



Title	半絶縁性GaAs基板の絶縁破壊機構に関する検討
Author(s)	劉, 亜莉; Liu, Yali; 長谷川, 英機 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 137, 65-71
Issue Date	1987-10-31
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/42058">https://hdl.handle.net/2115/42058</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	137_65-72.pdf



## 半絶縁性 GaAs 基板の絶縁破壊機構に関する検討

劉 亜莉\* 長谷川英機\* 大野 英男\*

(昭和62年6月30日受理)

### Investigation of Breakdown Mechanism of Semi-Insulating GaAs

Yali LIU, Hideki HASEGAWA and Hideo OHNO

(Received June 30, 1987)

#### Abstract

The breakdown of semi-insulating (S. I.) GaAs is investigated both experimentally and theoretically.

All these experimental results cannot be explained by the Space-Charge-Limited Current theory (SCLC). A new model based on the avalanche theory is proposed which can explain all of the experiment results.

Using carefully designed sample structures with guard rings, current-voltage (I-V), dependence of the characteristics breakdown voltage  $V_{BD}$  on the thickness of the substrate and the temperature dependence of the breakdown voltage are measured.

Light emission associated with breakdown is observed for the first time. It showed a broad spectrum covering 400 nm~900 nm.

#### 1. 緒 言

GaAs 集積回路技術の発展はめざましく、その集積度は1チップ上に数千から数万個以上のトランジスタを集積化するレベルに達している。しかし、集積回路の基板として用いられる半絶縁性基板の電気的性質、ことにその絶縁破壊機構はよく理解されていない。集積度が高くなるにしたがい、素子分離に関連して基板の絶縁破壊現象が問題となってくる。すなわち、半絶縁性 GaAs 基板は、一般に1~3 kV/cm の高電界下で、電流が急激に増大し半絶縁性が消失する現象があり、これにより、元来絶縁されているべき素子の間に、電流が流れてしまう。この現象の機構は従来、空間電荷制限電流理論、いわゆる SCLC 理論<sup>(1)~(7)</sup>で説明されてきているが、この説明は十分に確立されたものとはいえない。

本論文は LEC アンドープ GaAs 半絶縁性基板の絶縁破壊機構について実験的に検討を加え、理論的考察を加えたものである。電流-電圧特性および発光特性に関して詳細な実験を行った結果、得られた実験結果は SCLC 理論で説明できないことが判明した。さらに実験結果を説明する新しいモデルとして、深い準位の荷電にもとづく電界による高電界下のなだれ降状モデルを提案した。本論文では2. に実験方法、3. に実験結果、4. に理論的考察について述べている。

#### 2. 実験方法

##### 2.1 試料の作製法

半絶縁性基板として、アンドープ GaAs LEC 基板(抵抗率  $\rho \geq 10^7 \Omega\text{cm}$ )を用いた。絶縁破壊電

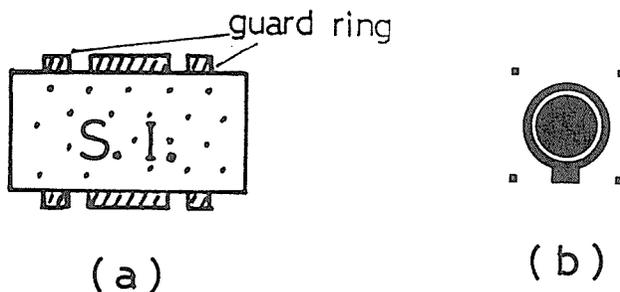


図1 絶縁破壊特性測定用試験の構造

圧  $V_t$  と基板の厚さ  $D$  の関係を求めるためには基板の厚さ  $D$  を変化させる必要がある。基板は Br-メタノールを用いて、研磨機でエッチングしながら薄膜化し、その厚さ  $D$  は  $460\ \mu\text{m}$  から  $215\ \mu\text{m}$  の範囲で変化させた。試料の構造は図 1(a) に示すサンドイッチ構造とし、その電極は図 1(b) に示すようなガードリング付きの電極パターンとした。ドットの直径は  $2\ \text{mm}$  とした。この試料は次のようにして製作した。厚さを調整した基板をまず有機溶剤で洗浄した後、硫酸系エッチング液 ( $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 3 : 1 : 1$ ) で 1 分間程度エッチングする。これは基板表面の酸化物を除去するためである。電極には Ge/Au/Ni を使い、 $8 \times 10^{-6}$  Torr 以上の真空度で蒸着した。厚さはそれぞれ  $500\ \text{\AA}/1000\ \text{\AA}/170\ \text{\AA}$  である。その後、水素雰囲気中で  $450^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$  の温度で 70 秒間熱処理し、オーミックコンタクトした。

また、絶縁破壊には発光が伴っている可能性がある。この発光の分光測定には、微細光を精密測定するために、前述した試料と多少異った構造の試料を用いた。この試料の構造を図 2(a)(b) に示す。GaAs 基板の片面に、図 2(a) に示すように、まず Si をドーブした  $500\ \text{\AA}$  の  $n^+$ GaAs 層を MBE 法により成長した。次に上述の試料と同じようにガードリング付きの電極を蒸着した。

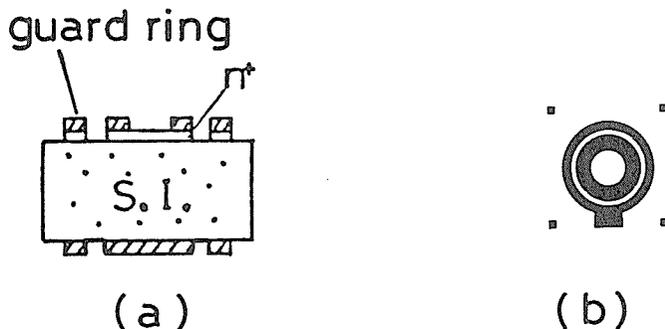


図2 発光特性測定用試料の構造

電極のパターンを図 2(b) に示す。発光を検出しやすくするため円形金属電極の中央に直径  $1\ \text{mm}$  の円形の孔をあけた。最後にアンモニア系エッチング液 ( $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 8 : 1.4 : 196$ ) で、不用な部分の  $n^+$  層を除去した。エッチングの条件は  $20^\circ\text{C}$ 、15 秒間である。

## 2.2 測定法

半絶縁性 GaAs 基板の電流電圧 ( $I$ - $V$ ) 特性は、エレクトロメータ (Keithley Model 617) を用いて測定した。測定系はマイクロコンピュータ制御の自動測定システムとなっている。測定回路を図 3 に示した。図において、 $I_d$  はドットを流れる電流、 $I_t$  は全電流であり、 $I_t$  にはガードリングを流れる電流の寄与も含まれている。温度は電気的シールドされた暗箱内で行い、その温度は試料ヒーターに PID 制御をかけて一定に保った。

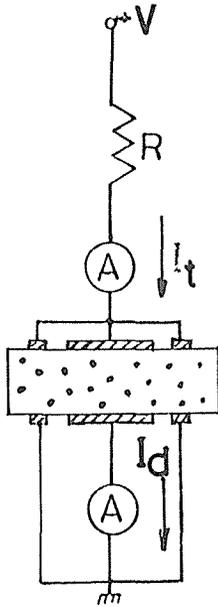


図3 電流電圧特性の測定回路

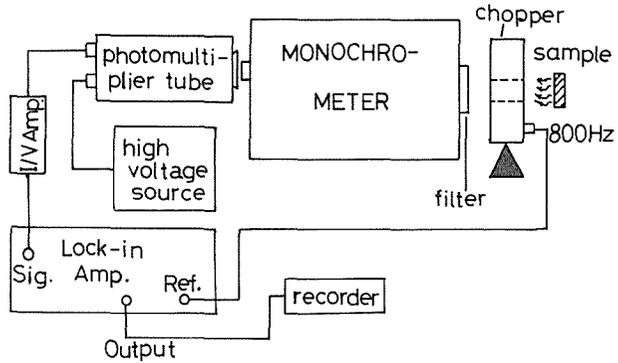


図4 発光の分光特性の測定系

絶縁破壊に伴う発光の可能性を検討するために、試料に電圧を印加して絶縁破壊状態にさせ、光電子増倍管で発光を検出することを試みた。発光の分光特性を測定するには、発光の強度がある程度強くなければ測定できない。そのため前節に述べた特別な構造の試料を用いて測定を行なった。測定系を図4に示す。試料からの発光はチョッパで変調されたのち、分光器を通して光電子増倍管で検出される。光電子増倍管からの信号は増幅度 $10^6$ 倍のI/V増幅器により増幅し、さらにロックインアンプに入力する。これにより、信号はチョッパからの参照信号により同期検波される。

### 3. 実験結果

#### 3.1 破壊電圧の厚さ依存性と温度依存性

図5はI-V特性の測定結果の例である。この試料の基板の厚さは $450\mu\text{m}$ で、絶縁破壊電圧は60Vであった。厚さが違う基板のI-V特性から、絶縁破壊電圧 $V_t$ と厚さDの関係性を求めた結果を図6に示す。横軸と縦軸は両方とも対数で、この図から $V_t$ とDの関係は $V_t \propto D^2$ ではなく、ほぼ $V_t \propto D^{1.6}$ であることがわかる。図7に絶縁破壊電圧 $V_t$ の温度依存性を示す。温度は $25^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$ の範囲で

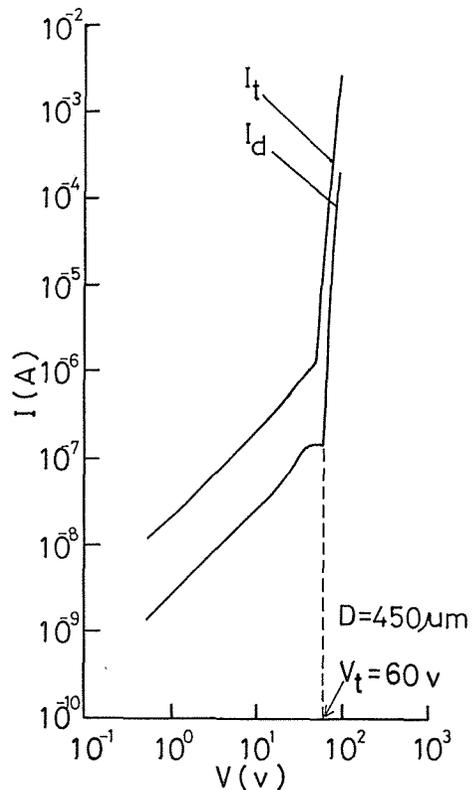


図5 試料のI-V特性

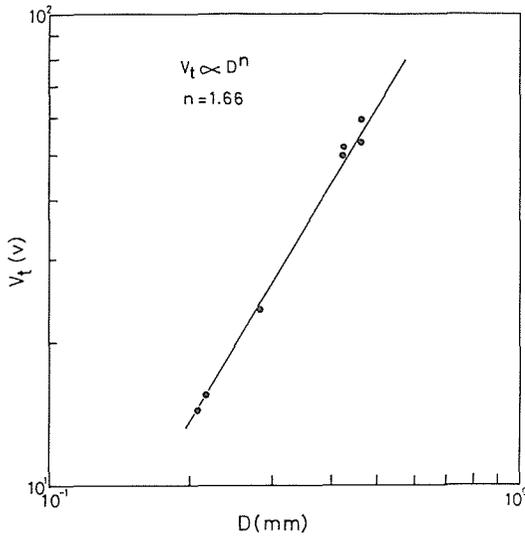


図6 絶縁破壊電圧  $V_t$  と試料の厚さ  $D$  の関係

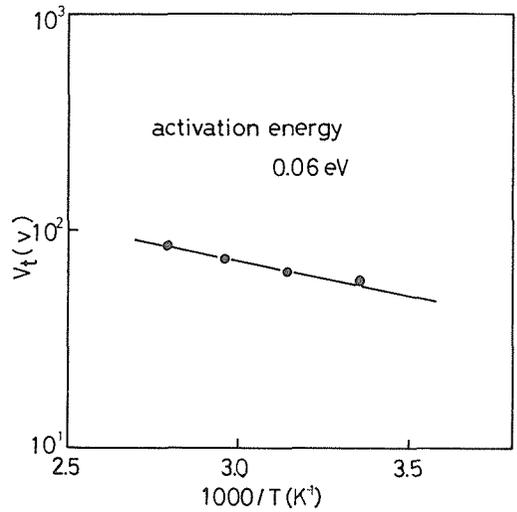


図7 絶縁破壊電圧  $V_t$  の温度依存性

変化させた。温度の上昇につれて、 $V_t$  が增大することが分かる。その活性化エネルギーは 0.06 eV である。

### 3.2 絶縁破壊に伴う発光現象

絶縁破壊に伴う発光の可能性を検討した結果、図2の試料の内側の電極の近傍から微弱な発光が認められた。このような GaAs 半絶縁性基板バルクの絶縁破壊に伴って、発光が観測されたのはこれがはじめてである。発光の積分強度と印加電圧の関係を図8に示す。検出可能な発光が開始する電圧は絶縁破壊のしきい値  $V_t$  とほぼ同じであることが分かった。また、絶縁破壊後の電流の増大に伴って、発光も増大する。

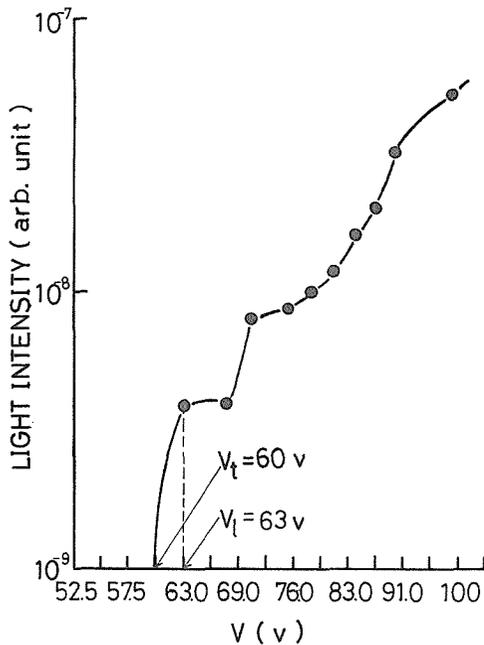


図8 発光の積分強度と印加電圧の関係

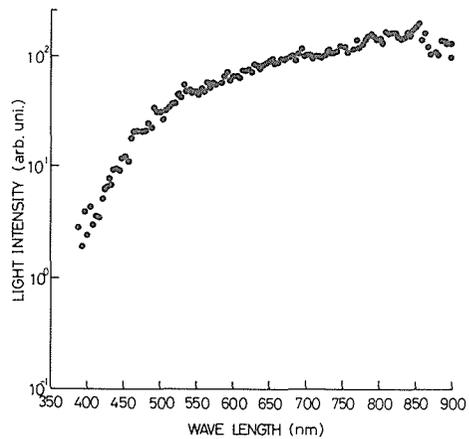


図9 発光のスペクトル分布

この発光の分光特性を図9に示す。この結果からわかるように、この発光のスペクトルは非常にブロードであり、かつ、非常に高いエネルギー成分を含んでいる。

#### 4. 理論的考察

前節で述べた実験結果の特徴をまとめると、次の3つになる。

- (1) ブレークダウン電圧  $V_b$  と基板  $D$  の関係は  $V_b \propto D^{1.6}$  である。
- (2) ブレークダウン電圧  $V_b$  は正の温度係数を持っており、活性化エネルギーは 0.06 eV である。
- (3) ブレークダウンには、非常にブロードな発光が伴う。

以下に、これらの実験結果が、半絶縁性基板の絶縁破壊機構として従来から受け入れられている空間電荷制限電流 (SCLC) 理論で説明できるかをまず考察する。

空間電荷制限電流理論は1956年 Murray A. Lampert により提出された<sup>(1)(2)</sup>。これはそれ以前から実験的に固体絶縁体で認められている図10(a)のような絶縁破壊特性を説明するために提出され

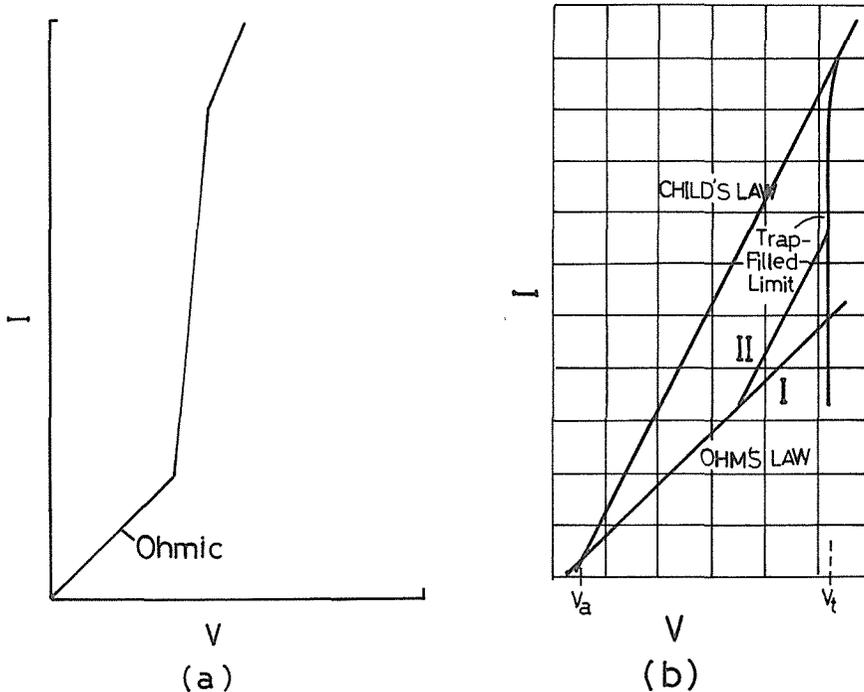


図10 固体絶縁体の一般的な  $I-V$  特性(a)と SCLC モデル(b)

たものである。半絶縁性 GaAs の電流電圧特性も従来この理論あるいは少数キャリアを考慮した修正理論<sup>(3)~(7)</sup>で説明されてきた。SCLC 理論の概略は次の通りである。すなわち、絶縁体にはトラップが分布して存在していると仮定する。簡単のため、ここでは電流の主なる担い手は電子であり、トラップは電子トラップであるとしよう。このとき、擬フェルミ準位とトラップ準位の相対位置関係を考慮した理論解析により、この絶縁体の電流と電圧特性は図10(b)のような三角形の内側に制限されることが導かれる。その三角形を形成する3本の線はそれぞれオーム則 ( $I \propto V$ )、Child 則 ( $I \propto V^2$ ) と空間電荷制限電流線である。オーム則は低電界の場合成り立ち、Child 則はトラップが存在しない固体の特性を表わす。電流が急激に立ち上がる線は絶縁体中の電子トラップが電子により全部埋められたときに対応する。トラップが全部埋められると、トラップがない絶縁体と同じ状況となり、それ以後の特性は Child 則に従うようになる。現実には、電子の擬フェル

ミ準位  $E_{FN}$  がトラップ準位  $E_t$  の上にあるか下にあるかで、トラップのされ方は当然異なる。電子の注入レベルが最初低く、 $E_{FN} < E_t$  であり、注入の増大と共に  $E_{FN} > E_t$  に遷移する場合には、部分的なトラップ占有状態を反映して、図の直線 II の領域があらわれる。直線 II の領域はトラップの深さが浅いほど顕著になることはいうまでもない。いずれにしても、最終的絶縁破壊は、トラップが全部電子で埋められたときに対応する。このように、SCLC 理論の特徴は、絶縁破壊電圧  $V_t$  が、トラップをすべて埋めるための電圧、いわゆる trap-filled limit voltage  $V_{TFL}$  で与えられると考える点にある。この  $V_{TFL}$  と基板の厚さ  $D$  の関係は次式で与えられる。

$$V_t = V_{TFL} = qN_t D^2 / 2\epsilon \quad (1)$$

ここに  $q$  は電荷素量、 $N_t$  はトラップ密度である。

さて、実験と理論の比較を試みると、実験では図 6 のように  $V_t \propto D^{1.6}$  となった。これは式(1)の  $V_t \propto D^2$  と一致してはいないが、定性的に近いとも言える。そこで、式(1)により、図 6 の実験データを使って、トラップ密度を計算すると

$$N_t = 2\epsilon V_t / qD^2 = 4.3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$$

となる。この値は通常に知られている半絶縁性 GaAs 基板のトラップ密度である  $10^{15} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  と  $10^4 \sim 10^5$  倍の差がある。つまり、式(1)は定量的には全く正しくない。さらに、式(1)では、 $V_t$  に温度依存性はないはずであるが、実際には、図 7 に示すように明確な温度依存性が認められた。また、SCLC モデルでは絶縁破壊に発光は伴わないが、実験では図 8、図 9 に示すような特性の発光が認められた。このように、この実験結果は、すべて SCLC モデルと一致しないことがわかる。

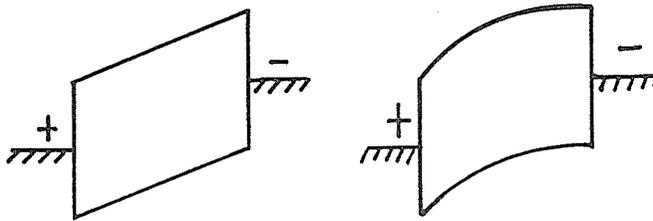


図11 電子注入とバンドの曲がり

図11に、本論文で提案するなだれ破壊モデルを示した。図11(a)は空間電荷のない状態、(b)は電極から注入された電子がトラップされ、空間電荷が生じ、バンドが曲がった状況を示す。すなわち、雪崩降伏モデルは、SCLC モデルと同様に電子の捕獲を考えるが、異なる点は電流の立ち上がる限界の電圧にある。SCLC 理論ではトラップが全部埋められた時、電流が立ち上がるとするが、なだれ降伏モデルでは、図11(b)のようにバンドが曲がって、正電極側の電界が強くなり、その電界がなだれ降伏の臨界電界に達すると、それにより絶縁破壊が起こると考える。このなだれ降伏モデルによれば、すべてトラップが荷電する以前に十分破壊が生じ得ることから、前述のトラップ密度の大きな不一致がさけられる。また、なだれ降伏電圧が正の温度係数をもつことは、pn 接合等によく知られていることである<sup>(8)</sup>。さらに、なだれ破壊に高いエネルギー成分をもつブロードな発光が伴うことも一般的な現象である<sup>(9)</sup>。このように、本論文の実験結果は、新しいなだれ降伏モデルで矛盾なく説明できる。このモデルは、我々のグループが半絶縁性基板の表面絶縁破壊を説明したモデルと類似しており<sup>(10)(11)</sup>、このモデルに表面準位をとり入れることにより、より統一的な絶縁破壊理論を展開できる可能性がある。現在、そのような方向でこのモデルの定量化を検

討中である。

#### 参考文献

- 1) M. A. Lampert, Phys. Rev., Vol. 10, pp. 1648 (1956)
- 2) M. A. Lampert, Proc. IRE, Vol. 50, pp. 1781 (1962)
- 3) R. W. Haisty and P. L. Hoyt, Solid-state Electron., Vol. 10, pp. 795 (1967)
- 4) M. Ilegems and H. J. Queisser, Phys. Rev. B12, 1443 (1975)
- 5) H. Okushi, J. Appl. Phys. 48, 5311 (1977)
- 6) K. Kitkhara, K. Nakai, A. Shibatomi and S. Ohkawa, Appl. Phys. Lett., Vol. 32, pp. 260 (1978)
- 7) J. Jimenez-Lopez, J. Bonnafe, and J. P. Fillard J. Appl. Phys. 50 (2), 1150, 1979
- 8) C. R. Crowell and S. M. Sze, Appl. Phys. Lett. 9, 242, 1966
- 9) H. Adachi and H. L. Hartnagel J. Vac. Sci. Technol., 19 (3), 427, 1981
- 10) H. Hasegawa, T. Kitagawa, T. Sawada, and H. Ohno, Electron. Lett. Vol. 20, pp. 561 (1984)
- 11) H. Hasegawa, T. Kitagawa, T. Sawada, and H. Ohno, Inst. Phys. Conf. Ser. Vol. 74, pp. 521 (1985)