

Ημιαγωγοί

Si (Πυρίτιο)

PubChem

1 H Hydrogen 1s ¹
--

Atomic Number

Symbol

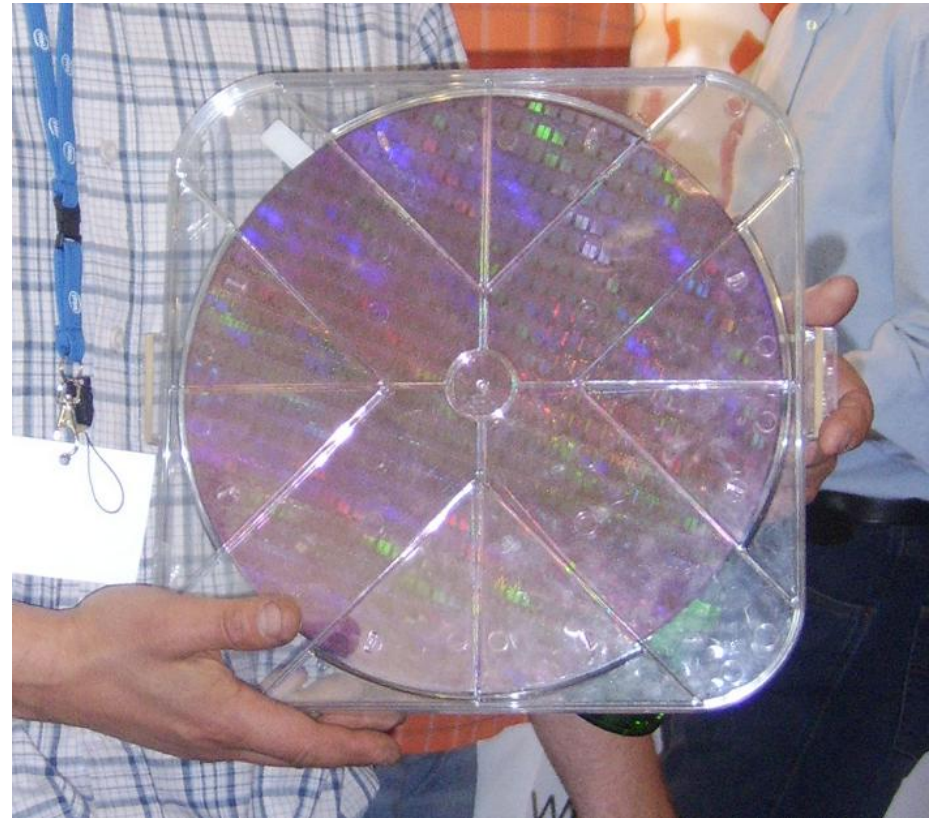
Name

Electron Configuration

3 Li Lithium [He]2s ¹	4 Be Beryllium [He]2s ²																	5 B Boron [He]2s ² 2p ¹	6 C Carbon [He]2s ² 2p ²	7 N Nitrogen [He]2s ² 2p ³											
11 Na Sodium [Ne]3s ¹	12 Mg Magnesium [Ne]3s ²																	13 Al Aluminum [Ne]3s ² 3p ¹	14 Si Silicon [Ne]3s ² 3p ²	15 P Phosphorus [Ne]3s ² 3p ³											
19 K Potassium [Ar]4s ¹	20 Ca Calcium [Ar]4s ²	21 Sc Scandium [Ar]3d ¹ 4s ²	22 Ti Titanium [Ar]3d ² 4s ²	23 V Vanadium [Ar]3d ³ 4s ²	24 Cr Chromium [Ar]3d ⁵ 4s ¹	25 Mn Manganese [Ar]3d ⁵ 4s ²	26 Fe Iron [Ar]3d ⁶ 4s ²	27 Co Cobalt [Ar]3d ⁷ 4s ²	28 Ni Nickel [Ar]3d ⁸ 4s ²	29 Cu Copper [Ar]3d ¹⁰ 4s ¹	30 Zn Zinc [Ar]3d ¹⁰ 4s ²	31 Ga Gallium [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ¹	32 Ge Germanium [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ²	33 As Arsenic [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ³	34 Se Selenium [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁴	35 Br Bromine [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁵	36 Kr Krypton [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶														
37 Rb Rubidium [Kr]5s ¹	38 Sr Strontium [Kr]5s ²	39 Y Yttrium [Kr]4d ¹ 5s ²	40 Zr Zirconium [Kr]4d ² 5s ²	41 Nb Niobium [Kr]4d ⁴ 5s ¹	42 Mo Molybdenum [Kr]4d ⁵ 5s ¹	43 Tc Technetium [Kr]4d ⁵ 5s ²	44 Ru Ruthenium [Kr]4d ⁷ 5s ¹	45 Rh Rhodium [Kr]4d ⁸ 5s ¹	46 Pd Palladium [Kr]4d ¹⁰	47 Ag Silver [Kr]4d ¹⁰ 5s ¹	48 Cd Cadmium [Kr]4d ¹⁰ 5s ²	49 In Indium [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ¹	50 Sn Tin [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ²	51 Sb Antimony [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ³	52 Te Tellurium [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁴	53 I Iodine [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁵	54 Xe Xenon [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁶														
55 Cs Cesium [Xe]6s ¹	56 Ba Barium [Xe]6s ²	57 La Lanthanum [Xe]5d ¹ 6s ²	58 Ce Cerium [Xe]5d ¹ 6s ²	59 Pr Praseodymium [Xe]5d ¹ 6s ²	60 Nd Neodymium [Xe]5d ¹ 6s ²	61 Pm Promethium [Xe]5d ⁴ 6s ²	62 Sm Samarium [Xe]5d ⁶ 6s ²	63 Eu Europium [Xe]5d ⁶ 6s ²	64 Gd Gadolinium [Xe]5d ⁷ 6s ²	65 Tb Terbium [Xe]5d ⁹ 6s ²	66 Dy Dysprosium [Xe]5d ⁹ 6s ²	67 Ho Holmium [Xe]5d ⁹ 6s ²	68 Er Erbium [Xe]5d ⁹ 6s ²	69 Tm Thulium [Xe]5d ⁹ 6s ²	70 Yb Ytterbium [Xe]5d ⁹ 6s ²	71 Lu Lutetium [Xe]5d ⁹ 6s ²	72 Hf Hafnium [Xe]5d ² 6s ²	73 Ta Tantalum [Xe]5d ³ 6s ²	74 W Tungsten [Xe]5d ⁴ 6s ²	75 Re Rhenium [Xe]5d ⁵ 6s ²	76 Os Osmium [Xe]5d ⁶ 6s ²	77 Ir Iridium [Xe]5d ⁷ 6s ²	78 Pt Platinum [Xe]5d ⁹ 6s ¹	79 Au Gold [Xe]5d ¹⁰ 6s ¹	80 Hg Mercury [Xe]5d ¹⁰ 6s ²	81 Tl Thallium [Xe]5d ¹⁰ 6s ² 6p ¹	82 Pb Lead [Xe]5d ¹⁰ 6s ² 6p ²	83 Bi Bismuth [Xe]5d ¹⁰ 6s ² 6p ³	84 Po Polonium [Xe]5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁴	85 At Astatine [Xe]5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁵	86 Rn Radon [Xe]5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁶
87 Fr Francium [Rn]7s ¹	88 Ra Radium [Rn]7s ²	89 Ac Actinium [Rn]7s ²	90 Th Thorium [Rn]7s ²	91 Pa Protactinium [Rn]7s ²	92 U Uranium [Rn]7s ²	93 Np Neptunium [Rn]7s ²	94 Pu Plutonium [Rn]7s ²	95 Am Americium [Rn]7s ²	96 Cm Curium [Rn]7s<																						



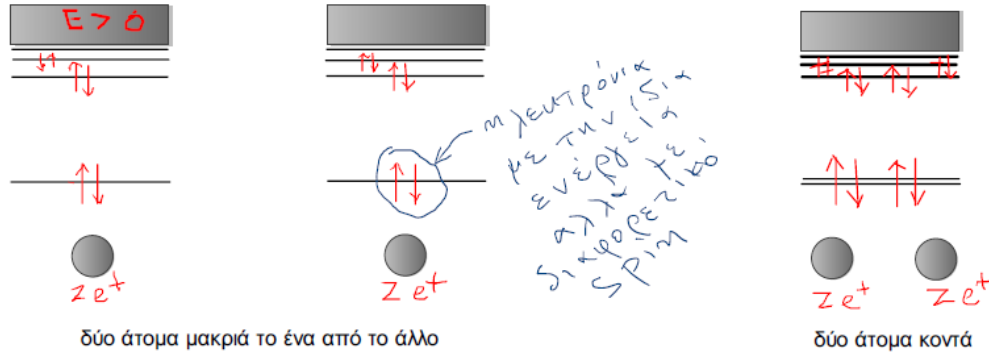
HOCHTECHNOLOGIE: EIN 300-MM-STAB AUS DER HIKARI-PRODUKTION.



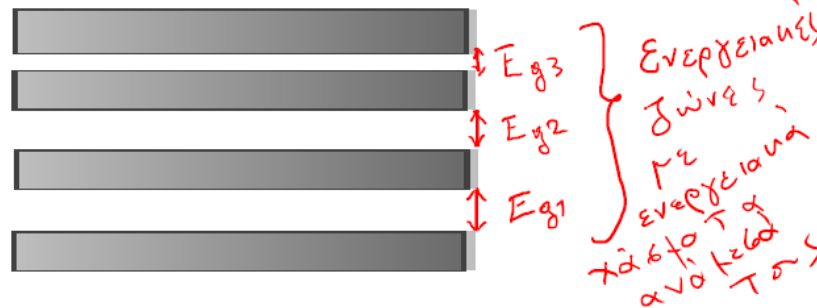
Δημιουργία ενεργειακών ζωνών όταν τα άτομα έρθουν κοντά μεταξύ τους

Απαγορευτική αρχή του Pauli:

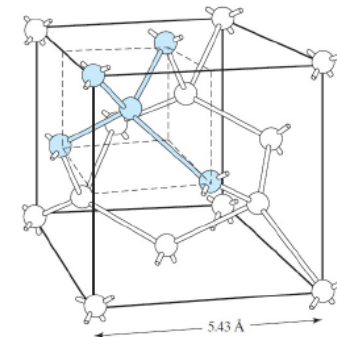
Για τα ηλεκτρόνια ισχύει και μια άλλη αρχή της κβαντομηχανικής, η απαγορευτική αρχή του Pauli. Αυτή λέει ότι δύο ή περισσότερα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να έχουν τους ίδιους "κβαντικούς αριθμούς". Αυτή η αρχή δεν επιτρέπει στα ηλεκτρόνια δύο ατόμων να έχουν τις ίδιες ενεργειακές στάθμες, όταν τα άτομα έρχονται κοντά μεταξύ τους. Έτσι αν δύο άτομα είναι πολύ μακριά το ένα από το άλλο οι ενεργειακές τους στάθμες διαφέρουν απειροελάχιστα, αλλά όταν έρθουν κοντά τότε η διαφορά είναι ανιχνεύσιμη. Δείτε το παρακάτω σχήμα:



Επομένως λόγω της απαγορευτικής αρχής του Pauli οι ενεργειακές στάθμες μετατρέπονται σε ενεργειακές ζώνες, όπου η κάθε ζώνη περιέχει πάρα πολλές στάθμες πολύ κοντά η μία στην άλλη

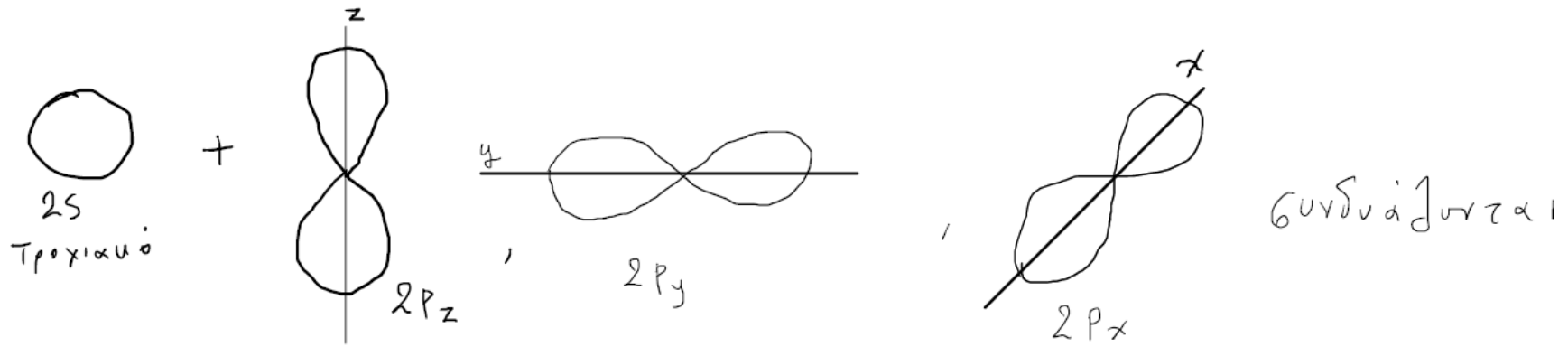


Ένας κρύσταλλος έχει διατεταγμένα πάρα πολλά άτομα:



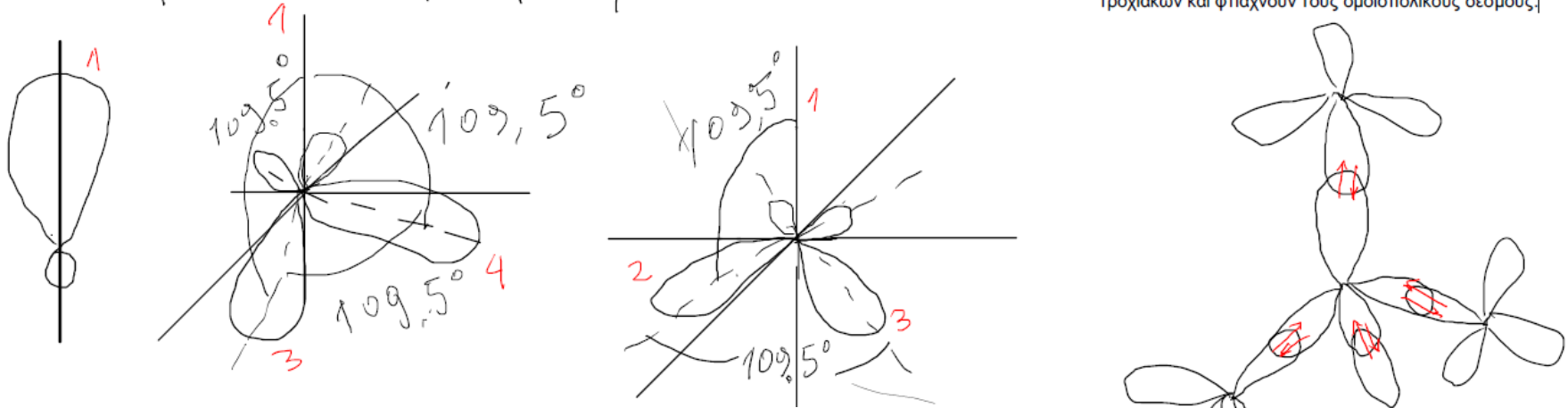
Μοναδιαίος όγκος κρυστάλλου πυριτίου (Si). Ένας μεγαλύτερος κρύσταλλος αποτελείται από πολλούς τέτοιους τοποθετημένους σαν lego. Τα άτομα Si που έχουν γαλάζιο χρώμα είναι ένα "μοναδιαίο κελί" που αποτελείται από ένα άτομο συνδεδεμένο με ομοιοπολικό δεσμό με 4 γειτονικά του.

sp3 Υβριδοποίηση για δημιουργία ομοιοπολικού δεσμού

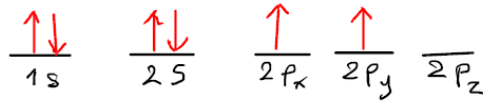


και φτιάχνουν 4 sp τροχιακά

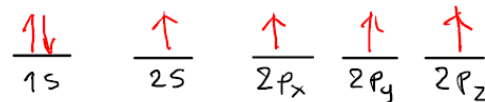
Τα sp τροχιακά στο διαμάντι, στο πυρίτιο, κλπ έχουν το καθένα από ένα ηλεκτρόνιο, συνδέονται με τα ηλεκτρόνια των γειτονικών sp τροχιακών και φτιάχνουν τους ομοιοπολικούς δεσμούς.



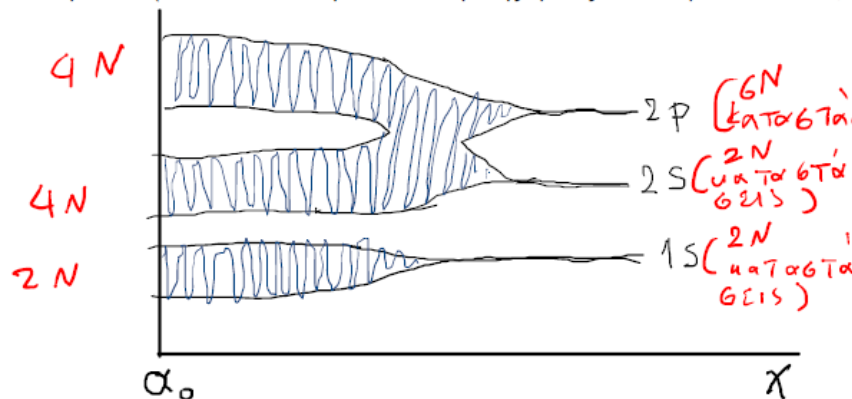
Πριν την υβριδοποίηση



μετά την υβριδοποίηση



Αν δούμε πως εξελίσσονται οι ενεργειακές στάθμες σε ενεργειακές ζώνες σαν συνάρτηση της απόστασης μεταξύ των ατόμων άνθρακα στον κρύσταλλο του διαμαντιού. (Η εικόνα είναι ίδια για όλα τα άτομα της ομάδας IV του Περιοδικού Πίνακα, δηλ Πυρίτιο, Γερμάνιο, Ψευδάργυρο)

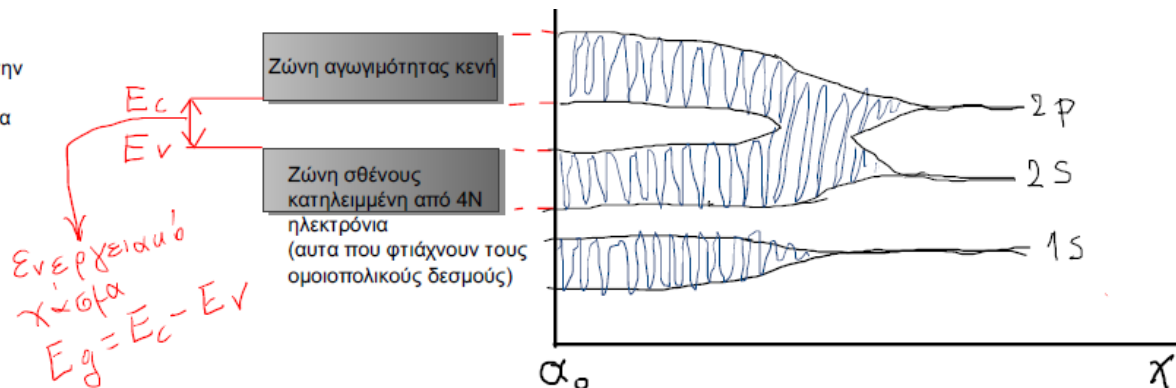


Στο διαμάντι υπάρχει η στάθμη $1s$ που μπορεί να πάρει 2 ηλεκτρόνια. Άρα ο κρύσταλλος με N άτομα στην ζώνη που προκύπτει από την $1s$ μπορεί να πάρει $2N$ ηλεκτρόνια.

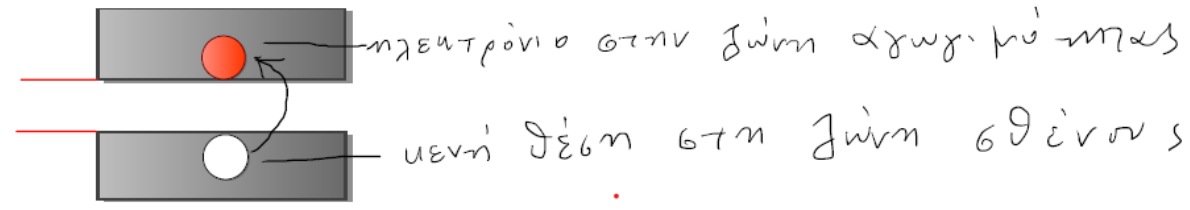
Επίσης υπάρχει η στάθμη $2s$ που μπορεί να πάρει 2 ηλεκτρόνια και αυτή και η στάθμη $2p$ που έχει τα "τροχιακά" P_x, P_y, P_z . Καθένα από αυτά μπορεί να πάρει μέχρι δύο ηλεκτρόνια άρα έχει 6 θέσεις για ηλεκτρόνια.

Καθώς τα άτομα έρχονται κοντά μεταξύ τους τα $2s$ και $2p$ τροχιακά μπλέκουν και δημιουργούν τα sp^3 υβριδικά τροχιακά.

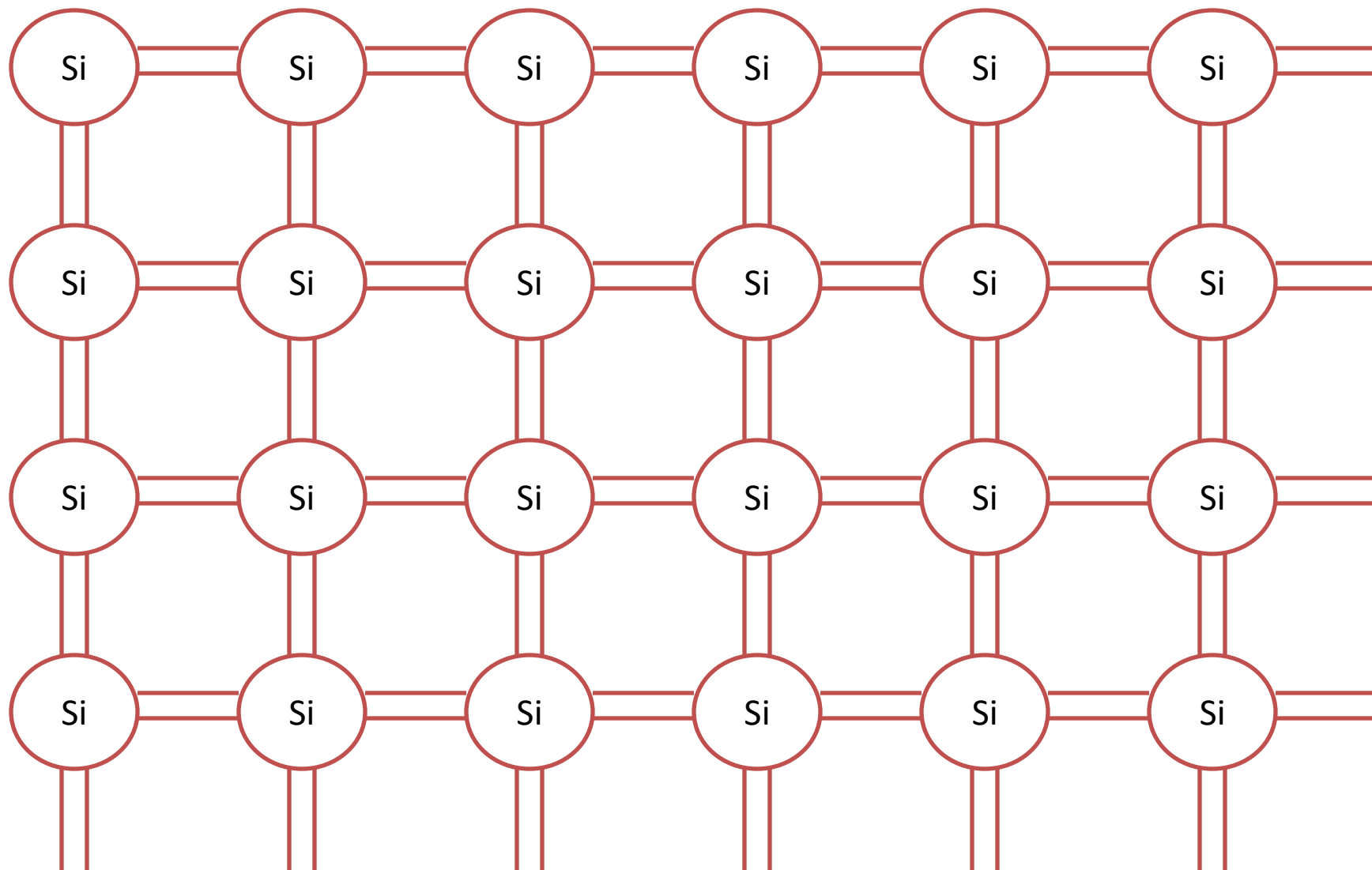
Η ενεργειακή ζώνη που προκύπτει από την κατάσταση $1s$ των ατόμων είναι κατειλημμένη από $2N$ ηλεκτρόνια, ενώ για τις δύο άλλες ενεργειακές ζώνες έχουμε:



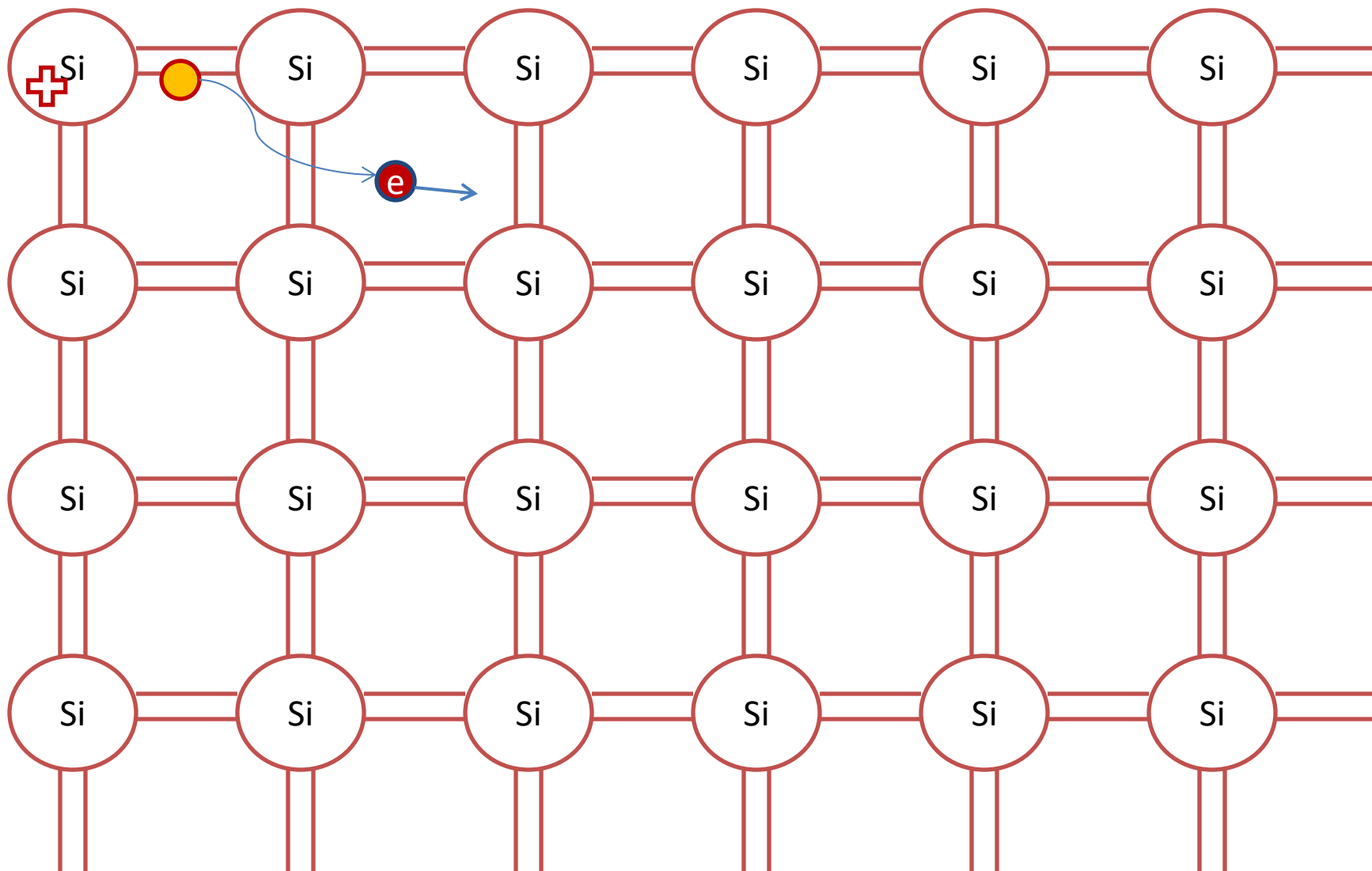
Όταν η ενέργεια του κρυστάλλου αυξηθεί, με αποτέλεσμα τα άτομα να ταλαντώνονται γύρω από την θέση τους (π.χ. με προσφορά εξωτερικής ενέργειας), τότε κάποια ηλεκτρόνια υπάρχει πιθανότητα να αποκτήσουν ικανή κινητική ενέργεια έτσι ώστε να φύγουν από την θέση τους στον δεσμό και να αρχίσουν να κινούνται ελεύθερα μέσα στον κρύσταλλο. Αυτό είναι εύκολο να γίνει γιατί η συνολική τους ενέργεια είναι μικρή. Η ενέργεια που πρέπει να αποκτήσουν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το Ενεργειακό χάσμα. Αυτό για το διαμάντι είναι $E_g = 5.47 \text{ eV}$ για το πυρίτιο είναι $E_g = 1.12 \text{ eV}$ για το γερμανίο είναι $E_g = 0.8 \text{ eV}$ και όλα αυτά στους 300° K δηλαδή σε 27 βαθμούς Κελσίου



Όταν αυξηθεί η θερμοκρασία θα αυξηθεί και αριθμός των ηλεκτρονίων που φεύγουν από τους δεσμούς τους. Όμως όπως υπάρχει "γέννηση" ελεύθερων ηλεκτρονίων υπάρχει και επανασύνδεση ελεύθερων ηλεκτρονίων. Έτσι σε σταθερή κατάσταση υπάρχει ένας αριθμός ελεύθερων ηλεκτρονίων και ίσος αριθμός κενών θέσεων στη ζώνη σθένους, ενώ για όσα παραπάνω ελεύθερα ηλεκτρόνια γεννιούνται, ίσος αριθμός από ελεύθερα ηλεκτρόνια επανασυνδέονται στους δεσμούς

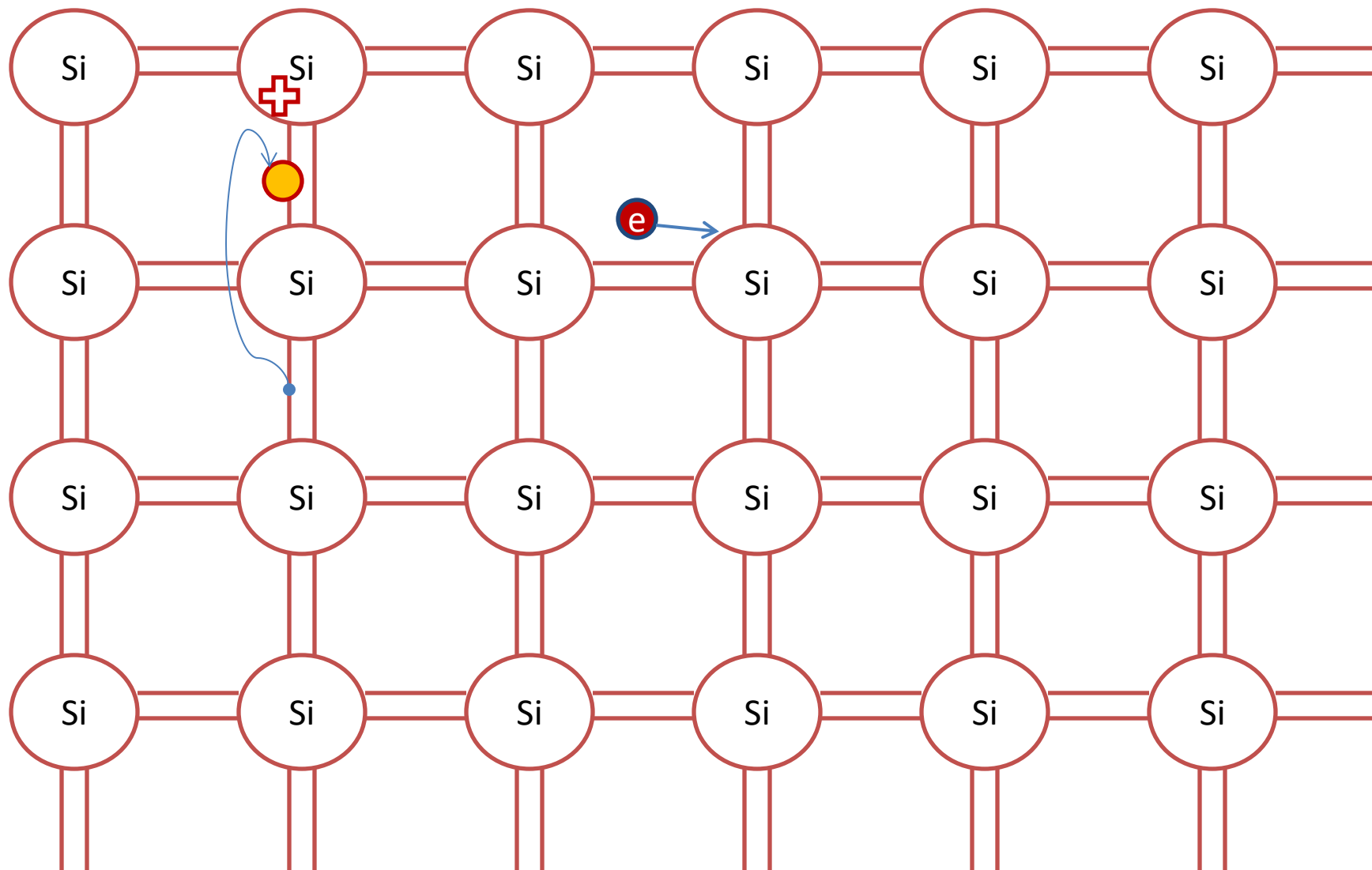


$T=0$



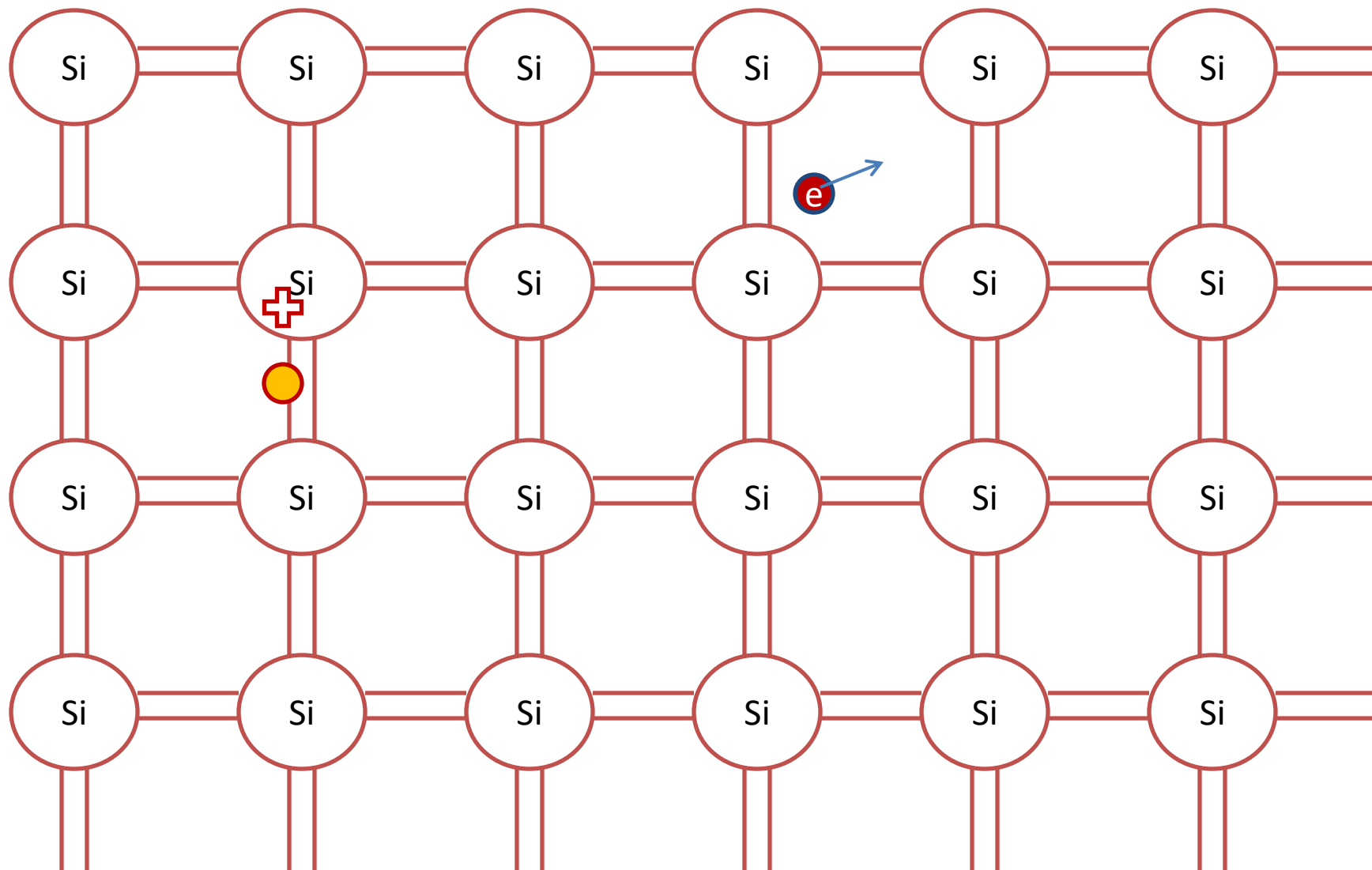
$T > 0$

$t = t_0$



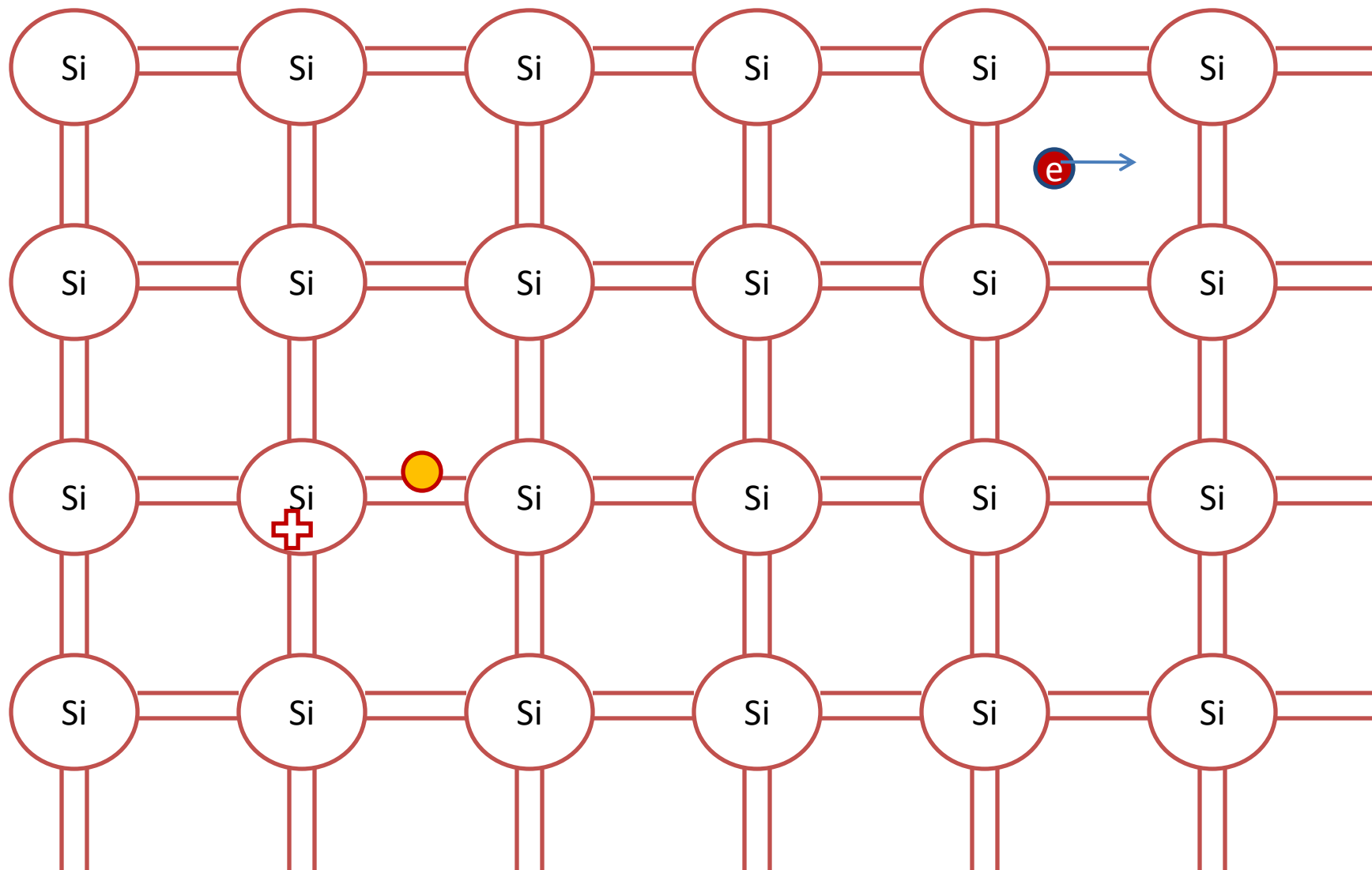
$T > 0$

$t = t_1$



$T > 0$

$t = t_2$



$T > 0$

$t = t_3$

Η κατανομή Fermi - Dirac

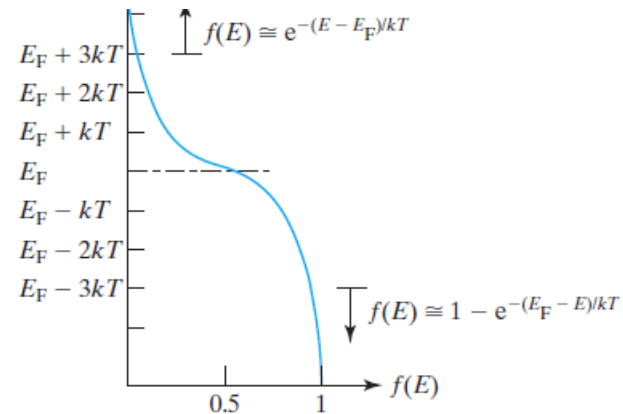
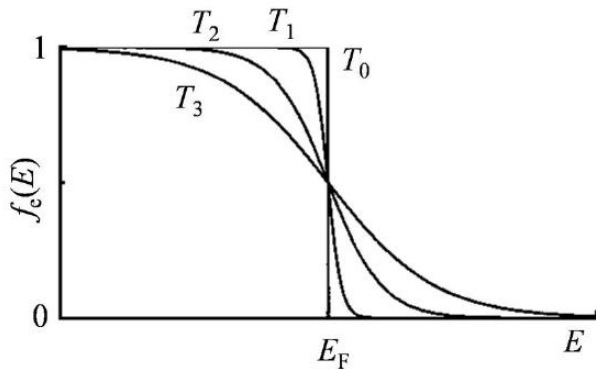
Έχει προβλεφθεί θεωρητικά ότι όταν ένας πληθυσμός από ηλεκτρόνια που μπορεί να καταλάβει ένα μεγάλο πλήθος από ενεργειακές στάθμες βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία, τότε η πιθανότητα να έχει μια ενέργεια E βγαίνει από την κατανομή Fermi Dirac.

Ο τύπος της είναι:

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

Παρατηρούμε ότι για $E = E_F$ η

$$f(E_F) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_F - E_F}{kT}}} = \frac{1}{2}$$



Συγκέντρωση ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας

$$n = \int_{E_c}^{\infty} D_c(E) \cdot f(E) \cdot dE$$

$$p = \int_{\text{Valence band bottom}}^{E_v} D_v(E) (1 - f(E)) dE$$

$$D_c(E) \equiv \frac{\text{αριθμός ενεργειακών σταθμών σε } \Delta E}{\Delta E \times \text{όγκος}}$$

↑ ζώνη αγωγιμότητας

Πόση θερμική ενέργεια χρειάζεται για να «φύγει» ένα ηλεκτρόνιο σθένους από την θέση του;
Απάντηση: **E_g**: Ενεργειακό χάσμα ανάμεσα στη ζώνη σθένους και στη ζώνη αγωγιμότητας
E_g Πυριτίου (Si) : 1.12 eV = 1.12·φορτίο ηλεκτρονίου · 1Volt = 1.12 ·1.6·10⁻¹⁹ Joules

n =αριθμός ελευθέρων ηλεκτρονίων/cm³ , **p** =αριθμός οπών/cm³

Αριθμός ελευθέρων ηλεκτρονίων = αριθμός οπών

Ο αριθμός των ελευθέρων ηλεκτρονίων – οπών εξαρτάται από την **θερμοκρασία** και το **E_g**

$$n = p = n_i = 5.2 \times 10^{15} \times T^{3/2} e^{-\frac{1}{2} \frac{E_g}{kT}}$$

Για το Si στους 27°C δηλ 300°K (το kT/q_e = 25.8 mV, αρα κT=25.8 x 10⁻³ eV):

$$n = p = n_i = 5.2 \times 10^{15} \times 300^{3/2} e^{-0.5 \cdot \frac{1.12}{(25.8) \cdot 10^{-3}}}$$
$$= 10,119 \times 10^9 / cm^3 \approx 10^{10} / cm^3$$

10¹⁰ μικρό νούμερο!! Σε σχέση με αριθμό ατόμων Si ~5·10²² /cm³

Επίσης:

$$n \times p = n_i^2$$

Για το διαμάντι, δηλαδή τον άνθρακα σε μορφή διαμαντιού $E_g = 5.46 \text{ eV}$,
οπότε στους 27°C δηλ 300°K

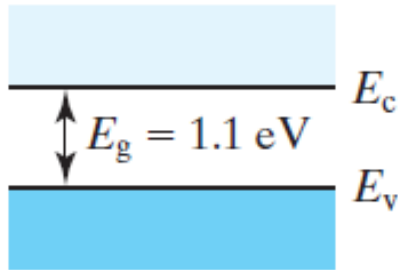
$$n = p = n_i = 5.2 \times 10^{15} \times 300^{3/2} e^{-0.5 \cdot \frac{5.45}{(25.8) \cdot 10^{-3}}}$$
$$= 3.65 \times 10^{-27} / \text{cm}^3$$

Το διαμάντι είναι μονωτής

Για το Γερμάνιο Ge $E_g = 0.67 \text{ eV}$,
οπότε στους 27°C δηλ 300°K

$$n = p = n_i = 5.2 \times 10^{15} \times 300^{3/2} e^{-0.5 \cdot \frac{0.67}{(25.8) \cdot 10^{-3}}}$$
$$= 6.2028 \cdot 10^{13} / \text{cm}^3$$

Το γερμάνιο είναι ημιαγωγός

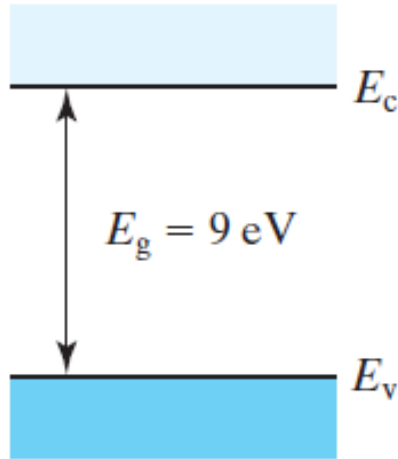


(a) Si, semiconductor

Ημιαγωγός:

$$10^{22} \text{ άτομα} / \text{cm}^3$$

$$10^{10} e / \text{cm}^3$$

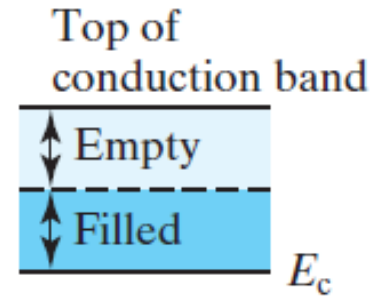


(b) SiO₂, insulator

Μονωτής:

$$10^{22} \text{ άτομα} / \text{cm}^3$$

$$0 e / \text{cm}^3$$



(c) Conductor

Αγωγός:

$$10^{22} \text{ άτομα} / \text{cm}^3$$

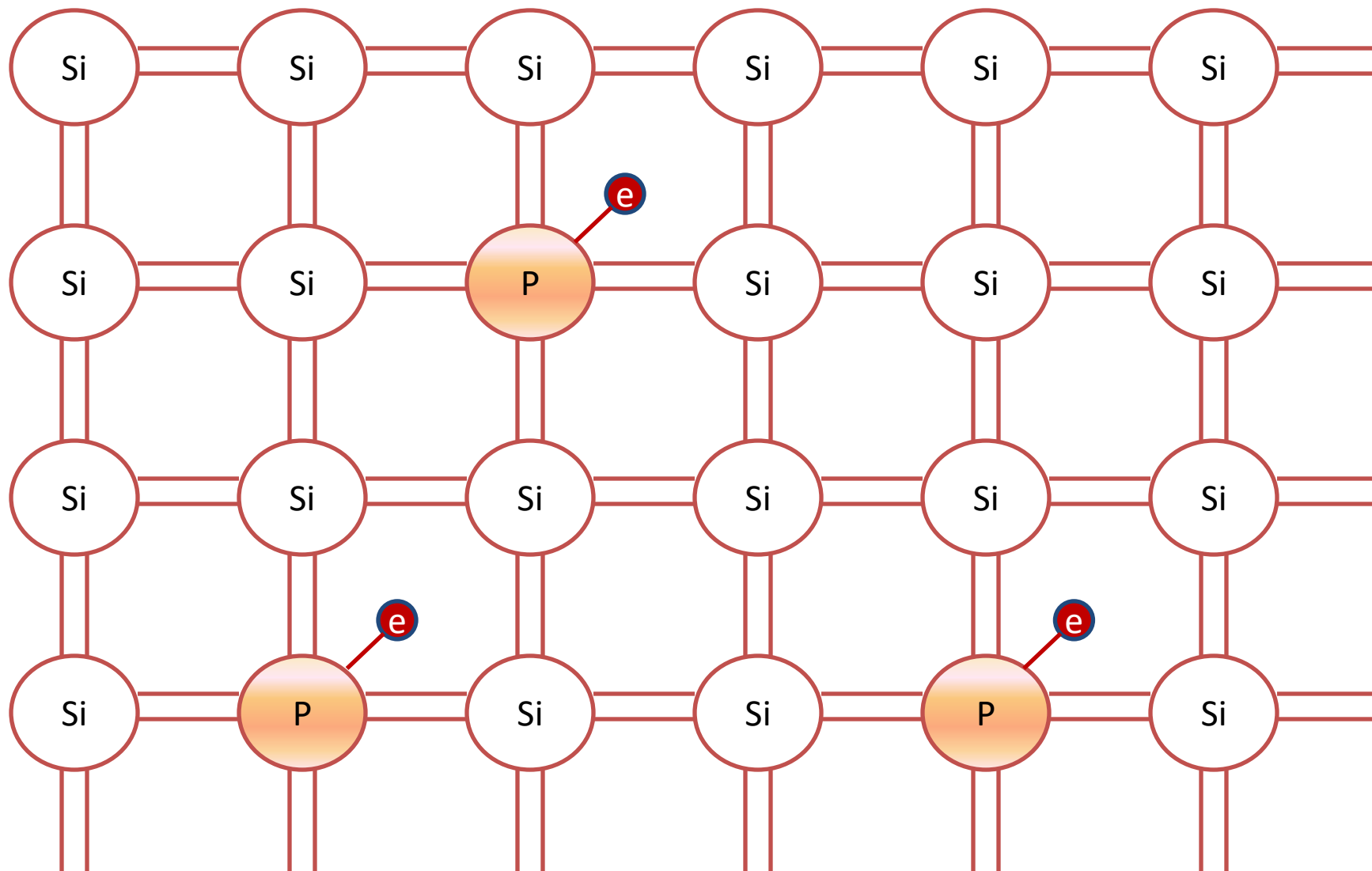
$$10^{22} e / \text{cm}^3$$

ΝΟΘΕΥΣΗ (DOPING)

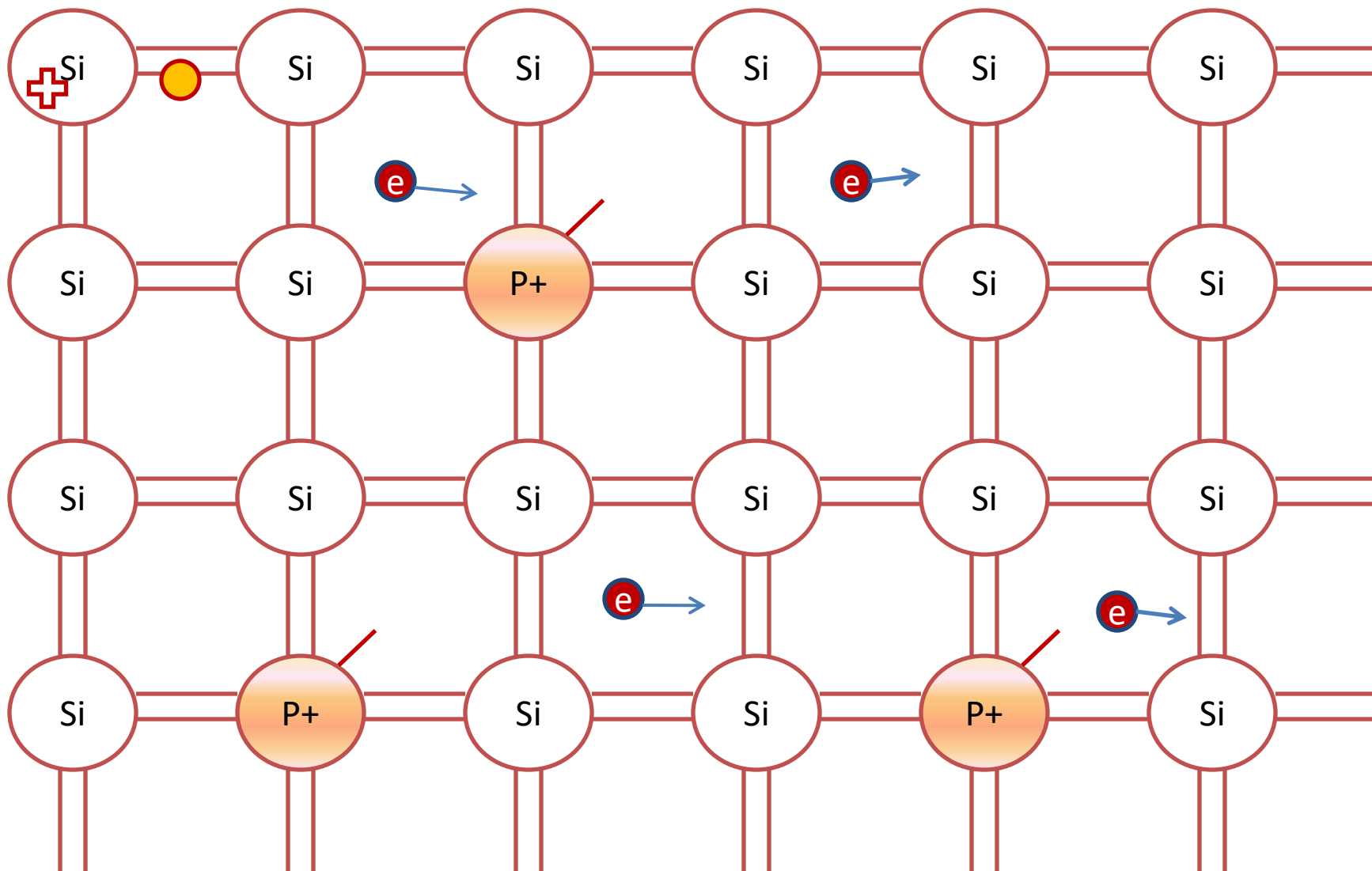
ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ ΤΥΠΟΥ n

PERIODIC TABLE OF ELEMENTS

PubChem																		2He
1H Hydrogen 1s¹		1H Atomic Number Symbol Name Electron Configuration																10Ne Neon [He]2s²2p⁶
3Li Lithium [He]2s¹		5B Boron [He]2s²2p¹																18Ar Argon [Ne]3s²3p⁶
4Be Beryllium [He]2s²		6C Carbon [He]2s²2p²																17Cl Chlorine [Ar]3s²3p⁵
11Na Sodium [Ne]3s¹		7N Nitrogen [He]2s²2p³																35Br Bromine [Ar]4s²3d¹⁰4p⁵
12Mg Magnesium [Ne]3s²		13Al Aluminum [Ne]3s²3p¹																53I Iodine [Kr]5s²4d¹⁰5p⁵
19K Potassium [Ar]4s¹		14Si Silicon [Ne]3s²3p²																85At Astatine [Xe]6s²4f¹⁴5d¹⁰6p⁵
20Ca Calcium [Ar]4s²		15P Phosphorus [Ne]3s²3p³																117Ts Tennesse [Og]7s²5f¹⁴6d¹⁰7p⁵
21Sc Scandium [Ar]4s¹3d¹		31Ga Gallium [Ar]4s²3d¹⁰4p¹																32Ge Germanium [Ar]4s²3d¹⁰4p²
22Ti Titanium [Ar]4s²3d²		33As Arsenic [Ar]4s²3d¹⁰4p³																33As Arsenic [Ar]4s²3d¹⁰4p³
23V Vanadium [Ar]4s²3d³		34Se Selenium [Ar]4s²3d¹⁰4p⁴																34Se Selenium [Ar]4s²3d¹⁰4p⁴
24Cr Chromium [Ar]4s¹3d⁵		35Br Bromine [Ar]4s²3d¹⁰4p⁵																35Br Bromine [Ar]4s²3d¹⁰4p⁵
25Mn Manganese [Ar]4s²3d⁵		36Kr Krypton [Ar]4s²3d¹⁰4p⁶																36Kr Krypton [Ar]4s²3d¹⁰4p⁶
26Fe Iron [Ar]4s²3d⁶		37Rb Rubidium [Kr]5s¹																37Rb Rubidium [Kr]5s¹
27Co Cobalt [Ar]4s²3d⁷		38Sr Strontium [Kr]5s²																38Sr Strontium [Kr]5s²
28Ni Nickel [Ar]4s²3d⁸		39Y Yttrium [Kr]5s¹4d¹																39Y Yttrium [Kr]5s¹4d¹
29Cu Copper [Ar]4s¹3d¹⁰		40Zr Zirconium [Kr]5s²4d²																40Zr Zirconium [Kr]5s²4d²
30Zn Zinc [Ar]4s²3d¹⁰		41Nb Niobium [Kr]5s¹4d⁴																41Nb Niobium [Kr]5s¹4d⁴
31Ga Gallium [Ar]4s²3d¹⁰4p¹		42Mo Molybdenum [Kr]5s¹4d⁵																42Mo Molybdenum [Kr]5s¹4d⁵
32Ge Germanium [Ar]4s²3d¹⁰4p²		43Tc Technetium [Kr]5s¹4d⁵																43Tc Technetium [Kr]5s¹4d⁵
33As Arsenic [Ar]4s²3d¹⁰4p³		44Ru Ruthenium [Kr]5s¹4d⁶																44Ru Ruthenium [Kr]5s¹4d⁶
34Se Selenium [Ar]4s²3d¹⁰4p⁴		45Rh Rhodium [Kr]5s¹4d⁷																45Rh Rhodium [Kr]5s¹4d⁷
35Br Bromine [Ar]4s²3d¹⁰4p⁵		46Pd Palladium [Kr]5s⁰4d¹⁰																46Pd Palladium [Kr]5s⁰4d¹⁰
36Kr Krypton [Ar]4s²3d¹⁰4p⁶		47Ag Silver [Kr]5s¹4d¹⁰																47Ag Silver [Kr]5s¹4d¹⁰
37Rb Rubidium [Kr]5s¹		48Cd Cadmium [Kr]5s²4d¹⁰																48Cd Cadmium [Kr]5s²4d¹⁰
38Sr Strontium [Kr]5s²		49In Indium [Kr]5s²4d¹⁰5p¹																49In Indium [Kr]5s²4d¹⁰5p¹
39Y Yttrium [Kr]5s¹4d¹		50Sn Tin [Kr]5s²4d¹⁰5p²																50Sn Tin [Kr]5s²4d¹⁰5p²
40Zr Zirconium [Kr]5s²4d²		51Sb Antimony [Kr]5s²4d¹⁰5p³																51Sb Antimony [Kr]5s²4d¹⁰5p³
41Nb Niobium [Kr]5s¹4d⁴		52Te Tellurium [Kr]5s²4d¹⁰5p⁴																52Te Tellurium [Kr]5s²4d¹⁰5p⁴
42Mo Molybdenum [Kr]5s¹4d⁵		53I Iodine [Kr]5s²4d¹⁰5p⁵																53I Iodine [Kr]5s²4d¹⁰5p⁵
43Tc Technetium [Kr]5s¹4d⁵		54Xe Xenon [Kr]5s²4d¹⁰5p⁶																54Xe Xenon [Kr]5s²4d¹⁰5p⁶
44Ru Ruthenium [Kr]5s¹4d⁶		55Cs Cesium [Xe]6s¹																55Cs Cesium [Xe]6s¹
45Rh Rhodium [Kr]5s¹4d⁷		56Ba Barium [Xe]6s²																56Ba Barium [Xe]6s²
46Pd Palladium [Kr]5s⁰4d¹⁰		57La Lanthanum [Xe]6s¹5d¹																57La Lanthanum [Xe]6s¹5d¹
47Ag Silver [Kr]5s¹4d¹⁰		58Ce Cerium [Xe]6s¹5d¹4f¹																58Ce Cerium [Xe]6s¹5d¹4f¹
48Cd Cadmium [Kr]5s²4d¹⁰		59Pr Praseodymium [Xe]6s¹4f³																59Pr Praseodymium [Xe]6s¹4f³
49In Indium [Kr]5s²4d¹⁰5p¹		60Nd Neodymium [Xe]6s¹4f⁴																60Nd Neodymium [Xe]6s¹4f⁴
50Sn Tin [Kr]5s²4d¹⁰5p²		61Pm Promethium [Xe]6s¹4f⁵																61Pm Promethium [Xe]6s¹4f⁵
51Sb Antimony [Kr]5s²4d¹⁰5p³		62Sm Samarium [Xe]6s¹4f⁶																62Sm Samarium [Xe]6s¹4f⁶
52Te Tellurium [Kr]5s²4d¹⁰5p⁴		63Eu Europium [Xe]6s¹4f⁷																63Eu Europium [Xe]6s¹4f⁷
53I Iodine [Kr]5s²4d¹⁰5p⁵		64Gd Gadolinium [Xe]6s¹4f⁷5d¹																64Gd Gadolinium [Xe]6s¹4f⁷5d¹
54Xe Xenon [Kr]5s²4d¹⁰5p⁶		65Tb Terbium [Xe]6s¹4f⁹																65Tb Terbium [Xe]6s¹4f⁹
55Cs Cesium [Xe]6s¹		66Dy Dysprosium [Xe]6s¹4f¹⁰																66Dy Dysprosium [Xe]6s¹4f¹⁰
56Ba Barium [Xe]6s²		67Ho Holmium [Xe]6s¹4f¹¹																67Ho Holmium [Xe]6s¹4f¹¹
57La Lanthanum [Xe]6s¹5d¹		68Er Erbium [Xe]6s¹4f¹²																68Er Erbium [Xe]6s¹4f¹²
58Ce Cerium [Xe]6s¹5d¹4f¹		69Tm Thulium [Xe]6s¹4f¹³																69Tm Thulium [Xe]6s¹4f¹³
59Pr Praseodymium [Xe]6s¹4f³		70Yb Ytterbium [Xe]6s¹4f¹⁴																70Yb Ytterbium [Xe]6s¹4f¹⁴
60Nd Neodymium [Xe]6s¹4f⁴		71Lu Lutetium [Xe]6s¹4f¹⁴5d¹																71Lu Lutetium [Xe]6s¹4f¹⁴5d¹
61Pm Promethium [Xe]6s¹4f⁵		72Hf Hafnium [Xe]6s²4f¹⁴5d²																72Hf Hafnium [Xe]6s²4f¹⁴5d²
62Sm Samarium [Xe]6s¹4f⁶		73Ta Tantalum [Xe]6s²4f¹⁴5d³																73Ta Tantalum [Xe]6s²4f¹⁴5d³
63Eu Europium [Xe]6s¹4f⁷		74W Tungsten [Xe]6s²4f¹⁴5d⁴																74W Tungsten [Xe]6s²4f¹⁴5d⁴
64Gd Gadolinium [Xe]6s¹4f⁷5d¹		75Re Rhenium [Xe]6s²4f¹⁴5d⁵																75Re Rhenium [Xe]6s²4f¹⁴5d⁵
65Tb Terbium [Xe]6s¹4f⁹		76Os Osmium [Xe]6s²4f¹⁴5d⁶																76Os Osmium [Xe]6s²4f¹⁴5d⁶
66Dy Dysprosium [Xe]6s¹4f¹⁰		77Ir Iridium [Xe]6s²4f¹⁴5d⁷																77Ir Iridium [Xe]6s²4f¹⁴5d⁷
67Ho Holmium [Xe]6s¹4f¹¹		78Pt Platinum [Xe]6s¹4f¹⁴5d⁹																78Pt Platinum [Xe]6s¹4f¹⁴5d⁹
68Er Erbium [Xe]6s¹4f¹²		79Au Gold [Xe]6s¹4f¹⁴5d¹⁰																79Au Gold [Xe]6s¹4f¹⁴5d¹⁰
69Tm Thulium [Xe]6s¹4f¹³		80Hg Mercury [Xe]6s²4f¹⁴5d¹⁰																80Hg Mercury [Xe]6s²4f¹⁴5d¹⁰
70Yb Ytterbium [Xe]6s¹4f¹⁴		81Tl Thallium [Xe]6s²4f¹⁴5d¹⁰6p¹																81Tl Thallium [Xe]6s²4f¹⁴5d¹⁰6p¹
71Lu Lutetium [Xe]6s¹4f¹⁴5d¹		82Pb Lead [Xe]6s²4f¹⁴5d¹⁰6p²																82Pb Lead [Xe]6s²4f¹⁴5d¹⁰6p²
72Hf Hafnium [Xe]6s²4f¹⁴5d²		83Bi Bismuth [Xe]6s²4f¹⁴5d¹⁰6p³																83Bi Bismuth [Xe]6s²4f¹⁴5d¹⁰6p³
73Ta Tantalum [Xe]6s²4f¹⁴5d³		84Po Polonium [Xe]6s²4f¹⁴5d¹⁰6p⁴																84Po Polonium [Xe]6s²4f¹⁴5d¹⁰6p⁴
74W Tungsten [Xe]6s²4f¹⁴5d⁴		85At Astatine [Xe]6s²4f¹⁴5d¹⁰6p⁵																85At Astatine [Xe]6s²4f¹⁴5d¹⁰6p⁵
75Re Rhenium [Xe]6s²4f¹⁴5d⁵		86Rn Radon [Xe]6s²4f¹⁴5d¹⁰6p⁶																86Rn Radon [Xe]6s²4f¹⁴5d¹⁰6p⁶
76Os Osmium [Xe]6s²4f¹⁴5d⁶		87Fr Francium [Rn]7s¹																87Fr Francium [Rn]7s¹
77Ir Iridium [Xe]6s²4f¹⁴5d⁷		88Ra Radium [Rn]7s²																88Ra Radium [Rn]7s²
78Pt Platinum [Xe]6s¹4f¹⁴5d⁹		89Ac Actinium [Rn]7s¹5f¹																89Ac Actinium [Rn]7s¹5f¹
79Au Gold [Xe]6s¹4f¹⁴5d¹⁰		90Th Thorium [Rn]7s²5f²																90Th Thorium [Rn]7s²5f²
80Hg Mercury [Xe]6s²4f¹⁴5d¹⁰		91Pa Protactinium [Rn]7s¹5f³																91Pa Protactinium [Rn]7s¹5f³
81Tl Thallium [Xe]6s²4f¹⁴5d¹⁰6p¹		92U Uranium [Rn]7s²5f³																92U Uranium [Rn]7s²5f³
82Pb Lead [Xe]6s²4f¹⁴5d¹⁰6p²		93Np Neptunium [Rn]7s²5f⁴																93Np Neptunium [Rn]7s²5f⁴
83Bi Bismuth [Xe]6s²4f¹⁴5d¹⁰6p³		94Pu Plutonium [Rn]7s²5f⁶																94Pu Plutonium [Rn]7s²5f⁶
84Po Polonium [Xe]6s²4f¹⁴5d¹⁰6p⁴		95Am Americium [Rn]7s²5f⁷																95Am Americium [Rn]7s²5f⁷
85At Astatine [Xe]6s²4f¹⁴5d¹⁰6p⁵		96Cm Curium [Rn]7s²5f⁸																96Cm Curium [Rn]7s²5f⁸
86Rn Radon [Xe]6s²4f¹⁴5d¹⁰6p⁶		97Bk Berkelium [Rn]7s²5f⁹																97Bk Berkelium [Rn]7s²5f⁹
87Fr Francium [Rn]7s¹		98Cf Californium [Rn]7s²5f¹⁰																98Cf Californium [Rn]7s²5f¹⁰
88Ra Radium [Rn]7s²		99Es Einsteinium [Rn]7s²5f¹¹																99Es Einsteinium [Rn]7s²5f¹¹
89Ac Actinium [Rn]7s¹5f¹		100Fm Fermium [Rn]7s²5f¹²																100Fm Fermium [Rn]7s²5f¹²
90Th Thorium [Rn]7s²5f²		101Md Mendelevium [Rn]7s²5f¹³																101Md Mendelevium [Rn]7s²5f¹³
91Pa Protactinium [Rn]7s¹5f³		102No Nobelium [Rn]7s²5f¹⁴																102No Nobelium [Rn]7s²5f¹⁴
92U Uranium [Rn]7s²5f³		103Lr Lutetium [Xe]6s¹4f¹⁴5d¹																1

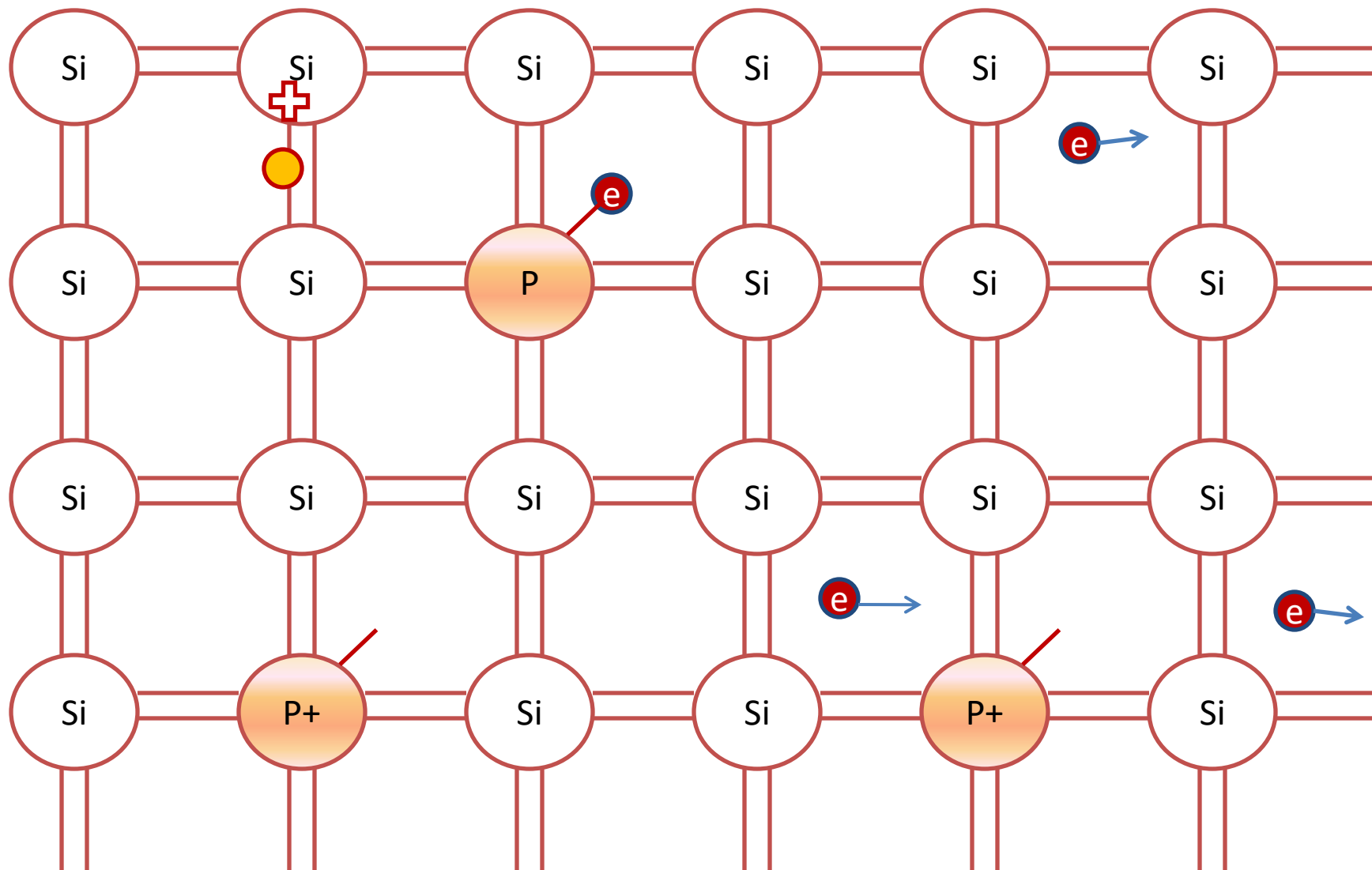


$T=0$



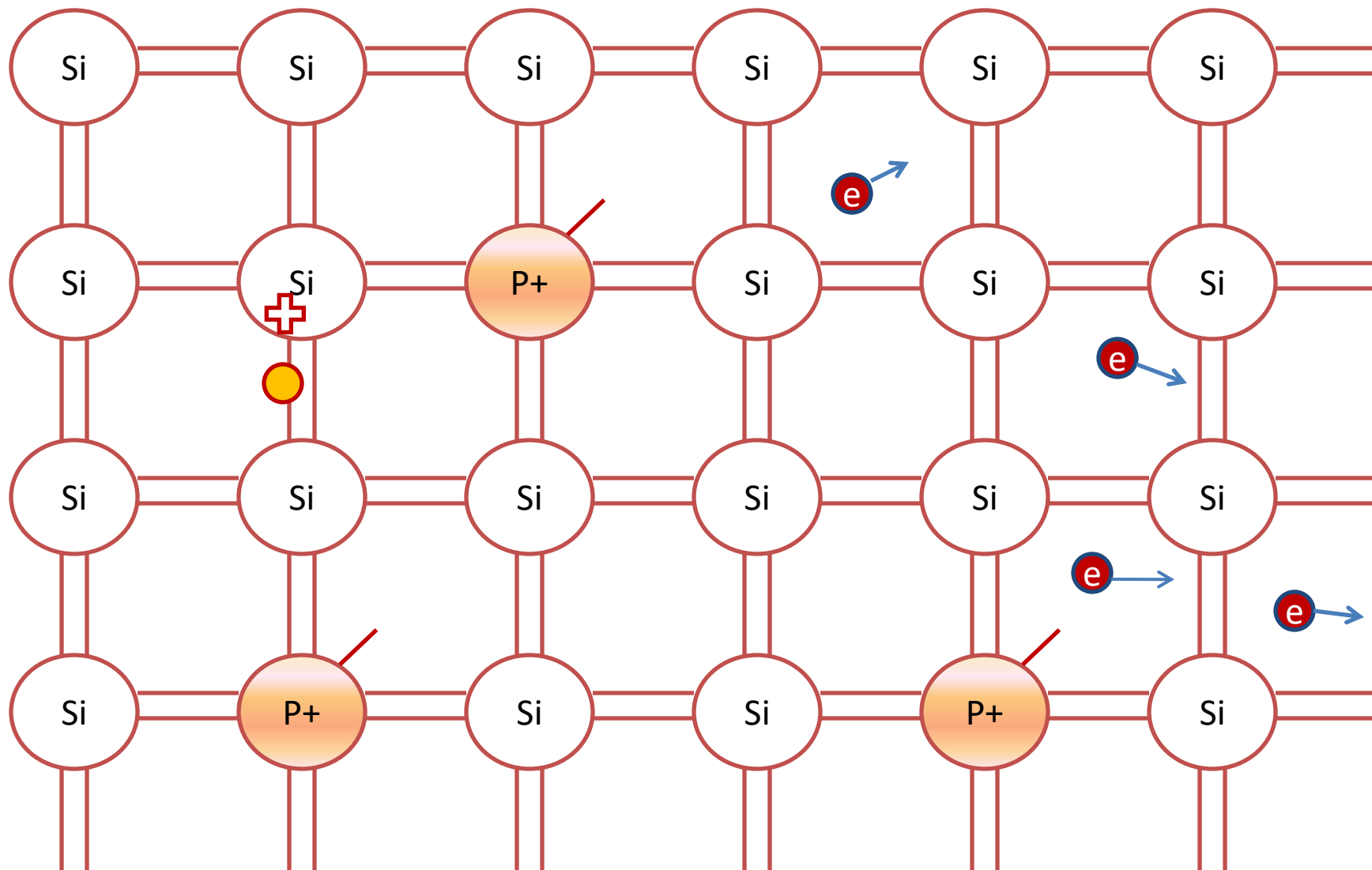
$T > 0$

$t = t_0$



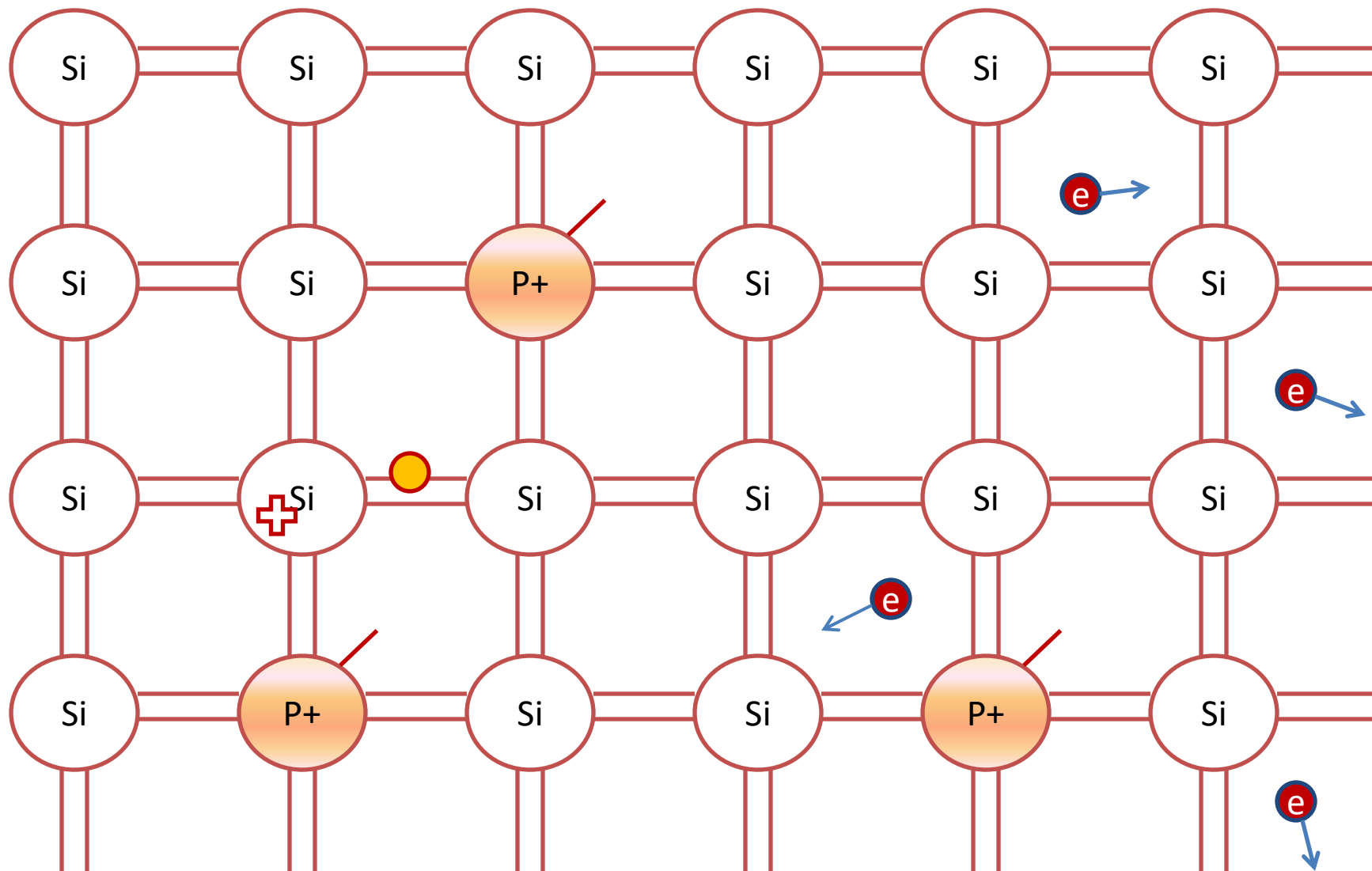
$T > 0$

$t = t_1$



$T > 0$

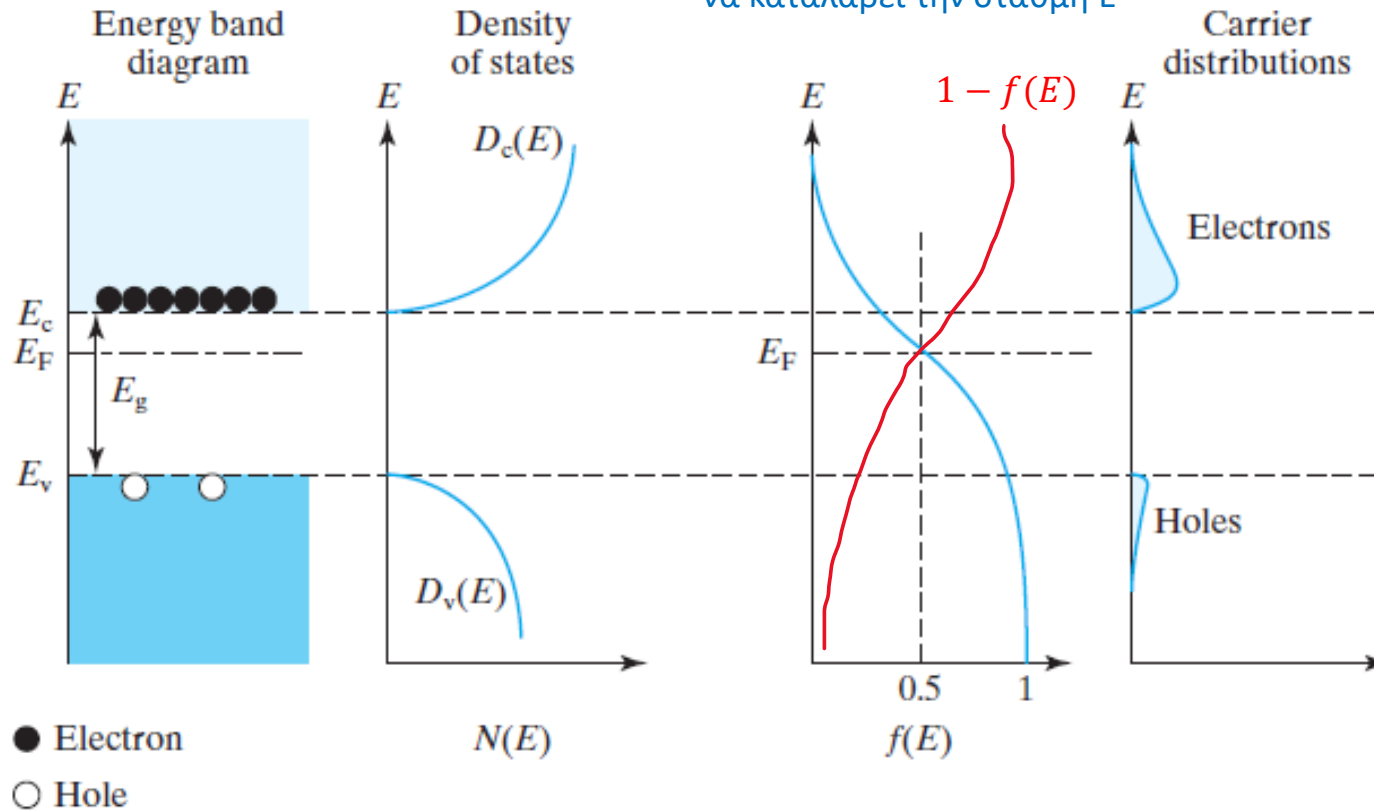
$t = t_2$



$T > 0$

$t = t_3$

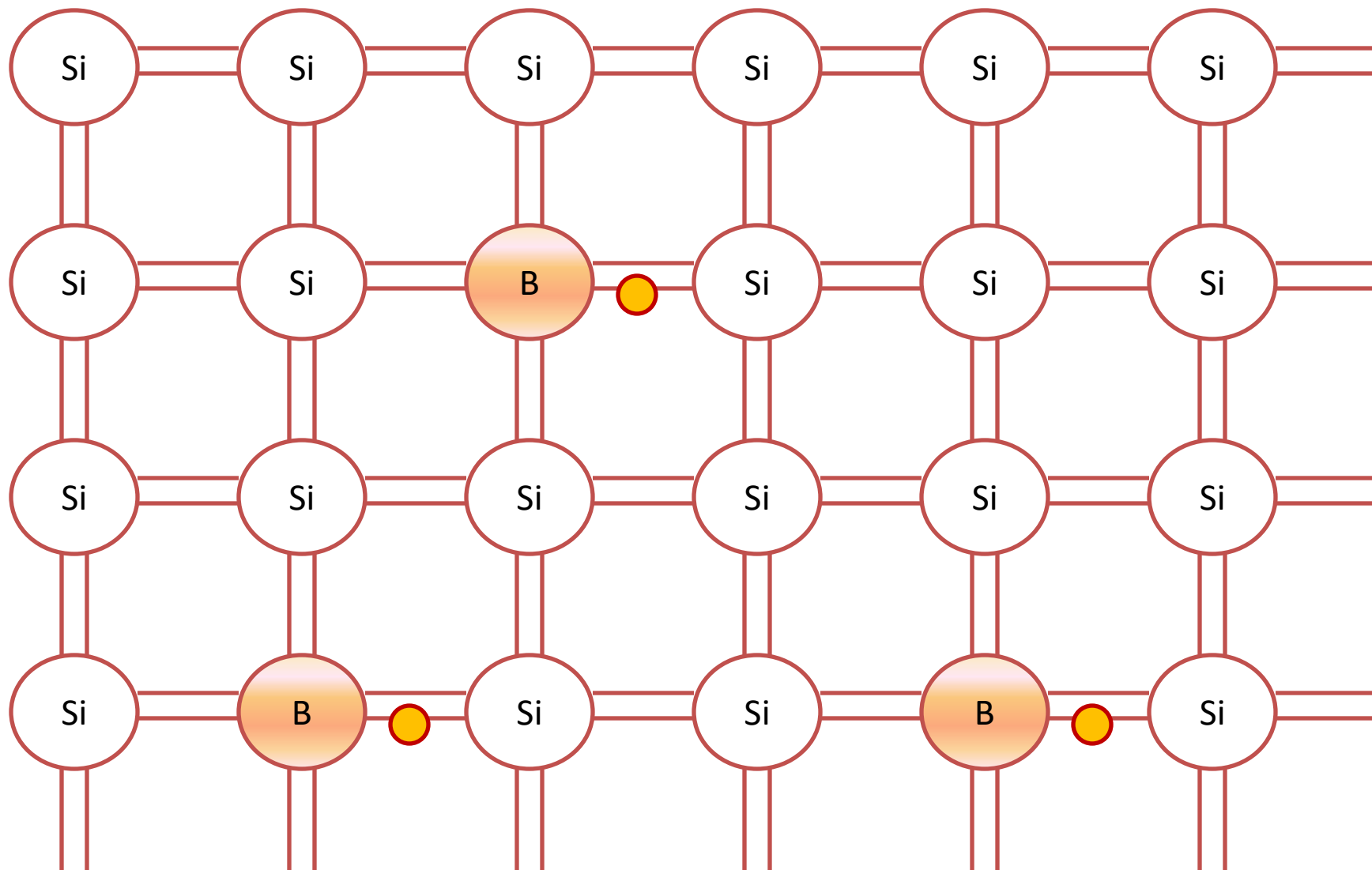
Πιθανότητα ηλεκτρονίου
να καταλάβει την στάθμη E



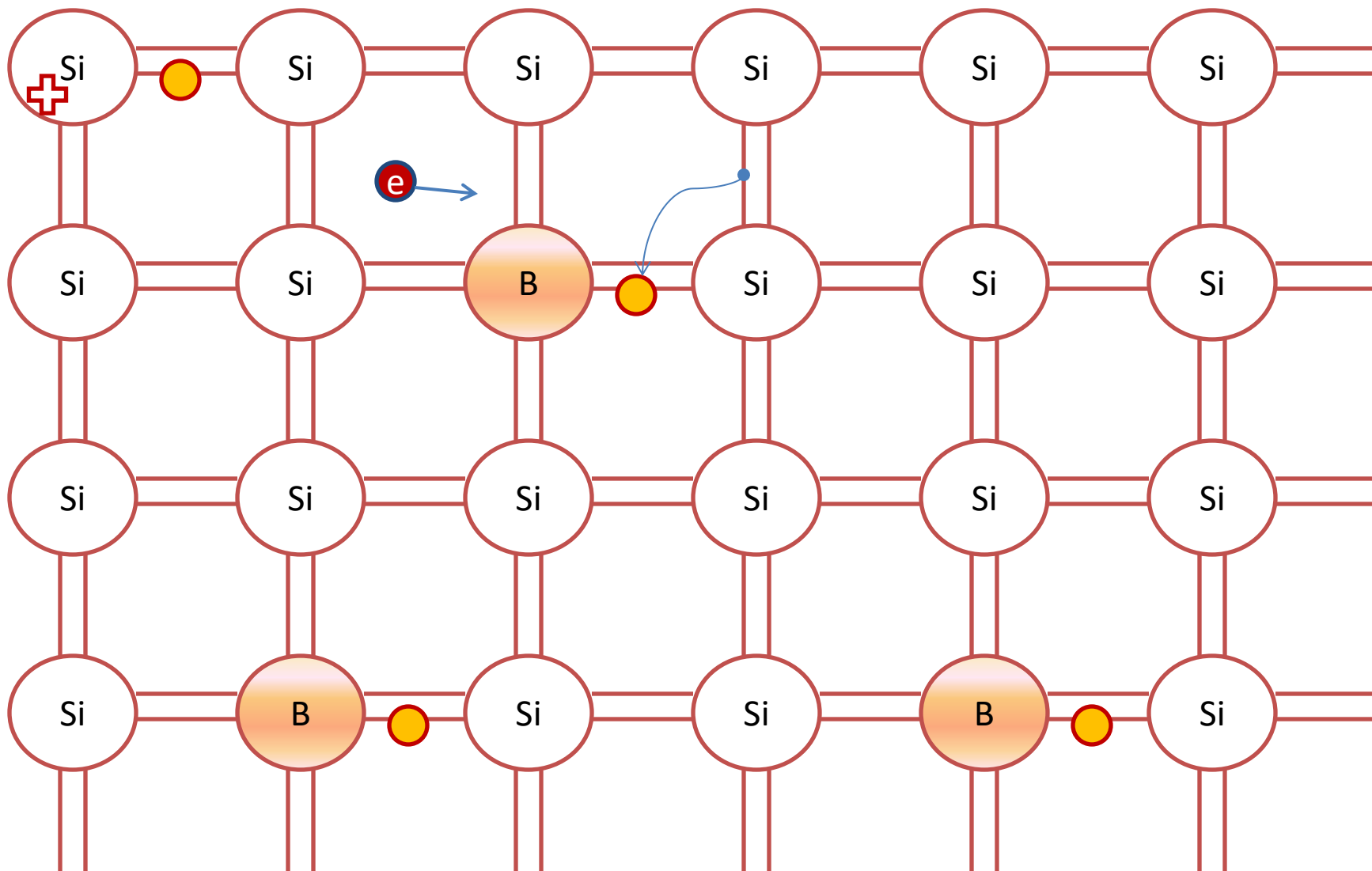
ΝΟΘΕΥΣΗ (DOPING)
ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ ΤΥΠΟΥ p

PERIODIC TABLE OF ELEMENTS

PubChem																																			
1 H Hydrogen 1s ¹																2 He Helium 1s ²																			
3 Li Lithium [He]2s ¹		4 Be Beryllium [He]2s ²																10 Ne Neon [He]2s ² 2p ⁶																	
11 Na Sodium [Ne]3s ¹		12 Mg Magnesium [Ne]3s ²																18 Ar Argon [Ne]3s ² 3p ⁶																	
19 K Potassium [Ar]4s ¹		20 Ca Calcium [Ar]4s ²		21 Sc Scandium [Ar]4s ¹ 3d ¹		22 Ti Titanium [Ar]4s ² 3d ²		23 V Vanadium [Ar]4s ² 3d ³		24 Cr Chromium [Ar]4s ¹ 3d ⁵		25 Mn Manganese [Ar]4s ² 3d ⁵		26 Fe Iron [Ar]4s ² 3d ⁶		27 Co Cobalt [Ar]4s ² 3d ⁷		28 Ni Nickel [Ar]4s ² 3d ⁸		29 Cu Copper [Ar]4s ¹ 3d ¹⁰		30 Zn Zinc [Ar]4s ² 3d ¹⁰		31 Ga Gallium [Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ¹		32 Ge Germanium [Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ²		33 As Arsenic [Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ³		34 Se Selenium [Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ⁴		35 Br Bromine [Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ⁵		36 Kr Krypton [Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ⁶	
37 Rb Rubidium [Kr]5s ¹		38 Sr Strontium [Kr]5s ²		39 Y Yttrium [Kr]5s ¹ 4d ¹		40 Zr Zirconium [Kr]5s ² 4d ²		41 Nb Niobium [Kr]5s ¹ 4d ⁴		42 Mo Molybdenum [Kr]5s ¹ 4d ⁵		43 Tc Technetium [Kr]5s ¹ 4d ⁵		44 Ru Ruthenium [Kr]5s ¹ 4d ⁶		45 Rh Rhodium [Kr]5s ¹ 4d ⁷		46 Pd Palladium [Kr]5s ⁰ 4d ¹⁰		47 Ag Silver [Kr]5s ¹ 4d ¹⁰		48 Cd Cadmium [Kr]5s ² 4d ¹⁰		49 In Indium [Kr]5s ² 4d ¹⁰ 5p ¹		50 Sn Tin [Kr]5s ² 4d ¹⁰ 5p ²		51 Sb Antimony [Kr]5s ² 4d ¹⁰ 5p ³		52 Te Tellurium [Kr]5s ² 4d ¹⁰ 5p ⁴		53 I Iodine [Kr]5s ² 4d ¹⁰ 5p ⁵		54 Xe Xenon [Kr]5s ² 4d ¹⁰ 5p ⁶	
55 Cs Cesium [Xe]6s ¹		56 Ba Barium [Xe]6s ²		57 La Lanthanum [Xe]6s ¹ 5d ¹		58 Ce Cerium [Xe]6s ² 5d ¹ 4f ¹		59 Pr Praseodymium [Xe]6s ² 4f ³		60 Nd Neodymium [Xe]6s ² 4f ⁴		61 Pm Promethium [Xe]6s ¹ 4f ⁵		62 Sm Samarium [Xe]6s ² 4f ⁶		63 Eu Europium [Xe]6s ² 4f ⁷		64 Gd Gadolinium [Xe]6s ² 4f ⁷ 5d ¹		65 Tb Terbium [Xe]6s ² 4f ⁹		66 Dy Dysprosium [Xe]6s ² 4f ¹⁰		67 Ho Holmium [Xe]6s ² 4f ¹¹		68 Er Erbium [Xe]6s ² 4f ¹²		69 Tm Thulium [Xe]6s ² 4f ¹³		70 Yb Ytterbium [Xe]6s ² 4f ¹⁴		71 Lu Lutetium [Xe]6s ¹ 4f ¹⁴ 5d ¹			
87 Fr Francium [Rn]7s ¹		88 Ra Radium [Rn]7s ²		89 Ac Actinium [Rn]7s ¹ 6d ¹		90 Th Thorium [Rn]7s ² 6d ²		91 Pa Protactinium [Rn]7s ¹ 5f ² 6d ¹		92 U Uranium [Rn]7s ² 5f ³ 6d ¹		93 Np Neptunium [Rn]7s ¹ 5f ⁴ 6d ¹		94 Pu Plutonium [Rn]7s ¹ 5f ⁶		95 Am Americium [Rn]7s ¹ 5f ⁷		96 Cm Curium [Rn]7s ² 5f ⁸		97 Bk Berkelium [Rn]7s ¹ 5f ⁹		98 Cf Californium [Rn]7s ² 5f ¹⁰		99 Es Einsteinium [Rn]7s ¹ 5f ¹¹		100 Fm Fermium [Rn]7s ² 5f ¹²		101 Md Mendelevium [Rn]7s ¹ 5f ¹³		102 No Nobelium [Rn]7s ² 5f ¹⁴		103 Lr Lawrencium [Rn]7s ¹ 5f ¹⁴ 6d ¹			
				72 Hf Hafnium [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ²		73 Ta Tantalum [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ³		74 W Tungsten [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ⁴		75 Re Rhenium [Xe]6s ¹ 4f ¹⁴ 5d ⁵		76 Os Osmium [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ⁶		77 Ir Iridium [Xe]6s ¹ 4f ¹⁴ 5d ⁷		78 Pt Platinum [Xe]6s ¹ 4f ¹⁴ 5d ⁹		79 Au Gold [Xe]6s ¹ 4f ¹⁴ 5d ¹⁰		80 Hg Mercury [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ¹⁰		81 Tl Thallium [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6p ¹		82 Pb Lead [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6p ²		83 Bi Bismuth [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6p ³		84 Po Polonium [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6p ⁴		85 At Astatine [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6p ⁵		86 Rn Radon [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6p ⁶			
				104 Rf Rutherfordium [Rn]7s ¹ 5f ¹⁴ 6d ²		105 Db Dubnium [Rn]7s ¹ 5f ¹⁴ 6d ³		106 Sg Seaborgium [Rn]7s ¹ 5f ¹⁴ 6d ⁴		107 Bh Bohrium [Rn]7s ¹ 5f ¹⁴ 6d ⁵		108 Hs Hassium [Rn]7s ² 5f ¹⁴ 6d ⁶		109 Mt Meitnerium [Rn]7s ¹ 5f ¹⁴ 6d ⁷		110 Ds Darmstadtium [Rn]7s ¹ 5f ¹⁴ 6d ⁸		111 Rg Roentgenium [Rn]7s ¹ 5f ¹⁴ 6d ⁹		112 Cn Copernicium [Rn]7s ² 5f ¹⁴ 6d ¹⁰		113 Nh Nihonium [Rn]7s ² 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7p ¹		114 Fl Flerovium [Rn]7s ² 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7p ²		115 Mc Moscovium [Rn]7s ² 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7p ³		116 Lv Livermorium [Rn]7s ² 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7p ⁴		117 Ts Tennessine [Rn]7s ² 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7p ⁵		118 Og Oganesson [Rn]7s ² 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7p ⁶			
				31 Ga Gallium [Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ¹		32 Ge Germanium [Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ²		33 As Arsenic [Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ³																											
				49 In Indium [Kr]5s ² 4d ¹⁰ 5p ¹		50 Sn Tin [Kr]5s ² 4d ¹⁰ 5p ²		51 Sb Antimony [Kr]5s ² 4d ¹⁰ 5p ³																											

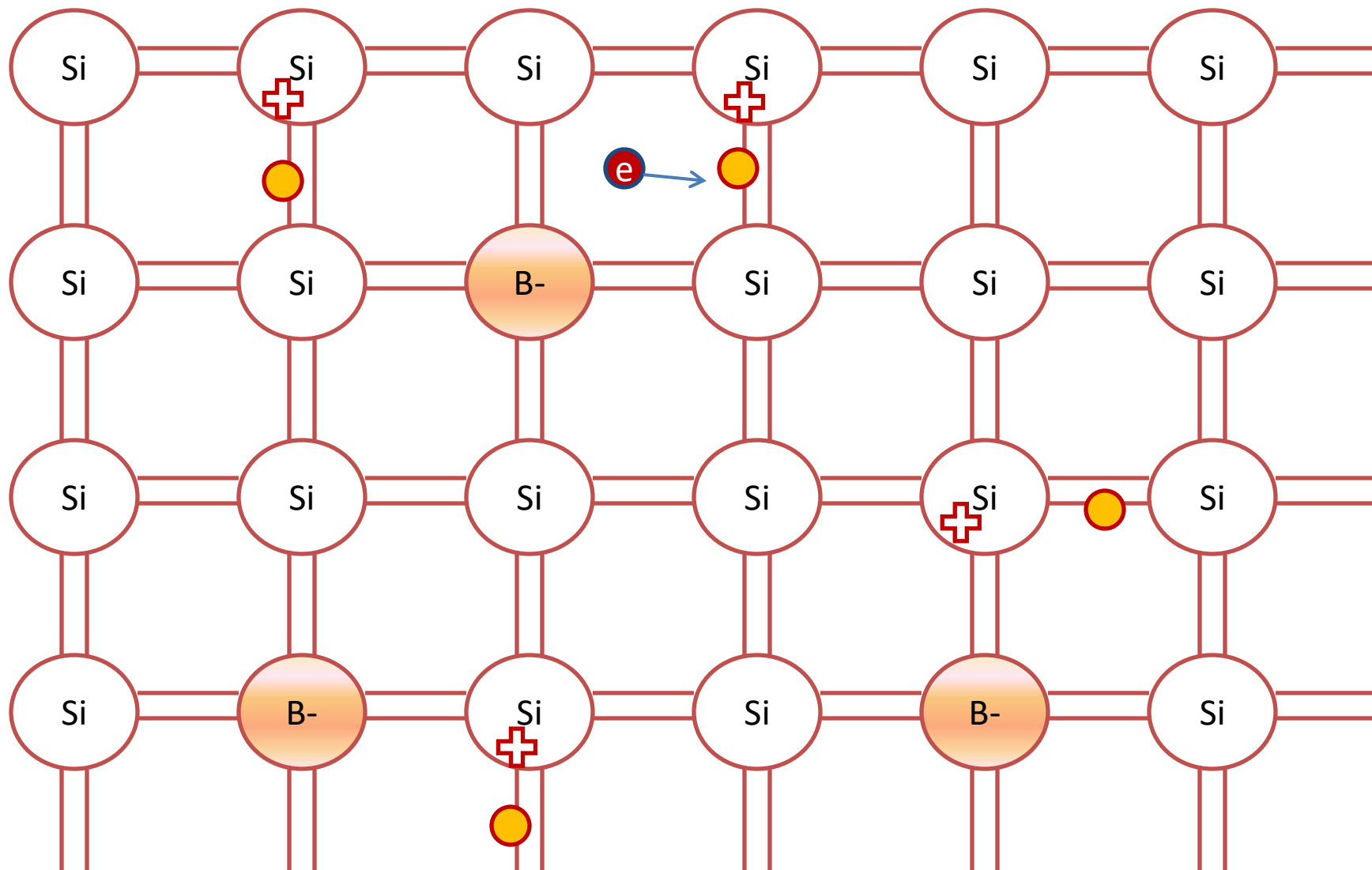


$T=0$



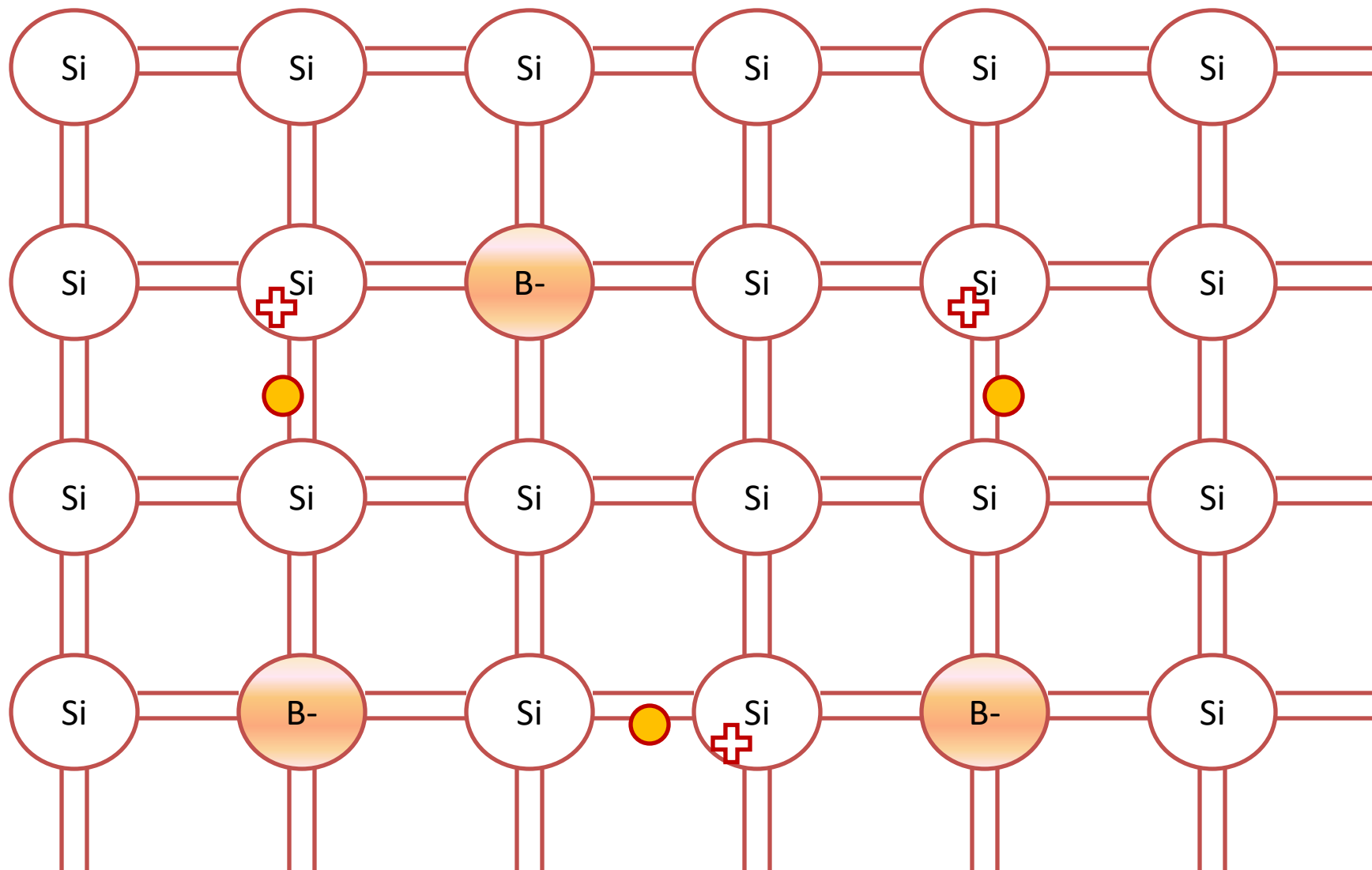
$T > 0$

$t = t_0$



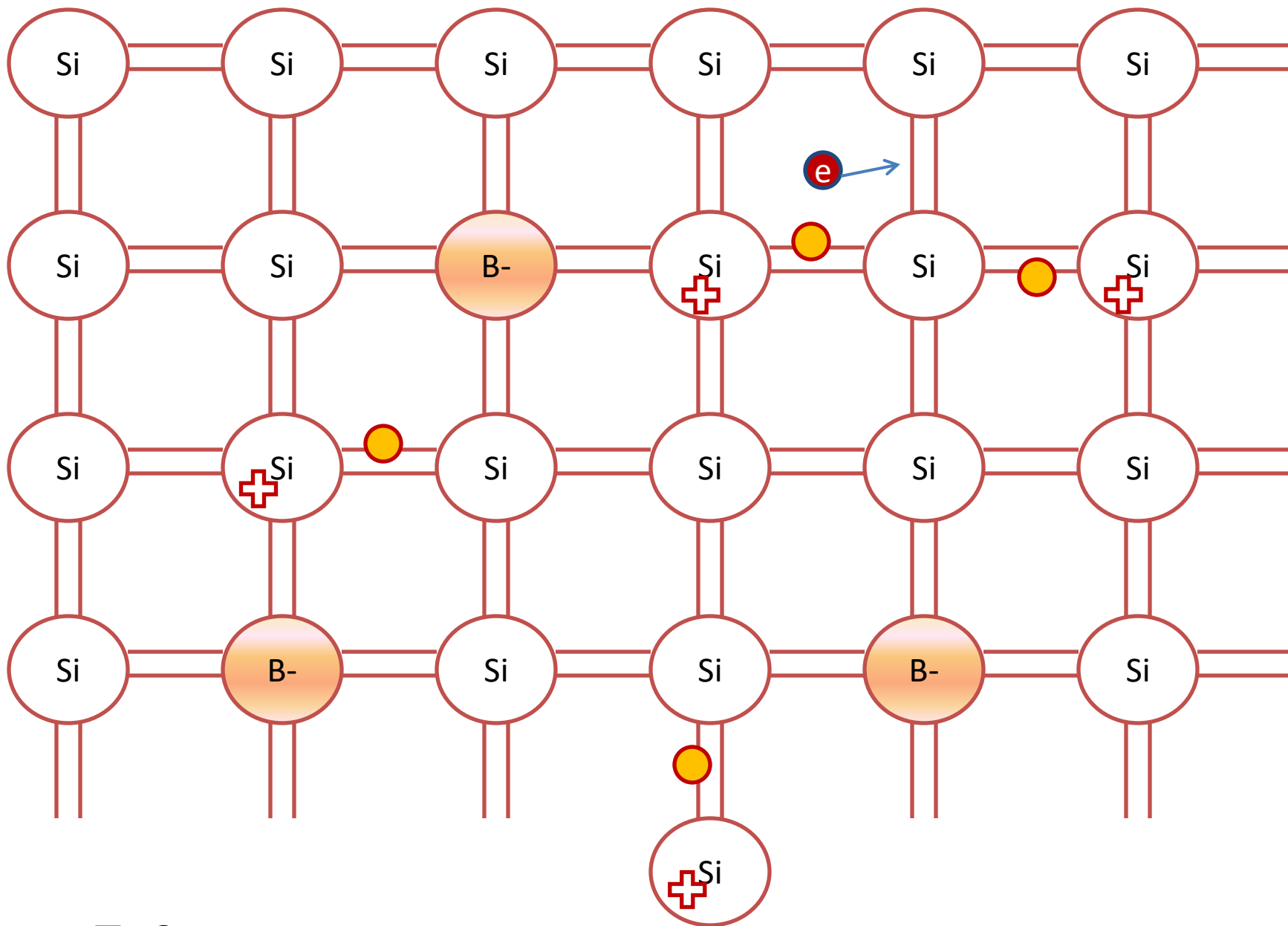
$T > 0$

$t = t_1$



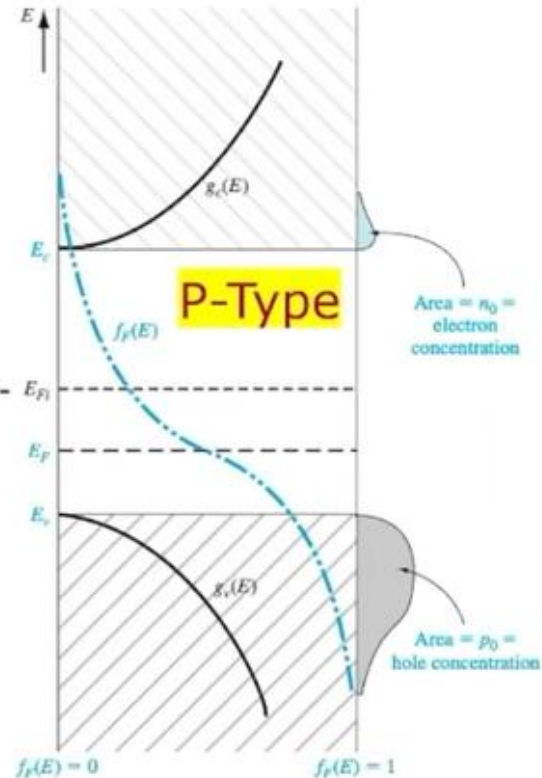
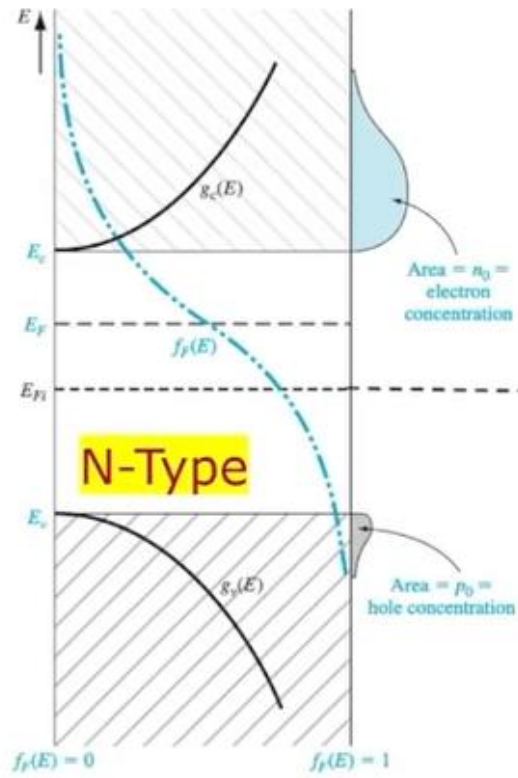
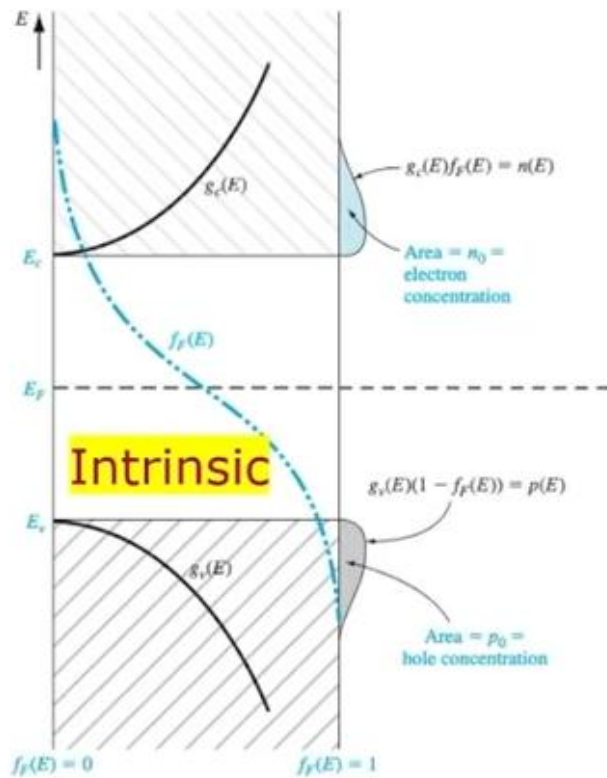
$T > 0$

$t = t_2$



$T > 0$

$t = t_3$



Ισχύει ο τύπος: $n \times p = n_i^2$

Δηλαδή στο πυρίτιο χωρίς νόθευση $n=p=10^{10} / \text{cm}^3$, άρα $n_i^2 = 10^{20} / \text{cm}^3$

Αν βάλουμε «βαριά» νόθευση $n=10^{18} / \text{cm}^3$:

Το n_i^2 θα παραμείνει $10^{20} / \text{cm}^3$ γιατί εξαρτάται μόνο από το ενεργειακό χάσμα και από την θερμοκρασία

Και η συγκέντρωση των οπών p θα γίνει $10^2 / \text{cm}^3$

Αυτό συμβαίνει γιατί ρυθμός παραγωγής των οπών παραμένει ο ίδιος αφού εξαρτάται από την θερμοκρασία και το ενεργειακό χάσμα, αλλά ο ρυθμός επανασύνδεσης ηλεκτρονίων και οπών μεγαλώνει πάρα πολύ επειδή εξαρτάται από τον συνολικό αριθμό ηλεκτρονίων και οπών.