

スライドショーで見てください。
スライドショーにしてから、画面上で右クリックして、「発表者ツールを表示」を選択

電子デバイス工学 (10)

学科共通 2 年目必修科目

B組 教室：A13、毎週水曜日10:30-12: 00（2 講目）

太田裕道（情報エレクトロニクス専攻／電気電子工学コース・
内線9428, hiromichi.ohata@es.hokudai.ac.jp）

出席の代わりに、最後のページで指定された部分の授業
のノート写真を撮って、
7月8日 13時まで
に電子メールで送ってください。写真は1枚でOKです。

では、電子デバイス工学10回目の講義を始めます。今日は第13章の光半導体デバイスを説明します。教科書110ページから120ページまでです。今日も**出席の代わりに、授業のノート**を写真に撮ってメールで送ってもらいます。提出する部分が決まっていますので、注意してください。

半導体に光を照射すると、内部に電子正孔対が発生する。この現象とpn接合を組み合わせることで、太陽電池や光検出器、イメージセンサーなどを作ることができる。一方、電子と正孔が再結合するとき、光の放出をともなうものがある。pn接合を使って光の放出を制御すると、発光ダイオードやレーザーダイオードを作ることができる。ここでは、これら光半導体の原理を学ぶ。

教科書110ページを開けてください。まずは、声を出して読んでみてください。

「半導体に光を照射すると、内部に電子正孔対が発生する。この現象とpn接合を組み合わせることで、太陽電池や光検出器、イメージセンサーなどを作ることができる。一方、電子と正孔が再結合するとき、光の放出をともなうものがある。pn接合を使って光の放出を制御すると、発光ダイオードやレーザーダイオードを作ることができる。ここでは、これら光半導体の原理を学ぶ。」

赤文字にしてあるのが今日のキーワードです。

覚えること

波長と光子エネルギーの関係

$$E[eV] = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = \frac{1240}{\lambda [nm]}$$

勿論、物理定数を完璧に覚えても構いませんが、

プランク定数 h 6.6261×10^{-34} J s

真空中の光速 c 2.9979×10^8 m/s

電気素量 e 1.6022×10^{-19} C

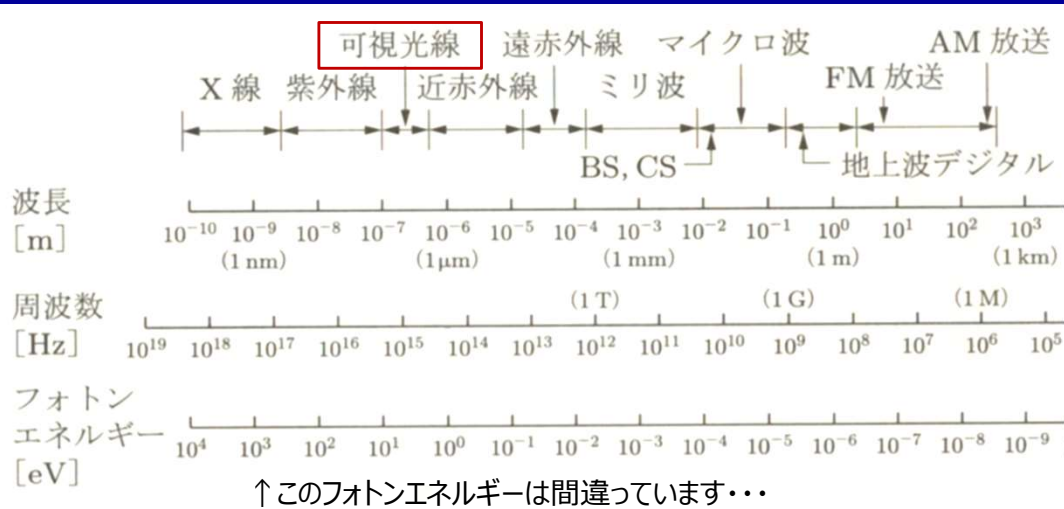
今日は光と半導体の相互作用について勉強しますが、「単位」が揃っていないと考えにくいので、まずは単位を揃えます。

通常、光は波長(nm:ナノメートル)で表しますが、半導体のバンドギャップと揃えるために、eV(エレクトロンボルト)に変換します。1240÷波長(nm)でeV単位のエネルギーになります。

もちろん、物理定数を完璧に覚えてもらってもよいのですが、1240÷波長=エネルギーは覚えておくと便利です。

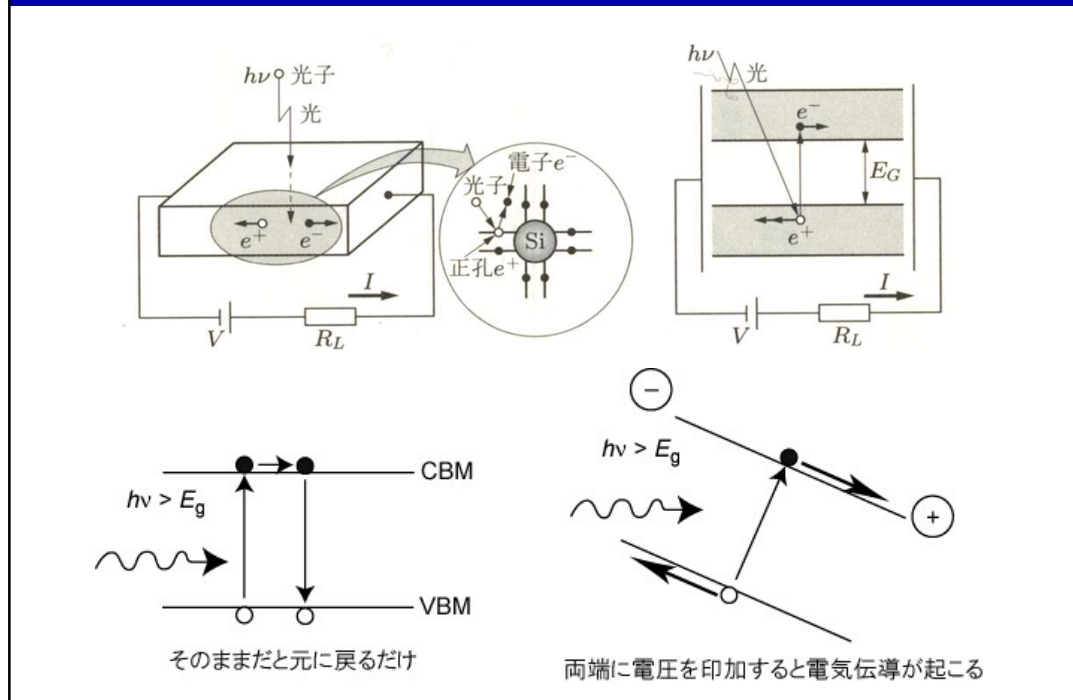
13.1 光子

p.111



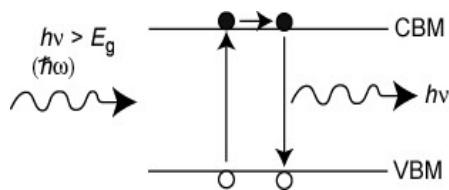
可視光線	波長	400 nm ~ 800 nm
	光子エネルギー	3.1 eV ~ 1.55 eV

可視光線は、波長 400 nm の紫から、波長 800 nm の赤までの、「人間の目に見える光」です。これを光子エネルギーに変換すると、 $1240 \div \text{波長}$ で、3.1 eV から 1.55 eV となります。



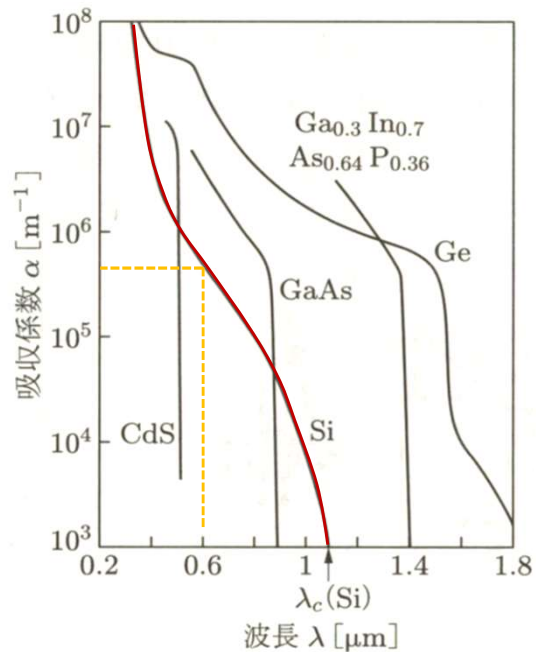
この講義の最初のほうで勉強しましたが、半導体にバンドギャップよりもエネルギーが高い光を照射すると、価電子帯から伝導帯に電子が励起されて、価電子帯には正孔ができます。半導体にただ光をあてるだけだと、光を止めれば伝導帯に励起された電子は元の価電子帯に戻ります。

では、半導体に電圧を印加しておくとうなるでしょうか？ 右下の絵のように、マイナス電極をつなげたほうはエネルギーが高くなり、プラス電極をつなげたほうはエネルギーが低くなります。電子は伝導帯を滑り落ちるように動き、正孔は価電子帯を上ります。つまり、電流が発生します。これを、「光導電効果」と呼びます。



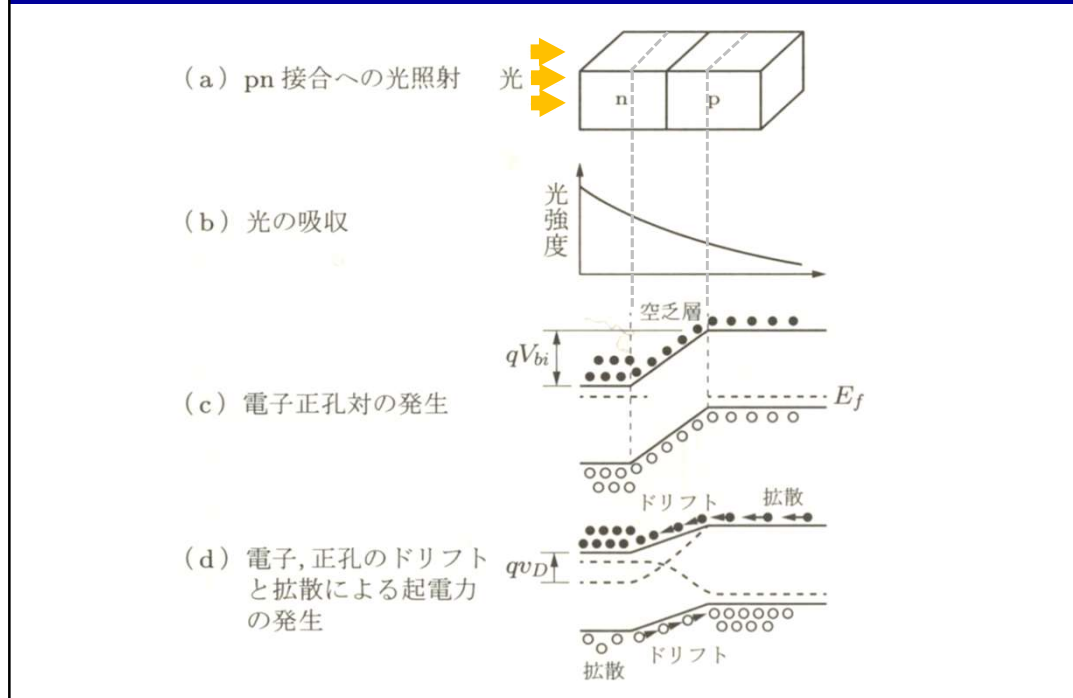
$$E[\text{eV}] = \frac{1240}{\lambda[\text{nm}]}$$

半導体	E_g (eV)	波長 (μm)
Si	1.12	1.11
GaAs	1.42	0.873
CdS	2.42	0.512
Ge	0.67	1.85



価電子帯の電子を伝導帯に励起するためには半導体のバンドギャップよりもエネルギーが大きな光を照射する必要があります。Siの場合、バンドギャップが1.12 eVなので、 $1240/1.12 = 1107$ 、波長が1107 nmよりも短い光を照射すればよいといえます。

右のグラフを見てください。横軸は光の波長です。縦軸は吸収係数と呼ばれるもので、光がどれだけ半導体に侵入できるかを表す指標です。例えば、Siの波長600 nmの光に対する吸収係数は $4 \times 10^5 / \text{m}$ くらいです。この逆数が光の侵入長なので、 $2.5 \mu\text{m}$ くらいです。Siの吸収係数の波長依存性は緩やかで、波長が長い光はあまり吸収せず、波長が短くなるとよく吸収するようになります。GaAs は様子が違います。(後で説明します)



次に、太陽電池について説明します。今、Si のpn接合ダイオードがあるとします(a)。例えば、波長 600 nmのオレンジ色の光を n型半導体側から照射したとします。600 nmの光はSi結晶の中に $2.5\ \mu\text{m}$ 侵入しますが、結晶内部に向かって光の強度は徐々に減少します(b)。

重要なのは、「空乏層」に光があたっていることです(c)。空乏層は、電子も正孔もない状態ですが、バンドギャップよりもエネルギーが大きな光があたると電子正孔対が発生します。pn接合にはもともと電圧がかかったようにバンドが曲がっているので、電子は伝導帯の坂を落ちるように、正孔は価電子帯の坂を上るように動きます。これが太陽電池の仕組みです。

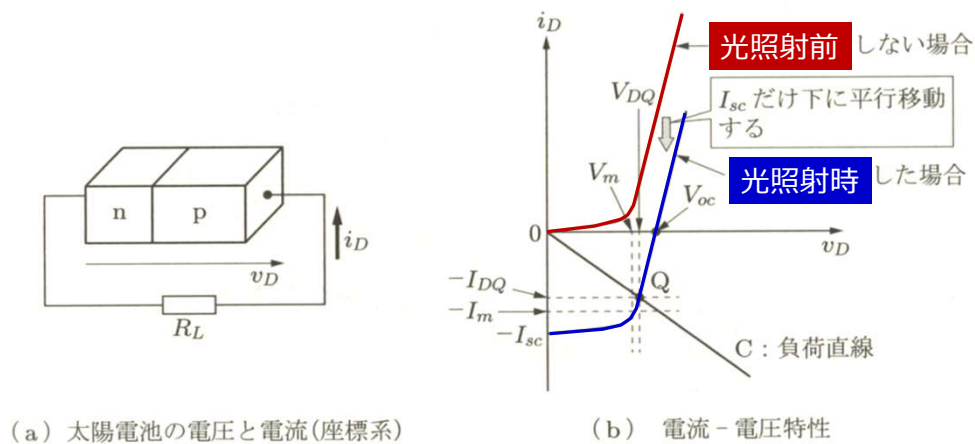
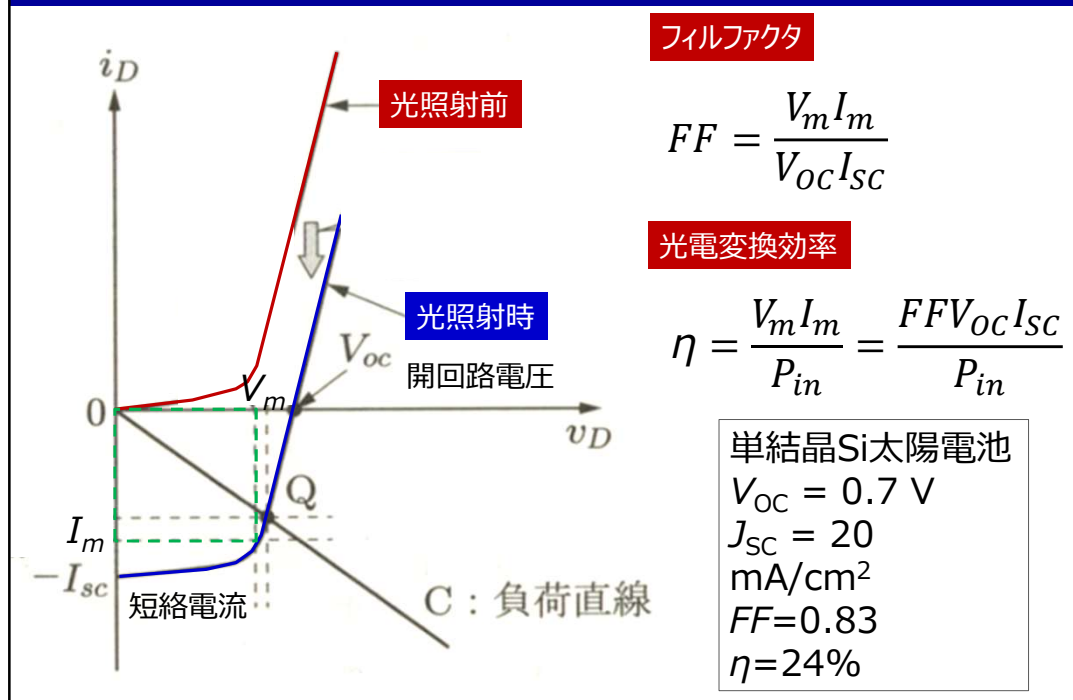


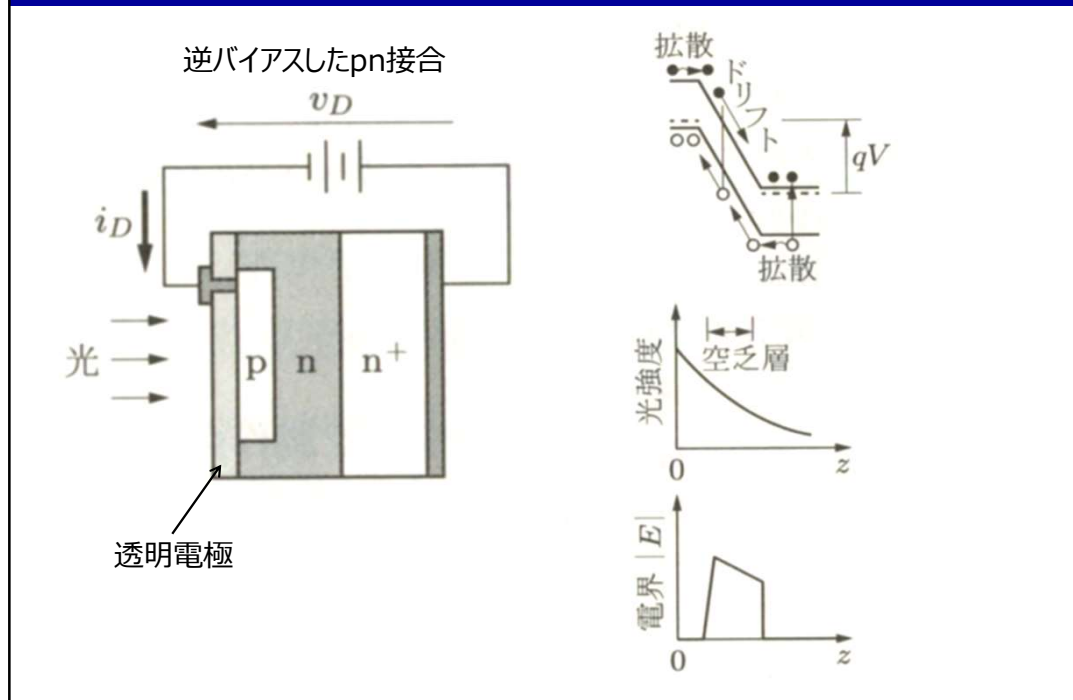
図 13.6 太陽電池の電流 - 電圧特性

先ほどの説明のように、太陽電池では Si の pn 接合ダイオードを使います。右の電流 - 電圧特性を見てください。Si の pn 接合ダイオードは既に勉強しましたが、赤の線のようにしきい値電圧以上の電圧を印加すると電流が増加します。

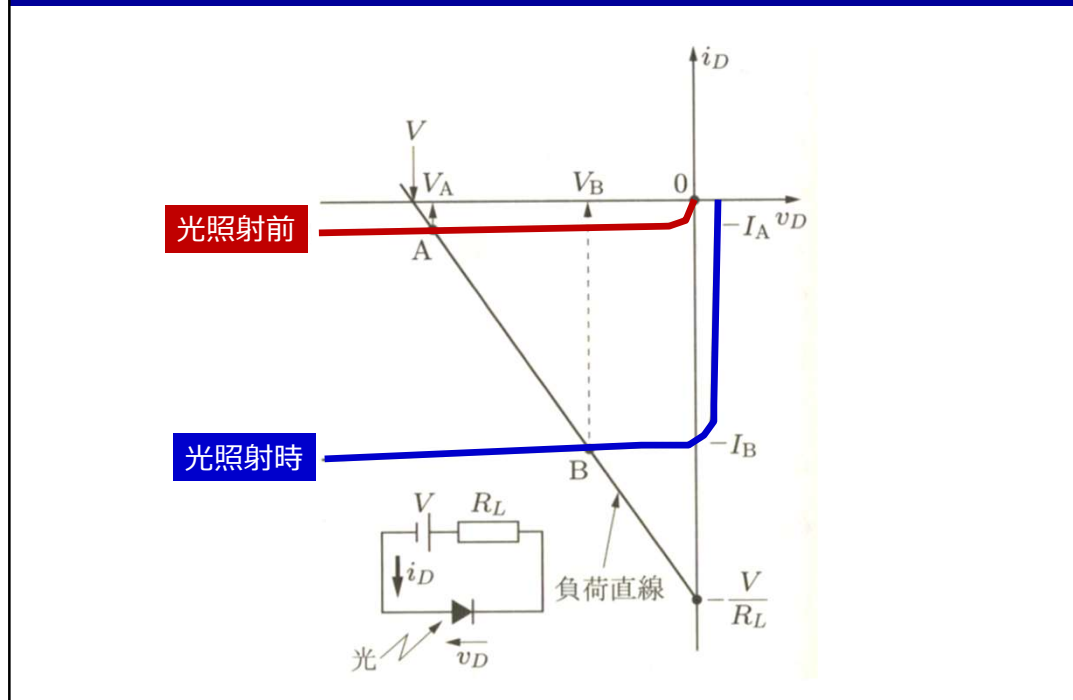
この電流 - 電圧特性を示す Si pn 接合ダイオードに、波長 600 nm の光を照射するとどうなるでしょう？ 電圧を印加していない状態で電流が流れます。極性が逆になるということに注意してください。そして、電流 - 電圧特性は全体的に下に平行移動されます(青い線)。



もう少し細かく見てみましょう。図の青い線に注目してください。電圧ゼロで流れる電流は、短絡電流(I_{SC})と呼ばれます。また、電流がゼロになる電圧は開回路電圧(V_{OC})と呼ばれます。原点0— I_{SC} — V_{OC} で囲まれた領域内において、専有面積が最大になる正方形を描くと緑色の点線になります。この I_m と V_m 、 I_{SC} と V_{OC} を使って、光電変換効率を計算することができます。



太陽電池と同じようなpn接合ダイオードに逆バイアス電圧を印加しておいて、逆方向電流で光を検出するフォトダイオードと呼ばれるデバイスもあります。構造は左の絵のようになっています。

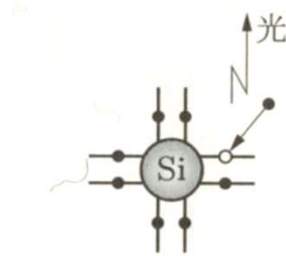


フォトダイオードの電流－電圧特性を見てみましょう。光を照射しない状態では、Si の pn 接合に逆バイアスを印加しているだけなので、少数キャリアによる微小な電流が流れるだけです。ここに、光を照射すると太陽電池と同じように電流が流れます。この流れる電流で光を検出します。

間接遷移型

Si、Geなど

生成した電子-正孔が再結合する際、熱としてエネルギーを放出

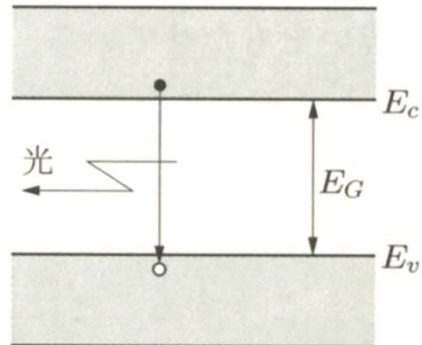


(a) 電子と正孔の再結合

直接遷移型

GaAs、GaNなど

生成した電子-正孔が再結合する際、光としてエネルギーを放出



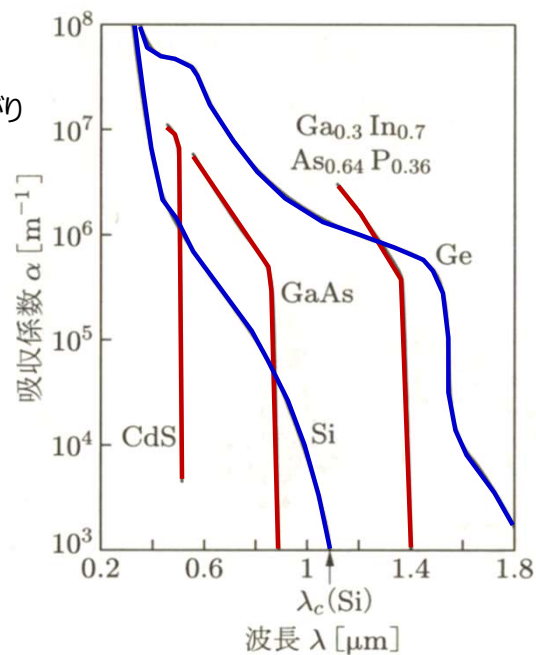
(b) 励起電子の遷移による発光

次は半導体の発光現象です。先ほどまでの説明では、Si に波長600 nmの光(バンドギャップよりもエネルギーが大きな光)をあてると、電子正孔対ができ、光を止めると励起された電子は元通り正孔を埋めるとしました。この時、Si結晶が吸収した光エネルギーを再結合で放出するのですが、光ではなく熱エネルギーとして放出します。GaAsやGaNなどの半導体では、吸収した光エネルギーを、再結合する際にほぼバンドギャップに相当する光エネルギーとして放出します。実は、SiとGaAsでは光吸収の様式が違って、Siは間接遷移型、GaAsは直接遷移型と呼ばれます。違いは次のページで説明します。

間接遷移型 / 直接遷移型

直接遷移型

急峻な立ち上がり



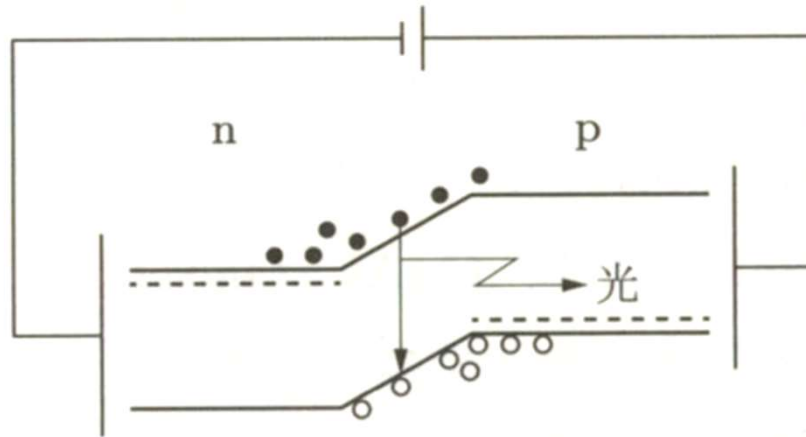
間接遷移型

立ち上がりが緩やか

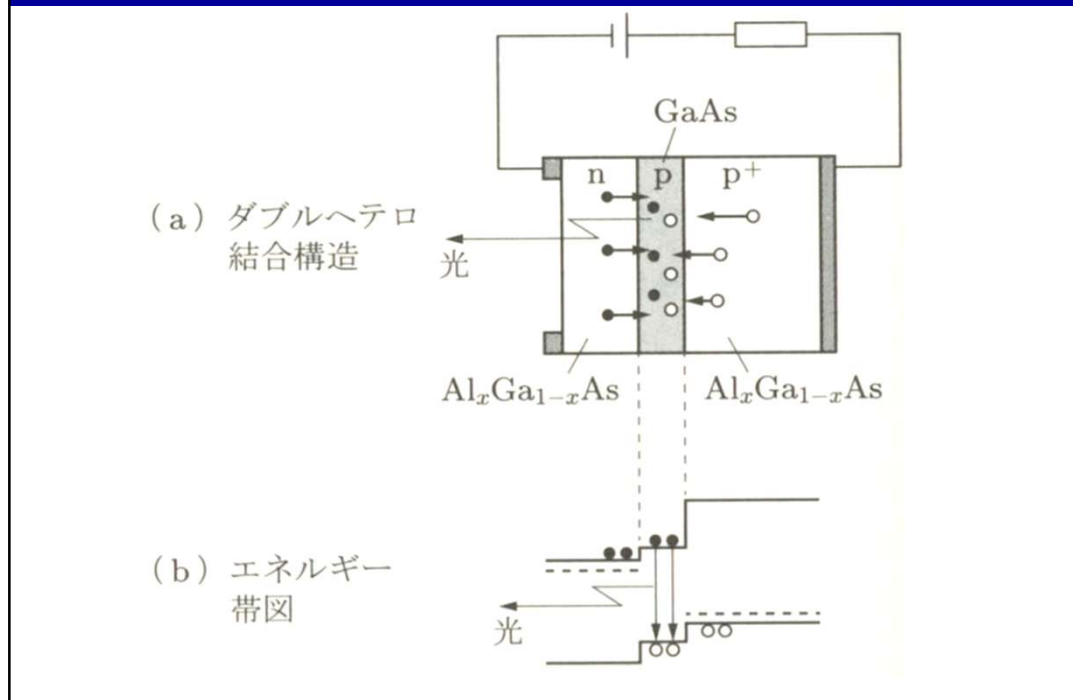
これは先ほども出てきた半導体の光吸収スペクトルです。先ほどはSiだけ説明しましたが、ほかの半導体についても見てみると、赤と青の2つのグループに分けることができます。青い線のSiとGeは波長が短くなるにつれて徐々に吸収係数が増加しますが、赤い線のCdS、GaAs、Ga_{0.3}In_{0.7}As_{0.64}P_{0.36}は、バンドギャップに相当する波長で急激に吸収係数が増加します。赤い線のグループは直接遷移型の特徴、青い線のグループは間接遷移型の特徴を表しています。発光ダイオードを作るためには、(主に)赤い線の直接遷移型の半導体が用いられます。

直接遷移型 GaAs、GaNなど

生成した電子-正孔が再結合する際、光としてエネルギーを放出



直接遷移型のGaAsやGaNなどの半導体を使ってpn接合ダイオードを作り、順バイアスで電流を流したとしましょう。電子と正孔が空乏層に入って出会うと、再結合しますが、この時、光を放出します。放出される光のエネルギーはバンドギャップに近いです。このようなダイオードを発光ダイオード(Light Emitting Diode: LED)と呼びます。

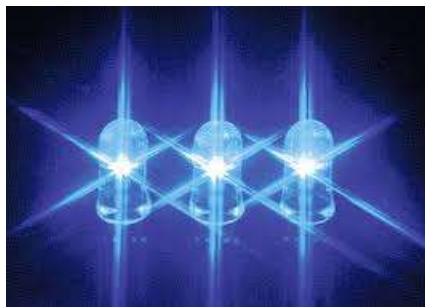


LEDの発光効率を高くするために、市販のLEDでは「ダブルヘテロ構造」というちょっと特殊なpn接合が使われています。上の図(a)では、p型GaAsが、n型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ と、正孔密度が多いp⁺型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ に挟まれています。GaAsの結晶にAlを少し混ぜることにより、バンドギャップが広がります。つまり、バンドギャップが狭いGaAsを、バンドギャップが広い2つの半導体で挟んだ構造です。こうすると、下の図(b)のように、電子と正孔の再結合はp型GaAs層で漏れなく起こるようになるので、発光効率が高められます。

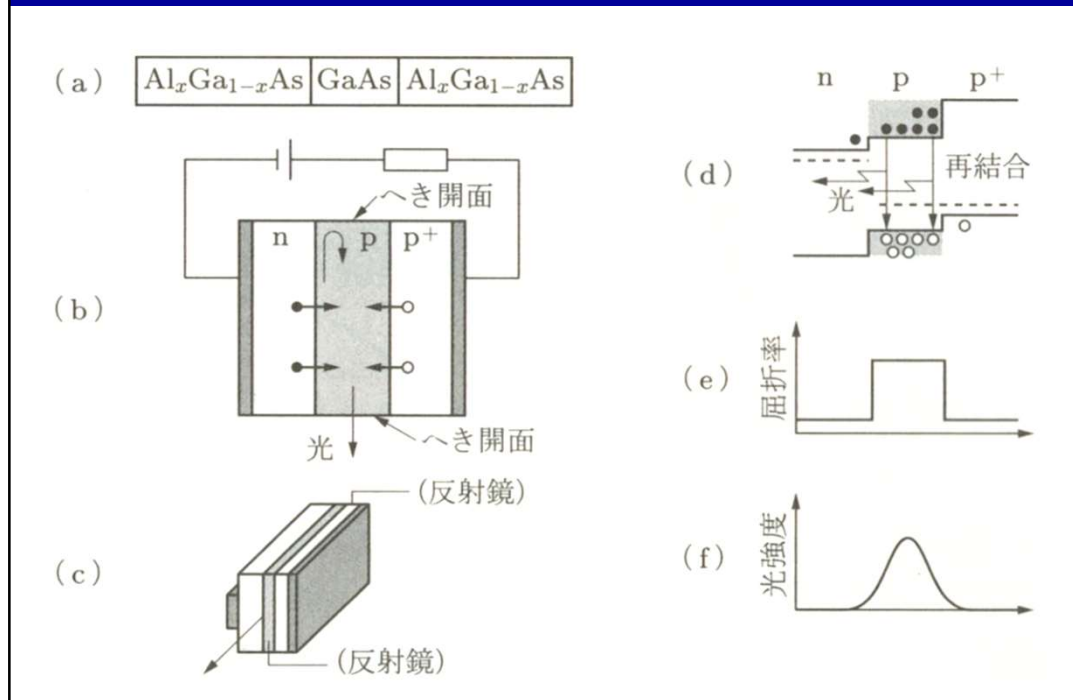
色	材料	ピーク波長	接合構造
青	InGaN	450	量子井戸
	ZnCdSe	489	ダブルヘテロ
緑	ZnTeSe	512	ダブルヘテロ
	GaP	555	ホモ
黄	AGaInP	570	ダブルヘテロ
	InGaN	590	量子井戸
赤	AlGaAs	660	ダブルヘテロ
	GaP(Zn-0)	700	ホモ
赤外	GaAs(Si)	980	ホモ
	InGaAsP	1300	量子井戸

発光ダイオードには様々な半導体が使われています。バンドギャップに応じて紫外線から赤外線まで様々な波長の光を発光します。それぞれ量子井戸やダブルヘテロ構造を作って発光効率を高めています。

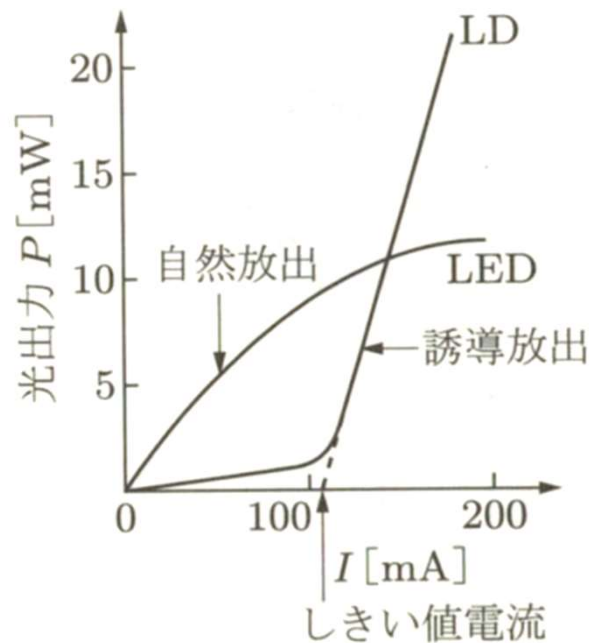
GaN 青色LED



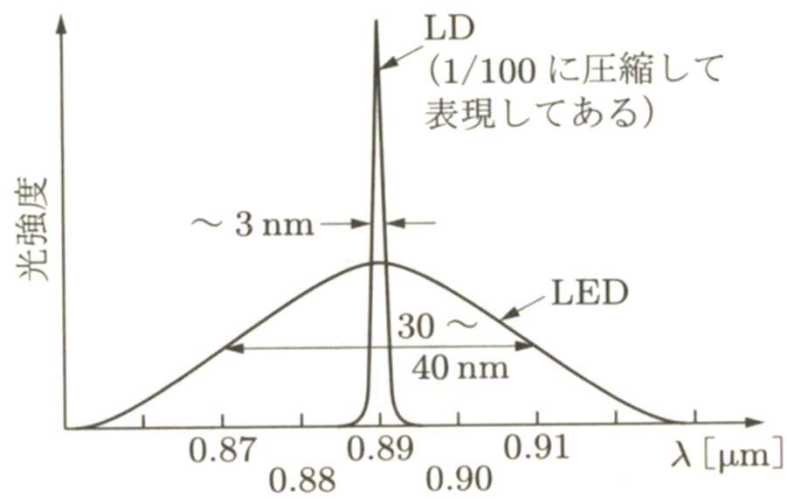
中でも20世紀中にはできないと言われていた青色発光ダイオードを発明した、赤崎先生、天野先生、中村先生の3名は、2014年にノーベル物理学賞を受賞されました。



発光ダイオードの発光効率を極限まで高めて、光をある1方向からだけ取り出せるようにすると、波長範囲が狭い、非常に強い光が出ます。半導体レーザーと呼ばれるもので、レーザーポインタや、CD、DVDの書き込み、読み取りに使われています。発光効率を高める方法は先ほどのダブルヘテロ構造と同じですが、結晶に2枚の平行な鏡を置いて発光した光を繰り返し行ったり来たりするようにさせ、発光の増幅を行うと、片側の鏡からレーザー光が出てきます。半導体の結晶は「へき開」と言って、原子平坦面を保ったまま割れるので、これを鏡として使います。



LED(Light emitting diode)と半導体レーザー(Laser diode: LD)の発光の違いは、このグラフからもよくわかります。LEDの場合、発光の光出力はLEDに流す電流に比例します。(電流が大きくなると温度が上がって発光効率がさがります)LDでは、あるしきい値電流まではあまり光出力がないのですが、しきい値を超える電流を流すと一気に光出力が増加します。



また、光の純度が良く(波長幅が狭い)、ピーク出力が大きいこともLDの特徴です。

写真に撮って提出するノート部分（写真は1枚でOK）

提出日締切：7月8日 13:00

1. 定規を使って、手書きで丁寧に描くこと
2. 図の説明は適宜入れること

太陽電池、フォトダイオード、発光ダイオード、半導体
レーザーについて、

- ①基本的な素子構造図、
- ②機能、
- ③応用分野・用途

をまとめよ。

今日の講義はここまでです。今日出席代わりに提出してもらうのも、毎年期末試験に出ている重要な部分です。1枚の写真に収まりきらなくても送付する写真は1枚でOKです。よく復習してください。