

# 太陽電池セル出力電流について 2

太陽電池セルの出力電流については、「太陽電池出力電流について」で概説しました。そこで、今度は更に前の段階に戻って、pn接合についてもう少し考えてみる事にしましょう。内容は空乏層について・pn接合の電気的性質及び光学的性質について説明します。

## 1. 空乏層について

半導体中でp型からn型へ急激に変化している領域をpn接合(pn junction)と言います。図1はpn接合の様子を定性的に示したものです。図1の(a)及び(b)は、p型及びn型半導体が独立に存在する場合、同図(c)は、pn接合が形成されている場合を示している。図(a)の様に各々独立に存在していたp型及びn型半導体とを図(b)の様に繋ぎ合わせて一体化すると、次の現象が起こる。

：電子の多いn型領域から電子の少ないp型領域へ電子が拡散する。

：正孔の多いp型領域から正孔の少ないn型領域へ電子が拡散する。

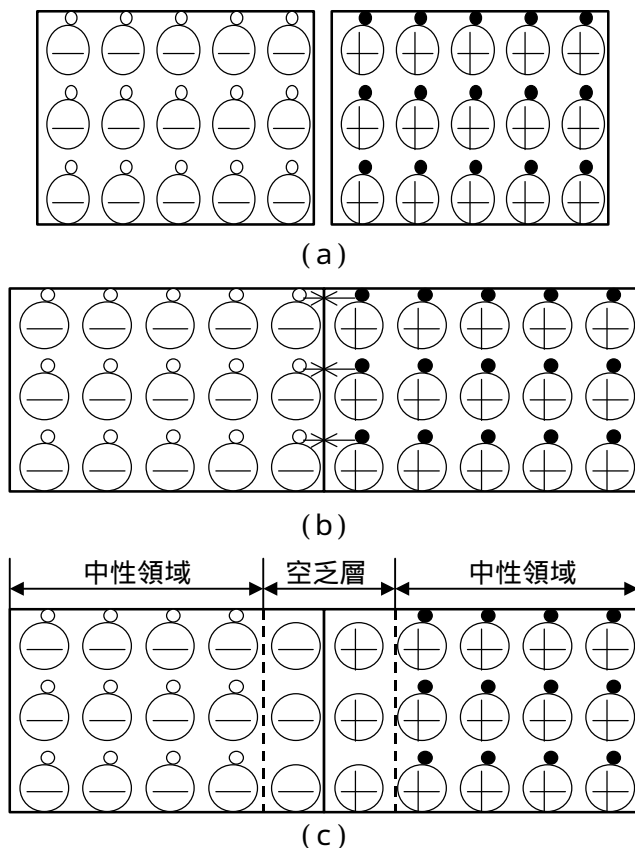


図1：pn接合の定性的説明

この拡散は、境界面に近い所から順々に起こりません。電子及び正孔が拡散した後に、イオン化されたドナー及びアクセプタは移動する事が出来ないために取り残されます。

電子や正孔がイオン化された不純物と一緒に存在している時には、半導体は電気的に中性である。しかし、電子及び正孔のみが移動してイオン化した不純物だけが取り残されてしまうと、その部分の電荷は正または負に帯電します。この様にして形成されたキャリアが存在しない領域を空間電荷層(space-charge region)または空乏層(depletion layer)と言う。

これに対して、空乏層以外の部分で電気的に中性な領域は中性領域(neutral region)と言う。空乏層内には、n型領域にドナーが正電荷として存在して、p型領域にはアクセプタが負電荷として存在します。この為に、n型領域からp型領域の方向に電界が形成されます。この電界はn型領域からp型領域に向かう電子の動きや、その逆向きの正孔の移動を妨げる働きをする。

従って、電子及び正孔の移動は或る所で止まってしまう。この空乏層中の電荷によって形成される電位差を拡散電位(diffusion potential)と言う。この拡散電位が存在する為に、pn接合では或る一定の電圧を掛けないと電流が流れないのです。半導体素子はすべてこの性質を利用しています。

pn接合の作製法は数多くあるが、ここでは簡単に列挙するだけにします。不純物を半導体結晶に合金としてつける事により作られる合金接合(alloy junction)、半導体結晶中に不純物を熱拡散する事によって作られる拡散接合(diffused junction)等がある。p型半導体とn型半導体との遷移領域に於いて、ドナー密度とアクセプタ密度との等しい面をpn境界(pn boundary)と呼びます。合金接合の様に、pn境界で不純物濃度が階段状に変化している接合を階段接合(step junction 又は abrupt junction)と言い、拡散接合の様に、pn境界の前後に於いて或る濃度勾配をもって不純物が分布している接合を傾斜接合(graded junction)と言います。

## 2. pn接合の電氣的性質

pn接合に掛ける電圧の極性を变化させる事により、これに流れる電流値が大きく異なります。図2(a)の様に、p型領域の方に正、n型領域の方に負の極性の外部電圧  $V(> 0)$  を印加します。この時は、空乏層に存在する電界を打ち消す方向に電界が生じ、拡散電位  $V_d$  より大きな電圧が印加されれば、電子はp型領域へ、正孔はn型領域に拡散し、電流が流れる。この極性の事を**順方向**(forward direction)といい、この外部電圧を**順方向バイアス**(forward bias)といいます。この時のエネルギー帯構造は図2(b)であり、印加電圧  $V$  により、n型領域のフェルミ準位  $E_F$  が相対的に  $eV$  だけ上昇します(即ち、下端伝導帯準位  $E_C$  及び上端価電子帯準位  $E_V$  も  $eV$  だけ上昇する)。この事により障壁の高さが  $eV_d$  から  $e(V_d - V)$  へと低くなるのです。よって、n型領域の多数キャリアである電子がp型領域へ、p型領域の多数キャリアである正孔がn型領域へ移動する為、電流が流れるのです。

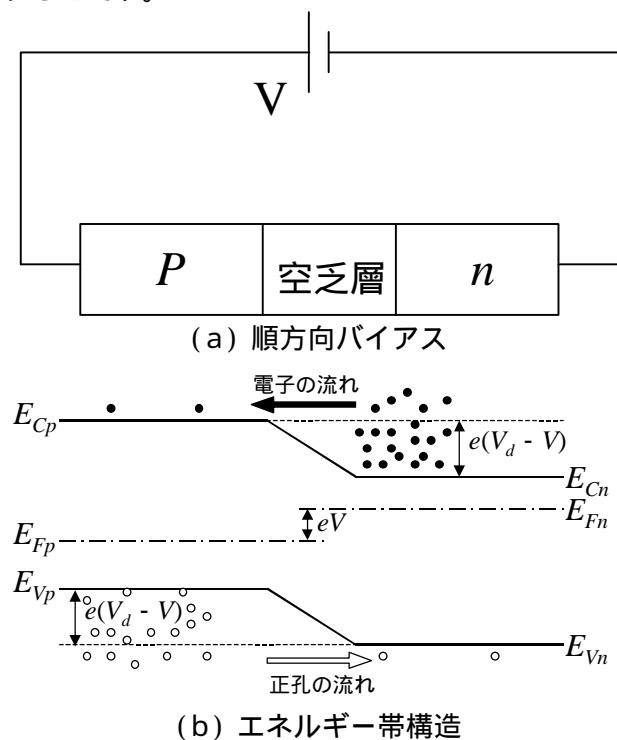


図2 : pn接合のエネルギー帯構造 1

一方、図3(a)の様に、n型領域の方に正、p型領域の方に負の極性の外部電圧  $V(> 0)$  を印加します。この時は、電子と正孔が各々の電極側引き寄せられる為、空乏層の中は電圧を印加する前よりも大きくなり、拡散電位  $V_d$  が更に大きくなります。よって、電子と正孔が反対側の領域に拡散する事ができないので、電流は殆ど流れません。こ

の極性の事を**逆方向**(reverse direction)といい、この外部電圧を**逆方向バイアス**(inverse bias)といいます。この様に、pn接合は印加する電圧の極性により電流が流れる方向と流れにくい方向があります。この事を**整流性**(rectification)といいます。この時のエネルギー帯構造は図3(b)であり、印加電圧  $V$  により、n型領域のフェルミ準位  $E_F$  が相対的に  $eV$  だけ下降します(即ち、下端伝導帯準位  $E_C$  及び上端価電子帯準位  $E_V$  も  $eV$  だけ下降する)。この事により障壁の高さが  $eV_d$  から  $e(V_d + V)$  へと高くなるのです。よって、p型領域の少数キャリアである電子がn型領域へ、n型領域の少数キャリアである正孔がp型領域へ移動します。但し、少数キャリア密度は非常に小さい為、電流は殆ど流れないのです。

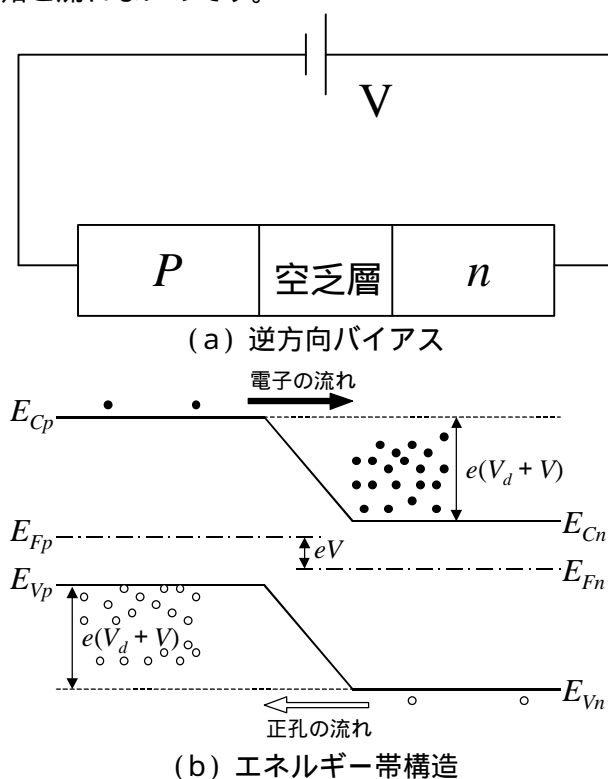


図3 : pn接合のエネルギー帯構造 2

これらの事をまとめた特性図を図4に示す。

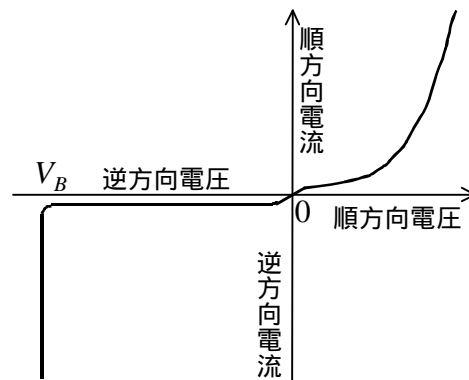


図4 : pn接合の電氣的特性

p n 接合に電極を付けた半導体素子を **p n 接合ダイオード**(diode)といい、整流・検波及びスイッチング用として使われています。

今まで述べた様に、p n 接合に逆方向電圧を印加しても電流は殆ど流れない(実際には逆方向飽和電流が流れる)。しかし、図4の様に或る逆方向電圧を印加すると、急激に大電流が流れ出します。この現象を**降伏**(breakdown)といい、降伏が起こる電圧  $V_B$  を**降伏電圧**(breakdown voltage)という。降伏状態のまま大電流を流し続けると、この素子は破壊されてしまいます。この降伏の起因するものとして、**ツェナー降伏**(Zener breakdown)と**なだれ降伏**(avalanche breakdown)とが知られている。ツェナー降伏は逆方向に電圧を印加された p n 接合の空乏層内に於いて、**トンネル効果**(tunnel effect)によって伝導帯電子が他の領域にすり抜ける為に起こる現象である。なだれ降伏は、空乏層の電界により加速されたキャリアが結晶格子と衝突して伝導帯電子・正孔対を生成する事により起こる。空乏層に入った伝導帯電子は、そこにある電界により加速され運動エネルギーを得ます。その電子が結晶格子と衝突した時、運動エネルギーが電子の生成エネルギーよりも大きいならば、新たに伝導帯電子・正孔対が作られます。また、この新しくできた電子も加えて、更に加速され、結晶格子と衝突をして伝導帯電子・正孔対を生成する過程を繰り返す事により、伝導帯電子数が次々と倍増していく為に逆方向電流が急激に増加するものである。

一般にツェナー降伏は不純物濃度の高い p n 接合で起こりやすく、その降伏電圧は小さいが、なだれ降伏は不純物濃度の低い p n 接合で起こりやすく、その降伏電圧は大きい。これを利用したのが**ツェナー・ダイオード**(Zener diode)である。ツェナー・ダイオードは定電圧ダイオードであり、降伏が起こると電流の変化に対して電圧の変化が無視できる程小さい為、基準電圧を発生させる素子として利用されている。

p n 接合の空乏層内はキャリアが存在せず、抵抗が極めて高く、且つ、イオン化した不純物が集まっており、コンデンサの一種として考える事も可能です。逆方向電圧  $V_R$  が拡散電位  $V_d$  よりもかなり大きい ( $V_R \gg V_d$ ) ならば、階段接合に於いて、空乏層巾  $W_d$  は逆方向バイアス  $V_R$  と平方根で比例しています。

$$W_d \propto V_R^{1/2} \quad \dots(1)$$

また、傾斜接合に於いては、空乏層巾  $W_d$  は逆方向電圧  $V_R$  と立方根で比例しています。

$$W_d \propto V_R^{1/3} \quad \dots(2)$$

コンデンサの静電容量  $C$  は電極間隔と反比例するので、空乏層を利用すれば、逆方向電圧により静電容量を可変できるコンデンサを作ることができます。

### 3 . p n 接合の光学的性質

p n 接合に光を照射した時も様々な現象を引き起こします。半導体に価電子(valence electron)が原子核の束縛を振り切るだけのエネルギーよりも大きなエネルギーをもつ光が照射すれば、伝導帯電子・正孔対が生成される。この現象が p n 接合で起これば、空乏層の電界により伝導帯電子・正孔が分離して起電力を発生する。これを**光起電力効果**(photovoltaic effect)といい、太陽電池(solar cell)や光センサ(photo-sensor)として利用されている。このとき p n 接合に逆方向電圧を印加しておけば、電流が流れやすくなる。この効果を**光導電効果**(photoconductivity effect)といい、フォトダイオードに用いられている。また、反対に、順方向電圧を印加すれば、注入された少数キャリアが再結合(recombination)する。これは、発光ダイオード(Light-Emitting Diode : LED)やレーザダイオード(laser diode)に応用されている。

### 付録 . トンネル効果について

トンネル効果について簡単に補足しておきます。半導体に強い電界を印加した場合に、 $-x$  方向の電界の強さを  $E$  とすれば、その時のポテンシャルエネルギー  $V$  は、

$$V = -eEx \quad \dots(3)$$

であり、伝導帯及び価電子帯は図5の様にそれぞれ傾きます。

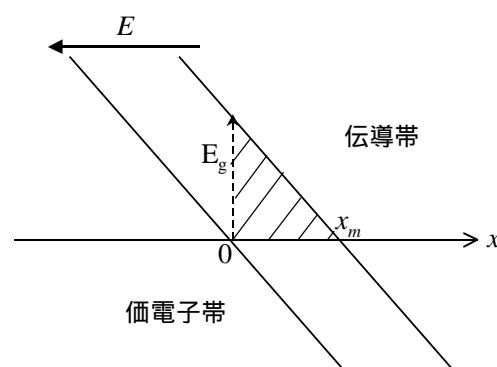


図5 : 強電界中でのエネルギー帯構造

量子力学に於いては電子の波動性の為に、電子はポテンシャル・バリアをトンネルする事ができます。これをトンネル効果(tunnel effect)と呼んでいます。価電子帯の電子は強電界中では伝導帯へトンネルする事が可能であり、これをジナー(Zener)効果とも言います。

ここで、そのトンネル確立  $T_t$  を求めてみましょう。W K B (Wentzel-Kramels-Brillouin) 近似より、トンネル確立は、

$$T_t = \exp\left(-2 \int_0^{x_m} |k(x)| dx\right) \quad \dots(4)$$

となります。ここで、 $k(x)$  は波数です。また、波数はポテンシャル・バリア内 ( $E < V$ ) では、

$$\frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} + V = E \quad \dots(5)$$

であり、ここで、

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \quad \dots(6)$$

であり、 $h$  はプランク定数です。ここで、式(5)より、 $k$  は純虚数である事が解ります。よって、 $k$  の絶対値は、

$$|k(x)| = \sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2} \cdot (V - E)} \quad \dots(7)$$

となります。また、ポテンシャルエネルギー  $V$  に対して電界の強さを  $E$  は無視 ( $E \ll V$ ) できるので、

$$|k(x)| = \sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2} \cdot V} \quad \dots(8)$$

です。図5より、

$$V = E_g - eEx \quad \dots(9)$$

であるから、式(8)及び(9)より、

$$|k(x)| = \sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2} \cdot (E_g - eEx)} \quad \dots(10)$$

ここで、境界条件は  $x = x_m$  に於いて、

$$E_g - eEx_m = 0 \quad \dots(11)$$

です。これで、トンネル確立  $T_t$  を求める準備は完了しました。式(4)及び(10)より、

$$T_t = \exp\left(-2 \int_0^{x_m} \sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2} \cdot (E_g - eEx)} \cdot dx\right) \quad \dots(12)$$

であり、これを解けば、

$$T_t = \exp\left[\left(\frac{2^{5/2} m^{*1/2}}{3\hbar e E} \cdot (E_g - eEx)^{3/2}\right)\right]_0^{x_m}$$

$$= \exp\left[\left(\frac{2^{5/2} m^{*1/2}}{3\hbar e E} \cdot (E_g - eEx_m)^{3/2}\right) - \left(\frac{2^{5/2} m^{*1/2}}{3\hbar e E} \cdot (E_g)^{3/2}\right)\right] \quad \dots(13)$$

であり、式(13)に境界条件・式(11)を代入して、これを解けば、

$$T_t = \exp\left(-\frac{2^{5/2} m^{*1/2} E_g^{3/2}}{3\hbar e E}\right) \quad \dots(14)$$

となります。式(14)より、

$$E \geq 10^8 \sim 10^9 \quad \dots(15)$$

程度以上の強電界中でトンネル効果が起こる事が解ります。これが、逆バイアスの降伏現象の一因となっているのです。

一方、p n 接合の順方向電流にトンネル効果が寄与し、負性微分導電率を示す事が解っている。このp n 接合を用いたダイオードをトンネル・ダイオード(又は江崎ダイオード)といいます。