

# 福岡工業大学 学術機関リポジトリ

## pn接合ダイオードの試作とその電気的特性

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 福岡工業大学 公開日: 2021-02-26 キーワード: pn junction, Saturation current, Dynamic resistance, Ideality factor, Forward voltage 作成者: 服部, 毅範, 篠田, 鼎 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/11478/00001668">http://hdl.handle.net/11478/00001668</a>

## pn 接合ダイオードの試作とその電気的特性

服 部 毅 範 (電子材料工学科)  
篠 田 鼎 (情報工学科)

The Measurement of Trial Manufacture of pn Junction Diode  
and the Electric Characteristics.

Takenori HATTORI (Department of Electric Material Engineering)

Kanae SHINODA (Department of Communication and Computer Engineering)

Abstract

We diffuse impurities to silicon single crystallization and in the semiconductor device production laboratory (clean room) on the campus of Fukuoka Institute of Technology, produced pn junction diode experimentally. We measure an electric characteristics of this diode, and consider the voltage-current in low electric current domain.

Key Words : *pn junction, Saturation current, Dynamic resistance, Ideality factor, Forward voltage.*

1. はじめに

半導体デバイス製作実験室(クリーンルーム)において、n形シリコン単結晶の酸化、ホトグラフィ技術を用いてのエッチング処理、ペイント法でホウ素の拡散の過程を経てプレーナ pn 接合ダイオードを試作した<sup>1)</sup>。このダイオードの電気的特性の測定値とショックレーの方程式との間には差(理想因子、飽和電流等)が生じる。この差について検討する。

2. ダイオードの電圧-電流特性

加える電圧の極性によって流れる電流の大きさが異なる1端子対(2端子)の電子デバイスは、ダイオードと呼ばれる。ダイオードは、電子回路に広く使用さ

れている。電圧の印加方向によって電流のオンオフが変わるダイオードは、自己制御スイッチと見ることができ、電圧がどんなに小さくてもはっきりとスイッチ作用をするというわけではない(完全なスイッチモデルは理想ダイオードと呼び、素子としては存在しない)。接合ダイオードは pn 接合理論が適用できるダイオードであって、用いられる半導体によってゲルマニウムダイオード(Ge diode)とシリコン(Si diode)がある。(1)式は接合ダイオードの電圧-電流特性を表すショックレーの方程式である。<sup>2)6)</sup>

$$I = I_s \cdot (\exp(qV/kT) - 1) \quad (1)$$

(1)式において0.1volt以上の電圧では $qV/kT > 1$ なので

$$I \approx I_s \cdot \exp(qV/kT) \quad (2)$$

と近似できる。

ここで、 $I$ はpn接合電流、 $I_s$ は製造上決まる固有の電流で逆方向飽和電流、 $q$ は電子の電荷( $1.6 \cdot 10^{-19}$  [c]),  $V$ はダイオードへの印加電圧、 $k$ はボルツマン

定数 ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  [J/K]), T は絶対温度 (セ氏温度 + 273) である。(1)式は Ge ダイオードの場合には測定値とよく一致するが, Si ダイオードの場合は異なってくる。そこで実際には

$$I = I_s \cdot (\exp(qV / NkT) - 1) \quad (3)$$

とにおいて N なるパラメータが導入される。接合ダイオードの p 側に正の電圧を加えたときが順方向電圧であって(3)式の V は正となり, 電流は p 領域から n 領域へ流れる。また, p 側に負の電圧を加えたときが逆方向電圧であって V は負で, I も負となる。ダイオードの抵抗の表し方には 2 通りあり, 1 つは電圧-電流特性の任意の点における電圧 V と電流 I の比で定義される抵抗である。この抵抗は, 静抵抗 (static resistance) と呼ばれる。一方, 小振幅動作においては, ダイオードの電圧-電流特性曲線上の傾斜の逆数として定義される抵抗が重要な量となる。これは動抵抗<sup>3)</sup>rd (dynamic resistance) と呼ばれ次式で表される。

$$rd = dV / dI \quad (4)$$

実際のダイオードでは, pn 接合の両側の半導体部分などに抵抗が存在するので, これを考慮しなければならない。このダイオードの等価回路 (図 1) の端子電圧を  $V_d$ , pn 接合部分のオフセット電圧<sup>5)</sup>を  $V_T$ , ダイオードに流れる電流を I とすると次式が成り立つ。

$$V_d = V_T + R_d \cdot I \quad (5)$$

$$R_d = rd + rB \quad (6)$$

この rB をバルク抵抗 (bulk resistance) という。

ここで, 1mA 以下の電流範囲においては

$rd \gg rB$  なので

$$R_d \approx rd \quad (7)$$

と近似することができる。

### 3. pn 接合ダイオードの製作プロセス<sup>4)</sup>

半導体デバイス製作実験室 (クリーンルーム) で pn 接合ダイオードを製作するには, 燐をドーパした n 形

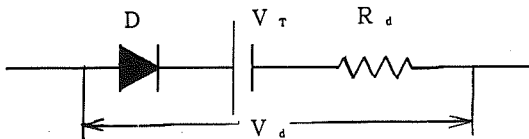


図 1 ダイオードの等価回路  
D: 理想ダイオード,  $V_T$ : オフセット電圧,  $R_d$ : 動抵抗,  $V_d$ : ダイオードの端子電圧

(100) Si 単結晶基板のウェーハで, この寸法は直径が約 10cm, 厚さが約 0.5mm であり, 抵抗率が約  $3.5 \Omega \text{cm}$  である。このウェーハを約  $1 \text{cm} \cdot 1 \text{cm}$  の大きさにダイヤモンドスクライバーでカットし, これを試料として使用する。pn 接合ダイオードの製作はこの試料を用いてプレーナ技術により, パッチ処理で製作する。製作工程は試料の洗浄から始まり, ウエット酸化, ホトレジストの塗布, 目合わせ (アノードパターン), 酸化膜のエッチング, ホトレジストの剝離, PBF 液の塗布, 熱処理, ポロシリケートガラスの除去, アルミニウムの蒸着, ホトレジストの塗布, 目合わせ (アルミニウム配線パターン), アルミニウムのエッチング, ホトレジストの剝離の工程で Si 結晶基板の表面にプレーナ形の pn 接合ダイオードが形成される。シンタリング後, 更に約  $1 \text{mm} \cdot 1 \text{mm}$  の大きさにカット, TO-5 ステムにマウント (Au-Si と Au-Sb の合金), ボンディング ( $25 \mu\text{m}$  の金線) そして金属のキャップを取り付け完成品となる。この様に pn 接合ダイオード製作に必要なプロセスのフローチャートを図 2 に示す。

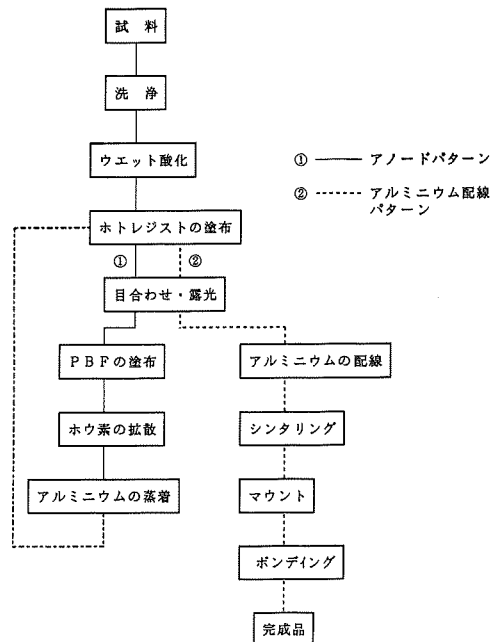


図 2 製作工程のフローチャート

## 4. 試作ダイオードの測定法

図3は測定回路を示す。この図でRは100Ωの保護抵抗である。試作ダイオードは一定の温度で電圧-電流を測定するためクライオスタットの中に入れ、測定温度を50 [°C]、室温 (27 [°C])、-50 [°C]、-100 [°C] と変え、それぞれの温度に対して分圧用抵抗 $R_0$ を変化させ、そのときのダイオードの両端電圧 $V_d$ 、電流 $I$ の変化をそれぞれ測定した。

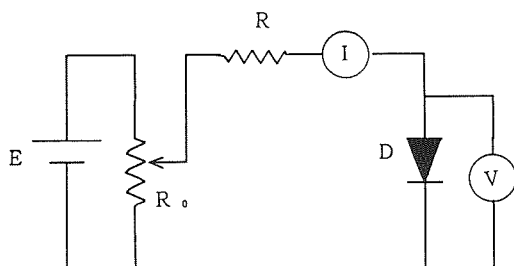


図3 測定回路

E: 電源電圧,  $R_0$ : 分圧用抵抗, R: 保護抵抗, I: 電流計, V: 電圧計, D: 試作ダイオード

## 5. 測定結果

各温度に対するダイオードの端子電圧 $V_d$ 、電流 $I$ の変化を図4に示す。この図は周囲温度を変えたときの電圧-電流特性である。この特性の直線部分と電圧軸との交点 $V_T$ は近似的に接合の接触電位を示し、 $V_T$ は温度が高くなると小さくなり、温度が低くなると大きくなる。これを図5に示す。この図より $V_T$ は半導体特有の温度依存性をしめす。理想因子 $N$ は(3)式を使って図6の勾配から求める。測定温度 (室温 (27 [°C])) に対して電流を0.1~1 [ $\mu$ A]、1~10 [ $\mu$ A]、10~100 [ $\mu$ A]、100~1000 [ $\mu$ A]、1000~[ $\mu$ A]に区分し、それぞれの電流区分に対して理想因子 $N$ を求めた。電流区分における飽和電流 $I_s$ は、理想因子 $N$ を使って、それぞれの電圧、電流の測定値を(3)式で計算し、その平均値とする。他の温度に対しても同様に理想因子 $N$ 、飽和電流 $I_s$ を求めた結果を表1に示す。(3)式に27 [°C] おける $N=1.15$ 、 $I_s=1.18 \cdot 10^{-12}$  [A]を代入した計算値を理論値とした。この結果を図7に示す。

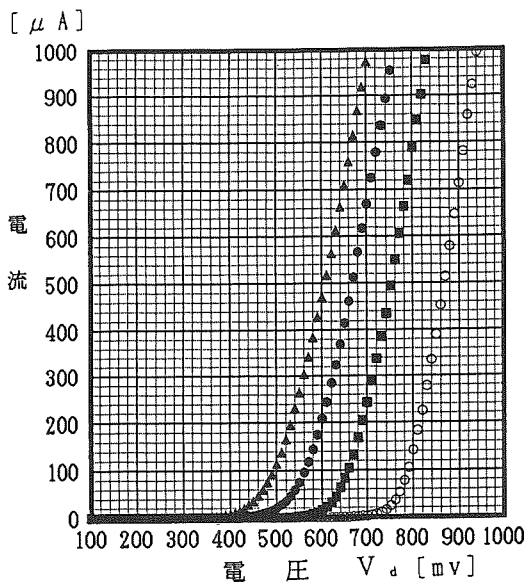


図4 ダイオードの温度を変えた時の電圧-電流特性

この図で、 $\blacktriangle$ は50 [°C]、 $\bullet$ は常温、 $\blacksquare$ は-50 [°C]、 $\circ$ は-100 [°C] の時の測定値

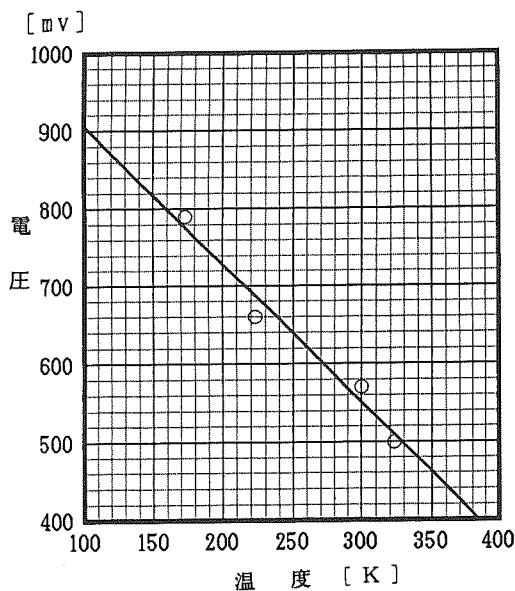


図5 温度-オフセット電圧の関係

$\circ$ は各温度に対するオフセット電圧 $V_T$ の測定値

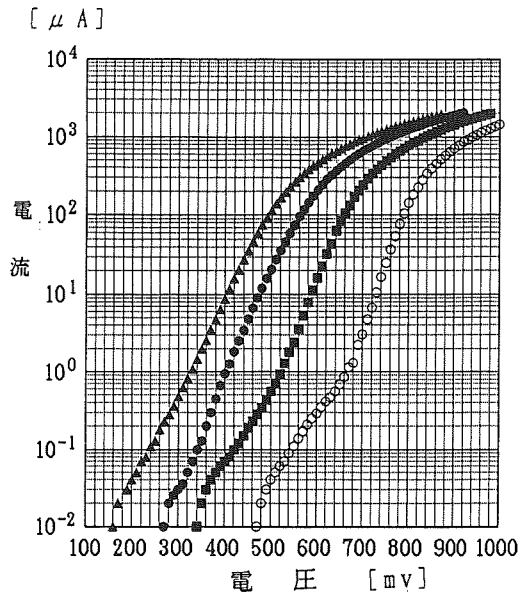


図6 ダイオードの温度を変えた時の電圧-電流特性  
この図で、▲は50 [°C], ●は常温 27 [°C], ■は-50 [°C], ○は-100 [°C] の時の測定値

この図より  $V_d$  の増加と共に理論値と測定値の間には差を生じる。この原因は低電流における接合領域の動

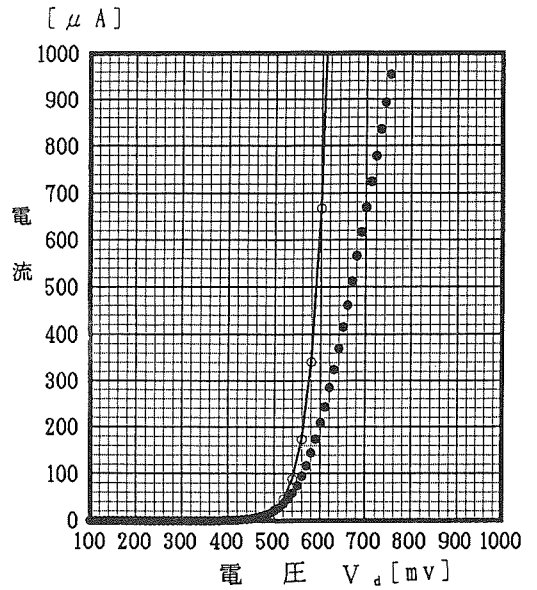


図7 理論値と測定値との比較  
○実線は理論式より求めた計算値, ●は測定値

抵抗の変化 ((7)式) にもとづくものである。この差を補正するために図7から理論値と測定値の差を求めた結果を図8に示す。この図より電流に対する電圧差の補正式は

表1 各電流区分における理想因子N, 飽和電流  $I_s$ , 動抵抗  $R_d$  に及ぼす温度の影響

温度	記号	0.1~1 μA	1~10 μA	10~100 μA	100~1000 μA	1000~μA
50°C	N	1.43	1.21	1.39	3.35	8.85
	$I_s$	$3.14 * 10^{-10}$	$7.62 * 10^{-11}$	$3.75 * 10^{-10}$	$8.07 * 10^{-7}$	$6.34 * 10^{-5}$
	$R_d$	$5.09 * 10^5$	$6.64 * 10^5$	$8.18 * 10^3$	$1.09 * 10^3$	$7.10 * 10^2$
27°C	N	1.22	1.15	1.40	3.75	9.82
	$I_s$	$2.67 * 10^{-12}$	$1.18 * 10^{-12}$	$2.26 * 10^{-11}$	$4.77 * 10^{-7}$	$4.82 * 10^{-5}$
	$R_d$	$6.82 * 10^5$	$8.00 * 10^4$	$9.45 * 10^3$	$1.20 * 10^3$	$7.60 * 10^2$
-50°C	N	2.33	1.43	1.55	3.97	11.26
	$I_s$	$1.03 * 10^{-11}$	$6.13 * 10^{-15}$	$3.68 * 10^{-14}$	$2.84 * 10^{-8}$	$2.30 * 10^{-5}$
	$R_d$	$8.85 * 10^5$	$1.01 * 10^5$	$1.13 * 10^4$	$1.35 * 10^3$	$8.40 * 10^2$
-100°C	N	3.60	1.88	1.68	4.48	11.22
	$I_s$	$3.98 * 10^{-12}$	$5.75 * 10^{-17}$	$3.02 * 10^{-18}$	$1.22 * 10^{-9}$	$3.71 * 10^{-6}$
	$R_d$	$1.10 * 10^6$	$1.26 * 10^5$	$1.37 * 10^4$	$1.57 * 10^3$	$9.50 * 10^2$

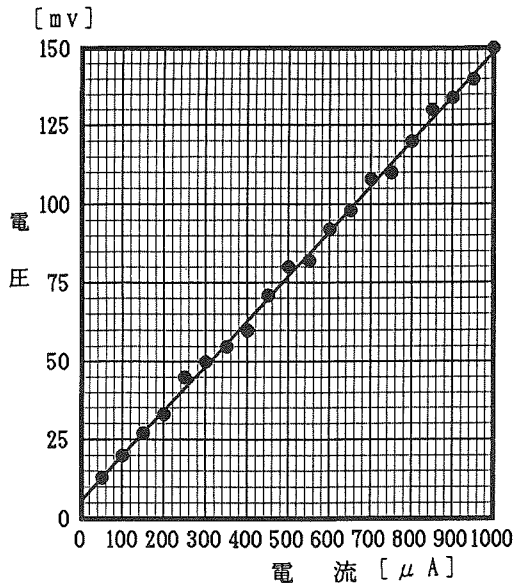


図8 電流に対する理論値と測定値の電圧差

$$VV = 0.143 \cdot I + 4.7 \quad (8)$$

となる。この場合、(3)式の電流を与える電圧に対して電圧をVVだけ補正した結果を図9に示す。この図から理論値と測定値がよく一致することが分かる。他の温度に対しても同様に(8)式を使って得た結果を図10に示す。測定温度50 [°C]、-50 [°C]においては、理論値と測定値は一致する。-100 [°C]では10 [μA] 近傍では一致するが、その範囲以外では理論値と測定値に差が生じる。

## 6. まとめ

表1から次のことがわかる。

1. 動抵抗 $R_d$ は、どの電流区分においても温度による影響が大きい。
2. 理想因子 $N$ は、電流区分1~10 [μA]の範囲では温度の低下とともに大きくなる傾向を示す。
3. 飽和電流 $I_s$ は温度による影響が大きい。

常温 (27 [°C]) では、測定した電流0.1~1 [μA]、1~10 [μA]、10~100 [μA]、100~1000 [μA]、1000~[μA]の範囲において、(8)式を使って補正した測定値は理論値と一致する。同様に測定値は50 [°C]、-50 [°C]でも理論値と一致する。

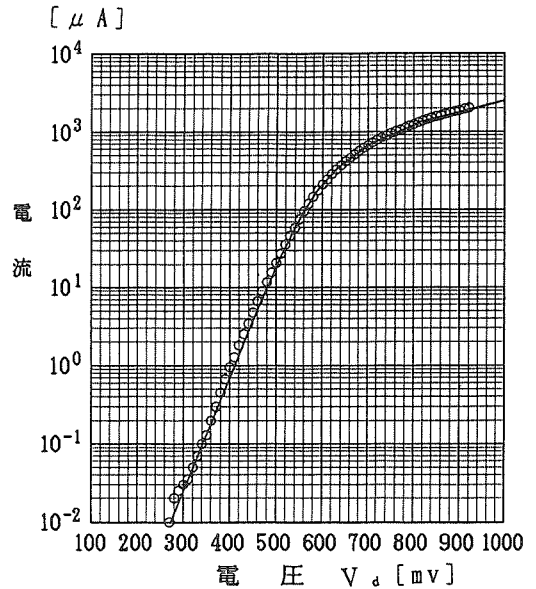


図9 理論値と測定値との比較  
○は測定値であり、実線は理論式の電圧にVVだけ補正した値

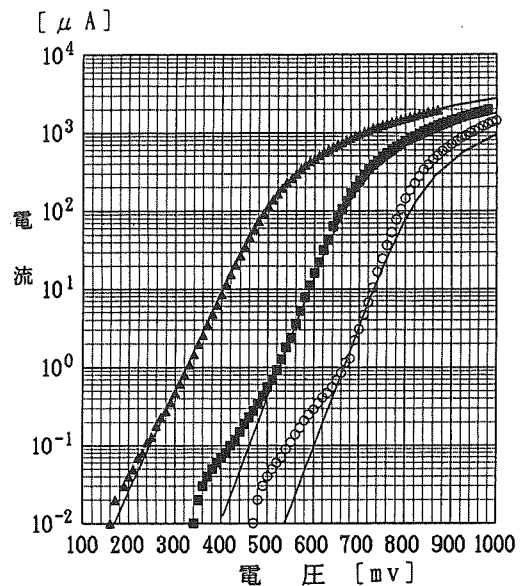


図10 各温度における理論値と測定値の比較  
この図で、▲は50 [°C]、■は-50 [°C]、○は-100 [°C]の時の測定値で、実線は理論値

しかし、電流が $0.1 [\mu\text{A}]$ 以下の時 $-50 [^{\circ}\text{C}]$ で差の最大値が9%,  $-100 [^{\circ}\text{C}]$ で、差の最大値は9.5%である。また、 $-100 [^{\circ}\text{C}]$ において電流が $100 [\mu\text{A}]$ 以上の領域では図10から分かるように測定値と一致しなくなる。 $-50 [^{\circ}\text{C}]$ ,  $-100 [^{\circ}\text{C}]$ において電流が $0.1 [\mu\text{A}]$ 以下の場合に差が生じる原因は低電流区分においては、pn接合の空間電荷層の内部で熱平衡状態にある電子またはホールが再結合により消滅する。したがって、動抵抗 $r_d$ , 飽和電流 $I_s$ , 理想因子 $N$ 等の影響が大きいため、この電流区分ではショックレーの式が適用できなくなるからと推定する。

## 参 考 文 献

- 1, 4) 北川, 服部, 田中, 権藤: 学部学生実験におけるシリコンMOS集積回路の製作, 福岡工業大学研究論集, (1986) 37-46
- 2) Millman・Halkias: Integrated Electronics, Mcgraw-Hill, International Book Company, (1972) 49-56
- 3) 丹野, 宮入: 演習電子デバイス, 森北出版, (1983) 83-85
- 5) 菊池: 接合形半導体, 東海大学, (1991) 81-83
- 6) S.M.Sze: Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons, Inc., (1981) 84-94