

HY327 – Ψηφιακά Κυκλώματα - Εισαγωγή στα Συστήματα VLSI

Διδάσκων: Χ. Σωτηρίου
Βοηθοί: Ι. Λιλίτσης, Η. Γκόλφος, Σ. Σίμογλου

<http://inf-server.inf.uth.gr/courses/CE330>

| HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

1

Περιεχόμενα

<ul style="list-style-type: none"> ▶ Συσκευές στο Πυρίτιο ▶ Άτομο <ul style="list-style-type: none"> ▶ Μοντέλο του Bohr ▶ Ηλεκτρονιακές Στιβάδες ▶ Η πραγματικότητα ▶ Μόρια <ul style="list-style-type: none"> ▶ Ομοιοπολικός Δεσμός ▶ Ετεροπολικός Δεσμός ▶ Άλλοι Δεσμοί ▶ Χημικό Σθένος ▶ Ενεργειακές Ζώνες Στερεών <ul style="list-style-type: none"> ▶ Επίπεδο Fermi 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Κρυσταλλική δομή Si ▶ Doping ▶ Πυρίτιο n και p ▶ Μονωτικό SiO₂ ▶ Άλλα ημιαγώγιμα υλικά ▶ NP junction ▶ Δίοδος pn <ul style="list-style-type: none"> ▶ Επίπεδα Fermi στη Δίοδο ▶ Cool Topics
---	---

▶ 2 HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

2

Συσκευές στο Πυρίτιο

- ▶ Συσκευές
 - ▶ MOS τρανζίστορ
 - ▶ Παρασιτικές συσκευές
 - ▶ Δίοδοι
 - ▶ Παρασιτικές χωρητικότητες, αντιστάσεις διασυνδέσεων
 - ▶ Παρασιτικά τρανζίστορ (διπολικά)
- ▶ Συσκευή - Συμπεριφορά - Μοντέλο
- ▶ Απλό μοντέλο για πρωτογενή ανάλυση
 - ▶ Διαισθητική ανάλυση
 - ▶ Ελάχιστη ακρίβεια
- ▶ Μοντέλα SPICE
 - ▶ Προσομοίωση του κυκλώματος βάση μοντέλου κατασκευής

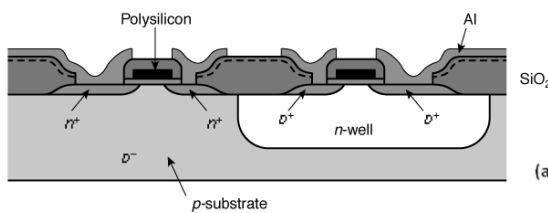
▶ 3

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

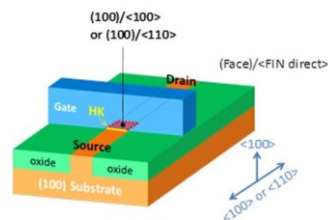
3

Συσκευή Planar FET

Introduced in 1960s



(a) Planar-FET



▶ 4

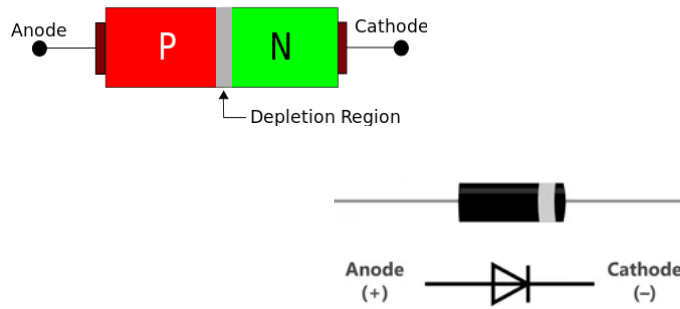
HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

4

Δίοδος Στερεάς Κατάστασης

Introduced in 1906

Semiconductor Diode Construction



▶ 5

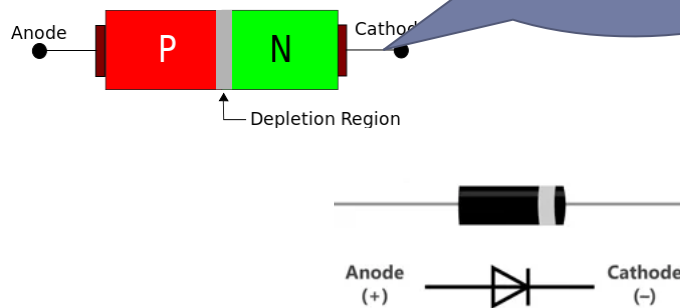
HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

5

Δίοδος Στερεάς Κατάστασης

Introduced in 1906

Semiconductor Diode Construction



▶ 6

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

6

Δίοδος Στερεάς Κατάστασης

Introduce... S... P και N?

Semicon...

DISCLAIMER: Από εδώ και πέρα εκτός ύλης

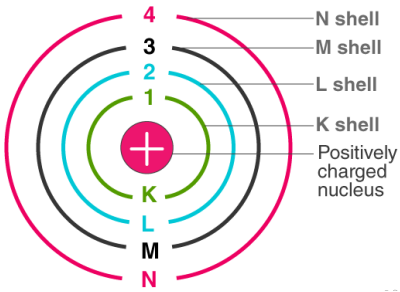
Anode (+) Cathode (-)

7

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

7

Άτομο - Μοντέλο του Bohr - Ηλεκτρονιακές Στιβάδες



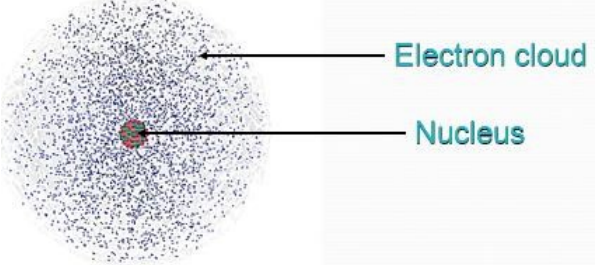
- ▶ Τα ηλεκτρόνια κινούνται σε συγκεκριμένες τροχιές (στιβάδες) γύρω από τον πυρήνα
- ▶ Μπορούν να μεταπηδήσουν από τροχιά σε τροχιά απορροφώντας και αποβάλλοντας ενέργεια αντίστοιχα (πχ. φωσφορισμός)
- ▶ Μοντέρνες θεωρίες της κβαντομηχανικής (atom orbitals etc) αποτελούν εξειδίκευση αυτού του μοντέλου
- ▶ Το μοντέλο είναι ακριβές υπό προϋποθέσεις (π.χ. ταχύτητα σωματιδίων \ll ταχύτητα του φωτός κ.α.)
- ▶ Κάθε στιβάδα μπορεί να περιέχει συγκεκριμένο αριθμό ηλεκτρονίων
 - ▶ K: 2, L: 8, M: 18, N: 32, ..., $2n^2$
- ▶ Η ενέργεια των ηλεκτρονίων διαφέρει ανάλογα με τη στιβάδα και τον αριθμό τους ανά στιβάδα

8

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

8

Άτομο (η πραγματικότητα)



▶ Τα ηλεκτρόνια δεν περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα σε προκαθορισμένες τροχιές αλλά η θέση τους περιγράφεται από μια μαθηματική πιθανοτική συνάρτηση που εξηγεί τόσο τη θέση τους όσο και την κυματοειδή συμπεριφορά τους


▶ 9
HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης
10/6/2022

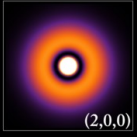
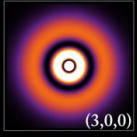
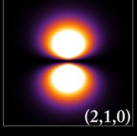
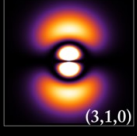
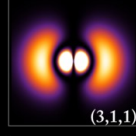

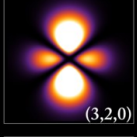
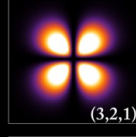
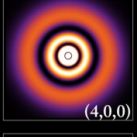
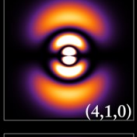
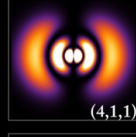
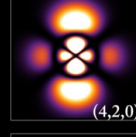
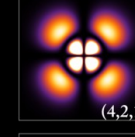


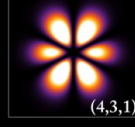

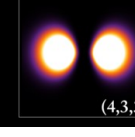
9

Hydrogen Wave Function

Probability density plots.

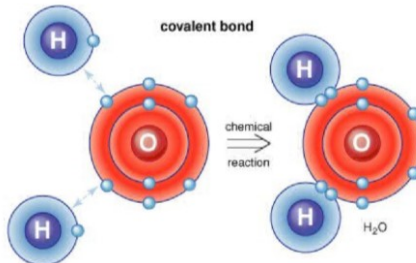
$$\psi_{nlm}(r, \theta, \varphi) = \sqrt{\left(\frac{2}{na_0}\right)^3 \frac{(n-l-1)!}{2n[(n+l)!]} e^{-\rho/2} \rho^l L_{n-l-1}^{2l+1}(\rho) \cdot Y_{lm}(\theta, \varphi)}$$



 (2,0,0)	 (3,0,0)			
 (2,1,0)	 (3,1,0)	 (3,1,1)		
 (3,2,0)	 (3,2,1)	 (3,2,2)		
 (4,0,0)	 (4,1,0)	 (4,1,1)	 (4,2,0)	 (4,2,1)
 (4,2,2)	 (4,3,0)	 (4,3,1)	 (4,3,2)	 (4,3,3)

10

Μόρια - Ομοιοπολικός Δεσμός



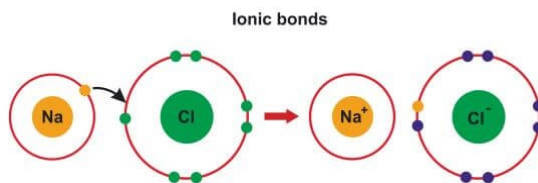
- ▶ Ο ομοιοπολικός δεσμός (covalent bond) σχηματίζεται μεταξύ ατόμων που «μοιράζονται» ηλεκτρόνια
- ▶ Ουσιαστικά τα ηλεκτρόνια «κλειδώνονται» σε συγκεκριμένες τροχιές γύρω από τους πυρήνες των ατόμων που συμμετέχουν στον δεσμό
- ▶ Ισορροπία ελκτικών και απωστικών δυνάμεων

▶ 11

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

11

Μόρια – Ετεροπολικός (Ιονικός) Δεσμός



- ▶ Ο ετεροπολικός δεσμός (ionic bond) σχηματίζεται μεταξύ ιόντων (δηλ. φορτισμένων ατόμων), όπου το ένα άτομο προσφέρει ηλεκτρόνια (κατιόν +) και το άλλο άτομο τα δέχεται (ανιόν -)
- ▶ Μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ στην ηλεκτροαρνητικότητα του ανιόντος και στην ηλεκτροθετικότητα του κατιόντος συνεπάγεται πιο ισχυρή ετεροπολική ένωση

▶ 12

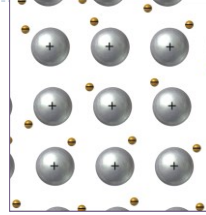
HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

12

Άλλοι δεσμοί

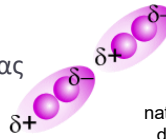
▶ Μεταλλικός Δεσμός

- ▶ Μεταξύ ατόμων μεταλλικών κρυστάλλων
- ▶ Προκύπτουν λόγω των ελεύθερων ηλεκτρονίων σθένους
- ▶ Υπάρχουν μόρια μετάλλων;



▶ Δεσμοί Van Der Waals

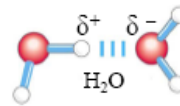
- ▶ Δεσμοί μεταξύ μορίων για το σχηματισμό της στερεάς, υγρής ή αέριας ύλης



Homonuclear molecules, such as iodine, develop temporary dipoles due to natural fluctuations of electron density within the molecule

▶ Δεσμός Υδρογόνου

- ▶ Χαμηλού ενδιαφέροντος για το μάθημα, ύψιστου ενδιαφέροντος για βιολογικές διαδικασίες, πχ DNA στις στροφές της έλικας



▶ 13

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

13

Χημικό Σθένος (Valence)

- ▶ Ικανότητα κάθε στοιχείου να δημιουργεί ομοιοπολικούς δεσμούς
- ▶ Εξαρτάται από τον αριθμό ηλεκτρονίων της εξωτερικής στιβάδας
 - ▶ Κάθε ηλεκτρόνιο που μπορεί να σχηματίσει χημικό δεσμό ονομάζεται ηλεκτρόνιο σθένους (valence electron)
 - ▶ Αν η εξωτερική στιβάδα είναι κλειστή, δηλ. περιέχει τον μέγιστο δυνατό αριθμό ηλεκτρονίων, το στοιχείο είναι χημικά αδρανές
 - ▶ Πχ. ευγενή αέρια
- ▶ Στα χημικά στοιχεία που μας ενδιαφέρουν (στα πλαίσια της διάλεξης) υπάρχουν το πολύ 8 ηλεκτρόνια σθένους
- ▶ Ανάλογα με τον αριθμό τους τα στοιχεία διακρίνονται σε:
 - ▶ Αγωγούς – Λιγότερα από 4 ηλεκτρόνια σθένους
 - ▶ Ημιαγωγούς – 4 ηλεκτρόνια σθένους
 - ▶ Μονωτές – Πάνω από 4 ηλεκτρόνια σθένους

▶ 14

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

14

Χημικό Σθένος (Valence)

- ▶ Ικανότητα κάθε στοιχείου να δημιουργεί ομοιοπολικούς δεσμούς
- ▶ Εξαρτάται από τον αριθμό ηλεκτρονίων της εξωτερικής στιβάδας
 - ▶ Κάθε ηλεκτρόνιο που μπορεί να σχηματίσει χημικό δεσμό ονομάζεται ηλεκτρόνιο σθένους (valence electron)
 - ▶ Αν η εξωτερική στιβάδα είναι πλήρως γεμάτη με ηλεκτρόνια, τότε ο αριθμός ηλεκτρονίων, το στοιχείο είναι αδρανές
 - ▶ Πχ. ευγενή αέρια
- ▶ Στα χημικά στοιχεία που μοιάζουν με τα αμέταλλα (στην διάλεξη) υπάρχουν το πολύ 8 ηλεκτρόνια σθένους
- ▶ Ανάλογα με τον αριθμό τους τα στοιχεία διακρίνονται σε:
 - ▶ Αγωγούς – Λιγότερα από 4 ηλεκτρόνια σθένους
 - ▶ Ημιαγωγούς – 4 ηλεκτρόνια σθένους
 - ▶ Μονωτές – Πάνω από 4 ηλεκτρόνια σθένους

Τι σημασία έχουν όλα αυτά στο VLSI?

▶ 15

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

15

Ενεργειακές Ζώνες Στερεών

- ▶ Τα ηλεκτρόνια μεμονωμένων ατόμων καταλαμβάνουν συγκεκριμένες τροχιές
- ▶ Κάθε τροχιά έχει συγκεκριμένο ενεργειακό επίπεδο
- ▶ Σε αντίθεση με το παραπάνω, όταν δημιουργούνται δεσμοί, οι τροχιές των επιμέρους ατόμων εφάπτονται ή αλληλεπιδρούν σχηματίζοντας νέες υβριδικές τροχιές
 - ▶ Άρα πλέον δε μιλάμε για ενεργειακό επίπεδο αλλά για ενεργειακές ζώνες
- ▶ Οι περιοχές εκτός των ενεργειακών ζωνών ονομάζονται χάσματα (band gaps) και είναι «απαγορευμένες» για τα ηλεκτρόνια του στερεού
- ▶ Η ενέργεια της τελευταίας κατειλημμένης ζώνης στο στερεό λέγεται ενέργεια Fermi του στερεού

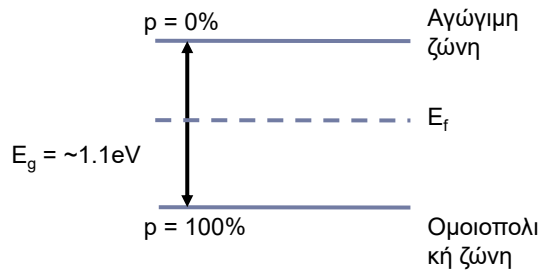
▶ 16

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

16

Ορισμός: Επίπεδο Fermi

- ▶ Επίπεδο Fermi είναι το θερμοδυναμικό έργο που απαιτείται για την εισαγωγή ενός ηλεκτρονίου στο στερεό
- ▶ Το Ενεργειακό επίπεδο που έχει πιθανότητα κατάληψης 50% (σε θερμοδυναμική ισορροπία)



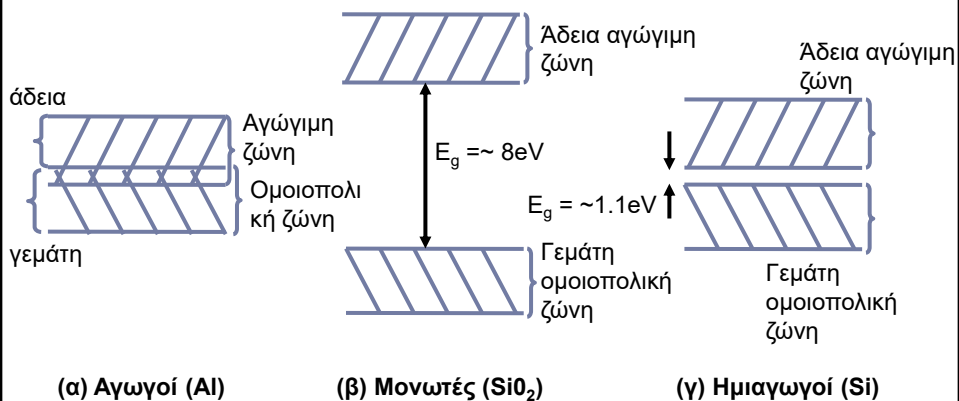
- ▶ Ανάλογα με το αν η τελευταία ενεργειακή ζώνη τους είναι πλήρως κατειλημμένη ή μη πλήρως, τα υλικά διακρίνονται σε μονωτές, αγωγούς (μέταλλα) και ημιαγωγούς.

▶ 17

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

17

Ενεργειακές Ζώνες Στερεών



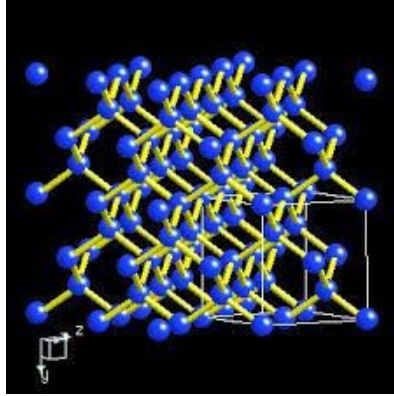
▶ 18

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

18

Κρυσταλλική Δομή Si

- ▶ Το πυρίτιο έχει κρυσταλλική δομή και σθένος 4.



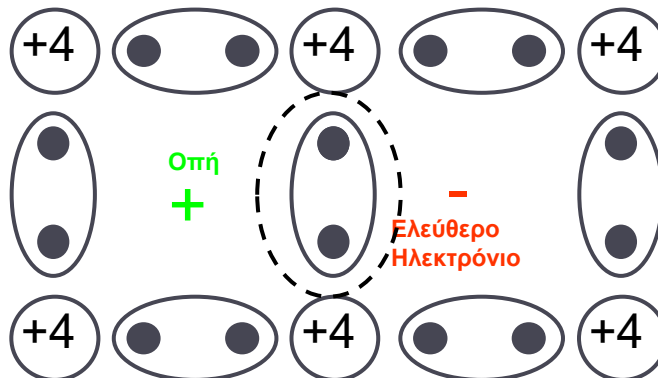
▶ 19

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

19

Κρυσταλλική Δομή Si

- ▶ Το πυρίτιο έχει κρυσταλλική δομή και σθένος 4.



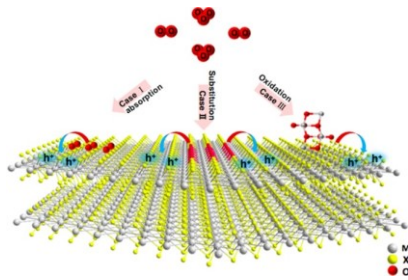
▶ 20

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

20

Doping

- ▶ Διαδικασία εισαγωγής προσμίξεων στους ημιαγωγούς για την ρύθμιση του επιπέδου Fermi
- ▶ Ρύθμιση αγώγιμων ιδιοτήτων του υλικού



Silicon Dopants

Acceptors, p-type	Donors, n-type
Boron (B)	Phosphorus (P)
Aluminum (Al)	Arsenic (As)
Gallium (Ga)	Antimony (Sb)
Indium (In)	Bismuth (Bi)
	Lithium (Li)

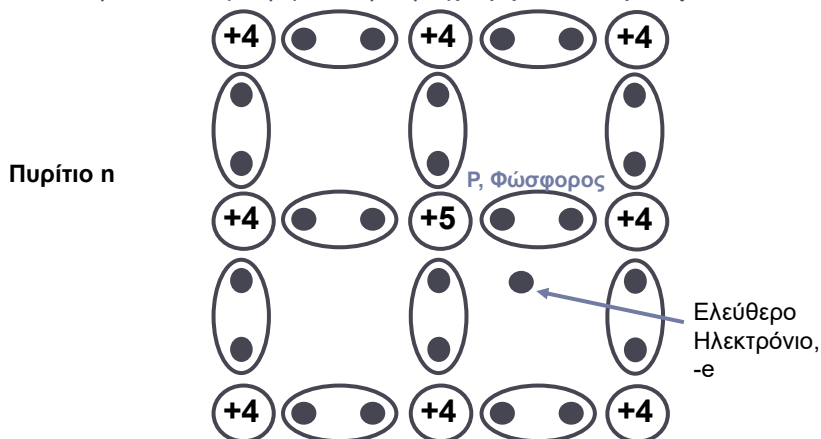
▶ 21

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

21

Πυρίτιο τύπου n και p

- ▶ Πυρίτιο n
 - ▶ Κρυσταλλική δομή που περιέχει (α) 5-σθενές άτομο



▶ 22

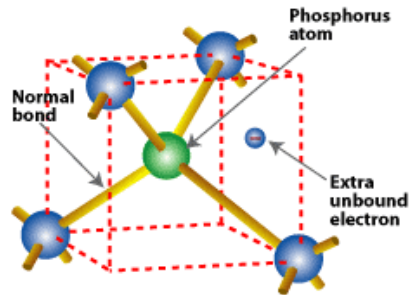
HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

22

Πυρίτιο τύπου n και p

▶ Πυρίτιο n

- ▶ Κρυσταλλική δομή που εμπεριέχει (α) 5-σθενές άτομο



▶ 23

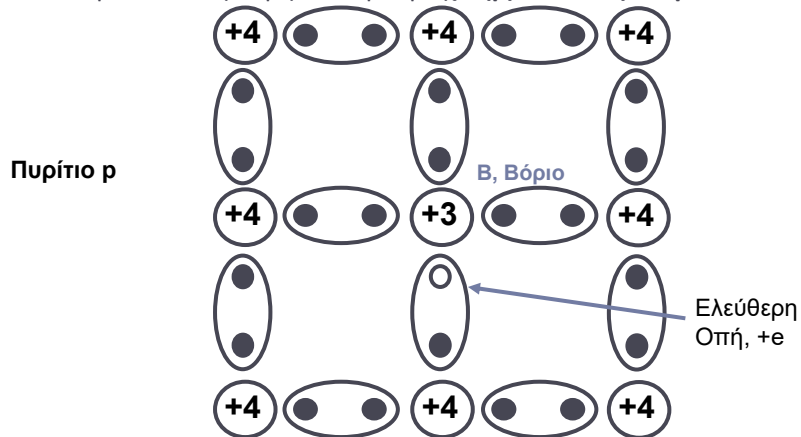
HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

23

Πυρίτιο τύπου n και p

▶ Πυρίτιο p

- ▶ Κρυσταλλική δομή που εμπεριέχει (β) 3-σθενές άτομο



▶ 24

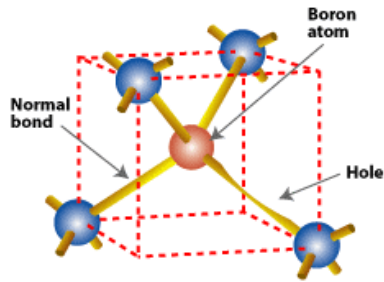
HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

24

Πυρίτιο τύπου n και p

▶ Πυρίτιο p

- ▶ Κρυσταλλική δομή που εμπεριέχει (β) 3-σθενές άτομο

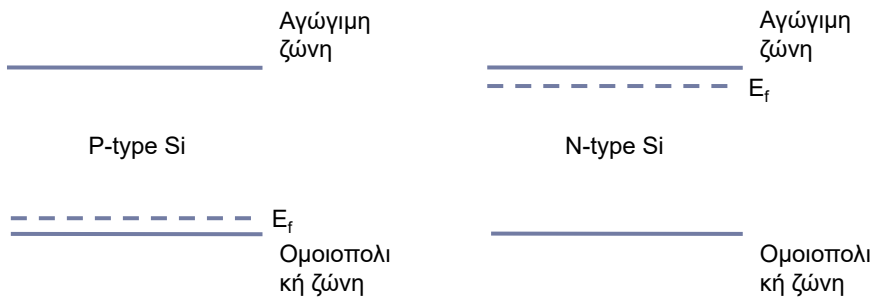


▶ 25

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

25

Επίπεδα Fermi σε n και p πυρίτιο



▶ 26

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

26

Μονωτικό SiO₂

- ▶ Το διοξείδιο του πυριτίου (SiO₂) χρησιμοποιείται σε όλο τον ενδιάμεσο χώρο μεταξύ των μετάλλων και των συσκευών
- ▶ Κρυσταλλική δομή:

▶ 27

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

27

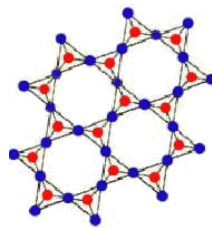
Μονωτικό SiO₂

- ▶ Το διοξείδιο του πυριτίου (SiO₂) χρησιμοποιείται σε όλο τον ενδιάμεσο χώρο μεταξύ των μετάλλων και των συσκευών
- ▶ Κρυσταλλική δομή:

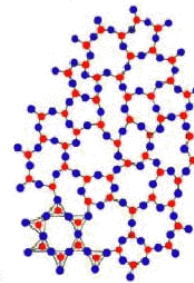


- ▶ Χαλαζίας (Quartz) ή γυαλί

Crystalline SiO₂
(Quartz)



Amorphous SiO₂
(Glass)



• Si • O

▶ 28

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

28

Άλλα ενδιαφέροντα ημιαγώγιμα υλικά

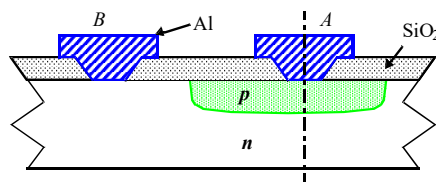
Diamond	C	Excellent thermal conductivity. Superior mechanical and optical properties. Extremely high nanomechanical resonator quality factor.
Germanium	Ge	Used in early radar detection diodes and first transistors; requires lower purity than silicon. A substrate for high-efficiency multijunction photovoltaic cells.
Silicon carbide, 4H-SiC	SiC	Used for high-voltage and high-temperature applications
Gallium nitride	GaN	β -doping with Mg and annealing allowed first high-efficiency blue LEDs and blue lasers. Insensitive to ionizing radiation. GaN transistors can operate at higher voltages and higher temperatures than GaAs, used in microwave power amplifiers.
Gallium phosphide	GaP	Used in early low to medium brightness cheap red/orange/green LEDs.
Gallium arsenide	GaAs	second most common in use after silicon, commonly used as substrate for other semiconductors, e.g. InGaAs and GaInNAs. Lower hole mobility than Si. P-type CMOS transistors unfeasible. Used for near-IR LEDs, fast electronics, and high-efficiency solar cells.
Gallium antimonide	GaSb	Used for infrared detectors and LEDs and thermophotovoltaics. Doped n with Te, p with Zn.
Indium phosphide	InP	Commonly used as substrate for epitaxial InGaAs. Superior electron velocity, used in high-power and high-frequency applications. Used in optoelectronics.
Indium arsenide	InAs	Used for infrared detectors for 1–3.8 μm , cooled or uncooled. High electron mobility. Strong photo-Dember emitter, used as a terahertz radiation source.
Indium antimonide	InSb	Used in infrared detectors and thermal imaging sensors, used in military long-range thermal imager systems. Transistors can operate below 0.5V and above 200 GHz. Terahertz frequencies maybe achievable.
Cadmium sulfide	CdS	Used in photoresistors and solar cells; CdS/Cu2S was the first efficient solar cell. Crystals can act as solid-state lasers. Electroluminescent. When doped, can act as a phosphor.
Cadmium telluride	CdTe	Used in solar cells with CdS. Used in thin film solar cells and other cadmium telluride photovoltaics. Fluorescent at 790 nm.
Zinc selenide	ZnSe	Used for blue lasers and LEDs. Common optical material in infrared optics.
Zinc telluride	ZnTe	Can be grown on AlSb, GaSb, InAs, and PbSe. Used in solar cells, components of microwave generators, blue LEDs and lasers. Used in electrooptics.
Copper sulfide	Cu2S	Together with lithium niobate used to generate terahertz radiation.
Lead selenide	PbSe	β -type, Cu2S/CdS was the first efficient thin film solar cell.
Lead telluride	PbTe	Used in infrared detectors for thermal imaging. Good high temperature thermoelectric material.
Tin(II) sulfide	SnS	Low thermal conductivity, good thermoelectric material at elevated temperature for thermoelectric generators.
Tin(IV) sulfide	SnS2	Has emerged as one of the simple, non-toxic and affordable material for thin films solar cells since a decade.
Lead tin telluride	Pb1-xSnx	SnS2 is widely used in gas sensing applications.
Cadmium arsenide	Cd3As2	Used in infrared detectors and for thermal imaging
Zinc antimonide	Zn3Sb2	Ni-type intrinsic semiconductor. Very high electron mobility. Used in infrared detectors, photodetectors, dynamic thin-film pressure sensors, and magnetoresistors.
Copper(I) oxide	Cu2O	Used in infrared detectors and thermal imagers, transistors, and magnetoresistors.
Strontium titanate	SrTiO3	One of the most studied semiconductors. Many applications and effects first demonstrated with it. Formerly used in rectifier diodes, before silicon.
Lithium niobate	LiNbO3	Ferroelectric, piezoelectric. Used in varistors. Conductive when niobium-doped.
Platinum silicide	PtSi	Ferroelectric, piezoelectric, shows Pockels effect. Wide uses in electrooptics and photonics.
Thallium(I) bromide	TlBr	Used in infrared detectors for 1–5 μm . Used in infrared astronomy. High stability, low drift, used for measurements. Low quantum efficiency.
		Used in some gamma-ray and x-ray detectors and imaging systems operating at room temperature. Used as a real-time x-ray image sensor.

▶ 29

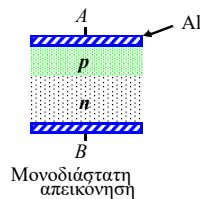
HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς 10/6/2022
Κατάσταση

29

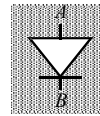
Δίοδος pn



Διατομή διόδου pn σε διεργασία κατασκευής



Μονοδιάστατη απεικόνιση



Σύμβολο διόδου

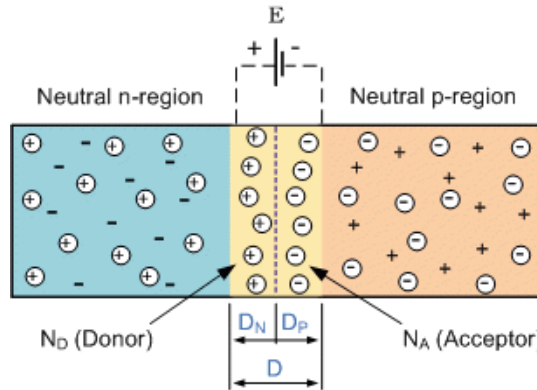
▶ 30

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς 10/6/2022
Κατάσταση

30

Δίοδος pn και Χώρος Αραίωσης

- ▶ Στο όριο μεταξύ p και n οι πλειοδότες φορείς αλληλοεξουδετερώνονται, με αποτέλεσμα την δημιουργία ηλεκτροστατικού δυναμικού

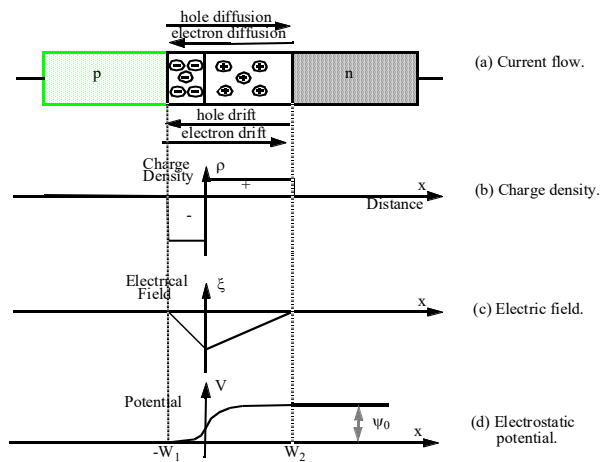


▶ 31

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

31

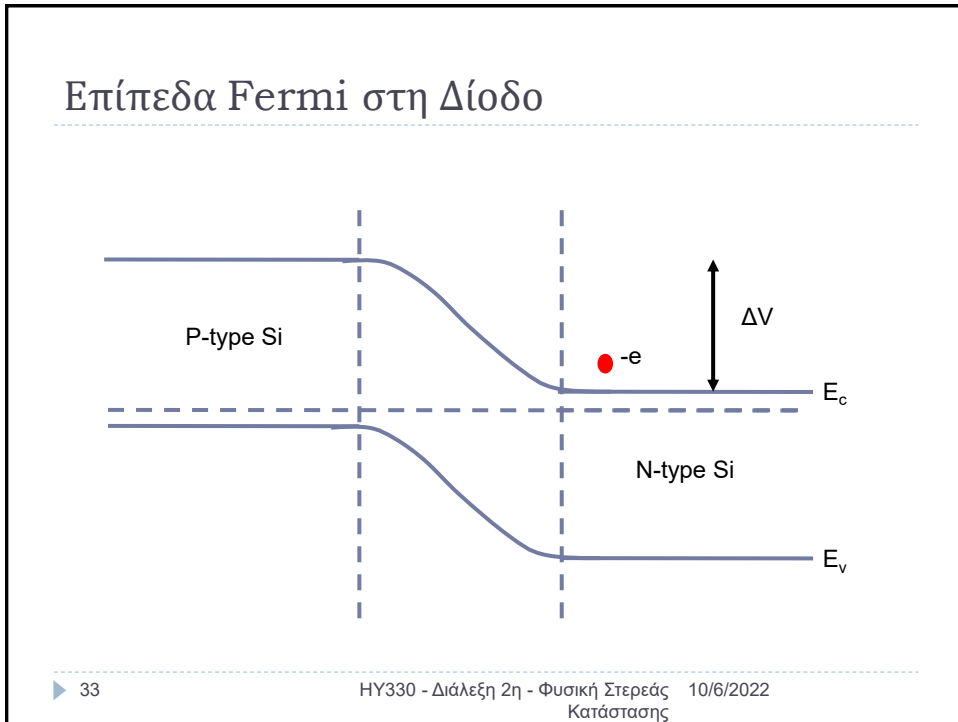
Χώρος Αραίωσης pn - Ανάλυση



▶ 32

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

32



33

Cool Topics

- ▶ Quantum Tunneling

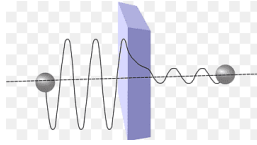
34

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

34

Cool Topics

- ▶ Quantum Tunneling



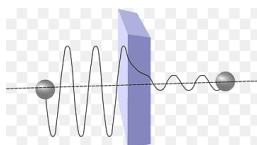
▶ 35

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

35

Cool Topics

- ▶ Quantum Tunneling



- ▶ Why LEDs emit light?

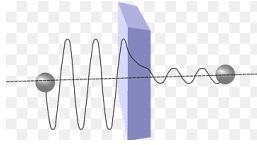
▶ 36

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

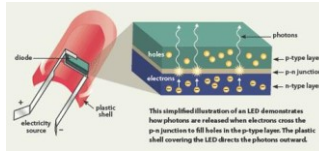
36

Cool Topics

▶ Quantum Tunneling



▶ Why LEDs emit light?



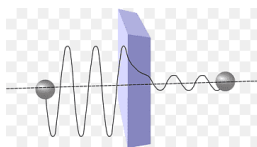
▶ 37

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

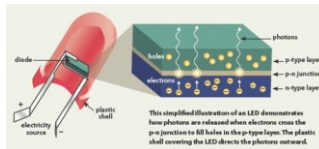
37

Cool Topics

▶ Quantum Tunneling



▶ Why LEDs emit light?



▶ Why are IC packages usually black?



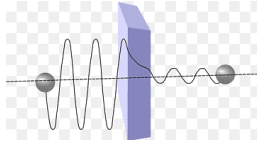
▶ 38

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης 10/6/2022

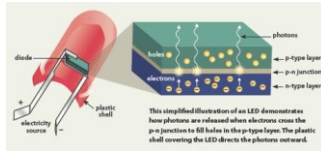
38

Cool Topics

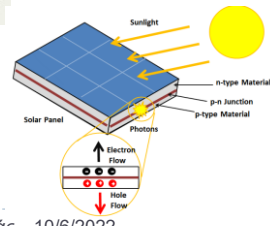
▶ Quantum Tunneling



▶ Why LEDs emit light?



▶ Why are IC packages usually black?



▶ 39

HY330 - Διάλεξη 2η - Φυσική Στερεάς Κατάστασης

10/6/2022