

# 電流－電圧特性測定による半導体デバイス解析

一番ヶ瀬 剛\* 賀屋 雅樹\*\*

## V-I characteristics measurement and parameter analysis for the semiconductor devices

Tsuyoshi Ichibakase\*, Masaki Kaya\*\*

### Abstract

Basic characteristics of the electronic devices are able to figure out from V-I characteristics. V-I characteristics analysis is available for observational study in the semiconductor devices, because this method is able to use a number of times without destructive. Much information is able to get from this method in many variant conditions, and this information has data of the internal constitution of semiconductor devices. The results of V-I characteristics measurement and parameter analysis from the semiconductor junction of between B and E terminals on transistor show that internal resistance “ $R$ ” increases in low current range, and “ $R$ ” has 3 values pattern. These phenomena arise from carrier density and the internal constitution of semiconductor devices. These results of analysis show that this studying method is quite useful as the internal constitution study in the semiconductor devices. In the future, this studying method will bring the expected results with new functional capability temperature, stress and exposure to light.

Keywords: V-I characteristics, transport properties, semiconductor device, optical device

### 1. はじめに

今日、多くの分野で使用されている電子デバイスは、デバイスに印加される電圧と電流特性を評価することで、その基本特性を理解することができる<sup>[1][2][3]</sup>。さらに、デバイスの置かれた温度、応力、光入射などの環境を変化させながら高精度に電圧と電流特性を評価することでデバイス内部の構造、欠陥などの情報も得ることができる。これらの解析方法は古典的な手法ではあるが、明確にデバイスの特性を把握できる。従来測定方法では、原理的なデータ収集に限られていたが、近年の測定装置の性能向上は著しいものがある。これらの高性能電圧測定器を使用し、コンピュータを用いた解析手法を導入して半導体接合モデルからの理論式<sup>[4][5][6][7][8][9][10][11][12]</sup>を適用して比較解析することで、デバイスの内部構造を詳細に解析することが可能になった<sup>[2][3][13]</sup>。

デバイスの V-I 特性(電流－電圧特性)を評価する方法は、印加する電圧・電流の範囲を通常動作の範囲に限定することで非破壊の評価方法となる<sup>[2][3][4]</sup>。従ってデバイスを破壊して解析する方法とは異なり、繰り返し評価が可能であり、同一のデバイスについて、デバ

イスの置かれた温度、応力、光入射などの環境を変化させながらの多角的な評価が可能である。従ってデバイスの V-I 特性の評価からは多くの情報が得られる。これらの情報はデバイス内部の設計寸法に依存する情報が多い。本論文では高精度の電流－電圧特性の測定とパラメータ(未定係数)解析手法を用いた半導体デバイスの解析について報告する。

### 2. 測定システムについて

使用した測定システムは、次の 3 項目について特に考慮した測定システムを使用した。1)測定精度を上げるために、システムでのノイズ発生を極力除去し、測定でのノイズの混入を減らす。2)測定精度を上げる。このために測定で得られるデータの有効数字(測定値の桁数)をできるだけ多く取る。3)測定時間当たりの取得データ数を極力増やす。以上の 3 項目は本研究の目的から、特に重要である。

測定システムは被測定物(試料デバイス)に電圧を印加する電源、計測対象物を含む測定回路、測定器であるデジタルボルトメータ、そしてデジタルボルトメータを制御するコンピュータ(パソコン)により構成される。

本研究に使用した電源は前記の、特に考慮して検討を行った項目の内、1)ノイズと 3)測

定時間当たりの取得データ数を極力増やすための設計を施して製作した。市販の電源でコンピュータの指示により電圧を発生させるもの、あるいはコンピュータで発生した基準電圧を直流増幅器で増幅する方法も考えられたが、この方法では連続した電圧変化を設定することができない。従って、印加電圧の間隔が制限される。解析に必要な電圧範囲はデバイスによって任意であり、しかも解析区間のデータ数を増加させようとすると可能な限り電圧間隔を小さく取る必要がある。また設定電圧の切り替え時にコンピュータおよび電源などから発生する矩形波および、電源の設定電圧切り替え時の急激な電圧変化は高周波成分を含むためにノイズ発生の原因となる。この2点を考慮すると市販の電源は好ましくない。電源の設定電圧を手動で調整する方法では、測定時間が必然的に自動測定よりも長くなり、3)の測定時間当たりの取得データ数が低下する。また、設定電圧が調整時に上下すると、履歴特性を含むデバイスでは正確な測定ができない。以上の事項を考慮して電源は最大電圧を設定すると電圧が連続的に変化する方式とし、必要とする電圧範囲に集中的にデータを測定する方法が最良であると考えた。この考察結果から電源装置はコンデンサの充放電を利用した、電圧が連続自動変化する電源を製作した。

測定システムでは測定器に Agilent 社の 34401[A]メータを使用した。測定は、測定範囲内で連続的に変化する電圧に対応して測定値を自動測定する。デジタルボルトメータとパソコンは RS-232 で接続されており、制御ソフトをパソコンにインストールすることで自動測定が可能となる。自動測定は制御ソフトにより、測定桁数、サンプリング間隔、測定データ数、測定開始時間をデジタルボルトメータに設定することで行う。また、自動測定の予備実験からデジタルボルトメータとパソコンのデータのやり取りで測定に影響を与えるようなノイズ発生は観測されなかった。

### 3. 測定システムと実験方法

測定システム構成を図1に、また試料測定端子台を図2に示す。電源装置Eの操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(以後 V1、V2 と記す)の操作・制御は2台のコンピュータ(以後 PC1、PC2 と記す)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。印加電圧は電源装置EのスイッチをONすると自動的に設定電圧まで電圧が連続上昇する。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。

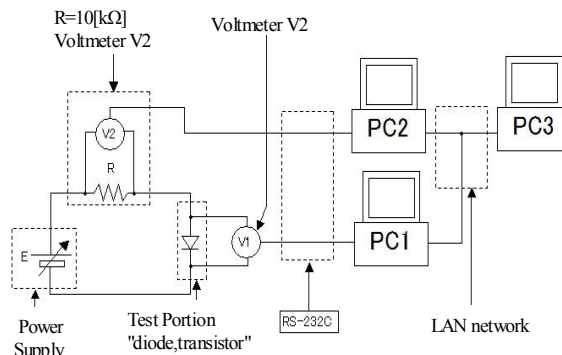


図1 測定回路図  
Fig.1 Figure of the measurement system

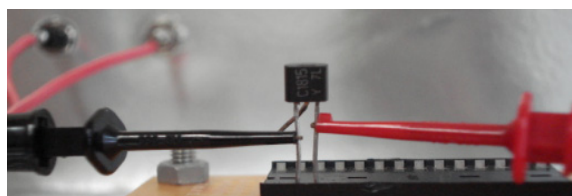


図2 端子台とプローブ(手順①)  
Fig. 2 Test Portion

デバイスに印加される電圧は V1 により測定され、PC1 に測定値が記録される。試料に流れる電流は回路抵抗 R の両端に発生する電圧を測定することにより得られる。以下に測定手順を示す。①測定対象であるトランジスタ 2SC1815 を測定装置内にある端子台に固定する。図2に示すようにベースにプラス(赤)、エミッタにマイナス(黒)のプローブを接続する。試料は静電遮蔽された試料室内に設置する。②電源装置Eの自動電圧変化機能をスタートさせる。トランジスタ 2SC1815 のベース・エミッタ間に順方向電圧が印加される(ベース:プラス、エミッタ:マイナス)。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前記②の操作と同時に V1、V2 を用いた電圧測定を開始する。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 0.6[sec]、測定桁数は6桁である。

デバイスに印加される電圧は 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

値  $R$  で割ることにより決定される。設定したサンプル数の測定を終了したら測定データをコンピュータ(PC3)に転送して解析・評価を行う。

#### 4. 解析理論と方法

##### 等価回路による接合部の式

図3に本研究に使用したPN接合を有する半導体デバイスの等価回路を示す。

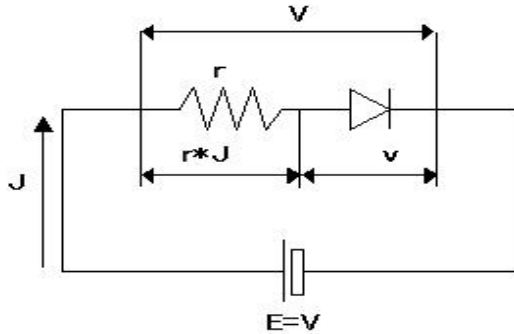


図3 等価回路  
Fig.3 Equivalent circuit

ここで  $E$ : 外部電圧 [V],  $V$ : 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)そして  $r$ : 内部抵抗 [Ω] (半導体デバイスのPN接合部分以外の抵抗)を示す。

等価回路から外部電圧  $V$  は以下の式で表せる。

$$V = r \cdot J + v \dots (1)$$

式(1)を接合部に加わる電圧  $v$  についてまとめると次の通りである。

$$v = V - r \cdot J \dots (2)$$

#### 4.2 PN接合理論式と解析方法

PN接合理論において電流と電圧の関係は次の式で示される。

$$J = J_o \cdot \left\{ \exp\left(\frac{e \cdot v}{k \cdot T}\right) - 1 \right\} \dots (3)$$

ここで  $J_o$ : 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 [ $J \cdot K^{-1}$ ] として  $T$ : 絶対温度 [K] である。

理論式(3)を使用して、PN接合(順方向)の電圧-電流特性を決定することが出来る。この理論式でのパラメータ(未定係数)を実験値と比較することで、デバイスの未定係数を決定する事が可能である。本研究では、この手

法を用いることでデバイスの解析を行った。なお電子の電荷素量:  $e$ 、ボルツマン定数:  $k$ 、絶対温度:  $T$  は次の値を用いた。 $e=1.062 \times 10^{-19}$  [C],  $k=1.381 \times 10^{-23}$  [ $J \cdot K^{-1}$ ],  $T=300$  [K]

#### 4.3 逆方向飽和電流 $J_o$

電流:  $J$  を求めるためには式(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(2)より接合部の電圧:  $v$  は次式(4)のように表せる。

$$v = V_x - r \cdot J_x \dots (4)$$

この式(4)の右辺を式(3)中の接合部の電圧:  $v$  と置き換える。

$$J = J_o \cdot \left\{ \exp\left(\frac{e}{k \cdot T} (V_x - r \cdot J_x)\right) - 1 \right\} \dots (5)$$

式(5)を  $\frac{e}{k \cdot T} = c$ 、 $J = J_x$  と置き換えると式(6)となる。

$$J_x = J_o \cdot \left\{ \exp(c \cdot (V_x - r \cdot J_x)) - 1 \right\} \dots (6)$$

式(6)を  $J_o$  についてまとめると次式を得る。

$$J_o = \frac{J_x}{\exp(c \cdot (V_x - r \cdot J_x)) - 1} \dots (7)$$

逆方向飽和電流:  $J_o$  を求める式(7)中の  $(V_x, J_x)$  には測定値を使用し、内部抵抗:  $r$  を決定することで逆方向飽和電流:  $J_o$  が決まる。

#### 4.4 理論値電流 $J$ の計算・解析方法

実際のデバイスに解析にあたっては、測定で得られたデータと理論式が測定での全領域で一致することはない。これは解析に用いる理論式に基づく実験式が不完全であり、パラメータ(未定係数)が少なすぎることによる。すなわち、パラメータ自体が他の条件の関数となっている場合がほとんどである。このためパラメータ自体が限られた範囲でしか定数と見なせない場合が多い。従って実際の解析では、測定データの領域を分割して領域ごとにパラメータ(未定係数)を決定する。この手法を用いると、領域の分割を繰り返すことで、実験式をさらに完全にすることが可能となる。この解析手法の具体例を次に示す。

測定データを例えば、印加電圧:  $V_a$  の領域内でAとBの2領域に分ける(ここでは簡略化のためAとBの2つの領域に分けている)。分割した領域内で、パラメータ(未定係数)であ

る内部抵抗： $r$ を理論曲線と測定データが一致するまで変化させる。一致したときに得られる内部抵抗： $r$ が求める値となる。この作業はパソコン上で行う方が効率的である。

データ分割の方法について図 4 に示す。また本研究で用いたパソコン上での解析シートを図 5 に示す。

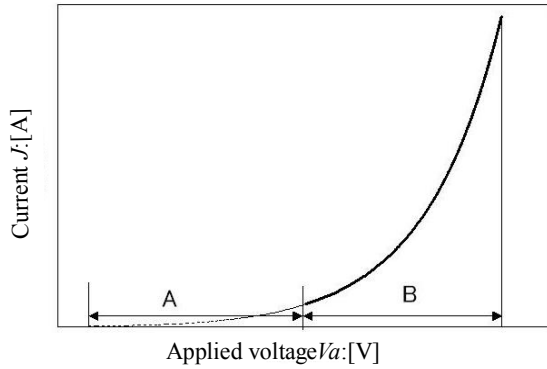


図4 測定値の分割  
Fig.4 Dividing the data

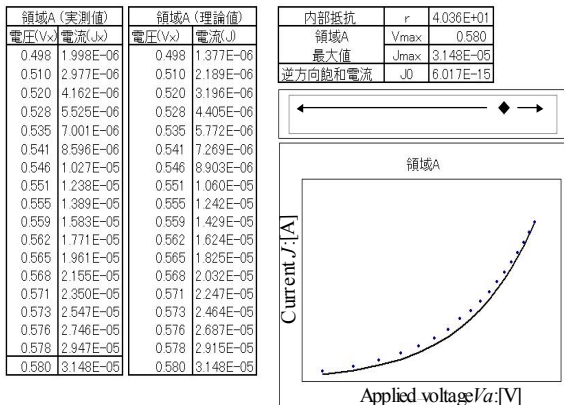


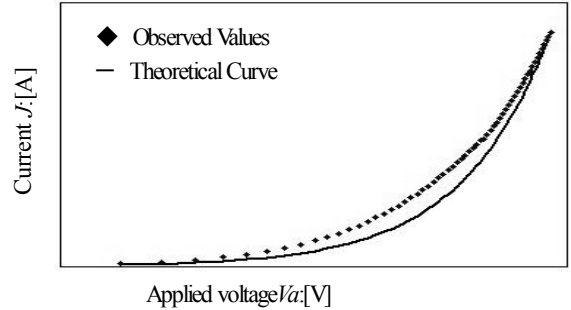
図5 理論値電流解析シート  
Fig.5 Data analysis table.

図 5 に示す理論値電流計算シートはエクセルで作成した。測定値を入力すると内部抵抗： $r$ 、逆方向飽和電流： $J_0$ 、理論値の電流： $J$ を求めることができ、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シートである。図 5 に示す、内部抵抗： $r$  (◆)を左右に動かすことで、理論値の電圧－電流特性は数値計算により変化していく。この様子を図 6 に示す。次に実際の操作手順に従って解析方法を示す。

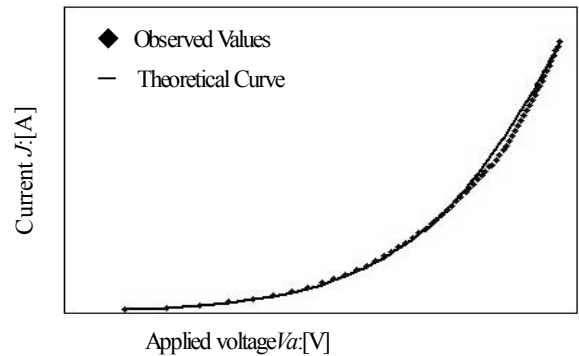
①実測値表に測定データを貼り付ける(測定データはエクセルの書式で PC3 に取り込まれている)。表示グラフに実測値の電流－電圧特

性が表示される。

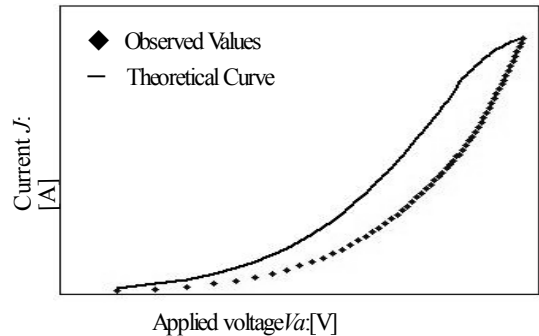
②理論値表に領域 A の ( $V_{max}, J_{max}$ )と内部抵抗(初期値 1)を参照元にした式(7)が組み込まれており、逆方向飽和電流： $J_0$ が求まる。



(a)Internal resistance: $R$  is small



(b)Internal resistance: $R$  is optimal



(c)Internal resistance: $R$  is large

図6 内部抵抗値での理論曲線の変化

Fig.6 Theoretical V-I curve depend on the internal resistance  $R$

③内部抵抗  $r$  は初期値として 1、逆方向飽和電流： $J_0$  と実測値表の測定データ ( $V_x, J_x$ )を参照元にした式(5)が理論値表の電流 ( $J$ )に組み込まれているので領域 A の電圧に対応する電流： $J$ が求まる。理論値表により、理論値の電流－電圧特性が表示グラフに作成される。

セル中の(◆)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。この操作により理論値表の電流( $J$ )もセル中の $r$ の値が変化すると同時に再計算される。表示グラフの理論値の電流も理論値表が再計算されることにより、理論値の電流－電圧特性は表示グラフ上で変化する。逆方向飽和電流： $J_0$ も(◆)を操作することで計算表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： $J_0$ の値が変化する。表示グラフの実測値と理論値の電流－電圧特性がほぼ一致したときに内部抵抗： $r$ 、逆方向飽和電流： $J_0$ が決まる。この時、理論値の電流： $J$ は実測値にほぼ近似した値として決定される。図6にセル中の(◆)を操作し、表示グラフが変化している様子を示す。図6(a)は内部抵抗が最適値よりも小さく、図6(c)は大きすぎる。図6(b)が最も実測値と理論値が近似できており、このときの内部抵抗値： $r$ は表示セルに示される。

領域Bについても同様な操作で電流－電圧特性が解析シートに表示され解析できる。しかし、軸の範囲を操作する必要がある。そして領域Bの内部抵抗： $r$ 、逆方向飽和電流： $J_0$ そして理論値の電流： $J$ が領域Aと同様に計算される。最後にすべての領域(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： $J_0$ そして理論値の電流： $J$ を求める。各領域の理論値表を1つのセルにまとめて、横軸に電圧： $V_a$ 、縦軸に理論値の電流： $J$ を取ることによって、数値計算によるPN接合の電流－電圧特性を求めることができる。

## 5. 実験結果と考察

### 5.1 PN接合の電圧－電流特性

図7にトランジスタ2SC1815のベース・エミッタ間に順方向電圧を印加して測定した実測値の電圧－電流特性を示す。縦軸はデバイスに流れる電流： $J$ であり、横軸はデバイスに印加される外部電圧： $V_a$ である。印加電圧0.6[V]付近から電流が急激に増加している様子が確認できた。この付近の電圧がしきい値電圧であるということがわかる。

図8にPN接合理論式を用いて作成したPN接合の順方向の電流－電圧特性を示す。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： $V_a$ である。実測値の電流－電圧特性と同様に印加電圧0.6[V]付近で電流が上昇していることから、その付近がしきい値電圧

であることがわかる。

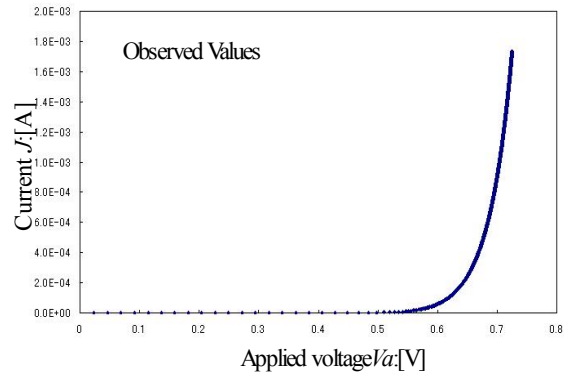


図7 PN接合の電圧－電流特性(実測値)  
Fig 7 V-I characteristics of the p-n junction.

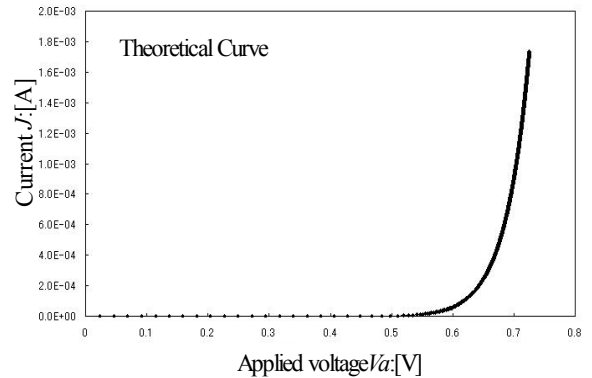


図8 PN接合の電圧－電流特性(理論値)  
Fig 8 V-I characteristics of the p-n junction

### 5.2 実測値と理論値のPN接合の電流－電圧特性の比較

図7, 8から印加電圧が増加し、流れる電流値が大きく増加している領域の実測値と理論値の電流は印加電圧0.6[V]付近で急激な上昇が始まり、印加電圧0.6[V]より大きな電圧領域では同じ変動をすることが確認できた。しかし、低電圧の領域では実測値と理論値の電流がどのような変化をしているか視覚的に確認できないので縦軸の電流： $J$ を対数表示にした。その結果を図9に示す。

図9では、測定データを50点づつにわけて数値計算を行い、理論値の電流： $J$ を求めた。電流－電圧特性は印加電圧0～0.4[V]付近で実測値と理論値の示す電流の値が大きく異なっている。しかし印加電圧0.4～0.7[V]付近の範囲で実測値と理論値はほぼ近似できていることが確認できた。図9からでは印加電圧

0~0.4[V]付近の範囲では実験式として近似できていないことがわかった。

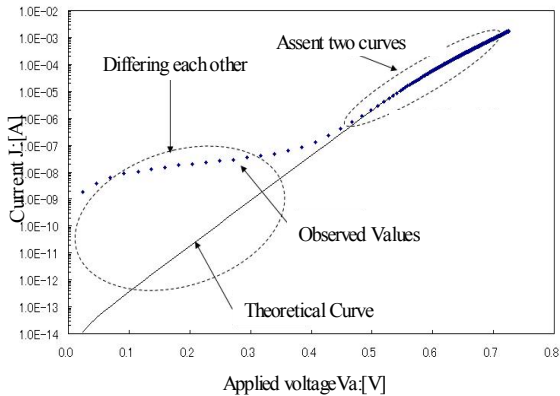


図9 実測値と理論値の比較1  
Fig9 Observed Values and theoretical Curve 1

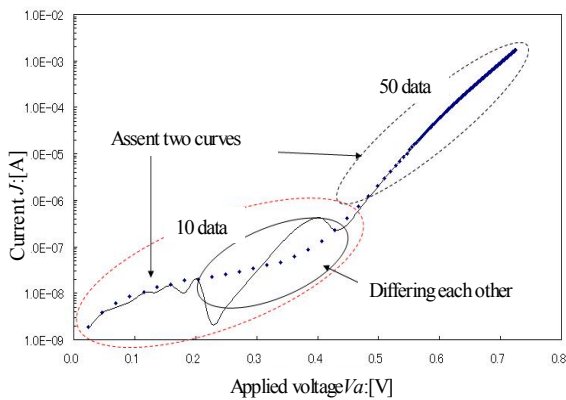


図10 実測値と理論値の比較2  
Fig 10 Observed Values and theoretical Curve 2

図 1 0 は、図 9 で示している近似できていない印加電圧 0~0.4[V]付近の領域の電流をデータ数 10 点ずつのさらに詳細な領域に分割して解析した結果である。図から電流:  $I$  を求める領域のデータ数を 50 点から 10 点と詳細にすることにより、印加電圧 0~0.2[V]付近の数値計算の精度が向上することが確認できた。さらに、図 1 1 では図 1 0 で示している近似しない領域をさらにデータ数 10 点から 3 点に分割して電流の数値計算を行った結果である。図から印加電圧 0.2~0.5[V]付近についても実測値と理論値の電流はほぼ近似できている。このことから、実測値と理論値の電流-電圧特性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向上していくことが確認できた。

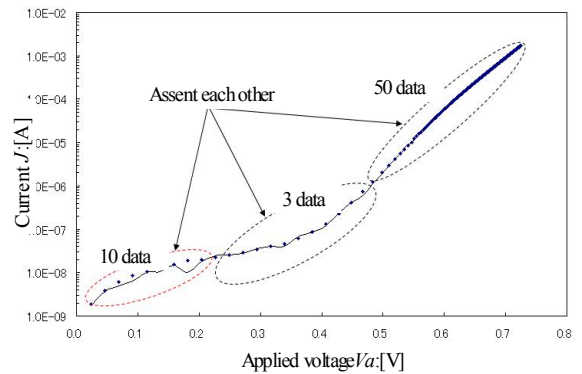


図11 実測値と理論値の比較3  
Fig 11 Observed Values and theoretical Curve 3

### 5.3 内部抵抗 $r$ と外部電圧 $V$ の関係

図 1 2 に内部抵抗:  $r$  と電圧(外部電圧):  $Va$  の関係を示す。

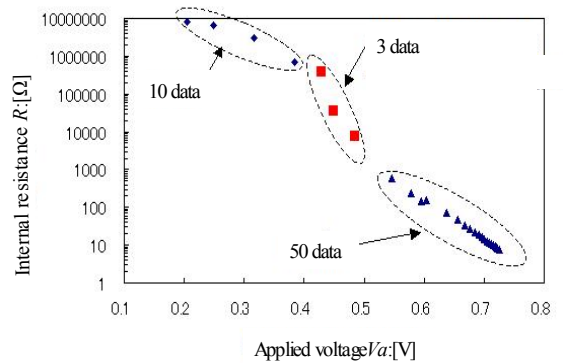


図12 内部抵抗と電圧の関係1  
Fig 12 Internal resistance vs Applied voltage 1

縦軸は対数表示で内部抵抗:  $r$ 、横軸はデバイスに加わる外部電圧:  $Va$  である。内部抵抗:  $r$  はデータ数 50 点、10 点、3 点について各領域で求めた。横軸の外部電圧:  $Va$  は内部抵抗:  $r$  を求めたデータ数 50 点、10 点、3 点の各領域での最大の電圧である。また図 13 に各領域での近似線を含む結果を示す。図から、内部抵抗:  $r$  と電圧:  $Va$  は指数を含む関係式で表されており、以下のことを示している。①データ数 50 点で近似した場合には外部電圧 0.6[V]以降が最も良く近似できる。図 1 2 での▲のデータ数 50 点で数値計算した領域の内部抵抗は、図 1 3 で示した近似曲線を描いた結果から、この直線上に分布しており、▲と■とは異なる動きをしている。②データ数 10 点で近似した場合には外部電圧 0~

0.2[V]付近が最も近似できている。図12の◆は図13で近似曲線を描くと、内部抵抗はほぼ直線付近に分布している。

データ数3点で近似した場合にはデータ数50点と10点で近似できた領域の中間に位置する領域が近似できた。図13で■について近似曲線を描くとこの領域の内部抵抗も直線上に分布している。

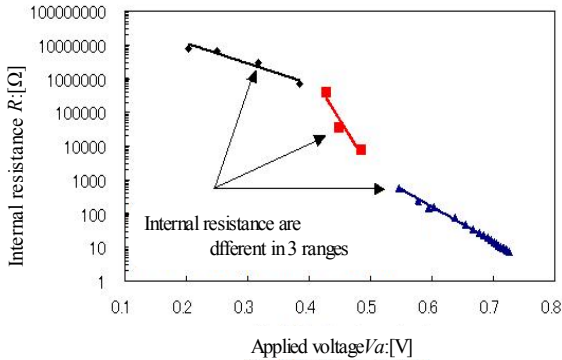


図13 内部抵抗と電圧の関係2

Fig 13 Internal resistance vs Applied voltage 2

以上の解析結果から接合部を含む電流－電圧特性は電流が減少する外部電圧領域でデバイスの抵抗値が増加していることを示している。この現象は半導体の抵抗値が電流を支配しているキャリア数の減少によって生じていると考えられる。しかしこの傾向に加えて外部電圧領域で3領域に特性傾向が分かれるのは単なる接合特性からは説明できない。この現象はデバイス内部の構造に起因しているものと考えられる。この構造因子を非破壊の解析方法で明確に把握できたことは大きな成果である。すなわち、本研究で基本的な手法とする解析手段が有効であることを明確に示している。

## 6. むすび

電子デバイスは、デバイスに印加される電圧と電流特性を評価することで、その基本特性を理解することができる。この方法は、印加する電圧・電流の範囲を通常動作の範囲に限定することで非破壊で条件を変えた繰り返し評価が可能な方法である。従ってデバイスのV-I特性の評価からは多くの情報が得られる。これらの情報はデバイス内部の設計寸法に依存する情報が多い。本報告では高精度の電流－電圧特性の測定とパラメータ(未定係

数)解析手法を用いた半導体デバイスの構造解析を行った。

半導体デバイスであるトランジスタのB-E接合特性の評価・解析からデバイス接合部の内部抵抗： $r$ は電流の少ない領域で増加し、3つの領域でそれぞれ抵抗値の挙動が異なった。電流が減少する外部電圧領域で抵抗値が増加するのはキャリア数の減少によって生じていると考えられる。しかしこの傾向に加えて外部電圧領域で3領域に特性傾向が分かれるのはデバイス内部の構造に起因しているものと考えられる。この構造因子を非破壊の解析方法で明確に把握できたことで、本研究で基本的な手法とする解析手段が有効であることが確認できた。今後、本研究で使用した解析システムにデバイスの置かれた温度、応力、光入射などの環境を変化させる機構を付加することで更なる評価・解析能力の向上が期待できる。

## 参考文献

- [1] 河東田隆：半導体評価技術，産業図書株式会社，2003，第8版
- [2] 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」，電学論E, 127, 4, pp. 234-240 (2007-4)
- [3] 一番ヶ瀬 剛：「II-VI族化合物半導体ITO-ZnSe-CdTe-ZnTe センサの電気特性」，電学論E, 126, 12, pp. 655-661 (2006-12)
- [4] Anderson, R.L. (1960a). Germanium Gallium Arsenide Contacts. Ph.D. Thesis, Syracuse Univ., Syracuse, New York.
- [5] Anderson, R.L. (1960b). Junctions between Ge and GaAs. *Proc. Int. Conf. Semicond., Prague, 1960 (Czech. Acad. Sci.)*, p. 563.
- [6] Anderson, R.L. (1960c). Germanium-Gallium arsenide heterojunctions. *IBM J. Res. Develop.* **4**, 283
- [7] Anderson, R.L. (1962). Experiments on Ge-GaAs heterojunctions. *Solid-State Electron.* **5**, 341.
- [8] Perlman, S.S. (1964). Heterojunction photovoltaic cells. *Advan. Energy Convers.* **4**, 184.
- [9] Perlman, S. S., and Feucht, D. L. (1964). p-n heterojunctions. *Solid-State Electron.* **7**, 911.
- [10] Van Opdrop, C., Kanerva, H. K. J. (1967). Current-Voltage characteristics and capacitance of isotype heterojunctions. *Solid-State Electron.* **10**, 401
- [11] Donnelly, J. P. (1965). Studies of Ge-GeAs and Ge-Si Heterojunctions. Ph.D. Thesis, Carnegie Inst. of Technol., Pittsburgh, Pennsylvania.
- [12] Donnelly, J. P., and Milnes, A. G. (1965). The capacitance of double saturation nGe-nSi heterojunctions. *Proc. IEEE* **53**, 2109.
- [13] 一番ヶ瀬 剛：「分光感度応答電流を使用した接合特性解析の方法と応用」，電学論E, 127, 1, pp. 14-18 (2007-1)

