

半導体デバイスの基礎

—pn 接合ダイオードの特性測定と太陽電池の試作—

白藤 立¹、吉本昌広²

1 背景

1947 年に史上初の半導体デバイスである点接触形トランジスタが発明されて以来、半導体デバイスの研究開発は、高周波化、高集積化、大電力化、そして光を扱う機能の実現に向けて精力的に進められてきた。現在、実用の半導体デバイスは表 1 に示す様な広がりを見せており、今日の電子・情報技術を支えている。われわれの身の回りに目を向けると、集積回路は、パーソナルコンピュータはもちろん、家電製品や自動車など至る所で用いられている。携帯電話 (800MHz) や衛星放送 (12GHz) は、半導体デバイスの高周波化によって実現されている。電車はモータも半導体デバイスで直接に制御され、省エネルギー化を進め、乗り心地を改善している。インターネットは、光による超高速大容量通信技術によって支えられており、光デバイスが不可欠である。

表 1: 主な半導体デバイス

集積化デバイス (CPU、DSP、メモリ など)	MOS 形電界効果トランジスタ (MOSFET)、 バイポーラトランジスタ、CCD
高周波用デバイス	MOSFET、バイポーラトランジスタ、 MES 形電界効果トランジスタ (MESFET)、 ヘテロバイポーラトランジスタ (HBT)、 高電子移動度トランジスタ (HEMT)
電力制御用デバイス	サイリスタ、GTO サイリスタ、バイポーラトランジスタ、 MOSFET、絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT) 静電誘導トランジスタ (SIT)
光デバイス	発光ダイオード、レーザダイオード、光検出器、太陽電池

半導体デバイスの基本構造は、pn 接合、半導体-絶縁体接合、電極の 3 つである。各半導体デバイスは、この 3 つの基本構造を組み合わせて作られている。これらの基本構造の動作原理を理解すれば、半導体デバイスの基本を習得したと言える。本実験では、3 つのなかで特に重要である pn 接合を採り上げる。

2 目的

実用の pn 接合ダイオード（整流ダイオード、発光ダイオード、太陽電池）の特性を測定するとともに、実際に太陽電池を製作し、その特性を測定・評価して、pn 接合の基本的な物理を理解する。

¹sirafuji@dj.kit.ac.jp

²yoshimot@dj.kit.ac.jp

3 原理

3.1 整流性

III 族元素を添加した Si(IV 族) は、III 族原子が**正孔**を放出し (自身は負にイオン化)、p 形 Si となる。このような添加元素を**アクセプタ**と呼ぶ。V 族元素を添加した場合には、V 族原子が**電子**を放出し (自身は正にイオン化)、n 形 Si となる。このような添加元素を**ドナー**と呼ぶ。正孔や電子は電流の担い手となるため、**キャリア**と呼ばれる。図 1(a) のように p 形 Si(または n 形 Si) が単独で存在する場合、イオン化アクセプタと正孔 (またはイオン化ドナーと電子) の密度はほぼ同じであり巨視的には電氣的に中性である。

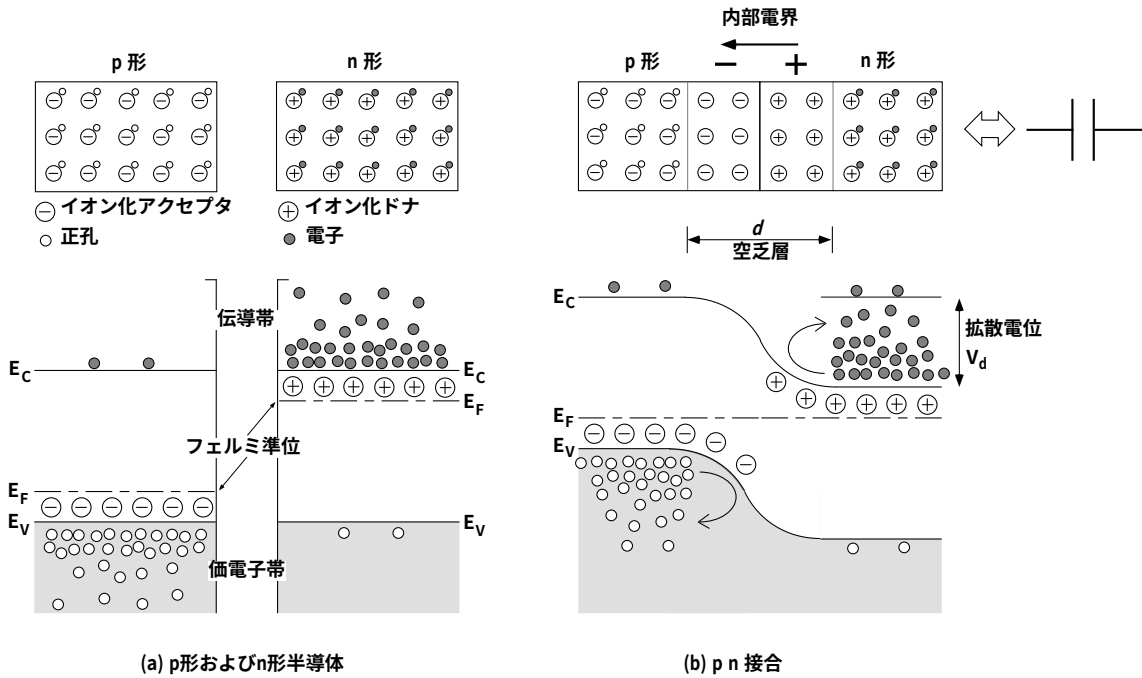


図 1: (a) p 形と n 形が単独で存在する場合と (b) pn 接合を形成した場合の半導体中の電荷分布とエネルギーバンド図。

pn 接合を形成すると、p 形領域には正孔が、n 形領域には電子が多いため、電子が n 形側から p 形側に、正孔が p 形側から n 形側に拡散で移動し、図 1(b) のようにキャリア不在の**空乏層**が形成される。空乏層の p 形側と n 形側には、それぞれ負のアクセプタイオンと正のドナーイオンのみが残留するため、キャリアの拡散を阻止する向き ($n \rightarrow p$) の電界が発生する。これによりキャリアの移動は見かけ上なくなり、p 形側と n 形側で挟まれた空乏層は、残留イオンの電荷を保持したコンデンサとなる。この状態で空乏層の両端にかかる電位差 V_d は**拡散電位**と呼ばれ、次式で表される;

$$V_d = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{n_{n0} p_{p0}}{n_i^2} \right) \approx \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right). \quad (1)$$

ここで、 p_{p0} 、 n_{n0} 、及び n_i は、それぞれ、p 形領域の平衡正孔密度、n 形領域の平衡電子密度、及び真性キャリア密度である。室温では、p 形半導体中の正孔及び n 形半導体中の電子の密度は添加したドナー密度 (N_D) 及びアクセプタ密度 (N_A) とほぼ等しいのでそれらを用いて近似できる。

p 形側が n 形側に対して正になる電圧 V を外部から印加すると、空乏層の電位差が $V_d - V$ に減少するので、電子および正孔の拡散を妨げていた障壁高が低くなる。すると図 2(a) のように、p 形側に電子が、n 形側に正孔が拡散し (**少数キャリアの注入**)、電流が流れる。一方、p 形側が n 形側に対して負になる電圧 $-V$ を外部から印加すると、空乏層の電位差は $V_d + V$ に増加し、図 2(b) のように n 形中の正孔および p 形中の電子が伝導するだけなので、ほとんど電流が流れない。このように、pn 接合は電圧印加方向により流れる電流量が大きく異なる**整流性**を示す。電流が流れ易い電圧印加方向を**順バイアス**、その逆を**逆バイアス**と呼んでいる。

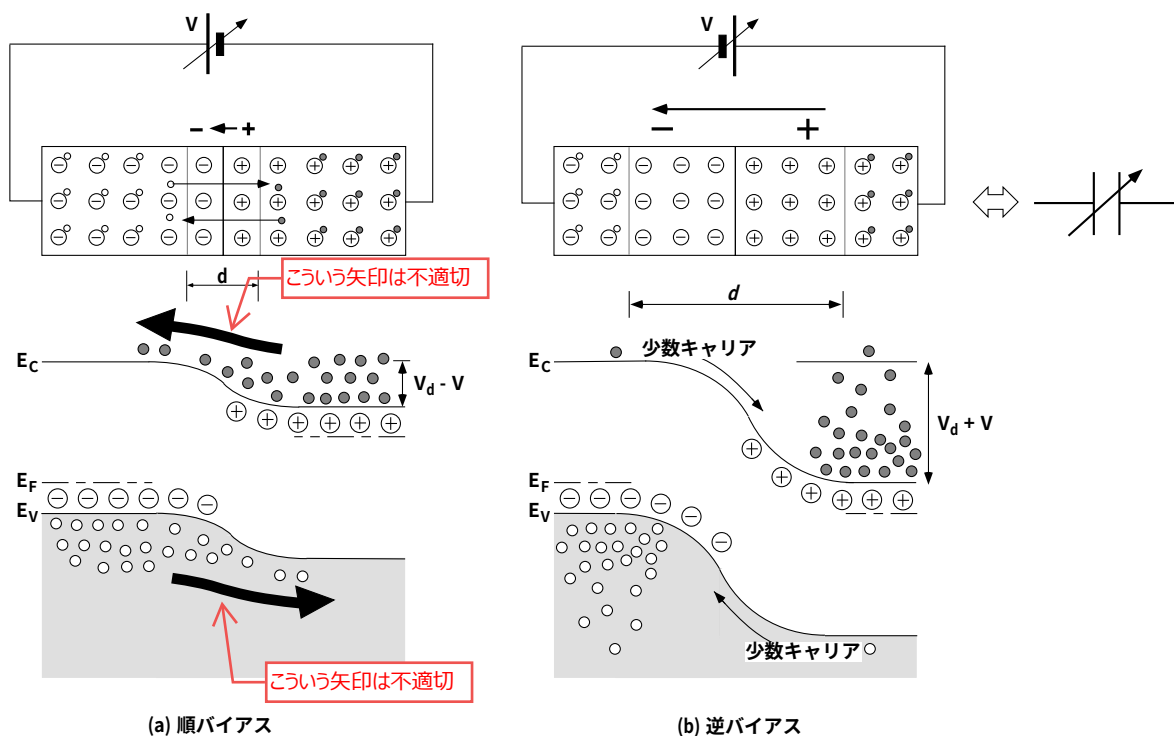


図 2: pn 接合に (a) 順バイアスと (b) 逆バイアスの電圧を印加したときのキャリアの流れとエネルギーバンドの状態。

理想的な pn 接合の電流密度-電圧特性は、電子及び正孔の拡散方程式を解くことにより、

$$j = j_0 \left\{ \exp \left(\frac{eV}{kT} \right) - 1 \right\} \approx j_0 \exp \left(\frac{eV}{kT} \right) \quad (2)$$

となる。ここで、 j_0 は**逆方向飽和電流密度**という。

pn 接合の容量-電圧特性を測定すれば、拡散電位や空乏層が pn 接合内に存在していることが確かめられる。不純物分布が接合面で階段状に急激に変化する pn 接合を**階段接合**という。また、不純物分布が位置の一次関数で変化する pn 接合を**傾斜接合**という。空乏層幅 d は、接合界面付近で Poisson の方程式を解くことにより次のように求まる。

階段接合の場合

$$d = \left\{ \frac{2\epsilon_s \epsilon_0 (V_d - V)(N_A + N_D)}{e N_A N_D} \right\}^{1/2} \quad (3)$$

ただし、p 形領域のアクセプタ密度を N_A 、n 形領域のドナー密度を N_D とする。また、 ϵ_S は半導体の比誘電率、 ϵ_0 は真空の誘電率である。

傾斜接合の場合

$$d = \left\{ \frac{12\epsilon_S\epsilon_0(V_d - V)}{e(a_1 + a_2)} \right\}^{1/3} \quad (4)$$

ただし、空乏層内では、ドナー密度が $N_D(x) = N_0 + a_1x$ 、アクセプタ密度が $N_A(x) = N_0 - a_2x$ で変化しているとする。

空乏層は電気二重層になっており、空乏層は容量をもっている。空乏層の単位面積当たりの容量は、階段接合、傾斜接合ともに、次式で表される。

$$C = \frac{\epsilon_S\epsilon_0}{d} \quad (5)$$

この容量は、空乏層幅を電極間隔とする平行平板コンデンサの容量と同じである。

3.2 受光素子

図 3(a) のように半導体がバンドギャップ E_G 以上のエネルギーを持つ光を吸収すると、伝導帯に電子が、価電子帯に正孔が励起される。このままでは、励起された電子と正孔はやがて再結合して消滅し、これらのキャリアは外部に取り出せない。

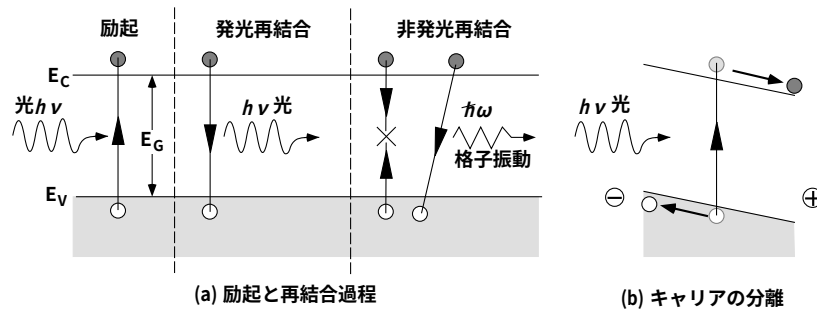


図 3: 半導体中における遷移過程。(a) 励起と再結合 (発光再結合と非発光再結合) 過程。(b) 外部電界による励起電子正孔対の空間的分離。

図 3(b) のように電界を印加すると、励起された電子と正孔は、それぞれ正および負の電極に引き寄せられ、光電流として外部に取り出せる。pn 接合では空乏層の内部電界 (拡散電位による電界) が、この電界の役目を果す。pn 接合を光検出器 (**ホトダイオード**) として用いるときには、逆バイアスを印加し、内部電界をさらに大きくする (図 4(a) 参照)。

逆バイアスを印加しない場合でも、拡散電位により電子と正孔はそれぞれ n 形と p 形側へ分離されて起電力が生じる (**光起電力効果**)。この効果を用いたデバイスが、**太陽電池**である。図 5 に太陽電池の電流-電圧特性を示す。電圧軸との交点を**開放電圧** V_{OC} 、電流軸との交点を**短絡電流** I_{SC} という。 I_{SC} は、光によって生成される電子と正孔の数に比例しているので、光量に比例する。電池としては、取り出す電流に関わらず電圧が一定であることが望ましいが、実際には取り出す電流が大きくなると、ダイオードの内部抵抗によって電圧降下が起こる。電力は電圧と電流の積で

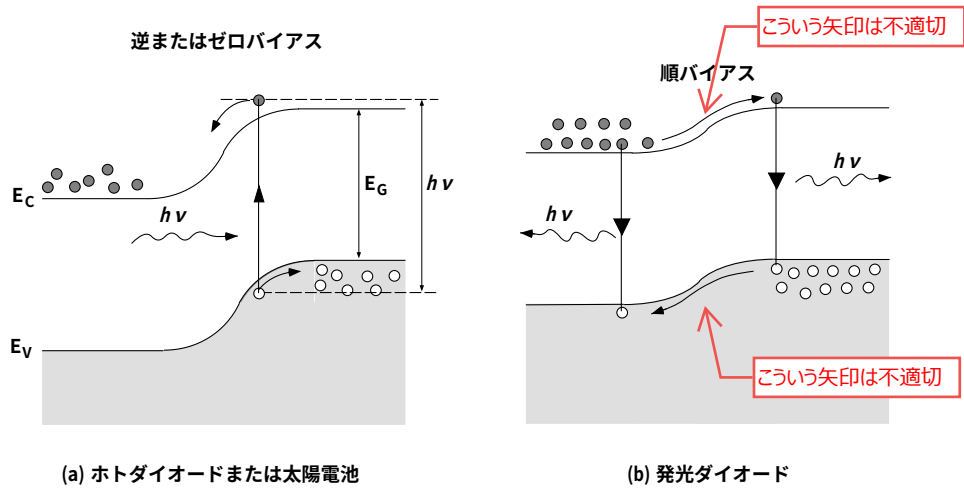


図 4: (a) ホトダイオードまたは太陽電池と (b) 発光ダイオードの動作原理。

あるから、最大の電力を取り出せる I_m と V_m の組み合わせがあり、最大電力を取り出すための最適負荷抵抗 $R_L = V_m/I_m$ がある。最大電力 $P_{\max}$ は、

$$P_{\max} = I_m V_m = I_{SC} V_{OC} FF \quad (6)$$

と表す。 FF は曲線因子 (Fill Factor) とよばれ、1 に近いほど太陽電池に適した電流-電圧特性となっていることを意味する。太陽電池の最大エネルギー変換効率 η は、

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_{in}} = \frac{I_{SC} V_{OC} FF}{P_{in}} \quad (7)$$

で与えられる。 $P_{in}(W)$ は、入射光量である。

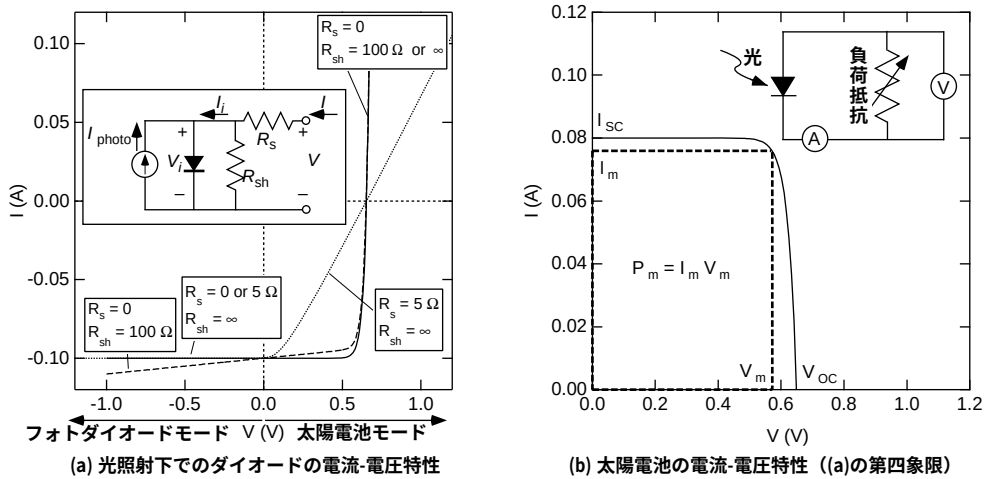


図 5: (a) 太陽電池の電流-電圧特性の一例とその等価回路。(b) (a) の第 4 象限 (太陽電池として動作する領域) の電流符号を逆にしてプロットしたもの (挿図は測定回路)。

3.3 発光素子

図 3(a) のように伝導帯や価電子帯に過剰な電子や正孔が生成して再結合するとき、電子が失ったエネルギーが光として放出される場合がある (**発光再結合**)。順バイアス時の pn 接合界面近傍は、そのような過剰な電子と正孔が注入されている状況であり (図 4(b) 参照)、発光再結合確率の高い半導体を用いると、発光素子 (**発光ダイオード** や **レーザダイオード**) となる。

4 実験スケジュール

本実験は、「市販の pn 接合ダイオードの測定」と「太陽電池の試作」の 2 つを同時進行で行う。表 2 に実験スケジュールを示す。各班は A、B、C の 3 コースに別れて市販 pn 接合ダイオードを測定する。

表 2: 実験スケジュール

	市販ダイオードの測定			太陽電池の試作
	A コース	B コース	C コース	全員
第 1 日	1. 整流性の確認 2. 電流電圧特性	1. 整流性の確認 3. 容量電圧特性	1. 整流性の確認 4. 発光・受光素子	...
第 2 日	3. 容量電圧特性	4. 発光・受光素子	2. 電流電圧特性	工程 [1 – 8]
第 3 日	4. 発光・受光素子	2. 電流電圧特性	3. 容量電圧特性	工程 [9, 10]
第 4 日				試作太陽電池 の特性評価

レポートは 2 回提出する。第 1 日目から 3 日目までの結果をまとめて 1 回目のレポートとし、第 4 日の開始時に提出する。第 4 日目の結果をまとめて 2 回目のレポートとし、1 週間後に提出する。

「課題」は、実験結果の解析のための手引きとなっているので、実験時間中に必ず解答すること。指導教官が「問題」の中からいくつかを選択して、レポートの課題とするので、その指示に従うこと。また、課題や問題の中には、本テキストで測定した結果だけでは、データ不足で解答できないものも敢えて設定してある。

5 実験手順

5.1 市販ダイオードの測定

【実験 1】整流性の確認

デジタルマルチメータ 2 台、可変抵抗 (ポテンシオメータ)、乾電池を用いて、市販ダイオードの電流-電圧特性を測定し、結果をグラフ (方眼紙) に表せ。測定結果が整流性を示していることを確認せよ。

【測定上の注意点】

- ダイオードの種類によって、順方向に流しうる電流の上限および、逆方向に印加しうる電圧

の上限が異なる。測定するダイオードのこれらの上限について、必ず指導教官の指示を受けること。

- 電流-電圧特性を測定する場合、一般に計測器の内部抵抗と測定対象の抵抗の大小によって、接続法が異なることに注意せよ (図 6 参照)。
- 光が pn 接合に入射すると、電流-電圧特性は影響を受ける。発光ダイオード、ホトダイオード、太陽電池の場合、遮光して測定すること。

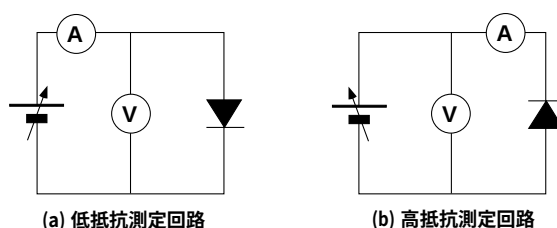


図 6: 電流計と電圧計を用いた測定回路 (測定対象の抵抗の大小により使い分ける)。

【実験 2】電流-電圧特性

デジタルマルチメータ、微小電流計、可変抵抗 (ポテンシオメータ)、乾電池を用いて、市販ダイオードの電流-電圧特性を測定し、結果を片対数グラフに表せ。

【測定上の注意点】

- 微小電流計は $1 \text{ pA} (=10^{-12} \text{ A})$ の微小電流が測れる高精度測定器である。実験 1 の注意に加えて、微小電流計に過大な電流を流さないように、細心の注意を払うこと。

現実の pn 接合では、キャリアの生成・消滅や、少数キャリアの高注入現象、直列並列抵抗の効果により、図 7 のように理想的な電流-電圧特性からずれる。現実の電流-電圧特性は次式の様になる。

$$I \approx I_0 \exp \left(\frac{eV}{nkT} \right). \quad (8)$$

n 値は**ダイオード因子**と呼ばれ、ダイオードの品質を示す一つの指標である。

現実のダイオードを等価回路で表すと図 7 の挿図のようになる。計測結果の解析から分路 (shunt) 抵抗 R_{sh} および直列 (series) 抵抗 R_{s} を定量的に評価できる。

課題 1 測定データから、飽和電流密度 I_0 、ダイオード因子 n 、分路抵抗 R_{sh} 、直列抵抗 R_{s} を求めよ。

問題 1 R_{sh} や R_{s} が生じる原因を考察せよ。

問題 2 電極は**オーム性**を示し、かつ電極と Si との間の**接触抵抗**ができるだけ小さいことが望ましいが、そうならない場合もある。現実の半導体デバイスの開発でも、これはしばしば重大な問題になっている。試料の構造上どのような工夫をし、どのような測定をすれば、オーム性の確認と接触抵抗の実測ができるか考察せよ。

問題 3 ダイオード因子 (n 値) が何によって決定されているか調べよ。

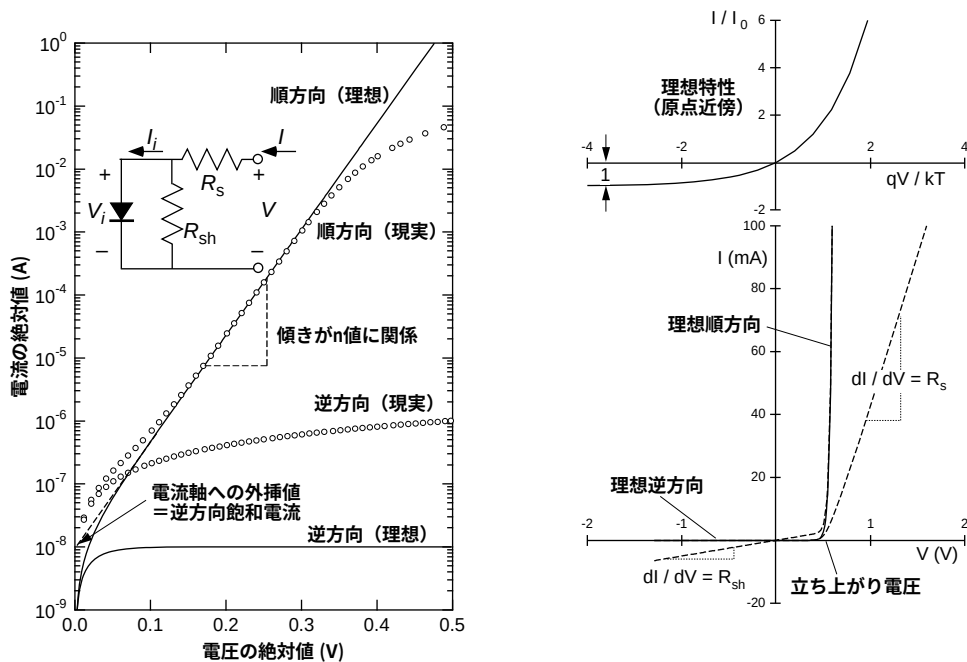


図 7: pn 接合ダイオードの電流-電圧特性の一例とその等価回路。

【実験 3】容量-電圧特性

pn 接合ダイオードの容量-電圧特性を測定せよ。測定端子間に外部電圧を印加できる高周波容量計 (図 8 参照) と可変抵抗 (ポテンシオメータ)、デジタルマルチメータ、電池を用いよ。

【測定上の注意点】

- 容量計測時のバイアスは逆バイアスであるので間違えないこと。また、電流-電圧特性測定の場合と同様に、外部の光を直接 pn 接合が受けるデバイスの場合には遮光が必要である。

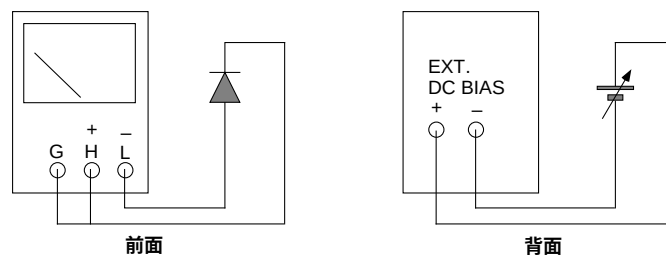


図 8: 外部電圧印加可能な高周波容量計による容量測定のための接続方法。

課題 2 縦軸を $1/C^2$ ($\text{pF}^{-2}\text{cm}^4$)、横軸を逆バイアス電圧 V (V) として計測結果をプロットせよ。また、 $1/C^3$ - V プロットもせよ。

課題 3 式 (3)、(4)、(5) を参考に、測定したダイオードが、階段接合、傾斜接合のいずれであるか判定せよ。

課題 4 測定データから拡散電位を求めよ。

問題 4 階段接合について、式 (3) および (5) を導出せよ。

問題 5 傾斜接合について、式 (4) および (5) を導出せよ。

【実験 4-1】発光受光素子—太陽電池の電流-電圧特性

(1) デジタルマルチメータ 2 台、可変抵抗 (ポテンシオメータ)、乾電池を用いて、太陽電池の暗時の電流-電圧特性を測定し、結果をグラフ (方眼紙) に表せ。

(実験 1【測定上の注意点】参照)

(2) 太陽電池に光を照射し、図 5(b) の回路で負荷抵抗の大きさを 0 から $5\text{k}\Omega$ および無限大 (端子間を開放) の範囲で変化させて、電流-電圧特性を測定せよ。光源には備え付けの白熱電球を用いよ。

課題 5 実験した光照射量におけるこの太陽電池の最適負荷抵抗はいくらか。またこのときの、出力電流、出力電圧を求めよ。

問題 6 発電の効率を大きくするためには、どのような材料で太陽電池を作るのが望ましいか考察せよ。

問題 7 直列抵抗成分 R_s と並列抵抗成分 R_{sh} を、図 7 及び図 5 を参考にして計測した特性から読みとれ。これらの抵抗成分は、 FF を小さくして発電効率を小さくしてしまう。このような特性の劣化を防ぐためにはどうしたらよいか考察せよ。

【実験 4-2】発光受光素子—発光ダイオードの電流-電圧特性および電流-光出力特性

(1) デジタルマルチメータ 2 台、可変抵抗 (ポテンシオメータ)、乾電池を用いて、発光ダイオードの電流-電圧特性を測定し、結果をグラフ (方眼紙) に表せ。このとき、遮光すること。

(実験 1【測定上の注意点】参照)

(2) 発光ダイオードの順方向電流と発光強度の関係を測定し、結果をグラフ (方眼紙) に表せ。太陽電池の短絡光電流が光強度に比例するとして、発光強度を測定せよ。太陽電池には発光ダイオードからの光のみが入射し、室内灯などの光が入射しないように注意すること。

問題 8 発光ダイオードの発光波長を決める要因を考察せよ。発光ダイオードに使われている半導体の種類と発光波長の関係を調べよ。

5.2 太陽電池の試作

5.2.1 素子構造

本実験では、pn 接合を有するデバイスとして太陽電池を製作する。その構造とエネルギーバンド図を図 9(a) と (b) に示す。 $n^+/p/p^+$ 構造 (back surface field; BSF 構造) となっており、p 形 Si 基板の表面及び裏面をそれぞれ n^+ 形及び p^+ 形に高密度ドープ状態にしたものである。 n^+/p 界面は、通常の pn 接合太陽電池の機能を有するが、裏面の p/p^+ 界面は、p 形 Si 中の少数キャリアである電子を閉じ込める機能がある。これにより、裏面に直接電極を取り付けた場合と比べて、光で生成されたキャリアが裏面電極側で再結合する率が少なくなり、発電電流に寄与ようになる (短絡電流 I_{SC} が増加)。また、裏面の p/p^+ 接合での電位差が表面の n^+/p 接合での電位差に加算されるため、発電電圧も増加する (開放電圧 V_{OC} が増加)。

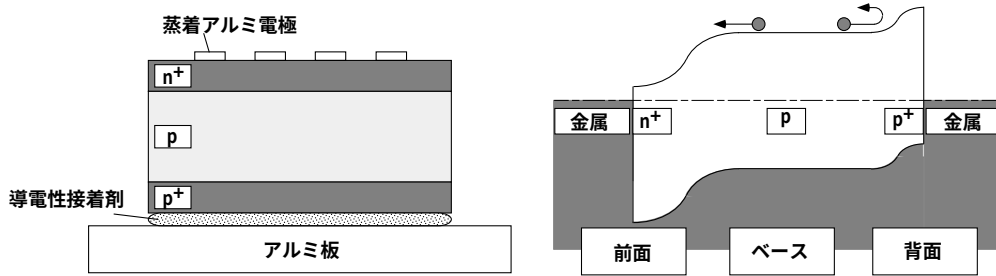


図 9: 製作する太陽電池構造 (BSF 構造) の (a) 断面図と (b) エネルギーバンド図。

5.2.2 不純物拡散法

本実験では、イオン打ち込み法と並んで pn 接合の代表的形成法である**不純物拡散法**を用いる。この方法では、半導体表面に高密度の不純物源があると、高温下で不純物が半導体表面から内部に拡散していく現象を活用している。不純物密度の深さ方向分布の解析には、次の 2 つの例が良く用いられる。

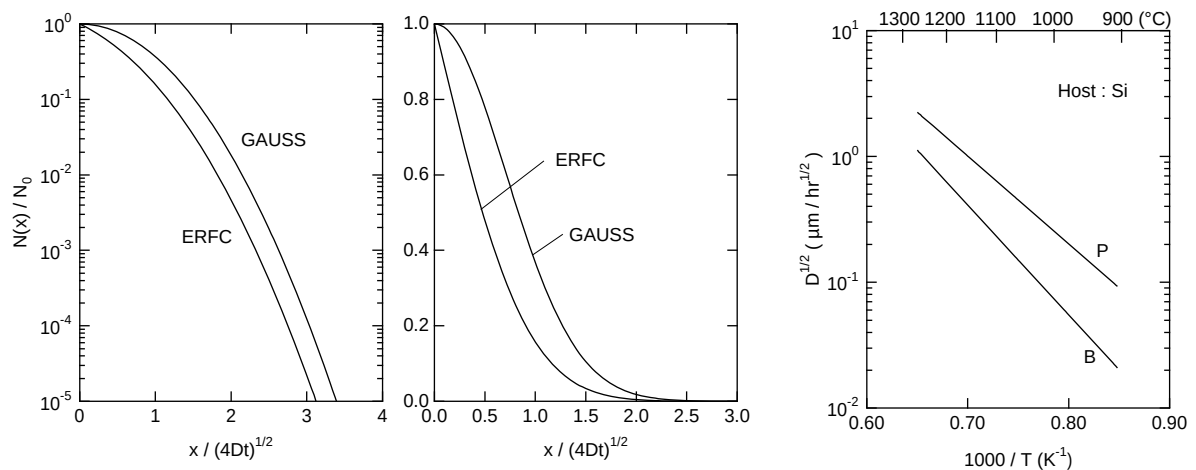


図 10: 拡散による不純物分布と Si 中の不純物の拡散係数。

半導体表面での不純物密度が常に一定の場合

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (9)$$

半導体表面での不純物密度の総量が一定の場合

$$N(x, t) = \frac{N_0}{\sqrt{\pi Dt}} \exp \left(-\frac{x^2}{4Dt} \right) \quad (10)$$

ここで、 x は半導体表面を原点に深さ方向を正にとっている。 erfc は**補誤差関数**である。 D は**拡散係数**で、半導体と不純物の種類、及び温度に依存しており、Si 中の B と P については、図 10 のような特性を示す。それぞれの場合の、 $N(x, t)$ を図 10 に示す。

5.2.3 真空蒸着法

本実験では、試料表面に Al 電極を形成する手法として**真空蒸着法**を用いる。これは、電極材料 (通常固体) を高温に加熱して蒸発させ、その時の蒸気圧で決まる露点よりも低い温度 (通常室温) にある物質の表面に堆積させるものである。その際、電極材料の酸化の抑制や蒸発した粒子の直進性向上のために、蒸着は高真空中で行うことが必要となる。決まった形状の電極を形成する場合には、表面の直前にその形状の穴が開いたマスクをセットする。加熱は、W や Ta 等のフィラメントに材料を引っ掛け、通電加熱によって行う。

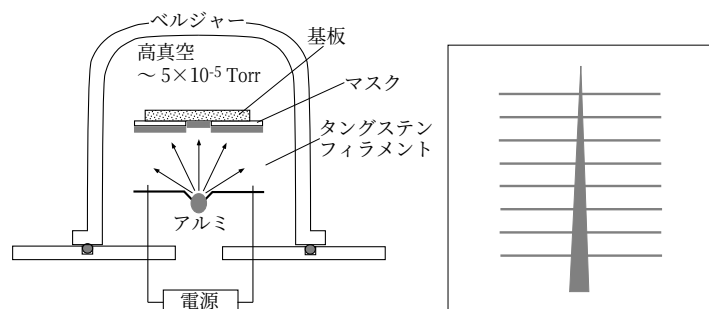


図 11: 真空蒸着の原理と楕円形 Al 電極形成用のマスクパターン。

5.2.4 製作プロセス

製作プロセスは図 12 に示す通りである。即ち、p 型の Si 基板³を用意し、その上面側に n 形、下面側に p 形の不純物を拡散させ、上面側には楕円形 Al を真空蒸着し、下面側は導電性接着剤 (商品名: アレムコボンド) で Al 板に接着する。なお、

- Si 表面に付着した手垢、ゴミ等は pn 接合の製作過程で Si と化学反応し、その電気的特性に影響するので、Si 基板は必ず清浄なピンセットで扱うこと。
- また、製作過程で腐食性の強いフッ化水素酸 (HF) を用いるので、掲示してある注意事項を遵守すること。HF に直接接触する道具 (ピンセット、ビーカ) にはポリエチレン製のものを用いること。

基板洗浄 (工程 [1]-[2])

大気に曝されたシリコン基板は、様々な汚染を受けているため、始めに洗浄を行う。手順は以下の通りである。

【有機洗浄】 アセトンを用いた超音波洗浄により、有機物を除去。

【リンス】 純水を用いた超音波洗浄により、残留アセトンを除去。

不純物拡散 (工程 [3]-[8])

表面の n⁺ 層及び裏面の p⁺ 層を不純物拡散の手法により形成する。n 形、p 形不純物源として表 3 に示した固相拡散源 (商品名: OCD および PBF) を用いる。

³Si 基板に裏表があることを確認すること。以下では、鏡面側を表面、粗面側を裏面と呼ぶことにする。

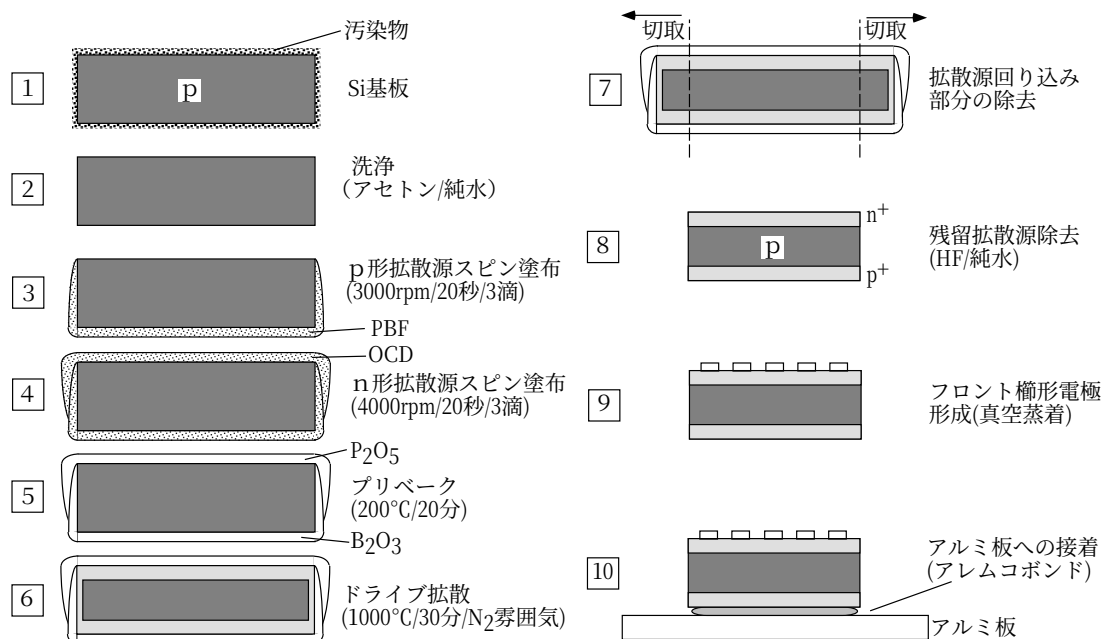


図 12: 製作工程

【**スピコーティング**】表 3 の条件で、固相拡散源のうち裏面にホウ素拡散源 (PBF) を、表面にリン拡散源 (OCD) を、スピナー⁴で塗布する。

【**プリベーキング**】塗布した固相拡散源を B_2O_3 膜及び P_2O_5 膜にするために、表 3 の条件で、オーブンを用いて加熱する。⁵

【**ドライブ拡散**】表裏面に形成された膜を拡散源として Si 内部に B 及び P を拡散させるために、表 3 の条件で、窒素雰囲気での拡散炉を用いて加熱する。

【**周辺除去**】スピコーティングした拡散源は、図 12[6] に示したように試料側面に回り込んでいる。この状態のまま工程を進めると、表と裏が側面を通じて導通するため、 p^+ と n^+ が重なり合っている試料の周辺部をダイヤモンドペンを用いて切り落とす。

【**残留拡散源除去**】ドライブ拡散後の試料表面に残留している拡散源を除去する。

【**HF 処理**】HF に約 1 分間浸し、残留拡散源を除去。

【**リンス**】純水に浸して攪拌し、残留 HF を除去。

電極形成 (工程 [9]-[10])

表面側については、図 11 に示した楕円形マスクを用いて Al を真空蒸着することによって電極形成を行う。裏面側については、導電性接着剤を用いて裏面を Al 板にはりつけることによって電極形成を行う。

評価及び解析

前節「発光と受光」で行った評価・解析方法を参考にして、製作した太陽電池の特性を評価せよ。

⁴ 高速回転させた試料に試薬液を滴下し、試料上に試薬液の均一な皮膜を作る装置。

⁵ これにより塗布膜に含まれる有機成分が蒸発する。

表 3: 拡散源の物性と使用方法

用途	品名	備考
p ⁺ 層形成用	PBF	ホウ素 (B) を B ₂ O ₃ として 1.4wt% 含有
		スピスコート回転数 3000 rpm
		スピスコート時間 20 秒
		滴下回数 3 滴
		プリベーク 200°C 20 分
		ドライブ拡散 1000°C 30 分
n ⁺ 層形成用	OCD	リン (P) を P ₂ O ₅ として 3g/100ml 含有
		スピスコート回転数 4000 rpm
		スピスコート時間 20 秒
		滴下回数 3 滴
		プリベーク 200°C 20 分
		ドライブ拡散 1000°C 30 分

問題 9 原理的には、電流密度 j =電流 I /電極面積 S である。今回製作した pn 接合ダイオードの構造について、蒸着した電極の面積を用いて電流密度を計算して良いだろうか。精度よく電流密度を決めるためには、どのような素子構造にすれば良いか述べて。

問題 10 本実験で B や P はどの程度の深さまで拡散しているか、計算せよ。

Si に関連する物性定数

表 4: Si に関連する物性定数 ($T=300\text{K}$)

バンドギャップ E_G	1.12 eV
真性キャリア密度 n_i	$1.08 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
伝導帯実効状態密度 N_C	$2.86 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
価電子帯実効状態密度 N_V	$3.10 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
誘電率 ϵ_S	11.9

参考図書

pn 接合に関する参考図書

1. 松波弘之、吉本昌広：半導体デバイス (共立出版)
2. 松波弘之：半導体工学 (昭晃堂)
3. 三菱電機技術研修所：わかりやすい半導体デバイス (オーム社)
4. 國岡昭夫：基礎半導体工学 (朝倉書店)
5. S.M.Sze: 半導体デバイス (産業図書)
6. 御子柴宣夫：半導体の物理 (培風館)
7. 永田穰：超高速バイポーラデバイス (培風館)

発光・受光素子に関する参考図書

1. 米津宏雄：光通信素子工学—発光・受光素子— (工学図書)

拡散プロセスに関する参考図書

1. A.S.Grove: 半導体デバイスの基礎 (マグローヒル)

本文中で指摘されているように、
電子が勾配を登るような絵を描いたらだめで、
以下のように書くべし。

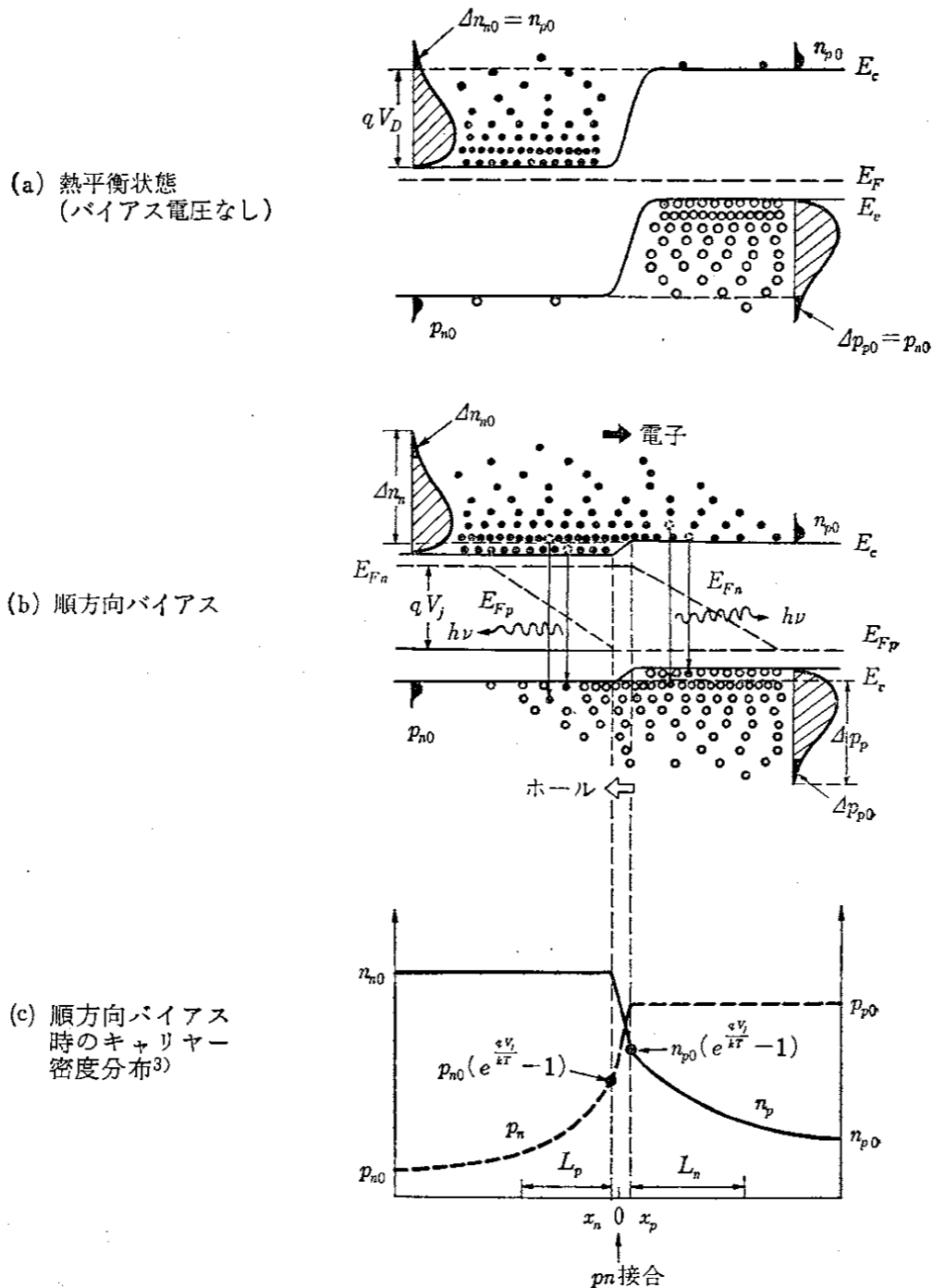


図 2.17 順方向バイアス時の pn 接合とキャリア密度分布 (ホモ接合)