

### ● pn 接合面での自然放出発光

不純物半導体の p 型領域と n 型領域が滑らかに接している構造を pn 接合といい、このような構造をした半導体を pn 接合ダイオードといいます。

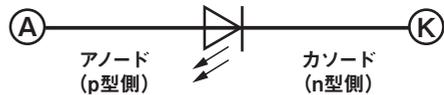
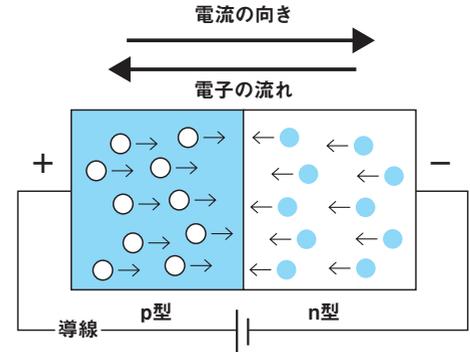
pn 接合ダイオードの p 型半導体のアノード電極 A に+、n 型半導体のカソード電極 K に-の順方向電圧を加えると接合面付近では p 型半導体の正孔（ホール）と n 型半導体の電子が再結合しながら電流が流れます。この再結合のときにガリウムヒ素 (GaAs) やガリウム窒素 (GaN) といった化合物半導体のような直接遷移半導体では、再結合で余ったエネルギーが光として放出されます。これを自然放出発光とよびます。一方、シリコン (Si) やゲルマニウム (Ge)

のような間接遷移半導体では格子振動にエネルギーをとられてしまい、余ったエネルギーがほとんどないのでほとんど発光しません。このように LED に適している半導体材料と適していない半導体材料があります。

### ● LED の輝度と pn 接合構造

LED の輝度は pn 接合構造の発光効率によって左右されます。接合領域の活性層に多くの電子と正孔を集めて再結合させると発光効率を上げることができます。発光効率が良い構造としては、ダブルヘテロ接合構造や量子井戸

図 1-5-1 pn 接合ダイオード



アノード：電流が流れ込む電極  
電子が出て行く電極

カソード：電流が流れ出す電極  
電子が入り込む電極

構造があります。これらの構造は、ホモ接合構造と比べて複雑になりますが、高輝度LED、青色LEDやLEDの仲間の半導体レーザ（LD）にはよく使われています。

### ・ホモ接合（同種接合）

接合しているp型とn型の半導体は、同じ結晶材料にドーパされた不純物半導体です。構造が簡単なので安価になりますが発光効率はよくありません。これはpn接合付近で発光した光が結晶から外部に出る前に吸収されてしまう割合が高いためです。

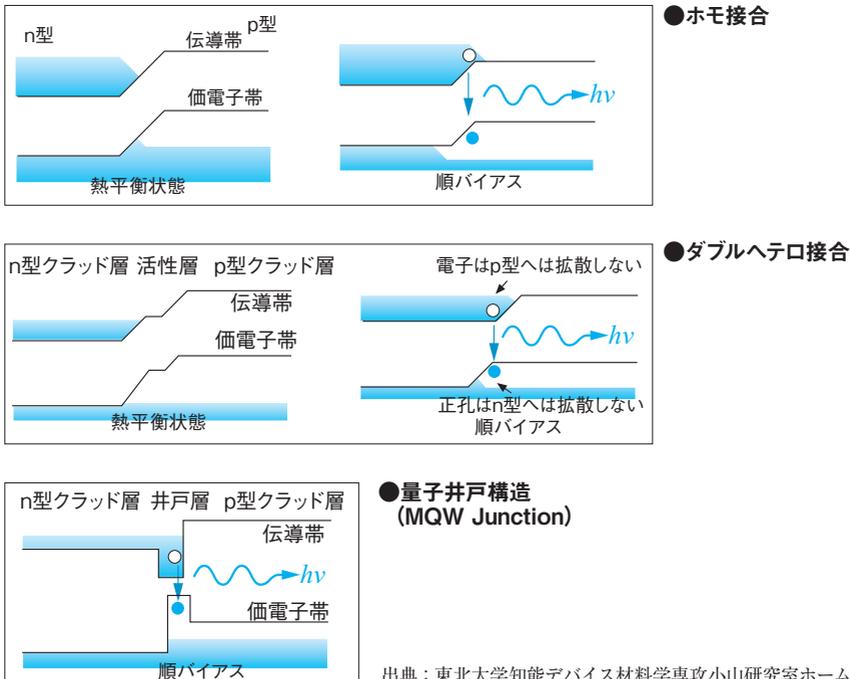
### ・ダブルヘテロ接合（異種接合）

活性層をクラッド層で挟みこむ構造で活性層にキャリア（電子、正孔）を閉じ込めて効率よく発光させます。

### ・量子井戸構造（MQW構造）

バンドギャップの大きい材料に挟まれたバンドギャップの小さい材料の量子井戸層にキャリア（電子、正孔）を閉じ込めて効率よく発光させます。

図 1-5-2 いろいろなpn接合構造



出典：東北大学知能デバイス材料学専攻小山研究室ホームページ

## ●電子の遷移

電子は価電子帯と伝導帯の間の禁制帯を遷移することを説明しました。太陽電池の発電、LEDやLDの発光は、この電子の遷移のときの電子が持つエネルギーによるものです。電子の遷移によって生じる光の吸収と放出について説明します。

### (a) 吸収：

入射された光を  $E_V$  の基底状態にある電子が光を吸収すると  $E_C$  の励起状態に遷移します。これを吸収とよびます。太陽電池の発電は、太陽光の吸収によるものです。

### (b) 自然放出：

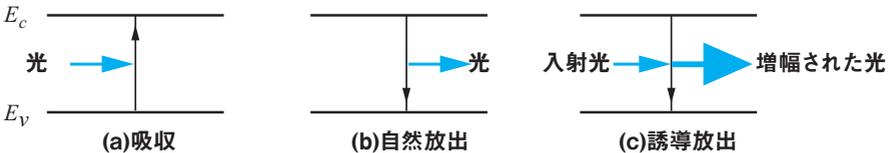
$E_C$  の励起状態にある電子が  $E_V$  の基底状態に遷移し、再結合するときに余ったエネルギーを光として放出します。発光される光の波長（発光色）は、 $E_C$  と  $E_V$  の差で決まります。LEDの発光はこの自然放出によるものです。

### (c) 誘導放出：

入射光が  $E_C$  の励起状態にある電子に入射すると電子は、刺激を受けて  $E_V$  の基底状態に遷移します。このときに入射光と同じ波長、位相の光を放出します。この光と入射光が合算されて2倍に増幅された光が放出されます。この誘導放出を繰り返して増幅していくとレーザー光になります。

LDのレーザー発光はこの誘導放出によるものです。

図 1-5-3 光の吸収と放出モデル



## ●電子の直接遷移と間接遷移の違い

バンド構造により電子が価電子帯と伝導帯の間の禁制帯を遷移する仕方には直接遷移と間接遷移があります。

### ・直接遷移 (direct bandgap)

波数空間 ( $k$  空間) において、半導体のバンド構造を描いたときに、伝導帯 ( $E_c$ ) の底と価電子帯 ( $E_v$ ) の頂上が同一の波数ベクトル ( $k$  点) の点に存在することをいいます。**直接ギャップ** (direct gap) とよばれることもあります。直接遷移型の半導体では、伝導帯 ( $E_c$ ) の下端にいる電子は、価電子帯 ( $E_v$ ) の上端にいるホールと運動量のやり取りをすることなく再結合 (垂直遷移) することができます。そのためバンドギャップ間の再結合のエネルギーは、光子 (光子) の形で自然放出されます。これを、放射再結合もしくは発光再結合とよんでいます。

### ・間接遷移 (indirect bandgap)

波数空間 ( $k$  空間) において、半導体のバンド構造を描いたときに、伝導帯 ( $E_c$ ) の底と価電子帯 ( $E_v$ ) の頂上が同一の波数ベクトル ( $k$  点) の点に存在しないことをいいます。**間接ギャップ** (indirect gap) とよばれることもあります。間接遷移型の半導体では、伝導帯 ( $E_c$ ) の底と価電子帯 ( $E_v$ ) の頂上が同じ波数ベクトルの位置に存在しません。そのため、電子とホールの再結合には運動量を必要とします。再結合は、フォノンや結晶欠陥などを介して行なわれます。再結合エネルギーは、光子の代わりに、格子振動を励起するフォノンとして放出されることが多く、光の放出は行なわれないか、生じても非常に弱い発光となります。

図 1-5-4 直接遷移と間接遷移のモデル

