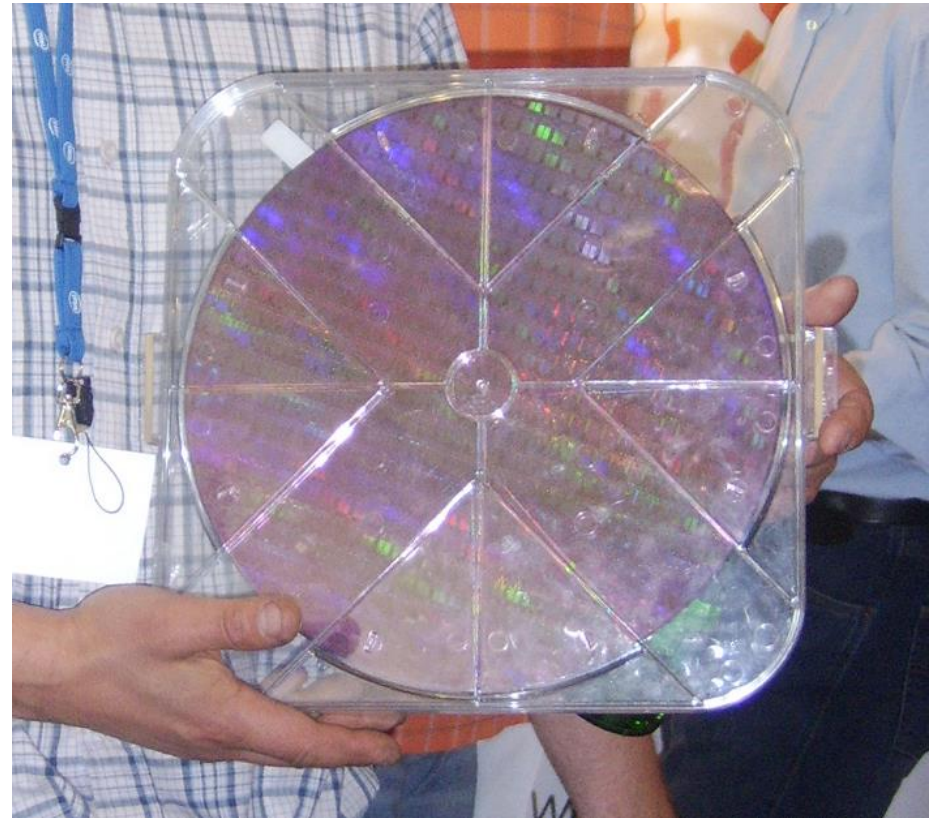


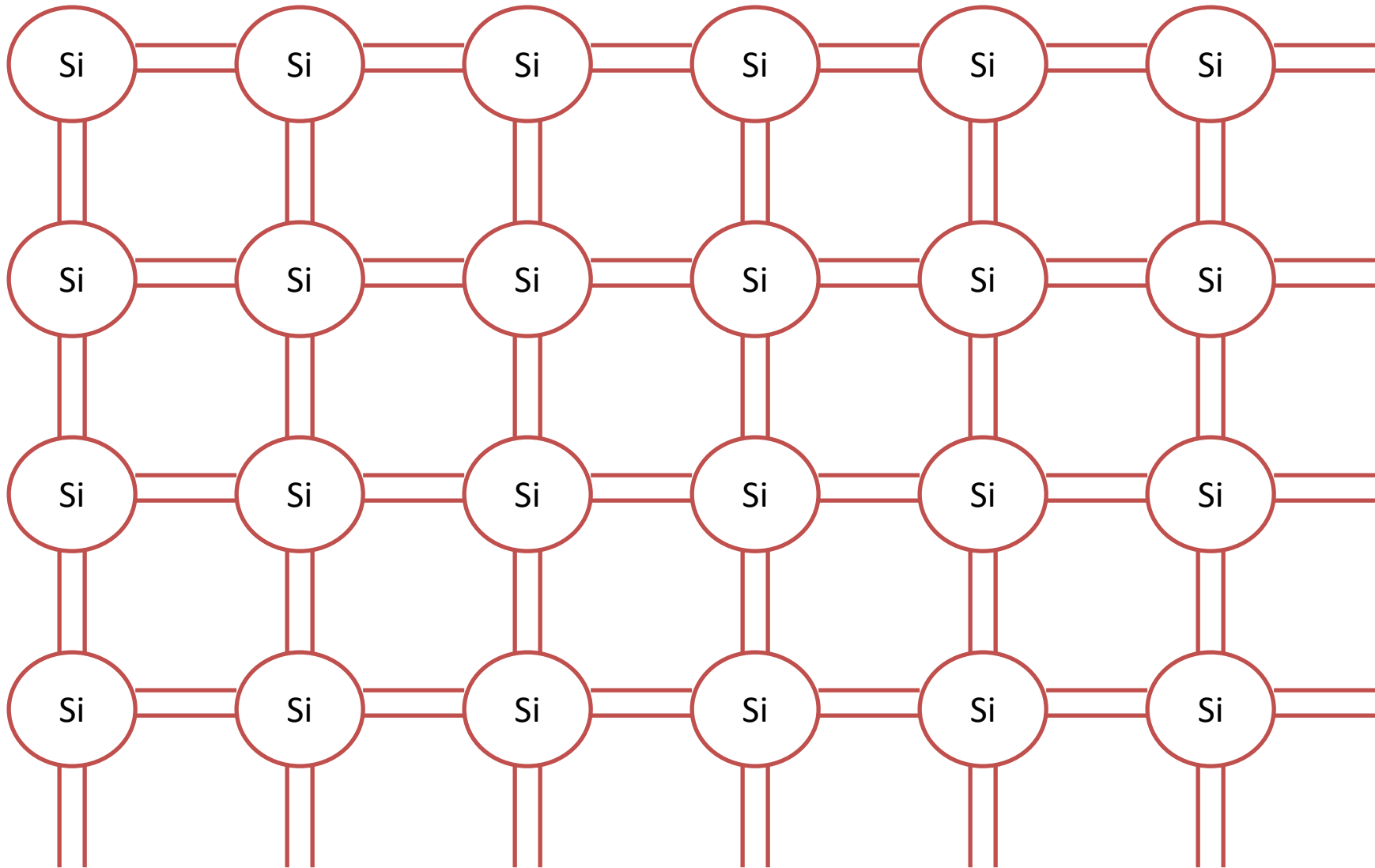
Ημιαγωγοί

Si (Πυρίτιο)

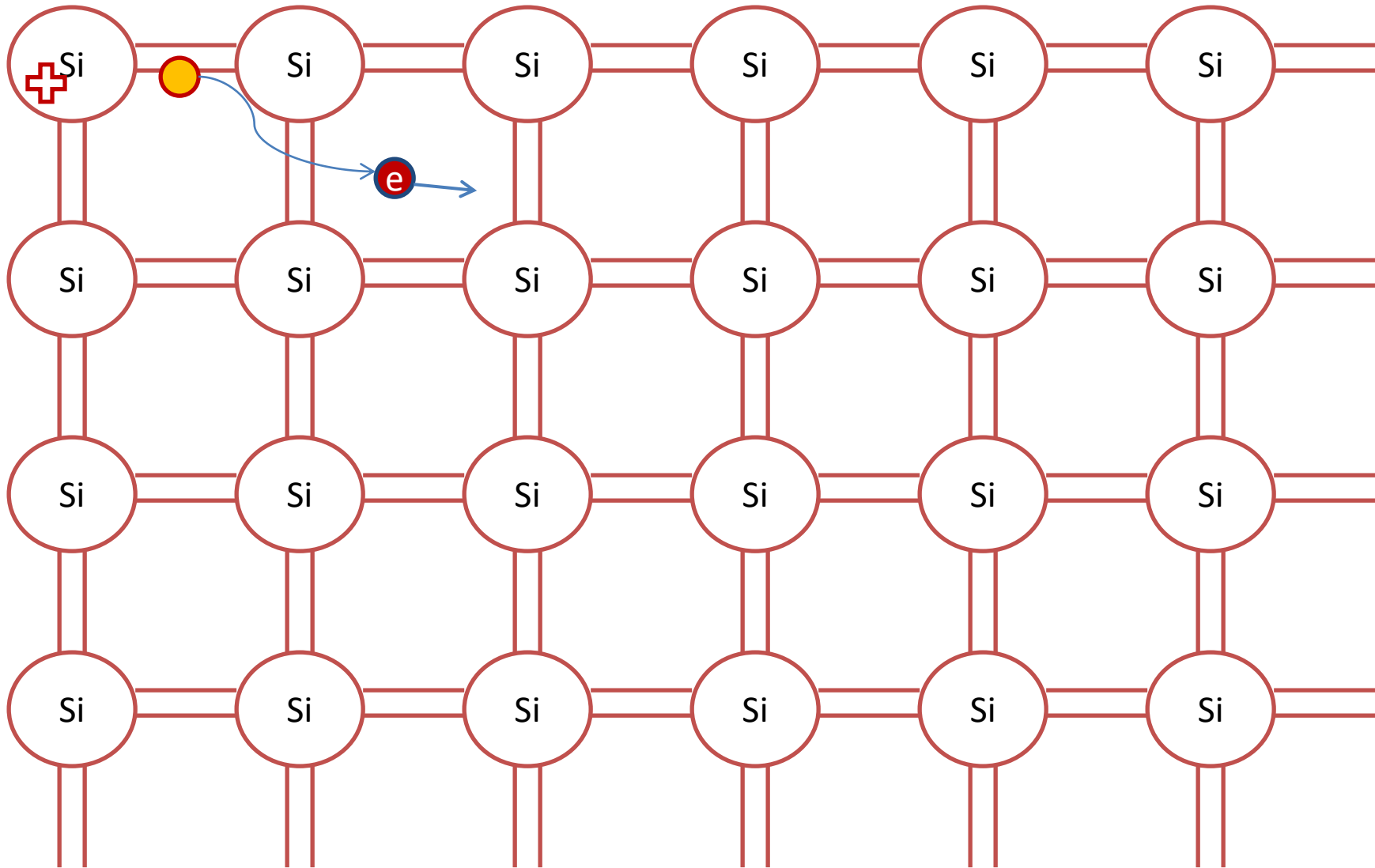


HOCHTECHNOLOGIE: EIN 300-MM-STAB AUS DER HIKARI-PRODUKTION.



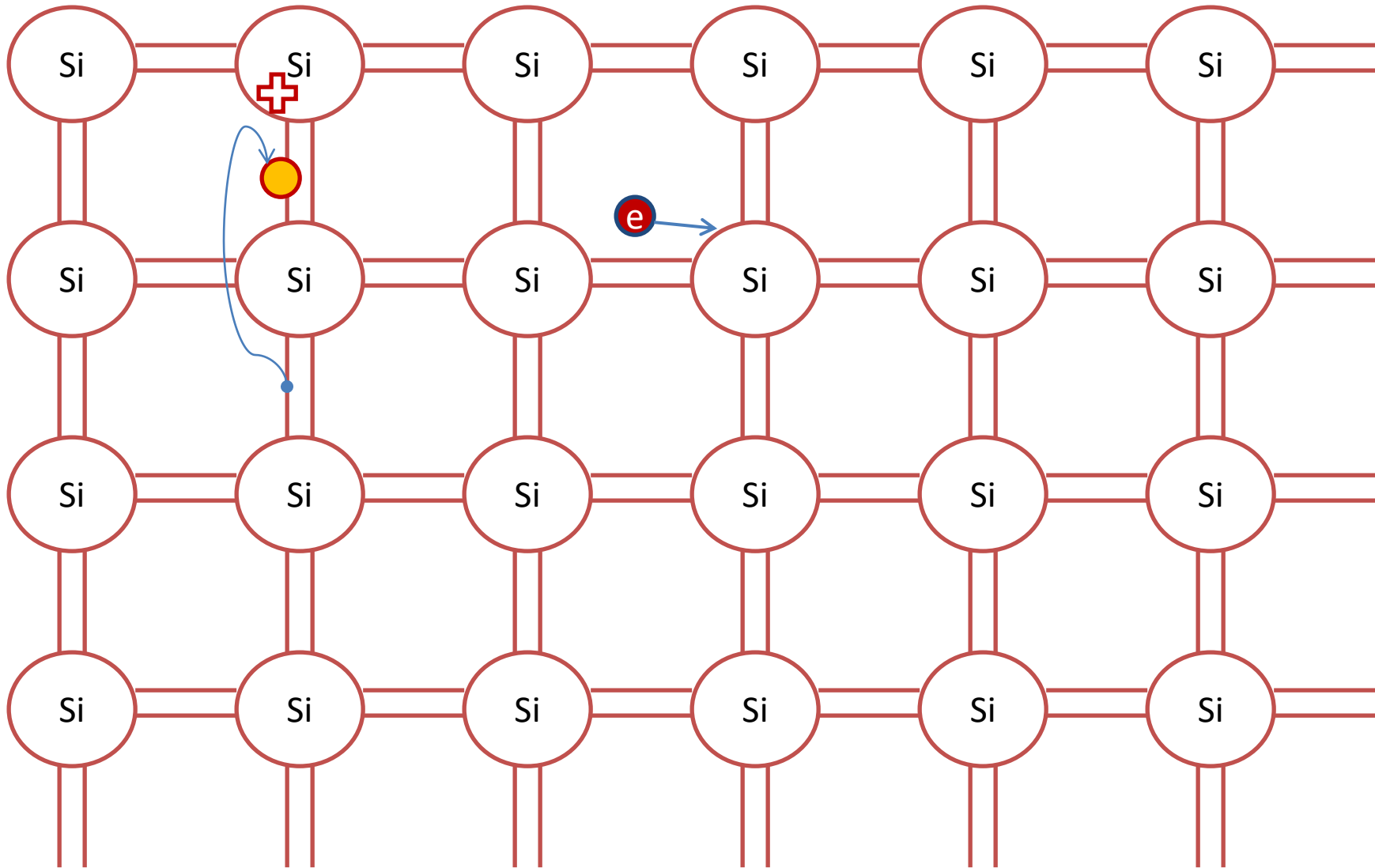


T=0



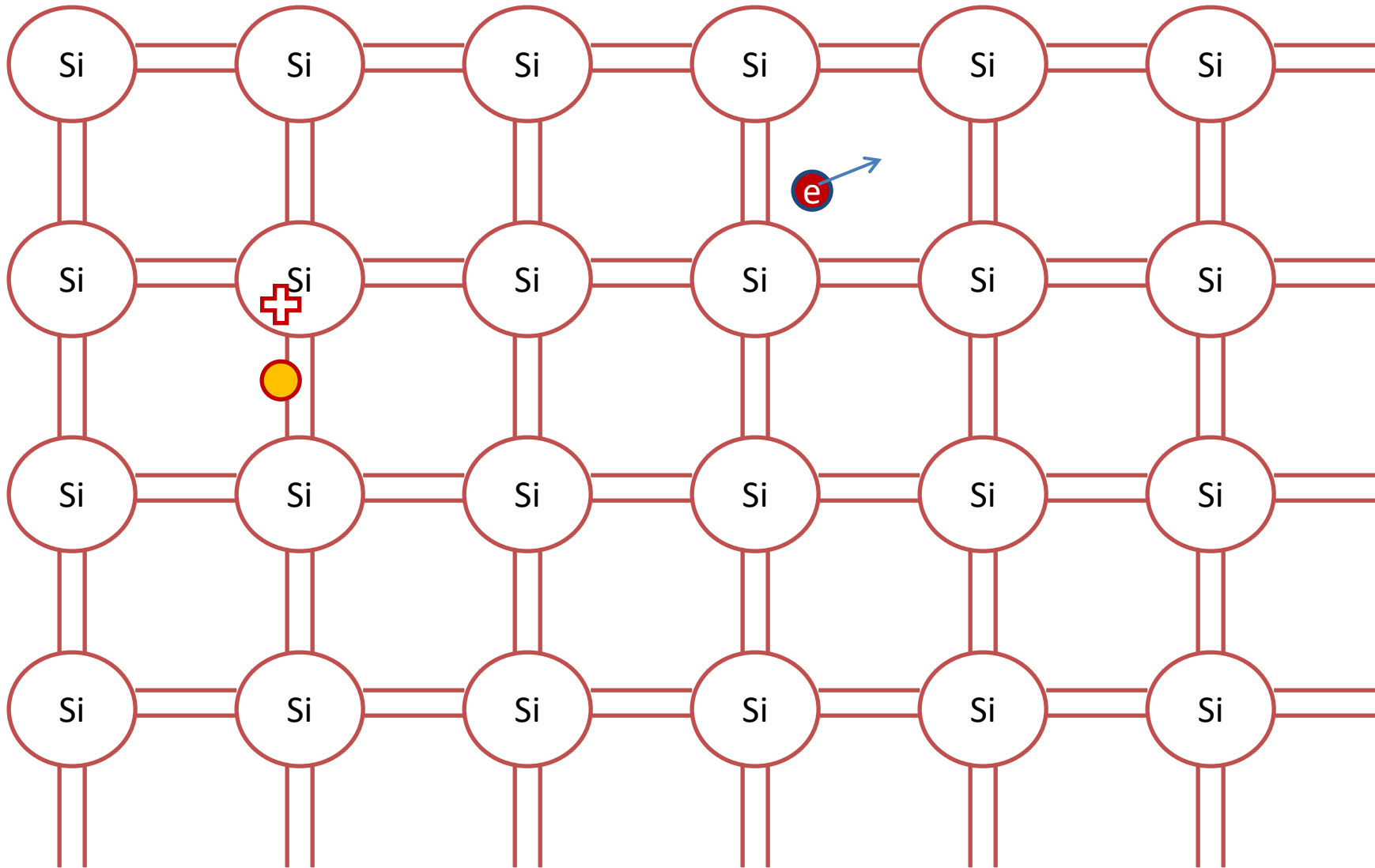
$T > 0$

$t = t_0$



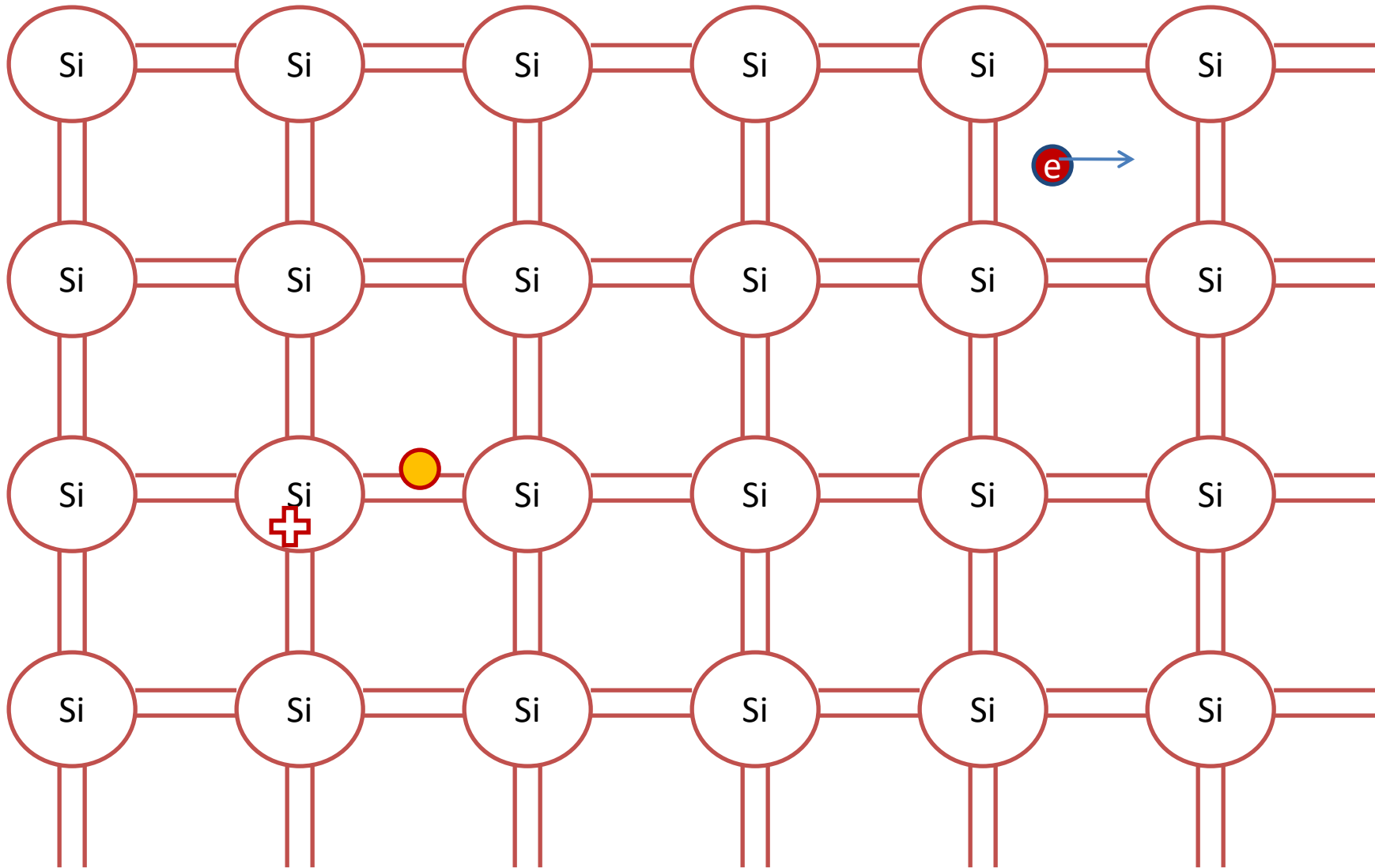
$T > 0$

$t = t_1$



$T > 0$

$t = t_2$



$T > 0$

$t = t_3$

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) : $1.12 \text{ eV} = 1.12 \cdot \text{φορτίο ηλεκτρονίου} \cdot 1\text{Volt} = 1.12 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Joules}$

n =αριθμός ελευθέρων ηλεκτρονίων/ cm^3 , p =αριθμός οπών/ cm^3

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 $kT/q_e = 25.8 \text{ mV}$, αρα $kT=25.8 \times 10^{-3} \text{ eV}$):

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

10^{10} μικρό νούμερο!! Σε σχέση με αριθμό ατόμων Si $\sim 5 \cdot 10^{22} / \text{cm}^3$

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

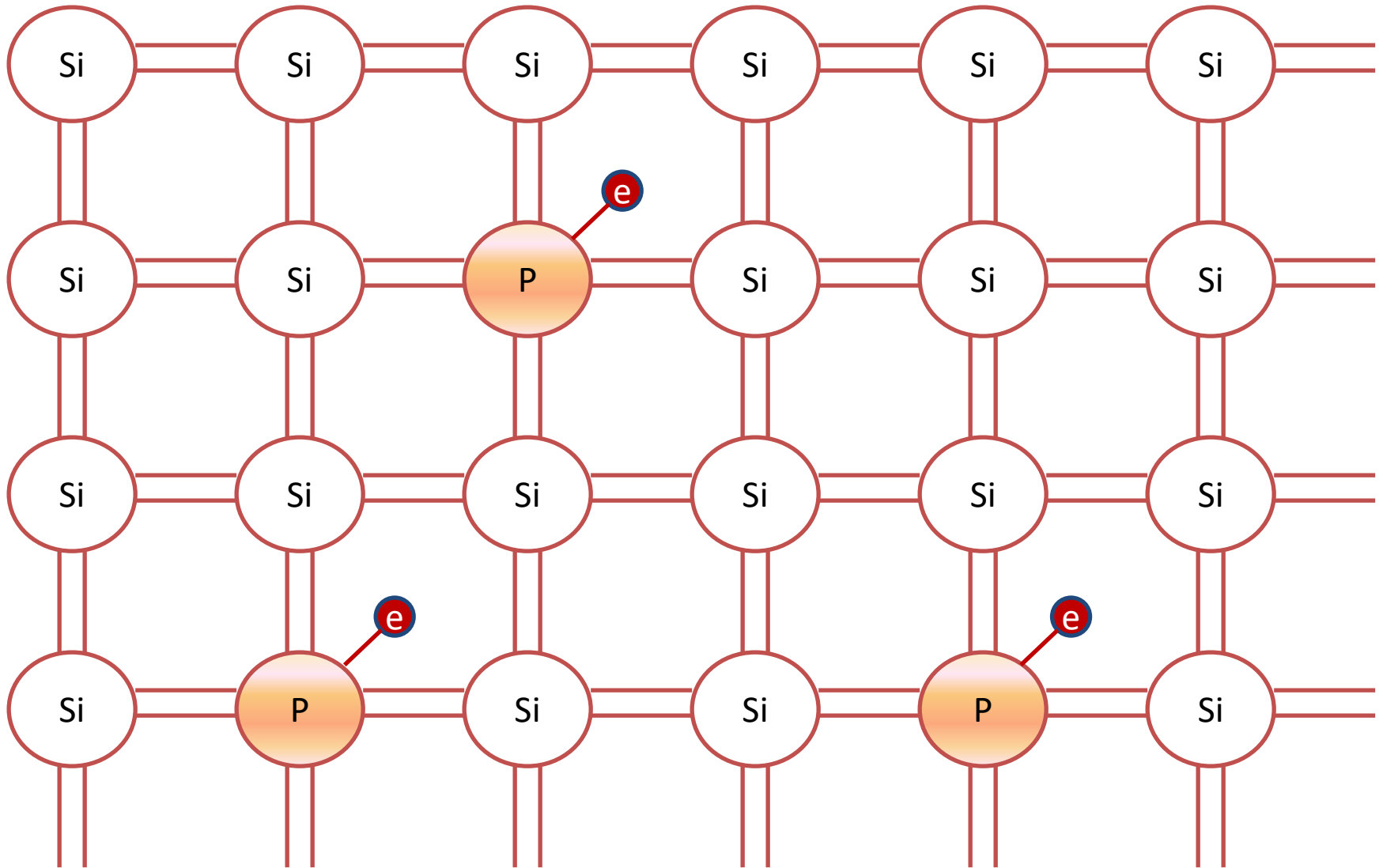
ΝΟΘΕΥΣΗ (DOPING)

ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ ΤΥΠΟΥ n

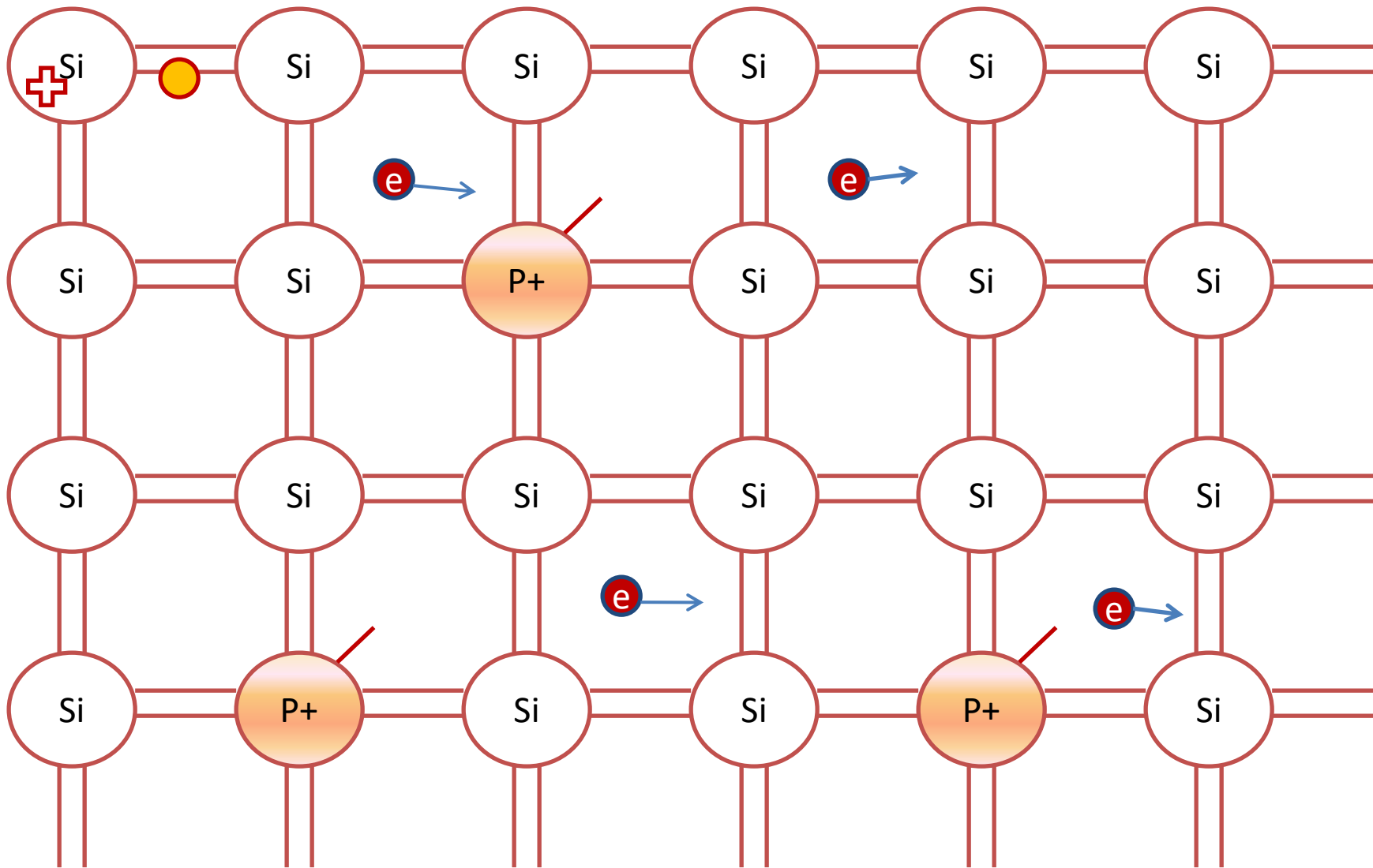
PERIODIC TABLE OF ELEMENTS

Pub  Chem

1 H Hydrogen <small>[1s¹]</small>																	2 He Helium <small>[1s²]</small>			
3 Li Lithium <small>[He]2s¹</small>	4 Be Beryllium <small>[He]2s²</small>																	10 Ne Neon <small>[He]2s²2p⁶</small>		
11 Na Sodium <small>[Ne]3s¹</small>	12 Mg Magnesium <small>[Ne]3s²</small>																	18 Ar Argon <small>[Ne]3s²3p⁶</small>		
19 K Potassium <small>[Ar]4s¹</small>	20 Ca Calcium <small>[Ar]4s²</small>	21 Sc Scandium <small>[Ar]3d¹4s²</small>	22 Ti Titanium <small>[Ar]3d²4s²</small>	23 V Vanadium <small>[Ar]3d³4s²</small>	24 Cr Chromium <small>[Ar]3d⁵4s¹</small>	25 Mn Manganese <small>[Ar]3d⁵4s²</small>	26 Fe Iron <small>[Ar]3d⁶4s²</small>	27 Co Cobalt <small>[Ar]3d⁷4s²</small>	28 Ni Nickel <small>[Ar]3d⁸4s²</small>	29 Cu Copper <small>[Ar]3d¹⁰4s¹</small>	30 Zn Zinc <small>[Ar]3d¹⁰4s²</small>	31 Ga Gallium <small>[Ar]3d¹⁰4s¹4p¹</small>	32 Ge Germanium <small>[Ar]3d¹⁰4s¹4p²</small>	33 As Arsenic <small>[Ar]3d¹⁰4s¹4p³</small>	34 Se Selenium <small>[Ar]3d¹⁰4s¹4p⁴</small>	35 Br Bromine <small>[Ar]3d¹⁰4s¹4p⁵</small>	5 B Boron <small>[He]2s²2p¹</small>	6 C Carbon <small>[He]2s²2p²</small>	7 N Nitrogen <small>[He]2s²2p³</small>	
37 Rb Rubidium <small>[Kr]5s¹</small>	38 Sr Strontium <small>[Kr]5s²</small>	39 Y Yttrium <small>[Kr]4d¹5s²</small>	40 Zr Zirconium <small>[Kr]4d²5s²</small>	41 Nb Niobium <small>[Kr]4d⁴5s¹</small>	42 Mo Molybdenum <small>[Kr]4d⁵5s¹</small>	43 Tc Technetium <small>[Kr]4d⁵5s²</small>	44 Ru Ruthenium <small>[Kr]4d⁷5s¹</small>	45 Rh Rhodium <small>[Kr]4d⁸5s¹</small>	46 Pd Palladium <small>[Kr]4d¹⁰</small>	47 Ag Silver <small>[Kr]4d¹⁰5s¹</small>	48 Cd Cadmium <small>[Kr]4d¹⁰5s²</small>	49 In Indium <small>[Kr]4d¹⁰5s¹5p¹</small>	50 Sn Tin <small>[Kr]4d¹⁰5s¹5p²</small>	51 Sb Antimony <small>[Kr]4d¹⁰5s¹5p³</small>	52 Te Tellurium <small>[Kr]4d¹⁰5s¹5p⁴</small>	53 I Iodine <small>[Kr]4d¹⁰5s¹5p⁵</small>	13 Al Aluminum <small>[Ne]3s²3p¹</small>	14 Si Silicon <small>[Ne]3s²3p²</small>	15 P Phosphorus <small>[Ne]3s²3p³</small>	
55 Cs Cesium <small>[Xe]6s¹</small>	56 Ba Barium <small>[Xe]6s²</small>		72 Hf Hafnium <small>[Xe]4f¹⁴6s²</small>	73 Ta Tantalum <small>[Xe]4f¹⁴6s²</small>	74 W Tungsten <small>[Xe]4f¹⁴6s²</small>	75 Re Rhenium <small>[Xe]4f¹⁴6s²</small>	76 Os Osmium <small>[Xe]4f¹⁴6s²</small>	77 Ir Iridium <small>[Xe]4f¹⁴6s²</small>	78 Pt Platinum <small>[Xe]4f¹⁴6s¹</small>	79 Au Gold <small>[Xe]4f¹⁴6s¹</small>	80 Hg Mercury <small>[Xe]4f¹⁴6s²</small>	81 Tl Thallium <small>[Xe]4f¹⁴6s¹6p¹</small>	82 Pb Lead <small>[Xe]4f¹⁴6s¹6p²</small>	83 Bi Bismuth <small>[Xe]4f¹⁴6s¹6p³</small>	84 Po Polonium <small>[Xe]4f¹⁴6s¹6p⁴</small>	85 At Astatine <small>[Xe]4f¹⁴6s¹6p⁵</small>				
87 Fr Francium <small>[Rn]7s¹</small>	88 Ra Radium <small>[Rn]7s²</small>		104 Rf Rutherfordium <small>[Rn]5f¹⁴6s²</small>	105 Db Dubnium <small>[Rn]5f¹⁴6s²</small>	106 Sg Seaborgium <small>[Rn]5f¹⁴6s²</small>	107 Bh Bohrium <small>[Rn]5f¹⁴6s²</small>	108 Hs Hassium <small>[Rn]5f¹⁴6s²</small>	109 Mt Meitnerium <small>[Rn]5f¹⁴6s²</small>	110 Ds Darmstadtium <small>[Rn]5f¹⁴6s²</small>	111 Rg Roentgenium <small>[Rn]5f¹⁴6s²</small>	112 Cn Copernicium <small>[Rn]5f¹⁴6s²</small>	113 Nh Nihonium <small>[Rn]5f¹⁴6s¹7s¹</small>	114 Fl Flerovium <small>[Rn]5f¹⁴6s¹7s¹</small>	115 Mc Moscovium <small>[Rn]5f¹⁴6s¹7s¹</small>	116 Lv Livermorium <small>[Rn]5f¹⁴6s¹7s¹</small>	117 Ts Tennessine <small>[Rn]5f¹⁴6s¹7s¹</small>				
			57 La Lanthanum <small>[Xe]5d¹6s²</small>	58 Ce Cerium <small>[Xe]4f¹6s²</small>	59 Pr Praseodymium <small>[Xe]4f²6s²</small>	60 Nd Neodymium <small>[Xe]4f³6s²</small>	61 Pm Promethium <small>[Xe]4f⁵6s²</small>	62 Sm Samarium <small>[Xe]4f⁶6s²</small>	63 Eu Europium <small>[Xe]4f⁷6s²</small>	64 Gd Gadolinium <small>[Xe]4f⁷6s²</small>	65 Tb Terbium <small>[Xe]4f⁹6s²</small>	66 Dy Dysprosium <small>[Xe]4f¹⁰6s²</small>	67 Ho Holmium <small>[Xe]4f¹¹6s²</small>	68 Er Erbium <small>[Xe]4f¹²6s²</small>	69 Tm Thulium <small>[Xe]4f¹³6s²</small>	70 Yb Ytterbium <small>[Xe]4f¹⁴6s²</small>				
			89 Ac Actinium <small>[Rn]6d¹7s²</small>	90 Th Thorium <small>[Rn]6d²7s²</small>	91 Pa Protactinium <small>[Rn]5f²6d¹7s²</small>	92 U Uranium <small>[Rn]5f³6d¹7s²</small>	93 Np Neptunium <small>[Rn]5f⁴6d¹7s²</small>	94 Pu Plutonium <small>[Rn]5f⁶7s²</small>	95 Am Americium <small>[Rn]5f⁷7s²</small>	96 Cm Curium <small>[Rn]5f⁸7s²</small>	97 Bk Berkelium <small>[Rn]5f⁹7s²</small>	98 Cf Californium <small>[Rn]5f¹⁰7s²</small>	99 Es Einsteinium <small>[Rn]5f¹¹7s²</small>	100 Fm Fermium <small>[Rn]5f¹²7s²</small>	101 Md Mendelevium <small>[Rn]5f¹³7s²</small>	102 No Nobelium <small>[Rn]5f¹⁴7s²</small>				
																	31 Ga Gallium <small>[Ar]4s²3d¹⁰4p¹</small>	32 Ge Germanium <small>[Ar]4s²3d¹⁰4p²</small>	33 As Arsenic <small>[Ar]4s²3d¹⁰4p³</small>	
																		49 In Indium <small>[Kr]5s²4d¹⁰5p¹</small>	50 Sn Tin <small>[Kr]5s²4d¹⁰5p²</small>	51 Sb Antimony <small>[Kr]5s²4d¹⁰5p³</small>

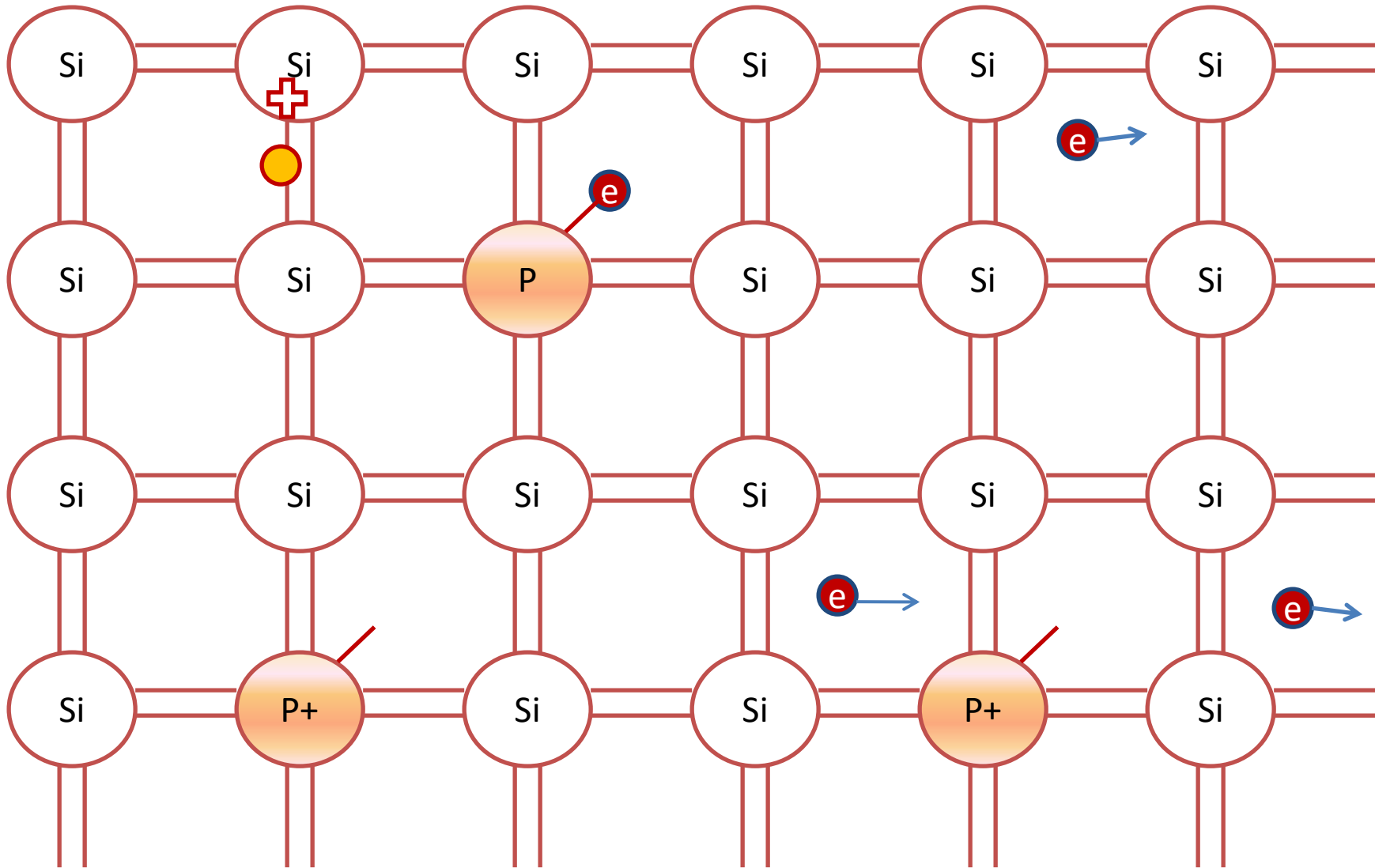


$T=0$



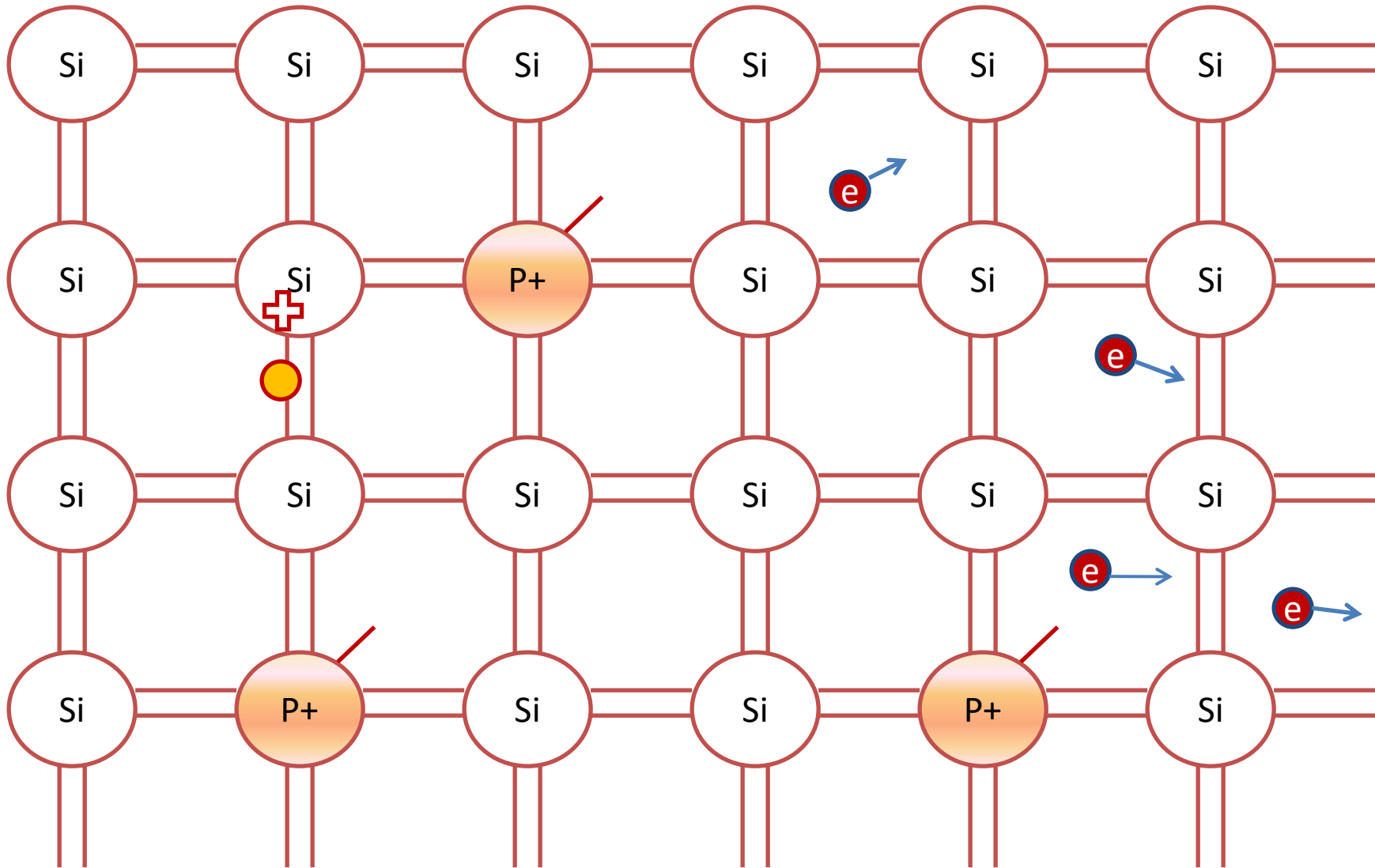
$T > 0$

$t = t_0$



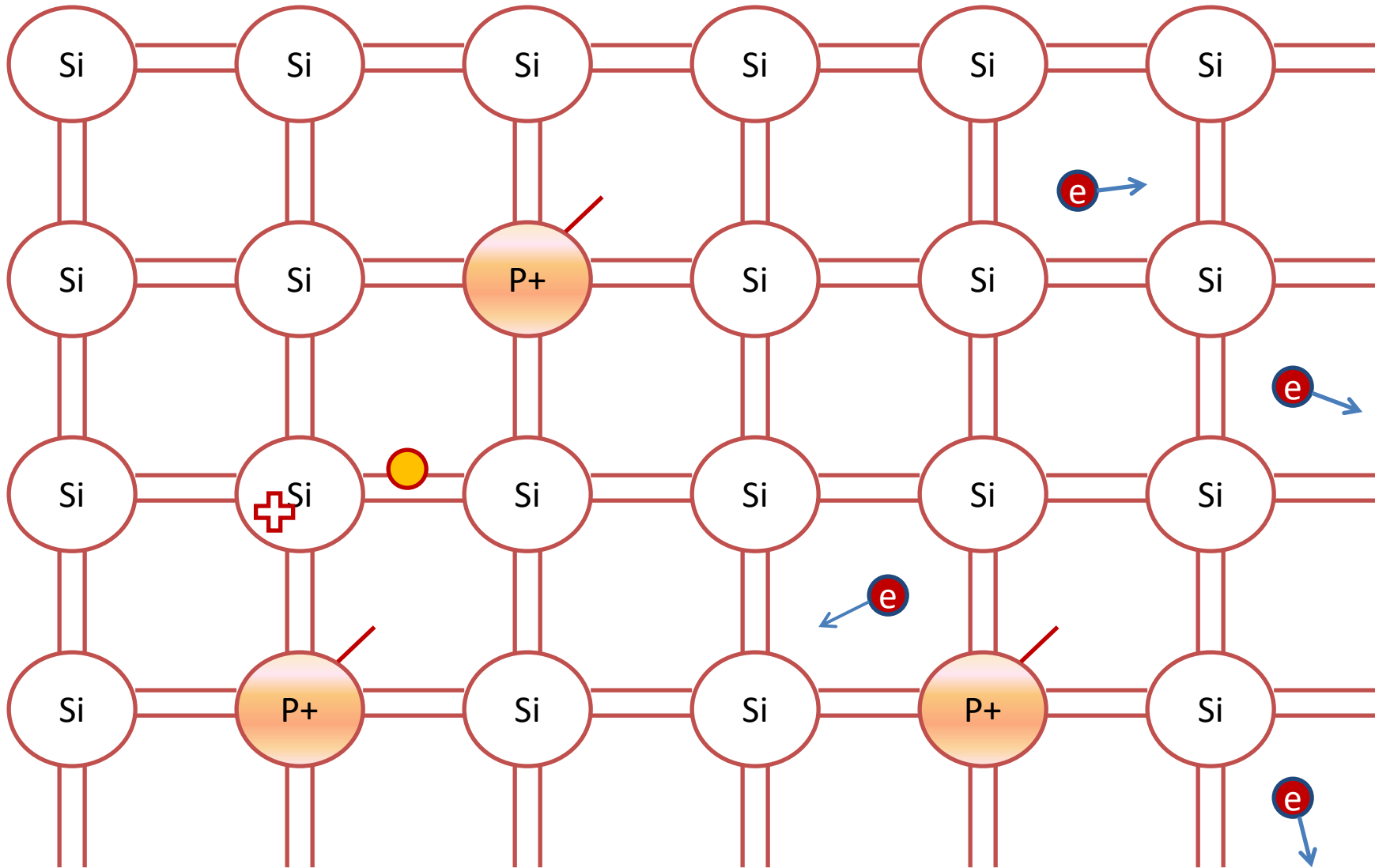
$T > 0$

$t = t_1$



$T > 0$

$t = t_2$



$T > 0$

$t = t_3$

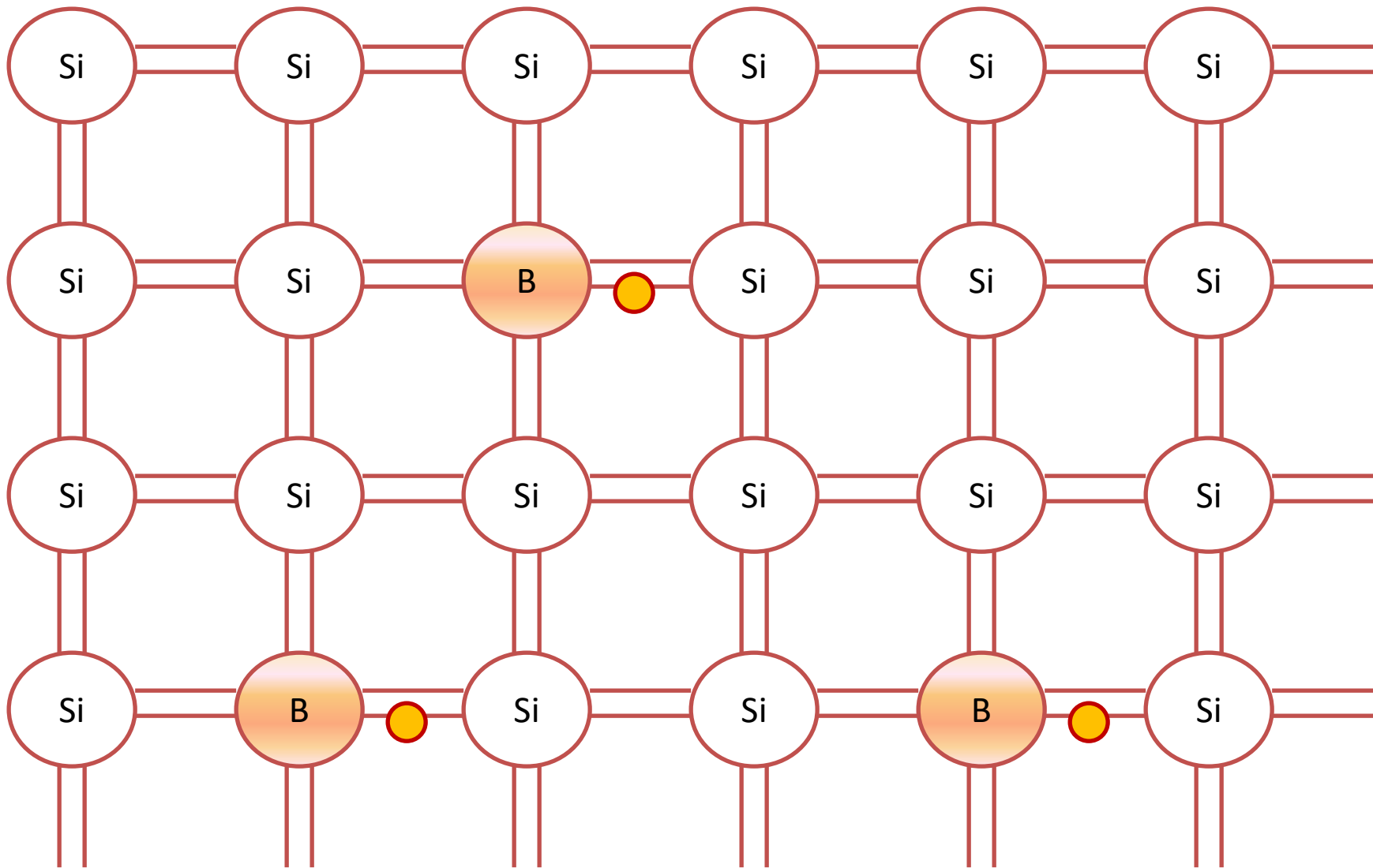
ΝΟΘΕΥΣΗ (DOPING)

ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ ΤΥΠΟΥ p

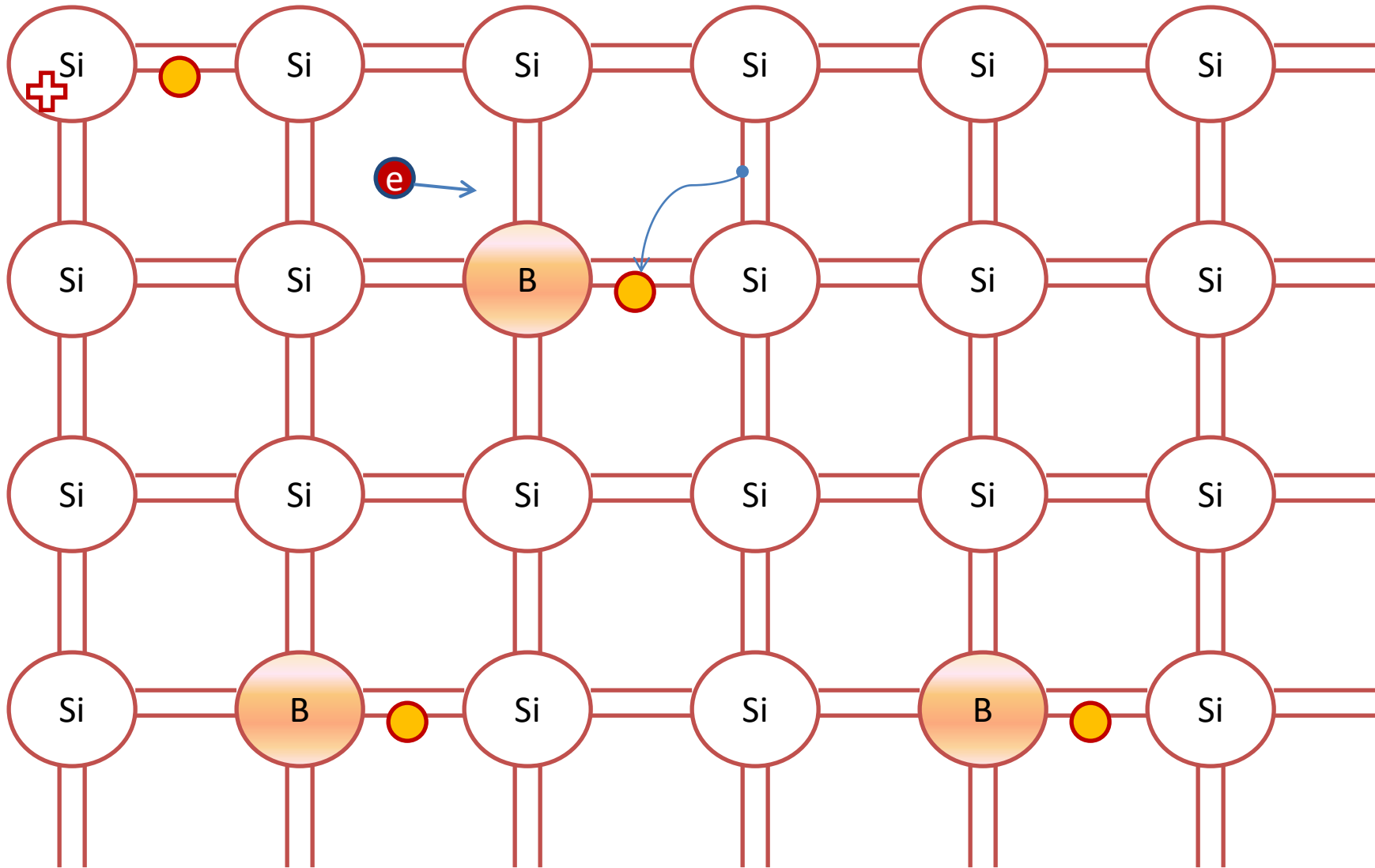
PERIODIC TABLE OF ELEMENTS

Pub  Chem

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 $[Ar]3d^1 4s^2$	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 $[Ar]3d^10 4s^2 4p^5$	5 B Boron $[He]2s^2 2p^1$	6 C Carbon $[He]2s^2 2p^2$	7 N Nitrogen $[He]2s^2 2p^3$																
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 $[Kr]4d^10 5s^2 5p^5$	13 Al Aluminum $[Ne]3s^2 3p^1$	14 Si Silicon $[Ne]3s^2 3p^2$	15 P Phosphorus $[Ne]3s^2 3p^3$																
55 Cs Cesium $[Xe]6s^1$	56 Ba Barium $[Xe]6s^2$		72 Hf Hafnium $[Xe]4f^14 5d^2 6s^2$	73 Ta Tantalum $[Xe]4f^14 5d^3 6s^2$	74 W Tungsten $[Xe]4f^14 5d^4 6s^2$	75 Re Rhenium $[Xe]4f^14 5d^5 6s^2$	76 Os Osmium $[Xe]4f^14 5d^6 6s^2$	77 Ir Iridium $[Xe]4f^14 5d^7 6s^2$	78 Pt Platinum $[Xe]4f^14 5d^9 6s^1$	79 Au Gold $[Xe]4f^14 5d^10 6s^1$	80 Hg Mercury $[Xe]4f^14 5d^10 6s^2$	81 Tl Thallium $[Xe]4f^14 5d^10 6s^2 6p^1$	82 Pb Lead $[Xe]4f^14 5d^10 6s^2 6p^2$	83 Bi Bismuth $[Xe]4f^14 5d^10 6s^2 6p^3$	84 Po Polonium $[Xe]4f^14 5d^10 6s^2 6p^4$	85 At Astatine $[Xe]4f^14 5d^10 6s^2 6p^5$	17 Cl Chlorine $[Ne]3s^2 3p^5$	18 Ar Argon $[Ne]3s^2 3p^6$	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 $[Ar]3d^10 4s^2 4p^5$
87 Fr Francium $[Rn]7s^1$	88 Ra Radium $[Rn]7s^2$		104 Rf Rutherfordium $[Rn]5f^14 6d^2 7s^2$	105 Db Dubnium $[Rn]5f^14 6d^3 7s^2$	106 Sg Seaborgium $[Rn]5f^14 6d^4 7s^2$	107 Bh Bohrium $[Rn]5f^14 6d^5 7s^2$	108 Hs Hassium $[Rn]5f^14 6d^6 7s^2$	109 Mt Meitnerium $[Rn]5f^14 6d^7 7s^2$	110 Ds Darmstadtium $[Rn]5f^14 6d^8 7s^2$	111 Rg Roentgenium $[Rn]5f^14 6d^9 7s^2$	112 Cn Copernicium $[Rn]5f^14 6d^10 7s^2$	113 Nh Nihonium $[Rn]5f^14 6d^10 7s^2 7p^1$	114 Fl Flerovium $[Rn]5f^14 6d^10 7s^2 7p^2$	115 Mc Moscovium $[Rn]5f^14 6d^10 7s^2 7p^3$	116 Lv Livermorium $[Rn]5f^14 6d^10 7s^2 7p^4$	117 Ts Tennessine $[Rn]5f^14 6d^10 7s^2 7p^5$	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 $[Ar]3d^10 4s^2 4p^5$				
57 La Lanthanum $[Xe]5d^1 6s^2$	58 Ce Cerium $[Xe]4f^1 5d^1 6s^2$	59 Pr Praseodymium $[Xe]4f^3 6s^2$	60 Nd Neodymium $[Xe]4f^4 6s^2$	61 Pm Promethium $[Xe]4f^5 6s^2$	62 Sm Samarium $[Xe]4f^6 6s^2$	63 Eu Europium $[Xe]4f^7 6s^2$	64 Gd Gadolinium $[Xe]4f^7 5d^1 6s^2$	65 Tb Terbium $[Xe]4f^9 6s^2$	66 Dy Dysprosium $[Xe]4f^10 6s^2$	67 Ho Holmium $[Xe]4f^11 6s^2$	68 Er Erbium $[Xe]4f^12 6s^2$	69 Tm Thulium $[Xe]4f^13 6s^2$	70 Yb Ytterbium $[Xe]4f^14 6s^2$	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 $[Kr]5s^2 4d^{10} 5p^3$																
89 Ac Actinium $[Rn]7s^2$	90 Th Thorium $[Rn]6d^2 7s^2$	91 Pa Protactinium $[Rn]5f^2 6d^1 7s^2$	92 U Uranium $[Rn]5f^3 6d^1 7s^2$	93 Np Neptunium $[Rn]5f^4 6d^1 7s^2$	94 Pu Plutonium $[Rn]5f^6 7s^2$	95 Am Americium $[Rn]5f^7 7s^2$	96 Cm Curium $[Rn]5f^8 7s^2$	97 Bk Berkelium $[Rn]5f^9 7s^2$	98 Cf Californium $[Rn]5f^10 7s^2$	99 Es Einsteinium $[Rn]5f^11 7s^2$	100 Fm Fermium $[Rn]5f^12 7s^2$	101 Md Mendelevium $[Rn]5f^13 7s^2$	102 No Nobelium $[Rn]5f^14 7s^2$	49 In Indium $[Kr]5s^2 4d^{10} 5p^1$	50 Sn Tin $[Kr]5s^2 4d^{10} 5p^2$	51 Sb Antimony $[Kr]5s^2 4d^{10} 5p^3$																			

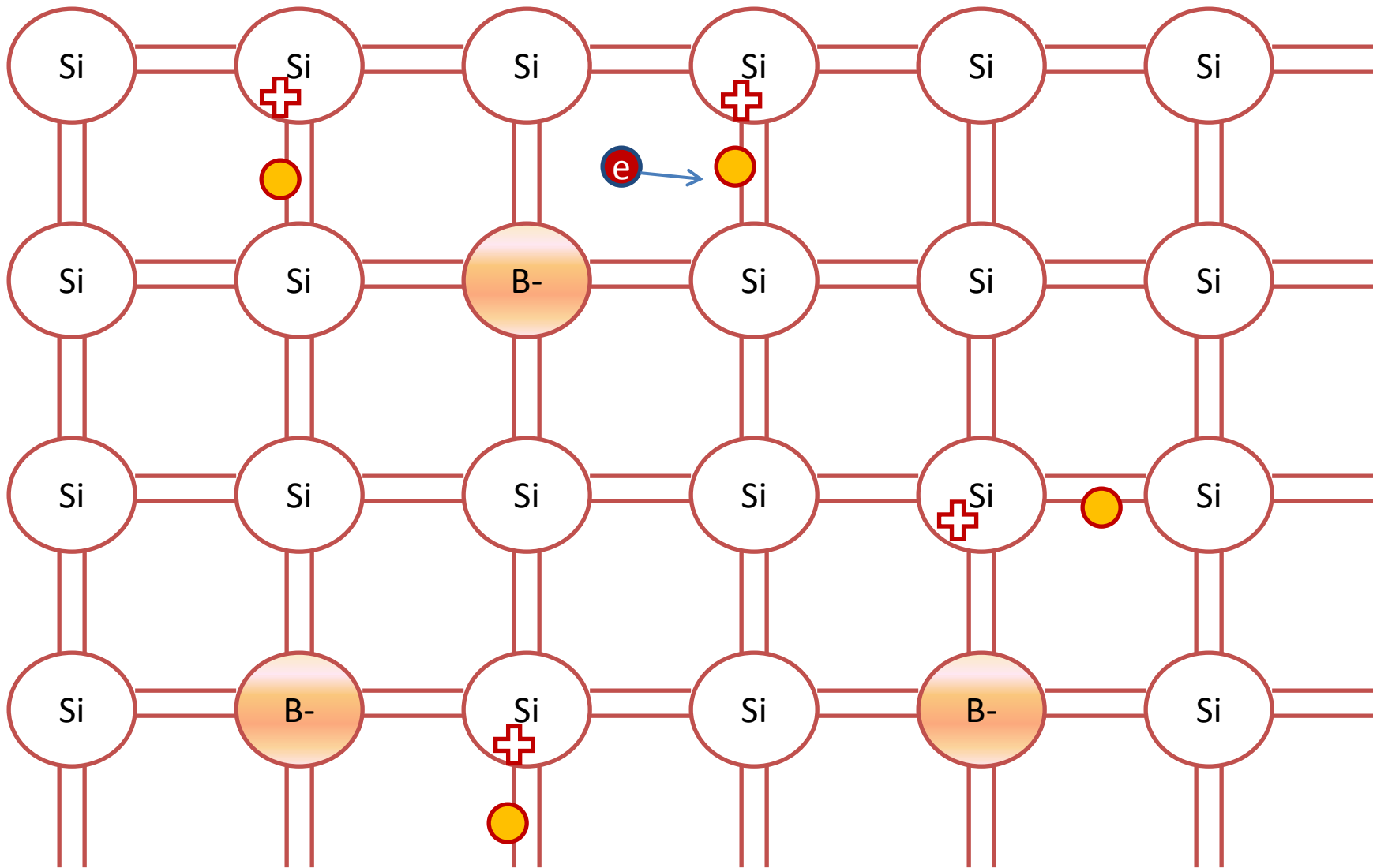


T=0



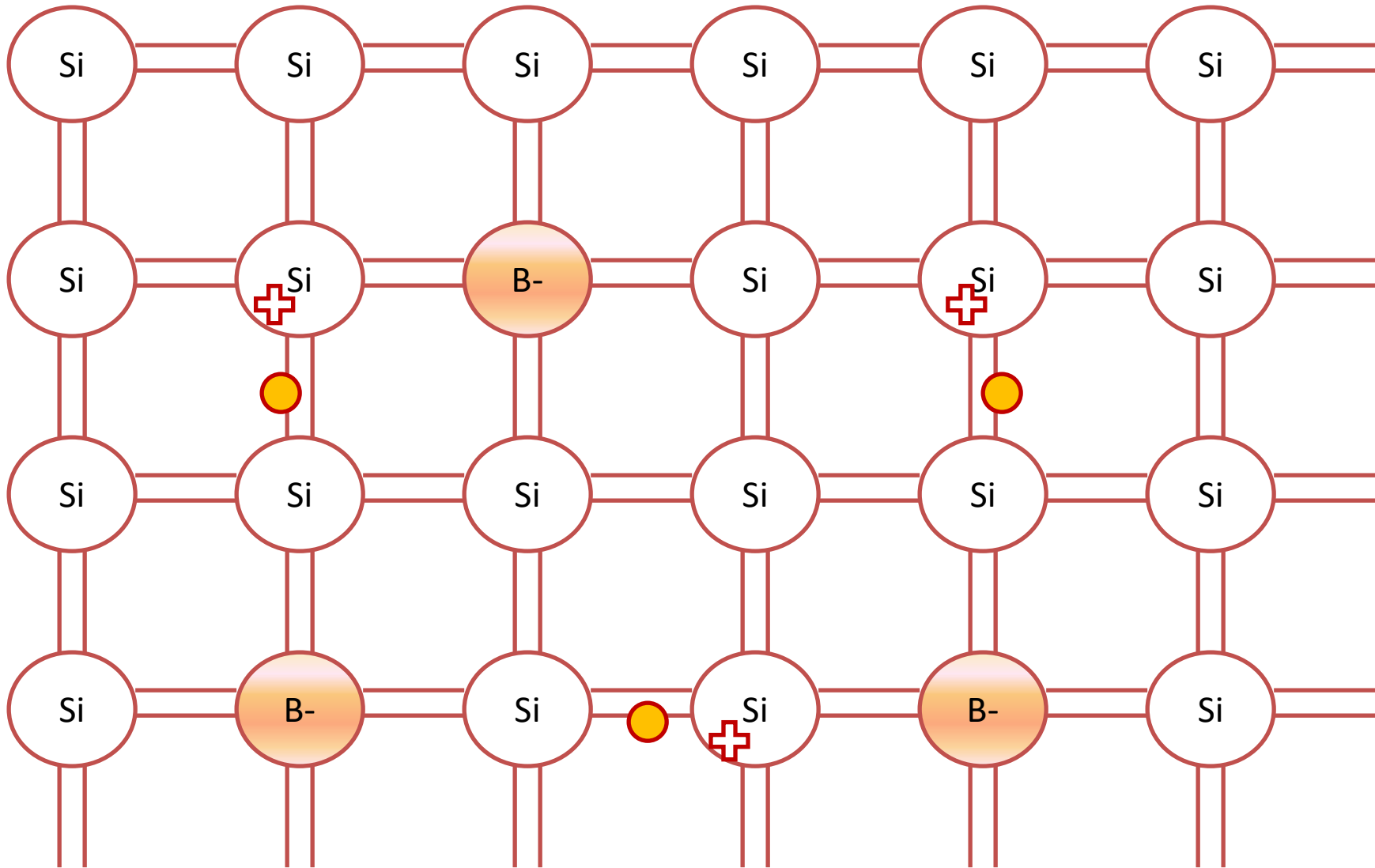
$T > 0$

$t = t_0$



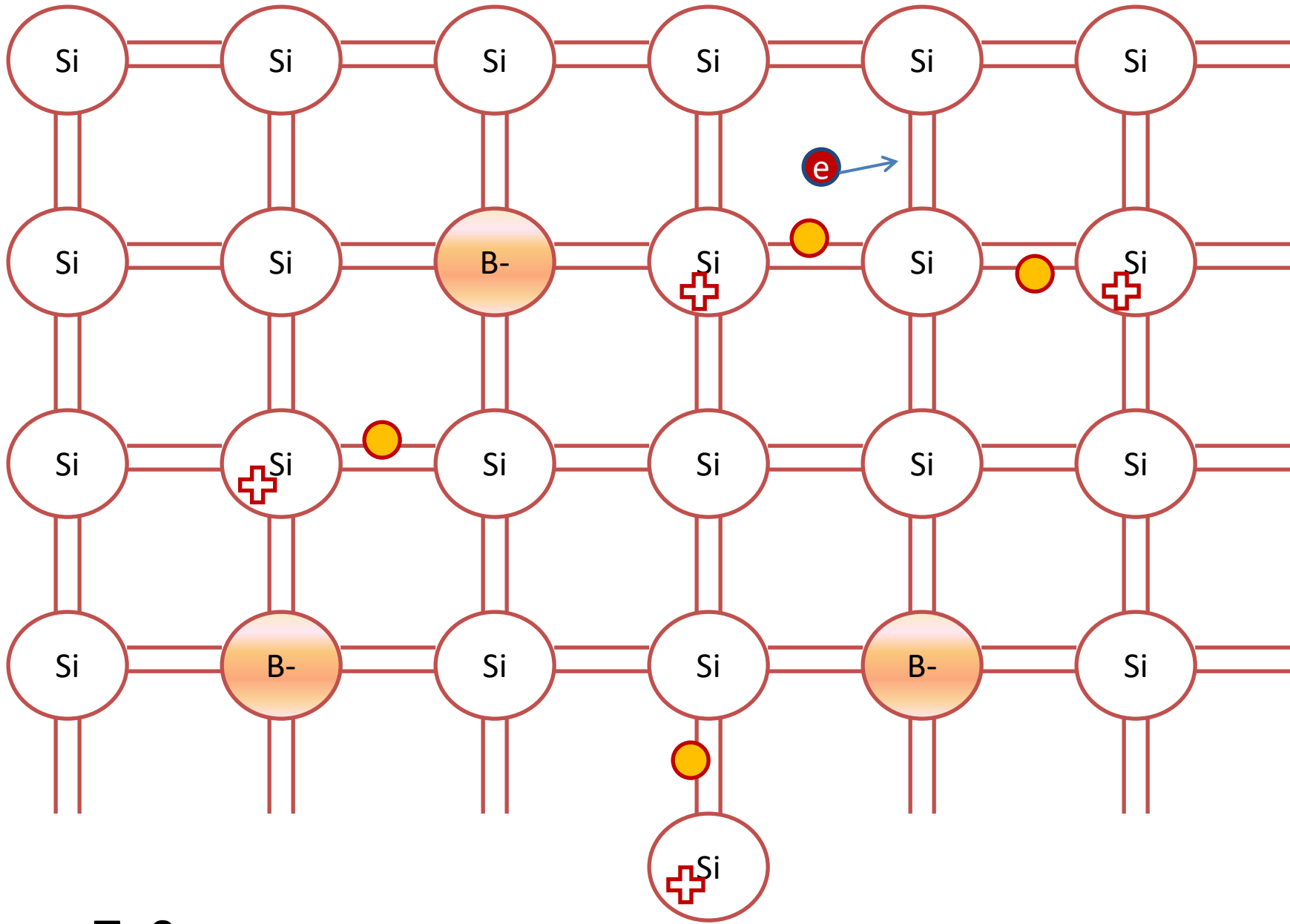
$T > 0$

$t = t_1$



$T > 0$

$t = t_2$



$T > 0$

$t = t_3$

$n=10^{15} / \text{cm}^3$ «ελαφρή» νόθευση

Ο τύπος ισχύει:

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

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

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

Στο πυρίτιο με νόθευση $n=10^{18} / \text{cm}^3$

η συγκέντρωση των οπών $p = 10^2 = (10^{20} / 10^{18}) \text{ cm}^3$

Δηλαδή 100 εκατομμύρια φορές (8 τάξεις μεγέθους) μικρότερη απ' όσο στο ανόθευτο πυρίτιο.

Αυτό συμβαίνει γιατί κάποια από τα πολύ περισσότερα ηλεκτρόνια που δίνει το πεντασθενές στοιχείο «επανασυνδέονται» με τις οπές που παράγονται λόγω θερμικής διέγερσης με αποτέλεσμα να πέφτει ο αριθμός των οπών κάτω από το κανονικό

Ημιαγωγός χωρίς νόθευση: 10^{10} ηλεκτρόνια ή οπές σε ένα κυβικό εκατοστό

Ημιαγωγός με «ελαφριά» νόθευση έχει 10^{15} ηλεκτρόνια ή οπές επιπλέον εξαιτίας του πεντασθενούς στοιχείου. Άρα σε κάθε 100 χιλιάδες ηλεκτρόνια (οπές) εξαιτίας της νόθευσης αντιστοιχεί και ένα ηλεκτρόνιο (οπή) που παράγεται θερμικά στο πυρίτιο είτε είναι νοθευμένο είτε ανόθευτο (ενδογενές).