

# 材料デザイン学 第 10 回

## 光学的特性 / 発光デバイス

岸田 逸平

Last-modified: 2016/10/12 22:25:29.

### 目次

1	ダイオード	2
1.1	ダイオードの仕組み	2
1.2	発光ダイオード, LED	3
2	結晶中の電子	4
2.1	1 原子の回りの電子	4
2.2	2 原子分子	6
2.3	多原子からなる結晶	6
2.4	バンド構造	8
2.5	運動量も含めたバンド構造	8
3	発光ダイオードに必要な特性	11
3.1	Si は発光しない	11
3.2	光の三原色	12
3.3	青色 LED	12
3.4	バンドギャップ以外に解決すべき課題	13
3.5	現在、LED に残されている課題	13
4	まとめ	14
4.1	前回コメント	14

4.2	前回課題 . . . . .	14
4.3	小レポート . . . . .	16

前回は半導体の話をしたが、今回は特に LED (発光ダイオード) に注目してみよう。

# 1 ダイオード

## 1.1 ダイオードの仕組み

LED はダイオードの一種なので、まずダイオードの一般論について述べる。

p 型半導体では正孔がキャリアとなり、n 型半導体では自由電子がキャリアとなる。(Fig. 1(a), (b)) ここで、p 型と n 型半導体を直接接合した素子を考える。このような素子では、一方向にのみ電流を流すという \_\_\_\_\_ 作用が生じる。

順方向 この素子に対して Fig. 1 (c) の方向に電圧をかけた場合、p-n 接合界面を挟んで各キャリアが集まるように移動し、p-n 接合界面近傍で正負のキャリアが \_\_\_\_\_ する。この方向の電流は連続的に流れる。

逆方向 この素子に対して Fig. 1 (d) の方向に電圧をかけた場合、p-n 接合界面を挟んで各キャリアが離れるように移動し、電極端近傍で滞留してしまい、電流は継続的に流れない。

\*1

## エネルギーのやりとり

ダイオードの順方向に電流を流すと p-n 接合界面で自由電子と正孔が結合し、対消滅する。この際、自由電子と正孔の準位差 (バンドギャップ) に相当するエネルギーが \_\_\_\_\_ される。これはエネルギー保存則の一つの表現とも言える。電子や正孔はエネルギーを失うが、系全体ではエネルギーの総量が保存されなければならない。通常のダイオードでは、 \_\_\_\_\_ エネルギーの形態でエネルギーが放出されることが

\*1 ここで示したのが高校で習う物理で理解できる程度の説明である。しかし、これは簡略化しすぎていて現象を説明し切れていない。たとえば、

- Fig. 1 (c) の p-n 界面近傍で正負キャリアの対消滅が生じているが、Fig. 1 (d) の p 型半導体と導線の界面近傍では正負キャリアの対消滅が生じないのは何故か？
- Fig. 1 (c) の p 型半導体と導線の界面近傍では正負キャリアの対生成が生じているが、Fig. 1 (d) の p-n 界面近傍で対生成が生じないのは何故か？

このあたりのことはより正確には、バンド構造とフェルミエネルギーの変化という形で理解できるが、例によって本講義では割愛する。本講義は特定の領域を深く掘り下げるのが主眼ではない。

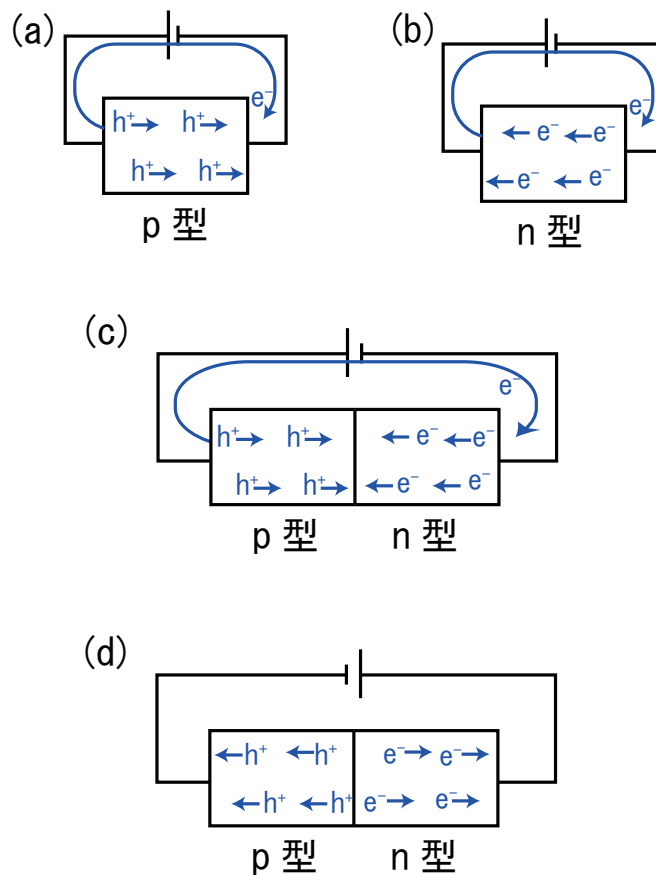


図1 (fig20131219f)

多い。

## 1.2 発光ダイオード, LED

発光ダイオードはダイオードの一種である。前節で述べた通常ダイオードと同様に、整流作用を有し、順方向には電流を流すが逆方向には電流を流さない。<sup>\*2</sup>順方向に電流を流したときに p-n 界面近傍でエネルギーを放出する。ここまでは両者で共通である。通常ダイオードと大きく異なるのは、発光ダイオードでは放出されるエネルギーが主にエネルギーである、という点である。

では、放出されるエネルギーの形態はどのように決まるのだろうか。それを知るには物質中の電子の挙動をもう少し詳しく知る必要がある。

<sup>\*2</sup> ただし、耐電圧は低く、実用に耐えるものではない。

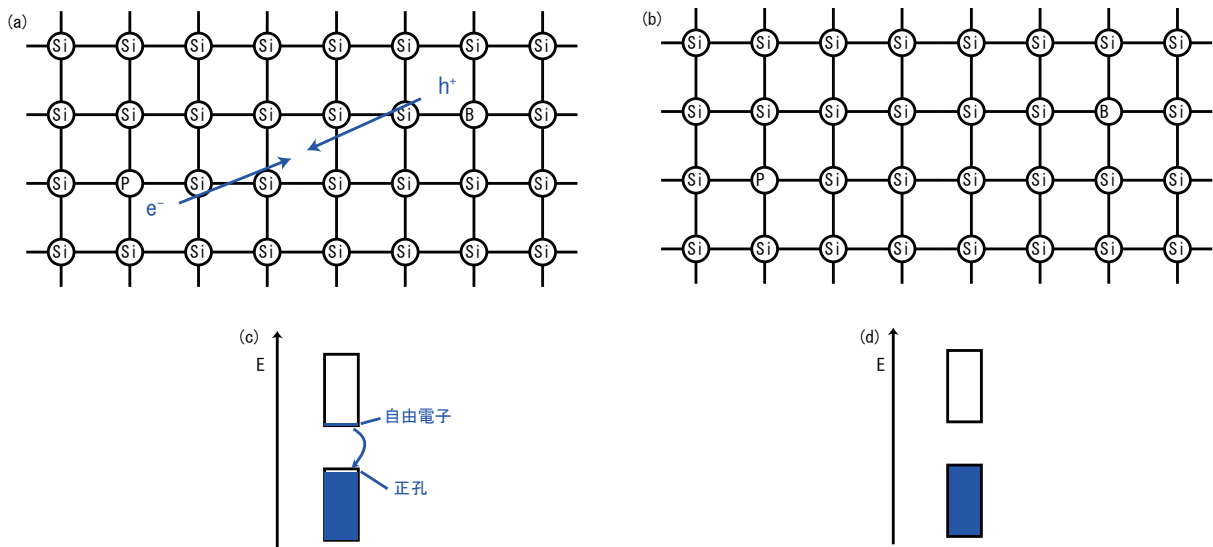


図 2 (fig20151210a)

## 2 結晶中の電子

固体の性質は主に電子の挙動によって決定される。電子は \_\_\_\_\_ であり、また同時に \_\_\_\_\_ である。古典論ではこれら二者は二律背反であったが、実験事実として電子はその両方の性質を持っている。

### 2.1 1 原子の回りの電子

電子が取れる状態 原子核の周囲で電子は好き勝手に自由な状態を取れるわけではない。古典論では太陽の周囲を回る惑星よろしく電子が原子核の回りを周回しているイメージだが、この描像は勿論正確ではない。電子は粒として周回しているのではなく、波としてたゆたっていると考えられる。この波も実在する何かが波として運動しているのではない。波動関数という謎の物理量が位置によって変位しているという静的なイメージを持って欲しい。この波は原子核周囲で一周したときに丁度繋がる条件でのみ存在できる。( Fig. 3 )

orbital この条件のことを orbital と呼ぶ。日本語の術語として「軌道」という単語が該てられているが、これは惑星の軌道 ( orbit ) と紛らわしく、古典的なイメージの一本の道筋があるような誤解を招きかねないので注意が必要である。本稿では orbital で統一する。

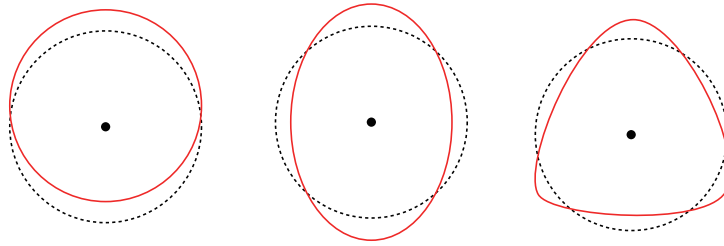


図 3 (fig20121113a) 電子 orbital の模式図。黒丸が原子核、破線が原子半径に沿った円、実線が orbital である。正確には orbital は 1 本の線で表されるわけではなく 3 次元的な広がりをもっている。

「一周したときに丁度繋がる条件」より、orbital の波数は整数しか許されず、  
な値となる。またエネルギーは波数に依存するため、これも離散的な値となる。  
 このことから 1 個の原子周囲の電子が持ちうるエネルギー準位は Fig. 4 (a) のようになる。

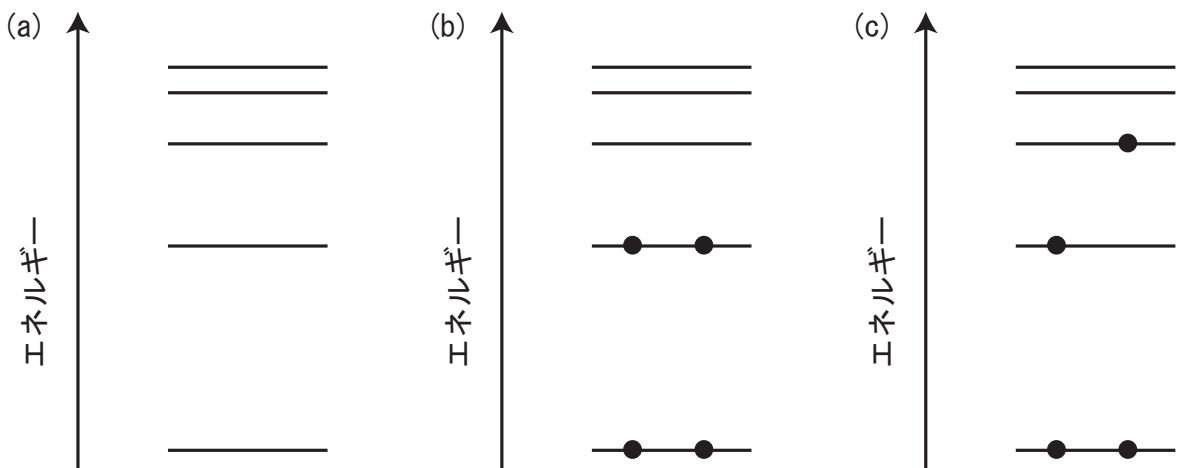


図 4 (fig20121113b) 原子が持つエネルギー準位の模式図。

準位はあくまで電子が入れるポテンシャルの高さを示すだけのものである。たとえば言えば座席のようなもので、空席だとエネルギーはなく、そこに電子が入って初めて有限のエネルギーを持つことになる。orbital に入った 1 個の電子はその準位のエネルギーを持つことになり、その系に存在する全ての電子のエネルギーの総和がその物質のエネルギーとなる。

に拠れば、2 つ以上の電子は  
 全く同じ状態を取ることはできない。状態とはとりあえずエネルギー準位だと思っておこ

う。<sup>\*3</sup> このことから、1つの orbital にはスピンの異なる2つの電子しか入ることができない。Fig. 4 (a) の orbital 群に電子が4個入ったときの基底状態を Fig. 4 (b) に示す。また、励起状態の一例を Fig. 4 (c) に示す。

準位の遷移 自然界はエネルギーの低い状態に落ち着こうとするので、通常電子は基底状態の準位を占有しようとする。この電子に適切なエネルギーを与えてやるとより上の準位に \_\_\_\_\_ する。このエネルギーは通常 \_\_\_\_\_ で与えられる。励起状態の電子は一定の確率でより低位の準位に落ち込み、その差分のエネルギーを光として放出する。

## 2.2 2原子分子

単原子分子で Fig. 4 (a) のようであったエネルギー準位は、原子の個数が複数になると異なる様相を呈するようになる。2原子間の相互作用によって形成される分子 orbital の模式図を Fig. 5 に示す。単原子について1つの orbital ずつだったものが相互作用して2つの orbital が形成される。

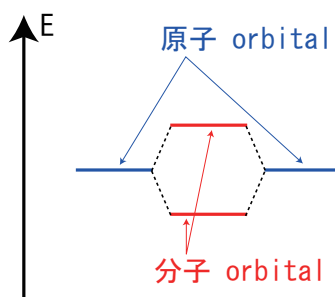


図5 (fig20121113c) 2原子分子が持つエネルギー準位の模式図。左右の2つの原子 orbital がそれぞれの原子の準位 ( Fig. 4 のうちの任意の1本) を示し、中央の分子 orbital がこの分子が持つ準位を示している。

## 2.3 多原子からなる結晶

物質を構成する原子の数が増えるほど、その間に相互作用が生じる。単原子では1つの準位を持つ orbital だったものが、アボガドロ数程度の多原子では orbital が密集してほとんど連続したバンド (帯) のように見えるようになる。これを示した模式図を Fig. 6 に示す。

<sup>\*3</sup> 正確には、主量子数・方位量子数・磁気量子数・スピン磁気量子数の4つの量子数がある。複数の粒子のどの2つも、4つ全ての量子数が同じになっているものがないということ。

図右端では連続しているように見えるが、実質は 1 本ずつの orbital の集合である。そのため  $N_A$  個の原子からなる結晶で  $N_A$  本の orbital からなるバンドならば、そのバンドには電子を \_\_\_\_\_ 個しか収容できない。

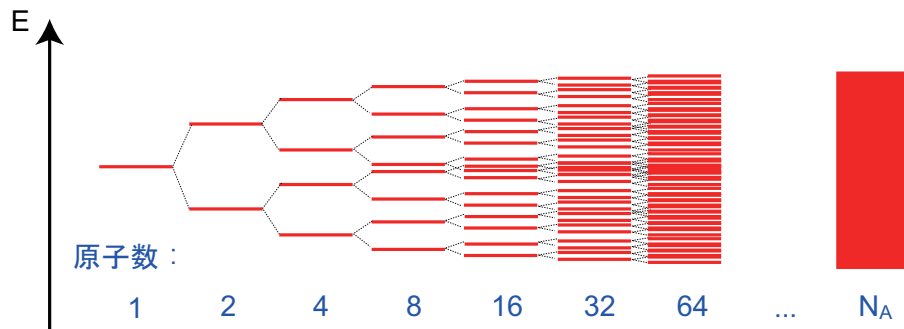


図 6 (fig20121113d) 物質を構成する原子数と準位の関係の模式図。アボガドロ数  $N_A$  個オーダーの原子の集合により、準位の数が増加して帯状に広がる。右端では塗り潰されたように見えるが、これは orbital を電子が占有している事ではなく、orbital が密集していることを示している。

1 個の原子でも複数の orbital を持っていた。多原子からなる固体では、このそれぞれの orbital に由来するバンドが構成される。<sup>\*4</sup> によって、固体は orbital の集合であるバンドを複数持つことになる。それらのバンドの中でエネルギーの低いところから電子が占有されていく。下から 2 番目のバンドまで丁度埋まった場合の模式図を Fig. 7 に示す。この図では下から 2 番目までを完全に占有して 3 番目のバンドは完全に非占有となっており、その間にバンドギャップがある。

Q. マクロな (たとえば 1 mol の原子からなる) 固体とかでは電子がものすごく沢山ある筈なのに、価電子帯チョッキリになるの？

固体に含まれる原子 1 個ごとに、1 つの軌道が追加される。その数がアボガドロ数程度の巨大な数になって帯のように見えたとしても、それは 1 つ 1 つの軌道の集合体であり、それに対応した数の軌道が含まれる。電気的中性条件により、物質は原子核の正電荷に対応する数の電子を内部に持つことになることから、電子も同様に個数に対応した数だけが固体に含まれる。このため、完全結晶ではバンドを埋めつくす丁度の数の電子が入ることがしばしばある。

<sup>\*4</sup> 幅が重なっていればエネルギー的には 1 つに見えてしまうこともある。

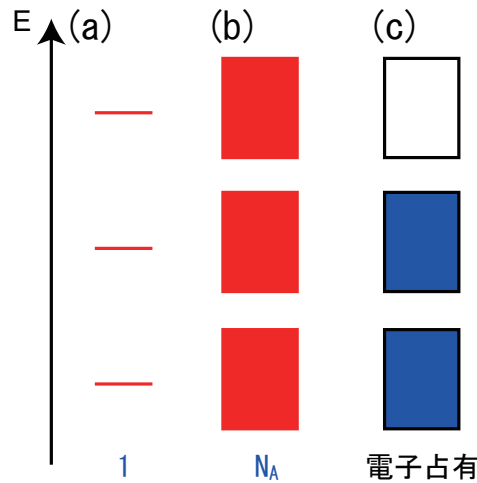


図 7 (fig20121113e) 結晶のバンド構造と電子占有の模式図。

## 2.4 バンド構造

結果、結晶において電子の取りうるエネルギーをまとめると、Fig. 8 のような形状として分類できる。異なる状態を下から順に埋めていき、完全に占有されたバンドは充満帯と呼ばれる。半導体において充満帯は \_\_\_\_\_ と呼ばれる。<sup>\*5</sup> 価電子帯の直上には電子が取ることができない \_\_\_\_\_ が存在し、その上に \_\_\_\_\_ が存在する。禁制帯のエネルギー的な幅を \_\_\_\_\_ と呼ぶ。半導体の電子物性は主にこの \_\_\_\_\_ によって決定される。

## 2.5 運動量も含めたバンド構造

これまで描いてきたバンド図はエネルギー準位だけを表したものだ。電子はエネルギーと同時に運動量を持つので、本来は運動量とエネルギーを同時に表現すべきである。Si についてそれをした模式図が Fig. 9 である。Fig. 9 (a) の縦軸はこれまでと同様エネルギーであるが、横軸に  $k$  軸が追加されている。この  $k$  は大雑把には運動量を表すものだ。<sup>\*6</sup> Fig. 9

<sup>\*5</sup> 良導体において中途半端に満たされたバンドも価電子帯と呼ばれる。

<sup>\*6</sup> 正確には逆空間 ( $k$  空間) における格子点。3次元空間のベクトルを横軸という1次元として投影している。



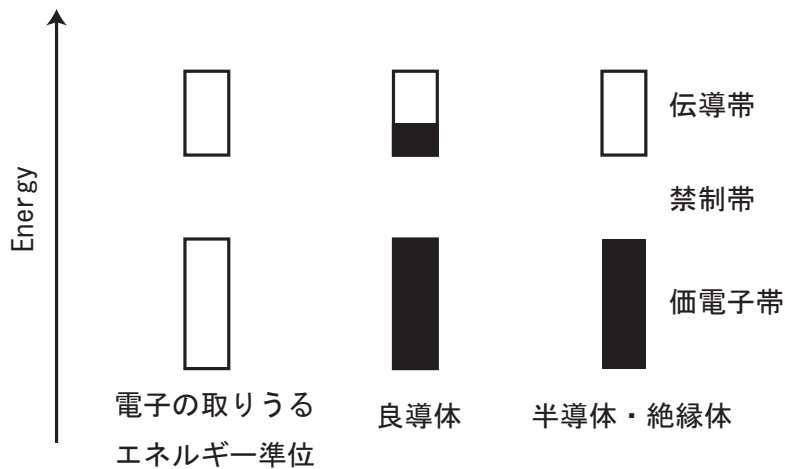


図 8 (fig20111110a)

(a) の横軸の情報を省略して縦軸のみに投影すると、見慣れた Fig. 9 (b) の形になる。これは Fig. 8 の右端のものに対応する。

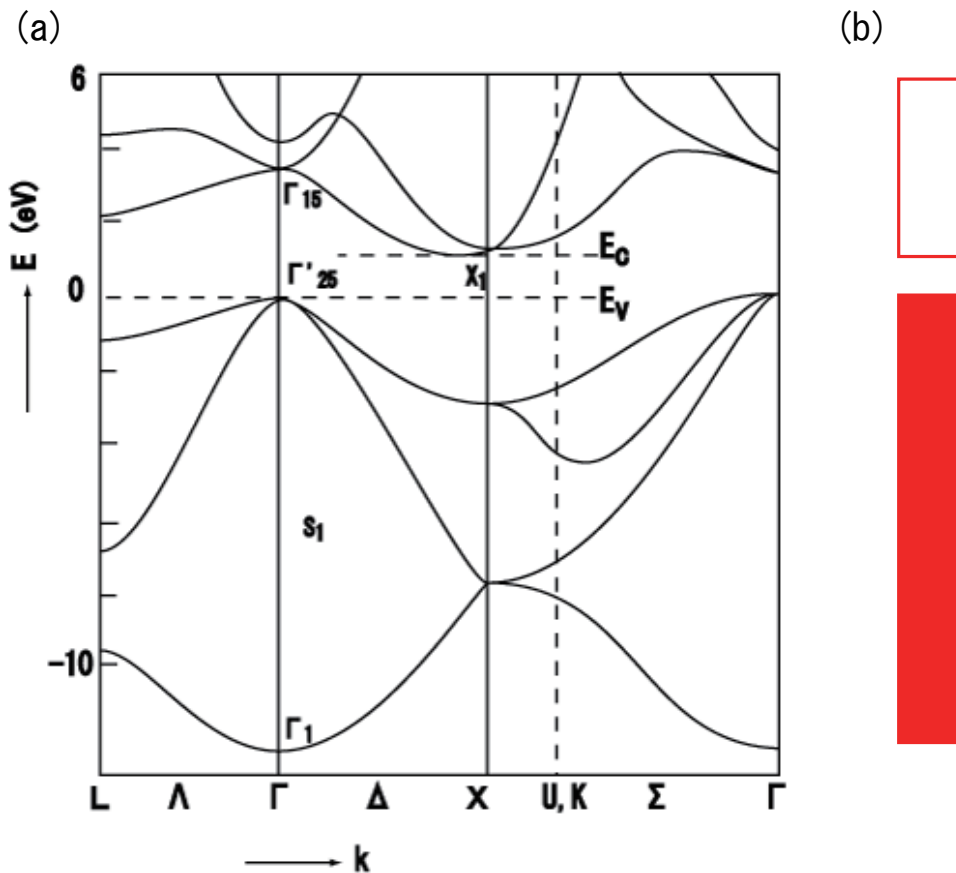
電子は Fig. 9 (a) で表された曲線上の点でしか状態を取り得ない。 $\Gamma$  点が運動量 0 の状態を表しているが、この運動量を持つときエネルギーは約 -12, 0, 3, 4 といった数点しか取り得ない。横方向に伸びる 1 本の曲線に何個の電子が収容されるかは、対象の結晶に含まれる原子数に依る。大雑把な理解としては、 $N_A$  個の原子からなる結晶では  $2N_A$  個の電子を収容できると思っておいたら良い。<sup>\*7</sup> このようにして実在の Si 結晶では電子がバンドを占有している。

Si ダイオードの電子・正孔の対消滅によるエネルギー放出 さて、Si の価電子帯上端と伝導帯下端に注目しよう。価電子帯上端は  $\Gamma$  点でエネルギーは 0 eV、伝導帯下端は X 点でエネルギーは 1.2 eV である。すなわち Si で作られたダイオードに順方向に電流を流すと p-n 接合界面での対消滅により、電子と正孔 1 組あたりで 1.2 eV のエネルギーを放出することが分かる。このエネルギーが光として放出されれば目出度く発光ダイオードとなるわけだが、はたしてそうなるだろうか。

間接遷移 価電子帯上端と伝導帯下端は、横軸上の位置すなわち運動量に違いがある。このようなバンド構造を間接遷移型と呼ぶ。

さて、自然界を司る重要な法則にエネルギー保存則がある。§1 で述べたように電子・正孔

<sup>\*7</sup> より正確には、その軸方向に何個の原子が配列しているか、に依存する。 $10^8$  個並んでいれば横軸は  $10^8$  点のグリッドになり、その点ごとに電子を 2 個ずつ収容する。



<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:Si-band-schematics.PNG>

図9 (fig20121113f) Si のバンド構造の模式図。(a)  $k$ - $E$  図 (Wikipedia より引用)、(b) エネルギー図と占有・非占有バンド。

の結合・消滅にともなって系全体でエネルギーが保存されなければならない、電子が失ったエネルギーは外部に放出される。もう一つ、重要な法則に \_\_\_\_\_ がある。電子・正孔の結合・消滅の前後で系全体の運動量は保存されなければならない。今ここで  $X$  点の電子が  $\Gamma$  点の正孔と結合・消滅するには電子が持つ  $X$  分の運動量をどこかに与えなければならない。\_\_\_\_\_ の持つ運動量は小さくその運動量を補償できるものではないため、エネルギーと運動量の両方をやりとりする場合光子はその役目に不足である。このような場合、原子の \_\_\_\_\_ としてエネルギーと運動量をやとりする。格子振動が放出されるということは物体の温度が上がる、すなわち \_\_\_\_\_ として放出されるということである。

直接遷移 もしバンド構造において、Fig. 10 (b) に模式的に表したように、価電子帯上端と伝導帯下端の運動量が同じ位置にあったらどうだろうか？電子が正孔と結合・消滅する際に運動量のやりとりをしなくても済む。すなわち \_\_\_\_\_ の放出のみでエネルギー保存則・運動量保存則の両方を満たすことができる。このようなバンド構造を直接遷移型と呼ぶ。エネルギーを光として取り出す LED には直接遷移型半導体が適する。

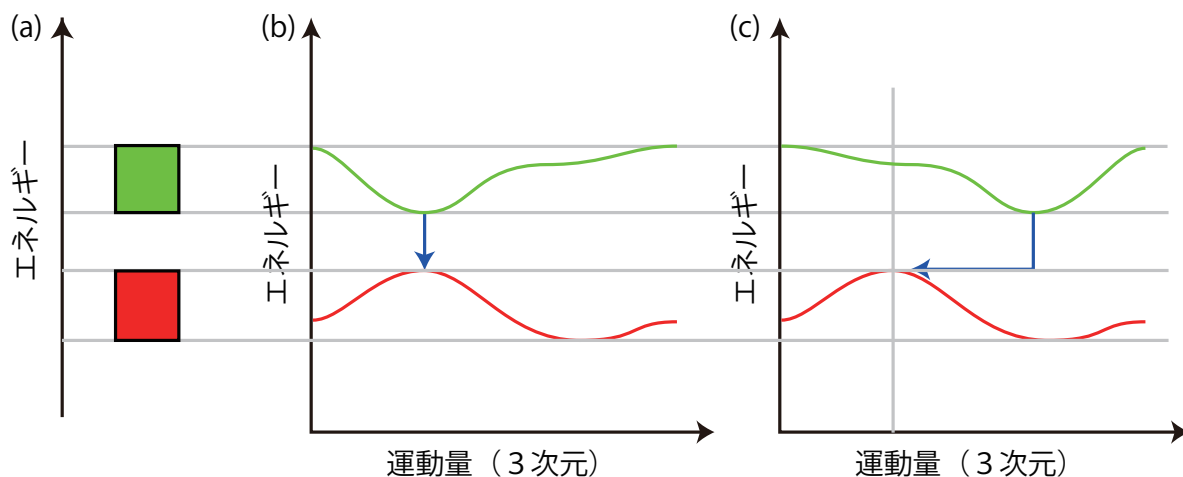


図 10 (fig20111117b) バンド図の模式図。(a) 今迄の授業で出てきた、エネルギーのみを描いた簡易的なバンド図。(b) 直接遷移型半導体のバンド図で、横軸に運動量を加えて描いたもの。運動量は 3 次元のベクトルだが、模式的に 1 次元として描いてある。(c) 間接遷移型半導体のバンド図を (b) と同じ作法で描いたもの。

### 3 発光ダイオードに必要な特性

#### 3.1 Si は発光しない

前回、Si が半導体材料として極めて優秀な特性を持つと述べたが、Si は \_\_\_\_\_ 遷移型のバンド構造を持っている。これが Si を発光素子として使用できない理由である。運動量の補償のために、対消滅のエネルギーの大部分が熱として放出されるのである。LED には \_\_\_\_\_ 遷移型半導体が適しているため、このような材料を探すことが第一である。

## 3.2 光の三原色

人間の目は赤 (Red)、緑 (Green)、青 (Blue) の 3 色を認識する。これらは光の三原色と呼ばれ、ひっくり返して \_\_\_\_\_ という用語が産業的にもよく用いられる。<sup>\*8</sup> 三原色以外の中間色はこれらの光の混ぜ合わせで表現できる。これがテレビなどに使用されるディスプレイの基本原理である。人間が認識する広い色空間をフルに表現するには三原色の光源を揃えることが必要である。赤、緑の LED は古くから開発されていたが、青色 LED はなかなか開発に成功しなかった。自分がその頃の開発者だったならば、どのように青色 LED の開発を進めるだろうか？

LED の発する光の色 (波長) は \_\_\_\_\_ で決定される。人間が感じる光の色の中心波長を Table 1 に示す。任意の色を発色する LED を作るには、目的の波長に相当するエネルギーのバンドギャップを持つ半導体を用いれば良い。(cf. §4.3 の小レポート)

表 1 (table20111117b)

色	波長 [nm]	エネルギー [eV]
赤	630	_____
緑	530	_____
青	440	_____

## 3.3 青色 LED

真性半導体のバンドギャップは理論計算からの見積りや実験による測定が可能。2.8 eV 程度のバンドギャップを持つ材料のうち、代表的なものを Table 2 に示す。GaN は 2.8 eV よりかなり広いバンドギャップを持つが、In などの添加元素によってバンドギャップが変化することを利用して適切なバンドギャップの半導体を形成することができる。

<sup>\*8</sup> 絵の具の三原色「赤、青、黄」は厳密には色料の三原色と言われ、光の三原色と補色の関係にある。

表 2 (table20121114a)

結晶	バンドギャップ [eV]
ZnSe	2.7
SiC	2.86
GaN	3.4

### 3.4 バンドギャップ以外に解決すべき課題

- 結晶化: 素子を作れる程度のサイズが必要。GaN は結晶化が難しいとされていた。
- p 型, n 型の両方の素子の形成: ドーピングしても安定せず、別の相を作る場合もある。GaN で p 型をどう作るか、というのも課題の一つであった。
- 高輝度化: 十分な光が出なければ、たとえば人間が認識できないような弱々しい光ならばほとんど意味がない。
- 安定性, 寿命: 1 時間で発光しなくなるような素子は使い物にならない。
- 歩留まり: 100 個に 1 個しか光らないような製造プロセスだとその分価格が釣り上がる。

実験室レベルでは、極低温、パルス運転、視認レベル以下の発光、寿命 数十分、というレベルの成功例が報告されていた。当時有望とされていたのが ZnSe。しかし結局 GaN で実用化される。「どの材料を選ぶか」という選択には、最終的には神のみぞ知る運任せの部分があるのは否定できない。しかしそれでも一番勝目の高いものを選択する努力をすべきである。

### 3.5 現在、LED に残されている課題

- 高出力を得にくい。
- 大電力を投じると発熱。発熱すると材料が劣化し、寿命が縮む。
- Ga を産出する地域が限定されている (中国など)。
- まだ理解されていない現象の解明: e.g.,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  発光ダイオードは、基盤のサファイアとその上に成長する GaN 層などの格子定数が大きく異なるのに輝度が高い。新たな理論とその現象を利用した新デバイスの可能性。

## 4 まとめ

### 4.1 前回コメント

p.9 の「Si 単結晶」の欄が小さい。 たぶん、 $\text{SiO}_2$  と書くべきところだと思う。板書が間違ってた？

### 4.2 前回課題

(a) 静電エネルギー  $U$  は以下のように表せる。

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r} \quad (1)$$

$$= \frac{1}{4 \times 3.14 \times 8.9 \times 10^{-12}} \frac{-(1.6 \times 10^{-19})^2}{0.53 \times 10^{-10}} [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (2)$$

$$= -4.32 \times 10^{-18} [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (3)$$

よって、 $-4.3 \times 10^{-18} [\text{J}]$

(b) 4つの点電荷があるので、相互作用の数は  ${}_4C_2 = 6$  個ある。静電エネルギー  $U$  は以下のように表せる。

陽子-陽子間のエネルギー  $U_{pp}$  は

$$U_{pp} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{a_1} \quad (4)$$

電子-電子間のエネルギー  $U_{ee}$  は

$$U_{ee} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{a_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\frac{1}{\sqrt{3}}a_1} \quad (5)$$

陽子-電子間のエネルギー  $U_{pe}$  は

$$U_{pe} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-e^2}{a_3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-e^2}{\frac{1}{\sqrt{3}}a_1} \quad (6)$$

ただし、 $a_3 = \sqrt{(\frac{a_1}{2})^2 + (\frac{a_2}{2})^2} = a_2 = \frac{1}{\sqrt{3}}a_1$  を使った。

全体のエネルギー  $U$  は、

$$U = U_{pp} + U_{ee} + 4U_{pe} \quad (7)$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{a_1} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\frac{1}{\sqrt{3}}a_1} + 4 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-e^2}{\frac{1}{\sqrt{3}}a_1} \quad (8)$$

$$= \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{a_1} + \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{3}}a_1} + 4 \frac{-1}{\frac{1}{\sqrt{3}}a_1} \right) \quad (9)$$

$$= \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{a_1} + \frac{\sqrt{3}}{a_1} - \frac{4\sqrt{3}}{a_1} \right) \quad (10)$$

$$= \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a_1} (1 - 3\sqrt{3}) \quad (11)$$

$$= \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{4 \times 3.14 \times 8.9 \times 10^{-12} \times 0.74 \times 10^{-10}} (1 - 3 \times 1.732) \quad (12)$$

$$= -\frac{1.6^2 \times 4.196}{4 \times 3.14 \times 8.9 \times 0.74} \times 10^{-16} \quad (13)$$

$$= -1.2985661536438033968 \times 10^{-17} \quad (14)$$

よって、 $-1.3 \times 10^{-17}[\text{J}]$

ダブルカウントに注意すること。あるいは、ダブルカウントも含めて網羅した総和に対して 2 で割っても良い。

変数をまとめた場合 電気素量単位としたエネルギーの式を出しておくとも数字の扱いがラクになるかもしれない。

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r} \quad (15)$$

$$= \frac{1}{4 \times 3.14 \times 8.9 \times 10^{-12}} \frac{q \times 1.6 \times 10^{-19} \times q' \times 1.6 \times 10^{-19}}{r} \quad (16)$$

$$= \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{4 \times 3.14 \times 8.9 \times 10^{-12}} \frac{qq'}{r} \quad (17)$$

$$= 2.290130966864667573 \times 10^{-28} \times \frac{qq'}{r} \quad (18)$$

$$= k \frac{qq'}{r} \quad (19)$$

ここで、 $k = 2.290130966864667573 \times 10^{-28}$  と置いた。

(a)

$$U = k \frac{qq'}{r} \quad (20)$$

$$= k \frac{-1}{0.53 \times 10^{-10}} \quad (21)$$

$$= 2.290130966864667573 \times 10^{-28} \times \frac{-1}{0.53 \times 10^{-10}} \quad (22)$$

$$= -4.32100182427295768490 \times 10^{-18} [\text{J}] \quad (23)$$

よって、 $-4.3 \times 10^{-18} [\text{J}]$

エネルギーは負の値 それぞれの粒子が無遠く離れたときにゼロ。自然はエネルギーが低くなる方に動くので、エネルギーが正の値なら、ゼロに向かって運動することになる。

また、距離が短くなるほどエネルギーが低くなるので、古典論に従えば原子と電子は同じ座標になるまで接近しようとする筈である。ここに古典論の限界がある。

### 4.3 小レポート

(a) Table 1 の波長に対応するエネルギーを求める導出過程を記述し、エネルギーの欄を埋めよ。物理定数の値は以下を参考にすると良い。

- プランク定数  $h = 6.63 \times 10^{-34} [\text{Js}] = 4.14 \times 10^{-15} [\text{eV} \cdot \text{s}]$
- 光速  $c = 3.00 \times 10^8 [\text{m/s}]$

ヒント:

$$c = \lambda\nu \quad (24)$$

$$E = h\nu \quad (25)$$

(b) 200 nm の紫外線を発光する LED を作成したいとする。これに使用する半導体として理想的なバンドギャップの値を求めよ。

(c) 2000 nm の赤外線が発光する LED について、同様に求めよ。



## 材料デザイン学 レポート (冬休みの宿題)

「自分が開発・改善したいデバイスは何か？」と君が問いかけられたとしよう。

- CPU, メモリ, HDD
- 排気ガス触媒, 水質浄化装置
- 磁石
- 誘電体
- 電池, 太陽電池, 燃料電池
- その他

思い付いたデバイス何でも良い。題材として向いているものと向いてないものがあるだろうが、その中で書き易いものを選び、それについて、材料の研究・開発によってその改善に寄与できることを述べてもらいたい。以下の点について調べたこと、考えたことをまとめて論述せよ。

1. デバイスの現状の用途、将来期待されている応用。
2. 現状における問題点、改善すべき点。(改善案と対応が付かなくても良いので、これをできるだけ多く述べること。)
3. そのデバイスの動作原理、メカニズム。
4. 関連する学問分野とその概略。どういうタイトルで教科書を探せば良いか。広すぎるタイトル名はダメ。たとえば、「科学」では何も言っていないのも同じ。「材料科学」「材料工学」でもほとんどの材料に当て嵌まる。特に自分の参考にした書籍がどの分野に属するのか、まえがきなどを参考にして適切な分野名を書く。
5. 自分がその研究者だったならば、その材料の改善に向けての自分独自の戦略をどのように組み立てるか。

調べた文献名を明示すること。インターネット上のウェブサイトで知り得た知識も用いて良いが、1冊は紙媒体の書籍を含めること。いずれもきちんと参考文献に挙げること。

作成したレポートの電子ファイルを C502 サーバに提出すること。

( <http://c502.mech.eng.osaka-cu.ac.jp/~ippeip/submission.html> )

提出期限は 1/8 (金) 15:00。