

# 電流—電圧特性解析装置を使用した電子デバイスの解析

一番ヶ瀬 剛\*

## Analysis of semiconductor devices by means of the I-V measurement system

Tsuyoshi ICHIBAKASE

### Abstract

In this report, I(current) - V(voltage) characteristics measurement system was constructed for analyzing semiconductor devices, and this system was applied to Semiconductor diodes. Semiconductor diode has many unique characteristics on configuration form, and mechanism of characteristics on configuration form was less well understood. We found three different I-V characteristics in measurement of Semiconductor diodes, and we considered a mechanism model to three different I-V characteristics.

Key words: I-V characteristics, semiconductor device, diode

### 1. はじめに

半導体デバイスは、材料開発からデバイスの完成までのプロセスにおけるさまざまな段階で評価が必要である。デバイスの特性には、非常に多くの項目があり、デバイスの種類、使用されるシステムなどの用途、必要とされる条件、環境などに応じて、どの項目が重要であるかを見極めながら評価し、またその向上をはかる必要がある。本研究はデバイス評価の中で、デバイス完成後の動作特性からデバイス内部の構造を解析しようと試みるものである。

### 2. 研究の目的と内容

#### 2. 1 半導体デバイスの動作特性による解析

本研究は半導体デバイスの電圧—電流特性を基本とした評価・解析システムを使用し半導体デバイスの測定を詳細に行うことで、デバイスの内部構造を非破壊で推定しようとするものである<sup>(1)</sup>。デバイスの内部構造を十分な精度で解析するには微小な電流、電圧の変化を解析可能なS/Nで測定し、デバイスの経時的変化、温度特性による変動誤差を最小にするために、短時間に測定を完了することが必要である。本研究では、評価・解析システムを試作



図1 システム全体の写真

した後に、緑色発光ダイオードの順方向特性を評価・解析対象とした実験を行った。図1に本研究で試作し使用したシステム全体の外観を示す。

#### 2. 2 評価・解析システムに必要と考えられる条件

評価・解析の結果は、対象とした測定データの精度が高ければより詳細なものとなる。そこで測定に

\*電子機械工学科

おける精度を高めることを目的とした以下の項目を挙げる。これらの項目を重視して測定が行えるように測定方法、測定装置の構築を行った<sup>(2)</sup>。

- ① S/N 特性の向上
- ② 詳細な解析が可能なデータ数の確保
- ③ 短時間での測定

### 3. 実験内容

#### 3. 1 S/N 特性の向上

本研究に使用した測定装置として電氣的なノイズ混入を防ぎ、また外乱光により光導電効果の影響を防ぐために、半導体デバイスを密閉可能な測定装置内に固定した状態で測定できる装置を製作した。

図2に測定装置、デバイス設置ボックスの内部構造を示す。デバイス設置ボックスには静電シールドとして密閉アルミ・シールドを施している。シールドに用いたアルミは厚さ約 0.1mm である。測定対象から密閉状態で測定値を得るために、測定対象とデジタルボルトメータを接続するための端子を測定装置の側面に設置した。これにより測定対象は外光、電氣的ノイズの影響を受けない状態に保つことができる。

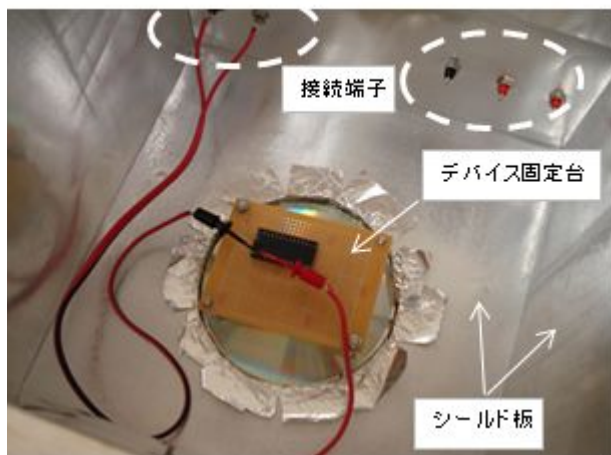


図2 測定装置内部

#### 3. 2 詳細な解析が可能なデータ数の確保

電流・電圧の設定、また読み取りや記録を人の手で行うと毎回の測定で誤差が生じてしまう可能性が高い。このため多くの測定を必要とする場合、人の手で行うには限度がある。

本システムではデジタルボルトメータ 2 台と、自動電圧変化装置(電源装置)を使用した。

2 台のデジタルボルトメータ (Agilent 34401A) は表 1 に示すように、最大 30000 点の測定を 0.6sec のサンプリング間隔で測定可能であり、測定桁数は

6 桁である。サンプル数やサンプリング間隔の設定などは、デジタルボルトメータを購入した際に付属している制御ソフトをコンピュータ(以下 PC と記す)にインストールすることにより、PC で設定した。

電源装置は表 2 の性能を備えている。この電源装置の役割は自動的に電圧を変化させることである。図 3 に電源装置の原理図を示す。

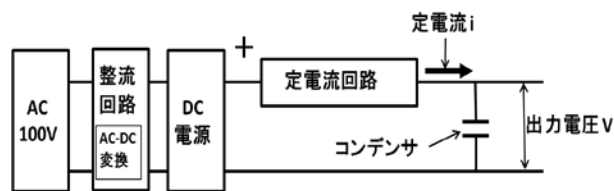


図3 電源構成図

DC 電源から定電流回路を通して電流を供給することによりコンデンサに定電流が流れ、時間経過により徐々に電荷がコンデンサに充電される。この結果、出力電圧が設定電圧まで自動的に連続して上昇する。出力電圧は DC 電源の最大設定電圧の 50V が上限である。また、この電源装置は通常の電源装置としても使用可能である。

自動電圧変化装置(電源装置)を用いて連続的に変化する設定電圧を試料に印加し、その電圧値において試料に流れる電流を、最大 30000 点のサンプル数でデジタルボルトメータにより測定する。この方法により、詳細な解析が可能なデータ数を確保できる。データ数が多いことで、印加電圧領域での試料に流れる電流データを任意の範囲に分割して、詳細な解析が可能となる。

表 1 デジタルボルトメータの性能

測定可能であるサンプル数(最大)	30000
サンプリング間隔(最小)	0.6sec

表 2 電源装置の性能

最大出力電圧	50V
上昇電圧	0.035V/sec
最大電圧まで上昇するのに要する時間	約 24min

### 3. 3 実験方法

図4に測定回路図及びシステム構成を示す。

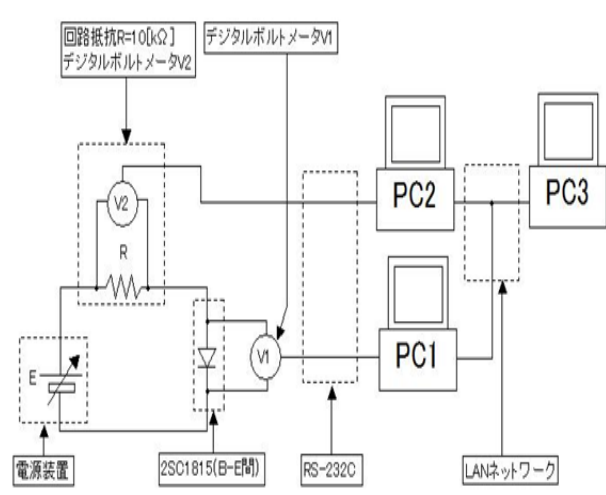


図4 測定回路図

電源装置 E の動作はスタートだけ手動で行い、その後は自動で電圧が変化する。デジタルボルトメータ V1、V2 (以下 V1、V2 と記す) の操作・制御は 2 台のコンピュータ (以下 PC1、PC2) で行う。分解能、サンプリング間隔、サンプル数、測定開始時間は PC1、PC2 により設定する。電源装置 E にはスイッチを押すと、自動的に設定電圧まで電圧が連続上昇する機能が備わっている。測定開始時間を V1、V2 に設定し、開始時間と同時に電源装置を手動によりスタートさせる。デバイスに加わる電圧は V1 が測定し、PC1 に測定値が記録される。V2 も電圧を測定しているが、PC2 内に記録される電圧を回路抵抗 R で割ることで電流が求まる。測定は以下の手順で行った。

- ① 測定対象を測定装置内にある端子台に固定する。図5に示すようにベースにプラス(赤)、エミッタにマイナス(黒)のプロープを接続する。測定装置を図2に示すようにシールドボックスで密閉にする。
- ② 手動で電源装置 E の自動電圧変化機能をスタートさせる。測定対象物に順方向電圧が印加される。時間経過によりデバイスに加わる電圧と電流は自動的に増加する。
- ③ ②と同時に V1、V2 が測定を開始する。測定を行うサンプル数は 1000 点であり、サンプリング間隔は 0.6sec、測定桁数は 6 桁である。

デバイスに加わる電圧は V1 により PC1 に読み込まれる。デバイスに流れる電流は、V2 により PC2 に読み込まれた電圧を回路抵抗 R で割ることで求まる。設定したサンプル数の測定が終了したら測定データを

コンピュータ(PC3)に移して評価・解析を行う。

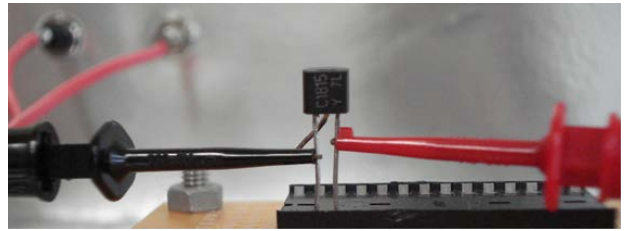


図5 端子台とプローブ

### 4. 解析方法と理論

#### 4. 1 等価回路による接合部の式

図6にPN接合を有する半導体デバイスの等価回路を示す。

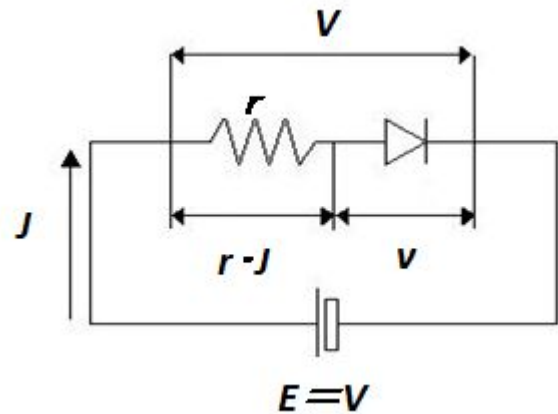


図6 等価回路

回路上に用いられている文字については以下のように定める。

$E, V$  : 外部電圧[V] (デジタルボルトメータ V1 で測定)

$v$  : 接合部に加わる電圧[V]

$J$  : デバイスに流れる電流[A] (デジタルボルトメータ V2 で測定した電圧と回路抵抗を用いてオームの法則により算出)

$r$  : 内部抵抗[Ω] (半導体デバイスの PN 接合部分以外の抵抗)

図 4.1 より外部電圧  $V$  は以下の式で表すことができる。

$$V = r \cdot J + v \dots (4.1)$$

式(4.1)を接合部に加わる電圧  $v$  についてまとめる。

$$v = V - r \cdot J \dots (4.2)$$

#### 4. 2 PN 接合理論式

PN 接合理論式は、次の式で示される。

$$J = J_o \cdot \left\{ \exp\left(\frac{e \cdot v}{k \cdot T}\right) - 1 \right\} \dots (4.3)$$

ここで各定数を次のように定める。

$J_o$ : 逆方向飽和電流[A]

$e$ : 電子の電荷素量[C]

$k$ : ボルツマン定数[ $J \cdot K^{-1}$ ]

$T$ : 絶対温度[K]

電子の電荷素量  $e$ 、ボルツマン定数  $k$ 、絶対温度  $T$  は以下の値を使用した。

$$\begin{cases} e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C} \\ k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \\ T = 300 \text{ K} \end{cases}$$

#### 4. 3 PN 接合理論式による電圧-電流特性

PN 接合理論式による電圧-電流特性から理論予想値としての  $J_s$  を決める方法について以下に述べる。

最初に、理論式による PN 接合(順方向)の電圧-電流特性のグラフを作成する。電圧は測定値を使用し、デバイスに流れる電流  $J$  は PN 接合理論式を用いて数値計算により求める。

逆方向飽和電流  $J_o$  の求め方: 電流  $J$  を求めるためには式(4.3)中の逆方向飽和電流  $J_o$  を求める必要がある。測定点の1点を  $(V_x, J_x)$  とすると、式(4.2)より接合部の電圧  $v$  は式(4.4)のように表せる。

$$v = V_x - r \cdot J_x \dots (4.4)$$

この式(4.4)を式(4.3)中の接合部の電圧  $v$  に代入する。更に  $J$  についてまとめる。

$$J = J_o \cdot \left\{ \exp\left(\frac{e}{k \cdot T}(V_x - r \cdot J_x)\right) - 1 \right\} \dots (4.5)$$

式(4.5)を  $\frac{e}{k \cdot T} = c$ 、 $J = J_x$  と置き換えると式(4.6)となる。

$$J_x = J_o \cdot \left\{ \exp(c \cdot (V_x - r \cdot J_x)) - 1 \right\} \dots (4.6)$$

式(4.6)を  $J_o$  についてまとめる。

$$J_o = \frac{J_x}{\exp(c \cdot (V_x - r \cdot J_x)) - 1} \dots (4.7)$$

逆方向飽和電流  $J_o$  を求める式(4.7)中の  $(V_x, J_x)$  には測定値が入り、内部抵抗  $r$  を別の方法で決定することで逆方向飽和電流  $J_o$  が決まる。

以上の方法により理論予想値としての  $J_s$  を決めることができる。

#### 4. 3 理論値電流 $J_s$ の計算方法及び内部抵抗 $r$ の推定

ここでは、PCを用いた理論値電流  $J_s$  の計算方法及び内部抵抗  $r$  の推定方法について述べる。

本論文の解析方法では、任意の電圧範囲で解析が可能である。PN 接合の電圧-電流特性では印可電圧の大きい領域(Si ダイオードでは約 0.6V 以上)で、電流が急激に増加する。このため単なる抵抗体に近い特性を示す。反対に印可電圧の小さい領域では PN 接合の電圧-電流特性の特性が際立って現れやすい。このために多くの場合に印可電圧の大きい領域と印可電圧の小さい領域で解析値(内部抵抗  $r$ 、逆方向飽和電流  $J_o$ 、理論値の電流  $J_s$ ) が異なってくる。

以上の理由から、解析の最初のステップとして測定データを2領域に分けて解析する。ここでは図7に示す様に、測定データを印可電圧にして約 0.6V 付近で、A と B の2つの領域領域に分ける。

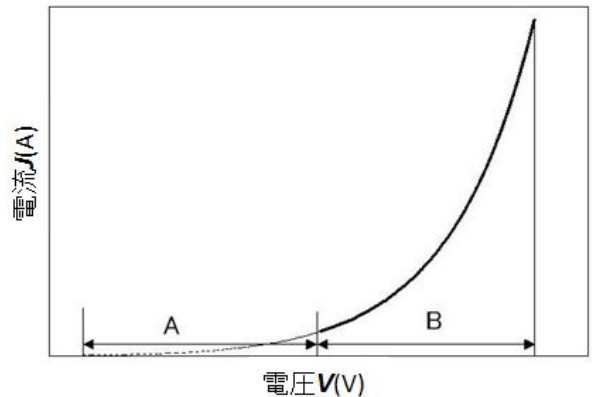


図7 測定値の分割

図8にPCによる計算シートの操作画面を示す。測定値を入力すると内部抵抗  $r$ 、逆方向飽和電流  $J_o$ 、理論値の電流  $J_s$  を求める計算シートである。理論値電流計算シートは Microsoft 社のエクセルで作成した。

実測値の電流と理論値電流を縦軸、横軸は電圧として同じグラフ上に電圧-電流特性を表示する。内部抵抗  $r$  (◆) を左右に動かすことで内部抵抗値  $r$  は変化し、同時に電圧-電流グラフの理論値の電圧-電流特性は数値計算により変わっていく(以下セル a, b, c, d 及びグラフ e は図8に使われているものを指している)。

① セル a に測定データを貼り付ける(測定データはエクセルの書式で PC3 に取り込まれてい

る)。グラフ e に実測値の電圧－電流特性が表示される。

② セル d に領域 A の ( $V_{max}, J_{max}$ ) と内部抵抗  $r$  (初期値 1) を参照元にした式 (4.7) が組み込まれており、逆方向飽和電流  $J_0$  が決まる。

③ 内部抵抗  $r$  は初期値として 1、逆方向飽和電流  $J_0$  とセル a の測定データ ( $V_x, J_x$ ) を参照元にした式 (4.5) がセル b の電流  $J$  に組み込まれているので領域 A の電圧に対応する電流  $J$  が決まる。セル b により、理論値の電圧－電流特性がグラフ e に作成される。

④ セル c の (◆) を左右に動かすことで計算式内の内部抵抗  $r$  を変化させることができる。この操作によりセル b の電流  $J$  もセル c の値が変化すると同時に再計算される。グラフ e の理論

値の電流  $J_s$  もセル b が再計算されることにより、理論値の電圧－電流特性はグラフ e 上で変化する。逆方向飽和電流  $J_0$  も (◆) を操作することでセル b, d に組み込まれている内部抵抗  $r$  が変わるので、逆方向飽和電流  $J_0$  の値は変わる。グラフ e の実測値と理論値の電圧－電流特性がほぼ一致したときに内部抵抗  $r$ 、逆方向飽和電流  $J_0$ 、理論値の電流  $J_s$  の実測値にほぼ近似した値が決まる。図 9 はセル c (◆) を操作し、グラフ e が変化している様子を示す。図 9 (a) は内部抵抗  $r$  が最適値よりも小さく、図 9 (c) は大きすぎる。図 9 (b) の場合に、理論式が最も実測値に近似できている。実測値と理論値が最も一致したときに、内部抵抗  $r$  はセル c によりその値が決まる。

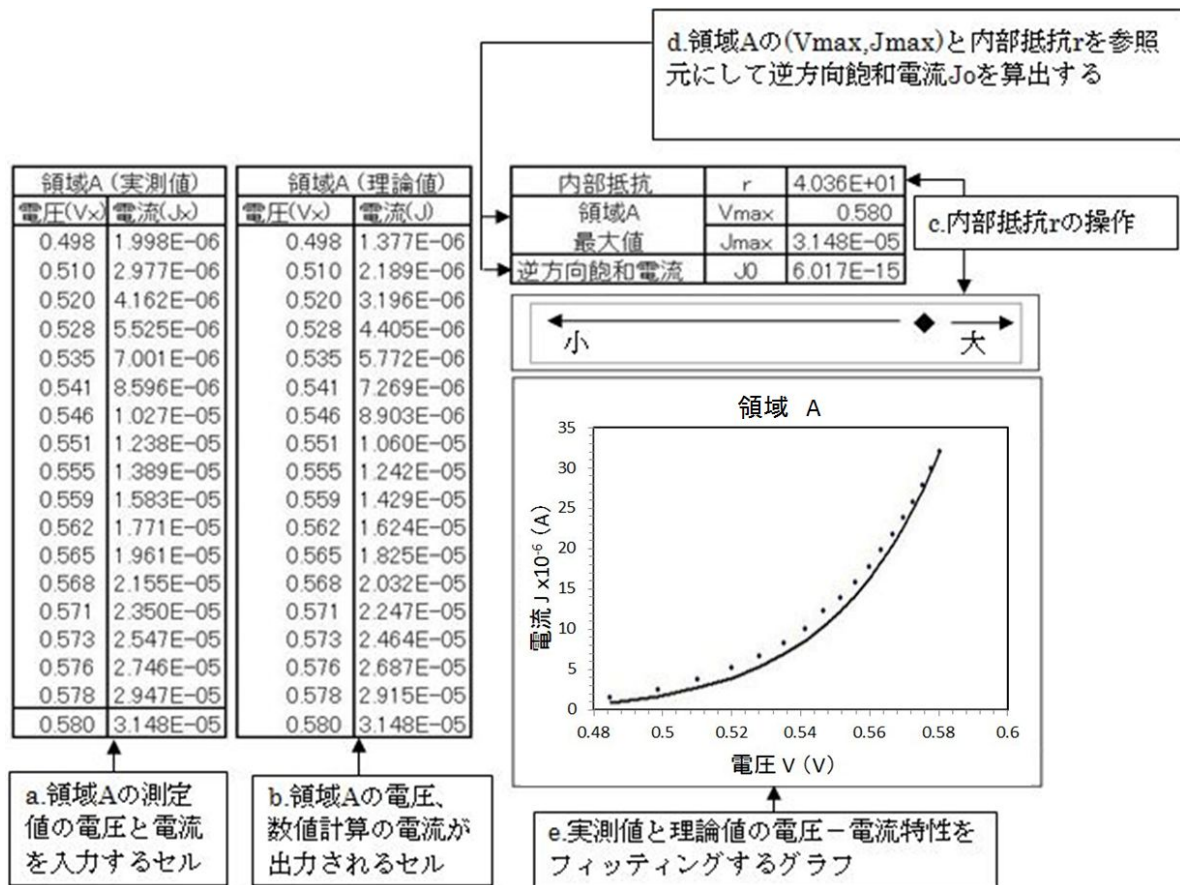


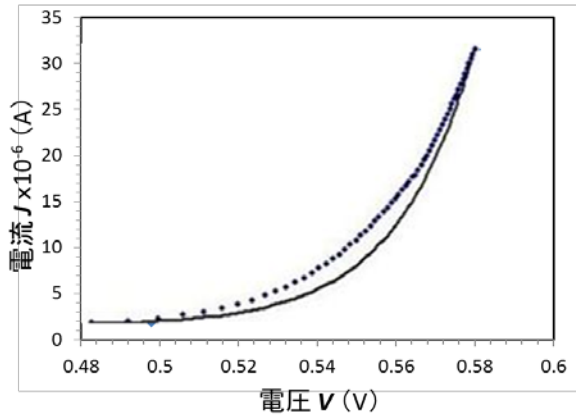
図 8 理論値電流計算シート

⑤ 領域 B についてもセル a に領域 B の測定値を貼り付けるだけで、グラフ e に実測値と理論値の電圧－電流特性が表示される。この場合、軸の範囲は再度設定しなくてはならない。そして④により領域 B の内部抵抗  $r$ 、逆方向飽和電流  $J_0$ 、理論値の電流  $J_s$  が領域

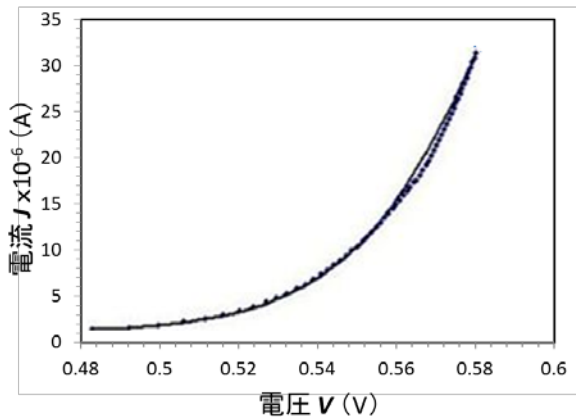
A と同じように計算される。

⑥ すべての領域(ここでは A と B の 2 つの領域)の内部抵抗  $r$ 、逆方向飽和電流  $J_0$ 、理論値の電流  $J_s$  を決める。各領域のセル b を一つのセルにまとめて、横軸に電圧  $V$ 、縦軸に理論値の電流  $J_s$  を取ることで、数値

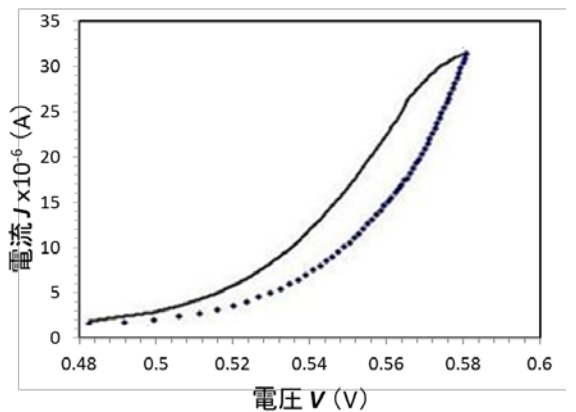
計算による理論曲線としてのPN接合の電圧-電流特性を推定することができる。



(a) 内部抵抗 小 (◆実測値-理論値)



(b) 内部抵抗 適 (◆実測値-理論値)



(c) 内部抵抗 大 (◆実測値-理論値)

図9 内部抵抗による電圧-電流特性の変化

## 5 実験結果と考察

### 5.1 PN接合の電圧-電流特性(実測値)

図10に今回実験に用いたLED及びGeトランジスタのエミッター-ベース間のp-n接合の順方向特性を示す。

図10は3つのLED及びGeトランジスタのエミッター-ベース間に順方向電圧を加えて測定した実測値

の電圧-電流特性である。縦軸はデバイスに流れる電流 $J$ であり、横軸はデバイスに加わる外部電圧 $V$ である。各々の素子では、立ち上がり電圧付近から電流が急激に増加している様子が確認できた。

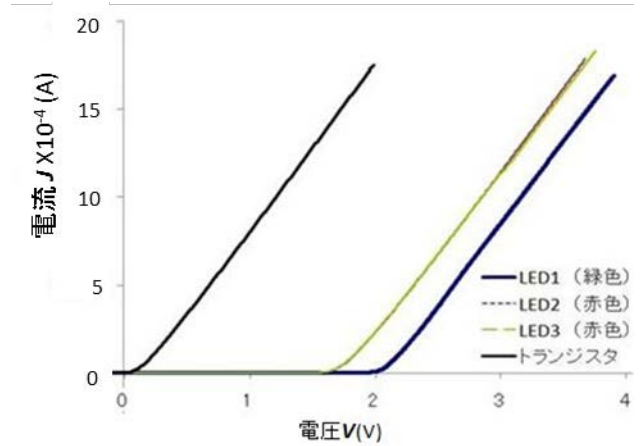


図10 PN接合の電圧-電流特性(実測値)

ここで、図11に示す様に、V-I特性曲線に接線を引き、各ダイオード及びトランジスタ立ち上がり電圧を推定した。

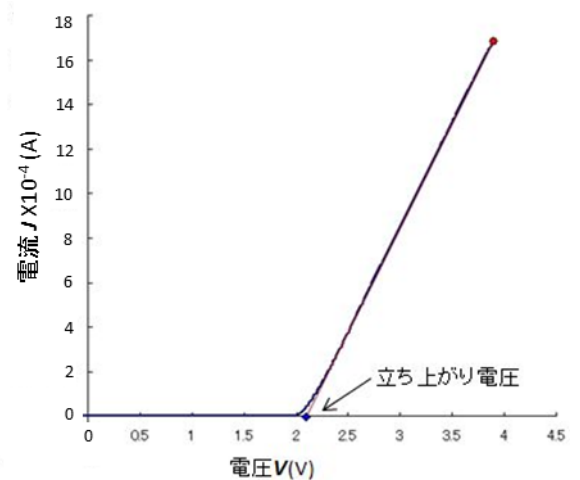


図11 PN接合(LED1)の電圧-電流特性(理論値)

各ダイオード及びトランジスタ立ち上がり電圧を決定し以下の表にまとめて示す。

表3 各LEDおよびトランジスタの立ち上がり電圧

	立ち上がり電圧(V)
LED1 (緑色)	2.092
LED2 (赤色)	1.809
LED3 (赤色)	1.782
トランジスタ	0.148

### 5. 2 PN 接合の電圧－電流特性(理論値)

ここで LED1 に注目して詳細な解析を進める。図 1 2 が PN 接合理論式を用いて作成した LED1 の順方向の電圧－電流特性である。縦軸は数値計算によって求めたデバイスに流れる電流  $J$  であり、横軸はデバイスに加わる外部電圧  $V$  である。実測値の電圧－電流特性と同様に表 3 のしきい値（立ち上がり電圧）で電流が上昇していることが分かる。

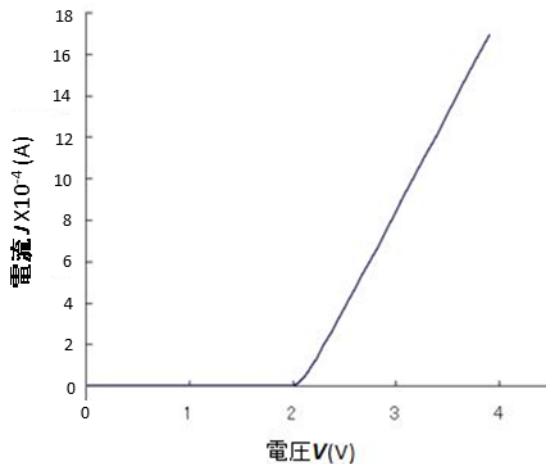


図 1 2 PN 接合 (LED1) の電圧－電流特性(理論値)

また、比較のために理想的な特性を示すと思われる Ge トランジスタのエミッター－ベース間の電流－電圧特性を図 1 3 に示す。トランジスタは 50 データごとに分けて理論値電流を求めることで、ほぼ全ての電圧領域において、連続した滑らかな近似ができた。

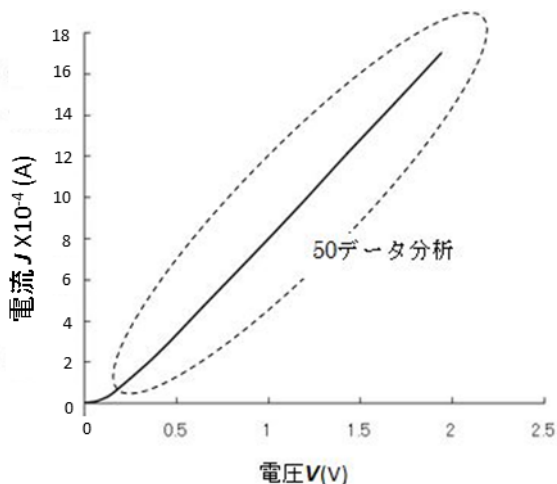


図 1 3 PN 接合 (Ge トランジスタ) の電圧－電流特性(理論値)

### 5. 3 LED1 の実測値と理論値の PN 接合の電圧－電流特性の比較

図 1 0 から電圧が増加し、流れる電流値が大きく増加している電圧領域の実測値と理論値の電流  $J_s$

はしきい値で急激な上昇が始まる。しきい値より大きな電圧領域では、実測値と理論値は同じ電流変化をすることが確認できた。しかし、しきい値付近の電圧及び、それより低い電圧領域では実測値と  $J_s$  がどのような変化をしているか詳細に確認できないので縦軸の電流を対数表示にした。その結果を図 1 4 に示す。

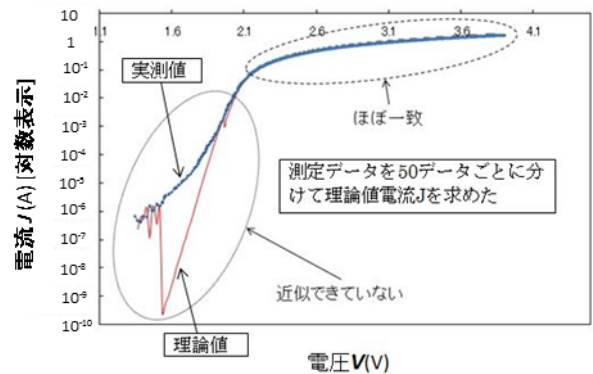


図 1 4 実測値と理論値の比較 1

図 1 4 では、LED1 の測定データを 50 データごとに分けて数値計算を行い、 $J_s$  を求めた。電圧－電流特性は 1.4～1.9V 付近では実測値と理論値の示す電流の傾向が大きく異なっており近似出来ていない。2V 以降の範囲では実測値を理論値でほぼ近似出来る事が確認できた。図 1 4 から 1.4～1.9V 付近の電圧範囲では近似出来ていない事が分かった。

図 1 5 に示すのは、図 1 4 で示した近似出来ていない 1.4～1.9 V 付近の領域の測定データを 10 データごとに分けて数値計算を行い、理論値の電流  $J_s$  を求めた結果である。電流を近似する領域を 50 データから 10 データと詳細にすることにより、1.4～1.9 V 付近の数値計算の精度が増し、近似線が測定データに近づく事を確認できた。

図 1 6 に示すのは図 1 5 で示した近似出来ていない領域を 3 データごとに区分して数値計算を行い、理論値の電流  $J_s$  を近似した結果である。図 1 5 に示した結果よりも更に精度が向上し、図 1 6 に示した 1.4～1.9V 付近の実測値と理論値の電流  $J_s$  はほぼ近似出来ている。

以上のことから、電圧－電流特性の実測値と理論値の数値計算による近似は、電流を求める測定値の範囲を詳細にして、数値計算を行うことで精度が増していくことが分かる。50 データごとに抽出し、理論値を近似した場合には電流は電圧の 2V 以降の広い領域で最も近似している。50 データごとで近似出

来ていない領域を 10 データごとで抽出して近似出来た場合には、精度の向上は確認できたが近似出来なかった。10 データごとの抽出で近似しなかった領域を 3 データごとで抽出して近似した場合には、更に精度が向上し、近似出来る事を確認できた。

従って、試料 LED1 は、印加電圧が 2V 以下の領域で複雑な動作特性を有していると推定される。

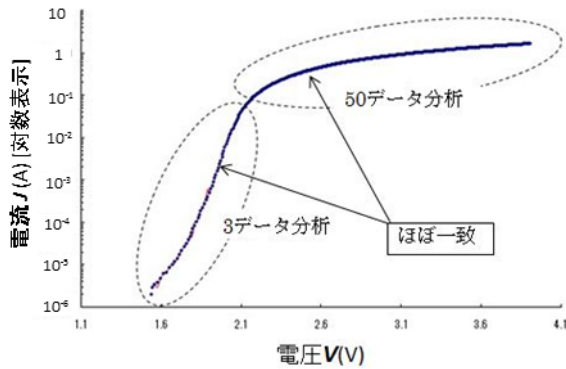


図 1 5 実測値と理論値の比較 2

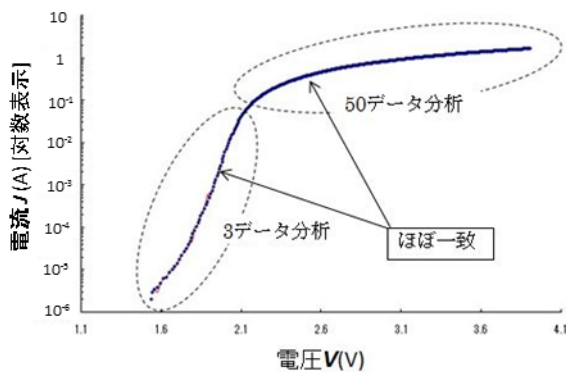


図 1 6 実測値と理論値の比較 3

#### 5. 4 内部抵抗 $r$ と外部電圧 $V$ の関係

図 1 7 は内部抵抗  $r$  と外部電圧  $V$  の関係を示したグラフである。

縦軸は対数表示での内部抵抗、横軸はデバイスに加わる外部電圧である。この図より、内部抵抗と電圧は直線領域と曲線領域を含む関係で表されており、以下のことが分かった。

- ① 50 データごとに数値計算を行い理論値の電流  $J_s$  を求めた場合には 2V 以降が最も広範囲に近似できた。図 1 7 から、■で示した領域の内部抵抗は直線上に分布しており、一定の値を示しているのに対し、◆で示される電圧範囲では異なった動きをしている。

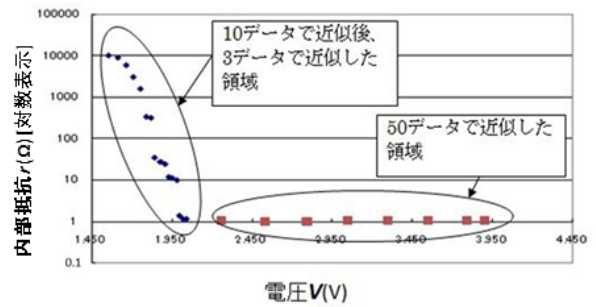


図 1 7 内部抵抗  $r$  と電圧  $V$  の関係 1

- ② 10 データごとに数値計算を行い、理論値の電流  $J_s$  を求めた後、更に 3 データごとに数値計算を行い、近似した領域 1.4~1.9 V 付近の範囲では内部抵抗  $r$  の変化が連続していない。図 1 7 の 1.4~1.9V 付近の領域を拡大し近似直線を描いた図を図 1 8 に示す。図 1 8 から内部抵抗  $r$  は領域 1 では曲線を描いてほぼ連続的に低下していくが、1.8V 以降の領域 2 では段階的に低下することが分かる。

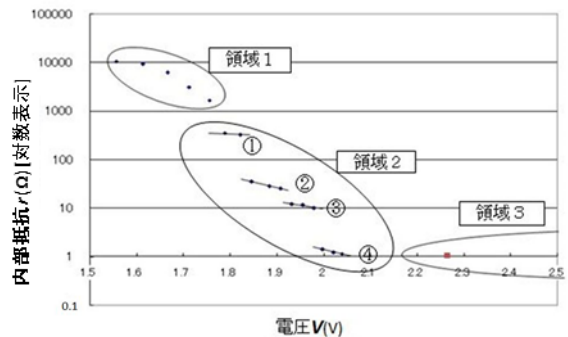


図 1 8 内部抵抗  $r$  と電圧  $V$  の関係 2

#### 5. 5 解析結果からの考察

5. 4 内部抵抗  $r$  と外部電圧  $V$  の関係の解析結果から次の事項が推定できる。

解析の試料として用いた緑色 LED は、理想的な PN 接合を示すトランジスタのベース-エミッタ間の特性と異なり、図 1 8 に示す様に外部電圧により大きく 3 つの動作領域 (領域 1, 領域 2, 領域 3) に分かれる。更に領域 2 では、4 つの異なる電圧-電流特性に分かれる。

この現象を考察する為に、内部構造を示すモデルを考えた。内部構造モデル図を図 1 9 に示す。以下モデル図での動作を説明する。

解析の試料として用いた緑色 LED は、理想的な PN



接合を示すトランジスタのベース-エミッタ間とは異なり、いくつかの面積領域からなる接合を形成している。実験に使用した試料では内部抵抗とダイオードの対からなる、4 面積領域から形成されている。電流のごく小さい段階では内部抵抗が最も小さい領域①を中心に電流が流れる。この為、領域 1 で示される単一のダイオード特性を示す。

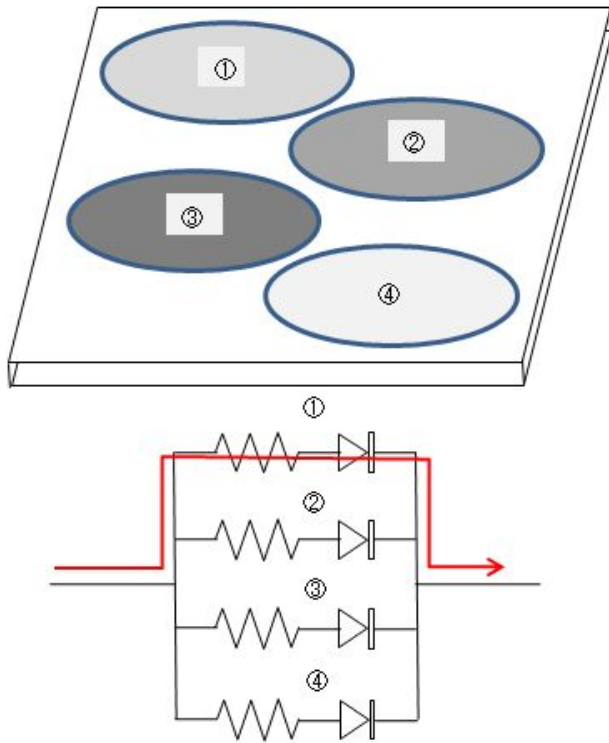


図 19 内部構造モデル図

電流が増加してくると、面積領域①では電流容量が不足してくるので面積領域②にも電流が流れ始める。この為、内部抵抗は面積領域①と面積領域②の並列抵抗値となる為異なる内部抵抗値を示す様になる。

さらに電流値が増加すると、面積領域③にも電流が流れ始める。この様にして順次、面積領域④まで電流が流れる面積領域を拡大して、接合面の全面積まで拡大する。電流が流れる面積領域が接合面の全面積まで拡大すると、面積領域をこれ以上拡大できないので、全面積領域を並列接続した単一のダイオード特性を示す。これが領域 3 の特性であると考えられる。

以上のモデルで示した様に、試料に用いた緑色 LED の内部は構造上、少なくとも 4 領域に分かれていることが推定される。すなわち外部印加電圧の増加に伴い、

領域 1 → 領域 2-① → 領域 2-② → 領域 2-③ → 領域 2-④ → 全領域

の様動作領域が内部で移動しているのではないかと推定される。

## 6. まとめ

本研究では製作した評価・解析システムを使用し、数値計算をパソコンで行うことにより、ダイオード特性の詳細な解析を行った。電流  $J$  の実測値を理論値で近似し実測値と比較する過程で、接合部分の印加電圧に依存した詳細な内部抵抗変化を推定する事ができた。

実測値を理論値で数値計算により近似する場合には、計算に用いるデータ数が 50 データごとである場合には 2V 付近以降の領域において、ほぼ正確に近似出来る。しかし 2V 付近以下では、正確な近似が出来ない。10 データごとの分析では 1.4~1.9 V 付近の精度が向上した。3 データごとの分析では更に精度が向上し、ほぼすべての領域を正確に近似することが出来た。

測定値の解析結果から、評価した解析試料の緑色 LED は印加電圧の 3 つの領域で電流特性の挙動が異なり、領域 2 では段階的に内部抵抗が低下していくことが分かった。また、領域 2 はさらに 4 つの領域に分けることが可能である。このことから解析に用いた LED の内部はトランジスタの PN 接合とは異なり構造上 5 つの領域に分かれていることが推定される。この 5 領域内を印加電圧の増加に伴い動作領域が順番に移動しているのではないかと推定される。

本研究を通じて、研究に用いた評価・解析システムを用いることによりダイオード特性の詳細な解析が可能であることが明らかになった。また、評価した解析試料の緑色 LED の内部構造が複数領域に分かれていることも推定できた。更に、内部抵抗の挙動を解析することにより、本研究の将来目標であるデバイスの動作特性からキャリア電荷の動きを推定するための解析方法の確立に向けての確認が出来た。

## 参考文献

- (1) 一番ヶ瀬剛：II-VI 族化合物半導体 ZnSe 基板の ITO との電気特性, 電気学会論文誌 E, 平成 19 年 4 月号
- (2) 河東田隆：半導体評価技術, 産業図書株式会社, 2003, 第 8 版

