

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕ  
ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΑ ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ  
ΩΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΣΤΙΣ  
ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ**

**ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ: ΝΑΚΟΣ ΜΙΛΤΙΑΔΗΣ**

**ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΤΑΘΑΤΟΣ ΗΛΙΑΣ**

**ΠΑΤΡΑ ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2014**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Σκοπός της συγκεκριμένης πτυχιακής είναι η έρευνα για την απόκτηση γνώσεων, όσον αφορά τη λειτουργία, τη χρησιμότητα και το σχεδιασμό των οργανικών τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (OFET), τρανζίστορ δηλαδή που στηρίζονται σε οργανικά ημιαγώγιμα υλικά. Τα OFET θεωρούνται σαν μια βιώσιμη λύση συγκρινόμενη με τα πιο παραδοσιακά και περισσότερο χρησιμοποιούμενα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET), των οποίων η κατασκευή στηρίζεται σε ανόργανους ημιαγωγούς, όπως το πυρίτιο (Si) και το γερμάνιο (Ge). Τα ανόργανα ημιαγώγιμα στοιχεία με τη μορφή των τρανζίστορ (FET) διαδέχθηκαν στις εγκαταστάσεις των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων τις ηλεκτρονικές λυχνίες και συνέχισαν να χρησιμοποιούνται για δεκαετίες, αφού η εύρεση, η διάθεση και εκμετάλλευση των οποίων είχε ήδη προηγηθεί αρκετά χρόνια πριν τα OFET, των οποίων η ανακάλυψη ανακοινώθηκε για πρώτη φορά το 1987. Παρόλη όμως την ευρεία εφαρμογή των FET σε διάφορους τομείς της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών, εξαιτίας των διάφορων προβλημάτων που παρουσιάζουν, όπως διάρκεια ζωής, απόδοση, φιλικότητα στο περιβάλλον, ευκολία στη διεργασία και εφαρμογή αυτών, αλλά και η ανάγκη εξεύρεσης και χρήσης νέων υλικών σύγχρονης τεχνολογίας, οδήγησαν το επιστημονικό ενδιαφέρον να στραφεί στη μελέτη των OFET κατά τα τελευταία χρόνια. Η συγκέντρωση επομένως των γνώσεων αυτών θα είναι μια βοήθεια για μελλοντική εκτενέστερη μελέτη των OFET και βελτίωση της χρησιμότητάς τους.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	I
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	II
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Εισαγωγή.....	1
1.1 Η έννοια των τρανζίστορ και η σημαντικότητα της ύπαρξης των FET για την εξελικτική πορεία της επιστήμης των ηλεκτρονικών από τις αρχές του 20 <sup>ου</sup> αιώνα έως και σήμερα. ....	1
1.2 Η αναγκαιότητα ενσωμάτωσης του OFET στη σύγχρονη τεχνολογία για περαιτέρω εξέλιξη της επιστήμης της ηλεκτρονικής.....	2
1.3 Ιστορική αναδρομή των OFET.....	3
1.4 Σκοπός της παρούσας εργασίας.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Εισαγωγή στους οργανικούς ημιαγωγούς .....	5
2.1 Η έννοια των ημιαγωγών.....	5
2.2 Ιστορική αναφορά στους οργανικούς ημιαγωγούς.....	5
2.3 Το μοντέλο των ελεύθερων ηλεκτρονίων στους οργανικούς ημιαγωγούς.....	7
2.3.1 Η σπουδαιότητα του άνθρακα ως βασικό συστατικό για την κατασκευή οργανικών ηλεκτρονικών συσκευών .....	7
2.3.2 Συζευγμένα μόρια ως σωματίδιο σε κουτί .....	8
2.3.3 Τα επίπεδα ενέργειας των συζευγμένων μορίων .....	14
2.3.4 Τα επίπεδα ενέργειας των ημιαγώγιμων πολυμερών .....	16
2.4 Φορείς φορτίου σε συζευγμένα μόρια .....	17
2.4.1 Μεταφορά φορτίου στους οργανικούς ημιαγωγούς .....	18
2.4.1.1 Ενδογενείς και εξωγενείς ημιαγωγοί .....	18
2.4.1.2 Διαταραγμένοι (άμορφοι) οργανικοί ημιαγωγοί .....	19
2.5 Συμπεράσματα .....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Οργανικά ημιαγώγιμα υλικά .....	21
3.1 Μικρά μόρια.....	22
3.1.1 Συγχωνευμένες δομές δακτυλίων .....	23
3.1.2 Ολιγομερή .....	25
3.1.3 Σταθερότητα έναντι του αέρα .....	27
3.2 Μεγάλα μόρια .....	29
3.2.1 Πολυμερικές ενώσεις .....	30
3.3 Οργανικοί αγωγοί .....	34

3.4 Συμπεράσματα .....	35
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Κατασκευή των OFET .....</b>	<b>36</b>
4.1 Εισαγωγή.....	36
4.2 Βασική δομή και λειτουργία των OFET.....	38
4.3 Τρόποι κατασκευής των OFET και παραλλαγές αυτών.....	39
4.3.1 Τεχνικές εναπόθεσης .....	39
4.3.1.1 Εναπόθεση μέσω θερμικής εξάτμισης .....	41
4.3.1.2 Υγρή εναπόθεση .....	43
4.3.1.3 Τεχνικές εναπόθεσης σε πολυμερή .....	45
4.3.2 Τεχνικές διαμόρφωσης .....	48
4.3.3 Χαρακτική .....	50
4.4 Κρυσταλλικότητα ημιαγωγικών υλικών και τεχνικές κρυστάλλωσης .....	51
4.4.1 Κρυστάλλωση πολυμερών.....	52
4.4.2 Μικρά κρυσταλλικά μόρια .....	52
4.4.3 Τάση κατωφλίου και στρες πόλωσης .....	53
4.5 Ροή των διαδικασιών κατασκευής OFET.....	54
4.5.1 Λιθογραφία με στένσιλ.....	56
4.5.2 Ενθυλάκωση με παρυλένιο .....	58
4.5.3 Ενθυλάκωση με πολυβινυλαλκοόλη.....	59
4.5.4 Ψηφιακή λιθογραφία.....	59
4.6 Συμπεράσματα.....	61
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Μοντελοποίηση και χαρακτηρισμός συσκευών OFET .....</b>	<b>62</b>
5.1 Μοντέλα τρανζίστορ.....	62
5.2 Πρότυπα μοντέλα. ....	63
5.3 Παράμετροι.....	64
5.3.1 Κινητικότητα .....	65
5.3.2 Τάση κατωφλίου .....	67
5.3.3 Αντίσταση επαφής .....	71
5.3.4 Υστέρηση.....	73
5.3.5 Διαρροή πύλης.....	74
5.3.6 Κλίση υποκατωφλίου.....	75
5.3.7 Αγωγιμότητα εξόδου .....	76
5.4 Χαρακτηρισμός.....	77
5.4.1 Σάρωση πύλης και συνάρτηση μεταφοράς.....	78
5.4.2 Σάρωση εκροής και χαρακτηριστική εξόδου.....	79

5.4.3 Χωρητικότητα.....	79
5.4.4 Διαρροή πύλης.....	79
5.5 Συμπεράσματα.....	80
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – Εφαρμογές των OFET.....</b>	<b>81</b>
6.1 Εισαγωγή .....	81
6.2 Λειτουργία των OFET ως αυτόνομες συσκευές .....	81
6.2.1 OFET εκπομπής φωτός .....	81
6.3 Εφαρμογές των OFET ως συστατικά άλλων συσκευών. ....	82
6.3.1 Συσκευές οπτικής απεικόνισης .....	83
6.3.1.1 Οθόνες υγρών κρυστάλλων .....	84
6.3.1.2 Ηλεκτρονικό χαρτί .....	89
6.3.2 Αισθητήρες .....	94
6.3.2.1 Αισθητήρες φωτός .....	95
6.3.2.2 Αισθητήρες αερίων .....	95
6.3.2.3 Αισθητήρες συστοιχίας .....	96
6.3.3 Συστήματα RFID .....	98
6.4 Συμπεράσματα .....	104
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>106</b>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Εισαγωγή

## **1.1 Η έννοια των τρανζίστορ και η σημαντικότητα της ύπαρξης των FET για την εξελικτική πορεία της επιστήμης των ηλεκτρονικών από τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα έως και σήμερα.**

Κατά τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία γνώρισε ραγδαία εξέλιξη χάρη στην χρήση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, τα οποία σήμερα αποτελούν μέρος σχεδόν κάθε ηλεκτρονικής κατασκευής.

Ακριβώς όπως τα ηλεκτρονικά είναι πλέον απαραίτητα σε όλες τις μορφές των συσκευών και μηχανημάτων, για τις καθημερινές μας δραστηριότητες, το ίδιο ισχύει και για τη συσκευή ημιαγωγών γνωστή ως τρανζίστορ.

Το τρανζίστορ, ή αλλιώς κρυσταλλοτρίοδος, είναι μια διάταξη ημιαγωγών στερεάς κατάστασης, που χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές της επιστήμης των ηλεκτρονικών, για ενίσχυση ή μεταβολή ηλεκτρονικών σημάτων και ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα τρανζίστορ, με την ανακάλυψη και την σταδιακά αυξανόμενη χρήση τους έφεραν επανάσταση στον τομέα των ηλεκτρονικών.

Θεωρούμενο ως ίσως η σημαντικότερη ανακάλυψη του 20<sup>ου</sup> αιώνα, όσον αφορά τα ηλεκτρονικά και όντας υπεύθυνο για τη δημιουργία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και μικροεπεξεργαστών, το τρανζίστορ, χαρακτηρίζεται ως το βασικό δομικό στοιχείο των ηλεκτρονικών συσκευών, και είναι πανταχού παρών στα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα.

Διάφοροι οι τρόποι κατασκευής των τρανζίστορ ανά τα χρόνια, με πολλές και διαφορετικές μοντελοποιήσεις και κατηγορίες το καθένα. Ένα από τα σημαντικότερα μοντέλα τρανζίστορ είναι το τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (Field Effect Transistor ή εν συντομία FET).

Το FET, γνωστό και ως μονοπολικό τρανζίστορ, καθώς αφορά λειτουργία ενιαίου φορέα, είναι ένας τύπος τρανζίστορ που χρησιμοποιεί ένα ηλεκτρικό πεδίο, για να ελέγχει το σχήμα και ως εκ τούτου την αγωγιμότητα ενός καναλιού ενός τύπου φορέα φορτίου σε υλικό ημιαγωγού.

Πριν από τα FETs, το ρόλο τους σε εφαρμογές των ηλεκτρονικών έπαιζαν τα τρανζίστορ διπολικής διασταύρωσης (Bipolar Junction Transistor ή αλλιώς BJTs).

Παρόλο που η έννοια των τρανζίστορ επίδρασης πεδίου προηγείται των τρανζίστορ διπολικής διασταύρωσης, τα FETs δεν είχαν υλοποιηθεί φυσικώς πριν από τα BJTs λόγω των περιορισμών των υλικών ημιαγωγών και της σχετικής ευκολίας παρασκευής BJTs σε σύγκριση με τα FETs κατ' εκείνη τη χρονική περίοδο.

Τα FETs, τα οποία αρχικά βασίζονταν σε λυχνίες, με την πάροδο του χρόνου ανακατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας διόδους στερεάς κατάστασης, όπως το πυρίτιο (Si) και το γερμάνιο (Ge).

Έκτοτε, η κατασκευή και χρήση τρανζίστορ αποτελούμενων από ανόργανα ημιαγωγικά υλικά παγιώθηκε με την έκθεση και προώθησή τους στην αγορά, σε όλες τις φάσεις της τεχνολογίας

των ηλεκτρονικών, κυρίως λόγω της ευρείας ύπαρξης πυριτίου, της ευκολίας στην κατασκευή και του χαμηλού κόστους παραγωγής γερμανίου.

Αν και πολυάριθμες οι κατηγορίες των τρανζίστορ FET, αυτή η εργασία πραγματεύεται την πιο εξελιγμένη μορφή FET, αυτή των οργανικών τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (Organic Field Effect Transistors ή αλλιώς OFETs).

Γενικά, με τον όρο οργανικά ηλεκτρονικά, ή αλλιώς πλαστικά ή πολυμερή ηλεκτρονικά, αναφερόμαστε στον κλάδο εκείνο της επιστήμης των υλικών που ασχολείται με ηλεκτρικά αγωγή πολυμερή και αγωγή μικρά μόρια. Η ονομασία τους, οργανικά ηλεκτρονικά, προήλθε λόγω του ότι τα πολυμερή και τα μικρά μόρια έχουν ως βάση τον άνθρακα, εν αντιθέσει με τα παραδοσιακά ηλεκτρονικά, τα οποία βασίζονται σε ανόργανους αγωγούς και ημιαγωγούς, όπως ο χαλκός ή το πυρίτιο αντίστοιχα.

Όταν μιλάμε για οργανικά τρανζίστορ, και συγκεκριμένα για οργανικά τρανζίστορ επίδρασης πεδίου, αναφερόμαστε σε έναν από τους κλάδους των οργανικών ηλεκτρονικών, εκείνο των OFETs, για τα οποία συντάχθηκε η εν λόγω εργασία και τα οποία λόγω μιας πληθώρας πλεονεκτημάτων που φέρουν θεωρούνται πλέον ως η τεχνολογία του μέλλοντος.

## **1.2 Η αναγκαιότητα ενσωμάτωσης του OFET στη σύγχρονη τεχνολογία για περαιτέρω εξέλιξη της επιστήμης της ηλεκτρονικής**

Με χαρακτηριστικά όπως χαμηλός θερμικός προϋπολογισμός, που απαιτείται για την κατασκευή τους, και υψηλός βαθμός ευελιξίας, άρχισαν να εγείρουν σημαντικά το ενδιαφέρον για μελέτη και έρευνα γύρω από τα οργανικά τρανζίστορ επίδρασης πεδίου κατά τα τελευταία χρόνια, που οι ρυθμοί και το κόστος παραγωγής παίζουν πλέον σημαντικότατο ρόλο, λόγω της ευρείας και καθημερινής χρήσης ηλεκτρονικών συσκευών, που στην πλειοψηφία τους απαρτίζονται προς το παρόν από ανόργανα τρανζίστορ.

Στους οργανικούς ημιαγωγούς, οι δεσμοί που αναπτύσσονται μεταξύ των μορίων τους είναι συνήθως ασθενείς, λόγω του ότι σχηματίζονται από δεσμούς van der Waals, αδύναμες ελκτικές δυνάμεις δηλαδή μεταξύ των ατόμων των μορίων τους. Έτσι, κανένας ομοιοπολικός δεσμός δεν χρειάζεται να μεταβληθεί. Χρησιμοποιώντας μια μόνο μικρή ενεργητική είσοδο, τα οργανικά ημιαγωγά υλικά μπορούν εύκολα να τεθούν σε επεξεργασία.

Υπάρχει επίσης η δυνατότητα σχηματισμού ημιαγωγιμων καναλιών σχεδόν σε οποιαδήποτε επιφάνεια ή υπόστρωμα με χρήση υλικών εκτύπωσης, εξατμιζόμενων (τεχνική εναπόθεσης) και καταλυμένων (μέσω εξάτμισης, ξεφλουδίσματος ή άλλων διαβρωτικών διεργασιών) υλικών.

Η συνεχής βελτίωση των υλικών αλλά και ο τρόπος διαχείρισης τους για το σχεδιασμό ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, καθιστά την απόδοση κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτή των (περισσότερων) ανόργανων ημιαγωγιμων υλικών, παρόλο που πρακτικά, οι ασθενείς δεσμοί και η εύκολη μεταχείριση των οργανικών αυτών μορίων δημιουργεί συνήθως προβλήματα όσον αφορά την απόδοση.

Με εκμετάλλευση των παραπάνω ιδιοτήτων, τα OFETs καθίστανται ικανά να προσκολληθούν σε οποιοδήποτε υλικό, επιφάνεια ή υπόστρωμα, όπως για παράδειγμα σε πλαστικό ή γυαλί.

### 1.3 Ιστορική αναδρομή των OFET

Παρόλο που το ενδιαφέρον για τους οργανικούς ημιαγωγούς άρχισε να εντείνεται στα τέλη της δεκαετίας του '80 και αρχές του '90, και κανείς δεν περίμενε πως το φαινόμενο των οργανικών ημιαγωγών θα ανήγειρε τελικά τέτοιο ενδιαφέρον, ώστε το μέλλον ολόκληρης της επιστήμης των ηλεκτρονικών να στραφεί στα οργανικά υλικά, η ασχολία επιστημόνων και ερευνητών με οργανικά ημιαγωγικά υλικά ξεκινάει πολύ πιο πριν, όμως έρευνες, μελέτες και κατασκευές βρίσκονταν ακόμη σε πειραματικό στάδιο.

Υπάρχουν διάφορα διπλώματα ευρεσιτεχνίας για το πώς θα μπορούσε να λειτουργήσει ένα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου, με πρωτοπόρο, το έτος 1930, τον αυτρο-ουγγρικής καταγωγής φυσικό Δρ. Julius Edgar Lilienfeld, ο οποίος σχεδίασε το πρώτο τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET). Σύμφωνα με τον δικό του σχεδιασμό και μελέτες, ένα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου δρα ως πυκνωτής, με ένα αγωγίμο κανάλι μεταξύ μιας πηγής και ενός ηλεκτροδίου εκροής, με τον έλεγχο της ποσότητας των φορέων φορτίου που ρέουν στο σύστημα να γίνεται μέσω τάσης, που εφαρμόζεται στο ηλεκτρόδιο της πύλης.

Πέντε χρόνια αργότερα, ο γερμανός φυσικός Δρ. Oskar Heil πρότεινε ένα άλλο τρανζίστορ επίδρασης πεδίου, στο οποίο με χρήση ενός ηλεκτρικού πεδίου γινόταν έλεγχος της αντίστασης σε ένα ημιαγωγίμο υλικό.

Το 1960, οι τότε ερευνητές της Bell Telephone Laboratories (γνωστή και ως Bell Labs) Δρ. Dawon Kahng και Δρ. Martin "John" M. Atalla, σχεδίασαν, προετοίμασαν και κατασκεύασαν το πρώτο τρανζίστορ επίδρασης πεδίου, με χρήση ενός ημιαγωγού μετάλλου-οξειδίου (Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor ή MOSFET).

Το 1982 έγινε η πρώτη επίδειξη ενός ημιαγωγίμου πυκνωτή μετάλλου-οξειδίου (πυκνωτής MOS), από τους F. Ebisawa, T. Kurokawa και S. Nara, με χρήση οργανικών ημιαγωγών. Ο εν λόγω ημιαγωγίμος πυκνωτής κατασκευάστηκε, έχοντας ως ημιαγωγό το οργανικό πολυμερές ονόματι πολυακετυλένιο, σε ένα διηλεκτρικό (μονωτής) πύλης πολυσιλοξάνης, με αλουμίνιο για την πύλη και χρυσό για την πηγή και τα ηλεκτρόδια. Με τον πυκνωτή να λειτουργεί σε κατάσταση ελάττωσης, δείχνοντας μόνο ένα μικρό ποσοστό ισχύουσας διαφοροποίησης, κατά την ανάλυσή του για διαγωγιμότητα, αμέσως φάνηκε η χρησιμότητά του σχεδίου αυτού στο μέλλον, καταλήγοντας σε ένα εύρημα με μεγάλη προοπτική για τα τρανζίστορ λεπτού φιλμ (Thin Film Transistors ή αλλιώς TFTs).

Η κατασκευή του πρώτου οργανικού τρανζίστορ επίδρασης πεδίου, βασίστηκε σε πολυμερές μορίων θειοφαίνιου, ενός είδους συζευγμένου πολυμερούς ικανού να άγει φορτίο. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να μειωθεί δραματικά η ανάγκη χρήσης ημιαγωγών μετάλλου-οξειδίου, που διαθέτουν αρκετό κόστος. Το πρώτο αυτό OFET, παρουσιάστηκε από τους H. Koezuka, A. Tsumura και T. Ando το 1987.

Την ίδια περίοδο αναφέρθηκαν παραδείγματα οργανικο-διαλυτών ουσιών που απαρτίζονταν κατά κόρον από πολυθειοφένιο (πολυμερισμένο θειοφαίνιο).

Οι πρώτες συσκευές αποτελούμενες από OFET κατασκευάστηκαν επάνω σε υποστρώματα με απευθείας πολυμερισμό αδιάλυτων μεμβρανών πολυακετυλενίου και πολυθειοφένιου.

Με την ανακοίνωση της ανάπτυξης μιας διαλυτής μορφής πολυθειοφένης από τον K.Y. Jen, μέσω του επιστημονικού περιοδικού Chemical Communications το 1986, και με την γνωστοποίηση της εφαρμογής αυτής σε OFET από τον A. Assadi το 1988 μέσω του επιστημονικού περιοδικού Applied Physics Letters, το ενδεχόμενο για δημιουργία



εκτυπώσιμων ημιαγωγίων συστημάτων με κόστος σαν κι αυτού των μέσων ενημέρωσης που χρησιμοποιούν τυπωμένο χαρτί, η πιθανότητα ύπαρξης τέτοιων οικονομικών κατασκευών κέντρισε αμέσως το ενδιαφέρον.

Εκτός της βελτίωσης των υλικών απαραίτητων για την κατασκευή OFET, με την περαιτέρω μελέτη και έρευνα όσον αφορά τα οργανικά υλικά, εξέλιξη υπήρξε και στον τρόπο επεξεργασίας και κατασκευής αλλά και στο χαρακτηρισμό των συσκευών.

Τα OFET, στην πλειονότητά τους τώρα σχεδιάζονται βάσει του TFT μοντέλου. Το αποτέλεσμα είναι η κατασκευή οργανικών τρανζίστορ με χρήση υλικών μικρότερης αγωγιμότητας, όπου θα έχουν καλύτερη κινητικότητα επίδρασης πεδίου και on-off αναλογίες ρεύματος.

Τα OFETs σήμερα φαίνονται μελλοντικά απαραίτητα περισσότερο από κάθε άλλη φορά. Η απόδοσή τους, βάσει πολλών μετρήσεων, έχει ξεπεράσει κατά πολύ την απόδοση του άμορφου πυριτίου, έχουν αναπτυχθεί διάφορες βιομηχανικά κλιμακούμενες στρατηγικές επεξεργασίας, και το κόστος και η ενεργειακή συμβολή των διαδικασιών αυτών είναι σημαντικά μικρότερα από εκείνες του άμορφου πυριτίου, όμως δεν έχουν γνωρίσει ακόμη την προσδοκώμενη, σύμφωνα με τα προαναφερόμενα θετικά τους χαρακτηριστικά, βιομηχανική αποδοχή.

Για την ώρα, κύριο μέλημα των ερευνητικών οργανισμών, φορέων, και προγραμμάτων που ασχολούνται με τα οργανικά τρανζίστορ επίδρασης πεδίου, είναι η ανάπτυξη εφαρμογών ικανών να ερευνήσουν περαιτέρω τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των OFET, ώστε να μπορούν να εκμεταλλεύονται σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό τις ιδιότητές τους και φυσικά να αναγνωρισθεί και να γίνει αποδεκτή η σημαντικότητα της ύπαρξής τους στην καθημερινότητά μας.

## **1.4 Σκοπός της παρούσας εργασίας**

Τα OFETs θεωρούνται πλέον ως μια βιώσιμη λύση συγκρινόμενα με τα πιο παραδοσιακά, ευρέως γνωστά και περισσότερο χρησιμοποιούμενα FETs, λόγω της ανάγκης που υπάρχει για βελτίωση διαφόρων παραγόντων, όπως διάρκεια ζωής, απόδοση, φιλικότητα στο περιβάλλον, ευκολία στη διεργασία και εφαρμογή, αλλά και ανάγκη εξεύρεσης και χρήσης νέων υλικών σύγχρονης τεχνολογίας.

Έτσι, σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η έρευνα για την απόκτηση γνώσεων, όσον αφορά τη λειτουργία, τη χρησιμότητα και το σχεδιασμό των οργανικών τρανζίστορ επίδρασης πεδίου, ώστε η συγκέντρωση των γνώσεων αυτών να αποτελέσει υπόβαθρο για μελλοντική, εκτενέστερη μελέτη των OFET και βελτίωση της χρησιμότητάς τους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Εισαγωγή στους οργανικούς ημιαγωγούς

### 2.1 Η έννοια των ημιαγωγών

Καταρχήν, για να γίνει κατανοητή η έννοια των οργανικών ημιαγωγών πρέπει να γίνει αντιληπτό το τι ορίζεται ως ημιαγωγός.

Ημιαγωγός ονομάζεται οποιοδήποτε υλικό παρουσιάζει ηλεκτρική αγωγιμότητα σε βαθμό μεταξύ εκείνης ενός αγωγού και ενός μονωτή, και η ειδική του αντίσταση μειώνεται ραγδαία με την αύξηση της θερμοκρασίας του.

Όπως τα τρανζίστορ θεωρούνται βασικό δομικό στοιχείο για την ανάπτυξη της τεχνολογίας της ηλεκτρονικής στο βαθμό που βρίσκεται σήμερα, οι μοναδικές ιδιότητες που διαθέτουν οι ημιαγωγοί τους καθιστούν απαραίτητο θεμέλιο της επιστήμης της ηλεκτρονικής.

Η ικανότητα των ημιαγωγών να αλλάζουν την αγωγιμότητά τους μέσω προσμίξεων (μέθοδος ντόπινγκ) ή με αλληλεπίδραση με ένα άλλο φαινόμενο όπως για παράδειγμα ένα ηλεκτρικό πεδίο ή το φως, τους καθιστά αρκετά χρήσιμους σε διάφορες κατασκευές αφού μπορούν για παράδειγμα να ενισχύουν, να εναλλάσσουν ή να μετατρέπουν μια ενέργεια εισόδου σε ένα σύστημα ή συσκευή.

Όπως έγινε αναφορά στην αρχή του προηγούμενου κεφαλαίου, με την ανακάλυψη του τρανζίστορ, ανόργανα ημιαγωγά υλικά όπως το πυρίτιο και το γερμάνιο άρχισαν να αναλαμβάνουν κυρίαρχο ρόλο στην επιστήμη της ηλεκτρονικής, αποτελώντας ένα άρρηκτα δεμένο πλέον μέρος των ηλεκτρονικών κατασκευών.

Παρόλη όμως την εξεύρεση και ευρεία χρήση ανόργανων υλικών, με την συνεχή ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών, από τις αρχές ήδη του 21<sup>ου</sup> αιώνα άρχισε να γίνεται σημαντική η μελέτη και η ανάπτυξη τεχνικών και μεθόδων προσαρμογής νέων υλικών, τέτοιων, ώστε να ανταπεξέρχονται στις ανάγκες της σύγχρονης επιστήμης. Αυτό γίνεται γιατί η τεράστια έκταση που καλύπτει ο τομέας των ηλεκτρονικών, καθώς και οι αλλαγές στον τομέα αυτό κατά τα τελευταία χρόνια, δημιούργησε την ανάγκη για εύρεση πιο αποτελεσματικών υλικών με σκοπό την ανάπτυξη νέων εφαρμογών και ελάττωση του κόστους κατασκευών. Έτσι, η επιστημονική έρευνα έρχεται σήμερα πρόσωπο με πρόσωπο με μια νέα κατηγορία ημιαγωγιμων υλικών, αυτή των οργανικών ημιαγωγών.

### 2.2 Ιστορική αναφορά στους οργανικούς ημιαγωγούς

Οι οργανικοί ημιαγωγοί είναι ημιαγωγοί που αποτελούνται από οργανικά υλικά και διαθέτουν ηλεκτρική αγωγιμότητα που βρίσκεται μεταξύ εκείνης των μονωτών και των αγωγών.

Η ανακάλυψη όμως των οργανικών ημιαγωγών δεν ξεκίνησε στις αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα (παρόλο που λόγω της ανάγκης εμφάνισης καινούργιων τρόπων περαιτέρω εξέλιξης της τεχνολογίας, ώστε αυτή να συμβαδίζει με τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες του σύγχρονου ρυθμού ζωής μας, το ενδιαφέρον άρχισε να στρέφεται σε αυτούς την τελευταία δεκαετία). Οι πρώτες μελέτες των υλικών αυτών χρονολογούνται από τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Για την ακρίβεια, γίνονταν συνεχώς έρευνες, ανακαλύψεις, παρατηρήσεις και εφαρμογές περί των

οργανικών ημιαγωγίων υλικών σε διάφορα στάδια του προηγούμενου αιώνα, οι οποίες φυσικά συνεχίζουν να γίνονται μέχρι και σήμερα.

Πίσω στο 1862, ένας αναλυτικός χημικός ονόματι Henry Letheby, μέσω μιας ηλεκτροχημικής μεθόδου για τον προσδιορισμό μικρών ποσοτήτων ανιλίνης, κοινοποίησε για πρώτη φορά ένα εν μέρει αγωγίμο υλικό, την πολυανιλίνη (polyaniline ή PANI).

Στη δεκαετία του 1950, έρευνες έδειξαν ότι πολυκυκλικές αρωματικές ενώσεις μπορούν να σχηματίσουν σύνθετα ημιαγωγίμα άλατα μεταφοράς φορτίου με αλογόνα.

Το 1954, ερευνητές των Bell Laboratories και άλλων ερευνητικών και επιστημονικών προγραμμάτων, ανακοίνωσαν συμπλέγματα μεταφοράς φορτίου (charge-transfer complexes, αλλιώς CT complexes ή electron-donor-acceptor complexes) με αρκετά χαμηλές αντιστάσεις (γύρω στα 8 ohms\*cm) σε συνδυασμούς περυλενίου με ιώδιο ή βρώμιο και αναφέρθηκε υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα (διαλύματος τιμής 0.12 S/cm) στο σύμπλεγμα περυλενίου-ιώδιου, (αρκετά ικανοποιητική) ένδειξη πως οι οργανικές ενώσεις μπορούν να μεταφέρουν ρεύμα.

Το ηλεκτρόνιο-δέκτης τετρακυανοκινωδιμεθάνιο (tetracyanoquinodimethane ή TCNQ) το οποίο είναι χρήσιμο για την παρασκευή αλάτων μεταφοράς φορτίου έγινε ευρέως γνωστό το 1962.

Ένα χρόνο μετά, οι B.A. Bolto, D.E. Weiss και συνεργάτες, μια ομάδα Αυστραλών ερευνητών, ανέφεραν παράγωγα πολυπυρρόλης με αντιστάσεις τόσο χαμηλές όσο 1 Ohm\*cm. Έκαναν επίσης πολλές αναφορές παρόμοιων οξειδωμένων πολυακετυλενίων υψηλής αγωγιμότητας. Με τη σημαντική εξαίρεση των συμπλεγμάτων μεταφοράς φορτίου, μερικών από τα οποία είναι ακόμη και υπεραγωγοί, τα οργανικά μόρια χαρακτηρίζονταν προηγουμένως ως μονωτές ή στην καλύτερη περίπτωση ασθενώς αγωγοί ημιαγωγοί.

Λίγο αργότερα, γύρω στο 1968, ο R. De Surville και οι συνεργάτες του M. Jozefowicz, L.T. Yu, J. Pepichon και R. Buvet, ανέφεραν υψηλή αγωγιμότητα σε ένα αγωγίμο πολυμερές ονόματι πολυανιλίνη.

Το 1970 συνετέθη και παρουσιάστηκε το τετραθιαφουλβαλένιο (tetrathiafulvalene ή TTF), ένας ισχυρός δότης ηλεκτρονίων.

Τρία περίπου χρόνια αργότερα ανακαλύφθηκε ο πρώτος καθαρός οργανικός αγωγός σαν αποτέλεσμα συνδυασμού των δύο αυτών παραπάνω συστατικών, σχηματίζοντας ένα ισχυρό σύμπλεγμα μεταφοράς φορτίου και παίρνοντας το όνομα TTF – TCNQ. Το εν λόγω σύμπλεγμα μπορεί να σχηματιστεί μέσω της διαδικασίας διαλύματος και ως αποτέλεσμα να κρυσταλλωθεί σε ένα καλοσχηματισμένο κρυσταλλικό στερεό, το οποίο παρουσιάζει σχεδόν μεταλλική ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Το 1974, ο John Edward McGinness και οι συνάδελφοί του δημιούργησαν μια ηλεκτρονική συσκευή αποτελούμενη από οργανικά πολυμερή χρησιμοποιώντας DOPA μελανίνη.

Τρία χρόνια μετέπειτα, το 1977, οι Alan J. Heeger, Alan MacDiarmid and Hideki Shirakawa ανέφεραν παρόμοια υψηλή αγωγιμότητα με την ανακάλυψη του πολυακετιλένιου, ενός οξειδωμένου και ενισχυμένου με ιώδιο πολυμερούς, γνωστοποιώντας ότι και τα πολυμερή μπορούν εξίσου να χρησιμοποιηθούν ως ηλεκτρικώς ενεργά υλικά. Για το πόρισμα τους αυτό βραβεύθηκαν με το Νόμπελ Χημείας 2000 “για την ανακάλυψη και ανάπτυξη αγωγίων πολυμερών”, συμπεριλαμβανομένων και της πολυπυρρόλης, ενός ιδιαίτερα αγωγίμου οργανικού πολυμερούς που ανακοινώθηκε επίσημα το 1979. Η ανακάλυψη αυτή οδήγησε

μεγάλο μέρος της επιστημονικής έρευνας περί οργανικών ημιαγωγικών υλικών να στραφεί στα συζευγμένα οργανικά υλικά.

Το 1980, οι ερευνητές A.F. Diaz και J.A. Logan ανέφεραν λεπτές μεμβράνες πολυανιλίνης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ηλεκτρόδια.

Την ίδια χρονική περίοδο, έγινε και η πρώτη αναφορά υπεραγωγιμότητας συμπλεγμάτων μεταφοράς φορτίου σε διάγραμμα φάσης Bechgaard-salt  $\text{TMTSF}_2\text{PF}_6$ , καθώς και η ανακάλυψη του πρώτου οργανικού μορίου, από τον Klaus Bechgaard, που σχηματίζει τον υπεραγωγό  $\text{TMTSF}_2\text{PF}_6$  (τετραμεθυλιούχο-τετρασελιφουλβένιο-εξαφθοριούχο φώσφορο), ο οποίος σε συνθήκες περιβάλλοντος δρα ως ημιαγωγός ενώ σε χαμηλή (κρίσιμη) θερμοκρασία και υψηλή (εξωτερική) πίεση παρουσιάζει υπεραγωγιμότητα.

Έκτοτε έχουν ανακαλυφθεί και συντεθεί πολλοί οργανικοί υπεραγωγοί και, από το έτος 2001 και μετά, η κρίσιμη θερμοκρασία έχει αυξηθεί σε πάνω από 1000K, αν και οι κρίσιμες πυκνότητες ρεύματος σε τέτοια συμπλέγματα είναι πολύ μικρές.

Στη δεκαετία του 1990, έρευνες και μελέτες που έγιναν στο εργαστήριο Cavendish του πανεπιστημίου του Κέμπριτζ είχαν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη οργανικών ηλεκτρονικών σε λεπτά και εύκαμπτα πλαστικά υποστρώματα.

Το 2000, η spin-off εταιρία Plastic Logic του εργαστηρίου Cavendish άρχισε να αναπτύσσει ένα ευρύ φάσμα προϊόντων χρησιμοποιώντας την τεχνολογία των οργανικών ηλεκτρονικών.

Από τότε ως και σήμερα, συνεχίζονται οι μελέτες για περαιτέρω εξέλιξη και κατανόηση των οργανικών υλικών (μέσω της διεύρυνσης του τομέα των οργανικών ημιαγωγικών υλικών και συστημάτων) ώστε η επιστήμη της ηλεκτρονικής κάποια στιγμή να αφομοιώσει πλήρως τα οργανικά ή πλαστικά ή πολυμερή ηλεκτρονικά, όπως αλλιώς ονομάζονται.

## **2.3 Το μοντέλο των ελεύθερων ηλεκτρονίων στους οργανικούς ημιαγωγούς**

### **2.3.1 Η σπουδαιότητα του άνθρακα ως βασικό συστατικό για την κατασκευή οργανικών ηλεκτρονικών συσκευών**

Σε αντίθεση με τα FETs, η κατασκευή των OFETs στηρίζεται σε οργανικά ημιαγωγικά υλικά.

Ένα χημικό στοιχείο που θα μπορούσε κάλλιστα να χαρακτηριστεί οργανικό και να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή οργανικών ημιαγωγικών υλικών, βρίσκεται αρκετά άφθονο στο περιβάλλον και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για την κατασκευή οργανικών τρανζίστορ επίδρασης πεδίου, είναι ο άνθρακας.

Ο άνθρακας, το δέκατο πέμπτο πιο άφθονο στοιχείο στο φλοιό της Γης, το τέταρτο πιο άφθονο στοιχείο στο σύμπαν κατά μάζα μετά το υδρογόνο, το ήλιο και οξυγόνο, και το δεύτερο πιο άφθονο στοιχείο στο ανθρώπινο σώμα κατά μάζα (περίπου 18,5%) μετά το οξυγόνο, είναι παρόν σε όλες τις γνωστές μορφές ζωής και αποτελεί τη βάση της οργανικής χημείας. Η μοναδική ποικιλία οργανικών ενώσεων και η ασυνήθιστη ικανότητα σχηματισμού πολυμερών που αυτές διαθέτουν, καθιστούν το στοιχείο αυτό τη χημική βάση όλων των γνωστών μορφών ζωής.

Υπάρχουν πολλοί λόγοι, εκτός της αφθονίας του στο περιβάλλον και του χαρακτηρισμού του ως οργανικό ημιαγώγιμο υλικό, που τον κάνει να γίνει αποδεκτός και να χρησιμοποιηθεί κατά κόρον ως βασικό υλικό κατασκευής οργανικών τρανζίστορ.

Καταρχήν, χαρακτηρίζεται ως ασυνήθιστα πλούσιος ως προς την χημική του συμπεριφορά. Ένας λόγος που μπορεί να ληφθεί υπόψη για αυτό είναι το σχετικά μικρό του μέγεθος, το οποίο μειώνει τη στερεοχημική παρεμπόδιση στα μόρια άνθρακα και καθιστά ικανή τη δημιουργία μεγαλύτερης ποικιλίας ενώσεων.

Ένα δεύτερο χαρακτηριστικό που θα μπορούσε να προστεθεί στα πλεονεκτήματά του είναι η μέτρια ηλεκτραρνητικότητά του. Το χαρακτηριστικό αυτό επιτρέπει στον άνθρακα να σχηματίζει ομοιοπολικούς δεσμούς με σχεδόν όλα τα υλικά, συμπεριλαμβανομένων και άλλων ατόμων άνθρακα, μέσω της μεθόδου αλυσοποίησης (catenation).

Επιπλέον, ως υλικό ομάδας IV<sub>A</sub> ή 14 (περιοδικού πίνακα χημικών στοιχείων) είναι ικανός να σχηματίζει τέσσερις δεσμούς. Έτσι αυξάνεται η χημική του ευελιξία και μπορεί να σχηματίζει πολυμερή μακράς αλυσίδας.

Επιπρόσθετα, υβριδοποιείται σε έναν αριθμό μορφών επιτρέποντας μια μεγάλη ποικιλία διαμόρφωσης συνδέσεων, συμπεριλαμβανομένων μονούς, διπλούς και τριπλούς δεσμούς καθώς και μια σειρά από μορφές συντονισμού.

Εξαιτίας αυτών των ιδιοτήτων, τόσο η συνθετική οργανική χημεία όσο και οι φυσικές συνθετικές διαδικασίες είναι σε θέση να παραδώσουν ένα ευρύ φάσμα υλικών βασιζόμενα στον άνθρακα με προσαρμοσμένες μηχανικές, οπτικές, ηλεκτρικές, καταλυτικές και άλλες ιδιότητες από ουσιαστικά παρόμοια δομικά στοιχεία.

### **2.3.2 Συζευγμένα μόρια ως σωματίδιο σε κουτί**

Τα υλικά στα οποία γειτονικά άτομα άνθρακα είναι  $sp^2$  υβριδοποιημένα, σχηματίζοντας απομονωμένες μη περιορισμένες ομάδες  $\pi$  ηλεκτρονίων, ονομάζονται συζευγμένα.

Τι εννοούμε όμως με τον όρο υβριδοποιημένα, και σε ποιούς τύπους διακρίνονται;

Γνωρίζοντας ότι ως ομοιοπολικός δεσμός χαρακτηρίζεται η σταθερή ισορροπία των ελκτικών και απωστικών δυνάμεων μεταξύ των ατόμων όταν αυτά μοιράζονται ηλεκτρόνια, μπορεί εύκολα να γίνει η θεώρηση πως ένα ομοιοπολικό συνδεδεμένο μόριο είναι μια σχετικά σταθερή διάταξη ατόμων.

Για πολλά μόρια, η κατανομή των ηλεκτρονίων επιτρέπει σε κάθε άτομο να πετύχει το ισοδύναμο ενός πλήρους εξωτερικού κελύφους το οποίο αντιστοιχεί σε σταθερή ηλεκτρονική δομή.

Ο χημικός χαρακτήρας ενός μορίου προσδιορίζεται από την ηλεκτρονική του δομή και την ευκολία με την οποία αυτή μπορεί να αναδιαμορφωθεί για να σχηματιστούν νέοι δεσμοί.

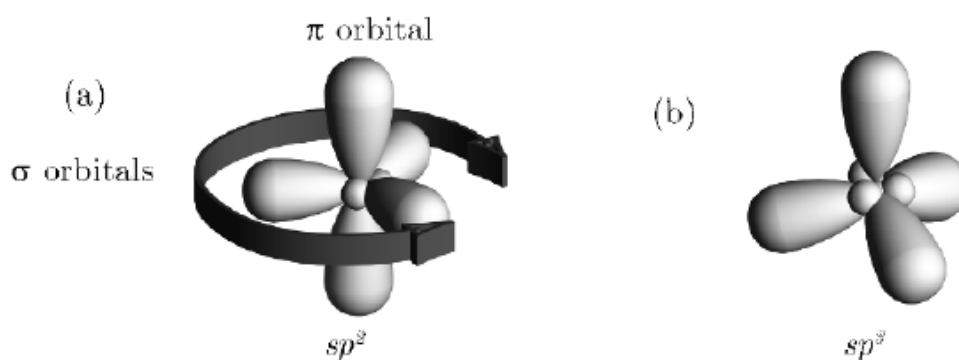
Τα ατομικά τροχιακά, όσον αφορά τον άνθρακα, έχουν την ικανότητα να υβριδοποιούνται σε έναν αριθμό γεωμετριών.

Με τον όρο υβριδοποίηση, στην περίπτωση των τροχιακών, θεωρούμε την ανάμιξη ατομικών τροχιακών σε νέα υβριδικά τροχιακά κατάλληλα για την αντιστοίχιση των ηλεκτρονίων, ούτως ώστε να σχηματιστούν χημικοί δεσμοί.

Με την έννοια ατομικό τροχιακό αναφέρεται μια περιοχή του τρισδιάστατου χώρου στην οποία μπορεί να βρεθεί το ηλεκτρόνιο ενός ατόμου, με κάθε ηλεκτρόνιο του ίδιου ατόμου να απαντάται σε ένα συγκεκριμένο τροχιακό.

Σύμφωνα με τη θεωρία VESPR και την παραδοσιακή τροχιακή μοντελοποίηση, οι τρεις τύποι υβριδικών τροχιακών που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για τον άνθρακα είναι οι  $sp$ ,  $sp^2$  και  $sp^3$ , οι οποίοι σχηματίζονται από την υπέρθεση των τροχιακών  $s$  και  $p$ .

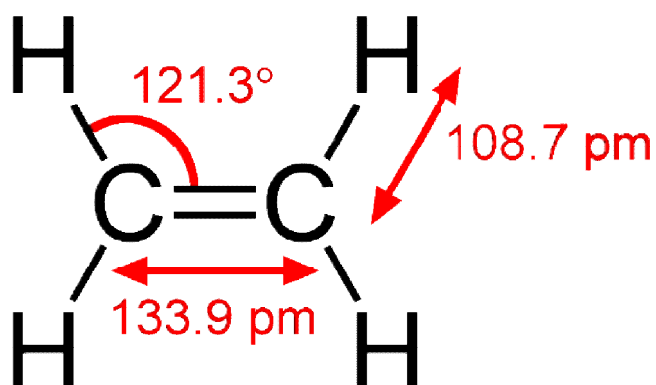
Στις εικόνες 2.1 (a) και (b) αποτυπώνεται η δομή ενός  $sp^2$  και  $sp^3$  τροχιακού.



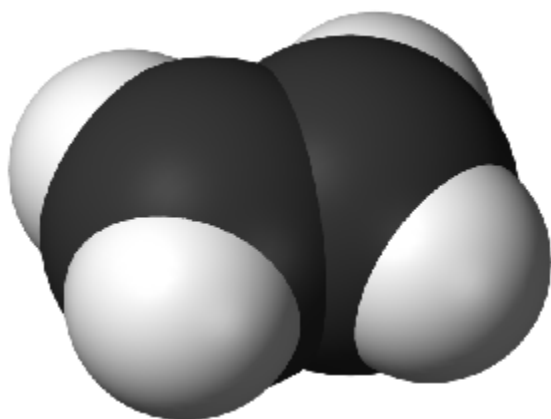
Εικόνα 2.1 Γεωμετρία των  $sp^2$  και  $sp^3$  τροχιακών δομών [Ioannis Kymissis, OFET/The physics of organic semiconductors].

Ένα καλό παράδειγμα ώστε να γίνει εύκολα κατανοητή η συνδετική δομή, όσον αφορά τις ουσίες που περιέχουν άνθρακα, είναι το μονομερές συστατικό ονόματι αιθυλένιο.

Παρατηρώντας τις παρακάτω εικόνες 2.2 και 2.3, βλέπουμε την χημική δομή και ένα τρισδιάστατο μοντέλο ενός μορίου του αιθυλενίου.



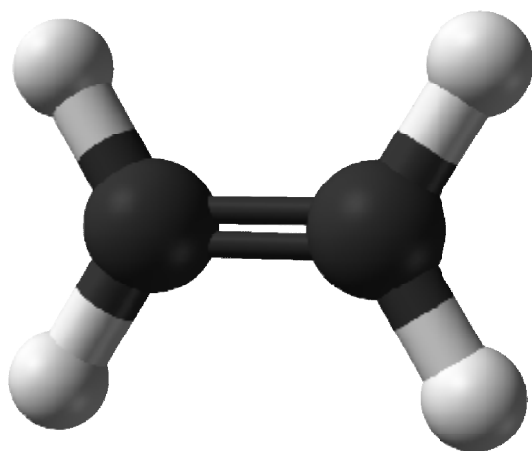
Εικόνα 2.2 Συντακτικός τύπος ενός μορίου του αιθυλενίου (αιθένιου) [Ethylene, <http://en.wikipedia.org/wiki/Ethylene>].



**Εικόνα 2.3** [Ethylene, <http://en.wikipedia.org/wiki/Ethylene>].

Το αιθυλένιο, όπως παρατηρείται κι από τις παραπάνω εικόνες, αποτελείται από ένα ζεύγος ατόμων άνθρακα με διπλούς δεσμούς (C-C), με τα άτομα που αποτελούν το ζεύγος να είναι και τα δύο  $sp^2$  υβριδοποιημένα.

Ο πιο κοινός διπλός δεσμός (που μπορεί να βρεθεί στα αλκένια) είναι μεταξύ δύο ατόμων άνθρακα, όπως αυτός του αιθυλενίου που παρουσιάζεται στην εικόνα 2.4.



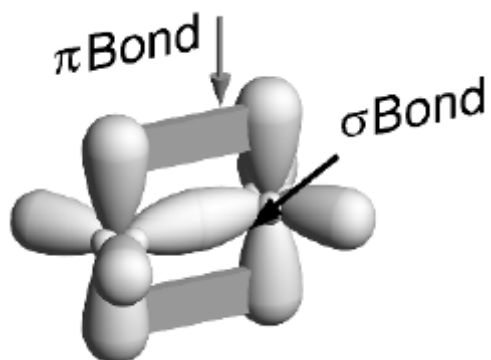
**Εικόνα 2.4** Δομή του μορίου του αιθυλενίου ή αιθενίου, ενός υδρογονάνθρακα με τέσσερα άτομα υδρογόνου συνδεδεμένα με ένα ζεύγος ατόμων άνθρακα που συνδέονται με έναν διπλό δεσμό [Ethylene, <http://en.wikipedia.org/wiki/Ethylene>].

Ο ένας δεσμός μπορεί να αποδοθεί στο υβριδοποιημένο  $sp^2$  τροχιακό, ενώ ο άλλος αποτελεί το μέρος του παραμένοντος μη υβριδοποιημένου  $p_z$  τροχιακού.

Ο δεσμός  $sp^2$  αναφέρεται συχνά και ως δεσμός σίγμα ή  $\sigma$ , και ο δεσμός  $p_z$  ως δεσμός  $\pi$  ή  $\pi$ .

Οι απλοί δεσμοί μεταξύ  $sp^2$  υβριδοποιημένων μορίων σχηματίζονται χρησιμοποιώντας σίγμα υβριδοποιημένα τροχιακά, ενώ οι διπλοί δεσμοί αποτελούν συνήθως παράγωγο ενός σίγμα και ενός  $\pi$  δεσμού.

Η εικόνα 2.5 που ακολουθεί μας δείχνει ένα σχηματικό διάγραμμα τροχιακών ενός μορίου του αιθυλενίου.

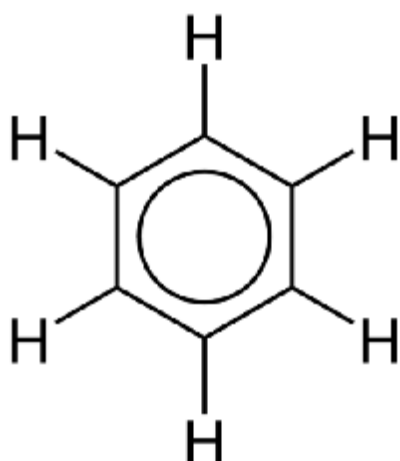


**Εικόνα 2.5** Σχηματικό διάγραμμα τροχιακών του αιθένιου [Ioannis Kymissis, OFET/The physics of organic semiconductors].

Είναι γνωστό πως με την αύξηση του μεγέθους των μορίων η πυκνότητα των ηλεκτρονίων τους γίνεται πιο πολύπλοκη, και σε περίπτωση που υπάρξουν δύο απλοί και διπλοί δεσμοί παρόντες σε ένα μόριο, η συνδετική δομή αποκτά μια όχι και τόσο σαφή διαμόρφωση.

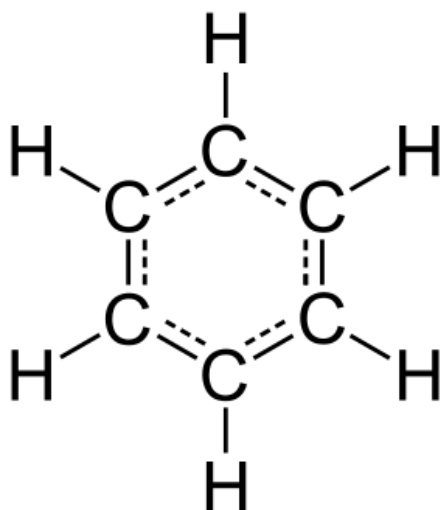
Το βενζόλιο, ένα από τα πιο θεμελιώδη πετροχημικά και φυσικό συστατικό του αργού πετρελαίου με κάθε μόριό του να αποτελείται από έξι άτομα άνθρακα, αποτελεί ένα σχετικά απλό και κατανοητό παράδειγμα.

Μια τυπική και μια πλήρης χημική δομή ενός μορίου του βενζολίου απεικονίζονται στις παρακάτω εικόνες 2.6 και 2.7 αντίστοιχα, καθώς και η τρισδιάστατη δομή του στην εικόνα 2.8.

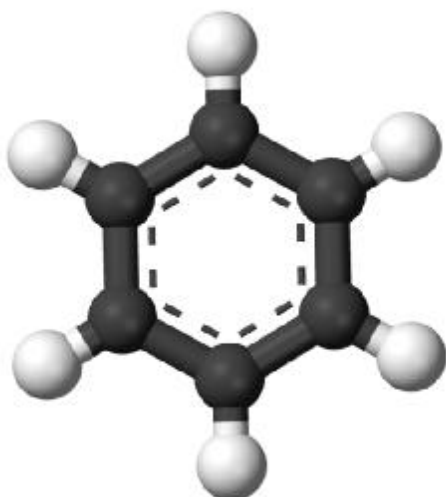


**Εικόνα 2.6** Χημική δομή ενός μορίου του βενζολίου [Benzene, [http://en.wikipedia.org/wiki/Delocalized\\_electron](http://en.wikipedia.org/wiki/Delocalized_electron)]



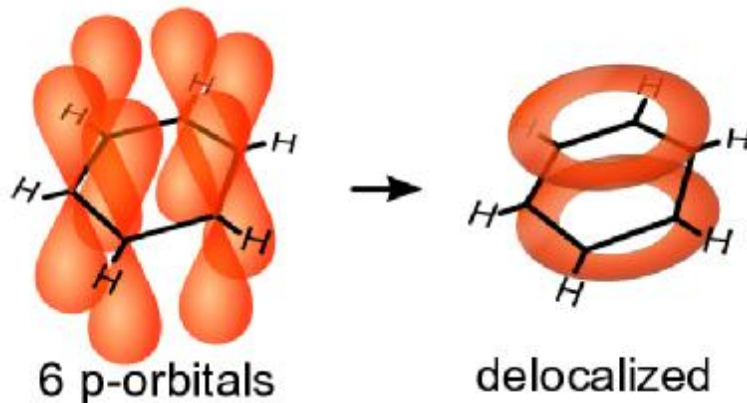


**Εικόνα 2.7** Πλήρης χημική δομή του μορίου [Benzene, <http://en.wikipedia.org/wiki/Benzene>]



**Εικόνα 2.8** Αναπαράσταση της τρισδιάστατης δομής του βενζολίου μέσω του μοριακού μοντέλου ball-and-stick, δείχνοντας την τρισδιάστατη θέση των ατόμων και των δεσμών μεταξύ τους.

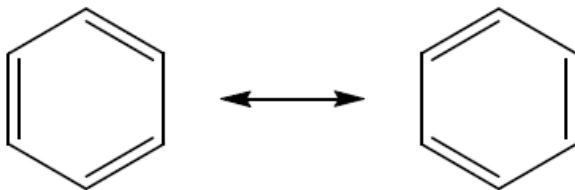
Σε περίπτωση που ο ένας δεσμός λάβει βενζόλιο, αντιστοιχούν δύο συνήθεις μορφές συντονισμού, όπου και στις δύο ένας απλός δεσμός (δεσμός σ) παραμένει πάντοτε μεταξύ των ατόμων του άνθρακα ενώ από την άλλη ο δεσμός π έχει τη δυνατότητα να κινείται από ατομική σε ατομική θέση, επιτυχώς απομονωμένος μεταξύ των ατόμων του μορίου, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.9.



**Εικόνα 2.9** Τροχιακή υβριδοποίηση σε δακτυλίους βενζολίου, όπου φαίνεται η απομονωμένη αυτή θέση του δεσμού π [Benzene orbitals, [http://en.wikipedia.org/wiki/Conjugated\\_system](http://en.wikipedia.org/wiki/Conjugated_system)].

Μια άλλη εικόνα που παρουσιάζει μια απομόνωση (μετεγκατάσταση) είναι η πιο πάνω εικόνα 2.6 που αναφέρει την χημική δομή του μορίου του βενζολίου. Εκεί, η μετεγκατάσταση των ηλεκτρονίων στο μόριο του βενζολίου υποδεικνύεται από τον κύκλο.

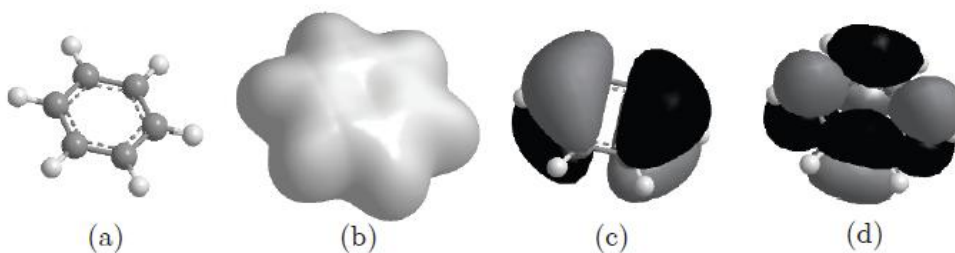
Η εικόνα 2.10 που ακολουθεί, παρουσιάζει τις δύο προαναφερόμενες μορφές συντονισμού.



**Εικόνα 2.10** Δύο μορφές συντονισμού του βενζολίου [Ioannis Kymissis, OFET/The physics of organic semiconductors].

Μια καλή ένδειξη ότι τα άτομα άνθρακα στα μόρια του βενζολίου είναι  $sp^2$  υβριδοποιημένα, είναι οι εναλλασσόμενοι απλοί και διπλοί δεσμοί που εμφανίζονται.

Η εικόνα 2.11, δείχνοντας τέσσερις εμφανίσεις του βενζολίου, μας βοηθάει να κατανοήσουμε το μοντέλο πυκνότητας των ηλεκτρονίων του.



**Εικόνα 2.11** Τέσσερις εμφανίσεις του βενζολίου [Ioannis Kymissis, OFET/The physics of organic semiconductors].

Οι τέσσερις παραπάνω εικόνες παρουσιάζουν: (a) Ένα χημικό μοντέλο του μορίου, (b) μια επιφάνεια (c) το υψηλότερο κατειλημμένο μοριακό τροχιακό (HOMO) και (d) το χαμηλότερο ακατάληπτο μοριακό τροχιακό (LUMO).

Όσον αφορά τις μορφές συντονισμού, υπάρχουν δύο καθόλα καθορισμένες μορφές, ισοδύναμες σε ενέργεια.

Ο συντονισμός ή αλλιώς μετεγκατάσταση, είναι η αναπαράσταση μιας υπέρθεσης πολλών καταστάσεων. Ορίζεται ως το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για την μετατροπή της απομονωμένης δομής σε εκείνη της πιο ενεργά συμβάλλουσας δομής. Κατά το συντονισμό, δεν γίνεται μεταπήδηση των συνδέσεων από μια διακριτή κατάσταση σε μια άλλη. Τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στις επάλληλες αυτές καταστάσεις δεν είναι κλειδωμένα σε μια συγκεκριμένη, άκαμπτη διαμόρφωση. Έχουν την πολυτέλεια να απομονώνονται σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό. Η απομόνωση ηλεκτρονίων δημιουργεί μια κατάσταση ενεργειακής συνοχής. Σαν αποτέλεσμα προκύπτει σχηματισμός ενός “πλαίσιου συγκράτησης”, κοινώς ονομαζόμενο ως δοχείο ή κουτί, με κουτί το ίδιο το μόριο και τα ηλεκτρόνια να παίζουν το ρόλο σωματιδίων. Τα ηλεκτρόνια  $\pi$  δεν ανήκουν σε έναν απλό δεσμό ή ένα άτομο, αλλά σε μια ομάδα ατόμων. Ο σχηματισμός αυτός αντιστοιχεί σε μια μορφή επιπέδων ενέργειας τα οποία διαμορφώνονται από το σχήμα και το μέγεθος του δοχείου. Το σωματίδιο τότε μπορεί να καταλάβει μόνο ορισμένα θετικά επίπεδα ενέργειας και δεδομένου ότι δεν μπορεί να παραμείνει ποτέ ακίνητο έχει ενέργεια μηδενικού σημείου (zero point energy ή ενέργεια κενού). Το επίπεδο ενέργειας που το σωματίδιο ανήκει, καθορίζει συγκεκριμένες θέσεις στις οποίες αυτό μπορεί να κινηθεί. Οι θέσεις στις οποίες το σωματίδιο δεν εμφανίζεται ποτέ ονομάζονται χωρικοί κόμβοι (spatial nodes).

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται σωματίδιο σε κουτί (particle in a box), απειρόβαθο πηγάδι ή σωματίδιο σε σωληνάκι και αφορά ένα ελεύθερο σωματίδιο που μπορεί να κινηθεί σε μικρό χώρο ο οποίος περικλύεται από (διάφορα) αδιαπέραστα εμπόδια. Σκοπός του φαινομένου αυτού είναι να ξεχωρίζει τις διαφορές μεταξύ των κλασικών και των κβαντικών συστημάτων.

Τα εν λόγω επίπεδα ενέργειας, όσον αφορά ένα απομονωμένο μόριο, είναι διακριτά και γνωστά με τον όρο τροχιακά των μορίων ή μοριακά τροχιακά, και είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού των ατομικών τροχιακών τα οποία αποτελούν το μόριο.

Αναλόγως των περιπτώσεων, μερικά μοριακά τροχιακά γεμίζουν με ηλεκτρόνια όταν το μόριο βρίσκεται σε κατάσταση γείωσης (ground state), έχοντας τα υψηλότερα επίπεδα κενά. Δύο κατηγορίες μοριακών τροχιακών που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον αναφέρονται στις οριακές καταστάσεις. Από τη μια το υψηλότερο κατειλημμένο μοριακό τροχιακό (Highest Occupied Molecular Orbital ή HOMO) και από την άλλη το χαμηλότερο ακατάληπτο μοριακό τροχιακό (Lowest Unoccupied Molecular Orbital ή LUMO).

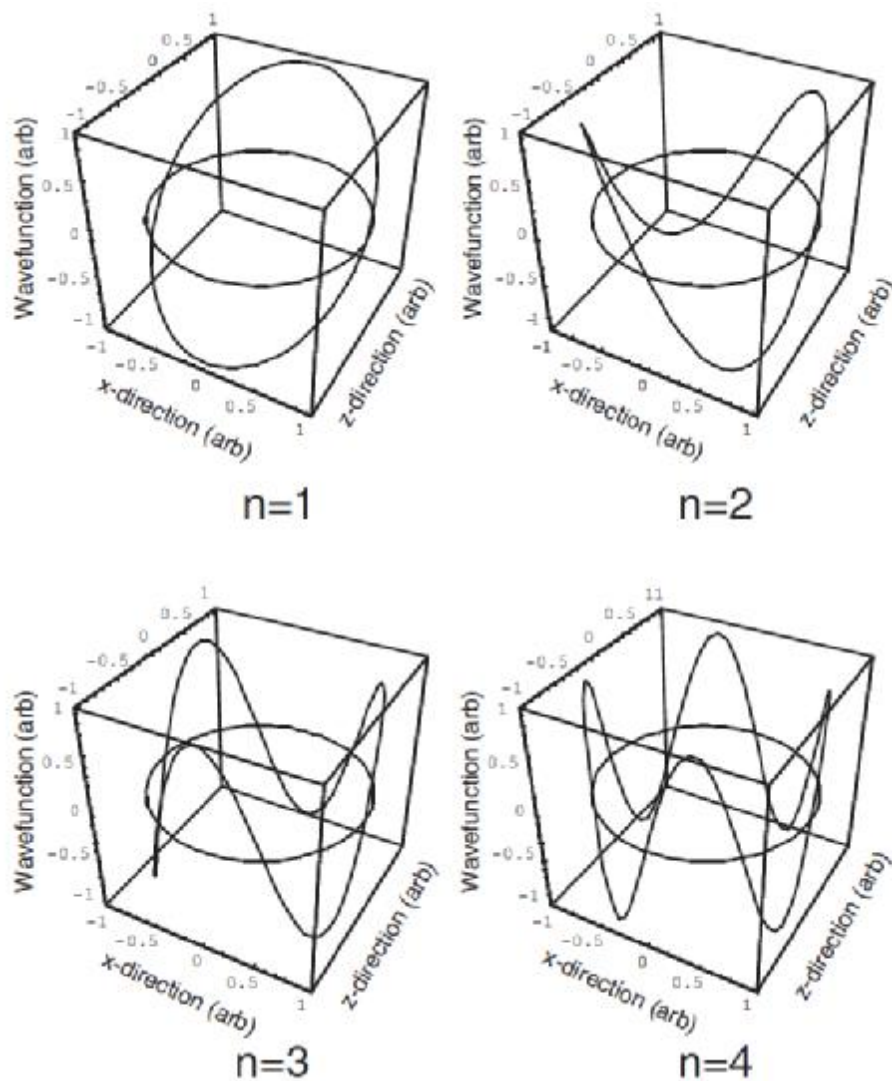
Λόγω της αυξημένης έκτασης της ενεργειακής συνοχής του μορίου, όσο μεγαλύτερο είναι το συζευγμένο δικτύωμα ενός μορίου, τόσο μικρότερο είναι το χάσμα HOMO-LUMO.

### 2.3.3 Τα επίπεδα ενέργειας των συζευγμένων μορίων

Τα επίπεδα ενέργειας στα συζευγμένα μόρια μπορούν να οριστούν επίσης με διαδικασία εφάμιλλη με αυτή που χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως για το πολυακετιλένιο, και μάλιστα με αρκετή λεπτομέρεια.

Το μοντέλο των ελεύθερων ηλεκτρονίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προσδιορισμό και αποσαφήνιση των επιπέδων ενέργειας σε συζευγμένα και μικρά συζευγμένα μόρια, με το μήκος του συζευγμένου τμήματος του μορίου ως παράγοντα καθορισμού των επιπέδων αυτών.

Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις κυκλικά συζευγμένων μορίων που εκεί γίνεται χρήση του μοντέλου περιμετρικής τροχιάς ελεύθερων ηλεκτρονίων (Perimeter Free Electron Orbital model ή PFEO), μια άλλη εκδοχή του μοντέλου των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Η διαφορά είναι ότι σύμφωνα με αυτή την εκδοχή το δοχείο που σχηματίζεται αναγνωρίζεται ως η περίμετρος του μορίου. Η εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζει τα πρώτα τέσσερα επίπεδα που προκύπτουν από την κυματική συνάρτηση PFEO:



**Εικόνα 2.12** Μια αντιπροσωπευτική σχηματική παρουσίαση των τεσσάρων πρώτων κυματοσυναρτήσεων PFEO [Ioannis Kymissis, OFET/The physics of organic semiconductors].

Από εκεί και έπειτα ο υπολογισμός των επιπέδων ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί από τα τροχιακά σύνορα.

Το μοντέλο PFEO παρέχει δυνατότητα υπολογισμού του πρώτου επιπέδου ενέργειας διέγερσης και κατανόηση της τάσης που επικρατεί στο HOMO-LUMO χάσμα. Με την

αύξηση του μορίου σε μέγεθος, το HOMO-LUMO χάσμα δέχεται μια μείωση και η δημιουργία μιας κατάστασης διέγερσης γίνεται πιο προσιτή. Αυτό βέβαια επιφέρει και αρνητικά αποτελέσματα. Το πολύ μικρό HOMO-LUMO χάσμα μερικών μορίων που κάνει τα ηλεκτρόνια να διεγείρονται αρκετά εύκολα καθώς και η εύκολη οξειδωση των υλικών όταν αυτά έρχονται σε επαφή με τον αέρα, τα καθιστούν ακατάλληλα για χρήση σε κατασκευή αρκετών τύπων τρανζίστορ.

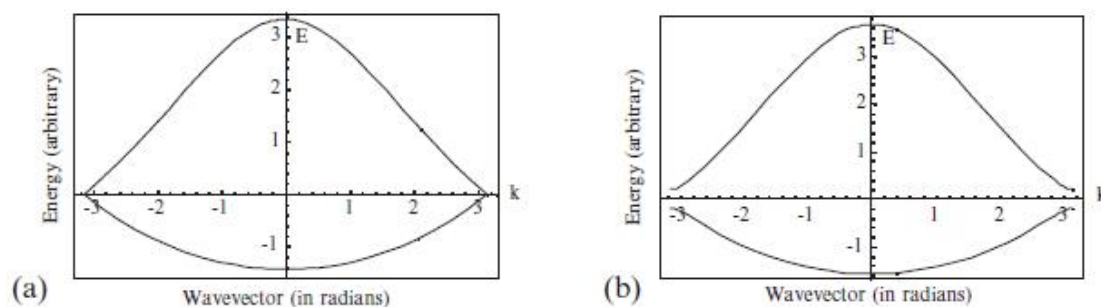
### 2.3.4 Τα επίπεδα ενέργειας των ημιαγώγιμων πολυμερών

Ενώ θα περίμενε κανείς να μην υπάρχει διάκενο ζώνης (χάσμα) σε ένα απείρου  $sp^2$  συνδεδετικό σύστημα, όπως είναι ένα συζευγμένο πολυμερές, στα άπειρα μονοδιάστατα συζευγμένα πολυμερή εξακολουθεί να παρατηρείται ένα πεπερασμένο διάκενο ζώνης λόγω ενός φαινομένου που ονομάζεται διμερισμός ή αστάθεια Peierls.

Σύμφωνα με την αστάθεια Peierls, τα μονοδιάστατα μέταλλα δεν είναι σταθερά, έχοντας μια εναλλακτική κατάσταση πάντοτε χαμηλότερη σε ενέργεια. Όσον αφορά τα συζευγμένα οργανικά υλικά, αυτό εκδηλώνεται ως διμερισμός, διαθέτοντας δύο δεσμούς που έχουν άνισες δυνάμεις.

Η δημιουργία και εγκαθίδρυση άνισων επιπέδων ενέργειας επί του πολυμερούς διατηρεί ένα πεπερασμένο διάκενο ζώνης (χάσμα), ακόμη και σε ένα απείρως μακρύ μόριο. Το μέγεθος του HOMO-LUMO χάσματος αυτού καθορίζεται από το βαθμό του διμερισμού και το μήκος ανασυνδυασμού των φορέων στο συζευγμένο σύστημα.

Η παρακάτω εικόνα 2.13 παρουσιάζει δύο διαγράμματα επιπέδων ενέργειας για δεσμούς μεταξύ των ατόμων σε ένα μόριο.



**Εικόνα 2.13** Δύο διαγράμματα επιπέδων ενέργειας για το πολυακετυλένιο [Ioannis Kymissis, OFET/The physics of organic semiconductors].

Στην εικόνα 2.13 (a) φαίνεται το διάγραμμα επιπέδου ενέργειας μιας αφύσικα απείρου μονοδιάστατης μεταλλικής εκδοχής πολυακετυλενίου. Η εικόνα 2.13 (b) δείχνει ένα πιο ρεαλιστικά διμερισμένο μόριο πολυακετυλενίου. Το μονομερές ομοιόμορφο μόριο δεν παρουσιάζει διάκενο ζώνης, λόγω του απείρου μεγέθους που διαθέτει. Επικρατεί ένα HOMO-LUMO χάσμα παρά την άπειρη έκταση του μορίου λόγω της αστάθειας Peierls, κατά την οποία το μόριο διμερίζεται και διαχωρίζονται οι δεσμοί στην άκρη της ζώνης Brillouin.

Υπάρχουν όμως και καταστάσεις όπου η αστάθεια Peierls δεν υφίσταται. Σε περιπτώσεις συστημάτων μεταφοράς  $\pi$  ηλεκτρονίων ανωτέρων διαστάσεων, όπως είναι οι νανοσωλήνες

άνθρακα και γραφενίου, αυτά δεν υπόκεινται στην αστάθεια Peierls και μπορεί να είναι μεταλλικά ή ημιμεταλλικά.

## 2.4 Φορείς φορτίου σε συζευγμένα μόρια

Γενικά, ως φορέας φορτίου ονομάζεται ένα σωματίδιο που κινείται ελεύθερα μεταφέροντας ηλεκτρικό φορτίο. Στους ημιαγωγούς, φορείς φορτίου θεωρούνται τα ηλεκτρόνια και οι οπές. Ως οπές, χαρακτηρίζονται οι κενές θέσεις που δημιουργούνται και κινούνται στην περιοχή ηλεκτρονίων ζώνης σθένους. Τα ηλεκτρόνια μεταφέρουν αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο ενώ οι οπές θετικό φορτίο (και ίσο σε μέγεθος με ένα ηλεκτρόνιο).

Η πυκνότητα των δύο αυτών φορέων φορτίου παίζει σημαντικό ρόλο στους ημιαγωγούς, λαμβάνοντας υπόψη ότι σε έναν ημιαγωγό το ρεύμα επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας και τον αριθμό των οπών στη ζώνη σθένους.

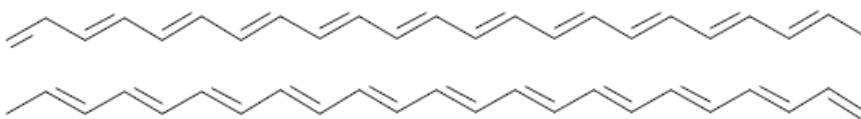
Στους οργανικούς ημιαγωγούς, μπορούμε να παρατηρήσουμε τη διάταξη των φορέων φορτίου από τη μελέτη των μορφών συντονισμού των συζευγμένων πολυμερών τους.

Παίρνοντας σαν παράδειγμα το οργανικό πολυμερές πολυακετιλένιο, η μορφή του έχει δύο εκφυλισμένες (ενεργητικά και γεωμετρικά) καταστάσεις γείωσης, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να συνυπάρχουν στην ίδια αλυσίδα οριοθετούμενες από ένα σύνορο.

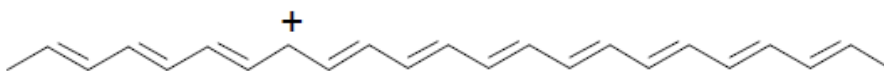
Όταν ένας ημιαγωγός χαρακτηρίζεται εκφυλισμένος σημαίνει ότι έχει αρκετά υψηλό επίπεδο ντοπαρίσματος, με αποτέλεσμα να λειτουργεί περισσότερο ως μέταλλο παρά ως ημιαγωγός.

Η μεταφορά φορτίων στο πολυμερές πραγματοποιείται στο σύνορο των δύο καταστάσεων.

Στην εικόνα 2.14 φαίνονται δύο μορφές συντονισμού του πολυακετιλενίου, και στην εικόνα 2.15 ο σχηματισμός ενός θετικά φορτισμένου φορτίου (polaron) επί της αλυσίδας του πολυμερούς, που προκύπτει σαν αποτέλεσμα της ένωσης των δύο μορφών συντονισμού.



**Εικόνα 2.14** Δύο μορφές συντονισμού του πολυακετυλενίου [Ioannis Kymissis, OFET/The physics of organic semiconductors].



**Εικόνα 2.15** Ένα θετικά φορτισμένο polaron σε πολυακετυλένιο [Ioannis Kymissis, OFET/The physics of organic semiconductors].

Με την εμφάνιση του φαινομένου polaron, το παραγμένο αυτό φορτίο μπορεί να παραμείνει σε σημείο όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.15 στο σημείο με το σύμβολο +, και η μεταφορά του επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός ηλεκτρικού πεδίου.

Με χρήση της παραπάνω μεθόδου δημιουργούνται οι καταστάσεις φόρτισης στους οργανικούς ημιαγωγούς, η μέθοδος αυτή όμως δεν είναι η μοναδική. Παρόμοιο φαινόμενο εμφανίζεται μέσω της διαδικασίας ντοπαρίσματος. Η οξείδωση ή μείωση που προκύπτει στους δεσμούς κατά μήκος της αλυσίδας έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ελεύθερων ηλεκτρονίων ή οπών.

## 2.4.1 Μεταφορά φορτίου στους οργανικούς ημιαγωγούς

### 2.4.1.1 Ενδογενείς και εξωγενείς ημιαγωγοί

Ως ενδογενείς, χαρακτηρίζονται οι ημιαγωγοί που δεν έχουν υποστεί επεξεργασία με μέθοδο ντοπαρίσματος. Σε αυτούς τους “καθαρούς” ημιαγωγούς, ο αριθμός των φορέων φορτίου (ηλεκτρόνια και οπές) εξαρτάται από τις ιδιότητες του ίδιου του υλικού.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα των ημιαγωγών αυτών οφείλεται συνήθως σε διέγερση ηλεκτρονίων που βρίσκονται στη ζώνη αγωγιμότητας, τα οποία όταν μετακινούνται αφήνουν στη θέση τους κενά (οπές). Τόσο τα ηλεκτρόνια όσο και οι οπές μπορούν να ταξιδέψουν σε όλη τη μάζα των ημιαγωγών με τη βοήθεια μιας εξωτερικής τάσης.

Αυτή η κατηγορία ημιαγωγών, ωστόσο, χαρακτηρίζεται από όχι και τόσο καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα εφόσον διαθέτει τόσα ηλεκτρόνια ώστε να μπορούν να καλύψουν πλήρως τους δεσμούς σθένους (οπές).

Μέσω της διαδικασίας ντοπαρίσματος (μέθοδος ντόπινγκ) η οποία συνεπάγεται προσθήκη ενός παράγοντα ντοπαρίσματος (άτομο πρόσμιξης) σε έναν ενδογενή ημιαγωγό, οι ενδογενείς ημιαγωγοί μετατρέπονται σε εξωγενείς (ντοπαρισμένοι ή ενισχυμένοι) και αποκτούν διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες από εκείνες των ενδογενών. Λόγω των ιδιοτήτων αυτών είναι που οι εξωγενείς ημιαγωγοί αποτελούν σημαντικό μέρος πολλών ηλεκτρονικών συσκευών. Αν ένας εξωγενής ημιαγωγός είναι τύπου n τότε ο παράγοντας ντοπαρίσματος προσφέρει πρόσθετα ηλεκτρόνια ενώ αν είναι τύπου p, ο παράγοντας ντοπαρίσματος προσφέρει πρόσθετες οπές (λιγότερα ηλεκτρόνια). Και στις δύο περιπτώσεις, υπάρχει δραματική αύξηση της αγωγιμότητας.

Σε ημιαγωγούς τύπου n, κατηγοριοποιούνται οι εξωγενείς ημιαγωγοί που έχουν μεγαλύτερη συγκέντρωση ηλεκτρονίων παρά οπών. Ορίζονται με το γράμμα n που είναι το αρχικό της αγγλικής λέξης negative, δηλώνοντας έτσι την αρνητική τους φόρτιση, την πλειονότητά τους δηλαδή σε ηλεκτρόνια. Παράγονται με έκθεση σε ντόπινγκ ενός ενδογενούς ημιαγωγού με ένα δότη (άτομο πρόσμιξης, περιοδικού πίνακα ομάδας  $V_A$  ή 15), όπως είναι τα χημικά στοιχεία φωσφόρος (P) και αρσενικό (As). Τα επίπεδα ενέργειας Fermi (στάθμη Fermi) είναι μεγαλύτερα από εκείνα των ενδογενών ημιαγωγών και βρίσκονται πιο κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας από την ζώνη σθένους.

Αντίθετα τύπου p, ονομάζονται οι εξωγενείς ημιαγωγοί που έχουν ως φορείς πλειονότητας τις οπές και φορείς μειονότητας τα ηλεκτρόνια. Για το λόγο αυτό ονομάστηκαν τύπου p από το αρχικό γράμμα της αγγλικής λέξης positive, αναφερόμενοι στη θετική φόρτιση που τους

παρέχεται από τις οπές. Προκύπτουν με ντόπινγκ ενός ενδογενούς ημιαγωγού με έναν δέκτη (άτομο πρόσμιξης, περιοδικού πίνακα ομάδας III<sub>A</sub> ή 13) όπως βόριο (B) ή αργίλιο (αλουμίνιο ή Al) και διαθέτουν επίπεδα ενέργειας Fermi μικρότερα εκείνων των ενδογενών ημιαγωγών, με τη στάθμη Fermi να βρίσκεται πιο κοντά στη ζώνη σθένους από τη ζώνη αγωγιμότητας.

#### **2.4.1.2 Διαταραγμένοι (άμορφοι) οργανικοί ημιαγωγοί**

Όπως έχει γίνει ξανά αναφορά, η μεταφορά φορτίου στους οργανικούς ημιαγωγούς επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τα τροχιακά δεσμού π, ακολουθεί έναν μηχανισμό μεταπήδησης και εξαρτάται από τον τύπο του μοντέλου μεταφοράς που χρησιμοποιείται για την διαμόρφωση διαταραγμένων συστημάτων.

Στους διαταραγμένους οργανικούς ημιαγωγούς παρατηρείται μειωμένη επικάλυψη δεσμών π μεταξύ των μορίων. Επίσης, εκτός των τροχιακών π δεσμών, υπάρχει και άμεση εξάρτηση των φορέων από την επικάλυψη της κβαντομηχανικής κυματοσυνάρτησης, η οποία προκύπτει ως αποτέλεσμα της διαταραχής.

Η πυκνότητα των φορέων φορτίου αποτελεί ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των οργανικών ημιαγωγών, λόγω του ότι το ρεύμα επηρεάζεται πολύ από τον αριθμό τόσο των ηλεκτρονίων όσο και των οπών.

Στα διαταραγμένα συστήματα η πυκνότητα των καταστάσεων (density of states ή DOS, ή αλλιώς φάσμα ενέργειας) είναι συχνά ασύμμετρη παρουσιάζοντας ένα αρκετά σημαντικό πρόβλημα στο σχηματισμό καθενός από τα διαφορετικά είδη φορέων.

Οι διαταραγμένοι οργανικοί ημιαγωγοί μπορούν να υποστηρίξουν ένα μόνο τύπο φορέα φορτίου, είτε τις οπές που αναφέρονται ως τύπου p είτε τα ηλεκτρόνια που αναφέρονται ως τύπου n, και έτσι δηλώνουν ποιός είναι οι φορείς πλειονότητάς τους και ποιά η ημιαγωγική συμπεριφορά τους σε κάθε περίπτωση. Η μεταφορά των φορέων φορτίου γίνεται με τη μεταπήδηση των φορέων από το ένα μόριο στο άλλο, εξ ου και ο όρος μεταφορά μεταπήδησης (hopping transport). Η μεταπήδηση αυτή εξαρτάται από το ενεργειακό χάσμα μεταξύ των επιπέδων HOMO και LUMO.

Οι ταχύτητες μετακίνησης των φορέων διαφέρουν ανά περιοχή κατά μήκος του συστήματος, ανάλογα με τη θερμοκρασία και το ηλεκτρικό πεδίο που επικρατεί σε αυτό.

## **2.5 Συμπεράσματα**

Οι οργανικοί ημιαγωγοί αποτελούνται από οργανικές ύλες (οργανικά υλικά).

Τόσο άφθονο και εύχρηστο θεωρήθηκε και εδραιώθηκε το οργανικό στοιχείο που ονομάζεται άνθρακας στην κατασκευή οργανικών ηλεκτρονικών και ημιαγωγών, που τα πλαστικά ή αλλιώς πολυμερή ηλεκτρονικά και τα ημιαγωγικά υλικά που έχουν αυτόν ως βάση τους κέρδισαν επιπλέον το χαρακτηρισμό οργανικά.

Προσθέτοντας στα παραπάνω τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και την ικανότητα που αυτός διαθέτει να σχηματίζει μοναδικές χημικές ενώσεις, καθίσταται αρκετά ικανός όχι μόνο να απαρτίζει συσκευές και μηχανήματα που μπορούν να συμβαδίζουν με τις εφαρμογές της



σύγχρονης τεχνολογίας των ηλεκτρονικών αλλά και να περάσει το όλο φάσμα των ηλεκτρονικών σε επόμενο, μελλοντικά καλύτερο στάδιο.

Κατανοώντας τον άνθρακα ως προς τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του, τις χημικές του ενώσεις, τη δομή και τα παράγωγά του, και μελετώντας ταυτόχρονα τον τομέα της οργανικής χημείας ως προς το συζευγμένο σύστημα, τα επίπεδα και τις ζώνες ενέργειας, τους φορείς φορτίου καθώς και τη μεταφορά αυτών σε όλο το υλικό, προκύπτουν διαδικασίες πιο βελτιωμένες από πλευράς χρόνου κατασκευής, αποτελεσματικότητας και οικονομίας που θα επιτρέπουν τον ορθολογικό σχεδιασμό και την επεξεργασία και χρήση νέων υλικών που θα χρησιμοποιούνται για την κατασκευή οργανικών τρανζίστορ επίδρασης πεδίου, αλλά και άλλων οργανικών ηλεκτρονικών διατάξεων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Οργανικά ημιαγώγιμα υλικά

Ηλεκτρονικά κυκλώματα (electronic circuits) ή ηλεκτρονικές συσκευές (electronic devices) που σχεδιάζονται και κατασκευάζονται εξ' ολοκλήρου από στερεά υλικά (solid materials) στα οποία η κινητικότητα και μεταφορά των ηλεκτρονίων, και γενικά οποιονδήποτε άλλων φορέων φορτίου, περιορίζεται μέσα στο στερεό αυτό υλικό είναι γνωστές ως ηλεκτρονικές διατάξεις στερεάς κατάστασης (solid-state electronic devices).

Οι ηλεκτρονικές διατάξεις που βασίζονται σε οργανικούς ημιαγωγούς, λόγω χαμηλού κόστους, απλής και εύκολης κατασκευής, αλλά και συμβατότητας με εύκαμπτα υποστρώματα, προσφέρουν μια ελκυστική εναλλακτική λύση έναντι των ηλεκτρονικών συσκευών που βασίζονται σε ανόργανους ημιαγωγούς.

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι οργανικών ημιαγωγών. Τα υλικά χαμηλού μοριακού βάρους και τα πολυμερή.

Τα υλικά χαμηλού μοριακού βάρους, πιο γνωστά με το όνομα μικρά μόρια (small molecules), είναι αγώγιμα εάν δεν έχουν δεχθεί επεξεργασία (ενώσεις χωρίς προσμίξεις). Τυπικά όμως είναι αδιάλυτα, και η επεξεργασία τους γίνεται στο κενό ή με περιστροφή με επικάλυψη. Μερικά τέτοια υλικά είναι τα τετρακένιο, πεντακένιο, εξακένιο, ρουμπρένιο, DIP (diindenoperylene), perylenediimides και TCNQ.

Τα πολυμερή (polymers), αλλιώς μεγάλα μόρια (large molecules) ή μακρομόρια (macromolecules), αποτελούνται από μακρές αλυσίδες άνθρακα. Είναι πολύ κακοί αγωγοί όταν βρίσκονται στη φυσική τους κατάσταση, για το λόγο αυτό τίθενται σε επεξεργασία μέσω της διαδικασίας ντοπαρίσματος, έχοντας ως παράγοντα ντόπινγκ ουσίες όπως το χλώριο ή το ιώδιο που βελτιώνουν κατά πολύ την αγωγιμότητά τους. Είναι φθηνότερα από τα μικρά μόρια και σε αντίθεση με εκείνα είναι διαλυτά. Έτσι, μπορεί να γίνει σε αυτά χρήση των διαδικασιών των διαφόρων μεθόδων εκτύπωσης, μειώνοντας έτσι το κόστος και αυξάνοντας την ευκολία και τον όγκο παραγωγής (των ηλεκτρονικών). Υλικά όπως πολυθειοφαίνιο (polythiophene), πολυφλουρένιο (polyfluorene), πολύ φαινυλενο-βινυλένιο (polyphenylene-vinylene ή PPV), πολυ 2,5-θειενυλενοβινυλένιο (poly 2,5-thienylene vinylene), πολυδιακετυλένιο και πολυ 2,5-θειενυλενοβινυλένιο (poly 2,5-thienylene vinylene) ανήκουν στην κατηγορία των μεγάλων μορίων.

Ένα άλλο πολυμερικό υλικό που χρησιμοποιείται αρκετά συχνά είναι το PEDOT (πολυαιθυλένιο-διοξυ-θειοφαίνιο), το οποίο είναι διαλυτό στο νερό. Ωστόσο, το αποτέλεσμα της λύσης αυτής είναι διαβρωτικό και οδηγεί σε συντομευμένη διάρκεια ζωής των κυκλωμάτων και μπορεί να βλάψει άλλα συστατικά τους.

Λόγω του ενεργητικού δυναμικού που στοχεύει στην συνεχή εύρεση νέων συστατικών ή στη βελτίωση των ήδη υπάρχοντων (όπως για παράδειγμα αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω), συνεχώς συντίθενται και δοκιμάζονται καινούργια υλικά και ενώσεις. Τα παραπάνω εστιάζονται σε κατασκευές OFET αγωγιμότητας τύπου p. Οργανικά τρανζίστορ επίδρασης πεδίου τύπου n δεν είναι ακόμα αρκετά ανεπτυγμένα.

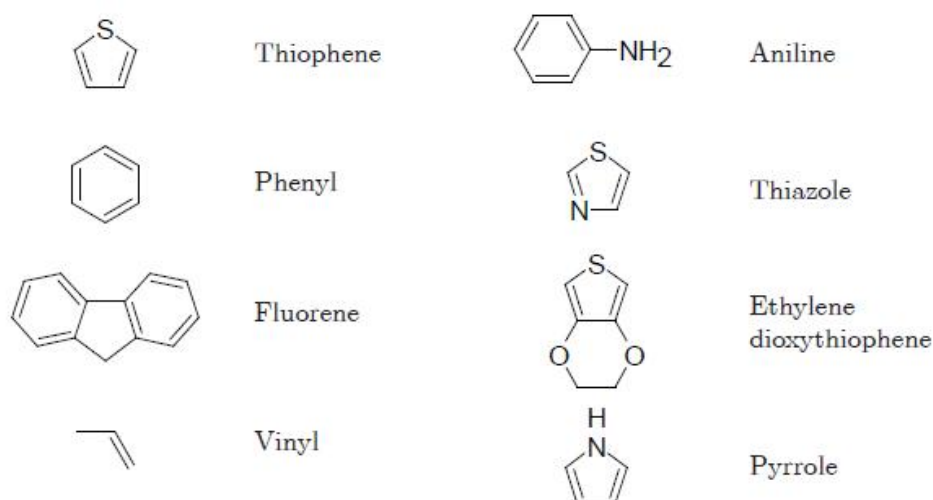
Δεδομένου ότι τα πολυμερή είναι διαλυτά και εύκολα σε επεξεργασία, οι περισσότερες διεργασίες στρέφονται σε αυτά.

Σχεδόν όλοι οι οργανικοί ημιαγωγοί πλέον κατασκευάζονται με χημικά στοιχεία πλούσια σε  $sp^2$  υβριδοποιημένα άτομα άνθρακα και απομονωμένα ηλεκτρόνια  $\pi$ .

Ένα άλλο στοιχείο που μοιράζονται τόσο τα μικρά μόρια όσο και τα πολυμερή είναι ότι και οι δύο αυτές κατηγορίες περιλαμβάνουν ένα αρωματικό σύστημα, γεγονός που προσδίδει και στις δύο κατηγορίες μια ιδιαίτερη σταθερότητα.

Στο κεφάλαιο 2 έγινε αναφορά των ηλεκτρονίων και των οπών ως φορείς φορτίου (σε  $\pi$  δεσμούς). Σχεδόν όλα τα οργανικά στερεά είναι μονωτές. Όταν όμως τα συστατικά των μορίων τους απαρτίζονται από συζευγμένα  $\pi$  συστήματα, τότε δίνεται στα ηλεκτρόνια η δυνατότητα να κινηθούν (μέσω επικαλύψεων σύννεφων ηλεκτρονίων  $\pi$ ) συνήθως με διαδικασίες μεταπήδησης (hopping) ή διάνοιξης σηράγγων (tunneling), αλλά και άλλων παρόμοιων μεθόδων.

Μερικά από τα πιο κοινά επαναλαμβανόμενα μονομερή από τα οποία απαρτίζονται τόσο τα μικρά όσο και τα μεγάλα μόρια απεικονίζονται στην εικόνα 3.1.



**Εικόνα 3.1** Μερικές από τις πιο κοινές επαναλαμβανόμενες λειτουργικές μονάδες σε συζευγμένα οργανικά υλικά. Οι περισσότεροι οργανικοί ημιαγωγοί και αγωγοί κατασκευάζονται από συγχωνευμένα ή συνδεδεμένα στοιχεία όπως τα παραπάνω, τα οποία είναι πλούσια σε  $sp^2$  υβριδοποιημένα άτομα άνθρακα και αποκεντρωμένα ηλεκτρόνια  $\pi$ . Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η χημική σύνθεση οργανικών ημιαγωγών και αγωγών συχνά δεν εκτελείται χρησιμοποιώντας αυτά τα υλικά ως συστατικά εκκίνησης [Ioannis Kymissis, OFET/Organic semiconductor materials for OFETs].

Το πώς λειτουργούν και επιδέχονται επεξεργασία τα μονομερή αυτά καθορίζεται από τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται.

### 3.1 Μικρά μόρια

Πολλά οργανικά υλικά έχουν ανακαλυφθεί κατά καιρούς ,κατά τη διάρκεια διάφορων ερευνών επί των υλικών. Ανάλογα με το πόσο εύκολα ή δύσκολα επιδέχονται επεξεργασία, το είδος της επεξεργασίας αυτής και τις χαρακτηριστικές ιδιότητες που διαθέτουν, το καθένα

από αυτά καταλήγει να χρησιμοποιείται περισσότερο ή λιγότερο και για συγκεκριμένο ή όχι σκοπό.

Τα μικρά μόρια είναι χαμηλού μοριακού βάρους, μπορούν να καθαριστούν (εξαγνιστούν) και να εναποθεθούν μέσω της διαδικασίας θερμικής εξάτμισης.

Γενικά, με τον όρο εναπόθεση εννοούμε την οποιαδήποτε διαδικασία μέσω της οποίας ένα υλικό ή μια χημική ένωση τοποθετείται επάνω σε μια επιφάνεια ή υπόστρωμα. Η τεχνική αυτή χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, τη φυσική εναπόθεση και την χημική εναπόθεση, και συναντάται συχνά σε κατασκευές ημιαγωγών.

Τα μικρά μόρια, μέσα από διάφορες επεξεργασίες, λειτουργούν ως οργανικές ενώσεις με καλή διαλυτότητα, και μπορούν εξίσου να εναποθεθούν από διάλυση.

Ως καθαρισμός ή εξάγνιση (purification method), θεωρείται ο οποιοσδήποτε τρόπος διαχωρισμού μιας χημικής ουσίας από ξένες ή μολυσματικές ουσίες (συχνά ονομαζόμενες ως προσμίξεις, αγγλιστί impurities) με φυσικό τρόπο.

### **3.1.1 Συγχωνευμένες δομές δακτυλίων**


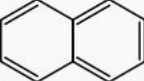
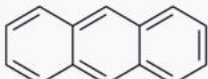
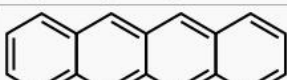
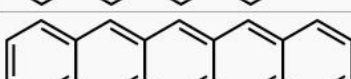
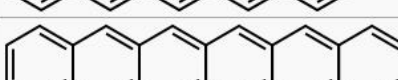
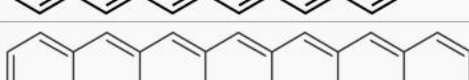
Ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται τα μόρια σε μια ένωση χαρακτηρίζει την ένωση αυτή, καθώς και τις μοναδικές ιδιότητες που αυτή προσφέρει. Αλλάζοντας τη συνδετική δομή των μορίων σε μια ένωση (μέσω διαφόρων τεχνικών επεξεργασίας) προκύπτουν διαφορετικές ενώσεις και διαφορετικά παράγωγα κάθε φορά.

Στις περιπτώσεις των συγχωνευμένων δακτυλίων, οι δομές των ενώσεων δημιουργούν διάφορα είδη ημιαγώγιμων υλικών.

Οι συγχωνευμένοι δακτύλιοι (fused rings) παράγονται από συγχώνευση (fusion method) δύο ή περισσότερων δακτυλίων.

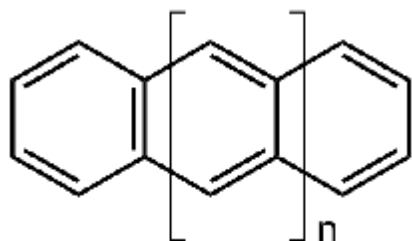
Για την κατασκευή οργανικών ημιαγωγών, οι συγχωνευμένες δομές δακτυλίων που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι τα ακένια, και σε μερικές περιπτώσεις το περυλένιο (perylene) και το ρουβρένιο (rubrene).

Τα ακένια, μια κατηγορία οργανικών ενώσεων και πολυκυκλικών υδρογονανθράκων, αποτελούνται από γραμμικά συγχωνευμένους δακτυλίους βενζολίου (benzene) και διαθέτουν πολλά παράγωγα, όπως φαίνεται παραστατικά στον παρακάτω πίνακα.

Name	Molecular formula	Number of rings	Molar mass	CAS number	Structural formula
Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	1	78.11 g/mol	71-43-2	
Naphthalene	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	2	128.17 g/mol	91-20-3	
Anthracene	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	3	178.23 g/mol	120-12-7	
Tetracene	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	4	228.29 g/mol	92-24-0	
Pentacene	C <sub>22</sub> H <sub>14</sub>	5	278.35 g/mol	135-48-8	
Hexacene	C <sub>26</sub> H <sub>16</sub>	6	328.41 g/mol	258-31-1	
Heptacene	C <sub>30</sub> H <sub>18</sub>	7	378.46 g/mol	258-38-8	

Πίνακας 3.1 Μια σειρά από συγχωνευμένους δακτυλίους βενζολίου. Ανάλογα με τον τρόπο συνδέσεως των δομών τους δημιουργούνται και τα αντίστοιχα παράγωγα ακένιων [Acene, <http://en.wikipedia.org/wiki/Acene>].

Τα ακένια και τα παράγωγά τους χρησιμοποιούνται ευρέως στην οργανική χημεία, στην επιστήμη της ηλεκτρολογίας και της ηλεκτρονικής. Ο γενικός συντακτικός τύπος για τα ακένια, παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2 Γενική δομή των ακένιων [Acene, <http://en.wikipedia.org/wiki/Acene>].

Ειδικότερα για τα OFETs, τα παράγωγα των ακένιων που χρησιμοποιούνται είναι το τετρακένιο και το πεντακένιο.

Το τετρακένιο (tetracene), ή αλλιώς ναφθακένιο (naphthacene), είναι ένας μοριακός οργανικός ημιαγωγός που ανήκει στην κατηγορία των πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων, αποτελείται από τέσσερις γραμμικά συγχωνευμένους δακτυλίους βενζολίου (όπως φαίνεται κι από τον πίνακα 3.1) και χρησιμοποιείται στα OFETs και στα OLEDs.

Το πεντακένιο (pentacene) είναι κι αυτό ένας οργανικός ημιαγωγός που ανήκει στους πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες, αλλά αποτελείται από πέντε γραμμικά συγχωνευμένους δακτυλίους (όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τον πίνακα 3.1).

Τόσο το τετρακένιο όσο και το πεντακένιο, με τις κατάλληλες μεθόδους επεξεργασίας, έχουν την ιδιότητα να σχηματίζουν πολυκρυσταλλικές δομές, που καθιστούν τη μεταφορά σε μονωτικά υποστρώματα αρκετά ικανοποιητική, και να σχηματίζουν μεγάλους ενιαίους κρυστάλλους.

Το πεντακένιο όμως δεν είναι διαλυτό και οξειδώνεται εύκολα αν έρθει σε επαφή με υπεριώδη ακτινοβολία (UV) ή το ορατό φως, με αποτέλεσμα να διαταράσσεται η μεταφορά των φορέων φορτίου και η κρυσταλλική δομή των συσκευών που κατασκευάζονται βάση αυτού. Επίσης, οι διεργασίες εναπόθεσης γίνονται μόνο μέσω κενού.

Παρόλα αυτά, όμως, μέσα από διάφορες διεργασίες και τεχνικές, το πεντακένιο μπορεί να προσφέρει παράγωγα (μονομερή, ολιγομερή και πολυμερή) τα οποία φέρουν τα πλεονεκτήματα που διαθέτει το πεντακένιο και το τετρακένιο και κανένα από τα μειονεκτήματα του πεντακένιου. Έτσι το πεντακένιο παραμένει το υψηλότερο σε προτίμηση οργανικό ημιαγωγίμο υλικό για την κατασκευή OFET.

Το εξακένιο (hexacene), το επτακένιο (heptacene), αλλά και τα παράγωγα του καθενός τους, τείνουν προς χρήση σε ηλεκτρονικές εφαρμογές και ειδικότερα για την κατασκευή οργανικών ημιαγωγών, προς το παρόν όμως και οι δύο αυτές κατηγορίες ακένιων δεν έχουν τεθεί σε χρήση και τόσο οι έρευνες όσο και τα αποτελέσματα βρίσκονται ακόμη σε πειραματικό στάδιο.

### 3.1.2 Ολιγομερή

Χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πολλών χρήσιμων ημιαγωγίμων πολυμερών (μεγάλα μόρια) μπορούν αντίστοιχα να προσφέρουν εξίσου καλά υλικά παράγωγα (μικρά μόρια) μέσω της διαδικασίας του ολιγομερισμού, για την κατασκευή πολλών ηλεκτρονικών συσκευών όπως π.χ. τρανζίστορ. Έτσι, προκύπτουν τα ολιγομερή.

Γενικά ως ολιγομερή, χαρακτηρίζονται τα μόρια ενδιάμεσης σχετικής μοριακής μάζας. Η δομή ενός ολιγομερούς αποτελείται από ένα μικρό και συγκεκριμένο αριθμό μονάδων μορίων χαμηλότερης σχετικής μοριακής μάζας.

Σε ένα ολιγομερές, ο βαθμός πολυμερισμού (degree of polymerization ή DP) είναι συνήθως μικρότερος από πέντε.

Με τον όρο βαθμός πολυμερισμού αναφέρεται ο αριθμός των μονάδων των μονομερών ενός ολιγομερούς, ενός πολυμερούς, ενός τελομερούς (ένα εξαιρετικά μικρό πολυμερές) ή ενός μακρομορίου (ένα πολύ μεγάλο μόριο).

Σε αντίθεση με τα πολυμερή, εάν σε ένα ολιγομερές γίνει αφαίρεση ενός από τα μονομερή του, οι χημικές ιδιότητες του ολιγομερούς μεταβάλλονται.

Τα ολιγομερή, ουσιαστικά, είναι ολιγομερικές εκδόσεις των αντίστοιχων πολυμερικών τους.

Δύο ενώσεις εξίσου σημαντικές με το βενζόλιο είναι το θειοφαίνιο και το φλουορένιο. Τα μόρια τόσο του ενός όσο και του άλλου μπορούν να λειτουργούν εξίσου αποτελεσματικά και στα μικρά και στα μεγάλα μόρια. Έτσι, εκτός από τα ακένια, δύο ακόμη σημαντικές ενώσεις

για την κατασκευή οργανικών ημιαγωγών είναι τα ολιγομερή παράγωγα των δύο παραπάνω ενώσεων, τα ολιγοθειοφένια και τα ολιγοφλουορένια, αντίστοιχα.

### Ολιγοθειοφένιο

Το θειοφαίνιο (thiophene) ή θειοφουράνιο (thiofuran) ανήκει στην κατηγορία των ετεροκυκλικών αρωματικών ενώσεων και αποτελείται από έναν επίπεδο πενταμελή δακτύλιο.

Το θειοφαίνιο ανακαλύφθηκε ουσιαστικά σαν πρόσμιξη σε βενζόλιο.

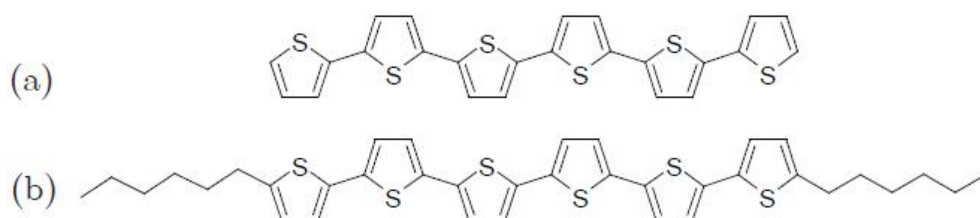
Τα ολιγοθειοφένια (oligothiophenes) δεν είναι τίποτε παραπάνω από ενώσεις που έχουν σχηματισθεί βάση μορίων θειοφαίνιου μέσω της διαδικασίας του ολιγομερισμού.

Σε αντίθεση με τον πολυμερισμό, μέσω της διαδικασίας του ολιγομερισμού (oligomerization) ένα μονομερές ή ένα μείγμα μονομερών μετατρέπεται σε ολιγομερές. Πρακτικά, ο ολιγομερισμός είναι μια διαδικασία όμοια με αυτή του πολυμερισμού. Η διαφορά όμως βασίζεται στο γεγονός ότι ο αριθμός των μονάδων των μονομερών είναι περιορισμένος.

Τα ολιγοθειοφένια είναι εύκολα επεξεργάσιμα και λειτουργούν πάνω κάτω όπως τα ακένια. Διαθέτουν την ιδιότητα να σχηματίζουν πολυκρυσταλλικές λεπτές μεμβράνες με ένα βαθμό επικάλυψης π τροχιακών παράλληλα του υποστρώματος.

Από το ολιγοθειοφένιο προκύπτουν επίσης πολλά παράγωγα. Τόσο αυτό, όσο και τα παράγωγά του χρησιμοποιούνται, σαν βασικό συστατικό, σε διάφορους τομείς της τεχνολογίας και κυρίως σε ηλεκτρονικές συσκευές όπως OFETs, OLEDs και οργανικά φωτοβολταϊκά συστήματα (organic photovoltaics ή OPVs).

Οι εικόνες 3.3 (a) και 3.3 (b) παρουσιάζουν παράγωγα που προσέλκυσαν αρκετά το ενδιαφέρον για χρήση σε ηλεκτρονικές κατασκευές κατά τα τελευταία χρόνια.



**ΕΙΚΟΝΑ 3.3** (a) Εξιθειοφένιο (Hexithiophene), μια ολιγομερής εκδοχή του πολυθειοφένιου που σχηματίζεται με διαδικασία εναπόθεσης σε κενό. (b) Μια εναλλακτική δομή του εξιθειοφένιου. Το παράγωγο αυτό διαθέτει βελτιωμένη κρυσταλλικότητα, εξαιτίας της πρόσθεσης δύο ομάδων αλκανίου (alkenes) στα άκρα του [Ioannis Kymissis, OFET/Organic semiconductor materials for OFETs].

Τα δύο παράγωγα που απεικονίζονται παραπάνω έχουν αναπτυχθεί για βελτίωση της δομής και της διαδικασίας στοίβαξης μεμβρανών.

Με τον όρο στοίβαξη μεμβράνης (film stacking), χαρακτηρίζεται η μέθοδος επεξεργασίας στρωμάτων μεμβράνης (φιλμ) και η ενίσχυση στις ίνες αυτών, χρησιμοποιώντας θερμότητα και πίεση.

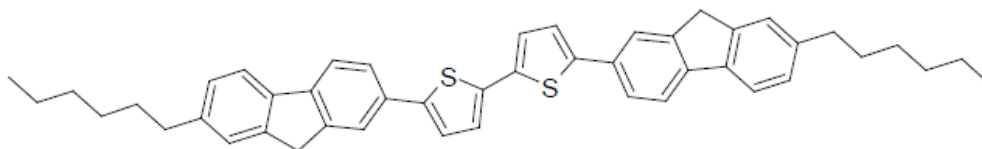
## Ολιγοφλουορένιο

Το φλουορένιο (fluorene), ή αλλιώς φθορένιο, είναι ένας εύφλεκτος πολυκυκλικός αρωματικός υδρογονάνθρακας με χαρακτηριστική αρωματική οσμή όμοια με αυτή της ναφθαλίνης (naphthalene). Είναι αδιάλυτο στο νερό, μα διαλυτό σε βενζόλιο και αιθέρα.

Από το φλουορένιο, μέσω της διαδικασίας του ολιγομερισμού παράγεται το ολιγοφλουορένιο, μια ολιγομερής εκδοχή του πολυμερούς ονόματι πολυφλουορένιο (polyfluorene).

Το ολιγοφλουορένιο (oligofluorene), ή αλλιώς ολιγοφθορένιο διατηρεί πολλές από τις υγρές κρυσταλλικές ιδιότητες της πολυμερικής του εκδοχής, και επιτρέπει τις διαδικασίες εναπόθεσης και καθαρισμού (εξάχνιση) μέσω κενού (vacuum deposition και vacuum purification, αντίστοιχα).

Όπως και με το ολιγοθειοφένιο, έτσι και το ολιγοφλουορένιο διαθέτει παράγωγα, όπως αυτό που φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



**Εικόνα 3.4** Με εναπόθεση σε θερμαινόμενο υπόστρωμα, το ολιγοφλουορένιο αποκτά ισχυρές αυτο-οργανωτικές ιδιότητες [Ioannis Kymissis, OFET/Organic semiconductor materials for OFETs].

### 3.1.3 Σταθερότητα έναντι του αέρα

Ένα αρκετά σημαντικό θέμα όσον αφορά τους ημιαγωγούς, οργανικούς και μη, είναι η σταθερότητα των μοριακών τους δομών. Ανάλογα με το είδος του υλικού που διατίθεται για την κατασκευή της εκάστοτε ηλεκτρονικής συσκευής, τον παράγοντα πρόσμιξης (στην περίπτωση ντοπαρίσματος), αλλά και τον τρόπο επεξεργασίας αυτών, προκύπτουν υλικά (καθώς και παράγωγα αυτών) που φέρουν διαφορετική σταθερότητα μεταξύ τους. Έτσι, γίνεται αντιληπτό ότι ο βαθμός σταθερότητας που διαθέτει κάθε ημιαγωγικό υλικό είναι διαφορετικός.

Ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο (βρίσκεται / τοποθετείται) ένας ημιαγωγός και το είδος των υλικών που τον απαρτίζουν, το αν θα παραμείνει ανεπηρέαστος ή όχι από πλευράς απόδοσης και λειτουργικότητας (σύμφωνα με τον αρχικό του σχεδιασμό) επηρεάζεται σημαντικά από το βαθμό της σταθερότητάς του.

Για ηλεκτρονικές διατάξεις στερεάς κατάστασης, και συγκεκριμένα για την περίπτωση των OFETs, δύο αρκετά ουσιαστικά χαρακτηριστικά που χρειάζεται να ληφθούν υπόψη και να εξετασθούν για τον σχεδιασμό ικανοποιητικά λειτουργικών οργανικών ημιαγωγών είναι η σταθερότητα ως προς τον αέρα (air stability).



Για τα οργανικά ημιαγωγιμα υλικά που περιέχουν άνθρακα, οξείδωση στα μόριά τους μπορεί να γίνει από το οξυγόνο, φέροντας ως αποτέλεσμα το γνωστό διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ). Μια τέτοια διαδικασία ονομάζεται οξειδοαναγωγή.

Γενικά, με τον όρο οξειδοαναγωγή (reduction-oxidation ή αλλιώς redox), θεωρείται οποιαδήποτε χημική αντίδραση κατά την οποία τα άτομα των υλικών ή ενώσεων που συμμετέχουν αλλάζουν αριθμό οξείδωσης, με αριθμό οξείδωσης (oxidation number ή oxidation state) να αναφέρεται ο βαθμός στον οποίο οξειδώνονται τα άτομα αυτά. Σε γενικές γραμμές, οι αντιδράσεις redox περιλαμβάνουν μεταφορά ηλεκτρονίων μεταξύ των χημικών ειδών (άτομα, μόρια, ιόντα, μοριακά θραύσματα ή μοριακές διαμορφώσεις) μέσα σε ένα υλικό ή χημική ένωση.

Η παραπάνω διαδικασία οξείδωσης του άνθρακα που παράγει διοξείδιο του άνθρακα είναι μια σχετικά απλή, γρήγορη και εύκολη διαδικασία οξειδοαναγωγής.

Στον τομέα των ηλεκτρονικών, και στην περίπτωση των ηλεκτρονικών στερεάς κατάστασης, οξείδωση (oxidation) χαρακτηρίζεται η αντίδραση εκείνη όπου τα άτομα σε ένα μόριο χάνουν ένα ηλεκτρόνιο, ενώ αναγωγή (reduction) η αντίδραση κατά την οποία τα άτομα κερδίζουν ένα ηλεκτρόνιο.

Ένας τρόπος παρατήρησης του βαθμού οξείδωσης και αναγωγής ενός υλικού είναι με τη μελέτη του φορτίου του. Αν τα άτομα του υλικού είναι θετικά φορτισμένα, τότε έχει επέλθει οξείδωση. Αν υπάρχει αρνητική φόρτιση, τότε το υλικό έχει υποστεί αντίδραση αναγωγής. Πρακτικά μιλώντας, οξείδωση είναι μια κατάσταση κατά την οποία υπάρχει απώλεια ηλεκτρονίων σε ένα υλικό (θετικά φορτισμένο υλικό), ενώ αναγωγή είναι η αύξηση του αριθμού των ηλεκτρονίων σε ένα υλικό (αρνητική φόρτιση).

Πίσω στο κεφάλαιο 2, έγινε αναφορά στους εξωγενείς (ντοπαρισμένους) ημιαγωγούς, στις δύο υποκατηγορίες τους (αυτές των τύπων n και p), καθώς και στις διαφοροποιήσεις μεταξύ αυτών των δύο. Οι υποκατηγορίες αυτές παρουσιάζουν αρκετές δυσκολίες ως προς τον τρόπο επεξεργασίας των υλικών από τα οποία απαρτίζονται.

Τόσο οι εξωγενείς ημιαγωγοί τύπου n όσο και οι εξωγενείς ημιαγωγοί τύπου p παρουσιάζουν αρκετά μεγάλη ευαισθησία σε αντιδράσεις redox.

Μέσα από μελέτες, πειράματα και απαριθμήσεις αντιδράσεων οξειδοαναγωγής, ο Δρ. D. M. de Leeuw παρατήρησε ότι υπό την παρουσία νερού και οξυγόνου, υπάρχουν ιόντα  $\text{H}^+$  (θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου ή αλλιώς κατιόντα υδρογόνου), ιόντα  $\text{OH}^-$  (υδροξείδιο), και μόρια  $\text{O}_2$  (οξυγόνο) που διατίθενται για οξείδωση και αναγωγή.

Για τους οργανικούς ημιαγωγούς τύπου n που δεν διαθέτουν σταθερότητα έναντι του αέρα, διαπίστωσε ότι μέσω των αντιδράσεων του δυναμικού οξειδοαναγωγής (κανονικό δυναμικό ή πρότυπο δυναμικό οξειδοαναγωγής, αγγλιστί reduction potential) που περιλαμβάνουν απλά και μόνο ιόντα νερού ή νερό μαζί με οξυγόνο, οι πιο πιθανές αντιδράσεις είναι αυτές της αναγωγής του  $\text{H}^+$  και του οξυγόνου σε νερό ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Σαν αποτέλεσμα, προκύπτουν μεταγενέστερες αντιδράσεις που προκαλούν διαταραχές στη μεταφορά των ηλεκτρονίων, μέσα σε μια ηλεκτρονική διάταξη.

Όσον αφορά τους οργανικούς ημιαγωγούς τύπου p, αυτοί είναι πιο ευαίσθητοι σε μια αντίδραση αναγωγής με νερό [Ioannis Kymissis, OFET/Organic semiconductor materials for OFETs/Air stability].

Στους οργανικούς ημιαγωγούς, το επίπεδο HOMO έχει την ίδια σημασία με αυτή της μέγιστης ζώνης σθένους (valence band maximum) για τους ανόργανους ημιαγωγούς. Αντίστοιχα, η ίδια αναλογία επικρατεί μεταξύ του επιπέδου LUMO και της ελάχιστης ζώνης αγωγιμότητας (conduction band minimum).

Παρατηρώντας τα επίπεδα ενέργειας των ηλεκτρονίων των οργανικών ημιαγωγών, μπορούμε να καταλάβουμε σε ένα κάποιο ποσοστό τον βαθμό σταθερότητας ενός ημιαγωγικού υλικού. Για παράδειγμα, σε ένα OFET που έχει κατασκευασθεί έχοντας ως βάση το πεντακένιο, παρατηρώντας τα επίπεδα ενέργειας, και συγκεκριμένα το χάσμα HOMO-LUMO, μπορούμε να πάρουμε μια ιδέα για το πόσο σταθερό ή όχι είναι το OFET αυτό. Όταν το HOMO επίπεδο είναι υψηλό και το χάσμα HOMO-LUMO μικρό, το εν λόγω OFET θεωρείται ότι έχει αστάθεια. Κατά συνέπεια, με το επίπεδο HOMO από τη μια να είναι υψηλό, τα μόρια του OFET αποκτούν ευαισθησία στην οξείδωση με τον αέρα (συνθήκες περιβάλλοντος), και με το HOMO-LUMO χάσμα από την άλλη να είναι μικρό, μπορεί εύκολα να προκληθεί μια φωτο-επαγόμενη διέγερση που να οδηγήσει σε μεταγενέστερες χημικές αντιδράσεις.

Με ρύθμιση των επιπέδων HOMO και LUMO (μέσω μεταβολής των επιπέδων ενέργειας των ηλεκτρονίων), τα υλικά μπορούν να θωρακιστούν έναντι των αντιδράσεων redox.

Για να επιτευχθεί σταθερότητα σε υλικά τύπου p, το επίπεδο HOMO απαιτείται να βρίσκεται σε περισσότερο από 5.2V (Volts) χαμηλότερα του επιπέδου του κενού (vacuum level).

Για υλικά τύπου n, όσον αφορά την απόκτηση σταθερότητας σε αυτά έναντι του οξυγόνου, απαιτείται οξείδωση μεγαλύτερη από 0.57V έναντι του ηλεκτρόδιου αναφοράς ονόματι κορεσμένο καλομέλινα ηλεκτρόδιο (saturated calomel electrode ή SCE).

Είναι όμως δυνατόν μέσω στερεοχημικών παρεμβολών με οξυγόνο ή νερό, τα υλικά που προορίζονται για την κατασκευή OFET να αποκτούν καλύτερη σταθερότητα.

Αλλα υλικά, στα οποία ενδέχεται να αλλάξει σημαντικά το τοπικό τους δυναμικό (local potential) εξ' αιτίας μιας εφαρμοσμένης πόλωσης (biasing), απαιτούν αφυδάτωση (dehydration reaction) και παθητικοποίηση (passivation) ώστε να πετύχουν ικανοποιητική σταθερότητα υπό πόλωση (bias) [Ioannis Kymissis, OFET/Organic semiconductor materials for OFETs/Air stability].

## 3.2 Μεγάλα μόρια

Ως μεγάλο μόριο ή πολυμερές (large molecule ή polymer, αντίστοιχα) χαρακτηρίζεται κάθε μόριο του οποίου η δομή αποτελείται από πολλαπλές επαναλαμβανόμενες υπομονάδες, γνωστές ως μονομερή.

Από προηγούμενη αναφορά, χαρακτηρίστηκε σημαντικά χρήσιμη μια από τις ιδιότητες του άνθρακα να σχηματίζει εύκολα αλυσίδες ή δίκτυα, με αποτέλεσμα την εμφάνιση δεσμών άνθρακα προς άνθρακα (C-C). Η διαδικασία μέσω της οποίας σχηματίζονται οι δεσμοί αυτοί ονομάζεται πολυμερισμός (και κατά συνέπεια οι αλυσίδες ή τα δίκτυα ονομάζονται πολυμερή).

Τα μονομερή (monomers), διαθέτοντας την ιδιότητα να δεσμεύονται χημικά με άλλα μόρια, είναι ενώσεις που χρησιμοποιούνται ως βασικό συστατικό για το σχηματισμό πολυμερών.

Τα πολυμερή παίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο στην καθημερινότητα λόγω των διαφόρων δυνατοτήτων που προσφέρουν. Σε σύγκριση με τα μικρά μόρια, η μεγάλη μοριακή μάζα τους προσδίδει σε αυτά μοναδικές φυσικές ιδιότητες, ιδιαίτερα χρήσιμες για κατασκευές πολυμερικών συσκευών όπως ανθεκτικότητα, ιξωδο-ελαστικότητα, ικανότητα σχηματισμού γυαλικών και ημικρυσταλλικών δομών.

Διακρίνονται σε φυσικά και συνθετικά. Και οι δύο αυτές υποκατηγορίες δημιουργούνται εξίσου μέσω πολυμερισμού πολλών μονομερών. Τα φυσικά πολυμερή ή αλλιώς βιοπολυμερή συντίθενται στο φυσικό περιβάλλον, δίχως ανθρώπινη παρέμβαση, ενώ τα συνθετικά πολυμερή, πιο γνωστά με τον όρο βιομηχανικά πολυμερή, είναι τεχνητά κατασκευασμένα.

Μετά την ανακάλυψη του πρώτου συνθετικού πολυμερούς ονόματι βακελίτη (bakelite) άρχισε η συνεχής και ευρεία παραγωγή συνθετικών πολυμερών, όπως το πολυαιθυλένιο, πολυθειοφένιο, πολυπροπυλένιο, νάιλον, τεφλόν (PTFE), πολυστυρόλιο, πολυεστέρες, πολυμεθυλο-μεθακρυλικό (πέρσπεξ και πλέξιγκλας, αγγλιστί Perspex και Plexiglas αντίστοιχα), πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) και το γνωστό καουτσούκ (rubber), το οποίο όμως ανήκει και στην κατηγορία των βιοπολυμερών.

Ενώ τα βιοπολυμερή παραμένουν αμετάβλητα (ως προς τη χημική δομή και τις ιδιότητές τους), στα συνθετικά πολυμερή τα πράγματα λειτουργούν διαφορετικά. Για κάθε συνθετικό πολυμερές, εφόσον αυτό τίθεται σε μελέτη και επεξεργασία, με μια διαφοροποίηση στην επεξεργασία του μπορούν να προκύψουν διάφορα παράγωγα, καθένα από αυτά για διαφορετική χρήση. Αυτό γίνεται μεταβάλλοντας τη διαδικασία του πολυμερισμού. Έτσι αλλάζει η χημική σύνθεση του παραγόμενου πολυμερούς (αλλαγή στο μήκος της αλυσίδας, στη διακλάδωση ή την τακτικότητα των μορίων του) και ως εκ τούτου και οι ιδιότητές του.

### 3.2.1 Πολυμερικές ενώσεις

Η συνεχιζόμενη έρευνα για βελτίωση της απόδοσης των ημιαγωγών παίζει ζωτικό ρόλο στην πρόοδο των οργανικών ηλεκτρονικών συσκευών. Πρακτικά, χωρίς ανεύρεση νέων ημιαγωγίμων υλικών η τεχνολογία των ηλεκτρονικών δεν μπορεί να προχωρήσει περαιτέρω. Για το λόγο αυτό, επιζητείται η δημιουργία νέων ημιαγωγών που θα μπορούν να τεθούν εύκολα σε διαδικασίες διάλυσης, θα κατέχουν υψηλή κινητικότητα, δομημένα και σταθερή διαμόρφωση, και θα είναι ανεπηρέαστα από τις εκάστοτε περιβαλλοντικές συνθήκες.

Με συνεχή και αδιάκοπη έρευνα, καινούργια πολυμερικά παράγωγα ή και εξ' ολοκλήρου καινούργια πολυμερή εφευρίσκονται όσο περνάει ο καιρός.

Τα OFETs απαρτίζονται από διάφορα μοντέλα πολυμερών, με αυτά που αναφέρονται στη συνέχεια ως παράδειγμα να είναι από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα στην κατασκευή OFET, λόγω του τρόπου λειτουργίας, της δομής και των χαρακτηριστικών που διαθέτουν. Αυτές οι χαρακτηριστικές τους ιδιότητες τα καθιστούν όχι μόνο κατάλληλα για χρήση σε OFETs αλλά και εφαρμόσιμα σε πολλά από τα υπόλοιπα πολυμερικά συστήματα.

#### Πολυθειοφένιο

Το πολυθειοφένιο είναι ένα πολυμερές που αποτελείται από πολλές επαναλαμβανόμενες μονάδες θειοφαίνιων και χρησιμοποιείται στην κατασκευή τρανζίστορ από το 1986. Μπορεί να συντεθεί είτε ηλεκτροχημικά (εφαρμόζοντας μεταξύ του διαλύματος θειοφαίνιου και ενός

ηλεκτρολύτη ένα δυναμικό) είτε χημικά (χρησιμοποιώντας οξειδωτικά ή καταλύτες διασταυρωμένης σύζευξης), με κάθε τεχνική να αποδίδει παράγωγα με διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Η ηλεκτροχημική μέθοδος είναι πρακτικά πιο εύκολη αφού το πολυμερές δεν χρειάζεται απομόνωση και καθαρισμό, το παράγωγο όμως αυτής της διαδικασίας υπάρχει περίπτωση να περιέχει ανεπιθύμητους άλφα-βήτα δεσμούς και διαφοροποιήσεις στην δόμησή του.

Η χημική μέθοδος από την άλλη, προσφέρει δύο πλεονεκτήματα που δεν συναντώνται με χρήση της ηλεκτροχημικής διαδικασίας. Πρώτον, μια ευρύτερη γκάμα επιλογής μονομερών, και δεύτερον, την παραγωγή τέλεια συμμετρικών θειοφαίνων με την επιλογή του σωστού καταλύτη.

Το πολυθειοφένιο χρησιμοποιείται αρκετά συχνά και σε μεγάλη γκάμα σε ηλεκτρονικές συσκευές.

Όσον αφορά το συμμετρικής περιοχής μοντέλο πολυθειοφένιου (regioregular polythiophene model), σε αυτό κάθε επαναλαμβανόμενη μονάδα προέρχεται από το ίδιο ισομερές του μονομερούς, σχηματίζοντας συμμετρικά πολυθειοφένια (regioregular polythiophenes).

Η εστίαση στην συμμετρία του πολυθειοφένιου καθώς και καθαρότητά του οδήγησαν σε ικανοποιητικά αυξανόμενη απόδοση, που τώρα πλέον μπορεί κάλλιστα να συγκριθεί με αυτή του άμορφου πυριτίου.

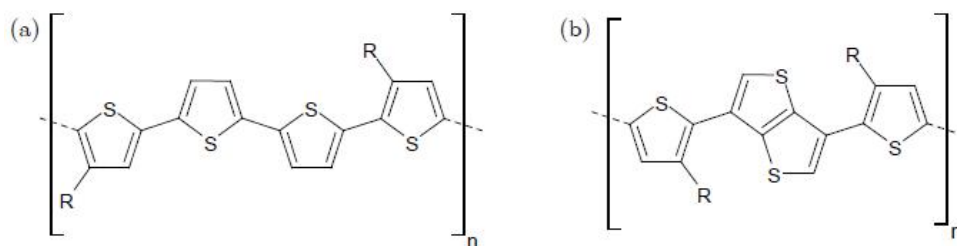
Στην περίπτωση των υγρών κρυστάλλων, υλικά υγρών κρυστάλλων μπορούν επίσης να κατασκευαστούν βάση μορίων πολυθειοφένιου.

Οι ημιαγωγοί υγρών κρυστάλλων μπορούν να δεχθούν επεξεργασία το ίδιο εύκολα με τους άμορφους και τους πολυμερικούς ημιαγωγούς. Η διαφορά βρίσκεται στην υψηλότερη κινητικότητα των φορέων φορτίων τους. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των ημιαγωγών υγρών κρυστάλλων που αξίζει προσοχής είναι η ρευστή φύση τους. Αυτή τους δίνει την έμφυτη ικανότητα να αυτο-οργανώνονται, να ευθυγραμμίζονται δηλαδή από διάφορα πεδία και δυνάμεις, με αποτέλεσμα την εύκολη εξάλειψη τυχόν ελαττωμάτων λόγω της αυτόματης επαναδόμησης που αυτοί διαθέτουν.

Με χαρακτηριστικά και ιδιότητες όπως τα παραπάνω, οι ημιαγωγοί υγρών κρυστάλλων θεωρούνται εξίσου σημαντικοί για εφαρμογές σε ένα αρκετά μεγάλο τομέα των ηλεκτρονικών, όπως π.χ. σε κατασκευή φωτοβολταϊκών συσκευών, οργανικών διόδων εκπομπής φωτός (OLEDs), TFTs, καθώς επίσης και σε OFETs.

Μια κοινή μέθοδος δημιουργίας OFET από υγρούς κρυσταλλικούς ημιαγωγούς είναι με προσθήκη ενός διαλύματος. Το παράγωγο της διαδικασίας αυτής θα είναι ένα εύκαμπτο OFET. Ένα τέτοιο OFET μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας το υγρο-κρυσταλλικό παράγωγο φαινυλ-τριθειοφαίνιο (phenyl-terthiophene) ως διαλύτη.

Στην εικόνα 3.5 που ακολουθεί, παρουσιάζονται δύο προηγμένα παράγωγα πολυθειοφένιου με υγρο-κρυσταλλικές ιδιότητες.



### Εικόνα

3.5

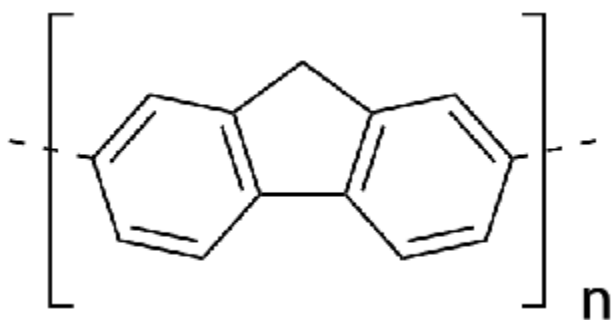
(a) Χημικός τύπος ενός μορίου του ημιαγωγού PQT  
 (b) Χημικός τύπος του πολυ (2,5-δισ (3-αλκυλ-θειοφαιν-2-υλ) θειενο [3,2-b] θειοφαίνιο. Το πολυμερές αυτό συναντάται περισσότερο με την αγγλική του ονομασία poly(2,5-bis(3-alkyl-thiophen-2-yl)thieno[3,2-b]thiophene).

Αυτά τα υλικά παράγωγα επεξεργάζονται με λύση (solution process) και μπορούν να μεταποιηθούν σε σχετικά μεγάλους τομείς μέσω ελεγχόμενων θερμικών κύκλων (thermal cycling process) [Ioannis Kymissis, OFET/Organic semiconductor materials for OFETs].

### Πολυφλουορένιο

Το πολυφλουορένιο ή πολυφθορένιο (polyfluorene) ανήκει στην κατηγορία των συνθετικών πολυμερών και προκύπτει με πολυμερισμό μιας ουσίας ονόματι φλουορένιο ή φθορένιο (fluorene). Χαρακτηρίζεται τόσο ηλεκτροδραστικός (electroactive polymer ή EAP) όσο και φωτοδραστικός (photoactive polymer), και παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον επειδή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες ηλεκτρονικές κατασκευές, λόγω της ηλεκτροφωταύγειας και των ηλεκτρονικών και απορροφητικών ιδιοτήτων που διαθέτει, ειδικά σε μεγάλο ποσοστό στα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου και πλέον με τη βοήθεια της σύγχρονης χημείας στα οργανικά τρανζίστορ επίδρασης πεδίου. Επίσης, αντιδρά και διαλύεται σχετικά εύκολα με τους περισσότερους διαλύτες.

Στην εικόνα 3.6 που ακολουθεί φαίνεται η χημική δομή ενός μορίου του πολυφλουορένιου.



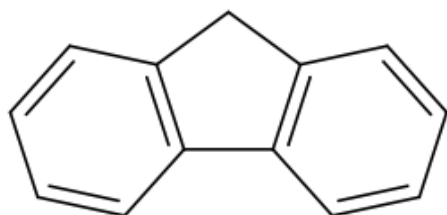
Εικόνα 3.6 Χημική δομή του πολυφλουορένιου [<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Polyfluorene.svg>].

Το φθορένιο, παίρνοντας την ονομασία του από την ιδιότητα φθορισμού που διαθέτει, είναι ένας πολυκυκλικός αρωματικός υδρογονάνθρακας που ανακαλύφθηκε από τον Marcellin Berthelot με απομόνωσή του από πίσσα άνθρακα και δεν έχει καμία σχέση με το εξαιρετικά αντιδραστικό και δηλητηριώδες αέριο ωχροκίτρινης εμφάνισης γνωστό ως φθόριο (fluorine), παρόλη την ομοιότητα των δύο αυτών ονομασιών τόσο στην ελληνική όσο και στην αγγλική γλώσσα.

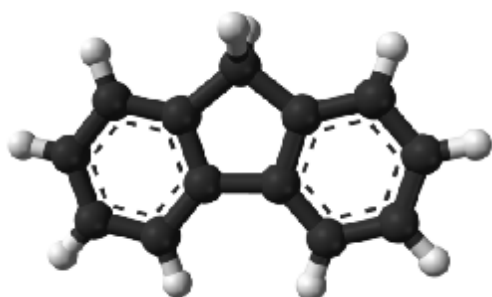
Εκτός από την τεχνική της απομόνωσης, το φθορένιο παράγεται με αφυδρογόνωση του διφαινυλομεθάνιου (diphenylmethane) ή με μείωση του διφαινυλενίου (biphenylene ή diphenylene) με ψευδάργυρο.

Η φύση του φθορένιου το καθιστά αρκετά ικανό για την κατασκευή πολυμερών εξαιτίας της ικανότητας που έχει να σταθεροποιεί και να άγει φορτίο.

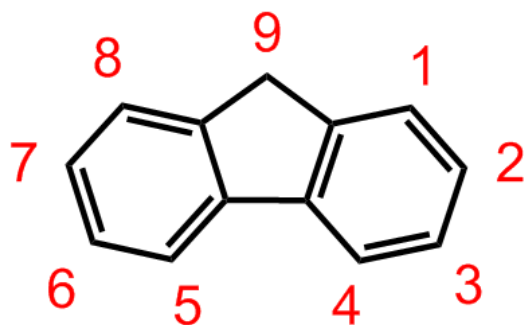
Το μόριο ενός φθορένιου είναι σχεδόν επίπεδο, με καθένα από τους δύο δακτυλίους βενζολίου να είναι στο ίδιο επίπεδο με τον κεντρικό άνθρακα 9 (ο αριθμός 9 δηλώνει τη θέση στην οποία συνδέονται οι πλευρικές αλυσίδες, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.9). Στις εικόνα 3.7, 3.8 και 3.9 παρουσιάζεται η δομή ενός μορίου του φθορένιου, το τρισδιάστατο μοντέλο του μορίου του και η αρίθμησή του (ως προς τον τρόπο σύνδεσης των παραγώγων του αλλά και του κεντρικού άνθρακα με τις πλευρικές αλυσίδες), αντίστοιχα.



**Εικόνα 3.7** Συντακτικός τύπος ενός μορίου του φθορένιου [<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Fluorene.svg>].



**Εικόνα 3.8** Αναπαράσταση της τρισδιάστατης δομής του μορίου του φθορένιου μέσω του μοριακού μοντέλου ball-and-stick [<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Fluorene-from-xtal-3D-balls.png>].



**Εικόνα 3.9** Τα παράγωγα ενός μορίου του πολυφλουορένιου συνήθως συνδέονται στις θέσεις 2 και 7. Η (κεντρική) θέση 9 είναι το σημείο σύνδεσης των πλευρικών αλυσίδων [[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Fluorene\\_numbered.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Fluorene_numbered.png)].

Επιπλέον, ένα άλλο χαρακτηριστικό του πολυφλουορένιου, η θερμοτροπική υγροκρυσταλλικότητα του, το καθιστά αρκετά σημαντικό για χρήση σε κατασκευή οθονών υγρών κρυστάλλων (LCDs).

Άλλα συστατικά που εγείρουν το ενδιαφέρον για χρήση τους σε κατασκευή ηλεκτρονικών συσκευών είναι τα παράγωγα του πολυφλουορένιου, εξαιτίας της υψηλής τους απόδοσης σε φωτοφωταύγεια, της υψηλής θερμικής σταθερότητας και του εύκολου χρωματικού συντονισμού, που οφείλονται σε χαμηλό διάκενο ζώνης (χάσμα) που επικρατεί στα μονομερή.

### 3.3 Οργανικοί αγωγοί

Στον τομέα της ηλεκτρολογίας και ηλεκτρονικής, και γενικά στον τομέα των φυσικών επιστημών, ως αγωγός χαρακτηρίζεται οποιοδήποτε αντικείμενο ή τύπος υλικού το οποίο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα.

Όσον αφορά τα οργανικά ημιαγώγιμα υλικά, τόσο τα ολιγομερή όσο και τα πολυμερή πολλών από αυτά υλικών, όταν ντοπαριστούν σε αρκετά μεγάλο βαθμό αποκτούν αγωγιμότητες σε βαθμό παρόμοιο με αυτόν των υψηλά αγώγιμων μετάλλων (high conductive metals), σχηματίζοντας, ουσιαστικά, οργανικά αγώγιμα υλικά που είναι υπεύθυνα για την κατασκευή οργανικών αγωγών (organic conductors).

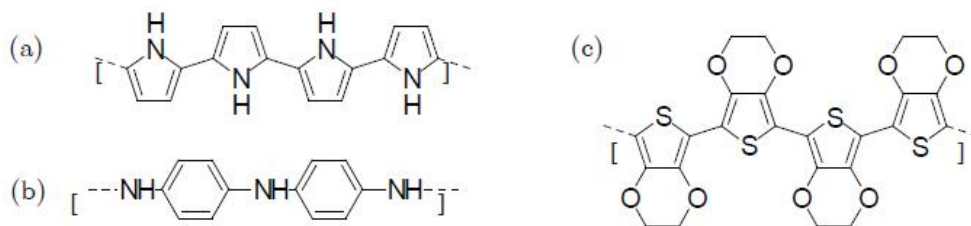
Τα υλικά αυτά συνήθως επιδέχονται επεξεργασία μέσω της διαδικασίας λύσης (solution process), που τα καθιστά εύχρηστα σε διαδικασίες εκτύπωσης ή επικάλυψης με άλλα διαλύματα, προτού δεχθούν τη διαδικασία ντοπαρίσματος.

Δεν διαλύονται όμως όλα τα οργανικά ημιαγώγιμα υλικά το ίδιο εύκολα σε διαλύτες. Πολλά από αυτά, μετά από μηχανική επεξεργασία, διαδικασία ντόπινγκ με οξέα ή επεξεργασία με τασιενεργά (επιφανειοδραστικές ουσίες, αγγλιστί surfactants), μπορούν να σχηματιστούν σε αγώγιμες διασπορές (conductive dispersions) και να εφαρμοστούν από διάλυμα σε υποστρώματα. Τέτοια υλικά χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά για την κατασκευή επαφών σε OFETs.

Ένα αρκετά μεγάλο πλεονέκτημα των οργανικών αυτών αγωγών που χρησιμοποιούνται για τέτοιο σκοπό είναι ότι η ευθυγράμμιση των ενεργειακών τους ζωνών αλλά και η ανάπτυξη και βελτίωση των υλικών της πηγής και των ηλεκτρονίων εκροής τους (drain electrodes) είναι καλύτερα από εκείνα των μεταλλικών επαφών. Αυτά τα δυσδιάλυτα υλικά μπορούν να προκύψουν με υψηλές τεχνικές επεξεργασίας της ενέργειας και κατάλληλη επιλογή του παράγοντα προσμίξεων και τασιενεργών, με τη μορφή μετασταθή διασπορών (metastable dispersions). Οι διασπορές αυτές είναι ικανές να δεχθούν τεχνικές εκτύπωσης με (blanket coating) και να χρησιμοποιηθούν ως πρότυπο ή να εξαγνισθούν από τυχόν προσμίξεις (π.χ. μέσω τεχνικών αντιντόπινγκ), ώστε να προσδιορισθούν και να ορισθούν τα στοιχεία του εκάστοτε ηλεκτρονικού κυκλώματος.

Ομοίως ισχύει και για τα οργανικά αγώγιμα πολυμερή.

Στην παρακάτω εικόνα 3.10 παρουσιάζονται (με τη μορφή του χημικού τύπου τους) μερικά από τα πιο συνήθη χρησιμοποιούμενα οργανικά αγώγιμα υλικά.



### Εικόνα

- (a) Πολυπυρρόλιου (αλλιώς πολυπυρρόλη, αγγλιστί polypyrrole)  
 (b) Πολυανιλίνη (polyaniline)  
 (c) Πολυ3,4-αιθυλενο-διοξυ-θειοφαίνιου (poly3,4-ethylene-dioxy-thiophene ή αλλιώς PEDOT)

3.10

Πολλά από αυτά τα πολυμερή, όταν συνδυαστούν με υδατοδιαλυτά οργανικά οξέα (π.χ. σουλφονικά οξέα όπως το βενζολιοσουλφονικό οξύ) μπορούν να σχηματίσουν ενισχυμένα συμπλέγματα (μέσω ντόπινγκ) που διαθέτουν υψηλή αγωγιμότητα και μπορούν να διασκορπιστούν σε μορφή αιωρήματος (αλλιώς εναιώρημα, αγγλιστί suspension). Παρόμοιες εκδοχές των πολυμερών αυτών που είναι αυτο-ντοπαρισμένα έχουν επίσης αναπτυχθεί [Ioannis Kymissis, OFET/The physics of organic semiconductors].

## 3.4 Συμπεράσματα

Όπως γίνεται αντιληπτό, με τη συνεχή έρευνα, μελέτη και κατασκευή νέων υλικών και τρόπων ανάπτυξης και επεξεργασίας αυτών, είναι σχεδόν ακατόρθωτο να αναφερθούν και να περιγραφούν όλες οι κατηγορίες των υλικών που είναι υπεύθυνα για το σχεδιασμό των OFET.

Τα οργανικά ημιαγώγιμα υλικά που είναι υπεύθυνα για την κατασκευή οργανικών ημιαγωγών, δεν είναι τίποτε άλλο από μικρά μόρια ή πολυμερή παραγόμενα από μια μικρή ομάδα θεμελιωδών συζευγμένων μονομερών.

Οι δυνατότητες ανάπτυξης νέων υλικών που προσφέρουν τόσο τα σύγχρονα τεχνολογικά μέσα όσο και η σύγχρονη οργανική χημεία, καθιστούν τα τελευταία χρόνια την κατασκευή νέων υλικών, με ιδιαίτερα απαιτούμενες ιδιότητες, χαρακτηριστικά και εφαρμογές, περισσότερο πραγματοποιήσιμη από ότι στις προηγούμενες δεκαετίες. Έτσι, τα οργανικά υλικά που σχεδιάζονται και διατίθενται για κατασκευή, προσφέρουν βελτιωμένη δυνατότητα επεξεργασίας και αξιοποίησης των ιδιοτήτων τους, καλύτερη σταθερότητα και ικανοποιητικότερη απόδοση.

Δεν είναι λίγοι οι τομείς των οργανικών ηλεκτρονικών που βρίσκονται ακόμη σε πειραματικό στάδιο, έναντι αυτών των αντίστοιχων ανόργανων ηλεκτρονικών, μα με τη βοήθεια της σύγχρονης τεχνολογίας και της οργανικής χημείας θα συνεχίσουν να αναπτύσσονται όλο και περισσότερα υλικά και συσκευές με ιδιότητες πιο βελτιωμένες σε σχέση με αυτές των ήδη υπάρχοντων, με μεγαλύτερες δυνατότητες επεξεργασίας, βελτίωσης και εκμετάλλευσης αυτών.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Κατασκευή των OFET

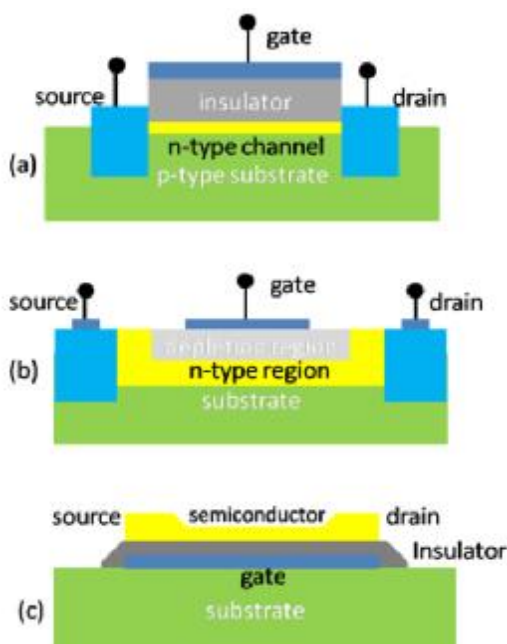
### 4.1 Εισαγωγή

Όλα τα τρανζίστορ που ανήκουν στην κατηγορία των τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FETs) περιέχουν τρία βασικά συστατικά και λειτουργούν βάση αυτών, την πηγή (source), την εκροή (drain) και την πύλη (gate).

Η κινητικότητα των φορέων φορτίου εξαρτάται από την πύλη και οι φορείς ταξιδεύουν με κατεύθυνση από την πηγή προς την εκροή.

Τα FET, σε όλες τις υποκατηγορίες τους (τρεις από τις οποίες αναφέρονται στην εικόνα 4.1) αποτελούνται από δύο πλάκες. Η μια πλάκα λειτουργεί ως αγωγίμο κανάλι μεταξύ δύο ωμικών επαφών (επαφές πηγής και εκροής), και η άλλη πλάκα λειτουργεί για να ελέγχει το φορτίο που επάγεται στο κανάλι (πύλη).

Η εικόνα 4.1 παρουσιάζει τα σχηματικά διαγράμματα τριών διαφορετικών ειδών FET.



**Εικόνα 4.1** Σχηματική τριών ειδών FET: (a) ενός MISFET (μέταλλο-μονωτής-ημιαγωγός τρανζίστορ επίδρασης πεδίου) (b) ενός MESFET (μέταλλο-ημιαγωγός τρανζίστορ επίδρασης πεδίου) (c) ενός TFT (τρανζίστορ λεπτής μεμβράνης) [[http://en.wikipedia.org/wiki/Organic\\_field-effect\\_transistor#Device\\_design\\_of\\_organic\\_field-effect\\_transistors](http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_field-effect_transistor#Device_design_of_organic_field-effect_transistors)].

Από την ανακάλυψή τους, τα οργανικά FETs, γνωστά με τον όρο OFETs, έχουν υποστεί διάφορες παραλλαγές και βελτιώσεις ως προς το σχεδιασμό τους. Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, στην πλειονότητά τους σχεδιάζονται βάση του TFT μοντέλου.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα που προκύπτει από αυτό είναι ότι τα OFETs μπορούν να κατασκευαστούν από υλικά με χαμηλή αγωγιμότητα.

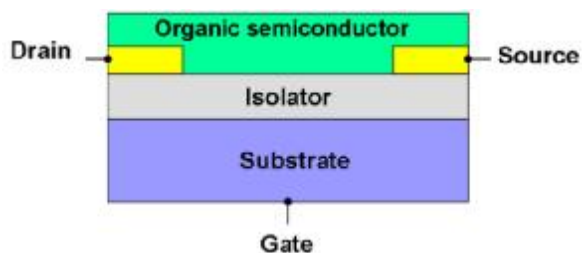
Για OFETs που σχεδιάζονται βάση του παραπάνω μοντέλου, έμφαση έχει δοθεί στην καλύτερευση της κινητικότητας επίδρασης πεδίου και στις on-off αναλογίες ρεύματος.

Με τον όρο κινητικότητα επίδρασης πεδίου (field-effect mobility), ή αλλιώς κινητικότητα ηλεκτρονίων (electron mobility), αναφέρεται το πόσο γρήγορα κινείται ένα ηλεκτρόνιο διαμέσου ενός ημιαγωγού ή μετάλλου, όταν έλκεται από ένα ηλεκτρικό πεδίο.

Ως on-off αναλογία ρεύματος (on-off current ratio), άλλες φορές συναντάται αναγραφόμενο και ως on/off current ratio, αναφέρεται η αναλογία ρεύματος σε on και off καταστάσεις σε ένα τρανζίστορ, και χαρακτηρίζει την αποδοτικότητα του τρανζίστορ, το πόσο γρήγορα δηλαδή μπορεί να ενεργοποιείται και να απενεργοποιείται (κατάσταση on και κατάσταση off, αντίστοιχα).

Η βελτίωση στην κινητικότητα επίδρασης πεδίου και στις on-off αναλογίες ρεύματος συνεπάγεται και βελτίωση της απόδοσης των OFETs.

Στην εικόνα 4.2 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα ενός OFET, σχεδιασμένο βάση του μοντέλου TFT.



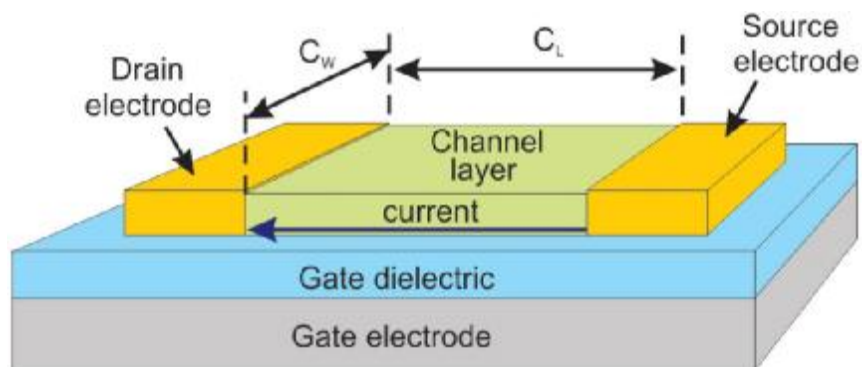
**Εικόνα 4.2** Σχηματική ενός οργανικού τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (OFET) [<http://en.wikipedia.org/wiki/OFET#OFET>].

Όπως έγινε σχετική αναφορά στο κεφάλαιο 1, λόγω των van der Waals δεσμών τους, οι οργανικοί ημιαγωγοί έχουν σχετικά ασθενείς αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων τους, πράγμα που σημαίνει ότι δεν χρειάζεται να επιχειρηθεί καμία απόπειρα διάσπασης ή ανασχηματισμού των ομοιοπολικών τους δεσμών, καθιστώντας έτσι αρκετά εύκολη την επεξεργασία και αξιοποίηση αυτών για τη δημιουργία βέλτιστων ηλεκτρονικών κατασκευών, τόσο από πλευράς λειτουργικότητας όσο και απόδοσης. Έτσι, με μια απλή χρήση μιας μέτριας ενεργητικής εισόδου μπορεί εύκολα να γίνει διαχείριση των μορίων τους, μιας και η ενέργεια που απαιτείται για την διάσπαση των δεσμών van der Waals είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη που χρειάζεται για την διάσπαση των ομοιοπολικών δεσμών στα περισσότερα αγωγά και ημιαγωγά πολυμερή. Αυτό βέβαια μπορεί από τη μια να καθιστά εύκολη την εφαρμογή διάφορων μεθόδων και τεχνικών επεξεργασίας, μα από την άλλη καθιστά τη δομή και τις ιδιότητες των στρωμάτων (επιπέδων) της εκάστοτε διάταξης να διαταράσσεται εύκολα.

Οι τεχνικές και διαδικασίες επεξεργασίας και κατασκευής των OFET είναι διάφορες και με την ανεύρεση νέων υλικών αναπτύσσονται όλο και περισσότερες. Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει μια αναφορά από τις πιο σημαντικές (και ευρύτερα) χρησιμοποιούμενες τεχνικές, μερικών από τα συνηθέστερα σε χρήση υλικών.

## 4.2 Βασική δομή και λειτουργία των OFET

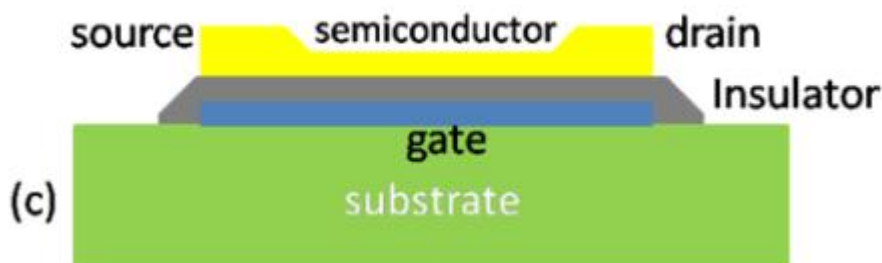
Στην εικόνα 4.3 παρουσιάζονται και περιγράφονται με πιο ακριβή τρόπο τα βασικά συστατικά ενός OFET.



**Εικόνα 4.3** Εδώ παρουσιάζονται τα απαραίτητα μέρη που παίζουν ρόλο τόσο στη λειτουργία (κατάσταση on) αλλά και στην μη λειτουργία (κατάσταση off) ενός OFET. Αυτά είναι η πηγή με το ηλεκτρόδιο της (source και source electrode), η εκροή και το αντίστοιχο ηλεκτρόδιο της (drain και drain electrode), το οργανικό ημιαγώγιμο υλικό ή οργανικό ημιαγώγιμο στρώμα ή αλλιώς ο οργανικός ημιαγωγός (organic semiconducting material ή semiconducting layer ή semiconductor, αντίστοιχα) ή αλλιώς κανάλι ή στρώμα καναλιού (channel ή channel layer, αντίστοιχα) αφού πρακτικά σχηματίζει κανάλι μεταξύ πηγής και εκροής, το διηλεκτρικό της πύλης ή αλλιώς μονωτικό υλικό ή μονωτής (gate dielectric ή insulating material ή insulator) και το ηλεκτρόδιο της πύλης (gate electrode) [<http://spie.org/x57011.xml> και [http://spie.org/Images/Graphics/Newsroom/Imported-2011/003815/003815\\_10\\_fig1.jpg](http://spie.org/Images/Graphics/Newsroom/Imported-2011/003815/003815_10_fig1.jpg)].

Παρατηρώντας τις εικόνες 4.1 (c) και 4.2, βλέπουμε ότι οι σχηματικές μεταξύ ενός TFT και ενός OFET είναι πανομοιότυπες. Λαμβάνοντας υπόψη τις ομοιότητες κατασκευής, οποιοδήποτε από αυτά τα δύο σχηματικά διαγράμματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αναφορά της λειτουργίας ενός OFET.

Μια αναλυτική εξήγηση της λειτουργίας ενός OFET, εξελίσσεται παρακάτω.



**Εικόνα 4.1 (c)** Σχηματική ενός TFT, η αρχιτεκτονική του οποίου χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό και την κατασκευή OFET [[http://en.wikipedia.org/wiki/Organic\\_field-effect\\_transistor#Device\\_design\\_of\\_organic\\_field-effect\\_transistors](http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_field-effect_transistor#Device_design_of_organic_field-effect_transistors)].

Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1(c), το οργανικό ημιαγώγιμο υλικό (απεικονίζεται ως ένα κίτρινο στρώμα) που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των φορέων φορτίου βρίσκεται σε επαφή με τα ηλεκτρόδια της πηγής και της εκροής (αριστερό και δεξί άκρο του κίτρινου στρώματος, αντίστοιχα), και το μονωτικό υλικό (γκρίζο στρώμα). Όταν εφαρμοστεί πόλωση (πόλωση πύλης, αγγλιστί gate bias) μεταξύ της πύλης (blue colored layer) και της πηγής (αριστερό άκρο του κίτρινου στρώματος), προκύπτει συσσώρευση φορέων στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ του ημιαγωγού και μονωτικού υλικού. Ανάλογα με τον τύπο του φορτίου της πόλωσης που εφαρμόζεται (τάση πύλης), θα υπάρξει και ανάλογη εμφάνιση τύπου φορέων (συσσώρευση είτε ηλεκτρονίων με εφαρμογή θετικής πόλωσης –διάταξη καναλιού n–, είτε οπών με εφαρμογή αρνητικής πόλωσης –διάταξη καναλιού p–).

Η αγωγιμότητα εξαρτάται από την πυκνότητα των φορέων φορτίου. Με αύξηση της πυκνότητας των φορέων, σχηματίζεται ένα υψηλά αγωγίμο κανάλι μεταξύ της πηγής και της εκροής. Το τρανζίστορ ενεργοποιείται (κατάσταση on), και ο ημιαγωγός-κανάλι διαρρέεται από ρεύμα μόλις εφαρμοστεί πόλωση (πόλωση εκροής, αγγλιστί drain bias) μεταξύ της εκροής (δεξί άκρο του κίτρινου στρώματος) και της πηγής.

Για την απενεργοποίηση του τρανζίστορ (κατάσταση off), χρειάζεται εφαρμογή μιας πόλωσης στην πύλη (gate bias) που δεν επιτρέπει τη συσσώρευση φορέων φορτίου.

### **4.3 Τρόποι κατασκευής των OFET και παραλλαγές αυτών**

Στον κλάδο των διαφόρων επιστημών (φυσική, χημεία, ηλεκτρονική, μηχανική, κ.τ.λ.), και συγκεκριμένα στον τομέα της χημικής μηχανικής (chemical engineering), η λειτουργία μονάδας (unit operation) θεωρείται βασικό βήμα μιας διαδικασίας.

Οι λειτουργίες μονάδας μπορεί να περιλαμβάνουν φυσικές ή χημικές μεταβολές, όπως είναι για παράδειγμα η εξάτμιση (evaporation), η κρυστάλλωση (crystallization), ο διαχωρισμός (separation), η διήθηση (filtration), ο πολυμερισμός (polymerization) και ο ισομερισμός (isomerization).

Όσον αφορά την κατασκευή ημιαγώγιμων συσκευών, όπως είναι για παράδειγμα τα OFET, υπάρχουν τέσσερις κύριες κατηγορίες επεξεργασίας, η εναπόθεση (deposition), η απομάκρυνση (removal), η διαμόρφωση ή σχηματομόρφωση (patterning), και η τροποποίηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων (modification of electrical properties).

Οι διεργασίες αυτές, αλλά και οι διάφορες παραλλαγές τους, αναλύονται παρακάτω.

#### **4.3.1 Τεχνικές εναπόθεσης**

Μια αρκετά μεγάλης σημασίας διαδικασία που περιλαμβάνεται σε μια από τις πέντε κατηγορίες λειτουργιών μονάδας (διαδικασίες ροής των ρευστών, διαδικασίες μεταφοράς

θερμότητας, διαδικασίες μεταφοράς μάζας, θερμοδυναμικές διαδικασίες και μηχανικές διαδικασίες) του τομέα της χημικής μηχανικής, και παίζει σημαντικό ρόλο στην κατασκευή οργανικών ημιαγωγικών υλικών, και άρα στην κατασκευή OFET, είναι η εναπόθεση.

Ως εναπόθεση (deposition) χαρακτηρίζεται οποιαδήποτε διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα την τοποθέτηση ενός λεπτού στρώματος υλικού (thin layer of material) σε μια επιφάνεια ή υπόστρωμα, ή επάνω σε ήδη τοποθετημένο στρώμα υλικού. Το λεπτό αυτό στρώμα υλικού είναι γνωστό με τον όρο λεπτή μεμβράνη ή λεπτό φιλμ (thin film).

Οι διαδικασίες ή αλλιώς μέθοδοι ή τεχνικές εναπόθεσης, ανάλογα με τον τρόπο διεξαγωγής τους, διακρίνονται σε φυσικές και χημικές.

Η φυσική εναπόθεση (physical deposition) περιλαμβάνει μηχανικές, ηλεκτρομηχανικές, και θερμοδυναμικές διαδικασίες για την παραγωγή ενός στερεού υλικού λεπτής μεμβράνης. Μερικές από τις πιο αξιολογούμενες φυσικές μεθόδους εναπόθεσης είναι οι τεχνικές θερμικής εξάτμισης (thermal evaporation techniques), η εναπόθεση καθοδικής διασκόρπισης (sputter deposition), η παλμική εναπόθεση με λέιζερ (pulsed laser deposition ή PLD), η εναπόθεση καθοδικού τόξου (cathodic arc deposition ή arc-PVD) και η ηλεκτροϋδροδυναμική εναπόθεση ή αλλιώς εναπόθεση με ηλεκτροψεκασμό (electrohydrodynamic deposition ή electro spray deposition).

Οι μέθοδοι χημικής εναπόθεσης (chemical deposition methods) θέτουν έναν πρόδρομο ρευστής κατάστασης (fluid precursor) που βρίσκεται σε μια στερεά επιφάνεια σε χημική αλλαγή, παράγοντας σαν αποτέλεσμα ένα στερεό στρώμα (solid layer). Με τον τεχνικό όρο πρόδρομος (precursor), στον τομέα της χημείας, αναφέρεται μια ένωση που συμμετέχει στην χημική αντίδραση που παράγει μια άλλη ένωση.

Οι τεχνικές χημικής εναπόθεσης διακρίνονται με βάση το είδος του μέσου ρευστής κατάστασης. Μερικές από τις πιο σημαντικές τεχνικές είναι η επιμετάλλωση (plating), η χημική εναπόθεση μέσω διαλύματος (chemical solution deposition ή CSD ή Sol-gel), η χημική εναπόθεση μέσω λουτρού (chemical bath deposition ή CBD), η επικάλυψη (επίστρωση) με περιστροφή (spin coating), η επικάλυψη μέσω χύτευσης (spin casting), χημική εναπόθεση μέσω ατμού (chemical vapor deposition ή CVD) και η εναπόθεση ατομικού (διασπάσιμου) στρώματος (atomic layer deposition ή ALD).

Οι περισσότερες μέθοδοι φυσικής εναπόθεσης χρησιμοποιούν ένα περιβάλλον ατμού χαμηλής πίεσης, τοποθετώντας τις στην περίπτωση φυσικής εναπόθεσης ατμών (physical vapor deposition ή PVD). Τέτοιες τεχνικές είναι οι τεχνικές θερμικής εξάτμισης, η εναπόθεση καθοδικής διασκόρπισης, η παλμική εναπόθεση με λέιζερ, η εναπόθεση καθοδικού τόξου και η εναπόθεση ηλεκτρονίων δέσμης (electron beam deposition), μια από τις διάφορες παραλλαγές εναπόθεσης μέσω θερμικής εξάτμισης.

Η χημική εναπόθεση ατμών (chemical vapor deposition ή CVD), από την άλλη, χρησιμοποιεί έναν πρόδρομο αέριας κατάστασης (gaseous precursor), συχνά ένα αλογονίδιο (halide) ή υδρίδιο (hydride) του στοιχείου που τίθεται σε εναπόθεση. Η μέθοδος της χημικής εναπόθεσης ατμών χρησιμοποιείται συχνά στην κατηγορία των πολυμερών.

Λόγω πληθώρας των τεχνικών εναπόθεσης που επικρατούν, με άλλες να χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε οργανικούς ημιαγωγούς και οργανικές διατάξεις, άλλες σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, κι άλλες να βρίσκονται ακόμη μόνο σε εργαστηριακή εφαρμογή, στις υποενότητες που ακολουθούν γίνεται μια ανάλυση των σημαντικότερων και πιο

χρησιμοποιούμενων μεθόδων εναπόθεσης, και μια απλή αναφορά σε υπόλοιπες, λιγότερο χρησιμοποιούμενες μεθόδους.

#### 4.3.1.1 Εναπόθεση μέσω θερμικής εξάτμισης

Η θερμική εξάτμιση (thermal evaporation), υπεύθυνη για εναπόθεση (deposition) και εξαγνισμό (purification) οργανικών ημιαγωγικών υλικών, χρησιμοποιείται συνήθως στην επεξεργασία των τρανζίστορ, αλλά και των ημιαγωγών γενικότερα, κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Επίσης συναντάται αρκετά συχνά σε διαδικασίες εναπόθεσης λεπτών μεμβρανών (thin films). Το υλικό που δέχεται επεξεργασία εξατμίζεται σε συνθήκες κενού.

Η τεχνική θερμικής εξάτμισης υπό κενό περιλαμβάνει δύο βασικές διεργασίες. Την εξάτμιση (evaporation) και τη συμπύκνωση (condensation) ενός υλικού το οποίο θερμαίνεται.

Γενικά, η εξάτμιση υπό κενό (vacuum evaporation) είναι μια διαδικασία κατά την οποία η πίεση μέσα σε ένα δοχείο πίεσεως γεμάτο με υγρό μειώνεται κάτω από την τάση ατμών του υγρού, αναγκάζοντας το υγρό να εξατμιστεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτή που θα εξατμιζόταν κανονικά, όπου τάση ατμών (vapor pressure ή equilibrium vapor pressure) είναι η πίεση που ασκεί ο ατμός (ένα υλικό σε αέρια μορφή, αγγλιστί vapor) στο εσωτερικό περιβάλλον ενός δοχείου στο οποίο αυτό περιέχεται. Ως δοχείο πίεσεως (pressure vessel) μπορεί να θεωρηθεί οποιοδήποτε κλειστό δοχείο κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να συγκρατεί υγρά ή αέρα σε μια πίεση (εσωτερική πίεση του δοχείου) διαφορετική από αυτή του περιβάλλοντος.

Όσον αφορά τον τομέα των ηλεκτρονικών (ηλεκτρονική, μικροηλεκτρονική, οπτική, κτλ.), και συγκεκριμένα για τους οργανικούς ημιαγωγούς, με τον γενικότερο όρο εξάτμιση υπό κενό χαρακτηρίζεται η διαδικασία εναπόθεσης λεπτών στρωμάτων ενός υλικού σε μια επιφάνεια.

Κατά τη διαδικασία εναπόθεσης, το υλικό τοποθετείται στο κενό και θερμαίνεται. Όταν η τάση ατμών του θερμαινόμενου υλικού ξεπεράσει την πίεση του περιβάλλοντος του δοχείου (πίεση στο εσωτερικό του δοχείου, συνηθέστερα αναφερόμενη με τον αγγλικό όρο background pressure), το υλικό εξατμίζεται, παίρνοντας τη μορφή ατμού μέσα στο δοχείο, και συμπυκνώνεται όταν κατακάθεται σε επιφάνειες ψυχρότερες από αυτό.

Η εναπόθεση θερμικής εξάτμισης μέσω κενού χρησιμοποιείται στην περίπτωση των μικρών μορίων (ημιαγώγιμα υλικά χαμηλού μοριακού βάρους) καθώς αυτά είναι αρκετά ελαφρά, με αποτέλεσμα η διαδικασία εξάτμισής τους να επιτυγχάνεται εύκολα.

Τα πολυμερή (μεγάλα μόρια) από την άλλη, τα οποία λόγω του υψηλού μοριακού τους βάρους είναι αρκετά βαριά για να εναποτεθούν με τον παραπάνω τρόπο, δέχονται τεχνικές αποσύνθεσης που περιλαμβάνουν υψηλές ή υπερυψηλές συνθήκες κενού (high vacuum or ultra-high vacuum, αντίστοιχα).

Παρόμοια διαδικασία που εφαρμόζεται στα πολυμερή, ισχύει και για τα μέταλλα.

Η παραπάνω περιγραφή θερμικής εξάτμισης, η οποία ανήκει στην κατηγορία φυσικής εναπόθεσης ατμών (PVD), περιγράφει μία από της διάφορες μεθόδους εναπόθεσης μέσω εξάτμισης, και χρησιμοποιήθηκε ως παράδειγμα για να γίνουν εύκολα αντιληπτά τα στάδια εξάτμισης και συμπύκνωσης ενός υλικού.

Οι τεχνικές εξάτμισης, σε όλες τους τις εφαρμογές απαιτούν την ύπαρξη κάποιας μορφής συστήματος ικανού να προκαλεί εξάτμιση ενός υλικού, και μιας αντλίας κενού (vacuum pump) ώστε να δημιουργούνται συνθήκες κενού. Ο παράγοντας εξάτμισης (μέσον εξάτμισης) όμως του υλικού που τίθεται σε εναπόθεση μπορεί να αλλάζει.

Τα διάφορα μέσα εξάτμισης ενός υλικού που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τεχνικές εξάτμισης αναλύονται παρακάτω.

### **Τεχνική θερμικής εξάτμισης**

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνεται και το παραπάνω σχετικό παράδειγμα με το δοχείο πίεσεως και την αντλία κενού που καθιστά το εσωτερικό περιβάλλον του δοχείου τέτοιο ώστε να δημιουργεί και να διατηρεί συνθήκες όμοιες με αυτές στο κενό.

Εδώ, ένας θερμικός εξατμιστήρας (αγγλιστί thermal evaporator, αλλά και γενικά ένα οποιοδήποτε μέσον που μπορεί να προκαλέσει θερμική εξάτμιση, π.χ. ένα δοχείο πίεσης) μέσω ενός ηλεκτρικού θερμαντήρα αντίστασης (electric resistance heater) λιώνει το επιθυμητό υλικό και αυξάνει την τάση ατμών του σε ικανοποιητικό βαθμό, ανάλογα με το είδος του υλικού.

Για να αποτραπεί η πιθανότητα ο ατμός (υλικό σε ατμώδες, αέρια κατάσταση) να έρθει σε επαφή με άλλα άτομα αέριας κατάστασης (background gases) που μπορεί να υπάρχουν μέσα στο περιβάλλον του εξατμιστήρα, η τεχνική εναπόθεσης με θερμική εξάτμιση γίνεται σε συνθήκες υψηλού κενού (high vacuum). Έτσι αποφεύγεται η προσθήκη προσμίξεων (ακαθαρσιών) στο υλικό (ατμός).

Στην περίπτωση της εναπόθεσης με επίταξη (epitaxy), μια από τις διάφορες τεχνικές αυτής, η επίταξη μοριακής δέσμης, μπορεί να περιληφθεί στην κατηγορία της εναπόθεσης με θερμική εξάτμιση.

Η επίταξη μοριακής δέσμης (molecular beam epitaxy) περιλαμβάνει διεργασίες επαναλαμβανόμενης εναπόθεσης πολλών στρωμάτων ενός στοιχείου σε μια επιφάνεια, εναποθέτοντας ένα στρώμα τη φορά.

Στην περίπτωση της επαναλαμβανόμενης εναπόθεσης ενός στρώματος ενός στοιχείου σε στρώμα ενός άλλου στοιχείου, η τεχνική αυτή χαρακτηρίζεται τόσο φυσική όσο και χημική.

### **Εξάτμιση μέσω δέσμης ηλεκτρονίων**

Αντί ενός θερμικού εξατμιστήρα, στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ένας εξατμιστήρας δέσμης ηλεκτρονίων (electron beam evaporator). Το υλικό που οδεύει προς εναπόθεση θερμαίνεται από μια ακτίνα υψηλής ενέργειας πυροδοτούμενη από έναν εκπομπό ηλεκτρονίων (electron emitter ή αλλιώς electron gun) μέσω του εξατμιστήρα δέσμης ηλεκτρονίων.

Ουσιαστικά, η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει ένα μικρό σημείο του υλικού να θερμαίνεται κάθε φορά. Αυτό καθιστά τη θέρμανση ανομοιόμορφη, πράγμα που σημαίνει ότι η μέθοδος αυτή χρησιμεύει για εναπόθεση υλικών με χαμηλή τάση ατμών.

## Στιγμαιαία ή μερική εξάτμιση

Μια από τις απλούστερες λειτουργίες μονάδας, η στιγμιαία ή μερική εξάτμιση (flash ή partial evaporation ) είναι μια μέθοδος κατά την οποία δημιουργείται μερικός ατμός όταν ένα κορεσμένο υγρό υποβάλλεται σε μείωση της πίεσης, όταν ρέει διαμέσου μιας βαλβίδας στραγγαλισμού (throttling valve), ή γενικά μια συσκευή στραγγαλισμού (throttling device).

Ως κορεσμένο υγρό (saturated liquid) θεωρείται μια ουσία που βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας μεταξύ ατμού–υγρού (vapor–liquid equilibrium).

Το όνομά της μεθόδου αυτής προκύπτει από την στιγμιαία μετατροπή ενός μέρους του υγρού σε αέριο (ατμός), όταν το κορεσμένο υγρό είναι ένα ενιαίο συστατικό (single-component liquid) όπως για παράδειγμα το υγρό προπάνιο (liquid propane) ή η υγρή αμμωνία (liquid ammonia).

Σε περίπτωση που το κορεσμένο υγρό αποτελείται από παραπάνω από πολλά συστατικά (multi-component liquid), όπως για παράδειγμα ένα μίγμα προπάνιου, βουτανίου ή ισοβουτανίου (a mixture of propane, butane ή isobutene, αντίστοιχα), ο μερικός ατμός που προκύπτει διαθέτει μεγαλύτερες ποσότητες πτητικών συστατικών (volatile components) από το υπόλοιπο υγρό.

## Ωμική εξάτμιση

Κατά την ωμική εξάτμιση (resistive evaporation), αλλιώς ωμική θερμική εξάτμιση (resistive thermal evaporation), ένα λεπτό σύρμα (filament wire) το οποίο θερμαίνεται με ηλεκτρική ενέργεια και στη συνέχεια θερμαίνει το επιθυμητό υλικό που προορίζεται για εναπόθεση. Η τεχνική αυτή διαδραματίζεται σε αρκετά υψηλές συνθήκες κενού.

### 4.3.1.2 Υγρή εναπόθεση

Μια εξίσου χρήσιμη κατηγορία τεχνικών εναπόθεσης, όπως αυτή της εξάτμισης, είναι με υγρή εναπόθεση ή εναπόθεση μέσω υγρών (liquid deposition). Η υγρή εναπόθεση χρησιμοποιείται για εναπόθεση ενεργών στρωμάτων ή επεξεργασία στρωμάτων που έχουν ήδη εναποτεθεί (με κάποιον τρόπο).

Η υγρή εναπόθεση (liquid deposition) πήρε την ονομασία αυτή επειδή πολύ απλά σχεδόν όλες οι διεργασίες που εκτελούνται έχουν να κάνουν με κάποιο είδος ρευστού (υγρό).

Το υλικό ή παράγοντας υγρής εναπόθεσης (liquid precursor) που χρησιμοποιείται είναι ρευστής κατάστασης. Μπορεί να είναι κάποιο ιξώδες υγρό (viscosity liquid), κolloειδές αιώρημα (colloidal suspension), φρίτης (frit), μεταλλικό αιώρημα (metallic suspension), και γενικά οποιοδήποτε υλικό μπορεί να διασπαστεί σε κάποιον υγρό υλικό φορέα. Το υλικό-φορέας μπορεί να είναι υδάτινος, ή όχι, διαλύτης.

Με τον τεχνικό όρο φρίτης (frit) αναφέρεται μια κεραμική σύνθεση που έχει συντηχθεί σε ειδικό κλίβανο τήξης, έχει δεχθεί απόσβεση (quenching) για σχηματισμό γυαλιού και έχει κοκκοποιηθεί (granulation).



Για την διεργασία μεθόδων υγρής εναπόθεσης, χρησιμοποιείται μια σειρά από παραλλαγές προδρόμων (presurors), που μπορούν να εναποτεθούν και να αντιδράσουν ώστε να σχηματίσουν λεπτές μεμβράνες.

Μια αρκετά κοινή μέθοδος υγρής εναπόθεσης είναι με χρήση κεριών στερεάς κατάστασης. Συγκεκριμένα, τα κεριά παραφίνης (paraffin waxes) χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μέσων μόνωσης στις ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές. Τα κεριά αυτά μπορούν να θερμανθούν και να εναποτεθούν σε μια επιφάνεια ή υπόστρωμα. Γενικά, τα κεριά με υγρή εναπόθεση χρησιμοποιούνται συχνά σαν ανθεκτικά μέσα χημικής χάραξης (etching resists) και στρώματα διαμόρφωσης για προτυποποίηση (patterning).

Με τον όρο ανθεκτικό (resist), όσον αφορά την κατασκευή ημιαγωγών, θεωρείται ένα λεπτό στρώμα που χρησιμοποιείται για να μεταφέρει το σχέδιο ενός κυκλώματος στο υπόστρωμα ενός ημιαγωγού, στον οποίο εναποτίθεται.

Ως χαρακτηριστική (etching), χαρακτηρίζεται η διαδικασία με την οποία αφαιρούνται με χημικό τρόπο ένα ή παραπάνω στρώματα (layers) από την επιφάνεια ενός δισκίου, κατά τη διάρκεια μιας κατασκευής.

Δισκίο (wafer) μπορεί να θεωρηθεί μια λεπτή φέτα ημιαγωγικού υλικού (π.χ. κρύσταλλος πυριτίου) που χρησιμεύει για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και άλλων μικροσυσκευών.

Διάφορες άλλες τεχνικές έχουν ανακαλυφθεί, και μάλιστα με περισσότερες μεθόδους παραλλαγής, για χρήση σε διάφορες περιπτώσεις υλικών στα οποία επιθυμείται εναπόθεση. Τρεις αρκετά αξιοσημείωτες τεχνικές αναλύονται στις δύο κατηγορίες που ακολουθούν.

## **Τεχνικές εκτύπωσης**

Οι τεχνικές εκτύπωσης (printing techniques) είναι ένα σύνολο μεθόδων εκτύπωσης που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών σε διάφορα υποστρώματα (π.χ. φθινό χαρτί ή εύκαμπτη μεμβράνη).

Με εκτύπωση ενός ή περισσότερων στρωμάτων σε μια συσκευή, προκύπτουν διάφορα ιδιαίτερα πλεονεκτήματα που δεν απαντώνται σε άλλες μεθόδους. Πρώτον, λόγω του ότι μαζί με την εναπόθεση του υλικού, ταυτόχρονα αυτό χρησιμοποιείται ως πρότυπο (υπόδειγμα, αγγλιστί pattern), μηδενίζεται η ανάγκη περαιτέρω, επιπλέον εφαρμογών για σχηματομόρφωση (patterning). Δεύτερον, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι αρκετά χαμηλού κόστους. Τρίτον, λόγω της μεθόδου εκτύπωσης η χρήση των υλικών καθίσταται πιο αποτελεσματική. Επίσης, οι επιδόσεις που προσφέρουν οι κατασκευές από μεθόδους εκτύπωσης μπορεί να επηρεαστούν με χρήση παράλληλων διαδικασιών εναπόθεσης, καθιστώντας την απόδοση αρκετά υψηλή.

Μερικές από τις πιο γνωστές και χρησιμοποιούμενες μεθόδους εκτύπωσης είναι η μεταξοτυπία (screening printing), φλεξογραφία (flexography ή flexo), γκραβούρα, αλλιώς χαρακτηριστική ή φωτολιθογραφία (gravure), λιθογραφία όφσετ (offset lithography) και η μέθοδος ψεκασμού μελάνης (inkjet).

Μερικά από τα υλικά που μπορούν να πάρουν μέρος σε διεργασίες εκτύπωσης είναι ημιαγωγοί, αγωγοί και μονωτές (τόσο οργανικά όσο και ανόργανα υλικά).

## Τεχνικές επικάλυψης

Οι μέθοδοι επικάλυψης ή επίστρωσης (coating methods) είναι μια κατηγορία τεχνικών που εφαρμόζονται σαν μορφή καλύμματος στην επιφάνεια ή υπόστρωμα ενός αντικειμένου. Η επικάλυψη μπορεί να εφαρμοστεί σε όλη την επιφάνεια του αντικειμένου ή μόνο σε συγκεκριμένα μέρη αυτού.

Η τεχνική της επικάλυψης μπορεί να εφαρμοστεί για λόγους διακόσμησης, λειτουργικότητας, ή και τα δύο.

Οι τεχνικές επικάλυψης κατηγοριοποιούνται σε εναπόθεσης ατμών (φυσική και χημική εναπόθεση ατμών), χημικές και ηλεκτροχημικές τεχνικές (chemical and electrochemical techniques), ψεκασμού (spraying), διεργασίες επίστρωσης τύλιγμα-με-τύλιγμα (roll-to-roll ή reel-to-reel ή web processes). Επίσης, υπάρχει και η κατηγορία της επίστρωσης με περιστροφή (spin coating). Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται για εναπόθεση μιας ομοιόμορφης λεπτής μεμβράνης σε επίπεδη επιφάνεια. Συνήθως ένα μικρό μέρος του υλικού επικάλυψης εφαρμόζεται στο κέντρο του υποστρώματος και είτε περιστρέφεται με μικρή ταχύτητα ή δεν περιστρέφεται καθόλου. Η επιφάνεια ή υπόστρωμα αρχίζει να περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα και λόγω της φυγόκεντρου δύναμης που αναπτύσσεται, υλικό επικάλυψης αρχίζει να απλώνεται.

Οι τεχνικές επικάλυψης περιλαμβάνουν διαδικασίες εναπόθεσης για διάφορα υλικά όπως ημιαγωγοί, αγωγοί, μονωτές, υλικά συγκάλυψης και διάφορα υλικά επιφανειακής ενεργειακής διαμόρφωσης (surface energy modulation materials).

### 4.3.1.3 Τεχνικές εναπόθεσης σε πολυμερή

Όσον αφορά τα πολυμερή, μια από τις σημαντικότερες και ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους εναπόθεσης είναι η χημική εναπόθεση ατμών.

Όντας μια χημική διαδικασία, η χημική εναπόθεση ατμών (CVD) συναντάται συχνά σε διαδικασίες κατασκευής ημιαγωγών, και χρησιμοποιείται για παραγωγή υψηλής καθαρότητας και απόδοσης σε στερεά υλικά.

Σύμφωνα με την εναπόθεση αυτή, η επιφάνεια ή υπόστρωμα εκτίθεται σε μια ή περισσότερες πτητικές ουσίες, που μόλις έρθουν σε επαφή με την επιφάνεια δημιουργούνται διάφορων ειδών αντιδράσεις, κι έτσι προκύπτει το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Η τεχνική CVD, εκτός της εναπόθεσης μονοκρυσταλλικών, πολυκρυσταλλικών, άμορφων, ανόργανων και οργανικών υλικών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την παραγωγή συνθετικών διαμαντιών (synthetic diamonds).

Στα πολυμερή, η χημική εναπόθεση ατμών, λόγω της εύκολης διεργασίας που απαιτείται για εναπόθεση ενός πολυμερικού υλικού, χρησιμοποιείται πλέον κατά κόρον για κατασκευές λεπτών πολυμερικών μεμβρανών απευθείας σε υπόστρωμα.

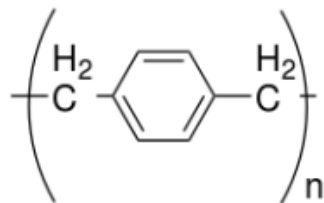
## Παρυλένιο

Το παρυλένιο (parylene) αποτελεί μια κατηγορία πολυμερών που προκύπτουν με τεχνικές CVD σε μόρια poly(p-xylylene), και δρα ως μονωτής υγρασίας και διηλεκτρικός μονωτής

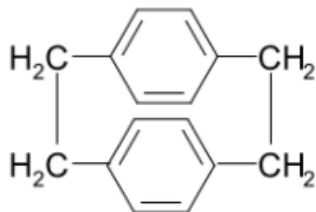
(moisture and dielectric insulator, αντίστοιχα). Διακρίνεται σε διάφορες κατηγορίες με τις πιο γνωστές και χρησιμοποιούμενες να είναι το παρυλένιο C, D και N, με το παρυλένιο C να θεωρείται το πιο δημοφιλές λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών και πλεονεκτημάτων που διαθέτει (π.χ. ανώτερες μονωτικές ιδιότητες και χαμηλό κόστος).

Το παρυλένιο αρχικά διατίθεται με τη μορφή ενός μετασταθούς διμερούς (metastable dimer). Όταν βρίσκεται σε συνθήκες κενού εξαχνώνεται, ρέει μέσα σε ένα καυτό είδος καμινίου και προσκρούοντας πάνω στα τοιχώματά του διασπάται σε ένα ζεύγος μονομερών. Από εκεί ρέει μέσω διάχυσης σε ένα θάλαμο εναπόθεσης κοντά ή κάτω από την θερμοκρασία δωματίου και συμπυκνώνεται σε ένα πολυμερές υψηλού μοριακού βάρους.

Στην εικόνα 4.4 παρουσιάζεται η δομή μιας επαναλαμβανόμενης μονάδας του παρυλενίου N, και στην εικόνα 4.5 η δομή του παρακυκλοφρανίου (paracyclophane) ή κοινώς γνωστό ως διμερές (dimer).

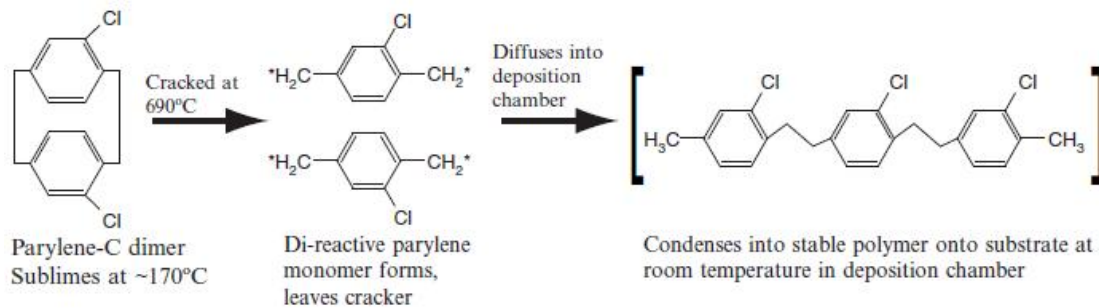


**Εικόνα 4.4** Χημικός τύπος μιας επαναλαμβανόμενης μονάδας του παρυλενίου N [<http://en.wikipedia.org/wiki/Parylene>].



**Εικόνα 4.5** Χημική δομή του δι-p-ξυλυλενίου (di-p-xylylene) [<http://en.wikipedia.org/wiki/Parylene>].

Στην εικόνα 4.6 αναφέρονται περιληπτικά τα τρία βήματα της διαδικασίας εναπόθεσης του παρυλενίου. Για το παράδειγμα, στην εικόνα φαίνεται το παρυλένιο C.



**Εικόνα 4.6** Πρώτον, το σταθερό διμερές εξαμτίζεται περίπου στους 170°C και διαχέεται μέσα στη μονάδα πυρόλυσης, η οποία δαيتهاί γύρω στους 700°C. Η μονάδα πυρόλυσης σπάει το διμερές σε δύο δραστικές μονομερείς μονάδες οι οποίες διαχέονται εντός του θαλάμου εναπόθεσης και συμπυκνώνονται σε ένα πλήρως δραστικό πολυμερές σε θερμοκρασία δωματίου. Το μη δραστικό υλικό συλλαμβάνεται σε μια ψυχρή παγίδα (cold trap) για την προστασία της αντλίας κενού και η διαδικασία εναπόθεσης συμβαίνει σε περίπου 10-15 mtorr (μονάδα πίεσης, αγγλιστί pressure unit) για το περυλένιο C [Ioannis Kymissis, OFET/Basic OFET fabrication].

Υπάρχουν πολλές διαφοροποιήσεις ως προς την εκτέλεση των τεχνικών χημικής εναπόθεσης ατμών, λαμβάνοντας υπόψη, ότι σε κάθε διεργασία, ο τρόπος με τον οποίο αρχίζουν οι χημικές αντιδράσεις διαφέρει.

Μερικές από τις πιο συνήθεις τεχνικές CVD περιγράφονται παρακάτω.

### Χημική εναπόθεση ατμών με θερμικό σύρμα

Η χημική εναπόθεση ατμών θερμού σύρματος (hot-wire CVD ή HWCVD), είναι γνωστή και ως καταλυτική χημική εναπόθεση ατμών (Cat-CVD). Ένας πρόδρομος αερίου (precursor gas) τροφοδοτείται πάνω από ένα λεπτό θερμό σύρμα (hot wire) που χρησιμοποιείται για να αποσυντίθενται τα επιθυμητά αέρια. Τα μονομερή του αερίου αυτού συμπυκνώνονται παίρνοντας τη μορφή ενός πολυμερούς λεπτής μεμβράνης επάνω σε κοντινές επιφάνειες στις οποίες προσπίπτει.

Μέσω της τεχνικής αυτής μπορούν να δημιουργηθούν μονωτήρες υψηλής ποιότητας και οργανικά αγωγικά πολυμερικά υλικά με προσμίξεις (ντοπαρισμένα).

### Χημική εναπόθεση ατμών με πλάσμα

Η χημική εναπόθεση ατμών μέσω πλάσματος (plasma CVD ή PCVD) περιλαμβάνει παρόμοιες διαδικασίες με αυτές της χημικής εναπόθεσης ατμών θερμού σύρματος, μα αντί για θερμό σύρμα χρησιμοποιείται ένα κλειστό περιβάλλον (π.χ. δοχείο) που παράγει μικροκύματα (plasma-producer container) σε θάλαμο μειωμένης ατμόσφαιρας.

### Ατομική εναπόθεση στρωμάτων

Η τεχνική της ατομικής εναπόθεσης στρωμάτων (atomic layer deposition ή ALD ή ALCVD) χρησιμοποιεί διαδοχικά δύο χημικές ουσίες αέριας κατάστασης, γνωστές καλύτερα ως πρόδρομοι αέριας κατάστασης (gaseous precursors), για εναπόθεση λεπτών μεμβρανών.

Οι πρόδρομοι αέριας κατάστασης αντιδρούν διαδοχικά με μια επιφάνεια (ένας κάθε φορά), και με συνεχιζόμενη έκθεση τους στην επιφάνεια προκύπτει εναπόθεση μιας λεπτής μεμβράνης.

### 4.3.2 Τεχνικές διαμόρφωσης

Στην υποενότητα 4.3.1 έγινε αναφορά των λειτουργιών εναπόθεσης. Πράγματι, ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές διατάξεις μπορούν να κατασκευασθούν μέσω των διαφόρων τεχνικών εναπόθεσης (θερμική, υγρή, εκτύπωσης κ.τ.λ.). Μερικές φορές, όμως, η εναπόθεση μπορεί να μην είναι αρκεί για να προκύψουν τα επιθυμητά αποτελέσματα, ως προς την κατασκευή μιας συσκευής. Σε τέτοιες περιπτώσεις γίνεται εφαρμογή των τεχνικών σχηματομόρφωσης ή διαμόρφωσης (patterning techniques).

Υπάρχουν περιπτώσεις που μετά την εφαρμογή μιας τεχνικής εναπόθεσης, μέρος ή τμήματα του αρχικού υλικού που τέθηκε σε εναπόθεση να είναι ανεπιθύμητα, σύμφωνα με το σκοπό της εναπόθεσης. Σε τέτοιες καταστάσεις, το ανεπιθύμητο αυτό υλικό (ή μέρη του) θα πρέπει να απομονώνεται και να αφαιρείται. Τέτοιες αφαιρετικές διαδικασίες ονομάζονται τεχνικές αφαιρετικής σχηματομόρφωσης (subtractive patterning techniques).

Αντίθετα, οι μέθοδοι εκτύπωσης (printing methods), συγκεκριμένα η μέθοδος εκτύπωσης με ψεκασμό (inkjet), και η χαρακτηριστική (gravure) όντας το αντίθετο των λειτουργιών αφαιρετικής σχηματοποίησης, μπορούν κάλλιστα να τοποθετηθούν στην κατηγορία των τεχνικών προσθετικής σχηματοποίησης (additive patterning techniques).

Παρακάτω ακολουθούν μερικές από τις κατηγορίες τεχνικών που παρέχουν αφαιρετικές διαδικασίες.

### Φωτολιθογραφία

Φωτολιθογραφία, οπτική λιθογραφία ή λιθογραφία UV (lithography, optical lithography ή UV lithography) είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιεί το φως για διαμόρφωση (αλλιώς σχηματομόρφωση, αγγλιστί patterning) διαφόρων υλικών, όπως στρώματα λεπτών μεμβρανών ή μεγάλο μέρος επιφανειών ή υποστρωμάτων. Το φως, με τη μορφή ενός συγκεκριμένου μοτίβου, προσπίπτει πάνω στο υλικό μέσω μιας αδιαφανής πλάκας με τρύπες ή διαφάνειες (photomask). Με τη διαδικασία αυτή, ένα φωτοευαίσθητο υλικό (photoresist) εκτίθεται στο φως και διαμορφώνεται. Αυτή η διεργασία στη συνέχεια χρησιμοποιείται σαν πρότυπη τεχνική (lift-off) για άλλα υλικά, τα οποία δεν έχουν ευαισθησία στο φως.

Ένα πλεονέκτημα της φωτολιθογραφίας είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα σε όλα τα στρώματα του υλικού που δέχεται επεξεργασία.

Όμοια αποτελέσματα με αυτά της φωτολιθογραφίας μπορεί να προσφέρει και η μέθοδος της λιθογραφίας δέσμης ηλεκτρονίων (electron beam lithography).

## Φωτοευαισθητοποίηση

Ένας άλλος τρόπος διαμόρφωσης είναι μέσω της μεθόδου φωτοευαισθητοποίησης (photosensitization). Η τεχνική αυτή έχει ως σκοπό τη δημιουργία φωτοευαισθησίας στο υλικό που πρόκειται να διαμορφωθεί, και έπειτα την απομάκρυνση του υπόλοιπου μέρους του υλικού (ανεπιθύμητο υλικό).

## Λιθογραφία με στένσιλ

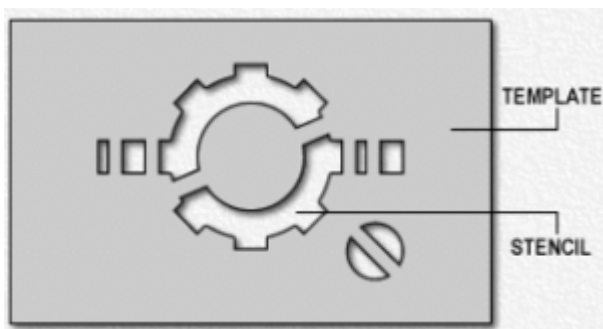
Η λιθογραφία με στένσιλ (stencil lithography), συχνά αποκαλούμενη ως μέθοδος συγκάλυψης σκίασης (shadow masking method) χρησιμοποιείται εξίσου για σχηματομόρφωση. Εδώ, το ρόλο του φωτοευαίσθητου υλικού (photoresist) παίζει η μάσκα σκιάσεως.

Η μάσκα σκιάσεως ή μάσκα συγκάλυψης (shadow mask), ή αλλιώς στένσιλ ή διάτρητο ή μεμβράνη ή μεμβράνη πολυγράφου (γνωστά το καθένα με τον αγγλικό όρο stencil), είναι ένα λεπτό φύλλο υλικού (π.χ. χαρτί, πλαστικό ή μέταλλο) που παρεμποδίζει το ανεπιθύμητο υλικό και αφήνει μόνο το επιθυμητό να φτάσει στην επιφάνεια ή στο υπόστρωμα.

Το στένσιλ μπορεί να είναι ένα επιδαπέδιο ή τεντωμένο φύλλο που μοιάζει με χαραγμένο μεταλλικό φύλλο (etched metal foil), ή ένα διαμορφωμένο στρώμα πάνω σε επιφάνεια ή υπόστρωμα από όπου μπορεί να αφαιρεθεί με ευκολία.

Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά απλή και δεν περιλαμβάνει θερμική ή χημική μεταχείριση, τα χαρακτηριστικά όμως που δημιουργούνται μέσω του στένσιλ δέχονται περιορισμό όσον αφορά τη γεωμετρία τους, αφού η όλη τεχνική εξαρτάται ουσιαστικά από το μέγεθος του στένσιλ.

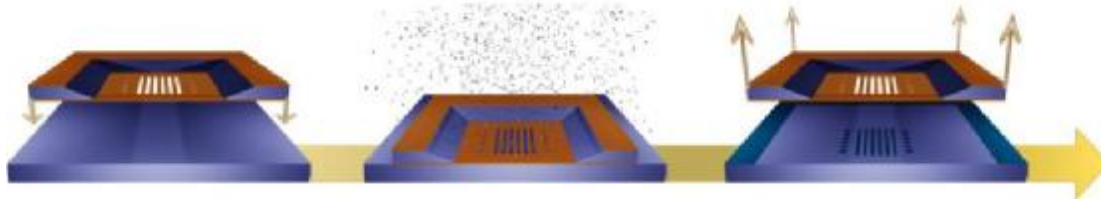
Ένα παράδειγμα ενός προτύπου (template) στένσιλ (ή αλλιώς μάσκα σκιάσεως) φαίνεται στην εικόνα 4.7 που ακολουθεί.



**Εικόνα 4.7** Διάγραμμα - παράδειγμα ενός στένσιλ. [<http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CF%84%CE%AD%CE%BD%CF%83%CE%B9%CE%BB>].

Για ένα υλικό, η λιθογραφία στένσιλ μπορεί να περιλαμβάνει τεχνικές εξάτμισης, υγρής εναπόθεσης (π.χ. μέθοδος διάλυσης), επιμετάλλωσης και εκτύπωσης.

Στην παρακάτω εικόνα 4.8 εφαρμόζεται παραστατικά (με σειρά από αριστερά προς τα δεξιά) μια διαδικασία λιθογραφίας στένσιλ.



**Εικόνα 4.8** Σχηματική λιθογραφία στένσιλ. Στην πρώτη εικόνα φαίνεται η τοποθέτηση σε επιφάνεια μιας μάσκας σκιάσεως ή στένσιλ, στην δεύτερη (μεσαία) εικόνα εφαρμόζεται η λιθογραφία, και στην τρίτη (δεξιά) εικόνα, αφού έχει πλέον τελειώσει η εν λόγω διαδικασία, το στένσιλ απομακρύνεται από την επιφάνεια, αφήνοντας πάνω της τα χαρακτηριστικά του στένσιλ [[http://en.wikipedia.org/wiki/Stencil\\_lithography](http://en.wikipedia.org/wiki/Stencil_lithography)].

### Λείζερ εκτομής

Μια άλλη αφαιρετική τεχνική σχηματομόρφωσης είναι η εκτομή με λέιζερ (laser ablation). Κατά τη διαδικασία αυτή, το ανεπιθύμητο υλικό αφαιρείται από μια στερεά ή υγρή επιφάνεια, με άμεσο τρόπο, μέσω μιας δέσμης λέιζερ. Όταν το λέιζερ είναι χαμηλής έντασης (low intensity laser flux), το υλικό απορροφά την ενέργεια που του περιέχει το λέιζερ και τελικά εξατμίζεται ή εξαχνώνεται (sublimation phase). Όταν είναι υψηλής έντασης (high intensity laser flux), το υλικό στις περισσότερες περιπτώσεις μετατρέπεται σε πλάσμα (plasma).

Οι τεχνικές εκτομής με λέιζερ χρησιμοποιούν είτε παλμικό λέιζερ (pulsed laser), είτε λέιζερ συνεχούς κύματος (continuous wave laser).

Η μέθοδος της εκτομής με λέιζερ είναι μια σχετικά απλή και εύκολη διαδικασία που εφαρμόζεται τόσο σε ημιαγωγούς και μέταλλα όσο και σε μονωτικά υλικά.

Επειδή η διαδικασία εκτελείται μέσω μιας ηλεκτρονικής διάταξης που περιέχει οθόνη (π.χ. υπολογιστής), επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος καθ' όλη τη διάρκειά της.

Η ταχύτητα εκτέλεσης και η ακρίβεια εκτομής, καθώς και η απόδοση και ποιότητα που παρέχονται μέσω της τεχνικής αυτής, είναι ικανοποιητικά υψηλές.

### 4.3.3 Χαρακτική

Μια τεχνική που χρησιμοποιείται αρκετά συχνά για κατασκευή οργανικών αγωγών και ημιαγωγών, και ανήκει στην κατηγορία των διαδικασιών απομάκρυνσης (removal processes), είναι η χαρακτική (etching).

Με τη μέθοδο αυτή, ένα ανεπιθύμητο υλικό απομακρύνεται (αφαιρείται) από την επιφάνεια ενός δισκίου (υπόστρωμα) μέσω χημικών διεργασιών.

Άλλοι χαρακτηρισμοί όπως χαλκογραφία ή χαρακτηριστική με οξύ χρησιμοποιούνται, αλλά πιο σπάνια ή και σε συγκεκριμένες περιπτώσεις χάραξης.

Η χαρακτηριστική τεχνική χρησιμοποιείται συνήθως στις μικροκατασκευές και περιλαμβάνει δύο τρόπους χάραξης, την υγρή χάραξη (wet etching) και τη χάραξη μέσω πλάσματος (plasma etching).

Η χάραξη των οργανικών αγωγών και ημιαγωγών επιτυγχάνεται με χρήση ενός πλάσματος οξυγόνου (oxygen plasma). Οι οργανικοί ημιαγωγοί, όμως, με έκθεση σε οξυγόνο και οξειδωτικά πλάσματος επηρεάζονται από πλευράς απόδοσης. Ένας συνήθης τρόπος μη επηρεασμού των οργανικών ημιαγωγικών υλικών είναι η προστασία τους μέσω τεχνικών επικάλυψης (shadow masking).

Παρόμοια με την λιθογραφία στένσιλ, η χαρακτηριστική χρησιμοποιεί ένα είδος μάσκας σκίασεως ή συγκάλυψης (shadow mask) που προστατεύει μέρος του υποστρώματος σε όλη τη διάρκεια της χάραξης.

Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές χάραξης ως προς τον τρόπο συγκάλυψης (ή αλλιώς σκίασης). Σε κάποιες περιπτώσεις, η μάσκα συγκάλυψης είναι ένα φωτοευαίσθητο υλικό (photoresist) ενώ σε άλλες η μάσκα είναι πιο ανθεκτική (π.χ. νιτρίδιο του πυριτίου).

Το φωτοευαίσθητο υλικό που χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις χάραξης έχει δεχθεί διαμόρφωση (patterning) μέσω της μεθόδου φωτολιθογραφίας (photolithography).

#### **4.4 Κρυσταλλικότητα ημιαγωγικών υλικών και τεχνικές κρυστάλλωσης**

Ένας άλλος πολύ σημαντικός παράγοντας όσον αφορά την κατασκευή ημιαγωγών, και συγκεκριμένα των OFETs, είναι η κρυσταλλικότητα.

Με τον όρο κρυσταλλικότητα (crystallinity) χαρακτηρίζεται ο τρόπος με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα ή τα μόρια ενός στερεού, που συμπεριφέρεται όπως ένας κρύσταλλος (crystal).

Σε έναν κρύσταλλο, τα άτομα ή τα μόρια του είναι διατεταγμένα με περιοδικό τρόπο.

Σημαντικοί παράγοντες που χαρακτηρίζουν ένα υλικό με κρυσταλλική δομή είναι η σκληρότητα, η πυκνότητα, η διαφάνεια και η διάχυση. Ο βαθμός κρυσταλλικότητας (degree of crystallization), δηλαδή το πόσο οργανωμένη είναι η δομή ενός στερεού που λειτουργεί σαν κρύσταλλος, επηρεάζει τους παράγοντες αυτούς.

Διάφορα υλικά μπορούν να παρασκευαστούν με τρόπο τέτοιο ώστε το αποτέλεσμα που θα προκύψει να είναι ένα μίγμα από κρυσταλλικές και άμορφες περιοχές. Μέσα σε αυτά περιλαμβάνονται και μερικές περιπτώσεις μικρών και μεγάλων μορίων.



#### 4.4.1 Κρυστάλλωση πολυμερών

Ως κρυστάλλωση (crystallization), θεωρείται οποιαδήποτε διαδικασία σχετίζεται με την ευθυγράμμιση των μοριακών αλυσίδων ενός στερεού. Στη περίπτωση των πολυμερών, κρυστάλλωση είναι μια διαδικασία που επιφέρει μερική ευθυγράμμιση των μοριακών τους αλυσίδων. Ως αποτέλεσμα, οι θερμικές, μηχανικές, χημικές και οπτικές ιδιότητες που μπορεί να διαθέτει το εκάστοτε πολυμερές, που επιδέχεται κρυστάλλωση, μεταβάλλονται.

Έχοντας υποστεί μια οποιαδήποτε διαδικασία τήξης, τα πολυμερή μπορούν να κρυσταλλωθούν κατά τα τελευταία στάδια μιας οποιασδήποτε διαδικασίας πήξης.

Ο χρόνος που έχει στη διάθεσή του ένα πολυμερές για να πήξει παίζει αρκετά σημαντικό ρόλο ώστε η κρυσταλλικότητα που θα προκύψει σε αυτό να είναι επιθυμητή, αφού όσο περισσότερο χρόνο έχει για να πήξει, τόσο καλύτερα οργανώνεται η εσωτερική του δομή. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται διαλύτες μέτριας μεταβλητότητας (moderate volatility solvents).

Ο βαθμός κρυσταλλικότητας των κρυσταλλωμένων πολυμερών (crystallized polymers) υπολογίζεται από διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης (π.χ. διάθλαση ακτίνων X, θερμιδομετρικές τεχνικές, κ.τ.λ.) και κυμαίνεται από 10% έως 80%.

Τα πολυμερή που έχουν τεθεί σε διαδικασία κρυστάλλωσης, εκτός του όρου κρυσταλλωμένα πολυμερή, συχνά αναφέρονται και ως ημικρυσταλλικά πολυμερή (semicrystalline polymers).

Στα ημικρυσταλλικά πολυμερή, οι ιδιότητες τους δεν εξαρτώνται μόνο από το βαθμό κρυσταλλικότητας, αλλά και από το μέγεθος και τον προσανατολισμό των μοριακών τους αλυσίδων.

Τα πολυμερή που χρησιμοποιούνται σε κατασκευές OFET, στην πλειοψηφία τους ανήκουν στην κατηγορία των ημικρυσταλλικών πολυμερών.

#### 4.4.2 Μικρά κρυσταλλικά μόρια

Όσον αφορά τα μικρά μόρια, πρωταγωνιστικό ρόλο παίζουν οι κρυσταλλίτες.

Οι κρυσταλλίτες (crystallites) είναι κρύσταλλα μικρά σε μέγεθος. Κρυσταλλίτες που ενώνονται μαζί σχηματίζουν πολυκρυσταλλικά στερεά (polycrystalline solids). Επειδή στην πλειοψηφία τους απαντώνται συχνά σε μικροσκοπικό μέγεθος, ονομάζονται επίσης και κόκκοι (grains).

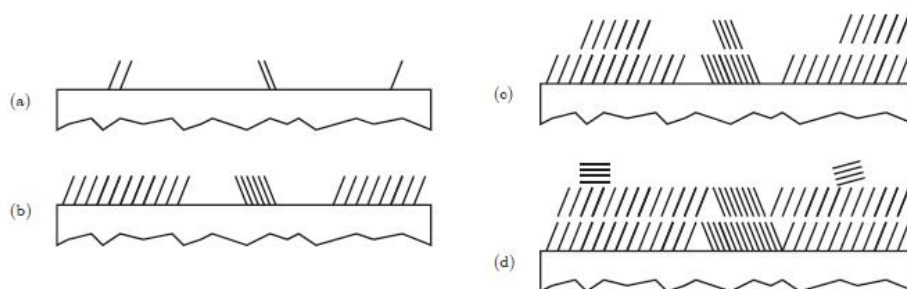
Στην περίπτωση των μικρών μορίων, συγκεκριμένα των οργανικών ημιαγωγών μικρών μορίων, κρυστάλλωση αυτών επιτυγχάνεται με εφαρμογή του μοντέλου ανάπτυξης Stranski-Krastanov (Stranski-Krastanov growth model ή SK growth).

Αυτό το μοντέλο ανάπτυξης πήρε την ονομασία του από τους Ivan Stranski και Lyubomir Krastanov, που το ανακάλυψαν το 1938.

Το μοντέλο SK growth, γνωστό επίσης και ως στρώμα-συν-νήσος μοντέλο αύξησης (layer-plus-island growth model), αποτελεί ένα από τα τρία βασικά μοντέλα ανάπτυξης λεπτών μεμβρανών σε κρυσταλλικές επιφάνειες ή διεπαφές (crystal surfaces ή interfaces, αντίστοιχα), και πραγματοποιείται μέσω της τεχνικής εναπόθεσης με επίταξη (epitaxy).

Το μοντέλο SK ακολουθεί μια διαδικασία δύο σταδίων. Αρχικά, λεπτές μεμβράνες προσκολλούν μαζί επάνω σε μια κρυσταλλική επιφάνεια ή υπόστρωμα. Οι μεμβράνες αυτές αποτελούνται από πολλά στρώματα μονόφυλλων (monolayers) και αποτίθενται μέσω προσρόφησης (adsorption). Οι μεμβράνες που προσκολλούν στην επιφάνεια αυξάνουν με μια στρώμα-με-στρώμα δομή (layer-by-layer fashion). Όταν το πάχος που έχουν σχηματίσει αυτές οι στρώμα-σε-στρώμα τοποθετημένες μεμβράνες ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο όριο (όριο πάχους στρώσης), η ανάπτυξη συνεχίζεται μέσω της μεθόδου σχηματισμού πυρήνων μέσω της διαδικασίας πυρηνοποίησης. Η πυρηνοποίηση (nucleation) δημιουργεί ομάδες μεμβρανών συχνά αναφερόμενες ως νήσοι ή νησιά (islands), εξ' ου και η ονομασία στρώμα-συν-νήσος αύξηση. Έπειτα ακολουθεί συνένωση (coalescence) των νήσων αυτών.

Στην εικόνα 4.9 παρατηρούνται τα διάφορα στάδια απόθεσης μεμβρανών στρώμα-σε-στρώμα και έπειτα στρώμα-συν-νήσος.



**Εικόνα 4.9** Σχηματική παρουσίαση της διαδικασίας ανάπτυξης Stranski-Krastanov. (a) Το αρχικό στρώμα έχει μια ισχυρή άπωση (repulsion) με το υπόστρωμα, και διαθέτει καλή οργάνωση. (b) Καθώς προστίθεται καινούργιο υλικό στο αρχικό στρώμα, οι κρυσταλλικές περιοχές συνεχίζουν να επεκτείνονται. (c) Όταν η περιοχή (συνολικό επιφανειακό στρώμα) φτάσει σε ένα συγκεκριμένο όριο κάλυψης, μέσω πυρηνοποίησης δημιουργείται ένα δεύτερο στρώμα (πάνω από το προηγούμενο, πρώτο στρώμα), και το αρχικό (συνολικό πλέον) στρώμα συνεχίζει να αυξάνεται. (d) Τελικά, κατατίθεται αρκετό υλικό ώστε η άπωση με το υπόστρωμα είναι ασθενέστερη, και το υλικό που έχει εναποτεθεί δεν διαθέτει οργάνωση σε σχέση με το υπόστρωμα [Ioannis Kymissis, OFET/Basic OFET fabrication].

#### 4.4.3 Τάση κατωφλίου και στρες πόλωσης

Τόσο για τα ανόργανα, όσο και για τα οργανικά τρανζίστορ επίδρασης πεδίου, τάση κατωφλίου (threshold voltage ή  $V_{th}$ ) ορίζεται η τιμή της τάσης που αναπτύσσεται μεταξύ πύλης και πηγής του τρανζίστορ, όταν δημιουργείται κανάλι μεταξύ των επαφών πηγής και εκροής του τρανζίστορ και ρεύμα ρέει μέσα από το κανάλι αυτό.

Με τον όρο στρες πόλωσης (bias stress) αναφέρεται η αλλαγή που συμβαίνει στα χαρακτηριστικά ρεύματος-τάσης (I-V) των οργανικών τρανζίστορ, λόγω παρατεταμένης (χρήσης! / εφαρμογής) τάσεων.

Κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε επεξεργασίας ημιαγωγών, υπάρχει περίπτωση να δημιουργηθούν ελαττωματικές δομές (structural defects) ή ακαθαρσίες (χημικές προσμίξεις, γνωστές με τον αγγλικό όρο impurities). Με την εμφάνιση ελαττωμάτων ή ακαθαρσιών, σχηματίζονται φορτισμένα δίπολα διεπαφής (charged interface dipoles) ή δημιουργούνται καταστάσεις παγίδας (trap states), που αλλάζουν την τάση κατωφλίου και κατά συνέπεια υποβιβάζουν τη διαγωγιμότητα (transconductance) μιας συσκευής.

Για υποβιβασμό της διαγωγιμότητας, της αλλαγής δηλαδή στο ρεύμα εκροής (drain current), απαιτείται μια μικρή μεταβολή της τάσης κατωφλίου (gate-source voltage ή  $V_{th}$ ) αλλά ταυτόχρονα και σταθερή τάση μεταξύ εκροής και πηγής (drain-source voltage).

Η τάση κατωφλίου επηρεάζεται επίσης με ενσωμάτωση του ημιαγωγού, ή του διηλεκτρικού πύλης, με το νερό. Ακόμη περισσότερο για τους ημιαγωγούς που έχουν ως βάση το πεντακένιο (pentacene), το νερό αντιδρά με το πεντακένιο δημιουργώντας ακαθαρσίες ή ελαττωματικές δομές.

Οι ελαττωματικές δομές που προκαλούνται από ακαθαρσίες, προκύπτουν με παραμόρφωση του πλέγματος ξενιστή, όπου πλέγμα ξενιστή (host lattice) είναι μια χημική ένωση που διαθέτει κρυσταλλική δομή (διάταξη πλέγματος).

Επιπλέον, το νερό μπορεί να εισχωρήσει σε υγροσκοπικά διηλεκτρικά πύλης (hygroscopic gate dielectrics), γεγονός που επιφέρει μεγάλο βαθμό υστέρησης (hysteresis) ως προς την χωρητικότητα.

Διάφοροι τρόποι που χρησιμοποιούνται για την προστασία του ημιαγωγού από το νερό, σε κάποιο σημαντικό τουλάχιστον βαθμό, είναι με τοποθέτηση του ημιαγωγού σε συνθήκες κενού, με διαδικασίες ενθυλάκωσης (encapsulation), και με χρήση μη υγροσκοπικών διηλεκτρικών πύλης.

Εκτός των άλλων μεθόδων ντοπαρίσματος (doping), ντόπινγκ μπορεί να εφαρμοστεί και στη διεπαφή του διηλεκτρικού πύλης (gate dielectric-semiconductor interface). Για την εκτέλεση αυτής της διαδικασίας, είναι σημαντικό να αποφευχθούν τυχόν χημικές διεργασίες (π.χ. φωτολιθογραφία), να μην χρησιμοποιηθούν παράγοντες διασταύρωσης (crosslinking agents), και τα διηλεκτρικά πύλης των πολυμερών να προστατευθούν από οξειδωση πλάσματος μέσω της χαρακτηριστικής (etching), του καθαρισμού (cleaning), και των τεχνικών διασκόρπισης (sputtering).

Επιπρόσθετα με τα παραπάνω, αλλαγή στη μορφολογία ενός ημιαγωγού προκύπτει με την εμφάνιση κινητών δεσμών (dangling bonds) στο διηλεκτρικό πύλης, γεγονός που επηρεάζει την μεταφορά φορτίου [Ioannis Kymissis, OFET/Basic OFET fabrication].

## 4.5 Ροή των διαδικασιών κατασκευής OFET

Όπως έγινε αναφορά σε προηγούμενες υποενότητες του κεφαλαίου αυτού, υπάρχουν διάφορα πρότυπα τεχνικών κατασκευής οργανικών ημιαγωγών, και συγκεκριμένα οργανικών τρανζίστορ επίδρασης πεδίου, καθώς και μεγάλη ποικιλία παραλλαγών των προτύπων αυτών.

Γενικά, με τον όρο ροή μιας διαδικασίας (process flow) αναφέρεται η μέθοδος εκείνη που τεκμηριώνει παραστατικά τα στάδια τα οποία εμπλέκονται στην εκτέλεση μιας συγκεκριμένης διαδικασίας.

Εκτός από τις διάφορες πρότυπες τεχνικές και παραλλαγές αυτών, ως προς τον τρόπο κατασκευής ενός OFET, υπάρχουν και πρότυπες τεχνικές και παραλλαγές ως προς την έκβαση των διαδικασιών ροής των διαφόρων OFET κατασκευών.

Στα OFET υπάρχουν τέσσερα βασικά στρώματα, όπως αυτά απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα 4.10, το στρώμα της πύλης (gate layer), του διηλεκτρικού της πύλης (gate dielectric layer), της πηγής-εκροής (source-drain layer), και το στρώμα ημιαγωγού ή ενεργό στρώμα (semiconductor ή active layer).

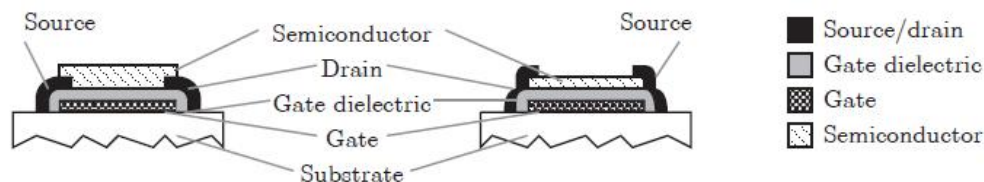
Το στρώμα της πύλης είναι ένας αγωγός διαμορφωμένος για διασυνδέσεις με τα άλλα στρώματα (π.χ. σύνδεση με το στρώμα πηγής ή εκροής, μέσω εφαρμογής μιας πηγής τάσης μεταξύ αυτών), συνδέεται με το υπόστρωμα καλύτερα από όλα τα άλλα στρώματα, και ελέγχει την κίνηση των φορέων φορτίου από την πηγή προς την εκροή.

Το στρώμα του διηλεκτρικού της πύλης είναι διαμορφωμένο για να επιτρέπει τη δυνατότητα σύνδεσης μεταξύ του στρώματος πηγής-εκροής και αυτού της πύλης.

Το στρώμα πηγής-εκροής βρίσκεται σε άμεση επαφή με το στρώμα του ημιαγωγού, και είναι διαμορφωμένο έτσι ώστε να σχηματίζει ένα είδος καναλιού μεταξύ πηγής και εκροής, αλλά και να χρησιμοποιείται για διασύνδεση του κυκλώματος.

Το στρώμα του ημιαγωγού είναι διαμορφωμένο έτσι ώστε να λειτουργεί ως κανάλι μεταφοράς φορέων φορτίου από την πηγή προς την εκροή.

Με εφαρμογή της κατάλληλης τεχνικής σχηματομόρφωσης στα στρώματα πύλης, διηλεκτρικού και πηγής-εκροής, μπορούν να προκύψουν αντιστάσεις (resistors), δίοδοι (diodes ή vias), και πυκνωτές (capacitors).



**Εικόνα 4.10** Βασική δομή ενός εξιδανικευμένου OFET [Ioannis Kymissis, OFET/Basic OFET fabrication].

Στην εικόνα 4.10 χρησιμοποιήθηκαν ως παράδειγμα οι διάταξεις OFET γεωμετρίας κάτω-πύλης / κάτω-επαφής (bottom-gate / bottom-contact configuration), και κάτω-πύλης / πάνω-

επαφής (bottom-gate / top-contact configuration), δύο πολύ συχνά χρησιμοποιούμενες διαμορφώσεις OFET, λόγω της γεωμετρικής ομοιότητας με την TFT διάταξη, όπου για διηλεκτρικό πύλης χρησιμοποιείται ένα θερμικά ανεπτυγμένο διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ).



Schematic of bottom gate, bottom contact OFETs using Ossila's source-drain evaporation stack and Si/SiO<sub>2</sub> substrates (top) and ITO substrates (bottom).



Schematic of bottom gate, top contact OFETs using Ossila's source-drain evaporation stack and Si/SiO<sub>2</sub> substrates (top) and ITO substrates (bottom).

**Εικόνα 4.11** Μια άλλη σχηματική των OFET διατάξεων γεωμετρίας κάτω-πύλης / κάτω-επαφής (bottom-gate / bottom-contact configuration), και κάτω-πύλης / πάνω-επαφής (bottom-gate / top-contact configuration) [[http://www.ossila.com/oled\\_opv\\_ofet\\_catalogue3/OFET\\_substrates\\_equipment/E191-Long\\_channel\\_OFET\\_source\\_drain\\_evaporation\\_stack.php](http://www.ossila.com/oled_opv_ofet_catalogue3/OFET_substrates_equipment/E191-Long_channel_OFET_source_drain_evaporation_stack.php)].

Στις υποενότητες που ακολουθούν, παρουσιάζονται μερικές από τις πιο προτιμώμενες παραλλαγές τεχνικών προτύπων, με δύο από αυτές να επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας ως βασικό συστατικό το πεντακένιο (pentacene) και μια χρησιμοποιώντας το παρυλένιο (parylene).

#### 4.5.1 Λιθογραφία με στένσιλ

Η λιθογραφία με στένσιλ (stencil lithography), ή αλλιώς συγκάλυψη σκίασης (shadow masking), αποτελεί έναν από τους πιο συνηθισμένους τρόπους σχεδιασμού ενός OFET.

Μια παραλλαγή της διαδικασίας αυτής, που βασίζεται (στις διαδικασίες / στη διαδικασία!) σχεδιασμού OFET των Tommie W. Kelley και Paul F. Baude, παρουσιάζεται στην εικόνα 4.12, και αναλύεται παρακάτω. Τα OFET που σχεδιάζονται με αυτό τον τρόπο έχουν ως βάση το πεντακένιο.

Το πεντακένιο (pentacene), ένα από τα πιο καλά ερευνηθέντα συζευγμένα οργανικά μόρια, διαθέτοντας αρκετά υψηλή κινητικότητα οπών (τέτοια που ξεπερνά εκείνη του άμορφου

πυριτίου), αποτελεί ένα αρκετά δημοφιλές συστατικό για χρήση τόσο σε OTFTs όσο και σε OFETs.

Όπως και σε όλες τις εφαρμογές και παραλλαγές της μεθόδου λιθογραφίας με στένσιλ, για το σχεδιασμό του OFET, γίνεται χρήση ενός είδους στένσιλ (αλλιώς μάσκα σκίασης ή μάσκα συγκάλυψης) για την κάλυψη και των τεσσάρων στρωμάτων.

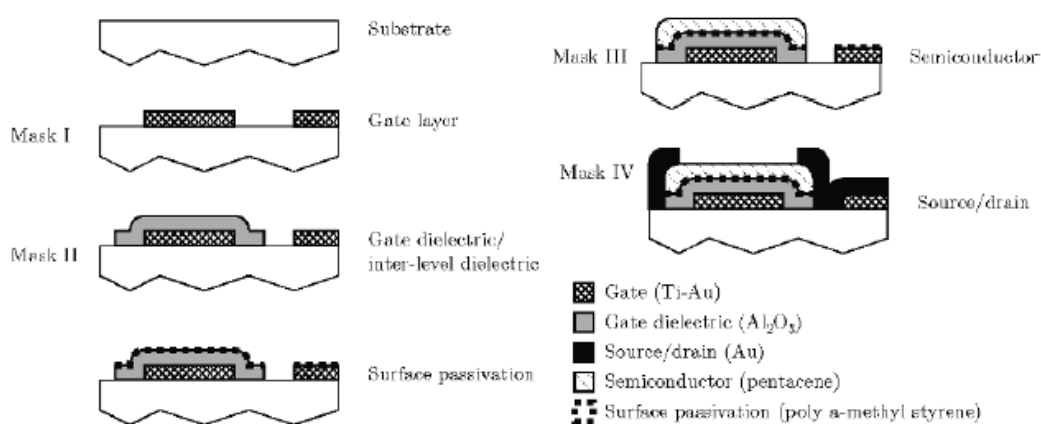
Η λιθογραφία με στένσιλ πραγματοποιείται με εξάτμιση του επιθυμητού υλικού. Η διαφορά εδώ είναι ότι γίνεται επιπλέον χρήση ενός στρώματος παθητικότητας (passivation layer). Για διηλεκτρικό πύλης χρησιμοποιείται ένα στρώμα οξειδίου του αργιλίου (αλλιώς στρώμα αλουμίνιας, αγγλιστί  $Al_2O_3$  layer), το οποίο εναποτίθεται μέσω θερμικής εξάτμισης δέσμης ηλεκτρονίων (electron beam evaporation).

Το στρώμα παθητικότητας χρησιμοποιείται για να αποτρέψει τυχόν αντιδράσεις που μπορεί να προκύψουν από την εναπόθεση του στρώματος αλουμίνιας.

Γενικά, με τον όρο αδρανοποίηση ή παθητικοποίηση (passivation) χαρακτηρίζεται η διαδικασία μετατροπής ενός υλικού σε παθητικό υλικό (passive material), σε υλικό δηλαδή που μετά από τέτοια επεξεργασία επηρεάζεται λιγότερο από εξωτερικούς παράγοντες (π.χ. αέρας ή νερό).

Για τα τρανζίστορ, ως αδρανοποίηση αναφέρεται η διαδικασία ανάπτυξης ενός στρώματος οξειδίου στην επιφάνεια ενός ημιαγωγού, το οποίο ονομάζεται στρώμα παθητικότητας (passivation layer). Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται με απομόνωση της επιφάνειας του τρανζίστορ από διάφορες ηλεκτρικές και χημικές συνθήκες που υπάρχουν στο περιβάλλον. Ως αποτέλεσμα παρέχεται στο τρανζίστορ ηλεκτρική σταθερότητα.

Σαν αποτέλεσμα εφαρμογής της λιθογραφίας με στένσιλ, τόσο στο στρώμα της πηγής, όσο και σε αυτό της εκροής, προκύπτει βελτίωση της αντίστασης επαφής και της ανάπτυξης κρυστάλλων στο κανάλι (source-drain channel).



**Εικόνα 4.12** Σχηματική της ροής της διαδικασίας λιθογραφίας με στένσιλ. Κάθε στρώμα είναι διαμορφωμένο χρησιμοποιώντας στένσιλ (ή αλλιώς μάσκα σκίασης) εκτός από την επιφάνεια του στρώματος παθητικότητας (surface passivation layer) το οποίο αποτίθεται με κάλυμμα (blanket deposition). Η επιφάνεια του στρώματος παθητικότητας δεν εισάγει καμία σημαντική αντίσταση μεταξύ της πύλης και του στρώματος πηγής-εκροής. Το στρώμα του διηλεκτρικού της πύλης

εναποτίθεται μόνο όπου είναι απαραίτητο λόγω της φύσης της γεωμετρίας του στένσιλ [Ioannis Kymissis, OFET/Basic OFET fabrication].

#### 4.5.2 Ενθυλάκωση με παρυλένιο

Η τεχνική της ενθυλάκωσης (encapsulation) είναι μια διαδικασία επικάλυψης (coating), και ανήκει στην κατηγορία των αφαιρετικών τεχνικών (subtractive techniques). Χρησιμοποιείται συνήθως για προστασία (κάλυψη) ενός υλικού ή για να δώσει πρόσθετες ιδιότητες σε αυτό.

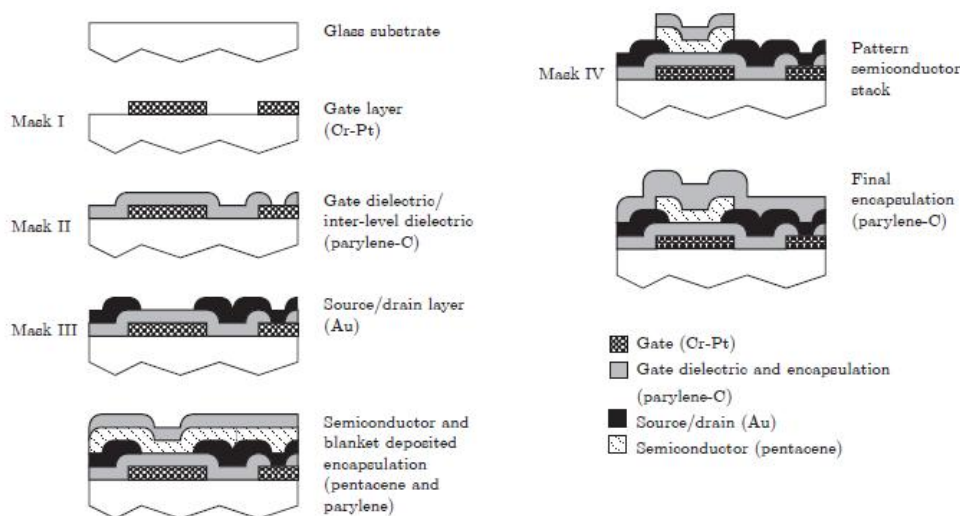
Ένα αρκετά σύνηθες στοιχείο που χρησιμοποιείται ως προστατευτική επίστρωση είναι το παρυλένιο (parylene). Μέσω διαδικασιών εναπόθεσης με επίστρωση, το παρυλένιο μπορεί να προσκολληθεί σε τμήματα υλικών, επιφάνειες ή υποστρώματα, προστατεύοντας έτσι το υλικό που καλύπτει από διάφορους εξωτερικούς παράγοντες, όπως για παράδειγμα την υγρασία.

Στην κατηγορία των OFET, αλλά και γενικά σε ηλεκτρονικές συσκευές και κυκλώματα, εκτός της χρήσης του σαν προστατευτική επίστρωση, το παρυλένιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως διηλεκτρικός μονωτής (dielectric insulator).

Η παρακάτω διαδικασία χρησιμοποιεί το πεντακένιο (pentacene) ως στρώμα ημιαγωγού, και το περυλένιο ως διηλεκτρικό πύλης (gate dielectric) και στρώμα επικάλυψης (encapsulation layer), όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.13. Το στρώμα επικάλυψης παρέχει προστασία στο πεντακένιο από έκθεση σε διαλύτες και άλλες αντιδραστικές ουσίες που χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά στη φωτολιθογραφία (photolithography).

Σε ενθυλάκωση με παρυλένιο, η μέθοδος που χρησιμοποιείται συχνότερα για σχεδιασμό OFET είναι η φωτολιθογραφία, μια αρκετά απλή και σύντομη σε εφαρμογή τεχνική.

Η τεχνική της ενθυλάκωσης μπορεί να χρησιμοποιήσει είτε αφαιρετικές είτε προσθετικές τεχνικές (subtractive και additive techniques, αντίστοιχα). Έτσι, μπορεί να γίνει εφαρμογή της αφαιρετικής μεθόδου ονόματι χαρακτικής (etching) ή της προσθετικής μεθόδου γνωστής ως lift-off (δημιουργία πρότυπων διαδικασιών διαμόρφωσης).



**Εικόνα 4.13** Σχηματική της ροής της διαδικασίας ενθυλάκωσης με παρυλένιο. Όλα τα στρώματα έχουν δεχθεί τεχνική χάραξης (etching), και γίνεται χρήση του παρυλενίου για προστασία του πεντακένιου από τυχόν επιθέσεις [Ioannis Kymissis, OFET/Basic OFET fabrication].

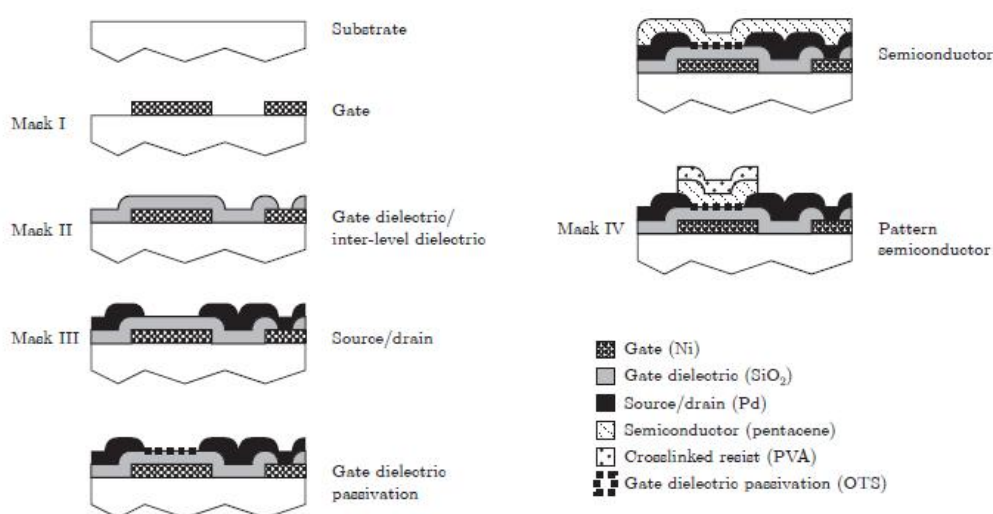


### 4.5.3 Ενθυλάκωση με πολυβινυλαλκοόλη

Μια άλλη μέθοδος είναι η ενθυλάκωση με χρήση πολυβινυλαλκοόλης (polyvinyl alcohol ή PVA) ως ανθεκτικό λεπτής μεμβράνης, ενός υδατικού φωτοευαίσθητου συστήματος που δεν θα επιφέρει τα άκρως αντιδραστικά αποτελέσματα που παρατηρούνται στους μετασταθείς ολιγομερείς ημιαγωγούς (metastable oligomeric semiconductors) κατά τη διάρκεια έκθεσής τους με άλλους διαλύτες.

Μιας και το ανθεκτικό λεπτής μεμβράνης (resist) αναπτύσσεται σε καθαρό νερό, υπάρχει εξίσου αποφυγή έκθεσης σε ισχυρές βάσεις ή ανεπτυγμένους διαλύτες.

Η διαδικασία αυτή φαίνεται παραστατικά στην εικόνα 4.14.



**Εικόνα 4.14** Σχηματική της ροής διαδικασίας της ενθυλάκωσης με πολυβινυλαλκοόλη. Η πύλη, το διηλεκτρικό της πύλης, και τα στρώματα πηγής και εκροής είναι διαμορφωμένα με φωτολιθογραφία. Το διηλεκτρικό πύλης έχει παθητικοποιηθεί (passivated gate dielectric) με χρήση οκταδεκυλοτιχλωρο-σιλάνιου (octadecyl-trichloro-silane), και ο ημιαγωγός εναποτίθεται. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται ένα φωτοευαίσθητο υλικό από πολυβινυλαλκοόλη για να διαμορφώσει τον ημιαγωγό, και ένα μη διασταυρωμένο ανθεκτικό λεπτής μεμβράνης (resist) αναπτύσσεται με νερό και το πεντακένιο που παραμένει εκτεθειμένο δέχεται χάραξη με χρήση πλάσματος οξυγόνου [Ioannis Kymissis, OFET/Basic OFET fabrication].

### 4.5.4 Ψηφιακή λιθογραφία

Αυτό που κάνει ιδιαίτερη την τεχνική εκτύπωσης ψεκασμού μελάνης (inkjet printing) είναι ο σχηματισμός του διηλεκτρικού στρώματος της πύλης (gate dielectric layer) και οι ομαλές πύλες (smooth gates).

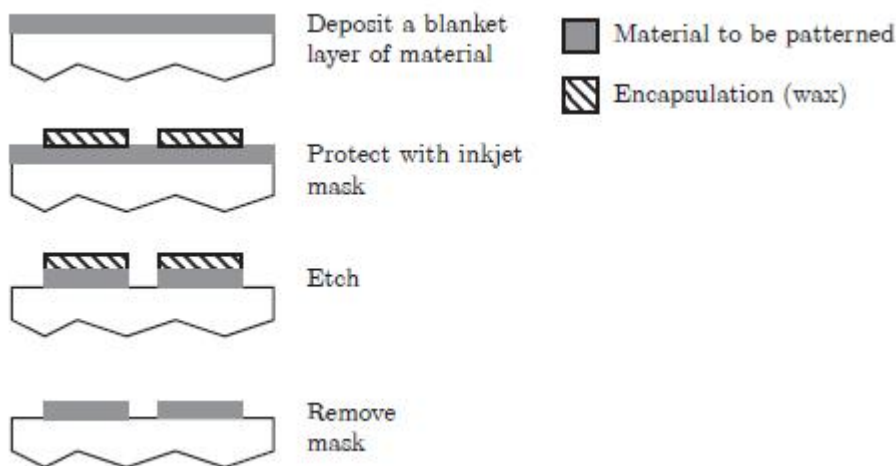
Σύμφωνα με την τεχνική της ψηφιακής λιθογραφίας (digital lithography ή subtractive inkjet), η οποία ανακαλύφθηκε από τον A. C. Arias και αναφέρεται παραστατικά στις εικόνες 4.15 και 4.16, απαιτείται εναπόθεση λεπτών μεμβρανών κάλυψης (blanket films) για την πύλη, το



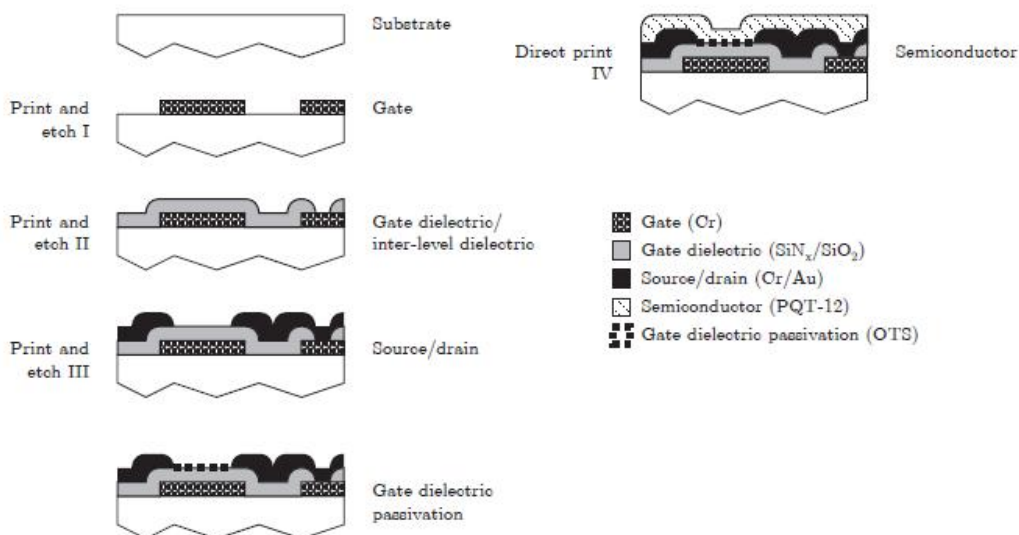
διηλεκτρικό της, και το στρώμα πηγής-εκροής, με το διηλεκτρικό της πύλης να αποτίθεται μέσω της τεχνικής χημικής εναπόθεσης ατμών ενισχυμένου πλάσματος (plasma-enhanced chemical vapor deposition ή PECVD).

Το ανθεκτικό λεπτής μεμβράνης που χρησιμοποιείται για τη μέθοδο αυτή είναι μια μορφή προστατευτικού κεριού (protective wax resist) που εφαρμόζεται μέσω της τεχνικής εκτύπωσης ψεκασμού (jet printing).

Το στρώμα ημιαγωγού που χρησιμοποιεί η μέθοδος αυτή είναι PQT-12, ένα διαλυτό ημιαγωγίμο πολυμερές, που εναποτίθεται με τεχνικές εκτύπωσης αφού πρώτα η επιφάνεια μεταξύ διηλεκτρικού και πύλης εκτεθεί σε οκταδεκυλο-τιχλωρο-σιλάνιο (octadecyl-trichloro-silane).



**Εικόνα 4.15** Σχηματική αναπαράσταση που δείχνει τη βασική έννοια της αφαιρετικής τεχνικής γνωστής ως ψηφιακή λιθογραφία (subtractive inkjet). Με τη διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται διαμόρφωση (patterning) μέσω μιας ψηφιακά ελεγχόμενης μεθόδου, αλλά επιτρέπει την εναπόθεση χρησιμοποιώντας οποιαδήποτε τεχνική. Το επιθυμητό υλικό αρχικά εναποτίθεται και στη συνέχεια διαμορφώνεται. Ένα τηγμένο κεριό εκτοξεύεται στο επιθυμητό μέρος που πρόκειται να διαμορφωθεί. Το κεριό στερεοποιείται με επαφή στην επιφάνεια. Οι απροστάτευτες περιοχές χαράσσονται χρησιμοποιώντας συμβατικές διαδικασίες, το ανθεκτικό λεπτής μεμβράνης (resist) απογυμνώνεται, και τίθεται σε επεξεργασία το επόμενο στρώμα [Ioannis Kymissis, OFET/Basic OFET fabrication].



**Εικόνα 4.16** Σχηματική της ψηφιακής λιθογραφίας (subtractive inkjet). Τα τρία πρώτα στρώματα αποτίθενται χρησιμοποιώντας συμβατικές τεχνικές εναπόθεσης ,ε κάλυμμα (blanket deposition) και διαμορφώνονται με χρήση της ψηφιακής λιθογραφίας, όπως αυτή εμφανίζεται στην εικόνα 4.15. Τα μεταλλικά στρώματα εναποτίθενται με θερμική εξάτμιση και το σύνθετο στρώμα νιτριδίου-οξειδίου (nitride-oxide) εναποτίθεται μέσω της τεχνικής PECVD. Μετά την επεξεργασία της στοίβας με οκταδεκυλο-τιγλωρο-σιλάνιο για παθητικοποίηση της επιφάνειας, ο ημιαγωγός εναποτίθεται προσθετικά (additive deposition), με χρήση ενός εκτυπωτή εκτόξευσης (jet printer) από το διάλυμα, και στεγνώνει [Ioannis Kymissis, OFET/Basic OFET fabrication].

## 4.6 Συμπεράσματα

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία τεχνικών, τόσο για το σχεδιασμό όσο και για την κατασκευή διατάξεων OFET.

Υπάρχουν ακόμη πιο πολλές παραλλαγές ως προς την εφαρμογή των τεχνικών αυτών, η καθεμιά με τα δικά της πλεονεκτήματα, μοναδικά χαρακτηριστικά και διεργασίες, καθώς επίσης και τους δικούς της περιορισμούς.

Λόγω αυτής της πληθώρας τεχνικών και παραλλαγών, στο κεφάλαιο αυτό έγινε μια γενική αναφορά σε μια μεγάλη γκάμα αυτών, και μια περαιτέρω ανάλυση σε αυτές που χρησιμοποιούνται περισσότερο, συνήθως λόγω των προνομίων που προσφέρουν, ή που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά και μόνο για το σχεδιασμό και κατασκευή συγκεκριμένων συσκευών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Μοντελοποίηση και χαρακτηρισμός συσκευών OFET

### 5.1 Μοντέλα τρανζίστορ

Μια ηλεκτρονική συσκευή, όπως είναι για παράδειγμα μια διάταξη OFET, μπορεί να χαρακτηριστεί πειραματικά μέσω ενός μοντέλου (device model).

Γενικά, ένας πειραματικός χαρακτηρισμός περιλαμβάνει ένα σύνολο δοκιμών που χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν μια συσκευή.

Υπάρχουν αναμφισβήτητα πολλά μοντέλα που αναπτύσσονται για να πραγματοποιήσουν πειραματικούς χαρακτηρισμούς, με τον χαρακτηρισμό να διακρίνεται, ανάλογα με το είδος του υλικού ή της συσκευής, σε ηλεκτρικό (electrical characterization), οπτικό (optical characterization), και φυσικό/χημικό (physical/chemical characterization).

Συγκεκριμένα για συσκευές ημιαγωγών, η μοντελοποίηση ημιαγωγίων συσκευών (semiconductor device modeling) είναι ένα σύνολο από διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία μοντέλων τα οποία μελετούν τη συμπεριφορά των εν λόγω συσκευών βάσει της θεμελιώδους φυσικής.

Επειδή τα τρανζίστορ είναι απλές συσκευές αλλά διαθέτουν κάπως περίπλοκη συμπεριφορά, προκειμένου να διασφαλιστεί η αξιόπιστη λειτουργία των κυκλωμάτων που χρησιμοποιούν τρανζίστορ, είναι αναγκαίο να γίνει μοντελοποίηση (επιστημονική καταγραφή) των φυσικών φαινομένων που παρατηρούνται κατά τη λειτουργία τους. Αυτή η διαδικασία μοντελοποίησης μπορεί να γίνει με τη χρήση ειδικών μοντέλων που ονομάζονται μοντέλα τρανζίστορ (transistor models).

Τα μοντέλα τρανζίστορ διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, ανάλογα με το αν χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό μιας συσκευής (device design) ή για τον σχεδιασμό ενός κυκλώματος (circuit design).

Αν και γενικά ο όρος μοντέλο (model) χρησιμοποιείται για να περιγράψει οτιδήποτε εκπροσωπεί μια έννοια ή ένα αντικείμενο, με τον όρο μοντέλο τρανζίστορ δεν θεωρείται κάποιο φυσικό αντικείμενο αλλά ένα εννοιολογικό μοντέλο (conceptual model) που δημιουργείται από σύνθεση εννοιών και δεν έχει υλική υπόσταση.

Τα εννοιολογικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για παρατήρηση, ανάλυση, κατανόηση ή προσομοίωση του θέματος που αντιπροσωπεύουν.

Υπάρχουν πολλά είδη μοντέλων, το καθένα με τη δική του πολυπλοκότητα και σκοπό.

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται αναφορά σε μερικούς από τους πρότυπους τρόπους μοντελοποίησης που μπορούν να χαρακτηρίσουν ηλεκτρικά μια συσκευή OFET.

Ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό διάφορων παραγόντων, όπως ηλεκτρική αντίσταση (electrical resistivity), συγκέντρωση φορέων (carrier concentration), κινητικότητα (mobility), αντίσταση επαφής (contact resistance), ύψος

φράγματος (barrier height), πλάτος ελάττωσης (depletion width), καταστάσεις διεπαφών (interface states), διάρκεια ζωής των φορέων (carrier lifetimes), και ακαθαρσίες ή ατέλειες (deep level impurities ή deep level defects).

Επειδή τα οργανικά τρανζίστορ επίδρασης πεδίου κατασκευάζονται με σκοπό όχι μόνο να παρέχουν αποτελέσματα σε βαθμό ίδιο με αυτά των ανόργανων τρανζίστορ επίδρασης πεδίου, αλλά και να προσφέρουν ακόμη περισσότερα πλεονεκτήματα, ιδιότητες και εφαρμογές από αυτά, κρίνεται απαραίτητη η μελέτη και ο έλεγχος όλων των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των OFET. Αυτό επιτυγχάνεται με καθορισμό, έλεγχο και διαχείριση των παραμέτρων που διαθέτει η εκάστοτε OFET συσκευή.

Η αντιμετώπιση αυτή ισχύει τόσο για τα OFET ως αυτόνομες συσκευές λειτουργίας όσο και για ηλεκτρονικά κυκλώματα που περιέχουν OFET.

## 5.2 Πρότυπα μοντέλα

Υπάρχουν διάφορα πρότυπα μοντέλα (standard models) που πραγματοποιούν χαρακτηρισμό, με μερικά από τα πιο συνηθισμένα σε χρήση να αναφέρονται παρακάτω.

### Πρότυπο IEEE 1620-2004

Το πρότυπο IEEE 1620-2004 (IEEE 1620-2004 standard) καλύπτει συνιστώμενες μεθόδους και πρότυπες πρακτικές για τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των οργανικών τρανζίστορ, όπως είναι για παράδειγμα τα OFET. Λόγω της φύσης των οργανικών τρανζίστορ, μπορούν να προστεθούν σημαντικά σφάλματα στη διαδικασία μέτρησης, εάν αυτή δεν πραγματοποιηθεί σωστά. Το πρότυπο αυτό δεν χρησιμοποιείται πλέον, καθώς έχει αντικατασταθεί από άλλα πιο σύγχρονα πρότυπα, μα αναφέρεται συχνά και λαμβάνεται υπόψη ως σημείο αναφοράς για τα διάφορα πρότυπα μέτρησης που αναπτύσσονται κατά καιρούς, αφού περιλαμβάνει τις πιο κοινές πηγές σφαλμάτων μέτρησης και παρέχει συνιστώμενες πρακτικές με σκοπό την ελάττωση ή και τον χαρακτηρισμό της επίδρασης καθεμιάς από αυτές [<http://standards.ieee.org/findstds/standard/1620-2004.html>].

### Πρότυπο IEEE 1620.1-2006

Ένα ενεργό και εγκεκριμένο πρότυπο που υπόκειται σε τακτική συντήρηση. Το πρότυπο IEEE 1620.1-2006 (IEEE 1620.1-2006 standard) περιλαμβάνει προτεινόμενες μεθόδους και τυποποιημένες πρακτικές για τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό έντυπων (printed) και οργανικών ταλαντωτών δακτυλίου (organic ring oscillators). Λόγω της φύσης των τυπωμένων και οργανικών κυκλωμάτων, μπορούν να περιληφθούν σφάλματα στις μετρήσεις αν οι διαδικασίες ηλεκτρικού χαρακτηρισμού δεν πραγματοποιηθούν σωστά. Το πρότυπο αυτό περιγράφει τις πιο κοινές πηγές σφαλμάτων μέτρησης, ιδιαίτερα για υψηλές αντιστάσεις μετρήσεων που απαιτούνται συνήθως για τους έντυπους και οργανικούς ταλαντωτές δακτυλίου. Επίσης, παρέχει συνιστώμενες πρακτικές με σκοπό να ελαχιστοποιήσει ή να χαρακτηρίσει την επίδραση των τεχνικών μέτρησης και άλλων πηγών σφαλμάτων που συναντώνται κατά τη διαδικασία μέτρησης έντυπων και οργανικών ταλαντωτών δακτυλίου [<http://standards.ieee.org/findstds/standard/1620.1-2006.html>].

## Πρότυπο IEEE 1620-2008

Άλλο ένα ενεργό πρότυπο που υπόκειται σε τακτική συντήρηση, το IEEE 1620-2008 (IEEE 1620-2008 standard) διαθέτει προτεινόμενες μεθόδους και τυποποιημένες πρακτικές για τον χαρακτηρισμό έντυπων και οργανικών τρανζίστορ. Λόγω της φύσης των έντυπων και οργανικών ηλεκτρονικών, μπορούν να παρουσιαστούν σημαντικά σφάλματα μέτρησης κατά την έκβαση των διαδικασιών χαρακτηρισμού, αν δεν γίνει σωστός έλεγχος. Το πρότυπο IEEE 1620-2008 περιγράφει τις πιο κοινές πηγές σφαλμάτων μέτρησης, ειδικότερα για υψηλής αντίστασης ηλεκτρικών μετρήσεων που απαιτούνται συνήθως για έντυπα και οργανικά τρανζίστορ, και παρέχει προτεινόμενες πρακτικές που έχουν ως σκοπό να ελαχιστοποιήσουν ή να χαρακτηρίσουν την επίδραση των τεχνικών μέτρησης και άλλων πηγών σφαλμάτων που παρουσιάζονται κατά τη μέτρηση έντυπων και οργανικών τρανζίστορ [<http://standards.ieee.org/findstds/standard/1620-2008.html>].

### 5.3 Παράμετροι

Η απόδοση των ημιαγωγικών συσκευών, όπως είναι τα τρανζίστορ, εξαρτάται κυρίως από τις ηλεκτρικές τους παραμέτρους.

Οι παράμετροι (parameters) που υπάρχουν και χρειάζονται έλεγχο και επεξεργασία σε ένα OFET ώστε αυτό να λειτουργεί σωστά, είναι ουσιαστικά οι παράγοντες που εμφανίζονται στο OFET κατά τη λειτουργία του και επηρεάζουν την απόδοση και λειτουργικότητά του.

Με έλεγχο των ηλεκτρικών παραμέτρων ενός τρανζίστορ, το τρανζίστορ αυτό είναι σε θέση να δεχθεί χαρακτηρισμό.

Το πρότυπο IEEE 1620-2004 αποτελεί ένα αρκετά κλασσικό πρότυπο αρκετά χρησιμοποιούμενο για χρόνια, και παρόλο που όλες οι δραστηριότητες συντήρησής του έχουν σταματήσει και έχει αντικατασταθεί από άλλα, πιο σύγχρονα, εγκεκριμένα πρότυπα, επειδή καλύπτει μια γενική γκάμα όλων των παραμέτρων που απαιτούν μέτρηση και χαρακτηρισμό για τη σωστή λειτουργία και μοντελοποίηση των οργανικών τρανζίστορ, στο κεφάλαιο αυτό λαμβάνεται αρκετά υπόψη ως παράδειγμα διαδικασιών μέτρησης και χαρακτηρισμού.

Όσον αφορά τις παραμέτρους, οι παράμετροι που συναντώνται στα FET υπάρχουν και ισχύουν και για τα OFET.

Οι πιο κοινές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται προσαρμόζουν τα χαρακτηριστικά των OFET σε ένα απλοποιημένο μακρύ κανάλι από κρυσταλλικό πυρίτιο (simplified long channel crystalline silicon device). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται απλότητα στη χρήση και κατανόηση της λειτουργίας.

Στον πίνακα 5.1 απεικονίζονται οι παράμετροι ενός παραδοσιακού τρανζίστορ πυριτίου (Si) και οι συμβατικές ηλεκτρικές τους μονάδες, για μοντελοποίηση μεγάλου σήματος (large-signal modeling).

Η μοντελοποίηση μεγάλου σήματος, στην επιστήμη της ηλεκτρολογίας, αποτελεί μια αρκετά συνήθη μέθοδο ανάλυσης, περιγράφοντας μη γραμμικές συσκευές όσον αφορά τις βασικές μη γραμμικές εξισώσεις, αντίθετα από την μοντελοποίηση μικρού σήματος (small-signal

modeling) που χρησιμοποιείται ειδικά για να εξηγήσει τη συμπεριφορά μη γραμμικών συσκευών με γραμμικές εξισώσεις.

Parameter	Meaning	Units
$I_S$	Source current	A
$I_G$	Gate current	A
$I_D$	Drain current	A
$V_{GS}$	Gate voltage	V
$V_{DS}$	Drain voltage	V
$W$	Width	$\mu\text{m}$
$L$	Length	$\mu\text{m}$
$C_{OX}$	Gate capacitance (specific)	$\text{F}(\text{cm})^{-2}$
$\mu$	Mobility (effective)	$\text{cm}^2(\text{Vs})^{-1}$
$V_T$	Threshold voltage	V
$Q$	Sheet charge density	$\text{C}/\text{cm}^2$

**Πίνακας 5.1** Παράμετροι ενός παραδοσιακού τρανζίστορ Si (πυριτίου) και συμβατικές μονάδες, για μοντελοποίηση μεγάλου σήματος [Ioannis Kymissis, OFET/Modeling and characterization].

Μερικές από τις σημαντικότερες ηλεκτρικές παραμέτρους, που χρήζουν απαραίτητης μελέτης για τη σωστή και αποδοτική λειτουργία ενός τρανζίστορ, αναλύονται παρακάτω.

### 5.3.1 Κινητικότητα

Γενικά, με το όρο κινητικότητα (mobility) θεωρείται η ικανότητα που έχουν τα φορτισμένα σωματίδια (π.χ. ηλεκτρόνια ή πρωτόνια) να κινούνται διαμέσου ενός μέσου (στερεό, υγρό ή αέριο), σε απόκριση ενός ηλεκτρικού πεδίου που τα επηρεάζει.

Στον τομέα των ηλεκτρονικών στερεάς κατάστασης, και συγκεκριμένα για τα OFET, η κινητικότητα αναφέρεται στο πόσο γρήγορα μπορεί ένας φορέας (ηλεκτρόνιο ή οπή) να κινηθεί διαμέσου μιας συσκευής (ημιαγωγού ή μετάλλου), όταν αυτό έλκεται από ηλεκτρικό πεδίο.

Η κινητικότητα μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας έναν από τους τύπους τρανζίστορ επίδρασης πεδίου. Το αποτέλεσμα της μέτρησης ονομάζεται κινητικότητα επίδρασης πεδίου (field-effect mobility), επειδή η κινητικότητα προκύπτει από την μέτρηση επίδρασης πεδίου.

Η μέτρηση μπορεί να γίνει με εφαρμογή δύο τεχνικών, είτε στη λειτουργία κορεσμού (saturation mode) ή στη γραμμική περιοχή (linear region).

Για την εφαρμογή της τεχνικής της περιοχής κορεσμού (saturation mode technique), απαιτείται σταθερή τάση πύλης (τάση μεταξύ πύλης και πηγής –  $V_{GS}$ ). Ύστερα με αύξηση της τάσης εκροής-πηγής ( $V_{DS}$ ), αυξάνεται το ρεύμα εκροής ( $I_D$ ) μέχρι να φτάσει σε κορεσμό

(saturation current ή  $I_s$ ). Στη συνέχεια, η τετραγωνική ρίζα του κορεσμένου αυτού ρεύματος ( $I_s$ ) ελέγχεται συναρτήσει της τάσης της πύλης και μετريέται η κλίση της συνάρτησης (slope).

Με την τεχνική της γραμμικής περιοχής (linear region), το τρανζίστορ λειτουργεί στην γραμμική περιοχή (γνωστή και ως ωμική περιοχή). Εδώ η  $V_{DS}$  είναι μικρή σε τιμή (τιμές μικρότερες του 0.1V). Λόγω των μικρών τιμών που παίρνει η  $V_{DS}$  και της ομοιότητας του πεδίου που εμφανίζεται σε όλο το μήκος του στρώματος πηγής-εκροής, η πυκνότητα των φορέων φορτίου (Q) είναι σταθερή.

Μαθηματικά, ορίζεται από την γενική σχέση:

$$\mu = \frac{\text{Velocity}}{E}$$

Όπου:

$\mu$  = κινητικότητα ή ηλεκτρική κινητικότητα σε  $m^2/V_s$ ,

Velocity (ή  $U_d$ ) = ταχύτητα ή ταχύτητα ολίσθησης σε m/s, δηλαδή η μέση ταχύτητα που επιτυγχάνει ένα σωματίδιο (π.χ. ηλεκτρόνιο) λόγω ενός ηλεκτρικού πεδίου,

και  $E$  = το μέγεθος του ηλεκτρικού πεδίου σε V/m (σταθερής τιμής μέγεθος).

Το ρεύμα που ρέει είναι η ποσότητα του φορτίου που κινείται στο εσωτερικό της συσκευής, και η ταχύτητα του ρεύματος είναι η ταχύτητα που κινούνται οι φορείς φορτίου.

Το ρεύμα είναι ανάλογο της πυκνότητας φορτίου (Q) και του πλάτους (W) ενός στρώματος (π.χ. κανάλι για τα OFET), της κινητικότητας των φορέων ( $\mu$ ) σε αυτό, καθώς και του μεγέθους του εφαρμοζόμενου σε αυτό ηλεκτρικού πεδίου (E):

$$I = QW\mu E$$

Από τον παραπάνω τύπο, η κινητικότητα ορίζεται και έτσι:

$$\mu = \frac{I}{QWE}$$

Το μοντέλο αυτό έχει μια γραμμική σχέση μεταξύ της ταχύτητας φορέων και του ηλεκτρικού πεδίου, όταν το ηλεκτρικό πεδίο έχει χαμηλή τιμή.

Στην λειτουργία γραμμικής περιοχής, η κινητικότητα των φορέων είναι δυνατόν να μετρηθεί εύκολα μέσω μιας διαδικασίας γνωστής με τον αγγλικό όρο curve fitting, η οποία χρησιμοποιείται για προσδιορισμό της κινητικότητας των φορέων σε ένα μοντέλο τρανζίστορ. Στην γραμμική περιοχή του τρανζίστορ, το συνολικό ρεύμα μπορεί να συμπεριφερθεί όπως ένας αντιστάτης:



$$\mu = \frac{\text{Velocity}}{E}$$

$$Q = \frac{C_{channel}(V_{GS} - V_T)}{WL}$$

$$\mu = \frac{I_D}{WQ} \frac{L}{V_{DS}}$$

$$= \frac{I_D}{W} \frac{WL}{C_{channel}(V_{GS} - V_T)} \frac{L}{V_{DS}}$$

$$= \frac{I_D L^2}{C_{channel}(V_{GS} - V_T) V_{DS}}$$

Επειδή η διαδικασία curve fitting εφαρμόζεται μόνο για την γραμμική περιοχή, εκεί η τάση  $V_{DS}$  είναι μικρή και η πυκνότητα  $Q$  των φορέων είναι σταθερή μέσα στο κανάλι, το ρεύμα  $I_D$  προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$I_D = Q(x) E_{lateral}(x) \mu(x)$$

Όπου:

$x$  = η θέση στην κατεύθυνση της ροής φόρτισης του φορέα,

$Q(x)$  = η πυκνότητα των φορέων σε συνάρτηση με τη θέση στην κατεύθυνση της ροής φόρτισης,

και  $E_{lateral}$  = το τοπικό ηλεκτρικό πεδίο στην κατεύθυνση της ροής φόρτισης φορέα.

Το ρεύμα  $I_{DS}$  είναι σταθερό ως συνάρτηση του  $x$  λόγω διατήρησης της φόρτισης. Κατά συνέπεια, η ταχύτητα με την οποία κινούνται οι φορείς, που δίνεται στην παραπάνω συνάρτηση με την μορφή  $E_{lateral}(x) * \mu(x)$ , είναι επίσης σταθερή.

Καθώς το ρεύμα στη συσκευή πλησιάζει σε κατάσταση κορεσμού (channel pinching ή pinch-off effect of the channel), η πυκνότητα φορέων ( $Q$ ) επηρεάζει περισσότερο τη θέση της ροής φόρτισης ( $x$ ), και η ταχύτητα των φορέων και το πλευρικό πεδίο (lateral field) δεν είναι πλέον σταθερά σε όλο το μήκος του καναλιού.

Στους κρυσταλλικούς και στους οργανικούς ημιαγωγούς, η σχέση μεταξύ ταχύτητας φορέων και ηλεκτρικών πεδίων είναι μη γραμμική αν το ηλεκτρικό πεδίο είναι μεγάλο. Στους οργανικούς ημιαγωγούς, η σχέση εξαρτάται επίσης από την συγκέντρωση φορέων φορτίου.

### 5.3.2 Τάση κατοφλίου



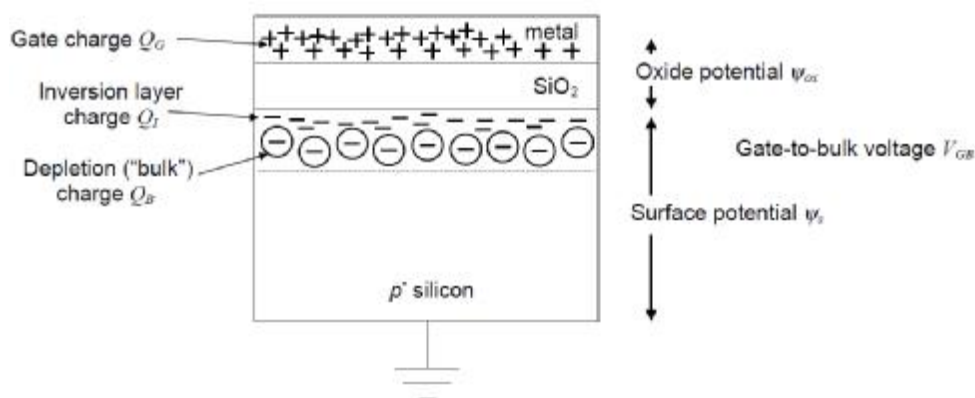
Στα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου, όταν το κανάλι που σχηματίζεται μεταξύ πηγής και εκροής αρχίσει να γίνεται αγωγίμο, εμφανίζεται μια τάση μεταξύ πύλης και πηγής ( $V_{GS}$ ). Η τάση αυτή ονομάζεται τάση κατωφλίου (threshold voltage ή  $V_{TH}$ ).

Σε μια διάταξη ημιαγωγών, γενικότερα, ως τάση κατωφλίου ορίζεται η τάση στην οποία επιτυγχάνεται αναστροφή (inversion) (εικόνα 5.1).

Επειδή όμως οι συσκευές οργανικών ημιαγωγών, όπως για παράδειγμα τα OFET, δεν επιτυγχάνουν ποτέ αναστροφή, δεν υπάρχει καθορισμένη τάση κατωφλίου. Το μόνο που μπορεί να ληφθεί υπόψη είναι μια τάση στην οποία η συσκευή αρχίζει να συσσωρεύει φορτίο. Στην περίπτωση συσκευών κρυσταλλικού πυριτίου (crystalline Silicon devices) η τάση αυτή αναφέρεται ως τάση επίπεδης ζώνης (flat-band voltage ή flatband voltage).

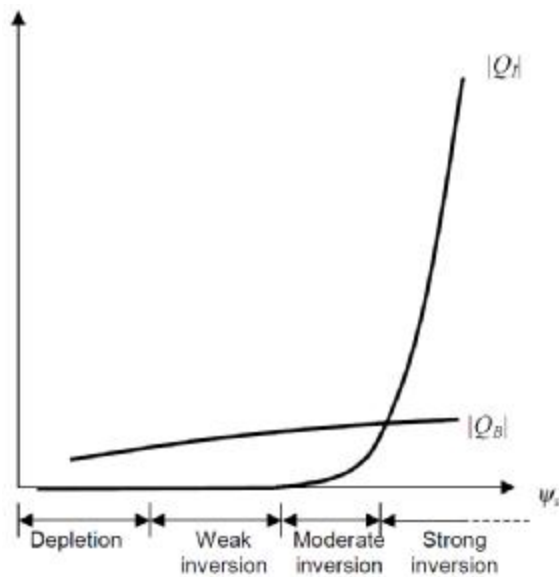
Για να γίνει καλύτερα αντιληπτή η τάση κατωφλίου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως παράδειγμα μια παραδοσιακή διάταξη FET.

Σε ένα παραδοσιακό τρανζίστορ επίδρασης πεδίου υπάρχουν τρία βασικά στάδια αναστροφής, η ασθενής (weak inversion), η μέτρια (moderate inversion), και η ισχυρή αναστροφή (strong inversion). Στην εικόνα 5.1 παρατηρείται ένα MOSFET, του οποίου το κανάλι (περιοχή κάτω από την πύλη) έχει υποστεί έντονη αναστροφή (strong inversion).



**Εικόνα 5.1** A strongly inverted MOSFET capacitor [[http://heim.ifi.uio.no/~inf3410/docs/R\\_Harrison-MOS\\_Transistor\\_in\\_Strong\\_Inversion.pdf](http://heim.ifi.uio.no/~inf3410/docs/R_Harrison-MOS_Transistor_in_Strong_Inversion.pdf)].

Στην εικόνα 5.2, κατά τη διάρκεια ισχυρής αναστροφής, το φορτίο του ανεστραμμένου στρώματος ξεπερνάει κατά πολύ το φορτίο εξάντλησης ( $|Q_I| \gg |Q_B|$ ), και το φορτίο της πύλης ( $Q_B$ ) εξισορροπεί λόγω του φορτίου του στρώματος αναστροφής ( $Q_I$ ). Η τάση στην οποία κυριαρχεί το φορτίο του στρώματος αναστροφής ονομάζεται τάση κατωφλίου ( $V_{TH}$ ).



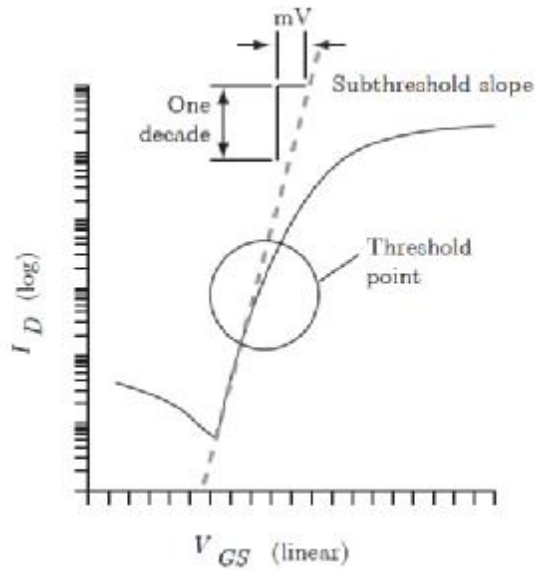
**Εικόνα 5.2** Σχολιασμός [\[http://heim.ifi.uio.no/~inf3410/docs/R\\_Harrison-MOS\\_Transistor\\_in\\_Strong\\_Inversion.pdf\]](http://heim.ifi.uio.no/~inf3410/docs/R_Harrison-MOS_Transistor_in_Strong_Inversion.pdf).

[\[http://heim.ifi.uio.no/~inf3410/docs/R\\_Harrison-MOS\\_Transistor\\_in\\_Strong\\_Inversion.pdf\]](http://heim.ifi.uio.no/~inf3410/docs/R_Harrison-MOS_Transistor_in_Strong_Inversion.pdf).

Παρόλα αυτά, ο όρος τάση κατωφλίου (threshold voltage ή  $V_{TH}$ ) συνεχίζει να χρησιμοποιείται στα OFET, θεωρώντας την ως την τάση (τάση πύλης ή  $V_{GS}$ ) κατά την εμφάνιση της οποίας αρχίζει να ρέει ρεύμα.

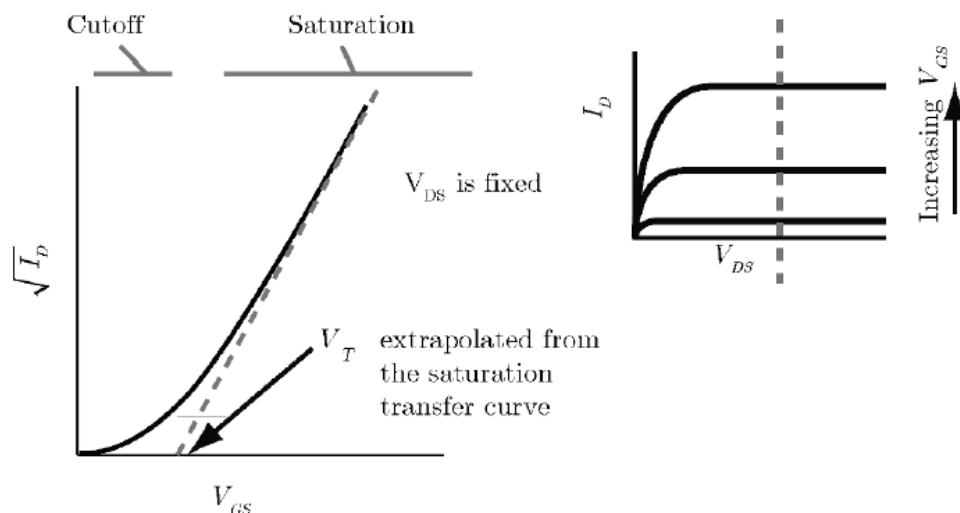
Στην περίπτωση των παραδοσιακών FET κρυστάλλου πυριτίου η τάση αυτή εμφανίζεται με την έναρξη της αναστροφής, ενώ στα OFET με την έναρξη της συσσώρευσης (charge accumulation).

Τάση κατωφλίου μπορεί να δημιουργηθεί όταν η αύξηση του ρεύματος αποκλίνει από την χαρακτηριστική ( $V$ - $I$ ) που αναμένεται από διάχυση σε μια συσκευή κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si), όπως παρατηρείται κι από την εικόνα 5.3. Αυτό συνήθως συμβαίνει όταν το ρεύμα είναι μικρό, αλλά δείχνει το σημείο που η επιρροή της πύλης αρχίζει να ξεπερνάει το εμπόδιο στην αγωγιμότητα, μέσα στο κανάλι.



**Εικόνα 5.3** Σχηματική της χαρακτηριστικής ( $I$ - $V$ ) και της κλίσης υπο-κατωφλίου (subthreshold slope). Η τάση κατωφλίου εδώ μπορεί να ληφθεί ως το σημείο στο οποίο το ρεύμα αποκλίνει από την εκθετική χαρακτηριστική που αναμένεται από μια καθαρά διαχυτική μεταφορά [Ioannis Kymissis, OFET/Modeling and characterization].

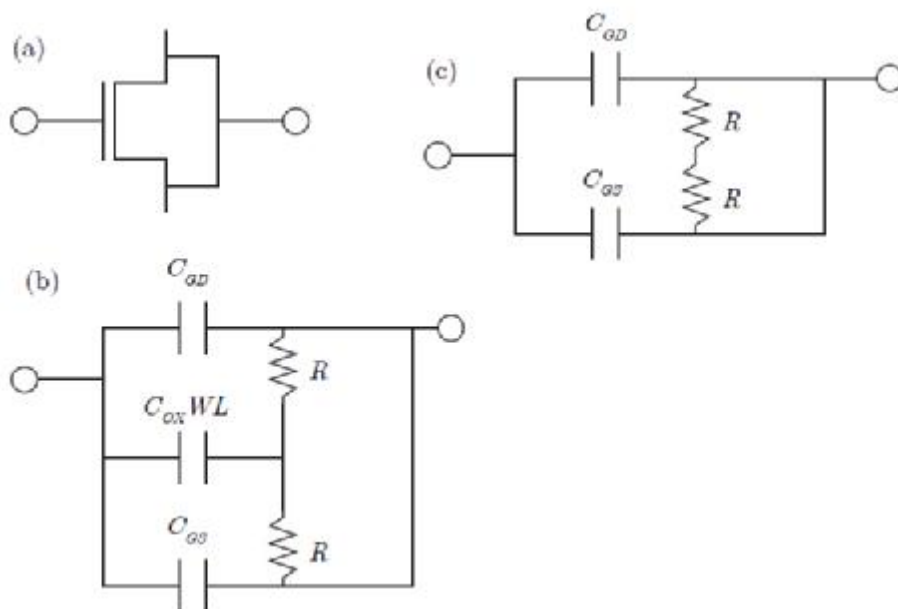
Ένας άλλος τρόπος, αρκετά απλός και εύκολος στην εφαρμογή, με τον οποίο μπορεί να προσδιοριστεί η τάση κατωφλίου είναι με προέκταση του γραμμικού τμήματος της καμπύλης ( $\sqrt{I_D}$ - $V_{GS}$ ) στο σημείο τομής του άξονα  $V_{GS}$ , όπως παρατηρείται κι από την εικόνα 5.4. Αυτό δείχνει την τάση στην οποία υπάρχει κάποια αύξηση στο ρεύμα και τις μεταβάσεις στη συσκευή από κατάσταση διακοπής σε μια περιοχή λειτουργίας όπου η συσκευή διαρρέεται από ρεύμα.



**Εικόνα 5.4** Σχηματική που δείχνει την προέκταση της τάσης κατωφλίου ( $V_{TH}$  ή  $V_T$ ) από την χαρακτηριστική μεταφοράς ( $\sqrt{I_D}$ - $V_{GS}$ ). Η καμπύλη ( $I_D$ - $V_{GS}$ ) δείχνει το τμήμα της χαρακτηριστικής εξόδου ( $I_D$ - $V_{GS}$ ) στο οποίο λαμβάνονται οι καμπύλες μεταφοράς [Ioannis Kymissis, OFET/Modeling and characterization].

Άλλη μέθοδος προσδιορισμού της τάσης κατωφλίου είναι με μέτρηση της χαρακτηριστικής χωρητικότητας-τάσης (C-V) του τρανζίστορ. Με τη μέθοδο αυτή παρουσιάζεται η πυκνότητα των φορέων. Αφού επέλθει ένωση πηγής και εκροής, μέτρηση της χωρητικότητας επιτυγχάνεται μεταξύ της πηγής-εκροής και πύλης.

Σχηματικά, η μέτρηση της χωρητικότητας φαίνεται στην εικόνα 5.5.



**Εικόνα 5.5** Σχηματικά μοντέλα για μέτρηση (C-V) των OFET. (a) Σύνδεση πηγής-εκροής και πύλης που δημιουργεί τη χαρακτηριστική. Η  $V_{DS}$  τίθεται στα 0V και η χωρητικότητα μετριέται μεταξύ της πύλης και των βραχυκυκλωμένων ηλεκτροδίων πηγής και εκροής. (b) Στη συσσώρευση (accumulation), υπάρχουν τρεις σημαντικές συμβολές στην ολική χωρητικότητα, η εκτεταμένη χωρητικότητα (overlap capacitance) του καναλιού ( $C_{OX}WL$ ), η overlap χωρητικότητα πύλης-πηγής ( $C_{GS}$ ), και η overlap χωρητικότητα πύλης-εκροής ( $C_{GD}$ ). (c) Στην μείωση (depletion), μόνο η overlap χωρητικότητα παρατηρείται. Δεν υπάρχει κινητό φορτίο στο κανάλι για να συμβάλει σε χωρητικότητα καναλιού [Ioannis Kymissis, OFET/Modeling and characterization].

### 5.3.3 Αντίσταση επαφής

Ως αντίσταση επαφής (contact resistance ή  $R_C$ ), αλλιώς αντίσταση διεπαφής (interface resistance) ή μεταβατική επαφή (transitional resistance) ή όρος διόρθωσης (correction term) ή παρασιτική αντίσταση (parasitic resistance), αναφέρεται η συνολική αντίσταση που έχει ένα υλικό, και προέρχεται από τα ηλεκτρικά μέρη του (ηλεκτρικά καλώδια, επαφές και συνδέσεις), αντίθετα με την ενδογενή αντίσταση που αποτελεί έμφυτη ιδιότητα, και δεν επηρεάζεται από την μέθοδο μέτρησης.

Η αντίσταση επαφής ορίζεται ανάλογα με τη σύνθεση των μορίων ενός υλικού, και όπως όλες οι αντιστάσεις στο διεθνές σύστημα μονάδων μετριέται σε Ωμ (Ohm).

Στα OFET, ο όρος αντίσταση επαφής περιλαμβάνει όλες τις αντιστάσεις σειράς (series resistance) για ένα δεδομένο μήκος καναλιού. Σαν αντιστάσεις επαφής μπορούν να ληφθούν

και οι αντιστάσεις της πηγής και της εκροής, η αντίσταση της διεπαφής μεταξύ ημιαγωγικού στρώματος (ημιαγωγού) και επαφών. Επίσης, ως αντίσταση επαφής μπορεί να θεωρηθεί και οποιαδήποτε παρέμβαση στα άκρα του καναλιού (επαφές πηγής και εκροής) που αλλάζει την μορφολογία και τη δομή του, και άρα την αντίστασή του.

Ένας πολύ γνωστός τρόπος προσέγγισης της αντίστασης επαφής στα τρανζίστορ είναι με το μοντέλο γνωστό ως μοντέλο γραμμής μεταφοράς (transmission line model ή transfer line model ή αλλιώς TLM).

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η συνολική αντίσταση ( $R_{total}$ ) μιας διάταξης χαράσσεται ως συνάρτηση του μήκους του καναλιού.

Σε ένα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου, η συνολική αντίσταση ορίζεται μαθηματικά από τη σχέση:

$$R_{total} = R_C + L * \rho_{channel}$$

Όπου:

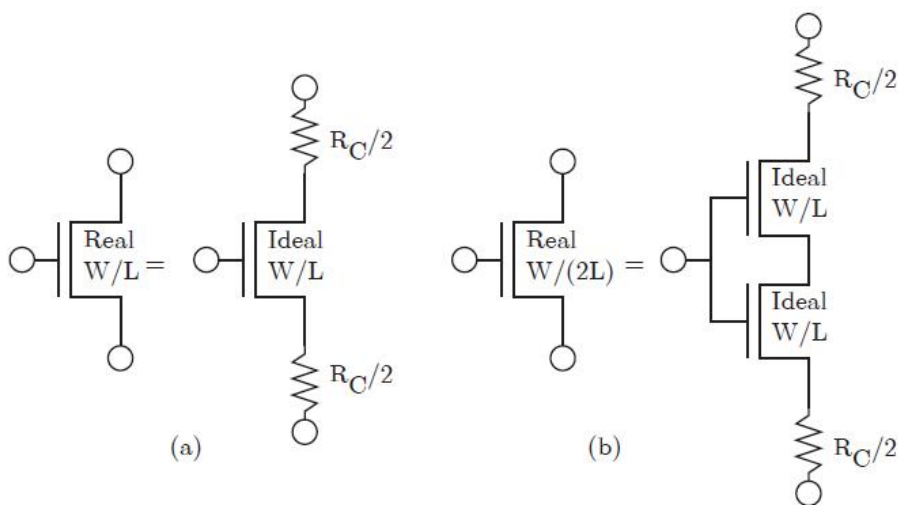
$L$  = το μήκος του καναλιού (ημιαγωγικό στρώμα),

$R_C$  = η συνολική αντίσταση που αναλογεί στις επαφές,

και  $\rho_{channel}$  = η ειδική αντίσταση (specific resistance) του καναλιού στην κατάσταση πόλωσης.

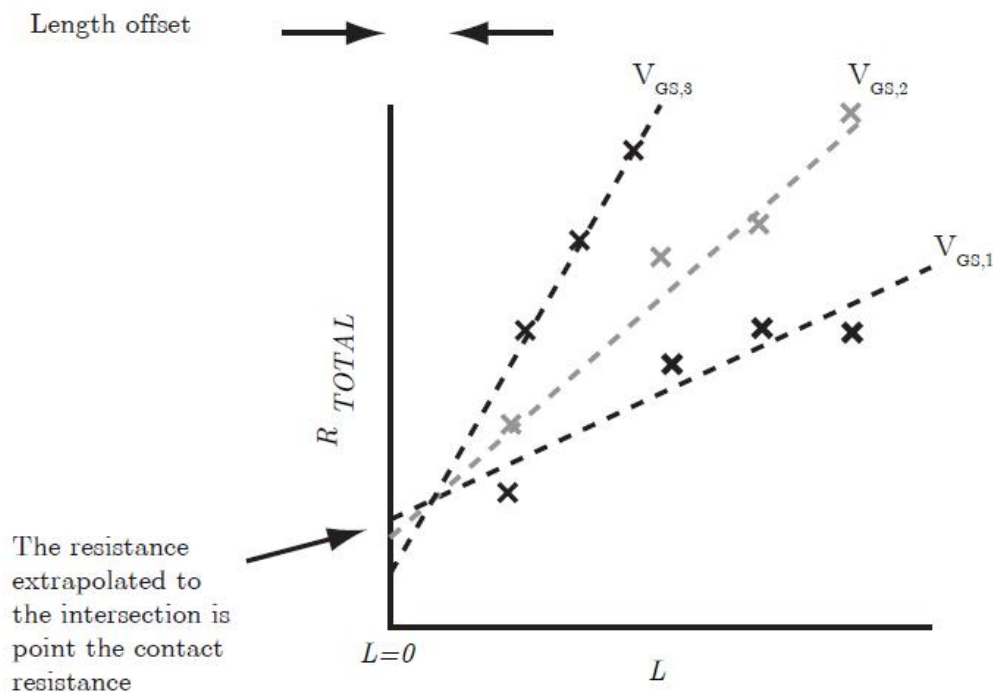
Με σύγκριση της αντίστασης καναλιού σε μια σειρά των τρανζίστορ διαφορετικών μηκών υπό συγκρίσιμες συνθήκες πόλωσης, η αντίσταση επαφής μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί από το μήκος του καναλιού, με προϋπόθεση να ισχύει  $L = 0 \mu m$ , όπως γίνεται αισθητό κι από την εικόνα 5.6.

Σε περίπτωση που η αντίσταση επαφής είναι μια γραμμική αντίσταση, το μέγεθος του πλευρικού ηλεκτρικού πεδίου ( $V_{DS}/L$ ) δεν είναι σημαντικό, αλλά για τη μείωση της επίδρασης τυχόν μη γραμμικότητας στη μέτρηση της αντίστασης επαφής συνηθίζεται να ελέγχεται η  $V_{DS}$  στα μετρούμενα σημεία ώστε το  $V_{DS}/L$  να παραμένει σταθερό.



**Εικόνα 5.6** Ένα μοντέλο για την αντίσταση επαφής. Μια πραγματική συσκευή διαμορφώνεται ως μια ιδανική συσκευή που δεν παρουσιάζει καμία αντίσταση επαφής και μια αντίσταση επαφής σε σειρά στην πηγή και εκροή (a). Αν μια μεγαλύτερη αλλά κατά τα άλλα πανομοιότυπη συσκευή κατασκευασθεί, η αντίσταση επαφής θα πρέπει να παραμείνει σταθερή, ενώ το ιδανικό τρανζίστορ κλιμακώνεται (b). Η σύγκριση συσκευών με διαφορετικά μήκη αποτελεί τη βάση για την πραγματοποίηση της μεθόδου γραμμής μεταφοράς (transfer line method) για την αφαίρεση της αντίστασης επαφής από το τρανζίστορ [Ioannis Kymissis, OFET/Modeling and characterization].

Στην εικόνα 5.7 απεικονίζεται σχηματικά η αντίστασης επαφής από μετρήσεις συσκευών με διαφορετικά μήκη.



**Εικόνα 5.7** Σχηματική εξόρυξη της αντίστασης επαφής από μετρήσεις συσκευών με διαφορετικά μήκη. Απεικονίζεται η συνολική αντίσταση καναλιού για ένα σύνολο συσκευών διαφορετικών μηκών, όπου  $R_{total} = R_C + L * \rho_{channel}$ . Στο σημείο τομής ισχύει  $R_{total} = R_C$  (ιδανικά  $L = 0$ , αλλά μια συστηματική αντιστάθμιση –όφσετ– στο μήκος καναλιού μπορεί να προκαλέσει τέτοια αποτελέσματα ώστε το σημείο αυτό να βρεθεί αλλού). Διαφορετικές καταστάσεις πόλωσης στην πύλη μπορούν επίσης να απεικονιστούν και να μετρηθεί η αντίστοιχη αντίσταση επαφής [Ioannis Kymissis, OFET/Modeling and characterization].

Άλλοι τρόποι μέτρησης της αντίστασης επαφής που χρησιμοποιούνται συχνά είναι η μέτρηση με περιφράξη τεσσάρων ηλεκτροδίων (gated four-probe measurement) και η μέθοδος τροποποιημένου χρόνου πτήσης (time of flight ή TOF).

### 5.3.4 Υστέρηση

Η υστέρηση εκφράζεται ως η εξάρτηση που έχει η έξοδος ενός συστήματος ως προς το τρέχον (ρεύμα στην είσοδο όταν το σύστημα λειτουργεί) αλλά και όλα τα προηγούμενα ρεύματα εισόδου που έχουν εφαρμοστεί ποτέ στο σύστημα αυτό.

Για να μπορέσει να γίνει πρόβλεψη μελλοντικών εξόδων σε ένα σύστημα (π.χ. μια ηλεκτρονική διάταξη), πρέπει να εξεταστεί είτε η εσωτερική του κατάσταση ή η ιστορία του (παρούσα αλλά και προηγούμενες εισροές πριν από αυτή).

Λόγω του ότι τα τρανζίστορ διατηρούν ένα ιστορικό (μια μορφή καταγραφής) όσον αφορά παρελθοντικές εισόδους, επηρεάζοντας έτσι την εσωτερική τους κατάσταση, συνήθως προτιμούνται διατάξεις με όσο το δυνατόν μικρότερη υστέρηση.

Για συσκευές όμως με μεγάλη υστέρηση, υπάρχουν διαθέσιμοι τρόποι για παρακολούθηση και περιορισμό του φαινομένου της υστέρησης σε κάποιο βαθμό.

Παρακολούθηση και μέτρηση μπορεί να επιτευχθεί μέσω των χαρακτηριστικών (I-V), ή μέσω των sweeps (DC hysteresis).

Ακόμη, παρακολούθηση και μέτρηση μπορεί να γίνει αφού η συσκευή σταθεροποιηθεί σε μια συγκεκριμένη πόλωση για κάποιο μικρό χρονικό διάστημα (το πρότυπο IEEE 1620 συστήνει δέκα λεπτά σε  $V_{GS}=V_{DS}=0V$ ). Αυτό θα δηλώσει την κατεύθυνση και τη φύση της υστέρησης.

Περιορισμός του φαινομένου της υστέρησης επιτυγχάνεται με διάφορες μεθόδους.

Ένας τρόπος περιορισμού είναι με την εφαρμογή της μεθόδου αργής χαλάρωσης του διηλεκτρικού της πύλης (slow relaxation of the gate dielectric). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται περισσότερο σε πολυμερή διηλεκτρικά που έχουν πολικές ομάδες (polar groups) ή απορροφούν το νερό.

Μια άλλη μέθοδος περιορισμού είναι η διηλεκτρική αποθήκευση φορτίου (dielectric charge storage) που πραγματοποιείται με έγχυση φορτίων στο διηλεκτρικό της πύλης.

Περιορισμός μπορεί επίσης να επιτευχθεί με τοποθέτηση παγίδων στον ημιαγωγό (semiconductor traps) [Ioannis Kymissis, OFET/Modeling and characterization].

### 5.3.5 Διαρροή πύλης

Στην επιστήμη των ηλεκτρονικών, με τον όρο διαρροή (leakage) αναφέρεται η σταδιακή απώλεια ενέργειας ενός συστήματος.

Η διαρροή σε ένα σύστημα (π.χ. ηλεκτρικό ή ηλεκτρονικό κύκλωμα) αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας. Αν η διαρροή είναι αρκετά μεγάλη, τότε το σύστημα παθαίνει σε κάποιο βαθμό βλάβη (failure modes) ή στις περισσότερες περιπτώσεις καταστρέφεται (catastrophic failure).

Στην κατηγορία των ημιαγωγών, κατά τη διαρροή οι κινητοί φορείς φορτίου ταξιδεύουν μέσα από μια περιοχή με μονωτικές ιδιότητες, με το ποσοστό της διαρροής να είναι αντιστρόφως

ανάλογο του πάχους της περιοχής. Όταν το πάχος της μονωτικής περιοχής μειώνεται, η διαρροή αυξάνει εκθετικά.

Στα τρανζίστορ, η κύρια πηγή διαρροής εμφανίζεται στο εσωτερικό τους, υπάρχουν όμως και περιπτώσεις που τα ηλεκτρόνια διαρρέουν μεταξύ των διασυνδέσεων.

Στα διπολικά τρανζίστορ (bipolar transistors, αλλιώς bipolar junction transistors ή BJTs), διαρροή μπορεί να εμφανιστεί και στο όριο (διεπαφή) μεταξύ των ημιαγωγικών επαφών τύπου n και τύπου p (n-type and p-type semiconductor junctions ή p-n junction), που έχουν δεχθεί προσμίξεις σε μεγάλο βαθμό (heavy doping), ενώ στα MOSFET διαρροή φορέων συμβαίνει μεταξύ των ακροδεκτών πηγής και εκροής (source and drain terminals). Η διαρροή αυτή των MOSFET είναι επίσης γνωστή ως αγωγιμότητα κατωφλίου (sub-threshold conduction).

Εκτός των παραπάνω, διαρροή στα τρανζίστορ εμφανίζεται και μέσω του μονωτικού πύλης (gate insulator), γνωστή με τον όρο διαρροή πύλης (gate leakage).

Διαρροή πύλης σε ένα τρανζίστορ μπορεί να προκύψει είτε από ατέλειες στην κατασκευή των διηλεκτρικών πύλης, από επιφανειακή αγωγιμότητα (surface conduction), μεταφορά μεγάλης πυκνότητας φορέων, ή ατελής επεξεργασία και διαμόρφωση (patterning) του ημιαγωγού.

Σε ένα τρανζίστορ που επικρατούν ιδανικές συνθήκες λειτουργίας (είτε λόγω ικανοποιητικής κατασκευής ή μη επίδρασης διαφόρων εσωτερικών ή εξωτερικών παραγόντων) δεν υπάρχει διαρροή στην πύλη. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει ρεύμα πύλης ( $I_G$ ), δηλαδή  $I_G = 0$  A.

Σύμφωνα με την διατήρηση της φόρτισης (charge conservation), μιας αρχής στη φυσική, το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο ενός απομονωμένου συστήματος παραμένει σταθερό ανεξάρτητα από τυχόν εσωτερικές αλλαγές ή επιδράσεις που μπορεί να συμβούν. Η καθαρή ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου (electric charge net quantity), το ποσό δηλαδή του θετικού φορτίου μείον το ποσό του αρνητικού φορτίου πάντα διατηρείται. Δε μπορεί ούτε να δημιουργηθεί ούτε να καταστραφεί.

Η αρχή διατήρησης της φόρτισης προϋποθέτει ότι  $I_D + I_S + I_G = 0$ , όπου  $I_D$  = ρεύμα εκροής ή ρεύμα εξόδου του καναλιού,  $I_S$  = το ρεύμα πηγής ή ρεύμα εισόδου στο κανάλι, και  $I_G$  = το ρεύμα πύλης.

Για να ισχύει η παραπάνω αρχή, σε ένα ιδανικό τρανζίστορ θα πρέπει να ισχύουν οι συνθήκες  $I_G = 0$  και  $I_D = -I_S$ , δηλαδή να μη υπάρχει διαρροή πύλης και το ρεύμα εισόδου να πηγαίνει εξολοκλήρου στην έξοδο (ρεύμα να διαρρέει μόνο το κανάλι).

Για τυχόν διαρροή πύλης μπορεί γίνει μέτρηση του ρεύματος πύλης (gate current ή  $I_G$ ). Μέτρηση στο ρεύμα πύλης μπορεί να γίνει ταυτόχρονα με οποιαδήποτε άλλη μέτρηση (I-V) στο σύστημα.

Ένας από τους πιο απλούς και εύκολους τρόπους μέτρησης (ελέγχου) διαρροής γίνεται όταν η  $V_{DS} = 0V$  σε ένα εύρος τιμών της  $V_{GS}$ . Το ρεύμα πύλης όμως μπορεί να μετρηθεί μόνο σε ένα εύρος τιμών πόλωσης και να αποδοθεί μόνο σε συσκευές που μπορούν να το μετρήσουν.

### 5.3.6 Κλίση υποκατωφλίου



Αν και απαντάται σε όλα τα τρανζίστορ γενικότερα, η κλίση υποκατωφλίου (sub-threshold slope ή subthreshold slope), αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα της χαρακτηριστικής ρεύματος-τάσης (I-V) ενός MOSFET.

Ως κλίση υποκατωφλίου ορίζεται η αντίστροφη κλίση της  $I_D$  (log) συναρτήσεως της  $V_{GS}$  μετρούμενη κάτω από το όριο, όπως μπορεί να παρατηρηθεί κι από την εικόνα 5.3.

Η κλίση υποκατωφλίου βρίσκεται στην περιοχή της μέγιστης κλίσης, και αναφέρεται συνήθως στην λογαριθμική κλίμακα 10, δηλαδή 10 λογαριθμικές μονάδες σε mV/decade, όπου μια δεκάδα (decade ή dec) αντιστοιχεί σε 10 φορές αύξηση του ρεύματος εκροής  $I_D$ .

Η κλίση υποκατωφλίου είναι στενά συνδεδεμένη με τον πολλαπλασιαστικό αντίστροφο (multiplicative inverse ή reciprocal) που ονομάζεται ταλάντευση υποκατωφλίου (sub-threshold swing ή  $S_{s-th}$ ) που συνήθως παρίσταται μαθηματικά με τη σχέση:

$$S_{s-th} = \ln(10) \frac{kT}{q} \left(1 + \frac{C_d}{C_{ox}}\right)$$

Όπου:

$C_d$  = χωρητικότητα περιοχής εξάντλησης (depletion region capacitance),

$C_{ox}$  = χωρητικότητα πύλης-οξειδίου (gate-oxide capacitance),

$k * T / q$  = θερμική ενέργεια δια του στοιχειώδους φορτίου.

Η ελάχιστη ταλάντευση υποκατωφλίου μπορεί να παρατηρηθεί αν η χωρητικότητα πύλης-οξειδίου γίνει πάρα πολύ μεγάλη ( $C_{ox} \rightarrow \infty$ ). Η ταλάντευση υποκατωφλίου τότε αποδίδει 60mV/dec σε θερμοκρασία δωματίου. Όταν συμβαίνει αυτό, η κλίση υποκατωφλίου θεωρείται ως η καλύτερη κλίση υποκατωφλίου που μπορεί να υπάρξει σε ένα FET (κλίση στην άκρη μιας διανομής Fermi, γνωστή με τον αγγλικό όρο Fermi-Dirac statistics).

Στο υποκατώφλι, το ρεύμα στο κανάλι είναι μια συνάρτηση της συγκέντρωσης φορέων φορτίου του καναλιού.

Επειδή οι οργανικοί ημιαγωγοί παρουσιάζουν μια σταδιακή αύξηση στην πυκνότητα των μελών στην άκρη του καναλιού και δεν έχουν όλοι οι φορείς την ίδια κινητικότητα, παράγεται μια ρηχή αύξηση στην πυκνότητα φορέων και η κλίση υποκατωφλίου παίρνει τιμή χειρότερη από 60mV/dec.

Η τυπική ταλάντευση υποκατωφλίου για ένα MOSFET σε θερμοκρασία δωματίου είναι περίπου 70mV/dec).

Όσο για το ρεύμα, σε συνθήκες διακοπής λειτουργίας (cut-off) το ρεύμα αρχίζει να αυξάνει ξανά στα σημεία πόλωσης, λόγω αυξημένης διαρροής πύλης (gate leakage).

Η μέτρηση της κλίσης υποκατωφλίου επιτυγχάνεται με εύρεση του πιο απόκρημνου σημείου της λογαριθμικής-γραμμικής καμπύλης ( $I_D$ - $V_{GS}$ ).

### 5.3.7 Αγωγιμότητα εξόδου

Σε ένα τρανζίστορ, σημαντικές διακυμάνσεις στο πλάτος του καναλιού στην περιοχή της εκροής (εξόδου) φέρουν σημαντικές συνέπειες στην αγωγιμότητα εξόδου, στην περίπτωση κατάστασης κορεσμού.

Με αυτό ως δεδομένο, η γεωμετρία του καναλιού μπορεί να ληφθεί υπόψη για έλεγχο και μέτρηση της αγωγιμότητας εξόδου.

Στα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου, και συγκεκριμένα στα OFET, για έλεγχο και επηρεασμό της αγωγιμότητας εξόδου γίνεται χρήση της μεθόδου διαμόρφωσης μήκους του καναλιού (channel length modulation ή CLM).

Η μέθοδος διαμόρφωσης του μήκους του καναλιού πραγματοποιείται με μείωση της ανεστραμμένης περιοχής του καναλιού, μέσω αύξησης της πόλωσης στην εκροή. Σαν αποτέλεσμα προκύπτει αύξηση του ρεύματος και μείωση της αντίστασης εξόδου (output resistance).

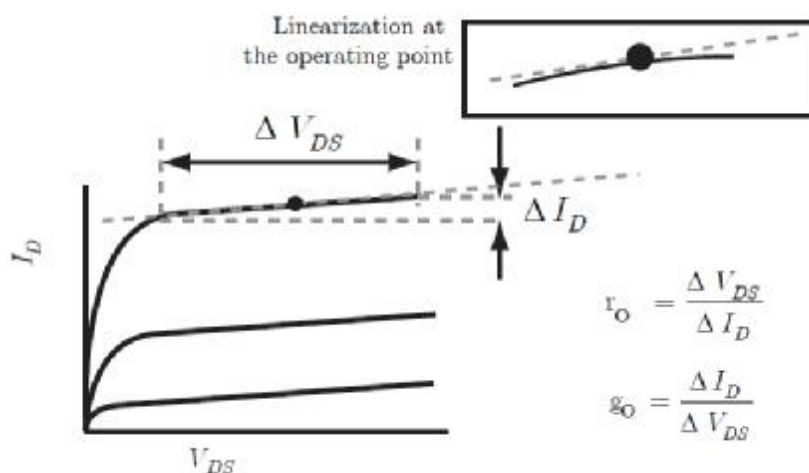
Η αγωγιμότητα εξόδου και η αντίσταση εξόδου υπολογίζονται μαθηματικά από τους τύπους:

$$g_o = \Delta I_D / \Delta V_{DS} \quad \text{και} \quad r_o = \Delta V_{DS} / \Delta I_D$$

Όπου:

$g_o$  = αγωγιμότητα εξόδου, και  $r_o$  = αντίσταση εξόδου, αντίστοιχα.

Στην εικόνα 5.8 φαίνονται η αγωγιμότητα εξόδου και αντίσταση εξόδου με σάρωση στην έξοδο (εκροή του τρανζίστορ).



**Εικόνα 5.8** Η αγωγιμότητα εξόδου και η αντίσταση εξόδου όπως παρατηρούνται με σάρωση εκροής του τρανζίστορ, καθώς και η χαρακτηριστική εξόδου. Το ένθετο δείχνει την ευθυγράμμιση (linearization) της χαρακτηριστικής εξόδου που χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί η αγωγιμότητα στο σημείο λειτουργίας [Ioannis Kymissis, OFET/Modeling and characterization].

## 5.4 Χαρακτηρισμός

Αφού πραγματοποιηθεί έλεγχος στις παραμέτρους ενός εξεταζόμενου υλικού ή συστήματος, αυτό μπορεί έπειτα να τεθεί σε χαρακτηρισμό.

Στην επιστήμη των υλικών, ως χαρακτηρισμός (characterization) θεωρείται οποιαδήποτε εξωτερική τεχνική χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση της εσωτερικής δομής και των ιδιοτήτων ενός υλικού, συσκευής ή συστήματος (π.χ. ενός OFET), και περιλαμβάνει τεχνικές δοκιμής ή ανάλυσης.

Για τον χαρακτηρισμό, υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που χρειάζονται παρατήρηση, έλεγχο και μέτρηση, με το κάθε μοντέλο να διαθέτει τον δικό του τρόπο μέτρησης των διαφόρων παραγόντων και παραμέτρων για τον εκάστοτε πειραματικό χαρακτηρισμό.

Οι σημαντικότεροι από τους παράγοντες που εξετάζουν όλα τα πρότυπα μοντέλα, και οι οποίοι χρειάζονται μέτρηση ώστε να επιτυγχάνεται ολοκληρωμένος χαρακτηρισμός σε ένα υλικό ή συσκευή, είναι η μελέτη των συναρτήσεων μεταφοράς, των χαρακτηριστικών εξόδου, της χωρητικότητας, και της διαρροής πύλης στο υλικό, σύστημα ή συσκευή που θέλουμε να χαρακτηρίσουμε.

Οι τεχνικές βάσει των οποίων πραγματοποιούνται τόσο η διερεύνηση όσο και οι μετρήσεις των παραγόντων σε ένα υλικό ή σύστημα εξαρτώνται από το πρότυπο μοντέλο που χρησιμοποιείται για τον εκάστοτε χαρακτηρισμό.

#### 5.4.1 Σάρωση πύλης και συνάρτηση μεταφοράς

Μέθοδοι σάρωσης σε μια ηλεκτρονική διάταξη επιτυγχάνονται με χρήση γεννήτριας ή ταλαντωτή σάρωσης (sweep generator ή sweep oscillator, αντίστοιχα).

Ο σαρωτής αυτός αποτελεί μέρος των διαφόρων μορφών εξοπλισμού ηλεκτρονικών δοκιμών, παράγοντας ηλεκτρικές κυματομορφές γραμμικής μεταβαλλόμενης συχνότητας με σταθερό πλάτος.

Οι σαρωτές χρησιμοποιούνται συνήθως για έλεγχο της απόκρισης συχνοτήτων στα ηλεκτρονικά κυκλώματα (π.χ. ηλεκτρονικά φίλτρα).

Η παρατήρηση των αποτελεσμάτων χρήσης συσκευών σάρωσης επιτυγχάνεται είτε μέσω ενός παλμογράφου (electromagnetic oscillograph) είτε μέσω ενός παλμοσκοπίου (cathode-ray oscilloscope), ανάλογα με το είδος της μέτρησης.

Για να παρατηρηθεί η συμπεριφορά ενός τρανζίστορ και να αξιολογηθεί η συνάρτηση μεταφοράς του, αρχικά γίνονται οι απαραίτητες διεργασίες ώστε η τιμή της  $V_{DS}$  να περιορίζεται σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών, και μέσω της μεθόδου σάρωσης γίνεται έλεγχος στην τάση της πύλης  $V_{GS}$  (gate sweeping method).

Μια τουλάχιστον από τις τιμές της  $V_{DS}$  θα πρέπει να επιλέγεται για δοκιμή του τρανζίστορ στην γραμμική περιοχή (χαρακτηριστική καμπύλη  $I_D-V_{GS}$ ), και τουλάχιστον άλλη μια δοκιμή στην περιοχή κορεσμού (χαρακτηριστική  $\sqrt{I_D-V_{GS}}$ ).

Για τη λήψη έγκυρων μετρήσεων, η  $V_{DS}$  στην γραμμική περιοχή θα πρέπει να λαμβάνεται σε όσο το δυνατόν μικρότερες τιμές γίνεται, επειδή μόνο σε περιοχή με χαμηλές τιμές το ηλεκτρικό πεδίο και η πυκνότητα φορέων στο κανάλι είναι ομοιόμορφη.

Αν το συνολικό φορτίο είναι γνωστό (από διαδικασίες μετρήσεων), η κινητικότητα των φορέων φορτίου μπορεί να προσδιοριστεί με μεταβολή της  $V_{DS}$ .

Με την μέθοδο της γραμμικής παρέκτασης (linear extrapolation) των παραπάνω καμπυλών (τρόπος επέκτασης καμπυλών για έλεγχο σε σημεία πέρα από τα όρια που παρουσιάζονται σε μια καμπύλη για μια τρέχουσα μέτρηση), μπορεί να προσδιοριστεί και η τάση κατωφλίου.

#### **5.4.2 Σάρωση εκροής και χαρακτηριστική εξόδου**

Γενικά ως χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης ή καμπύλη I-V (current-voltage characteristic ή I-V curve), ορίζεται η σχέση μεταξύ του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει ένα υλικό, κύκλωμα ή συσκευή και της αντίστοιχης τάσης (διαφορά δυναμικού) που εφαρμόζεται στα άκρα του, και παρουσιάζεται με τη μορφή γραφικής παράστασης (από τη γραφική αυτή παράσταση προσδιορίζεται και η αγωγιμότητα εξόδου).

Με χρήση σαρωτή, για ένα πεπερασμένο αριθμό τιμών της  $V_{GS}$ , σε επιθυμητό εύρος τιμών της  $V_{DS}$  (προτιμάται εύρος τιμών με αρκετά μεγάλη ευκρίνεια), και μέσω της τεχνικής ανάλυσης γνωστή ως μοντελοποίηση μικρού σήματος (small-signal modeling) στην περιοχή κορεσμού, μπορούν να ληφθούν (γραφικά) τα αποτελέσματα χάραξης της χαρακτηριστικής εξόδου (καμπύλη  $I_D - V_{DS}$ ).

#### **5.4.3 Χωρητικότητα**

Στην επιστήμη των ηλεκτρονικών, χωρητικότητα (capacitance) θεωρείται η ικανότητα ενός υλικού ή μιας διάταξης να αποθηκεύει ηλεκτρικό φορτίο.

Οποιαδήποτε υλική δομή που μπορεί να φορτιστεί ηλεκτρικά παρουσιάζει χωρητικότητα.

Μέτρηση της χωρητικότητας σε ένα τρανζίστορ μπορεί να επιτευχθεί με χρήση της μεθόδου μέτρησης της χωρητικότητας συναρτήσεως της τάσης (capacitance-voltage ή CV measurement) γνωστή με τον αγγλικό τεχνικό όρο quasi-static CV.

Για να αποδίδουν σωστά οι ημι-στατικές συνθήκες (quasi-static conditions) που επικρατούν κατά την έκβαση της μεθόδου αυτής, το ρεύμα διαρροής (διαρροή πύλης) θα πρέπει να είναι μικρό σε σχέση με το ρεύμα που λαμβάνεται υπόψη στις μετρήσεις, ώστε να μην υπάρχουν ανακρίβειες.

#### **5.4.4 Διαρροή πύλης**

Αφού εκτελεστούν τα παραπάνω και παρθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα, γίνεται έλεγχος για τυχόν διαρροή στο σύστημα (διαρροή πύλης).

Η διαρροή πύλης (gate leakage) μπορεί να μετρηθεί με σάρωση στην πύλη (gate sweeping) και θέτοντας  $V_{DS} = 0V$ .

Από εκεί και έπειτα, το ρεύμα διαρροής ή ρεύμα πύλης  $I_G$  μπορεί να χαραχθεί ως συνάρτηση της τάσης στην πύλη.

## **5.5 Συμπεράσματα**

Για την κατανόηση της συμπεριφοράς και λειτουργίας των OFET, ώστε αυτά να λειτουργούν πιο αποδοτικά και με λιγότερο κόστος παραγωγής και χρήσης, είτε ως αυτόνομες συσκευές είτε ως μέρη ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, απαιτούνται σε αυτά τεχνικές χαρακτηρισμού, δηλαδή διερεύνηση και μελέτη των ηλεκτρικών τους ιδιοτήτων καθώς και των παραμέτρων που τα εκπροσωπούν και οι οποίες επιτυγχάνονται μέσω της μοντελοποίησης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – Εφαρμογές των OFET

### 6.1 Εισαγωγή

Παρόλο που η μελέτη, ο σχεδιασμός και η κατασκευή των OFET έχουν ξεκινήσει εδώ και πολλές δεκαετίες, ευρεία παραγωγή και χρήση των τρανζίστορ αυτών σε μεγάλη κλίμακα με σκοπό την ενσωμάτωσή τους στην καθημερινότητα δεν έχει πραγματοποιηθεί ακόμη.

Όπως έγινε αναφορά στα προηγούμενα κεφάλαια, στροφή του ενδιαφέροντος σε οργανικές ηλεκτρονικές συσκευές έγινε όχι μόνο λόγω της μείωσης του γενικού κόστους παραγωγής και χρήσης αυτών, αλλά και επειδή τόσο η λειτουργικότητα, η απόδοση και η ανθεκτικότητα ως προς τους διάφορους εξωτερικούς παράγοντες, όσο και η εύκολη ενσωμάτωσή τους σε άλλες συσκευές είναι σε μεγαλύτερη κλίμακα από ότι εκείνη των παραδοσιακών ανόργανων συσκευών.

Με την έρευνα περί οργανικών ηλεκτρονικών, και συγκεκριμένα περί OFET, να βρίσκεται σε συνεχή πρόοδο, συνεχώς αναπτύσσονται όλο και περισσότερες εφαρμογές που έχουν ως σκοπό την αξιοποίηση των μοναδικών τους ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών.

Λόγω αρκετά μεγάλης ποικιλίας εφαρμογών των οποίων ο σχεδιασμός και η κατασκευή προϋποθέτει την ύπαρξη OFET, στο παρόν κεφάλαιο αναφέρονται μερικές μόνο από τις σημαντικότερες εφαρμογές που περιλαμβάνουν οργανικά τρανζίστορ επίδρασης πεδίου.

### 6.2 Λειτουργία των OFET ως αυτόνομες συσκευές

Δεδομένου ότι τα OFET λειτουργούν, όπως ακριβώς και οι αντίστοιχες ανόργανες διατάξεις τους, για ενίσχυση ή και διακοπή ηλεκτρονικών σημάτων και ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω των λειτουργιών αυτών μπορούν να χαρακτηριστούν και ως αυτόνομες συσκευές (standalone devices).

#### 6.2.1 OFET εκπομπής φωτός

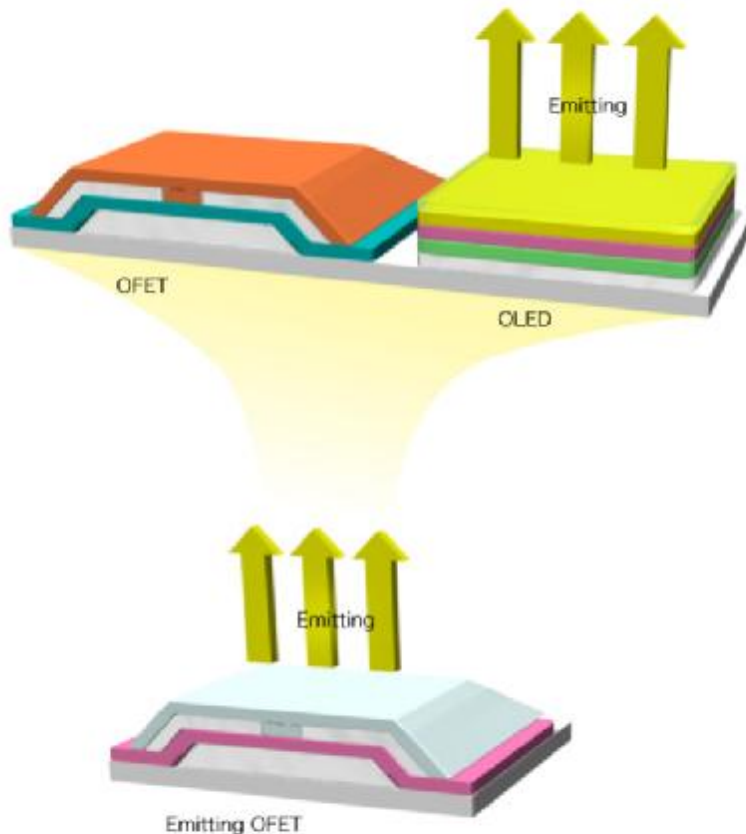
Μια από τις εφαρμογές των τελευταίων δέκα χρόνων, όσον αφορά τα οργανικά τρανζίστορ επίδρασης πεδίου, είναι η λειτουργία και χρήση τους ως (αυτόνομες) συσκευές εκπομπής φωτός (light-emitting devices).

Ένα OFET μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συσκευή εκπομπής φωτός (light-emitting OFET ή LE-OFET, επίσης γνωστό και ως organic light-emitting transistor ή OLET) με χρήση του ρεύματος που ρέει στο OFET, κατά τη λειτουργία του, για παραγωγή και εκπομπή φωτός.

Ένα OLET διαθέτει χρυσές επαφές (ηλεκτρόδιο πηγής και ηλεκτρόδιο εκροής), οι οποίες βρίσκονται επάνω σε ένα υπόστρωμα Si/SiO<sub>2</sub>.

Το αγώγιμο στρώμα (κανάλι) του OLET σχηματίζεται με εναπόθεση πολυκρυσταλλικού τετρακενίου λεπτής μεμβράνης (polycrystalline tetracene thin film) στο υπόστρωμα, μέσω της τεχνικής εξάχνωσης κενού (vacuum sublimation).

Όταν φορείς φορτίου διοχετεύονται μέσω των επαφών πηγής-εκροής στο κανάλι, το τετρακενίο εκπέμπει φως (φαινόμενο ηλεκτροφωταύγειας).



**Εικόνα 6.1** Σε ένα OLET, οι φορείς (ηλεκτρόνια και οπές) ανασυνδυάζονται για να δημιουργήσουν μοριακά εξιτόνια (excitons) και φως τη μέση του καναλιού του OFET [[http://www.cstf.kyushu-u.ac.jp/~adachilab/lab/?page\\_id=3898](http://www.cstf.kyushu-u.ac.jp/~adachilab/lab/?page_id=3898) και [http://www.cstf.kyushu-u.ac.jp/~adachilab/lab/wp-content/uploads/2012/09/ofetoled\\_e.jpg](http://www.cstf.kyushu-u.ac.jp/~adachilab/lab/wp-content/uploads/2012/09/ofetoled_e.jpg)].

### 6.3 Εφαρμογές των OFET ως συστατικά άλλων συσκευών

Εκτός της χρήσης τους ως αυτόνομες εφαρμογές, τα OFET μπορούν να ενσωματωθούν και σε άλλες συσκευές, παρουσιάζοντας πολλά οφέλη σε αντίθεση με τα παραδοσιακά FET, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα την απαραίτητη πλέον χρήση τους ως συστατικά μέρη διαφόρων συσκευών.

Λόγω της φυσικής πρακτικής τους ευελιξίας και της ικανότητας να καλύπτουν μεγάλες επιφάνειες, τα OFET θεωρούνται αρκετά κατάλληλα για χρήση σε πολλά μηχανικά και

ηλεκτρονικά συστήματα, τόσο για ενεργοποίηση μιας λειτουργίας όσο και για ενίσχυση μιας ήδη υπάρχουσας.

### 6.3.1 Συσκευές οπτικής απεικόνισης

Μιας και οι οργανικοί ημιαγωγοί, όπως είναι τα OFET, είναι σε θέση να κατασκευαστούν σε πλαστικά, με χαμηλή θερμοκρασία, μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ευέλικτων οθονών (flexible displays).

Οι συσκευές οπτικής απεικόνισης (visual displays) ή οθόνες (displays), ή ηλεκτρονικές οθόνες οπτικής απεικόνισης (electronic visual displays) όπως ονομάζονται στον τομέα των ηλεκτρονικών, είναι συσκευές εξόδου που χρησιμοποιούνται για την οπτική παρουσίαση πληροφοριών και εικόνων, σε ένα καθορισμένο χώρο ή επιφάνεια.

Οι τέσσερις παρακάτω εικόνες παρουσιάζουν τέτοιες ηλεκτρονικές οθόνες.



**Εικόνα 6.2** Παρουσίαση ηλεκτρονικής οθόνης ενσωματωμένης σε ηλεκτρονικό σύστημα που περιέχει, ξεκινώντας από πάνω προς τα κάτω, σωλήνες Nixie, οθόνη LED και οθόνη VFD [[http://en.wikipedia.org/wiki/Display\\_technology](http://en.wikipedia.org/wiki/Display_technology)].

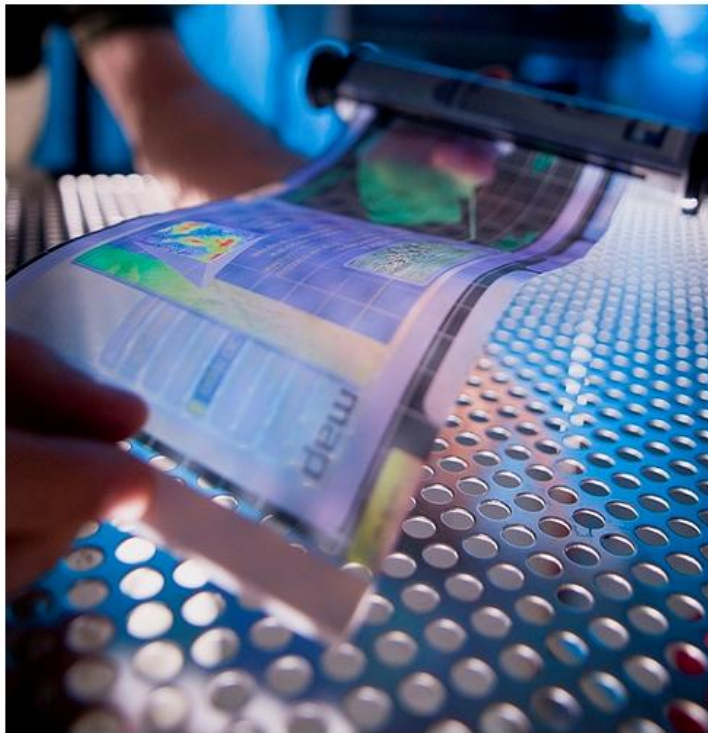


**Εικόνα 6.3** Οθόνη από ψηφιακό ρολόι που εμφανίζει την αλλαγή των αριθμών [[http://en.wikipedia.org/wiki/Display\\_technology](http://en.wikipedia.org/wiki/Display_technology)].





**Εικόνα 6.4** Ψηφιακή οθόνη μιας αριθμομηχανής (electronic calculator) [[http://en.wikipedia.org/wiki/Display\\_technology](http://en.wikipedia.org/wiki/Display_technology)].



**Εικόνα 6.5** Μια ευέλικτη οθόνη [<http://www.oled-display.net/hp-and-arizona-state-university-demo-flexible-displays/>].

Υπάρχουν πάρα πολλές ηλεκτρονικές συσκευές οπτικής απεικόνισης (segment displays, full-area 2-dimensional displays, 3-dimensional displays, flat panel displays κ.τ.λ.), με τις σημαντικότερες να αναφέρονται στις υποενότητες που ακολουθούν.

### **6.3.1.1 Οθόνες υγρών κρυστάλλων**

Οι υγροί κρύσταλλοι (liquid crystals ή LCs) είναι μοριακές δομές με κατάσταση ύλης άρα και ιδιότητες μεταξύ υγρών και στερεών.

Οι εφαρμογές των υγρών κρυστάλλων στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών έφεραν αρκετά σημαντικά θετικά αποτελέσματα κατά τη διάρκεια των τελευταίων χρόνων, με την ευρεία χρήση τους να συναντάται στις πασίγνωστες πλέον οθόνες υγρών κρυστάλλων (liquid crystal displays ή LCDs), οι οποίες στηρίζονται στις οπτικές ιδιότητες ορισμένων υγρών κρυσταλλικών ουσιών σε παρουσία ή απουσία ηλεκτρικού πεδίου.

Οι LCD οθόνες διακρίνονται σε παθητικής-μήτρας και ενεργητικής-μήτρας (passive-matrix και active matrix, αντίστοιχα).

Η διευθυνσιοδότηση παθητικής μήτρας (passive-matrix addressing) είναι ένα σύστημα διευθυνσιοδότησης όπου δεν απαιτούνται παρά μόνο συγκεκριμένα σήματα ελέγχου ( $m + n$ ) για διευθυνσιοδότηση μιας οθόνης. Σε μια passive-matrix, ένα pixel πρέπει να διατηρεί την τρέχουσα κατάστασή του χωρίς την ύπαρξη ενεργού κυκλώματος οδήγησης (active driving circuit), μέχρι τη στιγμή που θα ανανεωθεί η κατάστασή του μέσω κάποιου (εξωτερικού) μηχανισμού.

Η διευθυνσιοδότηση ενεργητικής μήτρας (active-matrix addressing) είναι ένα σύστημα διευθυνσιοδότησης που χρησιμοποιείται σε επίπεδες οθόνες (flat panel displays). Σε αυτή τη μέθοδο μεταγωγής επιμέρους στοιχείων (pixel) μιας επίπεδης οθόνης, κάθε pixel είναι συνδεδεμένο με ένα τρανζίστορ και ένα πυκνωτή για να διατηρείται ενεργή η κατάσταση των pixel, σε αντίθεση με την passive-matrix τεχνολογία όπου κάθε εικονοστοιχείο (pixel) πρέπει να διατηρεί την κατάστασή του παθητικά, χωρίς να ελέγχεται και να οδηγείται από το κύκλωμα.

Μια τυπική ηλεκτρονική συσκευή που περιέχει υγροκρυσταλλική οθόνη (LCD), λειτουργεί ως εξής.

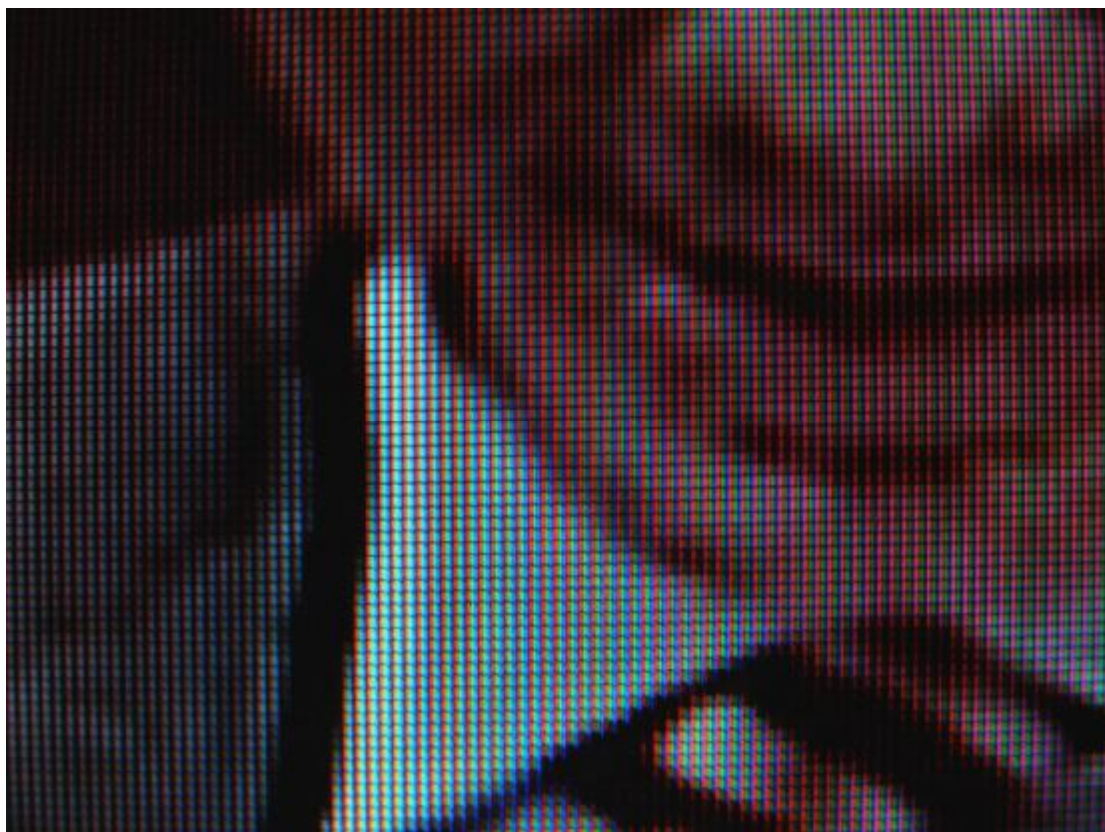
Ένα λεπτό στρώμα υγρών κρυστάλλων (πάχους 10 $\mu\text{m}$  συνήθως) τοποθετείται μεταξύ δύο πολωτών (polarizers) που διασταυρώνονται μεταξύ τους με προσανατολισμό 90 $^\circ$  (μοίρες) ο ένας προς τον άλλο. Οι υγροί κρύσταλλοι ευθυγραμμίζονται με τρόπο τέτοιο ώστε στην αδρανή τους κατάσταση (relaxed state ή relaxed phase) να περιπλέκονται σε σχηματισμό τέτοιο ώστε να επαναπροσανατολίζουν το φως που περνάει μέσα από τον πρώτο πολωτή, επιτρέποντας έτσι την μεταφορά του μέσα από τον δεύτερο πολωτή. Με την τοποθέτηση ενός ανακλαστήρα (reflector), το φως που περνάει μέσα από τον δεύτερο πολωτή ανακλάται κατευθυνόμενο προς την μπροστινή μεριά του στρώματος των υγρών κρυστάλλων (μπροστινό μέρος οθόνης), δημιουργώντας έτσι εικόνες. Με τον τρόπο αυτό το υγρό κρυσταλλικό στρώμα (οθόνη) παρουσιάζεται διαφανής.

Με εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου στο υγροκρυσταλλικό στρώμα, οι μοριακοί άξονες τείνουν να ευθυγραμμίζονται παράλληλα με το ηλεκτρικό πεδίο, αναιρώντας σταδιακά αυτήν τους την περίπλεξη στο κέντρο του στρώματος. Στην κατάσταση αυτή, τα υγρά κρυσταλλικά μόρια δεν μπορούν να επαναπροσανατολίσουν το φως, με αποτέλεσμα το φως που περνάει μέσα από τον πρώτο πολωτή απορροφάται από τον δεύτερο. Έτσι, με την αύξηση της τάσης, το υγροκρυσταλλικό στρώμα (οθόνη) χάνει τη διαφάνειά της. Με μεταβολή δηλαδή της τάσης, τα pixel που θα εμφανίζονται στην οθόνη μπορούν να μετατρέπονται σε διαφανή ή αδιαφανή.

Οι έγχρωμες LCD οθόνες λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο, προσθέτοντας όμως φίλτρα χρώματος που μπορούν να παράγουν μπλε, κόκκινα και πράσινα pixel, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.6, και στην αντίστοιχη της σε μεγέθυνση εικόνα 6.7.

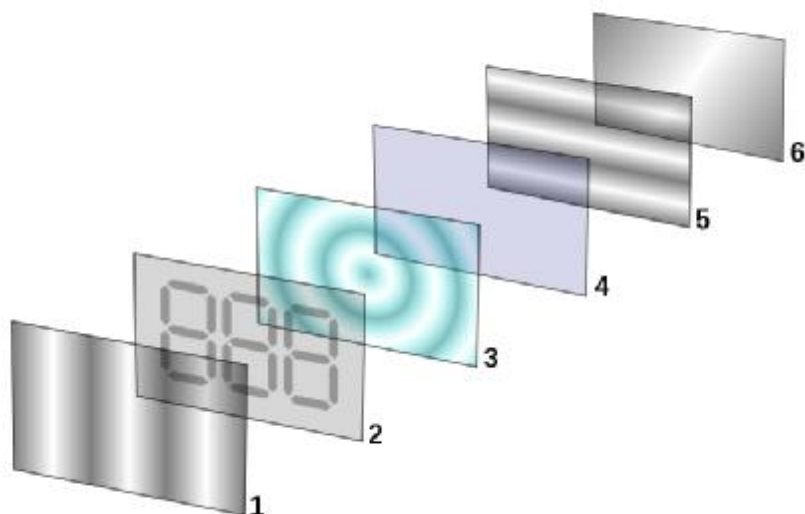


**Εικόνα 6.6** Κοντινό πλάνο φωτογραφίας μιας LCD οθόνης τηλεόρασης, στην οποία διακρίνονται μπλε, κόκκινα και πράσινα pixel. Η εικόνα απεικονίζει έναν άνδρα με κοστούμι και γραβάτα [[http://en.wikipedia.org/wiki/Liquid\\_crystal\\_display#Quality\\_control](http://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_crystal_display#Quality_control)].



**Εικόνα 6.7** Μία μεγέθυνση της εικόνας 6.6 [[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bc/LCD\\_close\\_up.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bc/LCD_close_up.jpg)].

Τα στρώματα μιας τυπικής LCD φαίνονται στην εικόνα 6.8.



**Εικόνα 6.8** Δομή μιας οθόνης υγρών κρυστάλλων: 1 – Κάθετο φίλτρο πόλωσης, 2 – γυαλί με ηλεκτρόδια, 3 – υγροί κρύσταλλοι, 4 – γυαλί με ηλεκτρόδια, 5 – οριζόντιο φίλτρο πόλωσης, 6 – ανακλαστήρας [[http://en.wikipedia.org/wiki/Liquid\\_crystal#Applications\\_of\\_liquid\\_crystals](http://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_crystal#Applications_of_liquid_crystals)].

Οι οθόνες υγρών κρυστάλλων βρίσκουν εφαρμογές σε πολλές κατηγορίες ηλεκτρονικών κατασκευών, αλλά και υποκατηγορίες αυτών. Πιο συχνά (καθημερινά πλέον) συναντώνται σε οθόνες ηλεκτρονικών υπολογιστών (computer monitor screens), τηλεοπτικών δεκτών (television screens), συσκευών κινητής τηλεφωνίας (mobile device screens), και αφής (touch screens).

Άλλες, εξίσου χρήσιμες εφαρμογές περιλαμβάνουν κατασκευές συσκευών με διασπορά υγρών κρυστάλλων σε πολυμερή (polymer dispersed liquid crystal devices ή PDLCs).



**Εικόνα 6.9** Ένα κινητό τηλέφωνο με οθόνη LCD. Το μοντέλο κινητού τηλεφώνου Samsung Galaxy S3 III GT-i9300 διαθέτει λευκή πλήρης οθόνη LCD που είναι και οθόνη αφής [<http://www.amazon.com/Samsung-Galaxy-SIII-GT-i9300-Replacement/dp/B009OZWORM>, [http://www.amazon.com/gp/product/images/B009OZWORM/ref=dp\\_image\\_z\\_0?ie=UTF8&n=2335752011&s=wireless](http://www.amazon.com/gp/product/images/B009OZWORM/ref=dp_image_z_0?ie=UTF8&n=2335752011&s=wireless)].





**Εικόνα 6.10** Μια οθόνη αφής. Η έγχρωμη LCD οθόνη αφής μοντέλου Eizo FlexScan L362T προσφέρει την ικανότητα αφής δύο δαχτύλων (two finger touch panel) που συνδυάζει εξαιρετική ποιότητα εικόνας με κομψό σχεδιασμό, παρουσιάζοντας λεπτές προσόψεις στην κορυφή και στα πλάγια ώστε να εξοικονομείται χώρος στο γραφείο ή στον πάγκο [[http://www.ampronix.com/content/web/lcd\\_touch\\_screen\\_displays\\_overview.asp](http://www.ampronix.com/content/web/lcd_touch_screen_displays_overview.asp), [http://www.ampronix.com/hub/images/Eizo-Flexscan-L362T\\_big.jpg](http://www.ampronix.com/hub/images/Eizo-Flexscan-L362T_big.jpg)].

### 6.3.1.2 Ηλεκτρονικό χαρτί

Το ηλεκτρονικό χαρτί (electronic paper ή e-paper) είναι μια συσκευή απεικόνισης που χρησιμοποιεί ηλεκτρονικό μελάνι (electronic ink) με τον ίδιο τρόπο που το απλό παραδοσιακό μελάνι χρησιμοποιείται πάνω σε ένα απλό φύλλο χαρτιού.

Το ηλεκτρονικό χαρτί μιμείται σχεδόν πλήρως σε εμφάνιση το παραδοσιακό χαρτί αφού αντανακλά το φως όπως ακριβώς θα γινόταν και με ένα απλό χαρτί, χωρίς να δημιουργεί πρόβλημα κατά τη διάρκεια της ανάγνωσης, ακόμη και σε άμεση επαφή με το ηλιακό φως, πρόβλημα που παρατηρείται στις περιπτώσεις των συμβατικών οθονών (flat displays, flat panels, LCDs κ.τ.λ.) οι οποίες εκπέμπουν φως, αλληλεπιδρώντας έτσι με το φως του περιβάλλοντος και καθιστώντας δυσανάγνωστη την οθόνη. Επιπλέον, δίνει διαφορετική και καλύτερη δυνατότητα ανάγνωσης σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη συμβατική οθόνη, λόγω της ιδιαίτερα εύκαμπτης και ευρείας επιφάνειάς του. Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα των ηλεκτρονικών χαρτιών είναι το ελάχιστο βάρος τους και η χαμηλή ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την λειτουργία τους.

Πρακτικά, ένα ηλεκτρονικό χαρτί μπορεί να αντιμετωπισθεί ακριβώς όπως ένα παραδοσιακό.



**Εικόνα 6.11** Επίδειξη ενός e-paper [<http://www.brightsideofnews.com/2009/08/26/report-e-paper-market-is-just-too-big-to-miss-out/>].

Ένα πολύ μεγάλο πλεονέκτημα των ηλεκτρονικών τεχνολογιών χαρτιού είναι η ικανότητά τους να μπορούν να απεικονίζουν ένα στατικό κείμενο ή και εικόνα επ' αόριστον δίχως την ανάγκη ύπαρξης ηλεκτρικής ενέργειας.

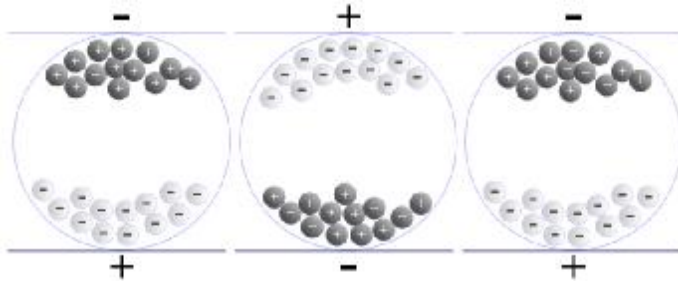
Το ηλεκτρονικό σύστημα (electronic system, circuit, board ή αλλιώς backplane) ενός ηλεκτρονικού χαρτιού αποτελείται από πλαστικά υποστρώματα και πλαστικά (οργανικά) ηλεκτρονικά.

Οι ηλεκτρονικές οθόνες διαφέρουν εν μέρει ανάλογα με τον τρόπο τον οποίο σχεδιάζονται και κατασκευάζονται.

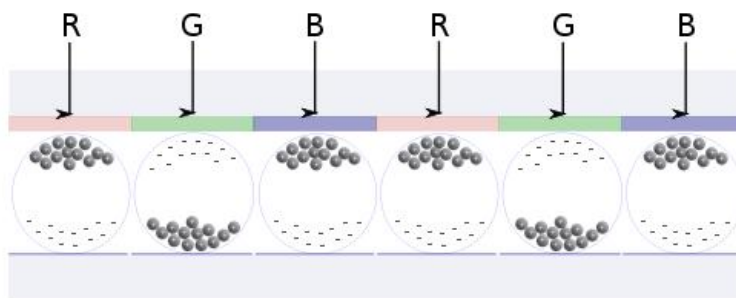
Μερικές από τις σημαντικότερες τεχνολογίες οπτικής απεικόνισης αναφέρονται ακολούθως.

## Ηλεκτροφορητική οθόνη

Οι ηλεκτροφορητικές οθόνες (electrophoretic displays) σχηματίζουν εικόνες, και γενικά οπτικές πληροφορίες με αναδιάταξη των φορτισμένων χρωστικών σωματιδίων (charged pigment particles) που διαθέτουν, μέσω ενός ηλεκτρικού πεδίου.



**Εικόνα 6.12** Βασικό σχήμα μιας ηλεκτροφορητικής οθόνης [[http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic\\_paper#Electrophoretic\\_display](http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_paper#Electrophoretic_display)].



**Εικόνα 6.13** Βασικό σχήμα μιας ηλεκτροφορητικής οθόνης με χρήση έγχρωμων φίλτρων [[http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic\\_paper#Electrophoretic\\_display](http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_paper#Electrophoretic_display)].

Η απλούστερη κατασκευή μιας ηλεκτροφορητικής οθόνης πραγματοποιείται βάσει των εξής βημάτων.

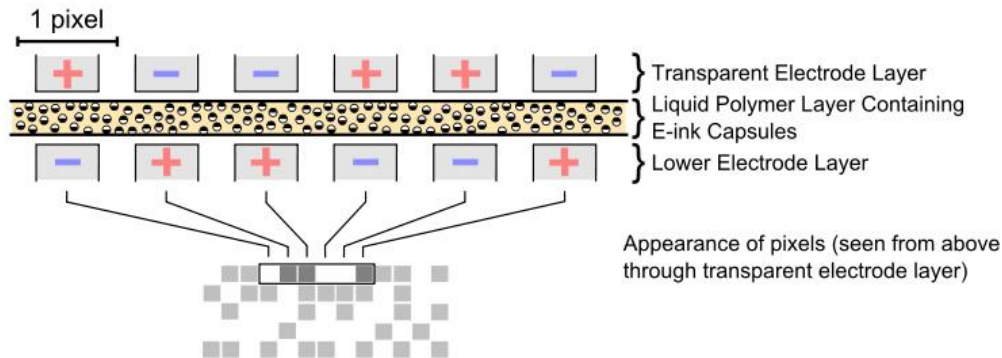
Εκατομμύρια μικροσκοπικά (περίπου ένα μικρόμετρο το καθένα σε διάμετρο) σωματίδια διοξειδίου του τιτανίου (τιτάνια ή  $TiO_2$ ) τοποθετούνται σε ένα διάλυμα φορέων υδρογονανθράκων (hydrocarbon oil) και ηλεκτρονικής μαύρης μελάνης, μαζί με επιφανειοδραστικές ουσίες (surfactants) και παράγοντες που προκαλούν φόρτιση (charging agents), ώστε να αποκτήσουν ηλεκτρικό φορτίο. Έπειτα, το μίγμα αυτό τοποθετείται σε ένα περιβάλλον μεταξύ δύο παράλληλων αγωγικών πλακών, και έτσι σχηματίζεται η ηλεκτροφορητική οθόνη. Οι πλάκες πρέπει να είναι περίπου 10 έως 100 μικρόμετρα η μια από την άλλη. Εφαρμόζοντας τάση μεταξύ των πλακών επηρεάζεται το ηλεκτρικό φορτίο σε διάφορα συγκεκριμένα σημεία στην οθόνη, με αποτέλεσμα τα σωματίδια είτε να μεταναστεύουν προς την επιφάνεια της οθόνης ή να αναπαύονται κοντά στο πίσω μέρος.

Όταν τα σωματίδια μετακινούνται στο μπροστινό μέρος (επιφάνεια της οθόνης), η οθόνη παρουσιάζεται λευκή (φως διασκορπίζεται από την επιφάνεια προς τον παρατηρητή). Όταν τα



σωματίδια μετακινούνται στην πίσω πλευρά ης οθόνης, η οθόνη εμφανίζεται μαύρη (το φως απορροφάται από το μελάνι).

Αν το ηλεκτρόδιο που βρίσκεται στο πίσω μέρος της οθόνης (lower electrode layer όπως εμφανίζεται στην εικόνα 6.14) χωρίζεται σε έναν αριθμό μικρών στοιχείων εικόνας (pixels), τότε με εφαρμογή κατάλληλης τάσης σε κάθε περιοχή της οθόνης με τρόπο τέτοιο ώστε να δημιουργηθεί μια διαμόρφωση περιοχών ανάκλασης και απορρόφησης, μπορούν να σχηματισθούν εικόνες στην οθόνη.



Εικόνα 6.14 Εμφάνιση των pixel [[http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic\\_paper#Electrophoretic](http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_paper#Electrophoretic)].

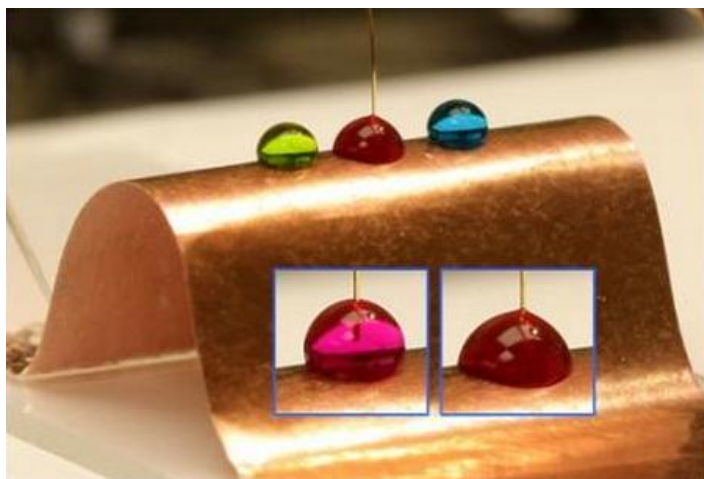
## Ηλεκτρο-ύγρανση

Μέσω της ηλεκτρο-ύγρανσης ή ηλεκτρο-διαβροχής (electro-wetting ή electrowetting) επιτυγχάνεται τροποποίηση των ιδιοτήτων μιας υδροφοβικής επιφάνειας ή υλικού χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρικό πεδίο.

Με την τροποποίηση αυτή, έγχρωμο ή μη μελάνι μπορεί να τοποθετηθεί και να μετακινηθεί επάνω στην επιθυμητή επιφάνεια με αποτέλεσμα τον σχηματισμό μιας ανακλαστικής οθόνης.

Υδροφοβικά ή υδρόφοβα (hydrophobic) χαρακτηρίζονται τα υλικά ή οι επιφάνειες που διαθέτουν εκ του φυσικού τους την ιδιότητα να απωθούν το νερό.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της οθόνης με ηλεκτρο-ύγρανση (εικόνα 6.15), εκτός της καλύτερης ποιότητας ανάγνωσης που παρέχουν όλα τα είδη των e-paper σε σχέση με τις συμβατικές οθόνες, είναι η δυνατότητα δημιουργίας ηλεκτρονικών χαρτιών με συνδυασμό κανονικού, απλού χαρτιού και ηλεκτρονικής μελάνης, χωρίς την αναγκαιότητα ενσωμάτωσης γυαλιού ή κυκλώματος στο δημιούργημα αυτό.



**Εικόνα 6.15** Πραγματικό χαρτί δέχεται επεξεργασία μέσω της τεχνικής ηλεκτρο-ύγρυνσης [<http://www.engadget.com/2010/11/24/new-electrowetting-technique-could-do-e-paper-on-real-paper-1ea/>].

Όλες οι εφαρμογές ηλεκτρονικού χαρτιού και μελάνης χρησιμοποιούν τεχνικές ενθυλάκωσης (encapsulation techniques), μελάνη ή κάποιο είδος δραστικού υλικού για ενθυλάκωση, και ηλεκτρονικά μέσα για ενεργοποίηση της ηλεκτρονικής μελάνης.

Για εύκαμπτες οθόνες, η βάση απαιτείται να είναι λεπτή, εύκαμπτη και αρκετά ανθεκτική ώστε να αντέχει σημαντικές φθορές.

Το ηλεκτρονικό μελάνι μπορεί να εφαρμοστεί πρακτικά σε οποιαδήποτε επιφάνεια (τοίχοι, αφίσες, διαφημιστικές ετικέτες, ρούχα), είτε αυτή είναι εύκαμπτη είτε όχι.

Υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις για τον τρόπο κατασκευής ενός ηλεκτρονικού χαρτιού και τον τρόπο εναπόθεσης ηλεκτρονικής μελάνης επάνω του, μα τελικά, το πώς θα επεξεργαστεί και θα κατασκευαστεί τόσο το ηλεκτρονικό χαρτί όσο και η ηλεκτρονική μελάνη εξαρτάται από την κρίση κάθε κατασκευαστή.

Εφαρμογές ηλεκτρονικού χαρτιού και μελάνης παρατηρούνται στα ηλεκτρονικά ρολόγια χειρός (wristwatches), σε ηλεκτρονικά βιβλία (e-books), εφημερίδες (newspapers), οθόνες ενσωματωμένες σε έξυπνες κάρτες (displays embedded in smart cards), οθόνες κατάστασης (status displays), κινητά τηλέφωνα (mobile phones) και ηλεκτρονικές ετικέτες ραφιών (electronic shelf labels).

Άλλες, όχι τόσο συνηθισμένες εφαρμογές περιλαμβάνουν ρούχα (clothes), ψηφιακές κορνίζες φωτογραφιών (digital photo frames), πληροφοριακές πινακίδες (information boards) και πληκτρολόγια (keyboards).



**Εικόνα 6.16** Οθόνη κατάστασης σε μνήμη USB (USB flash drive). Εδώ, το μελάνι χρησιμοποιείται ως μετρητής χωρητικότητας, δηλώνοντας έτσι τη διαθέσιμη μνήμη της USB συσκευής [[http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic\\_paper#Status\\_displays](http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_paper#Status_displays)].



**Εικόνα 6.17** Κινητό τηλέφωνο Motorola F3. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί μια οθόνη ηλεκτρονικού χαρτιού αντί μιας LCD [[http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic\\_paper#Mobile\\_phones](http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_paper#Mobile_phones)].

### 6.3.2 Αισθητήρες

Οι αισθητήρες ανήκουν στην κατηγορία των συσκευών μετατροπής ενέργειας (converters).

Αισθητήρας (sensor) μπορεί να θεωρηθεί οποιαδήποτε συσκευή είναι σε θέση να ανιχνεύσει ένα φυσικό μέγεθος και, από αυτό, να παράγει μια μετρήσιμη έξοδο.

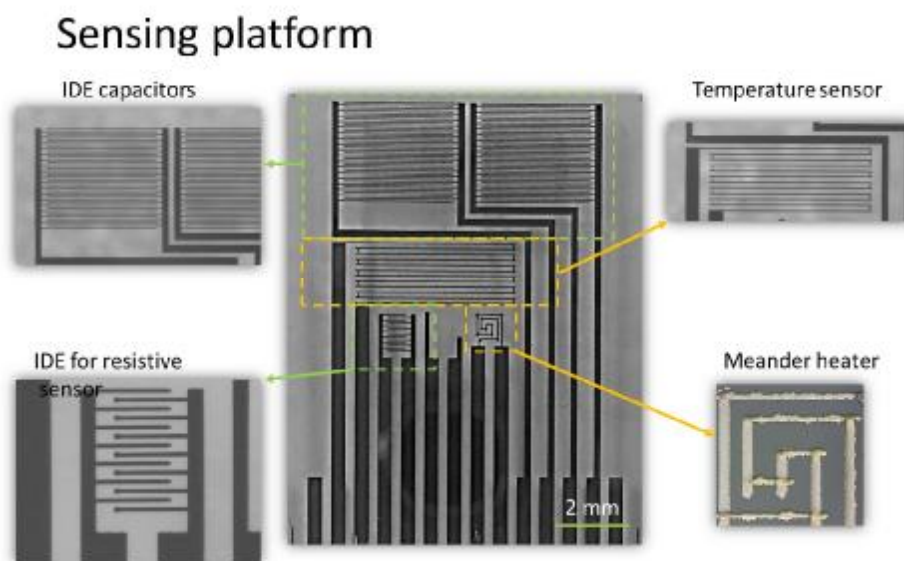
### 6.3.2.1 Αισθητήρες φωτός

Οι αισθητήρες φωτός (light sensors), αλλιώς φωτο-αισθητήρες (photo-sensors) ή φωτο-ανιχνευτές (photo-detectors), είναι αισθητήρες φωτός ή άλλης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας.

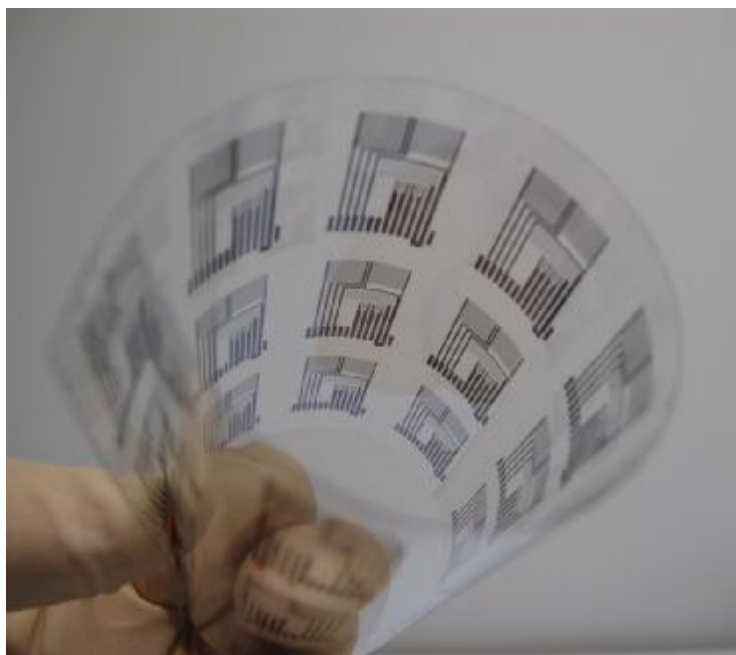
Στους αισθητήρες φωτός περιλαμβάνονται και οι αισθητήρες εικόνων (image sensors ή detectors), όπως είναι για παράδειγμα ο αισθητήρας APS (active-pixel sensor). Με ενσωμάτωση τρανζίστορ επίδρασης πεδίου στο σύστημά του, ο APS παρέχει ψηφιακή απεικόνιση ακτίνων X μεγάλης περιοχής (large-area digital X-ray imaging).

### 6.3.2.2 Αισθητήρες αερίων

Παρόμοια εφαρμογή συναντάται και στην περίπτωση των αισθητήρων αερίου (gas sensors). Στην εικόνα 6.19 παρατηρείται μια διάταξη (συστοιχία) αισθητήρων αερίου, που στην περίπτωση αυτή εναποτίθεται επάνω στην επιφάνεια ενός λεπτού φύλλου πολυμερούς μέσω μεθόδων εκτύπωσης (flexible printed gas sensor array).



Εικόνα 6.18 Πλατφόρμα αισθητήρα ανίχνευσης αερίου [<http://samlab.epfl.ch/page-15521.html>].



**Εικόνα 6.19** Ευέλικτη συστοιχία πολλαπλών αισθητήρων, κατασκευασμένη επάνω σε λεπτό φύλλο πολυμερούς [<http://sammlab.epfl.ch/page-15521.html>].

### 6.3.2.3 Αισθητήρες συστοιχίας

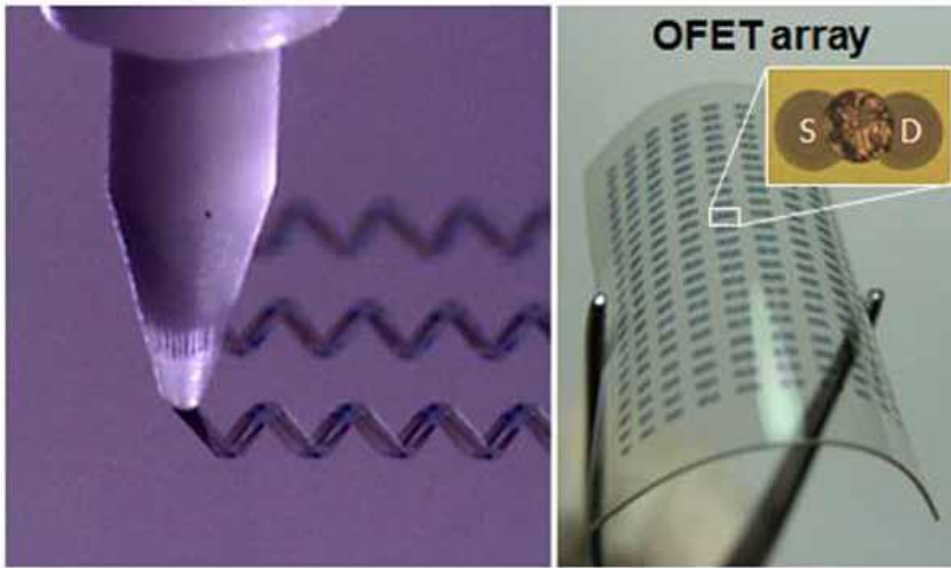
Μια συστοιχία αισθητήρων (sensor array), ή αλλιώς διάταξη αισθητήρων, δεν είναι τίποτε άλλο από μια ομάδα από αισθητήρες διαμορφωμένη σε ένα συγκεκριμένο γεωμετρικό σχήμα.

Οι αισθητήρες συστοιχίας μπορεί να απαρτίζονται από οποιαδήποτε από τις παραπάνω κατηγορίες αισθητήρων, καθώς επίσης και από άλλες κατηγορίες, σε μια συστοιχία σχηματισμένη έτσι ώστε να εκτελεί συγκεκριμένες λειτουργίες.

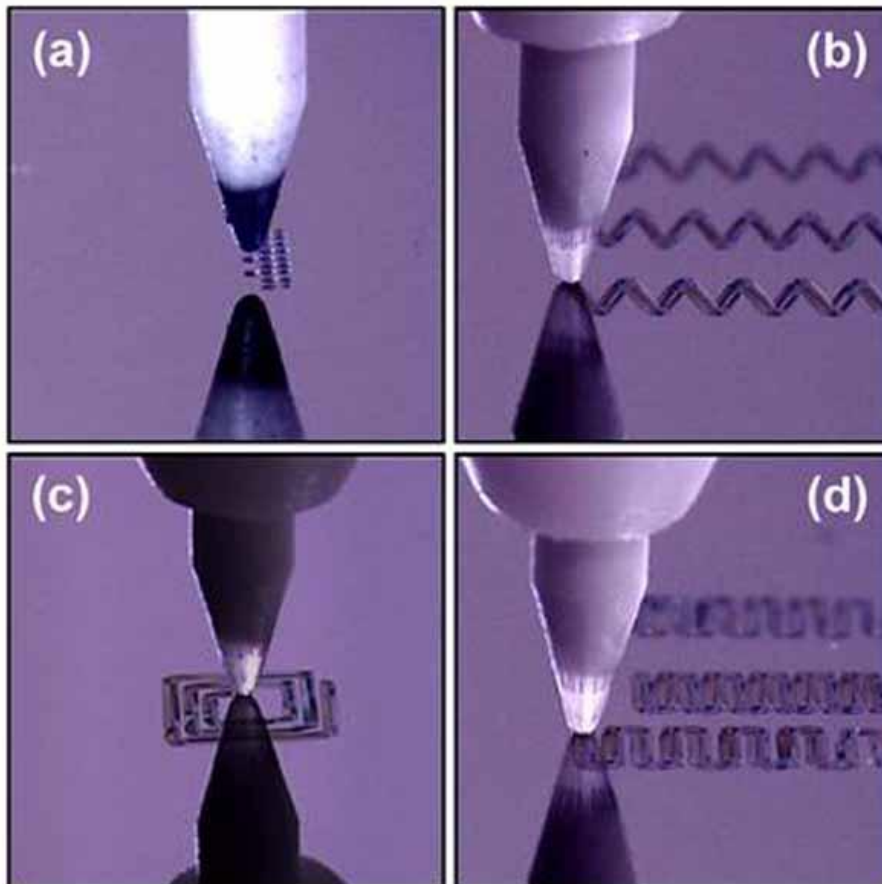
Η χρήση πολλών αισθητήρων μαζί ως συστοιχία προσφέρει πολλά περισσότερα πλεονεκτήματα σε αντίθεση με αυτά που θα προσέφερε ένας μόνο αισθητήρας, όπως για παράδειγμα βελτίωση μετατροπής της ενέργειας εισόδου σε μορφή ραδιοκυμάτων με καθορισμένη κατεύθυνση (ένα χαρακτηριστικό γνωστό με τον αγγλικό όρο antenna gain), καθώς επίσης και ελάττωση λήψης θορύβου και παρεμβολών.

Μια άλλη δυνατότητα που παρέχουν οι αισθητήρες συστοιχίας είναι ότι μπορούν να ανιχνεύουν την κατεύθυνση και απόσταση που έχουν οι προσπίπτουσες σε αυτούς πηγές σημάτων. Η τεχνολογία που πραγματοποιεί την ανίχνευση αυτή είναι γνωστή ως επεξεργασία σήματος συστοιχίας (array signal processing).

Από τους διάφορους τρόπους χρήσης των OFET σε αισθητήρες συστοιχίας, ένα παράδειγμα εφαρμογής αισθητήρων σε συστοιχία φαίνεται στις παρακάτω εικόνες 6.20, 6.21 και 6.22, όπου με χρήση ενός στυλό rollerball γεμάτο με αγωγίμο ασημένιο μελάνι επιτυγχάνεται άμεση γραφή οργανικών μετάλλων σε διάφορες κατηγορίες επιφανειών.

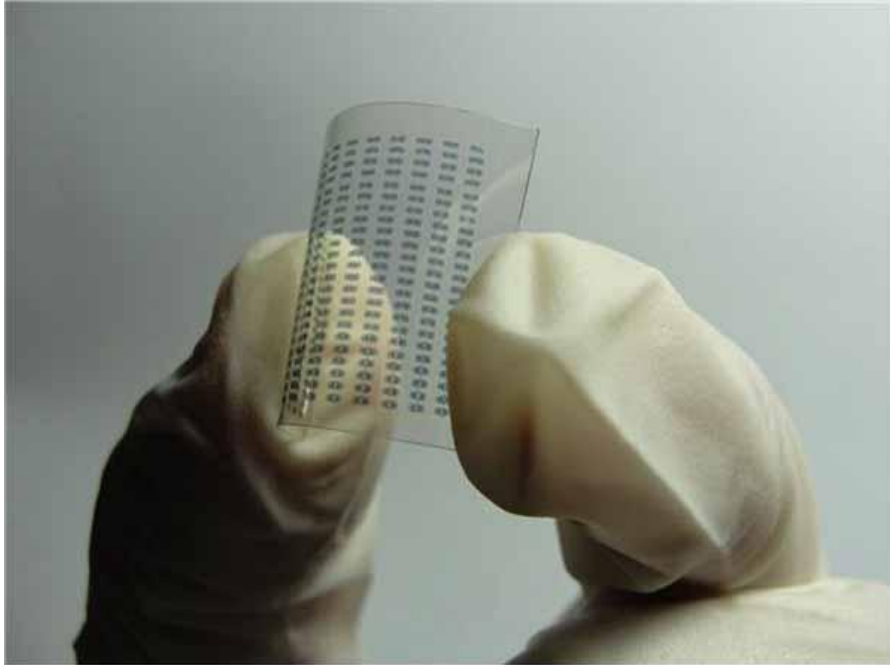


**Εικόνα 6.20** Το πρόσφατα αναπτυχθέν τριχοειδές στυλό (αριστερά) δημιουργεί πρότυπα, όπως μια συστοιχία από περίπου 300 OFET (δεξιά) [<http://www.korea.net/NewsFocus/Sci-Tech/view?articleId=112093>].





**Εικόνα 6.21** Η μέθοδος εκτύπωσης με τριχοειδή στυλό (capillary pens) μπορεί να δημιουργήσει μια ποικιλία από σχέδια συμπεριλαμβανομένων τελείες (dots), σπείρες (spirals), και ζιγκ-ζαγκ (zigzags) [<http://www.korea.net/NewsFocus/Sci-Tech/view?articleId=112093>].



**Εικόνα 6.22** Μια συστοιχία τρανζίστορ κατασκευασμένη χρησιμοποιώντας τη μέθοδο σχεδίασης με τριχοειδές στυλό (capillary pen drawing method) [<http://www.korea.net/NewsFocus/Sci-Tech/view?articleId=112093>].

Άλλα παραδείγματα εφαρμογών με αισθητήρες περιλαμβάνουν ραντάρ (radar/sonar), ασύρματες επικοινωνίες (wireless communications), σεισμολογία (seismology), παρακολούθηση της κατάστασης ενός μηχανήματος (machine condition monitoring) και διάγνωση βλαβών (fault diagnosis), εφαρμογές που συγκαταλέγονται στις περιπτώσεις επεξεργασίας σημάτων συστοιχίας.

### 6.3.3 Συστήματα RFID

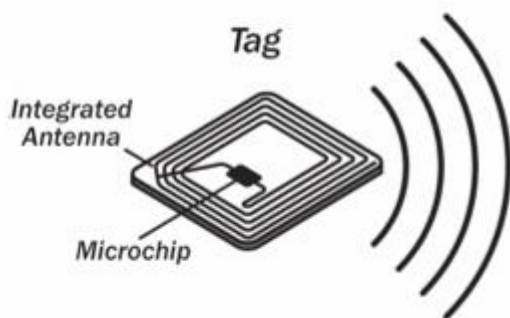
Η ταυτοποίηση μέσω ραδιοσυχνοτήτων (radio frequency identification ή RFID) είναι η χρήση, με ασύρματο τρόπο, των ραδιοσυχνοτήτων των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων για μεταφορά δεδομένων με σκοπό την αυτόματη αναγνώριση και εντοπισμό ετικετών (RFID tags) που συνδέονται με διαφόρων ειδών αντικείμενα.

Για παράδειγμα, χρήση ραδιοκυμάτων (μέσω συστημάτων RFID) γίνεται για αυτόματο προσδιορισμό ανθρώπων ή αντικειμένων.

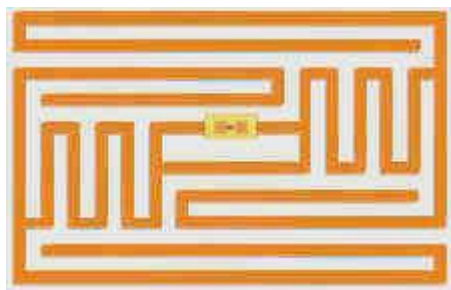
Τα συστήματα RFID απαρτίζονται από δύο κύρια μέρη, τους πομποδέκτες ή αναμεταδότες (transponders) ή αλλιώς ετικέτες (tags ή RFID tags) και τους αναγνώστες, αισθητήρες ή ανακριτές (RFID readers, sensors ή interrogators).

Οι ετικέτες RFID είναι μικροτσιπ που αποτελούνται από ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (integrated circuit ή microchip) και μια κεραία (integrated ή tag antenna), όπως φαίνεται και στις εικόνες 6.23 και 6.24. Οι αναγνώστες RFID έχουν ενσωματωμένα μια κεραία και μια μονάδα ελέγχου. Ο ρόλος των ετικετών είναι να αποθηκεύουν πληροφορίες, ενώ των αναγνωστών να ανακτούν τις πληροφορίες αυτές.

Σε ένα σύστημα RFID, η λειτουργία έχει ως εξής: Όταν η ετικέτα βρεθεί εντός εμβέλειας της κεραίας του αναγνώστη, η μονάδα ελέγχου επικοινωνεί με ραδιοκύματα με την κεραία της ετικέτας, η ετικέτα ενεργοποιείται, και έπειτα στέλνει πληροφορίες στον αναγνώστη. Στη συνέχεια παρεμβαίνει ένα ενδιάμεσο λογισμικό, το οποίο κατανοεί τις πληροφορίες και τις αποστέλλει στη μονάδα ελέγχου του αναγνώστη. Τέλος, ο αναγνώστης τις μεταφέρει στο εκάστοτε πληροφοριακό σύστημα.



**Εικόνα 6.23** Μια ετικέτα RFID, με το ολοκληρωμένο της κύκλωμα (integrated circuit ή microchip) και την κεραία (integrated ή tag antenna) [[http://itlaw.wikia.com/wiki/RFID\\_tag](http://itlaw.wikia.com/wiki/RFID_tag) και [http://img1.wikia.nocookie.net/\\_cb20100914063122/itlaw/images/a/a5/RFID\\_tag.jpg](http://img1.wikia.nocookie.net/_cb20100914063122/itlaw/images/a/a5/RFID_tag.jpg)].



**Εικόνα 6.24** Ετικέτα EPC (ηλεκτρονικός κωδικός προϊόντος, αγγλιστί electronic product code) ενός RFID συστήματος, χρησιμοποιούμενη από την εταιρία Walmart [<http://el.wikipedia.org/wiki/RFID> και <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:EPC-RFID-TAG.jpg> και [http://en.wikipedia.org/wiki/Radio-frequency\\_identification#Mandates](http://en.wikipedia.org/wiki/Radio-frequency_identification#Mandates)].





**Εικόνα 6.25** Ένας RFID αναγνώστης [[http://itlaw.wikia.com/wiki/RFID\\_reader](http://itlaw.wikia.com/wiki/RFID_reader) και [http://img4.wikia.nocookie.net/\\_cb20100914063251/itlaw/images/d/d7/RFID\\_reader.jpg](http://img4.wikia.nocookie.net/_cb20100914063251/itlaw/images/d/d7/RFID_reader.jpg)].



**Εικόνα 6.26** Σύγκριση μεγέθους ενός RFID μικροτσιπ με έναν κόκκο ρυζιού [[http://en.wikipedia.org/wiki/Radio-frequency\\_identification](http://en.wikipedia.org/wiki/Radio-frequency_identification)].

Ανάλογα με τον τύπο της ετικέτας, το μέγεθος των RFID μικροτσιπ μπορεί να είναι τόσο μικρό όσο ένας κόκκος ρυζιού, όπως μπορεί να παρατηρηθεί από την παραπάνω εικόνα 6.26.

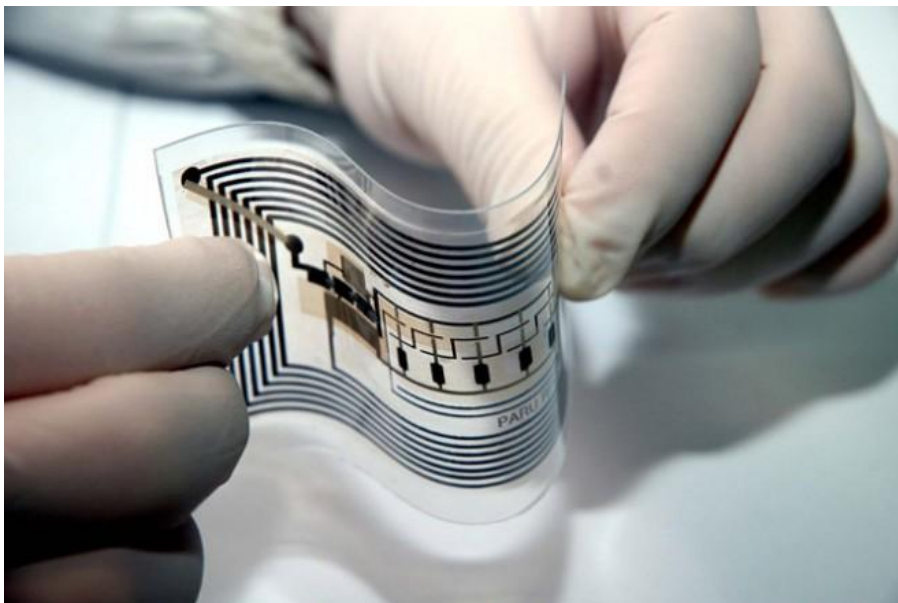
Όπως διαφέρει και ο τύπος μιας ετικέτας ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή, έτσι διαφέρει και η λειτουργία της.

Υπάρχουν περιπτώσεις που οι ετικέτες ενεργοποιούνται και λειτουργούν, μέσω μαγνητικών πεδίων, σε μικρές αποστάσεις (μερικά μέτρα).

Σε άλλες περιπτώσεις, γίνεται χρήση μιας τοπικής πηγής (π.χ. μπαταρία ή κάποιο είδος ηλεκτρομαγνητικού πεδίου). Στις περιπτώσεις αυτές, οι ετικέτες λειτουργούν ως παθητικοί αναμεταδότες, εκπέμποντας κάποια μορφή ραδιοσυχνότητας (μικροκύματα, ραδιοκύματα, κ.τ.λ.). Επίσης, οι αποστάσεις στις οποίες ενεργοποιούνται και λειτουργούν είναι αρκετά μεγάλες. Για παράδειγμα, μια ετικέτα RFID τροφοδοτούμενη από μπαταρία μπορεί να λειτουργήσει σε εκατοντάδες μέτρα.

Η ενεργοποίηση και λειτουργία μιας ετικέτας RFID θυμίζει σε κάποιο βαθμό τον τρόπο ενεργοποίησης και λειτουργίας ενός barcode (ραβδωτός κώδικας), σε αντίθεση όμως με τα barcodes, οι ετικέτες δεν χρειάζεται να βρίσκονται εντός οπτικού πεδίου ενός αναγνώστη RFID (γεγονός που τις καθιστά αόρατες στο ανθρώπινο μάτι) και διαθέτουν τη δυνατότητα αποθήκευσης περισσότερων πληροφοριών-δεδομένων από ότι τα barcodes. Επιπλέον για τις ετικέτες, παρέχεται και η δυνατότητα ενσωμάτωσής τους σε αντικείμενα.

Με χαρακτηριστικά τέτοια που επισκιάζουν αυτά των barcodes, είναι πολύ πιθανόν στο κοντινό μέλλον τα barcodes να αντικατασταθούν με ετικέτες RFID [<http://www.wired.com/2010/03/rfid/>].



**Εικόνα 6.27** Επίδειξη της ευκαμψίας μιας ετικέτας RFID [<http://www.wired.com/2010/03/rfid/>].

Με νέες μεθόδους ενσωμάτωσης οργανικών υλικών στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών, για επίτευξη χαμηλού κόστους παραγωγής αλλά και καλύτερης απόδοσης και λειτουργικότητας των ηλεκτρονικών συσκευών, αλλαγές άρχισαν να παρουσιάζονται και σε συστήματα RFID.

Συστήματα RFID που κατασκευάζονται με βάση τα OFET, παρουσιάζουν πράγματι χαμηλό κόστος παραγωγής. Για παράδειγμα, με κατασκευή τρανζίστορ, παθητικών στοιχείων και κεραίας μιας ετικέτας RFID μέσω τεχνικής εναπόθεσης συνεχούς εκτύπωσης (continuous printing technique) επιτυγχάνεται οικονομία σε υλικά και διαδικασίες παραγωγής, τέτοια, ώστε να μπορεί να συγκριθεί με αυτή που προκύπτει με μεθόδους απλής εκτύπωσης με συμβατικό χαρτί [Ioannis Kymissis, OFET/OFET applications].

Οι εφαρμογές των συστημάτων RFID είναι τεράστιες. Το πιο ευρέως διαδεδομένο παράδειγμα είναι τα προϊόντα στις αλυσίδες καταστημάτων, στις συσκευασίες των οποίων υπάρχουν ενσωματωμένες συρμάτινες ταινίες (RFID microchips) που διευκολύνουν την αναγνώριση των προϊόντων σε περιπτώσεις καταμέτρησης ή αποτρέπουν τυχόν προσπάθεια κλοπής τους.

Παρόμοιο παράδειγμα είναι και η εμφύτευση των RFID μικροτσιπ σε ζώα, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.28.

Άλλες εφαρμογές RFID περιλαμβάνουν πληρωμές μεταφοράς (transportation payments) όπως ηλεκτρονική είσπραξη διοδίων (electronic toll collection ή ETC) (εικόνες 6.29 και 6.30), διαβατήρια (biometric passport, e-passport ή digital passport), ταυτοποίηση ανθρώπινων προσώπων (human identification) με διαδικασίες ενσωμάτωσης ετικέτας σε άνθρωπο όπως φαίνεται στην εικόνα 6.31, συσκευές χρονομέτρησης π.χ. για διάφορα σπορ όπως είναι η χρονομέτρηση αγώνων (transponder, chip ή RFID timing) (εικόνα 6.32), και διάφορα κέντρα όπως νοσοκομεία, βιβλιοθήκες, μουσεία, σχολεία και πανεπιστήμια.



**Εικόνα 6.28** Πρόβατο με ετικέτα RFID [[http://en.wikipedia.org/wiki/Radio-frequency\\_identification#Animal\\_identification](http://en.wikipedia.org/wiki/Radio-frequency_identification#Animal_identification) και [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sheep%27s\\_face\\_Malta.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sheep%27s_face_Malta.jpg)].



**Εικόνα 6.29** Ετικέτα RFID για ηλεκτρονική είσπραξη διόδων (electronic toll collection ή ETC). Πολλά συστήματα ETC χρησιμοποιούν αναμεταδότες (transponders) σαν αυτόν που παρουσιάζεται στην εικόνα για ηλεκτρονική χρέωση λογαριασμών των καταχωρημένων αυτοκινήτων χωρίς την ανάγκη διακοπής της κυκλοφορίας [[http://en.wikipedia.org/wiki/Radio-frequency\\_identification#History](http://en.wikipedia.org/wiki/Radio-frequency_identification#History) και [http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic\\_toll\\_collection#Overview](http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_toll_collection#Overview)].



**Εικόνα 6.30** Ηλεκτρονική τιμολόγηση δρόμου (Electronic Road Pricing ή ERP) στην περιοχή North Bridge Road της Σιγκαπούρης, ένα παράδειγμα ηλεκτρονικής είσπραξης διοδίων και [\[http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic\\_Road\\_Pricing](http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_Road_Pricing) και [http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic\\_toll\\_collection#Technologies](http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_toll_collection#Technologies)].



**Εικόνα 6.31** Εμφύτευμα ενός RFID μικροτσιπ σε άνθρωπο. Στην εικόνα φαίνεται το χέρι ενός χομπίστα εμφυτευμάτων μικροτσιπ, ονόματι Amal Graafstra, μετά από εγχείρηση για εμφύτευση σε αυτό μιας ετικέτας RFID (το κίτρινο χρώμα στο χέρι προέρχεται από το ιώδιο που χρησιμοποιήθηκε για απολύμανση του χεριού για την χειρουργική επέμβαση) [\[http://en.wikipedia.org/wiki/Radio-frequency\\_identification#Human\\_identification](http://en.wikipedia.org/wiki/Radio-frequency_identification#Human_identification) και [http://en.wikipedia.org/wiki/Microchip\\_implant\\_\(human\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Microchip_implant_(human))].





**Εικόνα 6.32** Γραμμή τερματισμού στην οποία χρησιμοποιείται αναμεταδότης χρονομέτρου και τεχνολογία RFID μέσω αναρτημένης κεραίας και παθητικά διαθέσιμα τσιπ [[http://en.wikipedia.org/wiki/Transponder\\_timing](http://en.wikipedia.org/wiki/Transponder_timing) και <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Finish-SprintforSight-Large.jpg>].



**Εικόνα 6.33** Η πίσω πλευρά μιας διαθέσιμης ετικέτας RFID που χρησιμοποιείται για χρονομέτρηση αγώνων [[http://en.wikipedia.org/wiki/Transponder\\_timing#Usage](http://en.wikipedia.org/wiki/Transponder_timing#Usage) και [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Back\\_side\\_of\\_disposable\\_RFID\\_tag\\_used\\_for\\_race\\_timing.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Back_side_of_disposable_RFID_tag_used_for_race_timing.png)].

## 6.4 Συμπεράσματα

Από πολλές μελέτες και πειραματισμούς ανά τα χρόνια, παρατηρήθηκε το γεγονός ότι η αντικατάσταση ανόργανων συστατικών με οργανικά προσφέρει πολλές και διαφορετικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά στις οργανικές διατάξεις που κατασκευάζονται βάσει αυτών,

ιδιότητες και χαρακτηριστικά που προσδίδουν μια άλλη διάσταση στον τομέα των ηλεκτρονικών.

Οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά που διαθέτουν τα οργανικά τρανζίστορ επίδρασης πεδίου ξεπερνούν εκείνα των παραδοσιακών τεχνολογιών που περιλαμβάνουν FET, και στις περισσότερες περιπτώσεις κατά πολύ μάλιστα.

Με πλεονεκτήματα όπως μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, καλύτερη απόδοση, φιλικότητα στο περιβάλλον, αλλά και ευκολία επεξεργασίας και εφαρμογής, τα OFET άρχισαν με σταθερό ρυθμό να αντικαθιστούν τις αντίστοιχες ανόργανες διατάξεις σε διάφορες τεχνολογικές εφαρμογές του κλάδου των ηλεκτρονικών.

Επιπλέον, εκτός των πλεονεκτημάτων που προσδίδουν από πλευράς χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων, λόγω της σχετικά απλής και εύκολης κατασκευής τους αλλά και της αφθονίας σε οργανικά ημιαγώγιμα υλικά από τα οποία αυτά κατασκευάζονται, όλο και περισσότερες είναι οι εφαρμογές στις οποίες περιλαμβάνονται τα οργανικά αυτά τρανζίστορ.

Προς το παρόν, δεν μπορούν να αντικατασταθούν όλες οι συμβατικές τεχνολογίες που περιλαμβάνουν τρανζίστορ επίδρασης πεδίου με αντίστοιχες που να περιλαμβάνουν OFET, μα καθώς η επιστημονική μελέτη και έρευνα γίνεται εκτενέστερη, συνέχεια θα συναντάται πρόοδος στον τομέα των ηλεκτρονικών κατασκευών που ενσωματώνουν OFET.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. “Organic Field Effect Transistors, Theory, Fabrication and Characterization”, Ioannis Kymissis, Springer, ISBN 978-0-387-92133-4, e-ISBN 978-0-387-92134-1
2. “Physics of Organic Semiconductors”, Wolfgang Brutting, WILEY-VCH, ISBN-13: 978-3-527-40550-3, ISBN-10: 3-527-40550-X
3. “Organic Electronics, Materials, Manufacturing, and Applications”, Hagen Klauk, WILEY-VCH, ISBN-13 978-3-527-31264-1, ISBN-10 3-527-31264-1
4. “Physical and Chemical Aspects of Organic Electronics, From Fundamental to Functional Devices”, Christof Woll, WILEY-VCH, ISBN: 978-3-527-40810-8
5. "[Biography of John Bardeen 2](http://www.pbs.org/transistor/album1/bardeen/bardeen2.html)". PBS. Retrieved 2007-12-24, <http://www.pbs.org/transistor/album1/bardeen/bardeen2.html>
6. J.E. Lilienfeld (1930-01-28). [US 1745175](http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=US&NR=1745175&KC=&FT=E&locale=en_EP) "Method and apparatus for controlling electric currents", [http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=US&NR=1745175&KC=&FT=E&locale=en\\_EP](http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=US&NR=1745175&KC=&FT=E&locale=en_EP)  
Εναλλακτικά [U.S. Patent 1,745,175](http://www.google.com/patents/US1745175) "Method and apparatus for controlling electric current" first filed in Canada on October 22, 1925, describing a device similar to a [MESFET](http://www.google.com/patents/US1745175): <http://www.google.com/patents/US1745175>, καθώς και ένας ηλεκτρονικός σύνδεσμος που απεικονίζει (σε μορφή pdf) την (τότε έντυπη) φόρμα κατοχύρωσης της ευρεσιτεχνίας του Lilienfeld: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US1745175.pdf>
7. [GB 439457 Oskar Heil](http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=GB&NR=439457&KC=&FT=E&locale=en_EP), "Improvements in or relating to electrical amplifiers and other control arrangements and devices" first filed in Germany on March 2, 1934, [http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=GB&NR=439457&KC=&FT=E&locale=en\\_EP](http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=GB&NR=439457&KC=&FT=E&locale=en_EP)
8. “History of the transistor”, Wikipedia, the free encyclopedia/Contents/Invention of the transistor, [http://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_the\\_transistor](http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_transistor)
9. “Julius Edgar Lilienfeld”, Wikipedia, the free encyclopedia/Contents/Lilienfeld’s patents, [http://en.wikipedia.org/wiki/Julius\\_Edgar\\_Lilienfeld](http://en.wikipedia.org/wiki/Julius_Edgar_Lilienfeld)
10. “History of the transistor”, Wikipedia, the free encyclopedia/ Contents/Patents, [http://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_the\\_transistor#Patents](http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_transistor#Patents)
11. "[1960 - Metal Oxide Semiconductor \(MOS\) Transistor Demonstrated](http://www.computerhistory.org/semiconductor/timeline/1960-MOS.html)". Computer History Museum. Retrieved 11 November 2012, <http://www.computerhistory.org/semiconductor/timeline/1960-MOS.html>
12. H. Koezuka, A. Tsumura, T. Ando (1987). "Field-effect transistor with polythiophene thin film". *Synthetic Metals* **18**: 699–704. doi:[10.1016/0379-6779\(87\)90964-7](https://doi.org/10.1016/0379-6779(87)90964-7), <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0379677987909647>
13. MOS Capacitor, [http://www.eecs.berkeley.edu/~hu/Chenming-Hu\\_ch5.pdf](http://www.eecs.berkeley.edu/~hu/Chenming-Hu_ch5.pdf)

14. K. Y. Jen, G. G. Miller, and R. L. Elsenbaumer. Highly Conducting, Soluble, and Environmentally-Stable Poly(3-Alkylthiophenes). *Journal of the Chemical Society-Chemical Communications*, (17):1346{1347, 1986, Sep 1, [http://en.wikipedia.org/wiki/Chemical\\_Communications](http://en.wikipedia.org/wiki/Chemical_Communications)
15. Field-effect mobility of poly(3-hexylthiophene), A. Assadi, C. Svensson, M. Willander, and O. Inganäs, *Applied Physics Letters*, 53(3):195{197, Jul 1988. Εναλλακτικά, [Assadi, A.](#) ; Department of Physics and Measurement Technology, Linköping University, S-581 83 Linköping, Sweden ; [Svensson, C.](#) ; [Willander, M.](#) ; O. Inganäs, Field-effect mobility of poly(3-hexylthiophene), [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4858151&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D4858151](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4858151&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4858151), [http://en.wikipedia.org/wiki/Applied\\_Physics\\_Letters](http://en.wikipedia.org/wiki/Applied_Physics_Letters), <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/53/3/10.1063/1.100171>, <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/tocresult.jsp?isnumber=4858139>
16. [Synthetic Metals](#), Determination of field-effect mobility of poly(3-hexylthiophene) upon exposure to NH<sub>3</sub> gas, A.Assadi, G.Gustafsson, M. Willander, C. Svensson, O. Inganäs, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0379677990901358>
17. Carrier Injection Characteristics in Organic Field Effect Transistors Studied by Displacement Current Measurement, [Satoshi Ogawa](#), [Yasuo Kimura](#), [Hisao Ishii](#) and [Michio Niwano](#), Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan, <http://jjap.jsap.jp/link?JJAP/42/L1275/>
18. Electrical properties of polyacetylene/polysiloxane interface, [F. Ebisawa](#)<sup>1</sup>, [T. Kurokawa](#)<sup>1</sup> and [S. Nara](#)<sup>1</sup>, *J. Appl. Phys.* 54, 3255 (1983), <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/54/6/10.1063/1.332488>, <http://scitation.aip.org/docserver/fulltext/aip/journal/jap/54/6/1.332488.pdf?expires=1387536145&id=id&accname=freeContent&checksum=B987DB45C091FB3DCB127C28399A8421>, <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5113103&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F4915369%2F5113048%2F05113103.pdf%3Farnumber%3D5113103>.
19. *Organic Semiconductors*, Yoshikuko Okamoto and Walter Brenner, Reinhold (1964). Chapt.7, *Polymers*, pp125-158
20. Hideo Akamatu, Hiroo Inokuchi, and Yoshio Matsunaga (1954). "Electrical Conductivity of the Perylene–Bromine Complex". Περιοδικό *Nature* **173** (4395): 168. [Bibcode:1954Natur.173..168A](#). [doi:10.1038/173168a0](#) ή <http://www.nature.com/nature/journal/v173/n4395/abs/173168a0.html>
21. 9<sup>th</sup> Indo-German Winter Academy, Article: “Organic Semiconductors: Do they have a chance?” Tutor: Prof. C. Jacob, Student: Vishal Agarwal. Πηγές εκλήφθησαν από τα εξής περιεχόμενα “Organic Semiconductors: History”, σελίδα 9, <http://www.leb.eei.uni-erlangen.de/winterakademie/2010/report/content/course03/pdf/0313.pdf>



22. "Organic semiconductor", Wikipedia, the free encyclopedia/Organic semiconductor / Contents / History, [http://en.wikipedia.org/wiki/Organic\\_semiconductor](http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_semiconductor)
23. "Conductive polymer", Wikipedia, the free encyclopedia/Conductive polymer / Contents / History, [http://en.wikipedia.org/wiki/Conductive\\_polymer](http://en.wikipedia.org/wiki/Conductive_polymer)
24. The Nobel Prize in Chemistry 2000, "for the discovery and development of conductive polymers",  
[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/chemistry/laureates/2000/index.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2000/index.html)
25. Diaz, A; Logan, J (1980). "Electroactive polyaniline films". *Journal of Electroanalytical Chemistry* **111**: 111. doi:10.1016/S0022-0728(80)80081-7 ή <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022072880800817>
26. On the production of a blue substance by the electrolysis of sulphate of aniline H. Lethby, *Journal of the Chemical Society* Volume 15, 161–163, 1862,  
<http://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/1862/JS/js8621500161#!divAbstract>
27. Journal of the Chemical Society, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Journal\\_of\\_the\\_Chemical\\_Society](http://en.wikipedia.org/wiki/Journal_of_the_Chemical_Society)
28. Polyaniline, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Polyaniline>
29. De Surville, R.; Jozefowicz, M.; Yu, L.T.; Pepichon, J.; Buvet, R. (1968). "Electrochemical chains using protolytic organic semiconductors". *Electrochimica Acta* **13** (6): 1451. doi:10.1016/0013-4686(68)80071-4 ή <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0013468668800714>
30. "Polypyrrole", Wikipedia, the free encyclopedia / Contents / References, A. G. MacDiarmid, "Synthetic metals: A novel role for organic polymers (Nobel Lecture)", *Angew. Chem., Int. Ed.* 2001, 40, 2581-2590. doi:10.1002/1521-3773(20010716)40:14<2581::aid-anie2581>3.0.co;2-2 ή [http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1521-3773\(20010716\)40:14%3C2581::AID-ANIE2581%3E3.0.CO;2-2/abstract](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1521-3773(20010716)40:14%3C2581::AID-ANIE2581%3E3.0.CO;2-2/abstract) ή <http://www.molchem.science.ru.nl/rowan/Coll/caput-college/Conducting%20Polymer%20MacDiarmid.pdf> ή <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379677901005082>.  
Επίσης, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0379677986900706> , [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/chemistry/laureates/2000/macdiarmid-lecture.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2000/macdiarmid-lecture.html), [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/chemistry/laureates/2000/macdiarmid-lecture.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2000/macdiarmid-lecture.pdf)
31. "Plastic Logic", από "Wikipedia, the free encyclopedia". "[All-Plastic Electronics Power Flexible Color Display](#)". 7 June 2012. Επίσης [http://www.designnews.com/author.asp?section\\_id=1392&doc\\_id=245254&f\\_src=designnews\\_gnews&dfpPPParams&dfpPPParams=ind\\_183,industry\\_consumer,industry\\_medical,bid\\_27,aid\\_245254&dfpLayout=blog](http://www.designnews.com/author.asp?section_id=1392&doc_id=245254&f_src=designnews_gnews&dfpPPParams&dfpPPParams=ind_183,industry_consumer,industry_medical,bid_27,aid_245254&dfpLayout=blog)
32. "ΑΤΟΜΙΚΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΟΙ ΔΕΣΜΟΙ - Υβριδισμός",  
[http://www.chem.auth.gr/content/organic\\_lab/Gallos/\(03C\)Ybridismos.pdf](http://www.chem.auth.gr/content/organic_lab/Gallos/(03C)Ybridismos.pdf)
33. "Types of Hybridization", Clackamas Community College,  
<http://dl.clackamas.cc.or.us/ch106-02/typesof.htm>. On-line απεικόνιση μιας sp

υβριδοποίησης,

<http://www.mhhe.com/physsci/chemistry/essentialchemistry/flash/hybrv18.swf>

34. “Resonance”, Wikipedia, the free encyclopedia: Resonance (chemistry),  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Resonance\\_\(chemistry\)#Resonance\\_energy](http://en.wikipedia.org/wiki/Resonance_(chemistry)#Resonance_energy)
35. “Polaron”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Polaron>
36. “Ethylene”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Ethylene>
37. “Delocalized electron”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Delocalized\\_electron](http://en.wikipedia.org/wiki/Delocalized_electron)
38. “Benzene”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Benzene>
39. “Conjugated system/Benzene orbitals”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Conjugated\\_system](http://en.wikipedia.org/wiki/Conjugated_system).
40. “Catenation”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Catenation>
41. “Υδρογονάνθρακες”, Βικιπαίδεια, η ελεύθερη εγκυκλοπαίδεια,  
<http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CE%BF%CE%BD%CE%AC%CE%BD%CE%B8%CF%81%CE%B1%CE%BA%CE%B5%CF%82>
42. “Hydrocarbon”, Wikipedia, the free encyclopedia, Hydrocarbon/General properties,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrocarbon>
43. “Thin film”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Thin-film\\_deposition](http://en.wikipedia.org/wiki/Thin-film_deposition)
44. “Evaporation (deposition)”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Evaporation\\_\(deposition\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Evaporation_(deposition))
45. “Organic compound”, Wikipedia, the free encyclopedia, “Organic compound/Classification”, [http://en.wikipedia.org/wiki/Organic\\_compound](http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_compound)
46. “Organic chemistry”, Wikipedia, the free encyclopedia, Organic chemistry/Properties,Nomenclature,Classification of organic compounds,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Organic\\_chemistry](http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_chemistry)
47. “Acene”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Acene>
48. “Rubrene”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Rubrene>
49. “Perylene“, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Perylene>
50. “Vacuum deposition”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum\\_deposition](http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum_deposition)
51. “Vacuum Deposition Processes”, PF, PRODUCTS FINISHING,  
<http://www.pfonline.com/articles/vacuum-deposition-processes>
52. “Evaporation (deposition) “, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Evaporation\\_\(deposition\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Evaporation_(deposition))
53. “What is Vacuum Deposition?”, wiseGEEK, clear answers for common questions,  
<http://www.wisegeek.com/what-is-vacuum-deposition.htm>
54. “Benzene”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Benzene>
55. “Tetracene”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Tetracene>
56. “Pentacene”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Pentacene>
57. “Hexacene”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Hexacene>

58. "Heptacene", Wikipedia, the free encyclopedia,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Heptacene>
59. "Oligomer", Wikipedia, the free encyclopedia, Oligomer και Oligomer/IUPAC definition, <http://en.wikipedia.org/wiki/Oligomer>
60. "Organic chemistry", Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Organic\\_chemistry](http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_chemistry)
61. "Synthetic Strategy for Large Scale Production of Oligothiophenes", SIGMA-ALDRICH, <http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/organic-electronics/oligothiophene-synthesis.html>
62. "Synthesis, photophysical and electrochemical characterization of terpyridine-functionalized dendritic oligothiophenes and their Ru(II) complexes", Beilstein Institut / Beilstein Journal of Organic Chemistry, <http://www.beilstein-journals.org/bjoc/single/articleFullText.htm?publicId=1860-5397-9-100>
63. "Oligothiophene-Based Organic Thin-Film Transistors: A Kelvin Probe Force Microscopy Study of the Electronic Properties", Cambridge Journals Online, MRS (MATERIALS RESEARCH SOCIETY) online PROCEEDINGS LIBRARY, Home > MRS Online Proceedings Library> Volume 1435 > Oligothiophene-Based Organic Thin-Film Transistors: A Kelvin Probe Force Microscopy Study of the Electronic Properties,  
<http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?fromPage=online&aid=8800648>
64. "Thiophene", Wikipedia, the free encyclopedia,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Thiophene>
65. "Fluorene", Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Fluorene>
66. "Degree of polymerization", Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Degree\\_of\\_polymerization](http://en.wikipedia.org/wiki/Degree_of_polymerization)
67. "Organic light emitting diodes based on functionalized oligothiophenes for display and lighting applications", INTECH, open science | open minds,  
<http://www.intechopen.com/books/organic-light-emitting-diode/organic-light-emitting-diodes-based-on-functionalized-oligothiophenes-for-display-and-lighting-appli>
68. "A-D-A-D-A-Type Oligothiophenes for Vacuum-Deposited Organic Solar Cells", ACS Publications, MOST TRUSTED. MOST CITED. MOST READ.,  
<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ol102603n>
69. "Film Stacking", About.com, Composites / Plastics,  
<http://composite.about.com/library/glossary/f/bldef-f2229.htm>
70. "Film stacking impregnation model for a novel net-shape thermoplastic composite preforming process", Journal article, INFOSCIENCE,  
<http://infoscience.epfl.ch/record/118297>
71. "Film stacking impregnation model for a novel net shape thermoplastic composite preforming process", Science Direct, Journals | Books,  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353808000262>

72. “Photoswitchable end-capped hexithiophene molecular wires: Electrochemical synthesis and molecular properties“, ORGN 496,  
<http://oasys2.confex.com/acs/235nm/techprogram/P1141275.HTM>
73. “Telomer”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Telomer>
74. “The effect of end-group substitutions and use of a mixed solvent system on  $\beta$ -diketones and their iron complexes“, Science Direct, Journals | Books,  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020169398000176>
75. “Organic chemistry”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Organic\\_chemistry](http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_chemistry)
76. “Synthetic Strategy for Large Scale Production of Oligothiophenes“, SIGMA-ALDRICH, <http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/organic-electronics/oligothiophene-synthesis.html>
77. “Synthesis, photophysical and electrochemical characterization of terpyridine-functionalized dendritic oligothiophenes and their Ru(II) complexes”, Belstein Institut / Beilstein Journal of Organic Chemistry, <http://www.beilstein-journals.org/bjoc/single/articleFullText.htm?publicId=1860-5397-9-100>
78. “Oligothiophene-Based Organic Thin-Film Transistors: A Kelvin Probe Force Microscopy Study of the Electronic Properties”, Cambridge Journals Online, MRS (MATERIALS RESEARCH SOCIETY) online PROCEEDINGS LIBRARY, Home > MRS Online Proceedings Library> Volume 1435 > Oligothiophene-Based Organic Thin-Film Transistors: A Kelvin Probe Force Microscopy Study of the Electronic Properties,  
<http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?fromPage=online&aid=8800648>
79. “Thiophene”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Thiophene>
80. “Fluorene”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Fluorene>
81. “Degree of polymerization”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Degree\\_of\\_polymerization](http://en.wikipedia.org/wiki/Degree_of_polymerization)
82. “Organic light emitting diodes based on functionalized oligothiophenes for display and lighting applications”, INTECH, open science | open minds,  
<http://www.intechopen.com/books/organic-light-emitting-diode/organic-light-emitting-diodes-based-on-functionalized-oligothiophenes-for-display-and-lighting-appli>
83. “Solid-state (electronics)”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Solid-state\\_\(electronics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Solid-state_(electronics))
84. “Design strategy for air-stable organic semiconductors applicable to
85. high-performance field-effect transistors”, ScienceDirect, Science and Technology of Advanced Materials - 8 (2007) 273–276, [http://iopscience.iop.org/1468-6996/8/4/A07/pdf/STAM\\_8\\_4\\_A07.pdf](http://iopscience.iop.org/1468-6996/8/4/A07/pdf/STAM_8_4_A07.pdf)
86. “Gain and Loss of Electrons“ & “Oxidation Number”, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/chemical/oxred.html>

87. “Redox”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Redox> ή <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9F%CE%BE%CE%B5%CE%B9%CE%B4%CE%BF%CE%B1%CE%BD%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE>
88. “Oxidation state”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Oxidation\\_state](http://en.wikipedia.org/wiki/Oxidation_state) ή [http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%81%CE%B9%CE%B8%CE%BC%CF%8C%CF%82\\_%CE%BF%CE%BE%CE%B5%CE%AF%CE%B4%CF%89%CF%83%CE%B7%CF%82](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%81%CE%B9%CE%B8%CE%BC%CF%8C%CF%82_%CE%BF%CE%BE%CE%B5%CE%AF%CE%B4%CF%89%CF%83%CE%B7%CF%82)
89. “What is Oxidation?”, wiseGEEK, clear answers for common questions, <http://www.wisegeek.com/what-is-oxidation.htm>
90. “A soluble and air-stable organic semiconductor with high electron mobility”, Letters to Nature, *Nature* 404, 478-481 (30 March 2000) | doi:10.1038/35006603; Received 13 October 1999; Accepted 15 February 2000, nature—International weekly journal of science, <http://www.nature.com/nature/journal/v404/n6777/abs/404478a0.html#top>
91. “AIR-STABLE AND HIGH-MOBILITY ORGANIC SEMICONDUCTORS  
92. BASED ON HETEROARENES FOR FIELD-EFFECT TRANSISTORS”,  
HETEROCYCLES, Vol. 83, No. 6, 2011,  
<http://www.heterocycles.jp/newlibrary/downloads/PDF/21643/83/6>
93. “Stability of n-type doped conducting polymers and consequences for polymeric microelectronic devices”, *Synthetic Metals* 87 (1997) 53-59, D.M. de Leeuw \*, M.M.J. Simenon, A.R. Brown, R.E.F. Einerhand,  
[http://www.imamu.edu.sa/Scientific\\_selections/abstracts/Chemistry/Stability%20of%20n-type%20doped%20conducting%20polymers%20and%20consequences%20for%20polymeric%20microelectronic%20devices.pdf](http://www.imamu.edu.sa/Scientific_selections/abstracts/Chemistry/Stability%20of%20n-type%20doped%20conducting%20polymers%20and%20consequences%20for%20polymeric%20microelectronic%20devices.pdf)
94. “Ion”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Ion> ή <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%99%CF%8C%CE%BD>
95. “Hydrogen ion”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen\\_ion](http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_ion)
96. “Hydroxide”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Hydroxide> ή <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%BE%CE%B5%CE%AF%CE%B4%CE%B9%CE%BF>
97. “Oxygen”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Oxygen> ή <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9F%CE%BE%CF%85%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF>
98. “Chemical species”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Chemical\\_species](http://en.wikipedia.org/wiki/Chemical_species) ή [http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A7%CE%B7%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CF%8C\\_%CE%B5%CE%AF%CE%B4%CE%BF%CF%82](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A7%CE%B7%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CE%B5%CE%AF%CE%B4%CE%BF%CF%82)
99. “Reduction potential”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Reduction\\_potential](http://en.wikipedia.org/wiki/Reduction_potential) ή

- <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CE%B1%CE%BD%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CE%B4%CF%85%CE%BD%CE%B1%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CE%BF%CE%BE%CE%B5%CE%B9%CE%B4%CE%BF%CE%B1%CE%BD%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE%CF%82>
100. "Saturated calomel electrode", Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Saturated\\_calomel\\_electrode](http://en.wikipedia.org/wiki/Saturated_calomel_electrode)
  101. "Reference electrode", Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Reference\\_electrode](http://en.wikipedia.org/wiki/Reference_electrode)
  102. "Reference electrodes" & "Saturated calomel electrode (SCE)", Potentiometry (Chapter 23), <http://www.cem.msu.edu/~cem333/Week11.pdf>
  103. "Steric effects", Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Steric\\_effects](http://en.wikipedia.org/wiki/Steric_effects) ή [http://simple.wikipedia.org/wiki/Steric\\_effects](http://simple.wikipedia.org/wiki/Steric_effects)
  104. "Sterically induced reduction", Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Sterically\\_induced\\_reduction](http://en.wikipedia.org/wiki/Sterically_induced_reduction)
  105. "Biasing", Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Biasing> ή <http://simple.wikipedia.org/wiki/Biasing>
  106. "p–n junction", Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/P%2%80%93n\\_junction](http://en.wikipedia.org/wiki/P%2%80%93n_junction)
  107. "Local field potential", Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Local\\_field\\_potential](http://en.wikipedia.org/wiki/Local_field_potential)
  108. "Drying", Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Drying>
  109. "Dehydration reaction", Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Dehydration\\_reaction](http://en.wikipedia.org/wiki/Dehydration_reaction)
  110. "Passivation (chemistry)", Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Passivation\\_\(chemistry\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Passivation_(chemistry))
  111. "Polymer", Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Polymer>.
  112. Hasegawa, Tatsuo; Takeya, Jun (2009). "Organic field-effect transistors using single crystals". *Sci. Technol. Adv. Mater.* (free download) **10** (2): 024314. [Bibcode:2009STAdM..10b4314H](http://adsabs.harvard.edu/abs/2009STAdM..10b4314H). [doi:10.1088/1468-6996/10/2/024314](http://dx.doi.org/10.1088/1468-6996/10/2/024314), <http://adsabs.harvard.edu/abs/2009STAdM..10b4314H>, <http://iopscience.iop.org/1468-6996/10/2/024314/>,
  113. Yamashita, Yoshiro (2009). "Organic semiconductors for organic field-effect transistors". *Sci. Technol. Adv. Mater.* (free download) **10** (2): 024313. [Bibcode:2009STAdM..10b4313Y](http://adsabs.harvard.edu/abs/2009STAdM..10b4313Y). [doi:10.1088/1468-6996/10/2/024313](http://dx.doi.org/10.1088/1468-6996/10/2/024313), <http://adsabs.harvard.edu/abs/2009STAdM..10b4313Y>, <http://iopscience.iop.org/1468-6996/10/2/024313/>
  114. Dimitrakopoulos, C.D.; Malenfant, P.R.L. (2002). "Organic Thin Film Transistors for Large Area Electronics". *Adv. Mater.* **14** (2): 99. [doi:10.1002/1521-4095\(20020116\)14:2<99::AID-ADMA99>3.0.CO;2-9](http://dx.doi.org/10.1002/1521-4095(20020116)14:2<99::AID-ADMA99>3.0.CO;2-9), [http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1521-4095\(20020116\)14:2%3C99::AID-](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1521-4095(20020116)14:2%3C99::AID-)



- [ADMA99%3E3.0.CO;2-9/abstract;jsessionid=F8AB71707F2C49212958D8021C7E9D8A.f01t04](#)
115. Reese, Colin; Roberts, Mark; Ling, Mang-Mang; Bao, Zhenan (2004). "Organic thin film transistors". *Mater. Today* **7** (9): 20. doi:[10.1016/S1369-7021\(04\)00398-0](#),  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702104003980>
  116. Klauk, Hagen (2010). "Organic thin-film transistors". *Chem. Soc. Rev.* **39** (7): 2643. doi:[10.1039/B909902F](#),  
<http://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2010/CS/b909902f#!divAbstract>
  117. US 7057205 B2, "P-type OFET with fluorinated channels",  
<http://www.google.com/patents/US7057205>
  118. Springer Link, "Low voltage n-type OFET based on double insulators",  
<http://link.springer.com/article/10.1007/s11801-008-8029-z>
  119. IEEE Xplore, "Digital Library, Development of Active Functional Polymers for p- and n-type OFET- Applications",  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1596490&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D1596490](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1596490&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D1596490), Conference Proceeding
  120. Development of Active Functional Polymers for p- and n-type OFET- Applications,  
[http://www.researchgate.net/publication/4224312\\_Development\\_of\\_Active\\_Functional\\_Polymers\\_for\\_p-\\_and\\_n-type\\_OFET-\\_Applications](http://www.researchgate.net/publication/4224312_Development_of_Active_Functional_Polymers_for_p-_and_n-type_OFET-_Applications)
  121. SIGMA-ALDRICH, "p-Type Polymers",  
<http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/material-science-products.html?TablePage=19352647>
  122. SIGMA-ALDRICH, "p-Type Small Molecules",  
<http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/material-science-products.html?TablePage=19353582>
  123. Painter, Paul C.; Coleman, Michael M. (1997). "Fundamentals of polymer science : an introductory text". Lancaster, Pa.: Technomic Pub. Co. p. 1. ISBN [1-56676-559-5](#), <http://en.wikipedia.org/wiki/Special:BookSources/1-56676-559-5>
  124. McCrum, N. G.; Buckley, C. P.; Bucknall, C. B. (1997). "Principles of polymer engineering". Oxford ; New York: Oxford University Press. p. 1. ISBN [0-19-856526-7](#), <http://en.wikipedia.org/wiki/Special:BookSources/0-19-856526-7>
  125. IUPAC, *Compendium of Chemical Terminology*, 2nd ed. (the "Gold Book") (1997). Online corrected version: (2006–) "[macromolecule \(polymer molecule\)](#)",  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Compendium\\_of\\_Chemical\\_Terminology](http://en.wikipedia.org/wiki/Compendium_of_Chemical_Terminology),  
<http://goldbook.iupac.org/M03667.html>
  126. "Organic chemistry", Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Organic\\_chemistry](http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_chemistry).
  127. "Classification of organic compounds", Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Organic\\_chemistry#Classification\\_of\\_organic\\_compounds](http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_chemistry#Classification_of_organic_compounds).
  128. "Polythiophene", Wikipedia, the free encyclopedia,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Polythiophene>.

129. “Polyfluorene”, Wikipedia, the free encyclopedia, Polyfluorene/History, <http://en.wikipedia.org/wiki/Polyfluorene>
130. Hodgkinson, W. R.; Matthews, F.E. (1883). "XXIII.-Note on some derivatives of fluorene, C<sub>13</sub>H<sub>10</sub>". *Journal of the Chemical Society, Transactions* **43**: 163–172. doi:10.1039/CT8834300163, <http://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/1883/CT/ct8834300163#!divAbstract>
131. *Ann. Chim. Phys.* **12** (4): 222. 1867, <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k348222/f221.image>
132. Vaughan, G.A.; Grant, D.W. (1954). "The determination of fluorene in tar fractions". *Analyst* **79**: 776–779. Bibcode:1954Ana....79..776V. doi:10.1039/AN9547900776, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1954Ana....79..776V>, <http://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/1954/AN/an9547900776#!divAbstract>. “Chemical structure of polyfluorene”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Polyfluorene.svg>.
133. Sirringhaus, H.; Wilson, R.J.; Friend, R.H.; Inbasekaran, M.; Wu, W.; Woo, E.P.; Grell; Bradley, D.D.C. (2000). "Mobility enhancement in conjugated polymer field-effect transistors through chain alignment in a liquid crystalline phase". *Applied Physics Letters* **77** (3): 406–408. Bibcode:2000ApPhL..77..406S. doi:10.1063/1.126991., <http://adsabs.harvard.edu/abs/2000ApPhL..77..406S>, <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/77/3/10.1063/1.126991>.
134. Pei, Qibing; Yang, Yang (1996). "Efficient photoluminescence and electroluminescence from a soluble polyfluorene". *Journal of the American Chemical Society* **118**: 7416–7417. doi:10.1021/ja9615233, <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja9615233>,
135. Bundgaard, Eva; Krebs, Frederik C. (2007). "Low band gap polymers for organic photovoltaics". *Solar Energy Materials & Solar Cells* **91**: 954–985. doi:10.1016/j.solmat.2007.01.015, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024807000451>.
136. Lee, Kangwon; Maisel, Katharina; Rouillard, Jean-Marie; Gulari, Erdogan; Kim, Jinsang (2008). "Sensitive and selective label-free DNA detection by conjugated polymer-based microarrays and intercalating dye". *Chemistry of Materials* **20**: 2848–2850. doi:10.1021/cm800333r, <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/cm800333r>.
137. Dillow, Clay (2010-06-07). "[Laser Sensor Can See Explosives' Vapor Trails Even at Extremely Low Concentrations](http://www.popsci.com/technology/article/2010-06/laser-sensor-can-see-explosives-vapor-trails-even-extremely-low-concentrations)". *Popular Science*. Bonnier Corporation. Retrieved 2011-03-28, <http://www.popsci.com/technology/article/2010-06/laser-sensor-can-see-explosives-vapor-trails-even-extremely-low-concentrations>.
138. “Electroactive polymers”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Electroactive\\_polymers](http://en.wikipedia.org/wiki/Electroactive_polymers).
139. “Photoactive layer”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Photoactive\\_layer](http://en.wikipedia.org/wiki/Photoactive_layer).
140. “Photoactive compound”, ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, Materials science/Photoactive compound, <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/457720/photoactive-compound>.



141. “Preparation of Photoactive Layer for Organic Photovoltaic Applications“, SIGMA-ALDRICH, <http://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/protocols/materials-science/preparation-of-photoactive.html>.
142. “Marcellin Berthelot”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Marcellin\\_Berthelot](http://en.wikipedia.org/wiki/Marcellin_Berthelot).
143. “Hydrocarbon”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrocarbons>.  
Επίσης, “Pierre-Eugène-Marcellin Berthelot”, ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/62792/Pierre-Eugene-Marcellin-Berthelot>,  
και “Marcellin Berthelot”, [www.answers.com](http://www.answers.com), <http://www.answers.com/topic/marcellin-berthelot>.
144. “The determination of fluorene in tar fractions”, Publishing, Journals, books and databases, <http://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/1954/AN/an9547900776#!divAbstract>.
145. “Fluorene”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Fluorene>.
146. Karl Griesbaum, Arno Behr, Dieter Biedenkapp, Heinz-Werner Voges, Dorothea Garbe, Christian Paetz, Gerd Collin, Dieter Mayer, Hartmut Höke “Hydrocarbons” in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry 2002 Wiley-VCH, Weinheim. doi:10.1002/14356007.a13\_227, [http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/14356007.a13\\_227/abstract](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/14356007.a13_227/abstract).
147. “Diphenylmethane”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Diphenylmethane>.
148. D. M. Burns, John Iball (1954), *Molecular Structure of Fluorene* Nature volume 173, p. 635. doi:10.1038/173635a0, <http://www.nature.com/nature/journal/v173/n4405/abs/173635a0.html>
149. R. E. Gerkin, A. P. Lundstedt and W. J. Reppart (1984) *Structure of fluorene, C<sub>13</sub>H<sub>10</sub>, at 159 K* Acta Crystallographica, volume C40, pp. 1892–1894 doi:10.1107/S0108270184009963, <http://scripts.iucr.org/cgi-bin/paper?S0108270184009963>.
150. “Structural formula of fluorene”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Fluorene.svg>
151. “Ball-and-stick model of the fluorene molecule, C<sub>13</sub>H<sub>10</sub>, as found in the crystal structure”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Fluorene-from-xtal-3D-balls.png>
152. “Biphenylene”, Wikipedia, the free encyclopedia, Biphenylene/Diphenylene, <http://en.wikipedia.org/wiki/Biphenylene>.
153. “Facile Fabrication of Color Tunable Film and Fiber Nanocomposites via Thiol Click Chemistry”, ACS Publications, Most trusted. Most Cited. Most Read., Macromolecules, <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ma401636e>.
154. “Polyimide”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Polyimide>.

155. “Metal”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Metal>  
ή  
<http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%AD%CF%84%CE%B1%CE%BB%CE%BB%CE%BF>
156. “Conductive polymer”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Conductive\\_polymer](http://en.wikipedia.org/wiki/Conductive_polymer)
157. “Electrical conductor”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_conductor](http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_conductor) ή  
<http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%B3%CF%89%CE%B3%CF%8C%CF%82>
158. “Surfactant”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Surfactant>
159. “From conductive polymers to organic metals“, DEVELOPING TECHNOLOGY, Table of Contents,  
<http://pubs.acs.org/subscribe/archive/ci/31/i01/html/01wess.html>
160. “Dispersion relation”, Wikipedia, the free encyclopedia, Dispersion relation/Contents/Frequency versus wavenumber/Solid state,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Dispersion\\_relation](http://en.wikipedia.org/wiki/Dispersion_relation) ή  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Dispersion\\_relation#Solid\\_state](http://en.wikipedia.org/wiki/Dispersion_relation#Solid_state)
161. “Dispersion (materials science)”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Dispersion\\_\(materials\\_science\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Dispersion_(materials_science))
162. “Suspension (chemistry)”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Suspension\\_\(chemistry\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Suspension_(chemistry)) ή  
<http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%B9%CF%8E%CF%81%CE%B7%CE%BC%CE%B1>
163. “Self-doped conducting polymers”, A.O. Patil, Y. Ikenoue, N. Basescu, N. Colaneri, J. Chen, F. Wundl, A.J.Heeger, Synthetic Metals,  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379677987905546>
164. “Self-Doped Conducting Polymers”, Michael S. Freund, Bhavana A. Deore, WILEY. Επίσης, WILEY, Self-Doped Conducting Polymers, ISBN: 978-0-470-02969-5, <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0470029692.html>
165. “Synthesis and properties of an n-self-doped conducting polymer“, ACS Publications, MOST TRUSTED. MOST CITED. MOST READ., cm - CHEMISTRY OF MATERIAS, <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/cm00035a003>
166. “A novel water-soluble and self-doped conducting polyaniline graft copolymer”, [Chemical Communications](http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2003/CC/b309346h#!divAbstract), Publishing, Journals, books and databases,  
<http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2003/CC/b309346h#!divAbstract>
167. “Preparation of polyaniline and self-doped polyaniline–clay nanocomposites in supercritical CO<sub>2</sub>: Synthesis and conductivity study“, E. Akbarinezhad, M. Ebrahimi, F. Sharif, Synthetic Metals, ScienceDirect,  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379677912002780>

168. “Benzenesulfonic acid”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Benzenesulfonic\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/Benzenesulfonic_acid),  
 επίσης “Benzenesulfonic acid”, SIGMA-ALDRICH, <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/12635?lang=en&region=GR>
169. “Polypyrrole”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Polypyrrole>
170. “Polyaniline”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Polyaniline>
171. “Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/PEDOT>, εναλλακτικά “PEDOT”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=PEDOT&redirect=no>
172. “Organic field-effect transistor”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/OFET>
173. “Potential well”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Potential\\_well](http://en.wikipedia.org/wiki/Potential_well)
174. “Gate dielectric”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Gate\\_dielectric](http://en.wikipedia.org/wiki/Gate_dielectric)
175. “Dielectric”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Dielectric>
176. “Electric Field: Sheet of Charge“, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/elesht.html>
177. “Electron mobility”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Electron\\_mobility](http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_mobility)
178. “On/Off ratios and current ratios”, ACS Publications, MOST TRUSTED. MOST CITED. MOST READ., <http://pubs.acs.org/action/doSearch?action=search&searchText=on%2Foff+current+ratio&qsearchArea=searchText>
179. “Figure 1: The structure of a conventional unipolar OFET”, nature materials, nature.com/journal/home/archive/issue/news\_and\_views/full\_text/figure1, [http://www.nature.com/nmat/journal/v9/n6/fig\\_tab/nmat2775\\_F1.html](http://www.nature.com/nmat/journal/v9/n6/fig_tab/nmat2775_F1.html)
180. “High-performance devices using organic semiconductors”, Andrew G. Rinzler, Mitchell A. McCarthy and Bo Liu, SPIE. CONNECTING MINDS. ADVANCING LIGHT, Illumination & Displays, <http://spie.org/x57011.xml> και [http://spie.org/Images/Graphics/Newsroom/Imported-2011/003815/003815\\_10\\_fig2.jpg](http://spie.org/Images/Graphics/Newsroom/Imported-2011/003815/003815_10_fig2.jpg)
181. “Electrical polarity”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Positive\\_\(electricity\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Positive_(electricity))
182. “Electric charge”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Electric\\_charge](http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_charge)
183. “Tutorials on OE: OFET, Organic Field-Effect Transistor”, Organic Electronics @ NUS Science, <http://vhosts.science.nus.edu.sg/organicelectronics/?p=512>

184. “Deposition”, Wikipedia, the free encyclopedia, Thin film/Deposition, [http://en.wikipedia.org/wiki/Thin-film\\_deposition#Deposition](http://en.wikipedia.org/wiki/Thin-film_deposition#Deposition)
185. “Vacuum evaporation”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum\\_evaporation](http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum_evaporation)
186. “Vacuum deposition”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum\\_deposition](http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum_deposition)
187. “Equipment”, Wikipedia, the free encyclopedia, Evaporation (deposition)/ Equipment, [http://en.wikipedia.org/wiki/Evaporation\\_\(deposition\)Equipment](http://en.wikipedia.org/wiki/Evaporation_(deposition)Equipment)
188. “Vapor pressure”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Vapor\\_pressure](http://en.wikipedia.org/wiki/Vapor_pressure) και [http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CE%AC%CF%83%CE%B7\\_%CE%B1%CF%84%CE%BC%CF%8E%CE%BD](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CE%AC%CF%83%CE%B7_%CE%B1%CF%84%CE%BC%CF%8E%CE%BD)
189. “Microelectronics”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Microelectronics>
190. “Optics”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Optic>
191. “Physical vapor deposition”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Physical\\_vapor\\_deposition](http://en.wikipedia.org/wiki/Physical_vapor_deposition)
192. “Pressure vessel”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Pressure\\_vessel](http://en.wikipedia.org/wiki/Pressure_vessel)
193. “Vapor pressure”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Vapor> και <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%84%CE%BC%CF%8C%CF%82>
194. “Ultra-high vacuum”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Ultra-high\\_vacuum](http://en.wikipedia.org/wiki/Ultra-high_vacuum)
195. “achieving UHV”, [http://philiphofmann.net/ultrahighvacuum/achieving\\_UHV.html](http://philiphofmann.net/ultrahighvacuum/achieving_UHV.html)
196. “Vacuum pump”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum\\_pump](http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum_pump)
197. “Incandescent light bulb”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Electric\\_filament](http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_filament)
198. “epitaxy”, ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/190362/epitaxy>
199. “Epitaxy”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Epitaxy> και [http://en.wikipedia.org/wiki/Epitaxy#Molecular-beam\\_epitaxy](http://en.wikipedia.org/wiki/Epitaxy#Molecular-beam_epitaxy)
200. “Molecular beam epitaxy”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Molecular-beam\\_epitaxy](http://en.wikipedia.org/wiki/Molecular-beam_epitaxy)
201. “Precursor (chemistry)”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Precursor\\_\(chemistry\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Precursor_(chemistry))
202. “Halide”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Halide>

203. “Hydride”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Hydride>
204. “Electric heating”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Electric\\_heating](http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_heating)
205. “Electron gun”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Electron\\_gun](http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_gun)
206. “Flash evaporation”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Flash\\_evaporation](http://en.wikipedia.org/wiki/Flash_evaporation)
207. “Unit operation”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Unit\\_operation](http://en.wikipedia.org/wiki/Unit_operation)
208. “Vapor–liquid equilibrium”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Vapor%E2%80%93liquid\\_equilibrium](http://en.wikipedia.org/wiki/Vapor%E2%80%93liquid_equilibrium)
209. “Chemical engineering”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Chemical\\_engineering](http://en.wikipedia.org/wiki/Chemical_engineering)
210. “Liquid Deposition”, TORREY PINES RESEARCH, [http://www.tpr.com/liquid\\_deposition.htm](http://www.tpr.com/liquid_deposition.htm)
211. “Atomic layer deposition”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic\\_layer\\_deposition](http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_layer_deposition)
212. “Liquid deposition photolithography for submicrometer resolution three-dimensional index structuring with large throughput”, Light|Science & Applications, <http://www.nature.com/lsa/journal/v2/n3/full/lsa201312a.html>
213. “Paraffin wax”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Paraffin\\_wax](http://en.wikipedia.org/wiki/Paraffin_wax)
214. “Etching (microfabrication)”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Etching\\_\(microfabrication\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Etching_(microfabrication))
215. “Resist”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Resist>
216. “Wafer (electronics)”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Wafer\\_\(electronics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Wafer_(electronics))
217. “Solution”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Solution>
218. “Printed electronics”, Wikipedia, the free encyclopedia, Printing/Printed electronics, [http://en.wikipedia.org/wiki/Printing#Printed\\_electronics](http://en.wikipedia.org/wiki/Printing#Printed_electronics) και [http://en.wikipedia.org/wiki/Printed\\_electronics](http://en.wikipedia.org/wiki/Printed_electronics)
219. “Pattern”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Pattern>
220. “Polymeric Thin Films by Chemical Vapor Deposition for the Microelectronics Industry”, Justin F. Gaynor, Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Materials Engineering Science, [http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-08142006-110115/unrestricted/LD5655.V856\\_1995.G396.pdf](http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-08142006-110115/unrestricted/LD5655.V856_1995.G396.pdf)

221. “CVD of polymeric thin films: applications in sensors, biotechnology, microelectronics/organic electronics, microfluidics, MEMS, composites and membranes”, IOP science, <http://iopscience.iop.org/0034-4885/75/1/016501>
222. “Parylene”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Parylene>
223. “*p*-Xylene”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/P-xylene>
224. “Metastability in electronics”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Metastability\\_in\\_electronics](http://en.wikipedia.org/wiki/Metastability_in_electronics)
225. “Dimer (chemistry)”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Dimer\\_\(chemistry\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Dimer_(chemistry))
226. “Cold trap”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Cold\\_trap](http://en.wikipedia.org/wiki/Cold_trap)
227. “Torr”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Torr>
228. “Coating”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Coating>
229. “Spin coating”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Spin\\_coating](http://en.wikipedia.org/wiki/Spin_coating)
230. “Chemical vapor deposition”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Chemical\\_vapor\\_deposition](http://en.wikipedia.org/wiki/Chemical_vapor_deposition)
231. “Chemical liquid deposition process for microstructure fabrication”, ScienceDirect, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306904002250>
232. “Frit”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Frit>
233. “Process planning for an Additive/Subtractive Rapid Pattern Manufacturing system”, Iowa State University, Digital Repository @ Iowa State University, <http://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2064&context=etd>
234. “Subtractive patterning to define circuit components “, <http://www.freshpatents.com/-dt20120405ptan20120080793.php>
235. “Additive/Subtractive Rapid Pattern Manufacturing for Casting
236. Patterns and Injection Mold Tooling”, Matthew C. Frank, PhD, Frank E. Peters, PhD, Rajesh Karthikeyan, Department of Industrial and Manufacturing Systems Engineering, Iowa State University, Ames, IA, USA, <http://utwired.engr.utexas.edu/lff/symposium/proceedingsArchive/pubs/Manuscripts/2010/2010-22-Frank.pdf>
237. “Subtractive Patterning via Chemical Lift-Off Lithography”, SCIENCE, <http://www.sciencemag.org/content/337/6101/1517.abstract>
238. “Subtractive vs. Additive Process, [Positive vs. Negative Tone Photoresists >](http://www.microchem.com/Prod-LithographyOverviewSubAdd.htm)”, Lithography Overviews, MICRO CHEM, <http://www.microchem.com/Prod-LithographyOverviewSubAdd.htm>
239. “Subtractive Patterning via Chemical Lift-Off Lithography“, Science AAAS, <http://www.sciencemag.org/content/337/6101/1517.abstract>
240. “Lamination”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Lamination>



241. “Exploiting additive and subtractive patterning for spatially controlled and robust bacterial co-cultures”, Publishing, Journals, books and databases, <http://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2012/SM/C2SM26111A#!divAbstract>
242. “Subtractive Patterning via Chemical Lift-Off Lithography - Science 2012”, Scribd., <http://www.scribd.com/doc/188542152/Subtractive-Patterning-via-Chemical-Lift-Off-Lithography-Science-2012>
243. “Subtractive contact-patterning of molecular organic films”, ScienceDirect, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566119912002030>
244. “Photolithography”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Photolithography>
245. “Photomask”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Photomask>
246. “Lift-off (microtechnology)”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Lift-off\\_\(microtechnology\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Lift-off_(microtechnology))
247. “Photoresist”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Photoresist>
248. “Photosensitization”, Wikipedia, the free encyclopedia, Photoelectrochemical process/ Photosensitization, <http://en.wikipedia.org/wiki/Photosensitization#Photosensitization>
249. “Stencil lithography”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Stencil\\_lithography](http://en.wikipedia.org/wiki/Stencil_lithography)
250. “Stencil”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Stencil> και <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CF%84%CE%AD%CE%BD%CF%83%CE%B9%CE%BB>
251. “Niemeyer-Dolan technique”, Wikipedia, the free encyclopedia, Niemeyer-Dolan technique or Dolan technique, a shadow evaporation technique, thin-film lithographic method, [http://en.wikipedia.org/wiki/Niemeyer-Dolan\\_technique](http://en.wikipedia.org/wiki/Niemeyer-Dolan_technique)
252. “Robust shadow-mask evaporation via lithographically controlled undercut”, B. Cord, C. Dams, and K. K. Berggren, J Aumentado, <http://www.rle.mit.edu/qnn/documents/cord-1-2006-41.pdf>
253. “Shadow Mask Evaporation”, <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/wasshuber/node51.html>
254. “Shadow masks”, snf, Labmembers Wiki, <https://snf.stanford.edu/SNF/processes/other-resources/shadow-masks>
255. “Integrated shadow mask method for patterning small molecule organic semiconductors”, Stijn De Vusser, Soeren Steudel, Kris Myny, Jan Genoe, and Paul Heremans, AIP|Scitation, <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/88/10/10.1063/1.2182008?ver=pdfcov>
256. “Semiconductor”, OneSource Semiconductor Gloassary, <http://www.semi1source.com/glossary/default.asp?searchterm=mask>
257. “The stencil method (shadow mask lithography)”, <http://lmis1.epfl.ch/webdav/site/lmis1/shared/Files/Projects/NaPa/The%20stencil%20method.pdf>

258. “Etching”, Wikipedia, the free encyclopedia, Sputtering/ Etching, <http://en.wikipedia.org/wiki/Sputtering#Etching>
259. “Electron-beam lithography”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Electron-beam\\_lithography](http://en.wikipedia.org/wiki/Electron-beam_lithography)
260. “Laser ablation”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Laser\\_ablation](http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_ablation)
261. “Flux”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Flux>, και <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A1%CE%BF%CE%AE>
262. “Sublimation (phase transition)”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Sublimation\\_\(phase\\_transition\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Sublimation_(phase_transition)), και <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CE%BE%CE%AC%CF%87%CE%BD%CF%89%CF%83%CE%B7>
263. “Dry etching”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Dry\\_etching](http://en.wikipedia.org/wiki/Dry_etching)
264. “Processing”, Wikipedia, the free encyclopedia, Semiconductor device fabrication/ Processing, [http://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor\\_device\\_fabrication#Processing](http://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor_device_fabrication#Processing)
265. “Wet Etching”, siliconfareast.com, <http://www.siliconfareast.com/wetetch.htm>
266. “Etching” ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/193841/etching>
267. “THE ETCHING PROCESS”, <http://www.artmondo.net/printworks/articles/process.htm>
268. “Wet and Dry Etching”, Avinash P. Nayak, Logeeswaran VJ and M. Saf Islam, University of California, Davis. California.
269. “Wet and Dry Etching”, Applied Physics 298r, <http://www.mrsec.harvard.edu/education/ap298r2004/Erli%20chen%20Fabrication%20III%20-%20Etching.pdf>
270. “Etching processes”, MEMSnet, <http://www.memsnet.org/mems/processes/etch.html>
271. “Χαρακτική”, Βικιπαίδεια, η ελεύθερη εγκυκλοπαίδεια, <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A7%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE>
272. “Plasma etching”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma\\_etching](http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_etching)
273. “Crystallization of polymers”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Crystallization\\_of\\_polymers](http://en.wikipedia.org/wiki/Crystallization_of_polymers)
274. “Crystallinity”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Crystallinity>, και <http://simple.wikipedia.org/wiki/Crystallinity>
275. “POLYMER CRYSTALLINITY”, Raghavendra R. Hegde, M. G. Kamath, Atul Dahiya, <http://www.engr.utk.edu/mse/Textiles/Polymer%20Crystallinity.htm>
276. “Polymer Chemistry, Polymer Crystallinity”, <http://faculty.uscupstate.edu/llever/Polymer%20Resources/Crystalline.htm>
277. “Crystallinity in polymers”, <http://pslc.ws/macrog/crystal.htm>



278. “Theory of film growth”,  
[http://ap.polyu.edu.hk/apakhwon/lecture\\_notes/Thin\\_Films1.pdf](http://ap.polyu.edu.hk/apakhwon/lecture_notes/Thin_Films1.pdf)
279. “Crystallite”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Crystallite>
280. “Stranski–Krastanov growth”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Stranski%E2%80%93Krastanov\\_growth](http://en.wikipedia.org/wiki/Stranski%E2%80%93Krastanov_growth)
281. “Adsorption”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Adsorption>, και  
<http://simple.wikipedia.org/wiki/Adsorption>
282. “Monolayer”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Monolayer>
283. “Nucleation”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Nucleation>
284. “Coalescence (chemistry)”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Coalescence\\_\(chemistry\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Coalescence_(chemistry))
285. “Bias stress effect in low-voltage organic thin-film transistors”, Ute Zschieschang, R. Thomas Weitz, Klaus Kern, Hagen Klauk, Applied Physics A, Materials Science & Processing, <http://www.fkf.mpg.de/408909/Zschieschang-ApplPhysA-2009-139.pdf>
286. “Bias Stress Effects in Organic Thin Film Transistors”, IEE Xplore, DIGITAL LIBRARY,  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4227640&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D4227640](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4227640&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4227640)
287. “ELECTRONIC AND STRUCTURAL PROPERTIES OF PENTACENE AT ORGANIC/INORGANIC INTERFACES”, Byoungnam Park,  
[http://xray.engr.wisc.edu/publications/thesis\\_byoungnam%20park.pdf](http://xray.engr.wisc.edu/publications/thesis_byoungnam%20park.pdf)
288. “Interface Modification of Pentacene OFET Gate Dielectrics”, Springer Link,  
[http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-540-95930-4\\_30#page-1](http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-540-95930-4_30#page-1)
289. “Optical and electrical properties of electrochemically doped organic field effect transistors“, Yumusak C, Abbas M, Sariciftci NS - J Lumin (2013), OPEN I beta, [http://openi.nlm.nih.gov/detailedresult.php?img=3587372\\_gr3&req=4](http://openi.nlm.nih.gov/detailedresult.php?img=3587372_gr3&req=4)
290. “List of materials properties”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_materials\\_properties](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_materials_properties)
291. “In semiconductors and insulators”, Wikipedia, the free encyclopedia, Electrical resistivity and conductivity/ In semiconductors and insulators,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_resistivity\\_and\\_conductivity](http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistivity_and_conductivity)
292. “Electrical properties of materials”, [http://www.science-campus.com/engineering/electrical/fundamentals/electrical\\_prop\\_mats.html](http://www.science-campus.com/engineering/electrical/fundamentals/electrical_prop_mats.html)

293. “Electric Properties of Solids”, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/elpro.html>
294. “TFT image”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Tft.png>
295. “Threshold voltage”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Threshold\\_voltage](http://en.wikipedia.org/wiki/Threshold_voltage)
296. “ORGANIC METAL-SEMICONDUCTOR FIELD-EFFECT
297. TRANSISTOR (OMESFET)”, ARASH TAKSHI, <https://mm.ece.ubc.ca/mediawiki/images/8/8e/Arash-Desertation.pdf>
298. “Interface Dipole : Effects on Threshold Voltage and Mobility for both Amorphous and Poly-crystalline Organic Field Effect Transistors”, C. Celle, C. Suspene, M. Ternisien, S. Lenfant, D. Guerin, K. Smaali, K. Lmimouni, J.P. Simonato, D. Vuillaume, <http://arxiv.org/abs/1402.0676>
299. “The Concept of “Threshold Voltage” in Organic Field-Effect Transistors”, Wiley Online Library, [http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/\(SICI\)1521-4095\(199808\)10:12%3C923::AID-ADMA923%3E3.0.CO;2-W/abstract](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/(SICI)1521-4095(199808)10:12%3C923::AID-ADMA923%3E3.0.CO;2-W/abstract)
300. “Shallow donor”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Shallow\\_donor](http://en.wikipedia.org/wiki/Shallow_donor)
301. “Theory of the Shallow Impurity States in Semiconductors”, APS JOURNALS ARCHIVE, Physical Review Letters, Physical Review, and Reviews of Modern Physics, <http://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.150.720>
302. “Shallow impurity states in semiconductors”, Springer Link, <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF02751504#page-1>
303. “THE SHALLOW IMPURITY STATES IN SEMICONDUCTORS”, Acta Physica Sinica, <http://wulixb.iphy.ac.cn/EN/abstract/abstract644.shtml>
304. “Distinguishing bulk traps and interface states in deep-level transient spectroscopy”, A V P Coelho, M C Adam and H Boudinov, IOP science, <http://iopscience.iop.org/0022-3727/44/30/305303>
305. “Interface and bulk trap generation in metal□oxide□semiconductor capacitors”, D. A. Buchanan and D. J. DiMaria, <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/67/12/10.1063/1.344534>
306. “Effect of bulk trap density on HfO/sub 2/ reliability and yield”, IEEE Xplore, DIGITAL LIBRARY, [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1269432&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D1269432](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1269432&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D1269432)
307. “A new charge pumping model considering bulk trap states in polysilicon thin film transistor”, ScienceDirect, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038110198001567>
308. “Electrical Characterization of Gate Traps in FETs With Ge and III–V Channels”, IEEE Xplore, DIGITAL LIBRARY, <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6576144>
309. “Charge trapping”, Dynamics of trapping and recombination, <http://students.chem.tue.nl/ifp20/pages/Chapter%202/ch2par4.html>

310. “Trap density of states in small-molecule organic semiconductors: A quantitative comparison
311. of thin-film transistors with single crystals”,  
<http://www.pnm.ethz.ch/docs/Kalb7.pdf>
312. “Surface states”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Surface\\_states](http://en.wikipedia.org/wiki/Surface_states)
313. “Trap states in organic field-effect transistors:
314. Quantification, identification and elimination”, <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:41808/eth-41808-02.pdf>
315. “Transconductance”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Transconductance#Field\\_effect\\_transistors](http://en.wikipedia.org/wiki/Transconductance#Field_effect_transistors)
316. “Electronic circuits”, Wikipedia, the free encyclopedia, Hysteresis/ Electronic circuits, [http://en.wikipedia.org/wiki/Hysteresis#Electronic\\_circuits](http://en.wikipedia.org/wiki/Hysteresis#Electronic_circuits)
317. “Electrical hysteresis”, Wikipedia, the free encyclopedia, Hysteresis/ Electrical hysteresis, [http://en.wikipedia.org/wiki/Hysteresis#Electrical\\_hysteresis](http://en.wikipedia.org/wiki/Hysteresis#Electrical_hysteresis)
318. “Inclusion compound”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Inclusion\\_compound](http://en.wikipedia.org/wiki/Inclusion_compound)
319. “Defects and impurities”, Wikipedia, the free encyclopedia, Crystal structure/ Defects and impurities,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Crystal\\_structure#Defects\\_and\\_impurities](http://en.wikipedia.org/wiki/Crystal_structure#Defects_and_impurities)
320. “Crystallization”, Wikipedia, the free encyclopedia, Crystal/ Crystallization,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Crystal#Crystallization>
321. “Defects, impurities, and twinning”, Wikipedia, the free encyclopedia, Crystal/Defects, impurities, and twinning,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Crystal#Defects.2C\\_impurities.2C\\_and\\_twinning](http://en.wikipedia.org/wiki/Crystal#Defects.2C_impurities.2C_and_twinning)
322. “Dangling bond”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Dangling\\_bond](http://en.wikipedia.org/wiki/Dangling_bond)
323. “Micro-encapsulation”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Micro-encapsulation>
324. “Integrated circuit”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Integrated\\_circuit](http://en.wikipedia.org/wiki/Integrated_circuit) και  
[http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9F%CE%BB%CE%BF%CE%BA%CE%BB%CE%B7%CF%81%CF%89%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CE%BF\\_%CE%BA%CF%8D%CE%BA%CE%BB%CF%89%CE%BC%CE%B1](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9F%CE%BB%CE%BF%CE%BA%CE%BB%CE%B7%CF%81%CF%89%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CE%BF_%CE%BA%CF%8D%CE%BA%CE%BB%CF%89%CE%BC%CE%B1)
325. “Electronic circuit”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic\\_circuit](http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_circuit)
326. “Process flow diagram”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Process\\_flow\\_diagram](http://en.wikipedia.org/wiki/Process_flow_diagram)
327. “Process flow”, Business Dictionary.com,  
<http://www.businessdictionary.com/definition/process-flow.html>
328. “Silicon dioxide”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Silicon\\_dioxide](http://en.wikipedia.org/wiki/Silicon_dioxide) και  
<http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CE%B9%CE%BF%CE%BE%CE%B5%CE%>

[AF%CE%B4%CE%B9%CE%BF\\_%CF%84%CE%BF%CF%85\\_%CF%80%CF%85%CF%81%CE%B9%CF%84%CE%AF%CE%BF%CF%85](http://www.ossila.com/oled_opv_ofet_catalogue3/OFET_substrates_equipment/E191-Long_channel_OFET_source_drain_evaporation_stack.php)

329. “OFET geometries available with the Ossila OFET fabrication system”, E191, Long Channel OFET Source-Drain Evaporation Stack/OFET geometries available with the Ossila OFET fabrication system,  
[http://www.ossila.com/oled\\_opv\\_ofet\\_catalogue3/OFET\\_substrates\\_equipment/E191-Long\\_channel\\_OFET\\_source\\_drain\\_evaporation\\_stack.php](http://www.ossila.com/oled_opv_ofet_catalogue3/OFET_substrates_equipment/E191-Long_channel_OFET_source_drain_evaporation_stack.php)
330. “Typical OFET configurations”, Tutorials on OE: OFET, Organic Field-effect Transistors, Organic Electronics @ NUS Science,  
<http://vhosts.science.nus.edu.sg/organicelectronics/?p=512>
331. “Passivation (chemistry)”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Passivation\\_\(chemistry\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Passivation_(chemistry))
332. “passivation”, THE FREE DICTIONARY BY FARLEX,  
<http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Passivation+layer>
333. “passivation”, Answers.com, <http://www.answers.com/topic/passivation>
334. “High Performance Organic Thin Film Transistors”, MRS Proceedings, MRS ONLINE PROCEEDINGS LIBRARY,  
<http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?fromPage=online&aid=8083833>
335. “Aluminium oxide”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium\\_oxide](http://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium_oxide) και  
[http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9F%CE%BE%CE%B5%CE%AF%CE%B4%CE%B9%CE%BF\\_%CF%84%CE%BF%CF%85\\_%CE%91%CF%81%CE%B3%CE%B9%CE%BB%CE%AF%CE%BF%CF%85](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9F%CE%BE%CE%B5%CE%AF%CE%B4%CE%B9%CE%BF_%CF%84%CE%BF%CF%85_%CE%91%CF%81%CE%B3%CE%B9%CE%BB%CE%AF%CE%BF%CF%85)
336. “Aluminum Oxide, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramic Properties”, Materials, ACCURATUS.com,  
<http://accuratus.com/alumox.html>
337. “Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) – Physicalm Mechanical, Thermal, Electrical and Chemical Properties – Supplier Data by Ceramaret”, Azom.com,  
<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=3382>
338. “Quenching”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Quenching> και  
[http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%92%CE%B1%CF%86%CE%AE\\_\(%CE%BC%CE%B5%CF%84%CE%B1%CE%BB%CE%BB%CE%BF%CF%85%CF%81%CE%B3%CE%AF%CE%B1\)](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%92%CE%B1%CF%86%CE%AE_(%CE%BC%CE%B5%CF%84%CE%B1%CE%BB%CE%BB%CE%BF%CF%85%CF%81%CE%B3%CE%AF%CE%B1))
339. “Quench (disambiguation)”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Quenching\\_\(disambiguation\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Quenching_(disambiguation))
340. “Aluminium”, Wikipedia, the free encyclopedia, Passivation (chemistry)/Aluminium,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Passivation\\_\(chemistry\)#Aluminium](http://en.wikipedia.org/wiki/Passivation_(chemistry)#Aluminium)
341. “Parylene Deposition” και “Variables that Influence the Parylene Coating Process”, SCS Parylene Coatings, Home > Parylene Knowledge > Parylene Deposition Process, SCS – SPECIALTY COATING SYSTEMS.com,  
[http://scscoatings.com/what\\_is\\_parylene/parylene\\_deposition.aspx](http://scscoatings.com/what_is_parylene/parylene_deposition.aspx)
342. “Plastic encapsulation for semiconductors”, ami.ac.uk,  
[http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0269\\_pem/index.html](http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0269_pem/index.html)

343. "Photoengraving", Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Photoengraving>
344. "Polyvinyl alcohol", Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinyl\\_alcohol](http://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinyl_alcohol)
345. "Plasma-enhanced chemical vapor deposition", Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma-enhanced\\_chemical\\_vapor\\_deposition](http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma-enhanced_chemical_vapor_deposition)
346. "Improved stability of solution processed photovoltaic devices using PQT-12", ScienceDirect, Avery P. Yuen, Ah-Mee Hor, Stephen M. Jovanic, John S. Preston, Richard A. Klenkler, Nathan M. Bamsey, Rafik O. Loutfy, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024810005258>
347. "Octadecyltrichlorosilane", Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Octadecyltrichlorosilane>
348. "Semiconductor device modeling", Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor\\_device\\_modeling](http://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor_device_modeling)
349. "Transistor model", Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Transistor\\_models](http://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_models)
350. "IEEE Standards Association", Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_Standards\\_Association](http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_Standards_Association)
351. "Institute of Electrical and Electronics Engineers", Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE>
352. "1620-2004 - Standard for Test Methods for the Characterization of Organic Transistors and Materials", IEEE STANDARDS ASSOCIATION, <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1620-2004.html>
353. "1620.1-2006 - IEEE Standard for Test Methods for the Characterization of Organic Transistor-Based Ring Oscillators", IEEE STANDARDS ASSOCIATION, <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1620.1-2006.html>
354. "1620-2008 - IEEE Standard for Test Methods for the Characterization of Organic Transistors and Materials", IEEE STANDARDS ASSOCIATION, <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1620-2008.html>
355. "Scientific modelling", Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Scientific\\_modelling](http://en.wikipedia.org/wiki/Scientific_modelling)
356. "Outline of physics", Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Fundamental\\_physics](http://en.wikipedia.org/wiki/Fundamental_physics)
357. "Conceptual model", Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Model\\_\(abstract\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Model_(abstract))
358. "Conventional electrical unit", Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Conventional\\_electrical\\_unit](http://en.wikipedia.org/wiki/Conventional_electrical_unit)
359. "Technical standard", Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Technical\\_standard](http://en.wikipedia.org/wiki/Technical_standard)
360. "Test method", Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Test\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/Test_method)

361. “A novel characterization scheme for organic field-effect transistors”, [Journal of Physics D: Applied Physics](#), IOP science, <http://iopscience.iop.org/0022-3727/40/12/003>
362. “1620-2004 - Standard for Test Methods for the Characterization of Organic Transistors and Materials”, IEEE STANDARDS ASSOCIATION, <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1620-2004.html>
363. “1620.1-2006 - IEEE Standard for Test Methods for the Characterization of Organic Transistor-Based Ring Oscillators”, IEEE STANDARDS ASSOCIATION, <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1620.1-2006.html>
364. “1620-2008 - IEEE Standard for Test Methods for the Characterization of Organic Transistors and Materials”, IEEE STANDARDS ASSOCIATION, <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1620-2008.html>
365. “Electrical mobility”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_mobility](http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_mobility)
366. “Electron mobility”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Electron\\_mobility](http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_mobility) και [http://en.wikipedia.org/wiki/Electron\\_mobility#Field-effect\\_mobility](http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_mobility#Field-effect_mobility)
367. “Curve fitting”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Curve\\_fitting](http://en.wikipedia.org/wiki/Curve_fitting)
368. “Slope”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Slope>
369. “Channel length modulation”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Channel\\_length\\_modulation](http://en.wikipedia.org/wiki/Channel_length_modulation)
370. “Threshold voltage”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Threshold\\_voltage](http://en.wikipedia.org/wiki/Threshold_voltage) και [http://en.wikipedia.org/wiki/Pinch-off\\_voltage](http://en.wikipedia.org/wiki/Pinch-off_voltage)
371. “Large-signal model”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Large-signal\\_model](http://en.wikipedia.org/wiki/Large-signal_model) και [http://en.wikipedia.org/wiki/Transistor\\_models#Large-signal\\_nonlinear\\_models](http://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_models#Large-signal_nonlinear_models)
372. “Linear system”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Linear\\_system](http://en.wikipedia.org/wiki/Linear_system)
373. “The MOS Transistor in Weak Inversion”, MOSFET Operation in Weak and Moderate Inversion, R.R. Harrison, <http://www.ece.utah.edu/~harrison/ece5720/Subthreshold.pdf>
374. “The MOS Transistor in Strong Inversion”, Low-Power Circuit Design, R. Harrison, [http://heim.ifi.uio.no/~inf3410/docs/R\\_Harrison-MOS\\_Transistor\\_in\\_Strong\\_Inversion.pdf](http://heim.ifi.uio.no/~inf3410/docs/R_Harrison-MOS_Transistor_in_Strong_Inversion.pdf)
375. “Subthreshold conduction”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Subthreshold\\_conduction](http://en.wikipedia.org/wiki/Subthreshold_conduction)
376. “Modes of operation”, Wikipedia, the free encyclopedia, MOSFET/OSFET operation/ Modes of operation, [http://en.wikipedia.org/wiki/MOSFET#Modes\\_of\\_operation](http://en.wikipedia.org/wiki/MOSFET#Modes_of_operation)
377. “Subthreshold slope”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Subthreshold\\_slope](http://en.wikipedia.org/wiki/Subthreshold_slope)



378. “Current–voltage characteristic”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Current%E2%80%93voltage\\_characteristic](http://en.wikipedia.org/wiki/Current%E2%80%93voltage_characteristic)
379. “Capacitance–voltage profiling”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Capacitance\\_voltage\\_profiling](http://en.wikipedia.org/wiki/Capacitance_voltage_profiling)
380. “Depletion region”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Depletion\\_region](http://en.wikipedia.org/wiki/Depletion_region)
381. “Contact resistance”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Contact\\_resistance](http://en.wikipedia.org/wiki/Contact_resistance)
382. “Electrical contacts”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_contact](http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_contact)
383. “Series and parallel circuits”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Series\\_resistance](http://en.wikipedia.org/wiki/Series_resistance)
384. “Specific resistance”, [http://en.wikipedia.org/wiki/Specific\\_resistance](http://en.wikipedia.org/wiki/Specific_resistance)
385. “Parallel curve”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Parallel\\_curve](http://en.wikipedia.org/wiki/Parallel_curve)
386. “Translation (geometry)”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Translation\\_\(geometry\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Translation_(geometry))
387. “Gated four-probe measurements on pentacene thin-film transistors: Contact resistance as a function of gate voltage and temperature”, P.V. Pesavento, R.J. Chesterfield, C.R. Newman, C.D. Frisbie (2004), *J. Appl. Phys.* 96: 7312. Bibcode:2004JAP...96.7312P. doi:10.1063/1.1806533. Εναλλακτικά, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004JAP...96.7312P>, <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/96/12/10.1063/1.1806533>. Επίσης, <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5039643&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F4915369%2F5039587%2F05039643.pdf%3Farnumber%3D5039643>
388. “Time of flight”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Time-of-flight>
389. “Analysis of Transient Currents in Organic Field Effect Transistor: The Time-of-Flight Method”, M. Weis, J. Lin, D. Taguchi, T. Manaka and M. Iwamoto (2009), *J. Phys. Chem. C* 113: 18459. doi:10.1021/jp908381b. Εναλλακτικά, <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jp908381b>
390. “Hysteresis”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Hysteresis#Electronic\\_circuits](http://en.wikipedia.org/wiki/Hysteresis#Electronic_circuits)
391. “Leakage (electronics)”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Leakage\\_\(electronics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Leakage_(electronics))
392. “p–n junction”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/P%E2%80%93n\\_junction](http://en.wikipedia.org/wiki/P%E2%80%93n_junction)
393. “Bipolar junction transistor”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Bipolar\\_junction\\_transistor](http://en.wikipedia.org/wiki/Bipolar_junction_transistor)
394. “Failure modes of electronics”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Failure\\_modes\\_of\\_electronics](http://en.wikipedia.org/wiki/Failure_modes_of_electronics)
395. “Catastrophic failure”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Catastrophic\\_failure](http://en.wikipedia.org/wiki/Catastrophic_failure)

396. “Charge conservation”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Conservation\\_of\\_charge](http://en.wikipedia.org/wiki/Conservation_of_charge)
397. “Physical law of conservation”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Physical\\_law\\_of\\_conservation](http://en.wikipedia.org/wiki/Physical_law_of_conservation)
398. “Subthreshold slope”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Subthreshold\\_slope](http://en.wikipedia.org/wiki/Subthreshold_slope)
399. “Subthreshold conduction”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Subthreshold\\_conduction](http://en.wikipedia.org/wiki/Subthreshold_conduction)
400. “Physics of Semiconductor Devices”, S. M. Sze. New York: Wiley, 3rd ed., with Kwok K. Ng, 2007, chapter 6.2.4, p. 315, ISBN 978-0-471-14323-9.
401. “A 22nm high performance and low-power CMOS technology featuring fully-depleted tri-gate transistors, self-aligned contacts and high density MIM capacitors”, Auth, C.; Allen, C.; Blattner, A.; Bergstrom, D.; Brazier, M.; Bost, M.; Buehler, M.; Chikarmane, V.; Ghani, T.; Glassman, T.; Grover, R.; Han, W.; Hanken, D.; Hattendorf, M.; Hentges, P.; Heussner, R.; Hicks, J.; Ingerly, D.; Jain, P.; Jaloviar, S.; James, R.; Jones, D.; Jopling, J.; Joshi, S.; Kenyon, C.; Liu, H.; McFadden, R.; McIntyre, B.; Neiryneck, J.; Parker, C. (2012), 2012 Symposium on VLSI Technology (VLSIT). p. 131. doi:10.1109/VLSIT.2012.6242496. ISBN 978-1-4673-0847-2. Εναλλακτικά, <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6242496>
402. “Multiplicative inverse”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Reciprocal\\_\(mathematics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Reciprocal_(mathematics)) και <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CF%84%CE%AF%CF%83%CF%84%CF%81%CE%BF%CF%86%CE%BF%CF%82>
403. “Depletion region”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Depletion\\_region](http://en.wikipedia.org/wiki/Depletion_region)
404. “Thermal energy”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal\\_energy](http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_energy) και [http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%98%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%AE\\_%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%98%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1)
405. “Elementary charge”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Elementary\\_charge](http://en.wikipedia.org/wiki/Elementary_charge)
406. “Fermi–Dirac statistics”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Fermi\\_distribution](http://en.wikipedia.org/wiki/Fermi_distribution)
407. “Electrical resistance and conductance”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_conductance](http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_conductance) και [http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AE\\_%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%AF%CF%83%CF%84%CE%B1%CF%83%CE%B7](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%AF%CF%83%CF%84%CE%B1%CF%83%CE%B7)
408. “Channel length modulation”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Channel\\_length\\_modulation](http://en.wikipedia.org/wiki/Channel_length_modulation)
409. “Short-channel effect”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Short-channel\\_effect](http://en.wikipedia.org/wiki/Short-channel_effect)



410. “Single-crystal OFET and conductivity characteristics of hexacene”, nature chemistry, [http://www.nature.com/nchem/journal/v4/n7/fig\\_tab/nchem.1381\\_F5.html](http://www.nature.com/nchem/journal/v4/n7/fig_tab/nchem.1381_F5.html)
411. “MOSFET Output Resistance”, MOSFET Output Resistance, Jim Stiles, The Univ. of Kansas, 11/5/2004, <http://www.itc.ku.edu/~jstiles/312/handouts/MOSFET%20Output%20Resistance.pdf>
412. “Conventional electrical unit”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Conventional\\_electrical\\_unit](http://en.wikipedia.org/wiki/Conventional_electrical_unit)
413. “Electrical Characterization of Organic Electronic Materials and Devices”, WILEY, Professor Peter Stallinga, ISBN: 978-0-470-75009-4, <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-047075009X.html>
414. “Electrical characterization of semiconductor materials and devices—review”, M.J. Deen, F. Pascal, Springer Link, <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10854-006-0001-8#page-1>
415. “Ion beam”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Ion\\_beam](http://en.wikipedia.org/wiki/Ion_beam)
416. “Electrical characterization“, namlab, nanoelectronic materials laboratory, [http://www.namlab.com/pages/285\\_284\\_en\\_research\\_materials\\_competences\\_eleccharacterization.htm](http://www.namlab.com/pages/285_284_en_research_materials_competences_eleccharacterization.htm)
417. “Electrical characterization”, Freiberg Instruments Inline Metrology, Electrical characterization – important material parameters, <http://www.freiberginstruments.com/technology/electrical-characterization.html>
418. “Electrical Characterization Techniques  
419. for Semiconductors and  
420. Semiconductor-Dielectric Interfaces  
a. A Review”, M.J. Deen, Electrical and Computer Engineering, CRL 226, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada L8S 4K1, E-mail: [jamal@mcmaster.ca](mailto:jamal@mcmaster.ca), <http://www.electrochem.org/dl/ma/201/pdfs/0370.pdf>
421. “Semiconductor characterization techniques”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor\\_characterization\\_techniques](http://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor_characterization_techniques)
422. “Electrical measurements”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_measurements](http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_measurements)
423. “Function generator”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Function\\_generator](http://en.wikipedia.org/wiki/Function_generator)
424. “Semiconductor curve tracer”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor\\_curve\\_tracer](http://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor_curve_tracer)
425. “Characterization (disambiguation)”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Characterization\\_\(disambiguation\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Characterization_(disambiguation))
426. “Characterization (materials science)”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Characterization\\_\(materials\\_science\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Characterization_(materials_science))
427. “Electronic test equipment”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic\\_test\\_equipment](http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_test_equipment)
428. “Transfer function”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Transfer\\_characteristic](http://en.wikipedia.org/wiki/Transfer_characteristic)

429. “Electronic filter”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic\\_filter](http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_filter) και [http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CF%8C\\_%CF%86%CE%AF%CE%B%CF%84%CF%81%CE%BF](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CF%86%CE%AF%CE%B%CF%84%CF%81%CE%BF)
430. “Sweep generator”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Sweep\\_generator](http://en.wikipedia.org/wiki/Sweep_generator)
431. “Sweep generator”, Answers.com, <http://www.answers.com/topic/sweep-generator-electronics>
432. “Extrapolation”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Extrapolation>
433. “Current–voltage characteristic”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Current-voltage\\_characteristic](http://en.wikipedia.org/wiki/Current-voltage_characteristic)
434. “Small-signal model”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Small-signal\\_model](http://en.wikipedia.org/wiki/Small-signal_model)
435. “Large-signal model”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Large-signal\\_model](http://en.wikipedia.org/wiki/Large-signal_model)
436. “Finite difference”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Finite\\_differences](http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_differences)
437. “Oscillograph”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Oscillograph>
438. “Oscilloscope”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Oscilloscope>
439. “Electromagnetic oscillograph”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic\\_oscillograph](http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_oscillograph)
440. “System integration”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Systems\\_integration](http://en.wikipedia.org/wiki/Systems_integration)
441. “Capacitance-Voltage Measurement”, <http://web.pdx.edu/~davide/Lecture6.pdf>
442. “Light-emitting OFETs”, Wikipedia, the free encyclopedia, Organic field-effect transistor/Light-emitting OFETs, [http://en.wikipedia.org/wiki/Organic\\_field-effect\\_transistor#Light-emitting\\_OFETs](http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_field-effect_transistor#Light-emitting_OFETs)
443. Hepp, Aline; Heil, Holger; Weise, Wieland; Ahles, Marcus; Schmechel, Roland; Von Seggern, Heinz (2003). "Light-Emitting Field-Effect Transistor Based on a Tetracene Thin Film". *Phys. Rev. Lett.* 91 91 (15): 157406. Bibcode:2003PhRvL..91o7406H. doi:10.1103/PhysRevLett.91.157406. Εναλλακτικά, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2003PhRvL..91o7406H>, <http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.91.157406>
444. "Ambipolar Light-Emitting Transistors of a Tetracene Single Crystal", T. Takahashi, T. Takenobu, J. Takeya, Y. Iwasa (2007). "Ambipolar Light-Emitting Transistors of a Tetracene Single Crystal". *Advanced Functional Materials* 17 (10): 1623–1628. doi:10.1002/adfm.200700046. Εναλλακτικά, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adfm.200700046/abstract>. Επίσης, [http://en.wikipedia.org/wiki/Tetracene#cite\\_note-1](http://en.wikipedia.org/wiki/Tetracene#cite_note-1)

445. “Electroluminescence”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Electroluminescence>
446. “Gold plating”, Wikipedia, the free encyclopedia, Gold plating/Electronics,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Gold\\_plating](http://en.wikipedia.org/wiki/Gold_plating)
447. “Exciton”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Exciton>
448. “εξιτόνιο”, ygeiaonline.gr,  
[http://www.ygeiaonline.gr/index.php?option=com\\_k2&view=item&id=16628:ejitonio](http://www.ygeiaonline.gr/index.php?option=com_k2&view=item&id=16628:ejitonio)
449. “Βελτίωση απόδοσης φωτοβολταϊκών στοιχείων με τη δημιουργία πολλαπλών  
εξιτονίων”, Σεμινάριο Φυσικής, ΕΜΠ,  
[http://www.physics.ntua.gr/pdf\\_doc\\_files/seminario\\_fysikhs\\_2012/2012%20Kopsalis%20Ioannis.pdf](http://www.physics.ntua.gr/pdf_doc_files/seminario_fysikhs_2012/2012%20Kopsalis%20Ioannis.pdf)
450. “Applications of liquid crystals”, Wikipedia, the free encyclopedia, Liquid  
crystal/Applications of liquid crystals,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Liquid\\_crystal#Applications\\_of\\_liquid\\_crystals](http://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_crystal#Applications_of_liquid_crystals)
451. “Liquid-crystal display”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Liquid\\_crystal\\_display](http://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_crystal_display)
452. “Smart glass”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Smart\\_glass](http://en.wikipedia.org/wiki/Smart_glass)
453. “Polymer dispersed liquid crystal devices”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
Smart glass/Polymer dispersed liquid crystal devices,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Smart\\_glass#Polymer\\_dispersed\\_liquid\\_crystal\\_devices](http://en.wikipedia.org/wiki/Smart_glass#Polymer_dispersed_liquid_crystal_devices),  
[http://en.wikipedia.org/wiki/LCD\\_classification#Polymer\\_Dispersed\\_Liquid\\_Crystals](http://en.wikipedia.org/wiki/LCD_classification#Polymer_Dispersed_Liquid_Crystals)
454. “Polarizer”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Polarizer>
455. “Samsung Galaxy S3 SIII GT-i9300 - White Full LCD Display+Touch  
Screen”, amazon.com, [http://www.amazon.com/Samsung-Galaxy-SIII-GT-i9300-  
Replacement/dp/B009OZWQRM](http://www.amazon.com/Samsung-Galaxy-SIII-GT-i9300-Replacement/dp/B009OZWQRM)
456. “Passive matrix addressing”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Passive\\_matrix](http://en.wikipedia.org/wiki/Passive_matrix)
457. “Active matrix”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Active-matrix>
458. “Nixie tube”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Nixie\\_tube](http://en.wikipedia.org/wiki/Nixie_tube)
459. “Light-emitting diode”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/LED>
460. “Vacuum fluorescent display”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum\\_fluorescent\\_display](http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum_fluorescent_display)
461. “Display device”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Display\\_device](http://en.wikipedia.org/wiki/Display_device)
462. “Flexible electronics”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Flexible\\_electronics](http://en.wikipedia.org/wiki/Flexible_electronics),  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Flexible\\_display#Technical\\_details](http://en.wikipedia.org/wiki/Flexible_display#Technical_details)

463. “Electronic paper”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic\\_paper](http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_paper)
464. “Electrophoretic display”, Wikipedia, the free encyclopedia, Electronic paper/Electrophoretic display, [http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic\\_paper#Electrophoretic\\_display](http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_paper#Electrophoretic_display)
465. “What is an Electrophoretic Display?”, wiseGEEK, clear answers for common questions, <http://www.wisegeek.com/what-is-an-electrophoretic-display.htm>
466. “Electrowetting”, Wikipedia, the free encyclopedia, Electronic paper/Electrowetting, [http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic\\_paper#Electrowetting](http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_paper#Electrowetting)
467. “Backplane”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Backplane>
468. “Report: e-Paper market is just too big to miss out”, BRIGHT SIDE OF NEWS.com, <http://www.brightsideofnews.com/2009/08/26/report-e-paper-market-is-just-too-big-to-miss-out/>
469. “HP and Arizona State University Demo Flexible Displays”, OLED-DISPLAY.net, <http://www.oled-display.net/hp-and-arizona-state-university-demo-flexible-displays/>
470. “Hydrophobe”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrophobic>
471. “New electrowetting technique could do e-paper on real paper, lead to disposable Kindles”, engadget.com, <http://www.engadget.com/2010/11/24/new-electrowetting-technique-could-do-e-paper-on-real-paper-lea/>
472. “Titanium dioxide”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Titanium\\_dioxide](http://en.wikipedia.org/wiki/Titanium_dioxide)
473. “Sensor”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Sensor>, <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%B9%CF%83%CE%B8%CE%B7%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B1%CF%82>
474. “Sensor array”, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Sensor\\_array](http://en.wikipedia.org/wiki/Sensor_array)
475. “Actuator”, Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Actuator>
476. “Highly Sensitive OFET Sensors for Nerve Agent and Explosive Detection”, Johns Hopkins University, <http://p0217.projects.make-things.com/index.php/research/detail/highly-sensitive-ofet-sensors-for-nerve-agent-and-explosive-detection>
477. “Polymer composite-based OFET sensor with improved sensitivity towards nitro based explosive vapors”, ResearchGate.net, [http://www.researchgate.net/publication/245084729\\_Polymer\\_composite-based\\_OFET\\_sensor\\_with\\_improved\\_sensitivity\\_towards\\_nitro\\_based\\_explosive\\_vapors](http://www.researchgate.net/publication/245084729_Polymer_composite-based_OFET_sensor_with_improved_sensitivity_towards_nitro_based_explosive_vapors)
478. “Highly Sensitive Chemical-Vapor Sensor Based on Thin-Film Organic Field-Effect Transistors (OFETs) with Benzothiadiazole-Fused-Tetrathiafulvalene”,

- ADVANCED FUNCTIONAL MATERIALS, Wiley Online Library,  
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adfm.201202473/abstract>
479. “Real-time vapour sensing using an OFET-based electronic  
 480. nose and genetic programming”, *Sensors and Actuators B: Chemical*,  
 ELSEVIER, [http://dbkgroup.org/Papers/wedge\\_sensact09.pdf](http://dbkgroup.org/Papers/wedge_sensact09.pdf)
481. “Polymer composite-based OFET sensor with improved sensitivity towards  
 nitro based explosive vapors”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, ELSEVIER,  
 ScienceDirect.com,  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400510003503>
482. “Printed Sensors and Electronic Circuits based on Organic Field Effect  
 Transistors”, THE SENSORS, ACTUATORS AND MICROSYSTEMS  
 LABORATORY – SAMLAB, ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE  
 LAUSANNE – EPFL, <http://samlab.epfl.ch/page-100617-en.html>
483. “OFET Sensors with Poly 3-hexylthiophene and Pentacene as Channel  
 Materials for Ionizing Radiation”, MRS Proceedings, journals.cambridge.org,  
<http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?fromPage=online&aid=8486675>
484. “Polymer composite-based OFET sensor with improved sensitivity towards  
 nitro based explosive vapors”, dspace.library.iitb.ac.in,  
<http://dspace.library.iitb.ac.in/jspui/handle/10054/7451>
485. “Using Polymer Field Effect Transistors as Sensors”, polymersolutions.com,  
<http://www.polymersolutions.com/blog/polymer-field-effect-transistors-as-sensors/>
486. “Antenna gain”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Antenna\\_gain](http://en.wikipedia.org/wiki/Antenna_gain)
487. “Korea now draws organic transistors using ‘capillary pen’ ”, KOREA.net,  
<http://www.korea.net/NewsFocus/Sci-Tech/view?articleId=112093>
488. “Signal processing”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Signal\\_processing](http://en.wikipedia.org/wiki/Signal_processing)
489. “Radar”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/RADAR>
490. “Sonar”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/SONAR>
491. “Seismology”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Seismology>
492. “Diagnosis”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Fault\\_diagnosis](http://en.wikipedia.org/wiki/Fault_diagnosis)
493. “Flexible Printed Gas Sensors”, THE SENSORS, ACTUATORS AND  
 MICROSYSTEMS LABORATORY – SAMLAB, <http://samlab.epfl.ch/page-15521.html>
494. “Radio-frequency identification”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Radio-frequency\\_identification](http://en.wikipedia.org/wiki/Radio-frequency_identification) και  
<http://el.wikipedia.org/wiki/RFID>
495. “Electronic toll collection”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic\\_toll\\_collection](http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_toll_collection)

496. “Electronic Road Pricing”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic\\_Road\\_Pricing](http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_Road_Pricing)
497. “New RFID Tag Could Mean the End of Bar Codes”, wired.com,  
<http://www.wired.com/2010/03/rfid/>
498. “Barcode”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Barcode> κ01  
[http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A1%CE%B1%CE%B2%CE%B4%CF%89%CF%84%CF%8C%CF%82\\_%CE%BA%CF%8E%CE%B4%CE%B9%CE%BA%CE%B1%CF%82](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A1%CE%B1%CE%B2%CE%B4%CF%89%CF%84%CF%8C%CF%82_%CE%BA%CF%8E%CE%B4%CE%B9%CE%BA%CE%B1%CF%82)
499. “Biometric passport”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Biometric\\_passport](http://en.wikipedia.org/wiki/Biometric_passport)
500. “Microchip implant (human)”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Microchip\\_implant\\_\(human\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Microchip_implant_(human))
501. “Transponder timing”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Transponder\\_timing](http://en.wikipedia.org/wiki/Transponder_timing)
502. “Electronic Product Code”, Wikipedia, the free encyclopedia,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic\\_Product\\_Code](http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_Product_Code)
503. “Choosing the Right RFID Technology”, barcodesinc.com,  
<http://www.barcodesinc.com/info/buying-guides/rfid.htm>
504. “RFID tag”, itlaw.wikia.com, [http://itlaw.wikia.com/wiki/RFID\\_tag](http://itlaw.wikia.com/wiki/RFID_tag)
505. “RFID reader”, itlaw.wikia.com, [http://itlaw.wikia.com/wiki/RFID\\_reader](http://itlaw.wikia.com/wiki/RFID_reader)