

# 半導体工学(14)

## まとめ 小テスト回答

電子情報デザイン学科 藤野 毅 1

## 試験対策(1)

- 第1章 半導体結晶
  - 抵抗と抵抗率
  - 金属・シリコンの結晶構造・ミラー指数
  - 真性半導体とP型半導体とN型半導体
- 第2章 エネルギー帯図
  - Si原子の構造
  - エネルギーバンド図(真性半導体)
  - 金属・半導体・絶縁体の違い
  - 不純物準位とP型, N型半導体
- 第3章半導体のキャリア
  - 不純物濃度とキャリア数の関係
  - 不純物密度と抵抗率の関係(移動度)
  - 拡散を考慮したときの電流密度

2

## 試験対策(2)

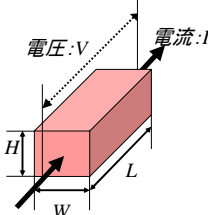
- 第4章 PN接合とPN接合ダイオード
  - 不純物濃度とフェルミポテンシャルφ
  - PN接合とビルトインポテンシャルV<sub>bi</sub>
  - PN接合の電流電圧特性
  - PN接合の空乏層容量
- 第5章 金属と半導体の接触
  - ショットキー接合とオーム接合になるときの条件
  - オーム性接合の作り方
- 第7章MOS電界効果トランジスタ
  - MOS構造のエネルギーバンド図と電圧特性
  - MOS構造の容量特性
  - MOSFETの駆動電流式(線形と飽和)
  - CMOSの構造

3

## 1章 抵抗率・導電率とは？

- 抵抗値は物質の形状で変化するので、物質固有の電気の通しやすさを評価するものとして**抵抗率ρ**を使用する。
- 抵抗率の単位は[Ω・cm]または[Ω・m]←教科書例題1
- 抵抗率の逆数が**導電率σ** [Ω<sup>-1</sup>・m<sup>-1</sup>]

抵抗Rと抵抗率ρの関係は下式で表される



$$R = \frac{L}{W \times H} \times \rho$$

W:配線幅  
L:配線長さ  
H:配線膜厚

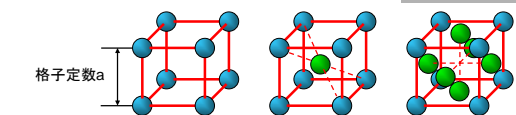
$$S:断面積 = W \times H$$

$$R = \frac{L}{S} \times \rho \quad (1.1式)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

4

## 1章 結晶格子の構造



	単体立方	対心立方	面心立方
単位格子中の原子数	1	2	4
充填率	52.3%	68%	74%

- アルミニウム、銅などの金属は**面心立方格子**を持つものが多い。このとき原子間は**金属結合**により結びついている。
- シリコン(Si)は**ダイヤモンド格子構造**(単位格子中の原子数は8個)このとき原子間は**共有結合**で結びついている

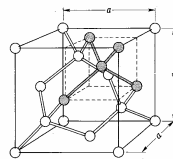
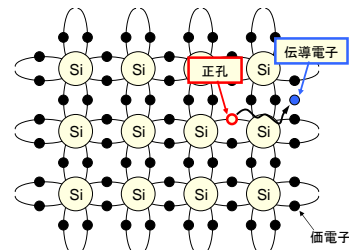


図 1-2 ダイヤモンド格子の模式図

5

## 1章 真性半導体とキャリア

- ゾーンメルティング法により非常に純度を高めた
- 転移などが存在しない単結晶
- 熱エネルギーによりごく一部の価電子が励起され、移動できる**正孔**と**伝導電子**が同数発生する。
- 室温では1.5X10<sup>16</sup>/m<sup>3</sup>程度と数少ないため**抵抗率が高い**



6

### 1章 不純物半導体とキャリア

- 第V族不純物(As,P): 自身はドナー(正)となり伝導電子を発生
- 第III族不純物(B): 自身はアクセプタ(負)となり正孔を発生
- 室温ではキャリア数=不純物数⇒抵抗率が下がる

(a) n型半導体(Asがドナー)      (b) p型半導体(Bがアクセプタ)

### 1章 第1章の問題

- 練習問題1
  - 抵抗体の断面の幅が1cm高さは5cm、長さが1mの時、抵抗値が10kΩであったときの物質の抵抗率がΩcmおよびΩmで求めよ。
  - 1Ωm=100Ωcmになっていることを確認して欲しい。
- 練習問題2
  - LSIの配線によく使用されるアルミニウムの抵抗率は約 $3 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$ である。
  - この配線の幅が1μm高さは0.5μm、長さが1mmのときの抵抗値を求めよ。
  - アルミニウムの導電率 $\sigma[\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$ を求めよ
- 練習問題3
  - 単立方、体心立方、面心立方格子について以下の問題に答えよ
  - 単位格子中にいくつの原子があるか？
  - それぞれの原子の中心座標を格子定数aを使ってあらわしなさい
  - 充填率(原子を剛体球と考えたときの単位格子堆積中にしめる剛体球の体積の割合)を求めよ
- 練習問題4
  - 銅(Cu)の結晶構造は面心立方格子である。
  - 格子定数が3.61Åであるときの密度を求めよ。
  - 但し銅の原子量63.55、アボガドロ数は $6.02 \times 10^{23}$

### 2章 シリコン原子の電子配置とエネルギー帯(1)

- Siの原子番号は14⇒1個のSi原子がもつ電子は14
- 1つの量子状態には1つの電子しか入ることができない ⇒ **パウリの排他律**
- 電子が存在する、一番外側の軌道⇒**最外殻電子軌道**

軌道			最大電子数	シリコン電子数
主量子数n	方位量子数l	方位量子数		
K殻	1	1s	0	2
		2p	1	6
L殻	2	2s	0	2
		3s	0	2
		3p	1	6
M殻	3	3s	0	2
		3p	1	6
		3d	2	10

### 2章 真性半導体のエネルギー帯図

- バンドギャップEgが小さいほど抵抗率が小さい

	Ge	Si	GaAs	C(ダイヤモンド)
Eg(eV)	0.66	1.11	1.43	6~7
$\rho(\Omega \text{cm})$	0.5	$2.3 \times 10^3$	$\sim 10^8$	$\sim 10^{12}$

### 2章 不純物半導体のエネルギー帯図

- P型: BのようなIII族の不純物はアクセプタとなって正孔(正電荷キャリア)が発生
- N型: AsのようなV族の不純物はドナーとなって伝導電子(負電荷キャリア)が発生

### 2章 導体, 半導体, 絶縁体のエネルギー帯図

- 導体: 伝導帯が部分的に電子で満たされている
- 半導体/絶縁体: エネルギーギャップEg依存
  - $0.1\text{eV} < E_g < 3\text{eV}$ : 半導体
  - $3\text{eV} < E_g$ : 絶縁体

**2章 第2章の問題**

- 用語のしっかりした理解
  - 価電子, 伝導帯・価電子帯, ドナー, アクセプタ, 伝導電子, 正孔などの言葉を理解しておくこと
  - 真性半導体・不純物半導体(P,N)のエネルギーバンド図をかけるようにしておくこと
- 練習(例)
  - N型半導体中では[ ]が多数キャリア, [ ]が少数キャリア
  - P型半導体中では[ ]が多数キャリア, [ ]が少数キャリア
- 教科書の演習問題【2・1】

13

**3章 フェルミ準位とキャリア密度**

- フェルミ準位が高い(水位が高い)場合
  - 伝導電子密度(わき水)は[増加する]
  - 正孔密度(泡)は[減少する]

14

**3章 キャリア密度から電気特性へ**

- いままでの話で
  - 不純物密度⇒キャリア密度とフェルミ準位導出

$n_i \approx 1.5 \times 10^{16} [m^{-3}]$

N型	P型
$n \approx N_D$ (3・19) $p \approx \frac{n_i^2}{N_D}$ (3・20) $E_F = E_i + k_B T \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$ (3・21)	$p \approx N_A$ (3・24) $n \approx \frac{n_i^2}{N_A}$ (3・25) $E_F = E_i - k_B T \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$ (3・26)

- キャリア密度と電気特性の関係へ
  - ある電界Eにおけるキャリア速度v
    - $v = \mu \cdot E$  (3・27)
  - 比例係数μを移動度と呼ぶ。単位は[m<sup>2</sup>/V・s]

15

**3章 (キャリア密度+移動度)⇒抵抗率・導電率**

- 抵抗率ρ, 導電率σの一般式
  - 正孔密度p, 正孔移動度μ<sub>p</sub>
  - 伝導電子密度n, 電子移動度μ<sub>n</sub>

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n)} \quad (3 \cdot 33)$$

- N型シリコンの場合  $n \gg p$  ので
  - $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q \cdot n \cdot \mu_n} = \frac{1}{q \cdot N_D \cdot \mu_n}$  (3・34)
- P型シリコンの場合  $n \ll p$  ので
  - $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q \cdot p \cdot \mu_p} = \frac{1}{q \cdot N_A \cdot \mu_p}$  (3・35)

16

**3章 第3章の問題**

- リンを  $5 \times 10^{23} [m^{-3}]$  ドープした半導体が  $[m^{-3}]$  ある。この半導体の室温における電子密度とフェルミ準位を求めよ
- 教科書演習問題【3・1】～【3・6】

17

**4章 ビルトインポテンシャルの導出**

- 教科書P.42は超重要
  - N型領域では(3・21)より
    - $E_F - E_m = k_B T \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$
    - $q \cdot V_{bi} = E_p - E_m = k_B T \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) + k_B T \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right) = k_B T \ln\left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}\right)$
    - $V_{bi} = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}\right) = 0.026 [V]$  (4・2)
  - P型領域では(3・26)より
    - $E_p - E_F = k_B T \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$

φはフェルミポテンシャル = -qφ<sub>p</sub>

$V_{bi} = \phi_n - \phi_p$  (4・1)

18

### 4章 PN接合電流(順方向)

復習

- 順方向電流は下記の2つのパスから成り立つ
  - 電子がN型からP型へ注入され、P型領域で拡散・再結合することで流れる電流  $J_n$
  - 正孔がP型からN型へ注入され、P型領域で拡散・再結合することで流れる電流  $J_p$

電子による電流密度  $J_n$

$$J_n = q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \left\{ \exp\left(\frac{qV_D}{k_B T}\right) - 1 \right\}$$

正孔による電流密度  $J_p$

$$J_p = q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} \left\{ \exp\left(\frac{qV_D}{k_B T}\right) - 1 \right\}$$

トータル電流密度  $J_D$

$$J_D = J_n + J_p = q \left( \frac{D_n}{L_n} n_{p0} + \frac{D_p}{L_p} p_{n0} \right) \left\{ \exp\left(\frac{qV_D}{k_B T}\right) - 1 \right\}$$

19

### 4章 PN接合ダイオードの降伏現象

- PN接合に逆バイアスを印加すると、逆方向飽和電流が流れる。さらに逆方向電圧を大きくするとある電圧で急激に大きな電流が流れる。これを降伏現象といい、この電圧を降伏電圧と呼ぶ
- 大きな電流が流れるメカニズムは以下の2つ
  - 電子雪崩(なだれ)降伏
 

PN接合に印加された電界により、大きな運動エネルギーを得て加速された電子が、結晶格子を構成している原子に衝突して電子正孔対を発生させて電流となる。発生した電子正孔対もまた空乏層中で加速され新たな電子正孔対を発生し、キャリア数が急激に増加して大きな電流となる。
  - ツェナー降伏
 

高濃度にドーピングされたPN接合の空乏層は非常に狭い。この狭いダイオードに高電圧を印加すると電子の波動性に基づくトンネル効果により電流が流れる。

$$J_D = J_S \left\{ \exp\left(\frac{qV_D}{k_B T}\right) - 1 \right\}$$

20

### 4章 電圧印加時の空乏層における蓄積電荷の変化

- 空乏層幅の変化により、PN接合に蓄積される電荷が変化

容量増加

容量減少

空乏層は、不純物密度の低いほうに広がる

$$N_A x_p = N_D x_n \quad (4 \cdot 23)$$

21

### 5章 N型半導体と金属との接触

- 金属とN型半導体を接触した場合
  - $\phi_m > \chi$ : ショットキー接触  $\Rightarrow \phi_B$  (障壁高さ) =  $\phi_m - \chi$
  - $\phi_m < \chi$ : オーム性接触

22

### 5章 P型半導体と金属との接触

- 金属とP型半導体を接触した場合
  - $\phi_m < \chi + E_G$ : ショットキー接触  $\Rightarrow \phi_B$  (障壁高さ) =  $\chi + E_G - \phi_m$
  - $\phi_m > \chi + E_G$ : オーム性接触

23

### 5章 オーム性接触の実現法

- オーム性接触を形成するためには
  - N型:  $\phi_m < \chi$
  - P型:  $\phi_m > \chi + E_G$
 単一の金属に対して、P,N両方の半導体にオーム性接触を形成できない
- 半導体表面に高不純物濃度領域を設けることにより、空乏層をきわめて薄くして、トンネル効果でオーム性接触を実現する。

24

### 7章 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

$0V < V_G < V_{th}$  (しきい値)

25

### 7章 エネルギーバンドのゲート電圧依存性 (P型基板)

- $V_G=0$ 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

26

### 7章 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、容量は小さいままとする

電荷の変化が生じる場所

27

### 7章 MOSTランジスタの容量

- 単位面積あたりの酸化膜容量  $C_{ox}$  は以下で示される

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

$\epsilon_{ox} = 3.9 \times \epsilon_0$   
酸化膜の比誘電率  
 $\epsilon_0 \approx 8.854 \times 10^{-12} [F/m]$   
 $t_{ox}$ : ゲート酸化膜厚

- ゲート酸化膜容量  $C_g$  は以下で示される

$$C_g \approx L \times W \times C_{ox}$$

28

### 7章 N型MOSTランジスタのドレイン電流式

- 線形領域と飽和領域とで2種類の式があるが、ピンチオフ電圧の定義 ( $V_{DS} = V_{GS} - V_{th}$ ) を覚えておけば線形式から飽和式が求まる。

$$I_{DS} = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} \left[ (V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$$

$V_{DS} = V_{GS} - V_{th}$  を代入 (7-10)

$$I_{DS} = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} \left[ \frac{1}{2} (V_{GS} - V_{th})^2 \right]$$

$V_{DS}$  に依存しない一定値 (7-11)

29

### 7章 CMOSランジスタの断面構造

- NMOSとPMOSを接続してインバータを形成

デバイス断面

回路

30

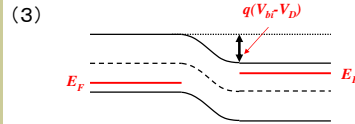
## 小テスト回答(以降)

31

## 小テスト問題【1】回答

(1) 左側

$$(2) V_{bi} = \frac{k_B T}{q} \ln \left( \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \right) = 0.026 \times \ln \frac{1.5 \times 10^{23} \times 6 \times 10^{23}}{(1.5 \times 10^{16})^2} = 0.026 \times 33.6 = 0.87 [\text{V}]$$



(4)  $I^+ > I^-$  ← PN接合はP型に正電圧を印加したときが順方向電流が流れる

(5)  $x_n : x_p = 1 : 4$  ←  $N_A x_p = N_D x_n$  不純物濃度の低い方へ空乏層は広がる

32

## PN接合の順方向特性

- 順方向電圧  $V_D (> 0)$  を印加するとビルトイン電圧  $V_{bi}$  が  $V_D$  だけ小さくなり、N型領域の多数キャリアである伝導電子がP型領域へ、P型領域中の多数キャリアである正孔がN型領域へ注入され電流が流れる。
- 注入されるキャリアは、高いエネルギーを持っている。あるエネルギー以上の電子数はボルツマン分布に比例するので、順方向電圧  $V_D$  の exponential に比例した電流が流れる。
- 空乏層領域は電圧印加により薄くなる

33

## PN接合におけるビルトイン電圧 $V_{bi}$

■ 求めた電位  $V$  は

- $-x_p < x < 0$  において

$$V(x) = \frac{q}{2\epsilon} N_A (x + x_p)^2$$

- $0 < x < x_n$  において

$$V(x) = \frac{q}{2\epsilon} [N_A x_p^2 - N_D (x - x_n)^2 + N_D x_n^2]$$

■ ビルトイン電圧は  $x = x_n$  を代入して

$$V_{bi} = \frac{q}{2\epsilon} (N_A x_p^2 + N_D x_n^2) \quad (4 \cdot 24)$$

■ 一方(4・22)式より

$$E_{max} = -\frac{qN_A x_p}{\epsilon} = -\frac{qN_D x_n}{\epsilon} \quad [x=0] \quad (4 \cdot 22)$$

$$N_A x_p = N_D x_n \quad (4 \cdot 23)$$

■ 空乏層の幅と不純物密度の積は一定  
⇒ 空乏層は不純物密度の少ないほうに広がりがやすい

34

## 小テスト問題【2】回答

$$(1) C_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{t_{ox}} = \frac{8.854 \times 10^{-12} \times 3.9}{10 \times 10^{-9}} = 3.45 \times 10^{-3} \quad [F/m^2]$$

$$(2) C_g \approx L \times W \times C_{ox} = 0.5 \times 10^{-6} \times 20 \times 10^{-6} \times 3.45 \times 10^{-3} = 3.45 \times 10^{-14} = 34.5 \quad [fF]$$

$$(3) \beta = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} = \frac{20}{0.5} \times 0.025 \times 3.45 \times 10^{-3} = 3.45 \times 10^{-3}$$

$V_{DS} < V_{GS} - V_{th}$  より線形電流

$$I_{DS} = \beta \left[ (V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] = 3.45 \times 10^{-3} \times \left\{ (5-1) \times 1 - \frac{1}{2} \right\} = 12.075 \quad [mA]$$

(4)  $V_{DS} > V_{GS} - V_{th}$  より飽和電流

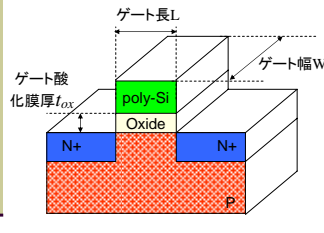
$$I_{DS} = \beta \left[ \frac{1}{2} (V_{GS} - V_{th})^2 \right] = 3.45 \times 10^{-3} \times \left[ \frac{1}{2} \times (5-1)^2 \right] = 27.6 \quad [mA]$$

35

(5)  $V_{GS} = 0V$  のときが大きい ← 空乏層がでけると、容量が小さくなる

## MOSTランジスタの容量(復習)

■ 単位面積あたりの酸化膜容量  $C_{ox}$  は以下で示される



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

$$\epsilon_{ox} = 3.9 \times \epsilon_0$$

酸化膜の比誘電率

$$\epsilon_0 \approx 8.854 \times 10^{-14} \quad [F/cm]$$

$t_{ox}$ : ゲート酸化膜厚

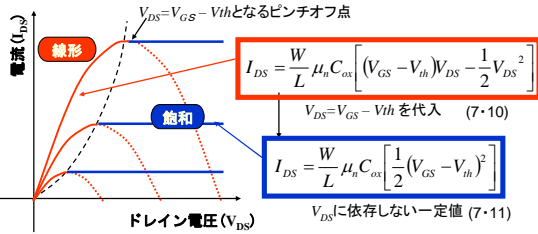
■ ゲート酸化膜容量  $C_g$  は以下で示される

$$C_g \approx L \times W \times C_{ox}$$

36

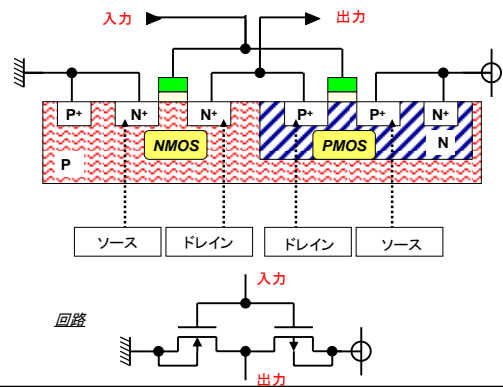
## N型MOSTランジスタのドレイン電流式

- 線形領域と飽和領域とで2種類の式があるが、ピンチオフ電圧の定義 ( $V_{DS}=V_{GS}-V_{th}$ )を覚えておけば線形式から飽和式が求まる。



37

## 小テスト問題【3】回答



38

## 定期試験

- 持ち込み物件
  - 関数電卓のみ
  - 教科書, レジユメ, ノート等は一切不可
- 時間60分, 大問5問
- 成績評価
  - 成績
  - 定期試験 100点
  - 小テスト(15点×2回), レポート5点を加点する

39