

# 高精度電子デバイス電気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 device 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 Varistor. Varistor has many unique characteristics, and mechanism of characteristics was less well understood. We found three different I-V characteristics in measurement of Varistor, and we applied a mechanism model to three different I-V characteristics.

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

### 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過程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、デバイスの用途、必要とされるデバイスの条件、環境などに応じて、どの項目が重要であるか見極めながら評価し、またその向上をはかる必要がある。

電子デバイスはデバイスを構成する材料、設計寸法などにより、理論上予想される電気特性が存在する。特に基本的な特性として、デバイスへの印加電圧と流れる電流を評価する方法電圧-電流特性（以後 V-I 特性と記す）がある。例えば、最も単純なデバイスである抵抗素子では、オームの法則に従うが、素子の構成材料の比抵抗が明らかであれば、デバイスの断面積と長さが分かれば抵抗値を求める事が出来る。従って比抵抗、断面積そして長さのうち、2つが決まれば抵抗値を求めることができる。一方で、上記3つの設計寸法と理論式、この場合はオームの法則が明らかな場合、理論上予想される V-I 特性が計算できる。

次に、実験で得られる詳細な測定結果と、上記理

論上予想される V-I 特性を比較することで、理論上予想される特性との食い違いが見られる場合がある。これは実際のデバイスでは、理論上とは異なる現象を生じていることを示している。この場合には理論式をさらに精度を上げた形にすることで、実際のデバイスの特性と一致させて、修正することが可能となる。修正された理論式が測定結果と一致できた場合には、実際のデバイスの詳細な構造を理解できた事となる。

電子デバイスの電気特性を精密に測定し、デバイスに予想される理論式と特性を比較検証することで実際のデバイスの詳細な構造を理解する解析手法はもう一つの利点として、デバイスを破壊することなく、デバイスの内部構造、構成を解析することが可能となる。

### 2 研究の目的と内容

#### 2.1 電子デバイスの動作特性による解析

本研究では、前記の研究手法を可能とするため、詳細な電圧・電流を測定する評価・解析システムを構築することから行った。V-I 特性は半導体デバイスの基本特性であるが、前述のように、測定を詳細

に行うことで、デバイスを非破壊で不良か否かを判断することも可能であり、また内部構造なども推定することができる。これらのことを十分な精度で解析するためには微小な電流、電圧の変化を解析可能なシグナル/ノイズ(S/N)で測定しデバイスの時間的な変化、温度特性による変動誤差を最小にするために、短時間で測定を完了することが必要となる。本研究では評価・解析システムを試作した後に、電子デバイスの中でも、特に複雑な特性を示すバリスタ素子の測定に応用し、その評価を行った。

## 2.2 バリスタとは

バリスタとは2つの電極をもつ電子部品で、両端子間の電圧が低い場合には電気抵抗が高いが、ある程度以上に電圧が高くなると急激に電気抵抗が低くなる性質を持っている。このため、異常電圧発生時に他の電子部品を高電圧から保護する働きがあり、電子回路の保護素子として広く使用されている<sup>(1)</sup>。

バリスタの構成として非直線性抵抗特性を持つ半導体セラミックスを2枚の電極ではさんだ構造を有している。素材としては主材料であるSiC粉末に成形材としての粘土、電気的特性を調整するためのカーボンや金属酸化物などを加え、それらを焼き固めたものである<sup>(2)</sup>。バリスタの素材はかなりの高温に耐えることが出来るが、電極やコーティング剤などから120度を超えないように使用することが望まれる。

バリスタには、ほかの電子素子と比べて独特な性質があるので、その応用もいろいろ考えられる。図2.2は実験で使用したバリスタである。本研究では、バリスタのV-I特性を測定した。その後、このデータから電気抵抗を計算し、印加電圧に対する抵抗の変化を解析した。



図 2.2 バリスタ素子

## 2.3 実験装置に必要と考えられる条件

評価・解析により得られた印加電圧に対する電流

の結果は、測定したデータの精度が高ければより詳細な解析が可能となる。そこで測定における精度を高めるために以下の項目について、評価・解析システムの検討を行った。その後、これらの項目を重視しつつ、測定が行える測定方法の確立と実験装置の構築を行った。

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 実験装置

### 3.1 シグナル/ノイズ特性の向上

電気的なノイズ混入を防ぎ、また外部光による光導電効果の影響を防ぐため、電子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 3.1.1 は測定装置内部の写真である。測定装置内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 0.1[mm]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、電気的ノイズの影響を受けない状態に保つことができる。

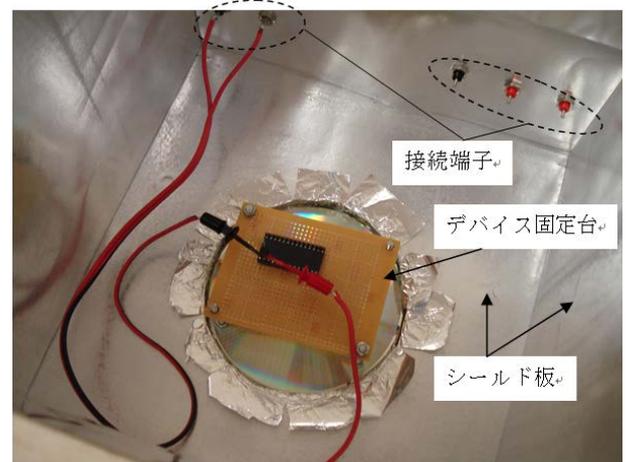


図 3.1.1 測定装置内部

### 3.2 詳細な解析が可能なデータ数の確保

被測定素子に印加する電圧・電流の設定、そして読み取りや記録を手動操作で行うと毎回の測定で設定誤差が生じてしまう可能性が高い。そこで本研究ではデジタルボルトメータ 2 台と、自動電圧変化装置(以下電源装置と記す)を使用した。

2 台のデジタルボルトメータ(Agilent 34401A)は表 3.2.1 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。本研究ではサンプリング間隔を 0.6sec、サンプリング数を 1000 点として実験を行った。

表 3.2.1 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	30000 点
サンプリング間隔	0.6[sec]

電源装置は表 3.2.2 に示す性能を備えている。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。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。

表 3.2.2 電源装置の性能

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

電源装置を用いて試料に電圧を印加し、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。電流値の検出は、回路に直列に挿入された抵抗に発生する電圧を測定することで行った。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。図 3.2.3 は実験装置の電源構成図である。

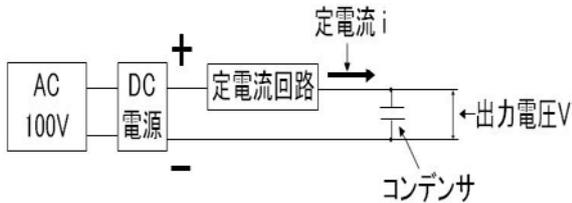


図 3.2.3 電源構成図

### 3.3 短時間での測定

測定対象の経時的変化、温度特性による測定値の変動誤差を最小にするには、測定を可能な限り短時間で行うほうが測定誤差の生じる確率も少なくなる。本システムでは 1000 点のサンプルデータを約 10min で測定可能である。

### 3.4 実験方法

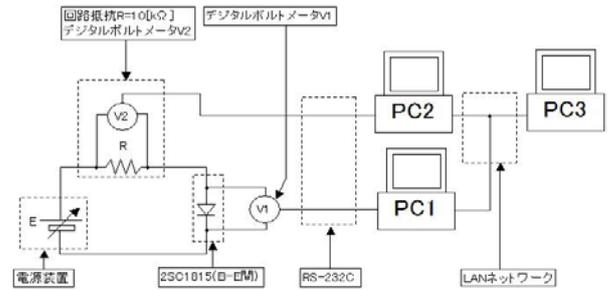


図 3.4.1 測定回路図



図 3.4.2 実験装置の概観

図 3.4.1 に測定回路図及びシステム構成を示す。また図 3.4.2 に実験装置の概観を示す。

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、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値 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。測定装置を図 3.1.1 の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 0.6[sec]、測定桁数は 6 桁である。
- ④ 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 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の評価・解析を行う。

#### 4 解析方法と理論

本研究では、得られた電流と電圧のデータを Microsoft 社のエクセルを用いて解析を行った。

測定では、印加電圧とそのときに流れる電流値が得られる。解析では、オームの法則から印加電圧/流れる電流値として、被測定素子の抵抗値を求めた。

本研究では日立製のバリスタ素子、3 素子を用いて解析を行った。この素子は約 18V 付近の印加電圧で抵抗が降下する仕様となっている。素子の大きさは 3mm~4mm 程度である。測定では素子に付箋をつけ、素子に A~C とナンバーリングし、極性も変えて実験を行った。

以降に示す測定結果のグラフでは横軸を印加電圧 V1、縦軸を素子抵抗値 r で表示している。

##### 4.1 解析の要点

解析にあたり考慮すべき重要な注目事項は以下の 4 点である。

##### 1. 抵抗値の揺らぎ

バリスタは様々な材料から構成されている。よって種々の材質の粒子の大きさ、密度などにより、抵抗値に揺らぎが生じると考えられる。そこで電圧の印加時に起こる抵抗の揺らぎを見ることがどの段階(印加電圧)で揺らぎが生じるのかに注目する。

##### 2. 抵抗値の立下り

バリスタの電気特性において一番重要な特性は、ほかの電子部品を高電圧から保護するために所定の電圧で、急激に抵抗値が低くなることである。この立下り印加電圧を求めることでデバイスが正常に機能しているかどうかを評価する。

##### 3. 極性による違い

バリスタのもう一つの重要な特性として、印加電圧に対する電気極性を持たないことである(従って、交流回路にも使用が可能である)。本研究では高精度で測定することが可能な実験装置を用いており、印加電圧の極性の違いで微少な電圧差がないかを判別することが可能である。測定では素子の端子の片方を着色し順方向、逆方向の区別を付けた。

##### 4. デバイスごとの違い

注目すべき点と類似しているが、バリスタは様々な材料から構成されている。デバイスが完成するまでのプロセスの中で、製造条件による影響、材質の粒子、密度等により、微少な変化があると考えられる。よってデバイスによる特性の違いを評価する。

以上 4 点に特に注目して評価・考察を行った。データの解析では、注目点が解析しやすいように、抵抗の立ち下り領域を拡大した。

#### 5 実験結果

##### 5.1 測定データ

下図は素子 A の印加電圧と抵抗値の関係を示したグラフである。

グラフから簡単な所見もまとめている。図 5.1.1 に示すのは、資料 A の電圧-抵抗値の特性である。

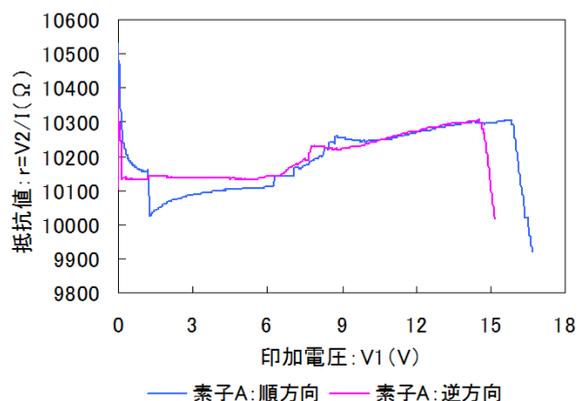


図 5.1.1 素子 A 順方向・逆方向グラフ

A~C の素子のなかで一番抵抗値の変動が大きく印加電圧 6V~10V 間で特に見られた。

印加電圧極性での特性差はあるが変化傾向はほとんど同じように変化する。

抵抗値が降下する電圧点は3つの素子のなかで一番ばらつきがあり、電圧はおおよそ 14V~16V であった。

印加電圧の低い領域での抵抗値の緩やかな降下、中盤の不規則な変動、後半の抵抗値の大きな降下と3つの動きが見られる。

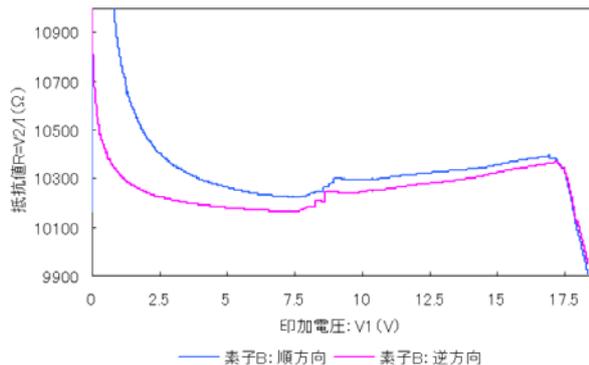


図 5.1.2 素子 B 順方向・逆方向グラフ

図 5.1.2 に素子 B の測定結果を示す。A~C の素子の中で印加電圧極性による特性差が最も大きく、抵抗の降下電圧まで差が大きい。しかし、特性の変化傾向はほとんど同じである。抵抗値の変動は印加電圧 8V~9V 間で特に見られる。抵抗が降下する電圧は、おおよそ 17V であった。

印加電圧の低い領域での抵抗値の緩やかな降下、中盤の不規則な変動、後半の抵抗値の大きな降下と3つの動きが見られる。

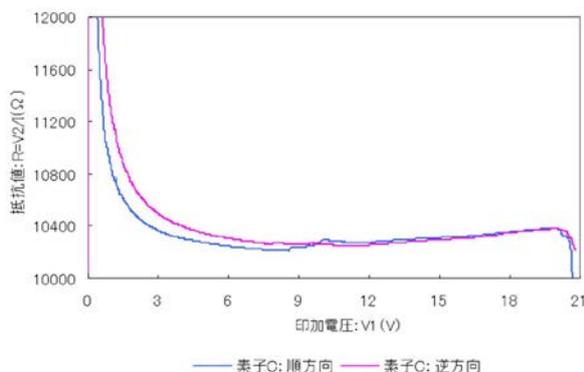


図 5.1.3 素子 C 順方向逆方向グラフ

図 5.1.3 に素子 C の測定結果を示す。A~C の素子の中で一番、印加電圧極性による抵抗変化傾向の差が少なく、印加電圧の低い領域を除くと印加電圧極性が反転してもほとんど特性値が重なっている。

わずかではあるが 8V~10V 間で抵抗の不規則な変動を生じている。

抵抗が大きく降下する電圧はおおよそ 20V 程度である。

印加電圧の低い領域での抵抗値の緩やかな降下、中盤の不規則な変動、後半の抵抗値の大きな降下と3つの動きが見られる。

図 5.1.4、図 5.1.5 に示すのは素子 A, B, C の順方向、逆方向の特性をそれぞれ重ねあわせたグラフである。

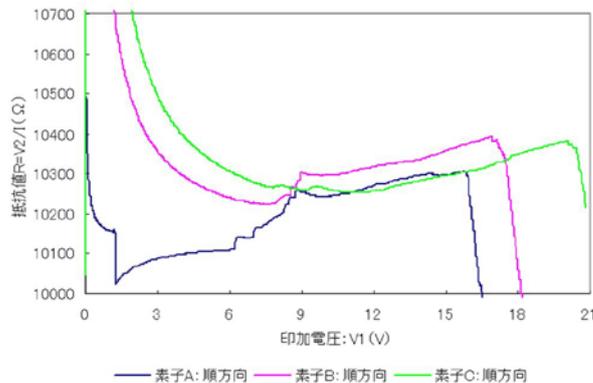


図 5.3.4 素子 A, B, C の順方向グラフ

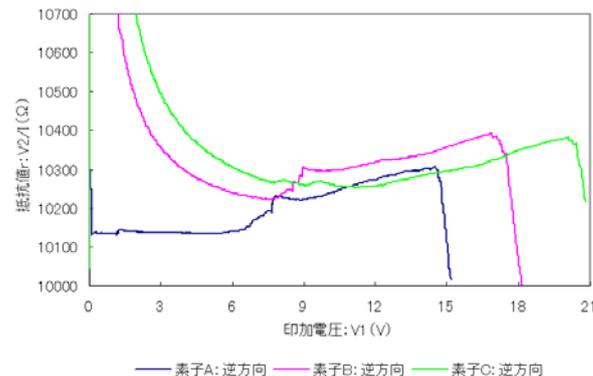


図 5.3.5 素子 A, B, C の逆方向グラフ

## 5.2 グラフから得られる知見

3つのバリスタ素子(A~Cの素子)による印加電圧と抵抗値の評価から、次の5項目の特徴が明らかになった。

- ① 順方向、逆方向で異なる抵抗値を示している。しかしグラフの変化傾向はほとんど同じである。
- ② 素子ごとに特性値が異なる。
- ③ 印加電圧 6V~9V 間でステップ状の不規則な変動が見られる。
- ④ 印加電圧 16V~20V 間で抵抗値の大きな降下が生じる。よってバリスタが正常に動作していることが分かる。しかし素子によってばらつきがある。
- ⑤ 印加電圧の低い領域での抵抗値の緩やかな降下、中盤の不規則な変動、後半の抵抗値の大きな降下と共通の3つの変化が見られた。

## 6 考察

実験結果から、バリスタ素子に関して幾つかの知見を得た。この結果をもとに、バリスタ素子の動作メカニズムについて考察を行った。

### 6.1 3領域の発見について

ひとつめの知見は次図、図 6.1.1 に示すように、印加電圧の低い領域での抵抗値の緩やかな降下、中盤の不規則な変動、後半の抵抗値の大きな降下と共通の3つ動作領域がみられる。このことから、バリスタの動作は3つのメカニズムから構成されていると考えられる。

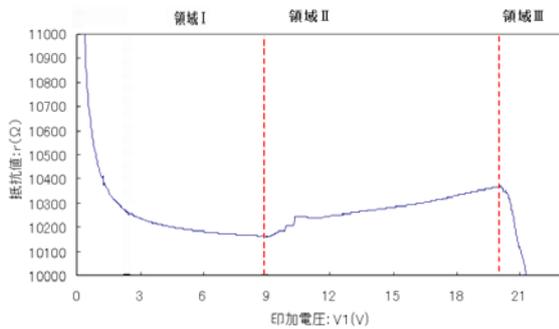


図 6.1.1 3領域に分けたグラフ

バリスタ素子の内部はさまざまな半導体材料を混ぜ合わせ、粉体にした後、焼結して作られている。したがって半導体粒子の集合体で構成されていると仮定することができる。これをモデル図で示したのが図 6.1.2 である。

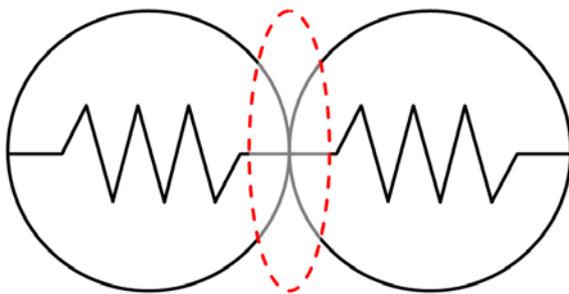


図 6.1.2 バリスタの内部モデル

バリスタ素子の内部の基本構成は図 6.1.2 のように球体（粒子）の組み合わせでできていると考える。

球体の内部には抵抗があり、その抵抗を結ぶ接点（粒子の接触点）がある。この接点の性質が、ある電圧で抵抗が下がる現象を引き起こしているのではないかと考えられる。さらに接点部である、赤点線内は半導体物質による、ヘテロ接合（半導体異種接合）を形成していると考えられる。

この仮定をもとに、バリスタ素子の基本粒子間の関係を図 6.1.3 に示す等価回路を仮定して考察する。

等価回路は3個の抵抗と2個のスイッチ、そして1個のダイオード素子から構成される。このうち両側の2個の抵抗は隣り合う粒子の抵抗に相当する（図中、円で囲まれた領域）。この等価回路モデルを使用し、動作特性を3領域に分けて考察する。それぞれの領域における電流のルートを赤線で示す。

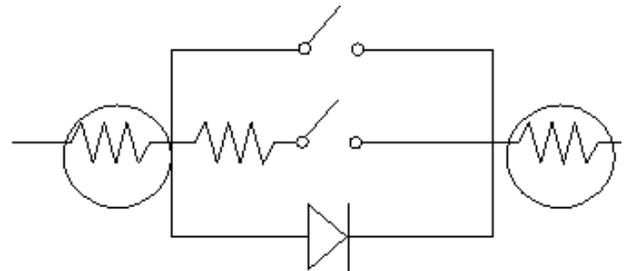


図 6.1.3 基本粒子間の等価回路図

領域 I : 印加電圧の低い領域

領域 I では2個のスイッチは解放状態にあり、電流はダイオードを通して流れる。この方向はダイオードの順方向特性を示す。この様子を図 6.1.4 に示す。ダイオードの順方向特性<sup>(3)</sup>はよく知られているように、印加電圧の上昇とともに指数関数的に電流値が増加する。これを抵抗値で表記すると、まさに領域 I と同じ特性を示す。

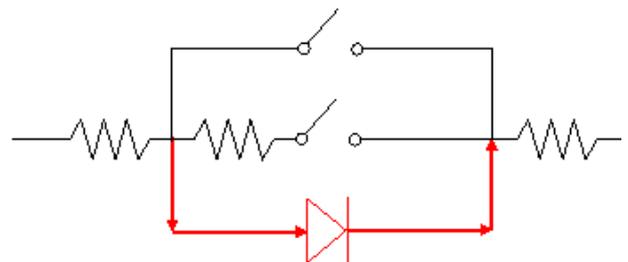


図 6.1.4 領域 I の電流の流れ図

領域 II : 中盤の不規則な変動する領域

領域 II では粒子内部へ直接電流が流れるスイッチが導通状態となる。この様子を図 6.1.5 に示す。このスイッチは接触面で複数形成されていると考えられる。次々に導通状態へ移行し新たな回路が形成され、不規則に階段状に変化していく。

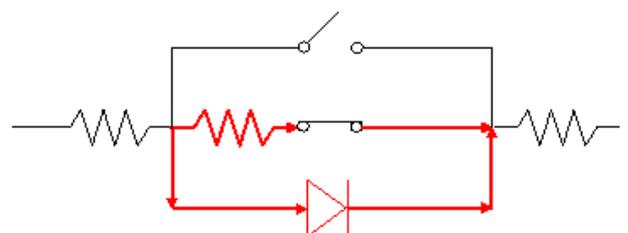


図 6.1.5 領域 III の電流の流れ図

このスイッチは江崎ダイオード<sup>(4)</sup>の原理と同じくトンネル効果で生じているものと考えられ、印加電圧に対して抵抗が上昇する傾向を持っている(すなわち、印加電圧に対して電流が減少する負性領域である)。

領域Ⅲ：後半の抵抗値が大きく低下する領域

領域Ⅲでは粒子内部へ直接電流が流れるスイッチに加えて、粒子を飛び越すスイッチが導通状態となる。この様子を図 6.1.6 に示す。

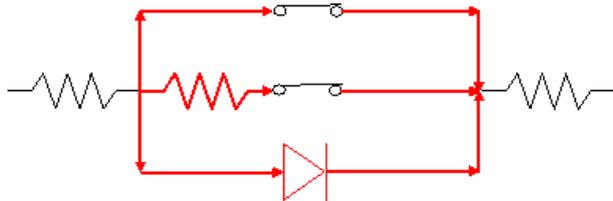


図 6.1.6 領域Ⅲの電流の流れ図

この状態がバリスタの電気特性において一番重要な特性である。この領域へ移行するスイッチについては先に述べたトンネル効果で生じているものと考えられる。

領域Ⅱの不規則な変動する領域と領域Ⅲへの移行については図 6.1.3 基本粒子間の等価回路図だけで説明するのは難しく、さらに考察を行った。

## 6.2 領域Ⅱの不規則な変動する領域と領域Ⅲへの移行

どの素子でも発生した領域Ⅱの不規則な抵抗値の変動は 6V~9V 間で発生し、立下り時にも僅かながら抵抗の変動を生じている。

これは電流が流れる際に、粒子間を流れる電流の経路が変化したのではないかと考えられる。この様子を図 6.2.1 に示す。ここでは仮に抵抗値の小さい粒子・抵抗 I (r1) と抵抗値の大きい粒子・抵抗 II (r2) があると仮定する。

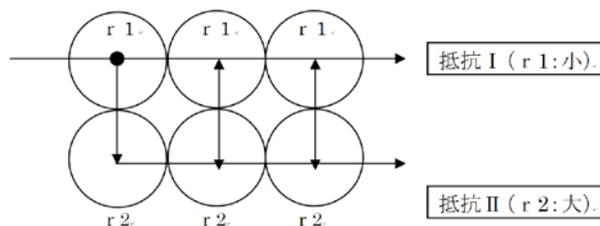


図 6.2.1 電流の経路変化モデル

抵抗値に変動が生じていないときの電流の経路を仮に  $r1 \rightarrow r1 \rightarrow r1$  とすると、変動が生じたときには  $r1 \rightarrow r2 \rightarrow r2$  に変化し、さらに  $r1 \rightarrow r2 \rightarrow r1$  に変化するなど、経路が連続的に変化しているのではないかと考えられる。図 6.2.1 ではモデル図なので 2 種類しか粒子がないが、実際にはこの移

動が素子を構成する粒子全体で起こり、変動の発生になるのではないかと考察する。

## 6 まとめ

- ① 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 PC で行うことにより、電子デバイス・バリスタ特性の詳細な解析を行った。測定して得られたデータをオームの法則を用い、印加電圧に依存した詳細な内部抵抗の変化として解析することができた。
- ② 評価結果の特性についてモデルを用いて考察し、測定した素子の特性メカニズムを推定した。さらに評価した解析試料のバリスタの動作が複数領域に分かれていることの説明を試みた。
- ③ 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電子デバイス特性の詳細な解析が可能であることが明らかになった。さらに、本研究の将来目標であるデバイスの電気特性から、電子デバイス内部の構成を推定するための解析方法の確立に向けての動作確認が出来た。

## 参考文献

- (1) 中 重治, 早川 茂, “電子材料セラミックス”, p.97(1986)オーム社
- (2) 小沢俊昭: 実用電子回路ハンドブック CQ 出版 p 65~ p 66 1972 年
- (3) 「最新ダイオード規格表」CQ 出版
- (4) Fink, Donald G. (1975), *Electronic Engineers Handbook*, New York: McGraw Hill, ISBN 0-07-02980-4

