

超高温特異環境トランジスタの開発基礎研究 II

新宮博康[†], 鷲見哲雄[†], 内田悦行^{††}, 梅野正義^{†††}, 安井利定[‡]

Development of a Diode in the Condition of High Temperature

Hiroyasu Shingu, Tetsuo Sumi, Yoshiyuki Uchida, Masayoshi Umeno* and Toshisada Yasui**
(Aichi Institute of Technology), (*Nagoya Institute of Technology), (**Neo'X Lab., Inc.)

Abstract: This paper reports on an application of the hot-zone phenomenon caused by the electrical connection of copper wires. The temperature of the copper part of the electrical connection rises and cuprous oxide is formed in the connection. When cuprous oxide is formed, the condition of the boundary between the copper and the cuprous oxide is similar in electrical character to a diode. The resistivity of the cuprous oxide changes over a wide temperature range. The experiments were carried out by making a diode repeatedly on a trial basis and observing the electrical character of the thermoelectromotive force. In conclusion we propose that a new diode is made in the boundary layer of copper and cuprous oxide with the application of hot-zone phenomenon.

Key words: electrical connection, heat generation, hot-zone, cuprous oxide, thermoelectromotive force, diode

1. はじめに

針接触形ダイオードからトランジスタを作り出して半世紀にならんとしている。この間、接合形トランジスタ、FET、ICと半導体技術は高度な発展をしてきた。

現在、トランジスタの使用可能温度は限定されたものであることから高温環境では使用不可能であり、現在のシリコンを基本とする素子を使用するとすれば特別な対策を必要とする。

一時的には高温環境下の制御には純流体素子が有望視されたが日の目を見ることはなかった。それは大きさや応答速度に致命的な弱点があったからに他ならない。現在でも、各分野において高温環境で動作可能な制御素子の開発が求められていることには変わりはない。

そこで、我々はこれまで銅系金属を代表とする特異現象として導体接続部に発生するホットゾーン現象の研究をおこなってきた。この研究過程でホットゾーン現象で生成される境界層に着目して表記のテーマについて基礎的研究プロジェクトを発足させた。ホットゾーン現象は約1000℃の高温環境で発生する現象である。この現象では銅系金属の突き合わせ部に電圧を印加した際に突き合わせ部に電流が流れ、同時に高温の局部的電流路を形成して、この部分に亜酸化銅が生成される。突き合わせ部では亜酸化銅だけではなく境界層と呼んでいる層が形成されると考えている。亜酸化

銅を含む境界層部分は1000℃の温度にも耐える電対を形成している。このことから1000℃程度の温度環境に耐えうる制御素子の可能性を追求している。制御素子の基本特性として整流特性、熱起電力特性から素子としての可能性を知ることが重要であることから、その第一歩としてホットゾーン現象で生成された境界層と亜酸化銅の電対について、ホットゾーン生成電圧と境界の構造を観察し、整流特性、熱起電力について測定した。中間段階ではあるが現段階の速報をする。

2. ホットゾーン現象とダイオード素子

銅系材料の電気接続部に電流が流れると、条件によっては、局部的高温を発生しながら亜酸化銅を生成して、この亜酸化銅部分が成長する現象がある。この現象をホットゾーン現象と名付けている¹⁾。この現象が起きている時、生成される亜酸化銅は比較的大きな抵抗率を持っている。しかし、この時の亜酸化銅は高温の溶融部を部分的に構成しているためこの溶融部が低い抵抗率を呈し、導電路となる。このようにしてできる銅金属と亜酸化銅との境には何らかの境界層ができる。この境界層は生成条件により数10～数100Vの耐力をもつ半導体の性質を示す。生成される亜酸化銅は抵抗の温度係数が負であること、また、P形半導体であることは古くから知られている。亜酸化銅がホットゾーン現象により生成されると境界層との組み合わせによりカップルができる。このカップルがダイオードの性質を示すことがこれまでの研究から分かってきた。このカップルの生成条件として電圧、電流を変える事により、生成される層が異なってくる。今回の実験で用いた試料は比較的ホットゾーン現象が発生しやすい条件でカップルを作った。

† 愛知工業大学 工学部 電気工学科

†† 愛知工業大学 工学部 情報通信工学科

††† 名古屋工業大学 電気情報工学科

‡ 株式会社 ネオックスラボ

3. 実験方法

前述のホットゾーン現象により、生成されたダイオードの基礎データを測定するため、試料は1 mm ϕ の電線用銅線を突き合わせに配置して、2つの銅線の突き合わせ部に亜酸化銅が生成された時、この亜酸化銅は熔融状態であるので、この熔融部にタングステンの細線を挿入する。細線は顕微鏡下目視によって、亜酸化銅の端部すなわち境界部近傍に挿入した。

生成された試料の亜酸化銅と境界との部分は接合力が脆弱であるため試料生成時の状態を維持したままで特性実験ができるようにした。すなわち、試料生成と測定実験は同一の試料保持装置を用いた。図-1に試料保持装置の写真を示す。

図-1は左右両側に銅線を保持、手前と向う側に細線保持の電極をもつ。下部基台はベークライトの絶縁台である。ホットゾーン現象を発生させるには一定の技術的経験を要するので、経験的に最も発生し易い条件として交流および直流を用い、電圧30~100 V、電流1 Aおよび2 Aとした。ホットゾーン現象により生成し、出来たダイオードは境界層側がアノード、亜酸化銅側がカソードとなる。また、交流でのホットゾーンは電線の両端に境界層をつくる。直流でのホットゾーンは正極側に境界層をつくる。生成した試料について、直流電圧を与え、その電流を測定する。今回は基礎的段階であるので温度特性は設備の都合上実験は行っていない。

次の特性について実験した。

- 1) 順方向、電流 - 電圧特性
- 2) 逆方向、電流 - 電圧特性
- 3) 破壊電圧
- 4) 熱起電力測定

3-1. 順方向 電圧 - 電流特性

生成された試料を用いて、室温における電圧 - 電流特性を測定した。試料に直流安定化電源を接続して電圧を上昇してそれぞれの点で電流を測定した。電流電圧はデジタル電圧計、電流計を用いた。今回は直接電源を接続することから、電圧はホットゾーン現象が起きない程度の低電圧という条件であった。

3-2. 逆方向電流 - 電圧特性

前項と同様に、試作した試料について前項の電圧を逆

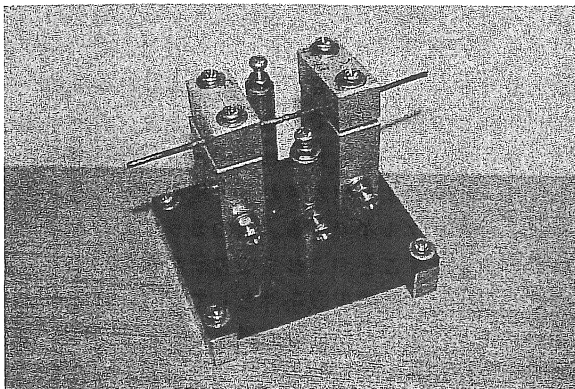


図 1 試料保持装置

に印可した時の電流を測定した。前項と異なり逆電圧を印可することから、ホットゾーンが発生する直前まで電圧を上昇できるあるが70 Vまでとした。

3-3. 破壊電圧

生成された試料を用いて、室温における破壊電圧を測定するため、順方向および逆方向の電圧を10 K Ω の抵抗器を直列に挿入して電圧を上昇させダイオードの破壊電圧を確定した。基礎的データであることから本来パルス状電圧を印加すべきところであるが直流電圧を手動により急上昇させて破壊時の電圧を測定した。また、参考のため熱起電力測定用の試料についても起電力測定後の破壊電圧を測定した。

3-4. 熱起電力特性

熱起電力を測定するためには温度の確定が必要なことから3-1項から3-3項までの実験とはことなった試料生成方と試料保持装置を用いた。試料の生成には銅リング(銅板)と電線用銅線により、電線をマイクロメータによる微調整可能な保持具を作りホットゾーン現象により亜酸化銅を作った。図-2に亜酸化銅生成時の写真を示す。銅リング上に3ヶ所の亜酸化銅を成長させて境界層をリング側になるように試料を作った。亜酸化銅および境界層生成時のホットゾーン発生電圧は直流100 V、1 Aを用いた。

製作したリング状電極(亜酸化銅)試料の写真を図-3に示す。3ヶ所の黒い粒状が亜酸化銅である。リングの直径は30 mm Φ 、亜酸化銅の長さは1 mmとした。この電極を用い一方を電熱器により加熱、他方を水道水の流量を調整して温度一定にした。亜酸化銅側を過熱した時を順方向起電力とした。境界層側を過熱した時を逆方向起電力とした。

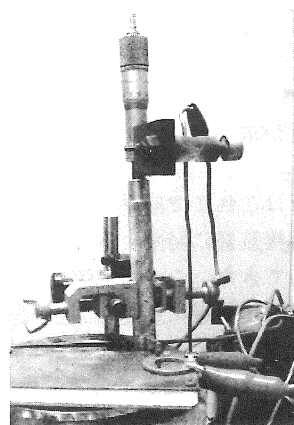


図-2 亜酸化銅生成装置

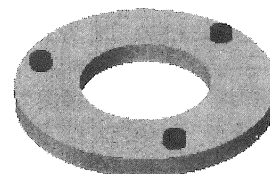


図-3 リング状電極/亜酸化銅

図-4 a に加熱および冷却装置の全体写真を示す。図-4 b にリング状電極を組み立てた状態の写真を示す。図-4 a の上部に流水部、中央黒い帯状が電極部、下の円筒部が電熱器の均熱部である。温度測定は K 熱電対で測定した。

ダイオードの熱起電力は無負荷起電力と負荷抵抗を接続したときの電流・電圧から温度差-出力特性を実験した。実験した負荷抵抗は $100\ \Omega$ と $1\ \text{K}\ \Omega$ を用いた。

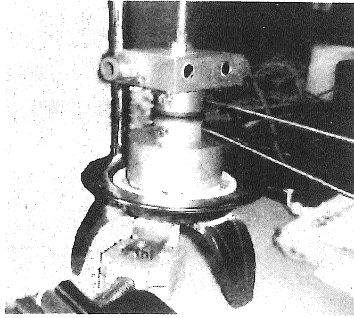


図-4 a リング状電極と過熱・冷却装置

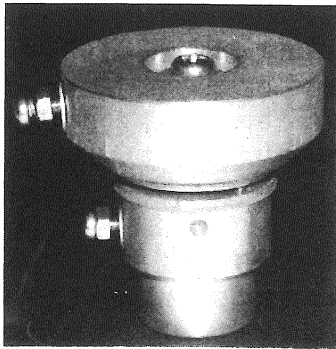


図-4 b 電極部

4. 実験結果

実験に使用した試料は全て手作りによるものであることからホットゾーン発生時の電氣的条件を厳密に管理しても試料のばらつきは必ず発生する。しかし、すべての実験に於いて比較的安定した結果を得ることが出来た。

4-1. 順方向 電圧-電流特性

図-5 に順方向電圧-電流特性を示す。導通電圧開始電圧約 $1\ \text{V}$ である。室温 (20°C) における抵抗値がおおよそ $10\ \text{K}\ \Omega$ である。

4-2. 逆方向電流-電圧特性

図-6 に逆方向電流-電圧特性を示す。逆方向電圧は $70\ \text{V}$ までとした。

4-3. 破壊電圧

$1\ \text{mm}\ \Phi$ 銅線による試料は外見上どれも同じように作

られているが順方向、逆方向それぞれの電流-電圧特性は同等でも破壊電圧については大きく変動した。最も低い電圧では $5.5\ \text{V}$ で破壊した。最も高い電圧では $120\ \text{V}$ を

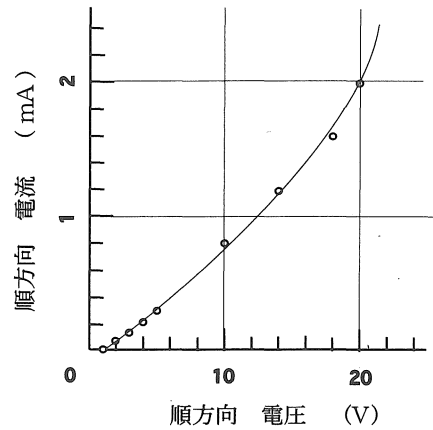


図-5 順方向 電圧-電流特性

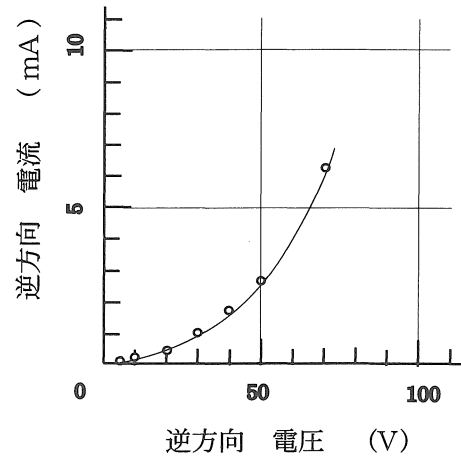


図-6 逆方向 電圧-電流特性

示した。 $70\ \text{V} \sim 100\ \text{V}$ の破壊電圧が頻度大であった。

熱起電力実験用試料の破壊電圧はばらつきが少なくほぼ $100\ \text{V}$ 近傍に集中した、平均 $114\ \text{V}$ であった。破壊した状態はクレータ状の陥没が観察された。図-7 に破壊痕の写真を示す。左側が亜酸化銅、右側が境界層である。

4-4. 熱起電力特性

図-8 に無負荷時の熱起電力特性を示す。図-9 に負荷時の熱起電力特性を示す。図-9 に負荷時の熱起電力特性

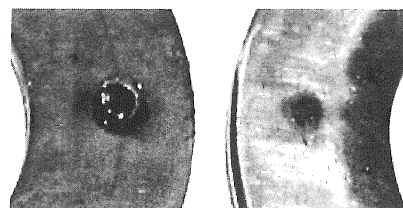


図-7 破壊痕

は3個の電極によるものである。このことから他の熱電対等と比較するために電対の断面積当たりの電力を示した。また、亜酸化銅が負性抵抗特性を持つことから内部抵抗について調べた。図-10に温度差と内部抵抗特性を示す。

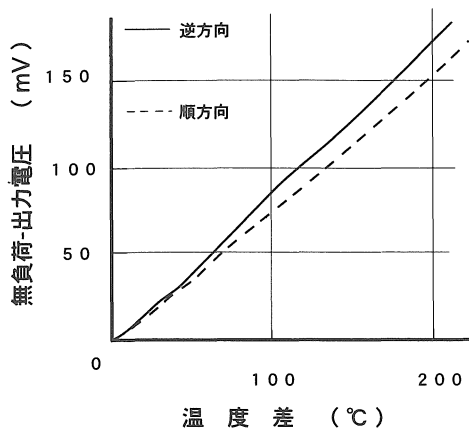


図-8 無負荷・熱起電力特性

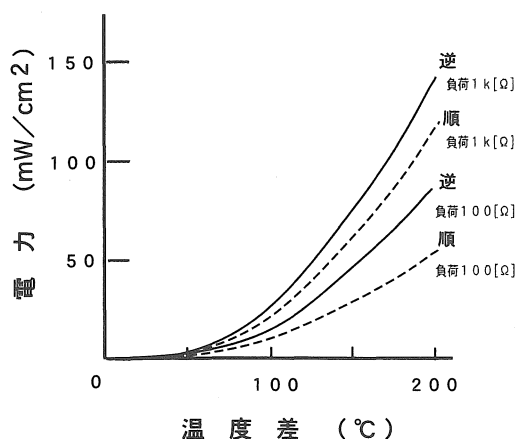


図-9 負荷・熱起電力特性

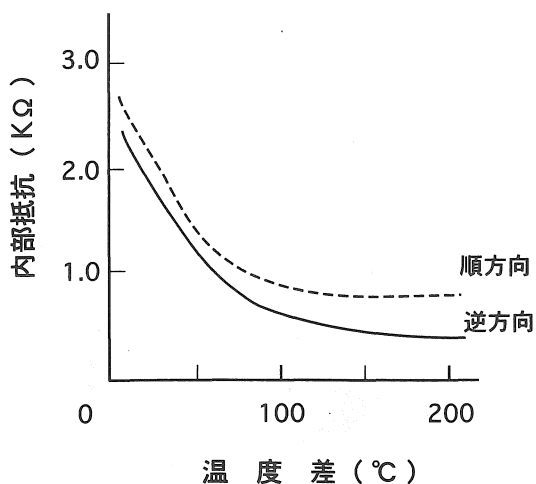


図-10 温度差-内部抵抗特性

5. 考察

試作した試料のダイオードはゲルマニウムやシリコンダイオードとはあらゆる面で違いを見せた。傾向としてはシリコンダイオードなどと同様に正方向特性、逆方向特性が現れたが不感帯域がプラス方向1V程度、マイナス方向4V程度であり、内部抵抗が正逆両方向約10KΩ程度を示した。逆方向特性は極端なツェナー特性は現われず緩やかなカーブとなっている。

破壊実験では境界層側に破壊痕ができ、時にはクレータ状の陥没が観察されゆっくりと破壊につながるのではなく、破壊が急激に起こることを示唆している。破壊時の電圧はダイオードを作るための亜酸化銅生成電圧に依存しているようである。

熱起電力特性では無負荷状態ではおよそ0.75mV/°Cの起電力を発生させた。これは比較的起電力の大きいK熱電対やT熱電対のおよそ10倍の起電力を発生することが分かった。

また断面積当たりの電力の取り出しでは内部抵抗の影響を直接受けるため温度の低い範囲では電力を取り出すことは困難である。図-10に示すように温度差が100°C以上、実際の高温度側温度は120°C以上で内部抵抗が降下している。

今回の一連の実験から正方向、逆方向のダイオードとしての特性と熱起電力特性からホットゾーン現象により生成されるダイオードはおよそ100°C以上の温度環境で用いることが可能であることを示した。

6. おわりに

ホットゾーン現象の研究から派生した今回の実験は亜酸化銅の生成過程とホットゾーン波形の解明にも関連するものであると考えている。内部抵抗が100Ωオーダーであることが制御素子としての可能性はそれなりの使用可能条件が限定されるものであろうと考える。例えば低電圧の電源では仕様困難であろうし、温度変動が内部抵抗を変化させる等制御素子としての実現については周辺回路技術の開発研究が必要である。

今後、ダイオード関連に残された基本特性として光電変換特性等が残るものの素子構造や材料の性質から多くの解決しなければならない問題を残している。

本研究は、本学総合技術研究所平成10年度-12年度プロジェクト研究の助成を受けた研究である。関係者各位に感謝の表す。

参考文献

- 1) 新宮、鷲見、高橋、「導体接続部におけるホットゾーン成長現象」、電気学会論文誌、Vol. 106A, No. 6 1-A 63, PP 519-524, 1896.

(受理 平成13年3月19日)