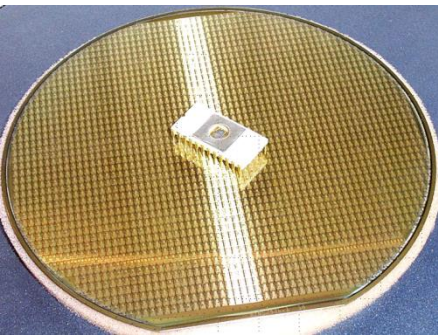
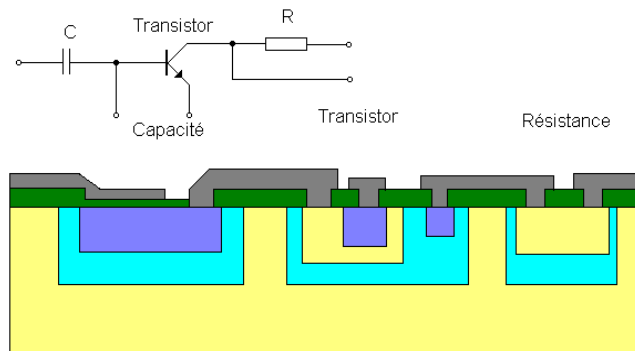
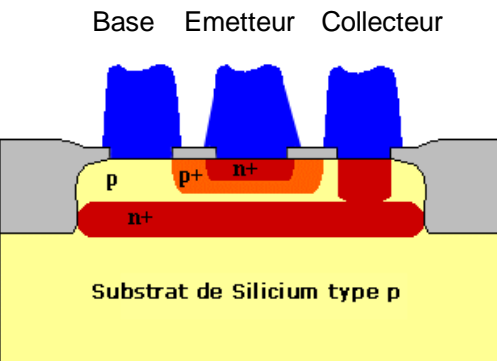


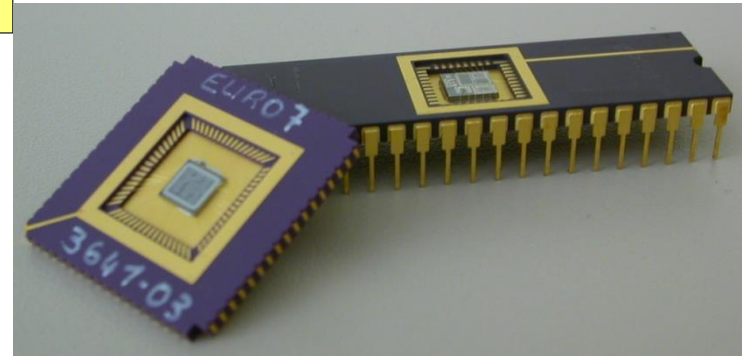


Etude et Modélisation des Composants Actifs

Patrick Tounsi



Merci à Jérémie Grisolia qui a permis l'utilisation d'illustrations extraites de l'un de ses cours



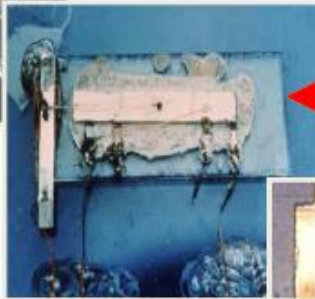
I. Comportement des semi-conducteurs

Historique

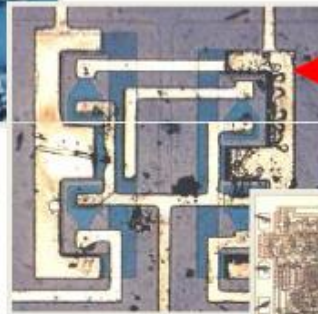
2



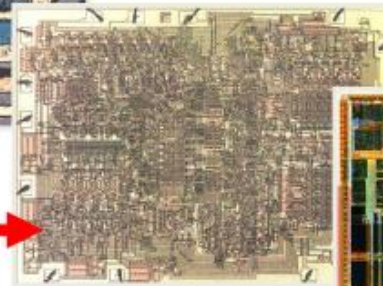
1947 : Premier transistor bipolaire à point de contact (Bell Labs)



1958 : Premier circuit intégré réalisé par assemblage de semi-conducteurs (TI)

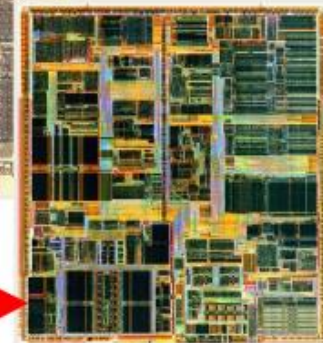


1961 : Premier circuit intégré logique : bascule flip-flop à 4 transistors sur 2,5 mm² (TI & Fairchild)



1971 : Premier microprocesseur 4004 INTEL
(4 bits - 2300 transistors - 10μm)

2003 : Microprocesseur Pentium IV INTEL
(32/64 bits - >55M transistors - 0,09μm)



Aujourd'hui, les semi-conducteurs sont sollicités dans le monde des capteurs de l'optoélectronique, des microsystèmes...

I. Comportement des semi-conducteurs

Evolution technologique

3

Recherche en 1947



Dunkan, Bell Labs



William Bradford Shockley
John Bardeen
Walter Houser Brattain

1971



4004 (INTEL)

- Techno : 10 μm
- 108 kHz
- 4 Bits
- 16 I/O
- 2300 Transistors

1978



8086 (IBM PC)

- Techno : 10 μm
- 10Mhz
- 16 Bits
- 64 I/O
- 29000 Transistors

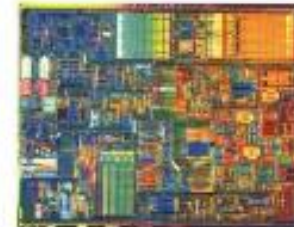
1997



Pentium II

- Techno : 0,35 μm
- 300MHz
- 64 Bits
- 300 I/O
- 7,5M Transistors

2002



Pentium IV

- Techno : 0,13 μm
- 3 GHz
- 128 bits
- 478 I/O
- 40 M Transistors

2007



**Quad QX9650
Core 2 (INTEL)**

- Techno: 0.045 μm
- 3 GHz,
- oxyde High k,
- Multi-cœur
- ~16 Transistors

Moore a revu son estimation en 1975 : le doublement aurait lieu tous les 18 mois et non tous les ans. Moore estime qu'elle se poursuivra jusqu'en 2017, date à laquelle elle devrait rencontrer des contraintes physiques.

I. Comportement des semi-conducteurs

Les étapes

Comportement des semi-conducteurs (propriétés, dopage, les trous et les électrons, concentration de porteurs, conductivité, effet d'un éclaircissement spécifique, diffusion, conduction, génération – recombinaison, comportement en température ...)

La jonction PN (équilibre, champ électrique, ZCE, potentiel interne, barrière de potentiel, contacts ohmiques, capacités parasites, l'avalanche, l'effet Zener, courant hors équilibre, modèle physique...)

Le transistor MOS (la capacité MOS, la formation du canal, la modulation du courant, ZCE, pincement du canal, équations du courant, capacité parasites, les effets du canal court, modèle physique ...)

Le transistor bipolaire (les courants, le champ électrique, l'effet transistor, le gain en courant et l'efficacité d'injection, charges stockées, l'avalanche, modèle physique)

Les Circuits Intégrés (structures bipolaires et MOS, CMOS, registres, mémoires ...)

I. Comportement des semi-conducteurs

Cours destiné aux électroniciens

5

Ce cours est conçu à partir du point de vue d'électroniciens. Pour la compréhension du fonctionnement des composants et de l'exploitation de leurs propriétés, on a recourt aux seules grandeurs habituelles des électroniciens: courant, tension, champ électrique...

Volontairement, certaines théories ne seront pas traitées, comme celle des bandes d'énergie, du niveau de Fermi...

$$n_C(E)dE = g(k)d^3k$$

(alors $d^3k = 4\pi k^2 dk$ et, d'après l'éq (II.3), $dE = (\hbar^2 / m_n) k dk$)

$$n_C(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_n}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_C)^{1/2}$$

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

$$p_0 = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) = N_V f_p(E_V)$$

I. Comportement des semi-conducteurs

Le silicium

6

Chaque atome de Silicium se lie avec 4 autres atomes (valence 4) aux sommets d'un tétraèdre. La structure cristalline est cubique à faces centrées.

La distance moyenne entre deux atomes est 2,23 Angström.

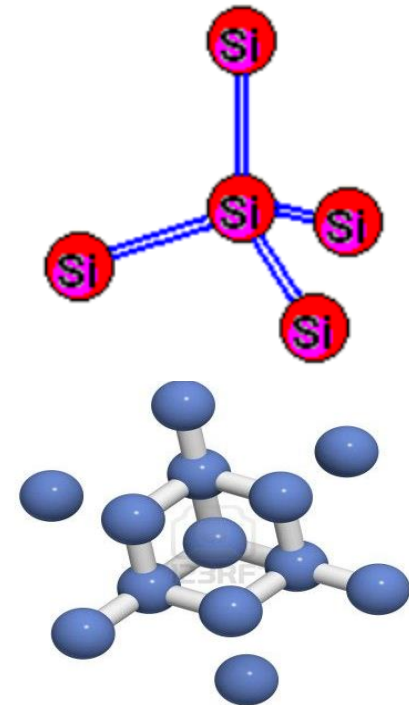
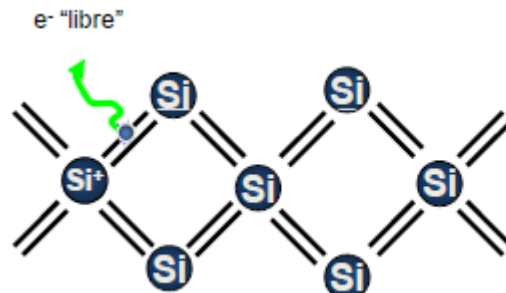
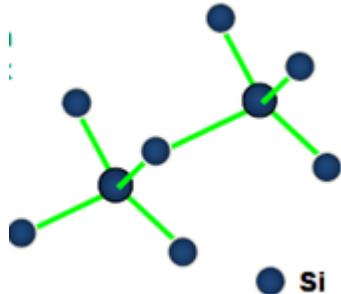
Le Silicium fait partie des cristaux semi-conducteurs.

C'est quoi un semi-conducteur ?

- Parfaitement isolant à 0 K
- Plus ou moins conducteur (résistif) suivant la température, le dopage, l'absorption de photons (éclairage)...etc
- Il est d'autant moins résistif qu'il y a eu « arrachage » d'électrons devenus libres. Ces électrons laissent des « lacunes » que l'on appelle « trous »
- Le courant peut être constitué de circulation d'électrons (comme dans les métaux) mais aussi des trous (lacunes) de proche en proche.

Pour le Silicium l'énergie nécessaire pour créer une paire électron – trou est $E_G = 1,12\text{eV}$ à 300K qui correspond à une longueur d'onde de $1,1\text{ }\mu\text{m}$ (infra-rouge).

IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA
5 B Boron 10.8	6 C Carbon 12.0	7 N Nitrogen 14.0	8 O Oxygen 16.0	9 F Fluorine 19.0
13 Al Aluminum 27.0	14 Si Silicon 28.1	15 P Phosphorus 31.0	16 S Sulfur 32.1	17 Cl Chlorine 35.5
31 Ga Gallium 69.7	32 Ge Germanium 72.6	33 As Arsenic 74.9	34 Se Selenium 79.0	35 Br Bromine 79.9
49 In Indium 114.8	50 Sn Tin 118.7	51 Sb Antimony 121.8	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.9
81 Tl Thallium 204.4	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 209.0	84 Po Polonium 210.0	85 At Astatine 210.0



I. Comportement des semi-conducteurs

Quelques grandeurs

7

Caractéristiques du silicium intrinsèque

Caractéristique	Valeur
Nombre atomique	14
Masse atomique	28,1
Densité (g/cm ³)	2,33
Permittivité relative (constante diélectrique)	11,9
Atomes/cm ³	$5,0 \times 10^{22}$
Ecart énergétique E_{GO} (eV), à 0 K	1,21
Ecart énergétique E_G (eV), à 300 K	1,12
Résistivité ($\Omega \cdot \text{cm}$), à 300 K	$2,30 \times 10^5$
Mobilité μ_n [cm ² /V.s] des électrons, à 300 K	1 500
Mobilité μ_p [cm ² /V.s] des trous, à 300 K	475
Concentration intrinsèque (cm ⁻³), à 300 K	$1,45 \times 10^{10}$
Constante de diffusion D_n (cm ² /s) des électrons, à 300 K	34
Constante de diffusion D_p (cm ² /s) des trous, à 300 K	13

charge élémentaire:	$q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
masse de l'électron:	$m = 0,911 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$
permittivité du vide:	$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$
constante de Boltzmann:	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$
	$k = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/}^\circ\text{K}$
constante de Plank:	$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$
vitesse de la lumière:	$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
nombre d'Avogadro:	$N = 6,02 \cdot 10^{23}$

I. Comportement des semi-conducteurs

Effet du dopage 1

8

Semi-conducteur intrinsèque: Il s'agit d'un semi-conducteur constitué du même type d'atomes (exemple Si), donc pratiquement pur.

A une température donnée > 0 K il y a un certain nombre d'électrons et de trous par unité de volume. On parle de concentration de porteurs

n pour les électrons, p pour les trous

$$n = p = n_i \text{ (concentration intrinsèque) } [\text{/cm}^3]$$

Loi d'action de masse: A l'équilibre thermodynamique (Température uniforme, pas de champ électrique, pas d'éclairement)

$$p n = n_i^2 (*)$$

Dopage N: Introduction d'impuretés d'atomes pentavalents (Phosphore, Arsenic, Antimoine...) à une concentration N_D .

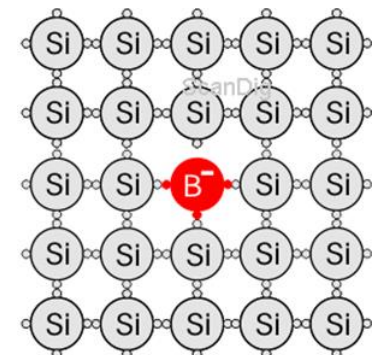
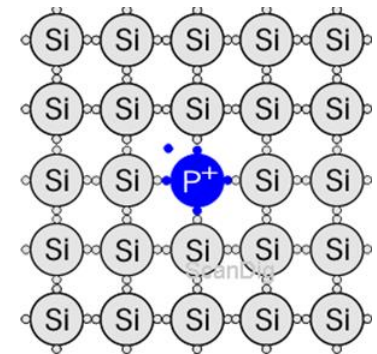
Déséquilibre en faveur des électrons: $n > p$, $n \sim N_D$, $p \sim n_i^2 / N_D$

Electrons majoritaires, trous minoritaires

Dopage P: Introduction d'impuretés d'atomes trivalents (Bore, Gallium, Indium...) à une concentration N_A . Déséquilibre en faveur des trous:

$$p > n, p \sim N_A, n \sim n_i^2 / N_A$$

Trous majoritaires, électrons minoritaires

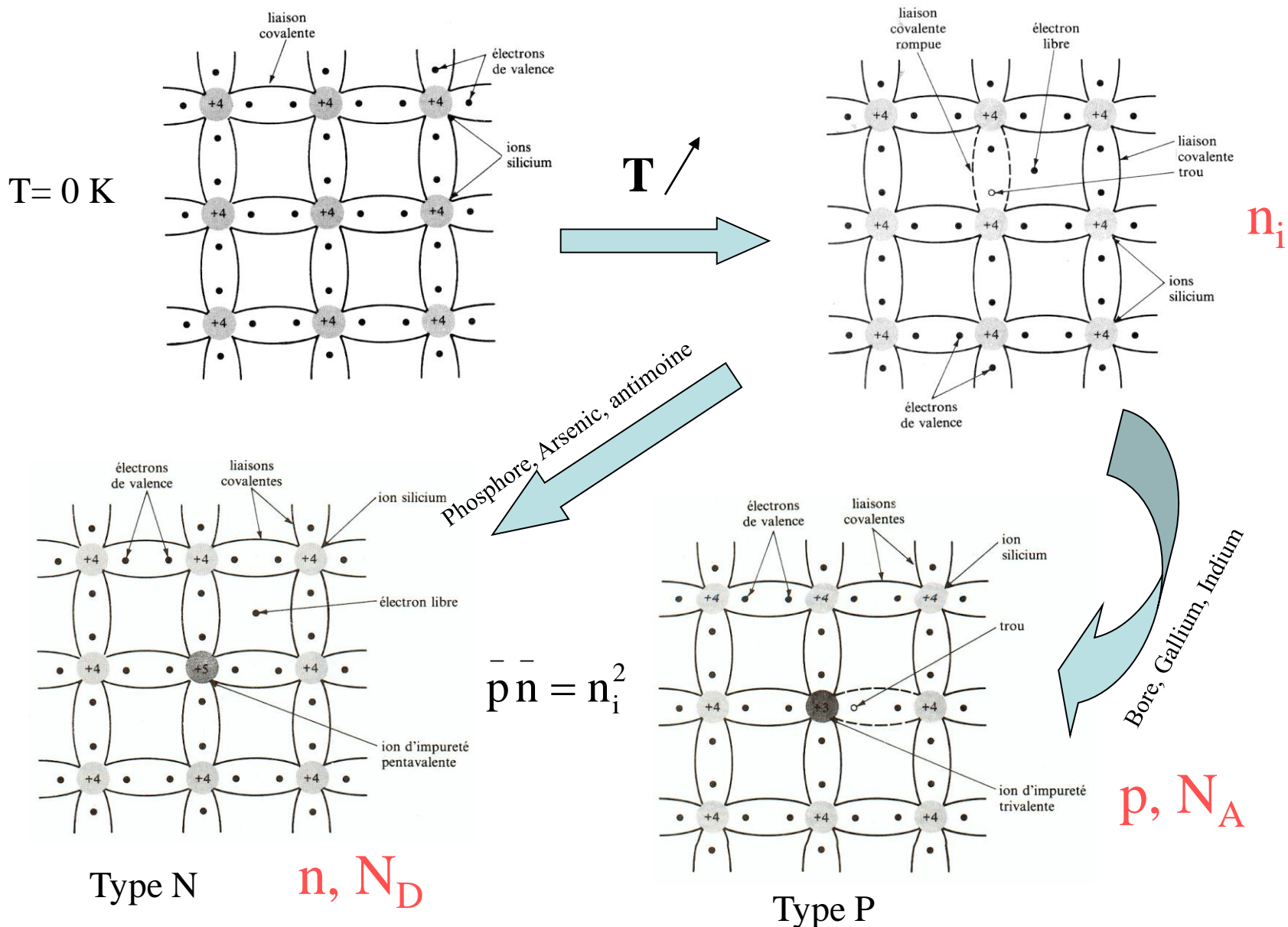


(*) Pour indiquer que l'on est à l'équilibre on note $\bar{p} \bar{n} = n_i^2$, ou $p_0 n_0 = n_i^2$

I. Comportement des semi-conducteurs

Effet du dopage 2

9



I. Comportement des semi-conducteurs

Neutralité électronique

Le dopage ne perturbe pas la neutralité électronique du cristal.

Type N: Les électrons libres excédentaires engendrés par l'apport d'atomes dopants (donneurs) s'équilibrent en charge par l'ionisation de ces impuretés. Dans le cas du dopage au Phosphore, ces atomes « lâchent » leur cinquième électron de valence, et deviennent des ions positifs P^+ , en concentration égale à N_D^+

$$n + N_D^+ = 0 \text{ charges}$$

Type P: Les lacunes (trous) excédentaires engendrés par l'apport d'atomes dopants (accepteurs) s'équilibrent en charge par l'ionisation de ces impuretés. Dans le cas du dopage au Bore, ces atomes « prennent » leur quatrième électron pour s'insérer dans la structure du Si, et deviennent des ions négatifs B^- , en concentration égale à N_A^-

$$p + N_A^- = 0 \text{ charges}$$

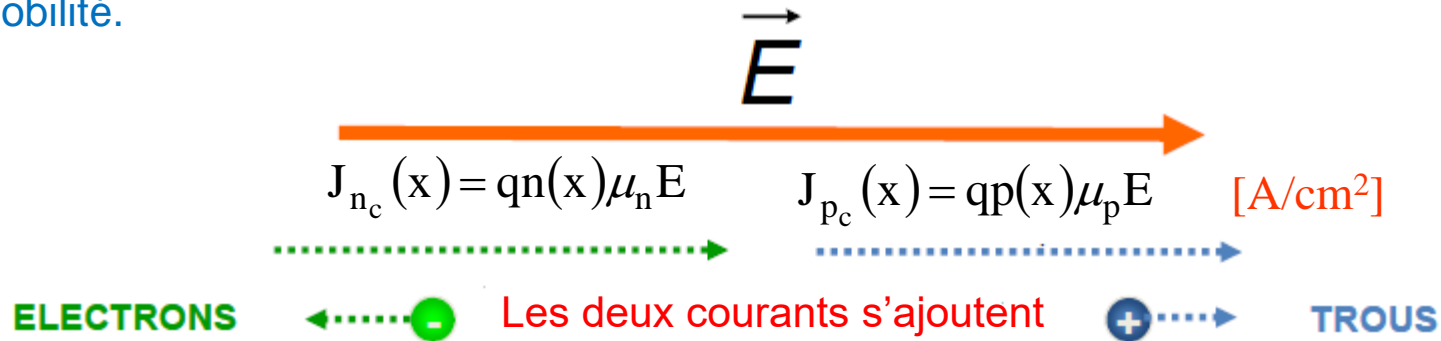
I. Comportement des semi-conducteurs

Conduction

11

La conduction des électrons est le principal mécanisme qui permet la création d'un courant dans les métaux

L'application d'un champ électrique sur des porteurs de charges, engendre une force et donc un déplacement de ces charges. Leur vitesse dépend de ce qu'ils rencontrent dans le cristal comme obstacles, ceci est pris en compte dans ce qui est appelé la mobilité.



Conductivité $\sigma = J / E = q(n\mu_n + p\mu_p) \left[(\Omega\text{cm})^{-1} \right]$

Résistivité $\rho = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)} \left[(\Omega\text{cm}) \right]$

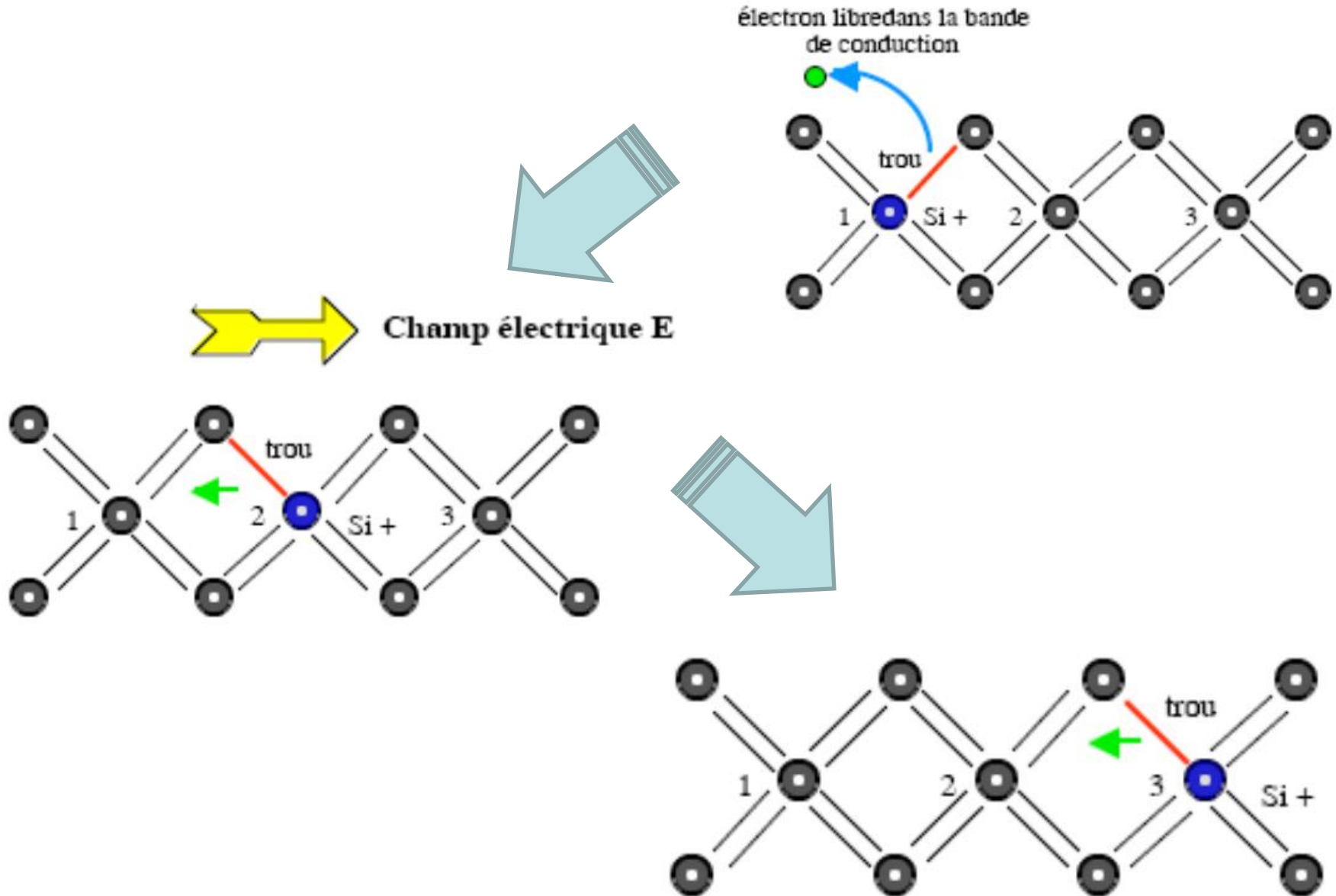
Rappel $E = -\text{grad}(V)$

La mobilité des trous μ_p est inférieure à celle des électrons μ_n . Pourquoi ?

I. Comportement des semi-conducteurs

12

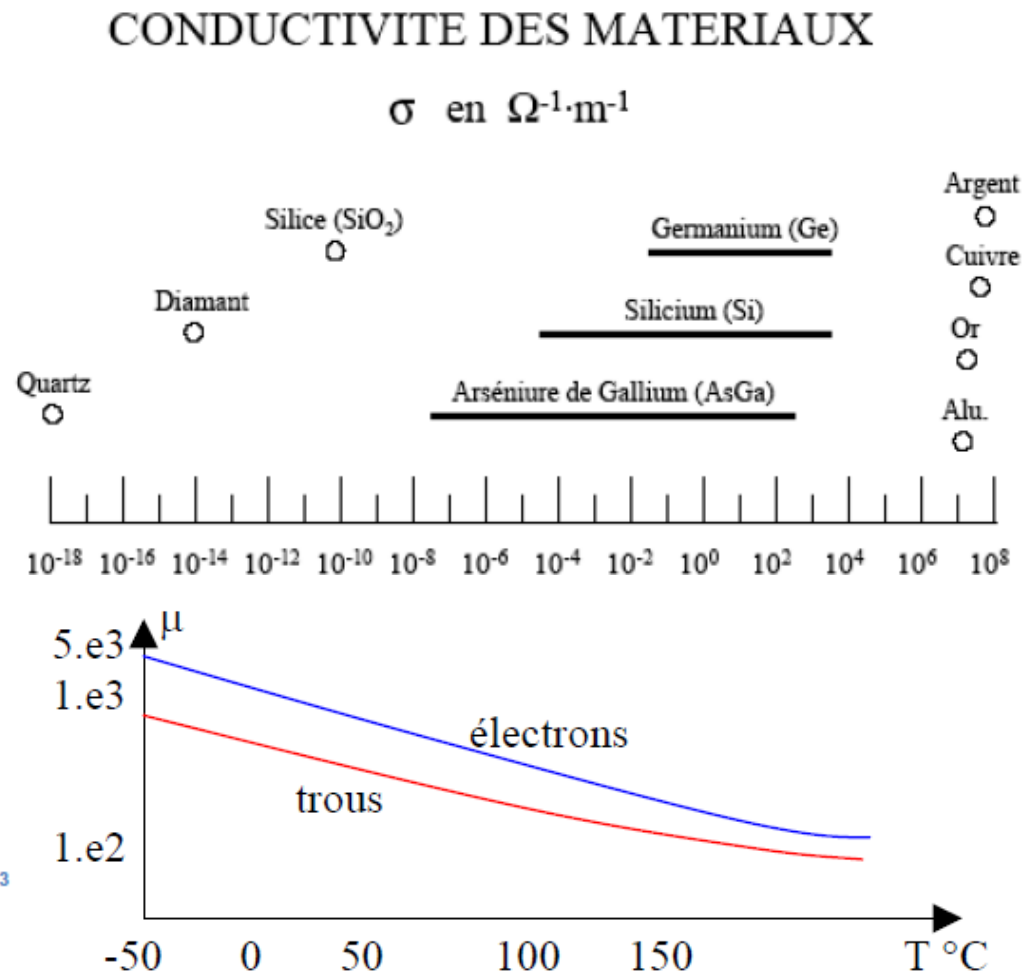
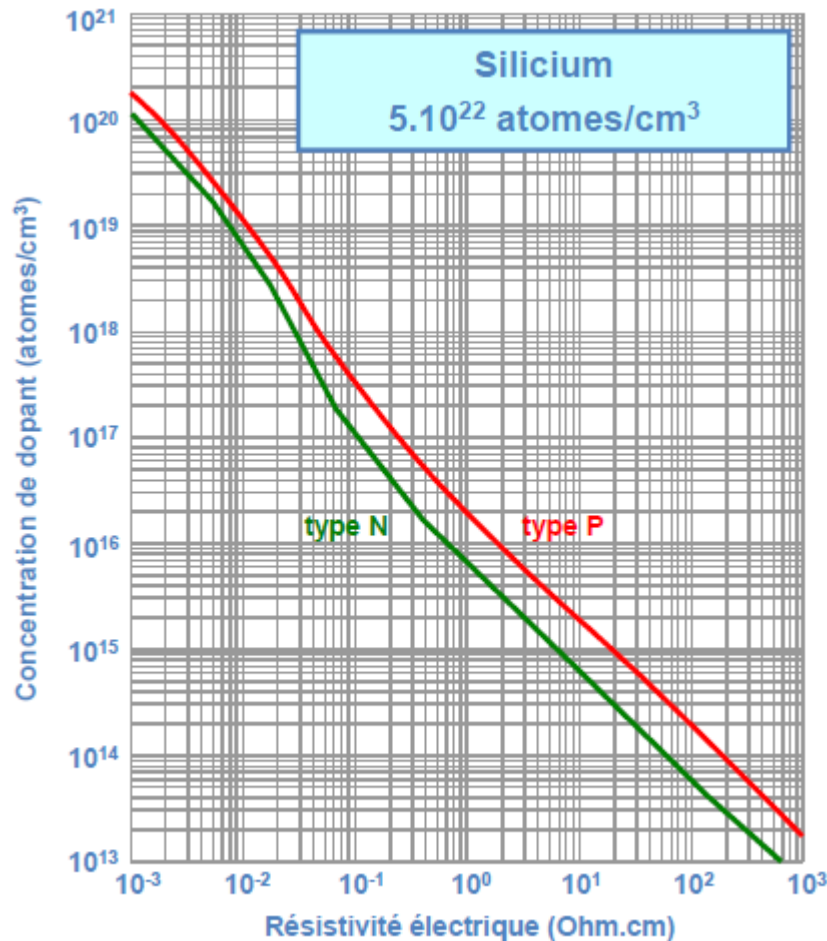
La conduction des trous... c'est quoi au juste ?



I. Comportement des semi-conducteurs

Conduction: ordres de grandeur

13



Contrairement aux métaux, on peut moduler la résistivité des semi-conducteurs en agissant sur la concentration des atomes dopants.

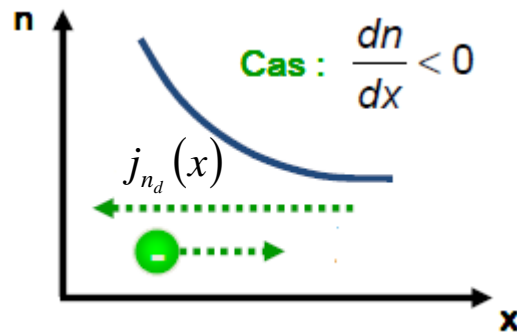
I. Comportement des semi-conducteurs

Diffusion

La diffusion des porteurs (électrons et trous) est l'un des principaux mécanismes qui permet la création d'un courant dans une diode ou dans un transistor

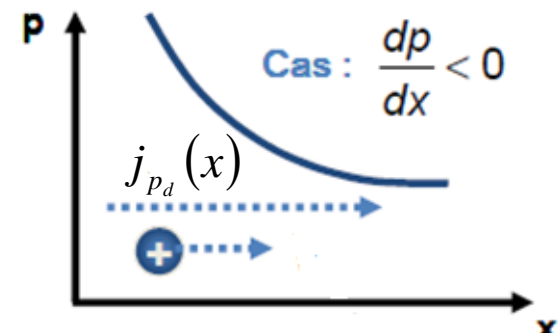
Le phénomène de diffusion du point de vue macroscopique est très répandu dans la nature. Il suffit pour qu'il se produise qu'une concentration dans un milieu ne soit pas uniforme. Les populations se déplacent de là où la concentration est la plus élevée vers la zone à moindre concentration tendant à uniformiser celle-ci.

Dans le cas du semi-conducteur ceci se traduit par un courant de diffusion d'électrons et de trous. Ce courant est naturellement proportionnel au gradient de concentration.



$$j_{nd}(x) = qD_n \frac{dn(x)}{dx}$$

[A/cm²]



$$j_{pd}(x) = -qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

Constante de diffusion [cm²/s]

$$D_n = \mu_n \frac{KT}{q}$$

$$D_p = \mu_p \frac{KT}{q}$$

K: Constante de Boltzmann

I. Comportement des semi-conducteurs

Les semi-conducteurs « composés »

Deuxième possibilité, associer des éléments de la colonne IIIa et de la colonne Va, on compose des matériaux semi-conducteurs dits III-V qui peuvent être :

1 - BINAIRES comme :

L'arséniure de Gallium (**GaAs**) (le plus répandu).

Le Phosphure d'indium (**InP**),

Le phosphure de gallium (**GaP**), ...

2 - TERNAIRES : $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, Arséniure de Gallium Aluminium. Ces matériaux là sont des alliages, c'est à dire que dans la matrice cristalline l'atome d'arsenic a comme partenaires des atomes d'aluminium avec une probabilité x et des atomes Gallium avec une probabilité complémentaire 1-x.

L'intérêt de ces ternaires est d'adapter la largeur de la bande interdite par le paramètre x.

3 - QUATERNAIRES :

Du type $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ qui présente l'intérêt de régler à la fois à travers les paramètres x et y :

la largeur de bande interdite

le paramètre cristallin du matériau.

IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA
5 B Boron 10.8	6 C Carbon 12.0	7 N Nitrogen 14.0	8 O Oxygen 16.0	9 F Fluorine 10.0
13 Al Aluminum 27.0	14 Si Silicon 28.1	15 P Phosphorus 31.0	16 S Sulfur 32.1	17 Cl Chlorine 35.5
31 Ga Gallium 69.7	32 Ge Germanium 72.6	33 As Arsenic 74.9	34 Se Selenium 79.0	35 Br Bromine 79.9
49 In Indium 114.8	50 Sn Tin 118.7	51 Sb Antimony 121.8	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.9
81 Tl Thallium 204.4	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 209.0	84 Po Polonium 210.0	85 At Astatine 210.0

I. Comportement des semi-conducteurs

Les semi-conducteurs « composés »

Ce que l'on a réussi en prenant un élément de la colonne III et un élément de la colonne V,

On peut le réussir en prenant un élément de la colonne II et un élément de la colonne VI.

On réalise alors des :

Semi-conducteurs composés II-VI

Dont il existe deux familles :

Petits Gap : application détection dans l'IR

Grand Gap : application détection dans le bleu

comme par exemple le :

✓ Le Tellure de Mercure : HgTe

✓ Le Sulfure de Cadmium : CdS

✓ Le Séléniure de Zinc : ZnSe

	IIIA	IVA	VA	VIA
5	6	7	8	
B Boron 10.8	C Carbon 12.0	N Nitrogen 14.0	O Oxygen 16.0	
13	14	15	16	
Al Aluminum 27.0	Si Silicon 28.1	P Phosphorus 31.0	S Sulfur 32.1	
31	32	33	34	
Zn Zinc 65.4	Ga Gallium 69.7	Ge Germanium 72.6	As Arsenic 74.9	Se Selenium 78.9
48	49	50	51	
Cd Cadmium 112.4	In Indium 114.8	Sn Tin 118.7	Sb Antimony 121.8	Te Tellurium 127.6
80	81	82	83	84
Hg Mercury 200.6	Tl Thallium 204.4	Pb Lead 207.2	Bi Bismuth 209.0	Po Polonium 210.0

I. Comportement des semi-conducteurs

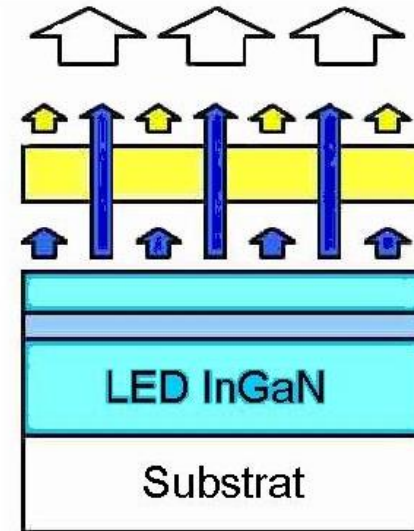
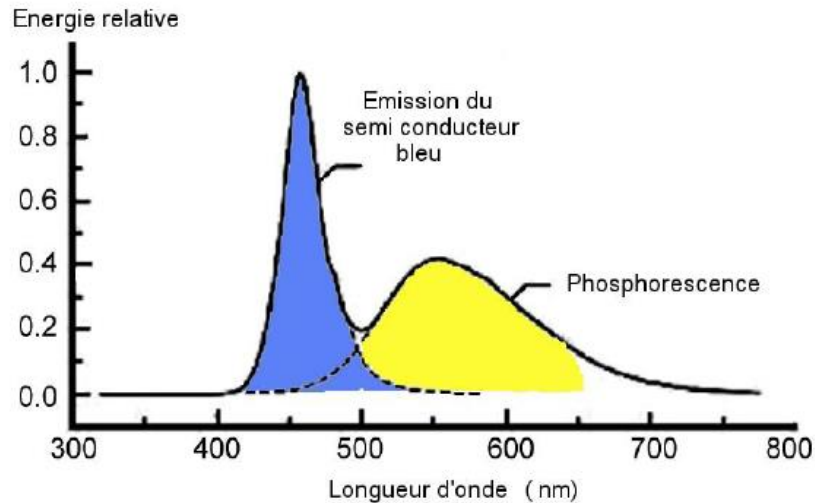
Les semi-conducteurs et l'optoélectronique

Couleur	Longueur d'onde (nm)	Tension de seuil (V)	Semi-conducteur utilisé
InfraRouge	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1,63$	arséniure de gallium-aluminium (AlGaAs)
Rouge	$610 < \lambda < 760$	$1,63 < \Delta V < 2,03$	arséniure de gallium-aluminium (AlGaAs) phospho-arséniure de gallium (GaAsP)
Orange	$590 < \lambda < 610$	$2,03 < \Delta V < 2,10$	phospho-arséniure de gallium (GaAsP)
Jaune	$570 < \lambda < 590$	$2,10 < \Delta V < 2,18$	phospho-arséniure de gallium (GaAsP)
Vert	$500 < \lambda < 570$	$2,18 < \Delta V < 2,48$	nitride de gallium (GaN) phosphure de gallium (GaP)
Bleu	$450 < \lambda < 500$	$2,48 < \Delta V < 2,76$	séléniure de zinc (ZnSe) nitride de gallium-indium (InGaN) carbure de silicium (SiC)
Violet	$400 < \lambda < 450$	$2,76 < \Delta V < 3,1$	
Ultraviolet	$\lambda < 400$	$\Delta V > 3,1$	diamant (C) nitride d'aluminium (AlN) nitride d'aluminium-gallium (AlGaN)
Blanc	Chaude à froide	$\Delta V = 3,5$	

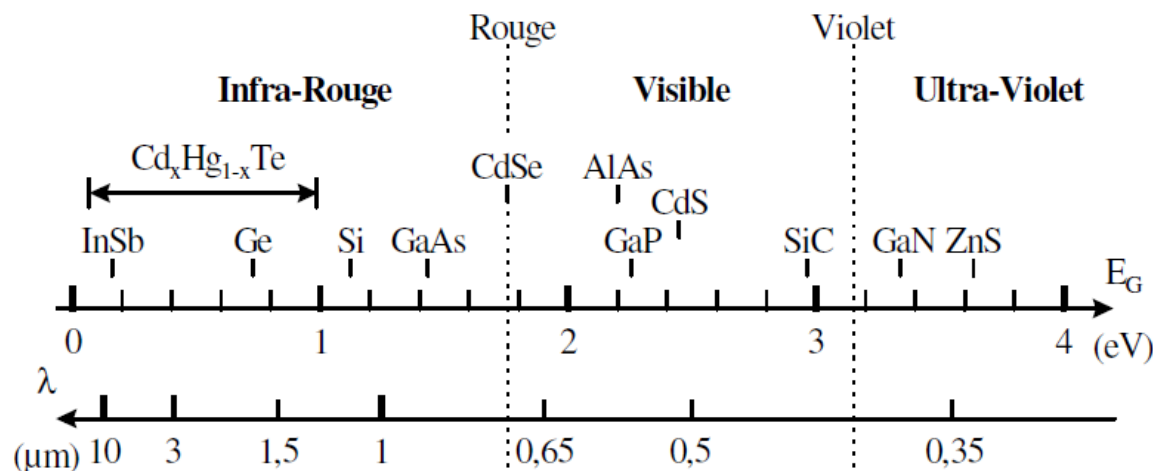
I. Comportement des semi-conducteurs

Les semi-conducteurs et l'optoélectronique

18



Exemple de création de lumière blanche avec une LED

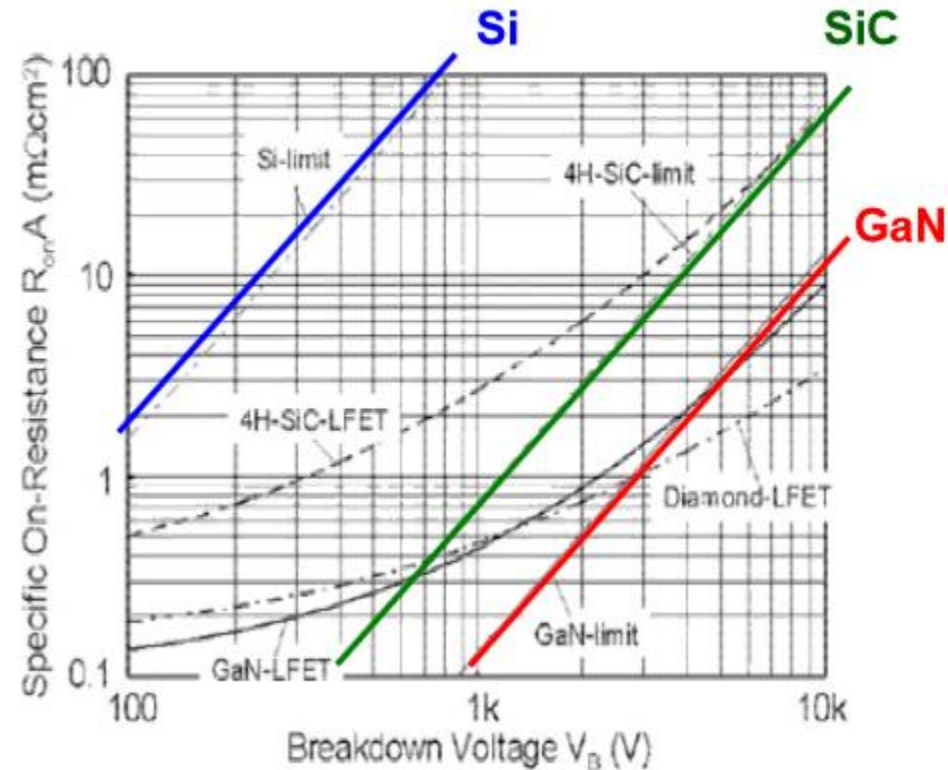
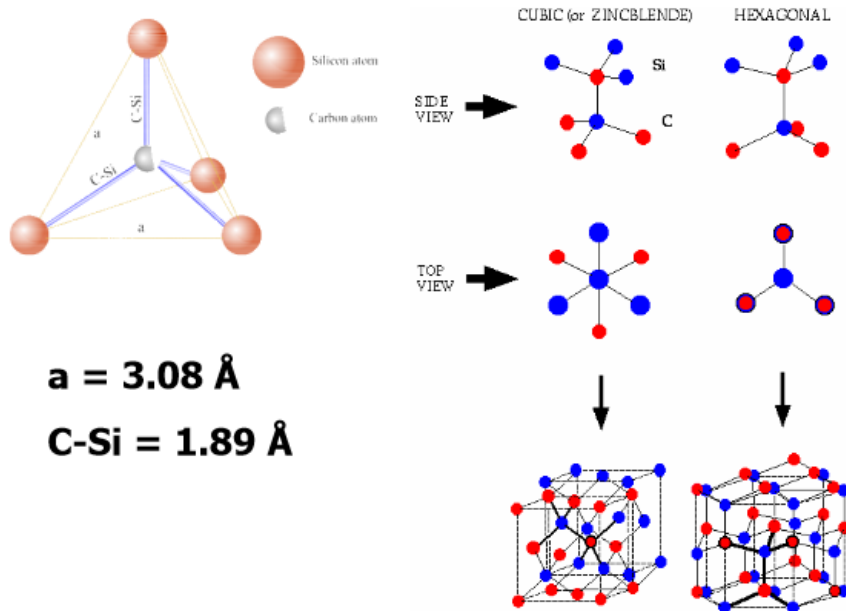


I. Comportement des semi-conducteurs

Les nouveaux semi-conducteurs pour les composants de puissance

19

Silicium + Carbone



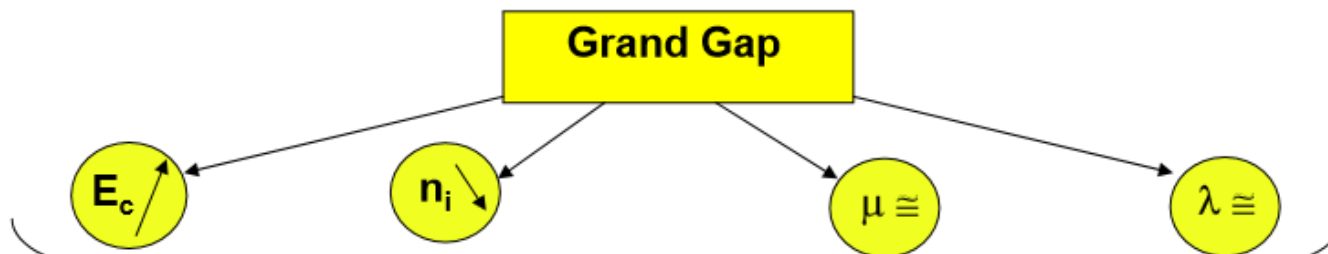
On veut se rapprocher des interrupteurs idéaux (faible chute de tension directe, grande tension bloquée) + fonctionnement à haute température pour alléger les systèmes de refroidissement (systèmes embarqués)

I. Comportement des semi-conducteurs

Les nouveaux semi-conducteurs pour les composants de puissance

20

	Semiconducteurs « classiques »		Semiconducteurs à grand gap				
	Si	GaAs	3C – SiC	6H – SiC	4H – SiC	GaN	Diamant
Bande interdite E_g (eV)	1,12	1,4	2,3	2,9	3,2	3,39	5,6
Mobilité des électrons μ_n ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	1 450	8 500	1000	415	950	2000	4000
Mobilité des trous μ_p ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	450	400	45	90	115	350	3800
Champ électrique critique E_c ($\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$)	$3 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	10^7
Vitesse de saturation v_{sat} ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	10^7	$2 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$
Conductivité thermique λ ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	1,3	0,54	5	5	5	1,3	20
Température d'utilisation maximale T_{max} ($^{\circ}\text{C}$)	125	150	500	500	500	650	700
Constante diélectrique	11,7	12,9	9,6	9,7	10	8,9	5,7
SFM 10^{11} ($\text{W} \cdot \text{s}^{-1}$)	2,9	8,1	80,8	48,8	123,5	141	15179
Ratio / silicium	1	2,8	27,8	16,8	42,6	48,6	5234
JFM 10^{11} ($\text{V} \cdot \text{s}^{-1}$)	4,77	12,7	79,5	79,5	95,5	159	477
Ratio / silicium	1	2,7	16,7	16,7	20	33	100



Composants haute tension, faibles pertes et travaillant à haute température