

物理システム工学科3年次
物性工学概論
第5回光る半導体

佐藤勝昭

受講者の声

- 宿題の問題中の式では $D = \epsilon_0 P + E$ となっており、プリントでは $D = \epsilon_0 E + P$ となっていた。どちらでもいいのですか？ (O) → ごめんなさい。宿題の問題を入力するときのミスです。 $D = \epsilon_0 E + P$ が正しいのです。
- 半導体の導電率が温度とともに(指数関数的に)変化するメカニズムを知りたいと思いました。実験ではホール係数のみであったので。(K) → ホール係数は $R_H = 1/ne$ です。これよりキャリア密度 n の変化が出ますね。 $\sigma = ne\mu$ を通じて導電率が変化するのです。

受講者の声

- カラーのプリントはわかりやすくてうれしい。(N,A)
半導体のギャップと透過光の関係の図が鮮やかでキレイだった。(N) プリントがあってうれしい。
(S) メールのお知らせはありがたい。(M)
- 今やっている実験とかなりかぶっていたので助かりました。バンドギャップがどういうものかという説明が図などを使ってわかりやすかった。(M) 実験で同様の内容をやったので理解に役立ちそう(T)
実験レポートのため1週間早くやって欲しかった
(A)→実験と対応させるのは、学習が身に付きま
すね。

受講者の声

- バンドギャップの話をもっと詳しく聞きたい。(T) バンドギャップは習ってないのでじっくりお願いします。(Y) バンドギャップについてよくわからないのでもう一度説明して欲しい。(I, H) → **要望に応えます。**
- エネルギーギャップについて波動関数を使って説明して欲しい。(M) → **本日、バンド構造についての補足資料のプリントを配布しました。それに書いてあるので、自分で勉強してください。**
- 全体的に話がむずかしかった。(T) 話がピンと来なかった。(Y) 基礎が足りないせいかむずかしい。(S) 半導体がむずかしいです。(S) 半導体の仕組みがいまいちわからない。(I) → **ショック療法です**

受講者の声

- ダイオードがいまいち理解出来ません。(O) PN接合と、透過光の説明をもう一度やって欲しい。発光ダイオードはこないだお店で点滅するのを見ていたので、ちょっと興味があった。(S) 半導体に関してこんなにくわしくやるとは意外。(A)→半導体とくに接合は重要なので、何度か繰り返してやります。
- 半導体は最近興味が出てきたので面白い。(M)
- もっと身近な話題を盛り込んで欲しい。(S)→最初の方で話したのですが…。今後できるだけ、身の回りのものを取り上げるようにします。

受講者の声

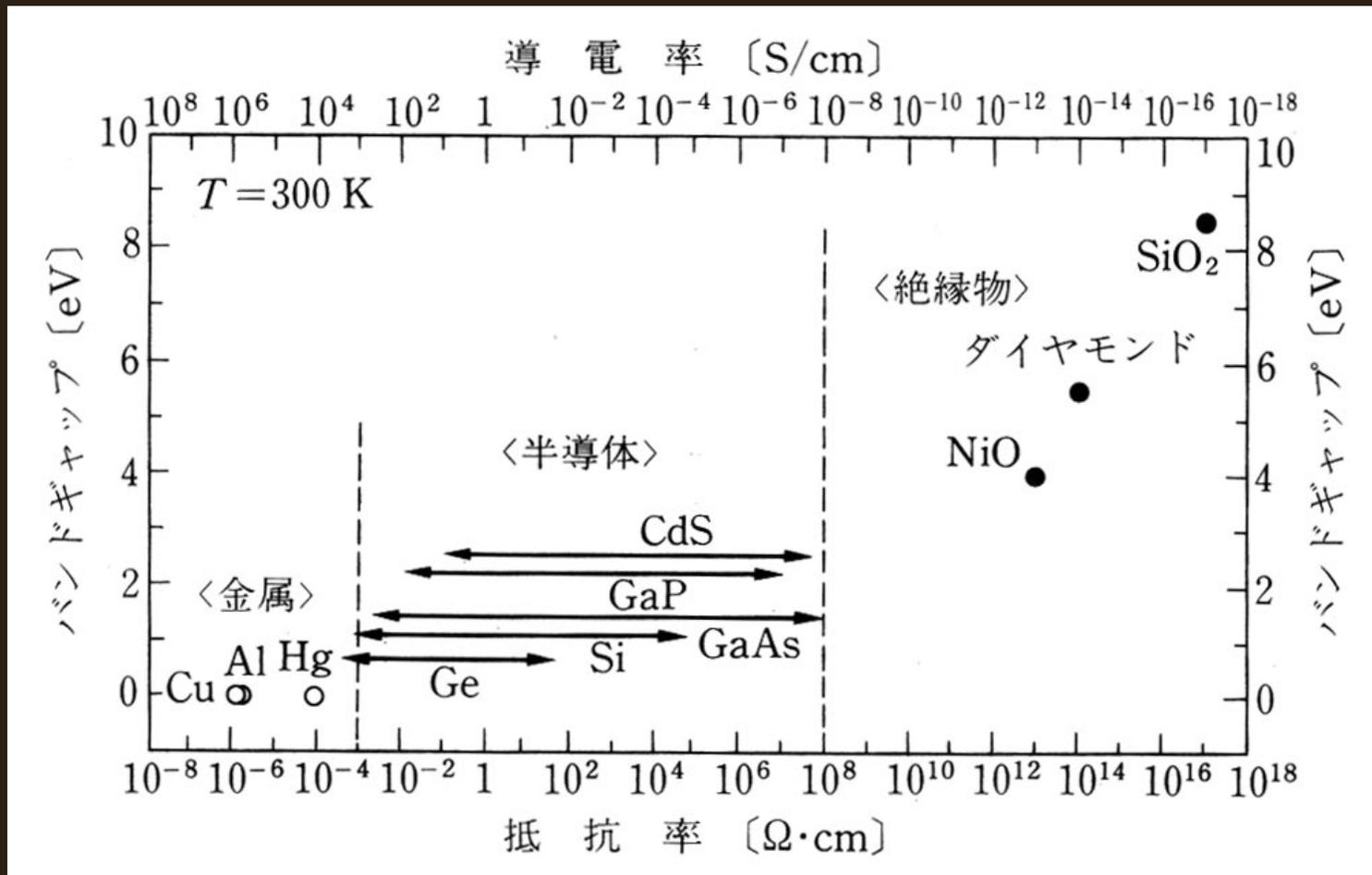
- 光の吸光度は化学実験でもやったことがあるので、いろいろなものの吸光度を調べてみたい。(T)
- フォトンエネルギー $E=h\nu$ の ν と波長 λ の関係は $\nu=c/\lambda$ で表されるのですか。(T)→Yes.
従って $E(\text{eV})=hc/\lambda=1240/\lambda(\text{nm})$ で表されます。
 $h=6.6\times 10^{-34}$, $c=3\times 10^8$, $e=1.6\times 10^{-19}$ を代入して確かめてみよう。
- 吸収端の波長がよくわからなかったのもう一度確認したい。(I)

受講者の声

- 配布資料の印刷が悪い。(U) プrintの図が見えなくて困る。(S)→今回は輪転機でなく、ゼロックスにしました。
- パワポでしか出てこない画もPrintが欲しい。(T)→ネットからパワポファイルをダウンロードして自分で印刷してください。
- 今日はテストが近いこともあり意識して授業を受けられた。(A) テストがあることに焦りはじめました。(K)

復習コーナー

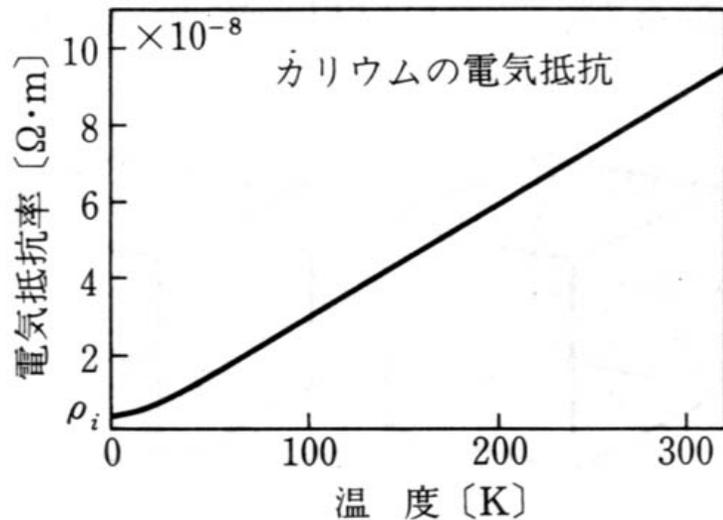
半導体とは何か



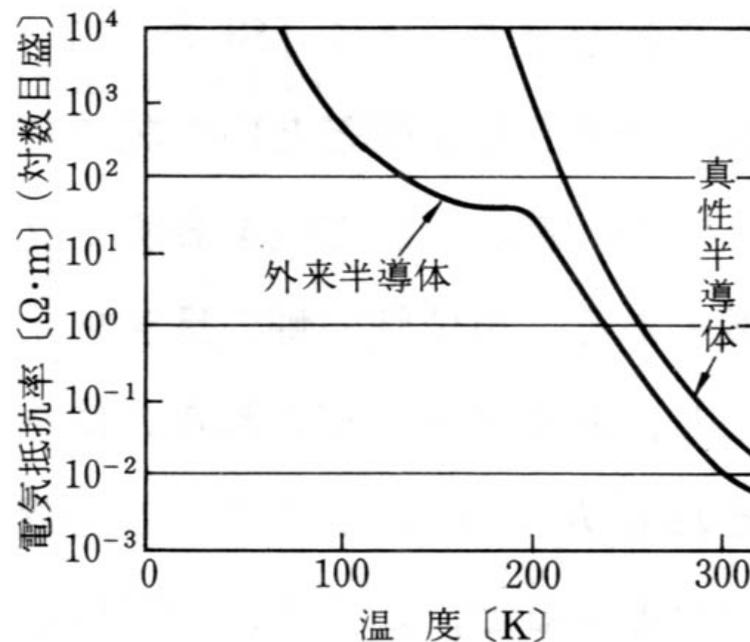
- 半導体の抵抗率の範囲とバンドギャップ
- (佐藤・越田:応用電子物性工学 図4.2)

復習コーナー

半導体の電気抵抗の温度変化



- (a) 典型的な金属の電気抵抗率の温度依存性
($\rho = \rho_i + aT$ というマチーゼンの法則に従う。ここに、 ρ_i を残留抵抗率と呼ぶ)



- (b) 典型的な半導体の電気抵抗率
(抵抗率の変化範囲が広いので対数目盛になっていることに注意)

- 金属と半導体の電気抵抗の温度変化の比較

補足資料

固体のバンド構造について

佐藤・越田「応用電子物性工学」抜粋

- 1 物質の電気伝導による分類
- 2 原子の寄り集まりと電子のバンド
- 3 結晶の周期ポテンシャルとバンド構造
- 4 バンド構造と状態密度
- 5 フェルミ分布

詳しくは、固体物理で学びますが、配布資料を自習しておよその概念をつかんでください。

以下では駆け足で2, 3のサワリの部分を紹介します。

半導体のウィルソン模型

- 半導体の電気伝導の温度変化をバンド構造によって最初に説明したのはウィルソンであったので、半導体のウィルソン模型という。
- 固体のエネルギーバンドの考え方を解説する。この考えは、固体の物性を考える上で非常に重要な概念なのでよく理解して欲しい。
- バンドを考える上で、2つのアプローチがある。

バンド構造への2つのアプローチ

- 固体物理の2つのアプローチ：
 - Heitler・LondonかHartree・Fockか
- 孤立原子の電子軌道からのアプローチ
 - Heitler・Londonの近似
- 自由電子からのアプローチ
 - Hartree・Fockの近似

原子の寄り集まりと電子のバンド

1. 孤立原子からスタート

- 希ガス気体の原子のようにばらばらに存在する原子(孤立原子)の中の電子は、量子力学の教えるところによれば、主量子数 n 、方位量子数 l 、磁気量子数 m で指定される特定の状態にあつて、そのエネルギーはとびとびの値しかとれない。
- 珪素(Si)を例にとると、孤立状態では、**図2(a)**に示すように、3s軌道(スピンを含め2重縮退)が2個の電子で占有され、3p軌道(スピンを含め6重縮退)を2個の電子が入った $3s^2 3p^2$ 状態をとる。

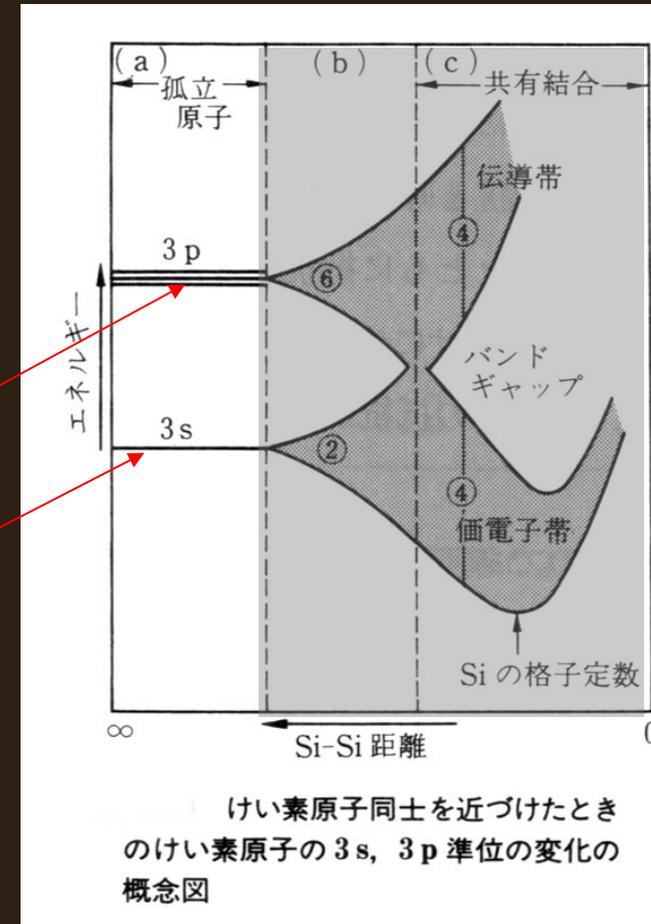


図2

原子の寄り集まりと電子のバンド

2. 原子が集まって来ると



- 原子が集まって固体を作ると、電子は1つの原子内にとどまっていなくていくつかの原子の位置にまたがって広がる。このため原子の数の分だけ電子軌道が重なることになる。
- 同じ軌道にはスピンのちがう2つの電子しか入ることができないので、重なり合った電子軌道は僅かずつ形を変えて同じ軌道に入らないように調整が起きる。
- この結果、とり得るエネルギーは図2(b)に示すように幅をもったもの(バンド)になってくる。**バンドの幅**は、電子が原子内を動き回る運動エネルギーの程度を表している。
- バンドは結晶に限らず周期性を持たないアモルファス物質にも見られる固体に共通の概念である。

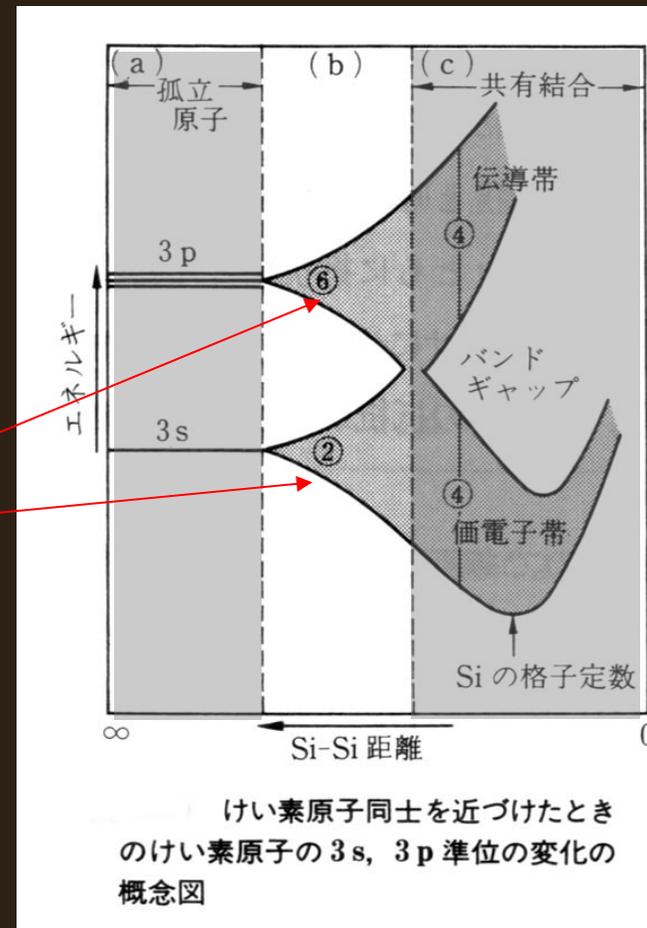
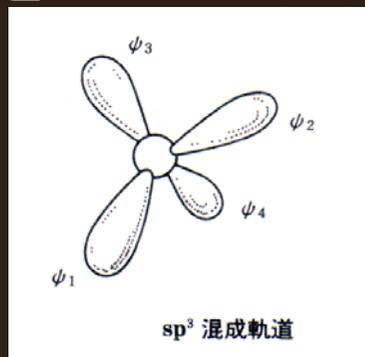
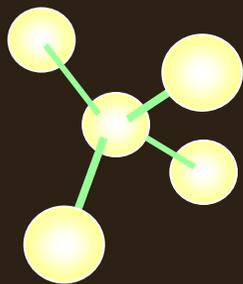
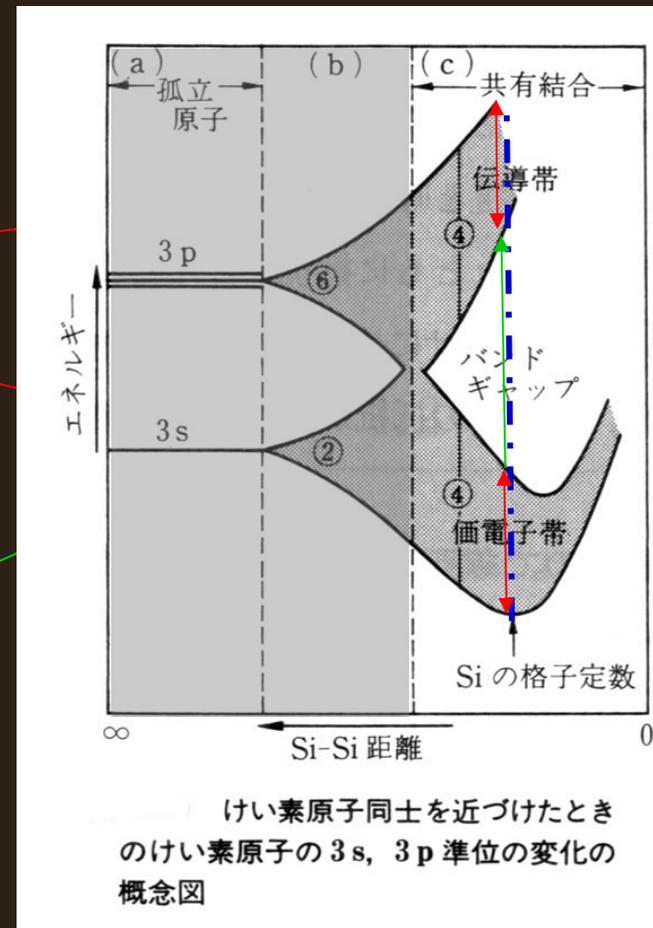


図2

原子の寄り集まりと電子のバンド

3. 原子間に共有結合ができる

- 原子がさらに接近すると、図2(c)に示すように、共有結合ができて、 sp^3 軌道（スピンを含めて8個の軌道がある）が固有状態となり、 sp^3 の反結合軌道の集まりのバンドと sp^3 の結合軌道の集まりのバンドとにエネルギーの分裂が起きる。
- その結果2つのバンドの間に電子が占めることのできないエネルギー範囲が生じる。これをバンドギャップと呼ぶ。



sp^3 混成軌道

図2

原子の寄り集まりと電子のバンド

4. バンドギャップと絶縁性

- シリコンでは1原子あたり4個の電子があるが、これがエネルギーの低い4個の結合軌道のバンドを満たし、エネルギーの高い4個の反結合軌道のバンドは空っぽとなる。
- 満ちたバンドを**価電子帯**、空いたバンドを**伝導帯**という。
- 下のバンドの電子に電界をかけて加速しようとするすると、加速されて高い運動エネルギーをもった電子は**バンドギャップ**内に押し出されなければならないが、ここには電子の占めるべき状態がないので、結局電子は加速できないことになる。このため純粋なシリコンは本質的に絶縁物となる。

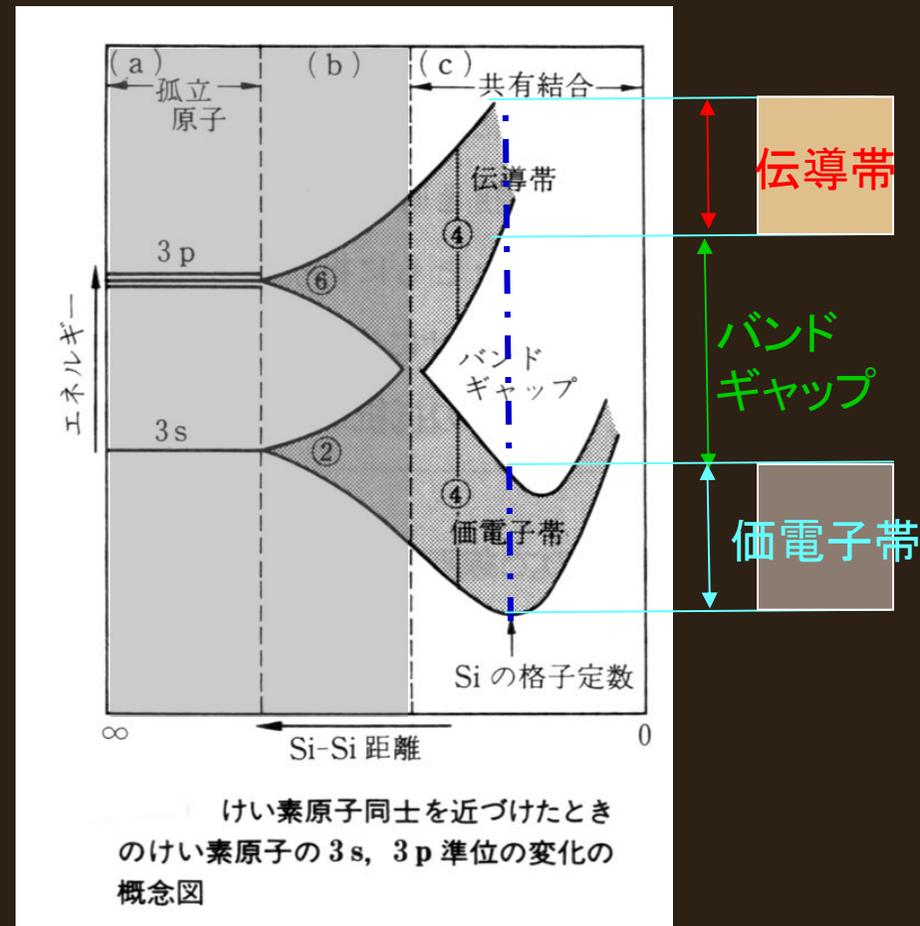
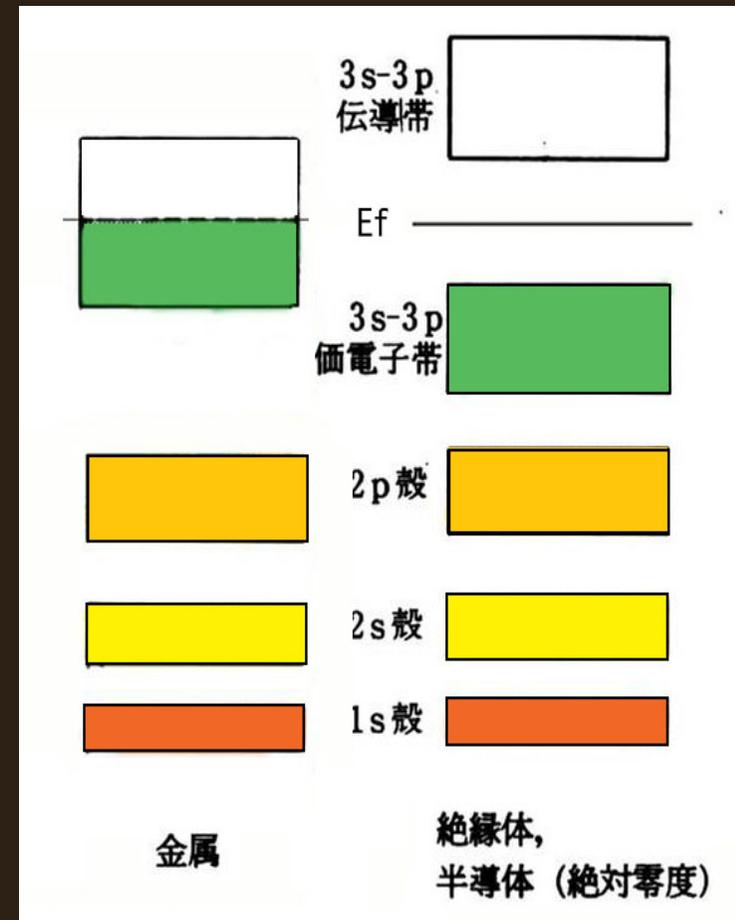


図2

原子の寄り集まりと電子のバンド

5. バンドで理解する金属・半導体・絶縁体

- 金属では、絶対零度でも伝導帯が部分的にしか満たされていないので、電界による加速が可能である。
- 金属は半導体よりはるかに大きな電気伝導率を持つが、これは関与するキャリアの数が遥かに多いことによる。
- 半導体や絶縁体では、絶対零度で価電子帯が電子で満たされているのに対して伝導帯には電子がないので導電率は無限小となる。
- 絶縁物と半導体は導電率の温度変化という観点からは区別がなく、単に室温での伝導率の大きさの程度の違いの問題にすぎない。金属の移動度は、必ずしも半導体より大きな値をとらない。



結晶の周期ポテンシャルとバンド構造

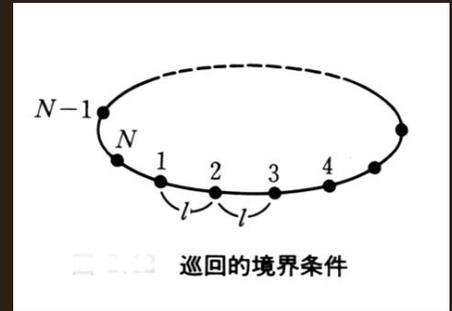
1. 自由電子からのスタート

- 電子が平面波によって表されるという自由電子状態の極限から出発して、周期的に並んだ結晶の原子核のポテンシャル(クーロン力の場)によってどのような変化を受けかを考えるアプローチを自由電子からの近似、または、ハートリーフックの近似という。
- この近似では、電子を波として表すことができるということを前提にしているから、原子の並び方が周期的である場合に都合がよい。すなわち、これは理想結晶を扱うのに適した近似である。

補足資料

結晶の周期ポテンシャルとバンド構造

2. 自由電子のエネルギー



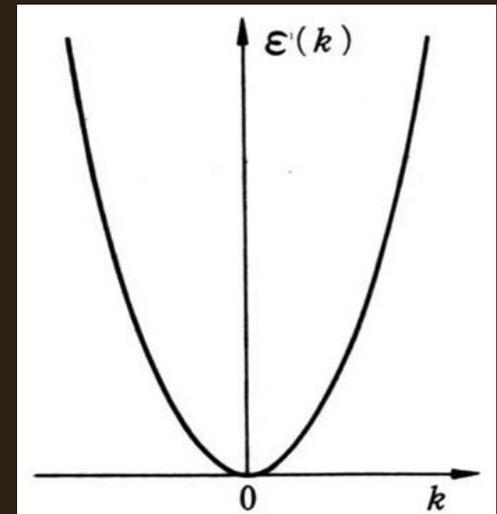
- 話を簡単にするために1次元の結晶, つまり, 図5に示すように原子が等間隔で1列に並んだ鎖を考える. この結晶は有限の数 N の原子からできていて「巡回的境界条件」が成り立っているとする.
- 自由電子に対するシュレーディンガー方程式は次式で表される.

$$H\psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = E\psi \quad (1)$$

この解は平面波, すなわち, $\exp(ikx)$, の形で書ける. k は波数と呼ばれ, 電子の波長を λ とすると $k=2\pi/\lambda$ で与えられる. この解に対応する固有エネルギーは

$$E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \quad (2)$$

- となる. エネルギーは k の二乗に比例する.
- 電子のエネルギー E を波数 k に対してプロットしたものが図6(a)である.



(a) 自由電子のエネルギーの波数依存性

$$\epsilon(k) = \frac{\hbar^2}{2m} k^2$$

補足資料

結晶の周期ポテンシャルとバンド構造

3. ブロッチ関数

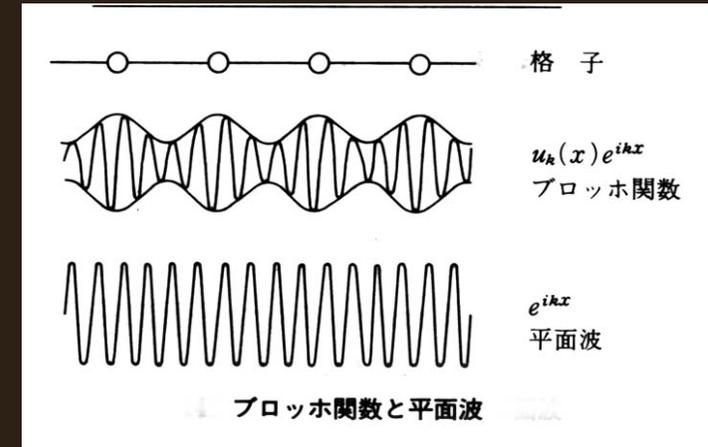
- これに対して、結晶ではポテンシャル V が存在するので、シュレーディンガー方程式は

- $$H\psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V(x)\psi = E\psi \quad (3)$$

- となる.
- 周期ポテンシャル中の電子の波動関数は、格子間隔の周期を持つ周期関数 $u_k(x)$ で振幅変調された平面波で表すことができる. すなわち

- $$\psi_k(x) = u_k(x) \exp(ikx) \quad (4)$$

- である. このように表せることをブロッチの定理といい、 $\psi_k(x)$ を**ブロッチ関数**と呼ぶ.



関数 $u_k(x)$ は周期 a をもつ周期関数であるから、
$$u_k(x+a) = u_k(x) \quad (5)$$
の関係が成り立つ。図7は、ブロッチ関数の空間的な変動の様子を模式的に表したものである。

補足資料

結晶の周期ポテンシャルとバンド構造

4. 空格子近似のE-k曲線

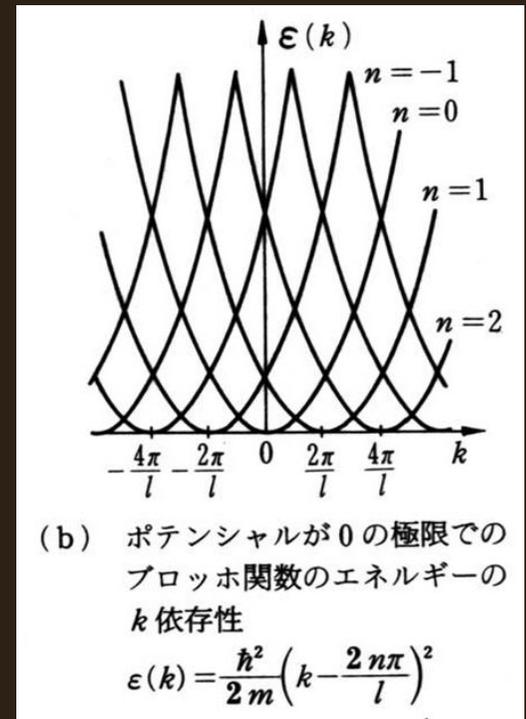
- 結晶中の電子をブロッホ関数で表すと、ポテンシャルが0になった極限(空格子近似), すなわち, 自由電子の極限において, そのエネルギーは, 式(2)ではなく,

$$E(k) = \frac{\hbar^2}{2m} (k + g)^2 \quad (6)$$

- で与えられる. ここに, g はポテンシャル $V(x)$ の周期 a の逆数に 2π をかけたものの整数倍である. すなわち,

$$g = \frac{2\pi}{a} n$$

- である. g を逆格子という. ここでは g はスカラーであったが3次元ではベクトルで記述され, 逆格子ベクトルと呼ばれる.

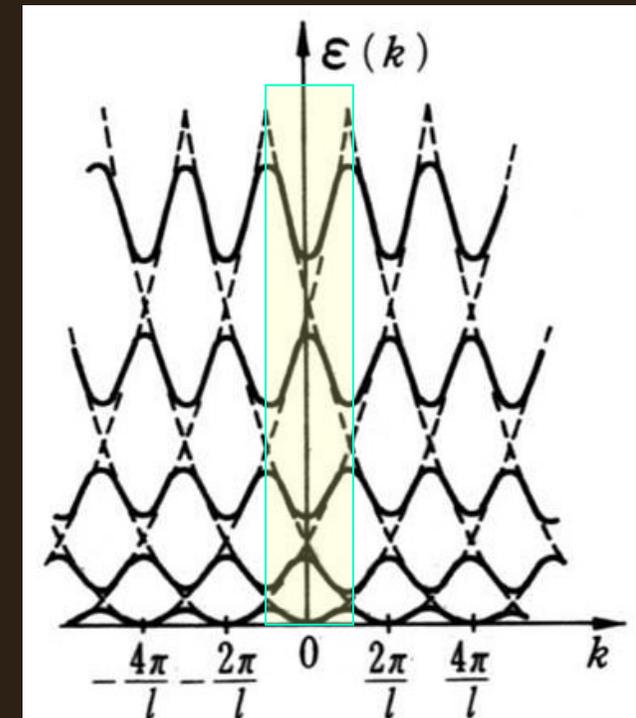


結晶中の電子のエネルギーは自由電子と異なって波数 k ではなく, k に任意の逆格子 g を付け加えた量に対して2次関数になっているのである. これを図示したものが図6(b)である.

結晶の周期ポテンシャルとバンド構造

5. 周期ポテンシャル中のE-k曲線

- ここで、周期ポテンシャルを考慮すると、 $\hbar^2 k^2 / 2m$ のエネルギー曲線に対応する波動関数と、 $\hbar^2 (k+g)^2 / 2m$ のエネルギー曲線に対応する波動関数との間に相互作用による混ざりが起き、エネルギー固有値が自由電子の場合から、ずれて図6(c)のようにエネルギー曲線の交点 (k が π/l の整数倍の位置) 付近で反発するような形となる。
- この結果、とり得るエネルギーは、一つながりでなくいくつかの領域(バンド)に別れ、バンドとバンドの間にバンドギャップを示すことになる。 $k = \pi/l$, すなわち、**第1ブリルアン域の境界**におけるギャップの大きさは**周期ポテンシャルのフーリエ成分 V_1 の2倍**に等しい。



(c) 周期ポテンシャルのあるときのプロット関数のエネルギー帯

結晶の周期ポテンシャルとバンド構造

6. ブリュアン域境界付近の波動関数

- バンドギャップの極大と極小の位置における電子の波動関数はどのようなになっているのであろうか. エネルギーが k に対して $(\hbar^2/2m)k^2$ で表される状態は,

- $\psi_1 = c \exp(ikx)$ (9)

- の形の波動関数に対応し、 $(\hbar^2/2m)(k - 2\pi/a)^2$ で表される状態には,

- $\psi_2 = c \exp\{i(k - 2\pi/a)x\}$ (10)

- に対応する. 電子の波数が $k = \pi/a$ (第一ブリルアン域の境界)の付近, すなわち, 電子の波長 λ が $2a$ (格子定数の2倍)の大きさをとると, 両波は

- $\psi_1 = c \exp(i\pi x/a), \psi_2 = c \exp(-i\pi x/a)$ (11)

- となって, 互いにちょうど反対の向きに進む波になっている. もし, これらの波が同じ重率で重ね合わされると, 定在波になる.

補足資料

結晶の周期ポテンシャルとバンド構造

伝導帯の底と価電子帯の頂の波動関数

- 重ね合わせ方に,

$$\phi^+ = \psi_1 + \psi_2 = 2c \cos(\pi x / a),$$

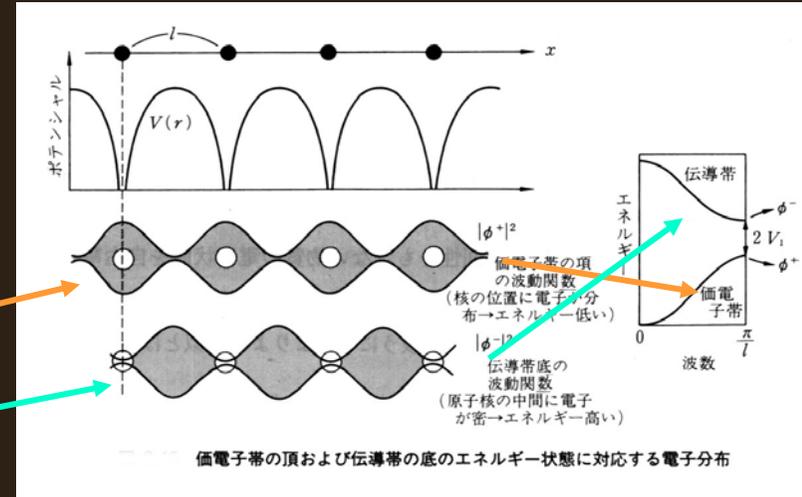
$$\phi^- = \psi_1 - \psi_2 = 2ic \sin(\pi x / a)$$

(12)

- の2通りがあって、図8に示すように、 ϕ^+ は原子の位置、すなわち、 $x=na$ において**定在波の腹**ができるのに対し、 ϕ^- は原子の位置に**節**ができる。

- つまり、 ϕ^+ は原子核の+電荷の位置に大きな存在確率 $|\phi^+|^2$ を有し、ポテンシャルエネルギーが低い、 ϕ^- は原子と原子の間で大きな存在確率を示すので、ポテンシャルエネルギーが高い。

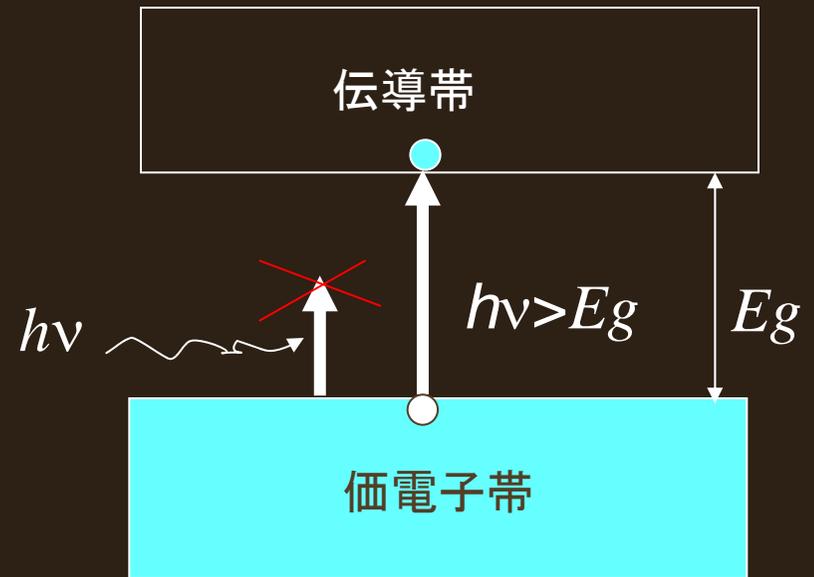
- これが、 $k = \pi/a$ において、2つのエネルギー曲線に反発が起きる原因であった。



復習コーナー

バンドギャップと半導体の吸収端

- 光子エネルギー $E=h\nu$ がバンドギャップ E_g より小さいと、価電子帯の電子が $E=h\nu$ を得ても、伝導帯に遷移できないので、光は吸収されず透過する。
- 光子エネルギーが E_g よりも大きいと、価電子帯の電子が伝導帯に遷移することができ、光吸収が起きる。
- 吸収が始まる端っこということで、バンドギャップを**吸収端のエネルギー**、それに相当する波長を**吸収端の波長**という。吸収端の波長より長い波長の光は透過する。



$$\begin{aligned}\lambda(\text{m}) &= c / \nu = hc / E(\text{J}) = hc / eE(\text{eV}) \\ &= 6.6261 \times 10^{-34} \times 2.9979 \times 10^8 / 1.6022 \times 10^{-19} E(\text{eV}) \\ &= 1.2398 \times 10^{-6} / E \approx 1.24 \times 10^{-6} / E\end{aligned}$$

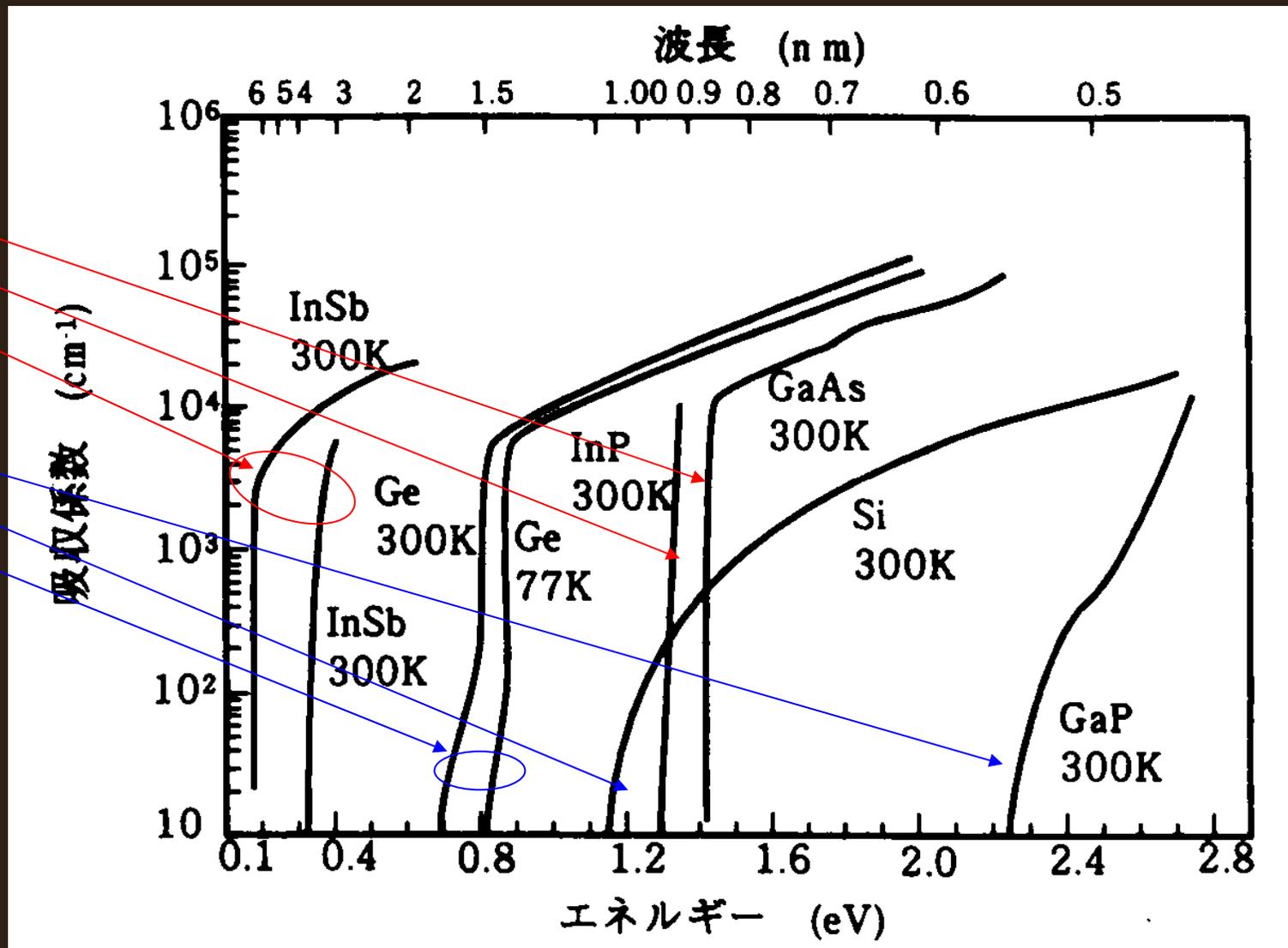
$$\lambda(\text{nm}) = 1240 / E(\text{eV})$$

復習コーナー

半導体の光吸収スペクトル

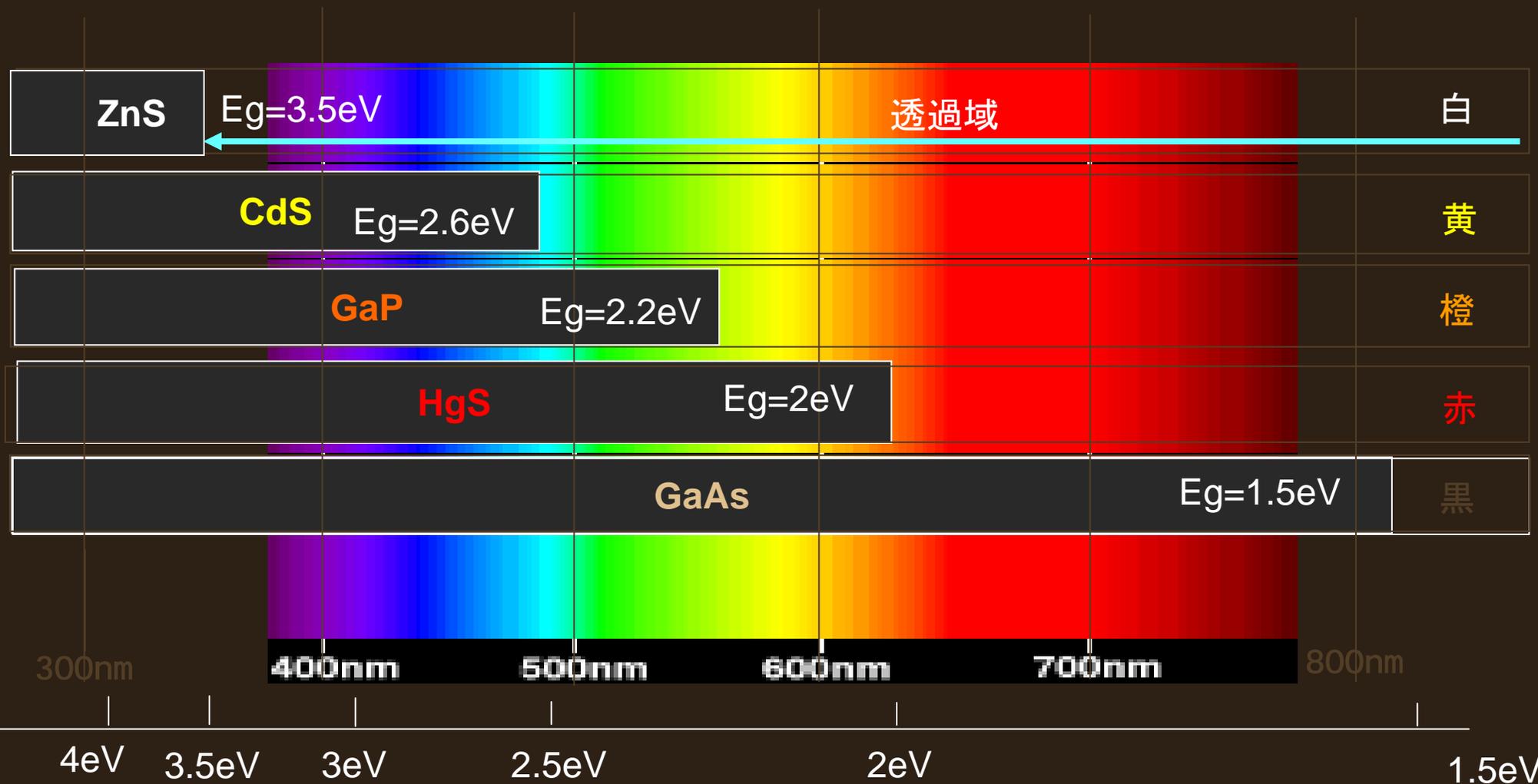
直接吸収端
InSb, InP, GaAs

間接吸収端
Ge, Si, GaP



復習コーナー

半導体のバンドギャップと透過光の色



復習コーナー

半導体のバンドギャップと絵の具の色



Mixed crystals of yellow cadmium sulfide CdS and black cadmium selenide CdSe, showing the intermediate-band-gap colors

Color of some band-gap semiconductors				
Substance	Mineral	Pigment	Band	Color
	name	name	gap (eV)	
C	Diamond	-	5.4	Colorless
ZnO	Zincite	Zinc white	3	Colorless
CdS	Greenockite	Cadmium yellow	2.6	Yellow
CdS _{1-x} Se _x	-	Cadmium orange	2.3	Orange
HgS	Cinnabar	Vermillion	2	Red
HgS	Metacinnabar	-	1.6	Black
Si	-	-	1.1	Black
PbS	Galena	-	0.4	Black

QUIZ: さまざまな半導体のバンドギャップ と透過光の色

半導体	E_g [eV]	λ_g [nm]	透過光の色
• Ge	0.67	1851	不透明
• Si	1.11	1117	不透明
• GaAs	1.42	873	不透明
• CdSe	1.74	712	赤
• GaP	2.26	549	橙
• CdS	2.42	512	黄
• ZnSe	2.67	463	淡黄
• GaN	3.39	366	無色透明
• ZnS	3.68	337	無色透明

光る半導体

- 半導体にバンドギャップより高い光子エネルギーの光を照射すると、光が吸収され、電子が価電子帯から伝導帯に励起され、価電子帯にホールが生成されます。
- この状態は、平衡状態ではないので、励起光を切ると励起された電子が価電子帯に戻り、ホールと再結合し、基底状態に戻ります。戻るときに、励起状態で持っていたエネルギーを光として放出する場合と、格子振動を通して熱になる場合があります。前者をルミネセンスといいます。

さまざまなルミネセンス

- 半導体において価電子帯の電子を伝導帯に励起する方法には、光の照射だけでなく、電界の印加、電子の注入、電子線の照射などがあります。
- **光**で励起：フォトルミネセンス(**PL**)
- **電子線**で励起：カソードルミネセンス(**CL**)
- **電界**で励起：エレクトロルミネセンス(**EL**)
- **キャリア注入**で励起：注入形エレクトロルミネセンス(**LED**)

フォトルミネセンスの例(1)

- 蛍光体を知っていますか。蛍光体は、蛍光ランプのガラスの内側の壁に塗布されています。
- 蛍光ランプでは、水銀・アルゴン気体中の放電によって生じた紫外線が管壁の蛍光体を励起し、基底状態に戻るときに可視光線を出す現象を用いています。
- ランプ用蛍光体は酸化物・ハロゲン化物を母体とし、発光中心となる希土類や遷移元素が添加されています。



Blue	$(\text{SrCaBaMg})_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}:\text{Eu}$
Green	$\text{LaPO}_4:\text{Ce},\text{Tb}$
Red	$\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}$
White	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{FCl}:\text{Sb},\text{Mn}$

フォトルミネセンスの例(2)

- プラズマディスプレイ(PDP)

- 微小電極間で放電

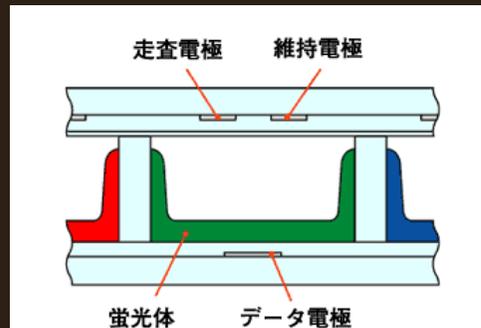
- 気体原子が励起

- 紫外線を放出

- 紫外線が蛍光体を励起

- 可視光発光

- カラーPDPの原理は蛍光ランプとよく似ており、極小の蛍光ランプが無数に並んで1枚の画面を作っていると考えられる。



PDP用蛍光体は、酸化物を母体とし、発光中心となる希土類や遷移元素が添加されている。

Blue BaMgAl₁₀O₁₇:Eu

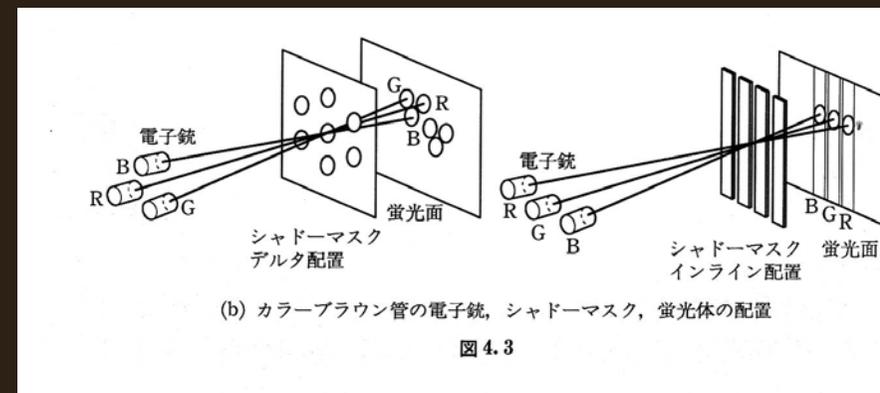
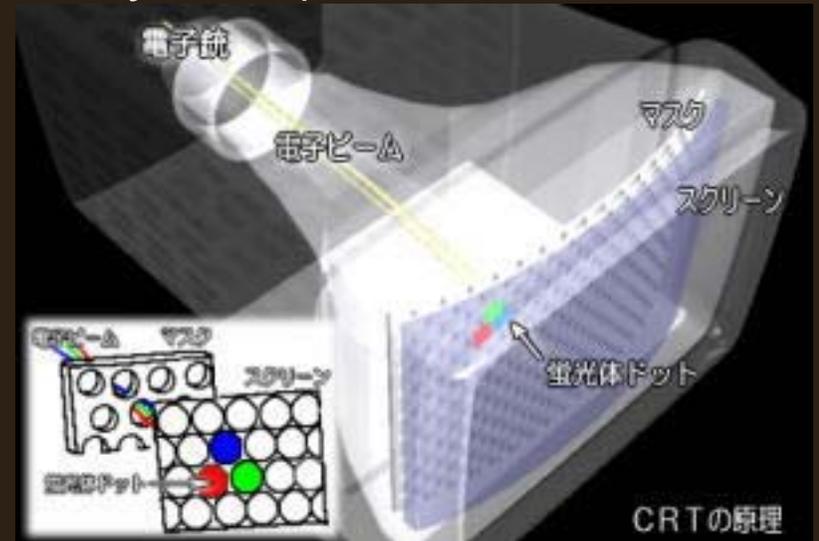
Green Zn₂SiO₄:Mn

Red (Y,Gd)BO₃:Eu

カソードルミネセンスの例1

ブラウン管(CRT=cathode ray tube)

- 赤、緑、青の微小な領域に蛍光体が塗り分けられており、各発光色に対応して、3本の電子銃が用いられ、別々に強度を制御された電子ビームが蛍光体を励起し発光させる。
- 蛍光体として不純物を添加した半導体が使われる。



CRT用蛍光体

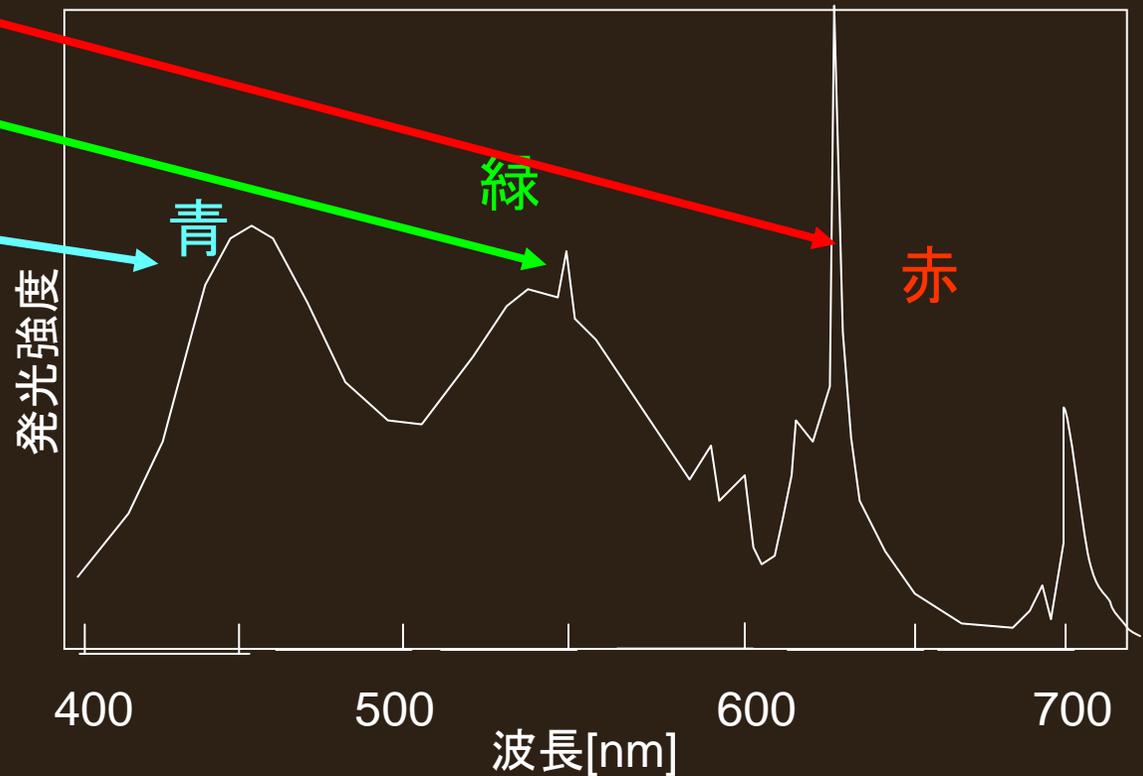
Blue ZnS:Ag,Al

Green ZnS:Cu,Al

Red $Y_2O_2S:Eu$

カラーCRTの蛍光体

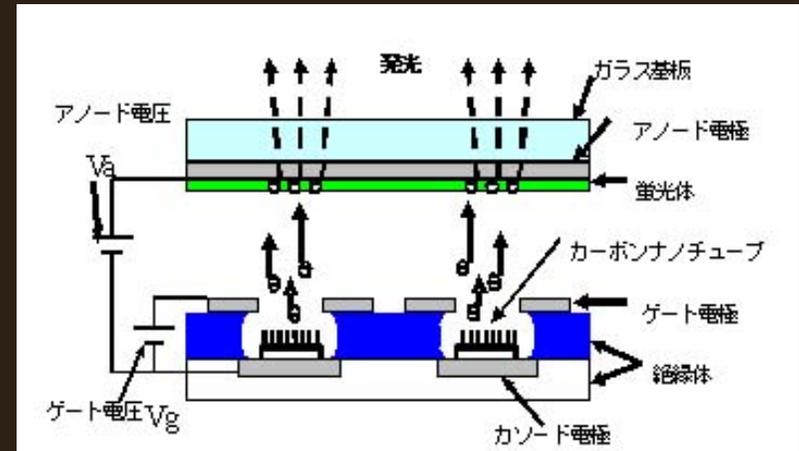
- 赤: $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}$
- 緑: $\text{ZnS}:\text{Cu},\text{Al}$
- 青: $\text{ZnS}:\text{Ag}$



カソードルミネセンスの例2

FED(電界放出型ディスプレイ)

- FEDは、真空の空間が二つのガラスシートによってはさまれたものになっている。
- そのガラスシートのうち、カソード(陰極)からは電界放出によって電子が放たれる。このときの電子はカソードとゲート電極の間の電圧の差によって生じる。
- 真空中に放出された電子はアノード(陽極)の方に向かって進み、途中で蛍光体に衝突して光を放つ。こうして、RGBの三つの蛍光体一組から発せられた可視光が、ディスプレイの1ピクセルに相当する。

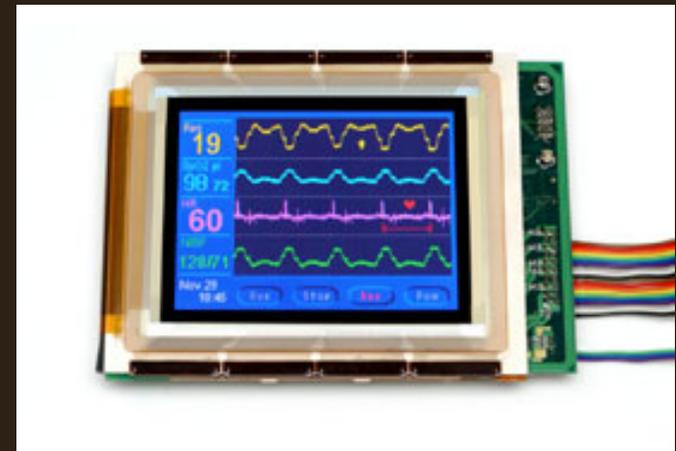
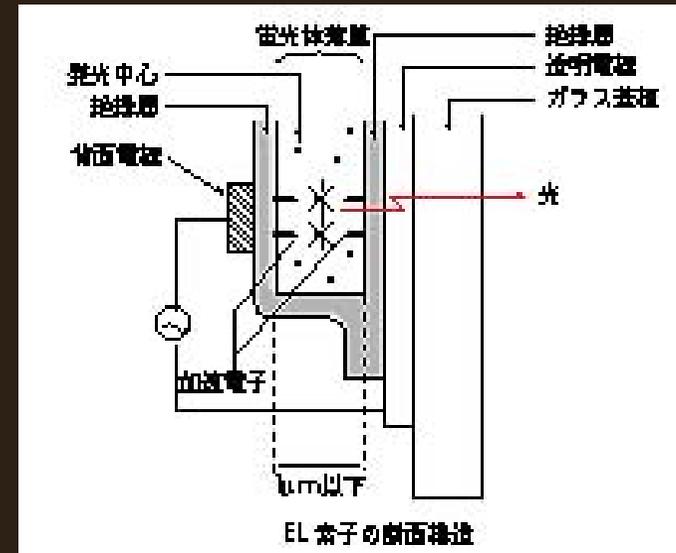


カーボンナノチューブを用いたFED

エレクトロルミネセンスの例1

無機エレクトロルミネセンス

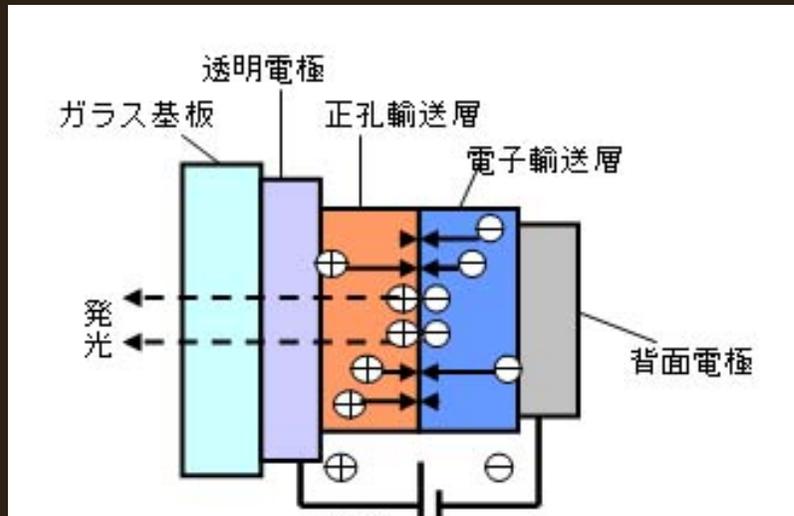
- 電子が電界により絶縁体/ZnS界面から放出される
- 電界で加速されホットエレクトロンとして移動
- ホットエレクトロンがMnなど発光中心に衝突
- 発光中心の電子系が励起される
- 励起状態から光を放出して基底状態に戻る



エレクトロルミネセンスの例2

有機エレクトロルミネセンス

- 有機ELは、有機発光層を金属電極と透明電極ではさんだ構造をとっている。
- 金属電極と透明電極との間に電圧を加えると、有機分子上を電荷が対向電極に向かって移動する。この移動中に、ホールと電子が出会うと、有機発光層の中で再結合し、この時エネルギーを放出する。このエネルギーによって有機発光層が発光する。(有機LEDともいう)



光産業技術振興協会のHPより

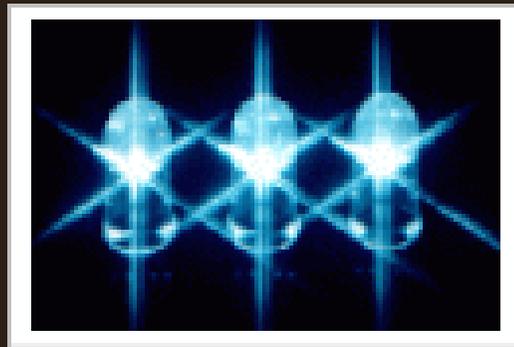


三洋電機のHPより

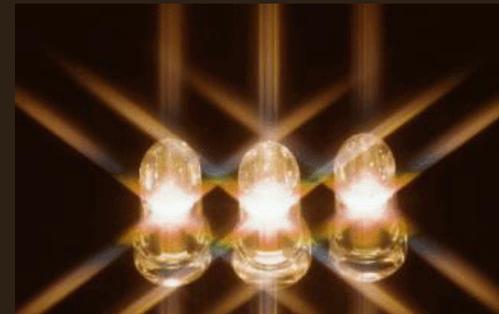
注入型ルミネセンス(LED)

LED=light emitting diode

- 半導体pn接合を順バイアスして、電子とホールをpn境界付近に導き、再結合の際に発光させる。
- 発光効率が高く、熱を出さない。
- 以前は、青色発光がむずかしかったが、窒化物系の半導体の開発により、高効率の青色発光ダイオードが市販されるようになった。



日亜 青色LED

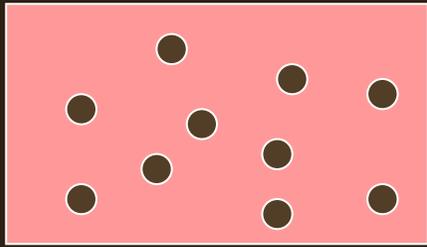


豊田合成 3色LED

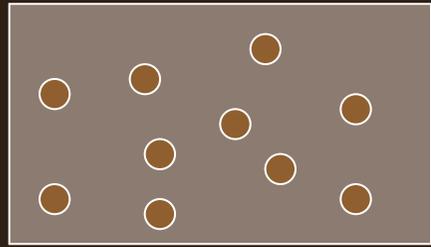
交通信号機が変わった



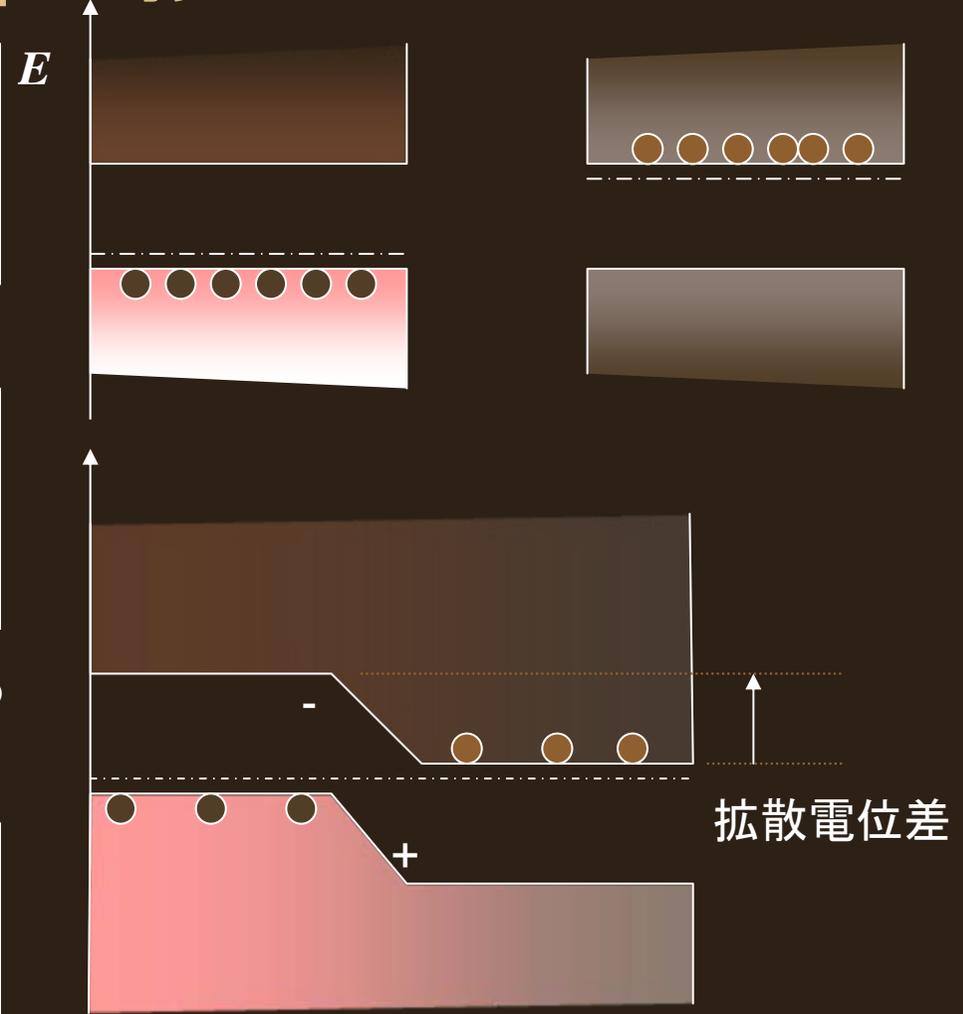
半導体pn接合



P形



N形



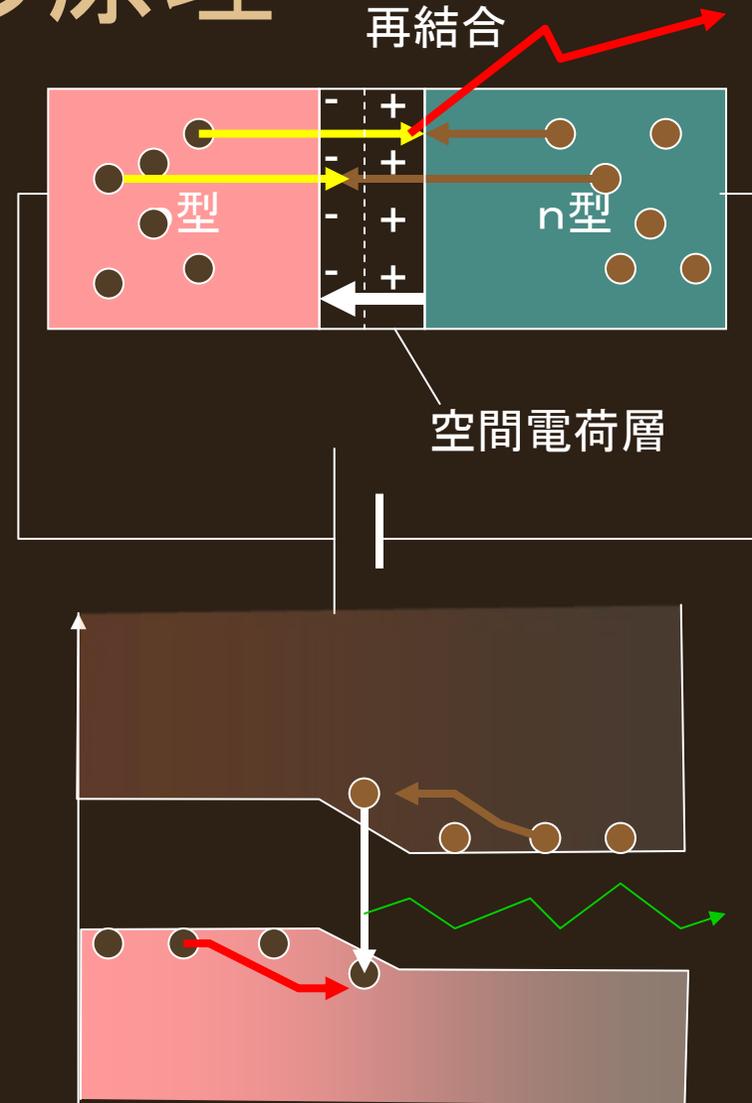
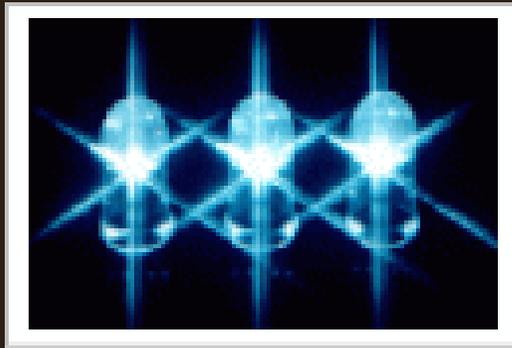
P形とN形を接合するとキャリア拡散が起きる



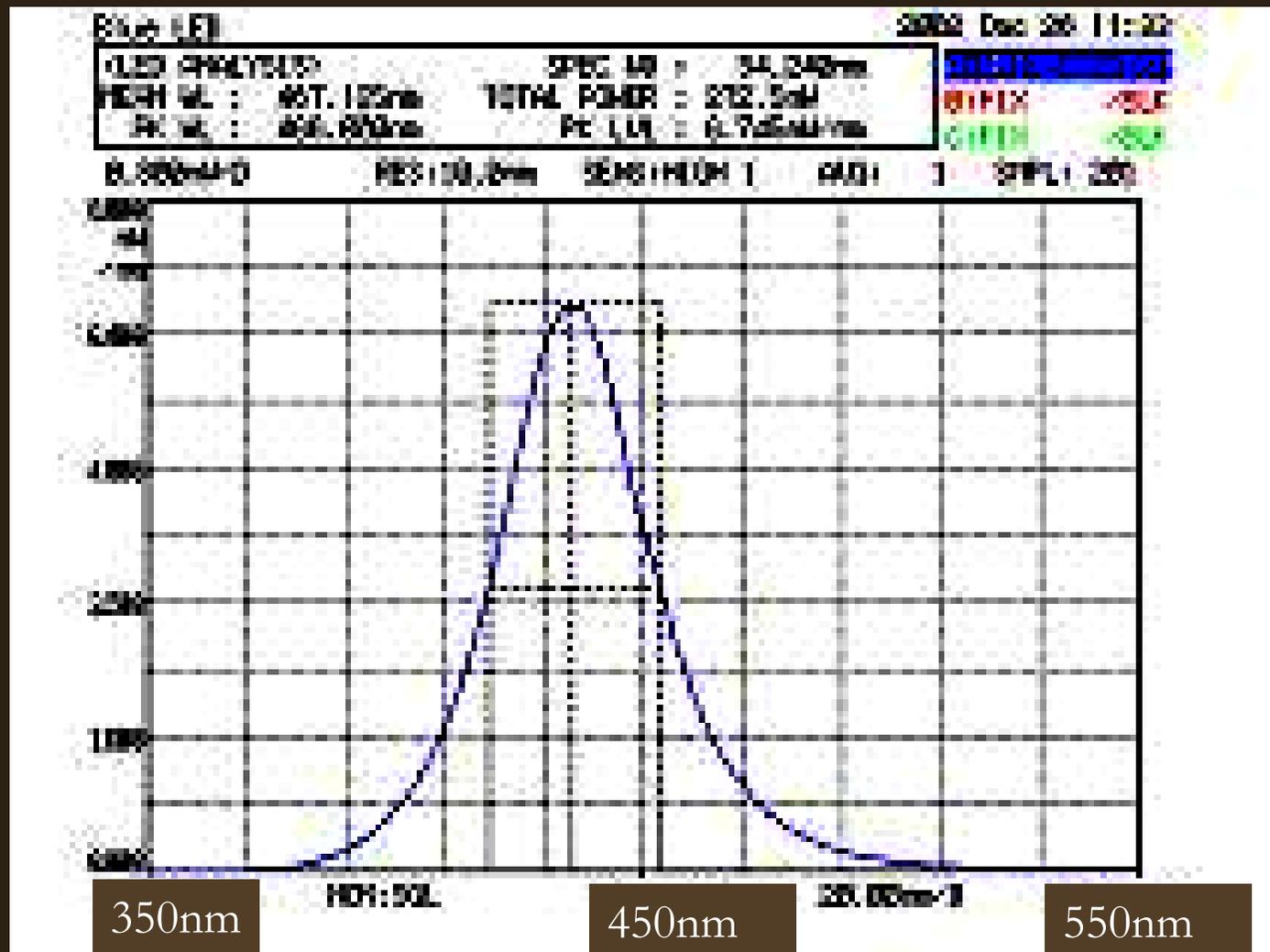
← 拡散電位差

LEDの原理

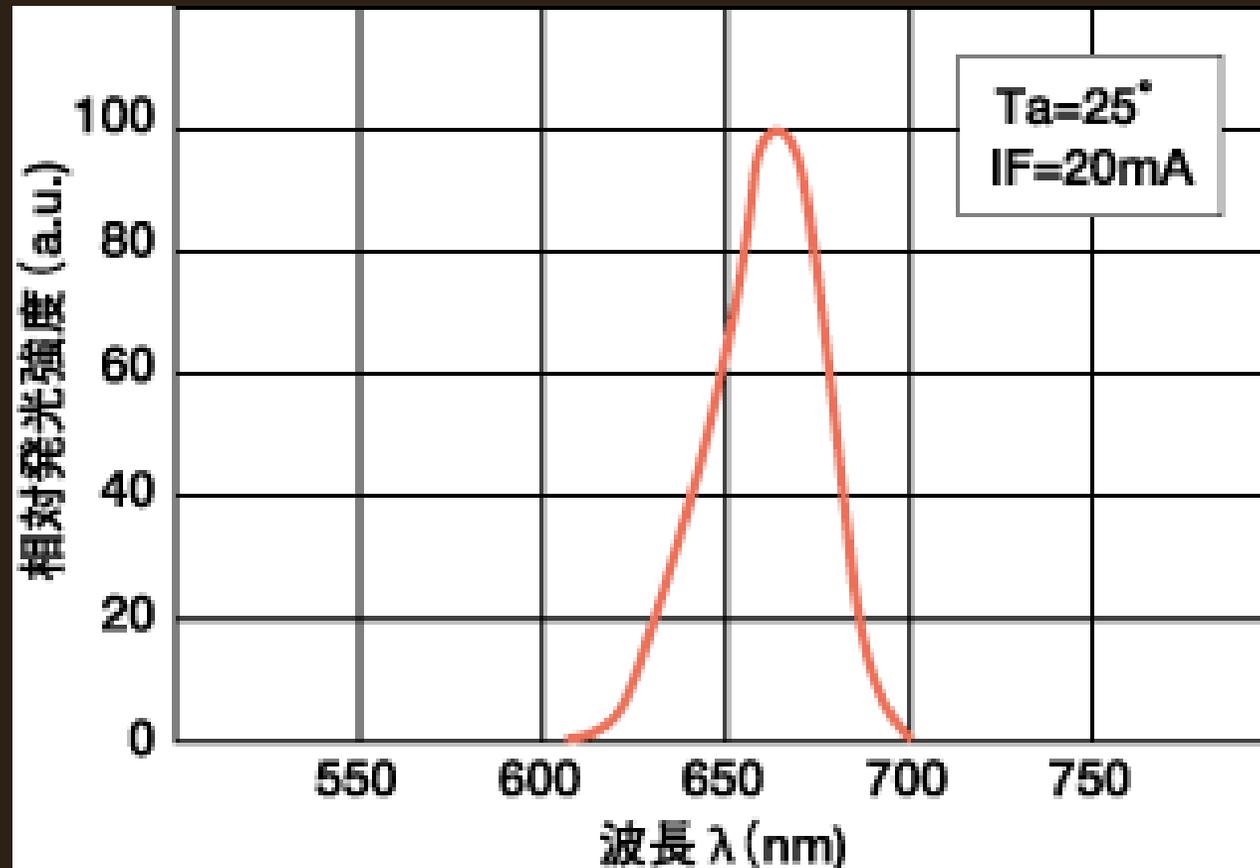
- pn接合を順バイアス
- 電子は、p層に注入
- ホールはn層に注入
- 界面付近で再結合



青色LEDの発光スペクトル

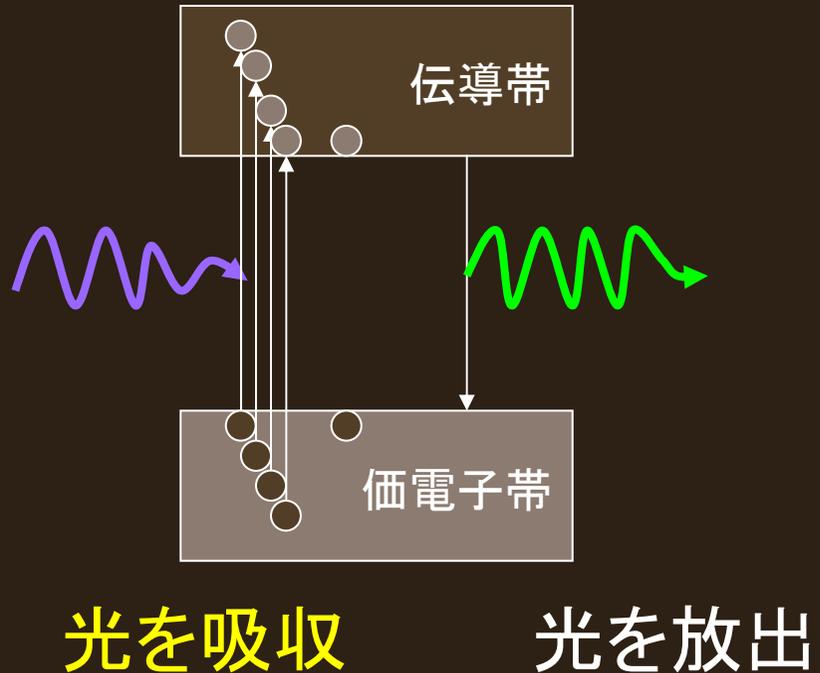


赤色LEDスペクトル



半導体のフォトルミネセンス(PL)

- 光子($h\nu > E_g$)入射
- 価電子帯から伝導帯へ電子が遷移
- 伝導帯に電子、価電子帯にホール生成
- 電子、ホールが移動
- 再結合してエネルギー差を光子として放出



ちょっと背伸び

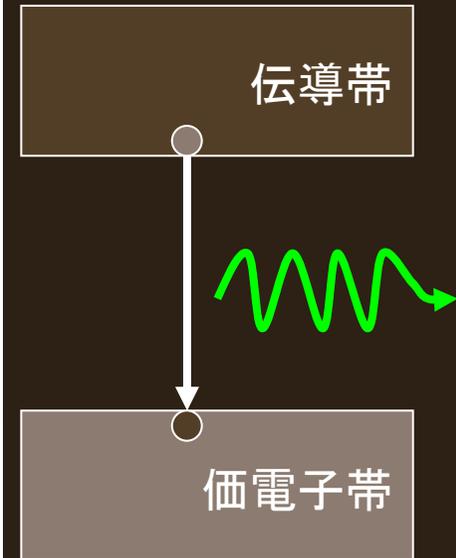
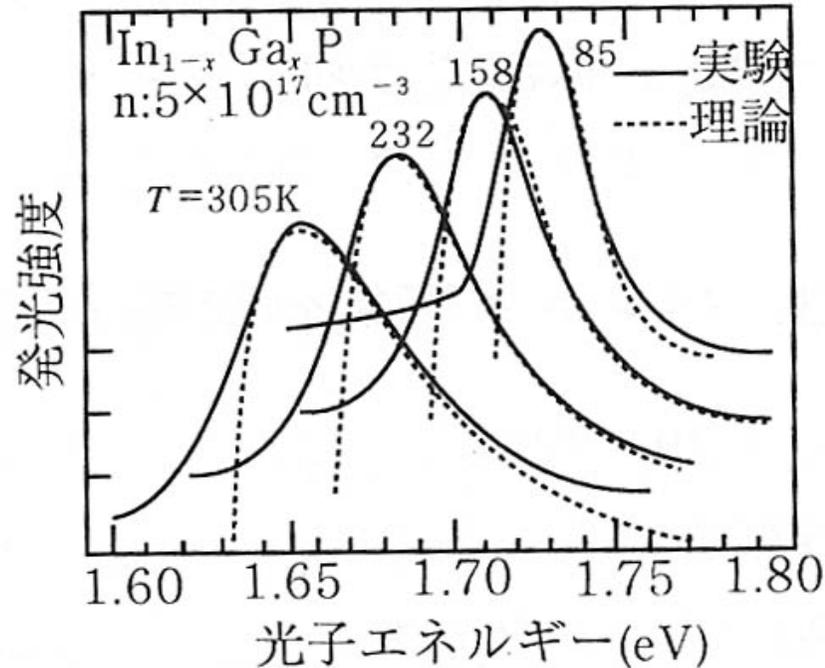
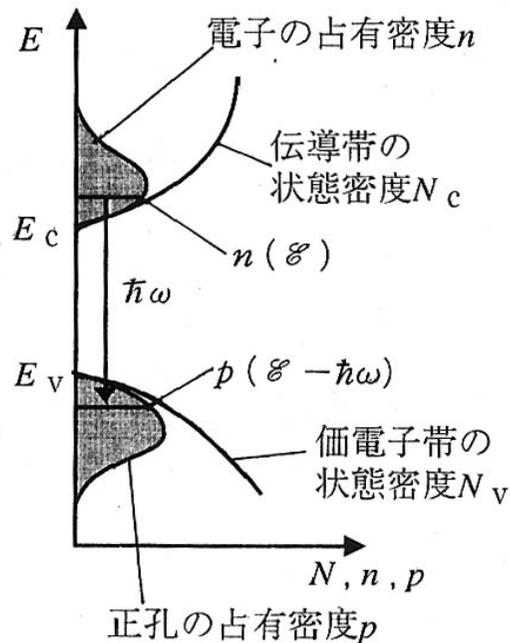
さまざまなフォトルミネセンス(PL)の過程

- 半導体のPLにはバンド間の直接再結合だけでなく、不純物準位を介した再結合過程がある。
 1. バンド間直接再結合(Band to Band)
 2. バンド・不純物準位間再結合(Free to Bound)
 3. ドナー・アクセプタ対再結合(DAP)
 4. 励起子再結合(EX)
 5. 原子内(局在準位間)再結合(Intra-atomic)

ちょっと背伸び

1. バンド間直接遷移による発光

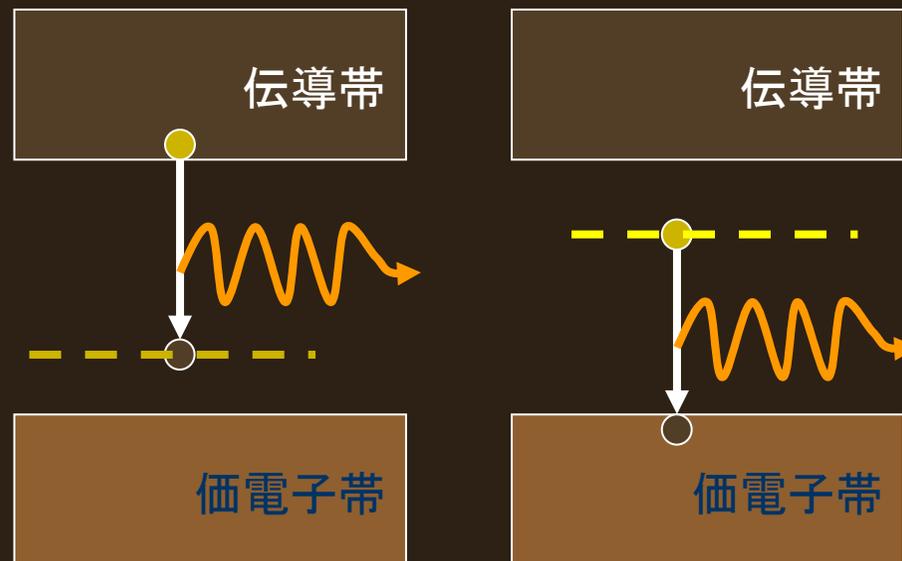
- 伝導帯電子と価電子帯ホールの直接再結合



ちょっと背伸び

2. バンド・不純物準位間遷移

- 伝導帯電子と、アクセプターに束縛されたホールの再結合 Free to Bound Transition (FB)
- ドナーに束縛された電子と価電子帯ホールの再結合 Bound to Free Transition (BF)



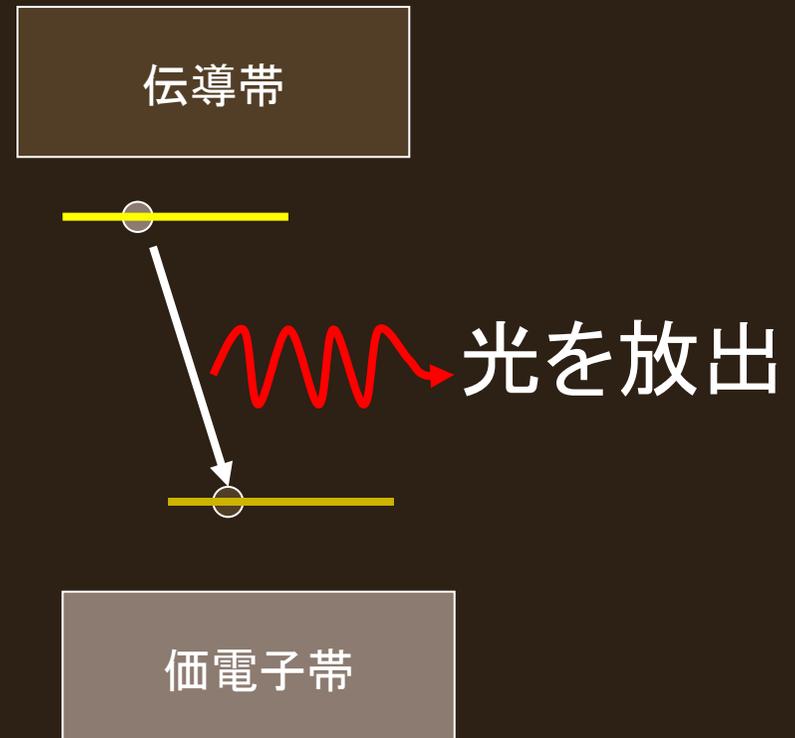
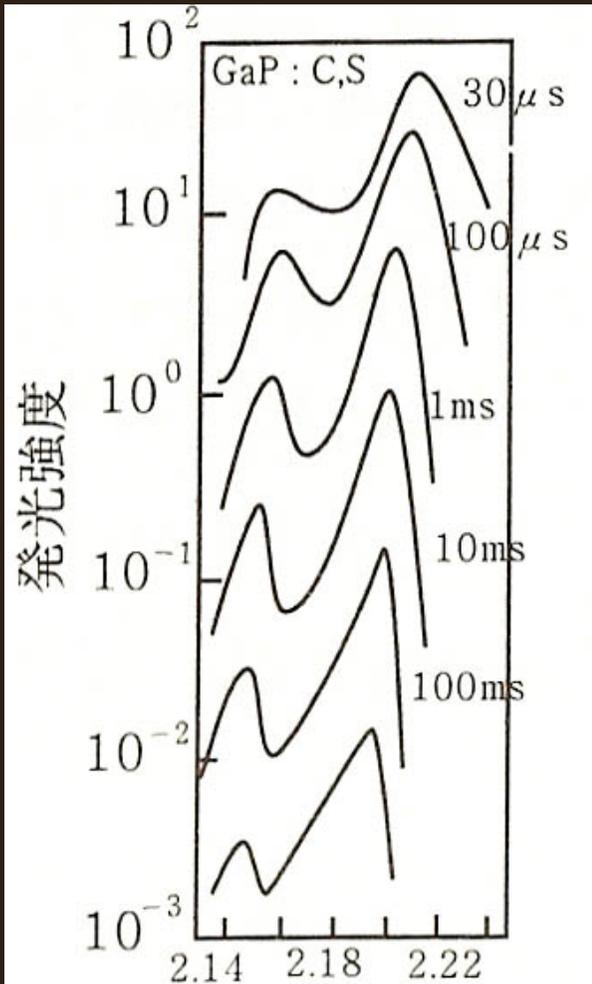
伝導帯→アクセプター

ドナー→価電子帯

ちょっと背伸び

3. ドナーアクセプター対再結合

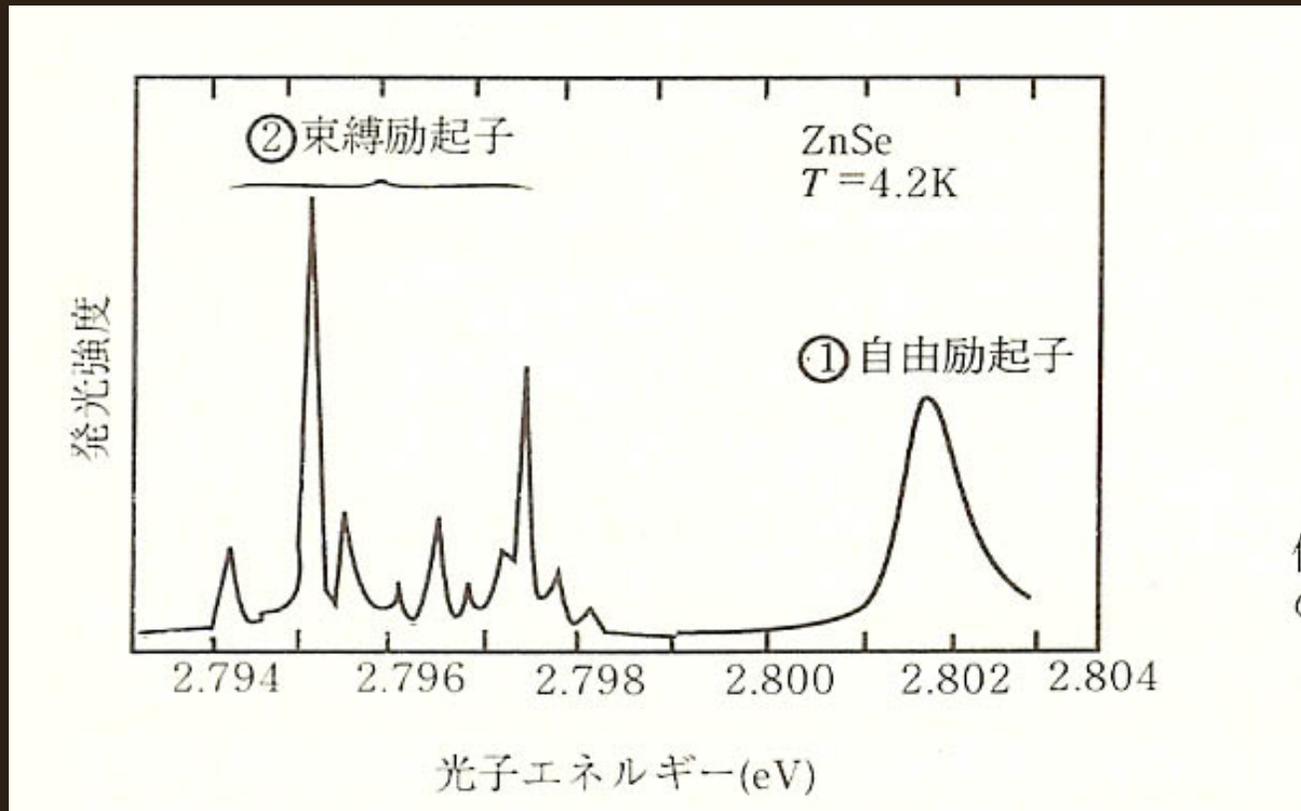
- ドナーに捉えられた電子とアクセプターに捉えられたホールとの再結合



ちょっと背伸び

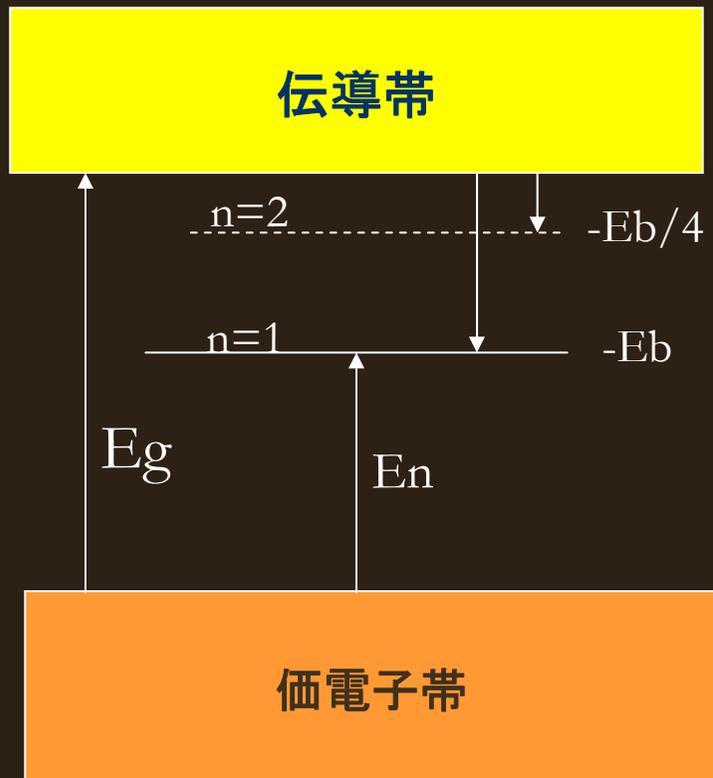
4. 励起子再結合

- 自由励起子(電子とホールがクーロン力で束縛された状態)
- 束縛励起子(電子とアクセプタホールが束縛された状態)



自由励起子とは

- 電子・ホールがクーロン力で束縛された状態



$$E_n = E_g - \frac{E_b}{n^2} + \frac{\hbar^2 K^2}{2M}$$

$$M = m_e^* + m_h^*$$

$$E_b = \frac{e^4 m_r}{8h^2 \epsilon^2} = E_{H_2} \frac{1}{\epsilon_r^2} \frac{m_r}{m_0}$$

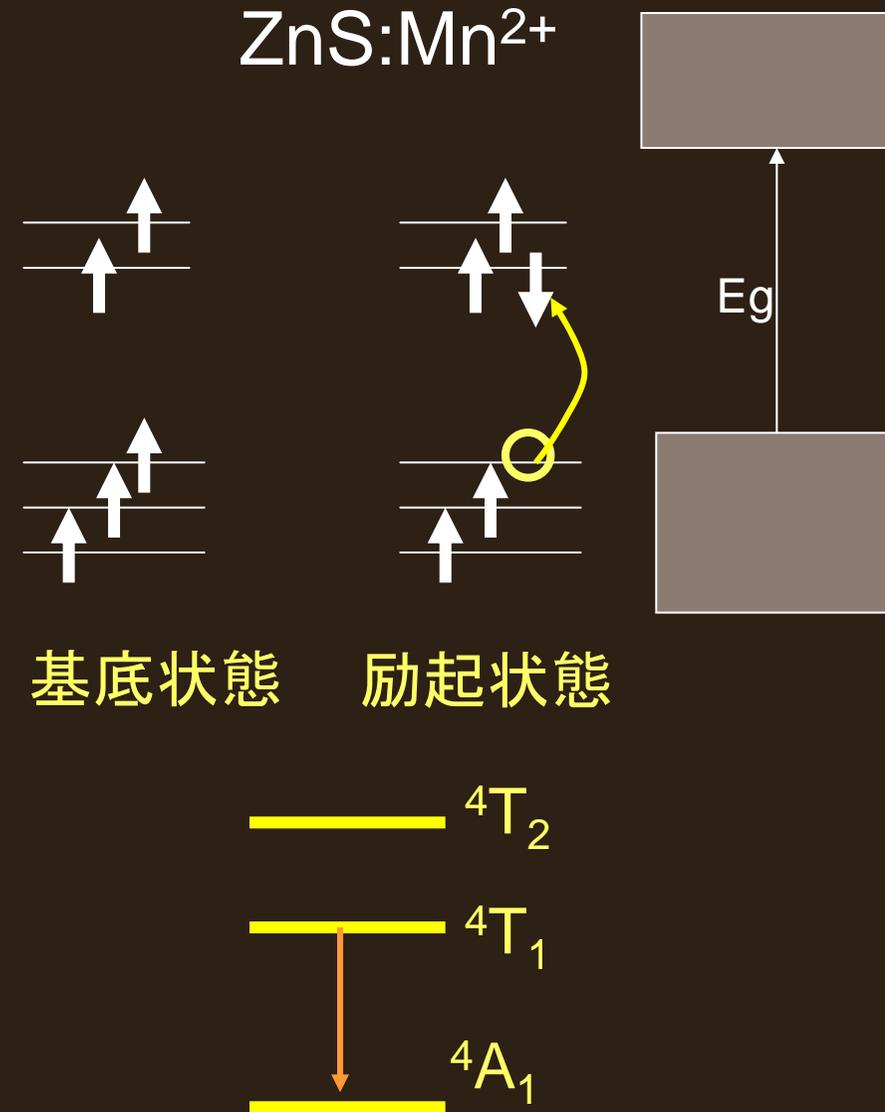
$$m_r = 1 / (m_e^{*-1} + m_h^{*-1})$$



ちょっと背伸び

5. 原子内再結合

- 半導体や酸化物中に添加された希土類の4f軌道や遷移金属の3d軌道は原子付近に局在し、多電子状態を作っている。
- このようなd電子、f電子の関与した内殻遷移が蛍光体では利用される。



ミニテスト予告

- 5/23
- 指定された席に着席
- 学生証を机上に提示
- 電卓持参のこと
- A4の紙1枚に自筆で書いたレジメ(カンペ)
(記名し提出)
- 出題範囲: 金属・半導体
- 勉強しておいてほしいこと: 金属の性質、Drudeの法則、半導体の透過色、半導体の用途、周期表と元素

第5回の問題

- LEDの原理について説明せよ。(キーワード: pn 接合、順バイアス、再結合)