講義名　半導体物性(a)　(Semiconductor Physics (a))

推奨学期　4 学期　科目分類　準必修　単位数 2-0-0

担当　a:　真島 豊　応用セラミックス研究所
すずかけ台 R3 棟 410 号室（内線 5309）
majima<at>msl.titech.ac.jp

【講義のねらい】

半導体の入門として，物質の構造，固体内電子の状態などについて学んだ後，固体の電気伝導理論，分布則について学習する．さらに，半導体中の電気伝導現象の基礎である，キャリア連続の方程式について応用を通して学習する．

【講義計画】（平成 21 年度）

10/6(火)　1. 結晶構造：結晶の並進対称性，ブラベ格子，ミラー指数

10/13(火)　2. 固体のバンド構造の基礎：定性論，水素原子，分子から固体，金属・半導体・ 絶縁体

10/20(火)　3. 固体のバンド構造Ⅰ：量子力学の基礎，パウリの排他律、無限のポテンシャルに閉じ込められた電子

10/27(火)　4. 固体のバンド構造Ⅱ：周期構造中の電子，許容帯，禁制帯，有効質量，電子と正孔

11/5(水)　5. キャリア：状態密度，分布則，真性キャリア濃度

11/10(火)　6. ドーピング：ドーピング，電子濃度・正孔濃度，温度特性

11/17(火)　7. 半導体中の電気伝導：ドリフト速度，移動度，導電率，抵抗率

12/1(火)　8. 中間試験

12/8(火)　9. 伝導電子の散乱とホール効果

12/15(火)　10. ドリフト電流と拡散電流

12/22(火)　11. 少数キャリア連続の方程式

1/12(火)　12. pn 接合

1/19(火)　13. pn 接合の電流－電圧特性（ダイオード特性）

1/26(火)　14. 金属−半導体接触

2/2(火)　15. 期末試験

【成績評価】

講義内容の理解度を中間試験(35%)，期末試験(35%)，演習(30%)で成績を評価する．

【教科書・参考書等】

教科書：小長井誠著：半導体物性（培風館）
参考書：Semiconductor Fundamentals: Robert F. Pierret (Addison-Wesley Publishing. Co.)

【関連科目】

「化学第一」，「化学第二」，「電磁気Ⅰ」，「物理学 A」を履修していることが望ましい．

【その他】

毎回，演習問題を課す．なお，特にオフィスアワーは設けない．質問がある場合にはメールで質問をするか，居室を訪ねてください．

【今日の講義のポイント】

結晶構造の基礎として、結晶の対称性から格子面、結晶の種類などを学び、半導体である Si 結晶の構造を理解する

1．結晶構造：結晶の並進対称性，ブラベ格子，ミラー指数

・ 結晶と非晶質

結晶―原子の定位置が規則的に配置されている固体

・ 単結晶―規則性が物質の端から端まで続いているもの

Si, Ge, GaAs

・ 多結晶―小さな単結晶が多数集まった結晶

非晶質(アモルファス)―長い距離にわたっての規則性はない

<u>結晶の対称性</u>

・ 結晶における対称操作

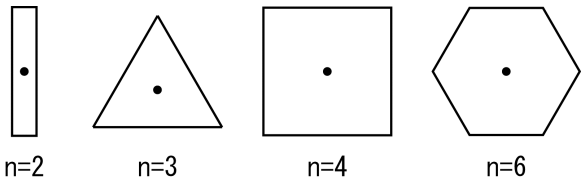
回転―結晶内のある軸の周りに回転させたとき $360°/n$ で元の結晶形と重なる

反射―結晶内のある平面に対して、その両側にある結晶が鏡像の関係にある

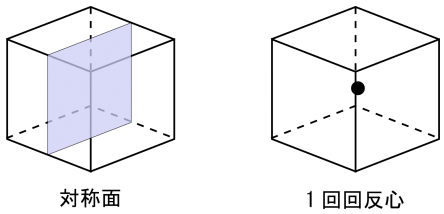
反転―結晶内の１点を通る全ての直線上で、その点を境にして両側の距離が等しくなる

８つの独立な対称操作

対称要素	対称操作
1 回回転軸(n=1)	360° の回転
2 回回転軸(n=2)	180° の回転
3 回回転軸(n=3)	120° の回転
4 回回転軸(n=4)	90° の回転
6 回回転軸(n=6)	60° の回転
対称面(m)	反射
1 回回反心($\bar{1}$)	反転
4 回回反心($\bar{4}$)	90° 回転と反転



平面における回転操作と回転軸



反射と反転

・ 七晶系

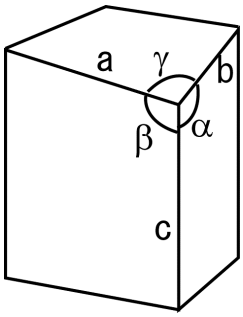
結晶は対称性により 7 種類に分類される

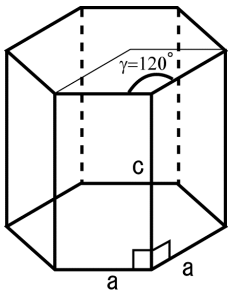
⇒七晶系

（さらに細かく見ると 32 晶属に分類される）

七晶系

立方晶系	a＝b＝c	α＝β＝γ＝90°
正方晶系	a＝b≠c	α＝β＝γ＝90°
斜方晶系	a≠b≠c	α＝β＝γ＝90°
単斜晶系	a≠b≠c	α＝β＝90°，γ≠90°
三斜晶系	a≠b≠c	α≠β≠γ
三方晶系	a＝b＝c	α＝β＝γ≠90°
六方晶系	a＝b≠c	α＝β＝90°，γ＝120°





<u>結晶の周期性―格子</u>

「結晶は規則的に繰り返された配列を持つ」

格子点：結晶中の等価な点

格子点の集合→格子(2 次元では平行四辺形、3 次元では平行六面体)

格子の中で最も小さい構成要素：単位格子(単位胞)

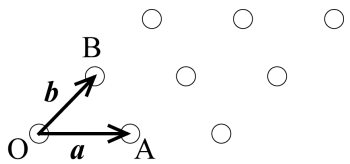
2 次元面内において任意の格子点は以下の形で表すことが可能

$\mathbf{R} = p\mathbf{a} + q\mathbf{b}$　(p, q: 0 を含む整数)

a, b: 基本ベクトル

|**a**|=a, |**b**|=b: 格子定数

a, b のなす角: 軸間角



2 次元格子

同様に 3 次元空間において任意の格子点は以下の形で表すことが可能

$\mathbf{R} = p\mathbf{a} + q\mathbf{b} + r\mathbf{c}$ （p, q, r: 0 を含む整数）

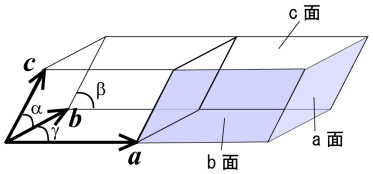
a, b, c: 基本ベクトル

|**a**|=a, |**b**|=b, |**c**|=c: 格子定数

軸間角は図のようにする

$$\alpha = \cos^{-1}\frac{\mathbf{b}\cdot\mathbf{c}}{|\mathbf{b}||\mathbf{c}|},\quad \beta = \cos^{-1}\frac{\mathbf{c}\cdot\mathbf{a}}{|\mathbf{c}||\mathbf{a}|},\quad \gamma = \cos^{-1}\frac{\mathbf{a}\cdot\mathbf{b}}{|\mathbf{a}||\mathbf{b}|}$$

単位格子の体積：$V = \mathbf{c}\cdot(\mathbf{a}\times\mathbf{b}) = \mathbf{a}\cdot(\mathbf{b}\times\mathbf{c}) = \mathbf{b}\cdot(\mathbf{c}\times\mathbf{a})$



3 次元格子（空間格子）

格子面：空間格子において 3 点の格子点が形成する平面

平面の式：ha+kb+lc=n

ミラー指数 $(h\ k\ l)$　h, k, l：整数

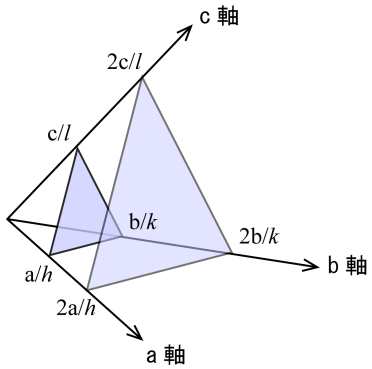
※注意 (h, k, l)と”,”をつけて書いてはいけない

格子面が結晶軸と平行な場合：0 を用いる

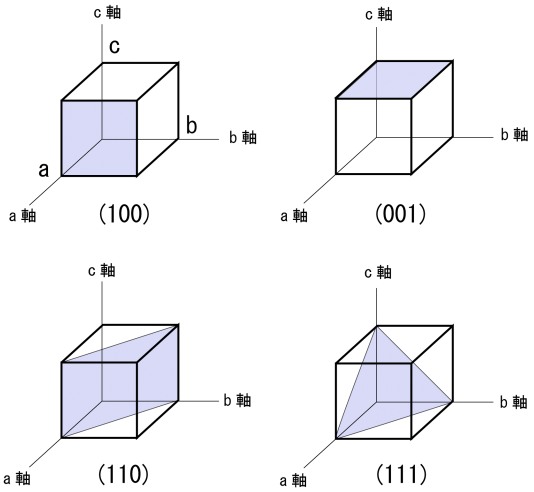
ex.：$(0\ k\ l)$ ― a 軸と平行

指数が負の値のとき：上に¯をつけて表す

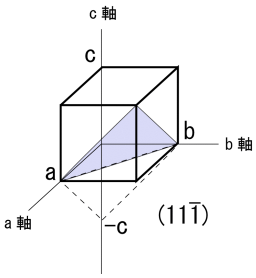
ex：$(\bar{h}\ k\ l)$



直交座標系における格子面およびミラー指数を以下に示す



いろいろなミラー指数

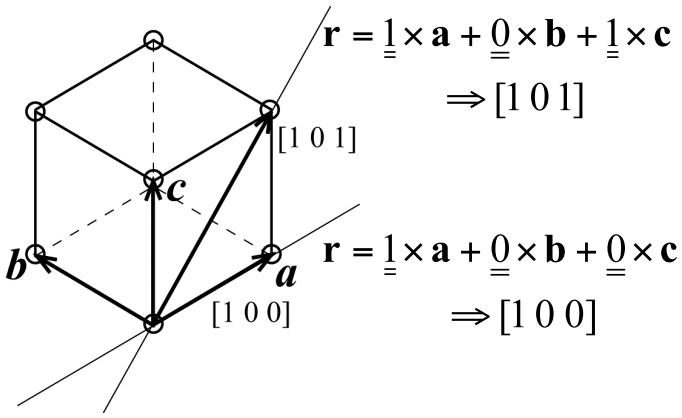


負のミラー指数

晶帯軸：2 点の格子点を通る直線

原点に最も近い格子点の座標を u, v, w (すべて整数)とすると、晶帯軸はこの格子点の座標で代表される

→[u v w]と表す



<u>結晶の分類</u>

- 対称要素のみを考える

  →晶族（7 群 32 晶族）

- 空間格子の対称性のみを考える

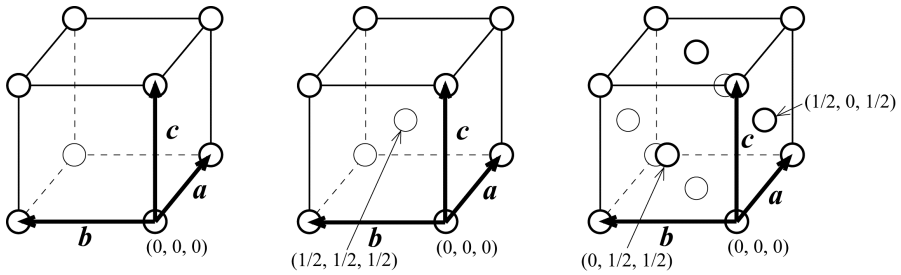
  →ブラベ格子（7 群 14 種）

立方晶系に属するブラベ格子　（立方晶系：a＝b＝c, α＝β＝γ＝90°）

P　単純立方格子(Simple Cubic, sc)

I　体心立方格子(Body Centered Cubic, bcc)

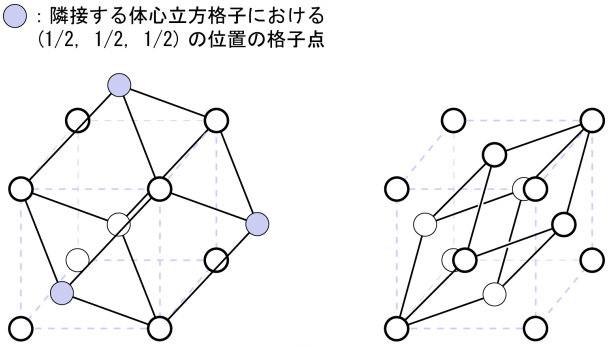
F　面心立方格子(Face Centered Cubic, fcc)



sc　　bcc　　fcc

	sc	bcc	fcc
単位格子内に含まれる格子点の数	$\frac{1}{8} \times 8 = 1$ 個	$\frac{1}{8} \times 8 + 1 \times 1 = 2$ 個	$\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$ 個

格子点を 1 つのみ含む単位胞：基本単位胞（primitive cell）



bcc　　fcc

bcc, fcc を基本単位胞で書き直したもの

空間群と実際の結晶

対称要素とブラベ格子を矛盾なく組み合わせることのできる独立な対称操作は 230 通り存在する

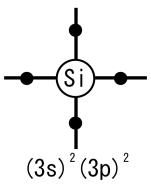
⇒230 の空間群（結晶の骨組みの数）

結晶の結合機構

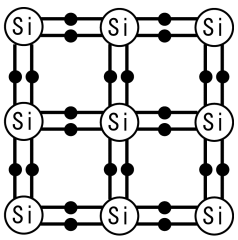
結合

① 共有結合 Si, Ge, GaAs
② イオン結合 NaCl, LiF
③ 金属結合
④ ファンデルワールス力 希ガス結晶 Ar, Xe

Si (シリコン)：代表的な半導体材料



孤立原子（Si）

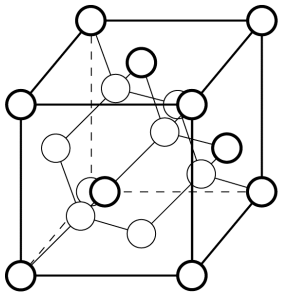


共有結合

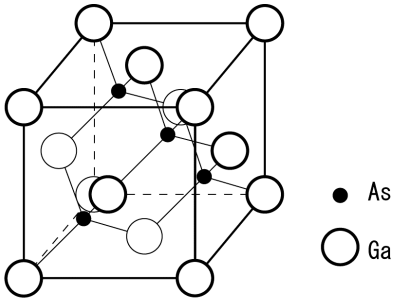
・1 個の Si 原子は 4 個の Si 原子に取り囲まれている
　→配位数が 4
・Si 原子の外殻電子数は 4 個

⇩

取り囲まれた 4 個の Si 原子と
電子を 1 個ずつ共有している
（共有結合）

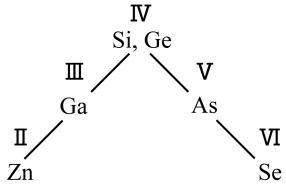


Si の結晶構造
（ダイヤモンド型構造）



GaAs の結晶構造
（閃亜鉛鉱構造）

元素半導体；Si, Ge

化合物半導体：Ⅲ-Ⅴ族化合物半導体 ex. GaAs

Ⅱ-Ⅵ族化合物半導体 ex. ZnSe