

福岡工業大学 学術機関リポジトリ

ダイオードの低電流領域における電気的特性

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2021-02-25 キーワード (Ja): キーワード (En): pn junction, saturation current, low current region, frequency response 作成者: 篠田, 鼎, 服部, 毅範 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/11478/00001661

ダイオードの低電流領域における電気的特性

篠 田 鼎 (情報工学科)
服 部 毅 範 (機能材料工学科)

The Electrical Characteristics of Junction Diode in Low current Region

Kanae SHINODA (Department of Communication and Computer Engineering)

Takenori HATTORI (Department of Functional Materials Engineering)

Abstract

The electrical characteristics of the semiconductor device changes sensitively by the stimulus from the outside. These characteristics are being used because of that we did the electric measurement (Si and Ge) of pn junction diode in the low current region. The following evidences were found.

- (1) activation energy of diode ($E_{Ge}=0.46\text{eV}$, $E_{Si}=0.96\text{eV}$).
- (2) the temperature coefficient of diode ($Ge=-2.0\text{mV}/^\circ\text{C}$, $Si=-2.1\text{mV}/^\circ\text{C}$).
- (3) the voltage dependence of junction capacitance.
- (4) the frequency response.

Therefore, it can be inferred that Ge diode is more useful than Si diode in the low current region from the frequency characteristics of impedance and saturation current.

Key words: *pn junction, saturation current, low current region, frequency response*

1. ま え が き

P n 接合では、電子とホールによる拡散電流とドリフト電流¹⁾との釣り合いのため P n 接合部分には、移動可能な自由キャリアがなく、不純物による固定電荷のみが存在する。従って、この接合領域が空乏層と呼ばれる。順方向バイアスの場合には、n 側及び P 側の少数キャリアであるホールおよび電子は P n 接合を境にして注入が始まる。逆方向バイアスの場合には P 側、n 側のそれぞれの多数キャリアが P n 接合面から遠ざかり、移動キャリアはさらに空乏層から一掃される。

外部電圧によるこのような接合領域へのキャリアの注入量および空乏層の周波数による影響について検討する。

2. 接 合 容 量

P n 接合には空乏層が存在し、印加電圧が変化すると空乏層の変化を通して正負等量の移動キャリアが変化する。順方向バイアスを正の向きにとるので、 ΔV の電圧増加に対して空乏層の幅が減少し、移動キャリアが単位面積当たり ΔQ だけ減少する (図 1)。その結果、接合には

$$C_T = (-\Delta Q / \Delta V) = -dQ / dV \quad (1)$$

なる容量が存在する。これが空乏層の容量である。この空乏層容量 C_T の電圧依存性は一般に次式¹⁾²⁾³⁾で

表される。

$$C_T = C_{T0}(V_T - V)^{-n} \quad (2)$$

ここで C_{T0} : 素材の誘電率, 導電率, 接面積等で決まる定数, V_T : 内蔵電位, V : 印加電圧である。

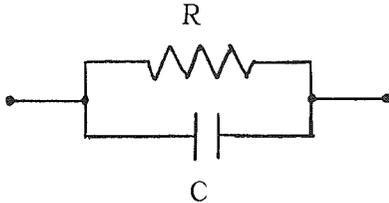


図1. ダイオードの等価回路
 R : 電圧-電流にもとづく抵抗
 C : 接合容量 (C_T) + 拡散容量 (C_D)

3. 飽和電流の温度依存性

飽和電流は, 温度の変化によって桁違いに変化する。この桁違いの変化に対して, 飽和電流と温度との関係からダイオードの活性化エネルギーを求める。この関係式を

$$I_s = A \cdot \exp(-E/kT) \quad (3)$$

とする。

ここで I_s : 飽和電流, A : 比例定数, E : ダイオードの活性化エネルギー, k : Boltzman 定数, T : 絶対温度である。

活性化エネルギーは飽和電流の対数対温度の逆数 ($\log_{10} I_s$ 対 $1/T$) の傾きから得られる。

4. ダイオードの測定法

少数キャリアの注入量に対しては, 電圧-電流の測定を行う。また, P n 接合領域に存在する空乏層の変化に対しては, 測定信号レベルおよび周波数を変えて測定を行う。ここで使用するダイオードは市販の 1N60 (ポイント・コンタクト形, G_e), 1S1588 (接合形 (E_p)) である。

ダイオードの静特性の測定には⁴⁾, 周囲の温度を -100 [°C] から 100 [°C] まで変化させるため, 素子をクライオスタット内に取り付け, 温度制御のもとに測定する。

また, P n 接合領域に対しては, デジタル・マルチ・フリケンシ LCR メータ (YOKOGAWA - HEW-

LETT-PACARD model 4275A) を使用した。この接合領域の測定は, 室温において, 直流バイアス電圧を $0.0 \sim -5.0$ [V], 測定信号レベルを $0.2 \sim 1.0$ [V], 周波数を $10, 20, 100, 200, 400$ [kHz], $1, 2, 4$ [MHz] の範囲で, 接合容量, 位相角, インピーダンスの測定をする。

5. 測定結果

図2は, 温度を変えたときのダイオードの電圧-電流特性を示す。 G_e ダイオードの -100 [°C] と S_i の室温 (25 [°C]) とを比較すると, このように温度が違っても電流が流れ始める電圧は G_e ダイオードの方が小さい。この図よりそれぞれのダイオードはエネルギー・ギャップの違いから温度による影響が大きいことが分かる。

図3は, 測定電圧範囲を $0.0 \sim 3.0$ [V] に設定し S_i および G_e ダイオードに電流が流れ始める電圧を比較する。 S_i ダイオードに比べエネルギーギャップの小さい G_e ダイオードの方が低い電圧で早く電流が流れ始める。 S_i ダイオードより G_e ダイオードの方が低電圧領域で動作することが分かる。

図4は, ダイオードに印加する直流バイアス電圧を 0.0 [V] に設定する。 S_i および G_e ダイオードに対して, 測定信号レベルを変えたときのインピーダンス-周波数特性である。測定信号レベルの決定は, ダイオードの電流が流れ始める電圧の近傍をもとにして, その前後の2点の電圧を選択した。測定信号レベルが高くなるにつれて, S_i および G_e ダイオードと共にインピーダンスは増加する。測定周波数が 2 [MHz] になるとインピーダンスは収束する傾向を示す。

図5は, 測定周波数を変えたときの逆バイアス電圧-位相角の特性である。 S_i ダイオードは逆バイアスに対してフラットな状態を示すが, G_e ダイオードの方は逆方向バイアスの増加と共に減少していく傾向を示している。また, 10 [kHz] では位相角は更に小さくなるので回路の減衰が大きくなる。

図6は, 接合の状態を知るため測定周波数 (100 [kHz], 1 [MHz]) を変え, 逆方向バイアス電圧に対する接合容量 (C_T) の変化を示す。 S_i ダイオードは逆方向バイアスに対してフラットな状態を示すが, G_e ダイオードの方は逆方向バイアスの増加と共に減少の傾向を示す。図3が示すように微小電圧領域での小信号に対して, G_e ダイオードの方が適していることが分かる。

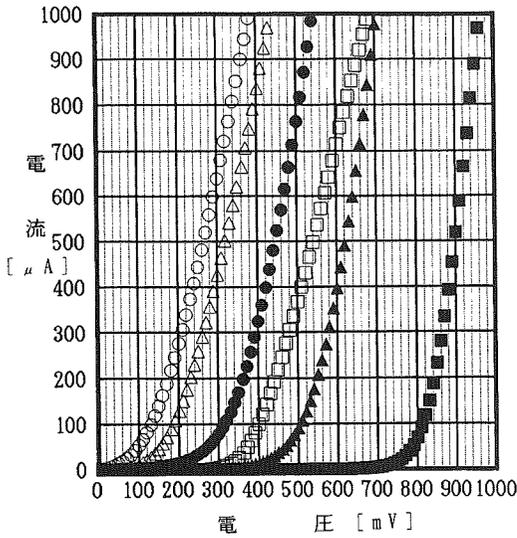


図2. ダイオードの温度を変えた時の電圧-電流特性。白は G_e ダイオード, 黒は S_i ダイオードである。□■は -100 [°C], \triangle ▲は 25 [°C], \circ は 50 [°C], \bullet は 100 [°C] に対応する。

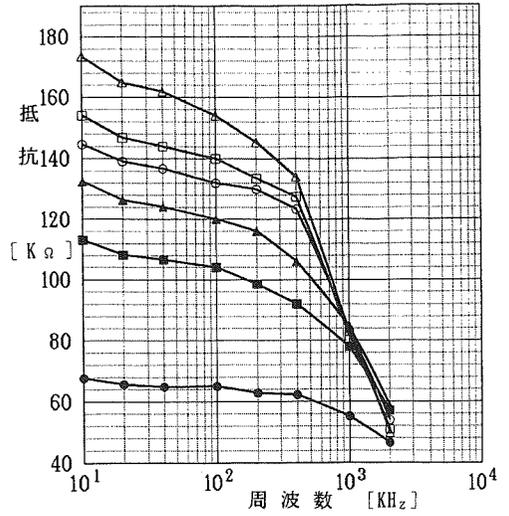


図4. 測定信号レベルを変えた時のインピーダンス-周波数特性。白は S_i ダイオード, 黒は G_e ダイオードである。 \circ は 0.5 [V], \square は 0.7 [V], \triangle は 1 [V] で, \bullet は 0.2 [V], \blacksquare は 0.5 [V], \blacktriangle は 0.7 [V] に対応している。

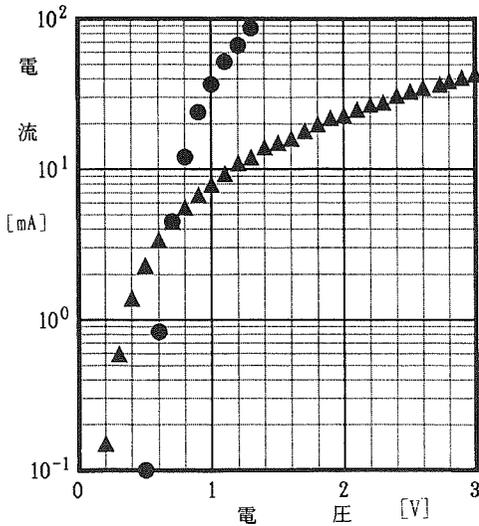


図3. ダイオードに電流が流れ始める電圧の比較。●は S_i ダイオード, ▲は G_e ダイオード。

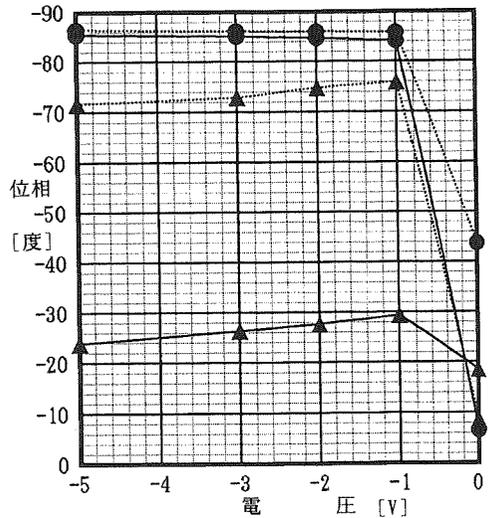


図5. 周波数による逆バイアス電圧-位相角の関係。●は S_i ダイオード, ▲は G_e ダイオードである。実線は周波数 100 [kHz], 点線は周波数 1 [MHz] の時の特性。

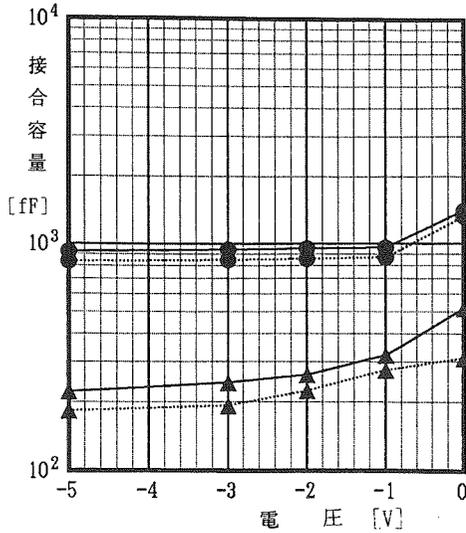


図6. 周波数による逆バイアス電圧-接合容量(C_j)の関係。
●は S_i ダイオード, ▲は G_e ダイオードである。実線は周波数100 [kHz], 点線は周波数1 [MHz] の時の特性。

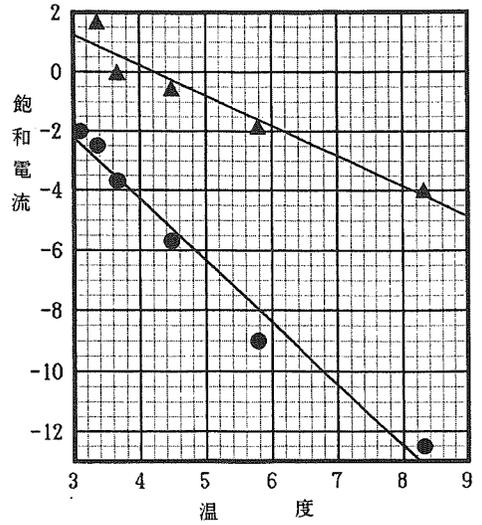


図8. 飽和電流 ($\log_{10} I_s$)-温度 ($1/T$) の関係。
●は S_i ダイオード, ▲は G_e ダイオードである。

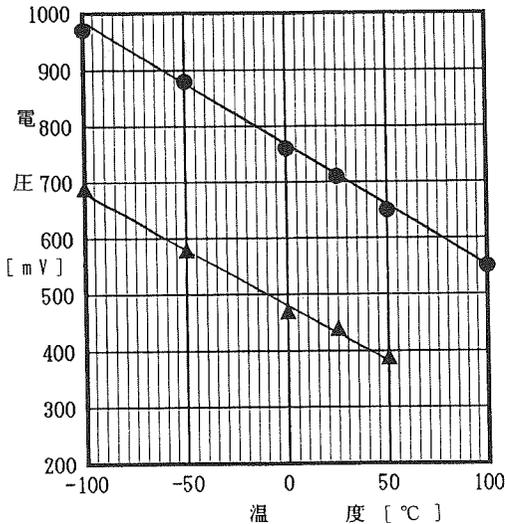


図7. 電流を1 [mA] に設定した時のダイオードの温度-電圧の関係。
●は S_i ダイオード, ▲は G_e ダイオードである。

図7は、電流を1 [mA] に設定した時の温度変化に伴う電圧の変化を示す。それぞれの勾配から G_e および S_i ダイオードの電圧の温度係数は、それぞれ -2.0 [mV/°C], -2.1 [mV/°C] となる。

図8は、温度変化に伴う飽和電流の特性を示す。(3)式より S_i ダイオードの活性化エネルギー、 G_e ダイオードの活性化エネルギーはそれぞれ 0.96eV , 0.46eV となる。エネルギーギャップの大きい S_i (1.12eV)¹⁾ ダイオードは活性化エネルギーの大きい方に対応する。また、活性化エネルギーの小さい G_e (0.66eV)¹⁾ ダイオードも同様に対応している事が分かる。 G_e ダイオードの方が S_i ダイオードに比べて飽和電流の傾きが緩やかである事から低温でも動作する事が分かる。

6. ま と め

半導体素子は、外部からの刺激によって電气的特性が敏感に変化するのを利用した素子である。ここでは、p n 接合ダイオードである S_i および G_e ダイオードの電气的測定の結果から、特に、低電圧領域 (オフセット電圧⁵⁾ 近傍) における飽和電流の温度依存性から活性化エネルギー ($E_{Ge}=0.46\text{eV}$, $E_{Si}=0.96\text{eV}$) 電

圧の温度係数 ($G_e = -2.0 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, $S_i = -2.1 \text{ mV}/^\circ\text{C}$), 接合容量の電圧依存性 (G_e および S_i ダイオード共に階段接合), インピーダンスの周波数特性から測定信号レベル (0.5 [V]) では, S_i ダイオードのカットオフ周波数は 600 [kHz], G_e ダイオードでは 1 [MHz] となった。逆方向バイアス電圧が, -1.0 [V] のときの逆方向バイアス電圧対接合容量の値は G_e ダイオード ($G_e = 300 \text{ f [F]}$) が S_i ダイオード ($S_i = 980 \text{ f [F]}$) に比べて値が小さい。以上のことから, G_e ダイオードは

- (1) 活性化エネルギーが小さい。
- (2) 低温で電圧が小さくても電流が流れる。
- (3) 逆バイアス電圧を与えた時には 100 [kHz] 以下の信号では, 位相角が極端に小さくなるので回路の減衰が大きくなる。
- (4) 接合容量が小さい。
- (5) インピーダンスが小さい。

従って, G_e ダイオードの方が S_i ダイオードより低電流領域では小信号, 低温領域において有効な働きをすると推測ができる。

参 考 文 献

- 1) S. M. Sze: Physics of Semiconductor Device, John Willy & Sons, inc., (1981) 63-132
- 2) 南日, 川辺, 長谷川訳: 半導体デバイス, 産業図書, (1996) p p. 74-85
- 3) Millman・Halkias: Integrated Electronics, Mcgraw-Hill, International Book Company, (1972) 58-73
- 4) 服部, 篠田: p n 接合ダイオードの試作とその電的特性, 福岡工業大学研究論集, (1996) 183-188.
- 5) 菊地: 接合形半導体, 東海大学, (1991) 49-87