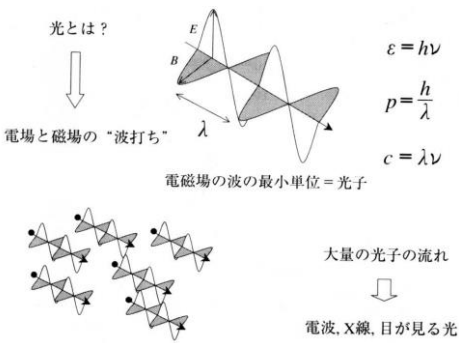
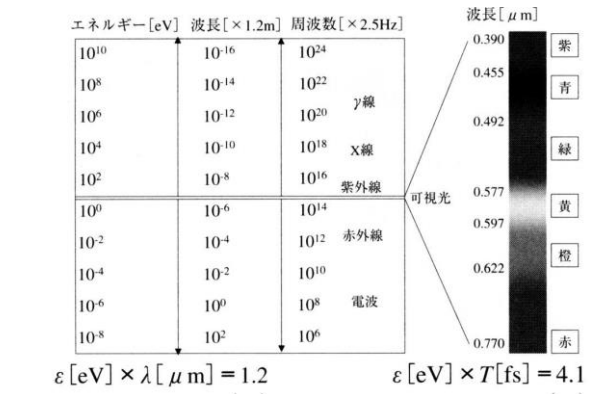


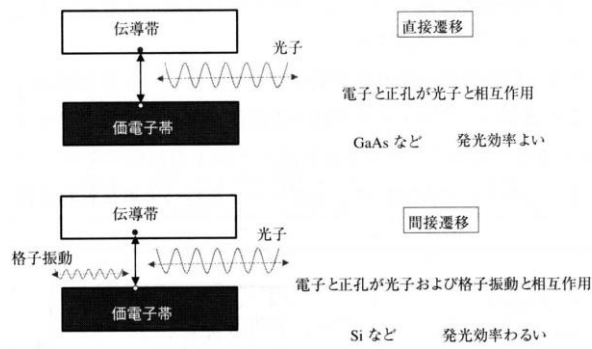


これまで、電子やホールといったキャリアが半導体中を流れる半導体の電子デバイスについてお話をしました。今週はもうひとつの半導体の重要な分野である**光半導体デバイス**のお話をします。光半導体デバイスはオプトエレクトロニクスデバイスといいます。半導体の性質を使って、光を発生したり、検出したり、あるいは増幅する素子のことです。光を発生するデバイスには、**発光ダイオード**があります。光を検出するデバイスには、光通信で使われる**フォトディテクター**やデジタルカメラでフィルムの代わりに使われる**CCD素子**があります。光を増幅するデバイスには、光通信で使われる**半導体レーザー**があります。



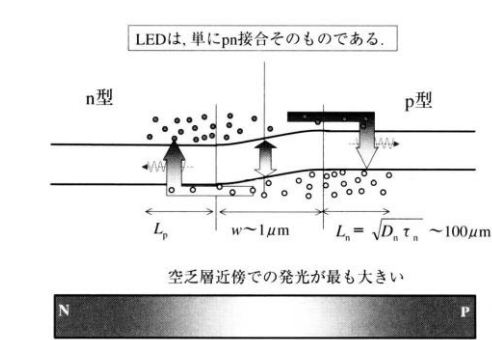
【光と電磁波エネルギーの関係】 光は電磁波つまり電波と同じものです。但し電波よりもずっと短い波長を持った電磁波ということです。光の周波数、エネルギーの間には次の関係があります。 $E = h\nu$ $c = \lambda\nu$ 周波数と波長の関係は、 $\lambda[m] = \frac{300[m]}{f[MHz]}$ です。また、光の、あるいは電磁波・電波でも

同じですが、エネルギーと周波数の関係は、 $E[eV] = h\nu$ 通常、光の分野では周波数のことを f ではなく、ギリシャ語の ν (ニュー) で表します。ここで h はプランク常数です。 f は周波数・振動数です。これを組み合わせると、光の波長とエネルギーの関係は、 $\lambda[nm] = \frac{1239.85}{E[eV]}$ となります。つまり 1 eV の光は、約 1.24 ミクロンの波長を持つことになります。この 1.24 ミクロンの波長の光は、赤外線と呼ばれる光の領域になっており、人間の目には見えません。しかし赤外線は目に見えない光であるので、リモコンや光通信などに使われています。



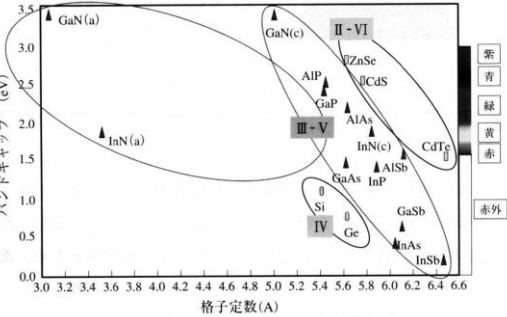
【半導体中の光の発生と吸収】 この講義の一番初めに、半導体のバンド構造についてお話ししました。シリコン半導体のバンド構造を思い出してください。縦軸は電子のエネルギーで、横軸は結晶中の電子の運動量です。運動量空間のバンドダイヤグラムです。光学遷移とは、例えば、伝導帯の底、電子のエネルギーが一番低いので、ここにたくさんの電子が存在していますが、その伝導帯の底から、荷電子帯の頂上、ここに電子が再結合する相手のホールが一番たくさん存在しています。この間で電子とホールが再結合して、バンドギャップ（禁制帯幅）に相当するエネルギーが放出される。このことを、**放射遷移**といいます。シリコンは、**間接遷移半導体**といって、荷電子帯の頂上と伝導帯の底が一致していません。運動量つまり結晶の格子振動エネルギーの補助があると、電子が伝導帯の底から荷電子帯の頂上へ光学遷移することができます。格子振動のエネルギーが必要なので、光学遷移する確率が高くありません。次に GaAs 半導体のバンド図を思い出しましょう。この場合は、伝導帯の底と、荷電子帯の頂上が、同じ結晶運動量あります。ですから、

運動量を与える格子振動のエネルギーの補助が無くても、伝導帯の底から、荷電子帯の頂上へ、光学遷移することができます。これを**直接遷移半導体**といいます。これらは格子振動のエネルギーの補助がなくても光学遷移することができるので、発光や光吸収する効率が、シリコンなどの間接遷移半導体より高くなります。ですから、光半導体デバイスには、シリコンよりも GaAs などの直接遷移半導体が使われます。



発光デバイス
発光ダイオード(=PNダイオード)

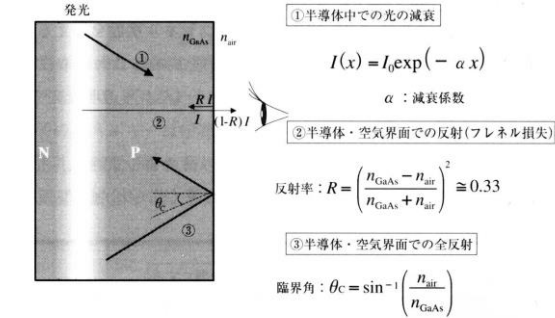
光が放出されます。この波長の光は、目に見える赤色が大体 0.76 ミクロンですから、それより波長が長いので目に見えない近赤外線です。光半導体デバイスに使われる、代表的な半導体の禁制帯幅を書いています。人間の目に見える光の中で、波長が長いほうから説明します。赤は大体が AlGaAs という三元系の化合物半導体が使われます。Al の組成によって禁制帯幅を色々変えられます。大体 Al の組成が 0.3 くらいで、赤に相当する 0.72 ミクロンの波長の光に対応するバンドギャップになります。緑は GaP 半導体が使われます。これは間接遷移半導体なのですが、結晶性をよくすると、明るい純緑色の発光ダイオードが作れます。光の波長は大体 0.55 ミクロン付近です。光のエネルギーは 2.55eV 程度です。また最近では、ちっか物半導体の InGaN が使われ、これも明るい発光ダイオードが作れます。さらに波長が短い光としては青があります。これは波長が大体 0.455 ミクロン程度で、光のエネルギーとしては大体 2.72eV になります。青も InGaN 系そして最近 ZnO という結晶で青色発光が報告されています。



主な光デバイス半導体材料の
格子定数とEg(=色)

う結晶で青色発光が報告されています。

発光の放射遷移の特定波長帯での確率は、ファン・ルーズブロッカーショックレーの式というものから求められて、導出の詳細は省略しますが、



発光ダイオードの光損失

青は InGaN ですが、明るい青色発光ダイオードが実現されました。主に、これまで出来なかった p 型の

【発光ダイオード】 代表的な光半導体デバイスである、発光ダイオードについて説明をします。発光ダイオードの構造を描きます。これは、pn 接合ダイオードと基本的に変わりません。発光ダイオードは、pn 接合に順バイアス電流を流します。そのときのバンド図を描いています。順バイアス電圧を加えると、p 型領域からホールが n 型領域に注入され、n 型領域から電子が p 型領域へ注入されます。注入された少数キャリアは、それぞれ多数キャリアと再結合して消滅しますが、その際、再結合する半導体領域の禁制帯幅・バンドギャップに相当するエネルギーを放出して再結合します。半導体が例えば GaAs ですと、バンドギャップ・禁制帯幅は室温で大体 1.4eV くらいですから、先ほど示した式によって、波長が 0.89 ミクロンの

発光ダイオードについて説明をします。発光ダイオードの構造を描きます。これは、pn 接合ダイオードと基本的に変わりません。発光ダイオードは、pn 接合に順バイアス電流を流します。そのときのバンド図を描いています。順バイアス電圧を加えると、p 型領域からホールが n 型領域に注入され、n 型領域から電子が p 型領域へ注入されます。注入された少数キャリアは、それぞれ多数キャリアと再結合して消滅しますが、その際、再結合する半導体領域の禁制帯幅・バンドギャップに相当するエネルギーを放出して再結合します。半導体が例えば GaAs ですと、バンドギャップ・禁制帯幅は室温で大体 1.4eV くらいですから、先ほど示した式によって、波長が 0.89 ミクロンの

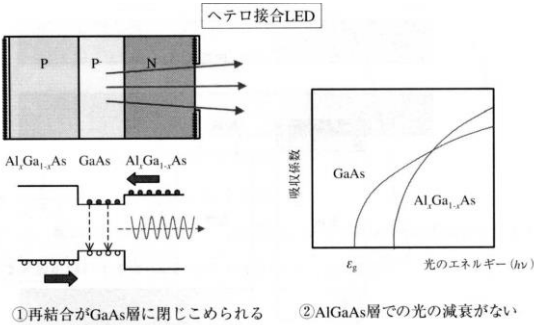
の化合物半導体が使われます。Al の組成によって禁制帯幅を色々変えられます。大体 Al の組成が 0.3 くらいで、赤に相当する 0.72 ミクロンの波長の光に対応するバンドギャップになります。緑は GaP 半導体が使われます。これは間接遷移半導体なのですが、結晶性をよくすると、明るい純緑色の発光ダイオードが作れます。光の波長は大体 0.55 ミクロン付近です。光のエネルギーは 2.55eV 程度です。また最近では、ちっか物半導体の InGaN が使われ、これも明るい発光ダイオードが作れます。さらに波長が短い光としては青があります。これは波長が大体 0.455 ミクロン程度で、光のエネルギーとしては大体 2.72eV になります。青も InGaN 系そして最近 ZnO という結晶で青色発光が報告されています。

$$R(\nu)d\nu = \frac{32\pi^2 k(\nu) n^2 \nu^3}{c^3 \left[\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right]} d\nu$$

項があることから分かるように、振動数 ν が高いほど、つまり波長が短いあるいは光のエネルギーが高いほど、放射遷移確率が小さくなります。つまり高いエネルギー・広いバンドギャップほど、難しい。長らく青色発光ダイオードは暗いものしかできませんでしたでしたが、最近ちっか物半導体の GaN を使って、実は

ちっか物半導体ができるようになったという、結晶成長の進歩の側面が大きい。青より波長が短い光の領域は紫外線になります。これはダイヤモンドが研究段階で開発されています。GaN も紫外線領域の波長の光を放出することが出来ます。次に、明るい発光ダイオードにするためには、どのようなことが必要かについてお話をします。注入された電子とホールが禁制帯幅で再結合することが、重要です。伝導帯の底の電子と荷電子帯の頂上のホールが再結合する場合のほかに、禁制帯の間に欠陥などで作られる電子準位があります。これがあると、その準位を介して再結合する電子とホールがあります。

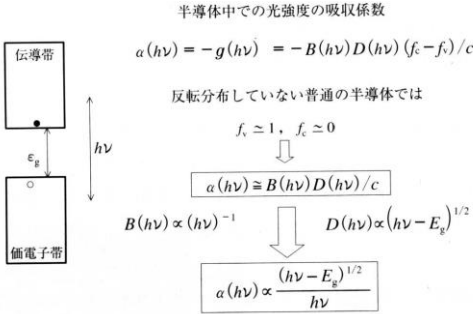
そうすると、目的の光は弱くなります。したがって、このような禁制帯の中に電子準位・欠陥準位をつくるような欠陥を少なくする必要があります。当初は、この結晶の欠陥が多く、非常に暗いものでした。発光ダイオードの性能指数のひとつに**量子効率**があります。これは、電子やホールを一個注入したときに、光子（フォトン）が何個でるかというものです。当初は量子効率が2－3％程度で非常に暗いものでした



発光ダイオード(LED)の高効率化

い。半導体の中でも、発生した光は屈折率が高いほうに集中します。ヘテロ接合構造の中間領域（これは禁制帯幅が小さくて屈折率が高い）で発生した光が、光を発生する領域に閉じ込められることになります。

【フォトディテクター】次に発光の逆の過程で、光を検出する半導体デバイスについて最後に話します。これは、フォトディテクターと呼ばれるもので、基本的なデバイス構造は発光ダイオードと同じです。この

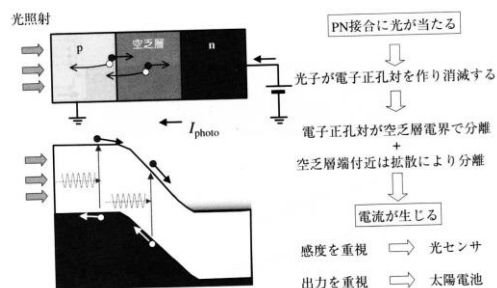


半導体中の光吸収 光検出デバイスの原理

pn 接合ダイオードのバンド図を描きます。これに光を照射します。そうすると、バンドギャップ以上のエネルギーを持つ光が入ると、荷電子帯から伝導帯へ電子が励起されます。荷電子帯には電子の抜け穴であるホールが作られます。これを**電子—正孔対**といいます。pn 接合のバンド図で、バンドが平らな領域（中性領域）で発生した電子—正孔対は、ここは電界がかかっていませんから、周りにある多数キャリアと再結合してしまうので、ダイオード電流として流れません。しかし、pn 接合の空乏層領域で発生した電子—正孔対は、ここは電界がかかっており、しかもキャリアが無いので、再結合しない。発生した電子—正孔対のうちの、電子はポテンシャルが低いn型領域へ流れ、ホールはp型領域へ流れます。これが、pn 接合に光を当てた場合に流れるダイオード電流になります。フォトディテクターは、この光電流を検出して、光を検知するデバイスです。光によってpn 接合の空乏層の中に作られるキャリアの生成率は、大体 $G(x) = \frac{\alpha(1-R)I_0}{h\nu} \exp(-\alpha x)$ になります。ここでαは吸収係数、Rは半導体と空気との間の反射率、νは光の周波数、hはプランク定数です。

空乏層を流れる光電流は $J_{drift} = -q \int_0^W G(x) dx = q \frac{(1-R)I_0}{h\nu} (1 - \exp[-\alpha W])$ となります。つまり、半導体表面での

反射率を低くして、空乏層幅 W を広くすることが重要です。反射率を低くするために、フォトディテクターの表面に反射防止膜を形成します。これは屈折率が異なる薄膜の多層膜が使われます。 W を広くするために、高純度半導体層を用います。色々な検出方法があります。短絡電流を測定する回路、またダイオードの端子を開放（オープン）にした場合は、光照射によって発生する電子と正孔による開放電圧を測定する方法もあります。これは光起電力測定です。良いフォトディテクターは、弱い光まで検出できて、しかも光を当てたとたんに検出できる、つまり高速に応答するということです。



光検出デバイス フォトダイオード、太陽電池、CCD

【フォトディテクターの高感度化】これは1000個の光子フォトンがやってきたときに、どれだけたくさんの電子—正孔対を発生できるかということになります。そのための特殊な構造の一つに、アバランシェ接合があります。**アバランシェとは、雪崩**のことです。あたかも、雪崩のように、一個の電子が発生すると、それが電界によって加速され、結晶格子と衝突しながら結晶中を伝播し、その過程で、雪だるま式に電子の数を増やしながら電流が流れる構造です。これはpn接合の代わりに、pnin接合として、最初のpnのn層を薄くして電界強度を高くし、光の照射によって発生した最初の電子—正孔対が電界によって高速に加速されて結晶格子と衝突して、雪崩現象が生じるようにした構造です。これは光によって発生した一個の電子が1000倍にも10000倍にも増幅されるわけですから、非常に感度が高く、電界で加速されますからある程度高速に動作しますが、この雪崩増幅過程で色々なエネルギーを持った電子が発生するため、雑音が大きい欠点があります。むしろ、広い周波数範囲で使える標準雑音源として使われるほどです。フォトディテクターが検出できる光の波長範囲、つまり光のエネルギー範囲は、禁制帯幅に相当するエネルギー以上であれば、電子—正孔対が発生するので、検出できます。しかし、半導体を通じて光を空乏層の中に照射するわけですから、半導体で吸収されると空乏層には届きません。大体、半導体中では、光の波長程度の距離は進入しますが、それ以上厚いと届きません。そのほか、n型領域のキャリア密度が高いと、**「自由キャリア吸収」**があり、空乏層に光が届かないことになります。実際のフォトディテクターでは、これらの影響を考えて構造を設計します。

【例題】

波長1ミクロンの光（近赤外線）に対応するエネルギーをeV単位で求めなさい。

【解答例】

SI単位系に単位を揃えて計算します。光の波長 λ と周波数 ν （あるいは f ）の関係は、

$$\lambda[m] = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 [m/s]}{f[1/s]} = \frac{3 \times 10^8 [m/s]}{\nu[1/s]} \quad \text{ここで、} c \text{ は真空中（あるいは空気中）の光速です。また、周波数}$$

ν を持つ波動（光や電磁波）とエネルギーの関係は $E = h\nu$ です。ここで、 h はプランク定数といい、 $h = 6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$ そして、1 eV エレクトロンボルト(eV)単位は、1個の電子が1ボルトの電位差で加速された時に、電子に与えられるエネルギーで、 $1eV = 1.602 \times 10^{-19} C \times 1V = 1.602 \times 10^{-19} J$ です。また、

$$1\mu m = 10^{-4} cm = 10^{-6} m。これらの関係から、\lambda[m] = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{E} が得られ、\lambda(1\mu m) \Leftrightarrow E = 1.24(eV) が得られます。$$