

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ  
ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ/ΑΝΟΡΓΑΝΩΝ  
ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ  
ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝ ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΑΝΔΡΕΑΣ ΗΛΙΑΣ ,ΑΝΔΡΕΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ:ΣΤΑΘΑΤΟΣ ΗΛΙΑΣ**

**ΠΑΤΡΑ 2018**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</u> .....σελ.5
----------------------------

<u>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</u> .....σελ.7
----------------------------

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο:Εισαγωγικές έννοιες

1.1 Φυσική των στοιχειωδών σωματιδίων.....σελ.9
1.2 Ενεργειακές ζώνες.....σελ.10
1.3 Ηλεκτρόνια και οπές.....σελ.13
1.4 Αγωγοί-Μονωτές-Ημιαγωγοί.....σελ.14
1.5 Ενεργειακή δομή αγωγών-μονωτών-ημιαγωγών.....σελ.15

#### Αγωγοί και μονωτές υπό την εφαρμογή εξωτερικού πεδίου

1.6 Μονωτές/Διηλεκτρικά.....σελ.17
1.7 Αγωγοί.....σελ.19
1.8 Ημιαγωγοί.....σελ.20
1.9 Ημιαγωγοί έμμεσου και άμεσου ενεργειακού χάσματος.....σελ.21
1.10 Ενδογενείς ημιαγωγοί.....σελ.22
1.11 Ημιαγωγοί προσμίξεων.....σελ.22
1.12 Επαφή p-n.....σελ.23
1.13 Ανοικτό κύκλωμα.....σελ.24
1.14 Ορθή και ανάστροφη πόλωση.....σελ.26
1.15 LED Δίοδοι.....σελ.27
1.16 P-I-N Δίοδος.....σελ.28
1.17 Διπολικά τρανζίστορς (Bipolar Junction Transistors).....σελ.29
1.18 Τρανζίστορ FET - Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (Field Effect Transistor).σελ.31
1.19 MOSFET.....σελ.32
1.20 JFET.....σελ.35

#### Οπτοηλεκτρονικά συστήματα

1.21 Φωτοβολταϊκά.....σελ.36
1.22 Κυματοδηγοί.....σελ.37
1.23 Λείζερ.....σελ.38

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο:**

### **Ανόργανα οπτοηλεκτρονικά συστήματα**

2.1 Εισαγωγή.....	σελ.40
2.2 Πυρίτιο.....	σελ.40
2.3 Περιγραφή του στοιχείου.....	σελ.40
2.4 Αγωγιμότητα πυριτίου.....	σελ.41
2.5 Πορώδες πυρίτιο.....	σελ.42
2.6 Κρυσταλλικό πυρίτιο σε εφαρμογές laser.....	σελ.44
2.7 Κρυσταλλικό πυρίτιο σε φωτοβολταϊκά κελιά.....	σελ.46
2.8 Ιδιότητες κυματοδήγησης πορώδους πυριτίου.....	σελ.47
2.9 Οπτοηλεκτρονικές συσκευές με πορώδες πυρίτιο.....	σελ.49
2.10 Σχεδιασμός κυματοδηγών.....	σελ.50
2.11 Μη γραμμικοί κυματοδηγοί πορώδους πυριτίου.....	σελ.50
2.12 Γερμάνιο.....	σελ.51
2.13 Χημική σύσταση γερμανίου.....	σελ.51
2.14 Κρυσταλλική δομή γερμανίου.....	σελ.52
2.15 Ενεργειακή δομή γερμανίου.....	σελ.53
2.16 Γερμάνιο σε οπτοηλεκτρονικές συσκευές με βάση το πυρίτιο.....	σελ.54
2.17 Γερμάνιο σε φωτοαισθητήρες.....	σελ.55
2.18 Laser με γερμάνιο πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου.....	σελ.59
2.19 Υλικά και τεχνολογίες ανόργανων φωτοβολταϊκών κελιών.....	σελ.59
2.20 Φωτοβολταϊκά 1ης γενιάς.....	σελ.59

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο:Οργανικά ηλεκτρονικά**

3.1 Εισαγωγή.....	σελ.61
3.2 Το άτομο του άνθρακα.....	σελ.62
3.3 Ηλεκτρονική διάταξη του ατόμου του άνθρακα.....	σελ.62
3.4 Οργανικά ηλεκτρονικά.....	σελ.64
3.5 Organic Field Effect Transistors.....	σελ.64

3.6 Οργανικά τρανζίστορες λεπτών υμενίων (Organic thin-film transistors OTFTS) .....	σελ.65
3.7 Οργανικές φωτοδίοδοι.....	σελ.67
3.8 Οργανικά φωτοβολταϊκά.....	σελ.71
3.9 Αρχή λειτουργίας OPVs.....	σελ.71
3.10 Δημιουργία φωτορεύματος.....	σελ.72
<u>Είδη οργανικών φωτοβολταϊκών (Organic photovoltaics-OPVs)</u>	
3.11 OPVs μονού υποστρώματος (Single Layer OPVs).....	σελ.75
3.12 OPVs διπλού υποστρώματος (Bilayer OPVs).....	σελ.76
3.13 Bulk Heterojunction OPVs.....	σελ.76
<b><u>ΕΠΙΛΟΓΟΣ</u></b> .....	<b>σελ.80</b>
<b><u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u></b> .....	<b>σελ.81</b>

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα οπτοηλεκτρονικά συστήματα αποτελούν διατάξεις οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως σε ένα μεγάλο φάσμα εφαρμογών. Η βάση για την κατασκευή τους είναι ανόργανα και οργανικά ημιαγώγιμα υλικά. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής πραγματοποιείται μια όσο το δυνατό πιο λεπτομερής ανάλυση της τεχνολογίας των οπτοηλεκτρονικών συστημάτων, ανάλυση η οποία στηρίζεται σε βιβλιογραφικές αναφορές.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται βασικές εισαγωγικές έννοιες της φυσικής της στερεάς κατάστασης εστιάζοντας πιο πολύ στο πεδίο της φυσικής των ημιαγωγών. Συγκεκριμένα, περιγράφεται η δομή των υλικών και ο τρόπος κατηγοριοποίησης τους με βάση την αγωγιμότητα τους. Έπειτα γίνεται μια εκτενής περιγραφή της δομής και λειτουργίας των ημιαγωγών, εστιάζοντας ιδιαίτερα στους μηχανισμούς με τους οποίους ενισχύεται ή αποδυναμώνεται η αγωγιμότητα τους. Τέλος, γίνεται μια περιγραφή των βασικών πρώτων εφαρμογών των ημιαγωγών σε ηλεκτρονικές διατάξεις (LED, BJT transistor, FET κ.τ.λ.), ως ένα στάδιο το οποίο προπορεύεται των επόμενων δύο κεφαλαίων, όπου εν τέλει γίνεται η κατηγοριοποίηση τους σε ανόργανα και οργανικά υλικά.

Το 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναφέρεται στην εφαρμογή των ανόργανων υλικών σε οπτοηλεκτρονικές διατάξεις. Τα δύο υλικά που επικρατούν τις τελευταίες δεκαετίες σε αυτές τις εφαρμογές είναι το πυρίτιο και το γερμάνιο. Μέσα από βιβλιογραφικές αναφορές περιγράφονται η φυσική και η τεχνολογία που σχετίζονται με τα δυο υλικά πυλώνες της ηλεκτρονικής τεχνολογίας. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η πρόοδος στην σύνθεση και στη δομή υλικών με βάση το πυρίτιο και το γερμάνιο έχει συμπαρασύρει την πρόοδο της οπτοηλεκτρονικής τεχνολογίας. Παράλληλα με τα επιτεύγματα πάνω στη βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων των δύο αυτών υλικών παρουσιάζονται και τεχνολογικές εφαρμογές στις οποίες έχουν αξιοποιηθεί.

Τα οργανικά υλικά στα οποία αντιστοιχεί το 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο είναι υλικά των οποίων η δομή στηρίζεται σε ενώσεις άνθρακα, συνεπώς στην αρχή το 4<sup>ο</sup> Κεφαλαίου υλοποιείται μια πρώτη λεπτομερής περιγραφή της ατομικής δομής του άνθρακα και των τρόπων με τους οποίους συμμετέχει σε ενώσεις με βάση την ηλεκτρονιακή του δομή. Έπειτα, σε μια αντίστοιχη λογική με το 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

παρουσιάζονται τόσο τεχνολογικά επιτεύγματα που σχετίζονται με την ανάπτυξη και δημιουργία βέλτιστων υλικών με βάση των άνθρακα και κατ' επέκταση οι τρόποι με τους οποίους χρησιμοποιούνται τα υλικά αυτά σε οπτοηλεκτρονικές εφαρμογές όπως είναι για παράδειγμα τα φωτοβολταϊκά.

Το τελευταίο κεφάλαιο αποτελεί τον επίλογο της παρούσας διπλωματικής στο οποίο συνοψίζονται κάποια συμπεράσματα, τα οποία προκύπτουν μέσα από όλα τα κεφάλαια της διπλωματικής.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι οπτοηλεκτρονικές διατάξεις αποτελούν συστήματα των οποίων η τεχνολογία συνδυάζει τεχνολογικά επιτεύγματα του πεδίου της ηλεκτρονικής και της οπτικής ταυτόχρονα. Από την εφεύρεση των τρανζίστορ και μετά η εξέλιξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών συστημάτων είναι ραγδαία. Παράλληλα οι ανάγκες για δημιουργία και εφαρμογή ευέλικτων συστημάτων, τα οποία θα μπορούν να ενταχθούν σε εφαρμογές παραγωγής και οδήγησης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, ενέπνευσε τους ερευνητές να μελετήσουν, να αναπτύξουν και να κατασκευάσουν αντάξιες διατάξεις οι οποίες αξιοποιούν την ήδη γνωστή τεχνολογία που σχετίζεται με το πεδίο της ηλεκτρονικής (τρανζίστορ).

Τα τρανζίστορ αποτελεί μια διάταξη η οποία με κατάλληλη συνδεσμολογία σε ένα κύκλωμα μπορεί να οδηγήσει στην ενίσχυση του σήματος με το οποίο τροφοδοτείται. Η πολύ σημαντική αυτή εφεύρεση, η οποία ήρθε να αντικαταστήσει τις λυχνίες που χρησιμοποιούντο μέχρι τότε, αποτέλεσε το ορόσημο μιας νέας τεχνολογικής περιόδου, μιας και μειώθηκε ο όγκος που καταλάμβαναν οι μέχρι τότε ηλεκτρονικές συσκευές, ενώ παράλληλα βελτιώθηκε η απόδοσή τους.

Το τρανζίστορ όπως και όλες οι ηλεκτρονικές και οπτοηλεκτρονικές διατάξεις είναι απόρροια σωστής σύνθεσης ημιαγωγικών υλικών. Τα ημιαγωγικά υλικά αποτελούν μια κατηγορία υλικών, τα οποία έχουν την ιδιότητα να αναπροσαρμόζουν την αγωγιμότητά τους, η οποία εξαρτάται από την ηλεκτρονιακή τους δομή. Στη φύση υπάρχουν ορισμένα υλικά όπως το γερμάνιο το πυρίτιο, ο άνθρακας τα οποία μπορούν να εμφανίσουν αυτή την τόσο σημαντική ιδιότητα για τη χρήση τους.

Με την κατάλληλη επεξεργασία συνεπώς, δημιουργήθηκαν ανόργανα οπτοηλεκτρονικά συστήματα τα οποία εμπεριέχουν πυρίτιο, γερμάνιο ή συνδυασμό και των δύο σε ειδικές διαμορφώσεις, είτε συστήματα τα οποία εμπεριέχουν συνθέσεις υλικών που έχουν ως βάση τον άνθρακα δημιουργώντας αντίστοιχα τη μεγάλη κατηγορία των οργανικών οπτοηλεκτρονικών συστημάτων.

Τα ανόργανα οπτοηλεκτρονικά συστήματα είναι τα πλέον διαδεδομένα στην αγορά μιας και οι πρώτες ηλεκτρονικές διατάξεις (τρανζίστορ) κατασκευάστηκαν από αυτά τα υλικά. Η τεχνολογία των ανόργανων υλικών χρησιμοποιήθηκε και συνεχίζει να χρησιμοποιείται ευρέως εξαιτίας των φοβερών ημιαγωγικών ιδιοτήτων που

διαθέτουν αυτά τα δύο υλικά. Η έρευνα στον τομέα αυτό εξακολουθεί μέχρι και σήμερα, μιας και πλέον η ηλεκτρονική τεχνολογία στηρίζεται άμεσα από την εξέλιξη της μικρο- και νάνο- τεχνολογίας.

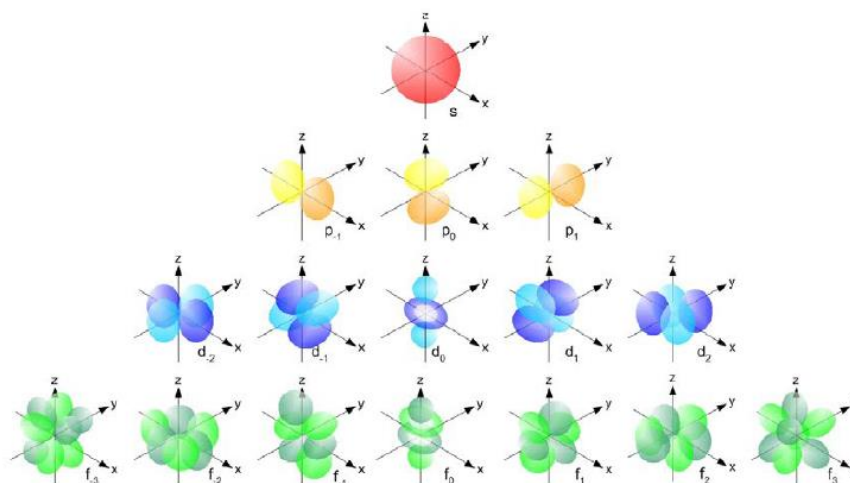
Σε αντίστοιχη λογική κινείται και ο πολυχρησιμοποιημένος άνθρακας. Το στοιχείο αυτό σε συνδυασμό με άλλα υλικά και με κατάλληλη επεξεργασία έχει αποδώσει συστήματα πολύ υψηλής τεχνολογίας και ηλεκτρονικής/όπτοηλεκτρονικής απόδοσης. Αντίστοιχα όπως και με τα ανόργανα υλικά, η εξέλιξη των συνθέσεων και των συστημάτων στα οποία μετέχει συμβαδίζει άμεσα με την πρόοδο της νάνο-τεχνολογίας.



## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> : Εισαγωγικές έννοιες

### 1.1 Φυσική των στοιχειωδών σωματιδίων

Όλα τα υλικά είναι δομημένα από άτομα, τα οποία έχουν στο κέντρο τους τον θετικά φορτισμένο πυρήνα, όπου είναι συγκεντρωμένη η περισσότερη από τη μάζα του ατόμου. Γύρω από τον πυρήνα περιστρέφονται ηλεκτρόνια, τα οποία είναι φορείς αρνητικού φορτίου. Οι ιδιότητες των υλικών εξαρτώνται από τον τρόπο σύνδεσης των ατόμων που τα αποτελούν (ισχυρές ή ασθενείς συνδέσεις), και αντίστοιχα πως και κατά πόσο αλληλοεπιδρούν τα ηλεκτρόνια και ο πυρήνας με τα περιβάλλοντα άτομα. Η κατανομή των ηλεκτρονίων στο άτομο καθορίζει τους δεσμούς που θα σχηματισθούν με τα γειτονικά άτομα του υλικού. Οι δεσμοί καθορίζουν τόσο τις οπτικές όσο και τις ηλεκτρονικές ιδιότητες των υλικών. Ο τρόπος κίνησης των ηλεκτρονίων περιγράφεται από κυματοσυναρτήσεις οι οποίες προκύπτουν μέσα από την λύση της εξίσωσης του Schroedinger. Συγκεκριμένα, τα ηλεκτρόνια κινούνται μέσα σ' ένα δυναμικό το οποίο διαμορφώνεται μέσω των πεδίων που δημιουργούν τα φορτία του πυρήνα και των ηλεκτρονίων. Εξαιτίας των πεδίων αυτών προκύπτει τόσο η κίνηση όσο και η περιστροφή των ηλεκτρονίων σε προδιαγεγραμμένα ατομικά τροχιακά.



Εικόνα 1.1: Ατομικά Τροχιακά

Τα ατομικά τροχιακά τα οποία χαρακτηρίζουν την κίνηση κάθε υλικού συνδέονται άμεσα τους κβαντικούς αριθμούς που τα χαρακτηρίζουν. Συγκεκριμένα, πρόκειται για τους κβαντικούς αριθμούς  $n$ ,  $l$  και  $m$ . Ο κβαντικός αριθμός  $n$  προσδιορίζει την κύρια στην οποία περιστρέφεται το ηλεκτρόνιο. Ο  $l$  προσδιορίζει την ολική στροφορμή του ηλεκτρονίου, η οποία χαρακτηρίζει τον τρόπο περιστροφής του σε σχέση με τον πυρήνα του ατόμου. Τέλος ο  $m$  προσδιορίζει την προβολή της στροφορμής του ηλεκτρονίου στον άξονα περιστροφής του. Εξαιτίας της προβολής, προκύπτουν πέραν τον κύριων στοιβάδων και κάποιες υποστοιβάδες στις οποίες μπορεί να περιστρέφεται το αντικείμενο με κοινή στροφορμή αλλά με διαφορετική κλίση σε σχέση με τον κύριο άξονα περιστροφής του. Οι υποστοιβάδες αυτές είναι γνωστές με τα γράμματα  $s, p, d, f$  κτλ. με την  $s$  να αποτελεί την υποστοιβάδα η οποία βρίσκεται πιο κοντά στον πυρήνα του ατόμου. Η απαγορευτική αρχή του Pauli αποτελεί μια ακόμα παράμετρο εξαιτίας της οποίας διαμορφώνεται η τελική κίνηση των ηλεκτρονίων. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την αρχή του Pauli ηλεκτρόνια τα οποία χαρακτηρίζονται την ίδια προβολή του  $spin$  (ιδιοστροφορμή) δεν μπορούν να βρίσκονται ταυτόχρονα στην ίδια στοιβάδα. Η βασική διαμόρφωση των ατομικών τροχιακών διαφαίνεται στην Εικόνα 1.1.

Όταν δύο άτομα πλησιάσουν, τα γειτονικά τροχιακά τους αλληλοεπικαλύπτονται με αποτέλεσμα το σχηματισμό δεσμών, οι οποίοι οδηγούν στην διαμόρφωση των μορίων.

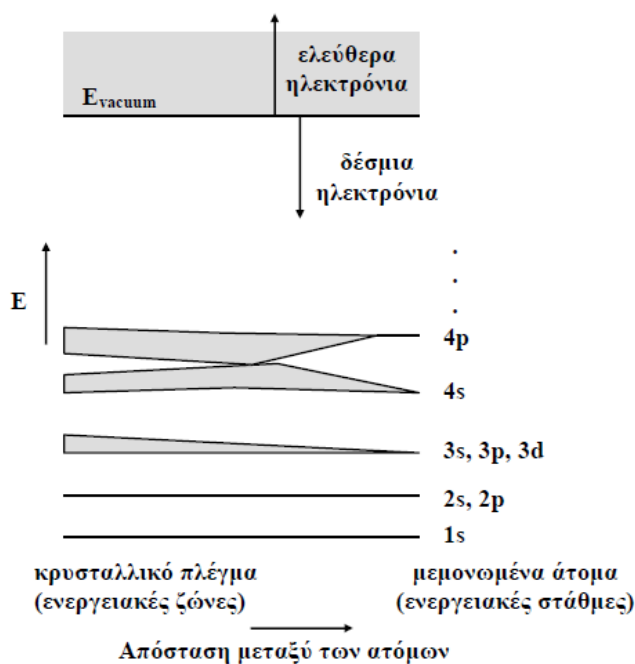
## 1.2 Ενεργειακές ζώνες

Σε ένα μεμονωμένο άτομο, τα ηλεκτρόνια βρίσκονται γύρω από τον πυρήνα και οι ενέργειές τους είναι κβαντισμένες, μπορεί δηλαδή να έχουν μόνο μια συγκεκριμένη διακριτή τιμή  $E_n$  ( $n=1,2,3,\dots$ ).

Στην Εικόνα φαίνεται το γραμμικό ενεργειακό φάσμα ενός τυπικού μεμονωμένου ατόμου αποτελούμενο από δυο καταστάσεις: την θεμελιώδη κατάσταση, όπου τα ηλεκτρόνια συγκρατούνται από τον πυρήνα με δυνάμεις Coulomb και την ελεύθερη κατάσταση όπου τα ηλεκτρόνια είναι ελεύθερα. Οι δυο αυτές περιοχές διαχωρίζονται από μια κατάσταση μηδενικής ενέργειας  $E_{vacuum}$ . Στη θεμελιώδη κατάσταση η ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι αρνητική σε σχέση με τη

στάθμη κενού. Οι επιτρεπόμενες ενεργειακές στάθμες είναι διακριτές, χωρίζονται μεταξύ τους από απαγορευμένες περιοχές και περιλαμβάνουν ορισμένο αριθμό ηλεκτρονικών καταστάσεων.

Έστω η περίπτωση όπου  $N$  άτομα συνδέονται μεταξύ τους με στόχο σχηματισμό ενός κρυσταλλικού στερεού. Καθώς οι αποστάσεις μεταξύ τους μικραίνουν, οι τροχιές των ηλεκτρονίων σθένους υπερκαλύπτονται και τα ηλεκτρόνια βλέπουν τους πυρήνες των γειτονικών ατόμων. Όμως η απαγορευτική αρχή του Pauli που ορίζει ότι δυο ηλεκτρόνια ενός ατόμου δεν μπορεί να υπάρχουν στην ίδια κατάσταση, υπαγορεύει το διαχωρισμό του ενεργειακού διαγράμματος σε  $N$  το πλήθος πολύ κοντά διατεταγμένες στάθμες. Καθώς η απόσταση μεταξύ των ατόμων ελαττώνεται, άλλες εσωτερικές τροχιές αρχίζουν να υπερκαλύπτονται και οι ενεργειακές τους στάθμες χωρίζονται επίσης σε  $N$  πολύ κοντά ταξινομημένες στάθμες. Κάθε ομάδα χωριστών ενεργειακών σταθμών ονομάζεται ενεργειακή ζώνη. Οι ζώνες



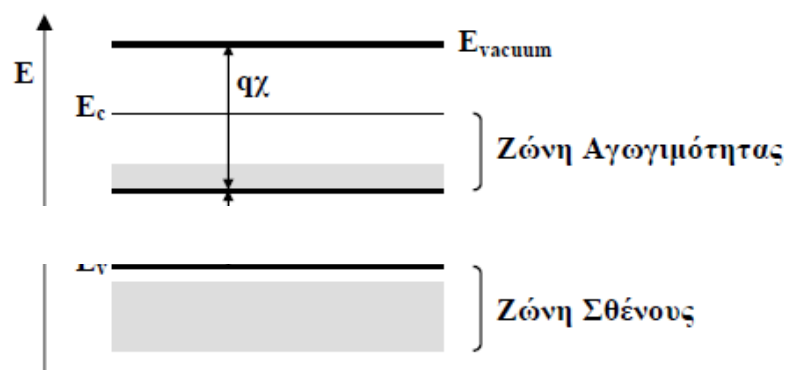
Εικόνα 1.2: Κατανομή Ενέργειας σε Επιτρεπόμενες και Απαγορευμένες Περιοχές

διαχωρίζονται μεταξύ τους από ενεργειακά χάσματα, δηλαδή απαγορευμένες τιμές ενέργειας στις οποίες δεν μπορούν να υπάρξουν ελεύθεροι φορείς Εικόνα 1.2.

Σε συνθήκες  $T=0\text{ K}$ , η ζώνη που είναι πλήρης καλείται ζώνη σθένους και τα ηλεκτρόνια δεν συμμετέχουν στην αγωγιμότητα του στερεού, αφού δεν υπάρχουν διαθέσιμες ενεργειακές καταστάσεις, που μπορούν να τις καταλάβουν υπό την επίδραση εξωτερικού πεδίου. Η αμέσως επόμενη ζώνη που είναι κενή ή μερικώς πληρωμένη, είναι γνωστή ως ζώνη αγωγιμότητας.

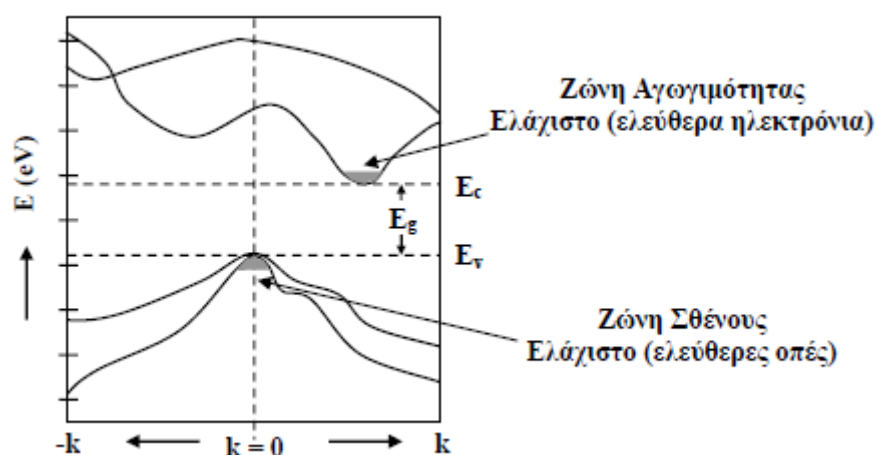
Ένα απλοποιημένο ενεργειακό διάγραμμα ημιαγωγού φαίνεται στο Εικόνα, όπου διακρίνεται η σχεδόν κενή ζώνη αγωγιμότητας. Η οριζόντια γραμμή  $E_c$  σημειώνει τον πυθμένα της ζώνης. Ομοίως, η κορυφή της ζώνης σθένους σημειώνεται από τη γραμμή  $E_v$ . Το ενεργειακό χάσμα βρίσκεται μεταξύ των δυο αυτών γραμμών, που χωρίζονται από ενέργεια  $E_g$ . Είναι δηλαδή,  $E_g = E_c - E_v$  και το υλικό συμπεριφέρεται ως μονωτής. Στην περίπτωση ( $\gamma$ ), η πλήρης ζώνη διαχωρίζεται από την κενή ζώνη με μικρό ενεργειακό χάσμα ( $\approx 1\text{eV}$ ), που επιτρέπει στα ηλεκτρόνια να μετακινηθούν προς την αμέσως υψηλότερη ζώνη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια σχεδόν πλήρη ζώνη (ζώνη σθένους) κάτω από μια σχεδόν κενή ζώνη (ζώνη αγωγιμότητας) και το υλικό συμπεριφέρεται ως ημιαγωγός.

Στην Εικόνα 1.4 παρουσιάζεται ένα απλό παράδειγμα της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας στο επίπεδο ενέργειας - ορμής (διάγραμμα  $E - k$ ). Παρατηρούμε



Εικόνα 1.3: Κατηγοριοποίηση σε Ζώνες Σθένους, Αγωγιμότητας & το Ενεργειακό Χάσμα

ότι η ζώνη αγωγιμότητας παρουσιάζει μια ελάχιστη τιμή ενέργειας  $E_c$  και κάτω από συνθήκες ισορροπίας, τα ηλεκτρόνια βρίσκονται σ' αυτή την ελάχιστη ενεργειακή κατάσταση. Η σχέση  $E - k$  για τη ζώνη σθένους, αντιστοιχεί στη σχέση ενέργειας - ορμής για τις οπές. Σ' αυτή την περίπτωση οι τιμές της ενέργειας αυξάνουν καθώς απομακρυνόμαστε από την κορυφή της ζώνης, με το ελάχιστο ενεργειακό επίπεδο  $E_v$  να υφίσταται στο μέγιστο σημείο της.

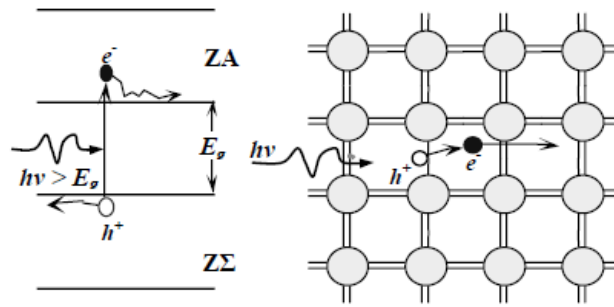


Εικόνα 1.4: Ενεργειακό Διάγραμμα Ζωνών

### 1.3 Ηλεκτρόνια και οπές

Η μετακίνηση των ηλεκτρονίων σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, συνήθως γίνεται με θερμική ή οπτική διέγερση με ελάχιστο ποσό ενέργειας ίσο με το ενεργειακό χάσμα του κρυστάλλου  $E_g$ . Ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας είναι ελεύθερο να κινηθεί στον κρύσταλλο και επίσης να ανταποκριθεί σε ηλεκτρικά πεδία, λόγω των κενών γειτονικών ενεργειακών ζωνών.

Στην περίπτωση, όπου ένα φωτόνιο με ενέργεια  $h\nu > E_g$  αλληλοεπιδρά με ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη σθένους και απορροφάται από αυτό (Εικόνα ), το ηλεκτρόνιο αποκτά ενέργεια ικανή να ξεπεράσει το ενεργειακό χάσμα  $E_g$ , και να φθάσει στη ζώνη αγωγιμότητας ώστε να καταστεί ελεύθερο.



Εικόνα 1.5: Κινητικότητα Ηλεκτρονίων - Οπών

Είναι φανερό ότι κατά την μετακίνηση του ηλεκτρονίου προς τη ζώνη αγωγιμότητας, δημιουργείται μια ελεύθερη θέση στη ζώνη σθένους, η οποία καλείται οπή. Η περιοχή γύρω από την οπή είναι θετικά φορτισμένη λόγω της αφαίρεσης ενός αρνητικού φορτίου από μια ουδέτερη, κατά τα άλλα περιοχή. Η οπή, που συμβολίζεται ως  $h^+$ , μετακινείται ελεύθερα στον κρύσταλλο όταν ένα ηλεκτρόνιο γειτονικού δεσμού, καλύψει τη θέση της, δημιουργώντας μια καινούργια ελεύθερη θέση. Αυτό ισοδυναμεί με κίνηση της οπής προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή του ηλεκτρονίου. Έτσι και τα ηλεκτρόνια και οι οπές με φορτία  $-e$  και  $+e$  αντίστοιχα, συμμετέχουν στην αγωγιμότητα του ημιαγωγού. Αν και στο συγκεκριμένο παράδειγμα, φωτόνιο ενέργειας  $h\nu > E_g$  δημιουργεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου – οπής, υπάρχουν και άλλες πηγές ενέργειας που επίσης δημιουργούν τέτοια ζεύγη.

Όταν ένα ηλεκτρόνιο μετακινηθεί από τη ζώνη αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους, συναντά μια οπή την οποία και καλύπτει. Το φαινόμενο καλείται επανασύνδεση και έχει ως αποτέλεσμα την εξαφάνιση του ζεύγους ηλεκτρονίου – οπής.

#### 1.4 Αγωγοί – Μονωτές – Ημιαγωγοί

Τα στερεά υλικά ανάλογα με το βαθμό που άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα κατατάσσονται σε αγωγούς, μονωτές και ημιαγωγούς. Η διαφορά τους έγκειται στο πλήθος των ελεύθερων ηλεκτρονίων που διαθέτει το κάθε υλικό, τα οποία ηλεκτρόνια μπορούν να επιταχυνθούν υπό την επίδραση ενός εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου. Οι αγωγοί παρουσιάζουν έντονα αυτή την ιδιότητα, οι ημιαγωγοί πολύ λιγότερο και

οι μονωτές σχεδόν καθόλου.

Οι ιδιότητες των ημιαγωγών σχετίζονται άμεσα με την εσωτερική τους δομή, δηλαδή την κατανομή των ηλεκτρονίων στις ενεργειακές στοιβάδες. Σύμφωνα με την κβαντική θεωρία οι επιτρεπόμενες ενέργειες των ηλεκτρονίων είναι περιορισμένες σε φάσματα. Αυτά χωρίζονται μεταξύ του από ενεργειακά διάκενα (bandgaps). Οι ημιαγωγοί στην πλειοψηφία τους αναμένεται να είναι κατά κύριο λόγο κρυσταλλικά υλικά εφόσον η διαμόρφωση των ενεργειακών ζωνών με ενδιάμεσα διάκενα, είναι πιο πιθανό να συμβαίνει με κρυσταλλικές δομές.

Οι αρχές των ημιαγωγών επεξηγούνται καλύτερα με το παράδειγμα του πυριτίου, ενός ημιαγωγού με 4 ηλεκτρόνια σθένους. Τα άτομα του πυριτίου σχηματίζουν κρυσταλλικό πλέγμα όπου κάθε άτομο συνδέεται με 4 γειτονικά του σε τετραεδρική δομή ώστε να μην υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα σε έναν ημιαγωγό σχετίζεται άμεσα με την κίνηση των αρνητικά φορτισμένων ηλεκτρονίων στην σχεδόν κενή ενεργειακή ζώνη, τη ζώνη αγωγιμότητας και την κίνηση των θετικά φορτισμένων οπών στην σχεδόν πλήρης ενεργειακή ζώνη, τη ζώνη σθένους. Μεταξύ αυτών των δύο ζωνών παρεμβάλλεται μια περιοχή απαγορευμένων τιμών ενέργειας η οποία ονομάζεται απαγορευμένη ζώνη ή ενεργειακό χάσμα/διάκενο. Περαιτέρω ανάλυση θα παρουσιασθεί στην επόμενη παράγραφο του κεφαλαίου.

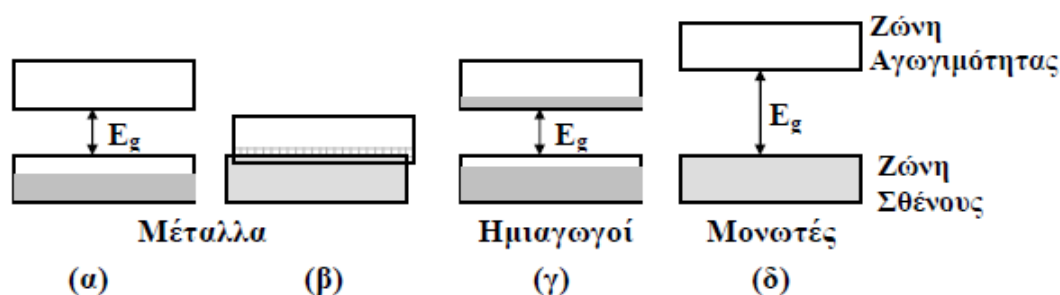
### 1.5 Ενεργειακή δομή Αγωγών – Μονωτών – Ημιαγωγών

Στην περίπτωση που είναι εξαρχής γνωστή η ενεργειακή δομή ενός υλικού, χρειάζεται να είναι επίσης γνωστό ποιες ενεργειακές στάθμες είναι κατειλημμένες και ποιες συγκεκριμένες ενεργειακές ζώνες είναι κενές, μερικώς πληρωμένες ή τελείως πληρωμένες. Οι κενές ζώνες δεν περιέχουν ηλεκτρόνια και δεν συμμετέχουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού. Μερικώς πληρωμένες ζώνες περιέχουν ηλεκτρόνια και έχουν διαθέσιμες ενεργειακές στάθμες σε λίγο υψηλότερες ενέργειες. Οι ελεύθερες αυτές ενεργειακές στάθμες, επιτρέπουν στους φορείς να αποκτήσουν ενέργεια, όταν μετακινούνται υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου. Σ' αυτή την περίπτωση, τα ηλεκτρόνια συμμετέχουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού. Οι τελείως πληρωμένες ζώνες περιέχουν μεγάλο αριθμό ηλεκτρονίων, αλλά δεν

συμμετέχουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα λόγω του ότι δεν αποκτούν ενέργεια, αφού δεν υπάρχουν διαθέσιμες ενεργειακές στάθμες.

Για να βρεθούν οι πλήρεις ή κενές ζώνες θα πρέπει να είναι γνωστό πόσα ηλεκτρόνια τοποθετούνται σε κάθε ζώνη και πόσα είναι διαθέσιμα. Κάθε ζώνη δημιουργείται από το διαχωρισμό μιας ή περισσότερων ατομικών ενεργειακών σταθμών. Επομένως, ο ελάχιστος αριθμός σταθμών σε μια ζώνη ισούται με το διπλάσιο του αριθμού των ατόμων στο υλικό. Ο λόγος, που γίνεται αναφορά στο διπλάσιο είναι ότι σε κάθε ενεργειακή στάθμη αντιστοιχούν δυο ηλεκτρόνια με αντίθετο σπιν. Για να απλοποιηθεί περισσότερο η ανάλυση, θεωρείται ότι μόνο τα ηλεκτρόνια σθένους παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Τα ηλεκτρόνια, που βρίσκονται κοντά στον πυρήνα, λόγω της ισχυρής έλξης, δεν μπορούν να κινηθούν ελεύθερα στο υλικό.

Τέσσερις διαφορετικές πιθανές περιπτώσεις παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.6.



Εικόνα 1.6: Κατηγοριοποίηση υλικών με κριτήριο την αγωγιμότητα τους

Η περίπτωση (α) παρουσιάζεται σε υλικά, που έχουν άτομα με ένα ηλεκτρόνιο σθένους ανά άτομο. Αυτά τα υλικά παρουσιάζουν υψηλή αγωγιμότητα, όπως για παράδειγμα ο χαλκός, ο χρυσός και το ασήμι. Υλικά, των οποίων τα άτομα έχουν δυο ηλεκτρόνια σθένους, παρουσιάζουν και αυτά υψηλή αγωγιμότητα όταν η πλήρης ζώνη επικαλύπτεται με την κενή ζώνη (περίπτωση β). Στην περίπτωση (δ), η αγωγιμότητα του υλικού είναι μηδενική λόγω του μεγάλου ενεργειακού χάσματος

Στους αγωγούς δεν υπάρχει ενεργειακό διάκενο, ενώ στους μονωτές οι υψηλότερες ενεργειακές καταστάσεις δεν είναι προσιτές λόγω του μεγάλου



ενεργειακού χάσματος. Τέλος, στους ημιαγωγούς το ενεργειακό χάσμα είναι αρκετά μικρό ώστε ένα ηλεκτρόνιο να μπορεί να μεταβεί από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Το ενεργειακό διάκενο μεταξύ της ζώνης σθένους και αγωγιμότητας εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους, ώστε να μετατραπεί σε ελεύθερο ηλεκτρόνιο, με ταυτόχρονη δημιουργία μιας οπής. Ως οπή ορίζεται ο φορέας φορτίου με φορτίο ίσο και αντίθετο με αυτό του ηλεκτρονίου. Η δυνατότητα δημιουργίας οπών σε έναν ημιαγωγό εξαρτάται από εξωγενείς παράγοντες, οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν το μέγεθος του ενεργειακού χάσματος ή να προσδώσουν ενέργεια στα ηλεκτρόνια μεγαλύτερη από αυτή του ενεργειακού χάσματος. Τέτοιοι παράγοντες είναι η θερμοκρασία του ημιαγωγού, η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου και η πρόσπτωση ακτινοβολίας στον ημιαγωγό.

#### Αγωγοί και μονωτές υπό την εφαρμογή εξωτερικού πεδίου

##### 1.6 Μονωτές/Διηλεκτρικά

Στα διηλεκτρικά υλικά (ηλεκτρικοί μονωτές), κατά την εφαρμογή εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου τα φορτισμένα σωματίδια που τα συνθέτουν, εξαιτίας των ισχυρών δεσμών που τα συγκρατούν, δύσκολα αποδεσμεύονται/δραπετεύουν από τον ατομικό φλοιό που τα συγκρατεί. Συγκεκριμένα, ανάλογα με τον τρόπο εφαρμογής του πεδίου, το θετικό και το αρνητικό φορτίο διαχωρίζονται σε δύο περιοχές μέσα στην ατομική κοιλότητα δημιουργώντας τα γνωστά δίπολα. Η μετατόπιση των διπόλων στο εσωτερικό του υλικού εξαρτάται από τον αριθμό τους, καθώς επίσης και από τους δεσμούς που αναπτύσσουν τα γειτονικά δίπολα μεταξύ τους. Τα διηλεκτρικά έχουν την τάση να ‘εγκλωβίζουν’ το επιπρόσθετο φορτίο στο εσωτερικό τους και να μην επιτρέπουν τη διέλευση του κατά μήκος της εσωτερικής τους περιοχής. Παραδείγματα διηλεκτρικών αποτελούν υλικά όπως το γυαλί, τα πλαστικά, το λάδι και ο ξηρός αέρας (ο χωρίς υδρατμούς αέρας).

Το ενεργειακό χάσμα που διαθέτουν τα διηλεκτρικά υλικά είναι αρκετά μεγάλης ενέργειας με αποτέλεσμα να μην είναι εύκολη διεργασία η επανασύνδεση μεταξύ οπών και ηλεκτρονίων. Στην περίπτωση ηλεκτρικού πεδίου χωρίς περιοδικότητα η αλλαγή της αγωγιμότητας του υλικού μπορεί να μην είναι αισθητή.

Στην περίπτωση όμως που γίνει εφαρμογή περιοδικού ηλεκτρικού πεδίου, με απόρροια την επαγωγή μαγνητικού πεδίου, το διηλεκτρικό μπορεί να αυξήσει σε ένα ικανοποιητικό ποσοστό την αγωγιμότητα του.

## 1.7 Αγωγοί

Σε αντίθεση με τους ηλεκτρικούς μονωτές, στους αγωγούς κατά την εφαρμογή εξωτερικού πεδίου τα άτομα που τα συνθέτουν έχουν την τάση να φορτίζονται έντονα επιφανειακά, διαδικασία ή οποία διεγείρει και αποδυναμώνει έντονα τις δυνάμεις που συγκρατούν τα αντίθετα φορτισμένα σωματίδια στο εσωτερικό των ατόμων. Απόρροια αυτού είναι η εξασθένηση των ατομικών δεσμών μεταξύ των ατόμων που συγκροτούν το υλικό και κατ' επέκταση η διέλευση φορτίου κατά μήκος του υλικού.

Για παράδειγμα, υλικά όπως ο χαλκός και το αλουμίνιο και γενικά όλα τα μέταλλα, υπάγονται στην κατηγορία των αγωγών, εξαιτίας της ευκινησίας που παρουσιάζουν τα διεγερμένα ηλεκτρόνια κατά τη διάρκεια της κίνησης τους κατά μήκος των υλικών αυτών. Παρόμοια, και τα ιοντικά διαλύματα συνιστούν ηλεκτρικούς αγωγούς εξαιτίας των θετικά και αρνητικά φορτισμένων σωματιδίων που περιέχουν τα οποία είναι ελεύθερα να κινούνται εντός του διαλύματος.

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια των μετάλλων έχουν τη δυνατότητα να κινηθούν κατά μήκος του εσωτερικού των υλικών. Οι ατομικές δυνάμεις συμβάλλουν στην δέσμευση των φορτισμένων σωματιδίων στο εσωτερικό, αλλά κατά κύριο λόγο στην επιφάνεια του υλικού. Κατά συνέπεια, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια παραμένουν στην επιφάνεια μετάλλου, μέχρι τη στιγμή της επαφής του με κάποιο άλλο υλικό στο οποίο θα διοχετεύσουν το επιπρόσθετο φορτίο που διαθέτουν.

Στα μέταλλα, τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας (η οποία στα μέταλλα έχει το πολύ τρία ηλεκτρόνια) είναι χαλαρά συνδεδεμένα. Κατά συνέπεια, τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας μπορούν να διαχωριστούν από τα άτομα και έχουν τη δυνατότητα να κινηθούν ελεύθερα, συνεισφέροντας με τον τρόπο αυτό στην αγωγιμότητα του υλικού.

Το ενεργειακό χάσμα στην περίπτωση των αγωγών είναι είτε πολύ μικρό είτε ανύπαρκτο. Το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο ενισχύει ακόμα περισσότερο την αγωγιμότητα τους. Συγκεκριμένα το πεδίο αυξάνει τόσο την συγκέντρωση των ηλεκτρονίων όσο και την ταχύτητα τους, παράγοντες οι οποίοι ενισχύουν την αγωγιμότητα του υλικού. Συνεπώς στην περίπτωση ύπαρξης μικρού ενεργειακού χάσματος, μετά την εφαρμογή του πεδίου αυτό τείνει να εξαλειφθεί.

### 1.8 Ημιαγωγοί

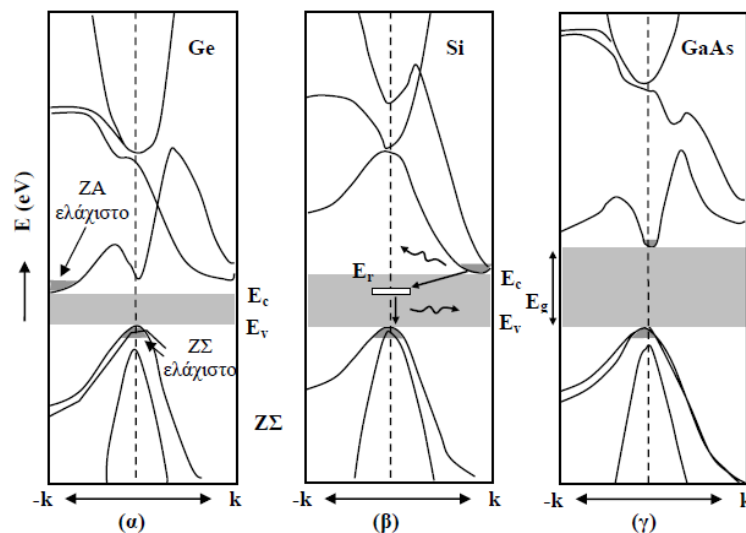
Σε αντίθεση με τους αγωγούς και τα διηλεκτρικά, υπάρχουν υλικά που εμφανίζουν ενδιάμεση συμπεριφορά τα οποία ονομάζονται ημιαγωγοί. Τα υλικά αυτά, υπό ορισμένες συνθήκες συμπεριφέρονται ως αγωγοί (άγουν ηλεκτρικό ρεύμα), ενώ υπό άλλες συμπεριφέρονται ως διηλεκτρικά.

Η αγωγιμότητα των υλικών αυτών εξαρτάται από τον τρόπο κατανομής των θετικών και αρνητικών φορέων τους σε ενεργειακές καταστάσεις. Συγκεκριμένα υπάρχουν δύο τύποι ημιαγωγών, οι οποίοι κατηγοριοποιούνται με βάση τον τρόπο τοποθέτησης της ζώνης αγωγιμότητας τους σε σχέση αντίστοιχα με τη ζώνη σθένους τους. Οι ημιαγωγοί άμεσου και έμμεσου ενεργειακού χάσματος.

### 1.9 Ημιαγωγοί Έμμεσου και Άμεσου Ενεργειακού χάσματος

Μια βασική παράμετρος σε ένα ενεργειακό διάγραμμα, είναι αν ο πυθμένας της ζώνης αγωγιμότητας και η κορυφή της ζώνης σθένους εμφανίζονται στην ίδια τιμή του κυματικού ανύσματος  $k$ . Αν συμβαίνει αυτό, το ενεργειακό χάσμα είναι άμεσο και ο ημιαγωγός καλείται ημιαγωγός άμεσου χάσματος. Αν δεν εμφανίζονται στην ίδια τιμή, τότε το ενεργειακό χάσμα είναι έμμεσο και ο ημιαγωγός καλείται ημιαγωγός έμμεσου χάσματος. Στην Εικόνα 1.7. φαίνονται λεπτομερώς τα ενεργειακά διαγράμματα του Ge, Si και GaAs. Οι κρύσταλλοι Ge και Si παρουσιάζουν ελάχιστο της ζώνης σθένους σε διαφορετική τιμή του  $k$ , απ' αυτήν που παρουσιάζει ελάχιστο η ζώνη αγωγιμότητας και επομένως είναι ημιαγωγοί έμμεσου χάσματος. Ένα ηλεκτρόνιο, επομένως, που βρίσκεται στον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας δεν μπορεί να επανασυνδεθεί άμεσα με μια οπή στην κορυφή της ζώνης σθένους, γιατί θα πρέπει να μεταβάλλει την ορμή του (δηλαδή το  $k$ ), πράγμα που δεν ευνοείται από το νόμο διατήρησης της ορμής. Έτσι στους ημιαγωγούς Ge και Si δεν παρατηρούνται άμεσες επανασυνδέσεις ηλεκτρονίου – οπής.

Η διαδικασία επανασυνδέσεων σ' αυτούς τους ημιαγωγούς πραγματοποιείται μέσω ενός κέντρου επανασύνδεσης, σε μια ενεργειακή στάθμη  $E_r$  εντός της ζώνης



Εικόνα 1.7: Ενεργειακές Ζώνες (α) Γερμανίου (Ge), (β) Πυριτίου (Si) και (γ) Γαλιούχου Αρσενικού (GaAs), τα (α) & (β) αποτελούν ημιαγωγούς άμεσου ενεργειακού χάσματος και το (γ) έμμεσου

απογύμνωσης, όπως φαίνεται για παράδειγμα στην Εικόνα. Αυτά τα κέντρα επανασύνδεσης μπορεί να δημιουργηθούν από πλεγματικές ατέλειες. Σε πρώτη φάση το ηλεκτρόνιο χάνει ένα μέρος της ενέργειάς του και δεσμεύεται από το κέντρο επανασύνδεσης, με ταυτόχρονη μεταβολή της ορμής του και σε δεύτερη φάση μεταπίπτει στη ζώνη σθένους και επανασυνδέεται με μια οπή. Οι μεταβολή της ενέργειας και της ορμής του κατά τη διαδικασία δέσμευσης από το κέντρο επανασύνδεσης, μεταβιβάζεται σε πλεγματικές ταλαντώσεις. Επομένως, στους ημιαγωγούς έμμεσου ενεργειακού χάσματος η πιθανότητα εκπομπής φωτονίων (ακτινοβολούσες επανασυνδέσεις) είναι μικρή. Σε μερικούς όμως ημιαγωγούς έμμεσου χάσματος, όπως για παράδειγμα GaP, η επανασύνδεση ηλεκτρονίου – οπής έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή φωτονίου.

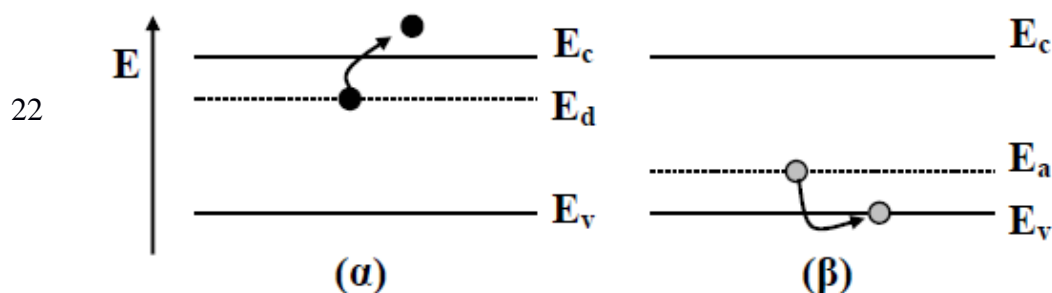
Στο ενεργειακό διάγραμμα του GaAs, τα δυο ελάχιστα παρουσιάζονται στην ίδια τιμή του  $k$  και επομένως το GaAs είναι ημιαγωγός άμεσου χάσματος, όπου τα ζεύγη ηλεκτρονίου – οπής μπορούν να επανασυνδεθούν άμεσα και να εκπέμψουν ένα φωτόνιο. Η πλειοψηφία των διατάξεων φώτο-εκπομπής (LEDs, δίοδοι Laser) χρησιμοποιούν ημιαγωγούς άμεσου ενεργειακού χάσματος.

### 1.10 Ενδογενείς Ημιαγωγοί

Ενδογενείς ονομάζονται οι ημιαγωγοί οι οποίοι δεν έχουν προσμίξεις. Ως πρόσμιξη εννοείται οποιαδήποτε παρεμβολή στο ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού. Για τους ενδογενείς ημιαγωγούς ισχύουν όλες οι διεργασίες που περιεγράφηκαν σε προηγούμενες παραγράφους (κέντρα επανασύνδεσης, σχέση κυματανύσματος και ενέργειας).

### 1.11 Ημιαγωγοί προσμίξεων

Στην περίπτωση που ενσωματωθούν ξένα άτομα σε ένα καθαρό κατά τα άλλα κρύσταλλο (ενδογενές υλικό), είναι δυνατό να δημιουργηθεί ένας ημιαγωγός, του



οποίου η συγκέντρωση φορέων μιας πολικότητας να είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του άλλου τύπου. Αυτοί οι ημιαγωγοί καλούνται ημιαγωγοί πρόσμιξης. Η δημιουργία ελεύθερων φορέων, απαιτεί όχι μόνο την παρουσία προσμίξεων, αλλά και την ικανότητά τους να προσθέσουν ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας. Σ' αυτή την περίπτωση καλούνται δότες. Αν προσθέθουν οπές στη ζώνη σθένους, καλούνται αποδέκτες (δέχονται ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους, δημιουργώντας έτσι μια οπή). Στην Εικόνα 1.8 φαίνονται τα τυπικά ενεργειακά διαγράμματα ενός δότη και ενός αποδέκτη, όπου  $E_d$  και  $E_a$  οι αντίστοιχες ενέργειές τους. Το ενεργειακό επίπεδο του δότη, πριν τον ιονισμό, είναι συμπληρωμένο.

Κατά τον ιονισμό, ο δότης δίνει ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας ενώ ο αποδέκτης δίνει μια οπή στη ζώνη σθένους. Βαριές προσμίξεις, που η ενεργειακή στάθμη τους απέχει πολύ από τις δυο ζώνες μπορούν να αποτελέσουν κέντρα επανασύνδεσης. Τέτοιες προσμίξεις καλούνται και παγίδες. Ένας ημιαγωγός με προσμίξεις δοτών καλείται n-τύπου, ενώ με προσμίξεις αποδεκτών καλείται p-τύπου. Σ' ένα ημιαγωγό n-τύπου ( $n > p$ ), τα ηλεκτρόνια είναι φορείς πλειοψηφίας και οι οπές φορείς μειοψηφίας. Στην περίπτωση p-τύπου ημιαγωγού ( $p > n$ ), οι οπές είναι φορείς πλειοψηφίας και τα ηλεκτρόνια φορείς μειοψηφίας.

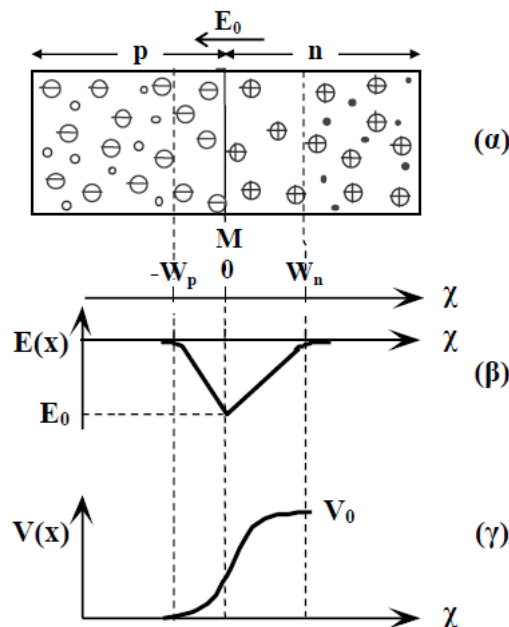
### 1.12 Επαφή p-n

Μια επαφή p-n αποτελείται, όπως υποδεικνύεται και από την ονομασία, από δύο περιοχές ενός ημιαγωγού με αντίθετες προσμίξεις. Η διάταξη αποτέλεσε μια από τις πρώτες δομές σύνθεσης ημιαγωγών προσμίξεων τύπου n & p οι οποίες χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα για εκθετική ενίσχυση του ρεύματος και όχι μόνο. Ο τρόπος σύνδεσης τους επηρεάζει άμεσα τον τρόπο λειτουργίας τους συνόλου του κυκλώματος. Στις υποενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι δυνατές λειτουργίες της διόδου με βάση τη σύνδεση τους στο κύκλωμα.

### 1.13 Ανοιχτό Κύκλωμα

Στην περίπτωση ανοιχτού κυκλώματος, δηλαδή χωρίς εξωτερική πόλωση, οι οπές διαχέονται από την περιοχή p προς την περιοχή n και επανασυνδέονται με τα ηλεκτρόνια, που είναι φορείς πλειοψηφίας. Η περιοχή n, κοντά στην επαφή απογυμνώνεται έτσι από φορείς πλειοψηφίας και δημιουργείται πλεόνασμα θετικού φορτίου (θετικά ιόντα δότη). Ομοίως, τα ηλεκτρόνια διαχέονται από την περιοχή n προς την περιοχή p και επανασυνδέονται με τις οπές, που είναι φορείς πλειοψηφίας. Η περιοχή p κοντά στην επαφή απογυμνώνεται από φορείς πλειοψηφίας και δημιουργείται πλεόνασμα αρνητικού φορτίου (αρνητικά ιόντα αποδέκτη). Δημιουργείται επομένως, εκατέρωθεν της επαφής, μια περιοχή απογυμνωμένη από ελεύθερους φορείς, με εύρος  $W_0 = W_p + W_n$  που καλείται ζώνη αποκοπής.

Εξ αιτίας του διαχωρισμού των φορέων, αναπτύσσεται στη ζώνη ένα εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο  $E_0$ , που τείνει να σαρώσει τις οπές/ηλεκτρόνια προς κατευθύνσεις αντίθετες από τις κατευθύνσεις διάχυσής τους. Είναι φανερό ότι όσο περισσότερες οπές/ηλεκτρόνια διαχέονται, το εσωτερικό πεδίο  $E_0$  θα αυξάνει μέχρι να ισορροπήσει το σύστημα. Μέχρι δηλαδή οι οπές/ηλεκτρόνια, που διαχέονται να ισορροπήσουν με τις οπές/ηλεκτρόνια, που σαρώνονται από το πεδίο Εικόνα



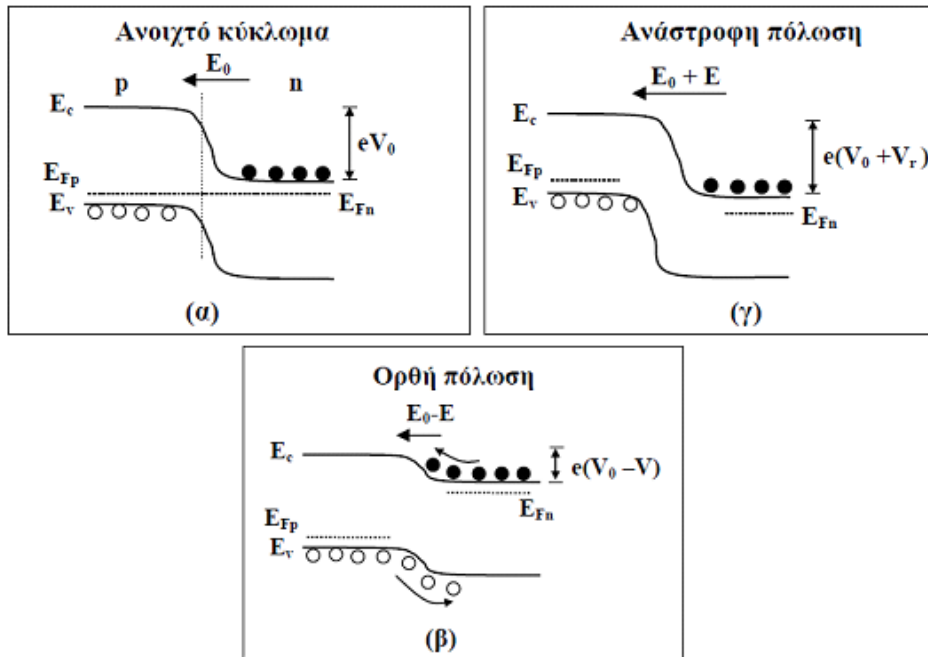
Εικόνα 1.9: Λειτουργία pn διόδου σε σύνδεση ανοιχτού κυκλώματος



Αν στα άκρα της επαφής p-n, εφαρμοσθεί τάση  $V$  (ορθής φοράς), τότε κατά μήκος της ζώνης αποκοπής δημιουργείται πτώση τάσης και το ενσωματωμένο δυναμικό θα μειωθεί κατά  $V_0 - V$  με συνέπεια τη μείωση του πεδίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του εύρους της ζώνης αποκοπής, πράγμα που σημαίνει ότι ο αριθμός των φορέων που διαχέονται αυξάνει. Το αντίθετο συμβαίνει κατά την ανάστροφη πόλωση, όπου το δυναμικό αυξάνει κατά  $V_0 + V$

Στην Εικόνα (α) φαίνεται το ενεργειακό διάγραμμα μιας επαφής p-n υπό συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος. Αν  $E_{Fn}$  και  $E_{Fp}$  είναι οι στάθμες Fermi στις περιοχές n και p αντίστοιχα, τότε σε κατάσταση ισορροπίας η στάθμη Fermi πρέπει να είναι ομοιόμορφη κατά μήκος των δυο περιοχών. Στην περιοχή n, μακριά από την επαφή M, οι στάθμες  $E_c - E_{Fn}$  είναι ίδιες όπως θα ήταν στην περίπτωση που το n – τύπου υλικό θα ήταν απομονωμένο. Οι ίδιες συνθήκες ισχύουν και στην περιοχή p, δηλαδή  $E_{Fp} - E_v$  είναι ίδιες. Είναι φανερό ότι για να έχουμε, τις στάθμες  $E_{Fn} - E_{Fp}$  και  $E_c - E_v$  ίδιες, κατά μήκος του συστήματος, θα πρέπει να κάμψουμε τις  $E_c - E_v$  κοντά στην επαφή M. Τη στιγμή, που οι δυο ημιαγωγοί ενώνονται για να

σχηματίσουν την επαφή, τα ηλεκτρόνια διαχέονται από την περιοχή n προς την περιοχή p, απογυμνώνοντας την n κοντά στην επαφή. Έτσι, όσο πλησιάζουμε προς το M, η  $E_c$  θα πρέπει να απομακρύνεται από την  $E_{Fn}$ , πράγμα που φαίνεται καθαρά στο σχήμα. Αντίστοιχα, στην περιοχή p η  $E_v$  απομακρύνεται από την  $E_{Fp}$ .



Εικόνα 1.10: Σύνδεση ενεργειακών χασμάτων σε επαφές pn, μεταφορά ηλεκτρονίων και οπών μεταξύ ζωνών αγωγιμότητας και σθένους σε περιπτώσεις α) Ανοιχτού Κυκλώματος β) Ανάστροφης & γ) Ορθής πόλωσης

Η ηλεκτροστατική δυναμική ενέργεια (ΗΔΕ) των ηλεκτρονίων, μεταβάλλεται από μηδέν (στην περιοχή p) σε  $-eV_0$  (στην περιοχή n), δηλαδή η συνολική του ενέργεια ελαττώνεται κατά  $eV_0$ . Με άλλα λόγια, τα ηλεκτρόνια της περιοχής n στην  $E_c$  θα πρέπει να ξεπεράσουν ένα φράγμα δυναμικού  $eV_0$  για να μετακινηθούν προς την  $E_c$  της περιοχής p. Το ίδιο φράγμα δυναμικού εμποδίζει και τη διάχυση των οπών από την p στη n περιοχή.

#### 1.14 Ορθή και ανάστροφη πόλωση

Όταν η επαφή p-n πολωθεί ορθά με μια τάση V, δημιουργείται μια πτώση τάσης κατά μήκος της περιοχής απογύμνωσης, ελαττώνοντας το φράγμα δυναμικού από  $eV_0$  σε  $e(V_0 - V)$ , έτσι που τα ηλεκτρόνια της πλευράς n να μπορούν να ξεπεράσουν το φράγμα και να διαχυθούν προς την πλευρά p (Εικόνα β). Σε αντικατάσταση των

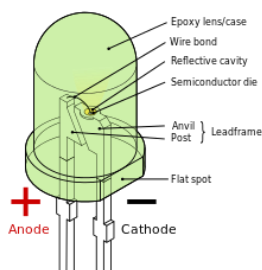
ηλεκτρονίων που διαχέονται προς την περιοχή p, η περιοχή n τροφοδοτείται με ηλεκτρόνια από τον αρνητικό πόλο της πηγής. Κατά τον ίδιο τρόπο, οι οπές μπορούν να διαχυθούν από την p στην n περιοχή, που διατηρεί τα φορτία της από το θετικό πόλο της πηγής. Αυτή η διαδικασία διάχυσης – αντικατάστασης φορέων, δημιουργεί ροή ρεύματος στο κύκλωμα ημιαγωγού – εξωτερικής πόλωσης.

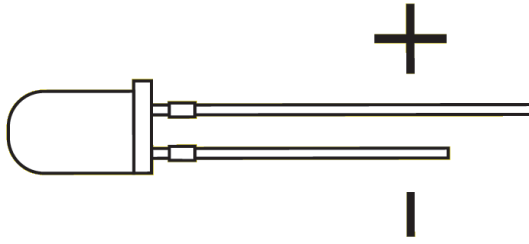
Στην περίπτωση ανάστροφης πόλωσης,  $V = V_r$ , της επαφής p-n η περιοχή απογύμνωσης δέχεται μια πτώση τάσης, που προστίθεται στο ενσωματωμένο δυναμικό  $V_0$  με αποτέλεσμα την αύξηση του φράγματος δυναμικού σε  $e(V_0 + V_r)$ , όπως φαίνεται στο Εικόνα γ. Σ' αυτή την περίπτωση, στο κύκλωμα ρέει ένα μικρό ανάστροφο ρεύμα λόγω θερμικών διεργασιών.

### 1.15 LED Δίοδοι

Οι LED δίοδοι αποτελούν μια κλασική επαφή pn με πρόσθετη ιδιότητα αυτή της φώτο-εκπομπής. Η λειτουργία τους είναι αυτή της επαφής pn όπως περιγράφηκε σε προηγούμενες παραγράφους. Η στρωτή εκπομπή φωτός επιτυγχάνεται μέσω της συνεχούς ορθής πόλωσης της διόδου. Εξαιτίας της εκτενούς περιγραφής που έχει πραγματοποιηθεί ήδη δεν πρόκειται να γίνει περαιτέρω αναφορά στη λειτουργία των LED. Στην Εικόνα διαφαίνεται η δομή μιας LED διόδου.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.11 η άνοδος και η κάθοδος είναι τοποθετημένες προκαθορισμένα. Για να είναι αναγνωρίσιμο κατά τη συνδεσμολογία σε ολοκληρωμένα κυκλώματα το άκρο της ανόδου είναι συνήθως λίγο πιο μακρύ σε σχέση με το αντίστοιχο της καθόδου και όπως φαίνεται και στην Εικόνα στη μεριά της καθόδου υπάρχει μια εγκοπή.

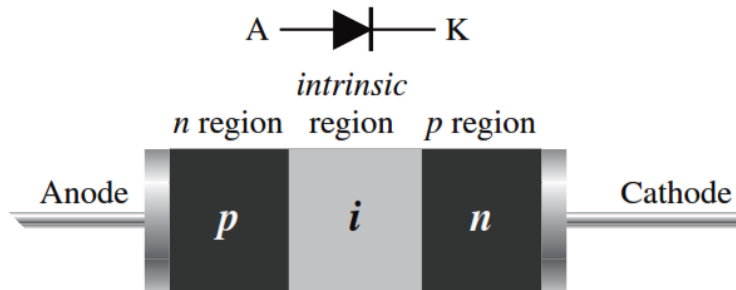




Εικόνα 1.11: Σχηματική αναπαράσταση LED ηλεκτρονικού στοιχείου για εφαρμογή σε ολοκληρωμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα

### 1.16 P-I-N Δίοδος

Η pin δίοδος είναι μια λίγο διαφορετική δομή διόδου σε σχέση με την ήδη γνωστή. Συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα σύστημα με δομή ίδια με αυτή της κλασικής διόδου που περιγράφηκε προηγουμένως, με τη μόνη διαφορά ότι ανάμεσα στην pn περιοχή εμπεριέχεται ένας ανόθευτος ημιαγωγός. Η διάταξη της διαφαίνεται στην Εικόνα 1.12.



Εικόνα 1.12: Σχηματική αναπαράσταση PIN διόδου

Όπως διαφαίνεται και στην Εικόνα 1.12 η δομή της και η αναπαράστασης της είναι πανομοιότυπη της ήδη γνωστής κλασικής διόδου. Ο ανόθευτος ημιαγωγός σε ένα επίπεδο μειώνει την απόδοση της pn διόδου, μιας και καθιστά την διάταξη έναν ανορθωτή χαμηλής ενίσχυσης. Αυτή η διαφοροποίηση συντελεί αρκετά σε κάποιες περιπτώσεις συστημάτων τα οποία δουλεύουν στις χαμηλές συχνότητες και συγκεκριμένα στην περιοχή από το υπέρυθρο έως και το ορατό, μια περιοχή ακτινοβολίας με ιδιαίτερο αντίκτυπο στις

### 1.17 Διπολικά Τρανζίστορ (Bipolar Junction Transistor)

Ο Shockley διατύπωσε τη θεωρία του transistor επαφής το 1949. Το πρώτο transistor κατασκευάστηκε το 1951. Ο Shockley πήρε αργότερα, για τη μνημειώδη του ανακάλυψη, το βραβείο Nobel. Η επίδραση του τρανζίστορ στην ηλεκτρονική υπήρξε τεράστια. Εκτός από την τεράστια βιομηχανία ημιαγωγών, το τρανζίστορ οδήγησε σε πολλές σχετικές ανακαλύψεις, όπως τα ολοκληρωμένα κυκλώματα, οιοπτοηλεκτρονικές διατάξεις και οι μικροϋπολογιστές. Οι περισσότερες ηλεκτρονικές συσκευές σχεδιάζονται σήμερα με ημιαγωγά στοιχεία. Από νωρίς το transistor αντικατέστησε στις περισσότερες εφαρμογές τη λυχνία κενού. Μας επιτρέπει να κάνουμε πράγματα που ήταν δύσκολο ή αδύνατο να γίνουν με τις λυχνίες. Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές στη βιομηχανία των υπολογιστών. Οι ιστορικοί συμφωνούν ότι το transistor δεν αναμόρφωσε τη βιομηχανία των υπολογιστών, αλλά τη δημιούργησε.

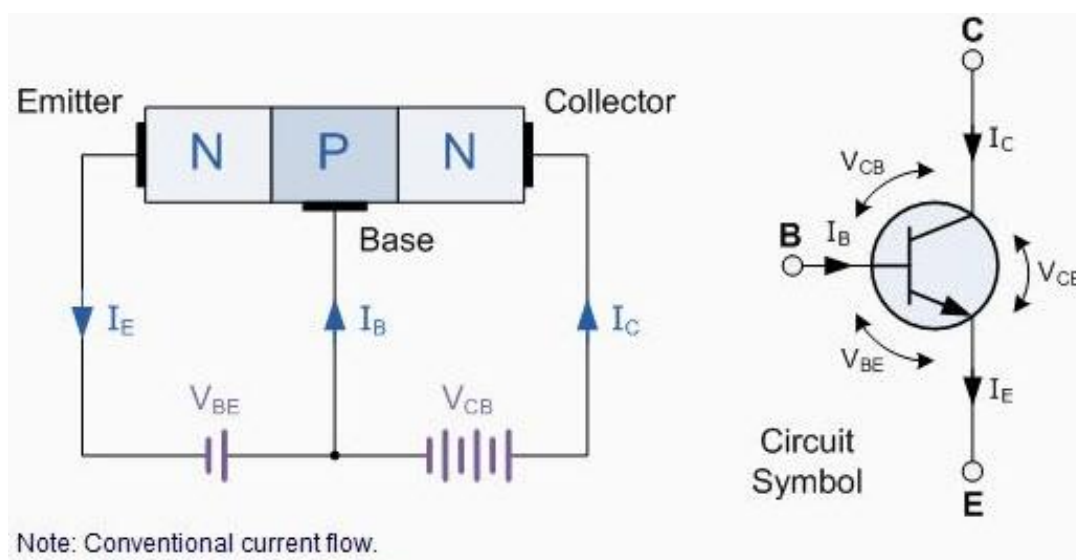
Τα διπολικά τρανζίστορ αποτελούν μια εξέλιξη των pn επαφών (διόδων). Ανάλογα με τον τρόπο σύνθεσης τους διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες τα pnp και npn. Με βάση τους συμβολισμούς αυτούς γίνεται εύκολα κατανοητό ότι τα pnp τρανζίστορ είναι διατάξεις που εμπεριέχουν δύο περιοχές ημιαγωγών προσμίξεων τύπου p και ανάμεσα τους έναν ημιαγωγό προσμίξεων τύπου n, ενώ οι npn δύο ημιαγωγούς τύπου n και ανάμεσα τους έναν ημιαγωγό τύπου p.

Τα διπολικά τρανζίστορ είναι κρύσταλλοι οι οποίοι αποτελούνται από τρία διαδοχικά εναλλασσόμενα στρώματα ημιαγωγίμου υλικού. Μπορεί να παρομοιαστεί με ένα "σάντουιτς" του οποίου το ενδιάμεσο υλικό είναι είτε τύπου -n (τρανζίστορ τύπου -pnp) ή τύπου -p (τρανζίστορ τύπου -nnp). Οι τρεις περιοχές του τρανζίστορ αναφέρονται ως εκπομπός (E), βάση (B) και συλλέκτης (C). Ο εκπομπός είναι η περιοχή μέσω της οποίας γίνεται η εκπομπή φορέων ως προς τη βάση του τρανζίστορ. Η βάση είναι μια πολύ λεπτή επιφάνεια η οποία επιτρέπει τη διέλευση των φορέων προς το συλλέκτη. Ο συλλέκτης είναι η περιοχή διοχέτευσης φορέων και συνήθως η περιοχή του τρανζίστορ από την οποία εκρέει το ενισχυμένο ρεύμα.

Για την κανονική λειτουργία του, το τρανζίστορ πρέπει να πολωθεί κατάλληλα με εξωτερικές πηγές τάσης. Η επαφή βάσης-συλλέκτη πρέπει να είναι ανάστροφα

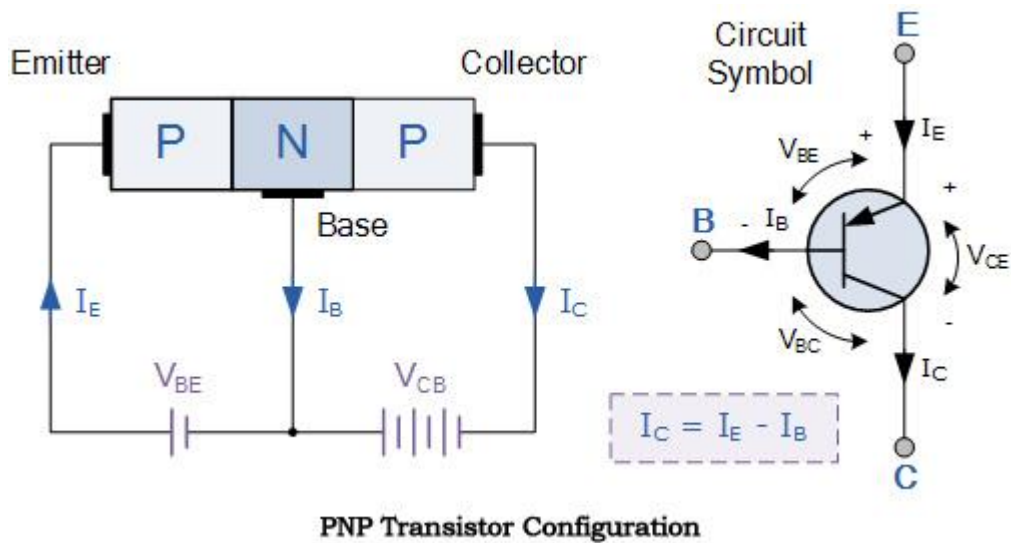
πολωμένη, ενώ η επαφή βάσης εκπομπού πρέπει να πολωθεί ορθά. Σε τρανζίστορ τύπου npn το ρεύμα οφείλεται κυρίως σε κίνηση ηλεκτρονίων ενώ σε τρανζίστορ τύπου pnp οφείλεται κυρίως στις οπές.

Το transistor στην Εικόνα έχει δύο επαφές. Μια ανάμεσα στον εκπομπού και τη βάση και μια ανάμεσα στη βάση και το συλλέκτη. Έτσι το transistor μοιάζει με δύο διόδους, που συνδέονται «πλάτη με πλάτη». Η επαφή στην αριστερή πλευρά την Εικόνας ονομάζεται επαφή εκπομπού – βάσης ή επαφή εκπομπού. Αντίστοιχα η επαφή δεξιά, είναι η επαφή συλλέκτη – βάσης ή η επαφή συλλέκτη. Στο κυκλωματικό σύμβολο του τρανζίστορ npn το βέλος που υπάρχει στον εκπομπού, δείχνει τη συμβατική φορά του ρεύματος. Μ' άλλα λόγια, τα ηλεκτρόνια κινούνται προς τον εκπομπού.



Εικόνα 1.13: npn τύπου τρανζίστορ

Στην Εικόνα 1.13 αναπαρίσταται η διαμόρφωση των npn τρανζίστορ. Το npn θεωρείται το «συμπληρωματικό» του pnp τρανζίστορ μιας και οι φορείς πλειονότητας στον εκπομπού και το συλλέκτη είναι οι οπές. Κατά τη λειτουργία ενός npn, τα ρεύματα και οι τάσεις έχουν αντίθετες φόρες, σε σχέση με τα αντίστοιχα μεγέθη ενός pnp τρανζίστορ. Στο κυκλωματικό σύμβολο του τρανζίστορ npn, το βέλος έχει φορά προς τον εκπομπού και δείχνει τη συμβατική φορά του ρεύματος. Έτσι, τα ηλεκτρόνια απομακρύνονται από τον εκπομπού.



Εικόνα 1.14: pnp τύπου τρανζίστορ

### 1.18 Τρανζίστορς FET – Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (Field-Effect Transistors)

Τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (ή τρανζίστορ φαινομένου πεδίου, Field Effect Transistor – FET) είναι ηλεκτρονικά στοιχεία στα οποία οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος είναι ενός είδους σε αντίθεση με τα διπολικά τρανζίστορ όπου συνεισφέρουν στο ηλεκτρικό ρεύμα τόσο οι φορείς πλειονότητας όσο και οι φορείς μειονότητας. Πρόκειται κατά βάση για μια ράβδο νοθευμένου ημιαγωγού και μια επαφή που βρίσκεται στο μέσο της ράβδου και κατά μήκος της επιφάνειάς της. Τα FET αξιοποιούν την τάση που εφαρμόζεται στην είσοδό τους (Gate G), μέσω της οποίας ρυθμίζεται το ρεύμα που διαρρέει τη διάταξη το οποίο αφού ενισχυθεί εξέρχεται από τη διάταξη.

Τα FET είναι ένα μονοπολικό ημιαγωγίμο σύστημα τριών ακροδεκτών, με παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτά των διπολικών τρανζίστορ. Συγκεκριμένα είναι πολύ αποδοτικά, ακριβή, φθηνά σε κόστος και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα πολύ μεγάλο πλήθος εφαρμογών αντικαθιστώντας τα BJ τρανζίστορ.

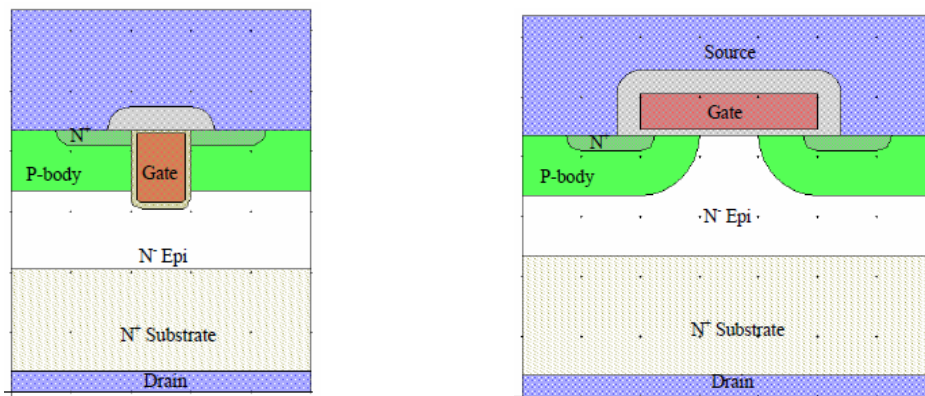
Υπάρχουν δύο τύποι FET, το τρανζίστορ επαφής επίδρασης πεδίου (junction field effect transistor-JFET) και το FET ημιαγωγού με οξείδιο μετάλλου (metal oxide semi-conductor FET-MOSFET).

### 1.19 MOSFET

Η τεχνολογία των τρανζίστορ τα οποία στηρίζονται στην εμφάνιση πεδίου τύπου ημιαγωγού μέσω της οξείδωσης μετάλλου (Metal Oxide Semiconductor Field Effect) στηρίζεται στη λογική της κλασικής τεχνολογίας τρανζίστορ η οποία εισήχθη για πρώτη φορά τη δεκαετία του 70. Στην Εικόνα [] αναπαρίσταται το σχηματικό του συστήματος με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά των περιοχών μεταφοράς. Η ανακάλυψη των τύπου MOSFET ήταν απόρροια των περιορισμών που εισήγαγαν τα διπολικά τρανζίστορ (BJT) τα οποία μέχρι την εμφάνιση των τύπου FET συστημάτων μονοπωλούσαν στις ηλεκτρονικές εφαρμογές.

Τα MOSFET χρησιμοποιούνται ευρέως εξαιτίας της χαμηλής ισχύος που καταναλώνουν στην Πύλη (Gate), της γρήγορης εναλλαγής και της υψηλότατης δυνατότητας τους για παράλληλες διεργασίες. Η χαρακτηριστική κάθετη δομή των MOSFET τρανζίστορ αποτελείται από την Πηγή (Source) και το Αυλάκι (Drain) τα οποία είναι τοποθετημένα σε αντίθετα σημεία, ούτως ώστε να επιτυγχάνονται υψηλότερα ρεύματα και τάσεις. Κατασκευαστικά υπάρχουν δύο τύποι MOSFET τρανζίστορ (Εικόνα), 1) αυτά στα οποία η πύλη είναι κάθετα τοποθετημένη, σαν ένα αυλάκι και 2) αυτά στα οποία η πύλη είναι μια επιφάνεια τοποθετημένη παράλληλα με τα υπόλοιπα στοιχεία της διάταξης. Ανάλογα με την τάση λειτουργίας τους συστήματος χρησιμοποιείται και η αντίστοιχη κατηγορία τρανζίστορ. Συγκεκριμένα σε τάσεις χαμηλότερες των 200V προτιμώνται τα MOSFET με αυλάκι ενώ στις υψηλότερες τάσεις η 2<sup>η</sup> κατηγορία αντίστοιχα. Η κατηγοριοποίηση αυτή οφείλεται στην χαμηλότερη αντίσταση που παρουσιάζει η 1<sup>η</sup> κατηγορία κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του τρανζίστορ, σ' αντίθεση με την 2<sup>η</sup> κατηγορία όπου η επίστρωση που έχει τοποθετηθεί στην πύλη λειτουργεί ως αντιστάτης μειώνοντας την ένταση του ρεύματος.





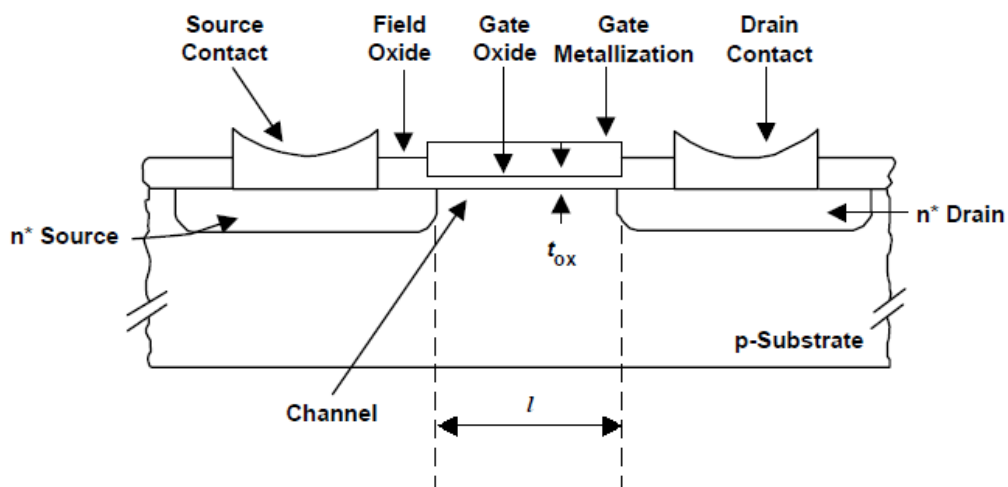
Εικόνα 1.14: Δομή MOSFET τρανζίστορ

Αν και δεν είναι εφικτό να ορισθούν με ακρίβεια τα όρια λειτουργίας μιας συσκευής παροχής ενέργειας, θα θεωρηθεί ως μια συσκευή ικανή να λειτουργήσει τουλάχιστον για ρεύμα 1Α. Τα διπολικά τρανζίστορ αποτελούν συσκευές, των οποίων η λειτουργία εξαρτάται άμεσα από το ρεύμα που δέχονται στην είσοδο τους. Συγκεκριμένα, εάν το ρεύμα στη βάση του τρανζίστορ είναι όσο το 1/5 από το αντίστοιχο στον συλλέκτη, το τρανζίστορ είναι ικανό να παραμένει μονίμως σε κανονική λειτουργία ενίσχυσης εισερχόμενου σήματος. Επίσης, για να επιτευχθεί γρήγορη απενεργοποίηση του συστήματος απαιτούνται υψηλότερα ανάστροφα ρεύματα τα οποία προέρχονται από τη βάση του τρανζίστορ. Ένας ακόμα περιορισμός των διπολικών τρανζίστορ είναι ότι τα ηλεκτρόνια και οι οπές συμβάλλουν ταυτόχρονα στη διαδικασία της μεταβίβασης. Οι οπές αποτελούν φορείς με μεγαλύτερο χρόνο ζωής, με αποτέλεσμα να μειώνουν την ταχύτητα εναλλαγής αρκετές τάξεις μεγέθους, συγκρινόμενα με τα MOSFET τρανζίστορ τα οποία επιτυγχάνουν αντίστοιχη τάση και ρεύμα πολύ πιο γρήγορα. Σημαντικό μειονέκτημα επίσης είναι η απώλεια θερμότητας που παρουσιάζουν. Συγκεκριμένα, η παραγόμενη τάση μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, μιας και το ρεύμα διοχετεύεται σε μια μόνο συσκευή, αγνοώντας τις λοιπές συσκευές οι οποίες είναι τοποθετημένες παράλληλα.

Αν και τα διπολικά τρανζίστορ αποτελούν πλέον ένα ιδιαίτερα εύκολο κατασκευαστικό σύστημα, με αποτέλεσμα το κόστος παραγωγής τους πλέον να είναι ιδιαίτερος χαμηλό, όλοι αυτοί οι περιορισμοί που εισαγάγουν κατά τον σχεδιασμό

και την υλοποίηση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, το καταστούν μια πολύ πιο ακριβή συσκευή σε σύγκριση με τις τύπου MOSFET συσκευές.

Τα MOSFET τρανζίστορ υπερσχύουν αρκετά συγκρινόμενα με τα διπολικά. Αποτελούν συσκευές οι οποίες διαθέτουν πληθώρα φορέων, οι οποίοι δεν διαχέονται σε ανεπιθύμητες περιοχές κατά την μετάβαση. Υπερτερούν επίσης των διπολικών σε εφαρμογές οι οποίες υλοποιούνται σε υψηλές συχνότητες. Στην συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων η απώλεια ενέργειας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εναλλαγής, αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα, στο οποίο τα MOSFET τρανζίστορ έχουν λειτουργήσει ως μια πολύ καλή λύση. Επιπλέον, αντέχουν κατά την ξαφνική εφαρμογή υψηλών ρευμάτων και τάσεων, χωρίς να σταματούν τη λειτουργία τους, εξαιτίας της δεύτερης κατάρρευσης που μπορεί να υποστούν. Επίσης τα MOSFET μπορούν να τοποθετηθούν παράλληλα λόγω της αύξησης της παραγόμενης τάσης που προκαλείται μέσω αυτών με την αύξηση της θερμοκρασίας, διαδικασία εξαιτίας της οποίας επιτυγχάνεται η διανομή ρεύματος στα λοιπά στοιχεία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.



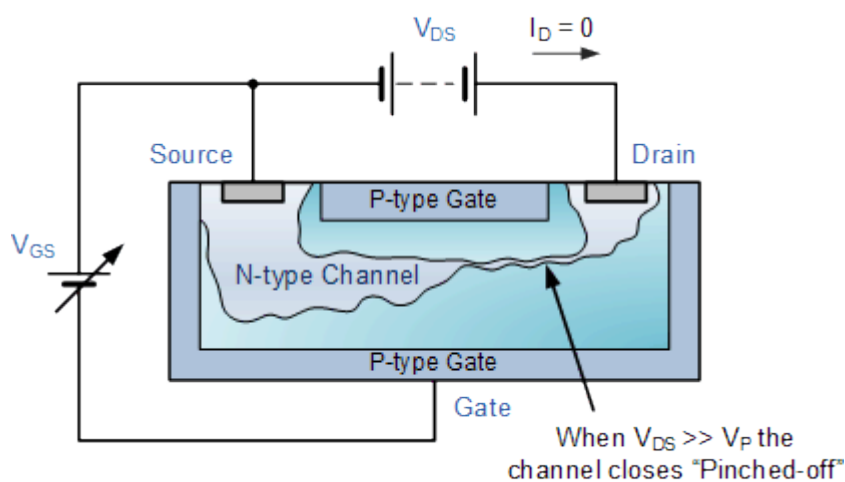
Εικόνα 1.15: Διάγραμμα περιοχών λειτουργίας και απόδοσης MOSFET τρανζίστορ

Στην περίπτωση των υψηλών τάσεων κατάρρευσης (>200V) τα MOSFET τρανζίστορ παρουσιάζουν υψηλότερη πτώση τάσης από τα αντίστοιχα διπολικά τρανζίστορ. Αυτή η ιδιότητα καθιστά τα διπολικά τρανζίστορ πιο ελκτικά παρόλο το

κόστος λειτουργίας που μπορεί να εμφανισθεί στις υψηλές συχνότητες.

### 1.20 JFET

Τα τρανζίστορ τύπου JFET μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ρυθμιστές τάσης ή ως ελεγχόμενοι εναλλάκτες. Υπάρχουν δύο τύποι JFET τρανζίστορ οι n και p τύπου αντίστοιχα. Οι n τύπου αποτελούνται από ένα ημιαγώγιμο υλικό ενισχυμένο με μεγάλο πλήθος αρνητικά φορτισμένων φορέων και αντίστοιχα οι p τύπου αποτελούνται από μια ημιαγώγιμη επιφάνεια ενισχυμένη με αποδέκτες (οπές). Σε κάθε άκρη της διάταξης υπάρχουν ωμικές επαφές οι οποίες λειτουργούν ως πηγή (source) και περιοχή διοχέτευσης φορτίου. Το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται στην περιοχή που βρίσκεται ανάμεσα από την περιοχή διοχέτευσης φορτίου και την πηγή αντίστοιχα. Η μεταφορά του ρεύματος μπορεί να περιορισθεί ή να αλλάξει φορά αν εφαρμοσθεί ανάστροφη τάση στα άκρα της πύλης του JFET. Στην Εικόνα 1.16 διαφαίνεται το σχηματικό ενός JFET τρανζίστορ τύπου n.



Εικόνα 1.16: Λειτουργία JFET τρανζίστορ τύπου n

Συγκρίνοντας τα MOSFET με τα JFET τρανζίστορ τα MOSFET πλεονεκτούν σε σχέση με τα JFET. Αρχικά τα JFET λειτουργούν καλά κυρίως στην περιοχή εξασθένισης, δηλαδή στην περιοχή όπου το σύστημα είναι σε θέση να λειτουργεί κυρίως ως αντιστάτης, ενώ από την άλλη τα MOSFET είναι πιο ευέλικτα και αποδοτικά τόσο στην περιοχή ενίσχυσης όσο και στην περιοχή εξασθένισης. Επίσης

τα MOSFET εξαιτίας της κατασκευής τους διαθέτουν πολύ μεγαλύτερη εμπέδηση εισόδου συγκρινόμενα με τα JFET, εξαιτίας της πολύ μικρής διαρροής ρεύματος που μπορεί να παρουσιάσουν. Τέλος οι χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος των JFET είναι λιγότερο αποδοτικές σε σχέση με τις αντίστοιχες των MOSFET, χαρακτηριστικό που αποδίδεται στην υψηλή αντίσταση που παρουσιάζουν τα JFET στην περιοχή διοχέτευσης φορέων (drain).

Οι διατάξεις που περιεγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για την κατασκευή ολοκληρωμένων οπτοηλεκτρονικών συστημάτων. Όπως έχει γίνει ήδη αντιληπτό είναι ιδιαίτερος σημαντικό το είδος των υλικών που χρησιμοποιούνται στα συστήματα αυτά. Στην αγορά υπάρχουν διατάξεις οι οποίες έχουν ως βάση τόσο οργανικά όσο και ανόργανα υλικά. Στα κεφάλαια που ακολουθούν θα παρουσιασθεί μια λεπτομερής αναφορά των συστημάτων αυτών καθώς επίσης και εφαρμογές που έχουν παρουσιασθεί στη βιομηχανία.

### **Οπτοηλεκτρονικά Συστήματα**

Πριν τη λεπτομερή παρουσίαση των ιδιοτήτων των οπτοηλεκτρονικών συστημάτων που πρόκειται να υλοποιηθεί στα Κεφάλαια 2 & 3 είναι σημαντικό να γίνει μια πρώτη αναφορά στα συστήματα που υπάγονται σε αυτή την κατηγορία και στη βασική τους λειτουργία.

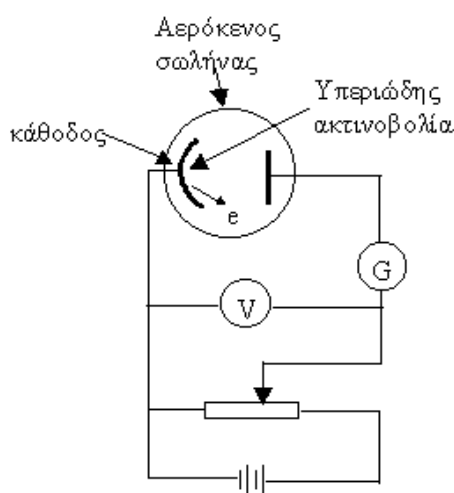
#### **1.21 Φωτοβολταϊκά**

Τα φωτοβολταϊκά αποτελούν οπτοηλεκτρονικές διατάξεις οι οποίες έχουν την ικανότητα να εγκλωβίζουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και να αποδίδουν ηλεκτρικό ρεύμα.



Εικόνα 1.17: Φωτοβολταϊκά πάνελ

Η λειτουργία τους στηρίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Όπως διαφαίνεται και στην Εικόνα 1.18 η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δεσμεύεται μέσω ενός αγώγιμου φωτοσυλλέκτη. Με την πρόσπτωση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του φωτοσυλλέκτη σκεδάζονται ηλεκτρόνια τα οποία συλλέγονται.

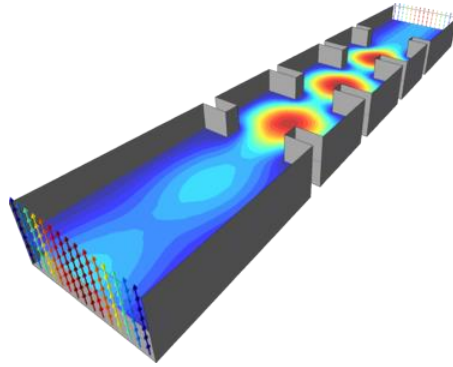


Εικόνα 1.18: Διατάξη δέσμευσης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο)

Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η εμφάνιση ρεύματος. Όπως διαφαίνεται και στην Εικόνα το ρεύμα αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί ως τροφοδοσία κυκλωμάτων. Η δομή των συστημάτων ποικίλει αναλόγως από τα υλικά από τα οποία αποτελούνται. Σε επόμενες παραγράφους θα γίνει πλήρης ανάλυση της δομής τους και των τεχνικών τους χαρακτηριστικών,

### 1.22 Κυματοδηγοί

Οι κυματοδηγοί είναι διατάξεις μέσω των οποίων μπορεί να δρομολογηθεί ελεγχόμενα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία διαφόρων μηκών κύματος.



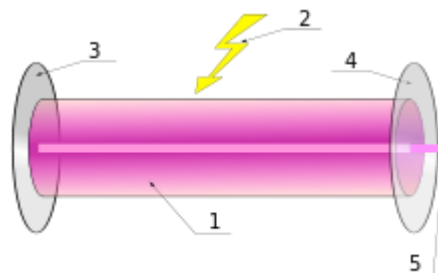
Εικόνα 1.19: Κυματοδηγός μέσα από προσομοίωση με λογισμικό που χρησιμοποιεί μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

Οι κυματοδηγοί συνιστώνται από διεπιφάνειες. Διάφοροι τρόποι κατασκευής, υλικά και τεχνοτροπίες θα παρουσιασθούν σε επόμενες παραγράφους.

Η κυματοδηγήση είναι αποτέλεσμα πολλαπλών ανακλάσεων σε περιοχές παρόμοιες με αυτή που παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.19. Ο στόχος είναι τόσο το πλάτος της έντασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας όσο και η πόλωση της να παραμείνουν αναλλοίωτα κατά τη διάρκεια των ολικών ανακλάσεων.

### 1.23 Λείζερ

Τα λέιζερ είναι διατάξεις οι οποίες παράγουν συμφασικό μονοχρωματικό φως, το οποίο διαδίδεται σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, σχηματίζοντας στενές δέσμες. Παράγουν μη σύμφωνο φως προς όλες τις διευθύνσεις και έχουν μεγάλο φασματικό εύρος.



Στην Εικόνα 1.20 παρουσιάζεται η βασική δομή ενός τυπικού λέιζερ οποιουδήποτε είδους. Η περιοχή 1 είναι το ενεργό υλικό του λέιζερ μέσω του οποίου μετατρέπεται η εξωτερική ενέργεια σε δέσμη φωτός. Η περιοχή 2 υποδεικνύει την προσφερόμενη παροχή ενέργειας από κάποια εξωτερική πηγή. Στην περιοχή 3 βρίσκεται ένα κάτοπτρο υψηλής ανακλαστικότητας και στην περιοχή 4 η έξοδος της δέσμης που έχει προκύψει έπειτα από πολλαπλές ανακλάσεις.

Υπάρχουν πολλοί τύποι λέιζερ λόγω της ποικιλίας των υλικών που τα συνιστούν αλλά και του τρόπου κατασκευής τους. Σε επόμενες παραγράφους θα αναφερθούν πιο αναλυτικά διατάξεις λέιζερ.

## **Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> : Ανόργανα Οπτοηλεκτρονικά Συστήματα**

### 2.1 Εισαγωγή

Τα ανόργανα υλικά είναι τα πρώτα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνθεση ηλεκτρονικών και κατ' επέκταση οπτοηλεκτρονικών συστημάτων. Με τον όρο ανόργανα υλικά εννοούνται υλικά τα οποία δεν συνιστώνται από το στοιχείο του άνθρακα. Τα δύο υλικά με την πιο ευρεία χρήση σε εφαρμογές ηλεκτρονικών είναι το πυρίτιο και το γερμάνιο. Στις παραγράφους που ακολουθούν θα παρουσιασθεί αναλυτικά τόσο η δομή των στοιχείων αυτών όσο και η εφαρμογή τους σε διάφορα οπτοηλεκτρονικά συστήματα.

### 2.2 Πυρίτιο

Το πυρίτιο, ο κύριος ημιαγωγός στην κατασκευή μικροηλεκτρονικών κυκλωμάτων, έχει στο παρελθόν θεωρηθεί ακατάλληλο για κατασκευή οπτοηλεκτρονικών εφαρμογών επειδή παρουσιάζει έμμεση μετάβαση των ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη κατώτερο ενεργειακό επίπεδο της ζώνης αγωγιμότητας, η οποία συνοδεύεται από εμφάνιση φωνονίου στον κρύσταλλο και αυτό έχει ως αποτέλεσμα ελάχιστη μόνο εκπομπή φωτός. Τα laser λοιπόν που υπάρχουν, βασίζονται σε υλικά που παρουσιάζουν άμεση μετάβαση από τη ζώνη σθένους στο κατώτερο επίπεδο της ζώνης αγωγιμότητας, όπως πχ το GaAs το οποίο μπορεί εύκολα να εκπέμψει φως. Αυτά τα υλικά όμως είναι ακριβά και δύσκολα επεξεργάσιμα για τη βιομηχανία ηλεκτρονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

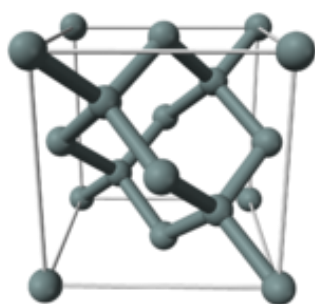
### 2.3 Περιγραφή του στοιχείου

Το πυρίτιο είναι ένα αμέταλλο χημικό στοιχείο. Μετά το οξυγόνο, φαίνεται να αποτελεί το υλικό σε μεγαλύτερη αφθονία στη γη και πιο συγκεκριμένα το 8<sup>ο</sup> σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα χημικά στοιχεία. Στη φύση συναντάται είτε (σπάνια) απομονωμένο είτε ως μέρος άλλων χημικών ενώσεων και αποσπάται με ειδικές μεθόδους. Η πιο συνήθης σύσταση στην οποία μετέχει εμπεριέχει διοξείδιο, άμμο και



χαλαζία. Απομονώθηκε για πρώτη φορά και καταγράφηκε ως ξεχωριστό χημικό στοιχείο από τον Μπερζέλιους το 1823. Ως προς την κρυσταλλική του δομή καταγράφηκε από τον Μπερζέλιους και μέχρι και σήμερα το ακατέργαστο πυρίτιο υπάγεται στην κατηγορία των άμορφων υλικών.

Το 1854 ο Σαίντ Κλέρ Ντεβίλ κατάφερε να παρασκευάσει για πρώτη φορά πυρίτιο με κρυσταλλική δομή. Το κρυσταλλικό πυρίτιο διαθέτει πλέγμα κανονικών οκτάεδρων, το χρώμα του είναι γκρι και διαθέτει μια μεταλλική λάμψη. Η κρυσταλλική του δομή διαφαίνεται στην Εικόνα 2.1.



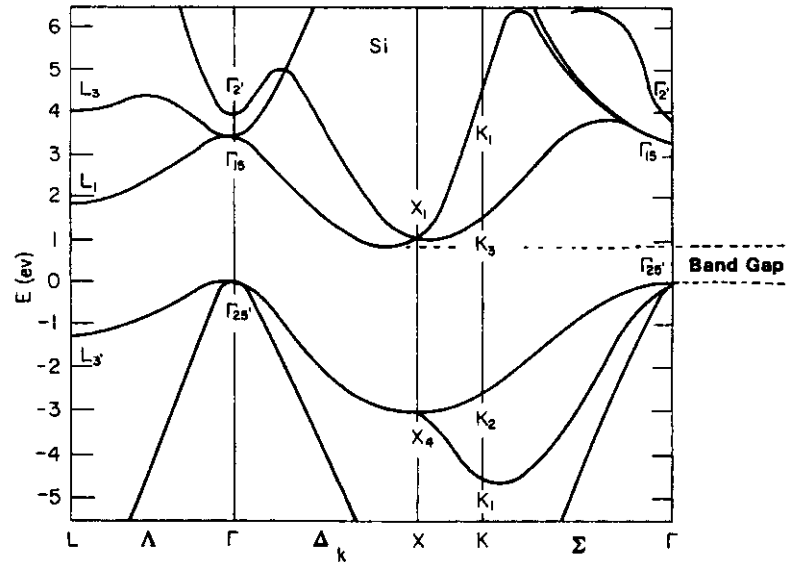
Εικόνα 2.1: Κρυσταλλική δομή πυριτίου

Το πυρίτιο είναι ένα τετρασθενές στοιχείο με ατομικό αριθμό 14. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο μετά την πρώτη ανακάλυψη του το πυρίτιο δεν χρησιμοποιήθηκε σε σύγκριση με άλλους ημιαγωγούς. Με την επίλυση τεχνικών ζητημάτων που εμπόδιζαν τη χρήση του, το πυρίτιο αποτέλεσε και αποτελεί μέχρι και σήμερα το πιο σημαντικό ημιαγωγικό στοιχείο για εφαρμογές ηλεκτρονικής, οπτοηλεκτρονικής και τηλεπικοινωνιών.

#### 2.4 Αγωγιμότητα πυριτίου

Ως προς την ηλεκτρική του αγωγιμότητα κατατάσσεται στην κατηγορία των ημιαγωγών και όπως όλοι οι κλασικοί ημιαγωγοί η αύξηση της θερμοκρασίας του οδηγεί και στην αύξηση της αγωγιμότητάς του.

Αποτελεί έναν ημιαγωγό έμμεσου ενεργειακού χάσματος με την στάθμη Fermi να βρίσκεται ακριβώς στη μέση του ενεργειακού του χάσματος. Η ενεργειακή δομή του κρυσταλλικού πυριτίου διαφαίνεται στην Εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2: Ενεργειακές Ζώνες Πυριτίου

### 2.5 Πορώδες πυρίτιο

Το πορώδες πυρίτιο μπορεί να αξιοποιηθεί τόσο σε εφαρμογές εκπομπής φωτός όσο και σε εφαρμογές κυματοδότησης. Πολλές ομάδες έχουν παρουσιάσει εφαρμογές όπως συσκευές εκπομπής φωτός, οπτικούς κυματοδηγούς και φωτοανιχνευτές.

Πρόσφατα αποδείχθηκε ότι το πορώδες πυρίτιο το οποίο αναπτύσσεται πάνω σε πολυκρυσταλλικά υμένα πυριτίου (PPS porous poly-Si) είναι πολύ πιο αποδοτικό σε σχέση με το συμβατικό πορώδες πυρίτιο PS. Τα PPS μπορούν να επιστρωθούν σε πυρίτιο, οξείδια, μέταλλα και γυαλί. Τα PPS είναι πολύ πιο ευέλικτα κατά την επίστρωση, μιας και δεν διαθέτουν τόσο τραχιά επιφάνεια όσο τα τυπικά PS και παρουσιάζουν κανονικότητα στην κρυσταλλική τους δομή. Οι ιδιότητες αυτές είναι πολύ σημαντικές για συσκευές κυματοδότησης των οποίων οι διαστάσεις είναι αρκετά μεγάλες. Για την ορθή σχεδίαση και κατασκευή συστημάτων κυματοδότησης

απαιτείται κανονικότητα και υψηλή ακρίβεια στις επαφές των επιφανειών που αποτελούν το σύνολο της συσκευής.

Τα προβλήματα απόδοσης που μπορεί να παρουσιάσουν τα συστήματα αυτά συνδέονται με την παραδοσιακή ηλεκτροχημική μέθοδο ανόδου. Οι επιφάνειες που έχουν κατασκευαστεί με υγρή χάραξη φαίνεται να είναι ασταθή και η μικρο-δομή τους να μην παρουσιάζει κανονικότητα.

Προς το παρόν οι PS-διατάξεις οι οποίες έχουν αξιοποιηθεί για την κατασκευή ηλέκτρο-φωτοβόλων συσκευών έχουν χαμηλή αποδοτικότητα. Η δυσλειτουργία αυτή αποτρέπει την εφαρμογή PS στην κατασκευή LED. Εν αντιθέσει με τα PS τα PPS εξαιτίας της δομής τους καθώς και της ποικιλίας μεθόδων με τις οποίες μπορεί να γίνει η χάραξη τους, φαίνεται να είναι πολύ πιο αποδοτικά σε σχέση με τα κλασικά PS.

Έχουν διατυπωθεί αρκετές θεωρίες οι οποίες προσπαθούν να εξηγήσουν τον μηχανισμό με τον οποίο είναι σε θέση το πορώδες πυρίτιο να εκπέμπει φως. Μια θεωρία αναφέρει ότι εκπομπή φωτός μέσω του πορώδους πυριτίου οφείλεται στον εγκλωβισμό κβάντων είτε σε επιφάνειες 2 B.E., είτε σε κβαντικούς σωλήνες (wires) 1 B.E. είτε σε κβαντικές τελείες 0 B.E, σε nano τάξεις μεγέθους. Άλλοι ερευνητές θεωρούν ότι η εκπομπή φωτός οφείλεται σε κέντρα εκπομπής ακτινοβολίας που διαθέτουν τα οξείδια του πυριτίου. Τέλος η πιο ακμάζουσα άποψη στην ερευνητική κοινότητα είναι ότι, η εκπομπή φωτός από το πορώδες πυρίτιο προέρχεται από εγκλωβισμό φορέων, οι οποίοι φορείς έχουν προκύψει εξαιτίας των ατελειών που μπορεί να έχει το πλέγμα του οξειδίου.

## 2.6 Κρυσταλλικό πυρίτιο σε εφαρμογές laser

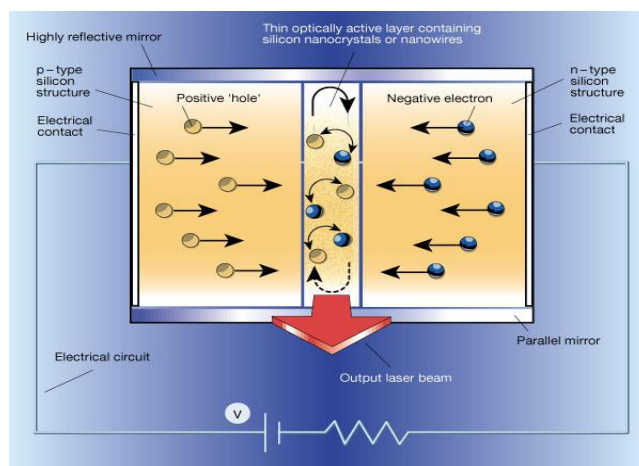
Ο Pavesi και οι συνεργάτες του έκλεισαν νανοκρυστάλλους πυριτίου μεταξύ στρωμάτων οξειδίου του πυριτίου σαν σάντουιτς και διέγειραν το σύστημα με πράσινο φως laser. Η συσκευή τότε εξέπεμψε μια πολύ εντονότερη δέσμη κόκκινου φωτός η οποία εμφανίζει ένα βαθμό ενίσχυσης όμοιο με τα laser που βασίζονται σε υλικά με “άμεσα ενεργειακά χάσματα”. Η ομάδα του Pavesi πιστεύει ότι η ηλεκτρονική αλληλεπίδραση μεταξύ των νανοκρυστάλλων του πυριτίου και του οξειδίου του πυριτίου στην επιφάνεια επαφής τους οδηγεί σε κάποιες ενδιάμεσες στάθμες ενέργειας από τις οποίες εκπέμπεται το φως και είναι υπεύθυνη για την επιτυχία της συσκευής.

Αυτό σημαίνει ότι κατά την απορρόφηση φωτός από ένα κρύσταλλο πυριτίου τα ηλεκτρόνια που θα εγκαταλείψουν τη ζώνη σθένους δεν θα βρεθούν κατ' ευθείαν στο ελάχιστο ενεργειακό επίπεδο όπου συμβαίνει η αναστροφή πληθυσμών για να ακολουθήσει η εκπομπή φωτός laser. Με την απορρόφηση φωτός από το πυρίτιο πραγματοποιείται άντληση των ηλεκτρονίων από την υψηλότερη ενεργειακή στάθμη της ζώνης σθένους (HOMO) στην χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη της ζώνης αγωγιμότητας (LUMO) σε χρόνους της τάξης των pico-sec. Στη συνέχεια συμβαίνει ενδιάμεση επιστροφή με ταχείς ρυθμούς της τάξεως των νάνο- δευτερολέπτων στη στάθμη όπου επιτυγχάνεται η αναστροφή των πληθυσμών. Από αυτή τη στάθμη η επιστροφή των ηλεκτρονίων ξανά προς τη HOMO γίνεται αργά σε χρόνους της τάξης των nano-sec και συνοδεύεται από σημαντική εκπομπή φωτός.

Το φως όμως αυτό δεν είναι συμφασικό, δηλαδή τα φωτόνια δεν έχουν την ίδια φάση ενώ το συμφασικό φως είναι απαραίτητο για την επιτυχή εκπομπή λέιζερ. Εξάλλου ένα εμπορικά εκμεταλλεύσιμο λέιζερ πυριτίου θα απαιτούσε να διεγείρεται ηλεκτρικά παρά με κάποιο άλλο λέιζερ. Κάτι τέτοιο θα το ενσωμάτωνε εύκολα στα μικροκυκλώματα. Μελλοντικές έρευνες εστιάζουν σε διαφορετικές διατάξεις και τοπολογίες των πυριτικών νάνο -κρυστάλλων, σε μια προσπάθεια να βρεθούν ακόμη πιο δυνατοί μηχανισμοί εκπομπής φωτός.

Στην Εικόνα 2.3 διαφαίνεται μια διαφοροποιημένη διάταξη σε σχέση με αυτή του Pavesi. Συγκεκριμένα πρόκειται για μια pn επαφή όπου στην περιοχή ένωσης τους έχει τοποθετηθεί μια διεπιφάνεια με νάνο -κρυστάλλους πυριτίου. Όπως

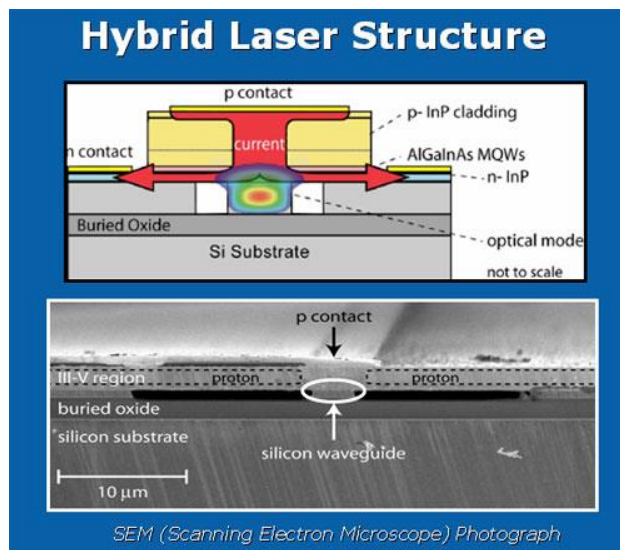
διαφαίνεται και στην Εικόνα με την εφαρμογή τάσης σε κατάσταση ορθής πόλωσης της pn επαφής επιτυγχάνεται εκπομπή ακτινοβολίας. Η συγκεκριμένη διάταξη αποτελεί μια ακόμη εφαρμογή λέιζερ με χρήση κρυσταλλικού πυριτίου.



Εικόνα 2.3: pn επαφή όπου στην διεπιφάνεια της επαφής έχουν τοποθετηθεί νανοκρύσταλλοι πυριτίου

Μια σημαντική εφαρμογή η οποία χρησιμοποιείται σε σημαντικό βαθμό τα τελευταία χρόνια είναι τα υβριδικά λέιζερ πυριτίου. Συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα λέιζερ από φωσφορούχο ίνδιο στο οποίο είναι ενσωματωμένος ένας κυματοδηγός από πυρίτιο. Η ενσωμάτωση των δύο αυτών διαφορετικών υλικών μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Η επικρατέστερη τεχνική είναι αυτή της απευθείας ανάπτυξης φωσφορούχου ινδίου πάνω στην επιφάνεια του πυριτίου. Η τεχνική αυτή τις περισσότερες φορές κατέληξε σε ανεπιτυχή αποτελέσματα.

Η εταιρία Intel σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο Santa Barbara της Καλιφόρνια έχει παρουσιάσει στην αγορά ένα υβριδικό λέιζερ πυριτίου όπου η ενσωμάτωση του κυματοδηγού στο λέιζερ επιτυγχάνεται με την ανάπτυξη μιας διεπιφάνειας οξειδίου με χρήση πλάσματος σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η σχηματική αναπαράσταση της διάταξης διαφαίνεται στην Εικόνα 2.4.



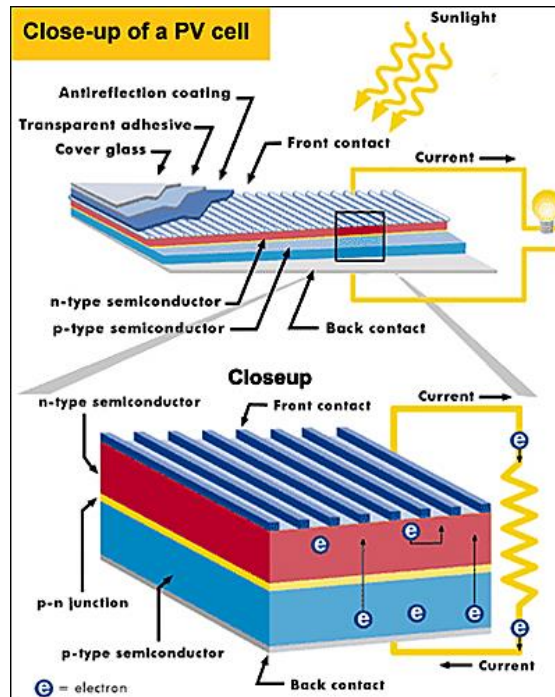
Εικόνα 2.4.: Υβριδικό λέιζερ πυριτίου από την εταιρεία Intel

Η λογική λειτουργίας αυτού του τύπου λέιζερ στηρίζεται επίσης στην ύπαρξη μιας pn επαφής με βασική διαφοροποίηση την ύπαρξη του ενδογενούς πυριτίου ως υπόστρωμα και του p πυριτίου ως ανώτερη επιφάνεια συγκρότησης της διάταξης.

Τα υβριδικά λέιζερ πυριτίου αποτελούν εφαρμογές μεγάλης αναγνωσιμότητας στο αντίστοιχο κοινό και με πολύ υψηλές αποδόσεις. Η εφαρμογή της Intel που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο γνωρίζει λόγω της καινοτομίας παραγωγής της την μεγαλύτερη ανταπόκριση στο καταναλωτικό κοινό.

### 2.7 Κρυσταλλικό πυρίτιο σε φωτοβολταϊκά κελιά

Πλήθος εφαρμογών ανόργανων φωτοβολταϊκών με βάση το κρυσταλλικό πυρίτιο έχουν παρουσιασθεί στην αγορά. Οι πρώτες διατάξεις των οποίων η τεχνολογία χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές με κύριο ημιαγώγιμο υλικό το κρυσταλλικό πυρίτιο είναι αυτή που διαφαίνεται στην Εικόνα 2.5.



Εικόνα 2.5: pn επαφή πυριτίου με παγίδες φωτός στην ανώτερη επιφάνεια για εφαρμογή σε φωτοβολταϊκά συστήματα

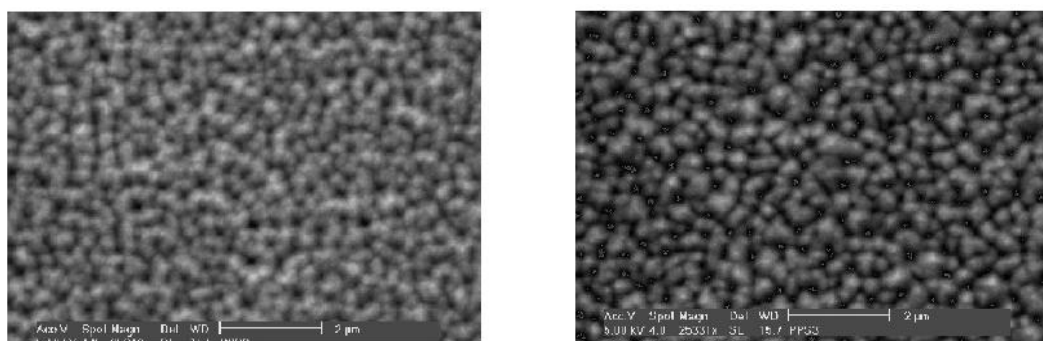
Συγκεκριμένα πρόκειται για μια pn επαφή πυριτίου, στην ανώτερη και κατώτερη επιφάνεια της οποίας είναι τοποθετημένοι δυο αγωγίμες επαφές μέσω της οποίας συνδέεται η διάταξη με το υπόλοιπο κύκλωμα το οποία τροφοδοτεί. Στην ανώτερη επιφάνεια βρίσκονται τα αυλάκια που διαφαίνονται στην Εικόνα τα οποία λειτουργούν ως παγίδες φορέων φωτός.

### 2.8 Ιδιότητες κυματοδότησης πορώδους πυριτίου

Σε εφαρμογές κυματοδότησης, το πορώδες πυρίτιο πρέπει να παρουσιάζει κανονική κατανομή στο πλέγμα και να έχει μια σταθερή επιφάνεια. Όπως ήδη έχει αναφερθεί και προηγουμένως έχουν παρουσιασθεί πολλά θέματα με την κλασική μέθοδο ηλεκτροχημικής ανόδου. Η επιφάνεια η οποία προκύπτει μέσα από υγρή

χάραξη δεν είναι σταθερή στον επιθυμητό βαθμό και δεν παρουσιάζει κανονικότητα από άποψη πλέγματος.

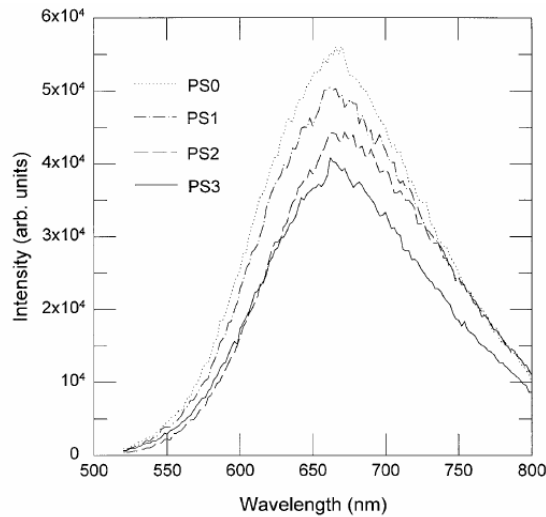
Με έναυσμα αυτή την ιδιομορφία αρκετές ερευνητικές ομάδες έχουν προτείνει στη βιβλιογραφία διάφορες τεχνικές χάραξης. Συγκεκριμένα ερευνητές πρότειναν μια μέθοδο στεγνής πίσω (back) χάραξης η οποία μπορεί να επιτευχθεί μέσα από την αλληλεπίδραση ιόντων με οξειδωμένη πολυσιλικόνη. Απόρροια αυτής της διαδικασίας είναι μια πορώδης δομή με κανονική κρυσταλλική δομή. Μια μικρογραφία του πορώδους πυριτίου όπως καταγράφηκε από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM διακρίνεται στην Εικόνα 2.6. Τα δύο δείγματα της Εικόνας 2.6 διαφέρουν στους χρόνους για τους οποίους τα ιόντα αντέδρασαν με την πολυσιλικόνη.



Εικόνα 2.6: Εικόνες από SEM για δύο διαφορετικές περιπτώσεις ανάπτυξης πυριτίου για εφαρμογές κυματοδήγησης

Η συγκεκριμένη τεχνική έχει αποδειχθεί ως μια από τις πιο αποδοτικές στην υλοποίηση μεγάλων PS επιφανειών έντονης κανονικότητας. Η ιδιότητα αυτή έχει μεγάλο αντίκτυπο σε συστήματα κυματοδήγησης, τα οποία αποτελούν ίσως τις πιο σημαντικές διατάξεις οι οποίες εφαρμόζονται σε οπτοηλεκτρονικά συστήματα. Ο δείκτης διάθλασης των PS εξαρτάται άμεσα από το πόσο πορώδες είναι το υλικό. Σε σχέση με αυτή τους την ιδιότητα χρησιμοποιούνται είτε ως τα κύρια υλικά στον πυρήνα του συστήματος κυματοδήγησης είτε επιστρώνονται γύρω από τον εκάστοτε κυματοδηγό.





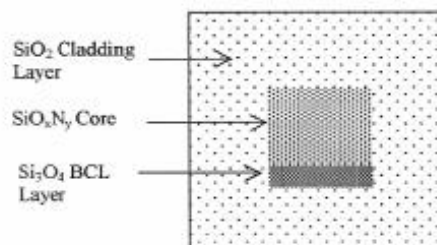
Εικόνα 2.7.: Μετρήσεις PS

## 2.9 Οπτοηλεκτρονικές συσκευές με πορώδες πυρίτιο

### Σχεδιασμός κυματοδηγών

Η ομάδα Twente έχει πραγματοποιήσει μια λεπτομερή μελέτη πάνω στο σχεδιασμό και δημιουργία κυματοδηγών πάνω σε PECVD πυριτιούχα οξονιτρίδια. Στην Εικόνα 2.8 διαφαίνεται η βασική δομή των στοιχείων.

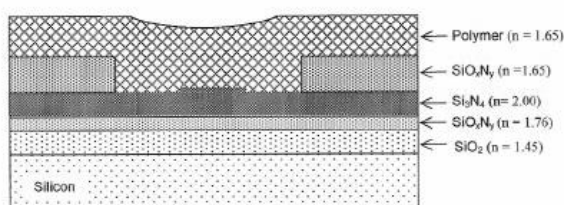
Συγκεκριμένα πρόκειται για ένα σύστημα στο οποίο μια οπτική ίνα μεταφέρει σήμα διαφόρων μηκών κύματος σε WDM δίκτυα. Για την ορθή λειτουργία της διάταξης αυτή απαιτείται ένας add drop πολυπλέκτης (multiplexer) εξαιτίας του οποίου επιτυγχάνεται η εκπομπή σήματος. Για τη συσκευή που παρουσιάζεται στην Εικόνα οι ερευνητές κατασκεύασαν ένα κυματοδηγό από οξονιτρίδια του πυριτίου στηριζόμενοι στη λογική του Mach – Zehnder φερόμετου.



Εικόνα 2.8: Κυματοδηγοί πάνω σε PECVD

### 2.10 Μη γραμμικοί κυματοδηγοί πορώδους πυριτίου

Τα οξυνιτρίδια του πυριτίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την κατασκευή μη γραμμικών κυματοδηγών. Στην Εικόνα 2.9 παρουσιάζεται η σχηματική αναπαράσταση ενός μη γραμμικού κυματοδηγού. Στη συσκευή της Εικόνας 2.9 ο προσδιορισμός του δείκτη διάθλασης της επιφάνειας των οξυνιτρίδιων που εφάπτεται με το πολυμερές είναι πολύ σημαντικό κομμάτι. Η παράμετρος αυτή καθορίζει την ένταση του πεδίου το οποίο θα εμφανισθεί στο μη γραμμικό πολυμερές



Εικόνα 2.9: Αναπαράσταση μη γραμμικού κυματοδηγού

### 2.11 Γερμάνιο

Το γερμάνιο είναι ένα ημιμέταλλο χημικό στοιχείο. Σε σύγκριση με το πυρίτιο το γερμάνιο συναντάται πολύ πιο δύσκολα σαν ελεύθερο στοιχείο στη φύση, μιας και είναι διεσπαρμένο σε αφθονία στην λιθόσφαιρα και αυτό το καθιστά ιδιαίτερος σπάνιο.

Ανακαλύφθηκε από τον Wickler το 1886 στη Γερμανία. Αρχικά, για την παραγωγή του Γερμανίου χρησιμοποιούταν ένα ορυκτό συγγενές του αργύρου. Αργότερα, ανακαλύφθηκε στη Νότια Αμερική άλλο ορυκτό, συγγενές του αργύρου, που το ονόμασαν γερμανίτη. Ο γερμανίτης περιέχει 6% γερμάνιο. Το καθαρό γερμάνιο είναι υλικό σκληρό, εύθραυστο και έχει αγωγιμότητα 10 φορές μικρότερη της αγωγιμότητας του χαλκού.

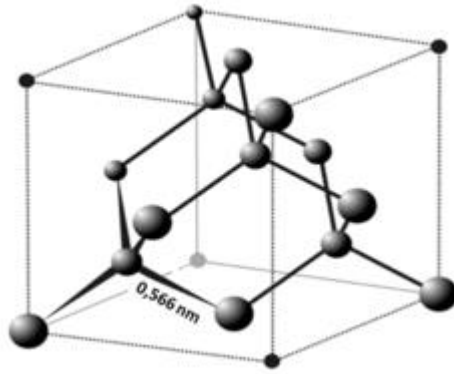
### 2.12 Χημική σύσταση γερμανίου

Το γερμάνιο είναι ένα τετρασθενές στοιχείο και διαθέτει στις στοιβάδες του 32 ηλεκτρόνια. Όπως και στο πυρίτιο ο τρόπος κατανομής των ηλεκτρονίων τους και κατ' επέκταση η ευκινησία των  $n$  φορέων τους τα κατατάσσει στην κατηγορία των ημιαγωγών. Συγκεκριμένα, το γερμάνιο και το πυρίτιο δεν συγκρατούν τα ηλεκτρόνια σθένους ούτε πολύ ισχυρά ούτε πολύ χαλαρά, γι' αυτό είναι και οι καλύτεροι ημιαγωγοί στην φύση.

### 2.13 Κρυσταλλική δομή γερμανίου

Το γερμάνιο είναι ένα κρυσταλλικό υλικό. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερων των  $100^{\circ}\text{C}$  οι δεσμοί που συγκρατούν το κρυσταλλικό του πλέγμα σπάνε. Η διαδικασία αυτή καταστρέφει την κανονική του κρυσταλλική δομή και αυξάνει την αγωγιμότητα του.

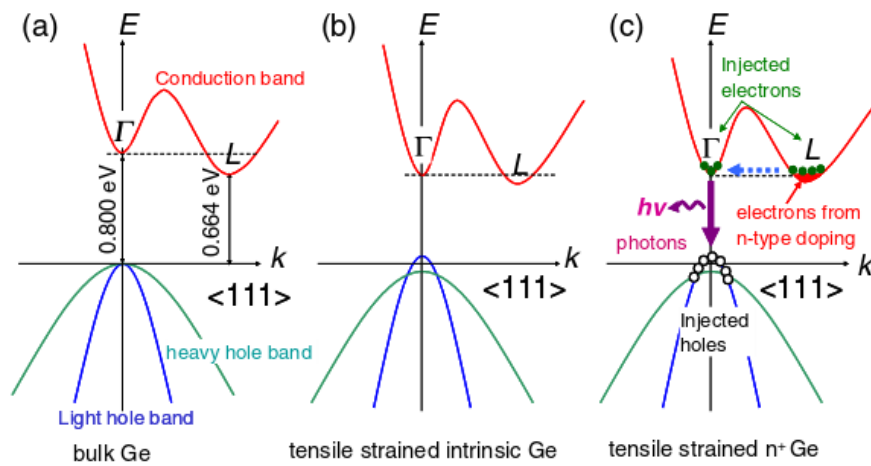
Συγκεκριμένα υπάρχουν τέσσερις αλλοτροπικές μορφές γερμανίου, η  $\alpha$ -, η  $\beta$ -, η  $\gamma$ - και η  $\delta$ -μορφή. Τα άτομα στον κρύσταλλο  $\alpha$ -Ge, που είναι η μορφή σε κανονική θερμοκρασία και πίεση, σχηματίζουν ομοιοπολικούς δεσμούς (υβριδισμός  $sp^3$ ) και κρυσταλλώνονται στη δομή του αδάμαντος που αποτελείται από ένα ενδοκεντρωμένο κυβικό πλέγμα (fcc) που στην βάση του αποτελείται από δύο ίδια άτομα. Στη δομή αυτή κάθε άτομο του πλέγματος περιβάλλεται από τέσσερις πρώτους γείτονες που σχηματίζουν ένα κανονικό τετράεδρο με παράμετρο κυψελίδας  $a = 0,56579060 \text{ nm}$  στους  $25^{\circ}\text{C}$ . Το  $\beta$ -Ge, που κρυσταλλώνεται στο τετραγωνικό σύστημα, και το  $\delta$ -Ge, που κρυσταλλώνεται στο κυβικό, είναι σταθερά σε πιέσεις μεγαλύτερες από  $12 \text{ GPa}$  ( $118431 \text{ atm}$ ). Η τετραγωνική  $\gamma$ -μορφή αποσυμπιέζεται προς  $\beta$ -Ge. Η δομή του διαφαίνεται στην Εικόνα 2.10.



Εικόνα 2.10: Κρυσταλλική δομή γερμάνιου

#### 2.14 Ενεργειακή δομή γερμάνιου

Η ενεργειακή διαφορά μεταξύ του έμμεσου και άμεσου ενεργειακού χάσματος μπορεί να εξισορροπηθεί μέσα από την εφαρμογή τάσης εφέλκυσμού σε περιοχή κοντά στην ζώνη σθένους του υλικού, με αποτέλεσμα την αύξηση της ενέργειας της “ελαφριάς” ζώνης σθένους η οποία όπως διαφαίνεται και στην Εικόνα 2.11 (1b), εξαιτίας της μεταβολής επιτυγχάνει την ενεργειακή αύξηση της και κατ’ επέκταση την ανύψωση της. Αποτέλεσμα αυτής της μεταβολής είναι η άμεση μετάβαση και σύνδεση φορέων και οπών χωρίς απώλειες ή ενίσχυση από τις ταλαντώσεις του πλέγματος. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αύξηση της κινητικότητας στη ζώνη σθένους βελτιώνοντας έτσι τις οπτικές ιδιότητες του υλικού.



Εικόνα 2.11: Ενεργειακές ζώνες γερμάνιου

Σε συνδυασμό με την τάση εφελκυσμού σημαντική βελτίωση στις οπτικές ιδιότητες του υλικού προσφέρει η ενίσχυση του με φορείς (ηλεκτρόνια n-doping process). Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.11 (1γ) η μεταβολή αυτή στον πληθυσμό των φορέων μειώνει την ενεργειακή διαφορά μεταξύ άμεσου και έμμεσου ενεργειακού χάσματος. Πιο αναλυτικά, όταν οι κοιλάδες L, οι οποίες αποτελούν τις πιο χαμηλές έμμεσες ενεργειακές καταστάσεις του συστήματος, (Εικόνα γ) είναι κατειλημμένες από ηλεκτρόνια τα οποία προέρχονται από την ενίσχυση του υλικού με φορείς τύπου n (ηλεκτρόνια), οι φορείς που έχουν προέλθει από ενίσχυση (ντοπάρισμα) του υλικού τείνουν να συνδεθούν αντίστοιχα με περισσότερες διαθέσιμες οπές. Αυτή η διαδικασία τείνει και καταφέρνει να αυξήσει την ενεργειακή κατάσταση του συστήματος εξαιτίας των συνεχών συνδέσεων μεταξύ οπών και φορέων.

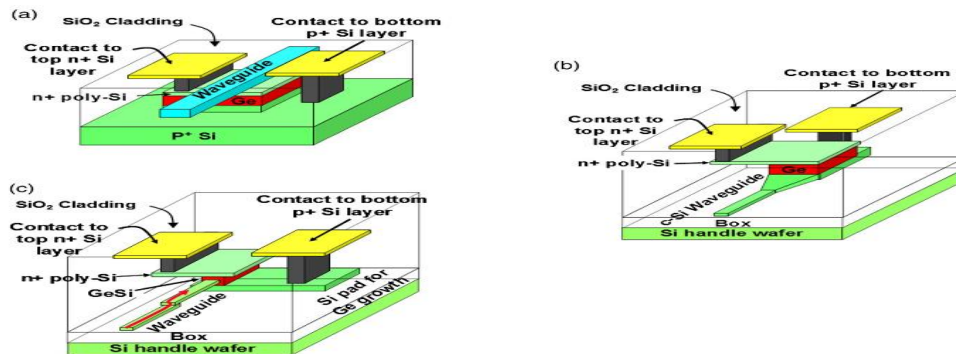
### 2.15 Γερμάνιο σε οπτοηλεκτρονικές συσκευές με βάση το πυρίτιο

Το γερμάνιο εξαιτίας της δομής του και των ιδιοτήτων είναι αρκετά εύθραυστο για να χρησιμοποιηθεί ως πρωτεύον υλικό σε ηλεκτρονικά και οπτοηλεκτρονικά συστήματα. Οι περισσότερες διατάξεις που έχουν παρουσιασθεί εμπεριέχουν το

πυρίτιο ως βάση και το γερμάνιο ως δεύτερο υλικό. Παρόλο που η περιεκτικότητα του γερμανίου στις διατάξεις είναι μικρότερη, οι εργασίες στις οποίες συνεισφέρει είναι ιδιαίτερος σημαντική για την ορθή λειτουργία των συστημάτων αυτών.

### 2.16 Γερμάνιο σε φώτο-αισθητήρες

Οι φώτο-αισθητήρες γερμανίου πάνω σε υπόστρωμα πυρίτιου είναι μια από τις πρώτες οπτοηλεκτρονικές συσκευές. Οι διατάξεις αυτές υιοθετούν την δομή των p-i-n διόδων, όπου ως ανόθευτος ημιαγωγός (intrinsic) χρησιμοποιείται το γερμάνιο και ως ημιαγωγός τύπου p ή n χρησιμοποιείται πάντα πυρίτιο. Το σημαντικό σημείο για την επιτυχή λειτουργία των διατάξεων αυτών είναι η βελτιστοποίηση του πεδίου που εμφανίζεται στην περιοχή του γερμανίου, ούτως ώστε οι φορείς να δεσμεύονται γρήγορα πριν εγκλωβιστούν σε τυχόν ατέλειες του πλέγματος. Από μελέτες που έχουν υλοποιηθεί από διάφορες ερευνητικές ομάδες πάνω σ' αυτές τις διατάξεις έχουν καταγραφεί αποδόσεις 49GHz με 2V είσοδο. Οι διατάξεις αυτές έχουν χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα εφαρμογών ειδικά σε αναλογικά ολοκληρωμένα συστήματα.



Εικόνα 2.12: Φωτοαισθητήρες γερμανίου με πυρίτιο

Οι φώτο-αισθητήρες γερμανίου με πυρίτιο για εφαρμογές κυματοδότησης είναι συστήματα τα οποία γνωρίζουν ιδιαίτερη απήγηση τα τελευταία χρόνια. Οι διατάξεις παροδικής σύζευξης και όπισθεν σύζευξης, οι οποίες διαφαίνονται στην Εικόνα 2.12, είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιημένες.

Οι διατάξεις παροδικής σύζευξης αξιοποιούν το φως που παράγεται από ένα υλικό χαμηλότερου δείκτη διάθλασης που λειτουργεί ως κυματοδηγός και μεταφέρεται σε ένα υλικό με μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης (συνήθως χρησιμοποιείται το γερμάνιο). Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται μέχρις ότου να μειωθεί η διαφορά μεταξύ του δείκτη διάθλασης των δύο υλικών. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και κατ' επέκταση η οπτική ενέργεια μεταφέρεται αργά στο υλικό με το πιο υψηλό δείκτη διάθλασης.

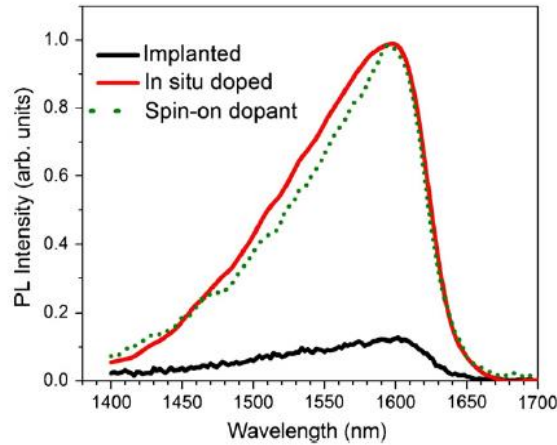
Οι διατάξεις όπισθεν σύζευξης είναι πιο αποδοτικό σε σχέση με τους παροδικής αλλά απαιτούνται συγκεκριμένα συστήματα αισθητήρων και κυματοδότησης. Στα συστήματα με σύζευξη τύπου κυματοδότησης η διαδρομή κατά μήκος του κυματοδηγού όπου υλοποιείται η οπτική απορρόφηση, πρέπει να έχει επαρκές μήκος ούτως ώστε να απορροφηθεί πλήρως το φως με το πέρας της διαδικασίας αυτής. Η συλλογή φορέων υλοποιείται μέσω μιας ανάστροφης διαδικασίας κάθετη στη διαδρομή κατά την οποία εκπέμπεται η ακτινοβολία. Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που διαδίδεται είναι της τάξης των νάνο-μέτρων ούτως ώστε να περιορίζεται ο χρόνος μεταβίβασης των φορέων. Παρ' όλα αυτά οι περιγραφόμενοι φώτο- αισθητήρες κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους δεν διαφαίνεται να παρουσιάζουν κάποια διασύνδεση μεταξύ του εύρους ζώνης τους (bandwidth) και της απόδοσης τους εξαιτίας της συνεισφοράς των κβάντων που τους συνιστούν.

### 2.17 Laser με γερμάνιο πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου

Η αύξηση της ενέργειας εφελκυσμού καθώς και η ενίσχυση φορέων του ημιαγωγού (n doping) αποτελούν δύο τεχνικές οι οποίες μπορούν να ισοσταθμίσουν την ενεργειακή διαφορά μεταξύ του άμεσου και έμμεσου ενεργειακού χάσματος του γερμανίου και να ενισχύσουν αισθητά την εκπομπή φωτός κατά τη διαδικασία επανασύνδεσης μέσω του άμεσου ενεργειακού χάσματος.

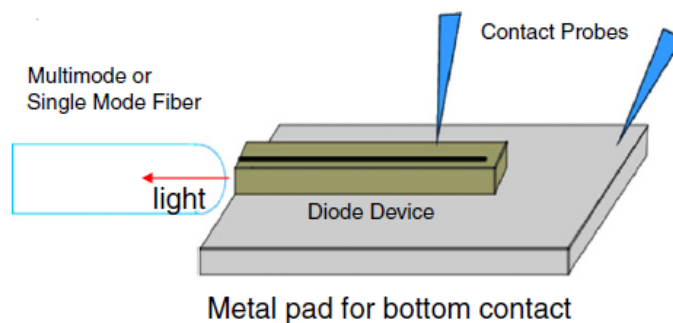
Στην Εικόνα 2.13 διαφαίνονται τα αποτελέσματα από μια εφαρμογή με ενίσχυση τύπου n φορέων. Συγκεκριμένα, πρόκειται για την οπτική διαπερατότητα τριών διαφορετικών διατάξεων n – γερμανίου με τρεις διαφορετικές τεχνικές ενίσχυσης της ημιαγωγικής επιφάνειας. Όπως διαφαίνεται και στο αντίστοιχο γράφημα οι τεχνικές ενίσχυσης με περιστροφή και με in – situ τεχνική είναι πολύ πιο

αποδοτικές στην περιοχή της ορατής ακτινοβολίας σε σύγκριση με την καθαρή τοποθέτηση φορέων. Οι τεχνικές αυτές και οι αποδόσεις τους έχουν καταγραφεί και επαληθευτεί από πολλές ερευνητικές ομάδες.



Εικόνα 2.13: Οπτική διαπερατότητα τριών διαφορετικών τύπων ημιαγωγών γερμανίου τύπου n

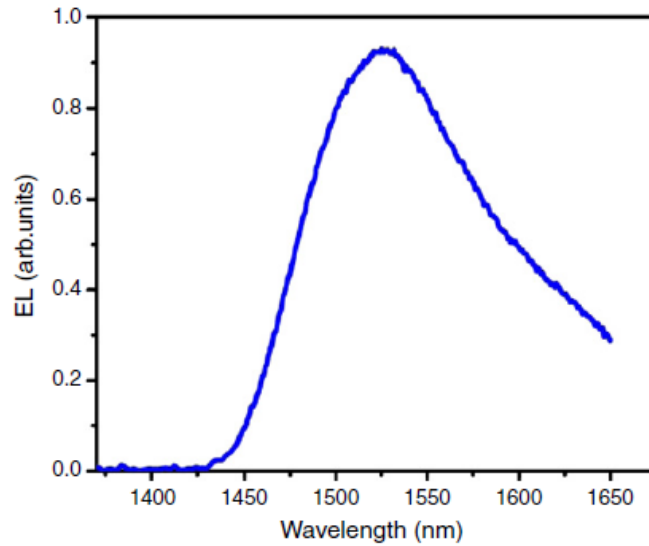
Μια εφαρμογή των αποδόσεων που παρουσιάζονται είναι η κατασκευή διόδου χαμηλής εκπομπής φωτός με ενσωματωμένο σύστημα κυματοδότησης. Η δομή της διάταξης διαφαίνεται στην Εικόνα 2.14. Η επίστρωση με το ενισχυμένο γερμάνιο κατασκευάστηκε με την τεχνική της περιστροφής. Στην άνω επιφάνεια του συστήματος η μαύρη γραμμή που διαφαίνεται λειτουργεί ως οπτική ίνα. Η απόδοση του συγκεκριμένου συστήματος διαφαίνεται στο γράφημα της Εικόνας 2.15.



Εικόνα 2.14: Δίοδος με εκπομπή φωτός χαμηλής έντασης και ενσωματωμένο σύστημα κυματοδότησης

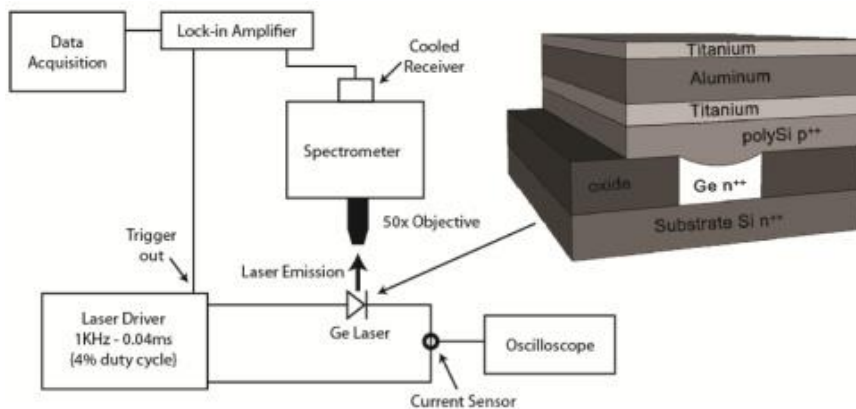


Τα αποτελέσματα εξαιτίας πολλαπλών ανακλάσεων στις επιφάνειες του συστήματος είναι λιγότερο αποδοτικά σε σχέση με τα αντίστοιχα που παρουσίασαν τα δείγματα μεμονωμένα. Διαφαίνεται όμως ότι το περιγραφόμενο σύστημα αποδίδει αρκετά ικανοποιητικά στην περιοχή του ορατού.



Εικόνα 2.15: Απόδοση διόδου εκπομπής φώτος χαμηλής εντάσεως και ενσωματωμένο σύστημα κυματοδηγησης

Στην Εικόνα 2.16 παρουσιάζεται μια pnp ητεροδομή γερμανίου πάνω σε πυρίτιο μέσω της οποίας επιτυγχάνεται lasing.

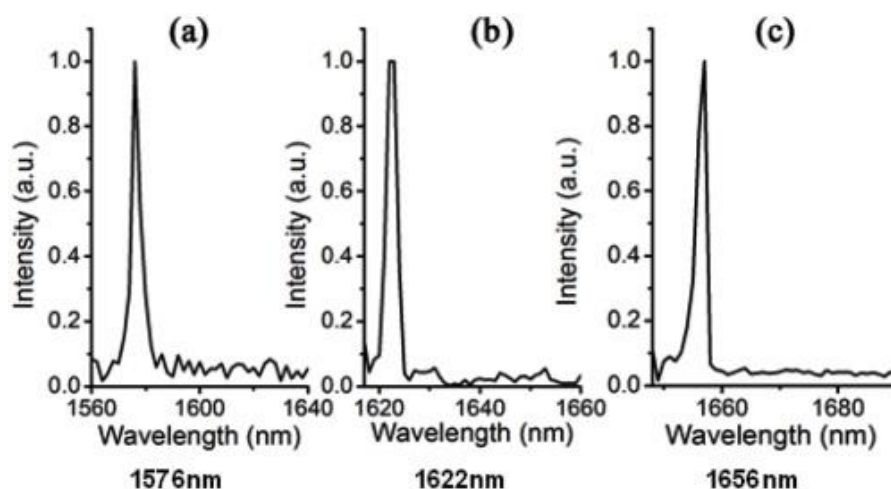


Εικόνα 2.16 pnp ητεροδομή γερμανίου πάνω σε πυρίτιο

Όπως διαφαίνεται και στη διάταξη της Εικόνας το σύστημα έχει ως κύριο υπόστρωμα μια επιφάνεια πυριτίου ενισχυμένη με  $n$  φορείς. Επόμενα έχει αναπτυχθεί μέσω του οξειδίου που το περιβάλλει το  $n$  ενισχυμένο γερμάνιο το οποίο αποτελεί την περιοχή κυματοδότησης της διάταξης. Το οξείδιο συνεισφέρει επίσης και στον περιορισμό του διαχεόμενου ρεύματος. Στην ανώτερη επιφάνεια της  $ppn$  δομής έχει τοποθετηθεί το  $p$  ενισχυμένο άμορφο πυρίτιο, η ενίσχυση του οποίου επήλθε μέσω έγχυσης φωσφόρου. Τέλος στην ανώτερη επιφάνεια της διόδου είναι ενσωματωμένη μια διάταξη αγωγών η οποία αποτελείται από τιτάνιο και αλουμίνιο.

Στην Εικόνα παρουσιάζεται και η πειραματική διάταξη μέσω της οποίας παρατηρήθηκε η απόδοση της εφαρμογής, αλλά και κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα.

Όπως διαφαίνεται και στην Εικόνα 2.17 η εφαρμογή αποδίδει υψηλή ένταση ακτινοβολίας στην περιοχή του ορατού φάσματος.



Εικόνα 2.17 Ένταση ακτινοβολίας στο ορατό φάσμα

### 2.18 Υλικά και Τεχνολογίες Ανόργανων Φωτοβολταϊκών Κελιών

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν μια πολύ σημαντική κατηγορία στον τομέα των οπτοηλεκτρονικών διατάξεων. Σε προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκε η εφαρμογή του κρυσταλλικού πυριτίου σε ανάλογα συστήματα. Το γερμάνιο δεν έχει εφάμιλλη εφαρμογή στο πεδίο των φωτοβολταϊκών συστημάτων συγκρινόμενη αντίστοιχα με του πυριτίου, έχει χρησιμοποιηθεί όμως σε συνδυασμό με κάποια άλλα υλικά. Στις ακόλουθες παραγράφους γίνεται μια σύντομη αναφορά των λοιπών ανόργανων υλικών που έχουν χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή φωτοβολταϊκών καθώς και στην τεχνική τους εξέλιξη τις τελευταίες δεκαετίες.

### 2.19 Φωτοβολταϊκά 1ης Γενιάς

Τα φωτοβολταϊκά κελιά κρυσταλλικού πυριτίου έχουν φτάσει σήμερα σε αποδόσεις της τάξης του 25%, αλλά η ζήτηση των χρησιμοποιούμενων υλικών τα καθιστά αρκετά ακριβά. Η μορφή του ενεργειακού διάκενου του πυριτίου 40 απαιτεί παχιές ενεργές περιοχές ( active layer ) φορέων στα ηλεκτρόδια. Για το λόγο αυτό επιβάλλεται η χρήση πυριτίου υψηλής καθαρότητας.

### 2.20 Φωτοβολταϊκά 2ης Γενιάς

Μια από τις πιο επιτυχημένες μεθόδους παραγωγής φωτοβολταϊκών κελιών από  $\mu$ -Si είναι με χρησιμοποίηση διάταξης p-i-n. Ένα ενδογενές στρώμα τοποθετείται μεταξύ ενός p- και ενός n-στρώματος για τη βελτίωση της συλλογής των φορέων άρα και της απόδοσης του στοιχείου. Για τα  $\alpha$ -Si και  $\mu c$ -Si έχουν αναφερθεί αποδόσεις της τάξεως του 9.5% και 10.1% αντίστοιχα. Το άμεσο ενεργειακό διάκενο ( direct band gap ) υλικών όπως το *CdTe* και *CIGS* εξασφαλίζουν επαρκή απορρόφηση ακτινοβολίας και επιτρέπει την κατασκευή ακόμη πιο οικονομικών φωτοβολταϊκών κελιών λεπτών υμενίων ( thin-film PVs ) με αποδόσεις 16,7% και 19,4% αντίστοιχα. Η απόδοση των ανόργανων φωτοβολταϊκών κελιών μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω με την κατασκευή κελιών πολλαπλών επαφών ( multi-junction ). Τα πιο αποδοτικά κελιά είναι τα μεταμορφικά κελιά *GaInP/GaInAs/Ge* τριπλής επαφής τα οποία είναι δυνατό

να μετατρέψουν σε ηλεκτρική, το 32% της ηλιακής ενέργειας. Οι μεταμορφικοί ( metamorphic ) ημιαγωγοί επιτρέπουν τον έλεγχο των ενεργειακών διάκενων. Έτσι αυξάνεται κατακόρυφα η απορρόφηση από τα διάφορα στρώματα του *GaInP/GaInAs/Ge* κελιού, καλύπτοντας ένα μεγάλο τμήμα του φάσματος εκπομπής της ηλιακής ακτινοβολίας. Ηλιακοί συλλέκτες αυξάνουν επιπλέον την απόδοση των κελιών πολυεπαφών στα 40.8%.

## **Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> - Οργανικά Ηλεκτρονικά**

### 3.1 Εισαγωγή

Τα οργανικά ηλεκτρονικά αποτελούν διατάξεις οι οποίες παρουσιάζουν ενδιαφέρον τόσο για τις φυσικές τους ιδιότητες όσο και για την πληθώρα των εφαρμογών που έχουν στη βιομηχανία. Συγκεκριμένα, τα οργανικά ηλεκτρονικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή αισθητήρων, οργανικών LEDs, λέιζερ, φωτοβολταϊκών και άλλων πολλών συστημάτων.

Η έρευνα πάνω στο πεδίο των οργανικών ηλεκτρονικών ξεκίνησε τη δεκαετία του '50, με τις πρώτες μελέτες πάνω σε οργανικά κρυσταλλικά υλικά. Στόχος ήταν η δημιουργία εναλλακτικών υλικών τα οποία θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν το πυρίτιο, το οποίο μαζί με το γερμάνιο αποτελούσαν μέχρι τότε, τα δύο μοναδικά υλικά τα οποία χρησιμοποιούνταν στην κατασκευή ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών διατάξεων.

Αναφορές δείχνουν ότι κάποια οργανικά ηλεκτρονικά εφαρμόστηκαν σε συστήματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σε διαστημικά προγράμματα. Στη δεκαετία του '70 εμφανίσθηκαν στην αγορά οι πρώτες οργανικές φωτοдиодοι οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν από ορισμένες εταιρείες στην κατασκευή φωτοτυπικών. Τη δεκαετία του '80 έκαναν την εμφάνιση τους τα πρώτα οργανικά υλικά με μη εμπορεύσιμο προϊόν γενικής χρήσης στον τομέα των ηλεκτρονικών, ήταν η Kodak. Επρόκειτο για τα οργανικά LED (OLED). Την ίδια περίοδο έκαναν την εμφάνιση τους και τα πρώτα οργανικά τρανζίστορ.

Η δεκαετία του '90 αποτέλεσε μια περίοδο ανόδου της τεχνολογίας των πολυμερών υλικών. Ακόλουθο αυτού ήταν η ενσωμάτωση οργανικών πολυμερών και σε ηλεκτρονικές διατάξεις. Συγκεκριμένα μια ομάδα από το Πανεπιστήμιο του Cambridge παρουσίασε την πρώτη φωτοдиодο από οργανικά πολυμερή. Το 2000 οι Heeger, MacDiarmid και Shirakawa κατέκτησαν το Nobel χημείας για την εργασία τους πάνω στον σχεδιασμό και στην κατασκευή αγώγιμων πολυμερών. Φτάνοντας στο σήμερα μπορεί να γίνει πια η εκτίμηση ότι τα οργανικά ηλεκτρονικά αποτελούν ένα πολύ σημαντικό γραμμικές οπτικές ιδιότητες. Η πρώτη εταιρία που εφάρμοσε την τεχνολογία αυτή σε κομμάτι της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών και πιο

συγκεκριμένα των οπτοηλεκτρονικών διατάξεων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα οργανικά φωτοβολταϊκά τα οποία χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως με ιδιαίτερες ικανοποιητικές αποδόσεις.

### 3.2 Το Άτομο του Άνθρακα

Με τον όρο οργανικά ηλεκτρονικά γίνεται αναφορά σε ηλεκτρονικά στοιχεία τα οποία προκύπτουν από υλικά τα οποία είναι απόρροια οργανικών ενώσεων. Οργανικές θεωρούνται οι ενώσεις οι οποίες εμπεριέχουν το στοιχείο του άνθρακα.

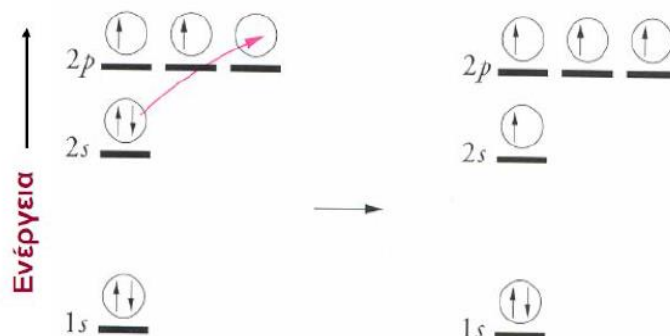
Συνεπώς, για την καλύτερη περιγραφή της λειτουργίας των οργανικών ηλεκτρονικών καθώς και των ηλεκτρικών τους ιδιοτήτων. Είναι σημαντικό να γίνει μια αναλυτική περιγραφή της ηλεκτρονιακής δομής του άνθρακα όπως επίσης και των χημικών δεσμών που σχηματίζει με άλλα άτομα, είτε άνθρακα είτε διαφορετικών χημικών στοιχείων και ενώσεων.

### 3.3 Ηλεκτρονιακή Διάταξη του Ατόμου του Άνθρακα

Με τον όρο ισότοπο χαρακτηρίζεται με διαφορετική εκδοχή η παραλλαγή ενός στοιχείου. Στη φύση συναντώνται τρία διαφορετικά ισότοπα για τον άνθρακα. Συγκεκριμένα, πρόκειται για τον άνθρακα-12, άνθρακα-13 και τον άνθρακα-14, όπου ο αριθμός που ακολουθεί το κάθε άτομο άνθρακα προσδιορίζει τον συνολικό αριθμό πρωτονίων και νετρονίων στον πυρήνα του κάθε ατόμου. Ο άνθρακας-12, του οποίου ο πυρήνας αποτελείται από έξι πρωτόνια και έξι νετρόνια, είναι το σταθερότερο και επικρατέστερο από τα τρία προαναφερθέντα ισότοπα. Κάθε αναφορά στο άτομο το άνθρακα στις επόμενες παραγράφους συνδέεται άμεσα με το ισότοπο άνθρακας -12.

Ο άνθρακας ( C ) ανήκει στην 14<sup>η</sup> Ομάδα του περιοδικού πίνακα. Είναι το πιο απλό στοιχείο της ομάδας, αποτελούμενο από έξι ηλεκτρόνια, δύο κατανομημένα στην 1s στοιβάδα, και τα υπόλοιπα 4 να καταλαμβάνουν τέσσερις από της έξι θέσεις της 2<sup>ης</sup> στοιβάδας με τα δύο από αυτά να βρίσκονται στην υποστοιβάδα 2s και τα υπόλοιπα δύο από τις τέσσερις κενές θέσεις της 2p υποστοιβάδας.

Όταν ο άνθρακας σχηματίζει δεσμούς, ένα ηλεκτρόνιο από τη 2s στοιβάδα προσλαμβάνει ενέργεια, με αποτέλεσμα να «μεταπηδήσει» σε ανώτερη στοιβάδα, όπου στην προκειμένη περίπτωση η αμέσως επόμενη είναι η 2p. Συνεπώς, γίνεται εύκολα κατανοητό ότι η εξωτερική στοιβάδα του άνθρακα είναι ημικατελιγμένη όπως διαφαίνεται και στην Εικόνα 3.1.

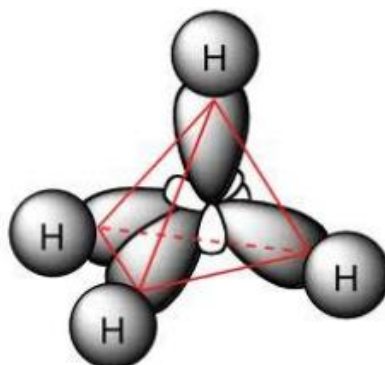


Εικόνα 3.1: Ηλεκτρονιακή δομή άνθρακα

Το υδρογόνο ( H ) είναι ένα μονοατομικό στοιχείο το οποίο διαθέτει ένα ηλεκτρόνιο το οποίο καταλαμβάνει την 1s στοιβάδα. Συνεπώς θα ήταν αναμενόμενο οι δεσμοί που δημιουργεί ο άνθρακας με τέσσερα άτομα υδρογόνου, για το σχηματισμό του γνωστού μεθανίου ( $\text{CH}_4$ ) να μην είναι ισοδύναμοι με τους δεσμούς που αναπτύσσονται ανάμεσα σε τέσσερα άτομα άνθρακα. Παρόλα αυτά, έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι ενεργειακά οι δεσμοί αυτοί είναι ισοδύναμοι. Τη λύση σε αυτό το πρόβλημα έδωσε ο Pauli μέσα από τη θεωρία που διατύπωσε για τον τροχιακό υβριδισμό. Σύμφωνα με τη θεωρία του Pauli, κατά τον υβριδισμό, μπορούν να συνδυαστούν δύο ή περισσότερα διαφορετικού τύπου αμιγή τροχιακά του ίδιου ατόμου, με στόχο τη δημιουργία νέων ατομικών τροχιακών. Ο αριθμός των υβριδικών τροχιακών είναι ίσος με τον αριθμό των ατομικών τροχιακών που συνδυάζονται. Τα υβριδικά τροχιακά διαφέρουν από τα αμιγή ατομικά τροχιακά από τα οποία δημιουργήθηκαν ως προς την ενέργεια, το σχήμα και τον προσανατολισμό.

Αξιοποιώντας συνεπώς την παραπάνω θεώρηση μπορεί να γίνει πιο εύκολα αντιληπτό το παράδειγμα του μεθανίου. Συγκεκριμένα, για τον σχηματισμό τεσσάρων

$sp^3$  τροχιακών όπως διαφαίνεται στην Εικόνα 3.2, θεωρείται υβριδισμό μεταξύ του  $2s$  με τα  $2p$  τροχιακά του άνθρακα.



Εικόνα 3.2: Τροχιακά άνθρακα

### 3.4 Οργανικά Ηλεκτρονικά

Η χρήση άνθρακα σε ηλεκτρονικά συστήματα βοήθησε στην εξέλιξη και ενίσχυση ήδη γνωστών ηλεκτρονικών διατάξεων με σημαντικό αντίκτυπο στον τομέα της οπτοηλεκτρονικής.

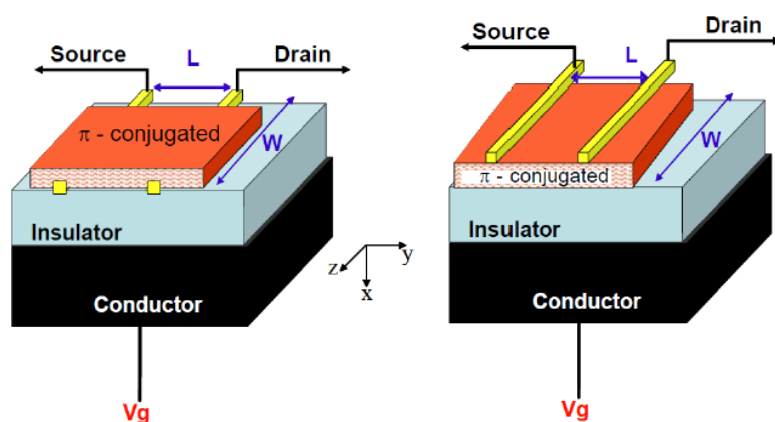
### 3.5 Organic Field Effect Transistors (OFETs)

Στους OFET, ο οργανικός ημιαγωγός τοποθετείται μεταξύ δυο αγώγιμων ηλεκτροδίων, την πηγή (source) και τον απαγωγό (drain) δημιουργώντας μια περιοχή (κανάλι) μέσω της οποίας μπορούν να κινηθούν οι φορείς. Η αγωγιμότητα του καναλιού ρυθμίζεται μέσω ενός τρίτου ηλεκτροδίου, της πύλης (gate).

Όταν στο ηλεκτρόδιο της πύλης δεν εφαρμόζεται τάση, το ηλεκτρικό ρεύμα μεταξύ πύλης και απαγωγού είναι πολύ μικρό και τότε το τρανζίστορ θεωρείται εκτός λειτουργίας/κλειστό (OFF state). Εφαρμόζοντας τάση στην πύλη, ελεύθεροι φορείς συγκεντρώνεται στην επιφάνεια μεταξύ του ημιαγωγού και του διηλεκτρικού, με



αποτέλεσμα την αύξηση του ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ πηγής – απαγωγού. Στη περίπτωση αυτή το τρανζίστορ θεωρείται εντός λειτουργίας/ανοιχτό (ON state).

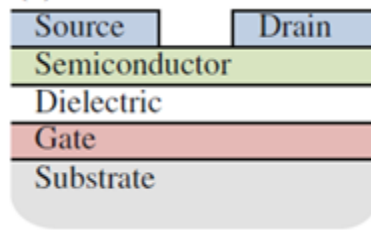


Εικόνα 3.3: Τρανζίστορ τύπου OFET

Στην Εικόνα 3.3 διαφαίνονται δύο OFETs. Παρατηρείται ότι τα ηλεκτρόδια πηγής και πύλης συνδέονται απευθείας με τον συζυγή οργανικό ημιαγωγό ο οποίος λειτουργεί και ως αγώγιμο κανάλι. Στο OFET που είναι τοποθετημένο στα αριστερά της Εικόνας, τα ηλεκτρόδια πηγής – πύλης έρχονται σε επαφή με το μονωτικό υλικό και το κανάλι, ενώ στο δεξιό OFET σχήμα τα ηλεκτρόδια είναι στην απέναντι επιφάνεια συζυγούς πολυμερούς. Αυτές οι δύο αρχιτεκτονικές χαρακτηρίζονται ως κάτω – και πάνω- επαφής (bottom contact and top contact).

### 3.6 Οργανικά τρανζίστορ λεπτών υμενίων (Organic Thin-Film Transistors OTFTs)

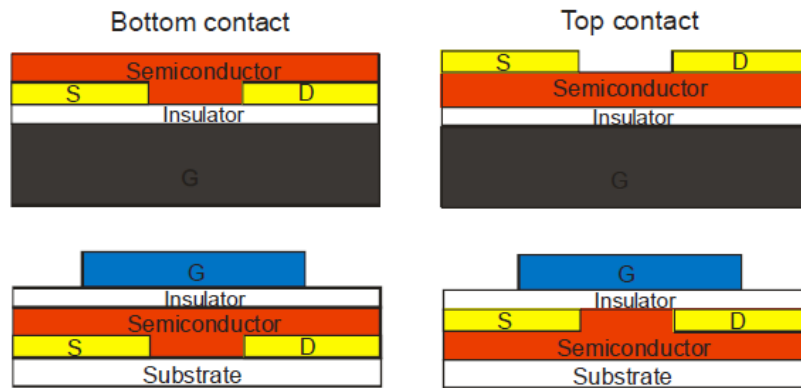
Τα OTFTs είναι συστήματα τα οποία χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών στα ηλεκτρονικά συστήματα. Τα OTFTs είναι διατάξεις μέταλλου – μονωτή – ημιαγωγού (Metal – Insulator – Semiconductor MIS), τύπου FET των οποίων η ημιαγωγική επιφάνεια έρχεται σε επαφή με ένα οργανικό υλικό. Στην Εικόνα 3.4, παρουσιάζεται η βασική δομή της διάταξης.



Εικόνα 3.4: Διεπιφάνειες OTFT τρανζίστορ

Τα OTFT είναι συσκευές οι οποίες αποτελούνται από 4 λεπτά υμένια επιστρωμένα σε ένα υπόστρωμα από μονωτικό υλικό. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.4, το κατώτερο υμένιο είναι αγώγιμο και λειτουργεί ως πύλη του TFT, το αμέσως επόμενο είναι μονωτικό, το τρίτο είναι κατασκευασμένο από ένα οργανικό ημιαγώγιμο υλικό και τέλος στην ανώτερη επιφάνεια είναι ένα υμένιο με δύο επαφές (drain/source). Με την εφαρμογή τάσης ανάμεσα στα άκρα μεταξύ πύλης και ημιαγωγού, μια λεπτή επιφάνεια κινούμενων φορέων (επιφάνεια ρεύματος) δημιουργείται στον ημιαγωγό κοντά στην περιοχή επαφής με το μονωτικό υμένιο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός καναλιού επικοινωνίας μεταξύ των δύο επαφών της ανώτερης επιφάνειας (source – drain channel). Η επιφάνεια ρεύματος λειτουργεί ως ρυθμιστής των αντίθετα φορτισμένων σωματιδίων τα οποία έχουν διοχετευθεί στο αγώγιμο υμένιο (gate). Για διάφορες τιμές της τάσης, το ρεύμα που παράγεται στην ημιαγώγιμη επιφάνεια ποικίλει.

Η δομή των OTFT διατάξεων ποικίλει. Η κεντρική διάταξη δεν αλλάζει αυτό που μπορεί να τα διαφοροποιήσει είναι ο τρόπος εναπόθεσης και σύνδεσης των επιφανειών, η μορφολογία και φυσικά το είδος των υλικών που χρησιμοποιούνται ανά περίπτωση. Μερικά παραδείγματα χαρακτηριστικών OTFT διατάξεων παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.5.



Εικόνα 3.5: OTFT τρανζίστορ, τύπου bottom & top contact

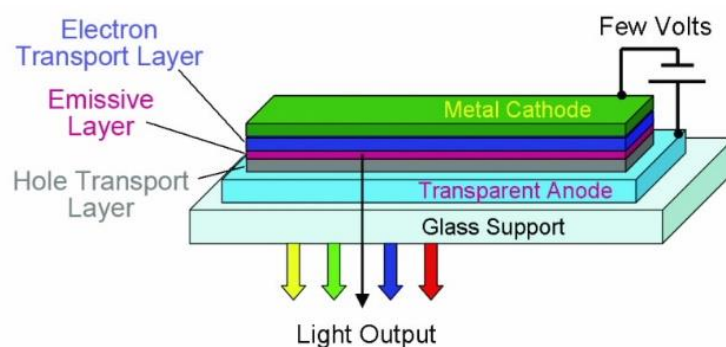
Μια από τις πιο σημαντικές εφαρμογές των OTFTs είναι η αναγνώριση των ραδιοσυχνοτήτων και οι εφαρμογές είναι γνωστές ως RFID. Πρόκειται για συσκευές οι οποίες χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση της αυθεντικότητας καρτών, εισιτηρίων και περιοχών. Επίσης σε συνδυασμό με ειδικά σχεδιασμένους αισθητήρες μπορούν να ενισχύσουν τη διαδικασία της μεταφοράς προϊόντων (φάρμακα, τρόφιμα κ.α.) εκτός της περιοχής παραγωγής τους, ενημερώνοντας συνεχώς για τη θερμοκρασία στην οποία είναι τα προϊόντα.

### 3.7 Οργανικές Φωτοдиодοι

Η διάταξη με την μεγαλύτερη εφαρμογή ευρέως στη βιομηχανία είναι οι οργανικές φωτοдиодοι (Organic Light-Emitting Diodes - OLEDs). Η βασική δομή της διάταξης παρουσιάζεται στην Εικόνα. Η δομή της εμπεριέχει δύο ημιαγωγίμες επιφάνειες οι οποίες έχουν τοποθετηθεί ανάμεσα από δύο ηλεκτρόδια τα οποία λειτουργούν ως άνοδος και κάθοδος αντίστοιχα. Ανάλογα με την διαφάνεια που παρουσιάζουν η κάθοδος και η άνοδος στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, το φως μπορεί να μεταδοθεί είτε από την άνοδο προς την κάθοδο είτε το αντίστροφο ακόμα και αμφίδρομα. Η βασική διάταξη της συσκευής είναι γνωστή ως φωτοдиодος ετεροδομής η οποία μοιάζει με την pn επαφή. Στη συγκεκριμένη διάταξη δύο οργανικοί ημιαγωγοί λειτουργούν ο ένας ως μια περιοχή εκπομπής οπών (θετικών

φορέων) και ο άλλος ως η επιφάνεια μέσω της οποίας εκπέμπεται φως.

Όπως διαφαίνεται και στην Εικόνα 3.6 ένα OLED σύστημα αποτελείται από τέσσερα βασικά επίπεδα. Η πρώτη επιφάνεια εφάπτεται με το γυαλί από το οποίο διαδίδεται και η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τη δίοδο. Όπως αναγράφεται και στην Εικόνα η πρώτη επιφάνεια λειτουργεί ως άνοδος των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων. Η ακριβώς επόμενη επιφάνεια είναι υπεύθυνη για την εκπομπή των ηλεκτρονίων, τα οποία προέρχονται από την επιφάνεια συγκέντρωσης και μεταφοράς τους. Η εκπομπή ηλεκτρονίων ξεκινάει μετά την εφαρμογή τάσης στα άκρα της μεταλλικής ανόδου και της καθόδου αντίστοιχα (Εικόνα). Η άνοδος και η κάθοδος αποτελούν τα δύο βασικά ηλεκτρόδια του συστήματος.



Εικόνα 3.6: Δομή διεπιφανειών για την σύνθεση OLED διάταξης

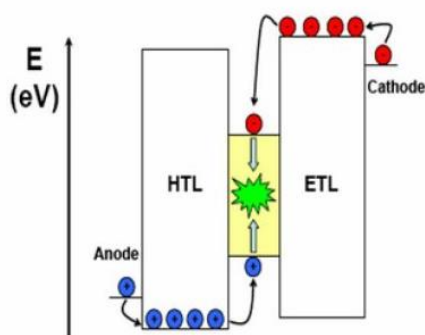
Ο R.H.Friend και η ομάδα του από το Πανεπιστήμιο του Cambridge πρότειναν τη χρήση συζυγών πολυμερών ως ηλεκτρο-φωτοβόλα υλικά στις δίοδους. Τη δεκαετία του '90 χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το πολυμερές πολυφαινυλενοβινυλένιο (poly(p-phenylene vinylene), PPV), ως ημιαγώγιμο στρώμα μεταξύ των δυο μεταλλικών ηλεκτροδίων. Το PPV διαθέτει ενεργειακό διάκενο περίπου 2.5 eV και παράγει κιτρινοπράσινο χρώμα. Μετά από αυτή την πρώτη εφαρμογή πληθώρα εφαρμογών με χρήση διαφόρων τύπων υλικών έχουν παρουσιασθεί στη βιβλιογραφία.

Στις OLEDs, το φως παράγεται μέσω του φαινομένου της ήλεκτρο-φωτοβολίας. Κατά τη διαδικασία αυτή, εξιτόνια (excitons) (ζεύγη οπής-ηλεκτρονίου ή αντίθετα

φορτισμένα ζεύγη πολaronίων) σχηματίζονται εντός της ζώνης εκπομπής της φωτοδιόδου (emissive layer). Για να σχηματιστούν εξιτόνια, πρέπει να έχουμε την έγχυση θετικών και αρνητικών φορτίων στο ήλεκτρο-φωτοβόλο στρώμα της φωτοδιόδου. Το παρεχόμενο φορτίο διατηρείται σταθερό είτε απευθείας από τα ηλεκτρόδιο ή (συνηθέστερα) διαμέσου των στρωμάτων μεταφοράς ηλεκτρονίων και οπών (hole- and electron-transporting layers – HTL , ETL). Τα παραγόμενα φορτία μετακινούνται και μέσω ηλεκτρικής αλληλεπίδρασης, παράγοντας εξιτόνια και κατ' επέκταση φωτόνια.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα αποτελεί η εξαγωγή των παραγόμενων φωτονίων, μιας και αυτά διαδίδονται από τη περιοχή επανένωσης προς κάθε διεύθυνση. Κατά συνέπεια, ένας μικρός αριθμός μόνο από αυτά διαδίδεται στη διεύθυνση του ημιαγωγικού ηλεκτροδίου π.χ. γυαλί ITO, έτσι ώστε να διαδίδεται όσο το δυνατόν καλύτερα η ακτινοβολία από τη συσκευή.

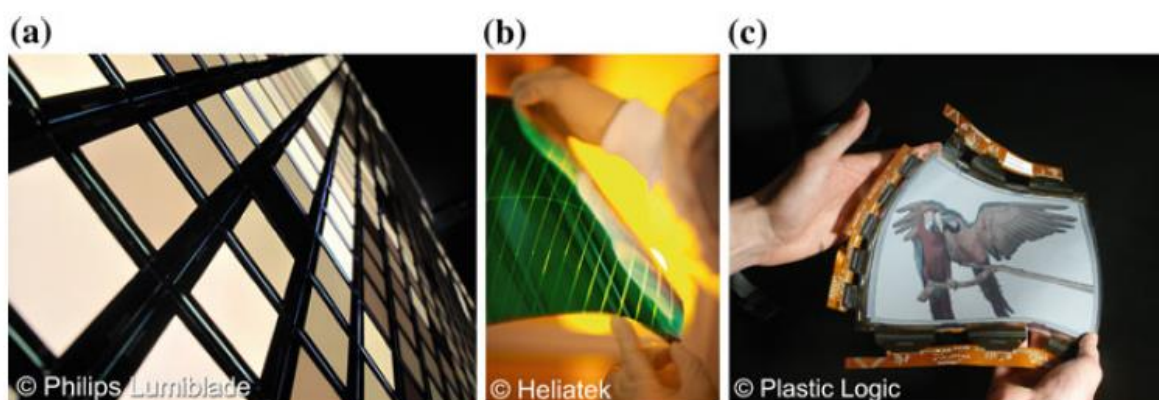
Στην Εικόνα 3.7 αναπαρίσταται σχηματικά η λειτουργία μιας φώτο-διόδου, ενεργειακά. Συγκεκριμένα, κατά τη διαδικασία εφαρμογής τάσης στα άκρα της συσκευής θετικοί φορείς/οπές (μπλε κύκλοι), οι οποίοι προέρχονται από την άνοδο και αρνητικοί φορείς/ηλεκτρόνια (κόκκινοι κύκλοι), οι οποίοι προέρχονται από την κάθοδο, διεγείρονται και αρχίζουν να μεταφέρονται στην περιοχή σύνδεσής τους. Με την ενίσχυση που δέχονται και από τις λοιπές επιφάνειες τις διάταξης, επιτυγχάνεται η σύνδεση οπών ηλεκτρονίων, με αποτέλεσμα την αύξηση της ενεργειακής κατάστασης του ζεύγους οπής-ηλεκτρονίου και κατ' επέκταση την εκπομπή φωτονίων κατά τη διαδικασία ενεργειακής αναβάθμισης κάθε ζεύγους.



Εικόνα 3.7: Οργανική Φωτοδιόδος εν ώρα λειτουργίας

Οι οργανικοί ημιαγωγοί που συνιστούν τα OLEDs απαρτίζονται είτε από μοριακές δομές είτε από πολυμερή. Αναλόγως με τα ημιαγωγιμα υλικά που χρησιμοποιούνται ανά περίπτωση, οι συσκευές κατηγοριοποιούνται με βάση την τεχνική σύνθεσης τους, την τάση που εφαρμόζεται στα άκρα τους και την αποδοτικότητα τους. Οι περισσότερες μοριακές οργανικές επιφάνειες εναποτίθενται είτε με εξάτμιση στο κενό είτε με εξάχνωση, ενώ οι πολυμερείς, οι οποίες κατά τη διαδικασία εναπόθεσης είναι σε υγρή κατάσταση επιστρώνονται με περιστροφές (spin – coating) και θερμαίνονται για να στερεοποιηθούν. Είναι πολύ πιο δύσκολο να ελέγξεις το πάχος της επιφάνειας με τεχνικές περιστροφικής επίστρωσης σε σχέση με την εναπόθεση με εξάτμιση. Αυτό οφείλεται στην μεγάλη αγωγιμότητα των οργανικών πολυμερών. Στα OLED με πολυμερή εφαρμόζεται συνήθως τάση 2-5V ενώ στα μοριακά 6-7V. Επίσης, τα πολυμερή φαίνεται να είναι πιο αποδοτικά.

Για πολλές δεκαετίες τα συστήματα και οι διατάξεις υγρών κρυστάλλων (LCD) μονοπωλούσαν στη διεθνή αγορά. Η συνεχής αύξηση των απαιτήσεων στην αγορά, μέσω της ανάπτυξης της τεχνολογίας σε εφαρμογές όπως οι φορητοί υπολογιστές, τα κινητά τηλέφωνα, οι τηλεοράσεις κ.α., κάνουν αναγκαία την ανάπτυξη συστημάτων υψηλής ποιότητας. Σε σύγκριση με τα LCDs τα OLEDs είναι πολύ πιο λεπτά, παρέχουν καλύτερη ευκρίνεια και πολύ καλύτερο contrast. Το βασικό μειονέκτημα των OLEDs συγκρινόμενα με τα LCDs είναι ο μικρός χρόνος ζωής, το οποίο όμως χρόνο με το χρόνο διορθώνεται.



Εικόνα 3.8: Εφαρμογές LED

Τα OLEDs βρίσκουν πληθώρα εφαρμογών στη βιομηχανία στο πεδίο των συστημάτων παροχής φωτός. Διατάξεις που παραπλήσιες σε λογική με αυτή των OLEDs όπως τα SSLs (Solid – State Lightings) και τα LEDs έχουν αντικαταστήσει τα κεριά, τις λάμπες φθορίου και πυρακτώσεως. Στην Εικόνα 3.8 παρουσιάζονται κάποιες από αυτές τις εφαρμογές.

### 3.8 Οργανικά Φωτοβολταϊκά

Τα πρώτα οργανικά φωτοβολταϊκά εμφανίστηκαν τη δεκαετία του '90, τα οποία αποτελούνταν από μια φωτοαγώγιμη επιφάνεια στην οποία είναι ενσωματωμένο ένα σύστημα ικανό να παράγει ρεύμα και μια προστατευτική επιφάνεια η οποία εμποδίζει την δέσμευση ακτινοβολίας στην περιοχή του υπεριώδους και συγκεκριμένα στην περιοχή κάτω των 450nm.

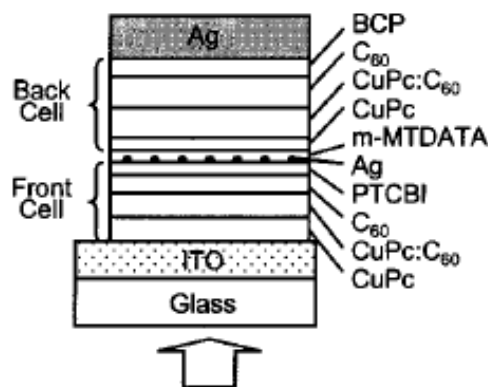
Κατά τη λειτουργία του συστήματος, εξαιτίας της προστατευτικής επιφάνειας που είναι ενσωματωμένη, εμφανίζεται αλλαγή στο φωτο-ρεύμα καθώς μεταφέρονται οι φορείς στα κατώτερα στρώματα της διάταξης ενώ η απόδοση της μετατροπής φωτός σε ρεύμα συνεχίζει να παραμένει υψηλή.

Η παραπάνω διάταξη αποτέλεσε το πρώτο σύστημα οργανικών φωτοβολταϊκών και οι κατασκευαστές του τιμήθηκαν με το βραβείο ευρεσιτεχνίας. Από εκεί και πέρα πληθώρα εφαρμογών έχει παρουσιασθεί στην αγορά των οργανικών φωτοβολταϊκών.

### 3.9 Αρχή Λειτουργίας OPVs

Η αρχή λειτουργίας των OPVs είναι η ίδια με οποιουδήποτε φωτοβολταϊκού ως προς το αποτέλεσμα που αναμένεται να αποφέρει, δηλαδή την παραγωγή ενός ρεύματος το οποίο θα έχει προκύψει μέσω σκεδάσεων ηλεκτρονίων εξαιτίας της πρόσπτωσης φωτονίων. Η διαφοροποίηση των OPVs έγκειται στον τρόπο δημιουργίας φωτορεύματος η οποία στην προκειμένη περίπτωση υλοποιείται στη διεπιφάνεια που αντιστοιχεί στο οργανικό υλικό.

Στην Εικόνα 3.9 διαφαίνεται η σύνθεση των διεπιφανειών διάταξης που προορίζεται για εφαρμογή σε φωτοβολταϊκά συστήματα της οποίας η σύνθεση έχει ως βάση τον άνθρακα σε συνδυασμό με υβριδικές μοριακές ετεροδομές.



Εικόνα 3.10: Σύνθεση διεπιφανειών για διάταξη οργανικών φωτοβολταϊκών συστημάτων

### 3.10 Δημιουργία Φωτορεύματος

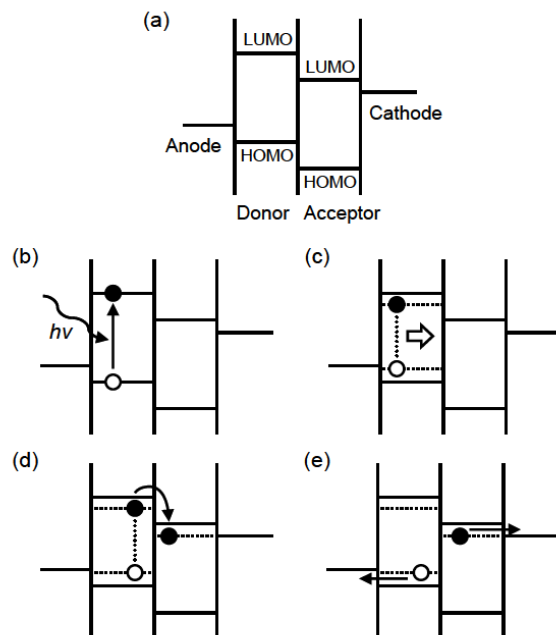
Τα οργανικά υλικά παρουσιάζουν χαλάρωση στους γεωμετρικούς τους περιορισμούς, χαμηλότερη διηλεκτρική σταθερά συγκρινόμενα με τα ανόργανα υλικά, μικρότερη συσχέτιση των ηλεκτρονίων και υψηλότερες ελκτικές δυνάμεις Coulomb. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά των οργανικών υλικών οδηγούν στη δημιουργία δεσμών ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής, (εξιτονικές συμπεριφορές) στα κατώτατα όρια της ζώνης αγωγιμότητας εξαιτίας της απορρόφησης φωτονίων. Απόρροια αυτής της διαδικασίας είναι η παραγωγή εξιτονίων τα οποία παρουσιάζουν ισχυρές ενέργειες δεσμού, της τάξης των  $500\text{ meV}$ . Ο στόχος όμως, είναι η ενίσχυση του παραγόμενου φωτορεύματος, μια διαδικασία η οποία αποδυναμώνεται από τις εξιτονικές συμπεριφορές. Επιβάλλεται λοιπόν η ένταξη στις φωτοδιόδους υλικών που να λειτουργούν ως δέκτες ή δότες ώστε να υλοποιείται επιτυχώς η διεργασία της αποδέσμευσης.

Για να υλοποιηθεί η παραγωγή φωτορεύματος συνεπώς στα οργανικά φωτοβολταϊκά θα πρέπει αρχικά να επιτευχθεί η απορρόφηση φωτονίων τα οποία διεγείρουν ηλεκτρόνια από το υψηλότερο κατειλημμένα μοριακά τροχιακά (highest occupied molecular orbital (HOMO)). Όπως όμως ήδη σημειώθηκε, αυτή η διεργασία θα οδηγήσει στην παραγωγή εξιτονίων τα οποία θα πρέπει να εγχυθούν στη διεπιφάνεια ( interface ) δότη/δέκτη όπου και δίσταται σε φορείς. Ως είναι λογικό το ολικό φορτίο των εξιτονίων είναι μηδενικό (μιας και είναι απόρροια σύνδεσης οπής – ηλεκτρονίου), με αποτέλεσμα η διάχυσή τους να θεωρείται μια τυχαία διαδικασία η



οποία επηρεάζεται από τις βαθμίδες συγκέντρωσης και όχι από ηλεκτρικά πεδία. Τα εξιτόνια, κατά τη διαδικασία της διάχυσης, είναι δυνατό να επανενωθούν πριν φτάσουν στη διεπιφάνεια δότη-δέκτη με αποτέλεσμα να υπάρχουν φωτόνια των οποίων η απορρόφηση δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί με αποτέλεσμα να αποδυναμώνεται η διαδικασία παραγωγής φωτορεύματος. Το χαρακτηριστικό μήκος που ένα εξιτόνιο μπορεί να διανύσει πριν επανασυνδεθεί, περιγράφεται μέσω του μήκους διάχυσης ( diffusion length ) του εξιτονίου. Το μήκος διάχυσης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το σχεδιασμό της συσκευής μιας και το πάχος του στρώματος λειτουργεί ενισχυτικά κατά τη διαδικασία της απορρόφησης του φωτός, αλλά παράλληλα οδηγεί σε κατακόρυφη αύξηση των επανασυνδέσεων.

Εν συνεχεία, τα εξιτόνια που καταφέρνουν να φτάσουν στη διεπιφάνεια δότη-δέκτη διασπώνται σε ηλεκτρόνια και οπές. Δεν υπάρχει ακόμη απόλυτη κατανόηση του μηχανισμού που οδηγεί στην επίτευξη του διαχωρισμού των εξιτονίων σε μοριακό επίπεδο. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι μεταβολή της ενέργειας κατά τη διάσπαση ενός δεσμού οπής-ηλεκτρονίου σε μια οπή στο δότη και ένα ηλεκτρόνιο στο δέκτη είναι αυτή που επιτρέπει τη διάσπαση των εξιτονίων και κατ' επέκταση την εμφάνιση ελεύθερων φορέων. Τελικά, τα φορτία μεταφέρονται μέσω των οργανικών ημιαγωγών και συλλέγονται στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια. Αντίθετα με τους ενόργανους ημιαγωγούς, τα φορτία σε οργανικά υλικά είναι περισσότερο εντοπισμένα χωρικά και μετακινούνται μέσω της μετάβασης σε κενές θέσεις στις αντίστοιχες ενεργειακές ζώνες. Η διαφοροποίηση στο μηχανισμό μεταφοράς για την επίτευξη της αποφυγής εξιτονικών φαινομένων, οδηγεί σε τιμές κινητικότητας εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και τα παρόντα πεδία, με διαφορετικό τρόπο σε σχέση με τα αντίστοιχα ανόργανα υλικά. Δύο επιπλέον παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία της συσκευής είναι η επιλογή των υλικών κατασκευής των ηλεκτροδίων καθώς και η μορφοποίηση της επαφής μεταξύ των ηλεκτροδίων και του οργανικού υλικού.



Εικόνα 3.10: (α)Βασικό ενεργειακό διάγραμμα ενός οργανικού φωτοβολταϊκού κελιού. (β)Απορρόφηση φωτονίου και δημιουργία εξιτονίου.(γ)Διάχυση του εξιτονίου προς τη διεπιφάνεια δότη-δέκτη. (δ)Διάσπαση του εξιτονίου και διαχωρισμός των φορτίων. (ε)Μεταφορά των φορτίων και συλλογή τους στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια.

### Είδη Οργανικών Φωτοβολταϊκών ( Organic Photovoltaics – OPVs)

#### 3.11 OPVs Μονού Υποστρώματος ( Single Layer OPVs )

Τα Single layer OPVs διαθέτουν ένα οργανικό υπόστρωμα, ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια: Το μπροστινό ηλεκτρόδιο αποτελείται από ένα διαφανές στρώμα μετάλλου ή διαφανούς αγώγιμου οξειδίου (TCO) όπως για παράδειγμα το Indium Tin Oxide (ITO). Είναι σημαντικό για την απόδοση του συστήματος το υπόστρωμα να διαθέτει υψηλή συνάρτηση έργου ( work function ), ενώ το πίσω ηλεκτρόδιο το οποίο είναι επίσης μεταλλικό χαμηλή συνάρτηση έργου, για αυτό για τη δημιουργία τους προτιμώνται υλικά όπως το αλουμίνιο ή το μαγγάνιο.

Μετά το πέρας της σύνδεσης των δύο ηλεκτροδίων με τη υπόλοιπη διάταξη προκύπτει, ως είναι αναμενόμενο, διαφορά στη συνάρτηση έργων μεταξύ των δυο ηλεκτροδίων εξαιτίας της οποίας προκαλείται δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου εντός

του οργανικού υλικού, το οποίο βρίσκεται σε διεπαφή με το κατώτερο ηλεκτρόδιο χαμηλής συνάρτησης έργου. Το ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται στο οργανικό υλικό ενισχύει τη διάσπαση των εξιτονίων, έλκοντας τα ηλεκτρόνια στο θετικό ηλεκτρόδιο και τις οπές στο αρνητικό ηλεκτρόδιο αντίστοιχα. Τα Single Layer OPVs αναφέρονται και ως δίοδοι Schottky μιας και η αποκατάσταση ( rectification ) λαμβάνει χώρα μόνο σε μια διεπαφή (οργανικού υποστρώματος / μεταλλικού ηλεκτροδίου). Το άλλο ηλεκτρόδιο χρησιμοποιείται ως ωμική επαφή με τον οργανικό ημιαγωγό.

Τα Single Layer OPVs, αν και απλά ως προς την κατασκευή τους, έχουν χαμηλή κβαντική απόδοση και χαμηλό συντελεστή μετατροπής. Οι χαμηλές αποδόσεις της διάταξης οφείλονται κατά κύριο λόγο στο ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια το οποίο είναι χαμηλής εντάσεως, η οποία δεν καταφέρει να ενισχύσει σε βέλτιστο βαθμό τη διάσπαση των εξιτονικών δεσμών. Εντός του οργανικού υλικού, το ποσοστό των ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών που επανασυνδέονται είναι αρκετά υψηλό. Αιτία αυτής της ανεπιθύμητης διεργασίας είναι η συνεχής κίνηση των ελεύθερων οπών και ηλεκτρονίων εντός του οργανικού υλικού στο οποίο είναι εγκλωβισμένα, τα οποία ως είναι λογικό έλκονται και συνδέονται.

### 3.12 OPVs Διπλού Υποστρώματος ( Bilayer OPVs )

Τα Bilayer OPVs αποτελούν τη βελτιωμένη μορφή των Single Layer OPVs ,εισάγοντας ένα υπόστρωμα οργανικού δότη και ένα υπόστρωμα οργανικού δέκτη μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων: Τα δύο νέα υποστρώματα παρουσιάζουν διαφορετική ηλεκτρονική συγγένεια ( electron affinity ) και ενέργεια ιοντισμού. Κατά συνέπεια, παρουσιάζονται δυνάμεις ηλεκτροστατικής φύσεως στη διεπαφή του δότη και του δέκτη τα οποία ενισχύονται μέσω της σωστής επιλογής υλικών για την εν λόγω διεργασία. . Με αυτό τον τρόπο, μεγιστοποιούνται τα τοπικά ηλεκτρικά πεδία και κατά συνέπεια παρουσιάζεται διάσπαση εξιτονίων σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με τα Single Layer OPVs. Το υπόστρωμα με τη μεγαλύτερη ηλεκτρονική συγγένεια και το μεγαλύτερο δυναμικό ιοντισμού αποτελεί τον δέκτη ηλεκτρονίων ( electron acceptor ) και το άλλο υπόστρωμα, τον δότη ηλεκτρονίων ( electron acceptor ). • Τα OPVs που κατασκευάζονται με αυτή την αρχιτεκτονική καλούνται και

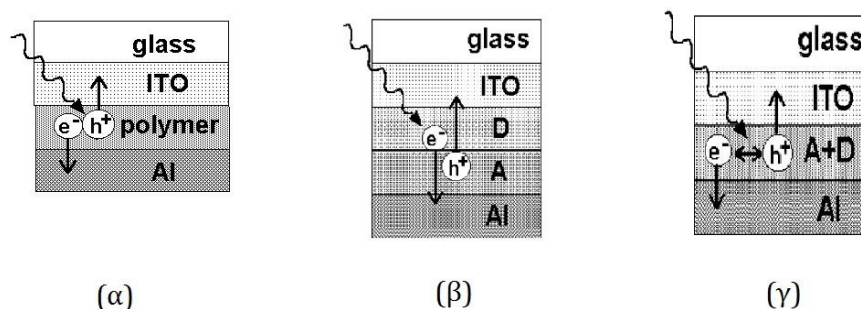
φωτοβολταϊκά επίπεδης ετεροεπαφής δότη-δέκτη ( planar donor-acceptor heterojunction OPVs ). • Το κύριο μειονέκτημά τους είναι η μικρή επιφάνεια διεπαφής. Έτσι ένας μικρός μόνο αριθμός εξιτονίων κατορθώνουν να το φτάσουν και να διασπασθούν.

### 3.13 Bulk Heterojunction OPVs

Στα Bulk Heterojunction OPVs, αντί να υπάρχουν διακριτά υποστρώματα δότη και δέκτη, τα δύο αυτά υποστρώματα συγχωνεύονται σε ένα: το οποίο έχει πάχος παραπλήσιο του μήκους διάχυσης των εξιτονίων, ώστε το μεγαλύτερο ποσοστό των εξιτονίων που δημιουργούνται είτε στο δότη, είτε στο δέκτη, να είναι ικανά να φτάσουν τη διεπαφή όπου και θα διασπασθούν. Μετά τη διάσπαση των εξιτονίων, τα ηλεκτρόνια μετακινούνται στη περιοχή του δέκτη ηλεκτρονίων, μεταφέρονται και τελικά συλλέγονται από ένα από τα δύο ηλεκτρόδια. Οι οπές μετακινούνται στην αντίθετη διεύθυνση και τελικά συλλέγονται από το άλλο ηλεκτρόδιο. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου κατασκευής οργανικών φωτοβολταϊκών είναι η μεγάλη επιφάνεια διεπαφής. Αν η μίξη του δότη και του δέκτη γίνει σε μοριακό επίπεδο κατάλληλης κλίμακας, με σωστή επαφή μεταξύ όμοιων μορίων ( charge percolation ), τότε, μεγαλύτερο ποσοστό εξιτονίων θα φτάσει στη διεπαφή. Η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος περιορίζεται κυρίως εξαιτίας της ελλιπούς αξιοποίησης του προσπίπτοντος φωτός μιας και το φάσμα απορρόφησης του ενεργού υλικού δεν συμβαδίζει με αυτό του ηλιακού φάσματος. Την αδυναμία εμφάνισης μεγάλης πυκνότητας ρεύματος ενισχύει η ευκινησία των φορέων φορτίου στους οργανικούς ημιαγωγούς.

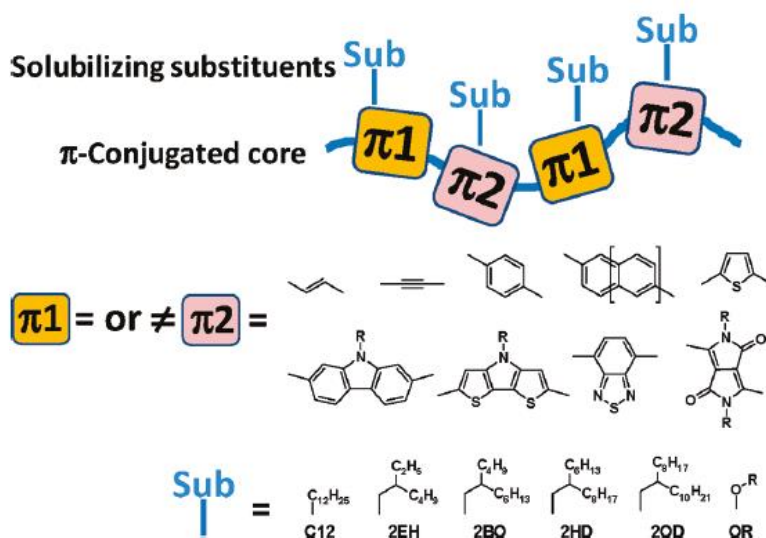
*Μια εφαρμογή με οργανικά πολυμερή φωτοβολταϊκά*

Πρόκειται για ένα σύστημα το οποίο έχει σαν βάση ένα γυαλί μέσω του οποίου



διέρχεται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Ακριβώς πάνω από την επιφάνεια του γυαλιού έχει τοποθετηθεί μια ITO επιφάνεια η οποία αποτελεί τη βάση της ετεροδομής που ακολουθεί. Η ετεροδομή αποτελείται από δύο ξεχωριστά υβριδικά κελιά, καθένα από τα οποία συνεισφέρει με διαφορετικό τρόπο. Ακριβώς πάνω από τα κελιά έχει τοποθετηθεί μια επιφάνεια άργυρου.

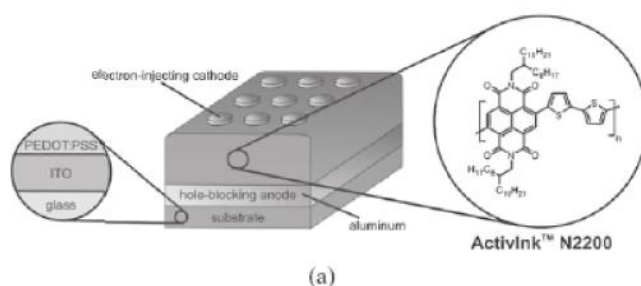
Η απορρόφηση της μέγιστης δυνατής ποσότητας από την προσπίπτουσα ακτινοβολία ρυθμίζεται μέσω του ITO το οποίο λειτουργεί ως άνοδος του συστήματος και αντίστοιχα ο άργυρος λειτουργεί ως κάθοδος ενισχύοντας την πλήρη ανακλαστικότητα της ακτινοβολίας στο εσωτερικό της διάταξης. Επίσης για την σωστή λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος θα πρέπει να είναι στρωτή και με καλή απόδοση η μετατροπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε ρεύμα. Σε αυτό συντελεί η περιοχή των υβριδικών κελιών και συγκεκριμένα τα στοιχεία πυθαλοκυανίνη χρυσού (copper phthalocyanine), που λειτουργεί ως p περιοχή και C<sub>60</sub> το οποίο λειτουργεί ως n δότης, που συνθέτουν τη διάταξη.



Εικόνα 3.12: (α) Single layer OPV (b) Double layer OPV (c) Bilayer OPV

Τα τελευταία χρόνια έχουν κάνει έντονα την εμφάνιση τους πολυμερή υλικά τα οποία μπορούν να ενισχύσουν την απόδοση των οργανικών φωτοβολταϊκών. Στην

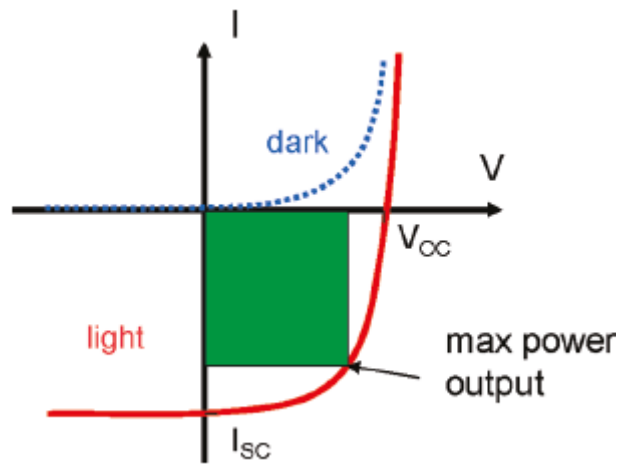
εργασία του Facchetti (2011) παρουσιάστηκαν πολυμερή π-σύζευξης ικανά να μετάσχουν σε οργανικά φωτοβολταϊκά κελιά. Συγκεκριμένα πρόκειται για τη σύζευξη δύο διαφορετικών π-δεσμών. Το γράμμα π αναφέρεται στο σχηματισμό που παίρνουν οι συνδέσεις των ατομικών τροχιακών για να καταλήξουν στον τελικό τους σχηματισμό. Η δομή του πολυμερούς φαίνεται στην Εικόνα.3.13



Εικόνα 3.13: Οργανική οπτοηλεκτρονική διάταξη με σύνθεση που στηρίζεται σε πολυμερικές αλυσίδες

Το πολυμερές λειτουργεί ως η οργανική ημιαγώγιμη περιοχή της φωτοβολταϊκής διάταξης. Η σχηματική αναπαράσταση της διάταξης διαφαίνεται στην Εικόνα. Το σύστημα της Εικόνας θεωρείται μια ιδιαιτέρως εξελιγμένη μορφή φωτοβολταϊκού συστήματος. Στο υπόστρωμα βρίσκεται το γυαλί απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μαζί με την ITO επιφάνεια η οποία λειτουργεί σαν άνοδος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην υπόλοιπη διάταξη. Επόμενα βρίσκεται η περιοχή σύνδεσης και τέλος στην ανώτερη επιφάνεια υπάρχουν αγωγίμες επιφάνειες οι οποίες λειτουργούν ως κάθοδοι. Αντί για ετεροδομές ή περιοχές ετεροεπαφών με την έννοια που έχουν παρουσιασθεί έως τώρα, ως περιοχή σύνδεσης λειτουργεί το ημιαγώγιμο πολυμερές.

Συγκεκριμένα, έχει αποδειχθεί ότι πολλά από τα συγκεκριμένα υλικά έχουν την τάση να παρουσιάζουν έντονη αύξηση της αγωγιμότητας τους καθώς αλληλεπιδρούν με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Στην Εικόνα 3.14 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική τάσης ρεύματος που παρέχεται από τη διάταξη έπειτα από πρόσπτωση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Είναι εμφανές ότι με την αύξηση της εκπομπής του φωτός επέρχεται και αύξηση του ρεύματος.



Εικόνα 3.14: Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος εξόδου

## ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα διπλωματική υλοποιήθηκε μια εκτενής βιβλιογραφική μελέτη της αρχής λειτουργίας και των εφαρμογών των οπτοηλεκτρονικών συστημάτων. Εν αντιθέση με τις πειραματικές εργασίες οι βιβλιογραφικές δεν έχουν να συνάγουν κάποιο συμπέρασμα το οποίο έχει προκύψει από τη μελέτη ενός θέτοντος προβλήματος το οποίο εν τέλει είτε επιλύεται είτε όχι.

Συνεπώς τα συμπεράσματα που μπορεί να συνάγει ο αναγνώστης με το πέρας της παρούσας διπλωματικής, είναι ότι τα οπτοηλεκτρονικά συστήματα αποτελούν απόρροια μιας ταχύτατης εξελίξιμης έρευνας στο πεδίο των ηλεκτρονικών συστημάτων, η οποία ξεκίνησε πριν περίπου 50 με 60 χρόνια και μέχρι σήμερα έχει να παρουσιάσει μια πληθώρα προϊόντων υψηλής τεχνολογικής αξίας.

Αξιολογώντας τις δύο μεγάλες κατηγορίες υλικών που αποτελούν τη βάση των οπτοηλεκτρονικών συστημάτων, γίνεται εύκολα συνειδητό ότι το πυρίτιο και το γερμάνιο αποτελούν ακόμα και σήμερα τα δύο κυρίαρχα υλικά της ηλεκτρονικής τεχνολογίας. Η ανάγκη όμως του ανθρώπου για συστήματα τα οποία θα είναι ευέλικτα τόσο κατασκευαστικά όσο και ως προς το κομμάτι της απόδοσης τους οδήγησε στην εφεύρεση και αξιοποίηση συστημάτων με βάση και άλλα υλικά όπως παραδείγματος χάρη αυτά που εμπεριέχουν σαν βάση για το σχηματισμό τους τον άνθρακα (οργανικά υλικά).

Κρίνοντας με βάση τα αποτελέσματα που αναδείχθηκαν από διάφορες εφαρμογές που έχουν παρουσιασθεί στην παγκόσμια βιβλιογραφία για όλες τις κατηγορίες υλικών σε όλη τη διπλωματική, το συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει είναι ότι η κάθε κατηγορία υλικών ξεχωριστά είναι σε θέση να συνεισφέρει με ένα συγκεκριμένο δικό της τρόπο στην απόδοση των οπτοηλεκτρονικών συστημάτων. Με την συνεχή άνοδο της έρευνας στο πεδίο της νανοτεχνολογίας, το σίγουρο είναι ότι μέσα στα επόμενα χρόνια θα δούμε ακόμα περισσότερα επιτεύγματα.



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Jiangeng Xue et al. “Asymmetric tandem organic photovoltaic cells with hybrid planar – mixed molecular heterojunctions”, APPLIED PHYSICS LETTERS, Vol. 85, 2004, pp. 5757-5761
2. Jifeng Liu et al. “Ge-on-Si optoelectronics”, Thin Solid Films, 2012 pp. 3354-3360
3. Antonio Facchetti “π-Conjugated Polymers for Organic Electronics and Photovoltaic Cell Applications”, CHEMISTRY OF MATERIALS, 2011, pp. 733-758
4. Σπύρος Γαρδέλης «Οπτοηλεκτρονική και εφαρμογές» σημειώσεις για το Θερινό Σχολείο στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», 2005
5. Αναστασία Μεριστούλη «ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΦΩΤΟΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΟΠΤΙΚΟΥΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ», διδακτορική διατριβή, 2009
6. Γ. Μήτσου «ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ», προσωπικές σημειώσεις, Εργαστήριο Οπτοηλεκτρονικής και Laser, Α.Τ.Ε.Ι. Αθήνας
7. Δημήτρης Αλεξανδρόπουλος «Επιστήμη Υλικών 6», προσωπικές σημειώσεις, 2015
8. Diehmar Kripp “Organic Electronics”, προσωπικές σημειώσεις
9. Σάββας Τούσας, «ΜΕΛΕΤΗ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΜΙΚΡΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ», πτυχιακή εργασία Α.Τ.Ε.Ι. Καβάλας
10. T. Zaki “Short – Channel Organic Thin-Film Transistors”, Book, Chapter 2, Springer International Publishing Switzerland, 2015
11. Vrej Barkhodarian “Power MOSFET Basics” El Segundo, Ca., [www.irf.com](http://www.irf.com)
12. Γεώργιος Βισκαδούρος «Ανάπτυξη καινοτόμων οπτοηλεκτρονικών διατάξεων πολυμερούς – νανοδομών για εφαρμογές σε οργανικά φωτοβολταϊκά και εκπομπή πεδίου», Μεταπτυχιακή Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης
13. Joy Perkinson, “Organic Field-Effect Transistors”, 2007
14. “Power MOSFET Basics” ALPHA & OMEGA SEMICONDUCTOR
15. Vikas S Pathak & Aruna Dani, “OPV cells as a Promising Future Prospect: a review”, IOSR Journal of Applied Physics pp. 65-69
16. C. J. Brabec, V. Dyakonov, J. Parisi, N.S.Sariftci, Organic Photovoltaics: Concepts and Realization, Springer, 2003
17. Frederick C. Krebs, Polymer Photovoltaics: A Practical Approach, SPIE, 2008
18. D. Fichou, G. Horowitz, Molecular and Polymer Semiconductors, Conductors, and Superconductors: Overview, in Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Elsevier, 2006, pp. 5748-5757
19. Coakley, K.M., and McGehee, M.D., “Conjugated polymer photovoltaic cells,” Chem. Mater., 16, 4533–4542 (2004)
20. Nurdan Demirci Sankir , “Flexible Electronics : Materials and Device Fabrication” , διδακτορική διατριβή(2005)