

Fenomenologi Transpor Elektron pada Struktur Memori Kuantum

Tri Fatirahman (10204001)

Program Studi Fisika, FMIPA ITB

Jl. Ganesa 10, Bandung

Outline

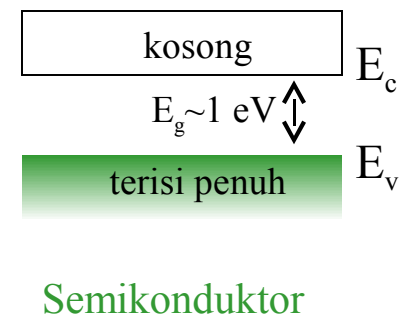
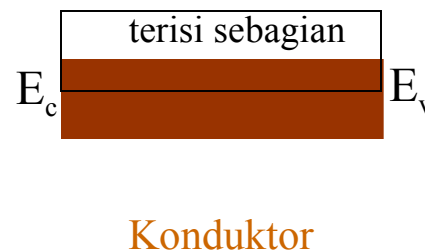
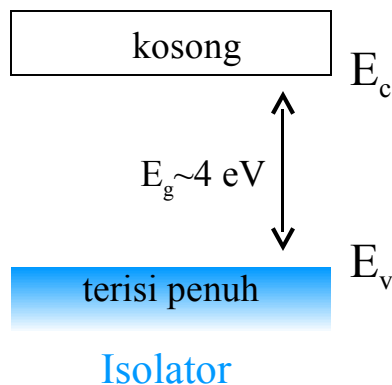
- **Pendahuluan**
- **Keadaan Elektron dalam Struktur Kuantum**
 - **Struktur Bulk**
 - **Struktur Quantum Well**
 - **Struktur Quantum Wire**
 - **Struktur Quantum Dot**
- **Devais**
 - **Metal-Oxide-Semiconductor (MOS)**
 - **MOSFET, Floating Gate MOSFET**
 - **Devais Memori Quantum Dot**

Pendahuluan

Material zat padat :

- **Isolator** : konduktivitas 10^{-18} - 10^{-8} S/cm, bandgap > 3 eV
- **Konduktor** : konduktivitas 10^4 - 10^6 S/cm, terdapat banyak elektron bebas pada pita konduksi
- **Semikonduktor** : konduktivitas 10^{-8} - 10^4 S/cm, bandgap $0.6 \sim 3$ eV

(Sze, S. M., *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, New York: John Wiley, 1985.)



Pendahuluan

Devais elektronik → teknologi semikonduktor

Karena :

- **sifat semikonduktor dapat diatur dengan adanya potensial bias, medan listrik, penyinaran, suhu**
- **pembawa muatan dapat diatur dengan doping**
 - * Tipe-*p* : pembawa muatan positif (hole)
 - * Tipe-*n* : pembawa muatan negatif (elektron)

Pendahuluan

Perilaku elektron dalam struktur semikonduktor berubah dengan adanya penurunan dimensi

Struktur Semikonduktor berdasarkan ukuran dan dimensi:

- **Struktur Bulk (3-dimensi)**
- **Struktur Quantum Well (2-dimensi)**
- **Struktur Quantum Wire (1-dimensi)**
- **Struktur Quantum Dot (0-dimensi)**

(Mitin, V.V., Viatcheslav A.K., Michael A.S., *Quantum Heterostructures: Microelectronics and Optoelectronics*, UK: Cambridge, 1999.)

Tinjauan teoretik perilaku elektron?

Pendahuluan

Struktur Bulk

Tinjau dalam ruang momentum

$$\rho = \left(\frac{L}{2\pi} \right)^3 = \frac{V}{(2\pi)^3}$$

$$V_k = \frac{4}{3}\pi k^3$$

$$V_k = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{2mE}{\hbar^2} \right)^{3/2}$$

$$N = \rho V_k$$

$$N = \frac{4\pi V}{3(2\pi)^3} \left(\frac{2mE}{\hbar^2} \right)^{3/2}$$

$$N = \frac{4\pi V}{3(2\pi)^3} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} E^{3/2}$$

Jumlah keadaan dalam bola

Pendahuluan

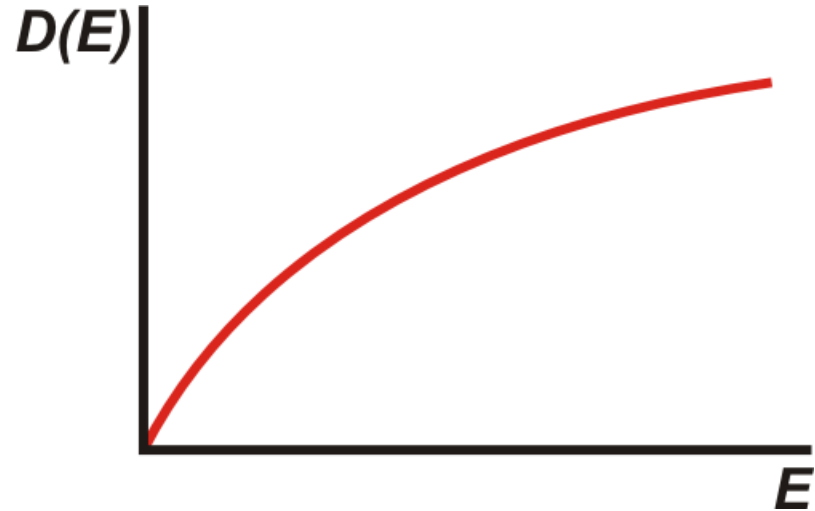
Struktur Bulk

Rapat keadaan : keadaan populasi elektron/hole dalam setiap pertambahan energi

$$D(E) = \frac{dN}{dE}$$

$$D(E) = \frac{4\pi V}{3(2\pi)^3} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} \frac{3}{2} E^{1/2}$$

$$D(E) = \frac{V}{(2\pi)^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} E^{1/2}$$



Pendahuluan

Struktur Quantum Well

Energi keadaan terikat

$$E_1 = \frac{\hbar^2 k_{w,1}^2}{2m}$$

Untuk potensial tak hingga

$$E_1 = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2mL^2}$$

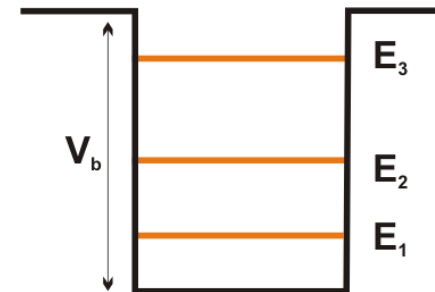
Rapat keadaan

$$D(E) = \sum_v \delta(E - E_v)$$

$$v \equiv \{s, n, \vec{k}_u\}$$

$$D(E) = 2 \sum_{n, k_x, k_y} \delta \left(E - E_n - \frac{\hbar^2 (k_x^2 + k_y^2)}{2m} \right)$$

$$k_x = \frac{2\pi l_x}{L_x} \quad k_y = \frac{2\pi l_y}{L_y} \quad l_x, l_y = 0, 1, 2, \dots$$

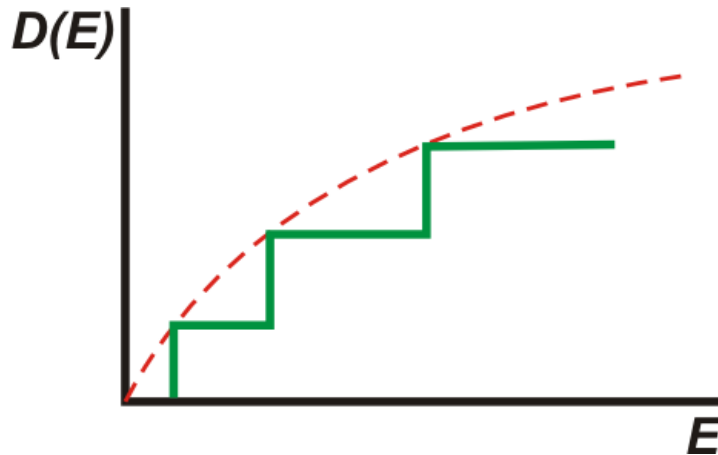


Pendahuluan

Struktur Quantum Well

$$D(E) = \frac{m l_x l_y}{\pi \hbar^2} \sum_n \int_0^a dE_{\parallel} \delta(E - E_n - E_{\parallel})$$

$$D(E) = \frac{Sm}{\pi \hbar^2} \sum_n \Theta(E - E_n)$$



--- Bulk

— Quantum Well

Pendahuluan

Struktur Quantum Wire

Energi terkuantisasi

$$E_{n_1, n_2} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m} \left(\frac{n_1^2}{L_y^2} + \frac{n_2^2}{L_z^2} \right)$$

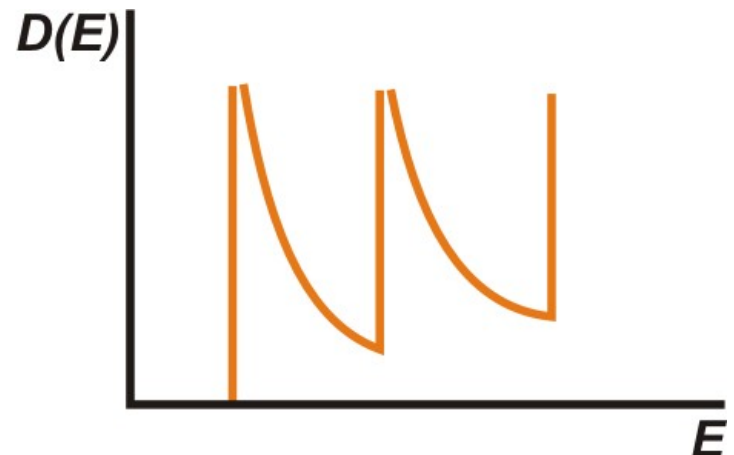
Rapat keadaan

$$D(E) = \sum_{n_1, n_2} D_{n_1, n_2}(E)$$

$$D(E) = 2 \sum_{k_x} \delta \left(E - E_{n_1, n_2} - \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m} \right)$$

$$D(E) = \frac{2L_x}{\pi} \int_0^\infty dk_x \delta \left(E - E_{n_1, n_2} - \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m} \right)$$

$$D(E) = \frac{L_x}{\pi} \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}} \frac{1}{\sqrt{E - E_{n_1, n_2}}} \theta(E - E_{n_1, n_2})$$



Pendahuluan

Struktur Quantum Dot

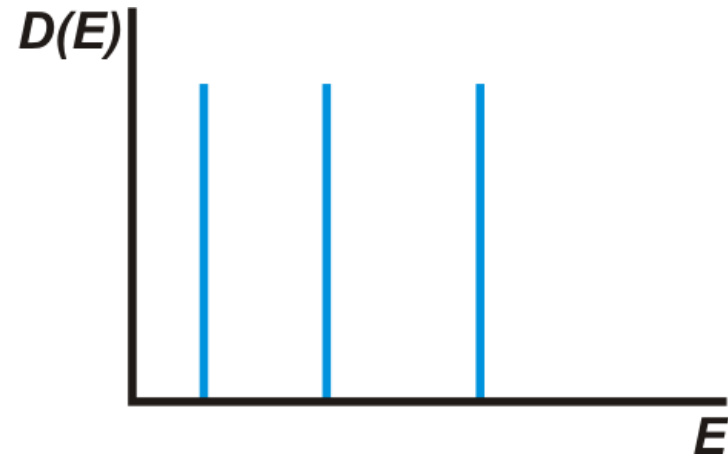
Energi terkuantisasi

$$E_{n_1, n_2, n_3} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m} \left(\frac{n_1^2}{L_x^2} + \frac{n_2^2}{L_y^2} + \frac{n_3^2}{L_z^2} \right)$$

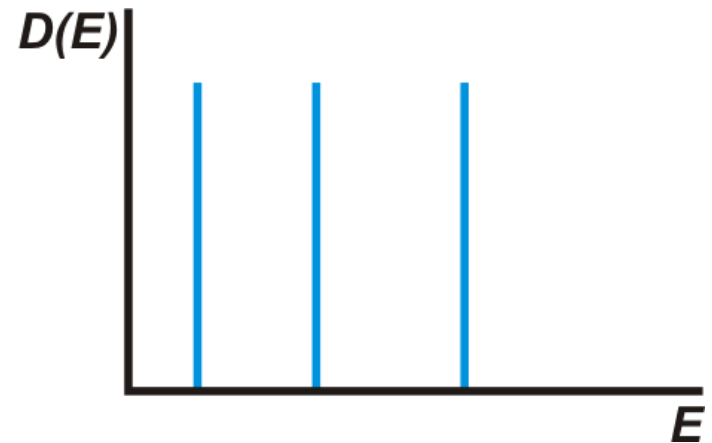
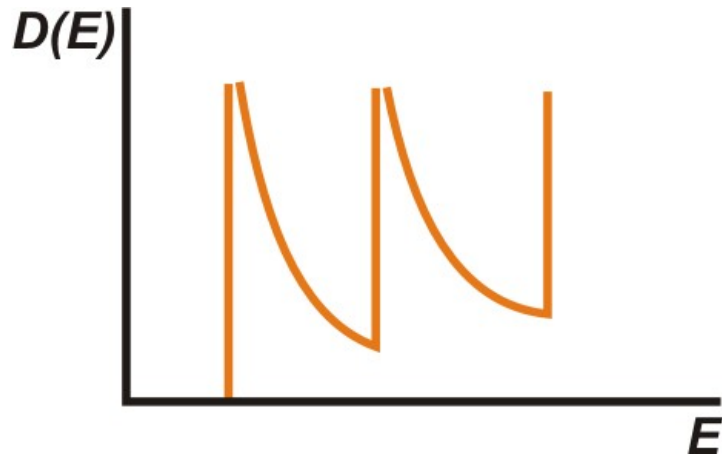
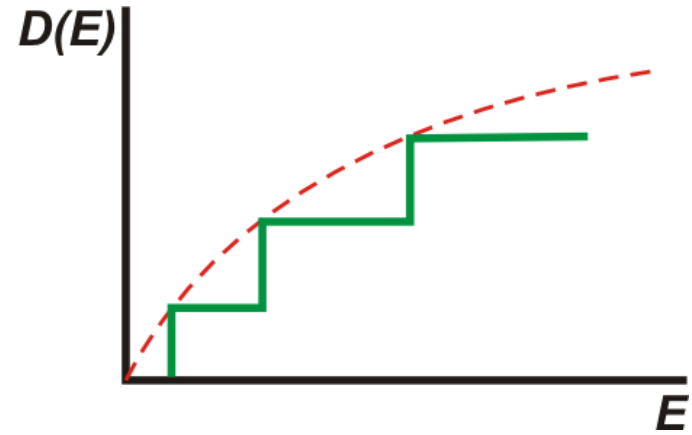
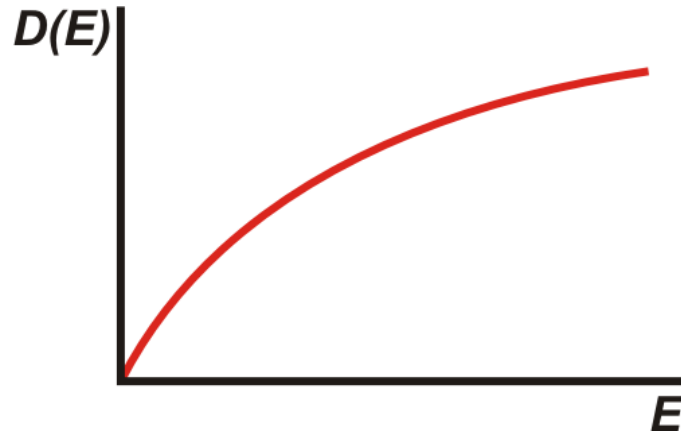
Rapat keadaan

$$D(E) = \sum_v \delta(E - E_v)$$

$$D(E) = \sum_{n_1, n_2, n_3} \delta(E - E_{n_1, n_2, n_3})$$

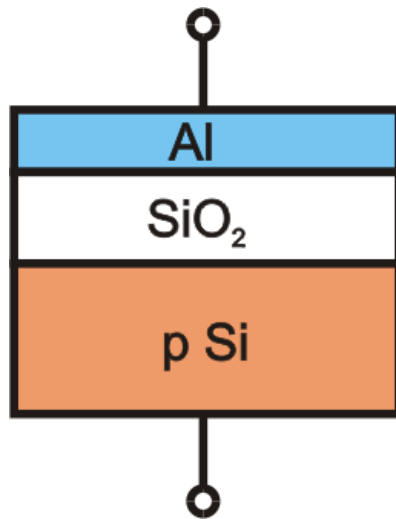


Pendahuluan

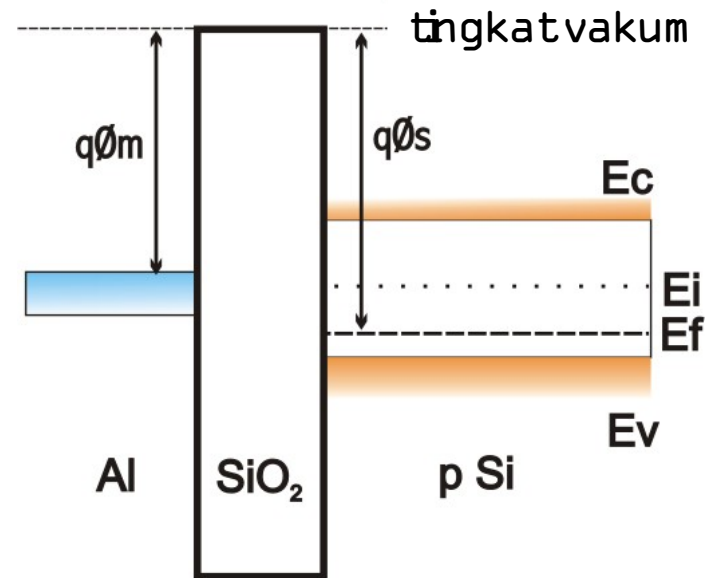


MOS

- **Metal-Oxide-Semiconductor (MOS)** merupakan gabungan metal dan material semikonduktor yang dipisahkan oleh oksida.



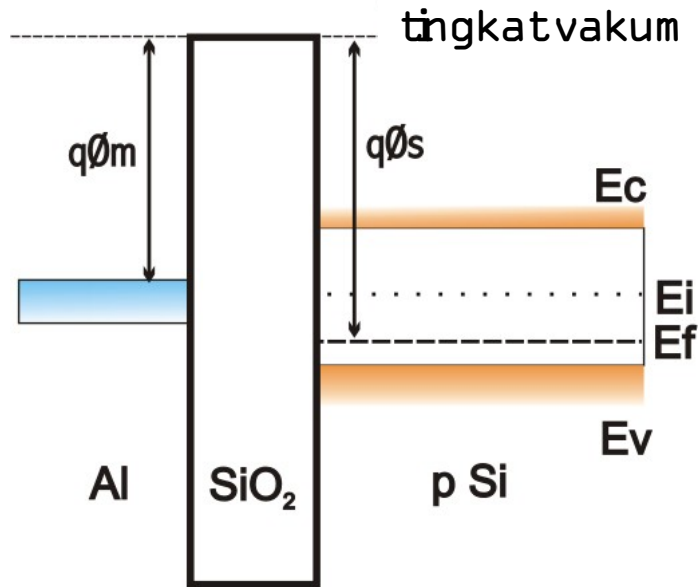
Struktur MOS



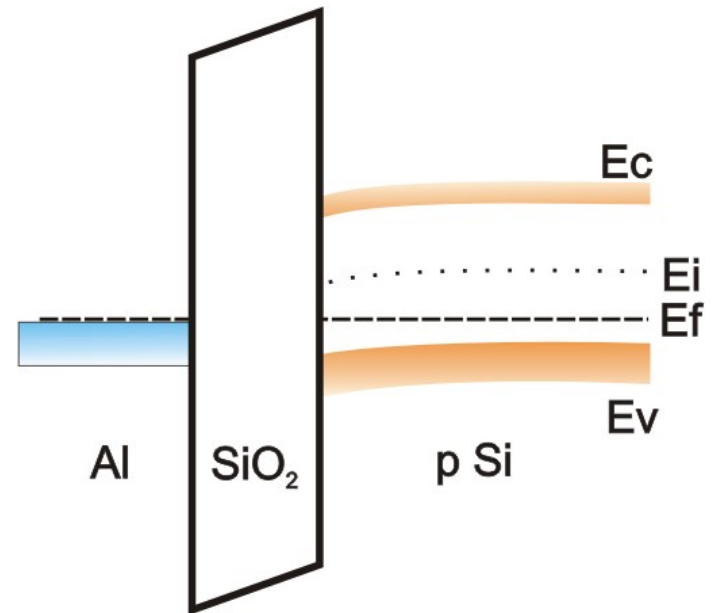
Struktur pita energi MOS

MOS

- Struktur MOS memiliki susunan pita energi yang bergantung pada fungsi kerja semikonduktor dan metal.



Struktur pita energi MOS

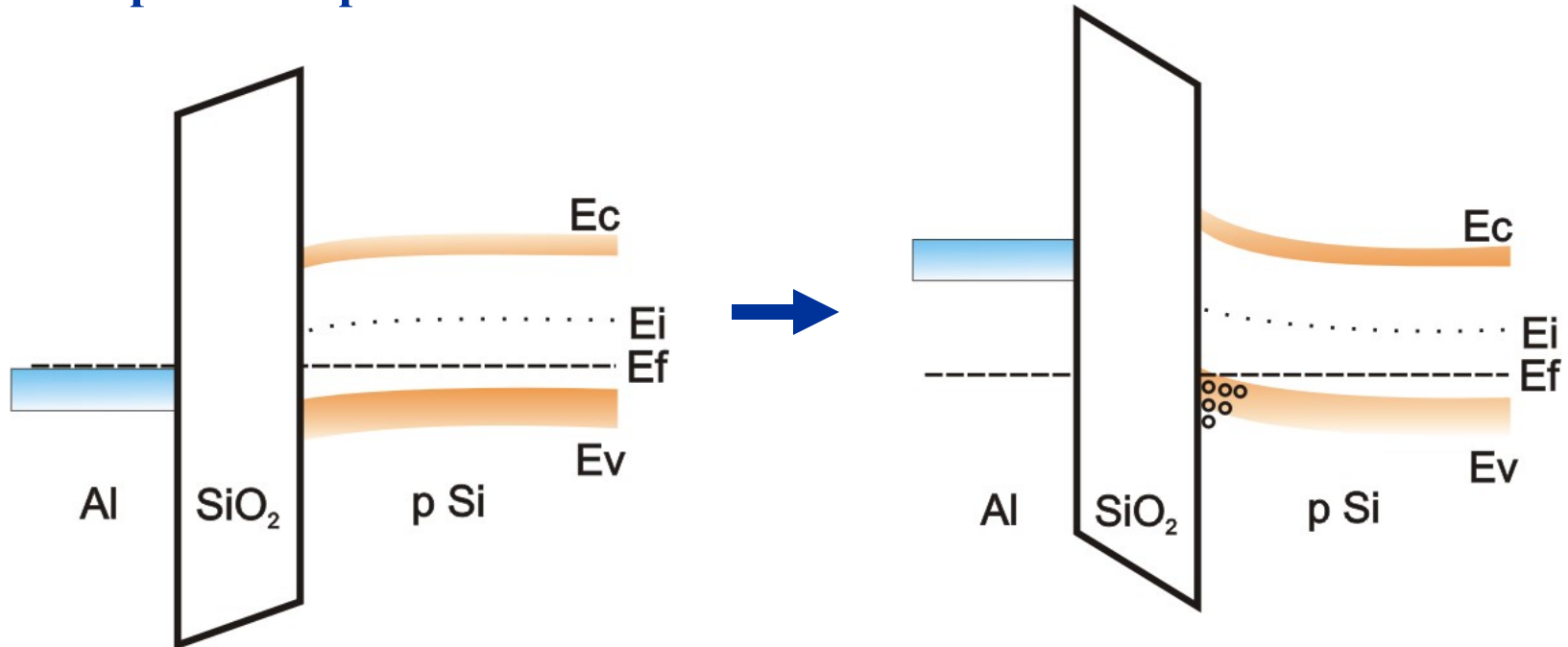


Struktur pita energi MOS dalam keadaan setimbang termal

MOS

Keadaan Akumulasi :

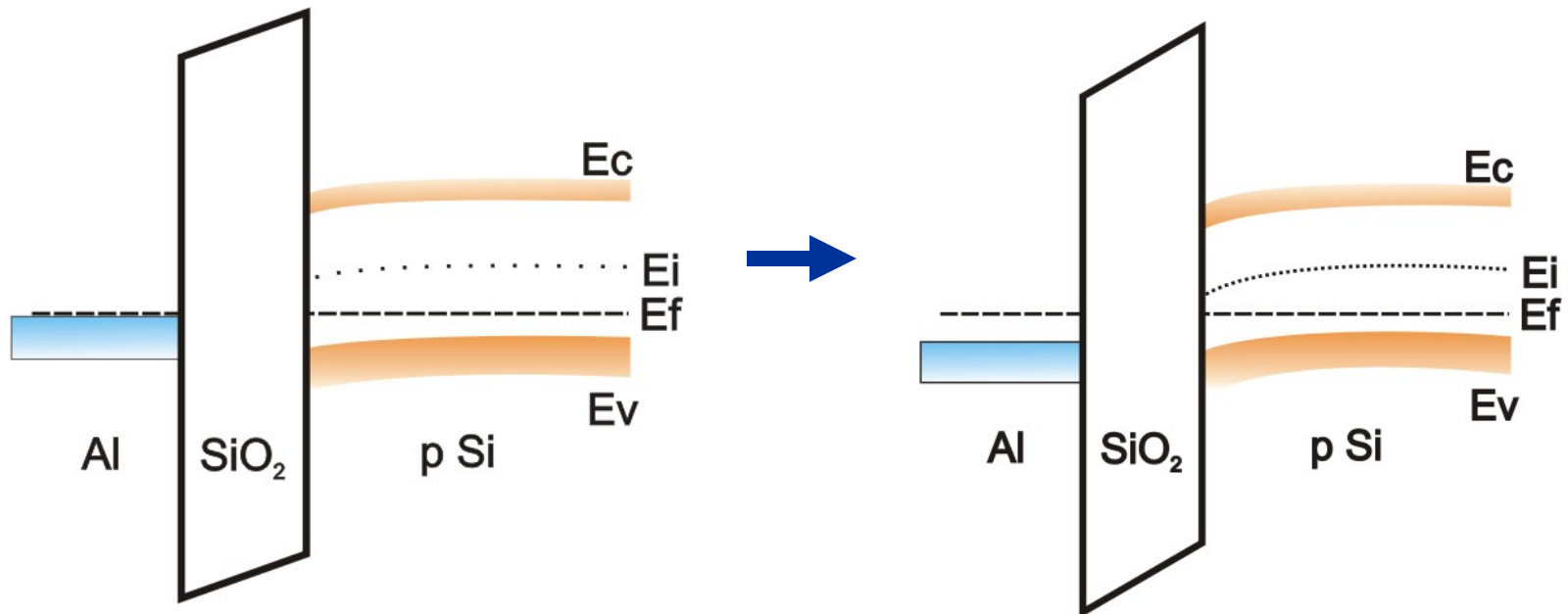
- $V < 0$ diberikan pada logam
- Pada perbatasan oksida-semikonduktor (daerah akumulasi) Fermi level pada semikonduktor memotong pita valensi
- Rapat holes pada daerah akumulasi bertambah



MOS

Keadaan Depleksi :

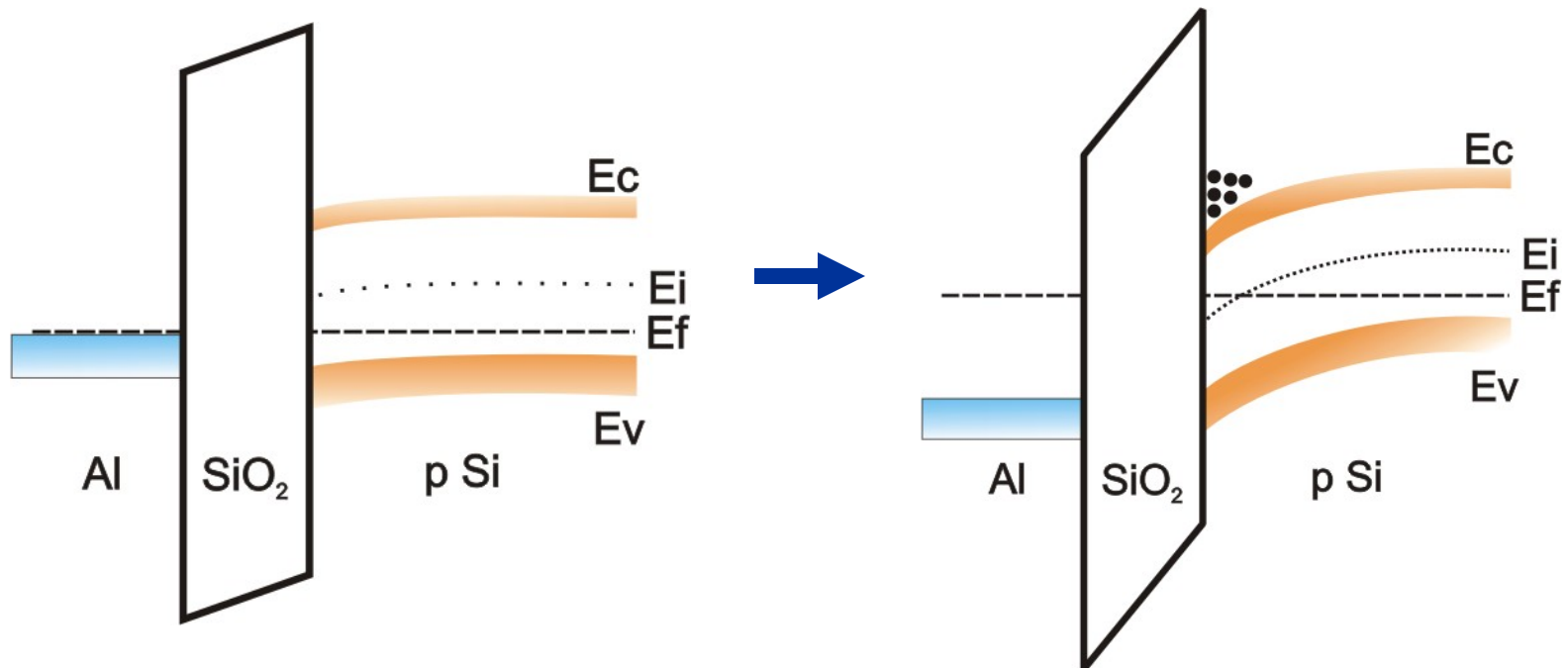
- $V > 0$ diberikan pada logam
- Pada perbatasan oksida-semikonduktor (daerah depleksi) Fermi level berada dibawah energi intrinsik semikonduktor



MOS

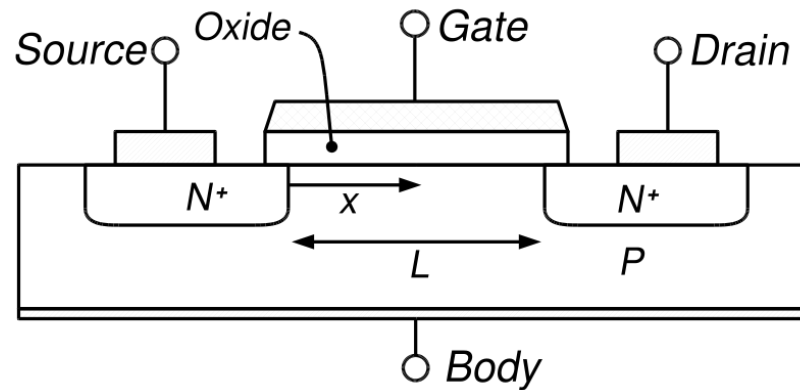
Keadaan Inversi :

- $V \gg 0$ diberikan pada logam
- Pada perbatasan oksida-semikonduktor (daerah inversi) Fermi level berada di atas energi intrinsik semikonduktor
- Rapat elektron pada daerah inversi lebih dominan



MOSFET

- **MOS Field-Effect Transistor (MOSFET)** merupakan device yang memanfaatkan efek medan yang dihasilkan dari potensial bias yang diberikan pada MOS
- **Struktur MOSFET** memiliki dua terminal (**source & drain**) sebagai sumber aliran pembawa muatan
- **Gate** berfungsi sebagai pengontrol oksida



Struktur nMOSFET

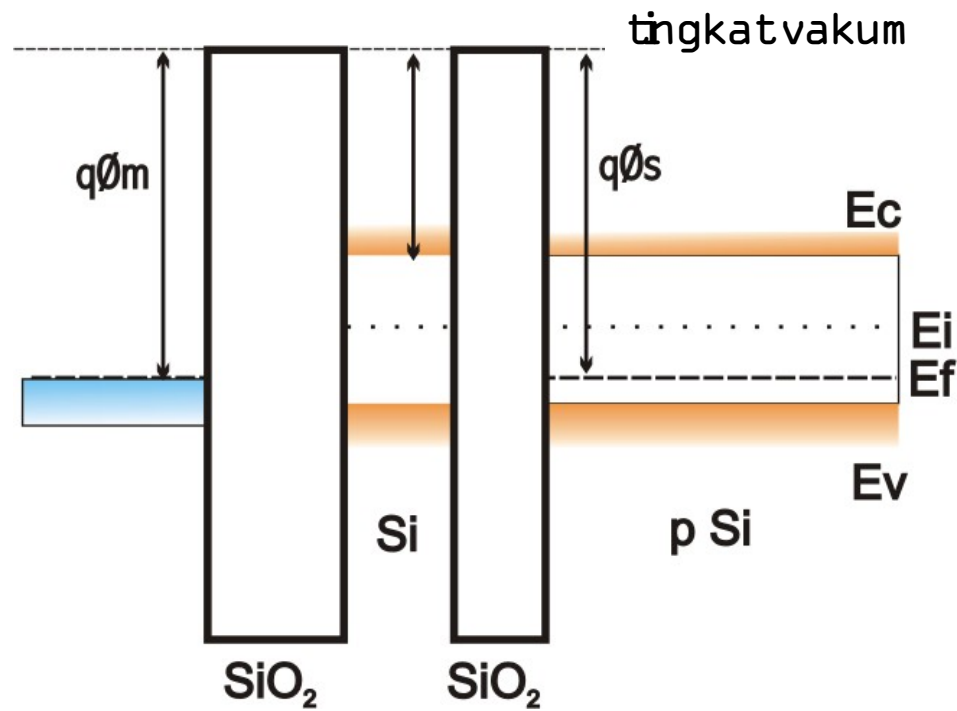
FGMOSFET

Proses pengisian muatan

- Potensial bias negatif diberikan pada logam sehingga body pada keadaan akumulasi holes
- Sejumlah holes memiliki energi yang cukup untuk melakukan proses tunneling
- Holes melakukan tunneling melewati oksida menuju floating gate
- Holes tersimpan di floating gate

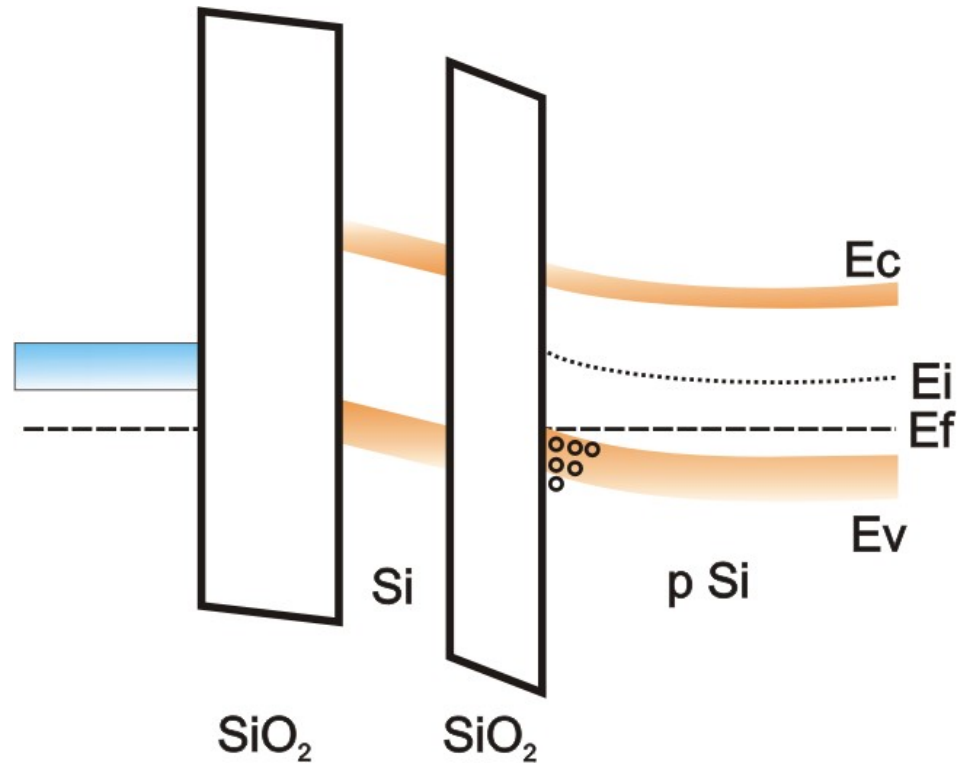
FGMOSFET

Pengisian



FGMOSFET

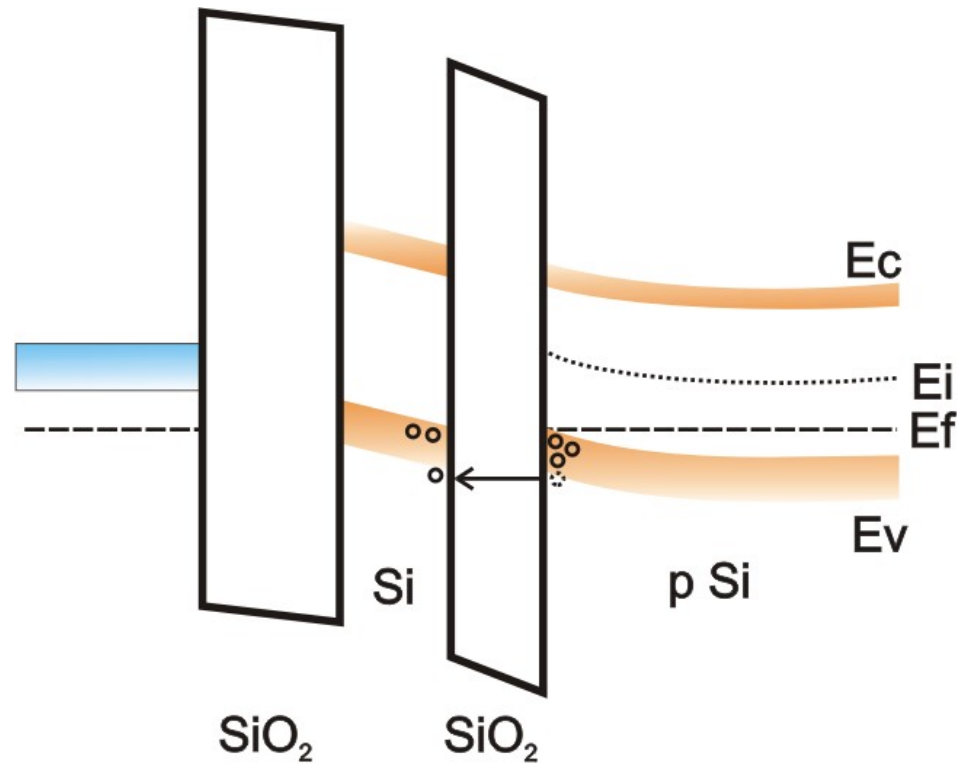
Pengisian



Potensial bias negatif diberikan pada logam sehingga body pada keadaan akumulasi holes

FGMOSFET

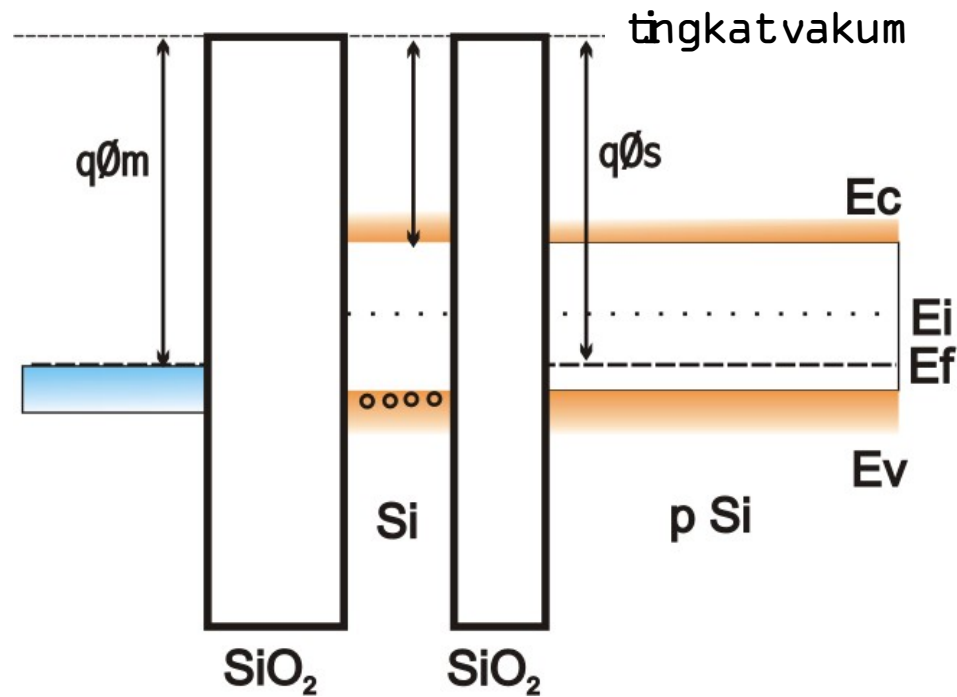
Pengisian



Holes melakukan tunneling melewati oksida menuju floating gate

FGMOSFET

Pengisian



Holes tersimpan di floating gate

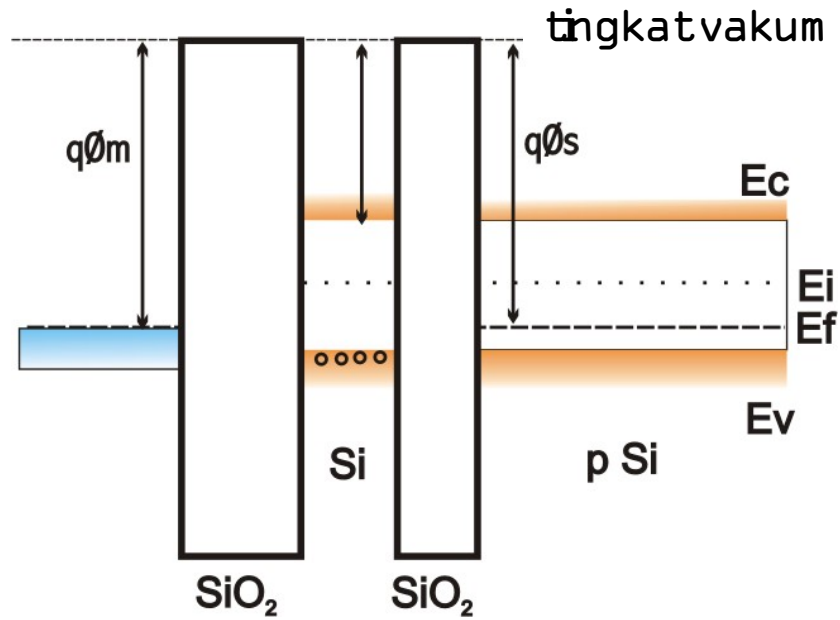
FGMOSFET

Proses pengosongan muatan

- Potensial bias positif diberikan pada logam sehingga body pada keadaan inversi, rapat elektron bertambah
- Sejumlah elektron memiliki energi yang cukup untuk melakukan proses tunneling
- elektron melakukan tunneling melewati oksida menuju floating gate
- Terjadi proses rekombinasi elektron-holes

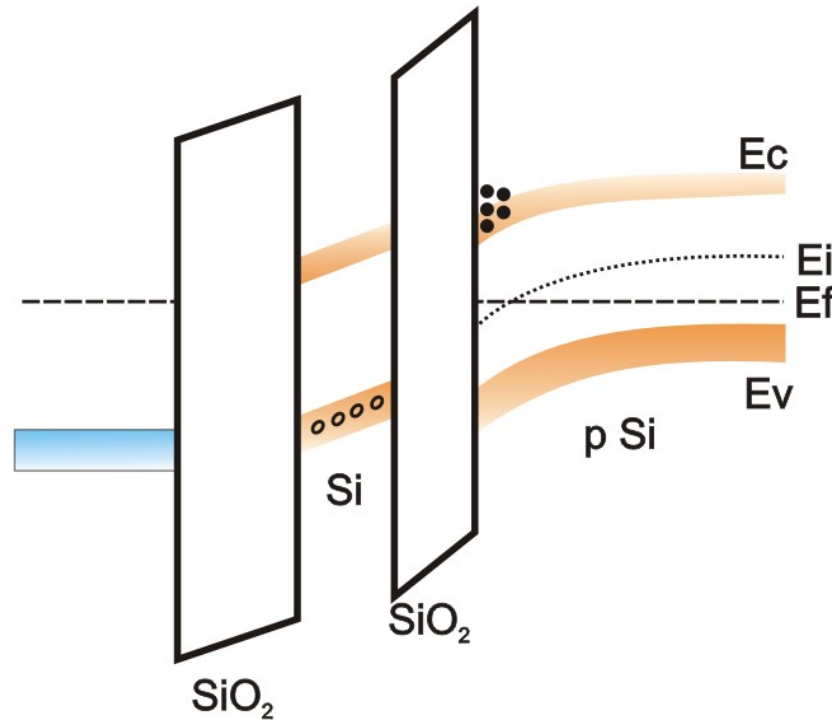
FGMOSFET

Pengosongan



FGMOSFET

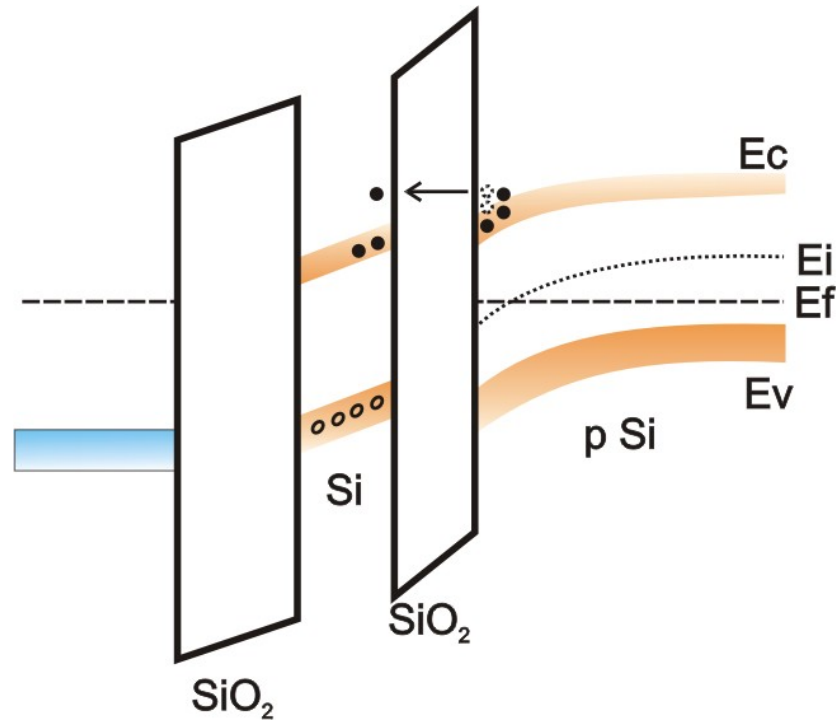
Pengosongan



Potensial bias positif diberikan pada logam sehingga body pada keadaan inversi, rapat elektron bertambah

FGMOSFET

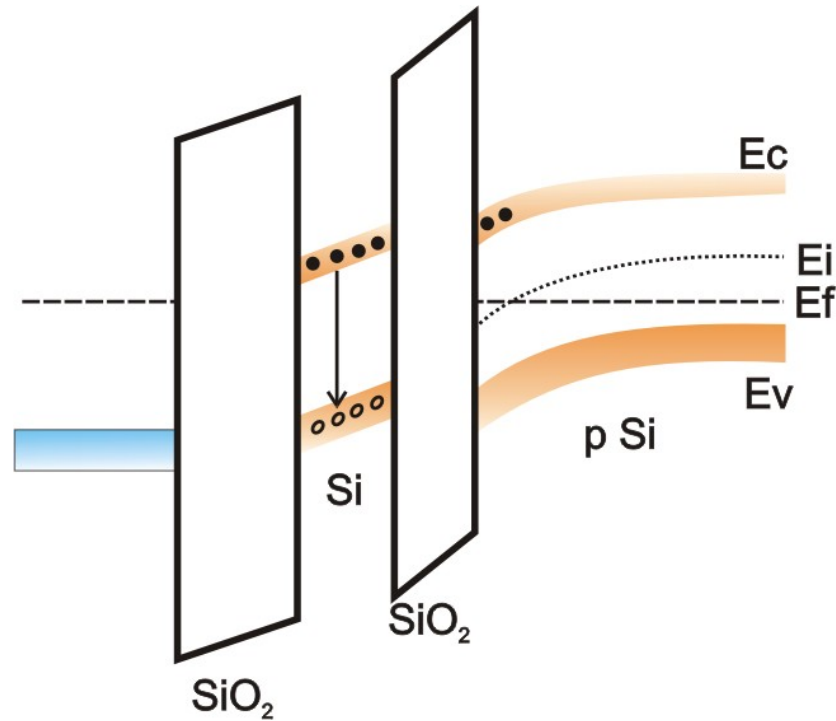
Pengosongan



Elektron melakukan tunneling melewati oksida menuju floating gate

FGMOSFET

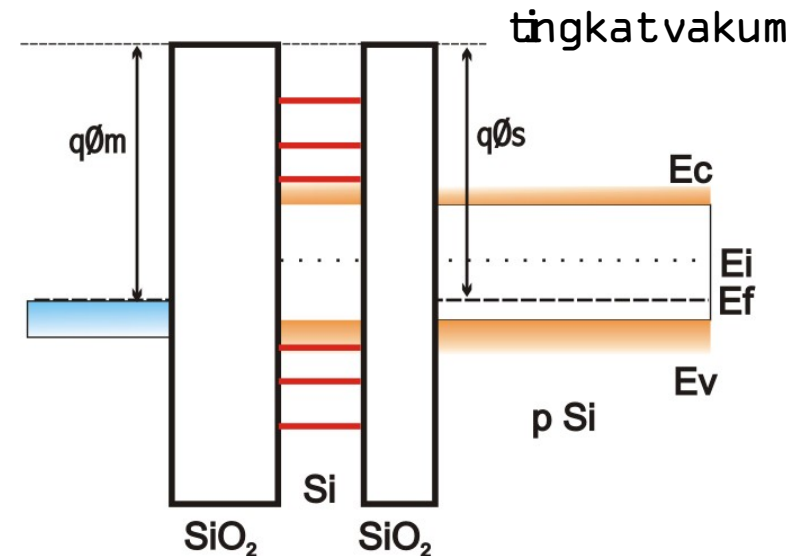
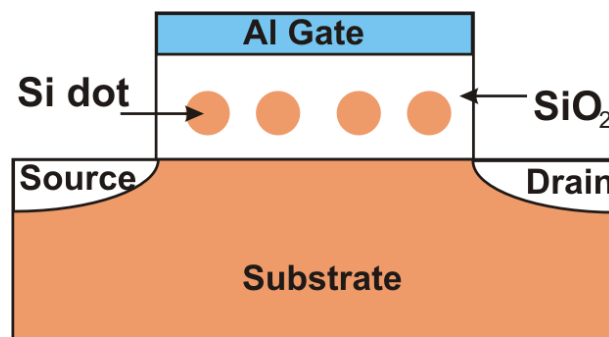
Pengosongan



Terjadi proses rekombinasi elektron-holes

QD Memory Device

- Quantum Dot (QD) memory device memiliki floating gate yang berupa deretan dot semikonduktor
- QD memori memiliki sifat unik yang berkaitan dengan efek kuantum tentang pengurungan muatan



QD Memory Device

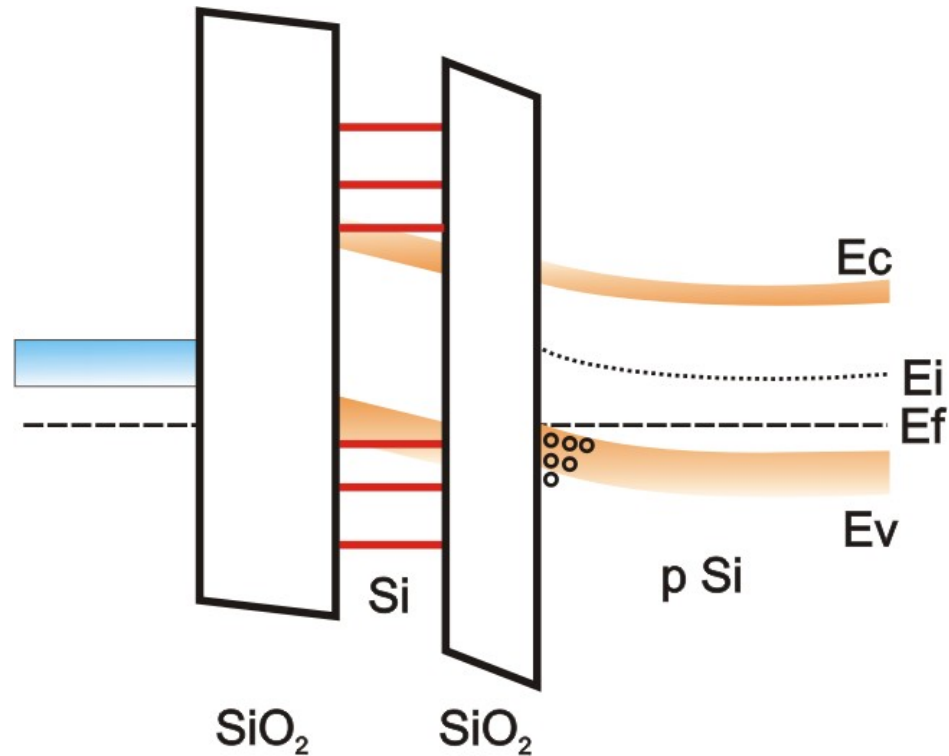
QD memori merupakan kandidat yang menjanjikan untuk dikembangkan sebagai device memori menggantikan device konvensional

Keuntungan:

- **Pengontrolan pengisian muatan pada floating gate**
- **Penghematan tegangan pada proses pemrograman**
- **Realibilitas yang tinggi**

QD Memory Device

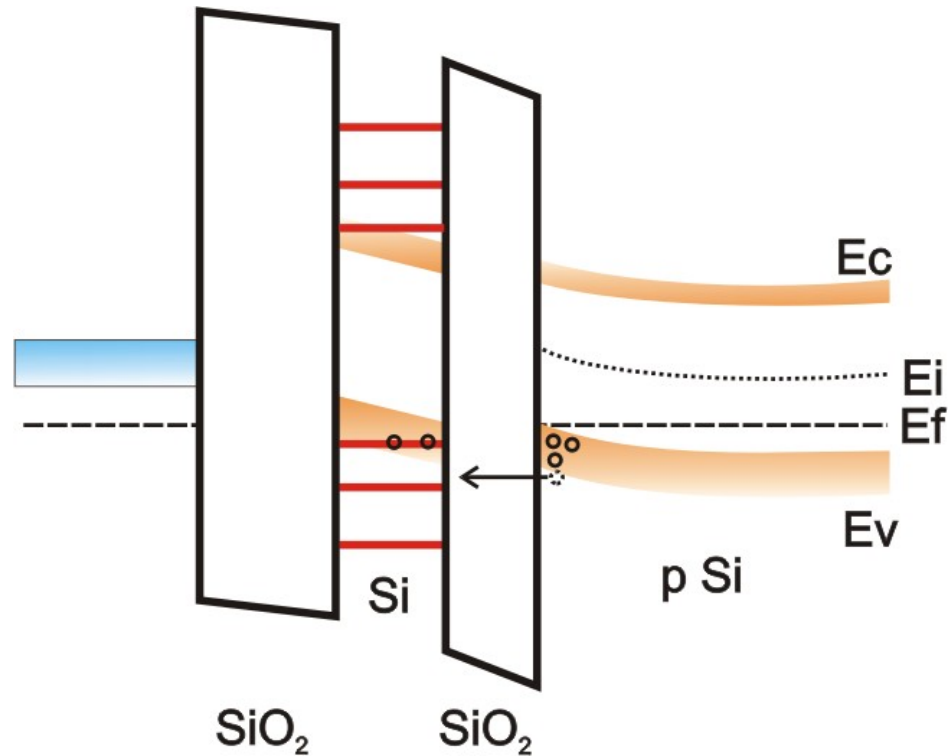
Pengisian



Potensial bias negatif diberikan pada logam sehingga body pada keadaan akumulasi holes

QD Memory Device

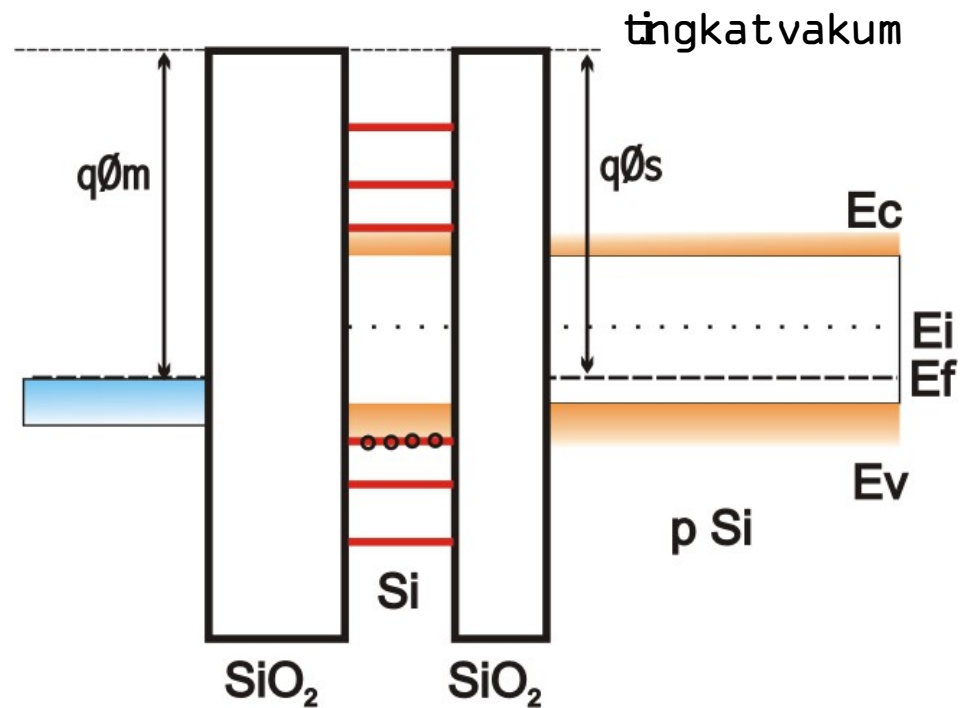
Pengisian



Holes melakukan tunneling melewati oksida menuju floating gate

QD Memory Device

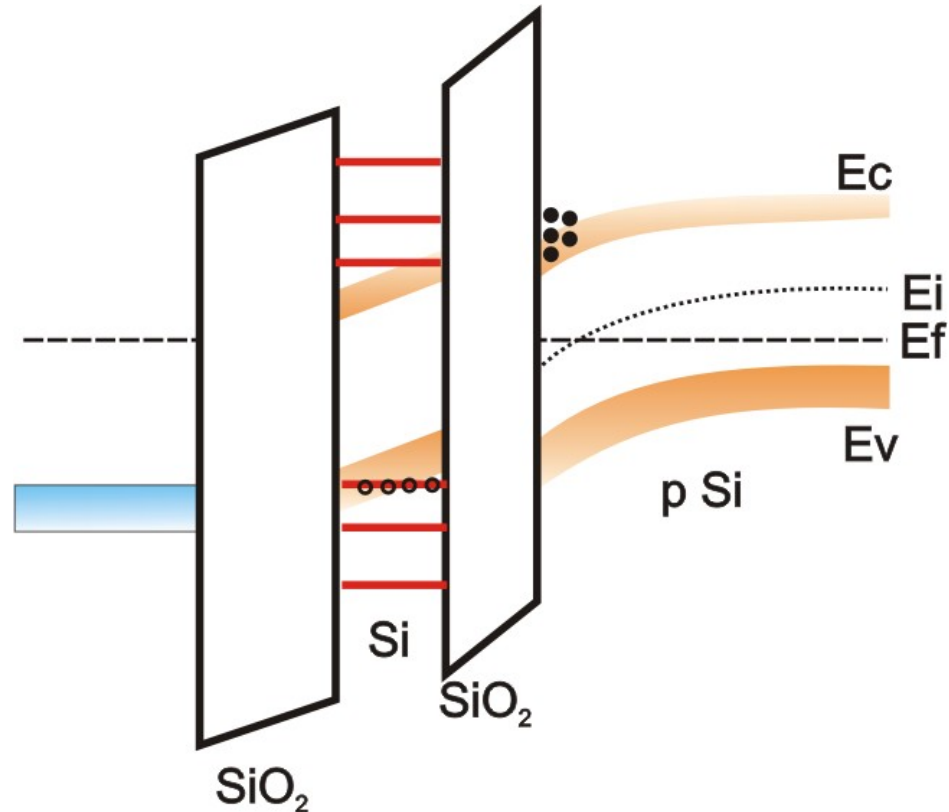
Pengosongan



QD Memory Device

Pengosongan

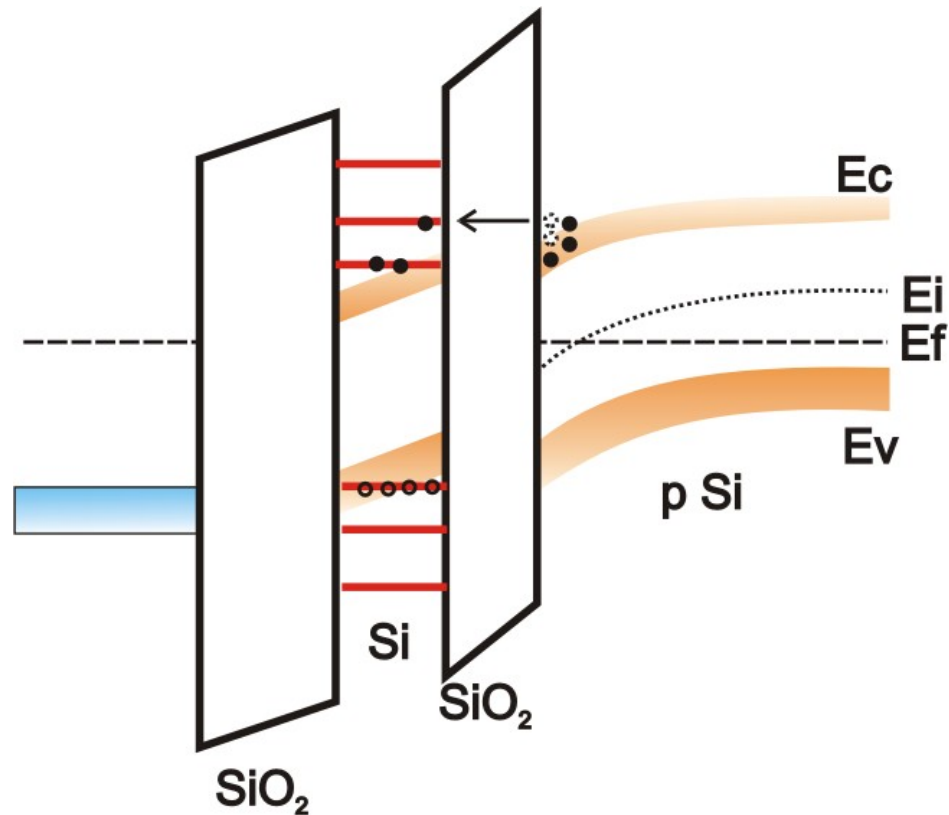
Potensial bias positif diberikan pada logam sehingga body pada keadaan inversi, rapat elektron bertambah



QD Memory Device

Pengosongan

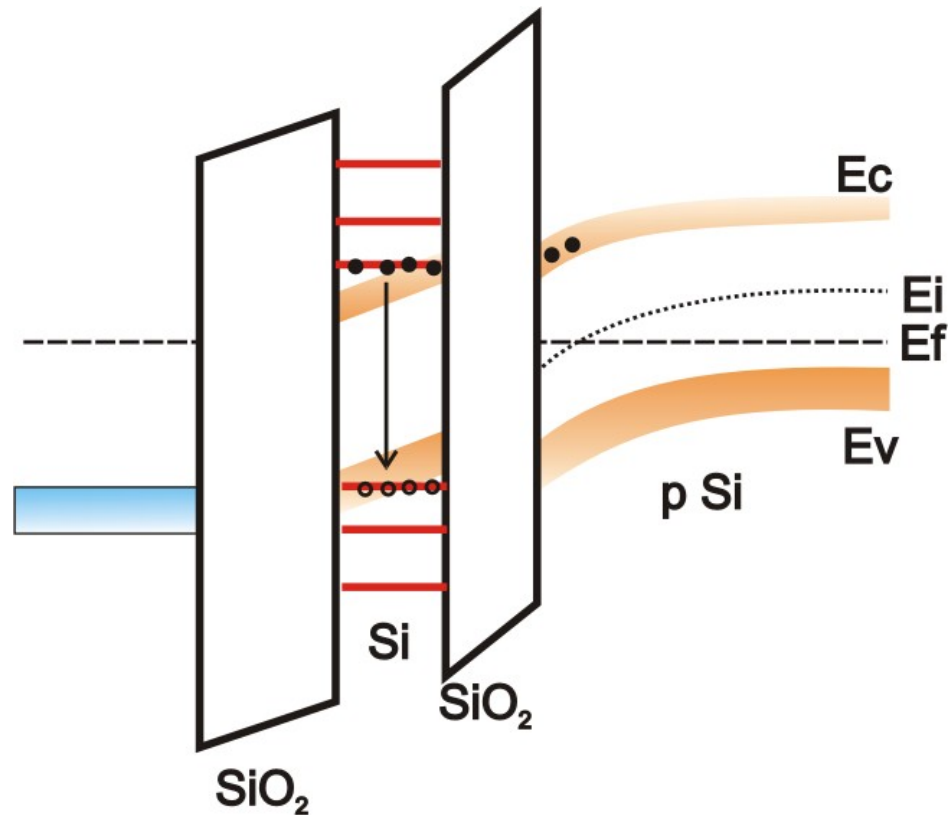
Elektron melakukan tunneling melewati oksida menuju floating gate



QD Memory Device

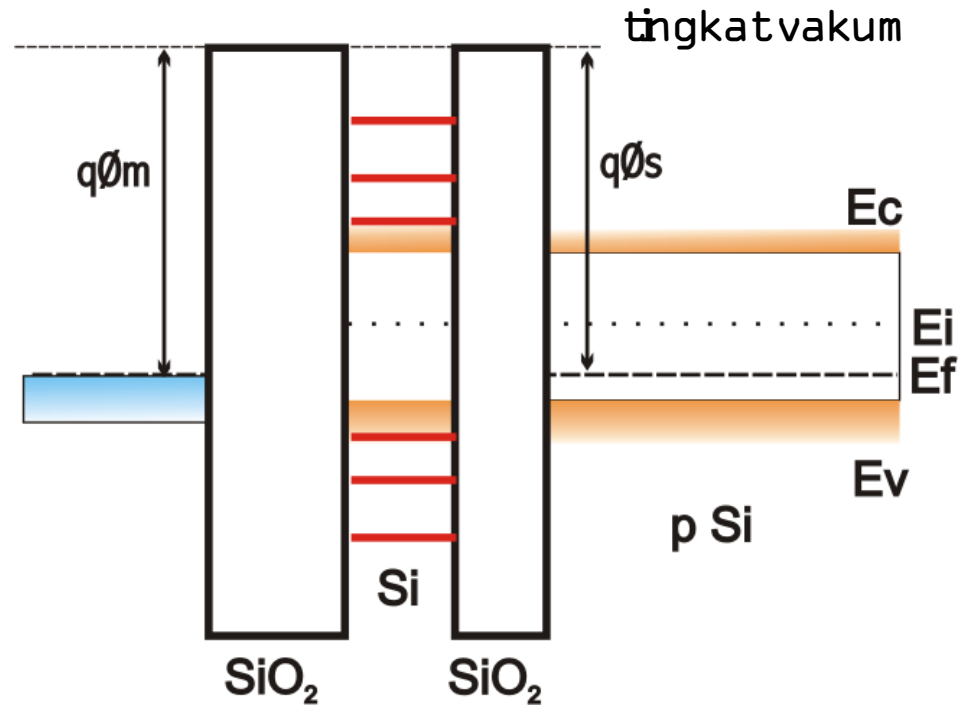
Pengosongan

Terjadi proses rekombinasi elektron-holes



QD Memory Device

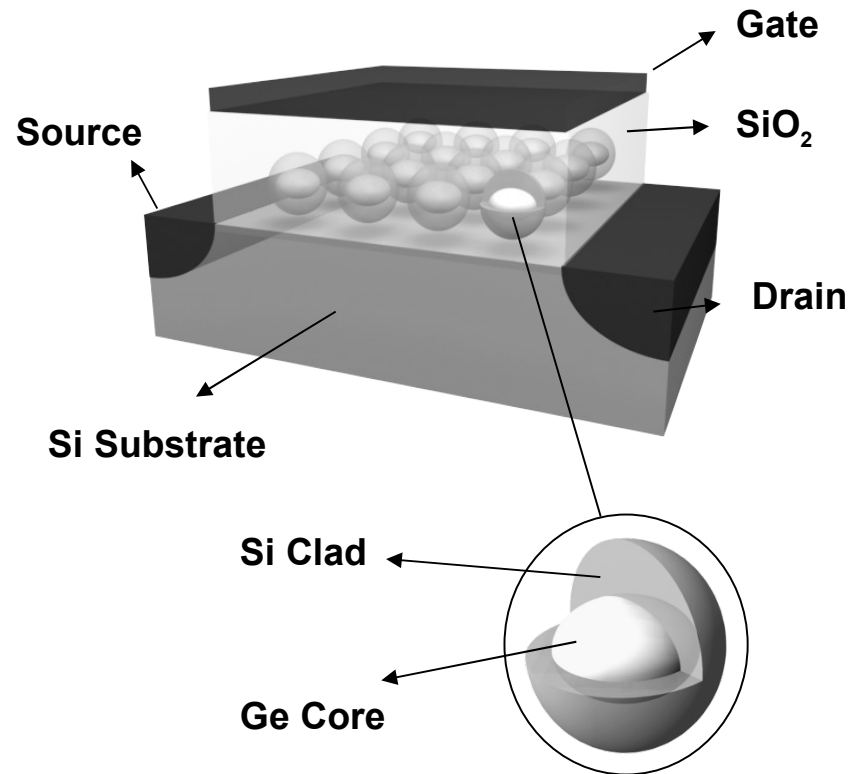
Pengosongan



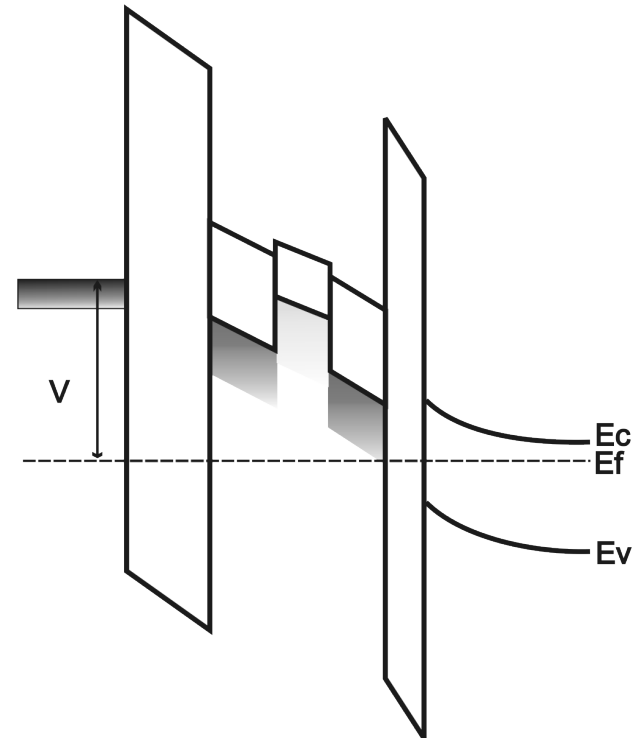
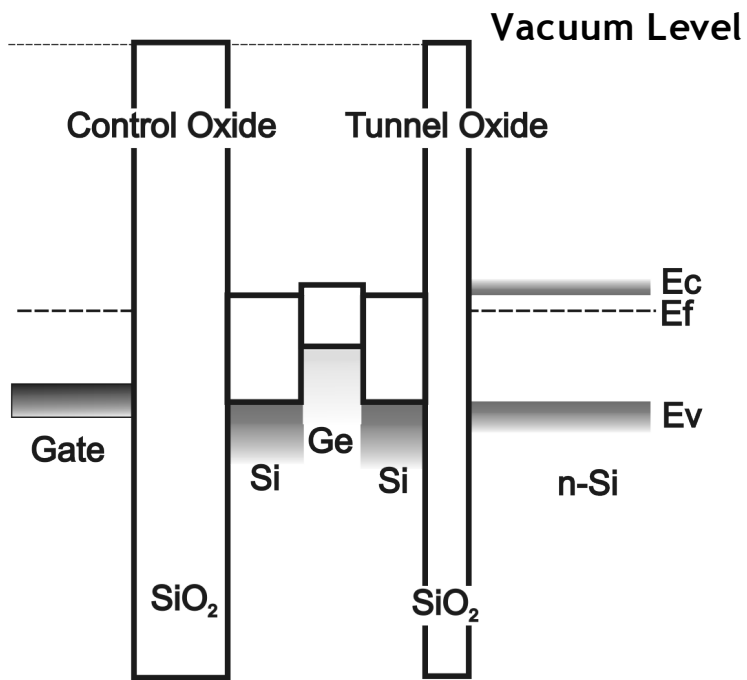
QD Memory Device

Tantangan:

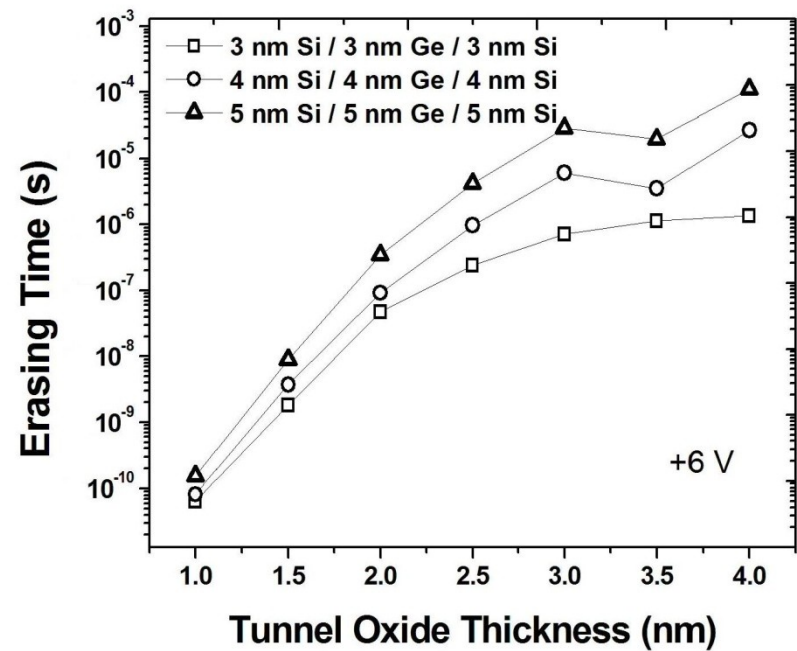
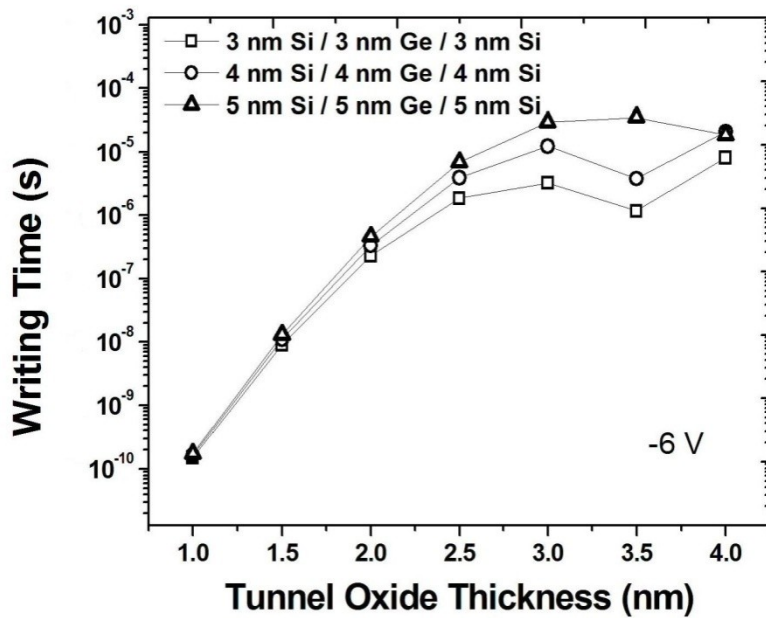
- Operasi kecepatan tinggi
- Waktu penyimpanan yg lama



QD Memory Device



QD Memory Device



(Tri Fatirahman and Ahmad Ridwan, ICMNS 2006, APS 2007)

Sekian... Terima kasih.