



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Υλικά Ι

Ενότητα 8: Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Δημήτρης Παπάζογλου
Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται στην άδεια χρήσης **Creative Commons** και ειδικότερα

*Αναφορά - Μη εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγο Έργο v. 3.0
(Attribution – Non Commercial – Non-derivatives)*



- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Κρήτης**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

ΥΛΙΚΑ Ι

ΠΑΡΟΝ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

8

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Νομός του Ohm

Η τάση είναι ανάλογη της έντασης του ρεύματος.

τάση
Volt

$$V = I \cdot R$$

αντίσταση
Ohm

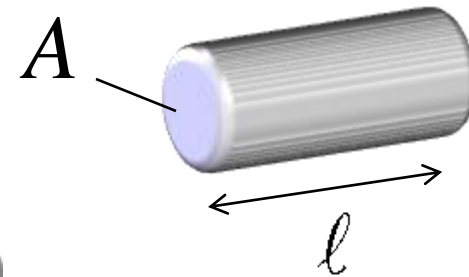
Ηλεκτρικό
ρεύμα
Ampere

Ειδική αντίσταση

$$\rho = \frac{R \cdot A}{\ell}$$

Ανεξάρτητη από
μήκος και διατομή

Ohm · m



$J = \sigma \cdot E$

πικνότητα ρεύματος
Ampere · m⁻²

Ένταση ηλεκτρικού πεδίου
Volt · m⁻¹

Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα
(Ohm · m)⁻¹

$\sigma = \frac{1}{\rho}$

Τυπικές τιμές συντελεστών ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας

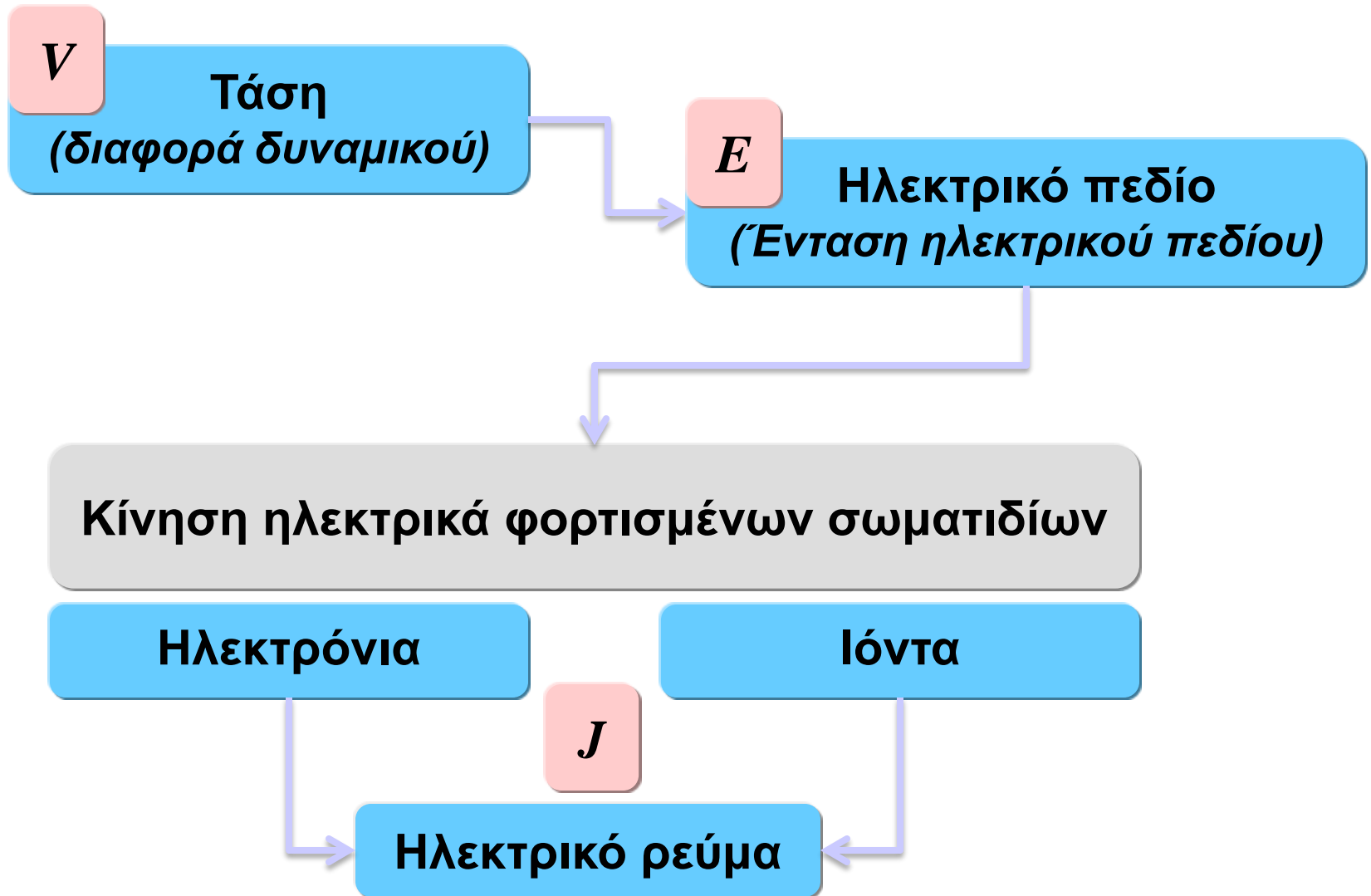
Μονωτές	Ημιαγωγοί	Μέταλλα
10 ⁻²⁰ έως 10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁶ έως 10 ⁴	~ 10 ⁷



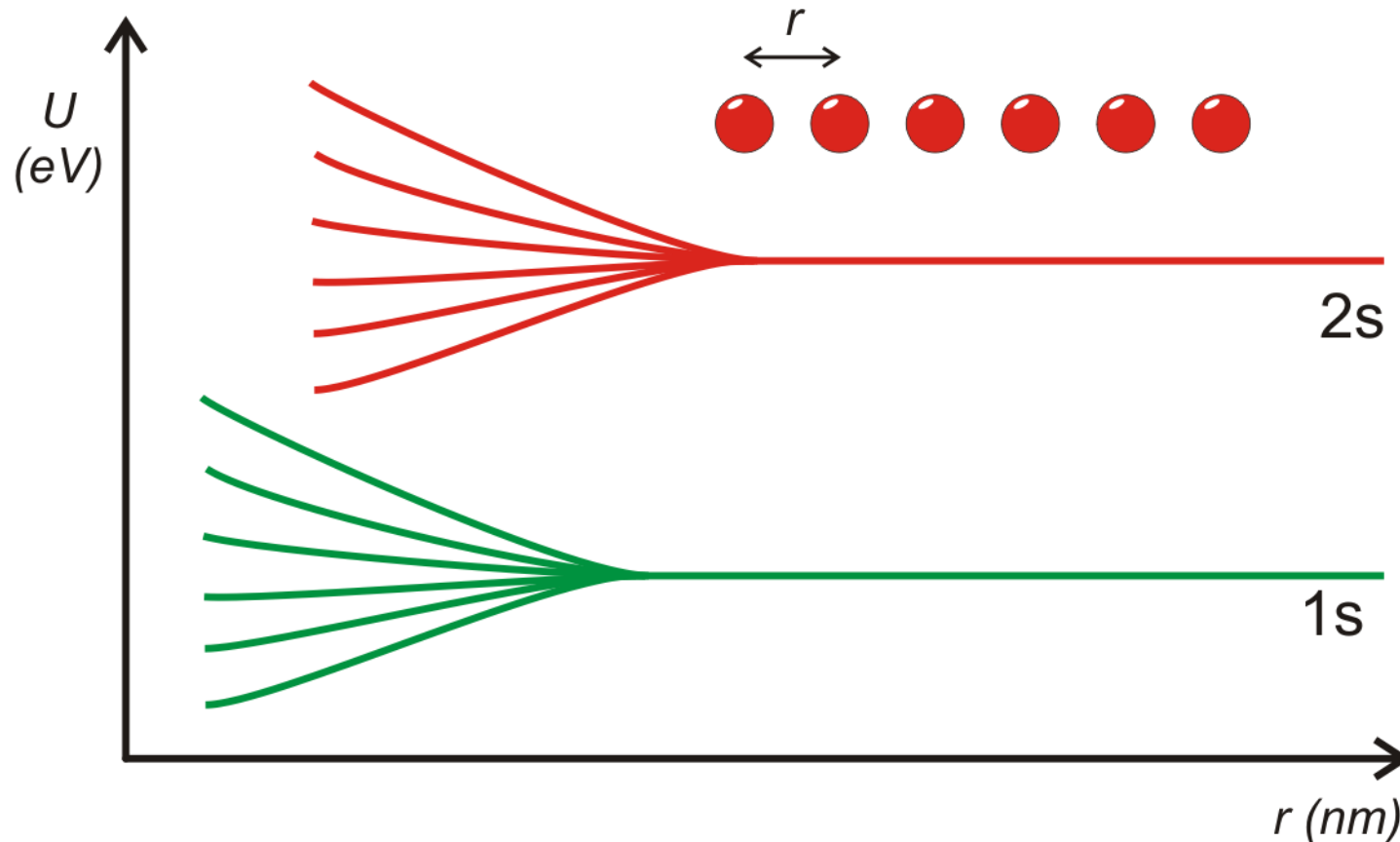
$\sigma \quad (Ohm \cdot m)^{-1}$

27 τάξεις μεγέθους !

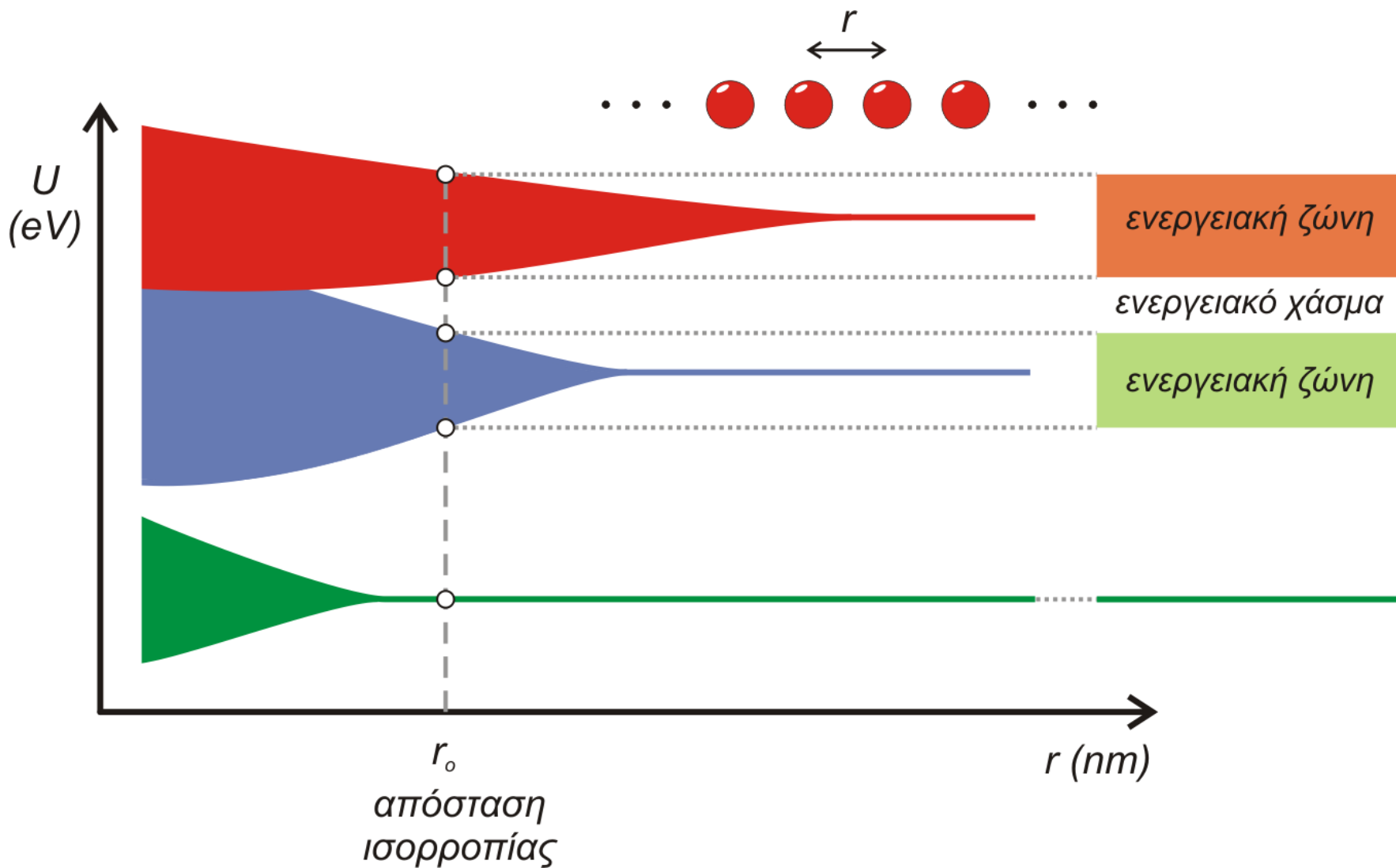
Ηλεκτρική αγωγιμότητα– ατομική κλίμακα



Ενεργειακό χάσμα



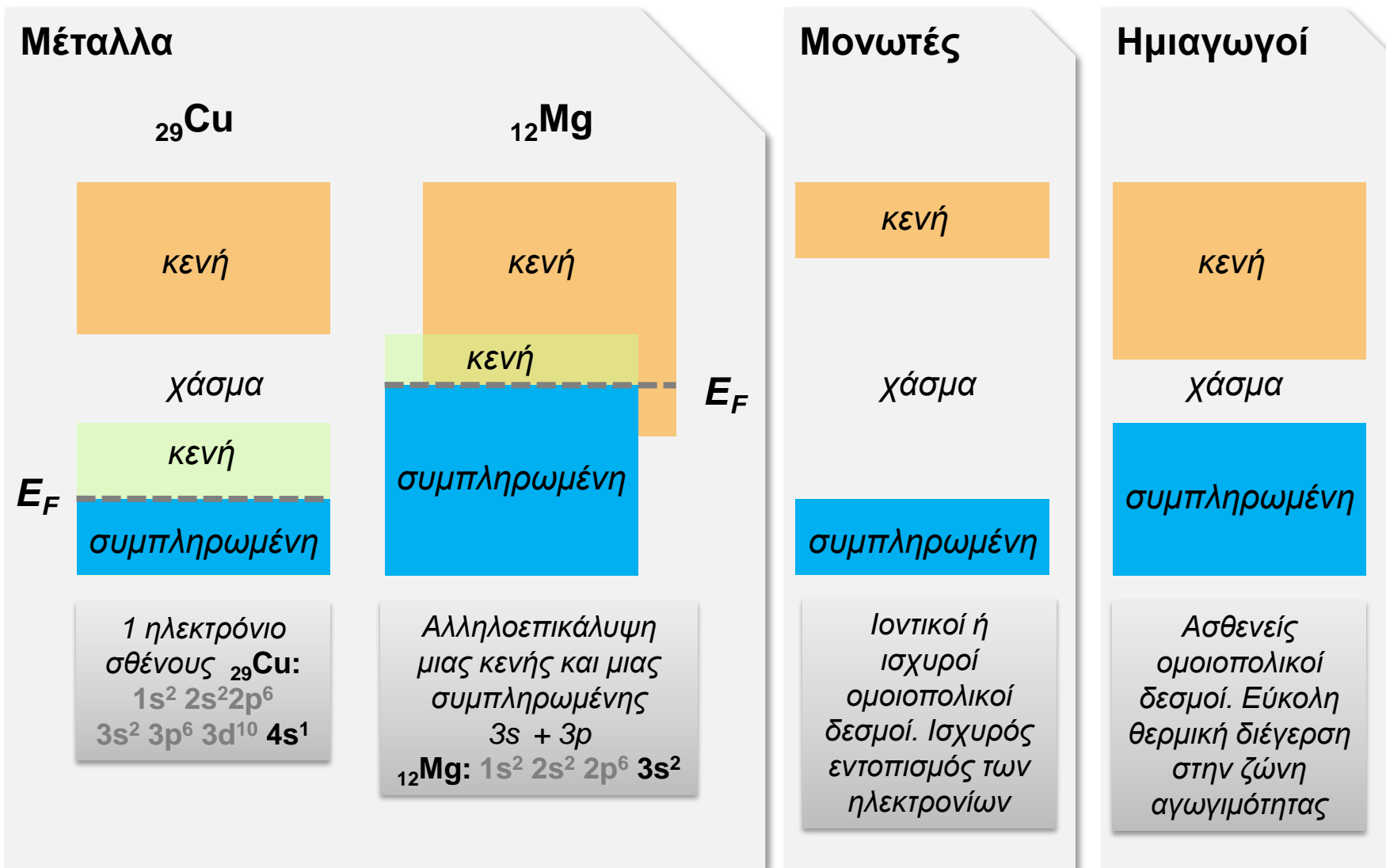
Σχηματικό διάγραμμα της ενέργειας ηλεκτρονίων ως συνάρτηση της απόστασης μεταξύ ατόμων για ένα συσσωμάτωμα 6 ατόμων



Σχηματικό διάγραμμα της ενέργειας ηλεκτρονίων ως συνάρτηση της απόστασης μεταξύ ατόμων για ένα στερεό

Ηλεκτρονικές δομές στερεών στους 0 °K

Ηλεκτρικές ιδιότητες



Ενέργεια Fermi

Κατανομή
Fermi-Dirac

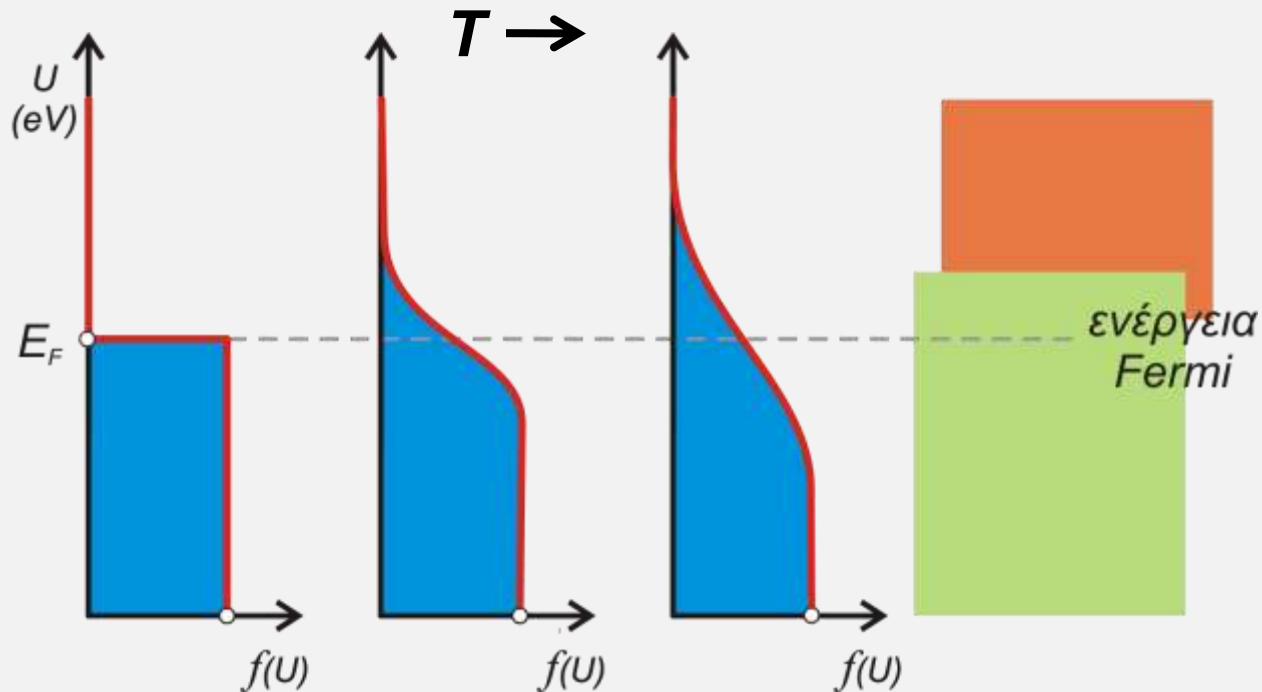
$$f(U) = \frac{1}{e^{\frac{U-E_F}{kT}} + 1}$$

$$kT \cong 0.026 \text{ eV}$$

$$(T = 300 \text{ }^\circ\text{K})$$

E_F : στα μέταλλα η υψηλότερη συμπληρωμένη κατάσταση στους $0 \text{ }^\circ\text{K}$

Μέταλλα



Ενέργεια Fermi

Κατανομή
Fermi-Dirac

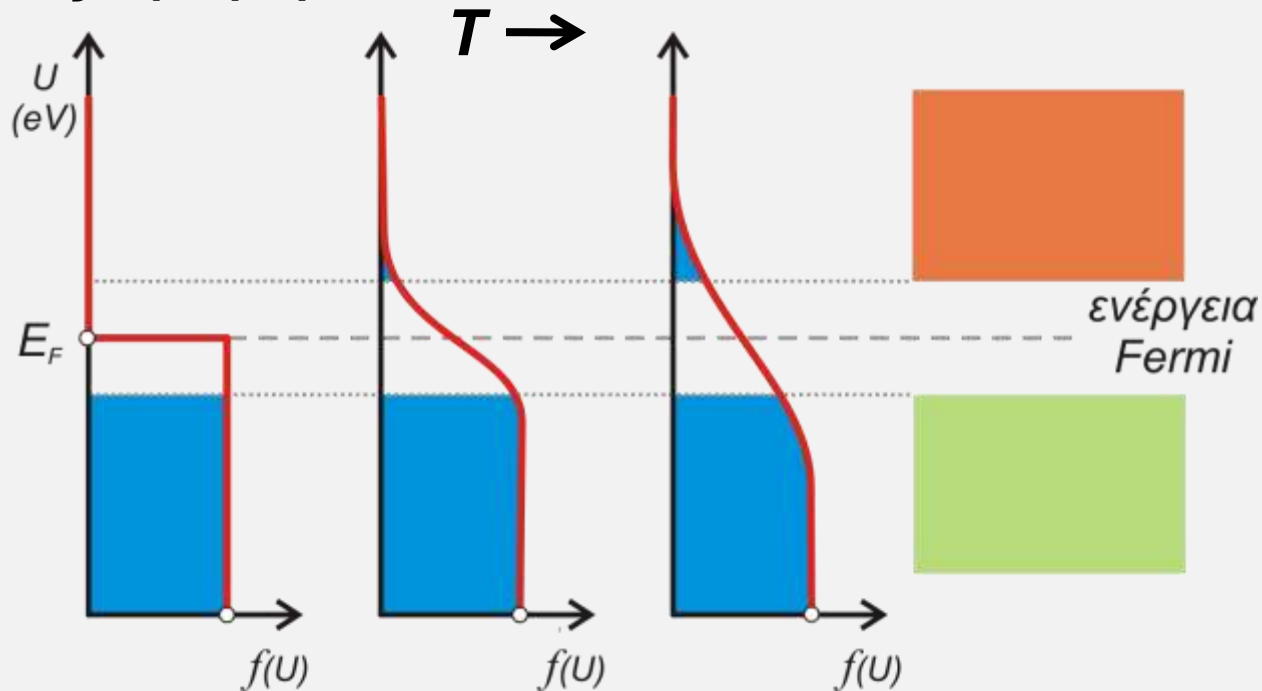
$$f(U) = \frac{1}{e^{\frac{U-E_F}{kT}} + 1}$$

$$kT \cong 0.026 \text{ eV}$$

$$(T = 300 \text{ }^\circ\text{K})$$

$U = E_F$: πιθανότητα κατάληψης 50%

Μονωτές, Ημιαγωγοί



Τυπικές τιμές ενέργειας Fermi

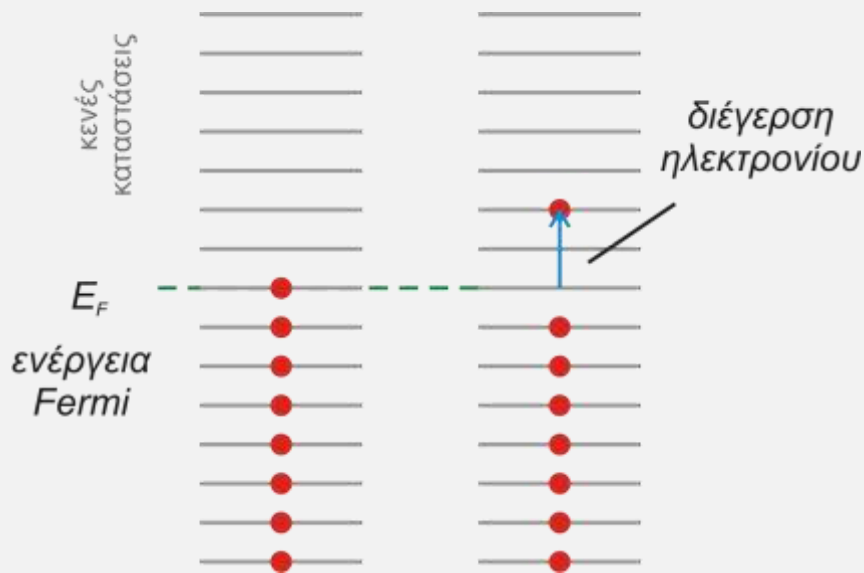
Στοιχείο	Ενέργεια Fermi E_F (eV)	Θερμοκρασία Fermi T_F (10^4 K)	Ταχύτητα Fermi v_F (nm/fs)
Cu	7.00	8.16	1.57
Ag	5.49	6.38	1.39
Al	11.7	13.6	2.03
Ga	10.4	12.1	1.92
In	8.63	10.0	1.74

Πηγή: *Wikipedia*

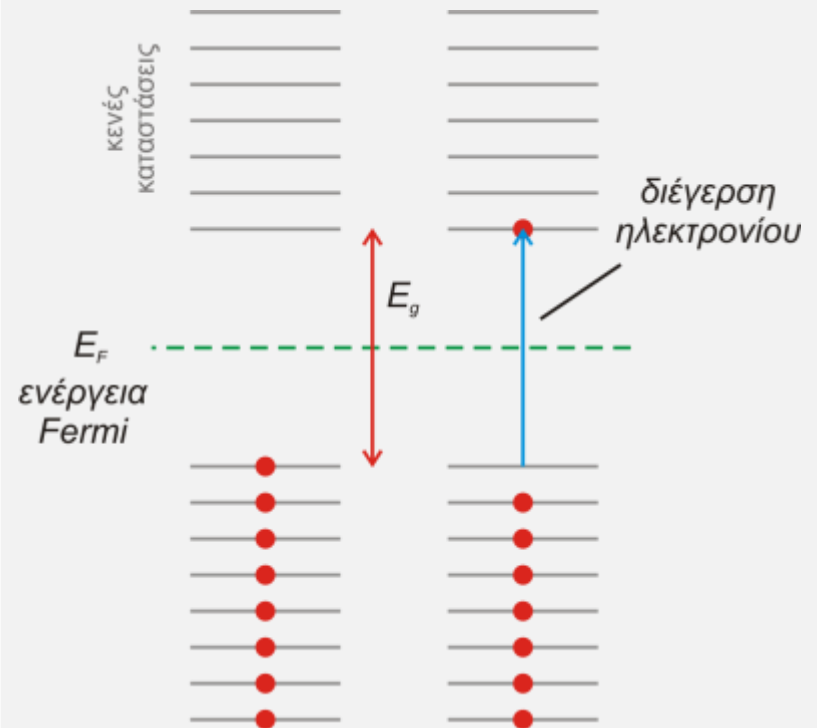
$$T_F \equiv \frac{E_F}{k}$$

$$v_F \equiv \sqrt{\frac{2E_F}{m_e}}$$

Μέταλλα

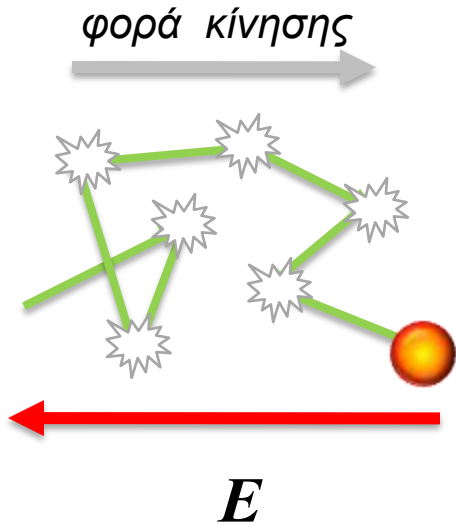


Μονωτές - Ημιαγωγοί



Μόνο ηλεκτρόνια με ενέργεια **μεγαλύτερη** της ενέργειας Fermi μπορούν να συμμετέχουν στην αγωγιμότητα

Ευκινήσια ηλεκτρονίων



Σκέδαση ηλεκτρονίων λόγω ατελειών στο κρυσταλλικό πλέγμα

Άτομα πρόσμιξης

Πλεγματικά κενά

Ένθετα άτομα

Διαταραχές

φωνόνια

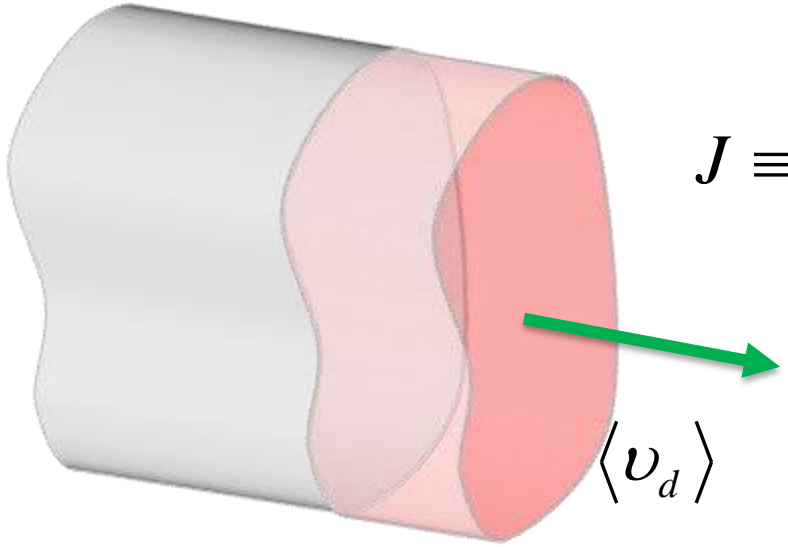
$$\langle v_d \rangle = \mu_e \cdot E$$

Ένταση ηλεκτρικού πεδίου
 $\text{Volt} \cdot \text{m}^{-1}$

μέση ταχύτητα μετατόπισης
 m s^{-1}

Ευκινήσια ηλεκτρονίων
 $\text{m}^2 \text{Volt}^{-1} \text{s}^{-1}$

Απώλεια κινητικής ενέργειας



$$J \equiv \frac{\text{φορτίο} / \text{χρονος}}{\text{επιφάνεια}} = \sigma E = |e| n \langle v_d \rangle$$

$$\langle v_d \rangle = \mu_e E$$

$$\sigma = n \mu_e |e|$$

Ειδική ηλεκτρική
αγωγιμότητα
 $(\text{Ohm} \cdot \text{m})^{-1}$

Πυκνότητα
ηλεκτρονίων
 m^{-3}

Ευκινησία
ηλεκτρονίων
 $\text{m}^2 \text{Volt}^{-1} \text{s}^{-1}$

Φορτίο
ηλεκτρονίου
 C

Ειδική αντίσταση μετάλλων

Κανόνας Matthiessen

Συνολική
ειδική
αντίσταση

$$\rho_{tot} = \rho_t + \rho_i + \rho_d$$

Θερμική
συνεισφορά

Συνεισφορά
προσμίξεων

Συνεισφορά
παραμόρφωσης

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Επίδραση
θερμοκρασίας

$$\rho_t = \rho_o + \alpha T$$

σταθερές

Επίδραση
συγκέντρωσης
προσμίξεων

$$\rho_i = A + c_i(1 - c_i)$$

σταθερά

Συγκέντρωση σε
κλάσμα ατόμων

Επίδραση
πλαστικής
παραμόρφωσης

Αύξηση της
ειδικής αντίστασης

$$\rho_i = \rho_a V_a + \rho_b V_b$$

Ογκομετρικά
κλάσματα

Ημιαγωγοί (ενεργειακό χάσμα < 2eV)

Ενδογενείς (Intrinsic)

Καθαρά υλικά (IVA ομάδα)

Si: **1.11 eV** Ge: **0.67 eV**

Ενώσεις III-V (IIIA, VA)

GaAs: **1.42 eV** GaP: **2.25 eV**

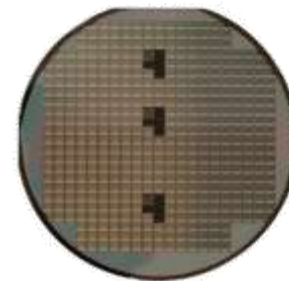
InSb: **0.17 eV**

Ενώσεις II-VI (IIA, VIA)

CdS: **2.40 eV** ZnTe: **2.26 eV**

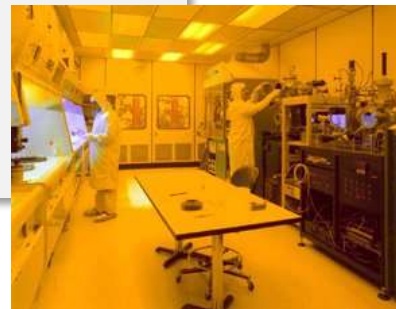
Μονοκρύσταλλος Πυριτίου

Massimiliano Lincetto / Wikimedia Commons, CC-BY-SA-3.0



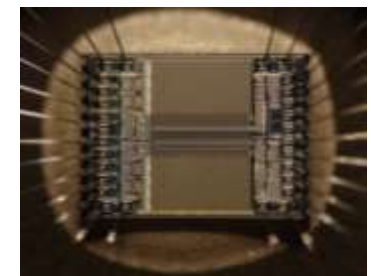
Silicon Wafer

/ Wikimedia Commons/ Public Domain



Clean room

© User: Duk/ Wikimedia Commons/Public Domain

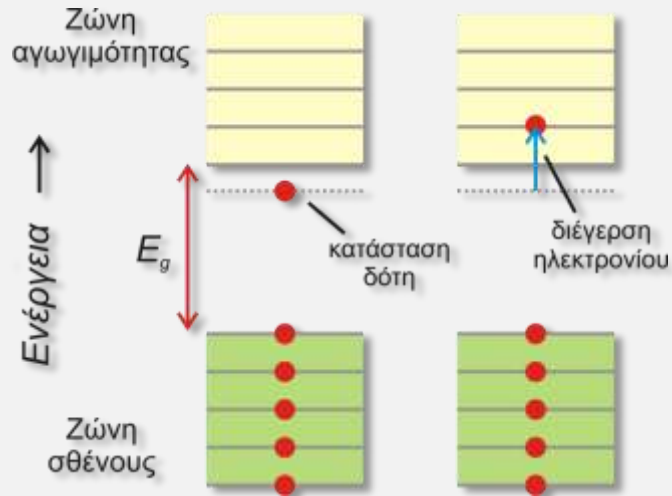
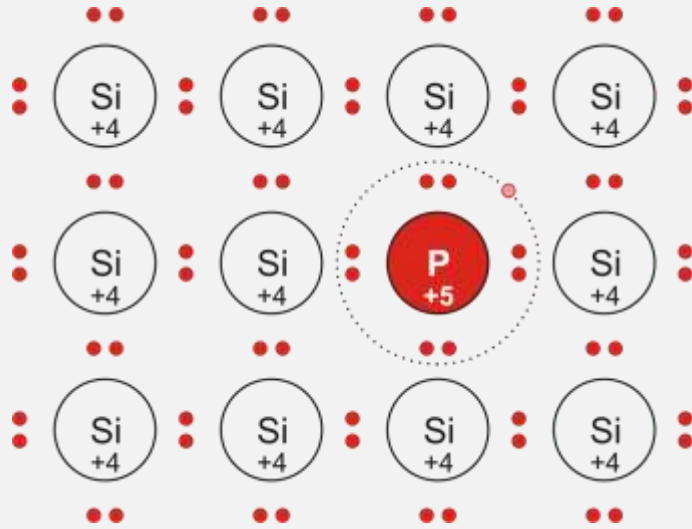


Μνήμη EPROM

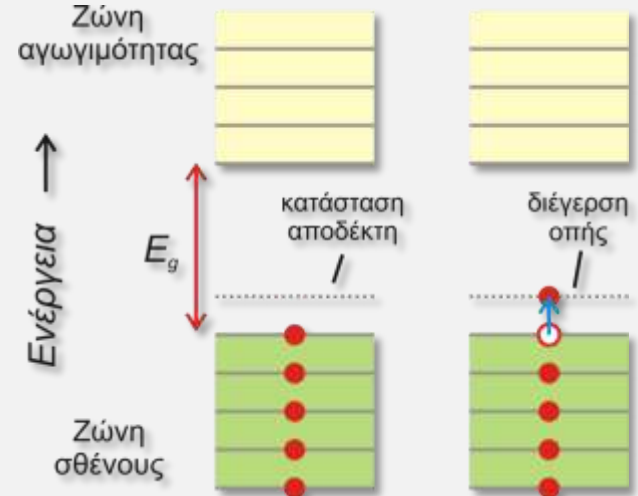
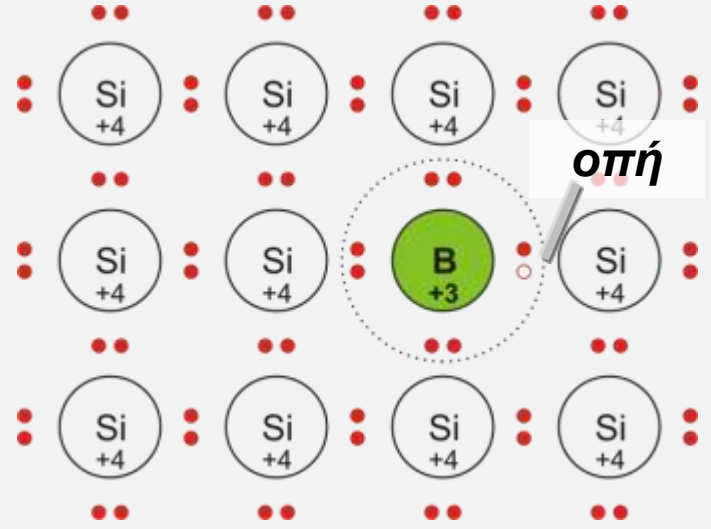
© User: Zephyris / Wikimedia Commons, CC-BY-SA-3.0

Εξωγενείς (Extrinsic) Ημιαγωγοί

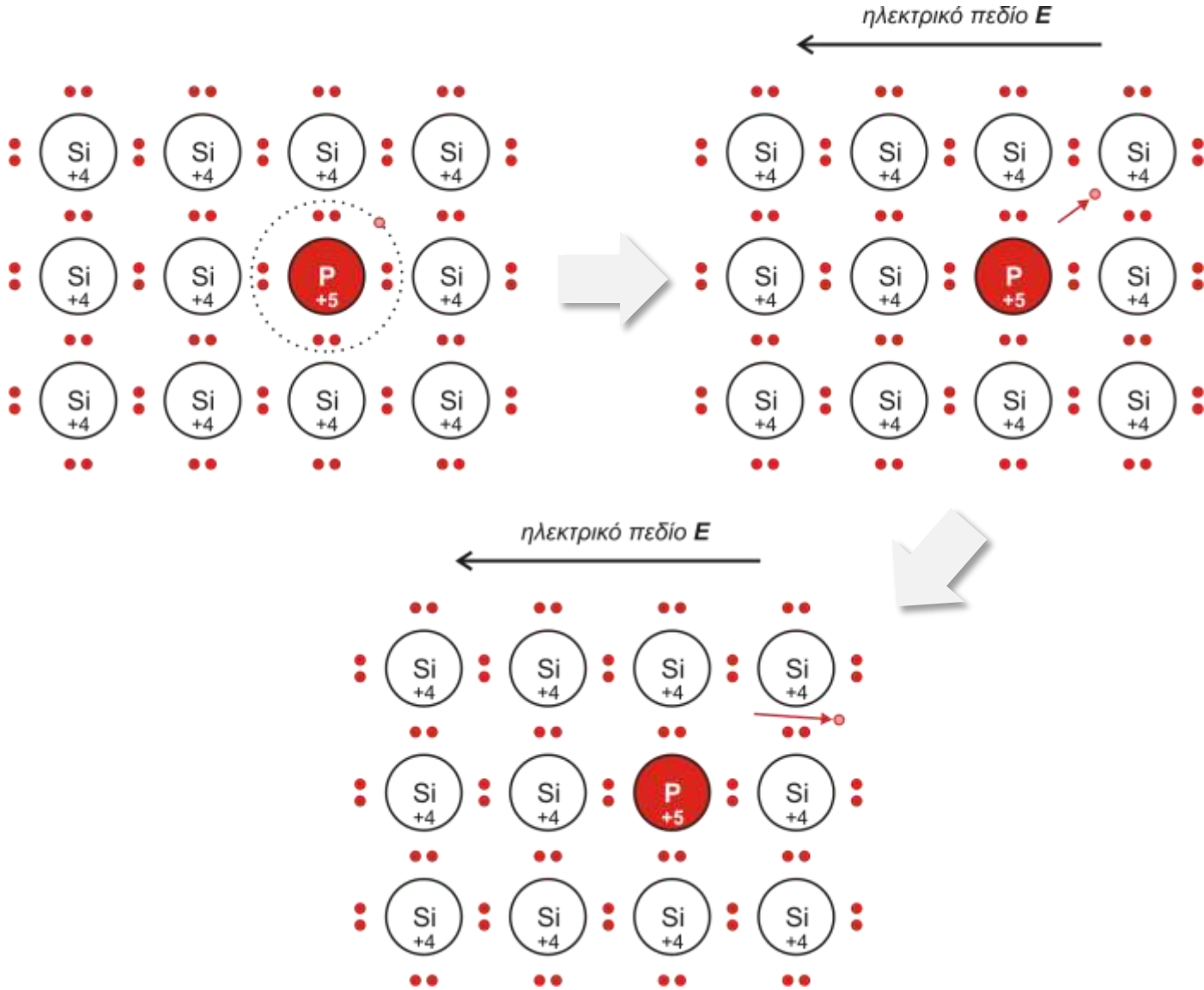
Προσμίξεις τύπου n



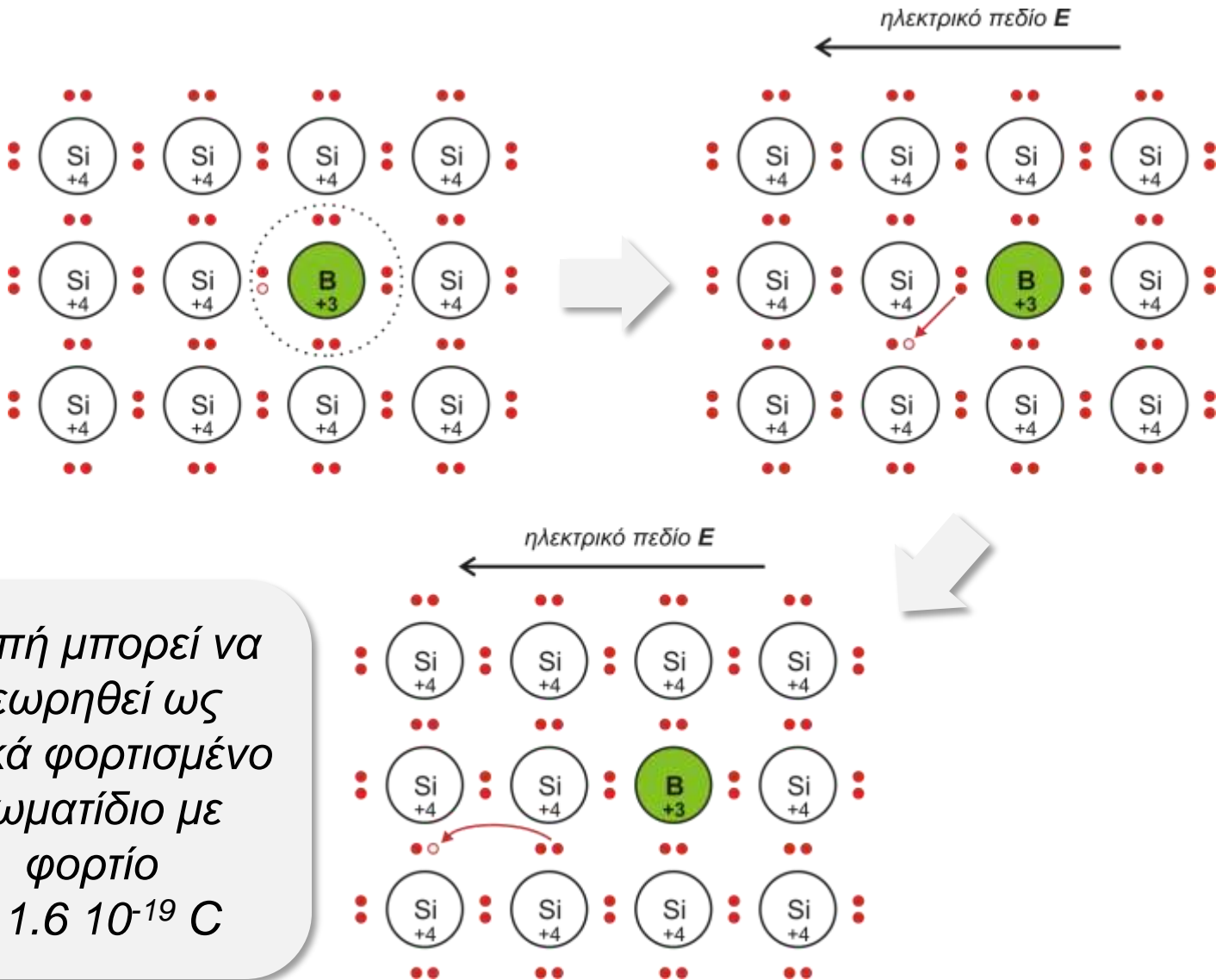
Προσμίξεις τύπου p



Ηλεκτρική αγωγή σε ημιαγωγούς με προσμίξεις τύπου n



Ηλεκτρική αγωγή σε ημιαγωγούς με προσμίξεις τύπου p



Η οπή μπορεί να θεωρηθεί ως θετικά φορτισμένο σωματίδιο με φορτίο $+ 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Ηλεκτρική αγωγιμότητα

ηλεκτρόνια

οπές

Ενδογενείς

$$\sigma = n|e|\mu_e + p|e|\mu_h$$

$$\mu_h < \mu_e, n = p$$

$$\sigma = n|e|(\mu_e + \mu_h)$$

$$\mu_h < \mu_e$$

Εξωγενείς

Τύπου n (P, As, Sb) (VA)

$$n \gg p$$

$$\sigma \cong n|e|\mu_e$$

Τύπου p (B, Ga, Al) (III A)

$$n \ll p$$

$$\sigma \cong p|e|\mu_h$$

Επίδραση της θερμοκρασίας

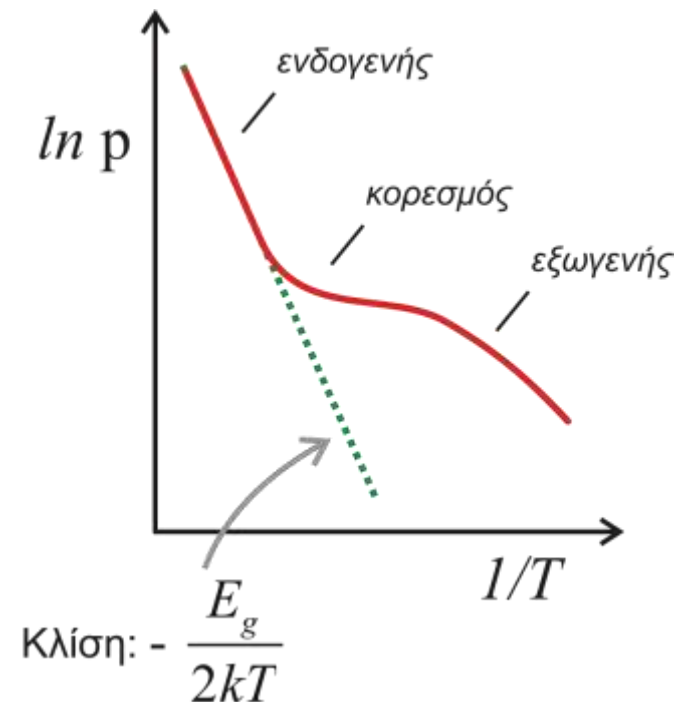
Ενδογενείς

Ισχυρή αύξηση n, p με την αύξηση της θερμοκρασίας

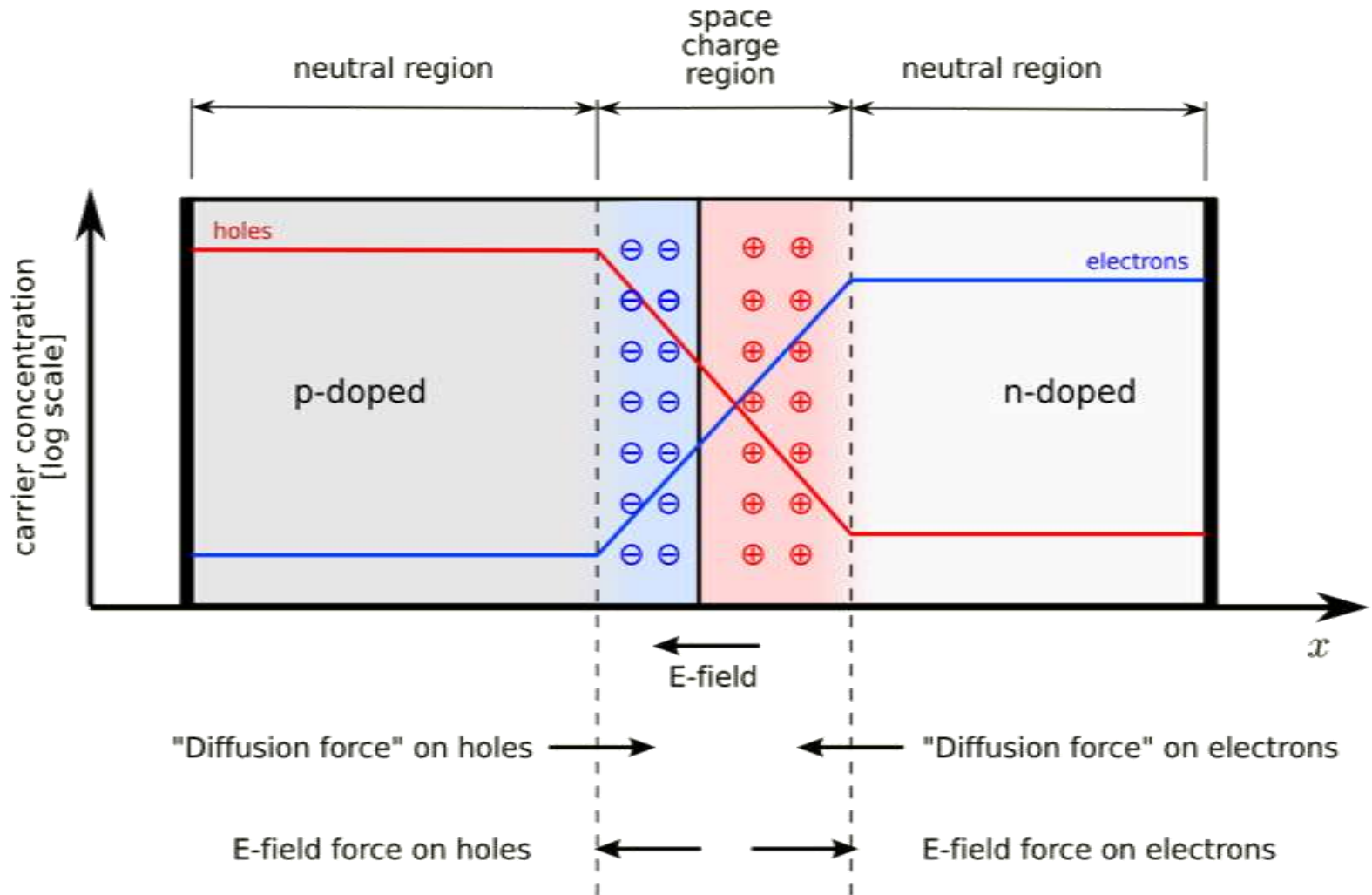
Ασθενής μείωση μ_e, μ_h με την αύξηση της θερμοκρασίας

$$\ln \sigma \cong C - \frac{E_g}{2kT} \Rightarrow$$

$$\ln n \cong \ln p \cong C' - \frac{E_g}{2kT}$$



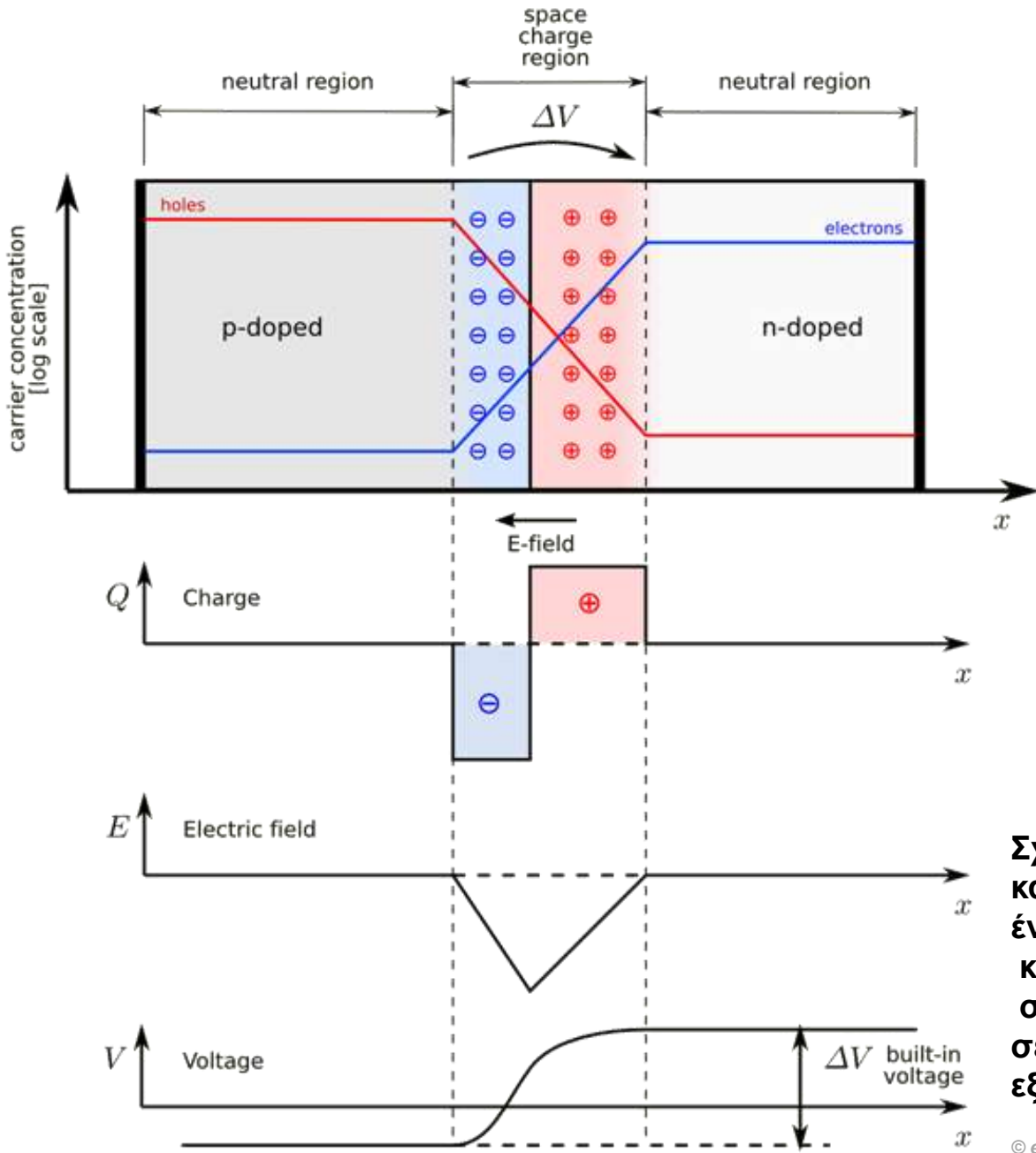
Επαφή p-n



Σχηματική απεικόνιση μιας επαφής p-n

© en:User:TheNoise/ Wikimedia Commons, CC-BY-SA-3.0

Ηλεκτρικές ιδιότητες



Σχηματική απεικόνιση κατανομών φορτίου (Q), έντασης ηλεκτρικού πεδίου (E), και διαφοράς δυναμικού (V) σε μια επαφή p-n που βρίσκεται σε θερμική ισορροπία με μηδενική εξωτερική τάση

© en:User:TheNoise/ Wikimedia Commons, CC-BY-SA-3.0

Ηλεκτρική Δίοδος

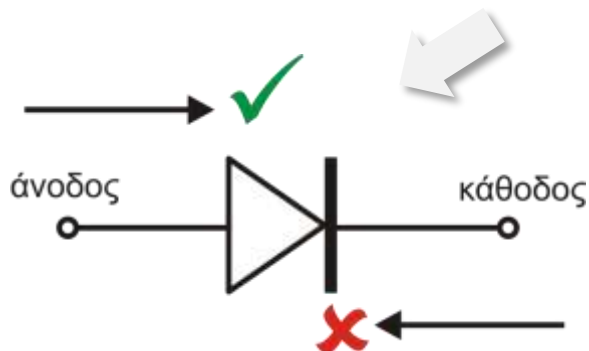
Ηλεκτρικό στοιχείο που επιτρέπει την διέλευση ρεύματος μόνο σε μια διεύθυνση



Τυπική κατασκευή p-n διόδου



γραφική απεικόνιση p-n διόδου σε ηλεκτρικό κύκλωμα



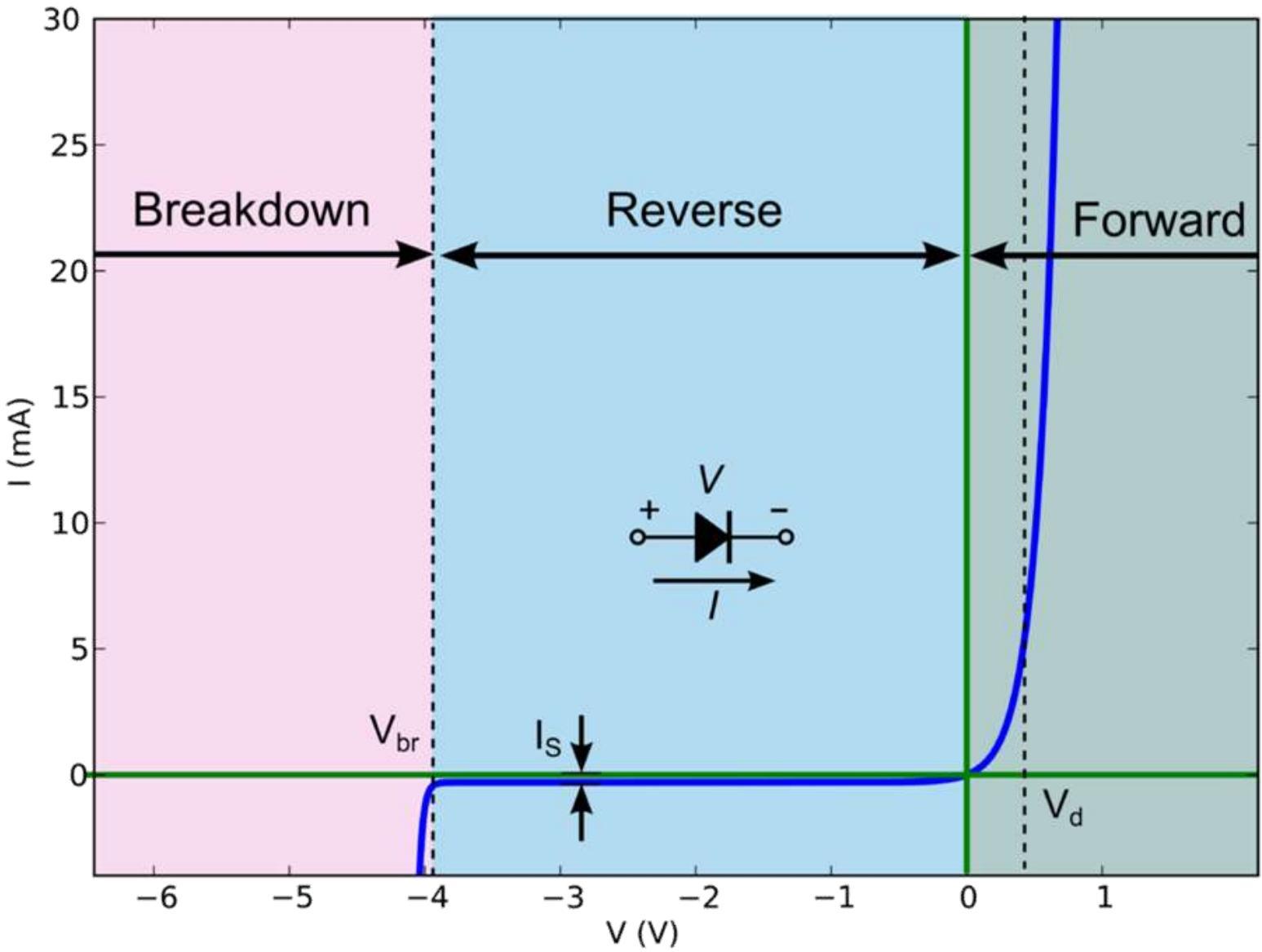
άνοδος



Λεπτομέρεια από το εσωτερικό διόδου

© User:Morcheeba / Wikimedia Commons, CC-BY-SA-2.5

Ηλεκτρικές ιδιότητες



Τυπική καμπύλη τάσης-ρεύματος για μια ηλεκτρική δίοδο
© User:Hldsc / Wikimedia Commons, CC-BY-SA-2.5

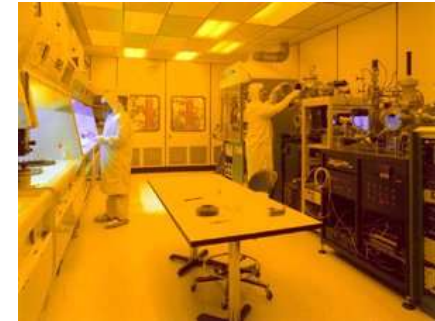
Η επιστήμη και τεχνολογία κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

Εναπόθεση
(*Deposition*)

Αφαίρεση
(*Removal*)

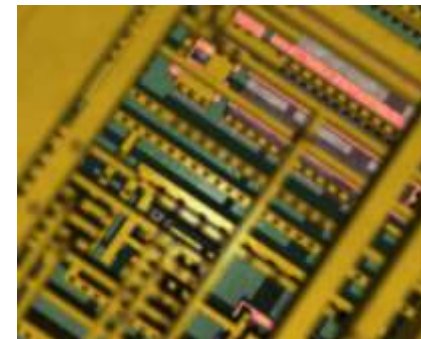
Λιθογραφία
(*Lithography*)

Τροποποίηση ηλεκτρικών
ιδιοτήτων
(*Modification of electrical
properties*)



Clean room

© User: Duk / Wikimedia Commons/Public Domain



Ολοκληρωμένο κύκλωμα
(ψευδοχρωματική απεικόνιση)

© David Carron / Wikimedia Commons,
CC-BY-SA-3.0

Εναπόθεση (Deposition)

(PVD)

*physical vapour
deposition*



PVD
(ceramic powder introduced into the plasma flame, which vaporizes it and then condenses it to form the ceramic coating.)

NASA/Wikimedia Commons/Public Domain

(CVD)

*chemical vapour
deposition*

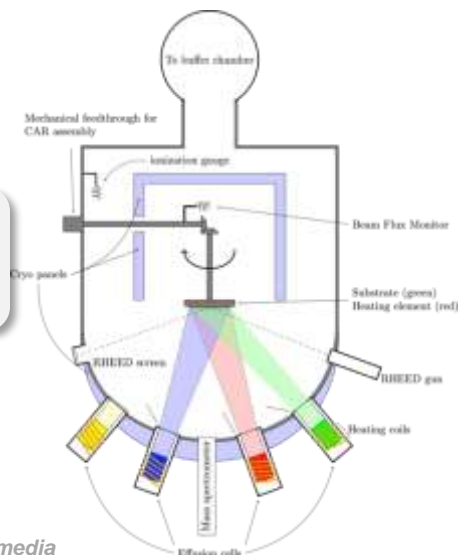


CVD
(DC plasma (violet), A heating element (red) provides the necessary substrate temperature.)

*User:Polyparadigm
/Wikimedia Commons/Public Domain*

(MBE)

*molecular beam
epitaxy*



MBE

*User:Vegar Ottesen / Wikimedia
Commons, CC-BY-SA-3.0*

(ECD)

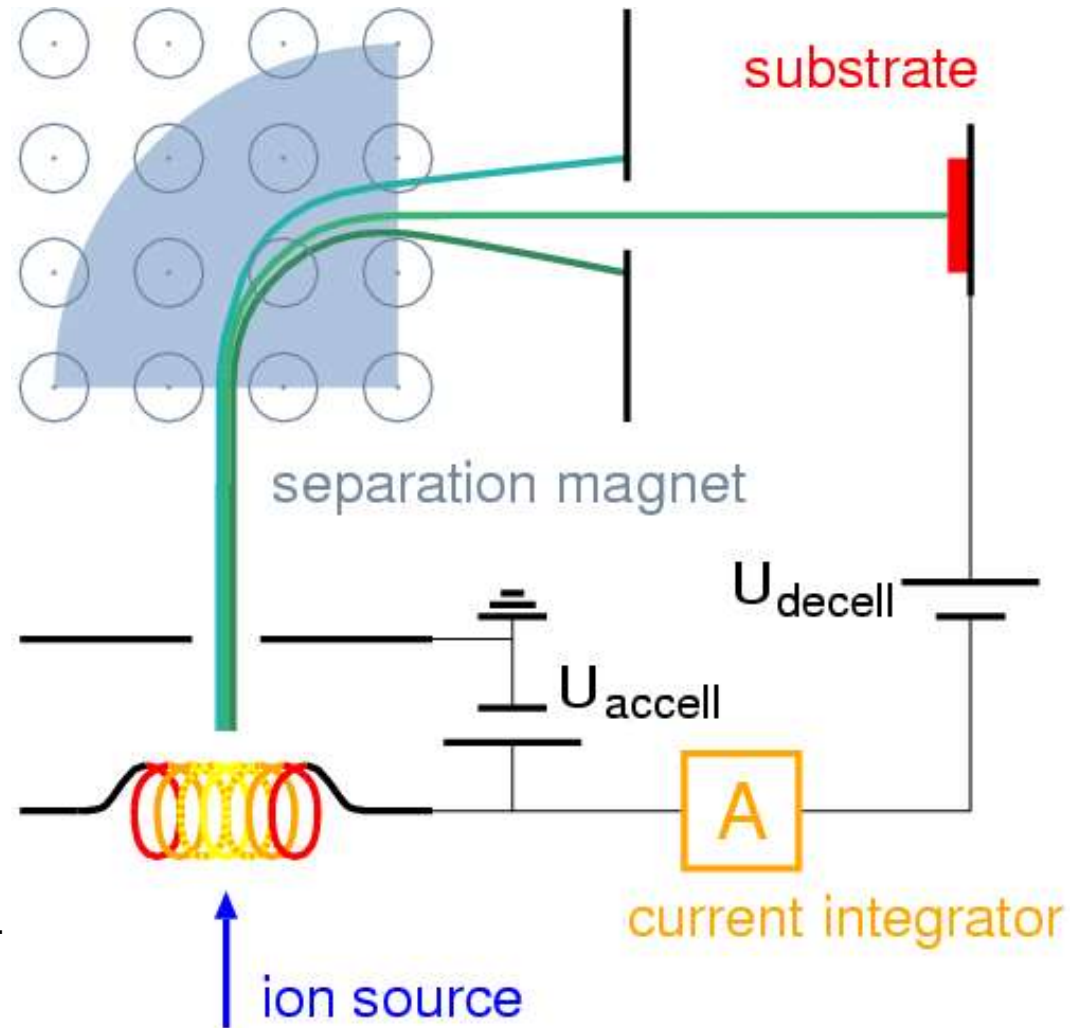
*electrochemical
deposition*

(ADL)

*Atomic layer
deposition*

Τροποποίηση ηλεκτρικών ιδιοτήτων (*Modification of electrical properties*)

**Εμφύτευση
Ιόντων
(*ion implantation*)**



Σχηματική απεικόνιση διάταξης εμφύτευσης-εναπόθεσης ιόντων με διαχωριστή μάζας

User: Dschwen/Wikimedia Commons, CC-BY-SA-3.0

Αφαίρεση (Removal)

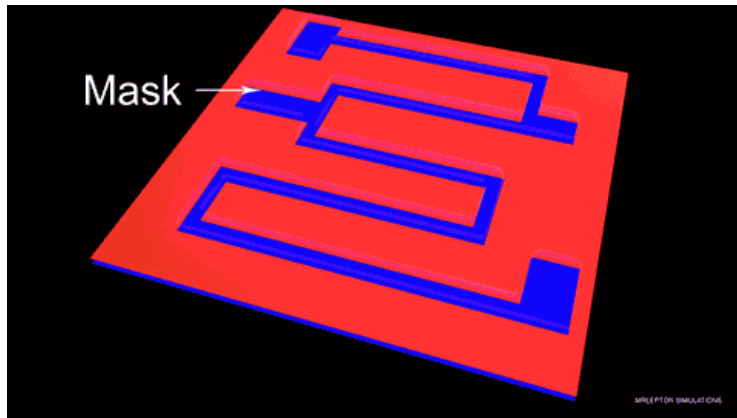
etching

wet

Χρήση υγρών
διαλυτών

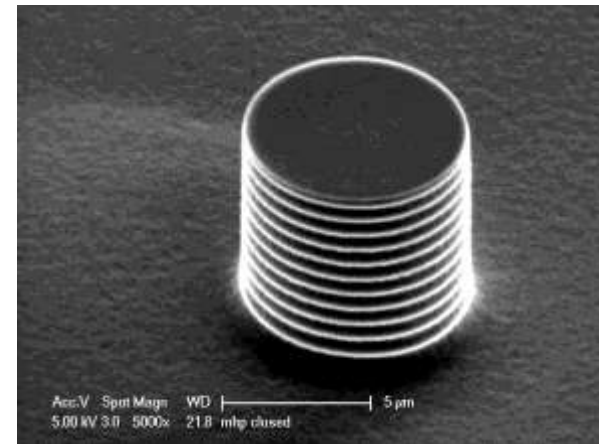
dry

Χρήση πλάσματος



Σχηματική απεικόνιση αφαίρεσης με wet etching

User:Mrneutrino / Wikimedia Commons, CC-BY-SA-3.0

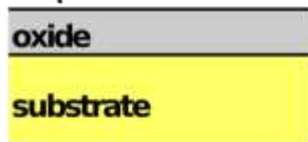


Εικόνα SEM από ion etching (Si pillar)

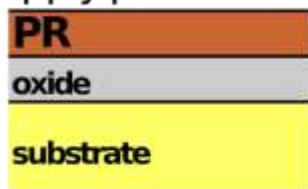
User:Pgalajda / Wikimedia Commons, CC-BY-SA-3.0

Λιθογραφία (Lithography)

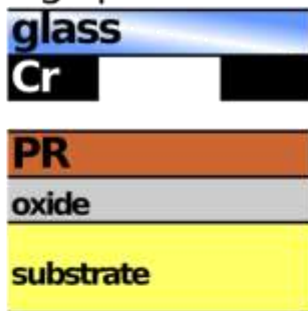
a. Prepare wafer



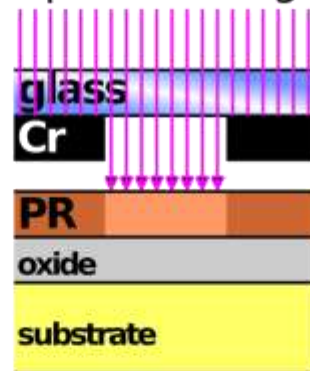
b. Apply photoresist



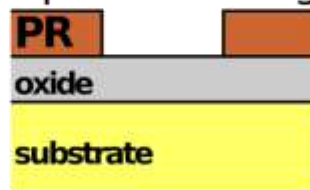
c. Align photomask



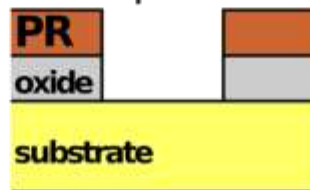
d. Expose to UV light



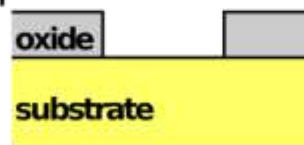
e. Develop and
remove photoresist
exposed to UV light



f. Etch exposed oxide



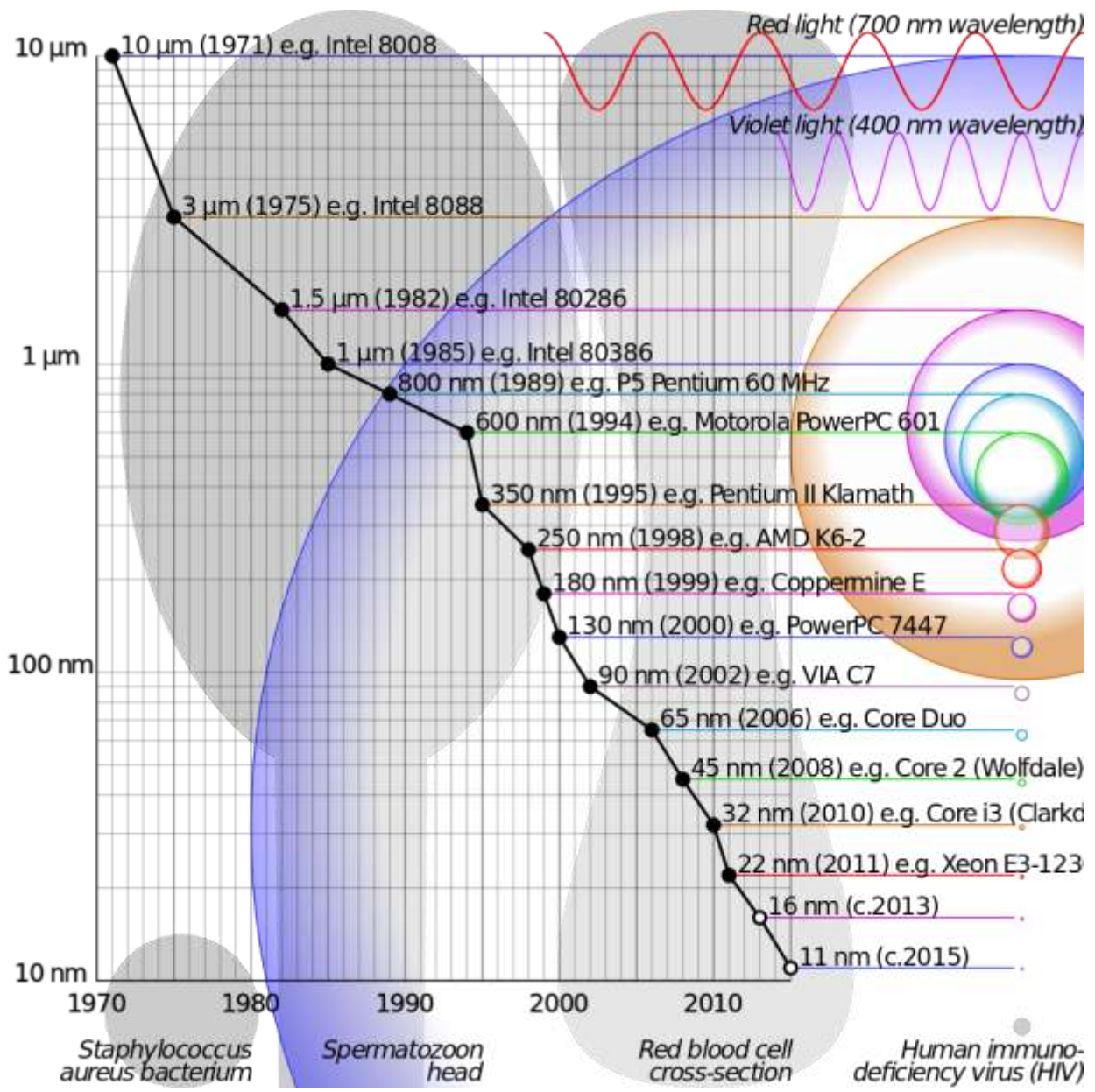
g. Remove remaining
photoresist



Σχηματική
απεικόνιση
φωτολιθογραφικής
διαδικασίας για
κατασκευή
ολοκληρωμένου
κυκλώματος

User: Cmglee/ Wikimedia
Commons, CC-BY-SA-3.0

Ηλεκτρικές ιδιότητες



Γραφική απεικόνιση της εξέλιξης στην μείωση των διαστάσεων στην Μικροηλεκτρονική

© User: Cmglee/ Wikimedia Commons, CC-BY-SA-3.0

Ιοντικά κεραμικά

Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Ηλεκτρονιακή

Ιοντική

$$\sigma_{tot} = \sigma_{el} + \sigma_{ionic}$$

σθένος

Συντ.
διάχυσης

$$\mu_i = \frac{s_i |e| D_i}{kT}$$

Τυπικές ηλεκτρικές ιδιότητες

Υλικό	Ειδική αντίσταση ρ ($m \cdot \Omega$)	Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα σ $1/(m \cdot \Omega)$
Άνθρακας (άμορφος)	$(5 \sim 8) \cdot 10^{-4}$	$(1.25 \sim 2) \cdot 10^3$
Γραφίτης	$(2.5 \sim 5) \cdot 10^{-6}$	$(2 \sim 3) \cdot 10^5$
Διαμάντι	$\sim 10^{12}$	$\sim 10^{-13}$
Κοινό Γυαλί	$(0.1 \sim 1000) \cdot 10^{12}$	$(0.001 \sim 10) \cdot 10^{-12}$
Εβονίτης	$> 10^{13}$	$\sim 10^{-14}$
Teflon	$> 10^{16}$	$< 10^{-16}$
PET	$\sim 10^{14}$	$\sim 10^{-14}$

Πηγή: *Wikipedia*

Πολυμερή

Τυπικά τα πολυμερή έχουν **χαμηλή** ηλεκτρική αγωγιμότητα



Δοκιμαστικό κατσαβίδι

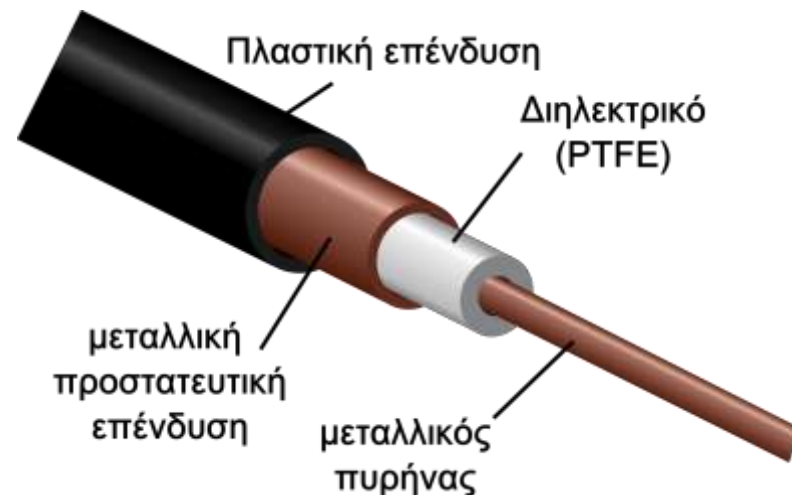
© User:Haragayato/Wikimedia Commons, CC-BY-SA-3.0

$$\sigma_{teflon} \approx 10^{-17} (\Omega \cdot m)^{-1}$$



Μονωτικές ταινίες

© User:DMGualtieri/Wikimedia Commons, CC-BY-SA-3.0

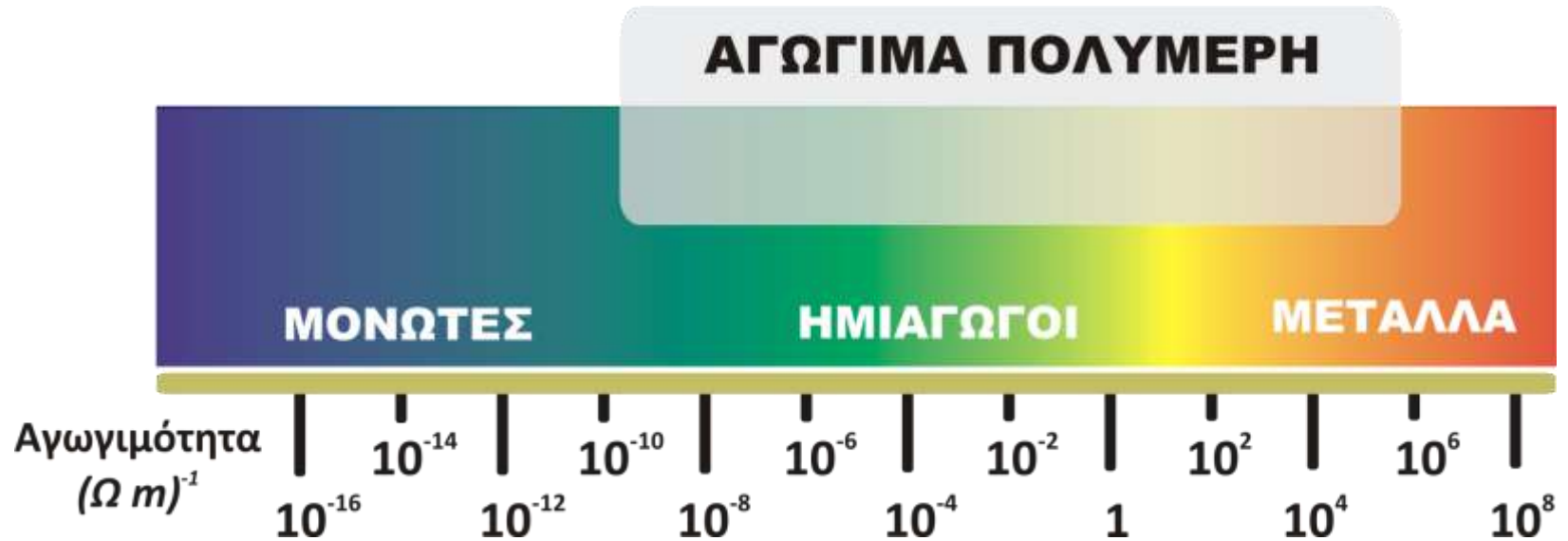


Σχηματική απεικόνιση τομής ηλεκτρικού καλωδίου

© User:Tkgd2007/Wikimedia Commons, CC-BY-SA-3.0

Αγώγιμα πολυμερή !

$$\sigma \approx 1.5 \cdot 10^7 (\Omega \cdot m)^{-1}$$



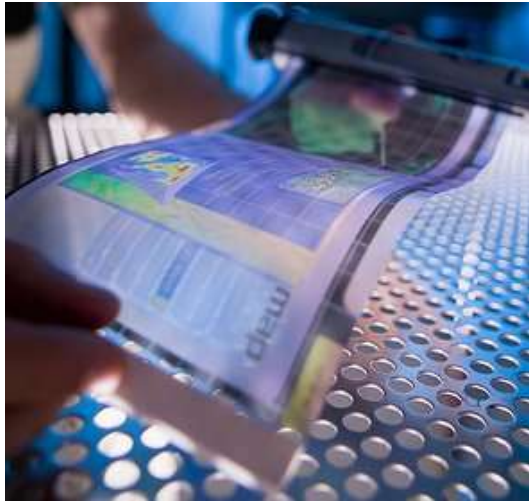
The Nobel Prize in Chemistry 2000

was awarded jointly to :

Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid and Hideki Shirakawa
"for the discovery and development of conductive polymers".

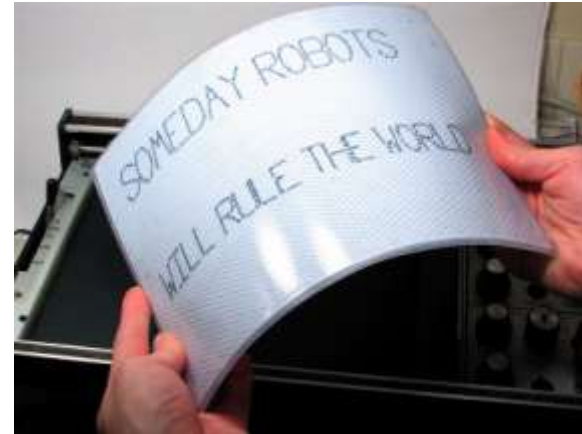
Περισσότερες Πληροφορίες: (<http://www.nobelprize.org>)

Αγωγή πολυμερή: Εφαρμογές



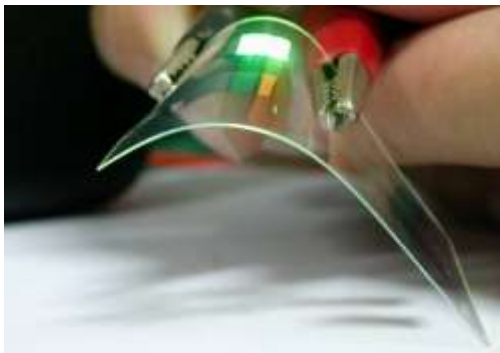
Flexible display

© User:RDECOM/Wikimedia Commons, CC-BY-SA-1.0



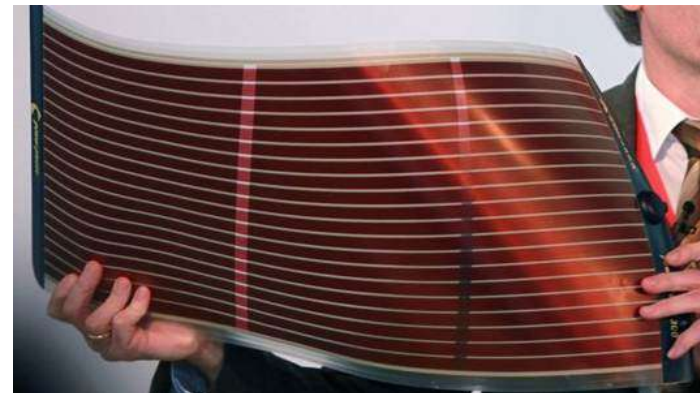
Flexible display (e-paper)

© Windell Oskay /Wikimedia Commons, CC-BY-SA-2.0



Flexible organic LED (OLED)

© User:meharris/Wikimedia Commons, CC-BY-SA-3.0



Flexible organic solar cell

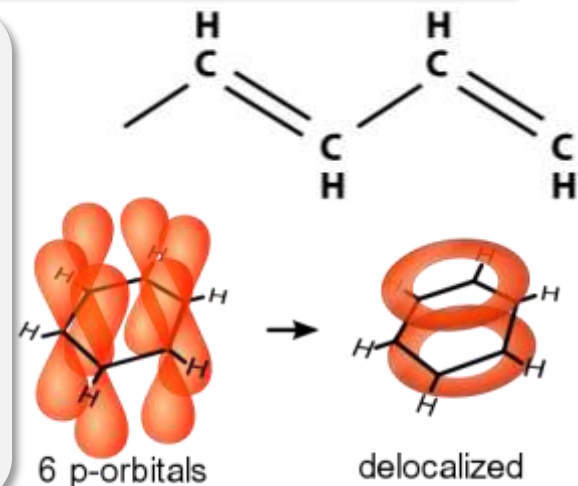
© Armin Kübelbeck/Wikimedia Commons, CC-BY-SA-3.0

Πως λειτουργούν;

συζευγμένοι διπλοί δεσμοί (conjugated double bonds)

Στους συζευγμένους δεσμούς, οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων του άνθρακα είναι εναλλάξ απλοί και διπλοί.

Κάθε διπλός δεσμός περιέχει ένα ισχυρά «εντοπισμένο» σ τροχιακό που σχηματίζει ένα ισχυρό δεσμό καθώς και ένα ασθενέστερα «εντοπισμένο» π τροχιακό.

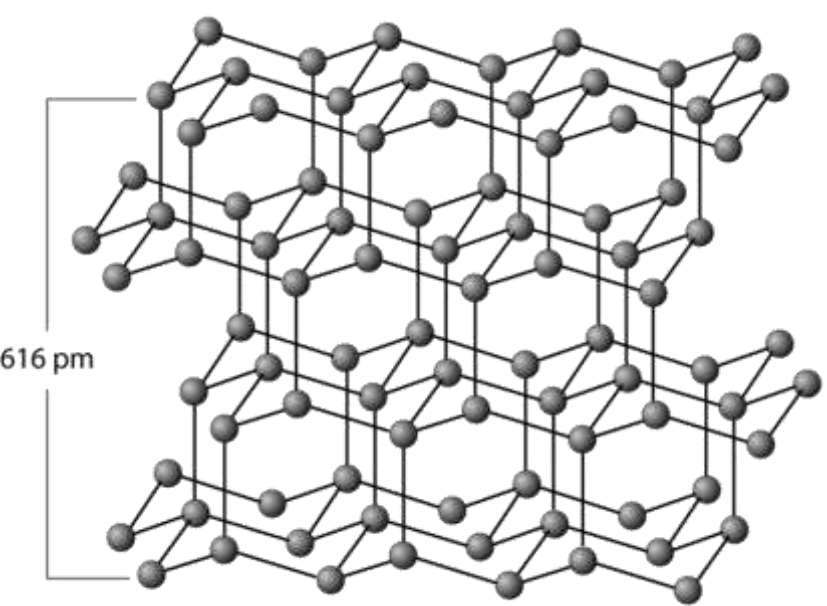


Υβριδισμός τροχιακών στους δακτυλίους του βενζολίου

© User:Vladsinger/Wikimedia Commons, CC-BY-SA-3.0

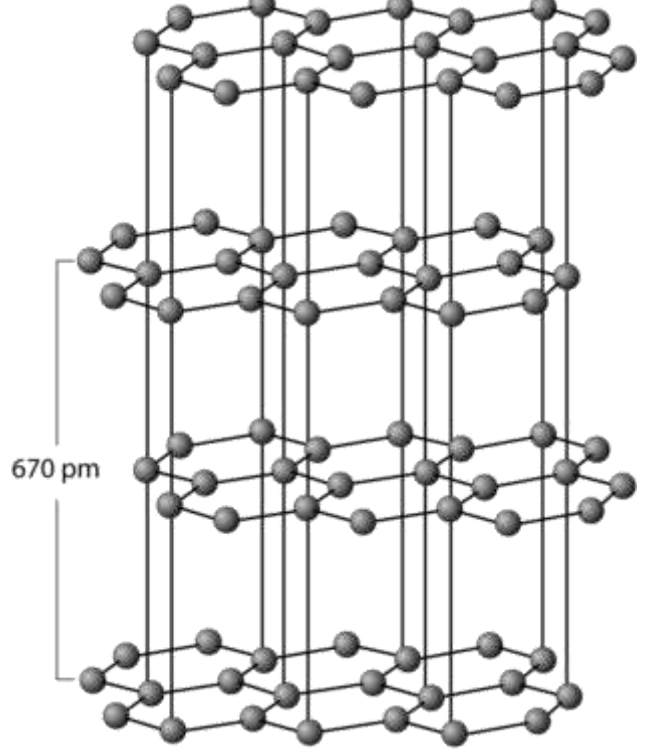
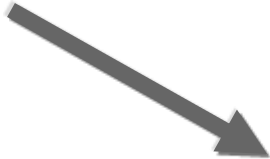
Προσμίξεις

Φορείς φορτίου (ηλεκτρόνια ή οπές) πρέπει να προστεθούν στο υλικό. Η ύπαρξη τους επιτρέπει την μεταφορά φορτίου στην μοριακή αλυσίδα



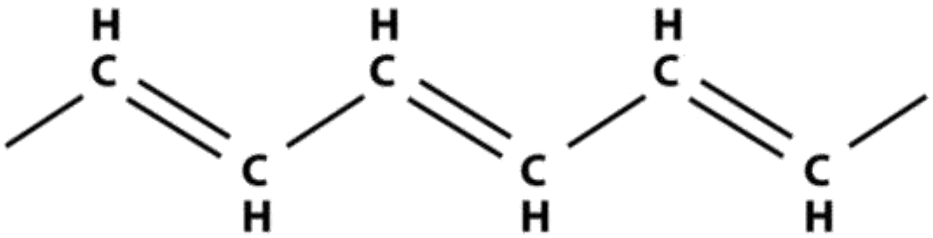
Δομή Διαμαντιού

σ τροχιακά



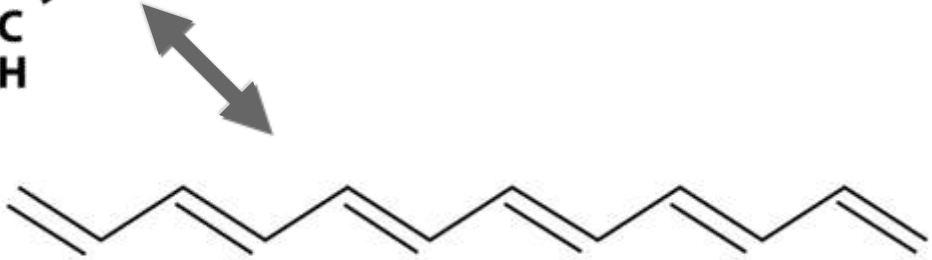
Δομή Γραφίτη

**σ + π
τροχιακά**



Πολυακετυλένιο

**σ + π
τροχιακά**



Τέλος Ενότητας



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

