デバイス

一つの半導体単結晶で p 型と n 型とが互いに接しているものを pn 接合という．pn 接合は，ダイオードとして広く用いられているだけでなく，バイポーラトランジスタやサイリスタ，電界効果トランジスタ，発光・受光デバイスの構成要素として，ほとんどすべての半導体デバイスに用いられている．この実験では，実際に Si の pn 接合ダイオードを製作し，電流電圧特性の測定と解析を通じて，その基本的な物理を理解することを目的とする．

1　pn 接合

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 型 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 型 Si となる．このような添加元素を**ドナ**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 型 Si(又は n 型 Si) が単独で存在する場合，イオン化アクセプタと正孔 (又はイオン化ドナと電子) の密度はほぼ同じであり巨視的には電気的に中性である．

pn 接合を形成すると，p 型領域には正孔が，n 型領域には電子が多いため，電子が n 型側から p 型側に，正孔が p 型側から n 型側に拡散で移動し，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 型側と n 型側には，それぞれ負のアクセプタイオンと正のドナ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 → p) の電界が発生する．これによりキャリアの移動はある状態で見かけ上なくなり，p 型側と n 型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;

$$V_\mathrm{d} = \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{n_\mathrm{n0}p_\mathrm{p0}}{n_\mathrm{i}^2}\right) \approx \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{N_\mathrm{D}N_\mathrm{A}}{n_\mathrm{i}^2}\right). \tag{1}$$

ここで，p_p0，n_n0，及び n_i は，それぞれ，p 型領域の平衡正孔密度，n 型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 型半導体中の正孔及び n 型半導体中の電子の密度は添加したドナ密度 (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．また，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なる．

$$d = \left\{\frac{2\epsilon_\mathrm{s}\epsilon_0}{e}\left(\frac{1}{N_\mathrm{A}} + \frac{1}{N_\mathrm{D}}\right)V_\mathrm{d}\right\}^{1/2}. \tag{2}$$

p 型側が n 型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 $V_\mathrm{d} - V$ に減少するので，電子及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 型側に電子が，n 型側に正孔が拡散し (**少数キャリアの注入**)，電流が流れやすくなる．一方，p 型側が n 型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 $V_\mathrm{d} + V$ に増加し，図 2(b) のように電子及び正孔の拡散が妨げられて電流が流れにくくなる．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．

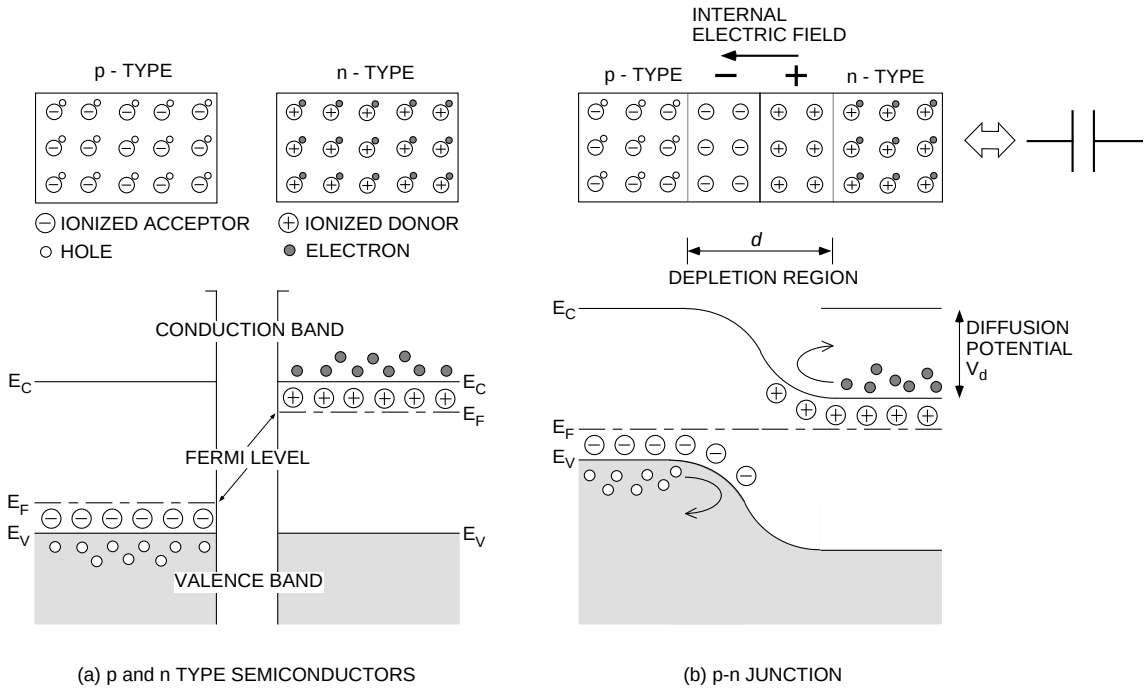


図 1: (a) p 型と n 型が単独で存在する場合と (b) pn 接合を形成した場合の半導体中の電荷分布とエネルギーバンド図.

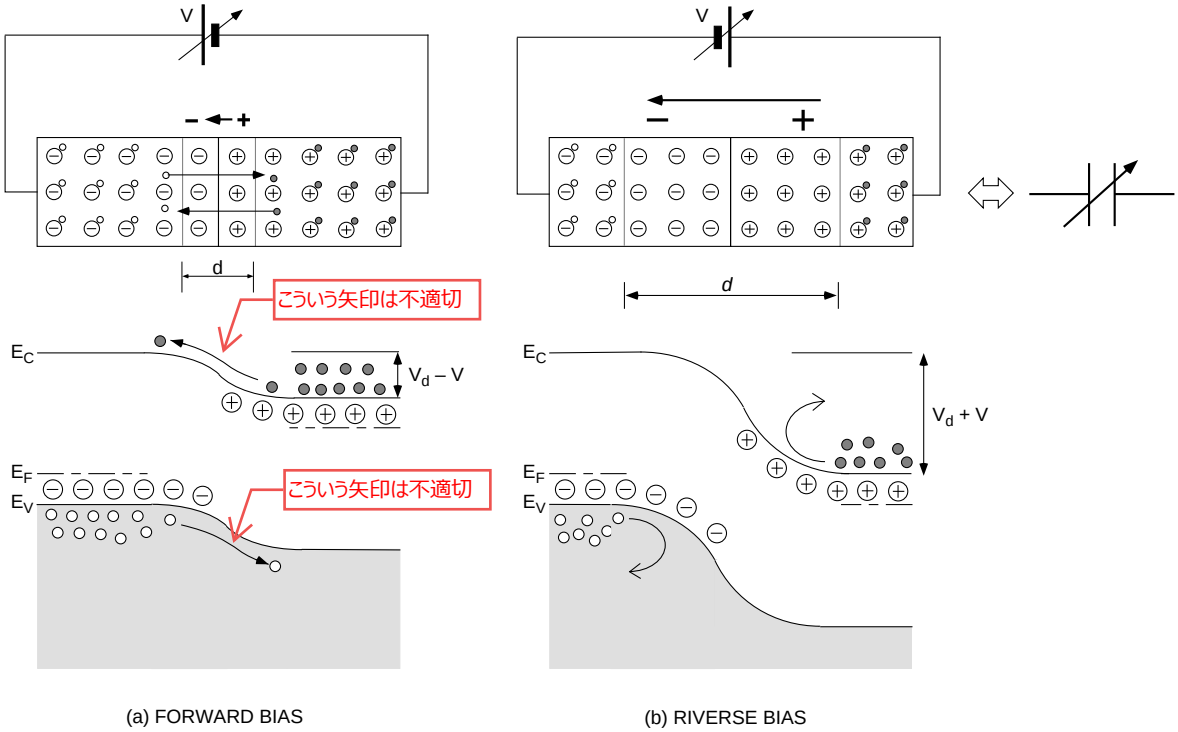


図 2: pn 接合に (a) 順バイアスと (b) 逆バイアスの電圧を印加したときのキャリアの流れとエネルギーバンドの状態.

2　電流-電圧特性

2.1　理論

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，

$$j = j_0 \left\{ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right\} \approx j_0 \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \tag{3}$$

となる．ここで，j_0 は逆方向飽和電流密度と呼ばれ，小さいことが望ましい．電流-電圧特性はこれに電流が流れる断面積を掛けることによって得られる．なお，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 3 のように理想的な電流-電圧特性からずれる．

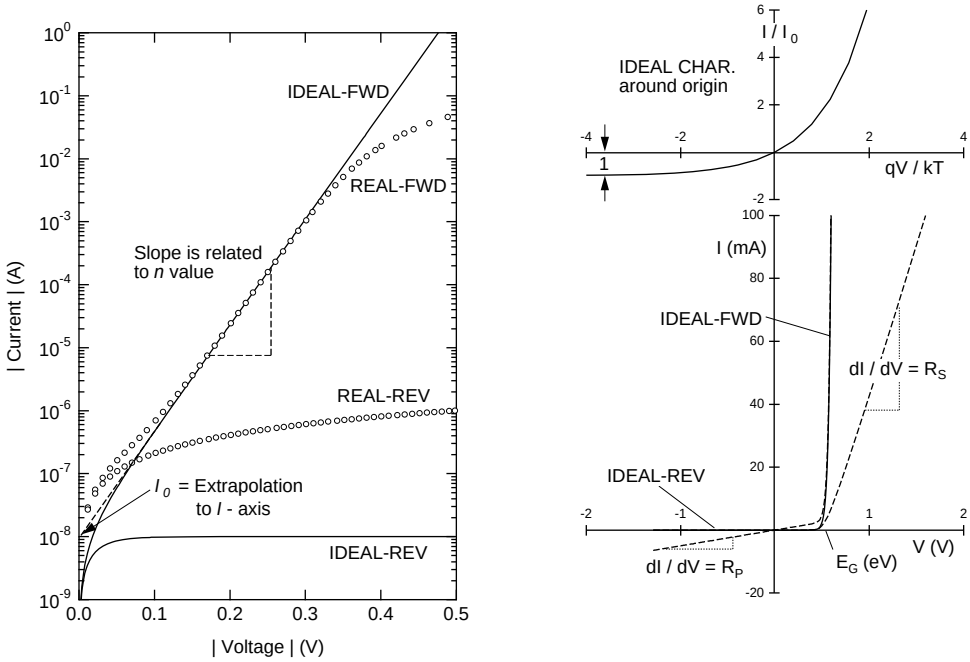


図 3: pn 接合ダイオードの電流-電圧特性の一例.

2.2　計測

1. 図 3(右) のような電流-電圧特性は，図 4(a) に示した回路と X-Y レコーダを用て描くことができる．
2. 図 3(左) のような電流-電圧特性は，電流計と電圧計を用いた plot-by-plot 法と呼ばれる方法で計測する．計測器の内部抵抗を考慮すると，比測定対象の抵抗の大小で接続法が図 4(b) のように異なってくる．

注：測定範囲は，順バイアスで最大 1.0V，逆バイアスで最大 10V までとする．また，後述のように pn 接合の電流-電圧特性は光の影響を受けるので，光が pn 接合部に入射するデバイスについては，試料を遮光する必要がある．

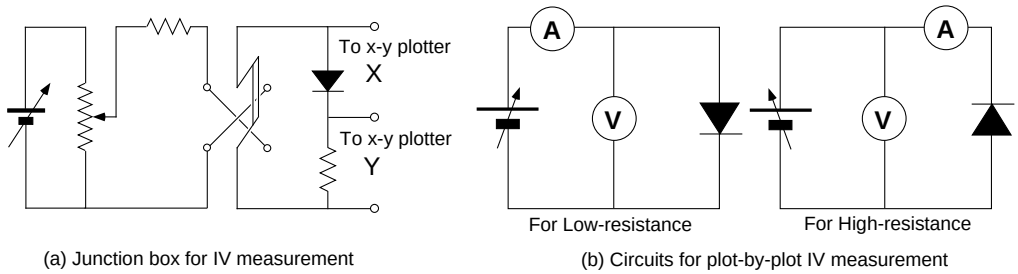


図 4: (a) X-Y レコーダを用いた電流-電圧特性測定のためのジャンクションボックスと (b) 電流計と電圧計を用いた測定回路 (測定対象の抵抗の大小により使い分ける).

2.3 解析

電流-電圧特性の解析から，pn 接合を形成している材料の物性や，品質を示す指標 (主にデバイスの構造に起因する) が求められる．以下を参考にして計測した結果を評価せよ．

1. X-Y プロッタで記録した電流-電圧特性 (リニア特性) は，図 3(右) のようにある電圧から急峻に立ち上がる．この立ち上がり電圧は逆方向飽和電流 I_0 の大きさと関係している．
2. 現実のダイオードの電流-電圧特性は次式の様になる．

$$I \approx I_0 \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right). \tag{4}$$

   n 値はダイオードの品質を示す一つの指標である．n 値が 1 に近いほど理想的な特性に近いことを意味するが，理想特性に近づけるためには，n 値がデバイスの何によって決定されているかを調べる必要がある．
3. 現実のダイオードは物質固有の抵抗成分がある．図 5 のような等価回路で表すと，計測結果の解析から抵抗成分を定量的に評価できる．ダイオードを形成する材料が決まると，これらの抵抗値は主にデバイス構造 (形状，厚み，電極面積等) によって左右される．

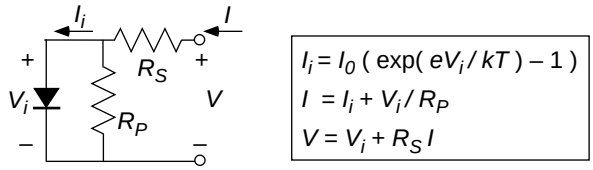


図 5: 実際のダイオードの等価回路

4. 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，どの様な測定をすれば，オーム性の確認と接触抵抗の実測ができるだろうか．)
5. 原理的には，電流密度 j=電流 I/電極面積 S であるが，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？)．

3　容量-電圧特性

3.1　理論

図 6(a) のように界面で電荷密度が N_A から N_D に急峻に変化している理想的な階段型接合の単位面積当たりの容量-電圧特性は，空乏層幅 d(式 (2)) から次のようになる．

$$C = \frac{\epsilon_\mathrm{s}\epsilon_0}{d} = \left\{ \frac{e\epsilon_\mathrm{s}\epsilon_0}{2(V_\mathrm{d} - V)} \frac{N_\mathrm{A}N_\mathrm{D}}{N_\mathrm{A} + N_\mathrm{D}} \right\}^{1/2} \tag{5}$$

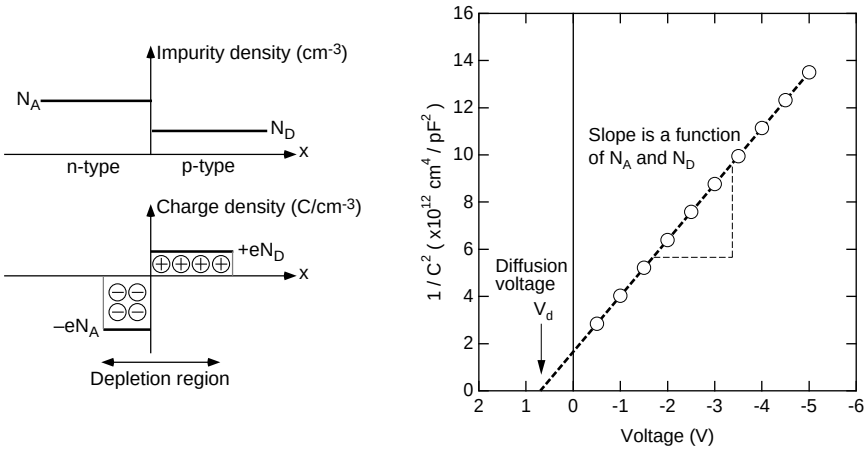


図 6: 階段接合の (a) 電荷分布と (b) 容量-電圧特性例

3.2　計測

図 6 のような特性は，測定端子間に外部電圧を印加できる高周波容量計を用いて計測できる．図 7 を参考にして計測せよ．

注：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ように．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．

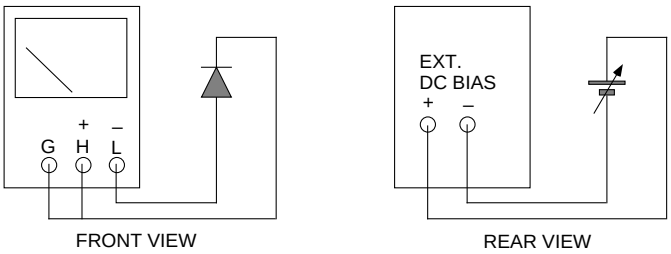


図 7: 外部電圧印加可能な高周波容量計による容量測定のための接続方法.

3.3 解析

容量-電圧特性の解析から，pn 接合の接合状態や不純物密度に関する情報を得ることが出来る．以下を参考にして計測した結果を評価せよ．

1. 階段接合の場合には，式 (5) より，縦軸を $1/C^2(\mathrm{pF}^{-2}\mathrm{cm}^4)$，横軸を逆バイアス電圧 $V(\mathrm{V})$ として計測結果をプロットすると直線になる．しかし，不純物拡散法によって形成した接合は階段型にならず，界面近傍で電荷密度が徐々に変化する傾斜接合となる．この場合の容量電圧特性は，

$$\frac{1}{C^3} = \frac{12}{e\epsilon_{\mathrm{s}}^2\epsilon_0^2 a}(V_d - V) \propto V_{\mathrm{d}} - V, \tag{6}$$

となり，縦軸を $1/C^3(\mathrm{pF}^{-3}\mathrm{cm}^6)$ としてプロットすると直線状に変化する．ここで，a は界面での不純物の密度勾配である．

2. 階段接合の場合には，理論式からわかるように拡散電位 V_{d} と空乏層幅 d を求められる．また，p 型側または n 型側の不純物密度が既知であれば，もう片方側の不純物密度を知ることができる．なお，予め N_{A} や N_{D} が既知であれば，式 (1)，式 (2) からでも V_{d} や d を予測できるはずである．
3. 傾斜接合の場合には，理論式からわかるように拡散電位 V_{d}，接合界面での不純物の密度勾配 a 及び空乏層幅 d を求められる．

参考

半導体の抵抗率 ρ から，添加した不純物 (ドナやアクセプタ) の密度を見積もることができる．抵抗率は

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_{\mathrm{e}}} \quad or \frac{1}{pe\mu_{\mathrm{h}}} \tag{7}$$

で与えられる．ここで，n 及び p は電子及び正孔の密度であり，室温で一種類の不純物しか添加していなければ，添加したドナやアクセプタの密度 (N_{D} や N_{A}) にほぼ等しい．μ_{e} 及び μ_{h} は電子及び正孔の移動度であり，使用した半導体材料が既知であれば判る．Si 中の電子と正孔の移動度は，付録を参照されたい．

あるいは，図 8 のようなチャートを用いてもよいだろう．

図 8: Si 中の不純物密度と抵抗率の関係.

4　受光と発光

4.1　発光・受光素子

図 9(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 9(b) のように電界を印加すると，励起された電子と正孔は，それぞれ正及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 接合の無又は逆バイアス時の空乏層の内部電界は，この電界の役目を果し，電子と正孔はそれぞれ n 型と p 型側へ分離されて起電力が生じる (光起電力効果)．これが半導体受光素子 (太陽電池やフォトダイオード) の基本原理である．

図 9(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，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．

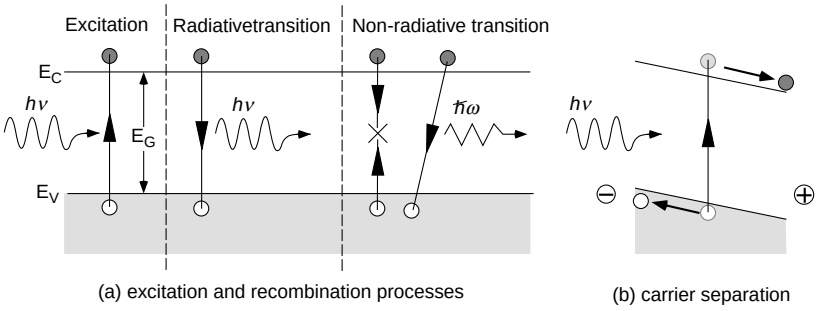


図 9: 半導体中における遷移過程．(a) 励起と再結合 (発光再結合と非発光再結合) 過程．(b) 外部電界による励起電子正孔対の空間的分離．

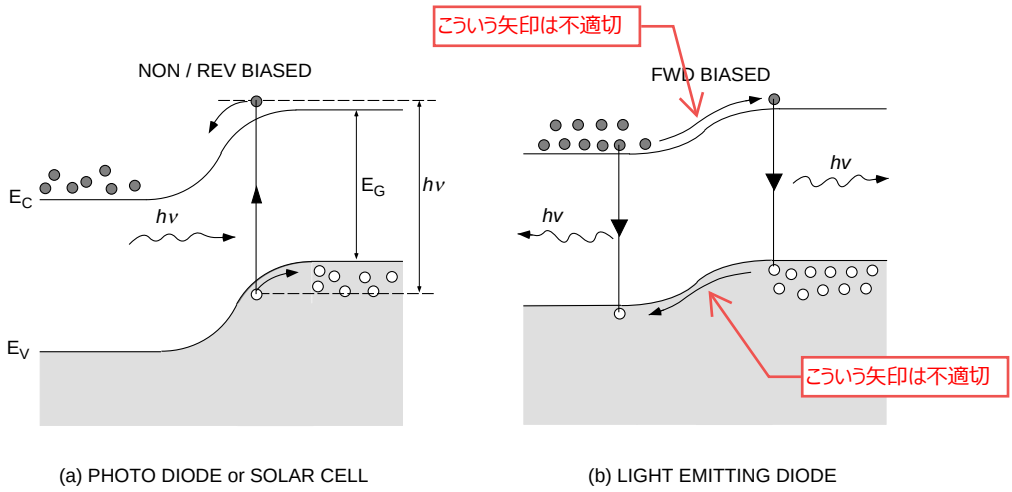


図 10: (a) フォトダイオードまたは太陽電池と (b) 発光ダイオードの動作原理．

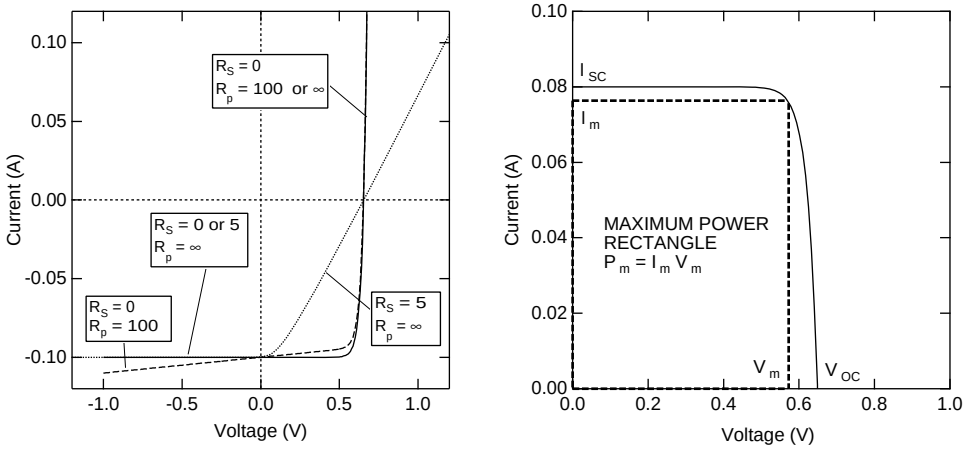


図 11: 太陽電池の電流電圧特性の一例．右図は第四象限 (太陽電池として動作する領域) の電流符号を逆にしてプロットしたもの．

4.2 発光素子の特性

発光ダイオードの電流-光出力特性は，基本的には発光再結合場所での電子と正孔の密度の積に比例する．図 10(b) のように，p 型に注入された電子が p 型にもともとあった正孔と再結合する場合，前者の密度のみが電流量に比例し，後者はアクセプタの密度で決まるため，発光強度は電流に比例する (n 型に注入された正孔が n 型にもともと合った電子と再結合する場合も同じ)．一方，注入キャリア同士の再結合が盛んな場合には，両者とも電流量に比例するため，発光強度は電流の二乗に比例する．また，発光領域の温度上昇の影響も受けるため，電流による発熱が大きくなると光出力は飽和傾向を示す．

4.3 受光素子の特性

図 11 に受光素子の一つである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 $R_{\mathrm{L}} = V_{\mathrm{m}}/I_{\mathrm{m}}$ がある．最大電力 P_{max} は，

$$P_{\mathrm{max}} = I_{\mathrm{m}} V_{\mathrm{m}} = I_{\mathrm{SC}} V_{\mathrm{OC}} FF \tag{8}$$

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，

$$\eta = \frac{I_{\mathrm{m}} V_{\mathrm{m}}}{P_{\mathrm{in}}} = \frac{I_{\mathrm{SC}} V_{\mathrm{OC}} FF}{P_{\mathrm{in}}} \tag{9}$$

で与えられる．P_{in}(W) は，入射光量である．

4.4 計測

本実験では，太陽電池に発光ダイオードの光を入射し，太陽電池の特性を評価する．以下を参考にして計測を行え．

1. 太陽電池への入射光量 P_{in} を知るためには，光源である発光ダイオードの特性を予め知っておく必要がある．即ち，発光ダイオードの電流-電圧特性，及び電流-光出力特性を計測し，発光ダイオードへの入力電力が光出力としてどれだけ放射されているかを示すチャート図を作成しなければならない．

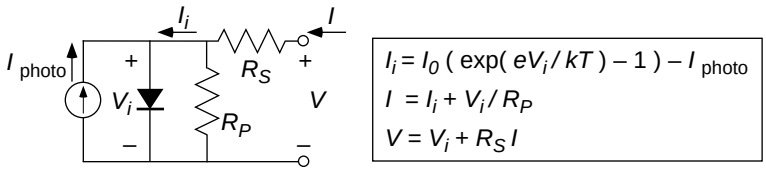
   光出力の計測のために別にキャリブレーションされた太陽電池を用意してある．なお，次の太陽電池の発電効率の計測には，この発光ダイオードとチャートを用いて入射光量を設定するので，チャート作成時の太陽電池と発光ダイオードの位置関係と次の測定における位置関係は同じである必要がある．

2. 以上の準備が出来ていれば，太陽電池に既知の光量の光を照射して電流-電圧特性を計測することができる．計測のための回路は，pn 接合ダイオードの電流-電圧特性測定のための回路 (図 4) を参考にせよ．

4.5 解析

本実験では，太陽電池の特性評価を主な目的とするが，発光ダイオードの電流-電圧及び光出力-電流特性についても考察する価値がある．以下を参考にして測定結果の評価を行い，太陽電池や発光ダイオードの特性について考えてみよ．

1. 発光ダイオードの発光色 (発光波長) は主に E_{G} によってきまるため，そのダイオードの材料をある程度特定できる．
2. ON-OFF の変調を行う通信機器用発光ダイオードの光出力は，電流に対してリニアであることが望ましく，また，電気 VI を光に変換する効率も高い方がよいが，本実験のダイオードはどうか．
3. 太陽電池の電流電圧特性から，I_{SC}，V_{OC}，I_{m}，V_{m} FF が得られ，入射光量と最大出力 $I_{\mathrm{m}}V_{\mathrm{m}}$ の比から最大発電効率 η が得られる．発電の効率は，理想的な太陽電池を作ったとしても，材料物性による制限を受けるが，どのような材料で太陽電池を作るのが望ましいだろうか．
4. 直列抵抗成分 R_{S} や並列抵抗成分 R_{P} は，図 3，図 11 及び図 12 を参考にすれば，計測した特性から読みとることができる．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が，改善するためにはどうしたらよいだろう．



Equivalent circuit for photo-detector diode

図 12: 太陽電池の等価回路

5　製作

5.1　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 13(a) と (b) に示す．$n^+/p/p^+$ 構造 (back surface field; BSF 構造) となっており，p 型 Si 基板の表面及び裏面をそれぞれ n^+ 型及び p^+ 型に高濃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 型 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，発電電流に寄与するようになる (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)．

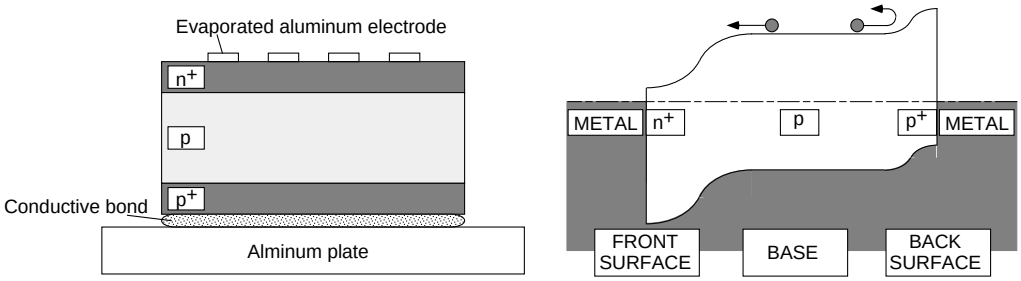


図 13: 製作する太陽電池構造 (BSF 構造) の (a) 断面図と (b) エネルギーバンド図.

5.2　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，半導体表面に高濃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．

半導体表面での不純物密度が常に一定の場合

$$N(x,t) = N_0 \ \mathrm{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \tag{10}$$

半導体表面での不純物密度の総量が一定の場合

$$N(x,t) = \frac{N_0}{\sqrt{\pi D t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \tag{11}$$

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 14 のような特性を示す．それぞれの場合の，$N(x,t)$ を図 14 に示す．

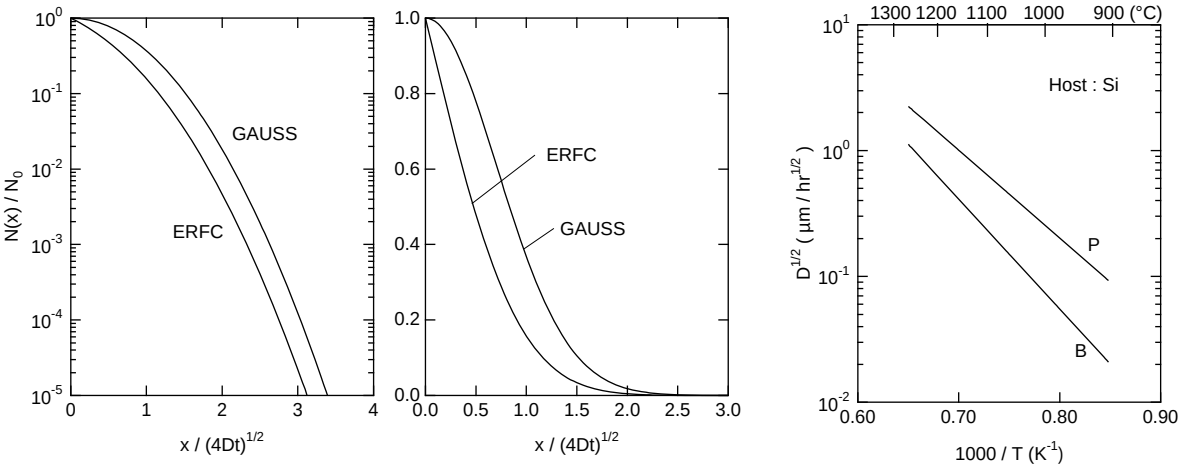


図 14: 拡散による不純物分布と Si 中の不純物の拡散係数

5.3 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かけ，通電加熱によって行う．

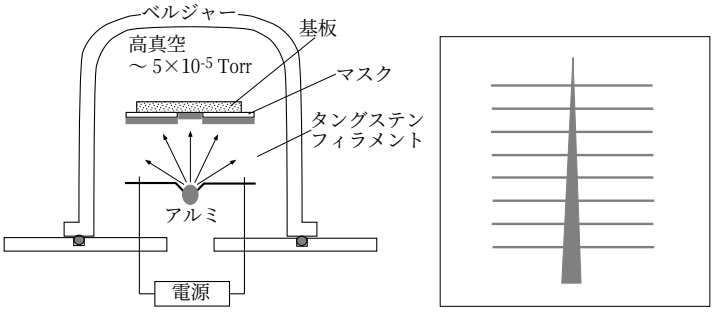


図 15: 真空蒸着の原理と櫛形 Al 電極形成用のマスクパターン

5.4 製作プロセス

製作プロセスは図 16 に示す通りである．即ち，p 型の Si 基板[1]を用意し，その上面側に n 型，下面側に p 型の不純物を拡散させ，上面側には櫛形 Al を真空蒸着し，下面側は導電性ボンドで Al 板に接着する．なお，

[1] Si 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．

- 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．

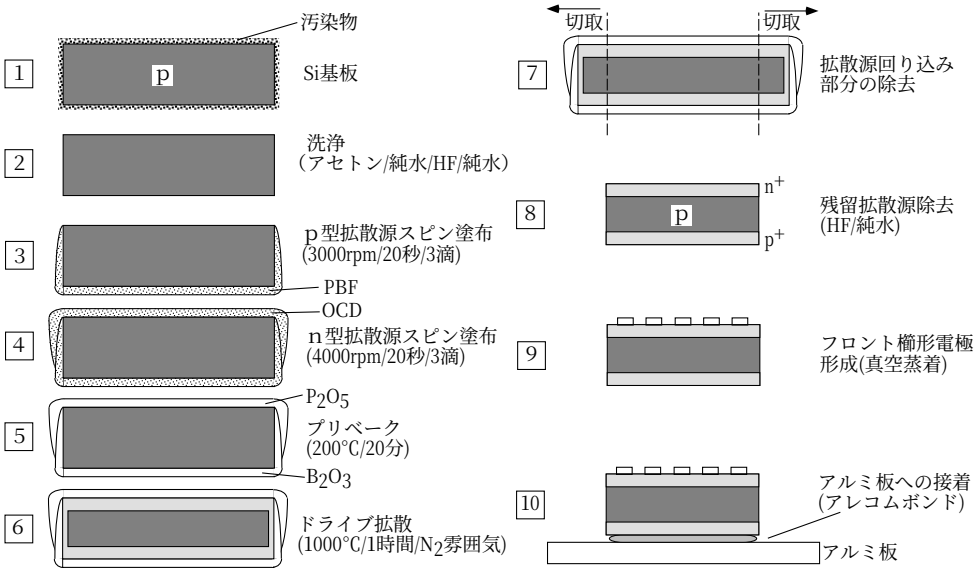


図 16: 製作工程

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１】 純水を用いた超音波洗浄により，残留アセトンを除去.

【自然酸化膜除去】 HF に約 1 分間浸し，自然酸化膜 (SiO_2) を除去.

【リンス２】 純水に浸して撹拌し，残留 HF 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 型，p 型不純物源として表 1 に示した OCD，PBF を用いる．

【スピンコーティング】 表 1 の条件で，裏面に PBF を，表面に OCD を，スピナー[2]で塗布する．

【プリベーキング】 塗布した PBD と OCD を B_2O_3 膜及び P_2O_5 膜にするために，表 1 の条件で，オーブンを用いて加熱する．[3]

[2] 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.
[3] これにより塗布膜に含まれる有機成分が蒸発する.

【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1の条件で，窒素雰囲気の拡散炉を用いて加熱する．

【周辺除去】スピンコーティングした拡散源は，図16[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してしまうため，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．残留拡散源はHFを用いて除去可能であり，前述の**【自然酸化膜除去】**，**【リンス２】**に従って除去する．

表 1: 拡散源の素性と使用方法

用途	品名	備考	
p^+ 層形成用	PBF	ホウ素 (B) を B_2O_3 として 1.4wt%含有	
		スピンコート回転数	3000 rpm
		スピンコート時間	20 sec
		滴下回数	3 滴
		プリベーク	200°C 20 min
		ドライブ拡散	1000°C 1 hour
n^+ 層形成用	OCD	リン (P) を P_2O_5 として 3g/100ml 含有	
		スピンコート回転数	4000 rpm
		スピンコート時間	20 sec
		滴下回数	3 滴
		プリベーク	200°C 20 min
		ドライブ拡散	1000°C 1 hour

電極形成 (工程 [9]-[10])

表面側については，図15に示した櫛形マスクを用いて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 (アレコムボンド) 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．

本製作実験では不純物拡散法を用いたが，拡散したBやPはどの程度の深さまで拡散しているであろうか．

6　付録

真空蒸着の手順

【ベルジャーのリーク (大気開放)】

蒸着装置の電離真空計のフィラメントが点灯している場合は，その電源のスイッチを OFF する．保持バルブ①を閉じる．荒引きバルブ②が閉じていることを確認する．ベルジャーリークバルブ④を開く．ベルジャー内が大気圧に戻れば，ベルジャーを取り外して机の上に置く．このとき，ベルジャーのゴムパッキンのすりあわせ面を下にして置かないこと．アルミの覆いを取り外し，机の上に置いておく．

【蒸着金属のセット】

蒸着用 Al を V 字型に曲げ，フィラメントの V 字部分に引っかける．アルミの覆いをもとに戻す．

【試料のセット】

ベルジャーのすり合わせ面と蒸着装置側のゴムパッキンを，エタノールを含ませたキムワイプで拭き，ベルジャーをセットする．セットしたら，蒸着金属及び Si 基板が所定の位置にセットされていることを確認する．全てのセットが終わったら，ベルジャー内の排気を行う．

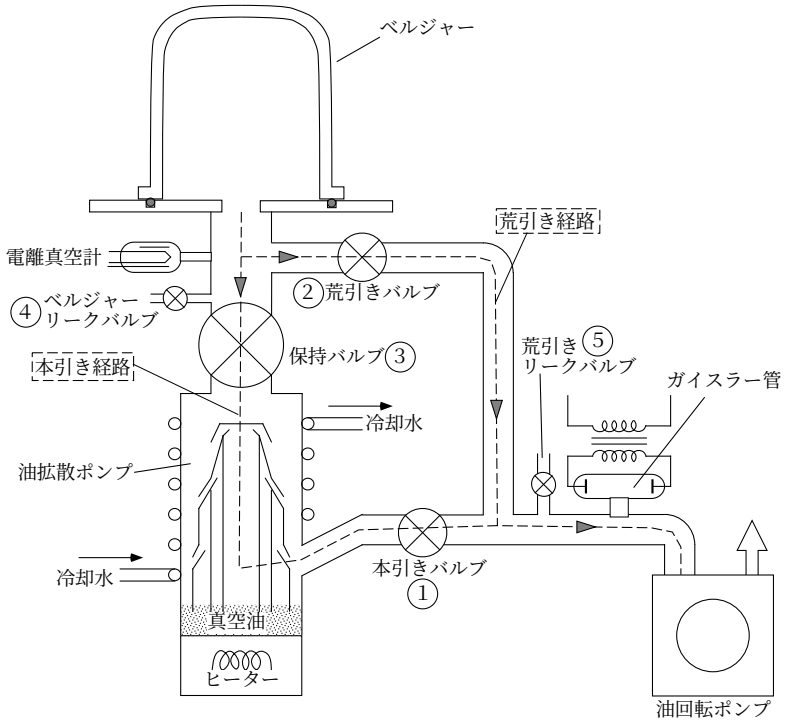


図 17: 真空蒸着の装置

【ベルジャー内の排気】

ベルジャーリークバルブ④を閉じる．本引きバルブ③を閉じる．荒引きバルブ②を開く．約 5 分待つ．ガイスラー管で圧力が $10^{-2} \sim 10^{-3}$Torr になっていることを確認する．荒引きバルブ②を閉じる．本引きバルブ③を開く．保持バルブ①を開く．約 5 分待つ．

電離真空計メータの圧力レンジを 10^{-3}Torr レンジにし，電源を ON する．フィラメント点灯のスイッチを一瞬だけ押し，圧力が 10^{-3}Torr 以下になっていることを確認する．確認

したら，フィラメント点灯用スイッチを押してから右にまわしてロックする．この状態で，電離真空計の指示値が 5×10^{-5}Torr 程度になるまで待つ．約 20 分程度でその圧力状態に到達するはずである．この圧力範囲になったら，蒸着可能である．

【蒸着】

電離真空計の圧力レンジを 10^{-3}Torr にし，電源を OFF する．蒸着用フィラメントの加熱用電源のスイッチを ON し，スライダックを徐々に回し電流を増やす．すると，あるところで Al が融解して球状になる．その時点でシャッタを開き，蒸発した Al が基板まで到達するようにする．融解開始電流よりも 1A 程度大きめで加熱 (通電) を続ける．蒸着金属が無くなる直前でシャッタを閉じ，スライダックをゼロに戻して OFF する．約 10 分間冷却する．

【試料の取り出し】

【ベルジャーのリーク】，**【試料のセット】**の手順を参考にして，試料を取り出す．

【蒸着装置の停止】

ベルジャーにも Al が蒸着されているので，アセトンを含ませたキムワイプで付着した Al を拭き取る．洗浄したベルジャーを蒸着装置にセットし，**【ベルジャー内の排気】**を行う．このときは，20 分ではなく 5 分待てばよい．次に，保持バルブ①を閉じる．拡散ポンプの電源を OFF し，扇風機でそのポンプのヒータ部を冷却する．ヒータ部で手で触れられる程度の温度になったら，本引きバルブ③を閉じ，油回転ポンプを OFF する．その後，ただちに荒引きリークバルブ⑤を開け，ポンプ吸引口の圧力を大気圧に戻しておく．最後に冷却水の蛇口を閉じる．

Si に関連する物性定数

表 2: Si に関連する物性定数 (T=300K)

バンドギャップ E_{G}	1.12 eV
真性キャリア密度 n_{i}	1.45×10^{10} cm^{-3}
伝導帯実行状態密度 N_{C}	2.8×10^{19} cm^{-3}
価電子帯実行状態密度 N_{C}	1.04×10^{19} cm^{-3}
誘電率 ϵ_{s}	11.9
電子移動度 μ_{e}	1500 cm^2/Vs
正孔移動度 μ_{h}	450 cm^2/Vs

参考図書

pn 接合に関する参考図書

1. 松波弘之: 半導体工学 (昭晃堂)
2. 國岡昭夫: 基礎半導体工学 (朝倉書店)
3. S.M.Sze: 半導体デバイス (産業図書)
4. 御子柴宣夫: 半導体の物理 (培風館)
5. 永田穣: 超高速バイポーラデバイス (培風館)
6. 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)

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 (マグロウヒル)

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．

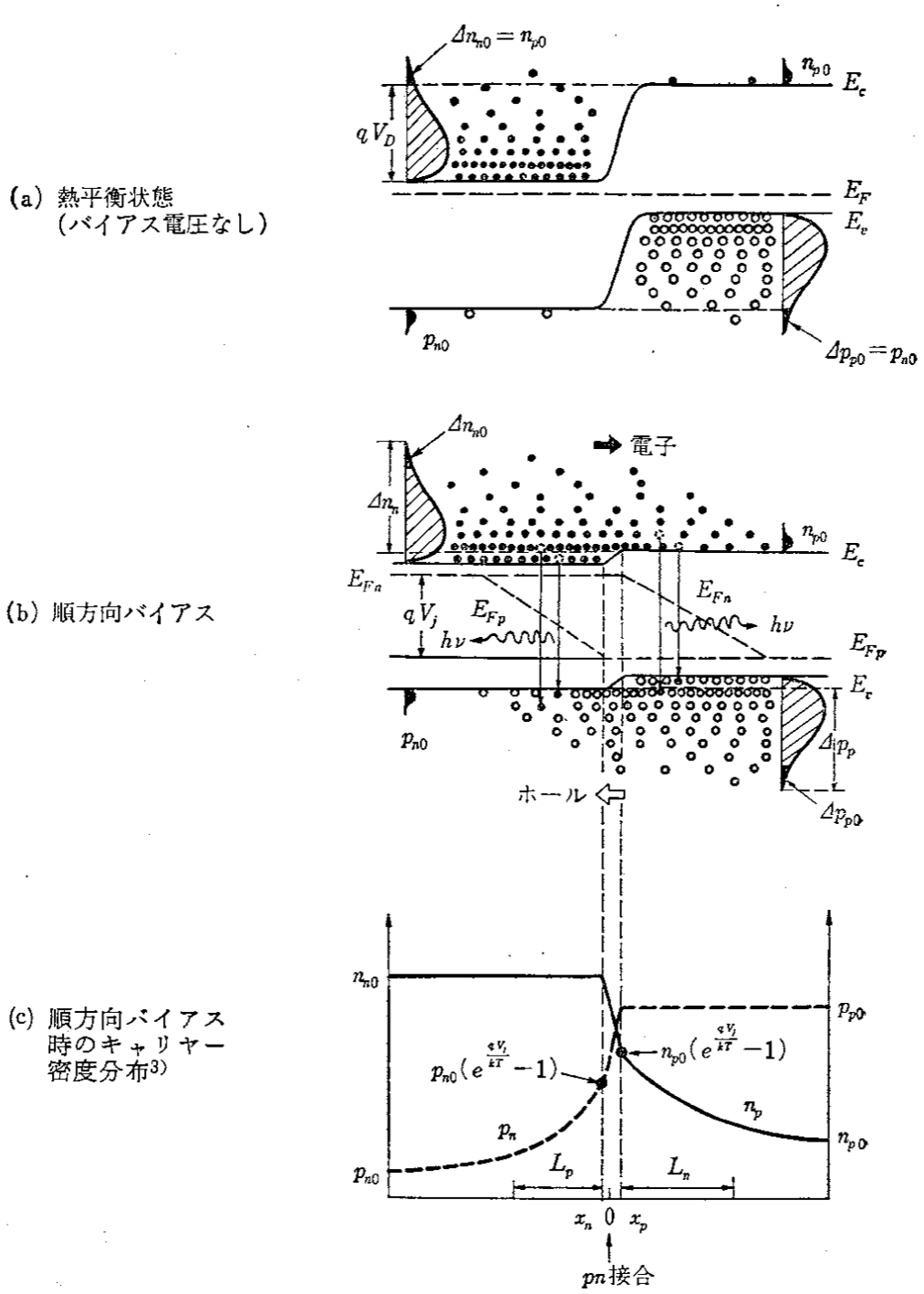


図 2.17 順方向バイアス時の pn 接合とキャリヤー密度分布（ホモ接合）