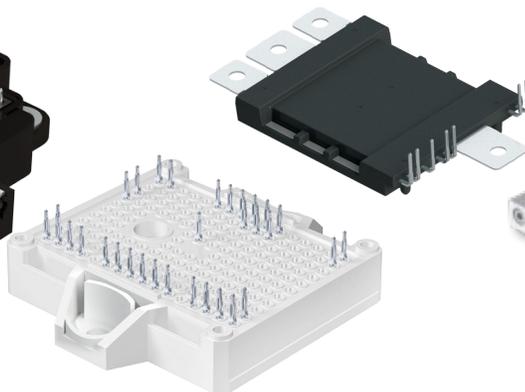
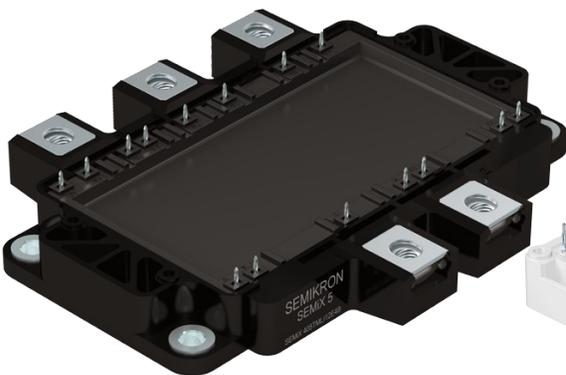
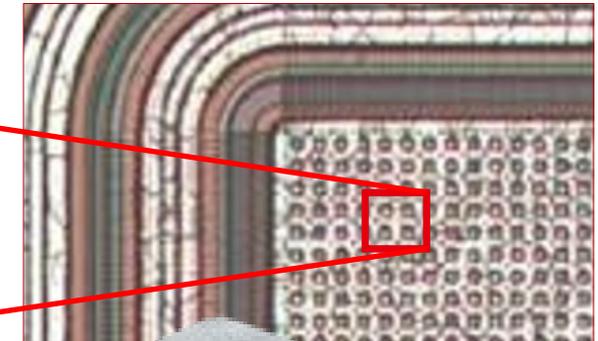
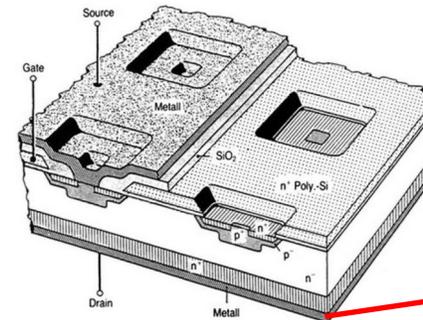
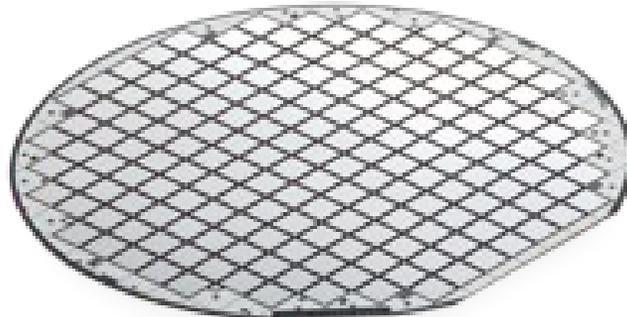
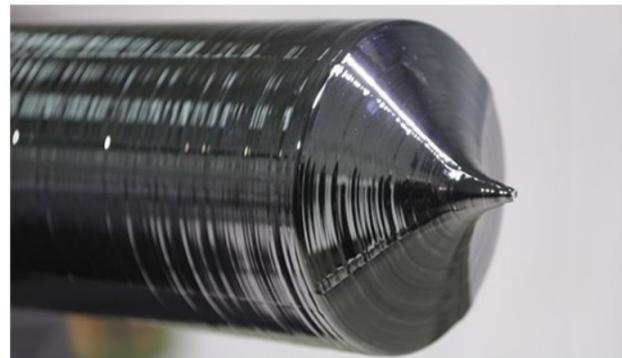
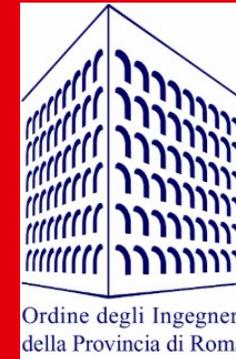


Power Electronics: From Semiconductor Basics to Advanced Power Module Design and Testing

Matteo Santoro, Commissione Elettronica e Microelettronica Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

Product Manager Semikron Danfoss.



Matteo Santoro



 <p>SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA</p>	<p>Ingegneria Elettronica V.O</p>	<p>1992-1999</p>	
 	<p>System Engineer </p>	<p>2000</p>	
 	<p>Hardware Engineer </p>	<p>2001-2003</p>	
 	<p>Senior Hardware Engineer </p>	<p>2004-2005</p>	
	<p>FAE   </p>	<p>2006</p>	
	<p>FAE & BizDev Team Manager   </p>	<p>2007-2014</p>	
 	<p>Product & Marketing Manager  </p>	<p>2014-ytd</p>	 
  	<p>Guest Lecturer </p>	<p>2022-ytd</p>	
	<p></p>	<p>2024-ytd</p>	

Global megatrends are transforming our world



Climate Change



Urbanization



Electrification



Food & Water Supply



Digitalization

Il dilemma energetico nel Mondo...

TWh	Idrica	Eolica	Fotovoltaica	Termica	Geotermica	Nucleare	Totale	
							Totale	Quota
MONDO	4.387,4	1.419,703	694,741	17.642,1	91,290	2.796,2	27.031,4	100,0%
EUROPA	918,7	460,537	154,089	2.747,3	21,977	1.143,7	5.446,2	20,1%
UE 28	354,6	426,627	138,438	1.488,8	6,635	823,1	3.240,2	12,0%
AMERICA	1.418,1	426,472	125,275	3.717,3	28,377	980,6	6.696,0	24,8%
Stati Uniti	310,0	298,332	96,011	2.829,0	18,193	843,8	4.395,2	16,3%
AFRICA	140,2	17,495	9,630	686,1	5,294	13,5	872,2	3,2%
ASIA	1.868,1	495,192	390,733	10.261,7	27,241	658,4	13.701,4	50,7%
Cina	1.304,8	402,254	232,213	5.231,0	0,125	349,0	7.519,3	27,8%
India	176,2	67,350	50,398	1.259,4	-	43,6	1.596,9	5,9%
OCEANIA	43,0	19,964	15,015	231,7	8,445	-	318,2	1,2%

In Europa e in Nordamerica consumiamo il 45% del consumo mondiale. La Cina il 27,8%.

Abitanti EU+USA = 700M

Abitanti mondo: 7000M

il 10% degli abitanti del mondo consuma quasi il 50% dell'energia disponibile!→

COP29 richiesta di una «finanza climatica» da parte dei paesi «in via di sviluppo (*)»

→ **COP 29** solo **300B€** di contributi da parte dei paesi ricchi a quelli «In via di sviluppo» → EU/USA crisi economiche, guerre

ESIGENZE POLITICHE: sul climate change, finanziamenti sviluppo «green»: ma alcuni stati NON vogliono fare debito (es. Germania → crisi di governo). USA out dagli accordi di Parigi

ESIGENZE TECNICHE: sviluppare tecnologia più efficiente MENO costosa, più SICURA per le applicazioni "green"



(*) Cina «ancora considerato paese in via di sviluppo». Contraddizione Cinese: è uno dei paesi che consuma più energia nel 2009 la CEI fece un'analisi sulla produzione elettrica Cinese : Le prime sei centrali a carbone cinesi inquinavano tanto quanto tutte le centrali a carbone del mondo. La Cina è «leader» nella transizione energetica green (auto elettriche) ma allo stesso tempo è quella che produce più CO2 del mondo.

Ed è ancora considerata Paese «in via di sviluppo» quindi a livello finanza climatica (COP29) SOLO volontario!

Agenda del Seminario



- Introduzione elettronica di potenza e sue applicazioni
- Richiamo sui semiconduttori
- Semiconduttori di potenza
- Cenni al processo di fabbricazione
- Utilizzo del datasheet nella progettazione di applicazione per sistemi di potenza (esempio: inverter fotovoltaico)
- Flusso di progettazione
- Tool di simulazione per la scelta del modulo di potenza: esempio di tool di simulazione disponibili on-line
- Affidabilità e caratterizzazione
- Cenni dei trend per le nuove tecnologie (SiC, GaN...)

Power Electronics

2. Applicazioni dell'elettronica di Potenza

Necessità della conversione AC/DC DC/AC

Storia :

Nikola Tesla (nato da famiglia Serba, attuale Croazia considerato Ungherese emigrato in USA)

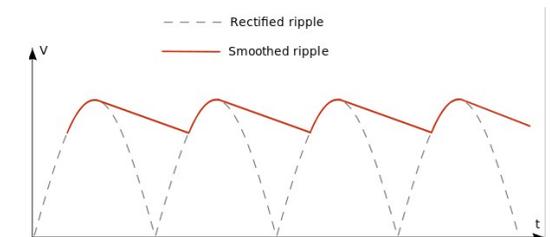
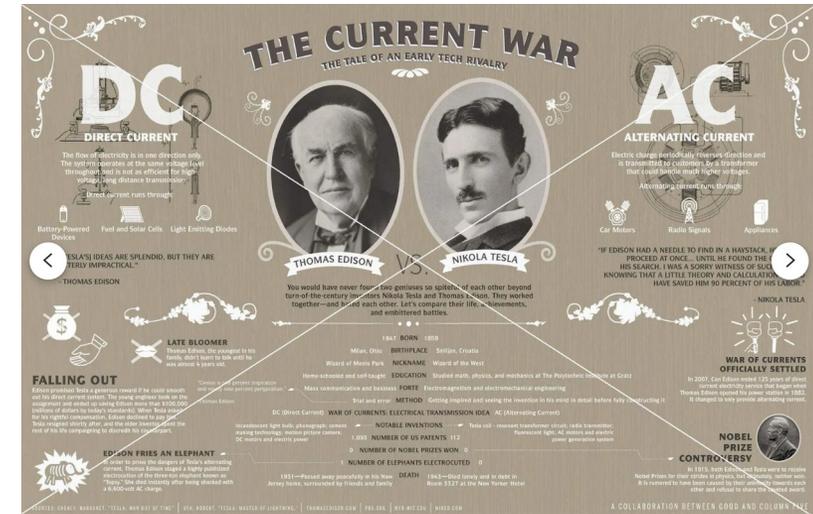
«**Guerra**» della corrente vs Edison (no Nobel 1915)

Alla fine per la distribuzione della corrente la spuntò TESLA. AC (anche se... vedi progetto Civitavecchia CC)

$DV = R * I \rightarrow P = DV * I = R * I^2 P \rightarrow T^{\circ}C$ Bassa temperatura bassa corrente. Ma per poter trasferire molta potenza \rightarrow **alta DV**

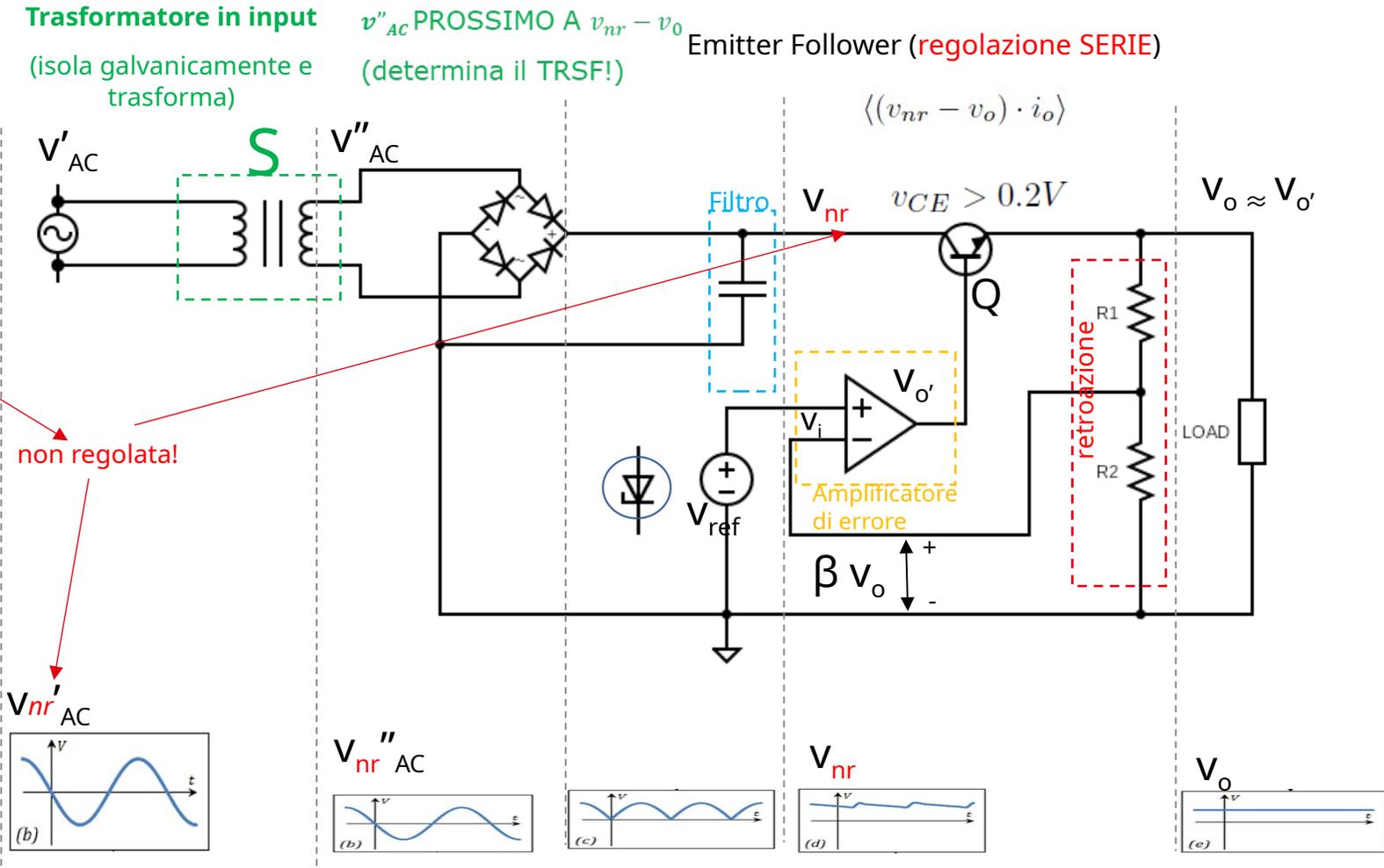
II TRASFORMATORE : linee di trasmissione filari ad altissima tensione (TERNA, linee elettriche aeree: **132-150kV** a 220AC o **380AC** (trifase): il mondo della **trasmissione dell'energia è in corrente alternata!**

La maggioranza dei **circuiti elettronici per funzionare ha bisogno di una tensione continua** (come quella delle pile) e **stabilizzata!** In ogni dispositivo elettronico è presente un convertitore di energia

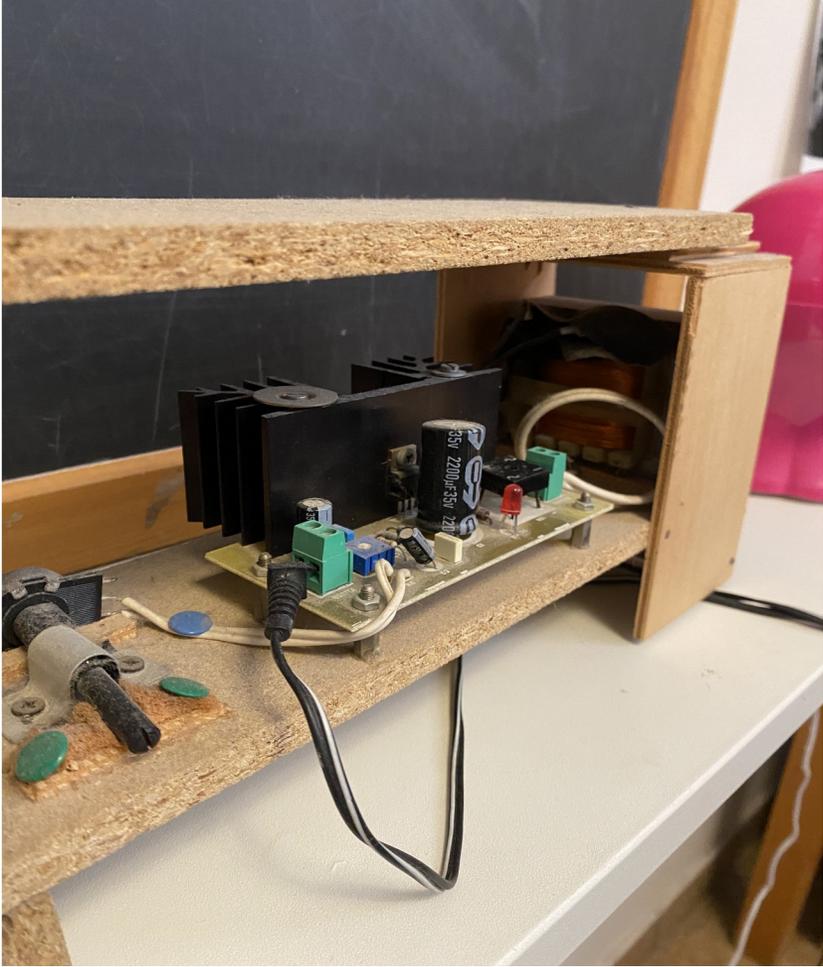
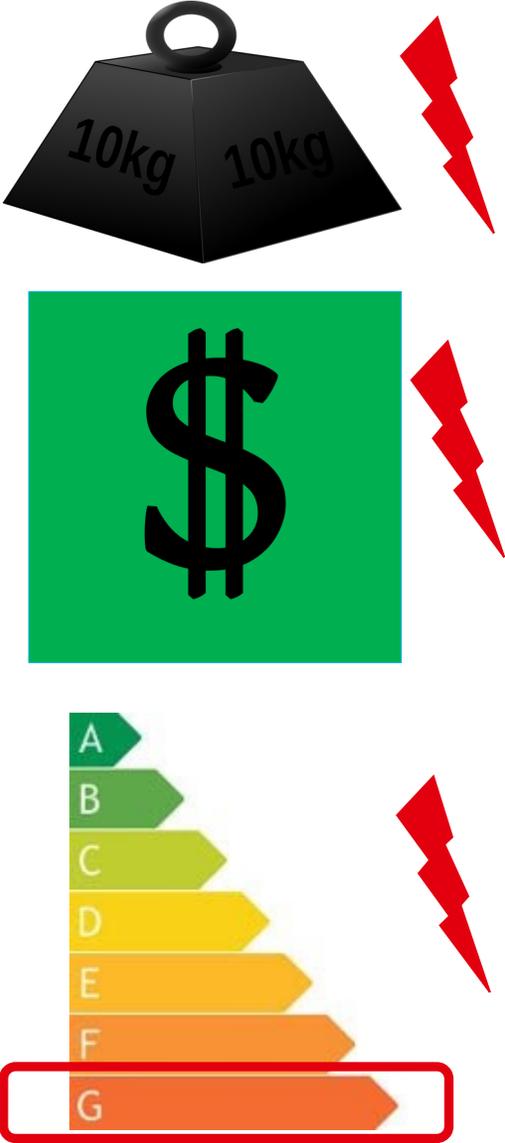
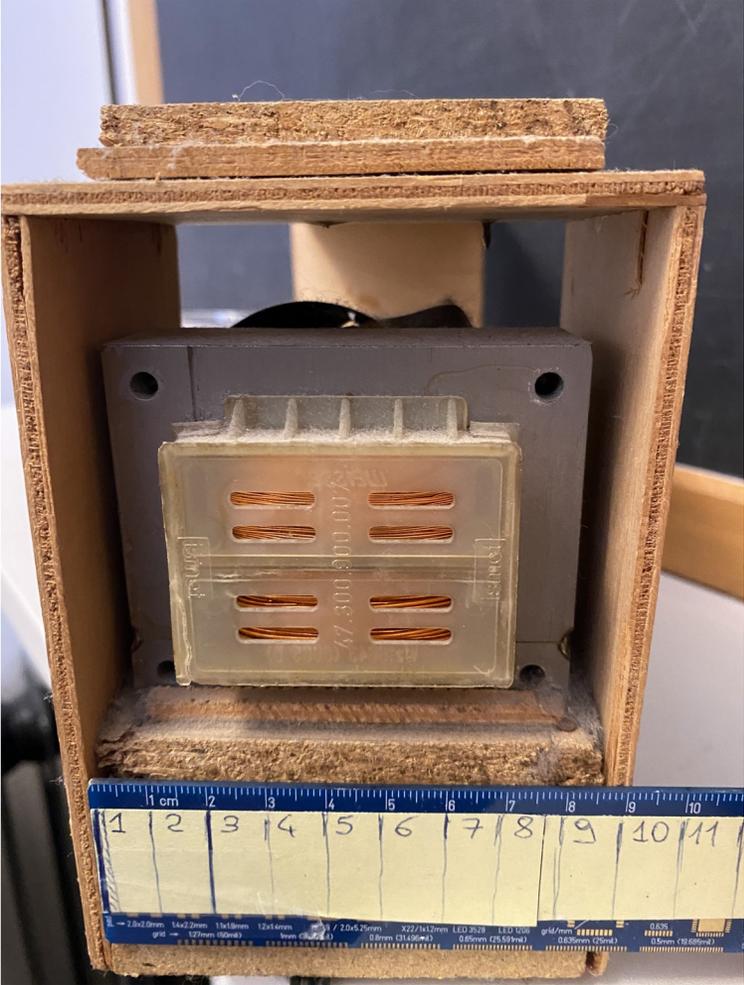


Convertitore Tradizionale : L'Alimentatore Stabilizzato (1/2)

- La conversione dell'energia tradizionalmente è fatta con dei trasformatori di potenza (ingresso: $v'_{AC} = 220V_{AC}$, con $f=50Hz$ ma $V_p=220\pm 40V!$) uscita v''_{AC} alternata: ad esempio $25 V_{AC}$
- Dimensione **S** trasformatori: **GRANDE!** perché è $\frac{1}{\alpha} f_{hz}$ di rete (50 Hz).
- Dissipano tanto sullo stadio finale. Il Transistor **Q** è POLARIZZATO in zona attiva
 $\rightarrow (\min\{v_{nr}\} > v_o)$ e $V_{CE} > 0.2V \rightarrow$ Dissipa sempre!
- Se il carico è 10Volt e $\langle v_{nr} - v_o \rangle = 2V$ (cosa tipica) sto dissipando **COSTANTEMENTE** $2V \cdot I$ sul Bjt!



Convertitore Tradizionale : L'Alimentatore Stabilizzato (2/2)



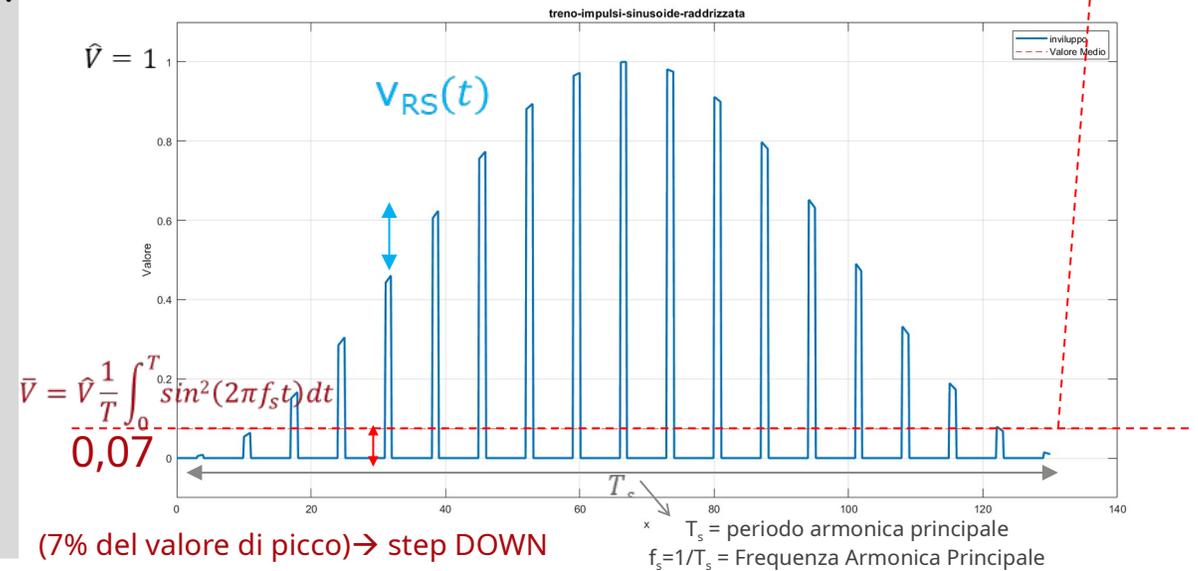
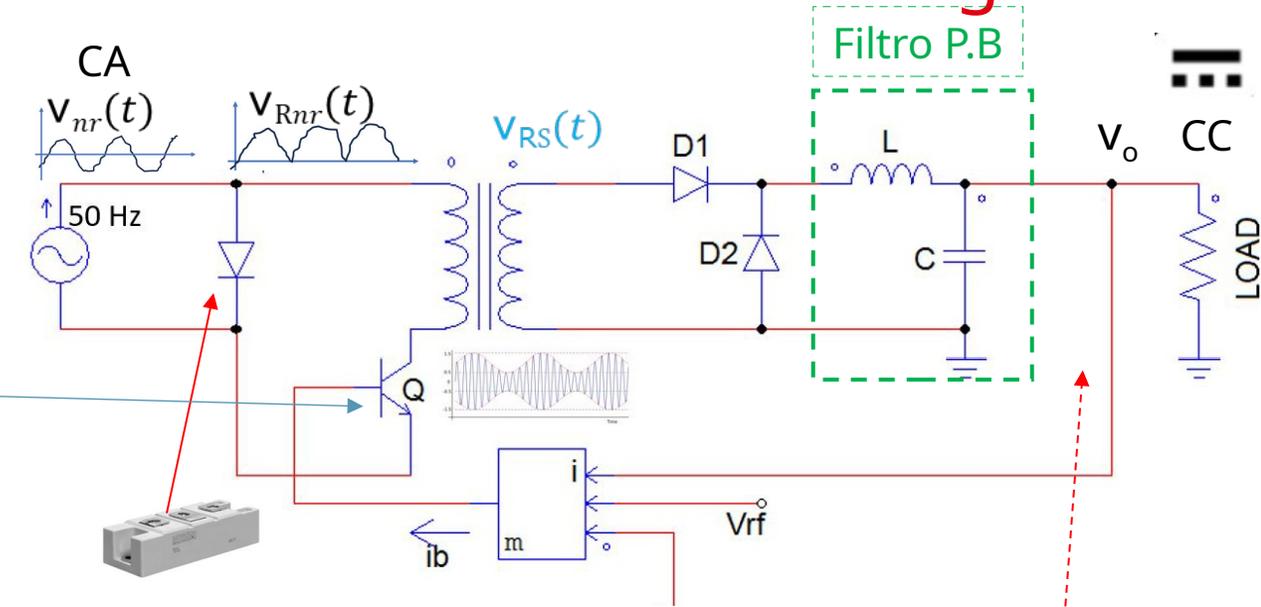
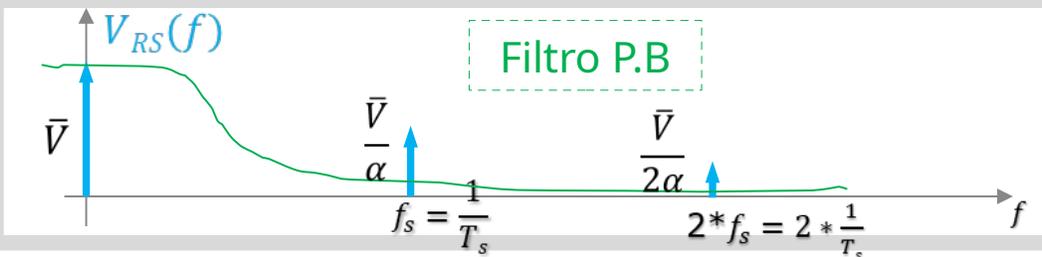
Necessità dell'elettronica di potenza: Alimentazione Switching

Alternativa: passo da alternata a continua usando un regolatore switching: Switching Regulator

- Diodo di Potenza fa la rettificazione
- Il Q è un Transistor di Potenza **ad alta frequenza**(e diminuisce la tensione) ma mantiene l'andamento dell'ingresso (e visto che commuta sta quasi sempre o acceso o spento) **consuma poco** : $DV \cdot I$ è la P_{diss} se è spento $I=0 \rightarrow P \rightarrow 0$, se è acceso $DV=0 \rightarrow P=0$)
- Il trasformatore ad alta frequenze è più piccolo (ingombro! Costo!)
- Occhio che a frequenze di KHz è un'antenna!

$$T_{d_{ON}}=a, T_{d_{OFF}}=a*4, \text{ Duty Cycle}=1/5 \rightarrow \bar{V} \propto D * \hat{V} < \hat{V}$$

Tensione Rettificata Campionata (Sampled), Regolata



Continua → Alternata : Inverter (switching), es. 2 Livelli

Si può generare una tensione sinusoidale (di potenza) partendo da una tensione e corrente continue (segnale di entrata di un inverter fotovoltaico) mediante lo stesso meccanismo.

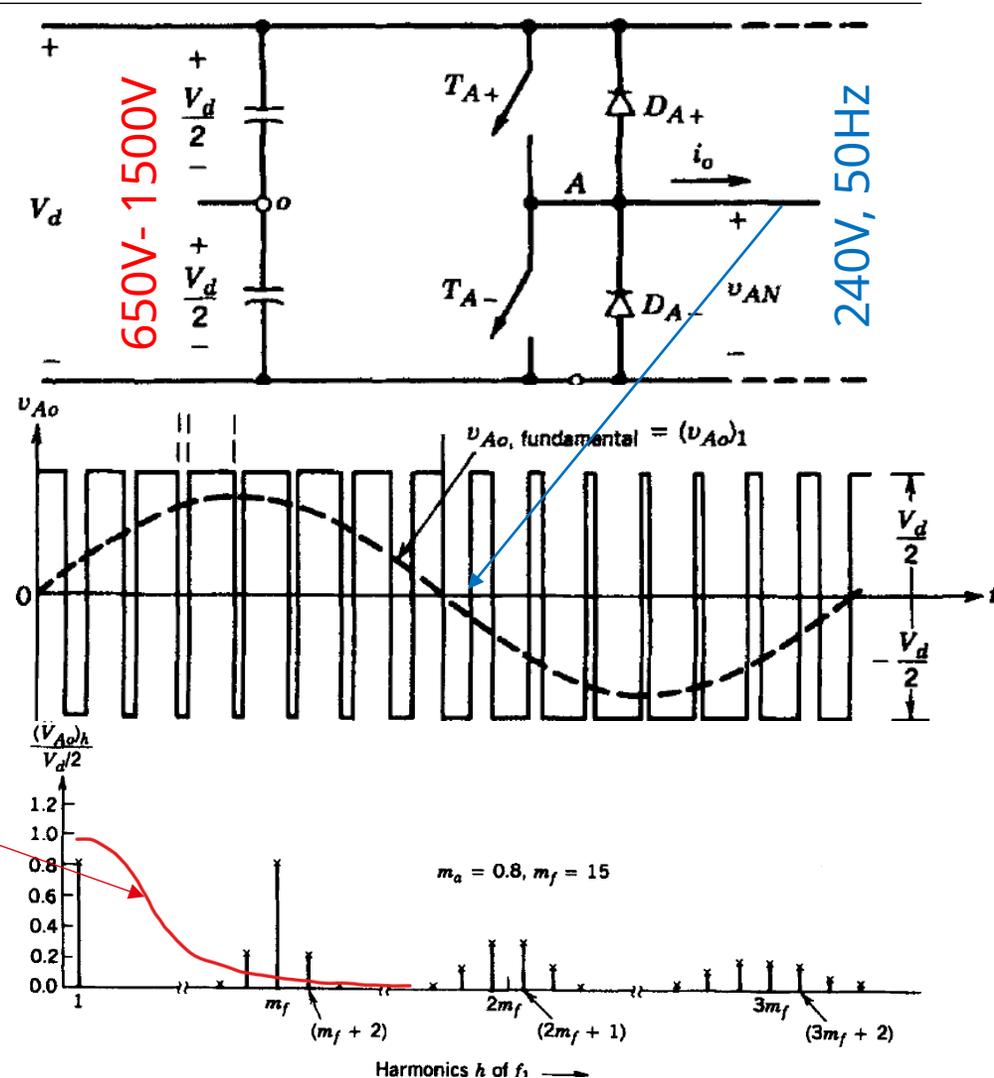
Agendo sul duty cycle degli interruttori possiamo raggiungere due scopi

- 1) **controllare il valore medio della tensione** di uscita (quindi ad esempio se la tensione totale di un inverter domestico da 6kW composto da 16 pannelli in serie da 370W è di 500V dobbiamo abbassarla al livello della tensione di rete 230V)
- 2) **Includere una portante a 50Hz facendo in modo che il duty cycle cambi da un valore minimo a un valore massimo in periodo di 1/50 sec** (servirà un *buon filtro* per filtrare le armoniche del treno di impulsi)

Fare tutto questo con un normale oscillatore, generatore e moltiplicatori di frequenze analogici è naturalmente possibile ma il consumo è di 2 ordini di grandezza superiore perché i transistor operano in zona Attiva! Nella PWM gli switch (IGBT o MOS) consumano SOLO durante la transazione (e quando sono accesi solo la potenza di conduzione in continua che è legata a una bassa R_{on})

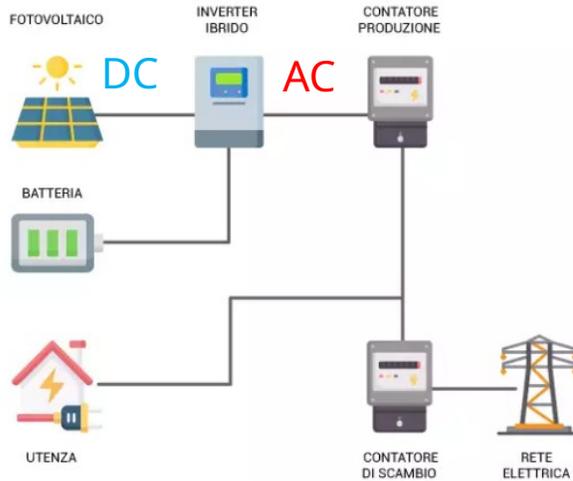
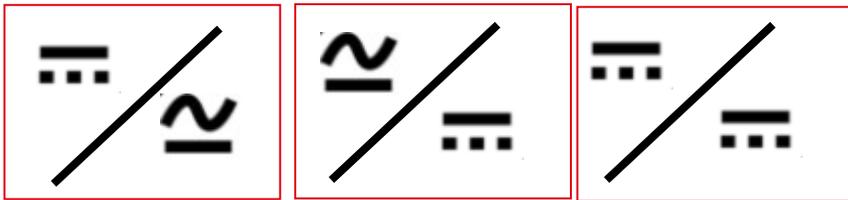
+) efficienza, consumo, dissipazione

-) generazione EMI (→ **3L**). Limitazione di frequenza di switching legata alla tecnologia (oltre i 20kHz si usano MOSFET SiC, efficienze maggiori)

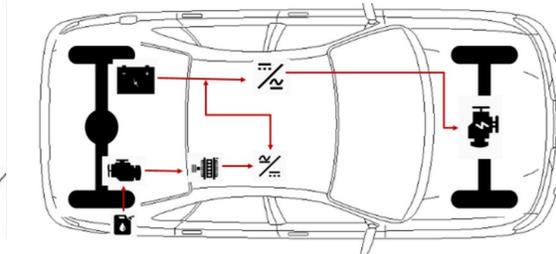
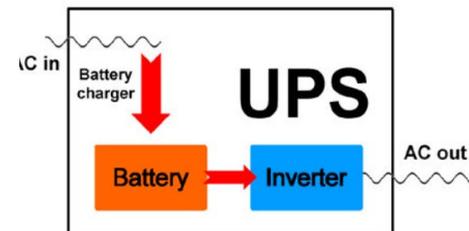
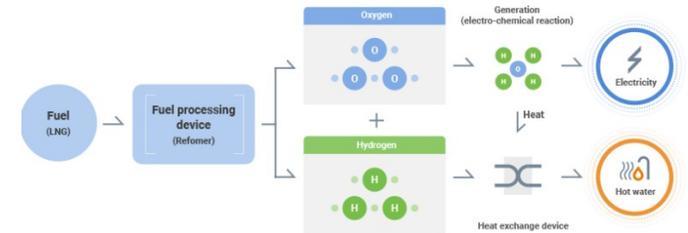
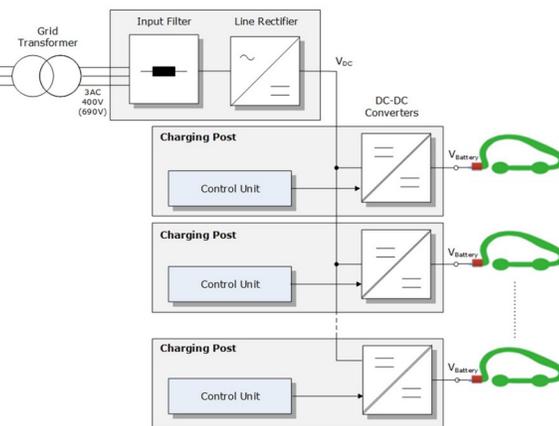
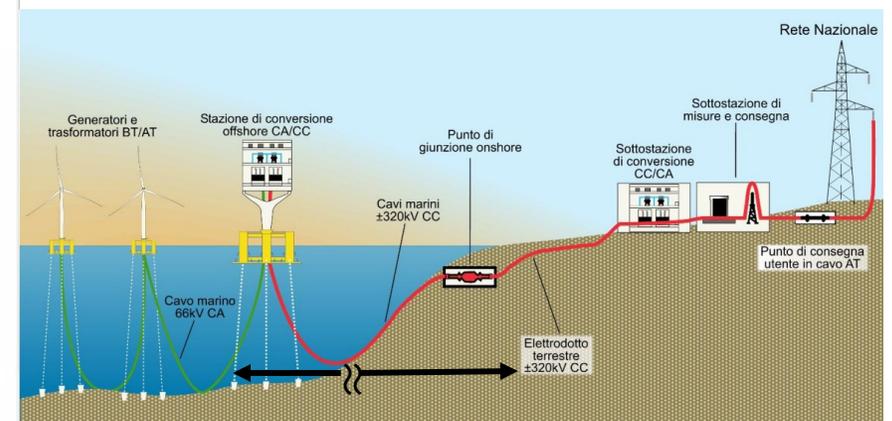


Application Examples of Power Electronics

- Photovoltaic
- Off Shore wind
- EV charge station
- Energy Storage
- UPS
- Fuel-Cell
- Automotive
- ...
- ...



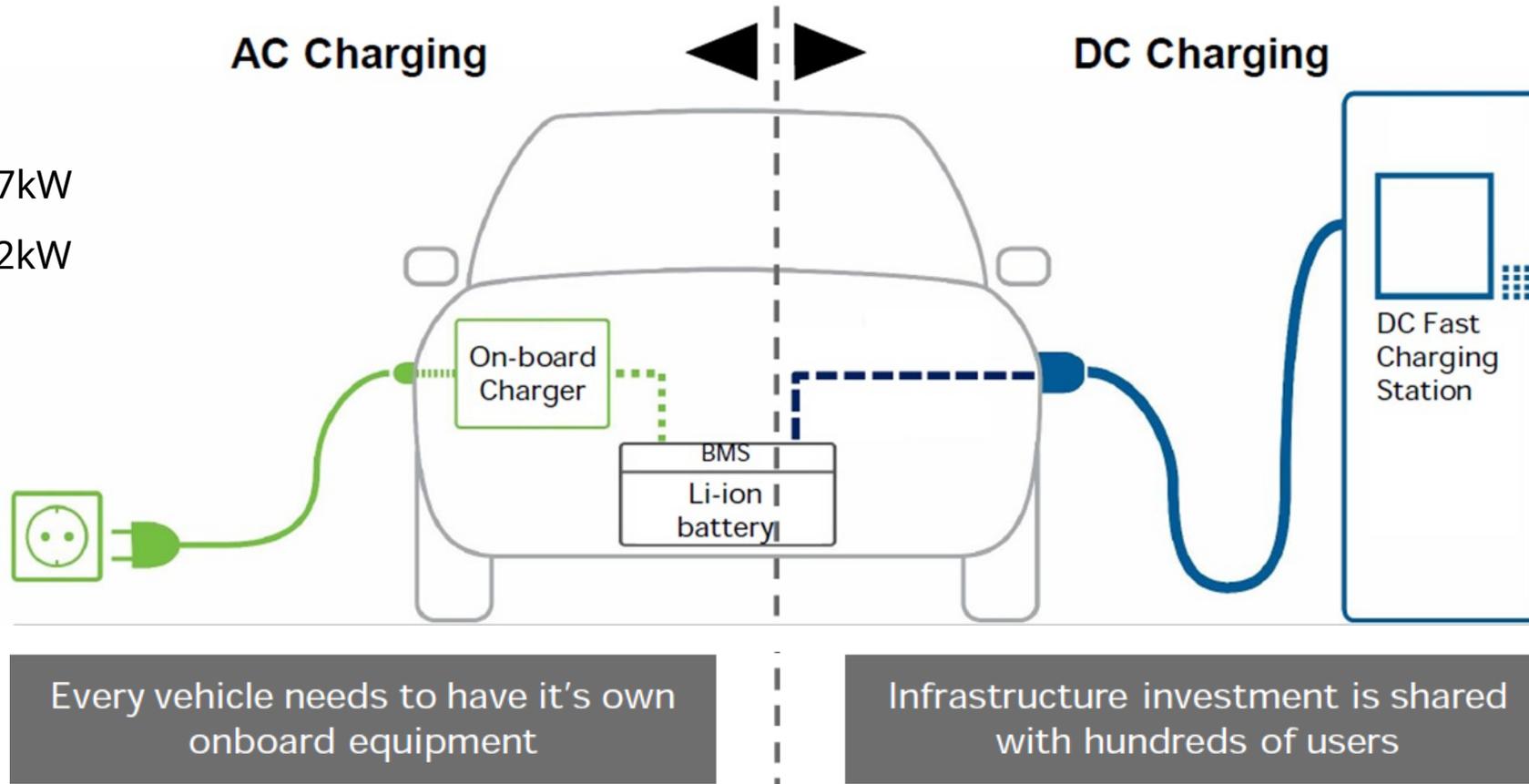
(MISE, 16/03/2022, Proc.8163)



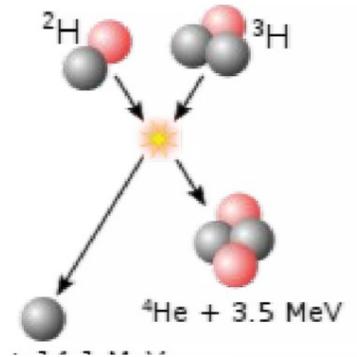
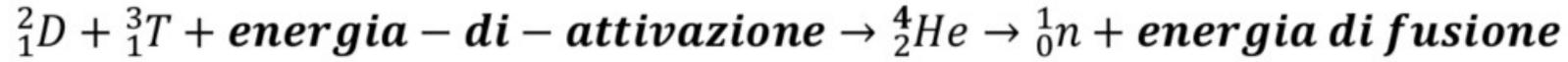
On-Board vs Off-Board Charging

- On Board : 7kW
- Wall Pack 22kW

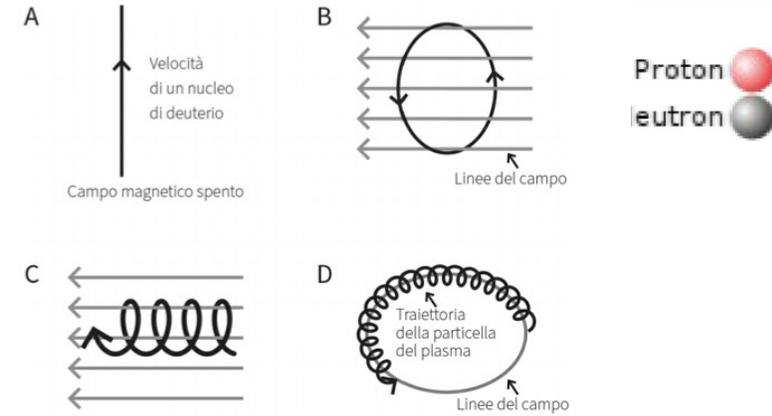
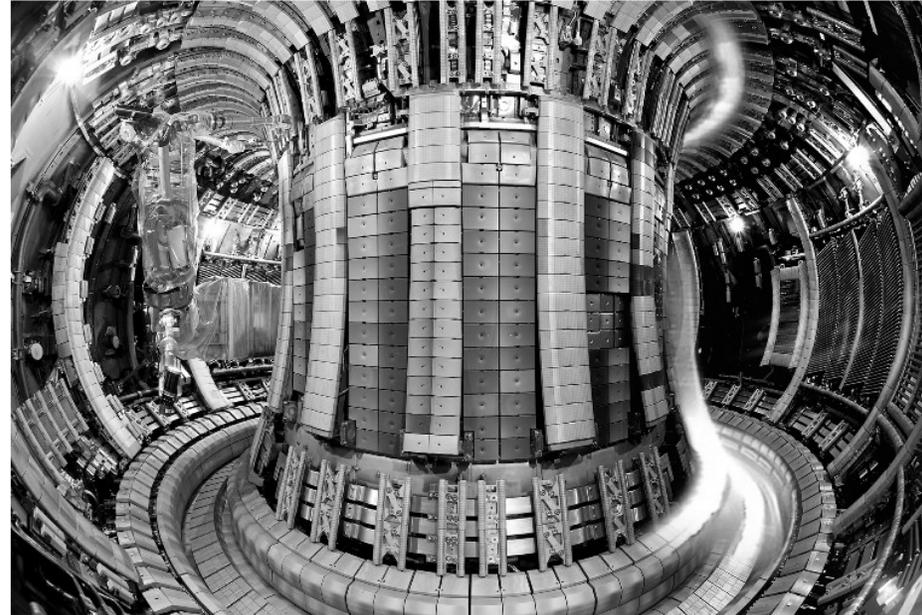
- Home!



Fusione Nucleare (Deuterio-Trizio):ITER



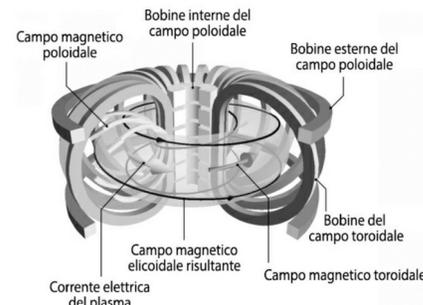
- Legge di Maxwell Faraday (Un $\vec{B}(t)$ variabile induce un \vec{E} .
- Legge di Ampère-Maxwell : un $\vec{E}(t)$ o una $\vec{I}(t)$ corrente variabile inducono un campo Magnetico
- Fusione: servono **150M°C** . Nessun metallo resiste
- Plasma (confinato in campo e.m molto potente)
- Necessità di andare a $-269^{\circ}C$
- Gas di Deuterio/Trizio ionizzato quindi può essere confinato.



La regola della mano destra



Se la particella ha carica negativa, la forza agirà in direzione opposta

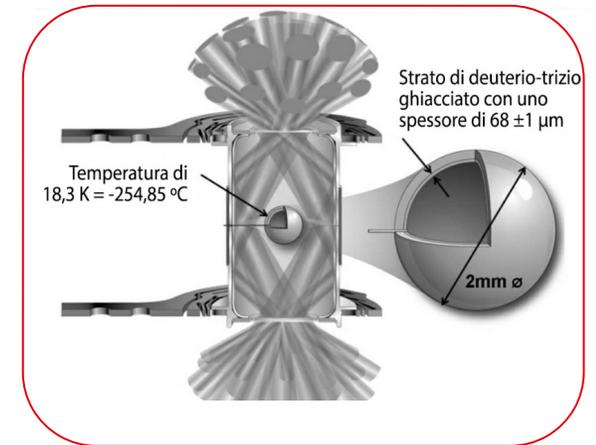


Tempistiche, Occhio Critico, Storia

- Iter : 2035 (Finanziamento Pubblico) /De+T
- DEMO : 2040 (Finanziamento Pubblico)
- Mini reattori a fusione e/o finanziamenti private (eg TAE Technologies/Google per la fusion Protone-Boro step successive nel 2025 (Copernicus) e 2030 (Da Vinci)
- ~~Occhio alle notizie stampa! 13/12/2022 "Il Laboratorio National Ignition Facility RECORD sulla fusione ! Dopo aver depositato 2,05 Mj di energia sulla capsula attraverso il LASER la fusione ha liberato 3,15 Mj di energia!" Fattore $Q = P_{out}/P_{in} = 1,54 \rightarrow 154\%$? Bingo? NO~~

Domanda del giornalista: quanta energia è stata prelevata dalla rete elettrica per generare i 192 laser?

Risposta: 300MJ! \rightarrow TOTALE energia richiesta 300MJ+2,05MJ \rightarrow Q «ingegneristico» è 0,01! Il Q «scientifico» è 1,54!



- STORIA: «Energia dell'Atomo» , Quaderni di «Le Scienze» , Dic 1982 Ippoliti: Fusione Nucleare primo decennio del 21mo secolo !

Rif: Baroni, Simone. **La fusione nucleare. Mito o realtà?: Una svolta possibile per una nuova energia** (Italian Edition) Hoepli. Kindle Edition.

Perché l'Elettronica di Potenza nelle centrali a Fusione/Fissione?

- Nucleare (Fissione/Fusione)
 - EFFICIENZA ENERGETICA e DIMINUIZIONE DELLE PERDITE
 - Negli impianti a Fusione è necessario generare campi elettromagnetici (o laser) di potenze elevatissime come abbiamo visto, e quindi è necessario avere una efficienza di conversione e una riduzione delle perdite di conversione (meno CALORE da dissipare). Mediante le tecniche di Elettronica di Potenza si può progettare convertitori di energia (in funzione dei carichi da alimentare) in modo più EFFICIENTE e con MINORE PERDITE dei convertitori CLASSICI (anche detti LINEARI che hanno bisogno di un dispositivo attivo SEMPRE ACCESO).
 - **Conversione AC/DC e DC/AC** con controllo **dinamico** e molto accurato (migliore qualità dell'energia)
 - Gestione **dei sistemi AUSILIARI (pompe di raffreddamento, sistemi di sicurezza)** che richiedono **alimentazione STABILE e PRECISA**
 - **Sicurezza:** i CONVERTITORI a Semiconduttori di Potenza sono progettati per garantire prestazioni di **ALTA AFFIDABILITA'** in condizioni ambientali sempre più critiche e in condizioni operativi estremi
 - Possibilità di lavorare a **TENSIONI E CORRENTE molto più elevate dei convertitori tradizionali**
 - **Controllo PRECISO della conversione mediante sistemi di controllo elettronico (*driving della conversione*):** capacità di ADATTARE il convertitore alle esigenze del carico in condizioni estreme e in modo molto più rapido dei convertitori classici.
 - **SMART GRID:** Il convertitore di potenza può essere controllato in modo elettronico, dinamico modulare e scalabile facilitand o l'adattamento alle diverse condizioni operative

Il Miracolo della radioattività !



ngocduylinh

During a brief window in 1950-51, children could get the Gilbert U-238 Atomic Energy Lab—a kit allowing them to make nuclear reactions at home using **ACTUAL RADIOACTIVE MATERIAL**. It was removed from shelves in 1951.

Cr. Historyinpictures



Power Electronics

3. Power Semiconductor Devices

Semiconductors Basics...



Einstein spiega l'effetto fotoelettrico (1905)(Nobel 1921)



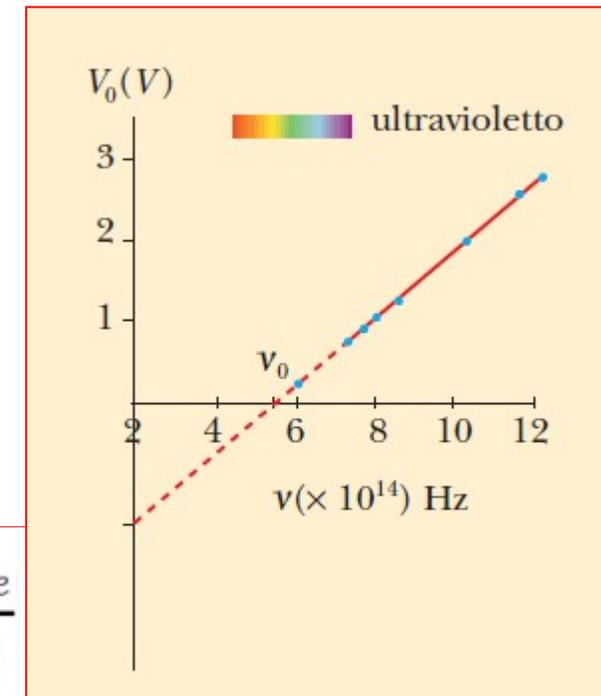
Einstein(1905)

- La radiazione monocromatica del corpo nero è composta di **quanti discreti di energia proporzionali alla frequenza della radiazione incidente** attraverso una costante (che poi fu calcolata essere h)
- solo UN fotone può interagire con UN elettrone («**palla di biliardo**» → **teoria corpuscolare della luce** - oltre la teoria ondulatoria di Maxwell della luce) e trasferisce all'elettrone l'energia istantaneamente
- L'energia netta dell'elettrone è pari alla differenza tra l'energia del fotone meno l'energia di estrazione (energia minima che bisogna imprimere all'elettrone da parte del fotone per staccarlo dai legami del metallo)
- Quindi **la relazione tra potenziale di arresto e frequenza è LINEARE** (equazione della retta) **e dipende SOLO da ν !!** (non dall'intensità!)
- Conferma sperimentale Milkan, 1916 (e valore di h)

h costante di Planck $6,626 \times 10^{-34}$ [J.s]

$$\Pi \varepsilon = \frac{R}{N} \beta \nu - P$$

$$E_{k,max} = h\nu - \phi_e = eV_0$$



$$V_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{\phi_e}{e}$$

Arriva Bohr! (1913)

- Bohr voleva trovare il modello delle bande di energie dell'atomo di idrogeno (si sapeva empiricamente che erano discontinue). Aveva a disposizione solo la **legge di Rydberg-Ritz** che per l'atomo di idrogeno è
- Bohr partì quindi dall'intuizione di Planck ipotizzando che il momento angolare **l** dell'elettrone che orbita sia quantizzato secondo **h**
- Applicando quindi la relazione di velocità con la carica elettrostatica e la definizione di momento angolare riesce a trovare il valore del raggio dell'orbita
- In questo senso l'energia dell'elettrone **NON è questa** (si trova con considerazioni di meccanica classica)
- Ma questa!** (energia del primo raggio di Bohr dell'atomo di idrogeno) . L'energia minima dell'elettrone NON E' ZERO! E salta di un valore pari a $\Delta E = h\nu$! L'atomo di idrogeno assorbe solo energie quantizzate. E salta solo per livelli quantizzati. E quando è a riposo il suo elettrone NON COLLASSA sul nucleo ma gira su una traiettoria (per la meccanica classica collasserebbe sul nucleo!)

$$\frac{\nu}{c} = \frac{1}{\lambda} = R \left[\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right]$$

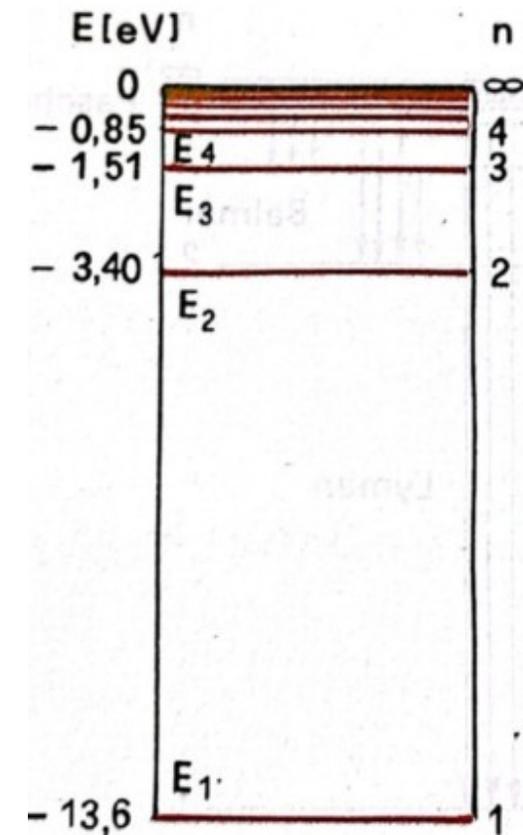
$$l = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar$$

$$r_n = \frac{l^2 4\pi\epsilon_0}{m_e e^2} = n^2 \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{e^2 m_e}$$

$$E_{tot} = -\frac{1}{24\pi\epsilon_0 r} \frac{e^2}{2}$$

$$E_{tot_n} = \frac{e^4 m_e}{n^2 8\pi\epsilon_0^2 h^2}$$

$$E_{tot_1} = \frac{1}{24\pi\epsilon_0 r_0} \frac{e^2}{2} = \frac{e^4 m_e}{8\pi\epsilon_0^2 h^2} = -13,6 eV$$



Il dualismo onda-particella: De Broglie (1924)

Il modello di Bohr si basa su caratteristiche “corpuscolari” dell’elettrone insieme all’ipotesi della quantizzazione dell’energia. Ma non fa nessuna ipotesi ondulatoria!

Nel 1924 De Broglie ipotizzò che **ANCHE l’elettrone** (come il FOTONE) fosse dotato **sia di caratteristiche ondulatorie** che **corpuscolari**. E definì le famose relazioni che legano caratteristiche corpuscolari classiche (quantità di moto e energia) a quelle ondulatorie (frequenza e lunghezza d’onda). Quindi l’elettrone di Bohr semplicemente per De Broglie si comporta come un’onda stazionaria che «oscilla» solo con un numero intero di lunghezze d’onda.

D.B definì delle relazioni che legano aspetti materiali (come la quantità di moto) ad aspetti ondulatori (come la lunghezza d’onda).

Il fatto che l’elettrone si comporti come una particella OPPURE come un’onda è dimostrato dai famosi esperimenti dell’interferometro di Young

$$\begin{cases} E = h\nu \Rightarrow \nu = E/h \\ p = h\nu/v = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow \lambda = h/p \\ \mathbf{p} = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{2\pi/k} = \hbar\mathbf{k} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \vec{p} = k\hbar \\ E = \omega\hbar \end{cases}$$

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi c}{\lambda n} = c \frac{|k|}{n(k)}$$

$$|k| = \frac{2\pi}{\lambda}$$

La Funzione d'onda e l'equazione di Schrödinger (1926) il perché dei livelli energetici

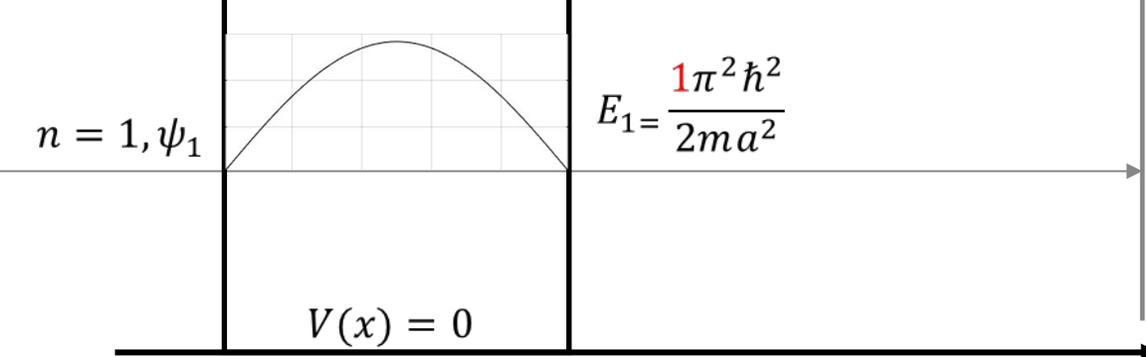
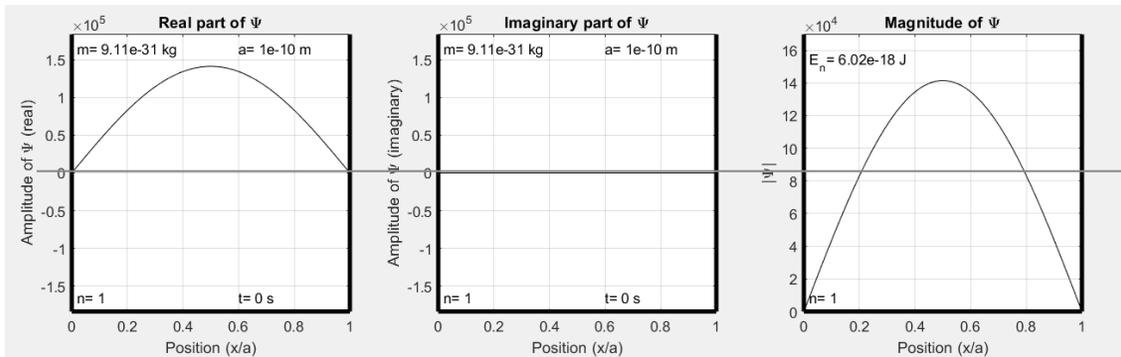
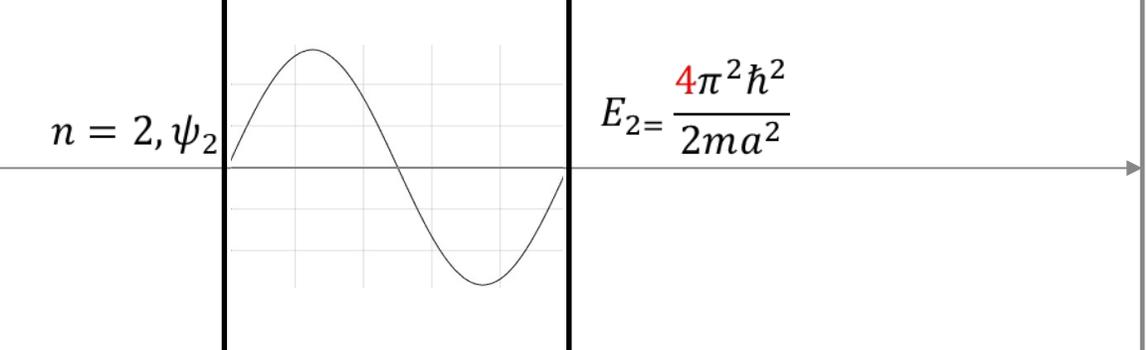
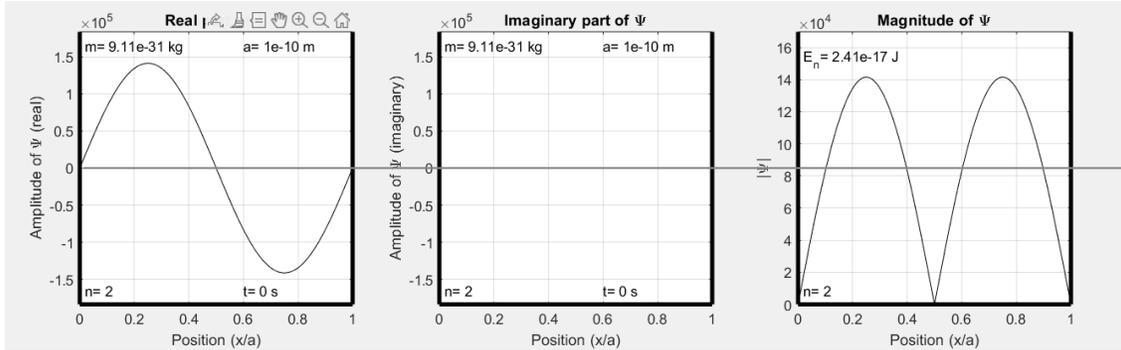
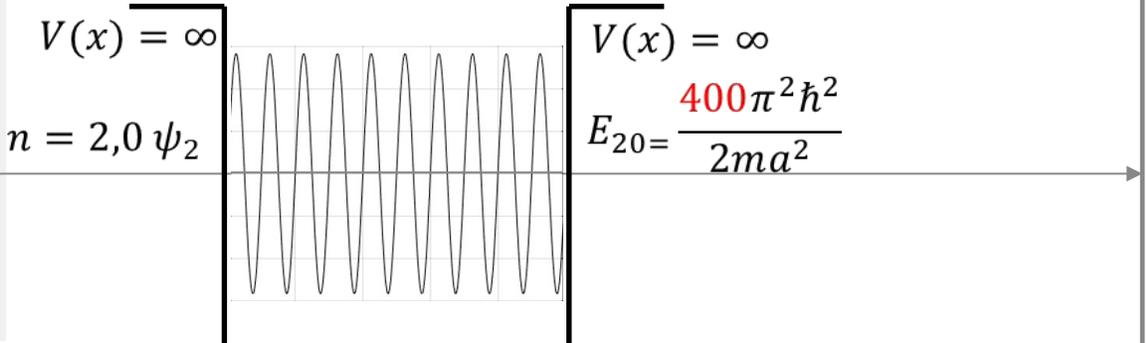
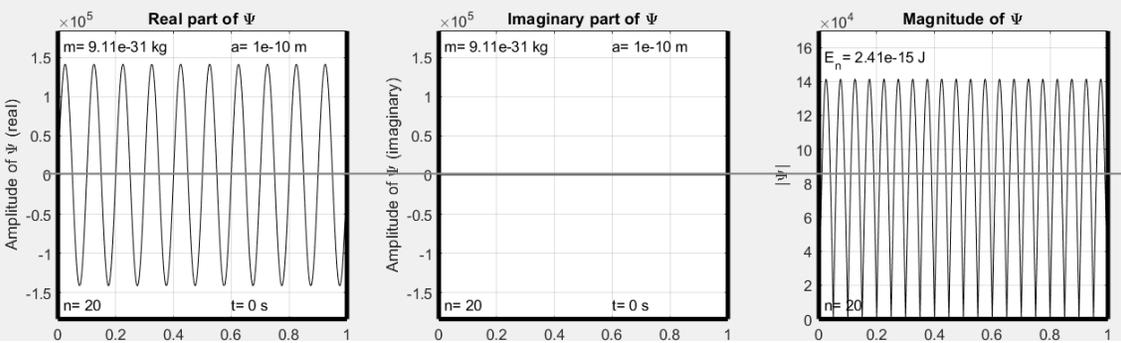
$$i\hbar \frac{\partial |\psi(x, t)\rangle}{\partial t} = \hat{H} |\psi(x, t)\rangle \quad \hat{H} = \frac{-\hbar^2}{2m} \cdot \frac{\partial^2 [\]}{\partial x^2} + V$$

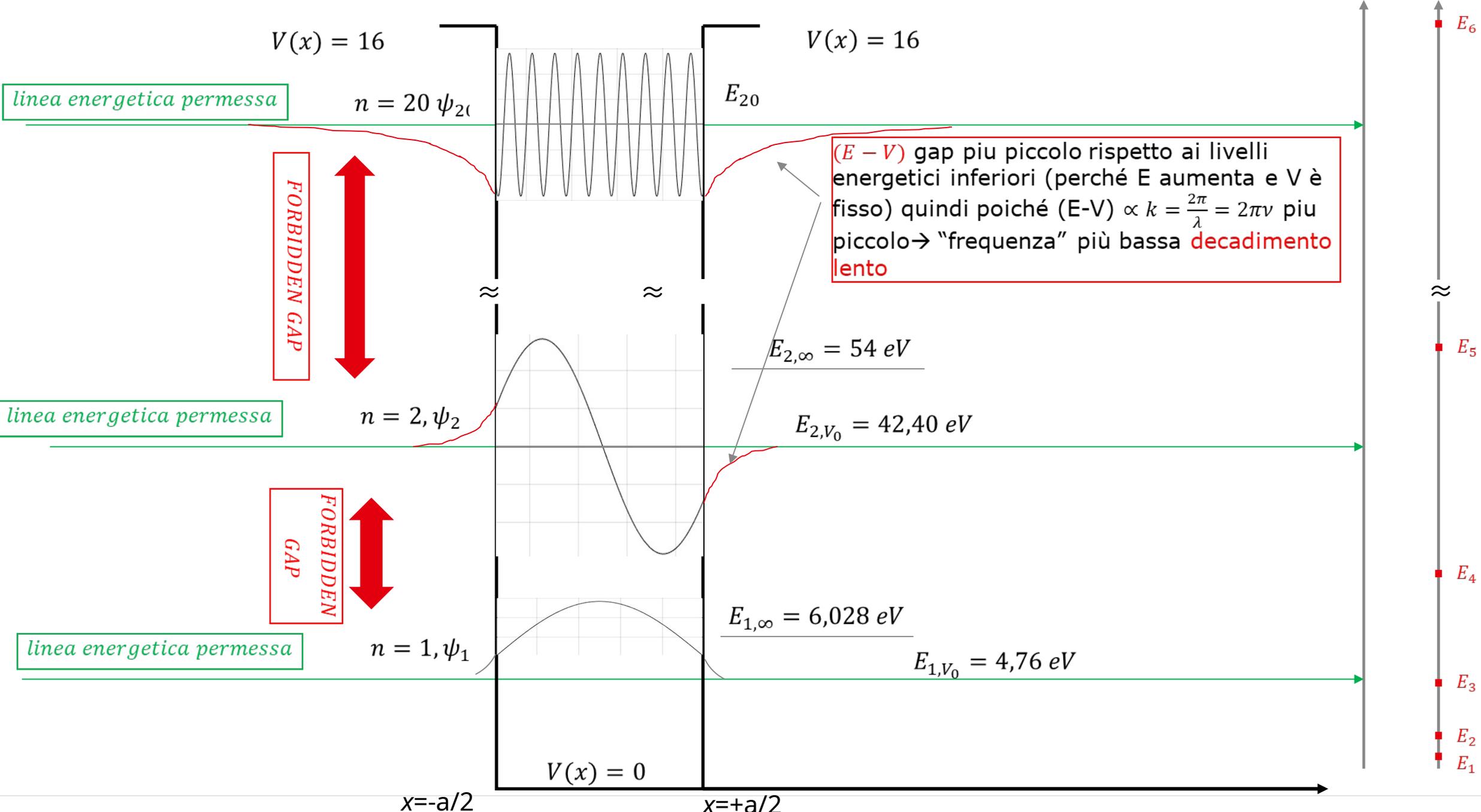
Nel 1926 Schrödinger riuscì a definire il comportamento di sistemi atomici complessi unificando la teoria nella cosiddetta **meccanica ondulatoria** che culminerà nella sua famosa equazione

Ad ogni particella si può associare una **funzione d'onda**. $\psi(\vec{r}, t)$ tale che **il suo** $|\psi(\vec{r}, t)|^2$ rappresenta (se normalizzata) **una densità di probabilità (Born)** di trovare una certa particella ad esempio nello spazio

La risoluzione dell'equazione di Schrödinger per la funzione d'onda in un particolare potenziale elettrostatico è **un problema classico di autovalori e autovettori**. E la sua soluzione fornisce per le energie esattamente una serie di **valori energetici quantizzati**. **Ossia se studiamo i livelli energetici consentiti per un elettrone in una «buca» di potenziale scopiamo che le soluzioni sono una sequenza di valori DISCRETI (prossime due slide esempio buca $V = \infty$ e $V = \text{finito}$)**

L'equazione di Schrödinger non vale solo per sistemi semplici (come un elettrone in un campo elettrostatico generato da un nucleo positivo che è il caso dell'atomo di idrogeno) ma è GENERALE anche se le sue soluzioni per sistemi troppo complessi possono essere determinate solo con metodi grafici e/o approssimati





Atomi isolati: righe di energia ben distinte!

ok ... Ora abbiamo una «regola» concettuale per «accettare» il fatto che gli atomi isolati emettono uno spettro a righe: prendiamo due atomi isolati «distanti» (ossia non interferenti): le bande energetiche delle loro funzioni d'onda sono queste

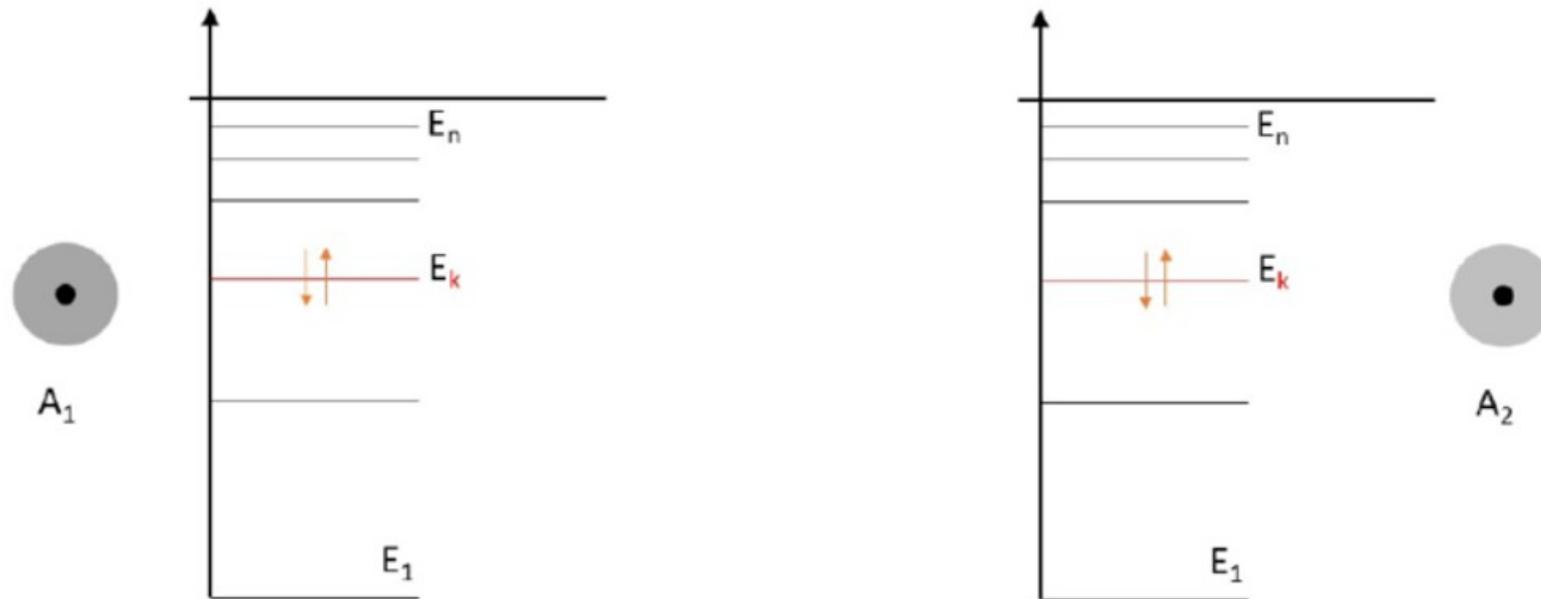


Figura 1.6.2: Bande energetiche di due atomi (con lo stesso numero Z) isolati

Atomi raggruppati: per formare un elemento le righe di energia si trasformano in «bande» (Pauli & C. dixit!)

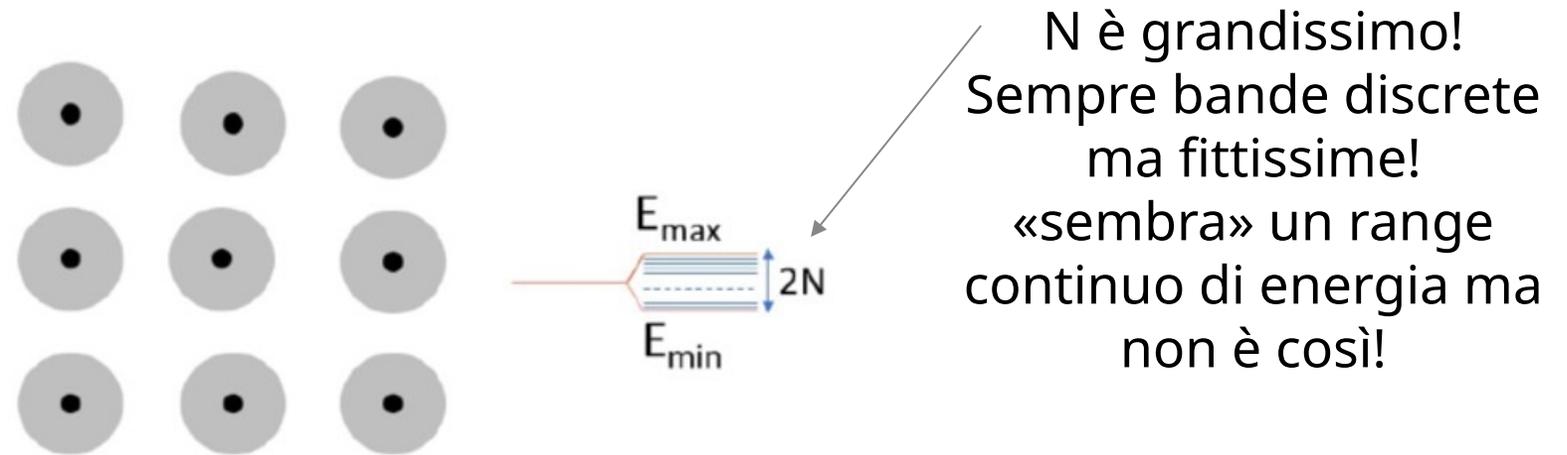
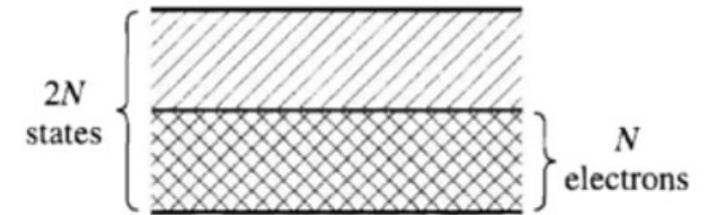
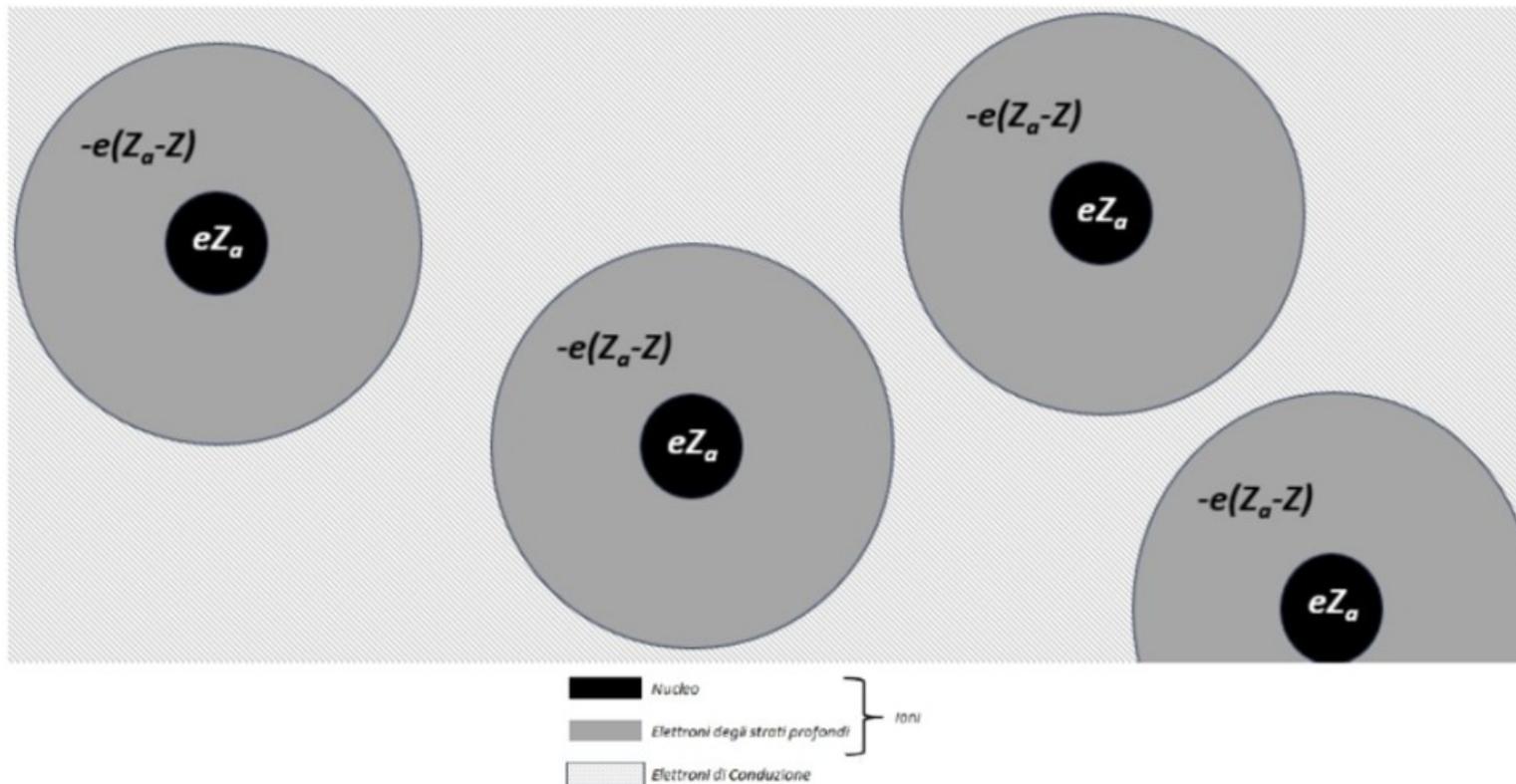


Figura 1.6.4: Formazione della banda energetica di un particolare livello di un cristallo solido composto da N atomi legati

Conduttori: bande di valenza parzialmente riempite: mare di elettroni di conduzione



Le fittissime righe disponibili per i valori energetici formano una banda (che sembra continua ma non lo è ma sono talmente fitte che è come se lo fosse).

Per di più gli elettroni occupano parzialmente quella banda che vuol dire che basta pochissima energia per poterli eccitare e far occupare una banda leggermente superiore

Isolanti: bande non sovrapposte e Energy Gap «alto»

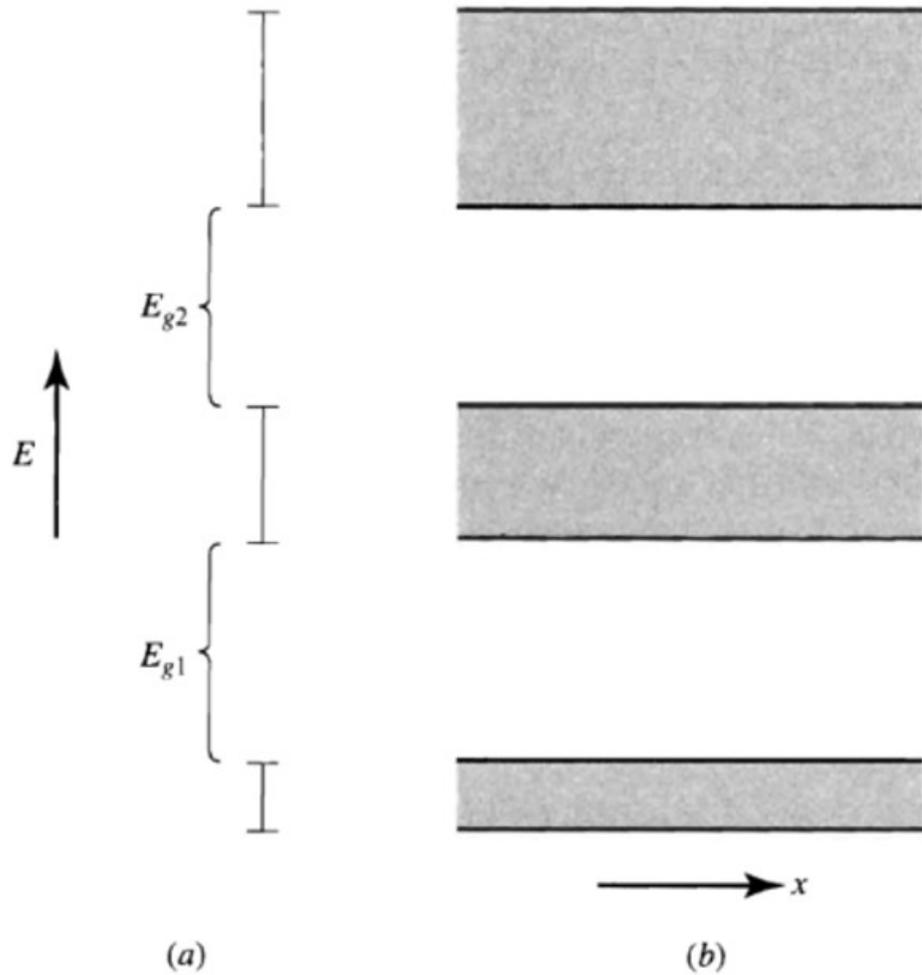


FIGURE 1.2 Broadening of allowed energy levels into allowed energy bands separated by forbidden-energy gaps as more atoms influence each electron in a solid: (a) one-dimensional representation; (b) two-dimensional diagram in which energy is plotted versus distance.

Qui gli elettroni occupano una banda che è separata da quella successiva. Se la banda è piena e la successiva è vuota, vuol dire che la banda di valenza è completamente occupata (gli elettroni sono occupati nei loro legami covalenti con gli atomi del materiale) e hanno una banda proibita (Energy Gap) che dovrebbero superare per poter essere promossi alla banda successiva (vuota). Se questo E_g è «alto» il materiale si comporta come un isolante (a temperatura ambiente)

Maggiore è T maggiore è la probabilità del salto

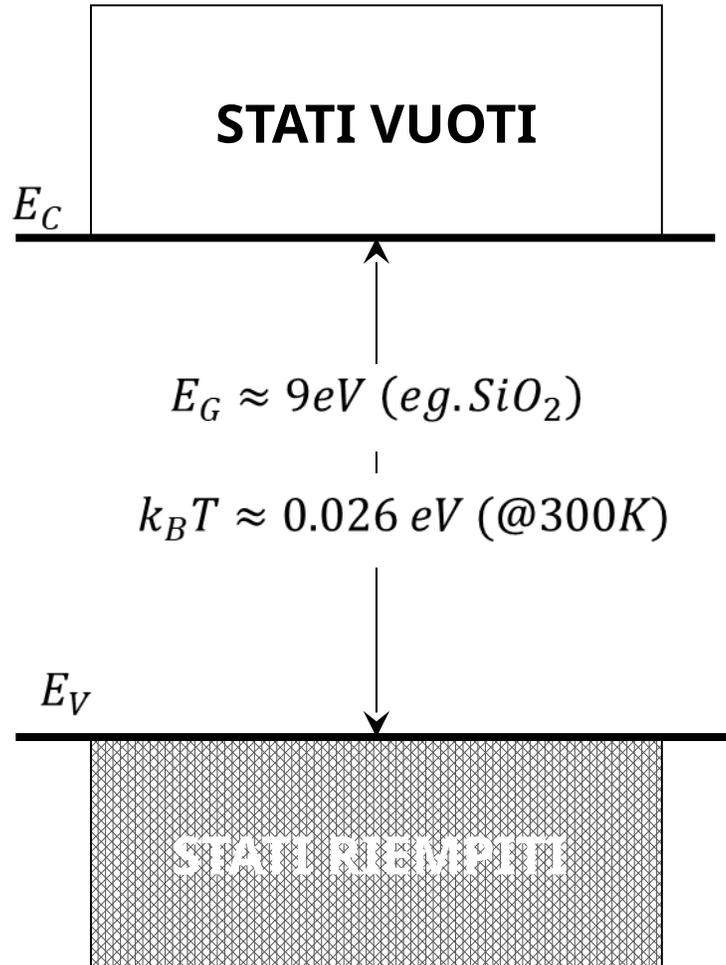
I semiconduttori sono una via di mezzo

Semiconduttori e atomi con cui vengono create molecole composte nella tavola periodica

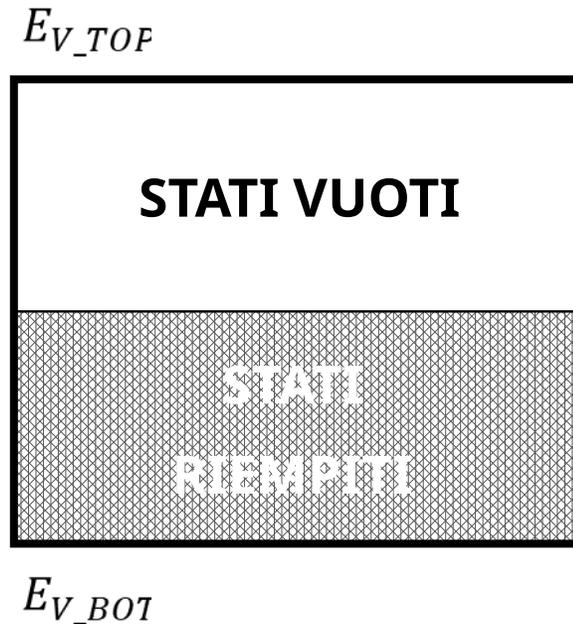
NUMERO ATOMICO		29	1;2	NUMERI DI OSSIDAZIONE		ELETTRONEGATIVITÀ (PAULING)		PRIMO POTENZIALE DI IONIZZAZIONE (eV)		STRUTTURA ELETTRONICA				
		Cu	7.726							RAME				
		(Ar) 3 d ¹⁰ 4 s ¹												
				III A		IV A		V A		VI A		VII A		1 s ² ELIO
		5	3	6	2; ± 4	7	± 1; ± 2; ± 3; 4; 5	8	-2	9	-1	10	0	
		B	2.0	C	2.5	N₂	3.0	O_{2,3}	3.5	F	4.0	Ne	—	
		8.298		11.26		14.534		13.618		17.422		21.564		
		1 s ² 2 s ² 2 p ¹		1 s ² 2 s ² 2 p ²		1 s ² 2 s ² 2 p ³		1 s ² 2 s ² 2 p ⁴		1 s ² 2 s ² 2 p ⁵		1 s ² 2 s ² 2 p ⁶		
		BORO		CARBONIO		AZOTO		OSSIGENO		FLUORO		NEON		
		13	3	14	2; ± 4	15	± 3; 5	16	-2; 4; 6	17	± 1; 3; 5; 7	18	0	
		Al	1.5	Si	1.8	P	2.1	S	2.5	Cl₂	3.0	Ar	—	
		5.986		8.151		10.486		10.36		12.967		15.759		
		(Ne) 3 s ² 3 p ¹		(Ne) 3 s ² 3 p ²		(Ne) 3 s ² 3 p ³		(Ne) 3 s ² 3 p ⁴		(Ne) 3 s ² 3 p ⁵		(Ne) 3 s ² 3 p ⁶		
		ALLUMINIO		SILICIO		FOSFORO		ZOLFO		CLORO		ARGON		
V B	VII B	VIII B	IB	II B										
2; 3; 4; 5	24	2; 3; 6	25	2; 3; 4; 7	26	2; 3	27	2; 3	28	2; 3	29	1; 2	30	2
1.6	Cr	1.6	Mn	1.5	Fe	1.8	Co	1.8	Ni	1.8	Cu	1.9	Zn	1.6
6.74	6.766	7.435	7.87	7.86	7.635	7.726	7.994	5.999	7.899	9.81	9.752	11.814	13.999	
(Ar) 3 d ³ 4 s ²	(Ar) 3 d ⁵ 4 s ¹	(Ar) 3 d ⁵ 4 s ²	(Ar) 3 d ⁶ 4 s ²	(Ar) 3 d ⁷ 4 s ²	(Ar) 3 d ⁸ 4 s ²	(Ar) 3 d ¹⁰ 4 s ¹	(Ar) 3 d ¹⁰ 4 s ²	(Ar) 3 d ¹⁰ 4 s ² 4 p ¹	(Ar) 3 d ¹⁰ 4 s ² 4 p ²	(Ar) 3 d ¹⁰ 4 s ² 4 p ³	(Ar) 3 d ¹⁰ 4 s ² 4 p ⁴	(Ar) 3 d ¹⁰ 4 s ² 4 p ⁵	(Ar) 3 d ¹⁰ 4 s ² 4 p ⁶	
ANADIO	CROMO	MANGANESE	FERRO	COBALTO	NICHEL	RAME	ZINCO	GALLIO	GERMANIO	ARSENICO	SELENIO	BROMO	CRIPTON	
3; 5	42	6	43	6; 7	44	3	45	3	46	2; 4	47	1	48	2
1.6	Mo	2.2	Tc	1.9	Ru	2.2	Rh	2.2	Pd	2.2	Ag	1.9	Cd	1.7
6.88	7.099	7.28	7.37	7.46	8.34	7.576	7.993	5.786	7.344	8.641	9.009	10.451	12.130	
(Kr) 4 d ⁴ 5 s ¹	(Kr) 4 d ⁵ 5 s ¹	(Kr) 4 d ⁵ 5 s ²	(Kr) 4 d ⁷ 5 s ¹	(Kr) 4 d ⁸ 5 s ¹	(Kr) 4 d ¹⁰ 5 s ⁰	(Kr) 4 d ¹⁰ 5 s ¹	(Kr) 4 d ¹⁰ 5 s ²	(Kr) 4 d ¹⁰ 5 s ² 5 p ¹	(Kr) 4 d ¹⁰ 5 s ² 5 p ²	(Kr) 4 d ¹⁰ 5 s ² 5 p ³	(Kr) 4 d ¹⁰ 5 s ² 5 p ⁴	(Kr) 4 d ¹⁰ 5 s ² 5 p ⁵	(Kr) 4 d ¹⁰ 5 s ² 5 p ⁶	
NIPIO	MOLIBDENO	TECNEZIO	RUTENIO	RODIO	PALLADIO	ARGENTO	CADMIO	INDIO	STAGNO	ANTIMONIO	TELLURIO	IODIO	XENO	
5	74	6	75	4; 6; 7	76	3; 4	77	3; 4	78	2; 4	79	1; 3	80	1; 3
1.5	W	2.4	Re	1.9	Os	2.2	Ir	2.2	Pt	2.2	Au	2.4	Hg	1.9
7.89	7.98	7.88	8.7	9.1	9.0	9.225	10.437	6.108	7.416	7.289	8.42	10.748		
(Xe) 4f ¹⁴ 5d ³ 6s ²	(Xe) 4f ¹⁴ 5d ⁴ 6s ²	(Xe) 4f ¹⁴ 5d ⁵ 6s ²	(Xe) 4f ¹⁴ 5d ⁶ 6s ²	(Xe) 4f ¹⁴ 5d ⁷ 6s ²	(Xe) 4f ¹⁴ 5d ⁹ 6s ¹	(Xe) 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ¹	(Xe) 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ²	(Xe) 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ¹	(Xe) 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ²	(Xe) 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ³	(Xe) 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁴	(Xe) 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁵	(Xe) 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁶	
TANTALIO	TUNGSTENO	RENIO	OSMIO	IRIDIO	PLATINO	ORO	MERCURIO	TALLIO	PIOMBO	BISMUTO	POLONIO	ASTATO	RADON	

Isolanti, Metalli, Semiconduttori

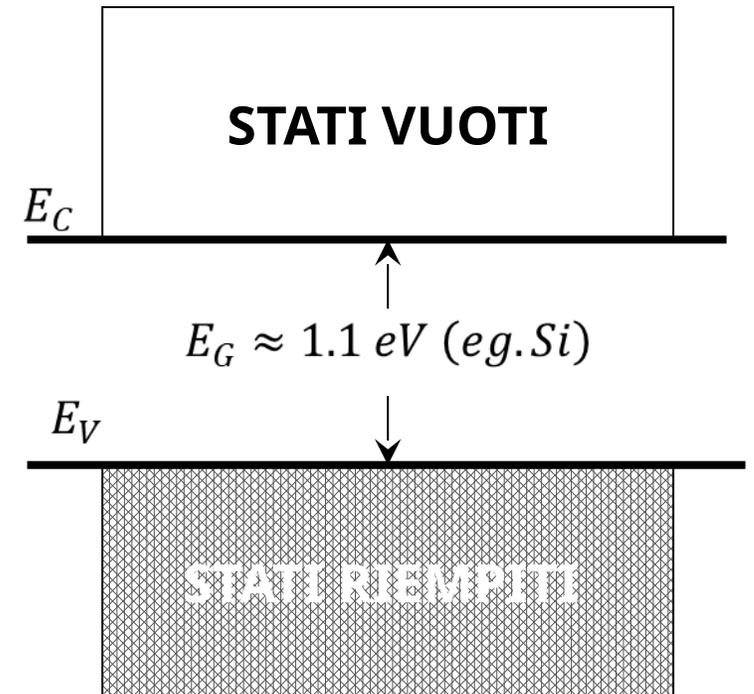
Isolante



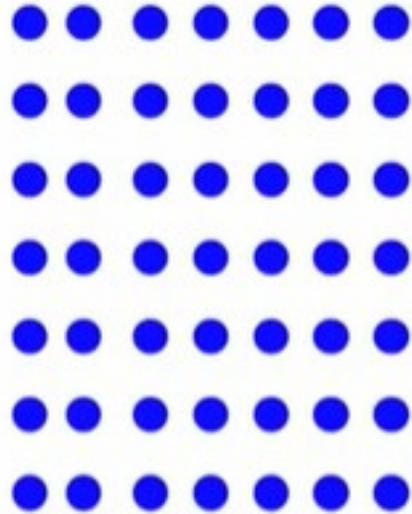
Conduttore



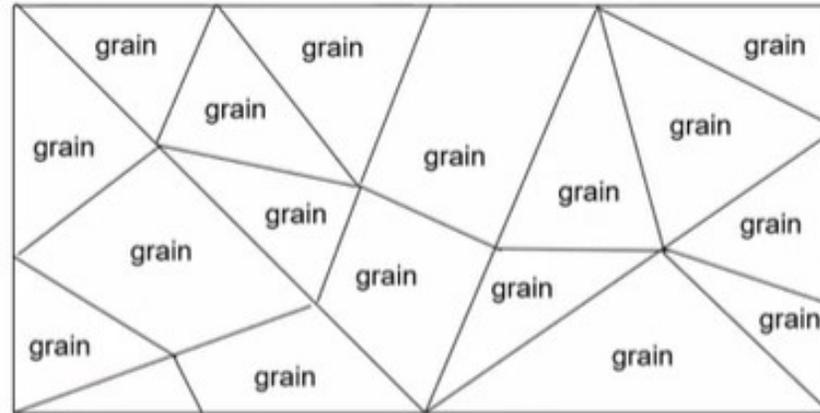
Semiconduttore



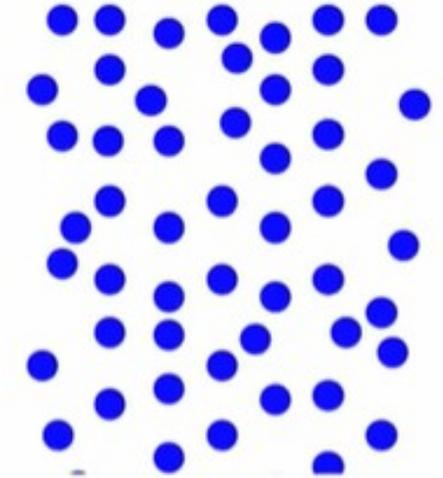
Semiconduttori monocristallini, policristallini, amorfi



Crystal: long range order.



Each **grain** is crystalline, but the grains are oriented differently.



Amorphous: no long range order, but often short range order

Il silicio monocristallino (single crystal) è il più costoso. E' il substrato dei wafer

Il policristallino ha alcune difettosità ma i singoli grani sono monocristallini (si usa quando sono necessarie grandi superfici come per esempio i fotodiodi delle celle solari)

Il silicio amorfo si usa per esempio nei televisori led.

Silicio

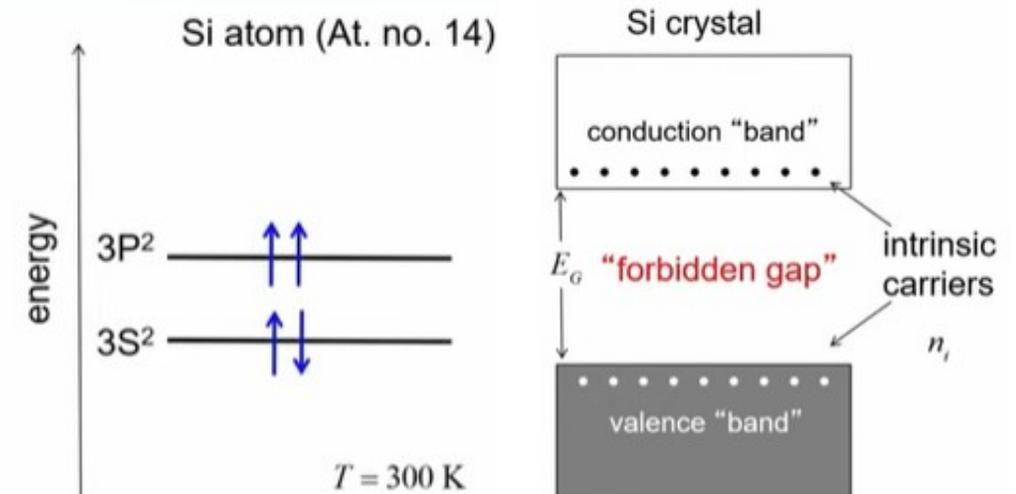
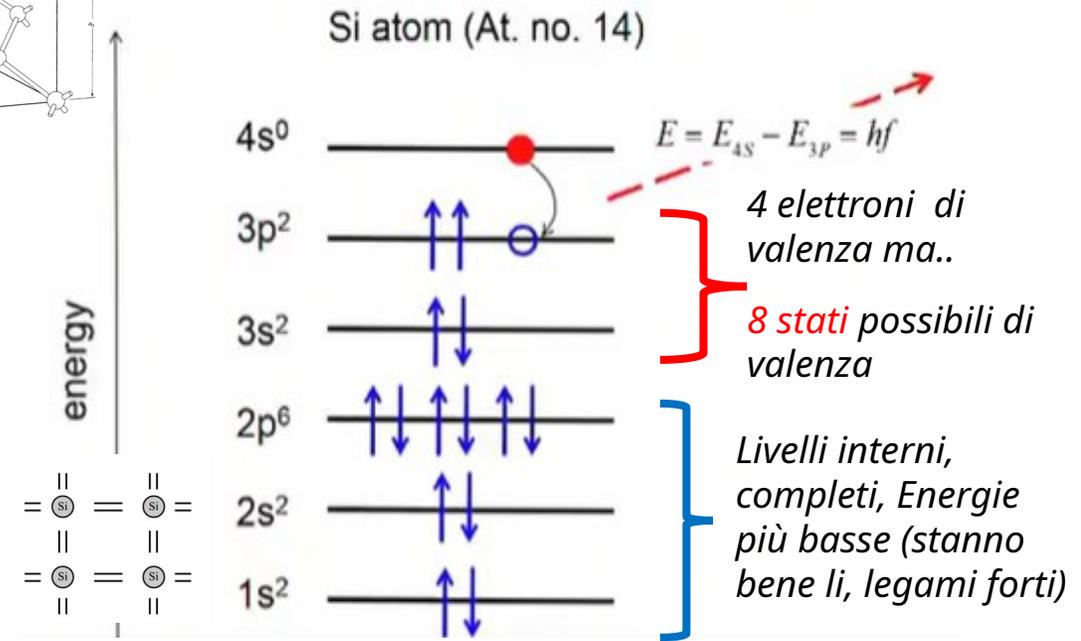
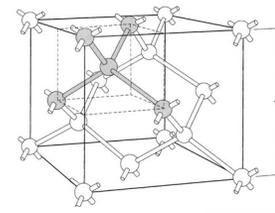
La maggior parte dei semiconduttori è nel **IV** gruppo

Il silicio è molto più complicato dell'idrogeno, ha **14 elettroni** e 14 protoni nel nucleo. Gli stato quantistici sono maggiori (orbitali). Essi si disporranno quindi in questo modo sugli orbitali disponibili partendo dall'orbitale più basso

Gli elettroni nei livelli più bassi sono molto legati al «core» gli elettroni invece che determinano le proprietà di legame sono quelli più in alto che occupano PARZIALMENTE tutti i livelli orbitali permessi (che sono 8). **Gli elettroni degli orbitali più alti sono 4** ma essendo 8 stati possibili possono legarsi con altri Atomi.

Si possono creare molecole complesse con elementi del IV gruppo che sono semiconduttori (ad esempio il SiC, mentre il C da solo è un isolante elettrico anche se in funzione della sua purezza cristallina può essere conduttivo o no (esempio grafite conduce! Il diamante è un perfetto isolante!)

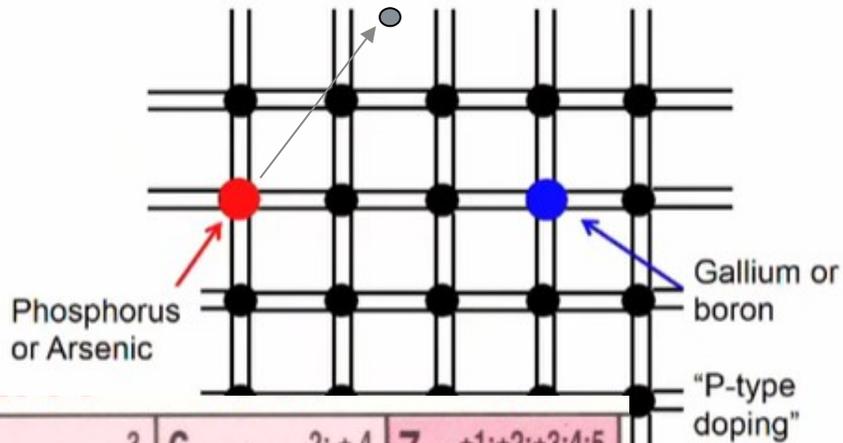
Il cristallo di silicio intrinseco è un «quasi isolante» a T=300K



Semiconduttori: drogaggio

"One shouldn't work on semiconductors, that is a filthy mess; who knows whether any semiconductors exist."

Wolfgang Pauli, 1931



- I semiconduttori all'inizio a causa dei propri difetti erano guardati con sospetto.
- Oggi grazie al **drogaggio** possiamo però cambiare radicalmente il loro comportamento e da isolanti li possiamo far diventare conduttori con conduzione definita dal livello di drogante.
- Il drogaggio si ottiene aggiungendo un atomo che ha un elettrone di valenza in più (drogaggio di tipo n, con il Fosforo) o in meno (drogaggio di tipo p: Boro)
- L'elettrone che riesce a «scappare» dall'atomo di fosforo. **Questo elettrone da solo ricorda un po' l'elettrone isolato dell'atomo di idrogeno.** Ci ricordiamo (sezione 3.1: Bohr) che questo elettrone ha un'energia di riposo

$$E_B = \frac{-m_0 q^4}{2(4\pi\epsilon_0 \hbar)^2} = -13,6 \text{ eV}.$$

Il **P** in **Si** ricorda un po' il comportamento di **H**! ma non stiamo nel vuoto! Qui la costante dielettrica è molto più alta $\epsilon = K_s \epsilon_0$ dove $K_s = 12$ quindi quella E_B viene più bassa!

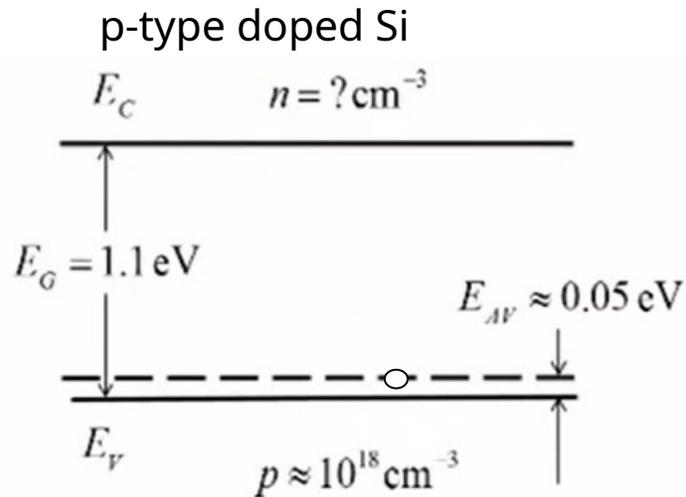
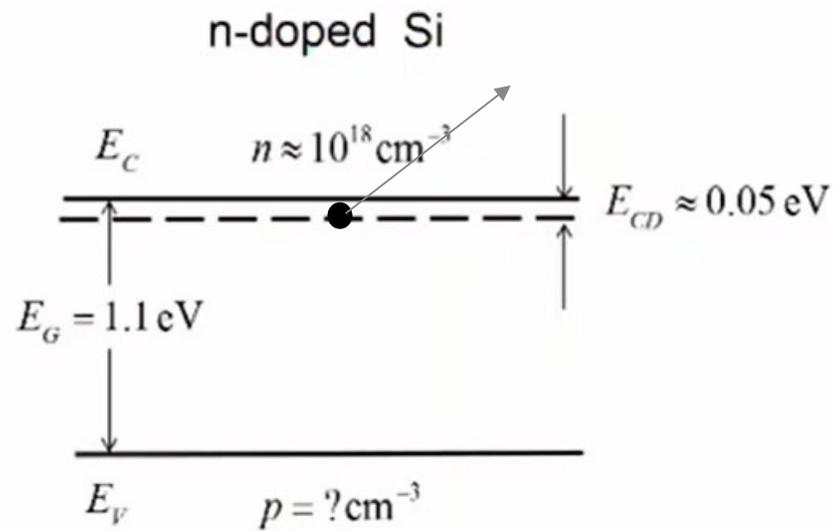
$$m_n^* = 1.18 m_0, E_B \approx -0.05 \text{ eV}$$

Questo elettrone è veramente poco legato!

I donatori nel silicio **sono TOTALMENTE ionizzati a T ambiente!**

5 B 1 s ² 2 s ² 2 p ¹ BORO	6 C 1 s ² 2 s ² 2 p ² CARBONIO	7 N 1 s ² 2 s ² 2 p ³ AZOTO
13 Al (Ne) 3 s ² 3 p ¹ ALLUMINIO	14 Si (Ne) 3 s ² 3 p ² SILICIO	15 P (Ne) 3 s ² 3 p ³ FOSFORO

Semiconduttori: drogaggio. Effetto sulle bande



Riprendiamo il diagramma a bande semplificato (non parabolico ma schematizzato come $E_c = E_{cmin}, E_v = E_{vmax}$)

Quando drogo il silicio l'elettrone libero del P si trova appena appena sotto il minimo della banda di conduzione. Basta poco per farlo saltare e andare in banda di conduzione

Valori tipici a $T=300\text{K}$

$$N_{Si} = 5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_i = 1,45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_i \ll N_D$$

in pratica tutti gli elettroni nella banda di conduzione sono quelli del Donatore!

Tipica concentrazioni di drogaggio sono

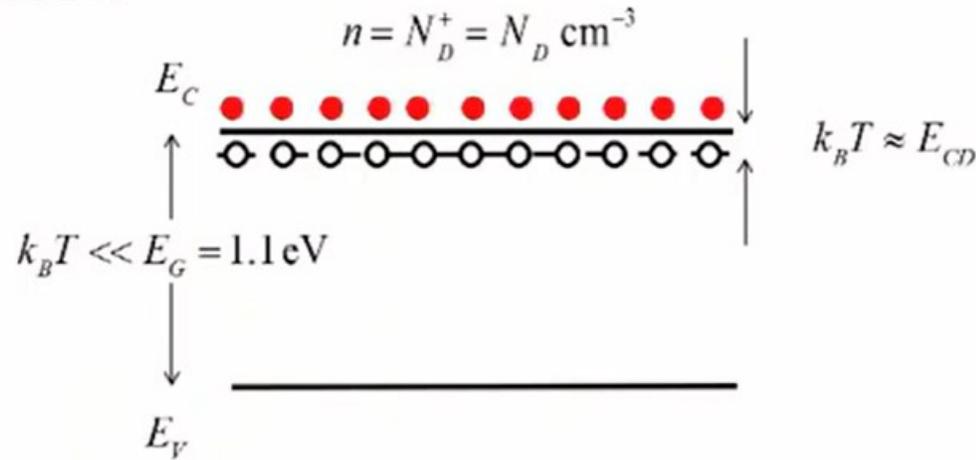
$$10^{14} \leq N_D \leq 10^{20} \text{ cm}^{-3}$$

Analogamente il BORO acquisisce una carica negativa da un elettrone del Silicio e quindi il Silicio accanto ha una lacuna e il numero di "lacune" cariche positive si indica con N_A anche lì si forma una valenza che può facilmente entrare nella banda di valenza

Il valore dei droganti di tipo P è dello stesso ordine di grandezza

Semiconduttore: aumento della temperatura

$T = 300 \text{ K}$



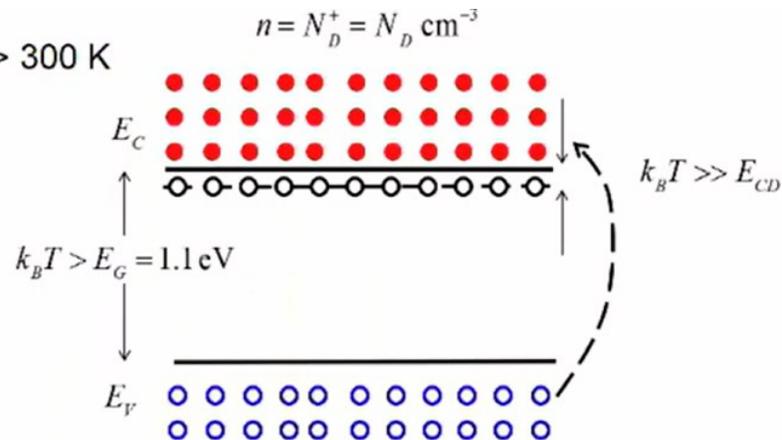
Appena aumentiamo la temperatura a $T=300\text{K}$ ambiente tutti i donatori sono ionizzati. Il semiconduttore diventa un buon conduttore e il suo valore di elettroni nella banda di conduzione è uguale a quello dei donatori ossia sono **tutti elettroni estrinseci**

Ma se insisto ad aumentare T allora in banda di conduzione cominciano ad arrivare più elettroni "intrinseci" dalla rottura dei legami del silicio nella banda di valenza, e per $T \gg 300\text{K}$ la banda di conduzione è **inondata di elettroni intrinseci**

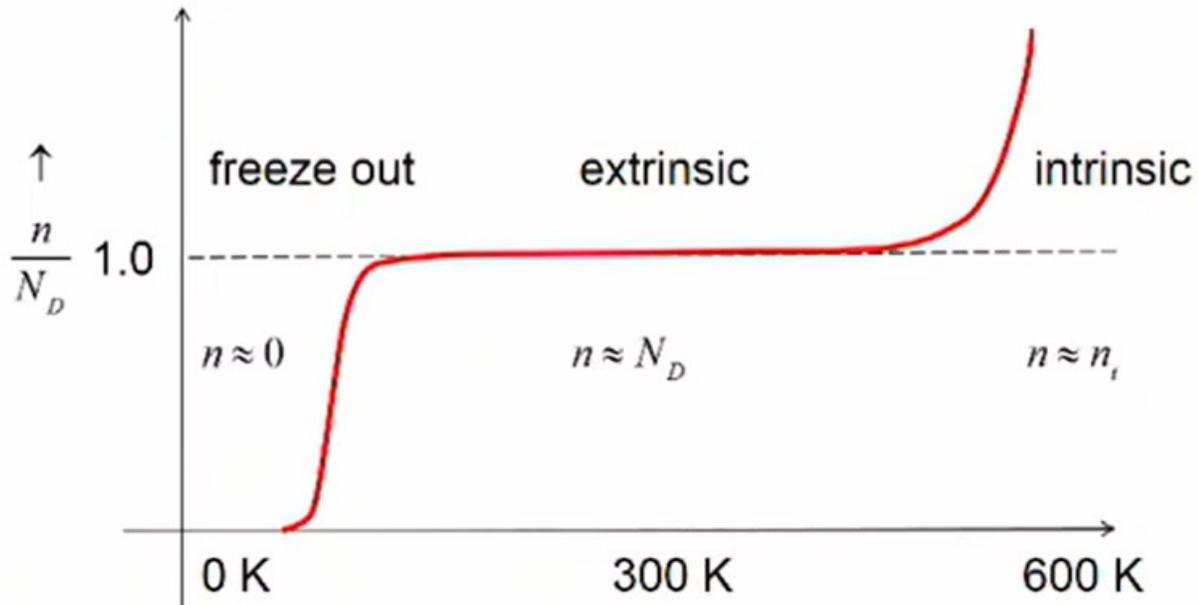
Quando $n_i \gg n$ allora il semiconduttore cessa di funzionare come un semiconduttore (diventa un filo conduttore).

Quindi per poter funzionare **ad alte temperature (eg $T=175^\circ\text{C}$)** il semiconduttore dovrebbe avere una **band gap più alta**. Ecco per esempio perché il **SiC** è preferibile al **Si** ad alte temperature!

$T \gg 300 \text{ K}$



Comportamento dei portatori di carica un semiconduttore in funzione della temperatura



Un semiconduttore si comporta in questo modo

A bassissime temperature i suoi portatori di carica non ci sono (isolante), ad altissime temperature I portatori di carica sono **intrinseci**.

A temperature intermedie tutti i portatori di carica sono **estrinseci**.

Allo zero assoluto un **semiconduttore** è un perfetto isolante: non ha portatori di carica liberi per far scorrere la corrente sono **congelati**.

Un metallo invece è il contrario! Allo zero assoluto diventa un **superconduttore** perché i suoi elettroni di valenza riempiono metà della banda di valenza, non hanno bande proibite da superare, e allo zero assoluto per ragioni quantistiche la resistenza si annulla.

Se hai un materiale e vuoi capire se è un semiconduttore o un metallo basta che misuri la sua conducibilità in $f(T)$. Se è zero a $T=0$ è un semiconduttore

Qualitative approach : explanations of Energy Band Diagram



Le Equazioni dei Semiconduttori

$$\frac{\partial p(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\nabla \cdot \frac{\vec{J}_p}{q} + G_p - R_p$$
$$\frac{\partial n(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\nabla \cdot \frac{\vec{J}_n}{q} + G_n - R_n$$
$$\Delta \cdot (K_S \epsilon_0 \vec{E}) = \rho(\vec{r}, t)$$

1) Equazione di continuità per le lacune

2) Equazione di continuità per gli elettroni

3) Equazione di Poisson

$$\vec{J}_p = pq\mu_p \vec{E} - qD_p \vec{\nabla} p$$

Corrente di Drift + Diffusione

$$\vec{J}_n = nq\mu_n \vec{E} + qD_n \vec{\nabla} n$$

$$\rho(\vec{r}) = q[p(\vec{r}) - n(\vec{r}) + N_D^+(\vec{r}) + N_A^-(\vec{r})]$$

Densità di carica

$$\vec{E}(\vec{r}) = \overrightarrow{grad}(V) = \vec{\nabla} V(\vec{r})$$

Campo elettrico e Potenziale elettrostatico

Sono tre equazioni in tre incognite nello spazio legate a certi parametri noti nei semiconduttori. Se le risolviamo possiamo capire come funziona il semiconduttore come evolvono nello spazio tempo le concentrazioni.

In generale le soluzioni in forma analitica si possono trovare solo per casi semplificati altrimenti si deve fare affidamento a metodi numerici

Metodo Qualitativo : Diagrammi delle Bande di Energia

Un diagramma a bande di energia è un modo grafico per rappresentare la parte più bassa della banda di conduzione e la parte più alta della banda di valenza in funzione dello spazio (dimensioni del semiconduttore)

REVIEWS OF MODERN PHYSICS, VOLUME 73, JULY 2001

Nobel Lecture: Quasielectric fields and band offsets: teaching electrons new tricks*

Herbert Kroemer

Electrical and Computer Engineering Department, University of California, Santa Barbara, California 93106-9560

(Published 22 October 2001)

Nobel Lecture, 2000

II. BAND DIAGRAMS AND QUASIELECTRIC FORCES

Whenever I teach my semiconductor device physics course, one of the central messages I try to get across early is the importance of energy-band diagrams. I often put this in the form of “Kroemer’s Lemma of Proven Ignorance”:

If, in discussing a semiconductor problem, you cannot draw an *Energy-Band-Diagram*, this shows that you don’t know what you are talking about,

with the corollary

If you can draw one, but don’t, then your audience won’t know what you are talking about.

Costanza del Livello di Fermi all'equilibrio

All'equilibrio: immaginiamo di avere un Semiconduttore qualsiasi (ad esempio uno COMPOSTO ossia **GaAs** oppure due pezzi di silicio di tipo **n** e di tipo **p** attaccati). Lungo tutto il semiconduttore il livello delle bande di energia ha un andamento che varia $E_C(x), E_V(x), E_i(x)$

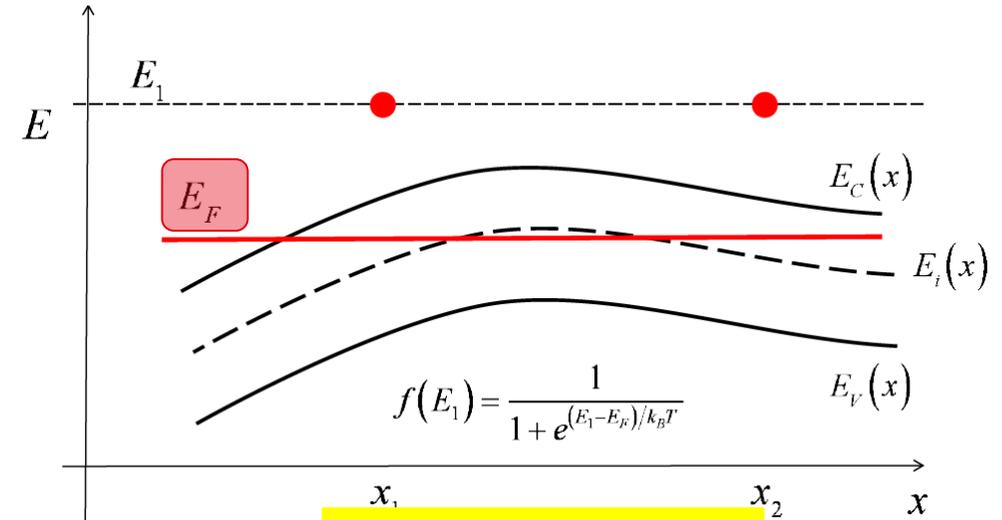
Se guardiamo a un particolare livello energetico E_1 e ci concentriamo su uno stato energetico nella posizione x_1 e poi su un altro stato energetico (sempre di valore E_1) nella posizione x_2 **la probabilità che all'equilibrio questi due livelli energetici siano occupati** (da un elettrone ad esempio) **deve essere la stessa** altrimenti avremmo elettroni che si muoveranno nella x dallo stato a energia superiore (o ad altra concentrazione) a quello inferiore (a concentrazione inferiore): ma non può essere! Perché stiamo all'equilibrio: a bocce ferme non può esserci corrente diffusiva.

Ora **la probabilità** di occupazione di un livello energetico di valore E_1 da parte di un elettrone è

$$f[E_1(x_1)] = \frac{1}{1 + e^{(E_1 - E_F)/k_B T}}$$

Dove E_F è il **livello di Fermi** (*livello energetico in corrispondenza del quale la probabilità di trovare uno stato occupato da un elettrone è esattamente del 50%.*)

Ma poiché deve essere $f[E_1(x_1)] = f[E_1(x_2)]$ e ovviamente E_1 è uguale nei due casi ne consegue che lungo tutto un semiconduttore **Il Livello dell'Energia di Fermi deve essere Costante** indipendentemente da



**Vale solo
All'Equilibrio**

Lo avevamo già visto nella derivazione dell'equazione della corrente, all'equilibrio

$$J_n = n\mu_n \frac{dF_n}{dx} = 0 = n\mu_n \frac{dE_F}{dx} \rightarrow E_F \text{ è costante}$$

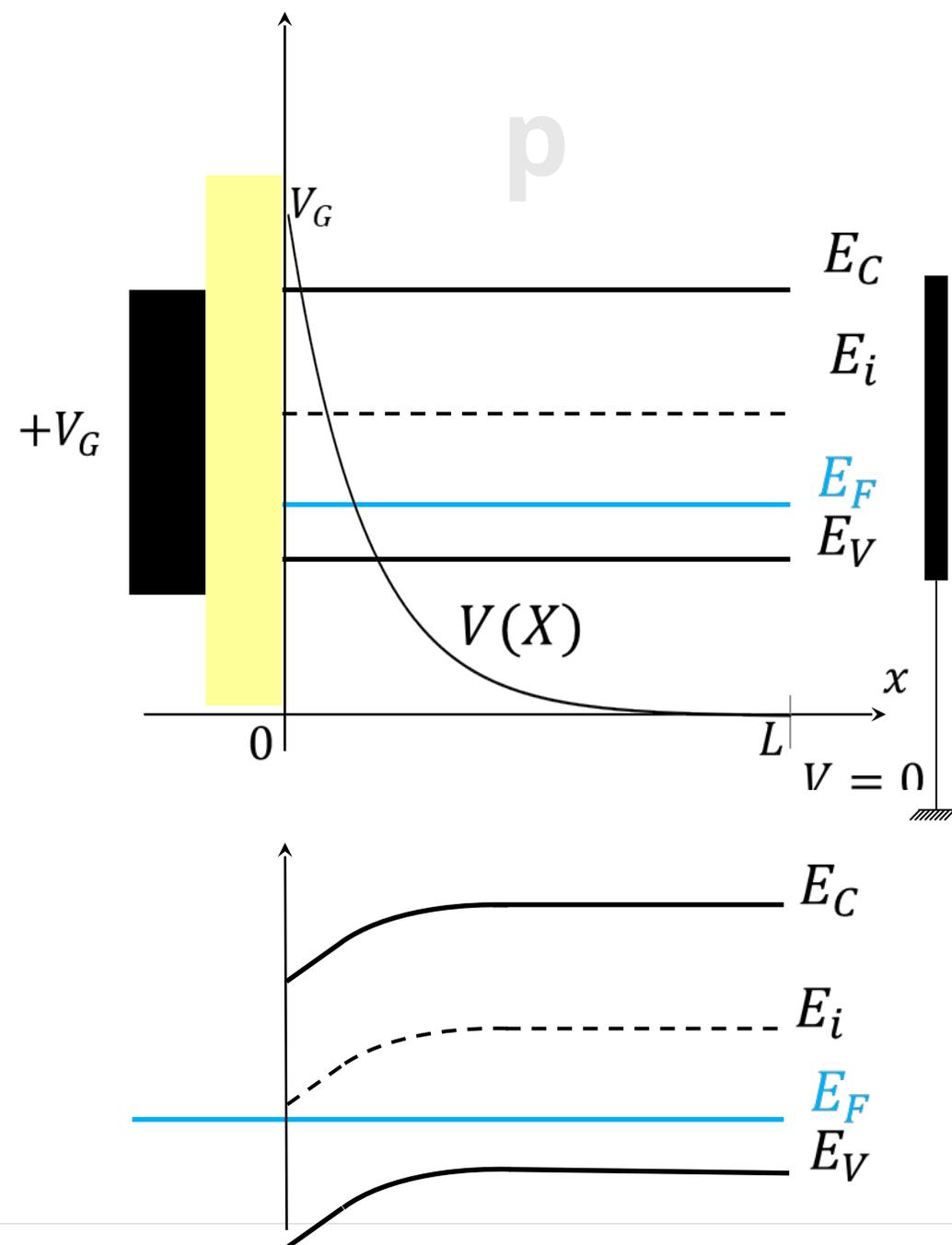
- Altra cosa: in un semiconduttore drogato **n** il **livello di Fermi** è più **vicino** alla **banda di Conduzione** e in un semiconduttore di tipo **p** il livello di **Fermi** è più **vicino alla banda di Valenza**!

Le bande si «piegano» in «basso» se applico una d.d.p verso il potenziale «alto»

Immaginiamo un semiconduttore di tipo P (livello di Fermi più vicino alla banda di Valenza) all'equilibrio le sue bande di energia sono come le vediamo al lato. Ora **APPLICHIAMO una tensione positiva a sinistra** (diciamo che è massima per $x=0$) isolata dal semiconduttore da uno strato isolante di SiO_2 (giallo) e metto a terra l'estremità destra (diciamo a $x=L$): si forma una differenza di potenziale attraverso il semiconduttore lungo l'asse x . Ho fatto un bel Metal Oxide Semiconductor FET.

Non sto più all'equilibrio!

Il potenziale positivo influenza la parte sinistra del semiconduttore (vicino a $x=0$) mentre il potenziale a zero influenza la parte a destra del semiconduttore (quella per $x=L$). Che effetto fa questa tensione alle energie? Ci ricordiamo che un potenziale positivo «ABBASSA» l'energia di un elettrone perché esso viene attratto dal potenziale positivo. Sappiamo che l'energia è $E = -qV$ dove V è la differenza di potenziale. Il potenziale $V(x)$ quindi decresce nello spazio con quell'andamento. Visto che l'Energia è MENO qV che vuol dire? Che quando inserisco una d.d.p per $x=0$ l'energia si ABBASSA proprio di qV mentre per $x=L$ essendo $V=0$ l'energia resta la stessa. Le bande si piegano: Il potenziale elettrostatico causa il piegamento delle linee delle bande di energia verso la parte che è a potenziale maggiore!



Le bande si «piegano» in «basso» a contatto con il potenziale «alto»

Riscriviamo la relazione del potenziale elettrostatico con la tensione

$$d.d.P = E_C(x) = E_C(+\infty) - qV(x)$$

Ora se guardo la PENDENZA di quell'andamento della banda ossia della pendenza di come decresce quell'energia, vuol dire che vado a fare il differenziale lungo x e per l'equazione di prima viene (1) (considerando il livello a + infinito dell'energia una costante e quindi il differenziale viene zero); l'ultima equazione deriva dal fatto che so che il gradiente del potenziale è proprio il campo elettrico \mathbb{E} . Questo ci dice che la pendenza della banda è legata al campo Elettrico (**più è intenso il campo elettrico più la banda si piega rapidamente**)
Qualsiasi pendenza delle bande fornisce il potenziale elettrostatico perché $E_C(x), E_i(x), E_V(x)$ hanno tutte la stessa pendenza

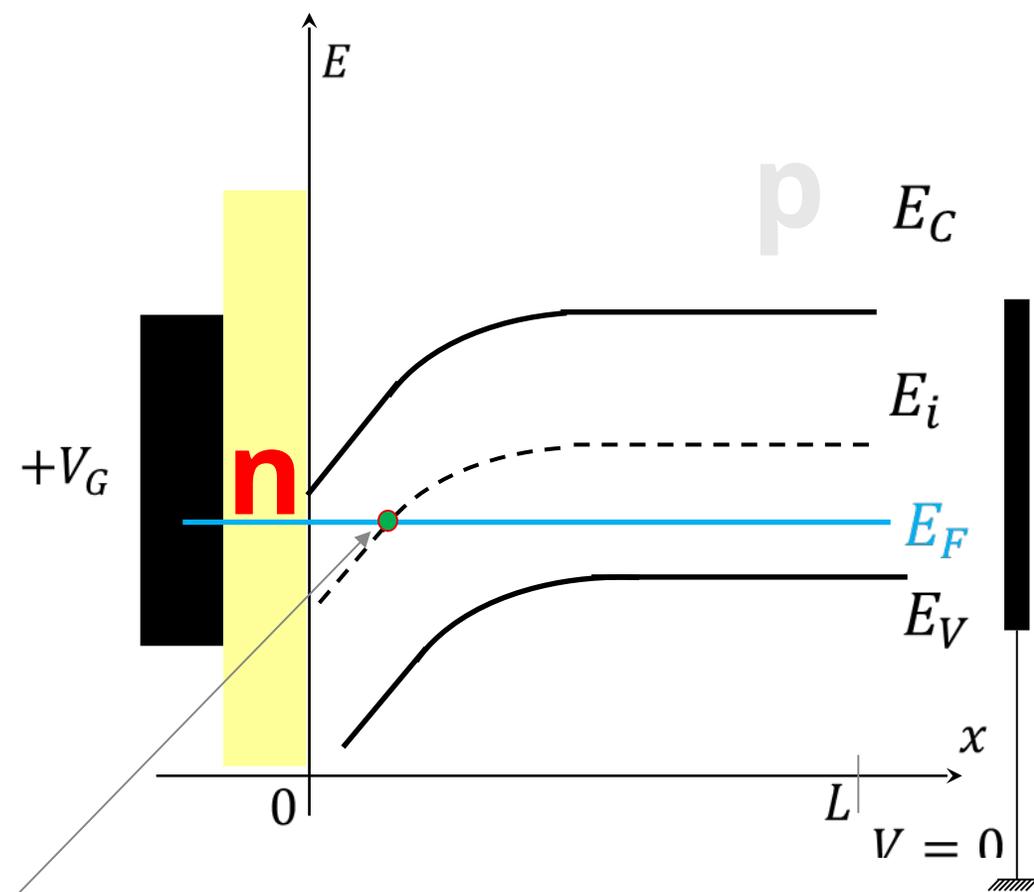
$$(1) \frac{dE_C(x)}{dx} = -q \frac{dV(x)}{dx} = q\mathbb{E}$$

Ora posso trovare anche la densità degli elettroni e lacune perché sono legate a questa formula

$$n(x) = n_i e^{[E_F - E_i(x)]/k_B T}$$

$$p(x) = n_i e^{[E_i(x) - E_F]/k_B T}$$

in questo punto x specifico $E_F = E_i$ il semiconduttore è intrinseco $n = p = n_i$



Se vado in profondità nel semiconduttore per $x=L$ e $V=0$ vedo che il livello di Fermi è più vicino al valore del massimo dell'energia di Valenza e sto sicuramente in un semiconduttore di tipo p. Ma quando mi avvicino allo zero il livello di Fermi (che DEVE restare costante) sta più vicino alla banda di conduzione quindi sono in una situazione in cui ho molti più elettroni (come se fosse un semiconduttore n). La superficie si è invertita. Ho creato una giunzione n p (anche se è solo un contatto METALLO semiconduttore, il metallo si comporta come «n»)

Le bande si «piegano» in «basso» verso il potenziale «alto»

Vale per "C", "i", "V"

Dopo che abbiamo disegnato i livelli delle bande di energia li dobbiamo «leggere» per estrarre i parametri del semiconduttore che ci interessano. Guardando un diagramma come quello accanto già sappiamo che stiamo fuori dall'equilibrio. C'è un potenziale elettrostatico che è più intenso nei pressi dell'origine. Ossia il Potenziale elettrostatico è l'inverso di un certo livello di energia (a parte un fattore q) ossia per esempio rispetto al livello $E_C(x)$

$$V(x) \propto -E_C(x)$$

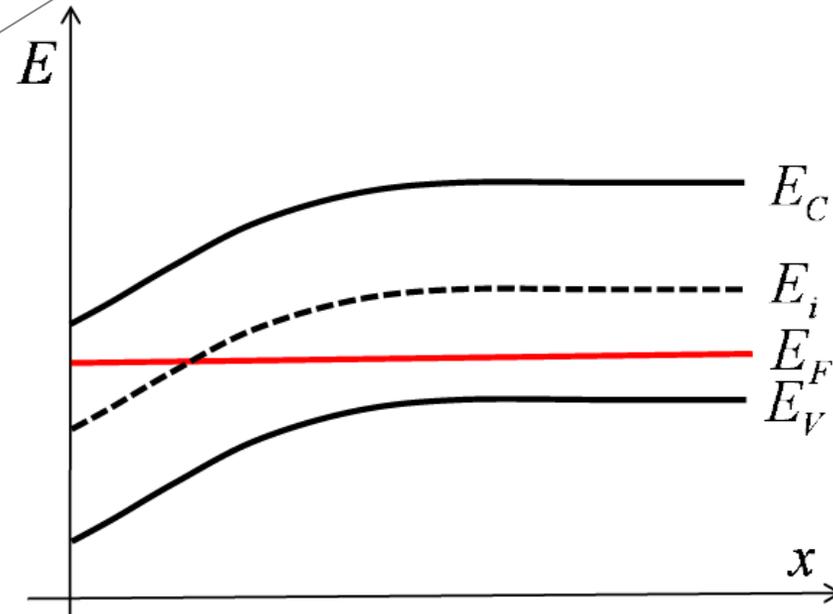
Sappiamo che la pendenza di uno di quei livelli (tutti si storcono con la stessa pendenza) è proporzionale all'intensità del campo elettrico

$$\mathbb{E} \propto dE_C/dx$$

e poiché $n(x) = n_i e^{[E_F - E_i(x)]/k_B T}$ allora vuol dire che facendo il logaritmo di ambo i membri viene che la densità di cariche è proporzionale alla differenza tra il livello di fermi e il livello intrinseco a quella specifica x

$$\log n(x) \propto E_F - E_i(x)$$

$$\log p(x) \propto E_i(x) - E_F$$



E infine se voglio la densità di carica spaziale $\rho(x)$ so che è $\rho(x) = \frac{d\mathbb{E}}{dx} K_s \epsilon_0$

ma il campo elettrico è $\mathbb{E} \propto dE_C/dx$

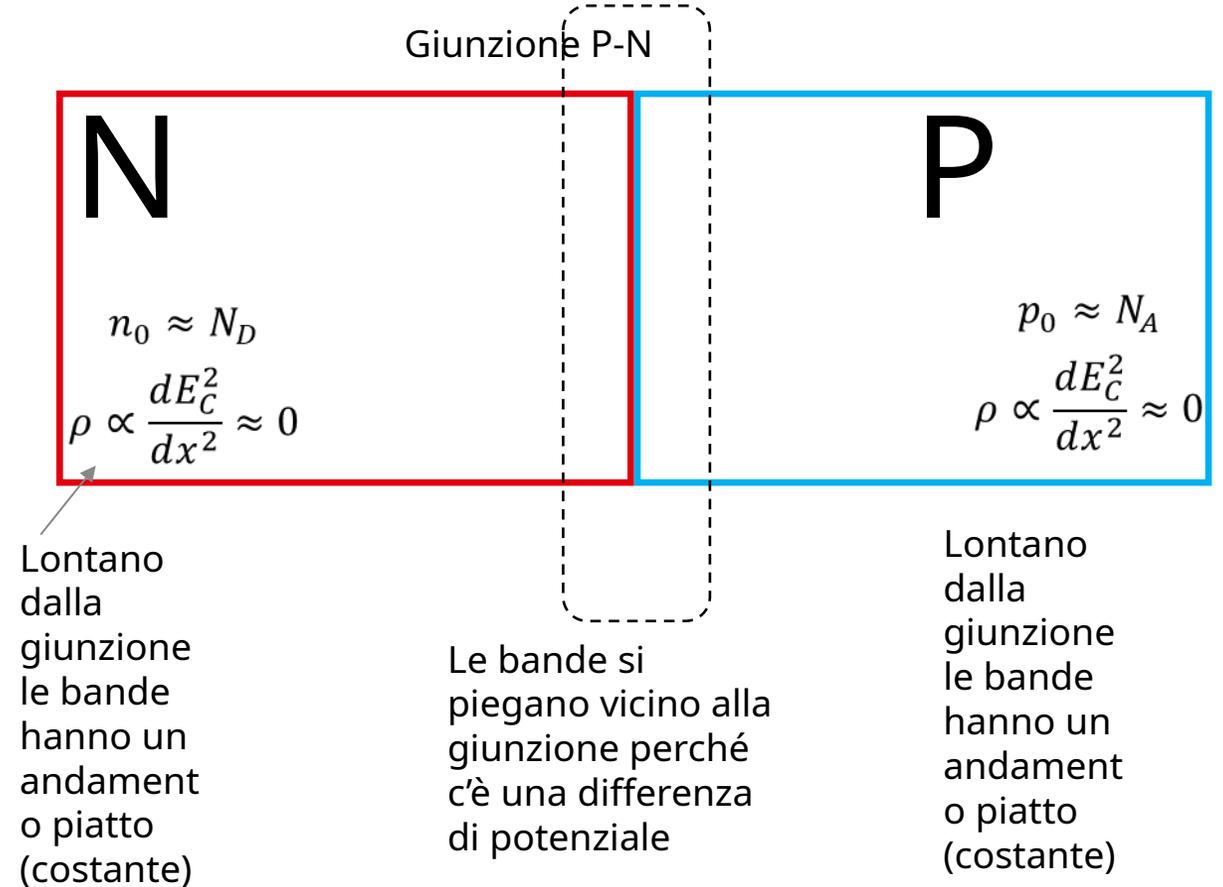
quindi

$$\rho(x) \propto \frac{dE_C^2}{dx^2}$$

Giunzione PN

Prendiamo una giunzione tra un semiconduttore N e P uniformemente drogati che poi è come è fatto un diodo. Quale è il diagrammi a bande di energia **all'equilibrio**? Beh fuori dalla giunzione il semiconduttore è un semiconduttore uniformemente drogato. E quindi sappiamo che le bande sono piatte

Ma nel passaggio dalla zona P a N vedremo si forma un potenziale e quindi in quella zona le bande si piegheranno vediamo come questo avviene

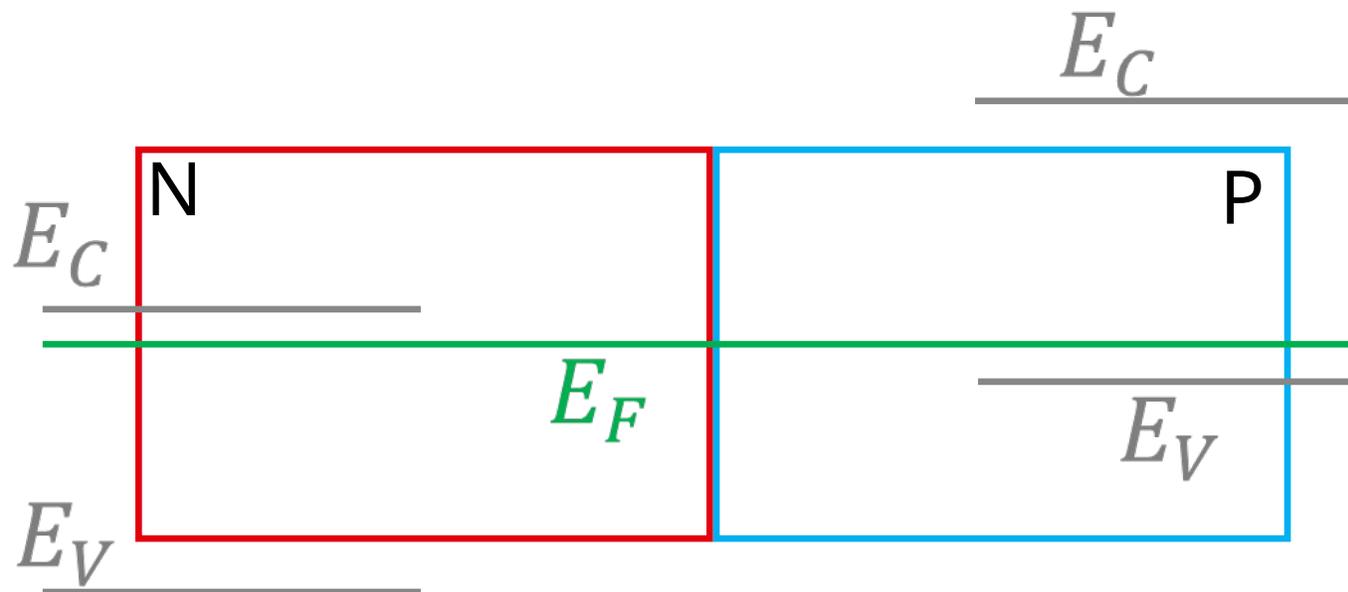


Giunzione PN

Come verrà il diagramma a bande di una giunzione p-n? Per prima cosa disegno il livello di Fermi che so essere costante lungo x per un semiconduttore (indipendentemente dai tipi di semiconduttori che metto attaccati): questa è una proprietà fondamentale **all'equilibrio**

Poi sappiamo che lontano dalla giunzione il semiconduttore ha i livelli di energia costanti e in un semiconduttore di tipo N il livello di Fermi più vicino al minimo della banda di conduzione mentre in un semiconduttore di tipo P il livello di Fermi è più vicino al massimo della banda di Valenza.

E infine devo unire le bande e visto che le bande si «piegano» già questo mi dice che nella transizione tra la giunzione P e N si formerà una differenza di potenziale di origine elettrostatica



Una volta disegnati i diagrammi delle bande di Energia posso leggerli per ricavarli qualitativamente gli andamenti di tutti i parametri fondamentali della giunzione: il valore del campo elettrostatico in funzione della posizione $V(x)$ il valore del campo elettrico, delle densità di lacune ed elettroni e della densità di carica spaziale in funzione della posizione $[E(x), p(x), n(x), \rho(x)]$ tutto senza

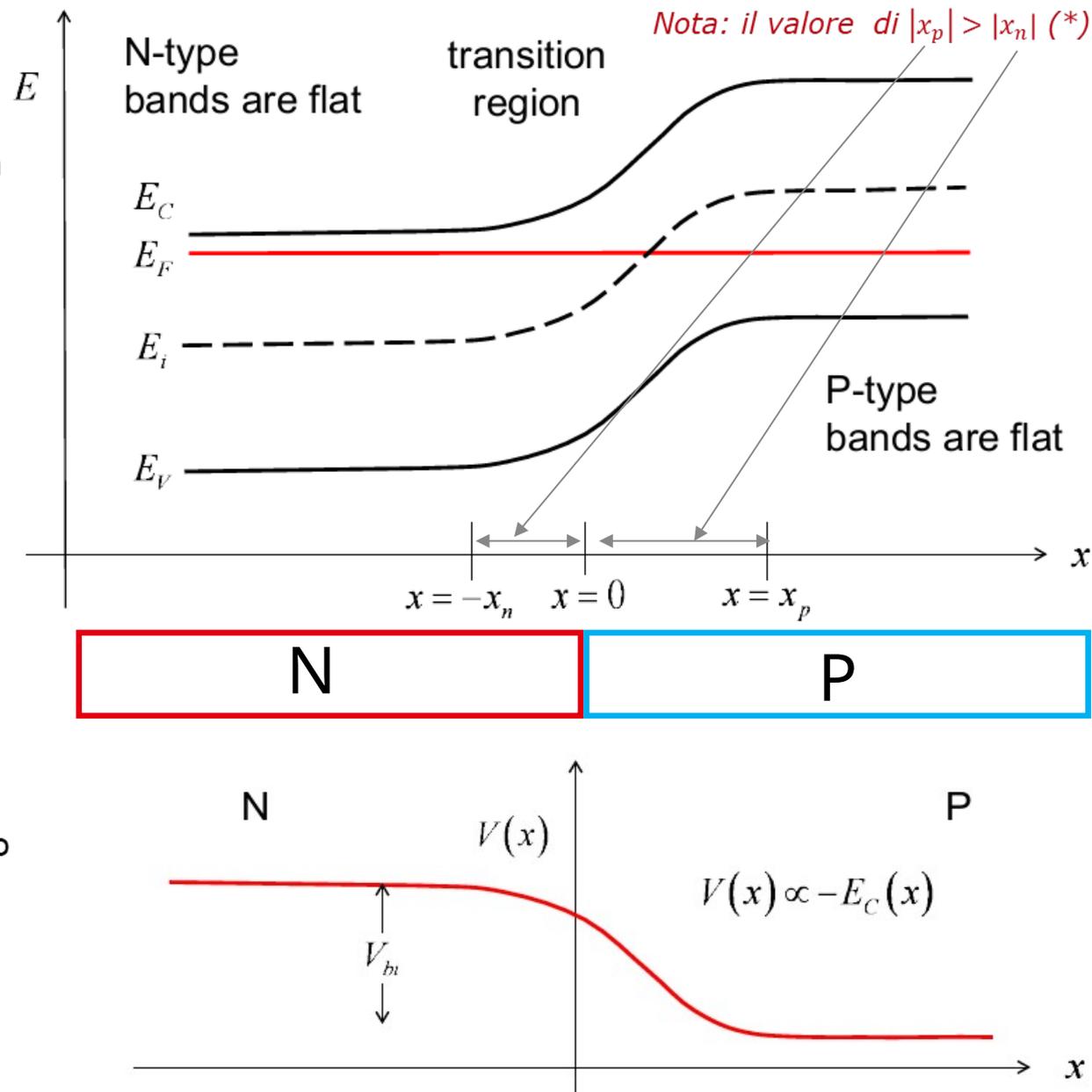
Giunzione PN: $V(x)$

Alla fine ci troviamo con questo diagramma a bande di energia **all'equilibrio**

Come sarà il $V(x)$ (potenziale elettrostatico) ai capi della giunzione? Sappiamo che c'è un $V(x)$ perché la derivata delle bande di energia nella regione di transizione è diversa da zero e che $\frac{dE_C(x)}{dx} = -q \frac{dV(x)}{dx}$ quindi c'è una variazione di $V(x)$ nella regione di transizione

Ma sappiamo anche che $V(x) \propto -E_C(x)$ quindi: nella zona in cui la $E_C(x)$ è costante la derivata è zero e anche il potenziale elettrostatico $V(x)$ è costante e ha un valore che è l'inverso («flip») di $E_C(x)$ in quella zona.

Nella zona di transizione il $V(x)$ decresce (perché $E_C(x)$ cresce ma visto che $V(x)$ è l'inverso del livello energetico decresce. E poi si stabilizza al valore $-E_C$ nella zona di tipo P (ed essendo $E_C(x > x_p) > E_C(x < -x_n)$ sarà $V(x > x_p) < V(x < -x_n)$). esempio $V = -10V$ sta più alto di $V = -20V$. E torna con il fatto che quando le bande di energia si piegano e «scendono» la differenza di potenziale «sale» (slide 23). Si forma quindi una differenza di potenziale ai capi della giunzione. Il salto di potenziale tra la regione N e P si chiama **Potenziale di Built-in**. Ed è il valore di potenziale per esempio che in conduzione «diretta» è necessario applicare alla giunzione per far scorrere corrente.



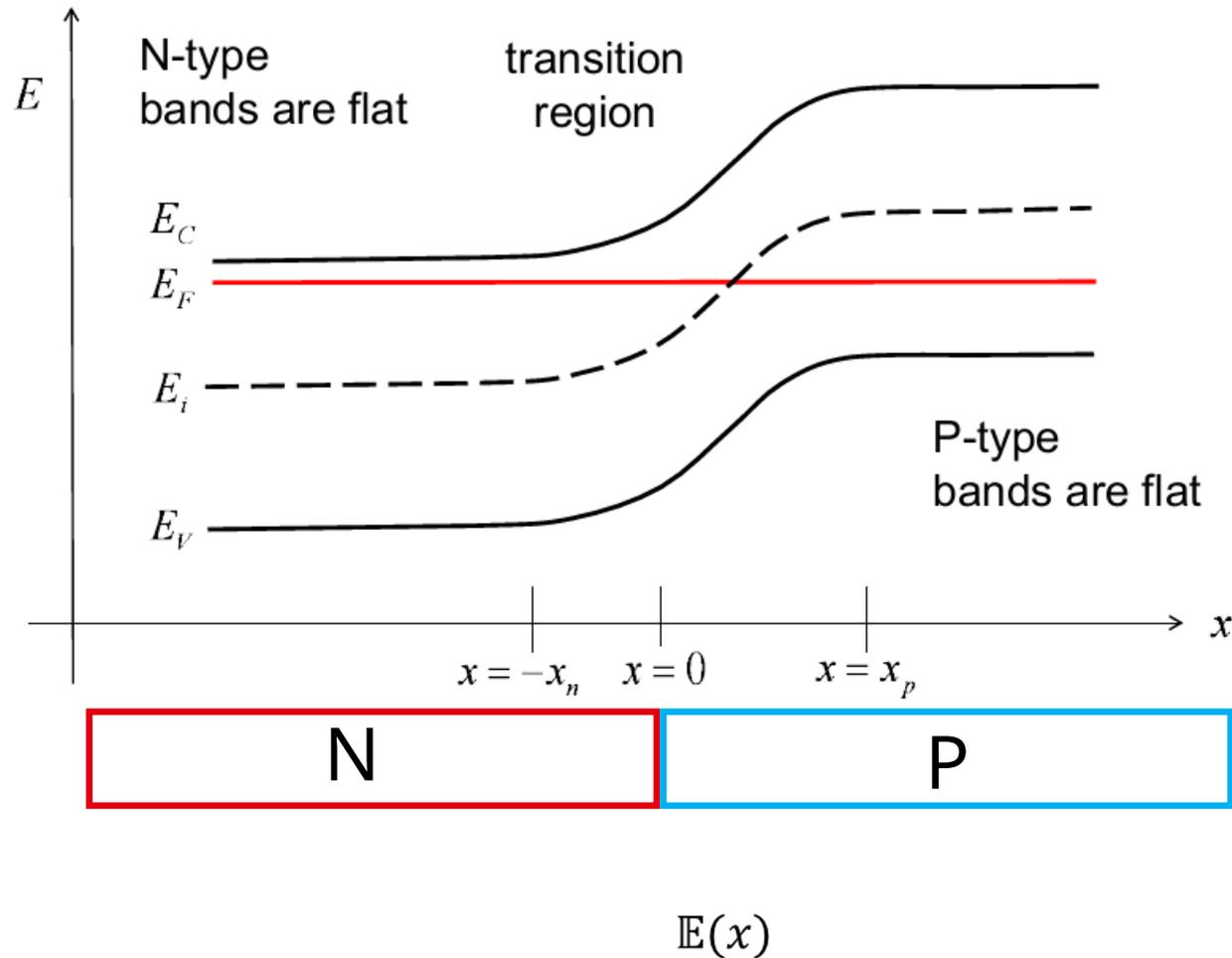
Giunzione PN: $\mathbb{E}(x)$

Come sarà l'andamento del Campo Elettrico ai capi della regione di transizione?

Ci ricordiamo che il campo elettrico è proporzionale alla pendenza della banda di conduzione

$$\mathbb{E} \propto dE_C/dx$$

Quindi parte da zero quando il livello energetico è «piatto»(derivata nulla) per toccare il suo massimo quando le bande salgono (o scendono) il più rapidamente (al flesso) perché la derivata delle bande è diversa da zero quando le bande si piegano per poi tornare a zero



x

Giunzione PN: $n(x), p(x)$

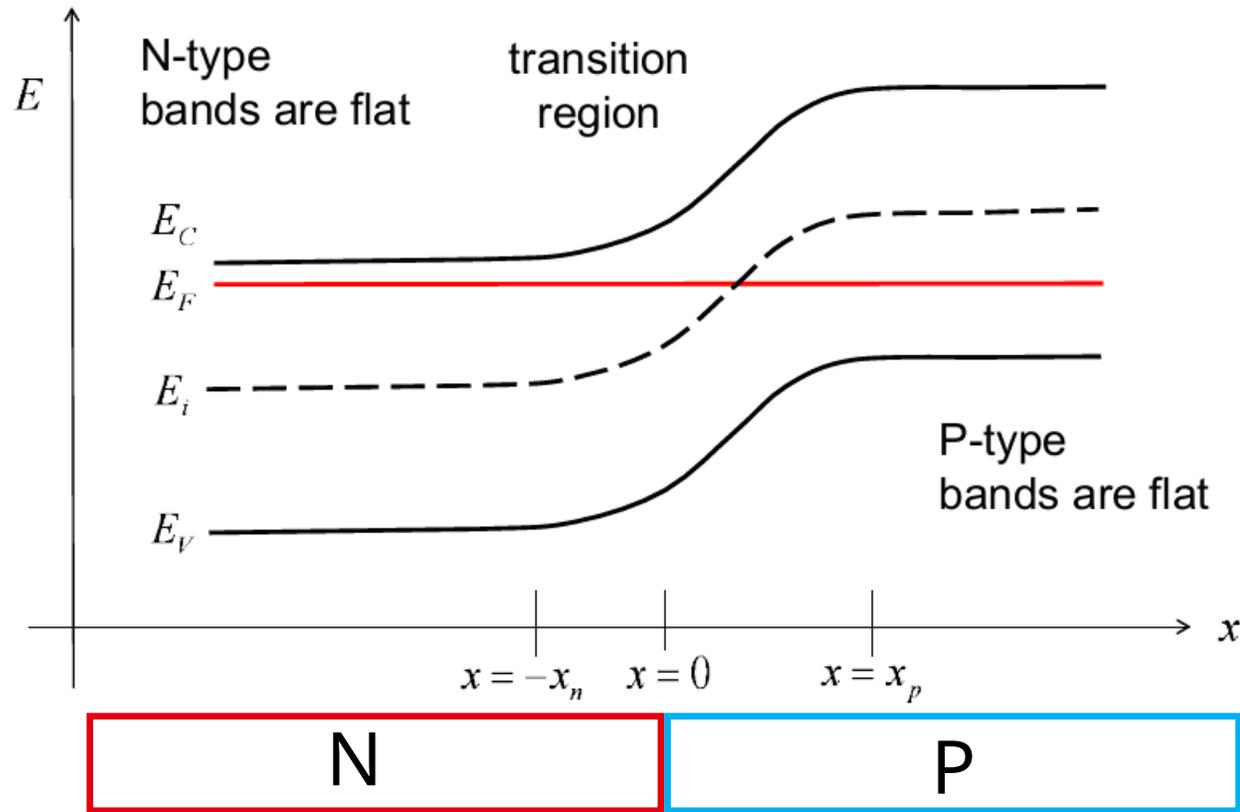
Come sarà l'andamento della densità dei portatori?

Sappiamo che

$$\log n(x) \propto E_F - E_i(x)$$

$$\log p(x) \propto E_i(x) - E_F$$

Quindi se guardo (il logaritmo) della concentrazione degli elettroni quando parto dalla giunzione profonda di tipo n (tutto a sinistra) il valore $E_F - E_i(x)$ è grande resta costante fino a quando le bande non cominciano a piegarsi e comincia a decadere (perché la differenza $E_F - E_i(x)$ diminuisce, e quando $E_F = E_i$ si annulla (in realtà vedremo che ha un andamento esponenziale quindi non si annulla ma deve tendere a un minimo). Che tipo di concentrazione di elettroni avremo nel semiconduttore di tipo p all'equilibrio? Beh sarà n_{0p} e sappiamo che in un semiconduttore di tipo p $n_{0p} = n_i^2 / N_A \ll p_{0p}$ e comunque sarà $n_{0p} < n_{0n}$. Quindi la concentrazione dei portatori $n(x)$ avrà un andamento che decade da un massimo nella zona n a un minimo nella zona p. L'inverso succede per la concentrazione di tipo P. è massima quando $E_i(x) - E_F$ è grande (ma guardando il grafico in valore assoluto sarà più bassa del livello di $n_{0n} = N_D$ della parte p. Poi si annulla quando il livello



$$\log_{10} n(x)$$

$$n_{0n} = N_D$$

$$p_{0n} = n_i^2 / N_D$$

$$\log_{10} p(x)$$

$$p_{0p} = N_A$$

$$n_{0p} = n_i^2 / N_A$$

Giunzione PN: $\rho(x)$,

Come sarà l'andamento della densità di carica spaziale con la posizione?

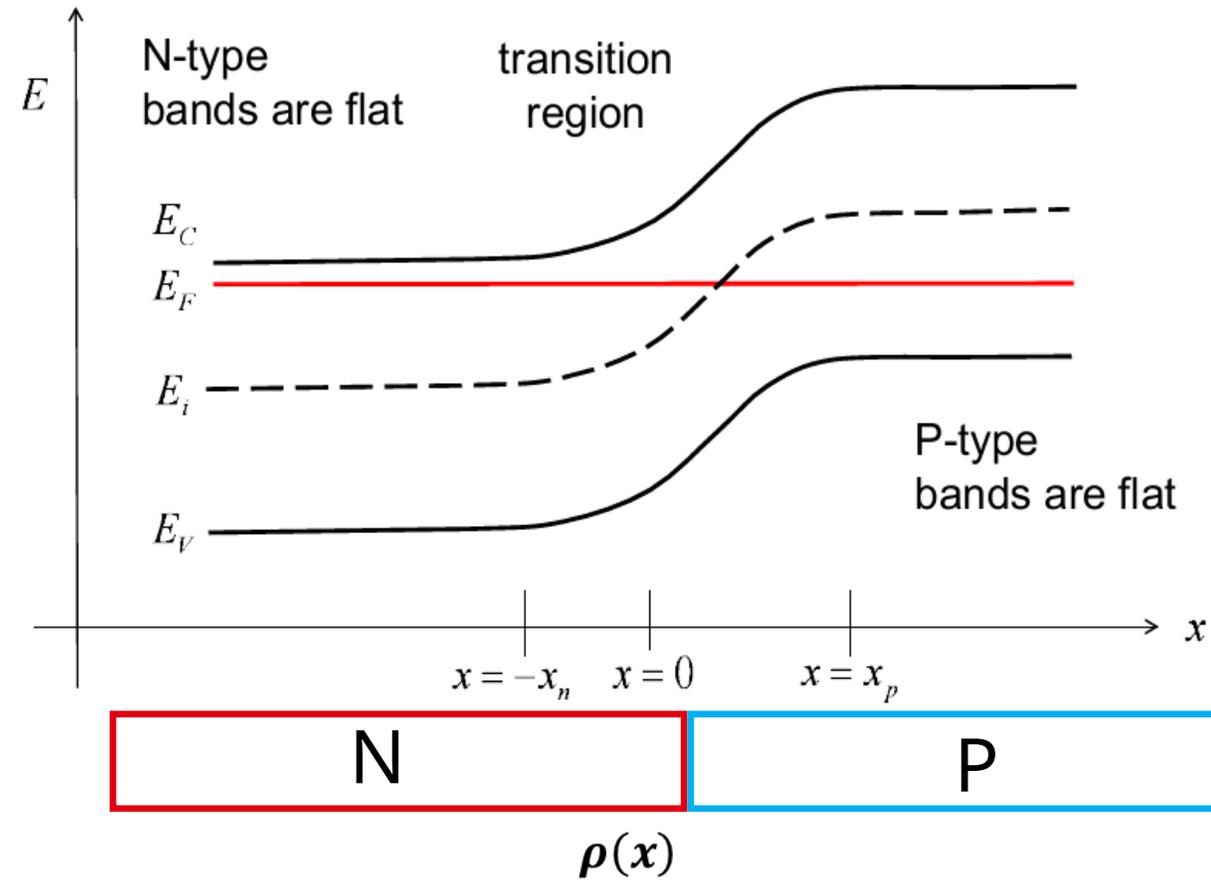
Sappiamo che

$$\rho(x) \propto \frac{dE_C^2}{dx^2}$$

Se il livello energetico è COSTANTE la carica spaziale essendo proporzionale alla derivata seconda è ZERO (la derivata seconda di una costante è zero). Quindi per tutti i valori di bande di energia costanti la carica spaziale è nulla.

La derivata seconda è positiva (e costante) dove la curvatura è rivolta verso l'alto (quindi nella zona a sinistra del valore di flesso per $E_F - E_i$). E sarà Negativa (e costante) a destra dove la curvatura è rivolta verso il basso. Al flesso la derivata seconda diventa costante e poi si inverte perché la curva diventa a concavità rivolta verso il basso

E' intuitivo capire che nella regione di interfaccia le lacune provenienti da destra hanno neutralizzato gli atomi donatori presenti nel semiconduttore di tipo n generando quindi degli ioni POSITIVI mentre a destra gli elettroni che entrano si legano agli accettori creando ioni NEGATIVI e assenza di cariche spaziali. L'assenza di cariche spaziali nella zona di interfaccia fa sì che questa zona si chiami regione di «svuotamento» (depletion region). Da notare che per la conservazione della carica le aree A1 e A2 devono essere uguali (quindi il massimo della carica spaziale nella regione n è in valore assoluto più alto del massimo della carica spaziale negativa nella regione di tipo p)

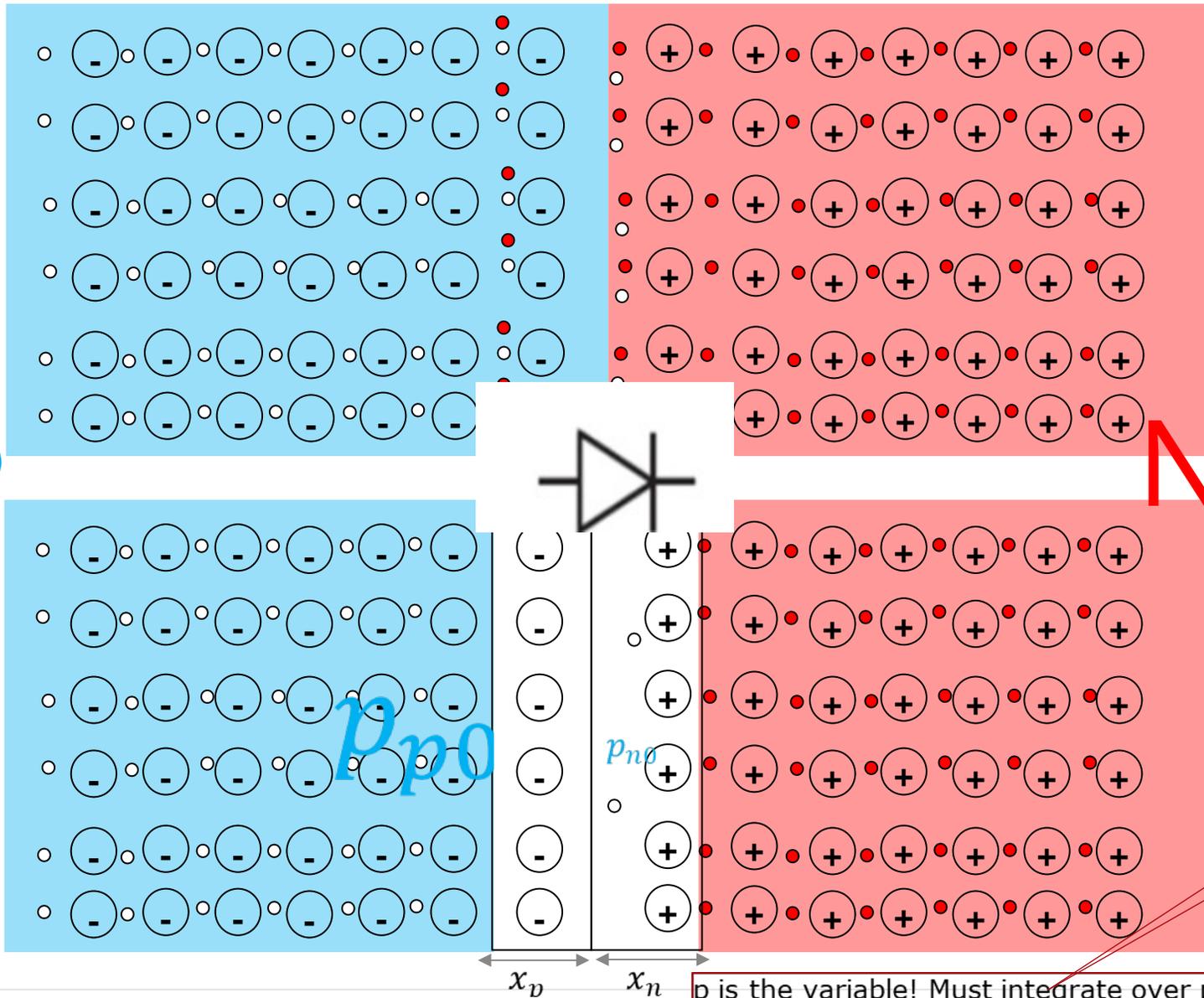


$$\rho(x) \propto p(x) - n(x) + N_D(x) - N_A(x)$$

$$\rho(x) = q[N_D - n(x)]$$

$$\rho(x) = q[p(x) - N_A]$$

PN Junction: space charge region. Built In Potential



• Equilibrium: $j_p = j_n = 0$

Inside the space charge region $n = p = 0$ let's focus on holes and calculate V_{Bi} on solving p equation (over p : independent variable)

• Semiconductor's holes current drift+diffusion

$$j_p = qp\mu_p E_x + qD_p \frac{dp}{dx}$$

• Einstein's relation

$$D_p = \frac{k_B T}{q} \mu_p, D_n = \frac{k_B T}{q} \mu_n$$

$$E_x dx = -\frac{qD_p}{q\mu_p} \frac{dp}{p} = -\frac{k_B T}{q} \frac{dp}{p}$$

$$V_{bi} = \int_{-x_p}^{+x_n} E_x dx = -\frac{k_B T}{q} \int_{p_{p0}}^{p_{n0}} \frac{dp}{p} = -\frac{k_B T}{q} \ln \frac{p_{n0}}{p_{p0}}$$

Complete ionization hypothesis

$$p_{p0} \cong N_A$$

Mass Action Law (applied in the n region)

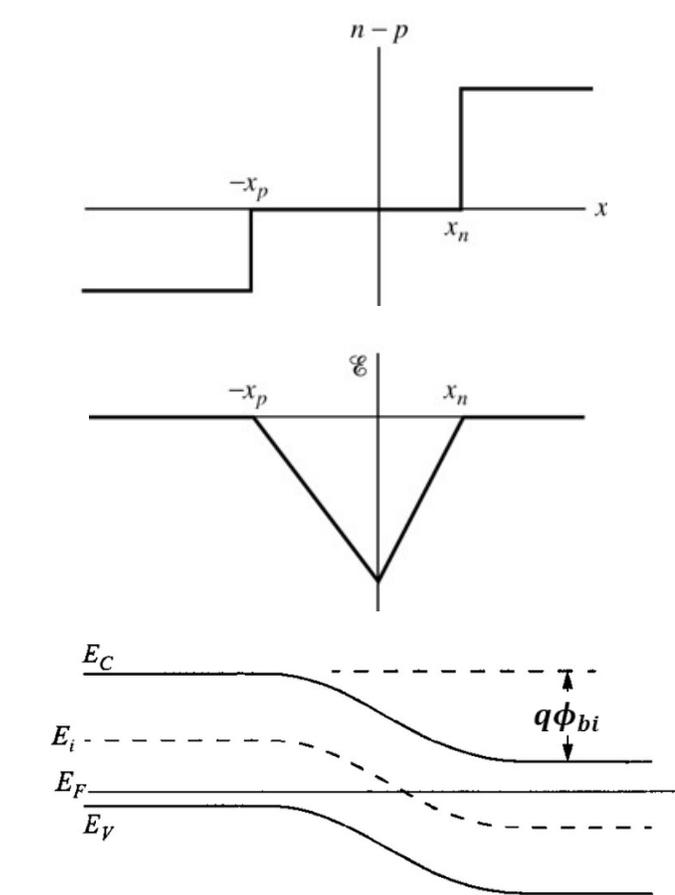
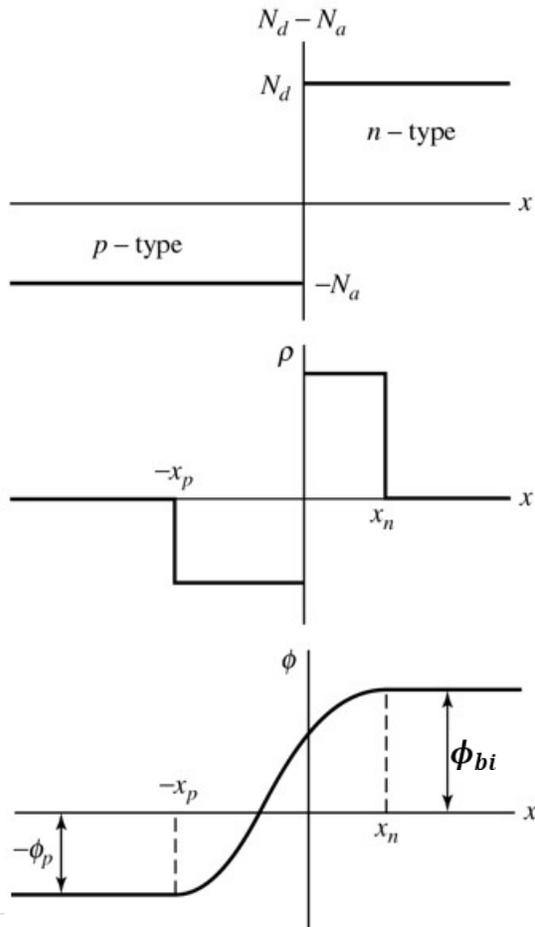
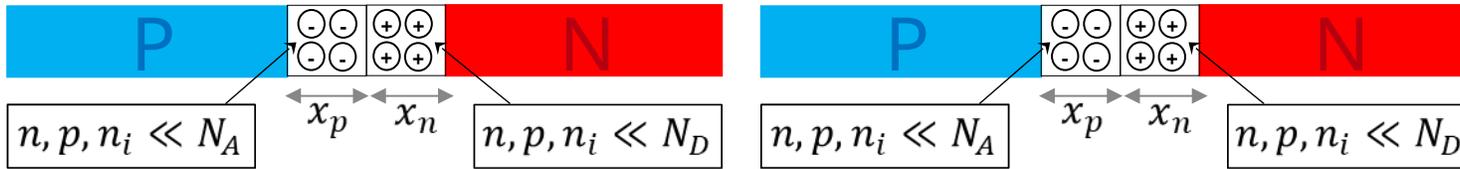
$$p_{n0} n_{n0} = n_i^2 \rightarrow p_{n0} N_D = n_i^2 \rightarrow p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D}$$

$$V_{bi} = -\frac{k_B T}{q} \ln \frac{p_{n0}}{p_{p0}} = -\frac{k_B T}{q} \ln \frac{n_i^2}{N_A N_D} = +\frac{k_B T}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

p is the variable! Must integrate over p concentration!

p concentration in p region is big (p_{p0}) where in n region is low! (p_{n0})

«Step» PN Junction: space charge region: B.I Potential



$$\phi_{bi} = \phi_n - \phi_p = \frac{k_B T}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

$$\phi_n = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right)$$

$$\phi_p = -\frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right)$$

Example

Calculate the «diffusion voltage» or «built in» potential for a PN junction with $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ for silicon at ambient temperature $T=300\text{K}$

As for Si at $T=300\text{K}$ $n_i = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

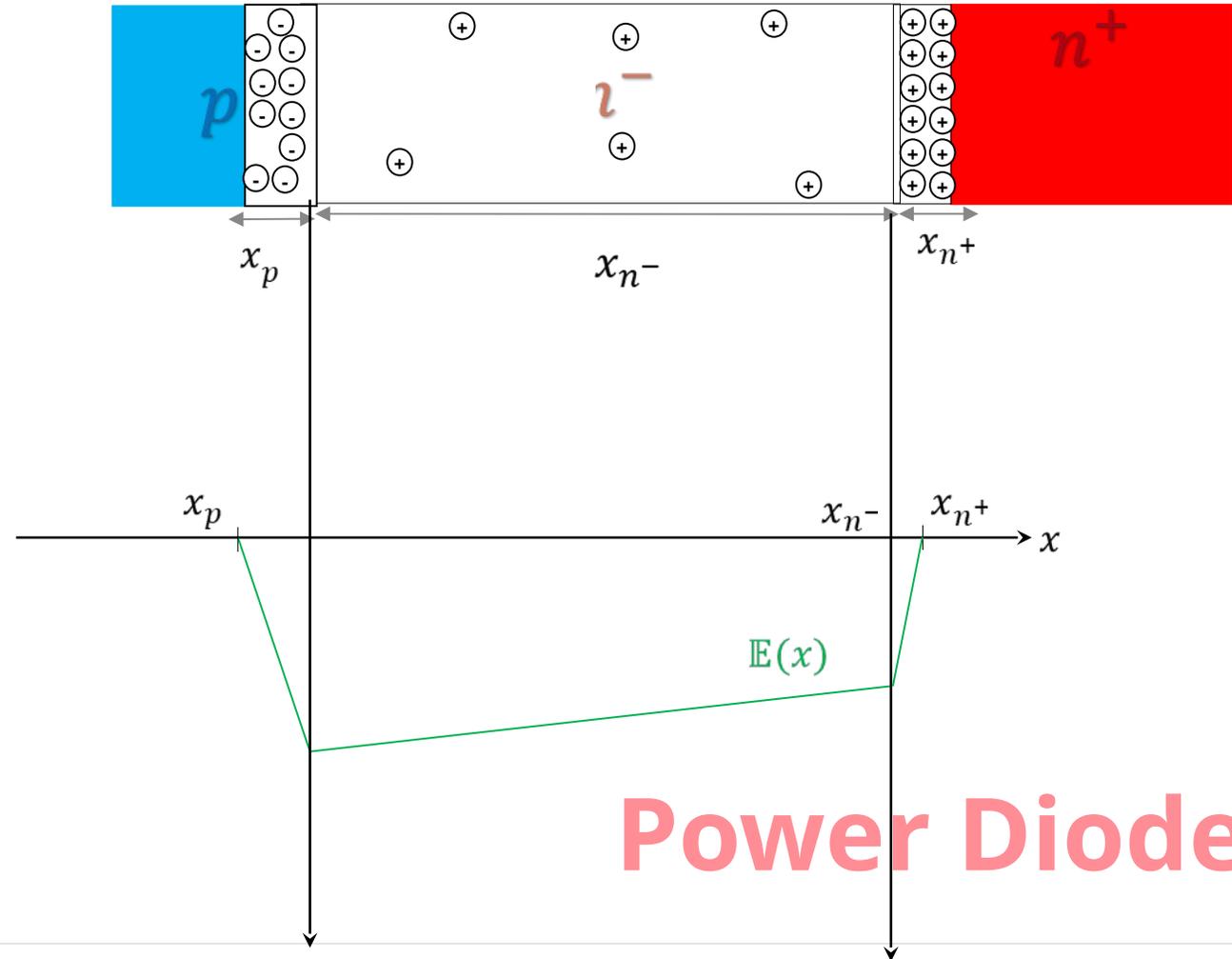
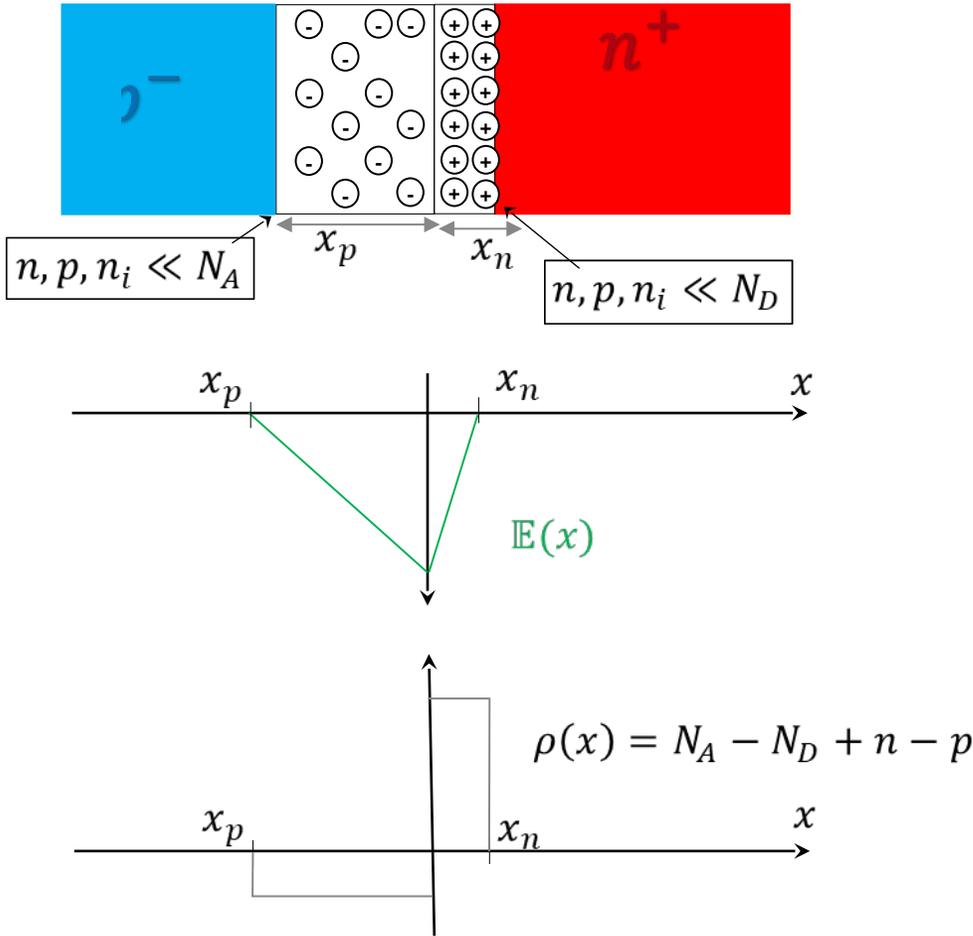
$$\phi_{bi} = \frac{k_B T}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = \frac{1.38 \cdot 10^{-23}}{1.60 \cdot 10^{-19}} \cdot 300 \cdot \ln \left(\frac{10^{17} \cdot 10^{16}}{1.45 \cdot 10^{10}} \right) = 1.36 \text{ V}$$

Electric field in step junction in function of doping ($N_{Si} = 5 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$)

$N_A = 10^{17} \text{cm}^{-3}$, $N_D = 10^{19} \text{cm}^{-3}$
 case (a) $p\text{-}n^+$ junction

$$N_A x_p = N_D x_n$$

$N_A = 10^{18}$, $N_{D_n^-} = 10^{16} \text{cm}^{-3}$, $N_{D_n^+} = 10^{19} \text{cm}^{-3}$
 case (b) $p\text{-}n^- \text{-}n^+$ junction



Concentrazione di elettroni in semiconduttori estrinseci (drogati) e intrinseci e dettaglio delle 3 zone di funzionamento del diodo: **la leakage** e **la rottura della giunzione (breakdown)**

Ci sono SEMPRE un po' di n_i in **p** (n_p)
e p_i in **n** (p_n)

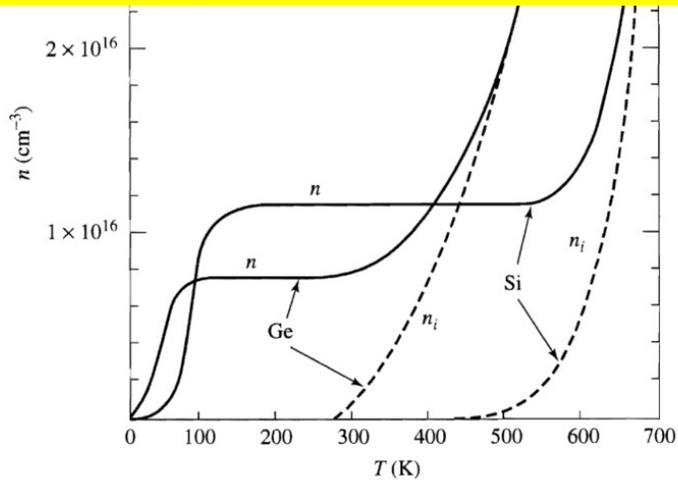
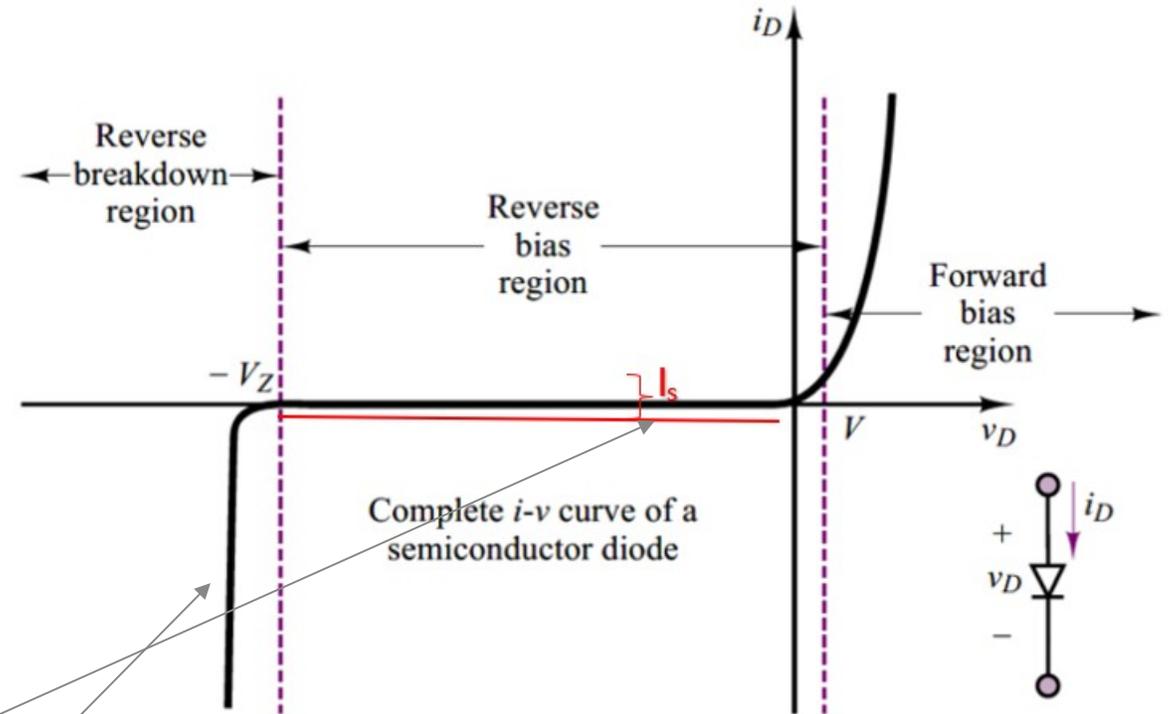


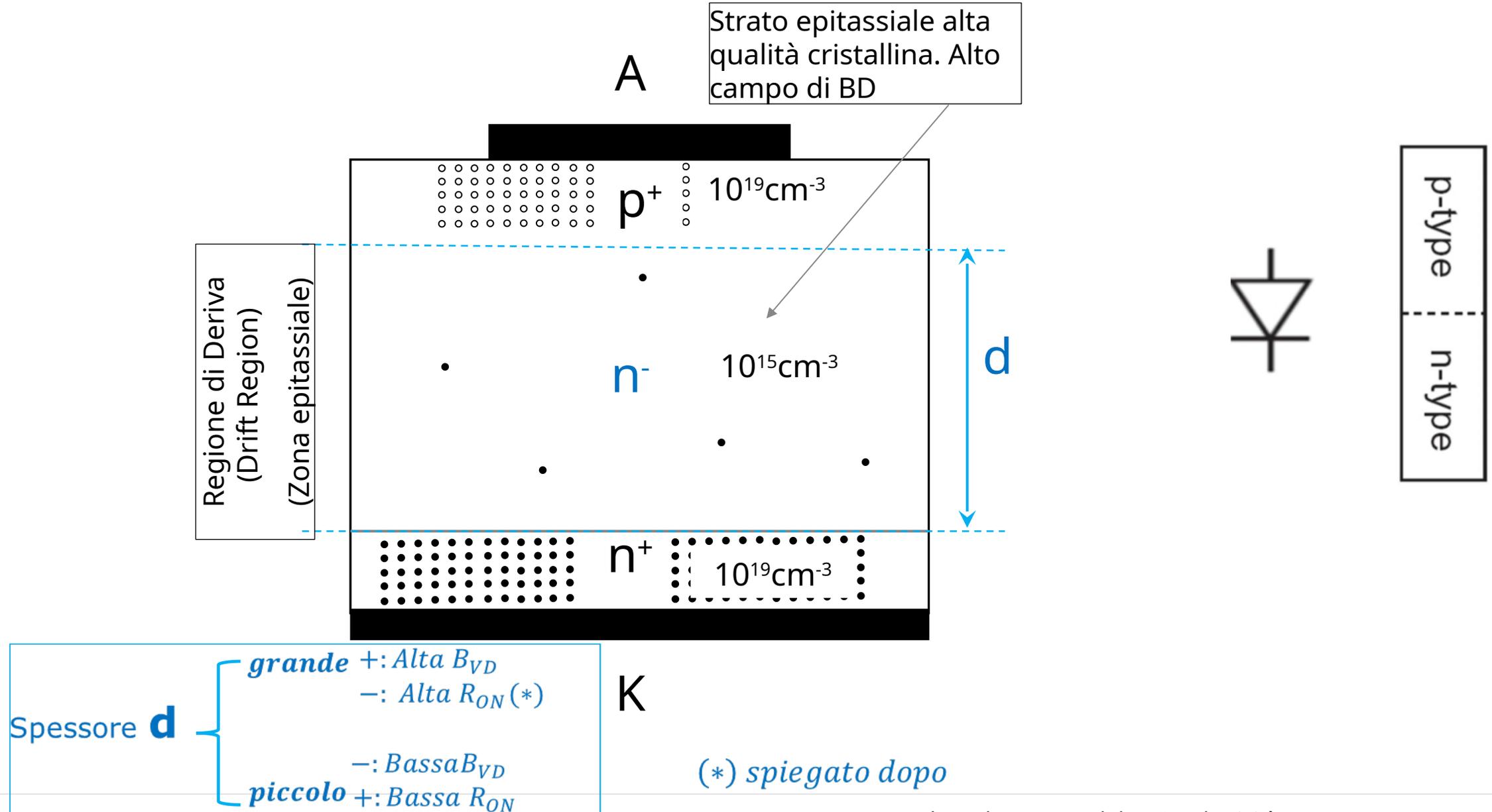
FIGURE 1.9 Electron concentration versus temperature for two *n*-type doped semiconductors: (a) Silicon doped with 1.15×10^{16} arsenic atoms cm^{-3} [1], (b) Germanium doped with 7.5×10^{15} arsenic atoms cm^{-3} [2].

$n_i = p_i$ SONO I RESPONSABILI DELLA CORRENTE DI SATURAZIONE INVERSA! I_s

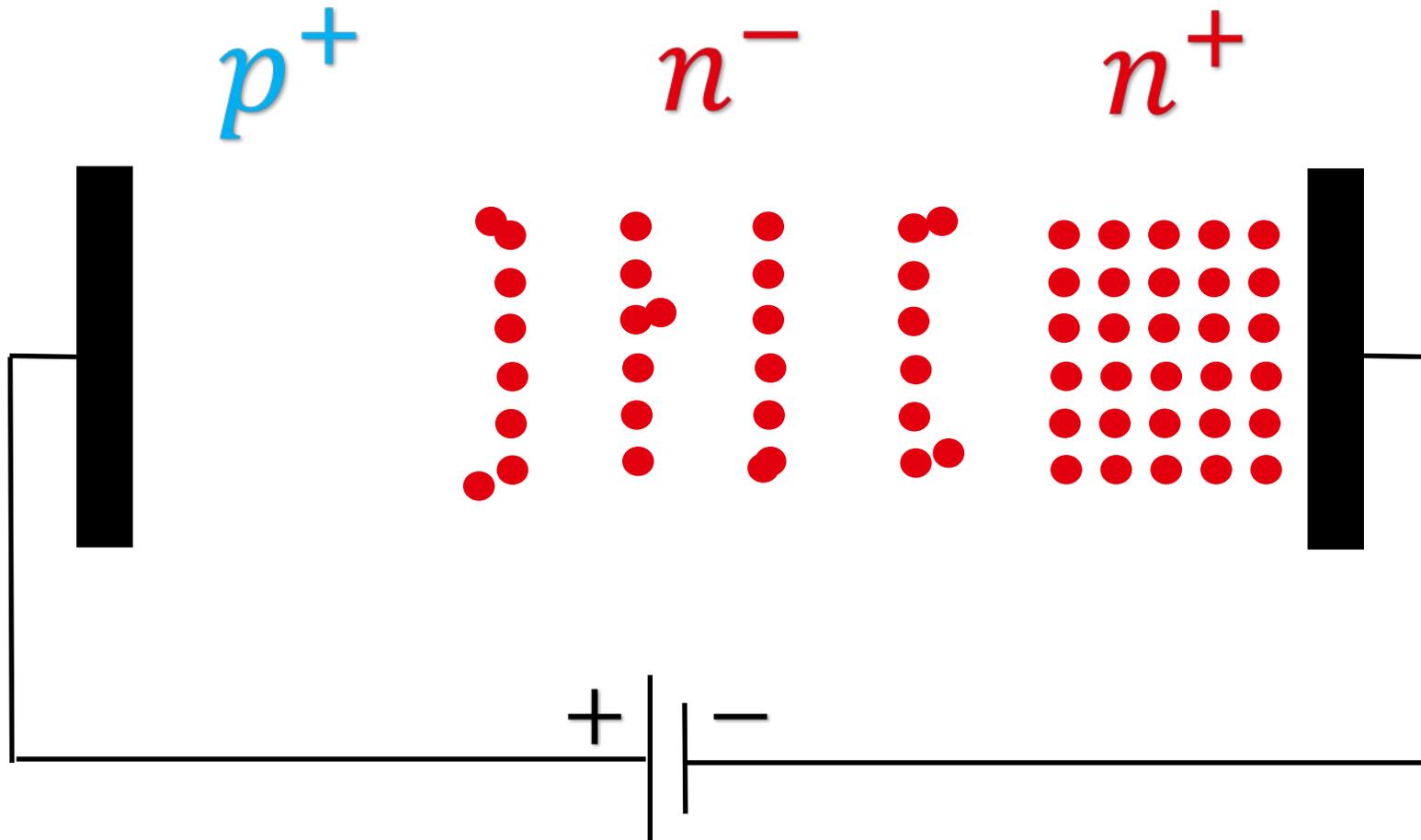


Breakdown

Giunzione P-i-N (struttura verticale) DIODO DI POTENZA

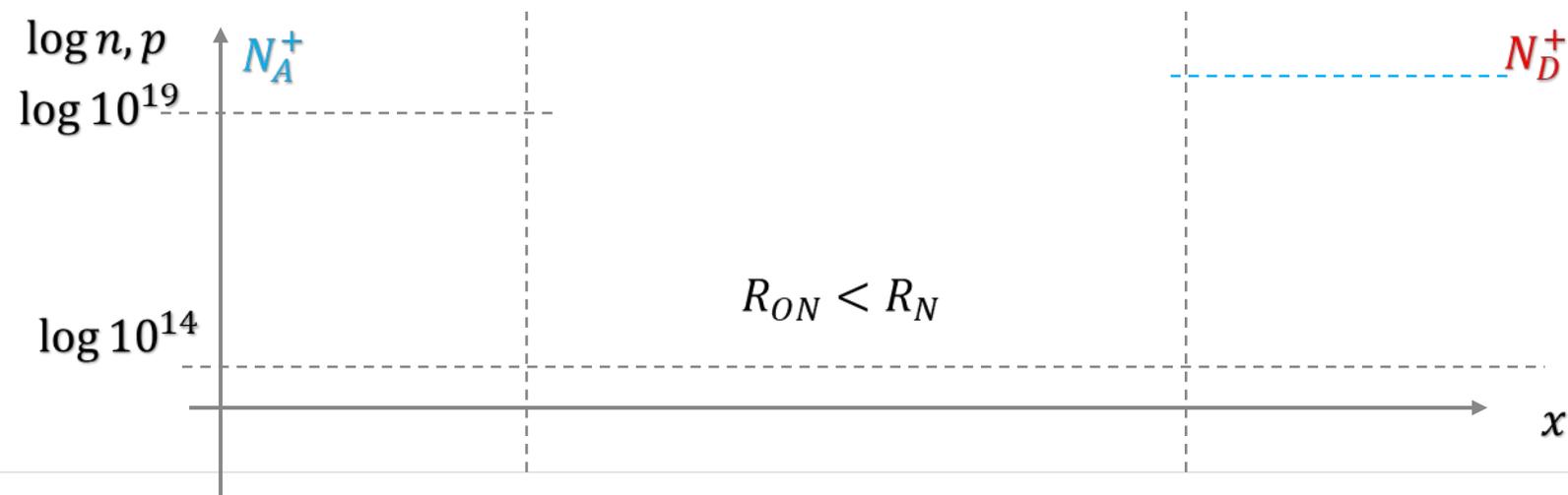
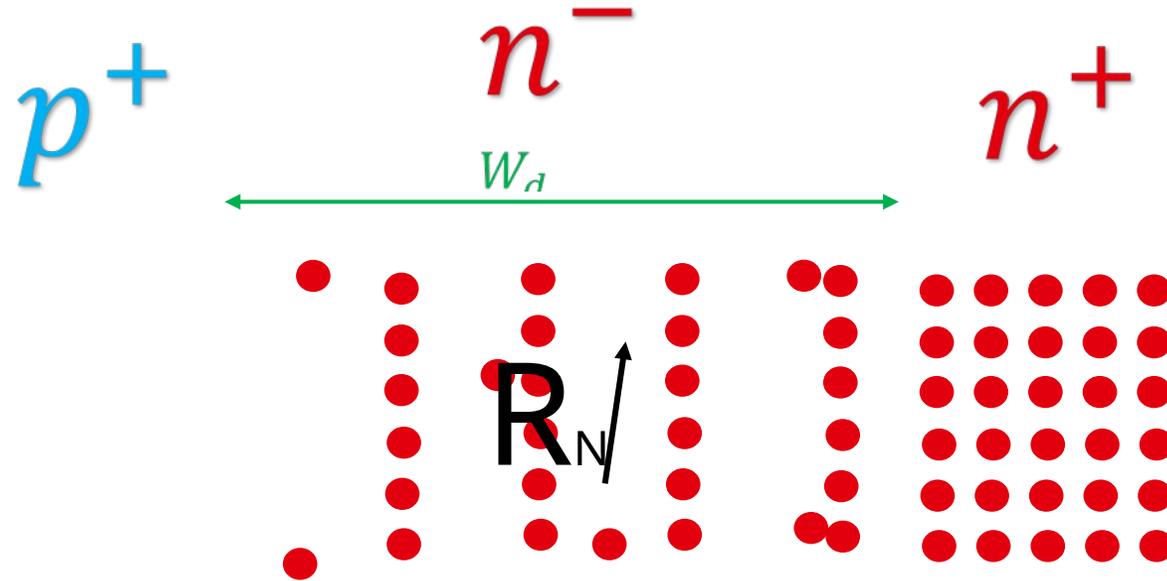


P-i-n : Principi di funzionamento



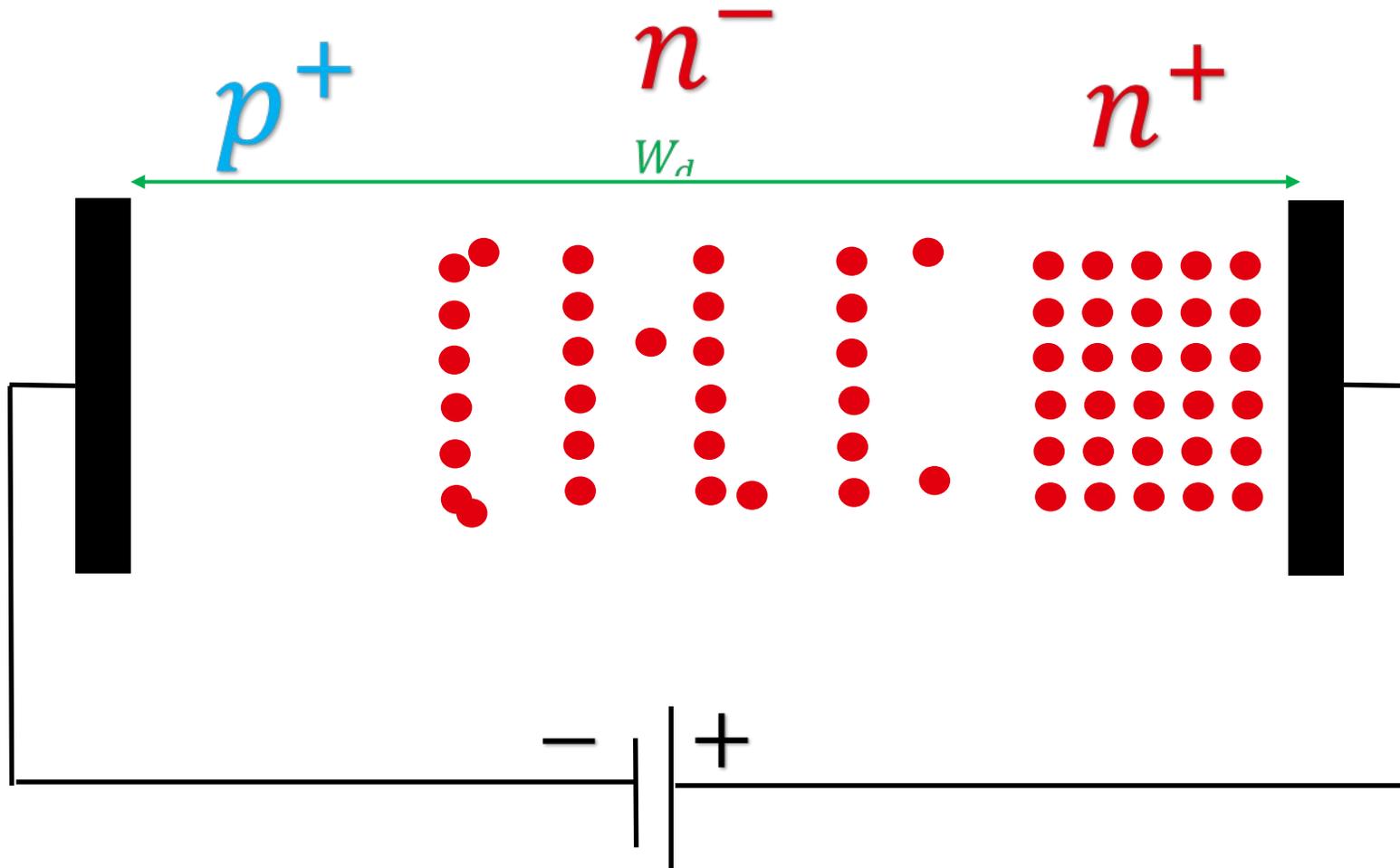
- Polarizzazione diretta
- Lacune non riescono ad essere neutralizzate dai «pochi» elettroni della zona intrinseca (solo alcune lo sono ma ne restano ancora molte).
- Si forma una zona di **doppia iniezioni di portatori (minoritari + maggioritari)**
- **Plasma di Portatori di Carica**

P-i-n : Modulazione della conduttività



- Immaginiamo che la lunghezza della giunzione W_d è comunque minore della lunghezza per avere ricombinazione completa $W_d < W_{ric}$
- La resistenza della regione intrinseca n^- è R_N e di solito è alta perché è un quasi isolante il silicio «quasi» intrinseco!
- Immaginiamo di avere nella zona p: $p_{p0} = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $n_{n0} = 10^{14}$ le lacune l'eccesso di portatori $p(x)$ può ritenersi costante. Così come quello degli elettroni
- L'andamento di portatori di carica in eccesso, costante, ed elevato (il plasma) nella zona «intrinseca» migliora la conduttività → **In diretta il diodo p-i-n riduce la R_{on} t.c $R_{on} < R_N$**
- Fenomeno della modulazione della conduttività (positivo perché mi riduce le perdite statiche $V_{on} = R_{on} I_{on}$)

P-i-n : Spegnimento: tempo di ritardo per svuotamento:



- Per avere una R_{ON} bassa serve un plasma importante (molti portatori)
- Allo spegnimento la zona di deriva (o intrinseca) deve essere svuotata e di solito questa zona (che è anche quella che definisce la tensione di breakdown) è geometricamente molto più grande delle zone p^+ e $p^- \rightarrow$ coda di spegnimento
- Questo fenomeno rende il diodo p-i-n **limitato per applicazioni ad alta frequenza di switching.**
- Come vedremo in questi casi si usano dispositivi **unipolari** (Schottky) o dispositivi con «trappole» per accelerare la ricombinazione (CAL4, CAL7)

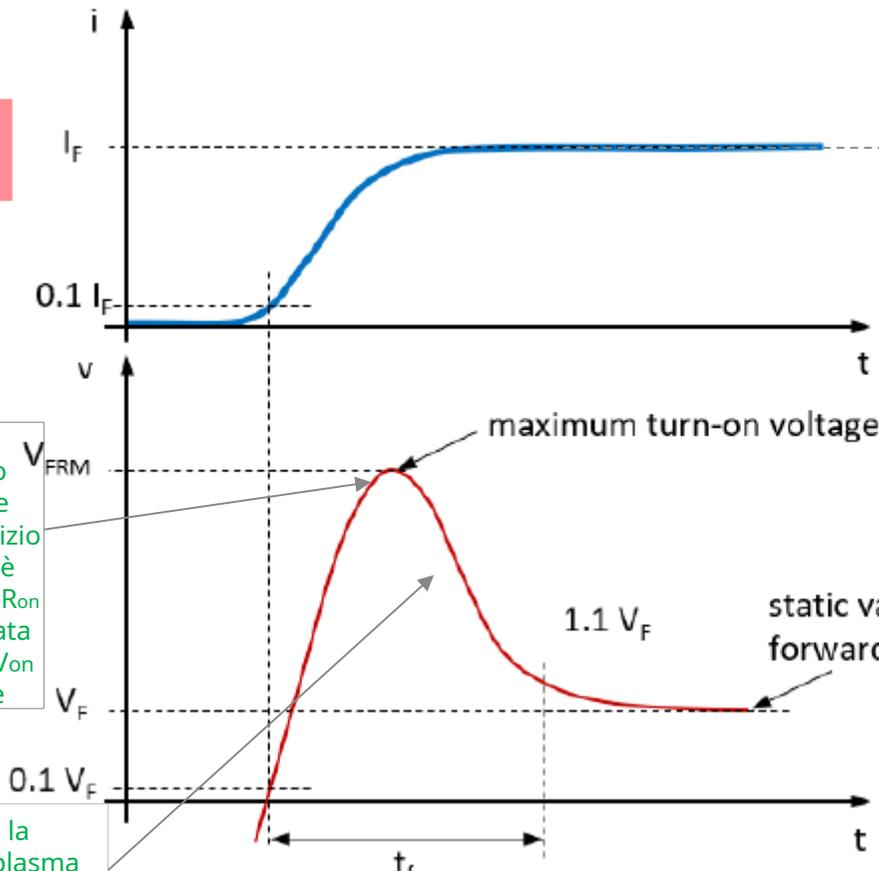
Turn-on e Turn-off del diodo p-i-n

ON

OFF

Sovratensione dovuta al ritardo della formazione del plasma all'inizio il plasma non si è ancora formato R_{on} non si è abbassata è ancora R_N . La V_{on} continua a salire

poi scende dopo la formazione del plasma e l'inizio del fenomeno della modulazione della conduttività che abbassa la resistenza della giunzione intrinseca

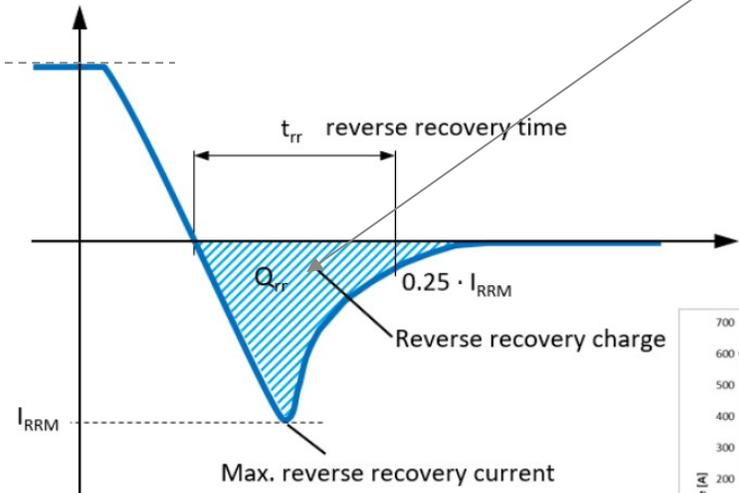


Turn-On del diodo p-i-n

$i(t)$

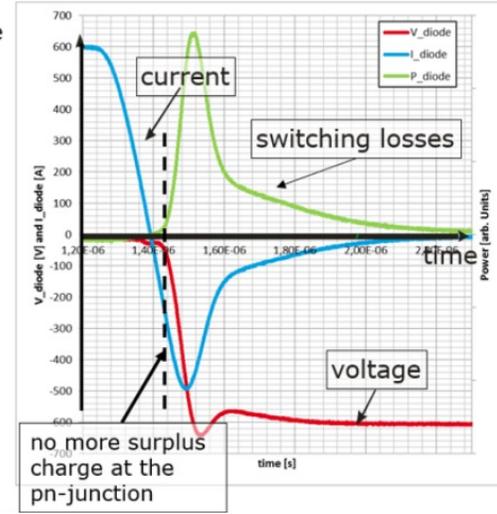
$v(t)$

Turn-Off del diodo p-i-n



Fenomeno dello svuotamento della regione intrinseca dal plasma: ritardo!

Overshoot dovuto al cario induttivo
Overshoot aumenta per induttanze maggiori!
Attenzione alla SOA!



Diodo Schottky



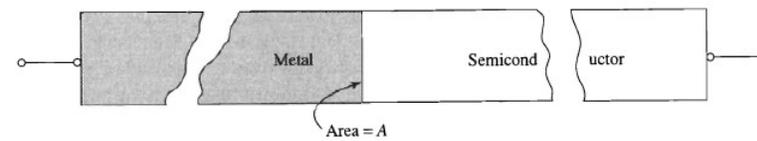
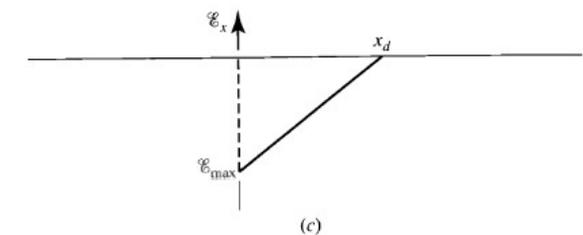
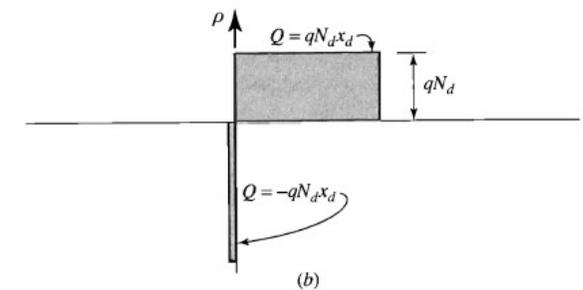
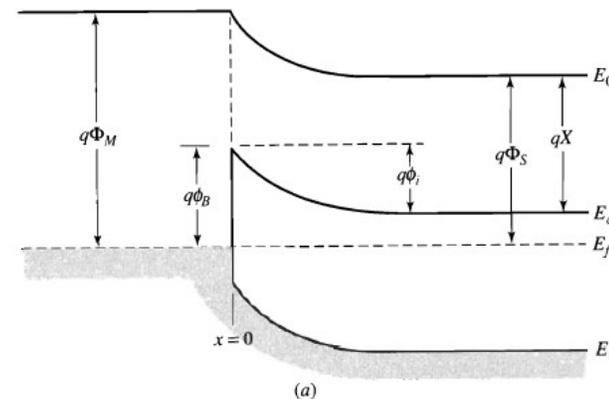
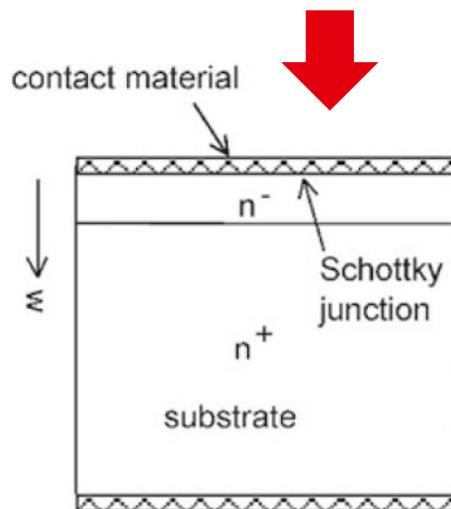
Walter Schottky

- [Sch38] Schottky, W.: Halbleitertheorie der Sperrschicht. Naturwissenschaften **26**, 843 (1938)
- [Sch39] Schottky, W.: Zur Halbleitertheorie der Sperrschicht- und Spitzengleichrichter. Zeitschrift für Physik **113**, 376–414 (1939)

Una barriera di potenziale si può creare anche con un contatto METALLO-SEMICONDUCTORE (Schottky 1938/39- (DA **NON** CONFONDERE CON SHOCKLEY!!!))

In elettronica di potenza molto utile perché non serve SVUOTARE IL CAPASMA. Perché il BODY DIODE di un MOSFET di potenza è LENTO!! Perché ha una struttura p-i-n, NON-Schottky!

Barriera Schottky di Potenza



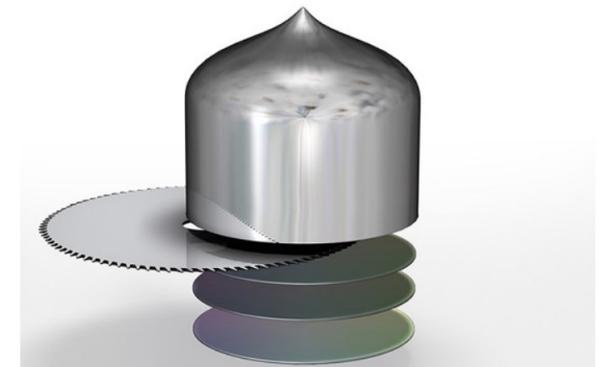
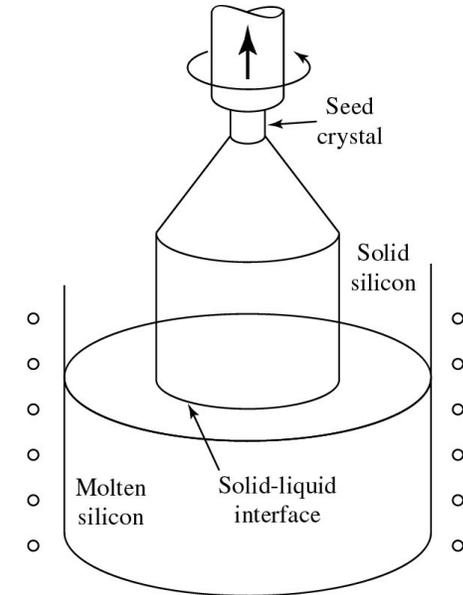
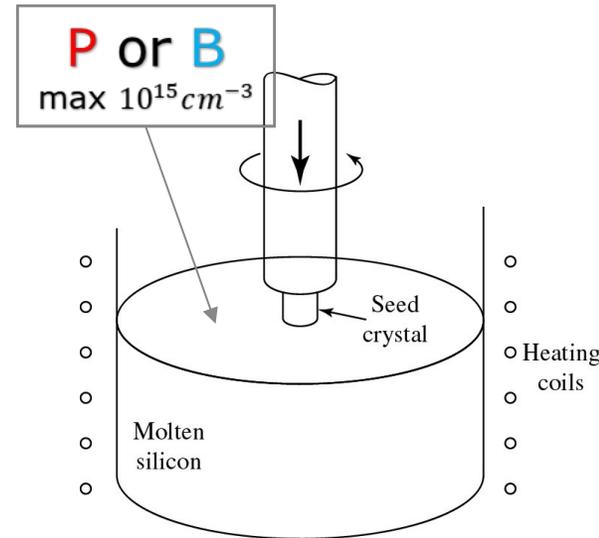
Barriera Schottky Classica

Silicon technology, planar technology, crystal growth, Lithography, doping, etching



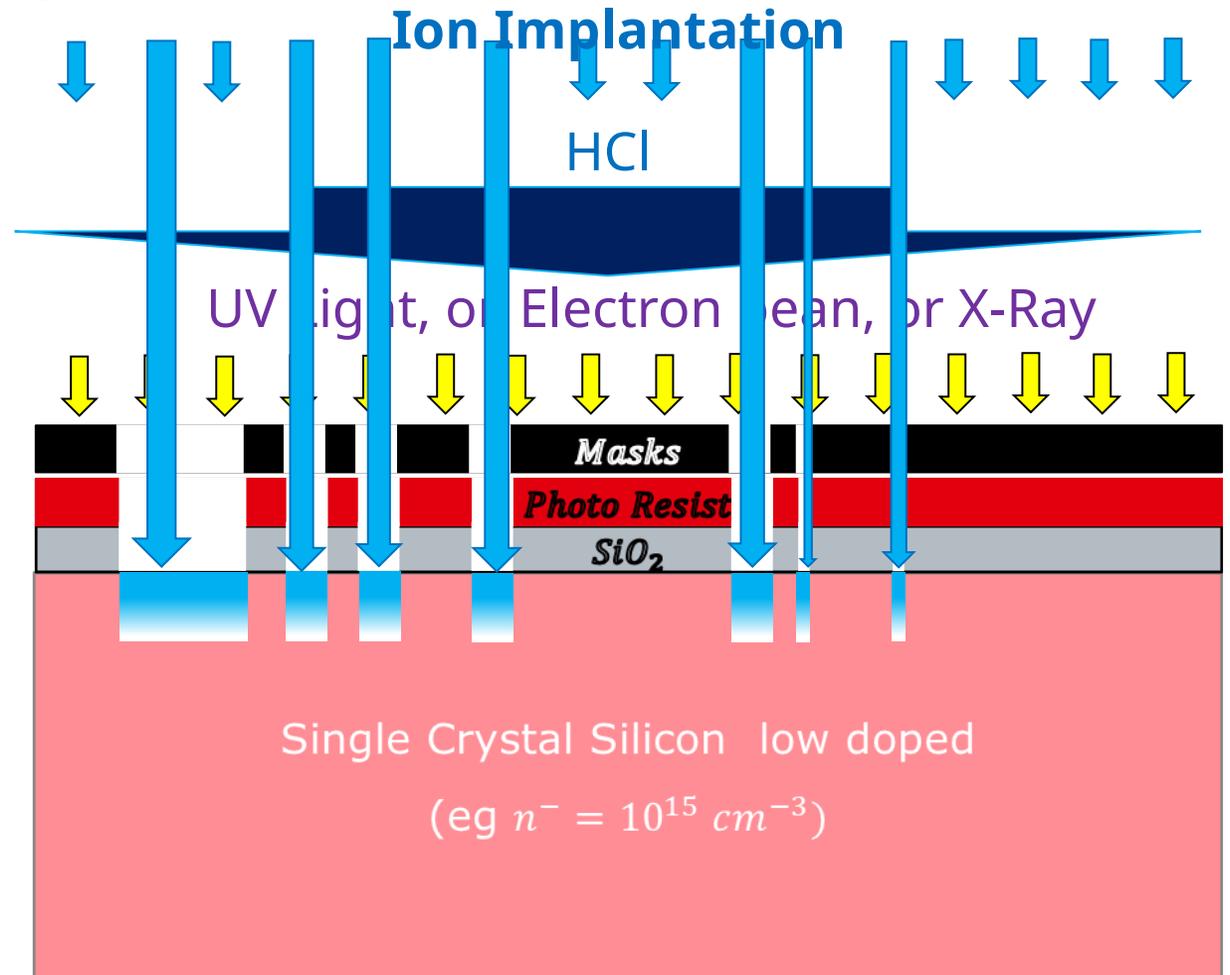
Single Crystal growth-(Czochralski method)

- Silicon Atom concentration : $5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3} \text{ atoms}$
- typical doping (from n^- to n^+) from 10^{15} to 10^{20}
- Impurity should be 2 orders of magnitude less than **minimum doping**: so $\frac{10^{15}}{100} = 10^{13}$
- So impurity should be less than $10^{22} - 10^{13} = 10^9$: only 1 impurity (electrical active) **below 1 billions of Silicon Atoms** can be tolerated! Process to obtain:
- Pieces of Polysilicon rod melted in fused-silica crucible at 1412°C (for SiC is 2500°C !)
- A high-quality single crystal silicon "seed" with desired orientation lowered in the rotating melt (crucible rotating in one direction, the seed in the opposite).
- Small dopant (B or P) added $1\text{Kg-Si} \rightarrow 0,1\text{mg}$ can create lightly doped n or p (n^- or p^-)-: the single crystal wafer is not "Pure" is sold already lightly doped!
- Seed raised slowly (*pulled*) from the melt. Cool \rightarrow material adhere on it following his crystal orientation and increase size.
- Very accurate control of the process needed
- Desired wafer diameter is obtained by controlling the pull rate and $T^\circ\text{C}$ with automatic feedback control. So cylindric ingots of single crystal can be created
- Up to 300mm (12-inches) for Silicon today



Oxidation and Lithography: Implantation and Diffusion

- On a single crystal silicon (lightly doped) oxidation happens relatively easily even at room temperature. SiO_2 is a very good electric insulator and protects the lower layer from doping by ion implantation.
- SiO_2 layer can be selectively removed by using a layer called "photo-resist" (*resina fotosensibile*) (a few drops of resist which expand by wafer spinning).
- On top of the resist, a mask is placed over the wafer and aligned at a microscope.
- Over the mask are created areas where UV-light can pass and expose the resist only in some areas. In spite of UV light "electron beam lithography" or even "X ray lithography".
- Solvent is used (eg. trichloroethylene) and resist is removed.
- SiO_2 exposed area is then removed with HCl .
- Dopants are introduced by ion implantation or gaseous deposition.
- In ion implantation, a beam of high-energy ions doping atoms strikes the semiconductor surface and penetrates into exposed regions (less than $1\mu m$).
- Dopant ions migrate through the crystal if it is heated sufficiently 1000° ; diffusion happens (process similar to the diffusion of carriers with different densities: Fick's law).

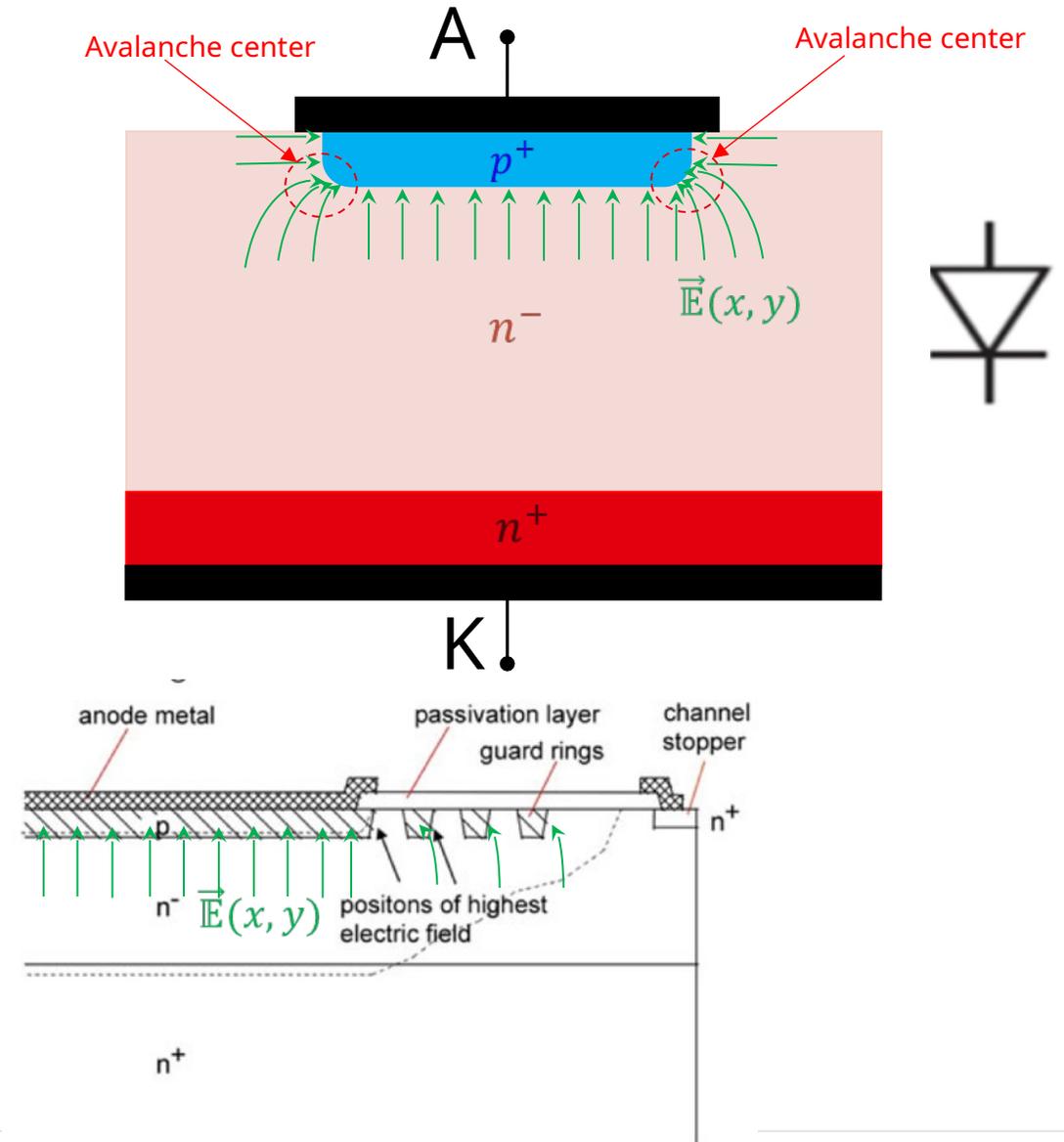
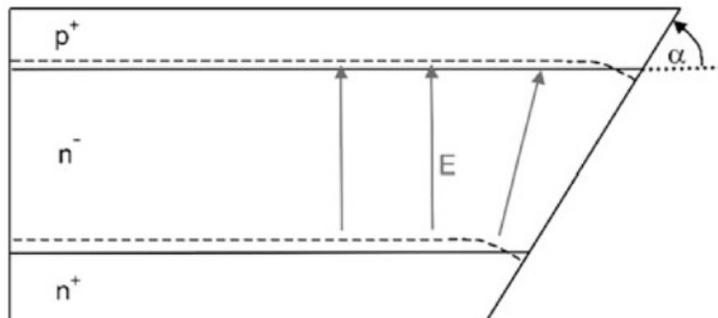


Edge shape terminations of Power Devices (*Terminazioni di bordo*)

- Edge shape or termination of Power devices must be designed carefully as the electric field density in power electronics is high and can concentrate on the high curvature "point discharge effect".
- P-N structure analyzed before does not have "infinite lateral" dimension. As it stops appropriate edge termination need to be developed to reduce electric field at the edges.
- As Equipotential lines must be orthogonal on the surface the shape of electric field can be changed by changing the shape of edge terminations

Two possible methods

- Edge structure with *beveled termination structures (terminazioni smussate)* especially for Thyristors : with mechanical grinding (*molatura*)
- *Planar termination structure (with field plates or guard rings)*



Edge shape terminations of Power Devices (*Terminazioni di bordo*)

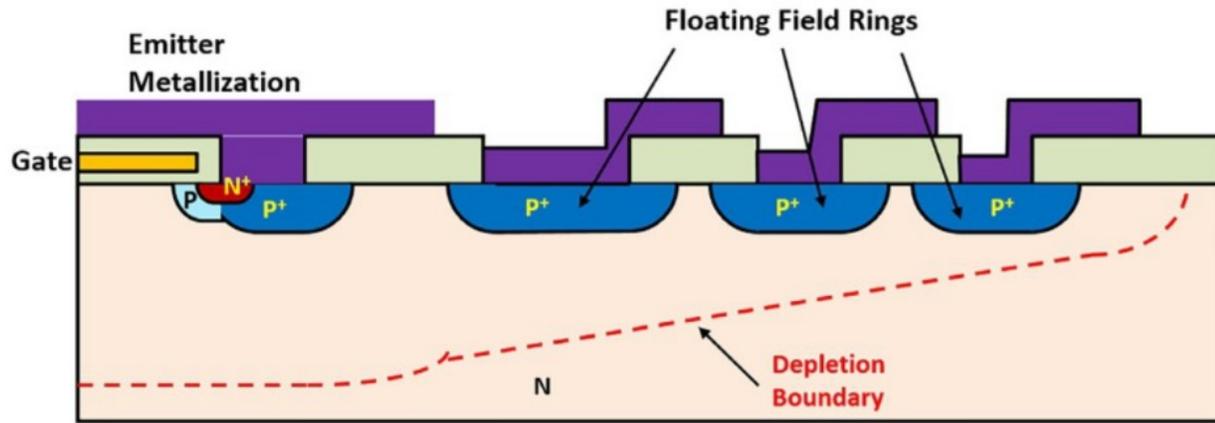


FIGURE 5.8

Cross-section of the typical edge termination design for a planar-gate IGBT.

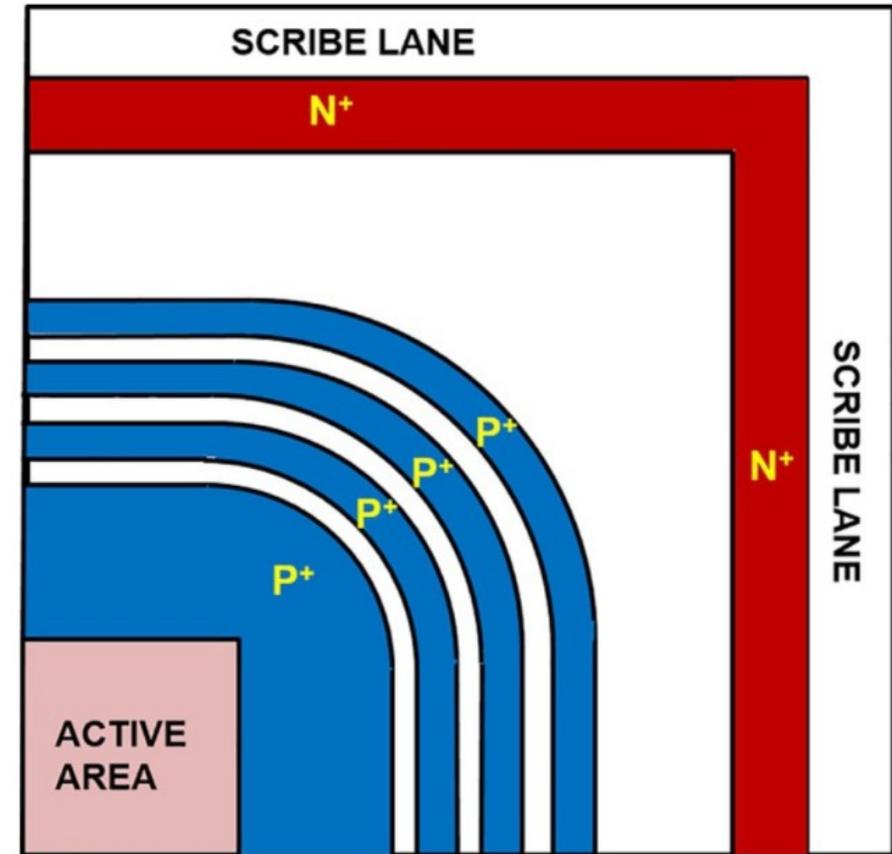
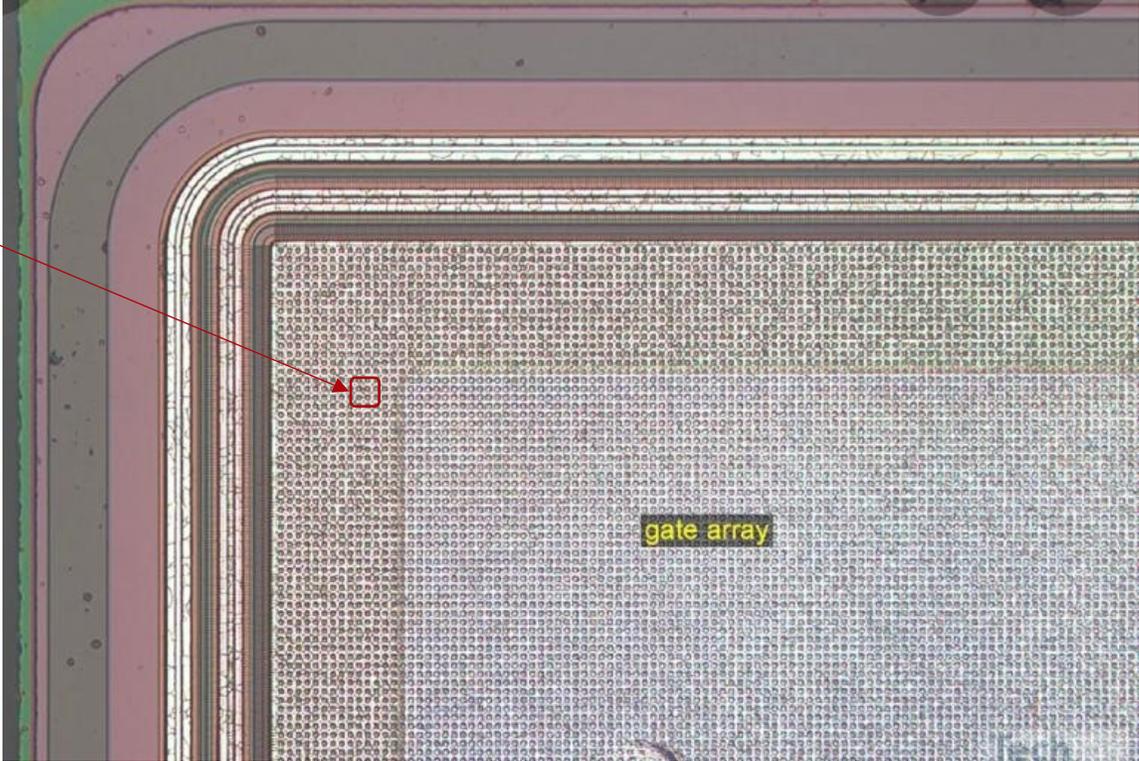
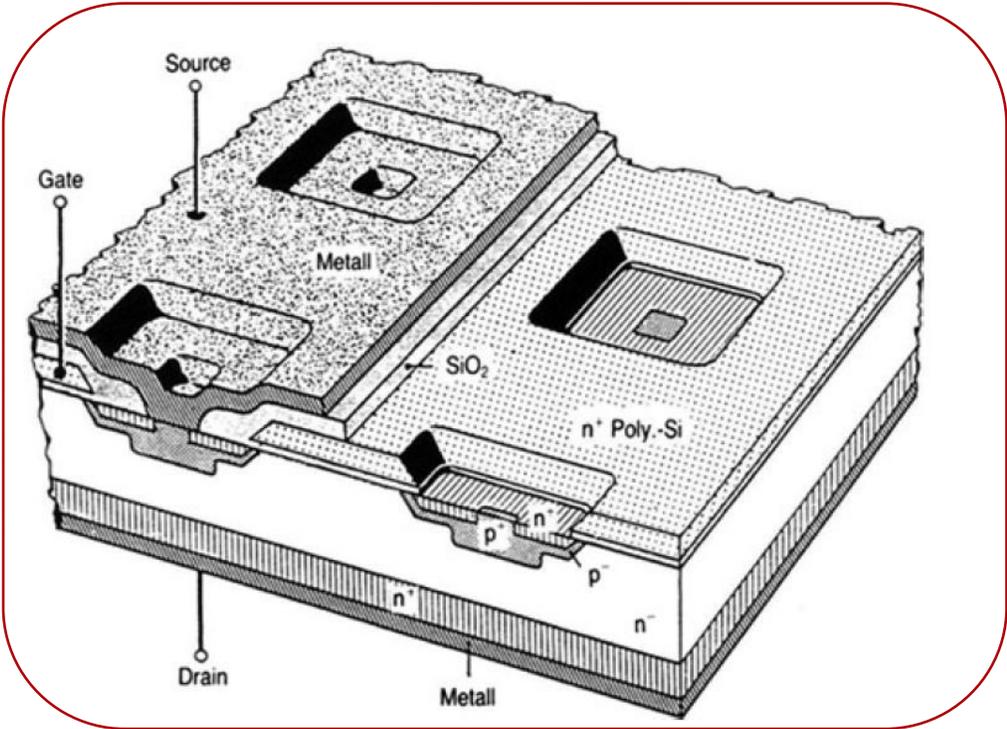


FIGURE 5.9

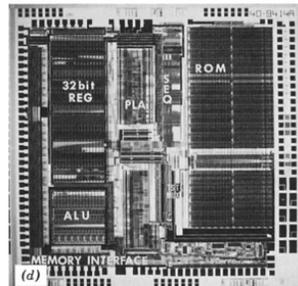
Edge termination layout for an IGBT chip.

Power Mosfet: Gate array detail and Edge Terminations



Front-End (different inner doped layers) and Back-End (metal) manufacturing steps

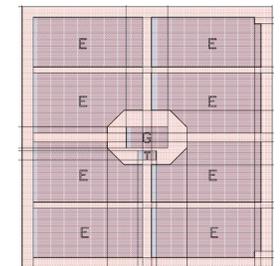
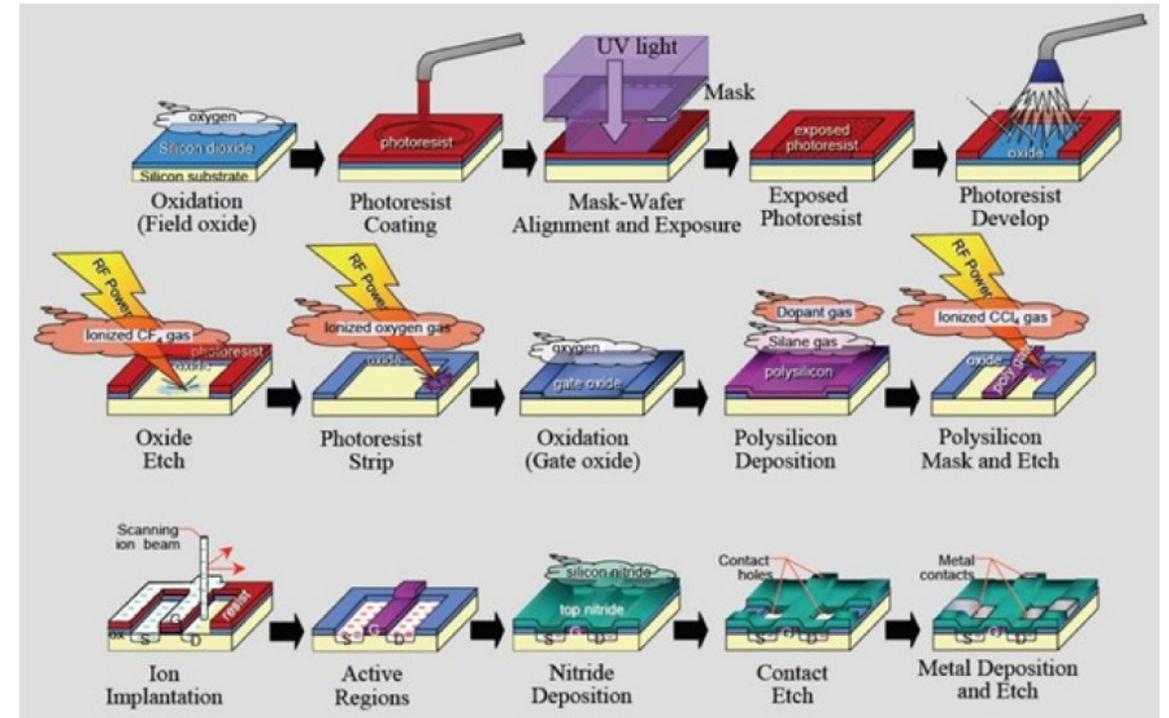
- Process is repeated several times to create n-type, p-type and connection of circuits. The creation of n-p layers is called "**Front-End**" manufacturing phase.
- The last steps consist in connecting the elementary cell (for instances C-MOS in IC-Technology) by the "**metal layer**" deposition and connection: this last process is called **Back End** manufacturing
- in IC fabrication the C-MOS cell are created and then connected to create Logic, Memories and the complete processors.
- In Power Electronics single cells are repeated/replicated to make for instance a unique IGBT



Design Experiment for a Smart Card Application

consuming Low Energy

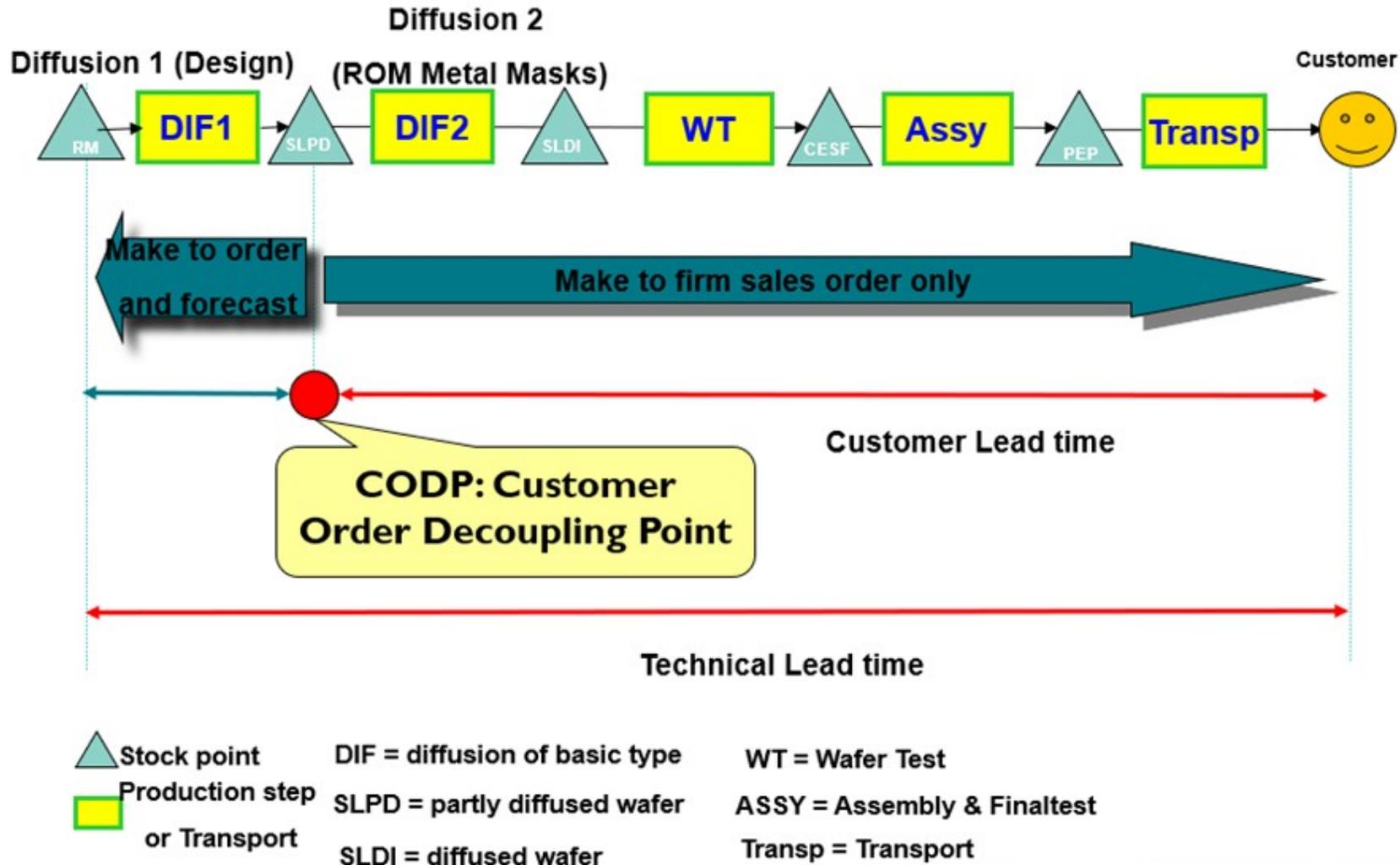
Kessels & Peeters, Philips 1999. Founded EU Project



IGC100T65T8RM
 Datasheet IGC100T65T8RM (Infineon)

Supply Chain Mode Example for Wafer Assembly

Supply Chain : Model Example



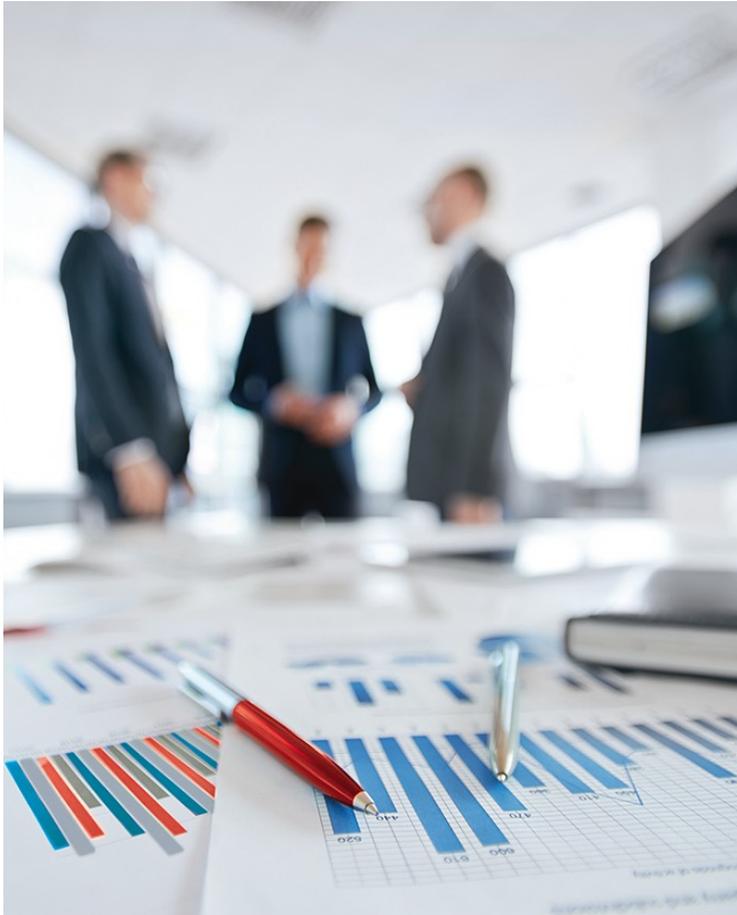
P-N type Silicon Semiconductor Manufacturing Process

Video Silicon Run I , II

<https://www.youtube.com/watch?v=3XTWXRj24GM>

<https://www.youtube.com/watch?v=hbxVzq2Nxp8>

Semiconductors devices, Diodes, MOSFET, IGBT (different types : gate planar, gate Trench...)



Power Electronics Applications and chip types

- Power semiconductors types

- a. Controlled High frequency, Low Power

MOSFET

- b. Controlled Medium Frequency, Medium Power

IGBT

- c. Controlled Slow Frequency, High Power

THY

- d. Uncontrolled Low Frequency

Diodes RECT (Bipolars in Semikron Danfoss!!! ☺)

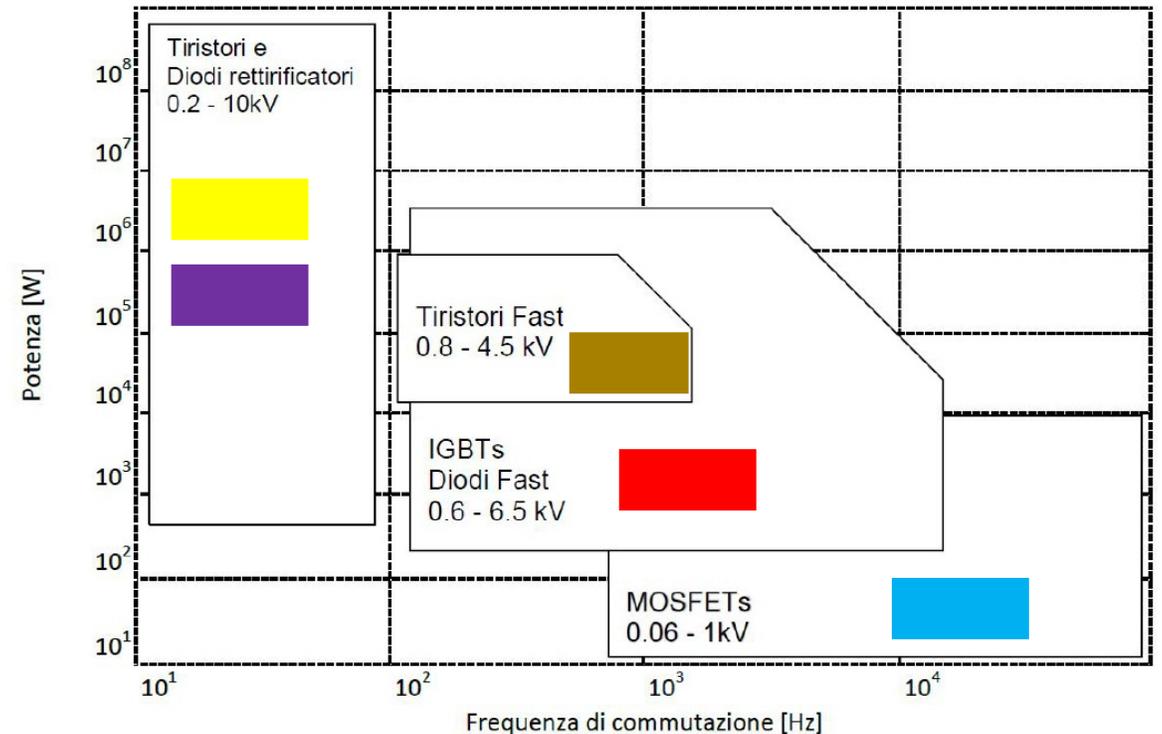
- e. Uncontrolled Medium-High Frequency

Fast Diode (CAL4F)

Dispositivo	Massima potenza Controllabile	Massima frequenza di commutazione
BJT	Media (700A, 2kV)	Media (10 kHz)
MOSFET	Bassa (100A, 1kV)	Alta (1 MHz)
GTO/Tristori	Alta (3kA, 5kV)	Lenta (1kHz)
IGBT	Media (1.5 kA, 2kV)	Media (50kHz)
MCT	Media (500A, 2kV)	Media (10kHz)

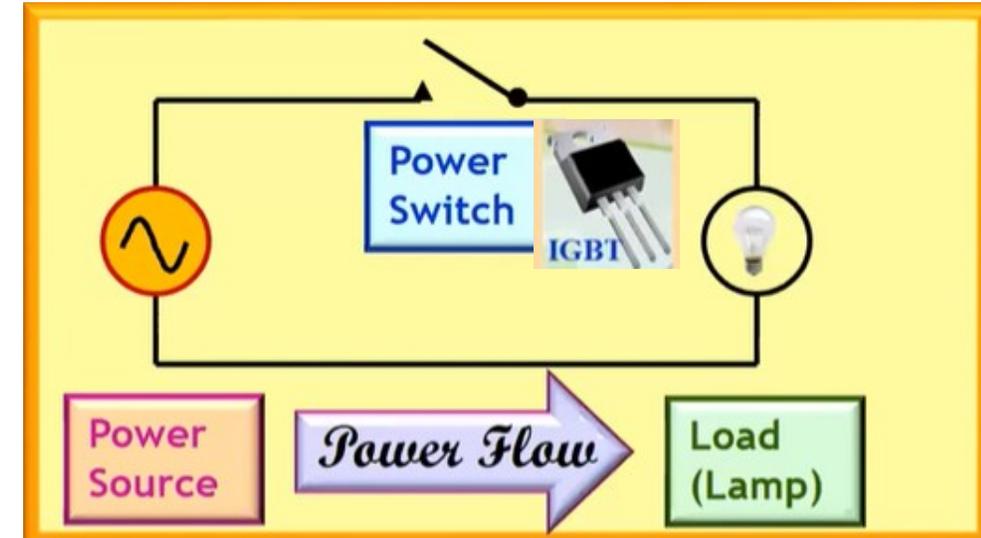
- Applications

- a. Solar, Energy Storage, UPS, Motor Drive ...



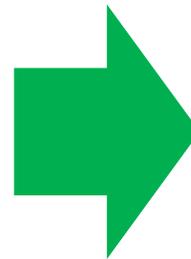
Caratteristiche ideali di un interruttore di Potenza

- Interruttori meccanici , lenti (1 sec ON/OFF)
- Interruttori elettronici : frequenza di commutazione anche 100.000 per secondo grazie a un controllo digitale della modulazione di accensione/spegnimento dell'interruttore a semiconduttore
- Per poterlo fare nel modo migliore possibile dobbiamo cercare la **MASSIMA EFFICIENZA** e la **MINIMA DISSIPAZIONE DI POTENZA** nell'interruttore



ALTA EFFICIENZA

- Minima tensione di «ON»
- Alta velocità di commutazione
- Alta densità di corrente di «ON»
- Robustezza
- Sopportare alte t°C

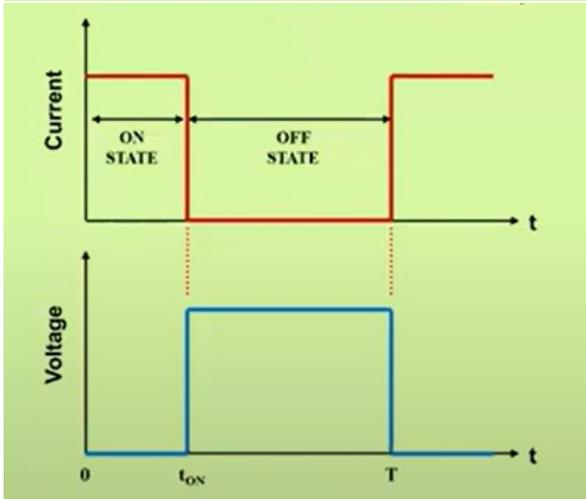
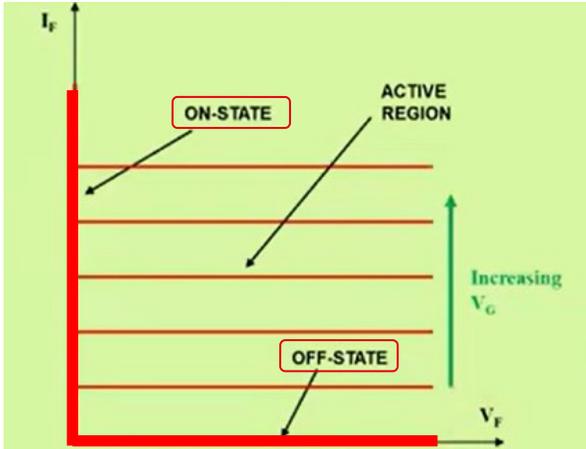


BASSA DISSIPAZIONE DI POTENZA NELLO SWITCH

- Bassa dissipazione statica
- Bassa dissipazione DINAMICA
- Stesse performance con chip più piccoli (costi ottimizzati)
- Affidabilità e alti MTBF

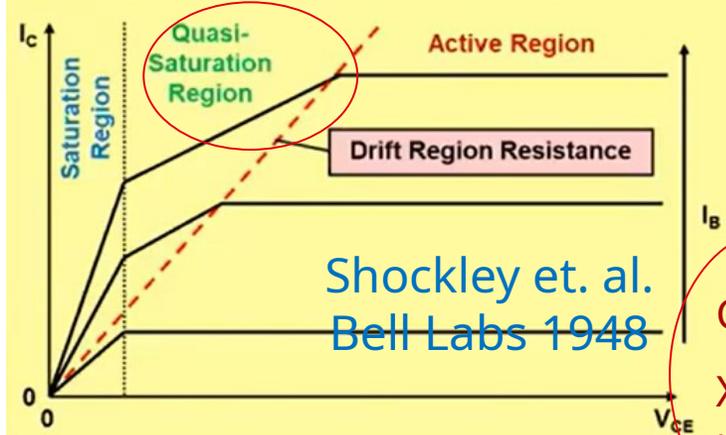
La sfida infinita degli interruttori di potenza

Interruttore IDEALE

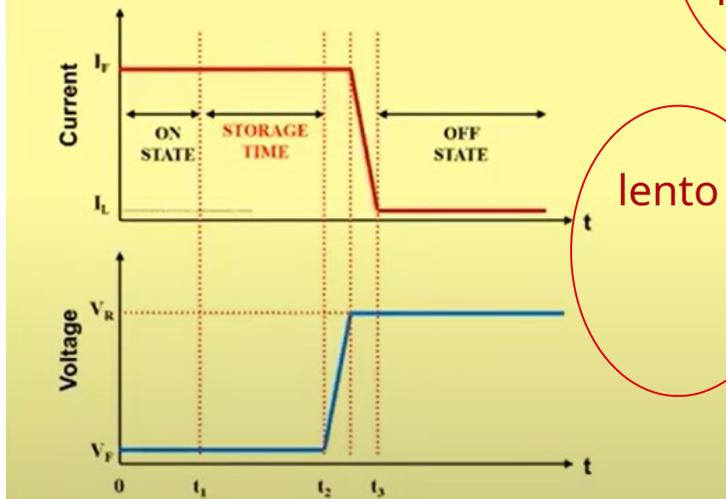


- $V_{drop}=0$
- Switch Loss= 0

Bipolar Transistor



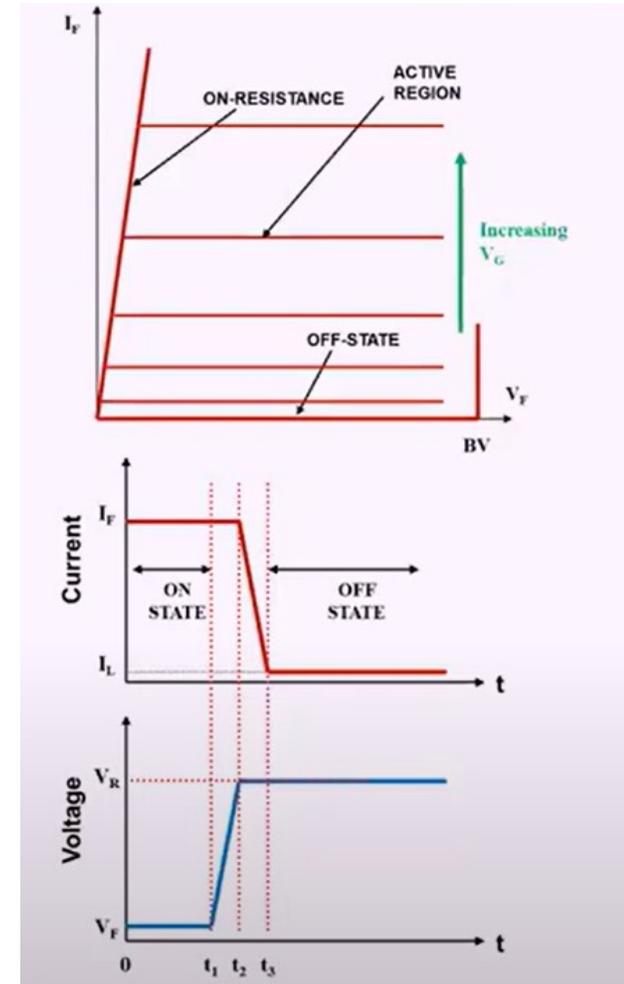
Quad
X 10
max



lento

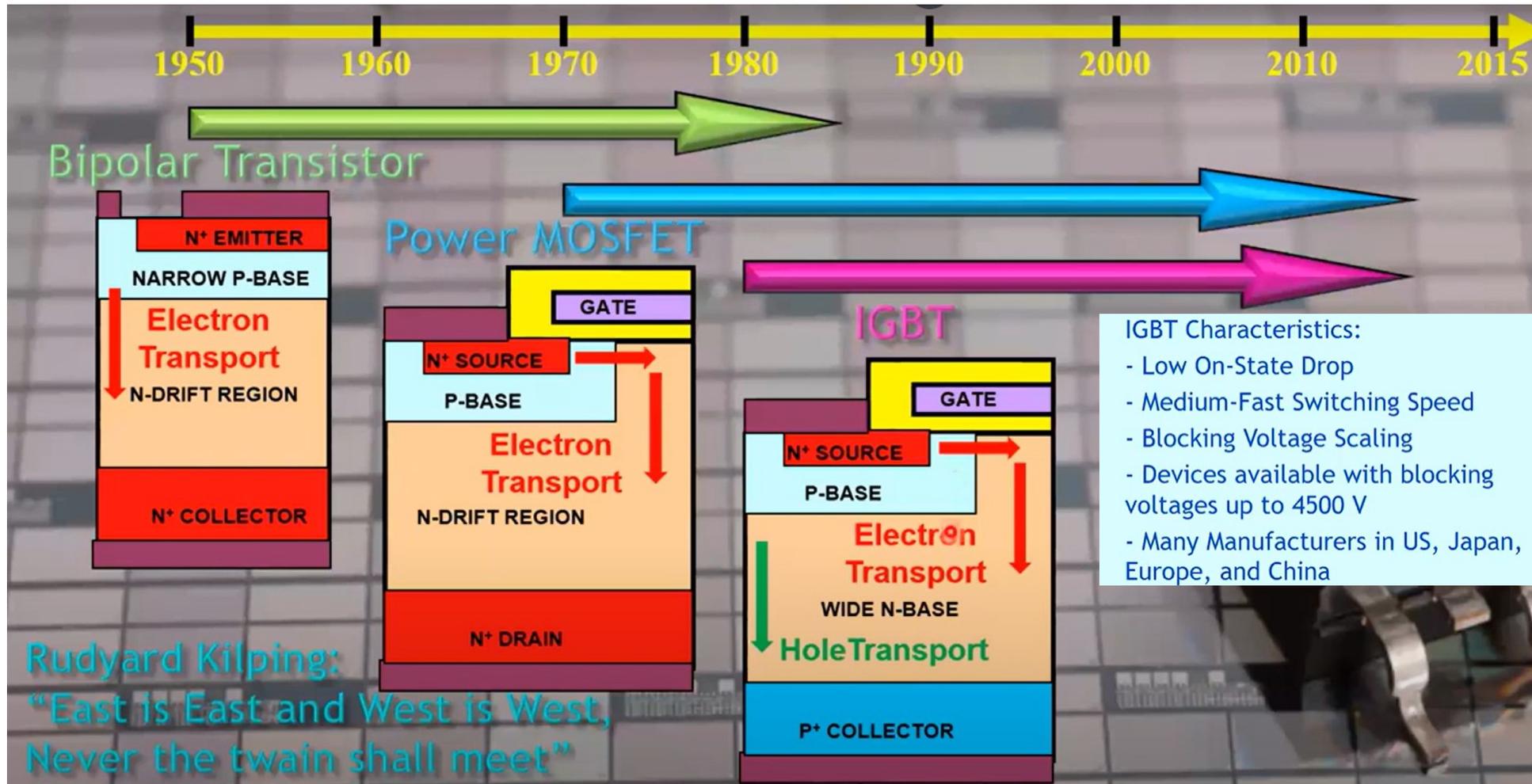
- Alta Quasi-Sat region
- Bassa freq di switch.

Power Mosfet



- Ron elevata
- Fast Switching speed.

Evoluzione degli interruttori di potenza a semiconduttore

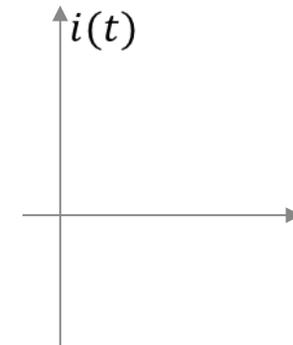
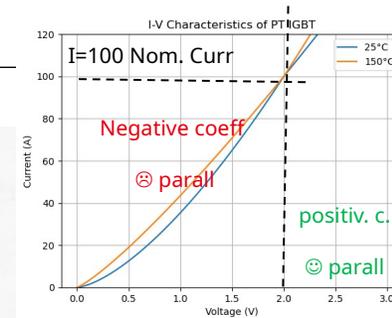
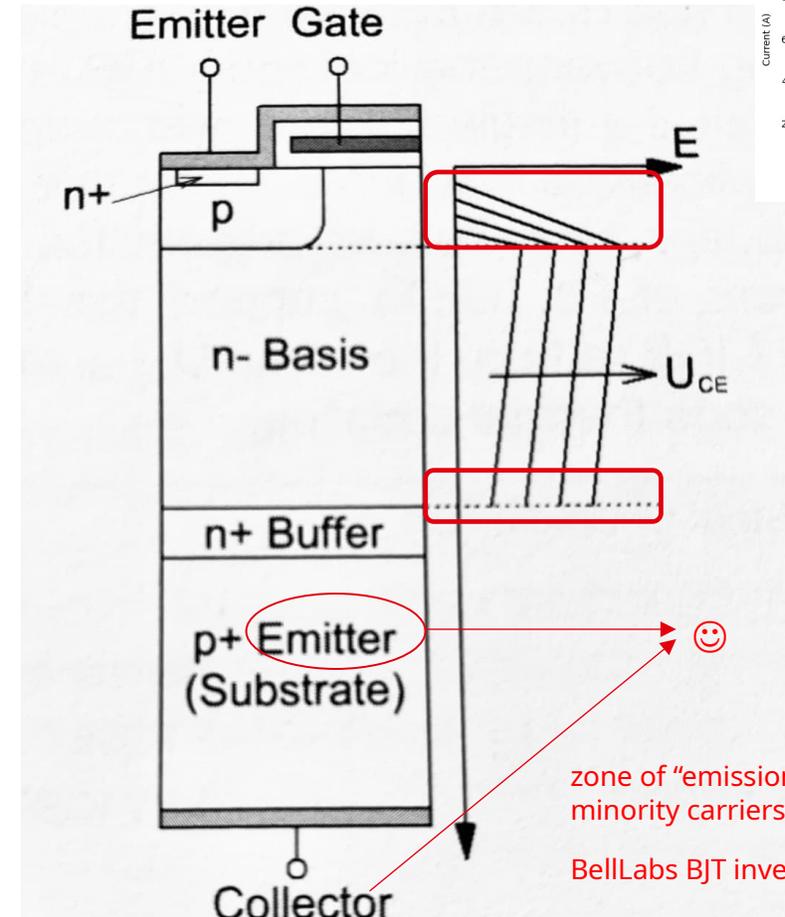


Rif: , J. Balyga *My Quest for the Ideal Power Switch*, NC State ECE Lecture 09/2023

<https://www.youtube.com/watch?v=mDnOyzMpu1s&t=22s>

IGBT PT (Gate structure: planar)

- First market available IGBT were PT.
- Let's imagine to be in blocking stage: the Electric field widens only in a shorten area p due the low doping n^- .
- Buffer : n^+ : block the field who decrease quickly assuring a Punch Trough without the need of big "basis" (reduce cost)
- Buffer n^+ layer has also a second function: some holes "emitted" by the p^+ layer can be recombined in the buffer: so contribution to "reduce the tail" in the turn off
- As we have seen in slide 64 $n_i(T) \propto T$ increase with temperature and this *decrease* the resistance of the semiconductor (negative coefficient):
- In IGBT normally the temperature coefficient from **negative** can become **positive** (* details in the next slide)
- **In PT IGBT the temperature coefficient remain negative for the whole Current range till the nominal Current!**



IGBT PT example of temperature coefficient

$$J_{n_x} = nq\mu_n \vec{E} + qD_n \frac{dn}{dx}$$

Current in semiconductors is due to drift + diffusion of $1\mu m$ where 2 V drop

Hypotesis: $n^+ = 5 \times 10^{18} cm^{-3}, n^- = 1 \times 10^{14} cm^{-3}, p = 1 \times 10^{17} cm^{-3}, p^+ = 1 \times 10^{18} cm^{-3}$

Data for silicon at $T = 25^\circ C = 298K, \mu_n = 1500 cm^2/V \cdot s, \mu_p = 450 cm^2/V \cdot s$

Data for silicon at $T = 150^\circ C = 423K, \mu_n = 1000 cm^2/V \cdot s, \mu_p = 300 cm^2/V \cdot s$: as you can see mobility DECREASE with T INCR.

Diffusion is provided by Einstein relation: **at 25 degrees**

$$D_n = \mu_n \frac{k_B T}{q} = 1500 \times \frac{1.38 \times 10^{-23} \cdot 298}{1.6 \times 10^{-19}} \approx 38.6 cm^2/s$$

$$D_p = \mu_p \frac{k_B T}{q} = 450 \times \frac{1.38 \times 10^{-23} \cdot 298}{1.6 \times 10^{-19}} \approx 11.6 cm^2/s$$

Diffusion coefficients at **150 degrees**

$$D_n = \mu_n \frac{k_B T}{q} = 1500 \times \frac{1.38 \times 10^{-23} \cdot 423}{1.6 \times 10^{-19}} \approx 36.5 cm^2/s$$

$$D_p = \mu_p \frac{k_B T}{q} = 450 \times \frac{1.38 \times 10^{-23} \cdot 423}{1.6 \times 10^{-19}} \approx 11.6 cm^2/s$$

Also diffusion decrease with temperature but "LESS" than drift.

In power semiconductors we can make the assumption that **current is almost totally due to the drift and not to diffusion (because high electric fields)**

So in forward conduction, the drift current due to "bipolars" effect (like p-i-n) IGBT is a bipolar devices can be written. We can also make the further assumption that un the drift region holes and electron are very similar ($n=p$) and so the total current can be simplified

$$I_{tot} \approx I_{drift} = qn\mu_n \frac{V_d A}{W_B} + qp\mu_p \frac{V_d A}{W_B} \approx qn_a(\mu_n + \mu_p) \frac{V_d A}{W_B}$$

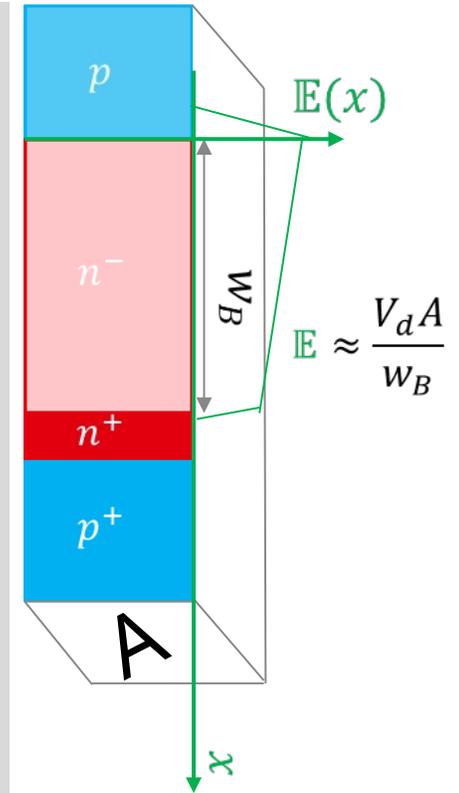
But the current can also be linked to the total injected charge in the junction drift region divided by the carrier average lifetime. The total charge in the volume is

$$I_{tot} = \frac{Q}{\tau} = qn_a W_B A \frac{1}{\tau}$$

By comparison of two equations we derive

$$V_d \approx \frac{W_B^2}{(\mu_n + \mu_p)\tau}$$

NOTE: $\mu(T), \tau(T)$ are function of temperature



IGBT PT example of temperature coefficient

$$J_{nx} = nq\mu_n \vec{E} + qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$V_d \approx \frac{W_B^2}{[\mu_n(T) + \mu_p(T)] \tau(T)}$$

$$I_{tot} = qn_a [\mu_n(T) + \mu_p(T)] \frac{V_d A}{W_B}$$

$\mu \downarrow \text{if } T \uparrow$
 $\tau \uparrow \text{ if } T \uparrow$

PT

$\mu(T), \tau(T)$ are function of temperature and in general $\frac{1}{\alpha} T$ because more interaction with carrier reduce mobility.

carrier life time increase with temperature (there is production of more carrier so they survive for long): $\tau \propto T$

So the Voltage is divided by two quantity one that decrease (mobility) with temperature one that increase (life time) with temperature.

The more carrier we have in the drift region the more happen the effect of conductivity modulation as we have already observed

$R_{ON} \rightarrow$ decrease if $n, p \uparrow$ so current increase.

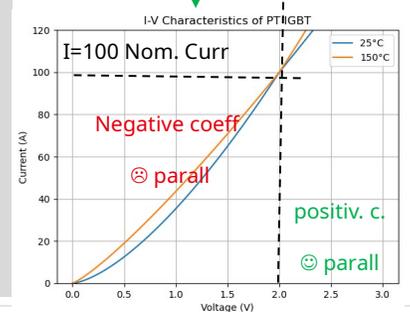
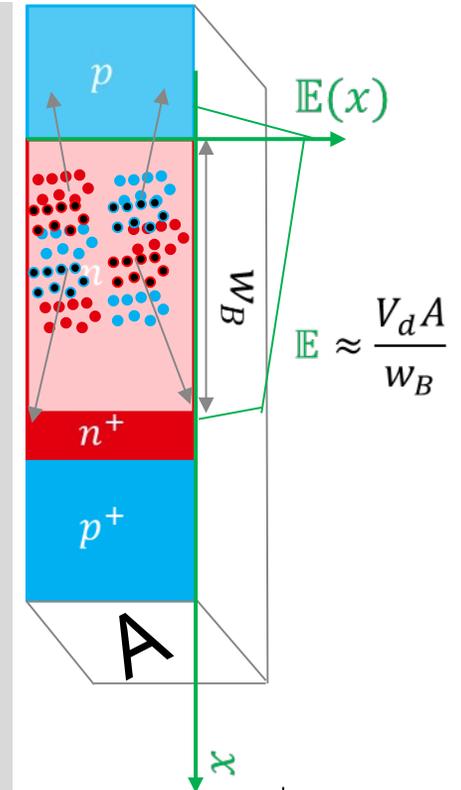
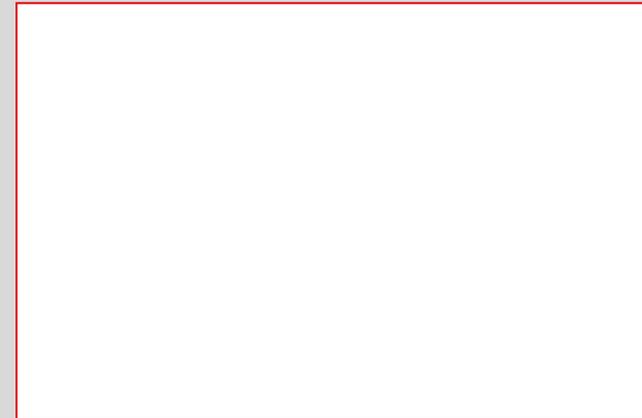
BUT current is also linked to mobility μ which decrease with temperature. It seems these two effect are perfectly compensated so what is the dependency of $V_d(T)$ as temperature?

In general **for PT device the effect of the life time is predominant which cause a negative temperature coefficient over the whole current range till nominal current**

This can be explained in this way.

In a PUNCH trough IGB the concentration of carriers is more "dense", the carrier does not have a lot of thermal energy but the strong density facilitate the recombination process. This means even at ambient temperature 25°C there is strong recombination SO the life time τ is LOW

BUT as the Temperature increase the carriers acquire more kinetic energy and go faster, and this DECREASE the probability of recombination. This means the life time increase a lot! And this is more evident in PT device where the density of carriers is quite "High"



IGBT NPT (Gate structure: planar)

Drift region n^- relatively large (because should contain the whole field)

Temperature coefficient from negative to positive **at relatively low current** → **easier to parallelize**

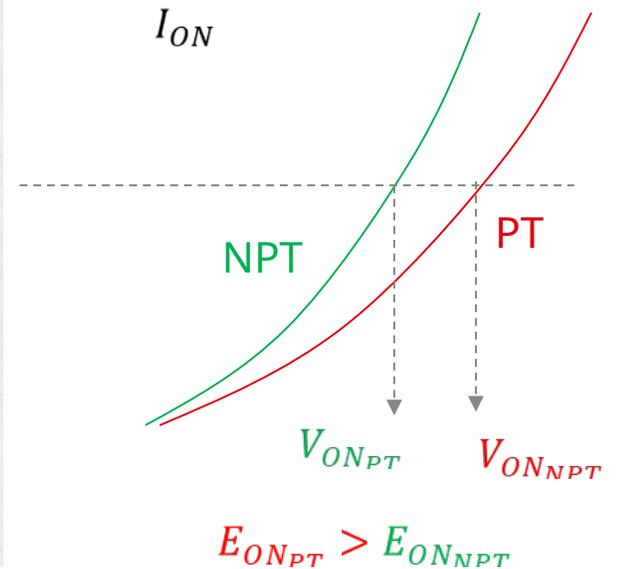
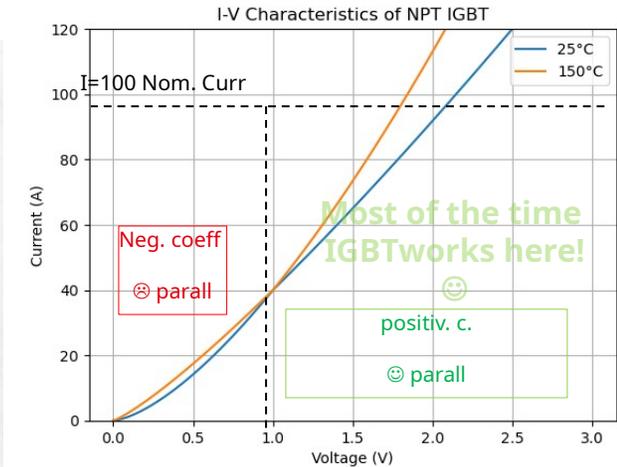
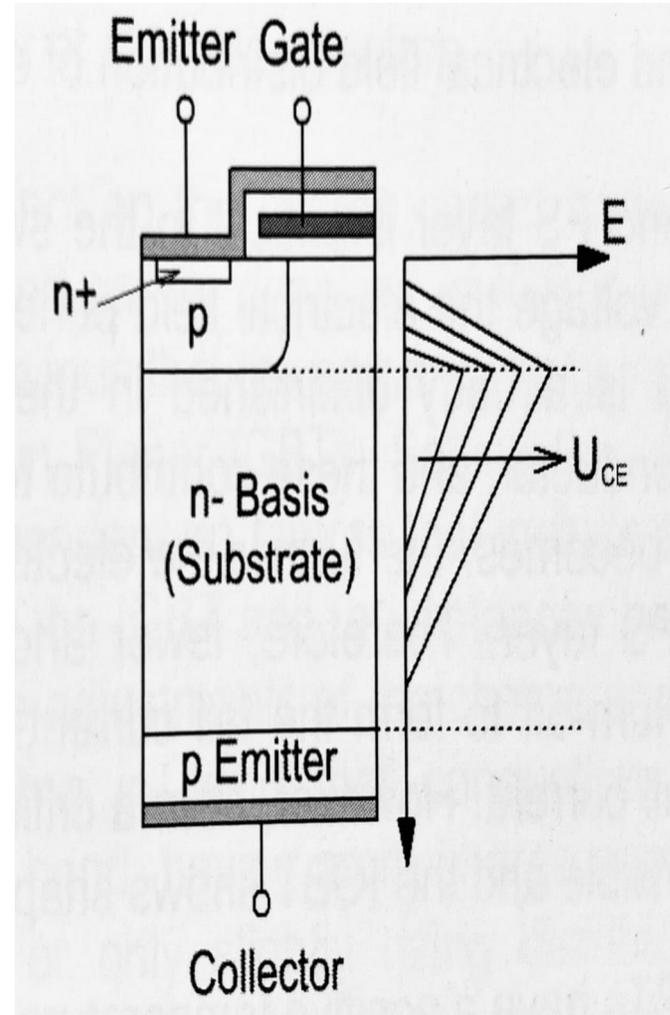
- This is due to the life time τ relatively high at room temperature and remain constant (because n^- is longer, is almost intrinsic and recombination happen less frequent!)
- This means that in the previous formula the drift voltage (V_d) practically is dominated by τ but mobility at relatively low current (at low temperature still negative coefficient but inversion happen before) which we know is inverse proportional to temperature

$$V_d \approx \frac{W_B^2}{[\mu_n(T) + \mu_p(T)] \tau(T)}$$

$\mu \downarrow$ if $T \uparrow$
 $\tau(T) \uparrow$: low T

NPT

- So parallelization here is OK !**
- Drawback effect is that mobility** is increased so temperature coefficient is positive but **CONDUCTION LOSSES INCREASE** (you can parallelize easier also at lower current, but **ON-State consumption is higher**)



IGBT Field Stop (gate structure planar)

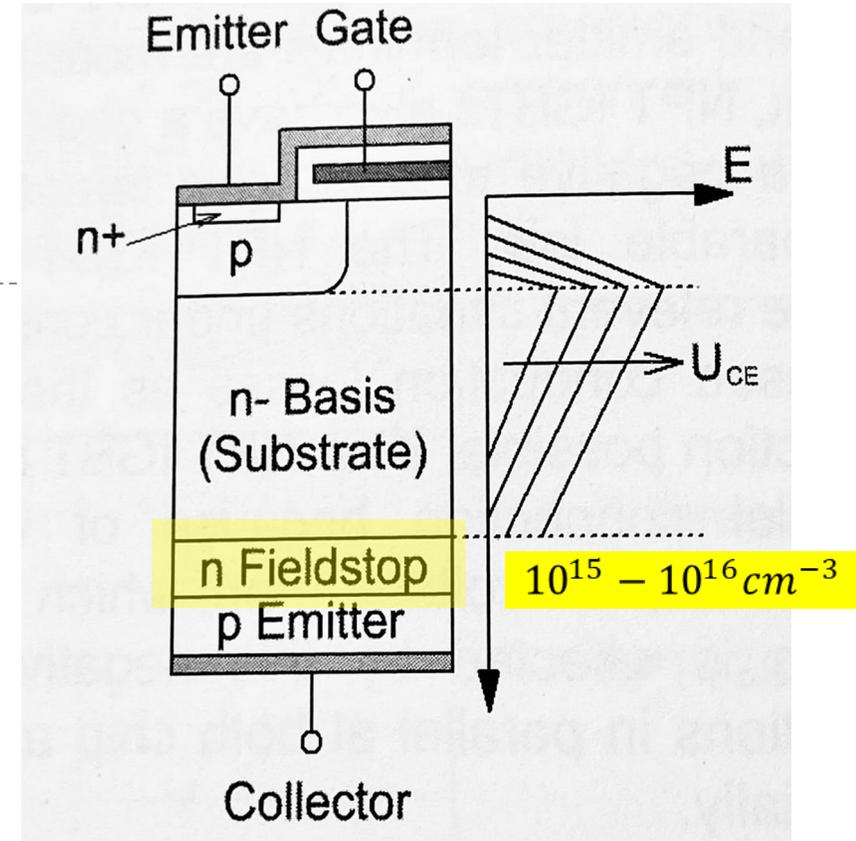
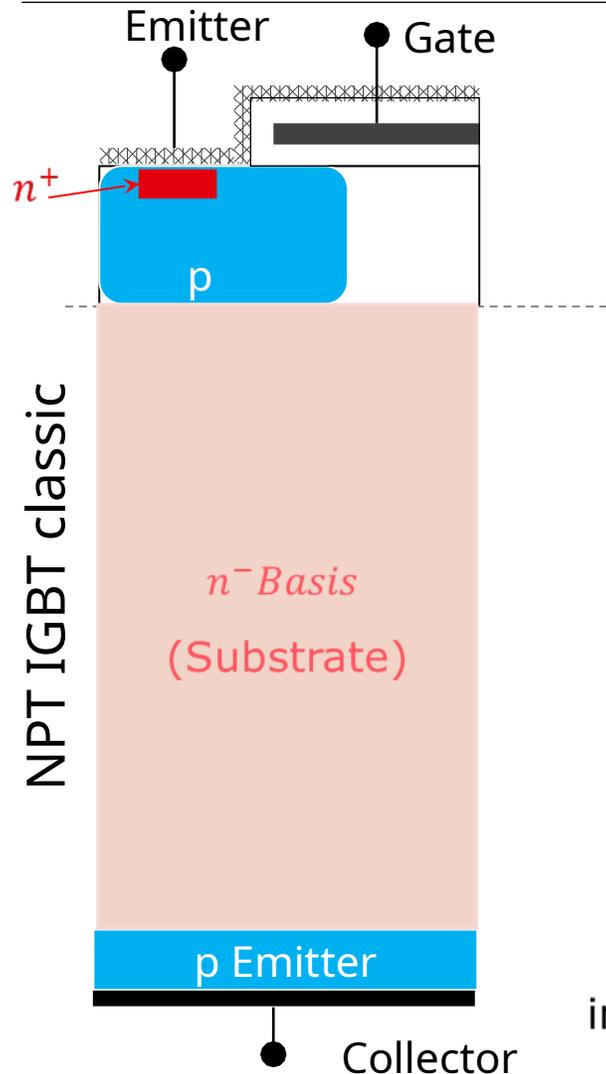
Particular sub-design of IGBT NPT

Goal of this design is to further reduce the ON-losses (as seen previously are high on simply NPT).

"n" Fieldstop layer stop the field like in the PT concept with the buffer but still maintaining the NPT advantages (as the positive temperature coefficient at higher application range) but as the "n-" is reduced in sizes with respect the previous design, there is also an improvement in ON-losses!

Field stop medium doped with respect "Buffer" otherwise is PT!

Maintain positive T coeff. for wide current range



in NPT the "Buffer" n^+ is much more heavily doped

IGBT Trench 1/2

Problems in Planar IGBTs...

Planar Gate structure of IGBT :

- Gate Positive \rightarrow n+ to n- channel inside p is created (yellow).
- Current flow in the channel from collector + to emitter - trough the drift region n.
- Because the E- C+ J_2 region is blocked, SCR (space charge region: *zona di svuotamento*) formed which "Pinch off" the current channel in drift region.
- This is indicated by the R_2 of the embedded BJT Q2 of the schematic model

R_2 drawbacks

- Conduction losses higher (pinch off effect)
- Carrier concentration not homogeneous
- Latch up effect (if i_{b2} is greater of certain values it could be $v_{BEQ2} > V_Y \rightarrow Q2$ permanently ON! Cannot switch off Q2!)

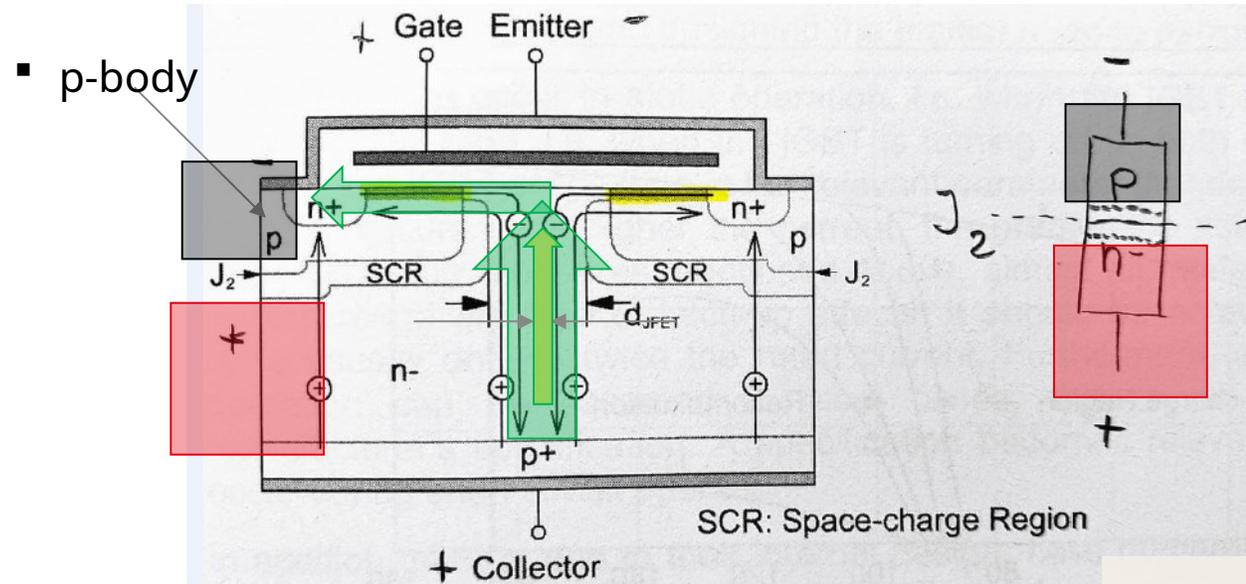
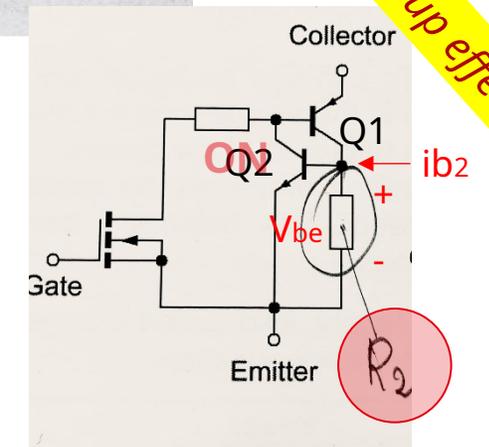


Figura 1.10: Effetto JFET (pinch off di canale con riduzione di conduttività) tra due celle adiacenti di un IGBT con struttura di gate planare (non in scala)



What can be the geometrical structure of Gate which allows carrier concentration as much homogeneous as possible, reduce ON losses and avoid latch up risk?

IGBT Trench 2/2 (Gate structure TRENCH! (affossato))

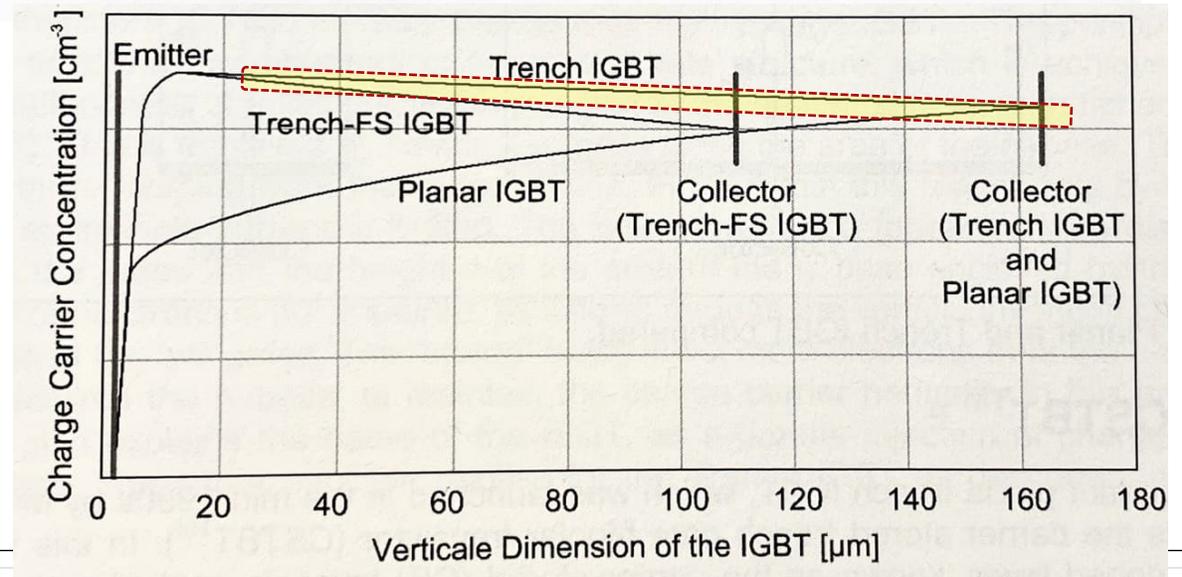
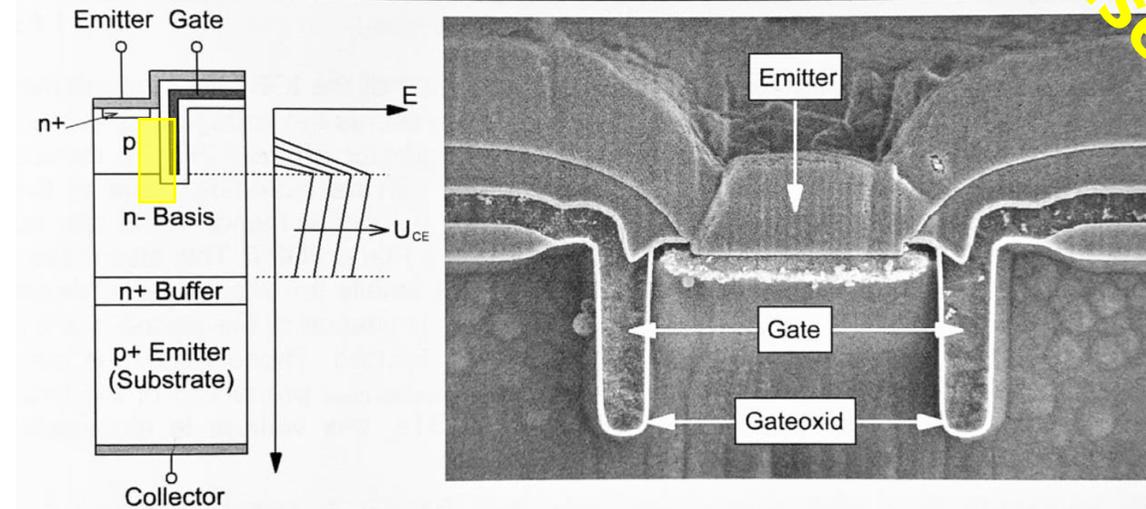
Most used in SDI

- To overcome planar gate drawbacks linked to conduction losses Trench gate structure developed (first in 1993)
- The trench gate **make** the **yellow** channel between n+ and n- inside p **vertical** which is **not influenced by the pinch off**
- This make possible the concentration charge carriers uniform from collector to emitter without degrading the switch off performances
- As inversion channel is vertical greater carrier injection density (and lower ON losses)

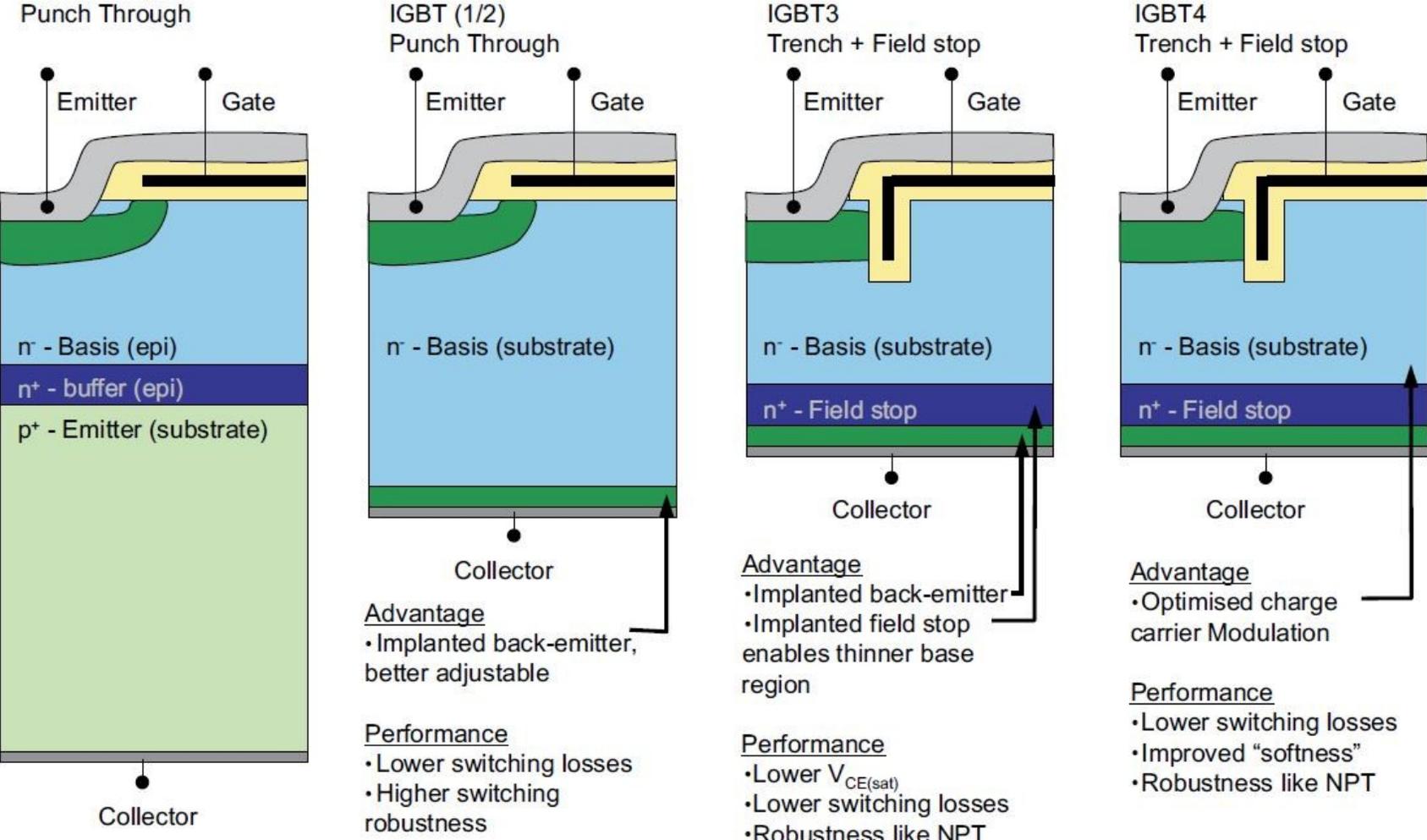
drawback: from diagram we see that Trench IGBT shows higher carrier concentration over the whole size of the device :

More carriers means more time to empty (turn off current tail).

Trade off : flat concentration proven to be ~~good compromise between static and dynamic losses of Trench IGBT~~



Summary of IGBT technology concept and properties



Technology limits (planar techno!!)

CMOS060 (65 *nm*) (TSMC 2005)

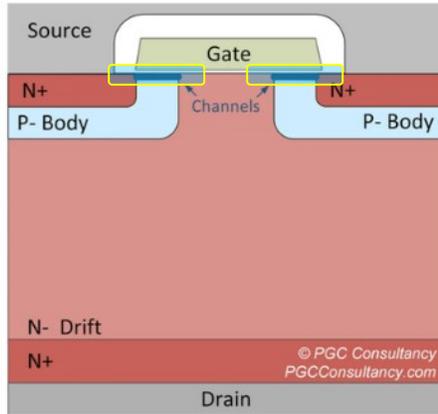
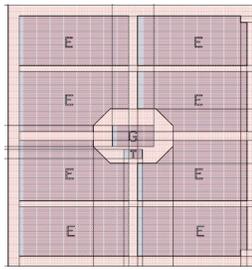
CMOS016 (16 *nm*) (TSMC 2015)

CMOS **A** 14 (1,4 *nm*) : 2028?

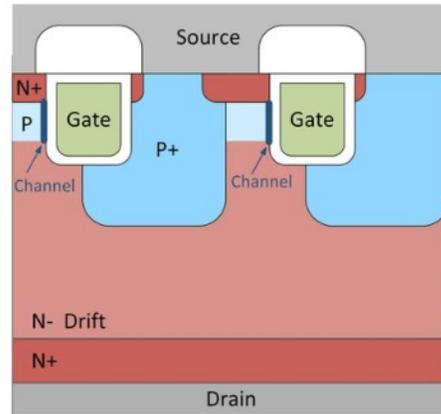
A is for Angstrom! Silicon Atom radius is 1.1 Å TSMC Quantum Computing!!??



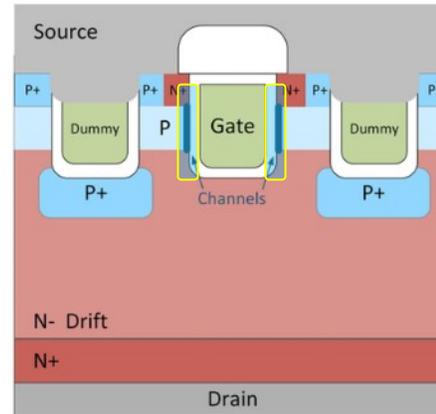
Technology (Power Semiconductors)



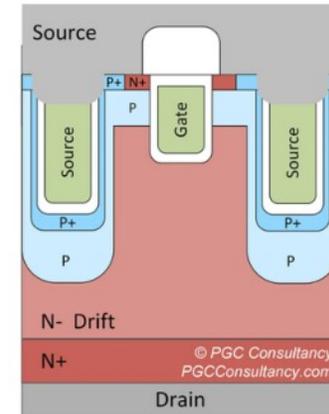
Common Planar MOSFET



Infineon
Trench MOSFET



Rohm Gen3
Trench MOSFET

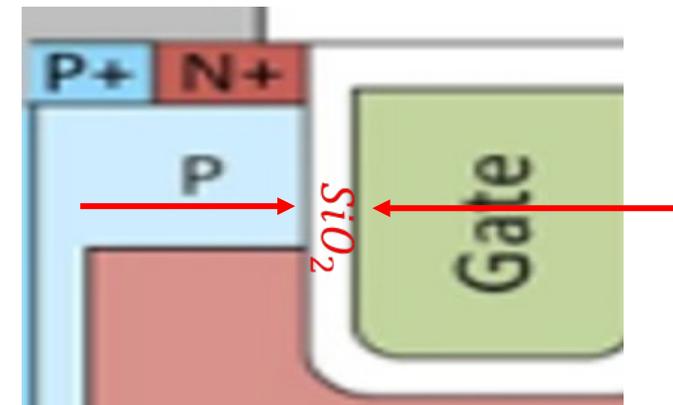


Rohm Gen4
Trench MOSFET

bottle-neck factor (in general for all semiconductors) is SiO_2 dioxide: in **power electronics** is between 50 – 100 nm

So **channel** cannot be shorter than 100nm – 200 nm

In Power semiconductors the “bulk” approximations is still valid and naturally there is no need to reduce sizes! There is need for “the same size” to grant more power!





Riferimenti per la fisica quantistica e dei semiconduttori

- [1] *Introduzione alla fisica dei Quanti*, Giovanni Battimelli, Seminario tenuto al liceo Classico Mamiani di Roma il 20/03/2014. disponibili su YouTube <https://youtu.be/ky-55xzuTeQ?si=m26p2y13VZK0uGPQ>
 - [2] *Fisica Matematica Logica*, Valerio Pattaro - (link consultato il 09/11/2024), <https://www.youtube.com/@ValerioPattaro>
 - [3] C. Mencuccini, V. Silvestrini, *Fisica II Elettromagnetismo - Ottica*, Liguori Editore, Terza edizione Italiana: 1998
 - [4] C. Mencuccini, V. Silvestrini, *Fisica I Meccanica Termodinamica*, Liguori Editore, Seconda edizione Italiana: 1987
 - [5] Mazzoldi P., Nigro M., Voci C., *Fisica, Elettromagnetismo e Onde*, EdiSES, Terza Edizione Italiana: 2021
 - [6] R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *La Fisica di Feynman, volume 3 Meccanica Quantistica*, Zanichelli seconda edizione 2007.
 - [7] J. Milman, A. Gravel, *Microelettronica*, McGraw-Hill, 1994 (edizione italiana)
 - [8] R. Muller, T. Kamis, *Dispositivi Elettronici nei Circuiti Integrati*, Bollati Boringhieri, 1993
 - [9] G. Vaccaro, A. Carfagna, L. Piccolella, *Lezioni di geometria e algebra lineare* - Zanichelli 1999
 - [10] Papoulis, A. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes* - Third International Edition - McGraw Hill 19991
 - [11] Iannaccone, Giuseppe, Corso di Elettronica di Potenza, Università di Pisa. A.A. 2012-2020, disponibili su YouTube
 - [12] N. Mohan, T.M. Undeland, W. P. Robbins, *Power Electronics, Converters, Applications and Design*, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2003
 - [13] Neil W. Ashcroft, N. David Mermin *Solid State Physics* - Harcourt inc. 1976. Versione consultata in francese: *Physique des solides*, EDP Science, 2002.
 - [14] Luigi Palumbo, Le Origini della Teoria Quantistica, *Appunti del corso di Fisica Moderna 2017-2018, Lezione 4*, disponibile on line all'indirizzo <https://www.sbai.uniroma1.it/sites/default/files/LEZIONE%20N.4%20-%20CONDUZIONE%20NEI%20SOLIDI.pdf>
 - [15] Sze S.M., Kwok K.N.G. *Physics of Semiconductor Devices*, 2007, John Wiley & Sons, Inc.
 - [16] Sze Simon M. *Dispositivi a Semiconduttore Comportamento fisico e Tecnologia*, Hoepli 1991.
 - [17] Ledermann Leon, Hill Christopher T. *Fisica quantistica per poeti*, 2013, Bollati Boringhieri (ed. or. 2011 *Quantum Physics for Poets*)
 - [18] Peter W. Atkins, *Chimica Fisica, terza edizione condotta sulla quinta edizione inglese*, Zanichelli, 1997
 - [19] *Classic Papers in Physics*, Hans Kangro editor, 1972
 - [20] Segré Emilio, *Personaggi e scoperte della fisica contemporanea*, Mondadori 1996
 - [21] Segré Emilio, *Personaggi e scoperte della fisica classica*, Mondadori 1996.
 - [22] Fleisch D. *Guida allo studio dell'equazione di Schrodinger*, Editori Riuniti 2021
 - [23] Pierret F. Robert, *Advanced Semiconductor (vol VI) Fundamentals, 2nd edition*, Prentice Hall 2003
- <https://nanohub.org/courses/sfun> (Mark Lundstrom, Perdue University, ultimo accesso al link : 16/03/2025)

Riferimenti per la parte di elettronica di potenza

- [1] Iannaccone, Giuseppe, Corso di Elettronica di Potenza, Università di Pisa. A.A. 2012-2020, disponibili su YouTube
- [2] A. Volke, M. Hornkamp, *IGBT Modules Technologies, driver and applications*, Infineon Technologies AG, Third edition , 2017
- [3] A. Wintrich, U. Nicolai, W. Tursky, T. Reimann, *Application Manual Power Semiconductors*, SEMIKRON International GmbH, 2nd revised edition 2015
- [4] J. Lutz, H. Schlangenotto, U. Scheuermann, R. De Doncker, *Semiconductor Power Devices Physics, Characteristics, Reliability*, Springer, 2011
- [5] N. Mohan, T.M. Undeland, W. P. Robbins, *Power Electronics, Converters, Applications and Design*, Third Edition, John wiley & Sons, Inc, 2003
- [6] J. P. Uyemura, *Fundamentals of MOS Digital Integrated Circuits*, Addison-Wesley Publishing Company, 1998
- [7] SEMISEL, *SEMIKRON Power Electronic Simulation Tool*, <https://www.semikron-danfoss.com/service-support/semisel-simulation.html>, SEMIKRON-DANFOSS
- [8] PSIM 2021A, *Simulation environment for power conversion and motor control*, <https://powersimtech.com/products/psim/capabilities-applications>, POWERSIM
- [9] N. H. E. Weste, K. Eshragan, *Principle of CMOS VLSI Design*, 2nd edition 1993
- [10] C. Mencuccini, V. Silvestrini, *Fisica II Elettromagnetismo - Ottica*, Liguori Editore, 1998
- [11] J. Milman, A. Gravel, *Microelettronica*, McGraw-Hill, 1994 (edizione italiana)
- [12] M. Santoro, M. Hansmann, M. Muscolino, *SEMIx5 Technical Explanations, Revision 03, 23-06-2021* <https://www.semikron-danfoss.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-technical-explanation-semix5-en-2021-06-23-rev-03.pdf>
- [13] <https://youtu.be/bmsWgA8bxdA>
- [14] T. Kioto, J.A. Cooper, *Fundamentals of Silicon Carbide Technology*, John Wiley & Sons, IEEE PRESS, 2014
- [15] R. Muller, T. Kamis, *Dispositivi Elettronici nei Circuiti Integrati*, Bollati Boringhieri, 1993
- [16] B. Jayant Baliga, *The IGBT Device Physics, Design and Applications of the Insulated Gate Bipolar Transistor*, Elsevier, 2015
- [17] B.J. Baliga, *Semiconductors for high voltage vertical channel field effect transistors*, J. Appl. Phys. 53 (1982) 1759-1764
- [18] <https://www.soitec.com/en/products/smart-cut>
- [19] P. Beckedahl, J. Rudzki, M. Spang, *Trends in Power Module Packaging and Impact of Wide Bandgap Semiconductors*, SEMIKRON-DANFOSS, ETG 2023

Riferimenti "classici" per i dispositivi e moduli di potenza (IGBT, MOS,...)



Matteo Santoro

Commissione Elettronica e Microelettronica Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

matteos72@gmail.com

Product Manager Semikron Danfoss

matteo.santoro@semikron-danfoss.com

Mobile: +39 333 1285194

