

Laboratorio di Elettronica

Dispositivi elettronici e circuiti

Proprieta' e fenomenologia dei semiconduttori.

Dispositivi a semiconduttore:

- * diodo a giunzione
- * transistor bjt
- * transistor jfet e mosfet

Modelli matematici lineari e non lineari di diodi e transistor.

Circuiti principali di impiego di diodi e transistor.

Introduzione all'elettronica digitale:

- * porte logiche
- * algebra di Boole
- * principali famiglie logiche (CMOS e TTL)
- * circuito flip-flop
- * elementi di elettronica sequenziale

Il rumore nei circuiti elettronici

Marcello Carla'

Dip. di Fisica – lab. 22 - studio 126

tel. 055 457 2055 / 2013 / 2060

carla@fi.infn.it

Prerequisiti

Leggi dei circuiti elettrici:

Ohm, Kirchhoff, Thevenin, Norton

Analisi di Fourier

Principi di base della reazione (feedback)

Elementi lineari dei circuiti:

resistenze, condensatori, induttanze, generatori

Testi di riferimento

J. Millman & A. Grabel - Microelectronics
(McGraw-Hill, 1987)

R.C. Jaeger – Microelectronic Circuit Design
(McGraw-Hill, 1997)

P. Horowitz & W. Hill – The Art of Electronics
(Cambridge University Press, 1989)

<http://studenti.fisica.unifi.it/~carla/appunti>

Segnale: grandezza fisica che interessa conoscere o misurare (perche' contiene *informazione*)

Elettronica Analogica

Le variabili elettriche di un circuito (tensioni e correnti) sono funzioni, per lo piu' continue, ma non necessariamente lineari, dei segnali.

Elettronica Digitale

Le variabili elettriche hanno solo due valori discreti, indicati convenzionalmente con 0 ed 1. Codici di 0 e 1 rappresentano numericamente i segnali.

Esempio: Termometro elettrico

La resistenza di un filo di Platino e' una funzione (quasi) lineare della temperatura:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha T + \beta T^2)$$

Quando viene percorsa da una corrente I ad ogni temperatura corrisponde una tensione:

$$V = I \cdot R_0 \cdot (1 + \alpha T + \beta T^2)$$

Il numero binario

$$b_7 b_6 b_5 b_4 b_3 b_2 b_1 b_0 \quad (b_i = 0/1)$$

rappresenta la temperatura

$$T = S \cdot \sum_i (b_i \cdot 2^i)$$

S = fattore di scala in °C / l.s.b.

l.s.b. = least significant bit (bit meno significativo)

Elaborazione Elettronica Analogica dei segnali

- Amplificazione (o attenuazione)

Lo strumento di misura ha un suo campo (*range*) di lavoro ottimale. I valori del segnale possono essere fuori di questo campo perche' troppo piccoli o troppo grandi.
- Filtraggio

Ogni segnale ed ogni strumento di misura sono affetti da *rumore*. Rendere il piu' alto possibile il rapporto segnale/rumore significa ridurre l'errore di misura.
- Trasformazioni non lineari

L'informazione che interessa puo' essere contenuta in una funzione non lineare del segnale. Ad esempio: l'intensita' del segnale supera o no un certo valore di soglia?

Elaborazione Elettronica Digitale dei segnali

- Operazioni logiche elementari

Gli elementi di base dell'elettronica digitale sono le *porte logiche*, circuiti che eseguono le operazioni logiche AND, OR, NOT tra le *variabili logiche*.

- Operazioni logiche *combinatorie*




Utilizzando le porte logiche si possono realizzare reti capaci di eseguire operazioni logiche e matematiche che sono funzioni complesse dei valori delle variabili logiche di ingresso.

- Operazioni logiche *sequenziali*

Reti logiche in cui il valore delle variabili di uscita dipende dal valore delle variabili di ingresso **e** dalla storia precedente della rete (reti dotate di *memoria*).

Semiconduttori

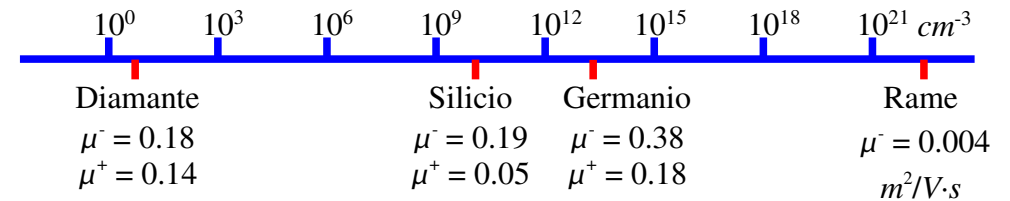
	IIIA	IVA	VA	VIA	
	5 B Boro	6 C Carbonio	7 N Azoto	8 O Ossigeno	
	13 Al Alluminio	14 Si Silicio	15 P Fosforo	16 S Zolfo	
IIB	30 Zn Zinco	31 Ga Gallio	32 Ge Germanio	33 As Arsenico	34 Se Selenio
	48 Cd Cadmio	49 In Indio	50 Sn Stagno	51 Sb Antimonio	52 Te Tellurio
	80 Hg Mercurio	81 Tl Tallio	82 Pb Piombo	83 Bi Bismuto	84 Po Polonio

	Conduttori
	Semiconduttori
	Isolanti

$$\rho < 10^{-5} \Omega m \quad (\text{rame} : 3 \cdot 10^{-8} \Omega m)$$

$$10^{-5} < \rho < 10^3 \Omega m \quad (\text{silicio} : 2300 \Omega m)$$

$$\rho > 10^3 \Omega m \quad (\text{diamante} : 10^{14} \Omega m)$$



Conduzione e resistivita'

$$\mathbf{J} = n q \mu \mathbf{E}$$

$$n q \mu = \sigma = \rho^{-1}$$

\mathbf{J} : vettore densita' di corrente

\mathbf{E} : campo elettrico

n : densita' dei portatori di carica

q : carica dei portatori

μ : mobilita' dei portatori

σ : conducibilita' elettrica

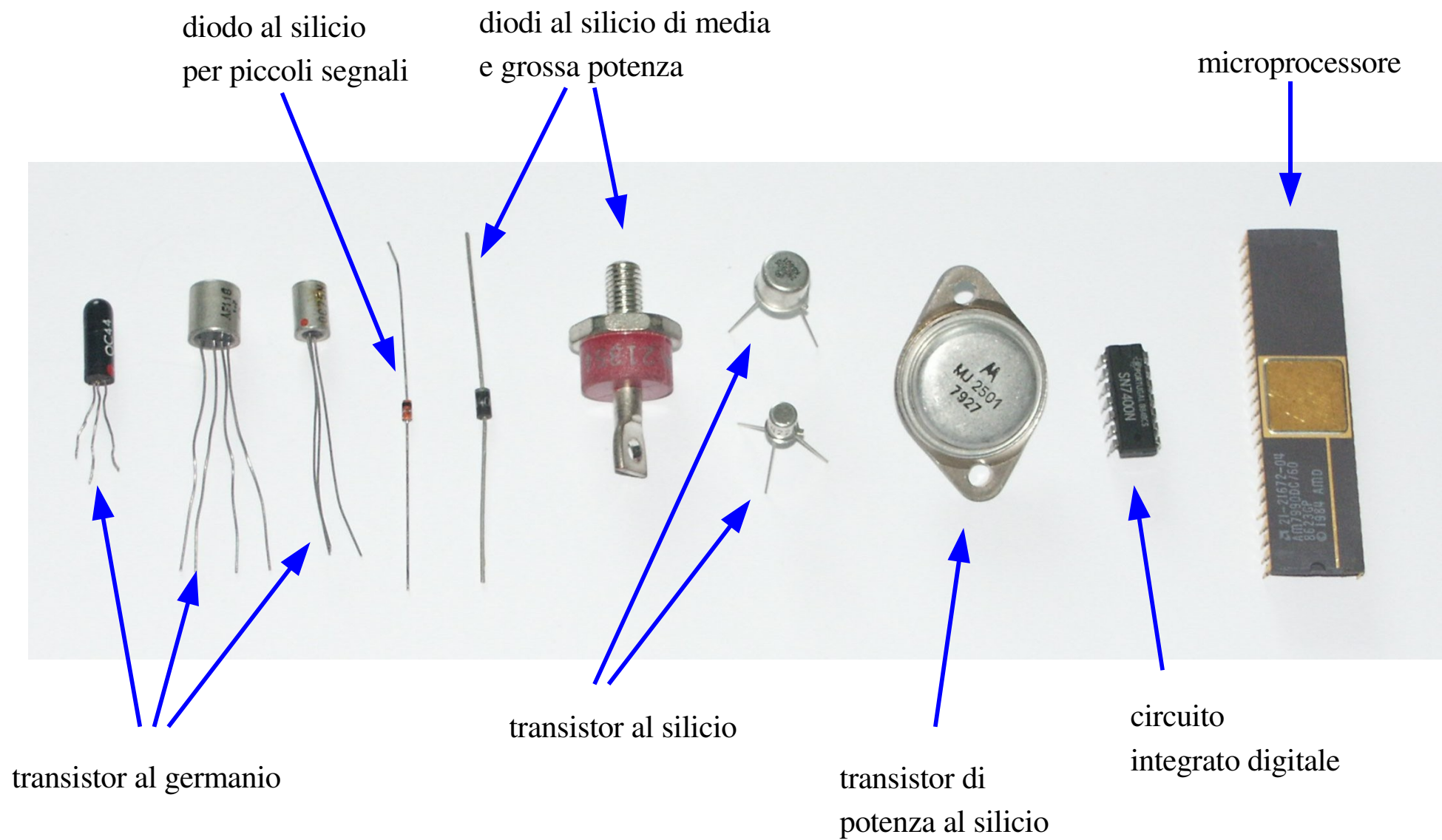
ρ : resistivita' elettrica

Germanio: primo ad essere utilizzato

Silicio: il piu' utilizzato attualmente

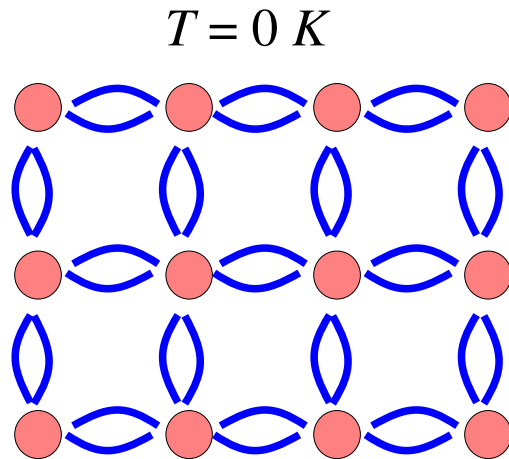
GaAs, InP: semiconduttori misti

Alcuni dispositivi a semiconduttore al germanio ed al silicio



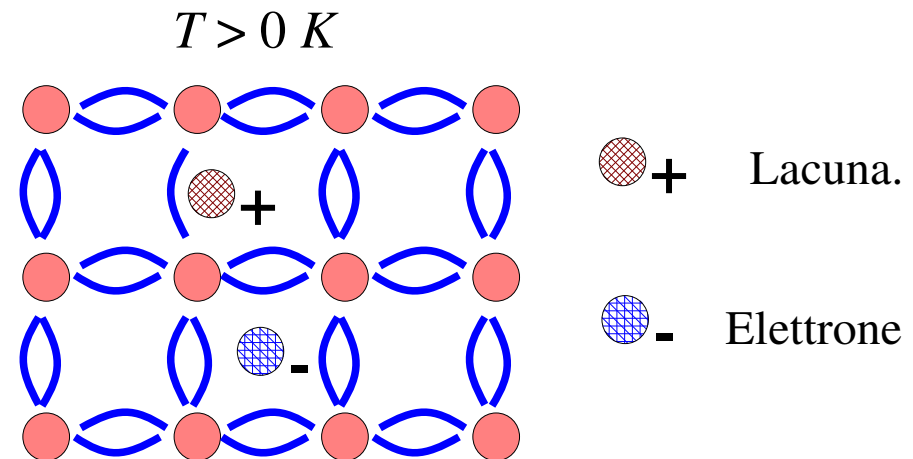
Semiconduttore intrinseco

Schema bidimensionale del reticolo cristallino di atomi tetravalenti



A $T = 0 \text{ K}$ tutti gli elettroni sono impegnati nei legami di valenza.

$$n_i^2 = n^2 = p^2 = B T^3 e^{-E_g/kT}$$



A $T > 0 \text{ K}$ alcuni legami si rompono e si formano coppie elettrone – lacuna.

n = concentrazione di elettroni

p = concentrazione di lacune

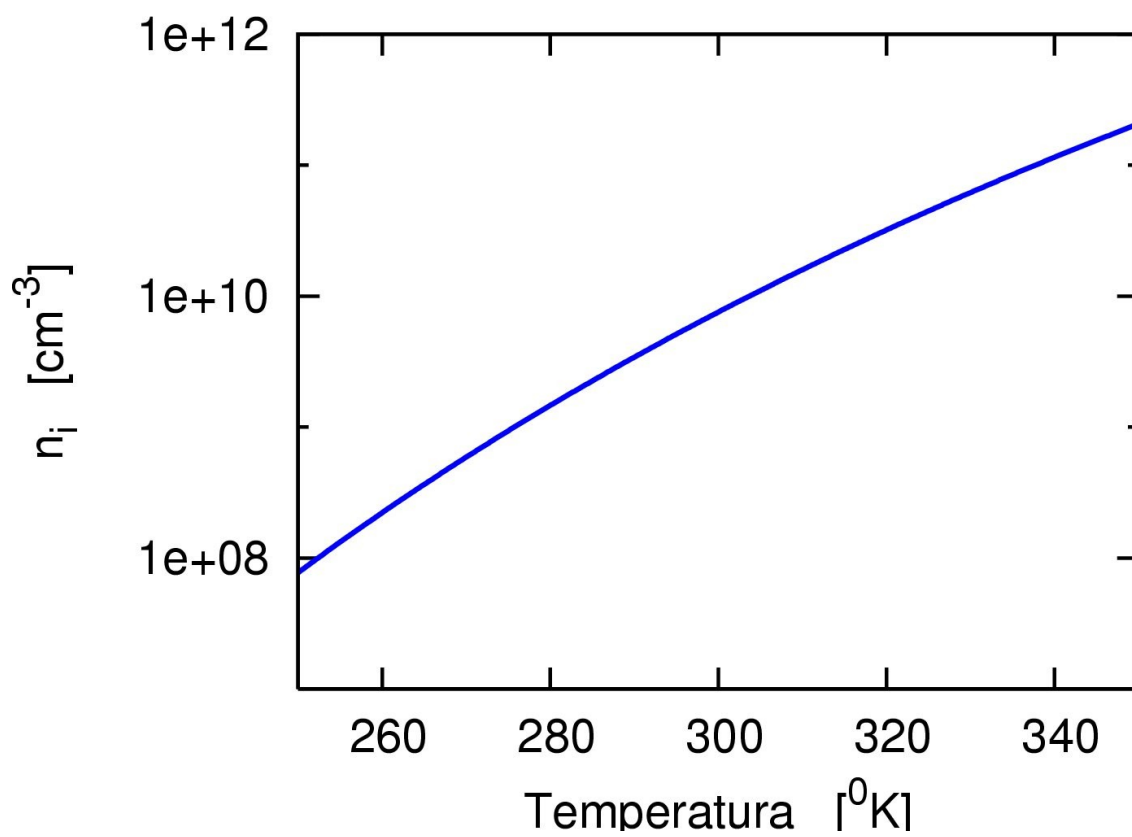
B = parametro caratteristico del materiale (per Silicio: $B = 1.08 \cdot 10^{31} \text{ K}^{-3} \text{ cm}^{-6}$)

E_g = band gap energy (energia di legame) (per Silicio: $E_g = 1.12 \text{ eV}$)

$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \simeq 86 \text{ } \mu\text{eV/}^\circ\text{K}$

$kT = 25.8 \text{ meV}$ (a $T = 300 \text{ }^\circ\text{K}$)

Concentrazione n_i di elettroni e lacune nel Silicio intrinseco



Modello a bande di energia

. in un semiconduttore si ha un doppio meccanismo di conduzione legato alla presenza di portatori di carica negativi (elettroni) e positivi (lacune)

Conduzione nei:

Metalli

$$\vec{J} = q n \mu_n \vec{E}$$

$$\sigma = q n \mu_n$$

La conduzione di corrente e' data dai soli elettroni (negativi).

$$\frac{\partial \rho}{\partial T} > 0$$

(Il libero cammino medio diminuisce con la temperatura)

Semiconduttori

$$\vec{J} = q (n \mu_n + p \mu_p) \vec{E}$$

$$\sigma = q (n \mu_n + p \mu_p)$$

La conduzione di corrente e' data dagli elettroni (negativi) e dalle lacune (positive).

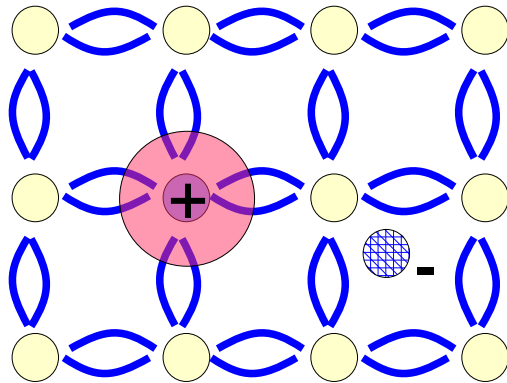
$$\frac{\partial \rho}{\partial T} < 0$$

(Il numero di portatori **n** e **p** aumenta con la temperatura)

Proprieta' chimico-fisiche di Germanio e Silicio




	simbolo	Ge	Si	unita'
numero atomico		32	14	
peso atomico		72.6	28.1	
densita'		5.32	2.33	g/cm^2
densita' atomica		$4.4 \cdot 10^{22}$	$5 \cdot 10^{22}$	$atomi/cm^3$
costante dielettrica relativa		16	12	
E_G ("band gap")		0.72	1.1	eV
conc. intrinseca portatori	n_i	$2.5 \cdot 10^{13}$	$1.5 \cdot 10^{10}$	cm^{-3}
frazione portatori/legami		$0.14 \cdot 10^{-9}$	$0.75 \cdot 10^{-13}$	
resistivita'	ρ	0.45	2300	$\Omega \cdot m$
mobilita' elettroni	μ_n	0.38	0.14	$m^2 V / s$
mobilita' lacune	μ_p	0.18	0.05	$m^2 V / s$
coeff. diffusione elettroni	D_n	$9.9 \cdot 10^{-3}$	$3.4 \cdot 10^{-3}$	m^2 / s
coeff. diffusione lacune	D_p	$4.7 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$	m^2 / s

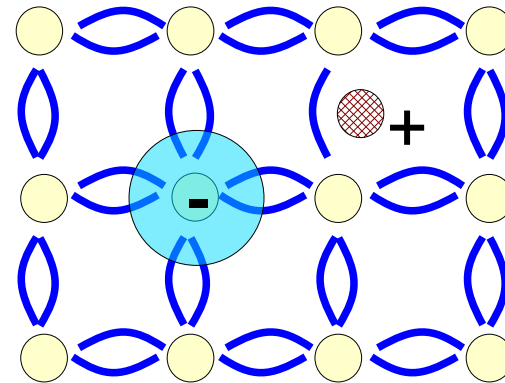
Semiconduttore estrinseco



Semiconduttore di tipo N.

Il drogaggio con atomi pentavalenti (donatori) genera un eccesso di elettroni di conduzione ed un reticolo di cariche positive fisse.

-  Silicio
-  Atomo “donatore” (As, P)
-  Atomo “accettore”(In, Ga)



 + Lacuna.

 - Elettrone

Semiconduttore di tipo P.

Il drogaggio con atomi trivalenti (accettori) genera un eccesso di lacune ed un reticolo di cariche negative fisse.

N_D = concentrazione di donatori

N_A = concentrazione di accettori

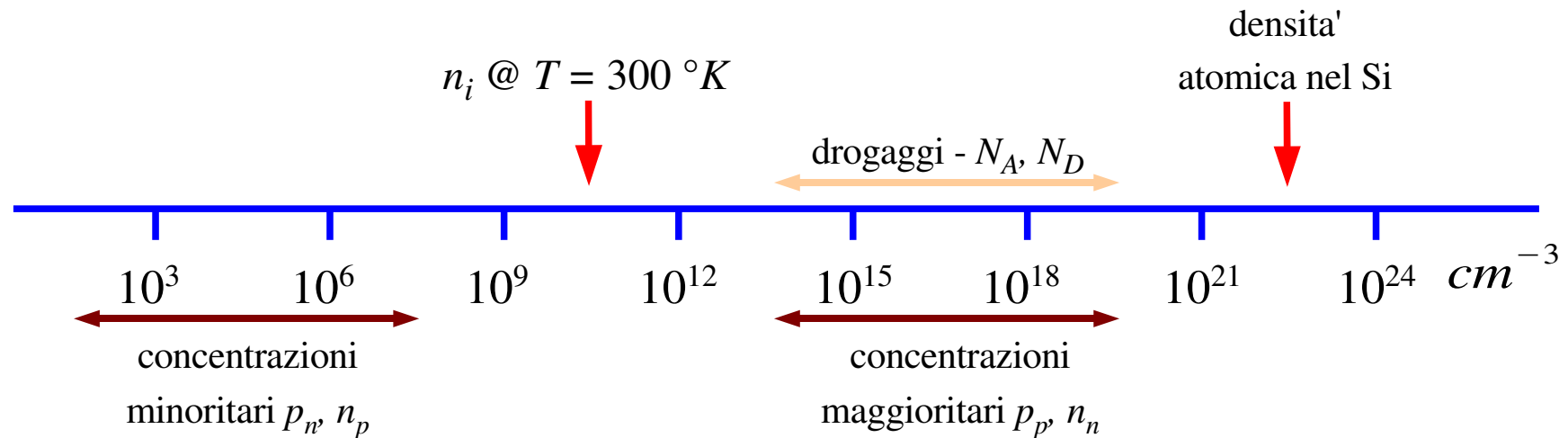
Legge di azione di massa

$$n \cdot p = n_i^2(T)$$

$$N_A \gg n_i \rightarrow p = N_A, n = n_i^2 / N_A$$

$$N_D \gg n_i \rightarrow n = N_D, p = n_i^2 / N_D$$

Semiconduttore di		
	tipo "n"	tipo "p"
elettroni	maggioritari	minoritari
lacune	minoritari	maggioritari
	$n \gg p$	$p \gg n$



Corrente di diffusione

In presenza di un gradiente di concentrazione dei portatori si ha trasporto di carica per diffusione. Nel caso unidimensionale:

$$J_p = -q D_p \frac{dp}{dx} \qquad J_n = q D_n \frac{dn}{dx}$$

D e μ sono correlate dalla equazione di Einstein:

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = V_T = \frac{kT}{q} \quad \left(\simeq 26 \text{ mV} @ T = 300 \text{ K} \right)$$

La corrente totale e' data dalla somma di conduzione e diffusione:

$$J_p = q \mu_p p E - q D_p \frac{dp}{dx} \qquad J_n = q \mu_n n E + q D_n \frac{dn}{dx}$$