DISPOSITIVI ELETTRONICI – prof. Giovanni Pennelli

⇒ Lezione del 27/02/12 (prof. Andrea Nannini) ①

- Docenti del corso:
  - Andrea NANNINI (12 ore)
  - Giovanni PENNELLI (66 ore) (titolare del corso)
  - Massimo PIOTTO (12 ore)

tot 90 ore

MASTER COPY
Tel. 388/9837745

N.B.: Il prof. Nannini mette il materiale delle sue lezioni online

- INTRODUZIONE alla ELETTRONICA INTEGRATA

Materiali:
- SILICIO (è alla base di tutto!)
- AsGa (viene usato ormai solo per l'optoelettronica)
- fili di saldatura e piste in alluminio (ultimamente anche di rame)
- Digital Light Processors (Texas Instruments): è usato per proiettori e specchi mobili comandati a CMOS
- altri materiali come As, P, Sb droganti tipo n
- B drogante p

Foto:
→ progetto (layout) di un MEMS (micro-electro-mechanical-systems)
→ accelerometro
→ cella di memoria RAM
→ monofilo di silicio

materiali → MONOCRISTALLINI
materiali → POLICRISTALLINI
materiali → AMORFI

mobilità μ crescente = resistività ρ decrescente

- EQUAZIONI FONDAMENTALI

- legge di Gauss: $\int_S \vec{D}\cdot\hat{n}\,dS = q$ $\qquad \vec{\nabla}\cdot\vec{D} = \rho$

$\vec{D} = \varepsilon_0\varepsilon_r\vec{E} \Rightarrow \vec{\nabla}\cdot\vec{D} = \frac{\rho}{\varepsilon_0\varepsilon_r}$ e $\int_S \vec{E}\cdot\hat{n}\,dS = \frac{q}{\varepsilon_0\varepsilon_r}$

- $\vec{E} = -\vec{\nabla}V$

- eq. di Poisson: $\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\varepsilon_0\varepsilon_r}$

monodimensionale (come tutti i modelli di questo corso): $\frac{d^2V(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon_0\varepsilon_r}$

— · — · — · — · —

⇒ Lezione del 28/02/2012

- Materiale del corso:
  - → dispense dei Diligenti (PDF sul sito di Pennelli)
  - → sito del corso: . phobos ict unipi it/~pennelli
  - → altri testi consigliati:
    - SZE, "Physics of Semiconductor Devices"
    - Müller, Kamins, "Device Electronics for Integrated Circuits"
    - Streetman, "Solid State Electronic Devices"
    - Ghione, ... (non buono)

- Ricevimento: presso il dipartimento, meglio il venerdì

- Esame: 9 crediti, scritto + orale
  soglia allo scritto 18/30, 17 ammesso con riserva
  scritto: 3 esercizi, 10 punti ciascuno
  orale: voto finale media S+O.

N.B.: Bisogna iscriversi all'esame!

MASTER COPY
Tel. 388/9837745

- Programma del corso:

  → Fisica dei dispositivi (moderni): l'elettronica si evolve non per miglioramenti circuitali, ma per perfezionamento ed evoluzione dei dispositivi, perciò parleremo di quelli in uso ora.

  → Fisica dei semiconduttori (Si): sarà una premessa al corso.

  → Giunzioni PN

  → Transistor BIPOLARI (BJT)

  → Transistor MOS

  → modelli per applicazioni circuitali

- CIRCUITO INTEGRATO: realizzazione di un circuito con dispositivi elementari opportunamente connessi in un'unica piastrina di silicio.

- FISICA dei SEMICONDUTTORI (SCD)

Esistono 3 tipi di materiali:

- CONDUTTORI, usati per le connessioni, $\sigma \simeq 10^5\ \Omega^{-1}\,cm^{-1}$
- SEMICONDUTTORI, usati per i dispositivi, $\sigma \simeq 10^0\ \Omega^{-1}\,cm^{-1}$
- ISOLANTI, usati per dividere connessioni e dispositivi, $\sigma \simeq 10^{-6}/10^{-7}\ \Omega^{-1}\,cm^{-1}$

MECCANICA QUANTISTICA: nuova interpretazione della fisica, non più deterministica ma probabilistica.

Negli anni '30 viene formulato il principio di indeterminazione di Heisenberg, a cui sottostanno tutte le particelle subatomiche:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \; 6{,}626 \cdot 10^{-34} \; J \cdot s$$

MASTER COPY

Tel. 388/9837745

Non si può dire dove e con quale velocità si muove la particella, si può solo dare una distribuzione di probabilità.

- TEORIA ONDULATORIA delle PARTICELLE: un elettrone si rappresenta come sovrapposizione di onde piane

$$-\frac{\hbar^2}{2m_e}\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V(\psi) = E\psi \qquad \text{(eq. di Schrödinger)}$$

V: potenziale; E: energia dell'elettrone

$$E = \frac{1}{2} m_e v^2 + U_{pot}$$

La soluzione di questa equazione differenziale (che è l'equazione dell'onda) è $\psi(x)$, che non ha un significato fisico specifico; tuttavia $|\psi(x)|^2$ è la sua densità di probabilità, cioè rappresenta la probabilità di trovarsi tra x e $x+dx$.

$$p(a<x<b) = \int_a^b |\psi(x)|^2 dx \qquad \text{con } P(-\infty, +\infty) = 1 \quad \text{(condiz. al contorno)}$$

ELETTRONE LIBERO: è un elettrone messo in una regione dove $V(x) = \emptyset$ ovunque.

L'equazione in caso di elettrone libero diventa:

$$-\frac{\hbar^2}{2m_e}\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = E\psi$$

la cui soluzione è $\psi = A e^{\alpha_1 x} + B e^{\alpha_2 x}$ (dove A e B dipendono dalle condizioni al contorno)

Sostituendo:

$$-\frac{\hbar^2}{2m_0}\alpha^2 = E \quad \Rightarrow \quad \alpha^2 = -\frac{2m_0E}{\hbar^2}$$

se $E \neq 0$ ho $\alpha = \pm j\sqrt{\frac{2m_0E}{\hbar^2}}$

Forma generale: $\psi(x) = Ae^{j\sqrt{\frac{2m_0E}{\hbar^2}}x} + Be^{-j\sqrt{\frac{2m_0E}{\hbar^2}}x}$

$$K = \sqrt{\frac{2m_0E}{\hbar^2}} = [m^{-1}] = \text{vettore d'onda} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\psi(x) = Ae^{jKx} + Be^{-jKx}$$

Si può ricavare la lunghezza d'onda dell'elettrone e sviluppare in serie con Fourier e trovarmi il pacchetto d'onda.

MASTER COPY

Tel. 388/9837745

Per la meccanica classica: $m_0 = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ Kg

$$E = \frac{1}{2}m_0v^2 = \frac{p^2}{2m_0}$$

In termini quantistici: $E = \frac{\hbar^2K^2}{2m_0}$

Da qui si deduce che $p = \hbar K = \frac{h}{\lambda}$

- Applicazione tipica di base nel caso $\vec{E} \neq 0$: una buca di potenziale infinita (caso monodimensionale)

$$V(x) = \begin{cases} 0 & x \in (0,a) \quad (a \text{ nell'ordine dei nm}) \\ +\infty & \text{altrove} \end{cases}$$

L'equazione diventa: $\begin{cases} -\frac{\hbar^2}{2m_0}\psi''(x) + 0 = E\psi(x) & x \in (0,a) \\ \psi(x) = 0 & \text{altrove} \end{cases}$

La condizione al contorno ci dice che $\int_0^a |\psi|^2 dx = 1$.

Per $x \in (0,a)$ si avrà $\psi(x) = Ae^{jKx} + Be^{-jKx}$ con $K = \sqrt{\frac{2m_0E}{\hbar^2}}$. Applicando le condizioni al contorno si trova che: $\psi(0) = A + B = 0 \Rightarrow B = -A$ e $\psi(a) = 0 = Ae^{jKa} - Ae^{-jKa}$.