

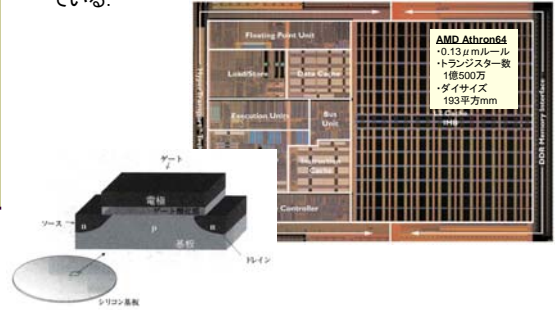
# 半導体工学(11)

## MOS電界効果トランジスタ

電子情報デザイン学科 藤野 毅 1

## MOSTランジスタの構造

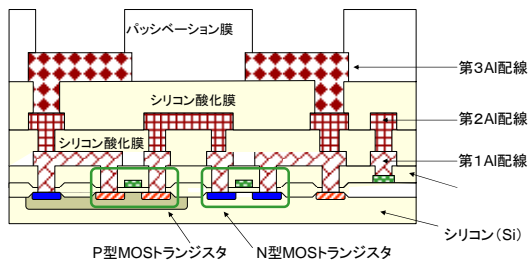
- 大規模LSI中にはMOSTランジスタが1億個以上使われている。



2

## 現在の大規模集積回路(LSI)の構造 復習

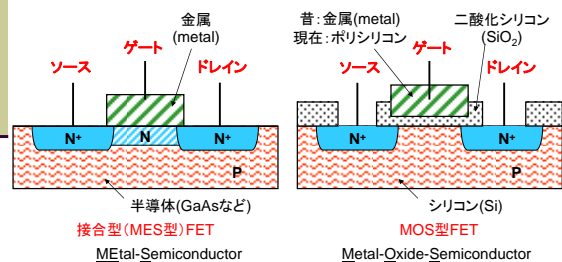
- MOS電界効果トランジスタと、トランジスタ間を接続する金属(アルミ)配線により形成されている。



3

## MOS電界効果トランジスタの構造

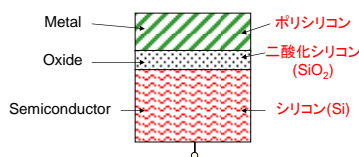
- 電界効果トランジスタ=Field Effect Transistor (FET)
- 3端子の素子で、ゲート電圧によって、ソースとドレインの間に流れる電流を制御することのできる素子。
- ゲート電極下の構造で2種類に分類できる
  - 接合型:ゲート下にショットキー接合を使用、MES型とも呼ばれる
  - MOS (Metal Oxide Semiconductor)型:ゲート下にMOS構造を使用



4

## MOS構造

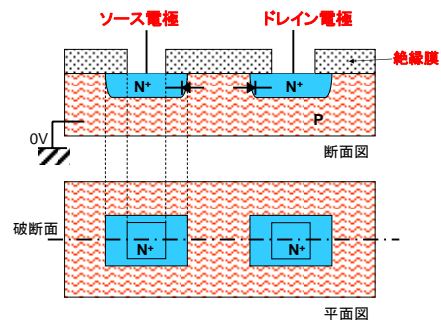
- 半導体上に電気を通さない薄い絶縁層を形成しその上に金属をつけた構造
  - 半導体: 通常はシリコン(Si)基板
  - 絶縁膜: 通常は二酸化シリコン(SiO<sub>2</sub>)薄膜
  - 金属: 昔はアルミニウムなどの金属が使われたが現在のVLSIはポリシリコン (poly-Si) に高度に不純物を導入した導体を使用される
  - 金属 (Metal)、絶縁膜 (Insulator)、半導体 (Semiconductor) を積層した構造のため MIS構造とも呼ばれるが、通常絶縁膜は酸化膜 (Oxide) であるため、MOS構造と呼ばれることが多い。



5

## P型シリコン基板上的独立したN型領域

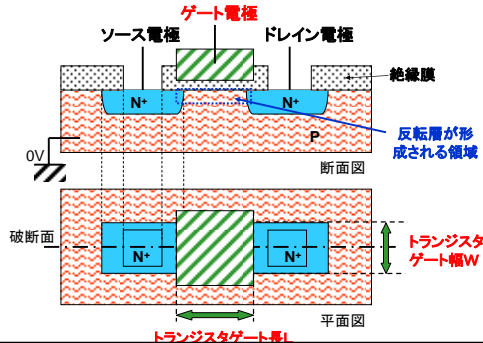
- NP-PN接合ができていないので、ほとんど電流は流れない



6

## ゲート電極を追加してMOSFET構造

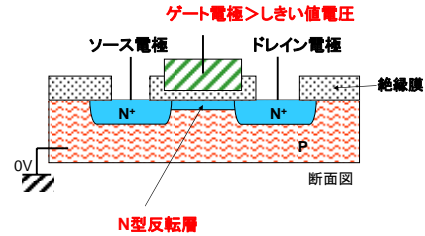
- ゲート電圧をあるしきい値電圧より高くすると、正の静電効果で、ゲート下に負の電子が集まり、N型領域(反転層)が形成され、ソース・ドレイン間に電流が流れる



7

## MOSFETにおけるN型反転層

- ゲート下がN型に反転した場合の様子

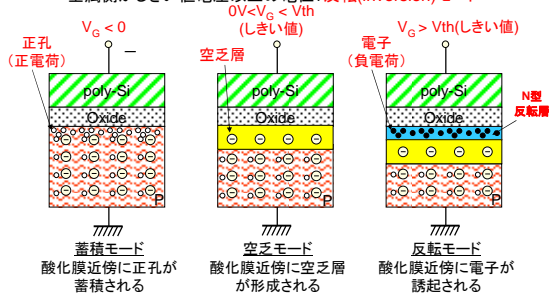


8

## MOS構造の電気特性

- P型シリコンを使ったMOS構造

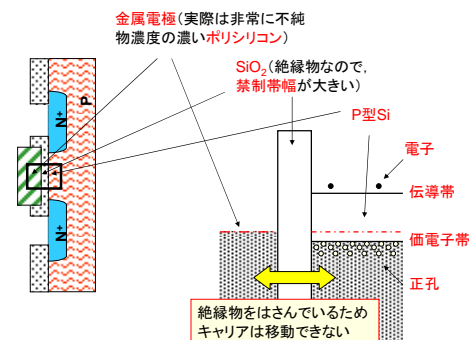
- 金属側が負電位: 蓄積(accumulation)モード
- 金属側がしきい値電圧以下の電位: 空乏(depletion)モード
- 金属側がしきい値電圧以上の電位: 反転(inversion)モード



9

## MOS構造のエネルギーバンド図

- トランジスタ構造とエネルギーバンド図の対応関係

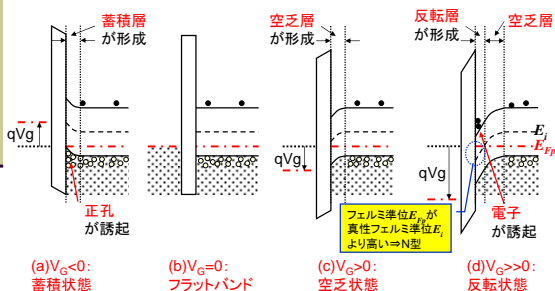


10

## エネルギーバンドのゲート電圧依存性

- $V_g = 0V$ でフラットバンド条件を満たす場合のエネルギーバンド図

- ゲート電極の仕事関数  $\phi_M$  とP型シリコンの仕事関数  $\phi_S$  が等しい
- ゲート絶縁膜と半導体界面には界面準位が存在しない
- 絶縁膜中には電荷が存在しない
- 絶縁膜には電流が流れない



11

## P型半導体の3つの状態

- 蓄積状態 ( $V_g < 0V$ )

- ゲート電極に印加された負電位による静電誘導でP型半導体内の多数キャリアである正孔が  $\text{SiO}_2$ -Si界面に蓄積される
- 上記正孔密度の高い層を蓄積層と呼ぶ

- 空乏状態 ( $V_g > 0V$ )

- ゲート電極に印加された正電位によってゲート電極直下の  $\text{SiO}_2$ -Si界面の正孔がSi内部へ移動する
- $\text{SiO}_2$ -Si界面にはアクセプタイオンによる負に帯電した空間電荷層すなわち空乏層が形成される

- 反転状態 ( $V_g >> 0V$ )

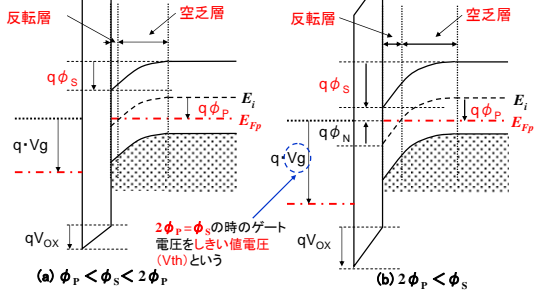
- P型シリコンのフェルミ準位  $E_{Fp}$  が真性フェルミ準位  $E_i$  に近づき空乏層がより広がっていく
- さらに大きな電圧がゲート電極に印加されるとフェルミ準位  $E_{Fp}$  が真性フェルミ準位  $E_i$  より高くなると、界面近傍はN型となり、伝導電子が多数キャリアとなる反転状態となる

12

## 弱反転と強反転

- 表面ポテンシャル  $\phi_s$  の大きさが P型フェルミポテンシャル  $\phi_p$  の2倍以上になると強反転

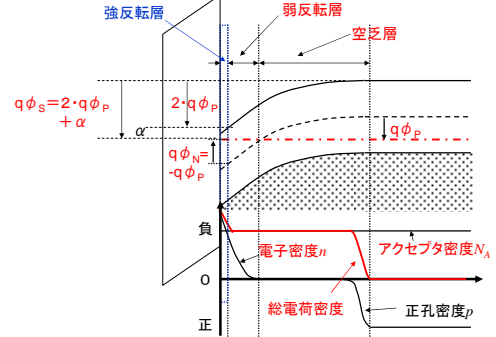
$V_G = V_{ox} + \phi_s$   
 $V_{ox}$ : 酸化膜の電圧  
 $\phi_s$ : 表面ポテンシャル



13

## 強反転時のP型Si内の電荷分布

- 界面のフェルミポテンシャルが  $-q \cdot \phi_p$  より大きい  $\Rightarrow$  少数キャリアである電子密度  $n$  がアクセプタ密度  $N_A$  より大きくなる



14

## 反転状態としきい値電圧

- 前のスライドでの電荷分布を簡略化

$$Q_G = -Q_s = -Q_f - Q_b \quad (7.1)$$

$$V_G = V_{ox} + \phi_s \quad (7.2)$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \quad V_{ox} = \frac{Q_G}{C_{ox}} \quad (7.3)$$

( $\epsilon_{ox}$  は酸化膜誘電率)

$$V_G = \frac{Q_G}{C_{ox}} + \phi_s = -\frac{Q_f}{C_{ox}} + \phi_s = -\frac{Q_f + Q_b}{C_{ox}} + \phi_s \quad (7.4)$$

$$V_G = V_{th} \quad Q_f = 0 \quad \phi_s = 2 \cdot \phi_p$$

$$V_{th} = -\frac{Q_b}{C_{ox}} + 2 \cdot \phi_p \quad (7.5)$$

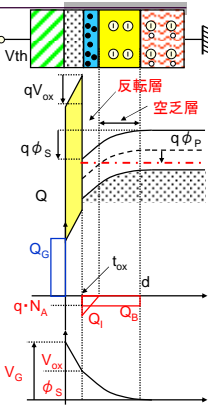
(7.4), (7.5)式より

$$C_{ox}(V_G - V_{th}) = -(Q_f + Q_b) + \phi_s \cdot C_{ox} + Q_b - 2 \cdot \phi_p \cdot C_{ox} = -Q_f$$

$$\therefore \phi_s \approx 2 \cdot \phi_p \quad (\text{ただし } V_G > V_{th} \text{ のとき}) \quad (7.6)$$

$$\therefore Q_f = -C_{ox}(V_G - V_{th}) \quad (7.6)$$

$$Q_b = -q \cdot N_A \cdot d \quad (7.7)$$



15

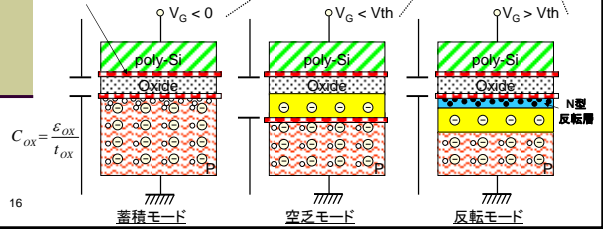
## MOSダイオードの容量(低周波)

- 蓄積時のゲート酸化膜容量は

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

- 空乏時は空乏層の厚さだけ容量が小さくなる

電荷の変化が生じる場所

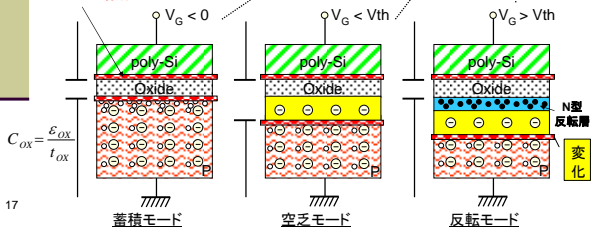


16

## MOSダイオードの容量(高周波)

- 容量の特性は交流電圧を与えた時の電流で測定するので、容量は周波数依存性を持つ
- 高い周波数では反転層のキャリアは電圧に追随しないので、容量は小さいまとなる

電荷の変化が生じる場所



17