία μεγάλη ποικιλία από οπτικές τεχνικές ώστε να μεγεθύνουμε εικόνες μικρού μεγέθους. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να εφαρμοστεί σε μία υψηλής ανάλυσης (High Definition - HD) τηλεόραση μεγάλου μεγέθους ή στη μικρή οθόνη ενός υπολογιστή χειρός. Επίσης αυτή η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κύρια τεχνολογία απεικόνισης είτε σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές είτε σε άλλες μελλοντικές εφαρμογές.[4]

6.2.3 Φορητές Εφαρμογές με Χρήση OLEDs

Απεικονίσεις οι οποίες μπορούν να πραγματοποιηθούν με μικρά σε μέγεθος OLEDs χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε διάφορες φορητές εφαρμογές, όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα, τα PDAs και τα σκόπευτρα στις φορητές κάμερες. Το πιο σημαντικό κριτήριο το οποίο μας επιτρέπει να χρησιμοποιούμε OLEDs σε φορητές εφαρμογές είναι ότι χαρακτηρίζονται από χαμηλή κατανάλωση ισχύος και είναι ιδιαίτερα ελαφριά και λεπτά. Η διατήρηση της κατανάλωσης ισχύος σε χαμηλά επίπεδα είναι ιδιαίτερα σημαντική στους notebook φορητούς υπολογιστές, στα PDAs και στα κινητά τηλέφωνα στα οποία υπάρχει απαίτηση η μπαταρία να διαρκεί όσο το δυνατόν περισσότερο.[4]

6.2.4 Απεικόνιση Χαμηλής Κατανάλωσης Ισχύος

Πολλές σύγχρονες προσεγγίσεις παρουσιάζουν ως βασικό αίτημα την ελάττωση της ισχύος που καταναλώνει η συσκευή. Αυτό πρακτικά ισούται με την κατασκευή OLED υψηλότερης απόδοσης μέσω της βελτιστοποίησης των οπτικών χαρακτηριστικών τους, τη δημιουργία ενός ιδιαίτερα αποδοτικού

συστήματος λειτουργίας και τη βελτίωση των υλικών που μας δίνουν την εκπομπή.

1. Κατασκευή OLED υψηλότερης απόδοσης μέσω της βελτιστοποίησης των οπτικών χαρακτηριστικών τους.

Μπορούμε να βελτιώσουμε την ποιότητα απόδοσης της εκπομπής από το γυάλινο υπόστρωμα προς τον αέρα μελετώντας και βελτιστοποιώντας τις οπτικές ιδιότητες του OLED. Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες η προσθήκη ενός στρώματος αεροζέλ από Πυρίτιο (Si), με δείκτη διάθλασης $n < 1,03$, μεταξύ του γυάλινου υποστρώματος και της ανόδου από ITO συνέβαλε σε μία μεγάλη αύξηση της απόδοσης του εκπεμπόμενου φωτός από τη συσκευή. Παρατηρήθηκε η εξαφάνιση του κυματοδηγούμενου φωτός το οποίο εκπέμπεται από την άκρη του γυάλινου υποστρώματος και επετεύχθη η αύξηση της απόδοσης του εκπεμπόμενου από τη συσκευή φωτός σε ποσοστά που αγγίζουν το 60%.

2. Δημιουργία ενός ιδιαίτερα αποδοτικού συστήματος λειτουργίας.

Τα OLEDs μπορούν να λειτουργήσουν με παροχή σταθερού συνεχούς (DC) ρεύματος χρησιμοποιώντας σχήματα τροφοδοσίας βασιζόμενα σε ενεργή μήτρα. Σε μία απεικόνιση OLED ενεργής μήτρας, κάθε εικονοστοιχείο (pixel) μπορεί να ανάψει ή να σβήσει ξεχωριστά εντός ενός συγκεκριμένου χρονικού πλαισίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται η συσκευή από τους περιορισμούς στην ανάλυση ή τις απαιτήσεις που υπάρχουν για πολύ μεγάλη στιγμιαία ένταση ρεύματος και είναι απαραίτητες παράμετροι για τη σωστή και αποδοτική λειτουργία απεικονίσεων με χρήση παθητικής μήτρας. Γίνεται λοιπόν εύκολα αντιληπτό ότι οι απεικονίσεις ενεργής μήτρας μπορούν να προκαλέσουν μείωση της απαιτούμενης πυκνότητας ρεύματος και της απαιτούμενης τάσης λειτουργίας οδηγώντας τη συσκευή σε υψηλότερους χρόνους ζωής.

3. Βελτίωση των υλικών που μας δίνουν την εκπομπή.

Ένας άλλος τρόπος ο οποίος οδηγεί στη μείωση της κατανάλωσης ισχύος είναι η αύξηση της απόδοσης της ακτινοβολούμενης ισχύος των κυττάρων ενός OLED. Αυτό μπορούμε να το πετύχουμε αυξάνοντας την αγωγιμότητα των ανεξάρτητων οργανικών στρωμάτων ενός κυττάρου. Η αγωγιμότητα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Sigma = n e \mu \quad (6.1)$$

Όπου n είναι η πυκνότητα των φορέων, e είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο και μ η ευκινησία των φορέων.

Οι δότες ή οι αποδέκτες στο εσωτερικό ενός οργανικού στρώματος μπορούν να προκαλέσουν αύξηση της πυκνότητας του ρεύματος. Σύμφωνα με την απλούστερη μηχανική παραδοχή ο λόγος παραγωγής singlet και triplet διεγερμένων καταστάσεων είναι 1 προς 3 και οδηγεί σε εσωτερική κβαντική απόδοση γύρω στο 25%. Αν ο παράγοντας σύζευξης του εκπεμπόμενου φωτός της συσκευής είναι γύρω στο 20%, ο οποίος εξάγεται από αρχές που διέπουν την απλή κλασσική οπτική, το ανώτερο όριο της εξωτερικής κβαντικής απόδοσης είναι γύρω στο 5%. Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες μπορεί να επιτευχθεί εξωτερική κβαντική απόδοση γύρω στο 8% χρησιμοποιώντας φωσφορίζουσες βαφές σαν κέντρο triplet εκπομπής.[4]

6.3 Χρόνος Ζωής

Ο απαιτούμενος χρόνος ζωής ενός OLED εξαρτάται καθαρά από την εφαρμογή και την επίδοση των προϊόντων φωτισμού που ήδη υπάρχουν. Η τεχνολογία πυρακτώσεως αναφέρει ένα εκτιμώμενο χρόνο ζωής γύρω στις 1000 ώρες. Για να λειτουργήσουν όμως τα OLED ως πηγές σταθερού φωτισμού πρέπει να εκτοπίσουν τις υπάρχουσες τεχνολογίες φθορισμού και επί της ουσίας πρέπει να φτάσουν το χρόνο ζωής τους. Πρακτικά ο χρόνος λειτουργίας για πηγές φωτός που βασίζονται στην τεχνολογία φθορισμού μπορεί να αγγίξει ακόμα και τις 15000 ώρες. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρόνου ζωής η ένταση φωτοβολίας ελαττώνεται ελαφρώς λιγότερο από 20%.

Ο χρόνος ζωής ενός βελτιστοποιημένου OLED δεν περιορίζεται τόσο σε περίπτωση που η εκπομπή φωτός σταματήσει απότομα, όσο όταν μειώνεται συνεχώς η φωτεινή έξοδος με την πάροδο του χρόνου. Έτσι ο χρόνος ζωής ενός OLED χαρακτηρίζεται σε συνάρτηση με το χρόνο μείωσης μίας γνωστής τιμής ρεύματος ή τάσης. Έτσι ένας ικανοποιητικός στόχος όσον αφορά το χρόνο ζωής ενός OLED θεωρείται αυτός που επιτρέπει φωτεινή ακτινοβολία με ένταση όχι μικρότερη του 80% της αρχικής για 15000 ώρες περίπου. Αν επιτευχθεί αυτός ο στόχος τα OLED θα έχουν συγκρίσιμο χρόνο ζωής με αυτό των διάφορων τεχνολογιών φθορισμού.

Ένας ακόμα παράγοντας που καθορίζει το χρόνο ζωής είναι η σταθερότητα του χρώματος. Το ιδανικό θα είναι να μην υπάρχει αξιοσημείωτη χρωματική διαφορά κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Αυτό μπορεί να γίνει πραγματικότητα αν το λευκό φως είναι εφικτό να παραχθεί με την ανάμιξη διαφορετικών χρωματικών υλικών στις ενεργές περιοχές ενός OLED ώστε να δημιουργηθεί η απαραίτητη φασματική έξοδος. Αξίζει να σημειώσουμε ότι αν ο χρόνος ζωής κάθε χρωματικού υλικού υπό τις συνθήκες λειτουργίας του, διαφέρει από υλικό σε υλικό τότε το χρώμα που θα παραχθεί είναι πολύ πιθανό να αποκλίνει αισθητά πριν μειωθεί η συνολική φωτοβολία κάτω από το ελάχιστο όριο που προσδιορίζει το χρόνο ζωής της συσκευής.[4]

6.4 Κόστος

Τα OLED παρέχουν ένα λεπτό εύκαμπτο μηχανικό φύλλο φωτισμού το οποίο μπορεί να τυλιχθεί γύρω από αντικείμενα για την παροχή περιβάλλοντος φωτισμού, διακοσμητικού φωτισμού, φωτισμού σκίασης ή συνδυασμού αυτών. Αυτές οι δυνατότητες αν χρησιμοποιηθούν σωστά από εξειδικευμένους σχεδιαστές μπορεί να αλλάξουν τον τρόπο με τον οποίο σκεφτόμαστε για το φωτισμό. Η βασική σκέψη όμως που πλανάται στο μυαλό όλων είναι το συνολικό κόστος του φωτισμού. Για τις εμπορικές και βιομηχανικές αγορές μία νέα τεχνολογία φωτισμού εγκρίνεται μόνο αν παρέχει και χαμηλό κόστος φωτισμού.

Αν υποθέσουμε ότι το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης είναι συγκρίσιμα μεταξύ των διάφορων τεχνολογιών φωτισμού, τότε η σύγκριση του συνολικού κόστους πρέπει να λάβει υπόψη το κόστος της αρχικής πηγής και το κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος ώστε αυτή να λειτουργεί. Σε αυτή την περίπτωση το κόστος σε συνάρτηση με το χρόνο παραγωγής ενός kilolumen φωτός δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις.

$$\text{Κόστος}(t) = \text{κόστος_πηγής} + A \quad (6.2)$$

$$\text{Όπου } A = \frac{1000 \text{ L} \times \text{κύκλος_διεργασίας} \times \text{κόστος ρεύματος} \times t}{\epsilon \times \text{απόδοση_φωτισμού}} \quad (6.3)$$

Για ένα OLED που παράγει 120 Lumen/Watt το κόστος πηγής για να παράγει ένα συνολικό κόστος φωτισμού συγκρίσιμο με τις σημερινές τεχνολογίες φθορισμού είναι περίπου 7\$/kilolumen φωτός. Από τις παραπάνω σχέσεις είναι σαφές ότι αν η παραγωγικότητα αυξηθεί ακόμα περισσότερο, αυτό είναι πολύ πιθανό να οφείλεται στην τεχνολογία των OLEDs. Ο προφανής στόχος είναι αποτελεσματικότητα 100% και για ένα φάσμα λευκού φωτός αντιστοιχεί σε παραγωγικότητα 350 περίπου Lumen/Watt. Ακόμα και σε αυτό το επίπεδο επίδοσης το κόστος της πηγής πρέπει να είναι λιγότερο από 11\$/kilolumen φωτός. Ως αναμενόμενη συνέπεια των απαιτήσεων της αγοράς τα κόστη θα είναι συγκρίσιμα μέσα στα επόμενα 2 χρόνια.

Κεφάλαιο 7^ο - Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επιδιώξεις

Στην πτυχιακή μας εργασία παρουσιάσαμε και αναλύσαμε τη δομή, τη χρήση και τη λειτουργία των Οργανικών Φωτοδιόδων και των Οργανικών Τρανζίστορ. Αυτά τα στοιχεία κατέχουν εξέχουσα θέση στη λειτουργία των σύγχρονων ηλεκτρονικών. Η εξέλιξη της λειτουργίας των Οργανικών Φωτοδιόδων και των Οργανικών Τρανζίστορ μπορεί να συμβάλλει αποφασιστικά στην εξέλιξη και βελτιστοποίηση της λειτουργίας πολλών ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, μικροϋπολογιστικών και οπτικοηλεκτρονικών διατάξεων. Τα οργανικά υλικά στα οποία βασίζονται είναι ενώσεις Άνθρακα (C) και Υδρογόνου (H₂), οι οποίες παρουσιάζουν ιδιότητες παρόμοιες με αυτές των ημιαγωγών και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βασικά συστατικά στοιχεία στα σύγχρονα ηλεκτρονικά. Οι συσκευές που μπορούν να μας προσφέρουν είναι παρόμοιες με τις συσκευές που όλα αυτά τα χρόνια μας έδινε η τεχνολογία που βασιζόταν στο Πυρίτιο (Si) ή στο Γερμάνιο (Ge), με πλεονέκτημα το γεγονός ότι οι ηλεκτρονικές συσκευές που μπορούν να συνθέσουν τα οργανικά υλικά βασίζονται σε εφαρμογές στις οποίες τόσο το Πυρίτιο (Si) όσο και το Γερμάνιο (Ge) δε μπόρεσαν να ανταπεξέλθουν. Επιπρόσθετα οι οργανικές ενώσεις εκτός από χαμηλό κόστος, χαρακτηρίζονται και από μερικά άλλα θετικά στοιχεία. Έχουν απλούστερες διαδικασίες παρασκευής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές οι οποίες αναπτύσσονται και σε μικρές και σε μεγάλες διαστάσεις, αλλά και σε εύκαμπτα υποστρώματα.

Το μόνο που πρέπει να προσέξουμε αν θέλουμε να πορευτούμε με τα οργανικά ηλεκτρονικά και να καρπωθούμε εις το έπακρο τα οφέλη που απορρέουν από τη χρήση τους στις σύγχρονες ηλεκτρονικές εφαρμογές είναι το γεγονός ότι είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στο νερό και γενικότερα στην υγρασία, τον περιβαλλοντικό αέρα και το οξυγόνο. Παρεμβάσεις αυτών των φυσικών στοιχείων μπορούν να μειώσουν κατά πολύ το χρόνο ζωής συσκευών που έχουν ως βάση τα οργανικά υλικά. Για το σκοπό αυτό κρίνεται απαραίτητη η μελέτη, η εύρεση και η χρήση κατάλληλων υλικών που θα προστατέψουν τις συσκευές μας από αυτούς τους επιβλαβείς παράγοντες. Επίσης καλό θα ήταν

να βρεθούν αποτελεσματικές τεχνικές μαζικής παραγωγής ή να εξελιχθούν οι είδη υπάρχουσες ώστε να μειωθεί ακόμα περισσότερο το κόστος και να αυξηθεί το πλήθος των παραγόμενων προϊόντων.

Αν οι οργανικοί ημιαγωγοί προέρχονται από εμβάπτιση σε διαλύματα προκύπτουν τιμές ευκινησίας φορτίων παραπλήσιες με αυτές των OFETs και OLEDs που έχουν κατασκευαστεί με εναπόθεση εν κενό. Τα τελευταία χρόνια η εξέλιξη των οργανικών ηλεκτρονικών είναι ραγδαία. Από τους οργανικούς ημιαγωγούς αυτοί που εναποτίθενται με εξάχνωση εν κενό έχουν δημιουργήσει στους επιστήμονες τις περισσότερες προσδοκίες, διότι χαρακτηρίζονται από άριστα οργανωμένη δομή χάρη στη μέθοδο εναπόθεσης τους. Από τη στιγμή που η ανάγκη για ηλεκτρονικές εφαρμογές χαμηλού κόστους θα γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη αναμένεται τα οργανικά ηλεκτρονικά να κυριαρχήσουν στο εμπόριο.

Αναφορές - Βιβλιογραφία

- [1] Zhigang Li - Hong Meng. Organic Light-Emitting Materials and Devices.
- [2] Διδακτορική Διατριβή Γεώργιος Χ. Χαιδόγιαννος Διπλωματούχος Χημικός Μηχανικός Ε.Μ.Π. (2007). Ολιγομερικά Κρυσταλλικά Υλικά για Εφαρμογές σε Οργανικές Διατάξεις Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου.
- [3] Howard E. Katz and Jia Huang. Department of Materials Science and Engineering, Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland 21218. Thin-Film Organic Electronic Devices.
- [4] Zakaya H. Kafafi . Organic Electroluminescence.
- [5] Wikipedia - Organic Field Effect Transistor
http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_field-effect_transistor
- [6]<http://www.ipc.uni-linz.ac.at/os/Organic-Field-effect-transistors-intro.pdf>
- [7] Βασιλοπούλου Μαρία Δρ. Φυσικός. Οργανικές Δίοδοι Εκπομπής Φωτός (OLEDs) για Κατασκευή Εύκαμπτων Οθονών και Στερεών Πηγών φωτισμού. ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» Ιούλιος 2008
- [8] Wikipedia - Organic Light Emitting Diode
http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_light-emitting_diode
- [9] Jan Kalinowski Technical University of Gdansk, Poland. Organic Light-Emitting Diodes Principles, Characteristics and Processes.