

半導体工学(1)

半導体とシリコン結晶

電子情報デザイン学科 藤野 毅 1

講義予定内容

(1) イントロダクション	第1章
(2) 半導体とシリコン結晶	第1章
(3) 半導体のエネルギーバンド	第2章
(4) 半導体のキャリア密度とフェルミ準位	第3章
(5) 半導体の電気伝導	第3章
(6) PN接合の電気特性	第4章
(7) PN接合の容量特性	第4章
(8) 金属と半導体接触時のエネルギー準位	第5章
(9) 金属と半導体接触時の電気的特性	第5章
(10) バイポーラトランジスタ	第6章
(11) MOSTランジスタ動作原理	第7章
(12) MOSTランジスタの電氣的特性	
(13) CMOSLSIの製造プロセス	
(14) まとめと復習	

2 後期の「集積デバイス工学」でより深く、応用的な講義を行う

半導体以前

■ 半導体より前の電子機器(ラジオ)

- 微弱な電波信号を増幅する
⇒ 電圧で電流を制御
- 真空管を利用

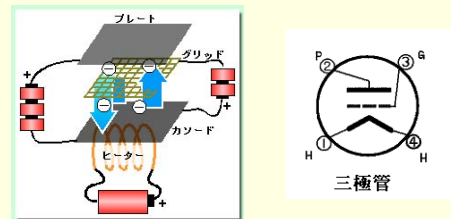


様々な真空管 真空管ラジオ

3 <http://homepage.mac.com/ryomasuda/VT/radio/> より引用

真空管(三極管)の動作原理

- カソードをヒーターで加熱: 熱電子放射
- プレートに正の電圧: カソードからプレートに電子が移動
- カソードとプレート間に網目状のグリッドを挿入し、グリッドの負の電圧で電子を制御

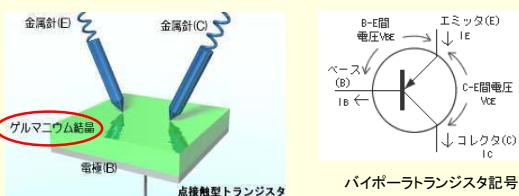


4 <http://homepage.mac.com/kan0ken1/audio/principle.html> より引用

初めての固体増幅器

■ 点接触型トランジスタ @1948年

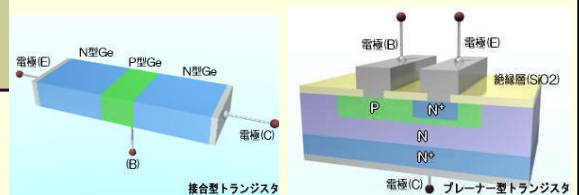
- ショックレー・パーディーン・ブラッデン(1956年ノーベル賞)
- 金属針(E)にプラスの電圧
- 金属針(C)にマイナスの電圧
- 電極(B)の電圧で、E(emitter)とC(collector)の間の電流を制御



5 <http://www.nanoelectronics.jp/kaitai/transistor/1.htm> より引用

接合型バイポーラトランジスタ

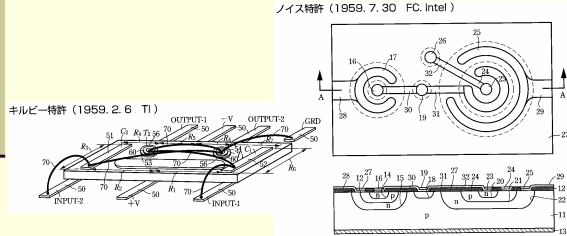
- 点接触型トランジスタの不安定さを改善
- さらに大量生産に適するように
⇒ プレーナー型トランジスタ
⇒ 集積回路へ



6

集積回路(IC)の基本特許

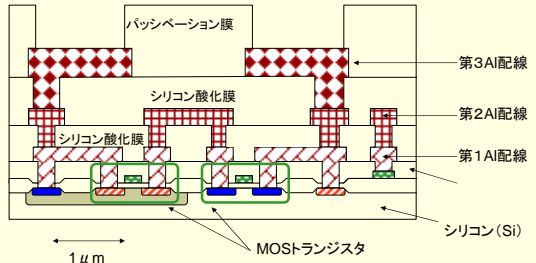
- キルビー特許(テキサスインスツルメンツ)
⇒2000年ノーベル賞
- ノイス特許(フェアチャイルド)



7

現在の大規模集積回路(LSI)の構造

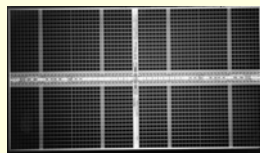
- **MOSTランジスタ**と、トランジスタ間を接続する金属(アルミ)配線により形成されている。



8

ダイナミックメモリ(DRAM)の高集積化

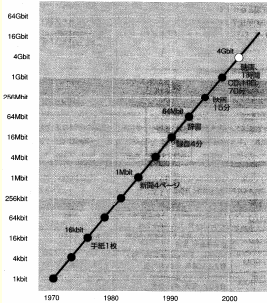
- メモリ容量が4倍/3年で進化(**ムーアの法則**)



256MbitDRAM(プロトタイプ)チップ写真
三菱電機技術報告1998年3月号より引用



メモリモジュール(168ピンDIMM)



「システムLSIのできるまで」日刊工業新聞社 より引用

9

半導体とは？(ラフな定義)

- オームの法則: 抵抗値Rが小さいほど電気をよく通す (V:電圧, I:電流)

$$R = \frac{V}{I}$$

- **導体**: 銅やアルミニウムなどの金属のように電気をよく通す物質
- **絶縁体**: 木やガラスのように電気を通さない物質
- **半導体**: その中間の性質をもつ

- 抵抗値は物質の形状で変化するため、物質固有の電気の通しやすさを表す指標としては不適当。
物質固有の値として、**抵抗率 ρ (resistivity)** または **導電率 σ (conductivity)**

10

半導体になる物質は？

- シリコン(Si)やゲルマニウム(Ge)などの第IV族の元素半導体
- 第III族のガリウム(Ga)と第V族のヒ素(As)が同じ割合で結晶化した化合物半導体

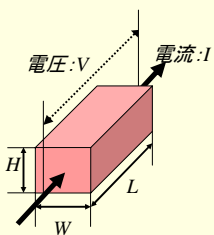
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
H							He
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr

元素の周期律表

11

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⁻¹・m⁻¹]



・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

$$R = \frac{L}{S} \times \rho$$

S:断面積
=W×H

(1・1式)

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

12

様々な物質の導電率(室温)

- 導体金属はほぼ一定の導電率を持っているのに対して、半導体は不純物量や温度によって導電率が大きく異なる
⇒電気を運ぶ**キャリア**の数が変化するため

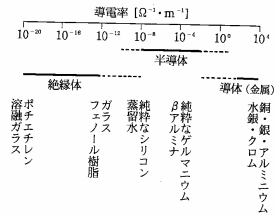


図 1-1 さまざまな物質の導電率(室温)

13

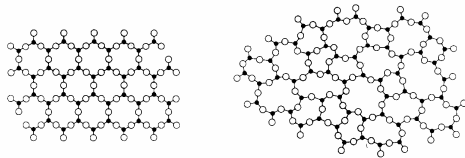
練習問題

- 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を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のときの抵抗値をもとめよ。
 - アルミニウムの導電率 $\sigma [\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$ を求めよ

14

結晶と非晶質

- 結晶: 原子が規則的に配列した固体
 - 単結晶(single crystal): 固体全体が1つの結晶である場合
 - 多結晶(poly crystal): 個体が多くの小さな結晶から構成されている場合
- 非晶質(アモルファスamorphous): 原子が不規則に配列している固体 例: ガラス

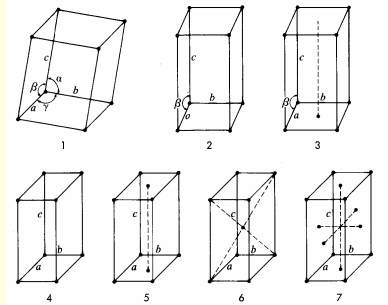


(a) 結晶構造, (b) アモルファス構造の図示

15

ブラベ格子1

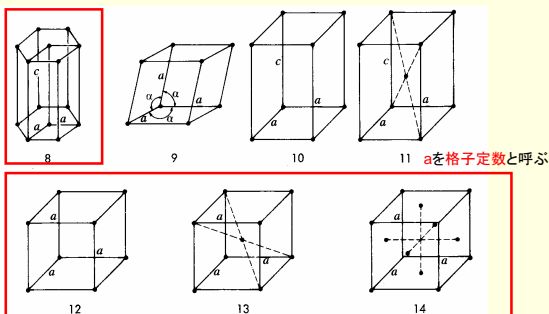
- 結晶はブラベ格子と呼ばれる14個の格子に分類される



16

ブラベ格子2

- 重要: 六方晶(8)、単純立方(12)、体心立方(13)、面心立方(14)



17

練習問題

- 練習問題1
 - 単純立方、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2
 - 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 6.02×10^{23}

18

補足説明(ノート)

■ アボガドロ数

- 物質1モルとそれを構成する粒子(分子、原子、イオンなど)の個数との対応を示す比例定数

■ 1モル

- 12gの ^{12}C 原子の数と同数個の粒子集団を1モルト呼ぶ

19

結晶の種類(ノート)

■ イオン結晶

- 正のイオンと負のイオンが静電気力によって結合

■ 共有結合結晶

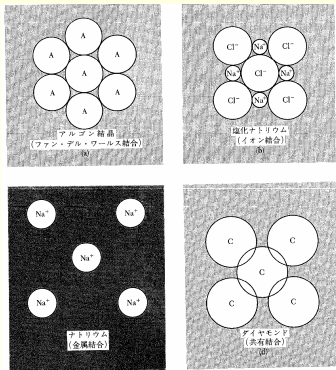
- 原子の価電子が2つの原子に共有されて結合

■ 金属結晶

- 原子の価電子が自由電子となって金属中で自由に動き回り、結晶全体で共有されていて原子を結合
(分子結晶: 分子間に働くファンデルワールス力)

20

結晶の種類(図で示す)



21

ダイヤモンド格子構造

■ 共有結合性の結晶

- シリコン(Si)はダイヤモンド格子構造
- 空間格子は面心立方格子

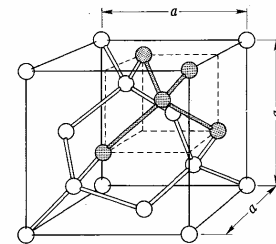


図 1.2 ダイヤモンド格子の模式図

22

ミラー指数

■ 教科書 図1.4

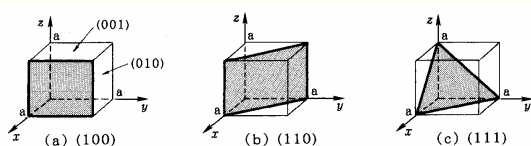
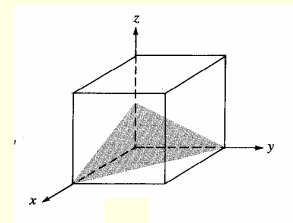


図 1.4 立方晶系における主要結晶面を表すミラー指数

23

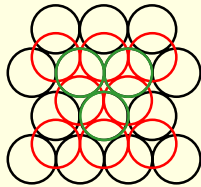
ミラー指数練習問題



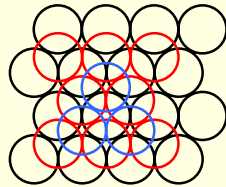
24

原子の重ね方(補足)

■ 最密充填構造



六方最密充填構造



面心立方構造