

ツェナーと衝突イオン化による シリコン p^+n 接合のなだれ降伏

Avalanche Breakdown of Silicon pn Junctions by the Cooperation of Zener Effect and Impact Ionization

右 高 正 俊*
Masatoshi Migitaka

要 旨

なだれ降伏は、これによる電流の遅れ特性を利用して、マイクロ波の発振を行なうなだれダイオードや、その定電圧特性を利用した定電圧ダイオードに利用されている。この衝突イオン化に伴うなだれ降伏はもう一つの降伏機構であるツェナー効果に影響される。本報は、ツェナーと衝突イオン化の両効果が関与するなだれ降伏を、合金形シリコン p^+n 接合について実験的に検討した結果である。キャリアの衝突イオン化によって鋭い降伏が起きるが、これは結晶欠陥に影響されやすく、不規則な不安定な降伏特性となる。ツェナー効果は結晶欠陥に影響されにくいため、キャリアは接合一面に注入される。したがってツェナー効果によって注入されたキャリアの衝突イオン化によりなだれ降伏をする降伏電圧約 5~10V の試料では、降伏現象は接合全面に一樣に起こり、降伏に伴う電流の立上りは急峻(しゅん)で、ダイオードの交流直列抵抗は小さくなり、素子が永久破壊されにくく、しかも低雑音で、降伏電圧の温度変化が小さくなる。

1. 緒 言

半導体接合の降伏現象は、定電圧ダイオード(ツェナーダイオード)⁽¹⁾として電圧の安定化、標準電圧の発生に広く利用されているが、最近になって、この現象がなだれダイオード(インパットダイオード)⁽²⁾として、マイクロ波、ミリメートル波の発生に利用されるようになってきている。この降伏現象には、ツェナー効果⁽³⁾⁽⁴⁾または衝突イオン化⁽⁵⁾による電流増大が原因となっている。そして、ツェナー効果は降伏電圧の低い狭い接合で主となり、衝突イオン化は降伏電圧の高い幅の広い接合で主となっている。降伏現象については多くの研究がなされているが^{(6)~(14)}、いずれも降伏電圧の極端に高いまたは低い素子についての研究が多く、一方の原因のみを単独に考えればよい場合が大部分である。

本論文は、中庸の降伏電圧をもつ試料について、上記二つの原因の相互作用による降伏現象を実験結果を中心にして検討したもので、以下に述べるのが要点となっている。

降伏電圧 5V 以下の試料では、降伏特性は柔らかであるが、降伏現象が接合中の欠陥に鈍感であるため、降伏電流は接合全面に一樣に流れやすい。この場合、降伏電圧の温度依存性は負である。降伏電圧 10V 以上の試料では、降伏電流が接合全面に流れる場合には、鋭い降伏特性を示すが、降伏現象が接合の欠陥に敏感なため電流は一樣に流れにくく降伏特性は不規則で雑音が多い。この場合、降伏電圧の温度依存性は正である。これらに対して、降伏電圧 5~10V の範囲にある試料では、降伏特性が接合の欠陥に鈍感で、しかも電圧-電流特性の鋭い規則的な降伏現象が起こり、雑音も少ない。これらの試料では、降伏電圧の温度依存性は小さいが、個々の試料の降伏電圧、測定時の接合電流によって正から負に変化する。

2. 実 験 方 法

実験に用いたシリコン p^+n 接合は、比抵抗 0.008~0.2 Ωcm の N 形シリコン単結晶の(111)面に、直径 0.2mm のアルミニウム線を合金化して作った階段形接合で、比抵抗によってほぼ決まる種々の降伏電圧をもつ試料を多数作った。試料は、接合を作ってからその周辺部を化学溶液で一部除去して完全な接合のみ持つようにした。種種の N 形シリコン単結晶よりそれぞれ 1~2 枚のウェーハを切り出し、四点法で各ウェーハの比抵抗を測定したのち、さらにウェーハ

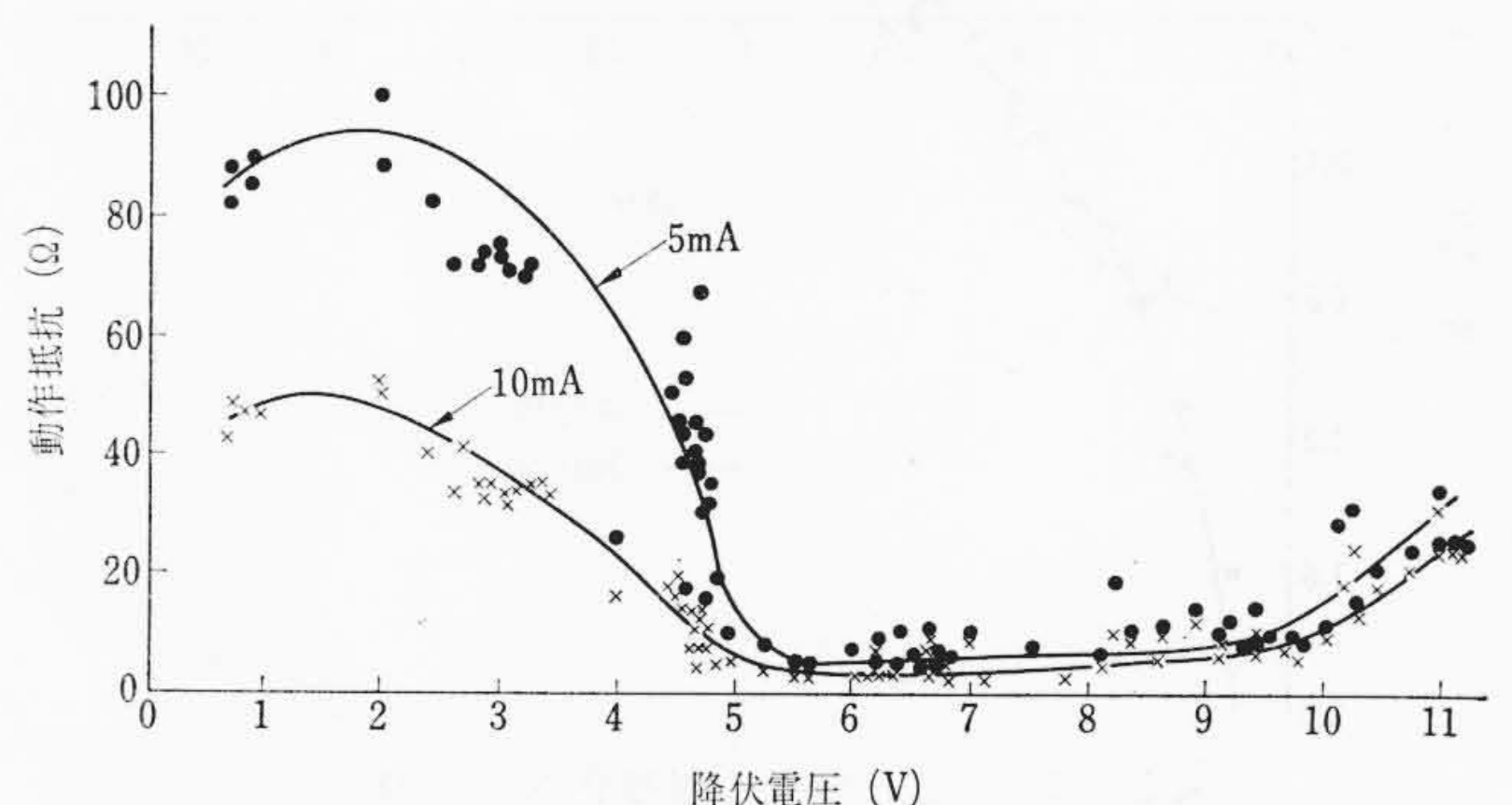


図1 シリコン p^+n 接合の降伏電圧と動作抵抗の関係

を小さなペレットに切断した。したがって、1枚のウェーハより、ほぼ同様の性質をもった試料を 20 個以上作ることができた。

降伏電圧としては、あらかじめ較正したカーブトレーサを用い、本報では特記しない限り電流密度 10 mA/mm² で測定した。また光を当てて降伏状態で接合周辺部からキャリアの注入を行ない、キャリアの増倍係数を測定した。さらに、試料をガラス張りの箱の中に入れ、不活性ガスで加熱しながら光を照射して、キャリア増倍の温度依存性を調べた。

3. 実 験 結 果

3.1 V-I 特 性

図1は、種々の降伏電圧をもつ試料について、降伏状態における V-I 曲線の動作抵抗を測定した結果を示したものである。ここで、動作抵抗とはある特定の接合電流値(図では 5 mA, 10 mA)で V-I 曲線に引いた接線のこう配から決まる交流直列抵抗である。図1から、この動作抵抗は接合電流によって変化し、降伏電圧 5~10V の試料では小さく、その中で最小値が現われるのは降伏電圧約 6V の試料であることがわかる。

3.2 化学エッチングによる V-I 特性の変化

合金形 p^+n 接合では、欠陥は接合の周辺部にできやすい⁽¹⁵⁾ので、これら欠陥を化学エッチングによって除去し、降伏特性の変化を調べた。

降伏電圧 5V 以下の試料では、化学エッチングによって接合の周辺部を除去しても、降伏特性にはほとんど変化はみられなかった。これに対し、降伏電圧 10V 以上の試料では、図2の試料(T-10)の

* 日立製作所中央研究所 工学博士

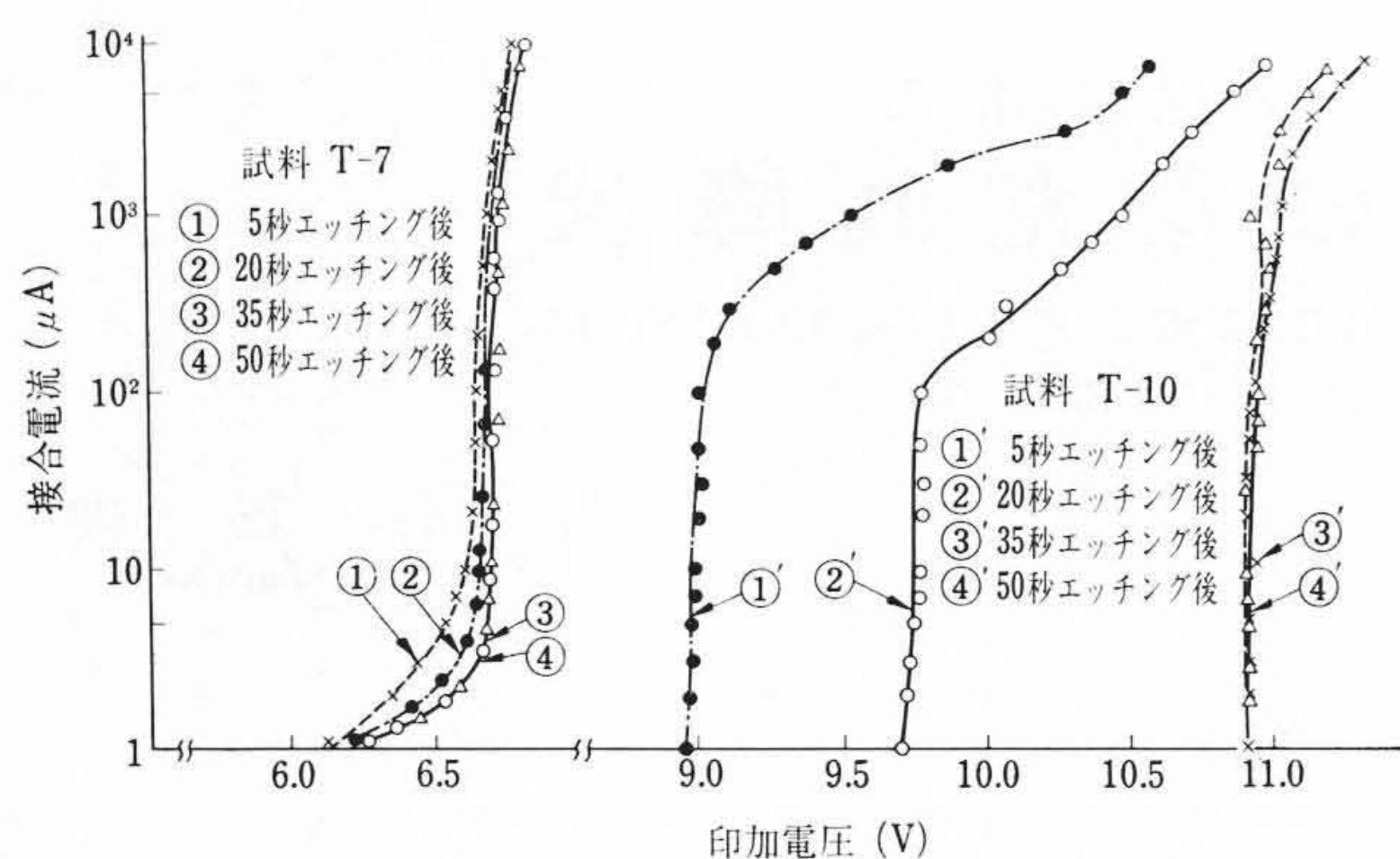


図2 化学エッチングによる降伏特性の変化

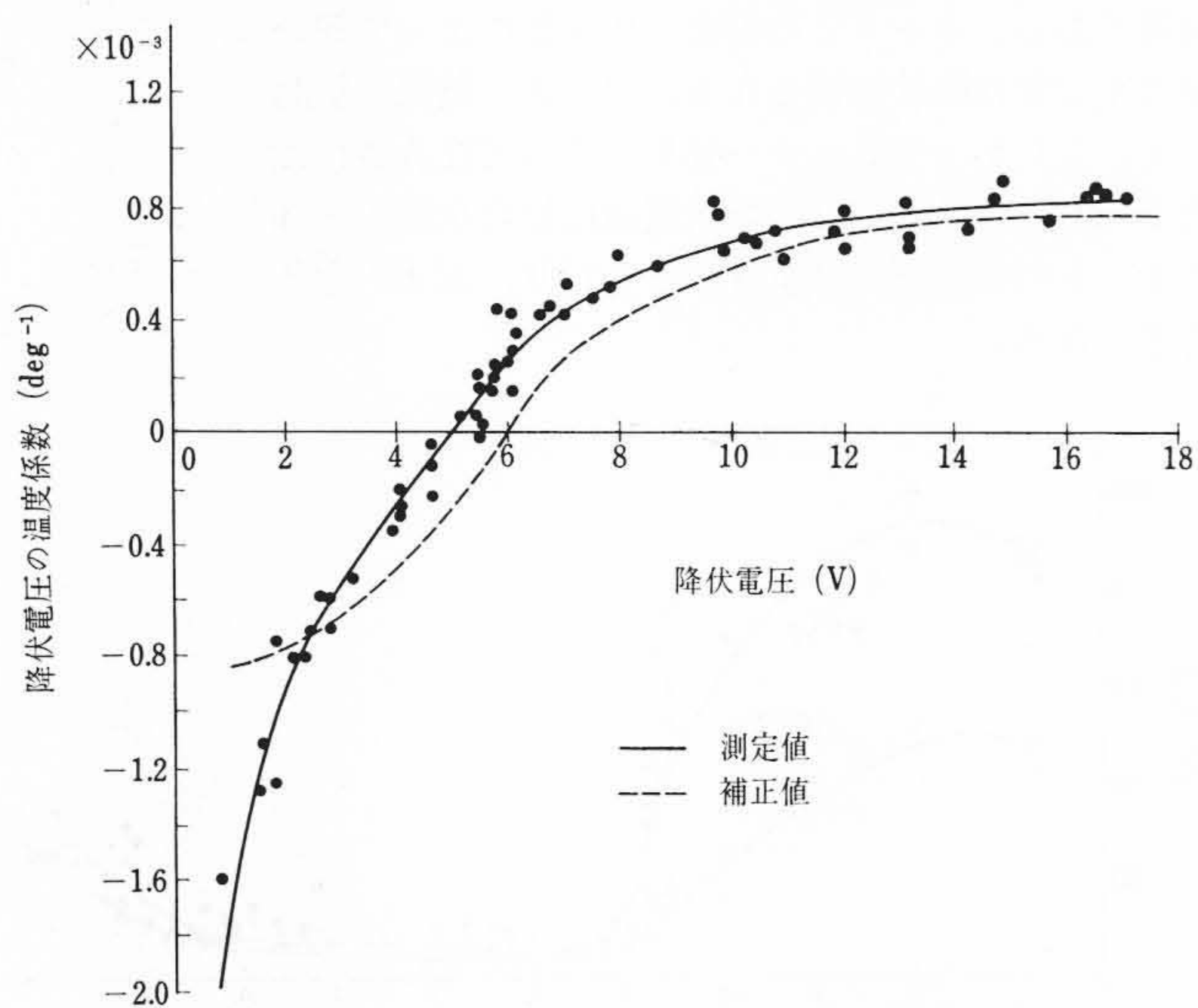


図3 降伏電圧とその温度係数との関係

ように、化学エッチングの各段階で降伏特性の著しい変化がみられた。さらに、降伏電圧5~10Vの試料では、図2の試料(T-7)に示すように最初から降伏特性は鋭く、化学エッチングの各段階でその特性の変化はわずかであった。

3.3 降伏電圧の温度係数

降伏電圧の温度変化を1~17Vの降伏電圧をもつ種々の試料について調べた。図3は降伏電圧の温度係数と降伏電圧の関係を示したものである。ここで、温度係数 β は次式のように定義されるものである。

$$\beta = \frac{\partial V_B(T_0)}{\partial T} / V_B(T_0) \dots \dots \dots (1)$$

(1)式で、 $V_B(T_0)$ は常温(T_0)で接合電流 $2.5 \sim 10^2 \text{ mA/mm}^2$ のときの試料の降伏電圧である。

温度係数は、降伏電圧10V以上の試料で約 $8.0 \times 10^{-4} \text{ deg}^{-1}$ に近づくことが図3からわかる。この係数の値はすでに報告されている $8.8 \sim 8.9 \times 10^{-4} \text{ deg}^{-1(5)}$ に近い。温度係数は降伏電圧5V付近の試料で非常に小さくなり、5V以下の試料では負の値をもつようになる。降伏電圧の低い試料では、約1Vのp+n接合の拡散電位を考慮しなければならない。図3の点線は拡散電位を考慮して降伏電圧の温度係数を計算し直したものである。このようにすると、温度係数が降伏電圧3V以下の試料で $-8.5 \times 10^{-4} \text{ deg}^{-1}$ に近づくようになる。

3.4 接合電流と降伏電圧の温度変化率

$\partial V / \partial T$ を降伏電圧の温度変化率と定義して、試料の降伏電圧に対してプロットすると図4のようになる。図4の曲線1は接合電流密度を $5 \times 10^2 \text{ mA/mm}^2$ として降伏電圧を測定した場合の結果を示し、曲線2は接合電流密度 10 mA/mm^2 の場合のものである。図4

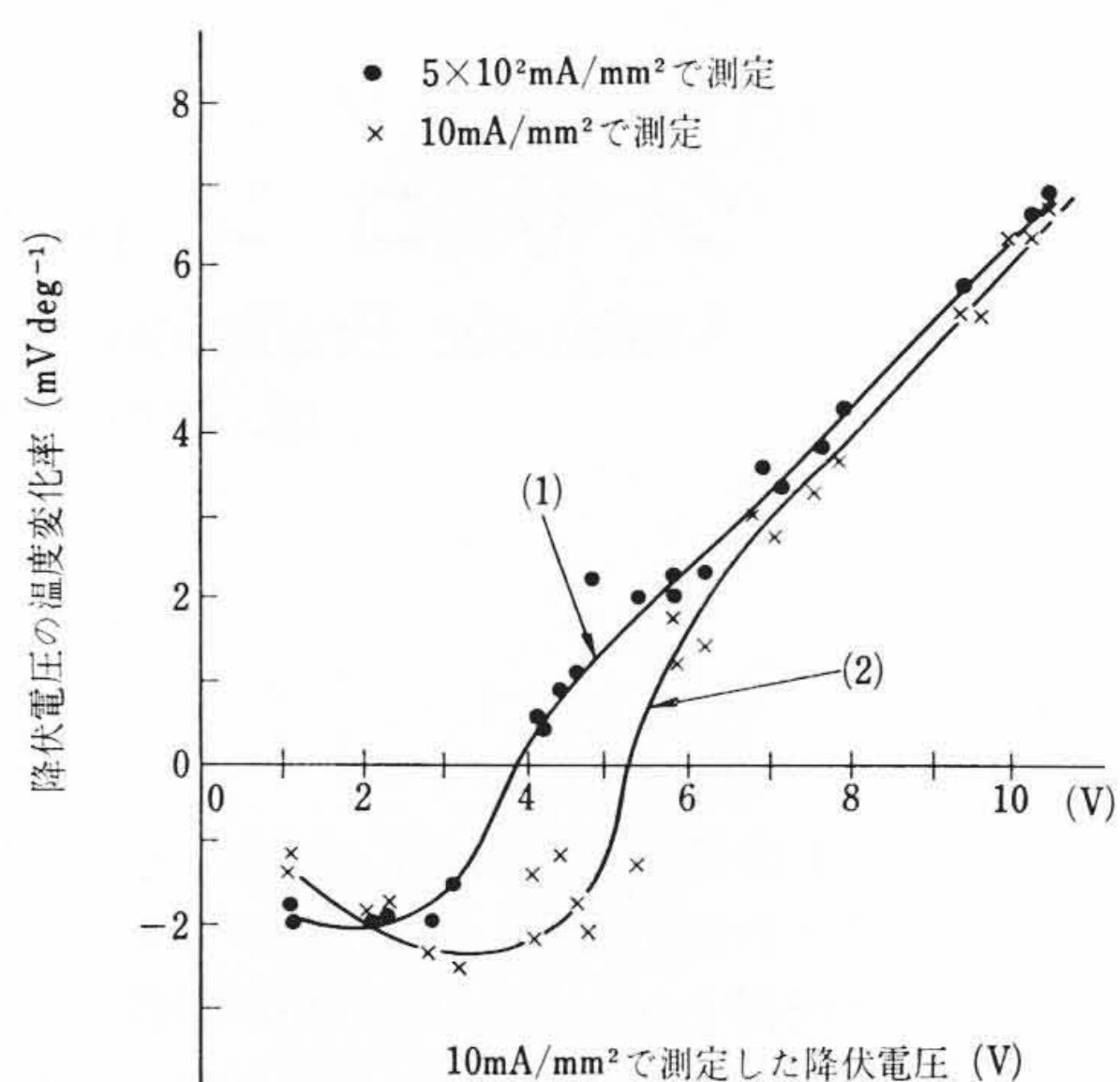


図4 種々の降伏電圧をもつ試料について測定した降伏電圧とその温度変化率

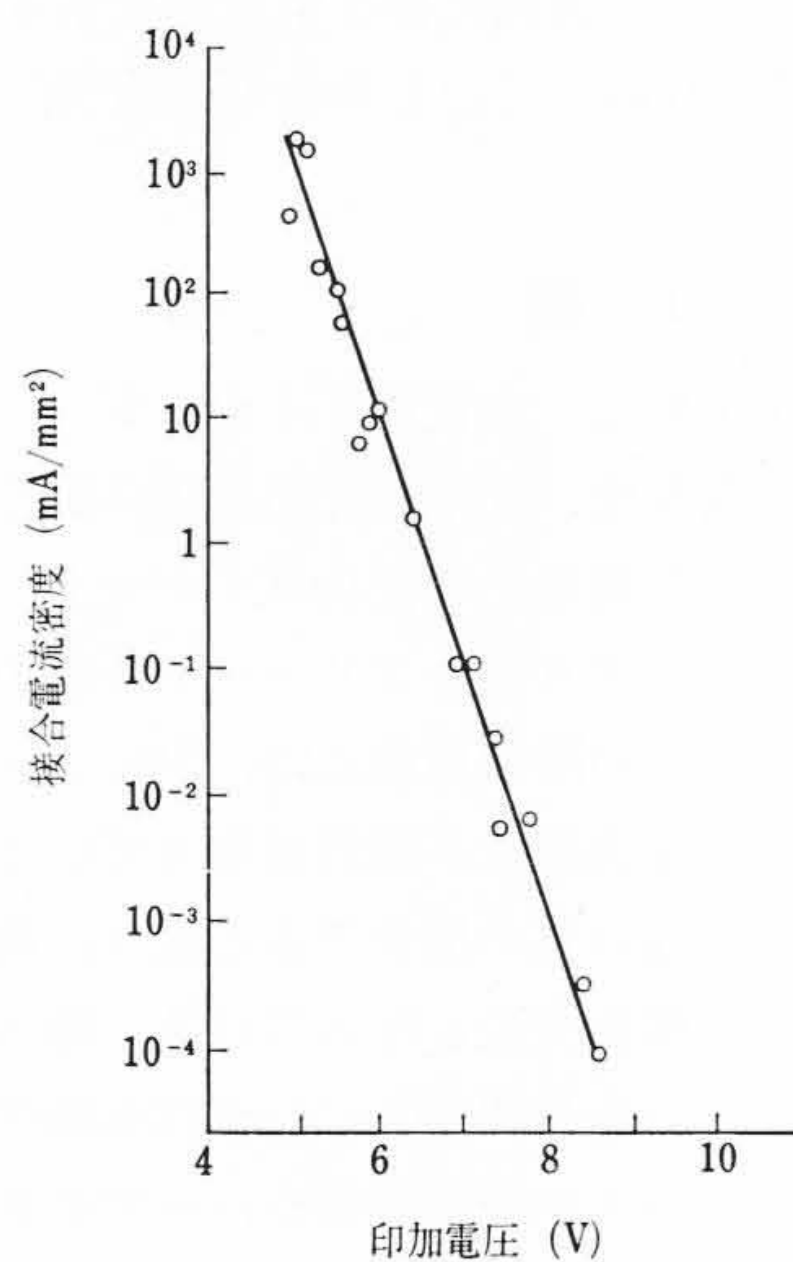


図5 印加電圧と温度変化がゼロとなる接合電流密度との関係

から、降伏電圧約4.5Vの試料では、温度変化率が接合電流によって著しく変化するが、降伏電圧が4.5Vより離れるに従ってこの変化は小さくなることがわかる。さらに、図4から、降伏電圧が4.5V近くの試料では、接合電流を適当に調節して降伏電圧の温度変化をゼロとなしうることがわかる。実験ではこの調節は5~9Vの降伏電圧をもつ試料で容易に行なうことができた。図5はこの結果を示し、印加電圧の温度変化がゼロとなったときの接合電流と、そのときの印加電圧の関係を、種々の降伏電圧をもつ試料について調べたものである。図5より、このような方法で求めた印加電圧(V_a)と接合電流密度(J_0)の間には簡単な関係があり、次のように表わすことができる。

$$J_0 = 10^{13} \exp(-4.7V_a) \dots \dots \dots (2)$$

この関係は電流密度 $10^{-4} \sim 10^3$ の応用範囲にわたって成立する。

3.5 イオン化率の温度依存性

キャリアの増倍率(M)は次のように書くことができる。

$$M = \frac{1}{1 - \alpha W} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 α はイオン化率すなわち、電界の方向にキャリアが1cm移動するとき作られる電子-正孔対の数を表わし、 W は有効障壁層厚さである。試料への印加電圧が一定のとき、有効障壁層厚さは一定であるから、(3)式を温度(T)で偏微分すると、

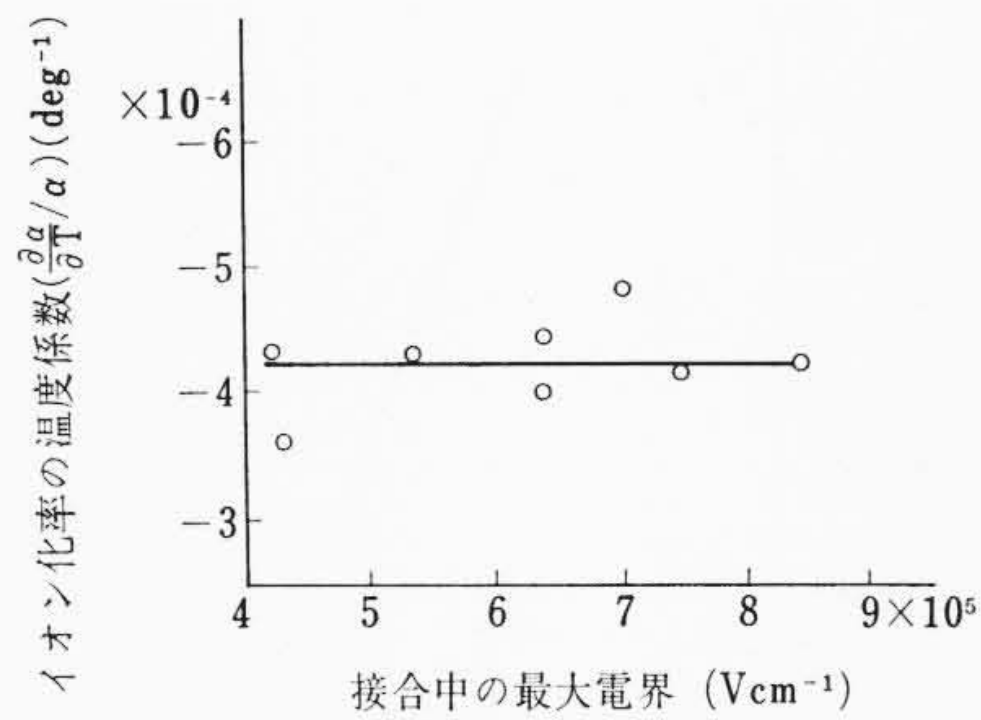


図6 接合中の最大電界とイオン化率の温度係数との関係

$$\frac{\partial \alpha / \partial T}{\alpha} = \frac{\partial M / \partial T}{M(M-1)} \dots\dots\dots (4)$$

となる。

イオン化率の温度係数 ($=(\partial \alpha / \partial T) / \alpha$) を、10~50V の種々の降伏電圧をもった試料について求めた。この場合、 $\partial M / \partial T$ は M の常温と 100°C の平均の変化率に等しいと仮定した。図6は、このようにして求めた $(\partial \alpha / \partial T) \alpha$ の値と、各試料の測定時の接合内最大電界の関係を示すものである。図より、イオン化率の温度係数は電界によらずほぼ一定のことがわかる。

3.6 試料を流れる電流の雑音波形

種々の試料に光を当てたり、加熱したり、冷却したりして、試料を流れる接合電流の雑音波形の様子をシンクロスコープで観察した。観察の結果、この雑音波形は2種類に分類できることがわかった。一つは約9Vの降伏電圧をもつ試料を22°Cにしたとき観察されるもので、図7によって代表することができる。もう一つは、降伏電圧約11Vの試料を22°Cにしたとき観察されるもので、図8によって代表できるものである。図7の雑音波形は多種類の鋸歯(きょし)状波の重畳したものとみなすことができ、図8の波形は一種の方形波とみなすことができる。図9は降伏電圧約9Vの試料を-70°Cにしたときみられる雑音波形を示し、図10は降伏電圧11Vの試料を200°Cとしたとき観察される雑音波形を示すものである。この場合、試料の雑音波形は図9の場合には図7型から図8型に変わり、図10の場合には逆に図8型から図7型に変わっている。しかし、降伏電圧9V以下の試料を200°Cに加熱したり、降伏電圧10V以上の試料を液体窒素温度に冷却したときには、顕著な変化はいずれの試料でもみられなかった。図8に示す雑音波形は、図7に示すものより一般に大きく、接合電流100 μ A~2 mAのときいちばん大きくなる。

雑音波形の変化は降伏電圧10V以上の試料に光を当てても起こることがわかった。図11は図8に示した試料を60Wの白熱電燈で10cm離れた所から照射したときの雑音波形である。このときには、雑音波形が図8に示したグループより図7のグループに変化したことがわかる。

4. 結果の検討

ツェナー効果による降伏の場合には、接合電流 I_t は次のように表わされる⁽¹¹⁾。

$$I_t = A V_a^p E^q \exp(-\alpha_I E_G^{3/2} E^{-1}) \dots\dots\dots (5)$$

$$\alpha_I = \frac{4\pi(2m^*)^{1/2}}{3e\hbar} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 A は定数、 m^* は電子の有効質量、 V_a は試料の印加電圧、 $-e$ は電子の電荷、 E は接合中の電界強度、 $\hbar = h/2\pi$ (h = プランク定数)、 E_G は半導体のエネルギー間げき、そして、 p, q は $p \sim 1, q = 1 \sim 3$ の定数である。

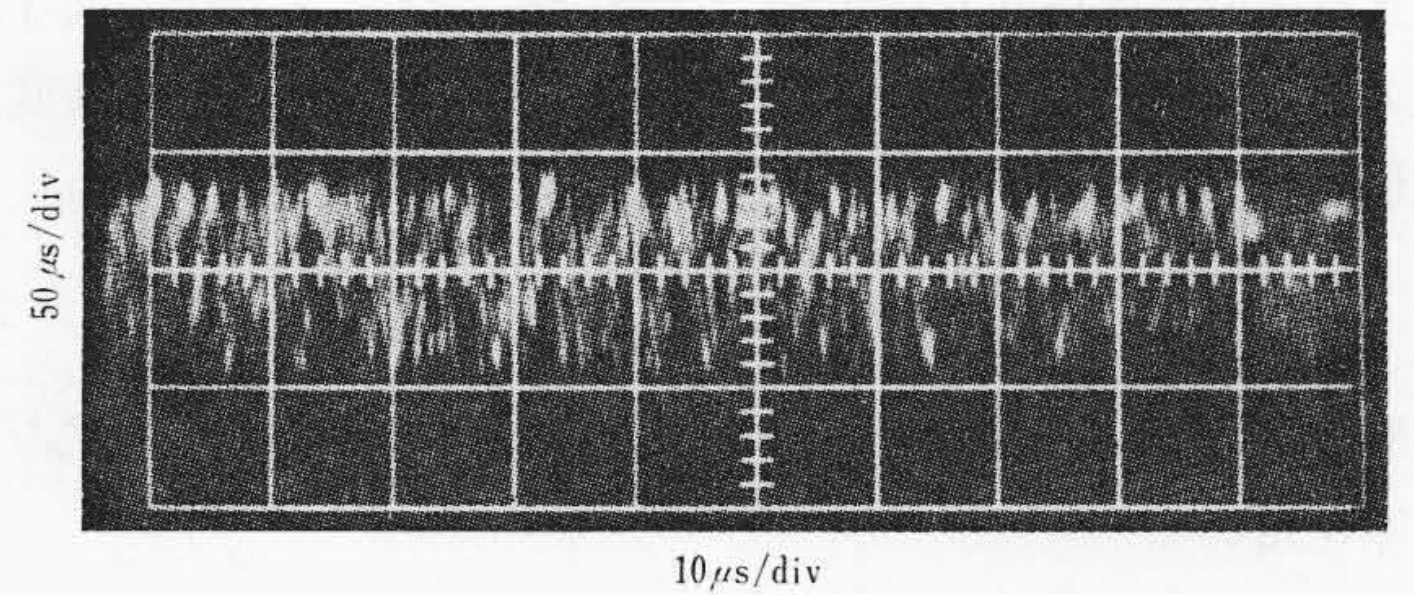


図7 降伏電圧約9Vの試料で観察されたマイクロプラズマ雑音波形(22°Cで測定)

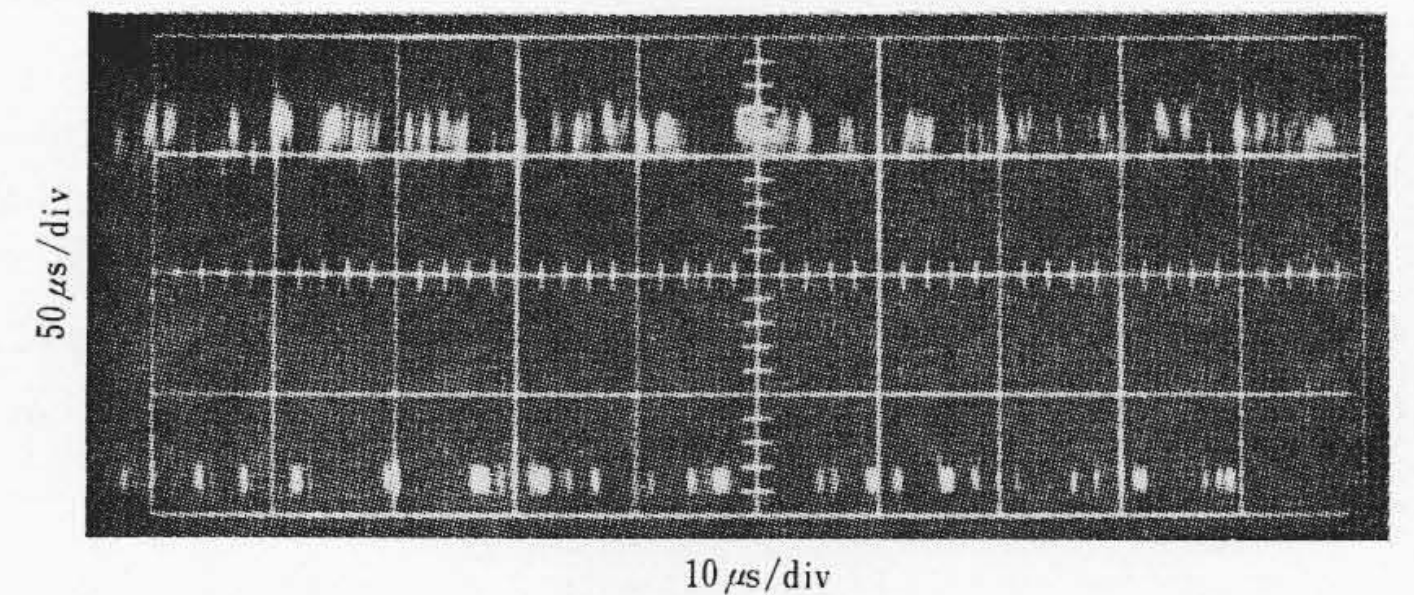


図8 降伏電圧約11Vの試料で観察されたマイクロプラズマ雑音波形(22°Cで測定)

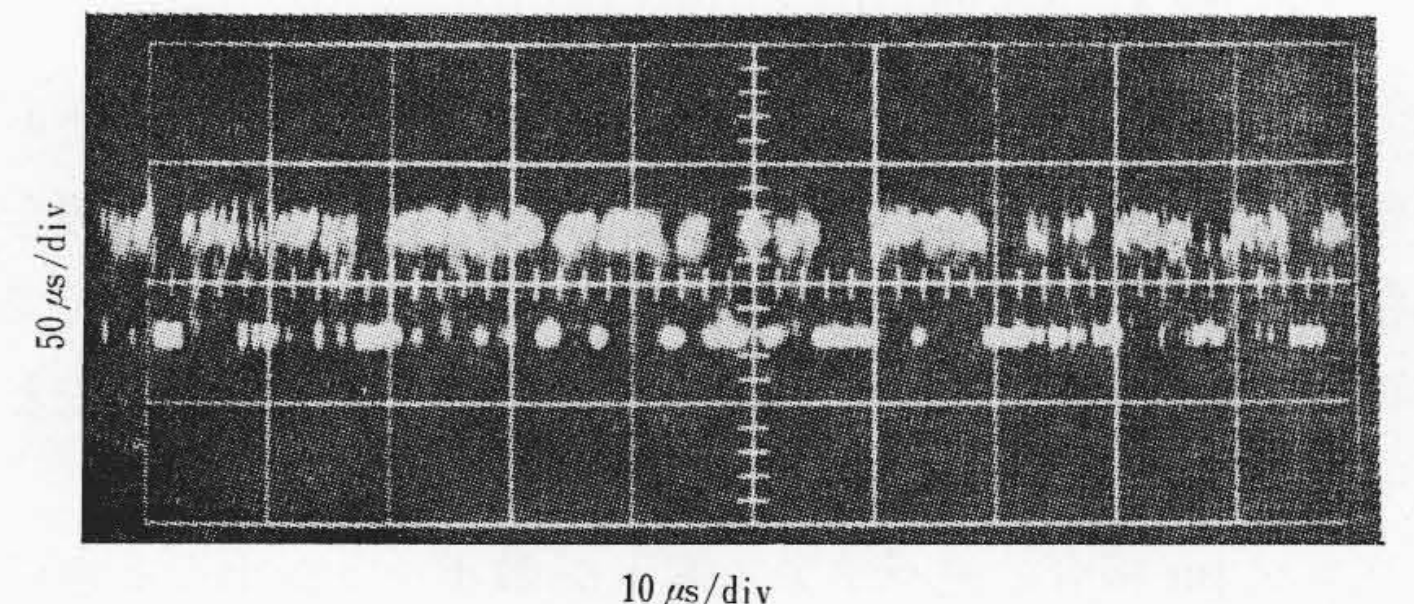


図9 降伏電圧約9Vの試料で観察されたマイクロプラズマ雑音波形(-70°Cで測定)

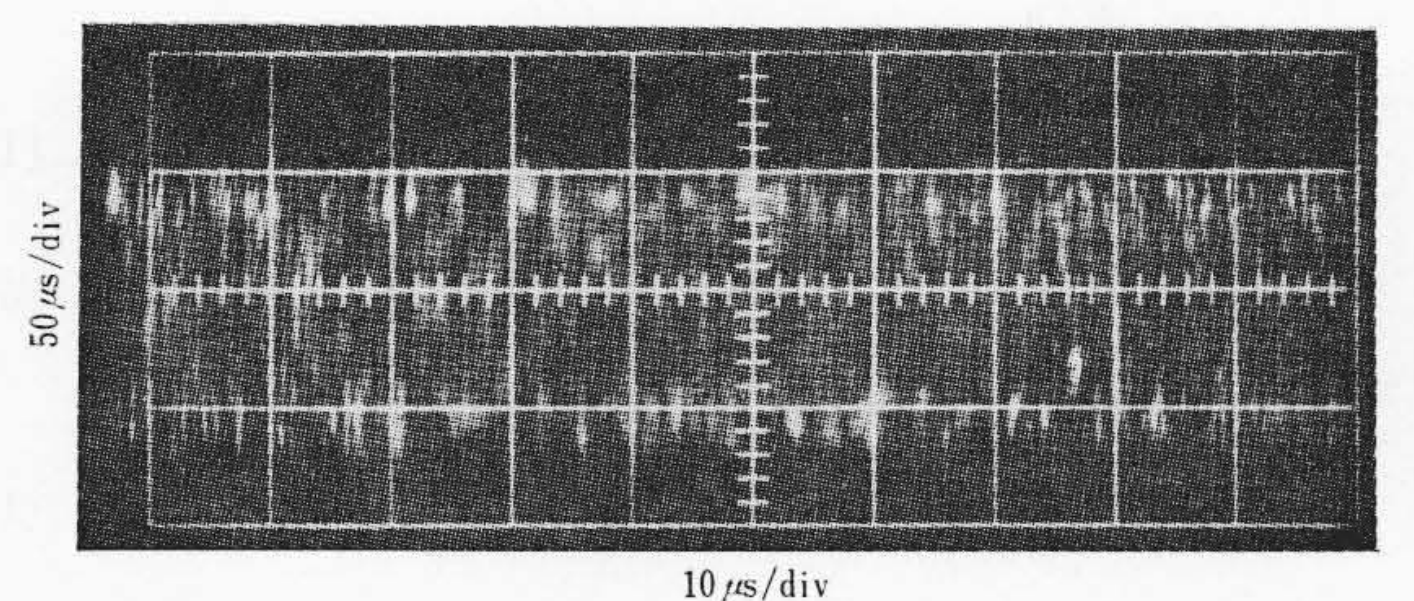


図10 降伏電圧約11Vの試料で観察されたマイクロプラズマ雑音波形(200°Cで測定)

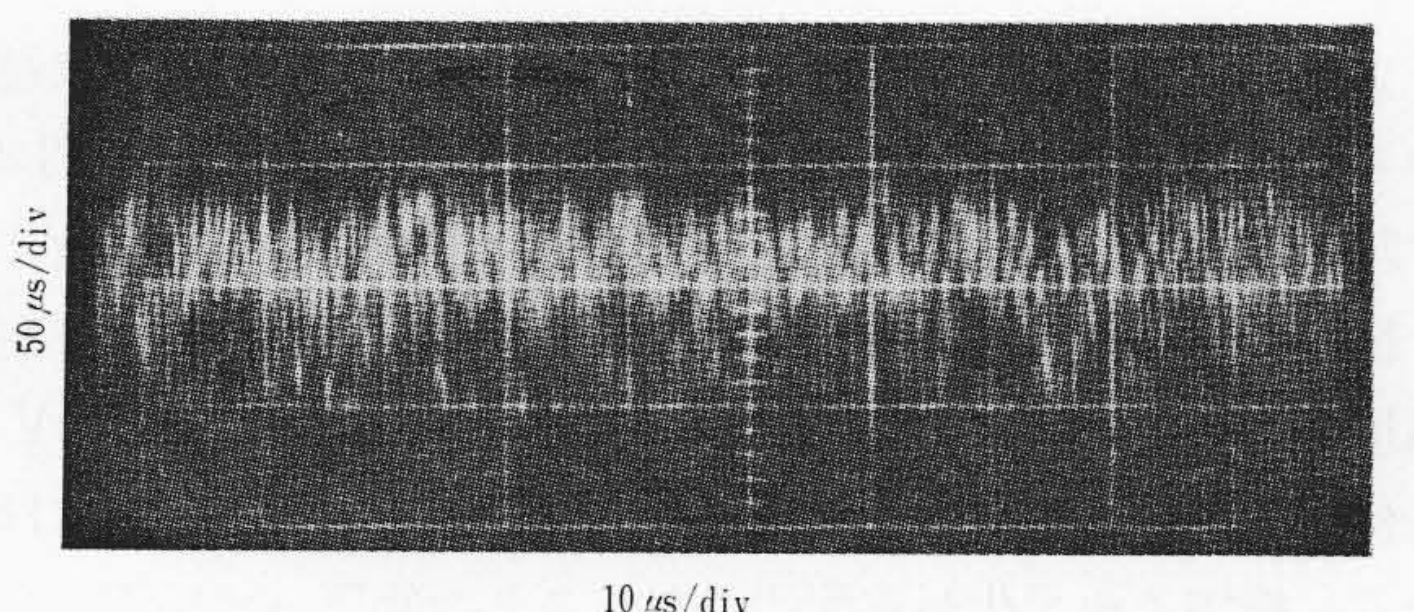


図11 降伏電圧約11Vの試料を10cm離れた所より白熱電燈で照射したときに観測されるマイクロプラズマ雑音波形

降伏電圧の温度係数を一定接合電流で測定するときは、図3におけるように $\partial I_t / \partial T = 0$ となる。(5)式の指数項以外の項の温度変化を無視し、温度(T)で(5)式を偏微分すると次式が得られる。

$$\frac{\partial(\alpha_I E_G^{3/2} E^{-1})}{\partial T} = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

N形層中のキャリア濃度の温度変化を無視すれば、 $E_M \propto V_B^{1/2}$ (16) の関係を用いて

$$\frac{\partial V_B / \partial T}{V_B} = \beta = 3 \frac{\partial E_G / \partial T}{E_G} \quad \dots\dots\dots (8)$$

が導かれる。ここで、 E_M は接合中の最大電界、 V_B は降伏電圧と拡散電位の和である。シリコン半導体の場合、常温で $E_G = 1.03 \text{ eV}$, $\partial E_G / \partial T = -3 \times 10^{-4} \text{ eV deg}^{-1}$ (17) であるから、降伏電圧の温度係数 β は次のように表わされる。

$$\beta = -8.7 \times 10^{-4} (\text{deg}^{-1}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

この値は、図3に示すように、3V以下の降伏電圧をもった試料の降伏電圧の温度係数にきわめて近い。これらの試料では、キャリアの光増倍現象、マイクロプラズマ雑音のいずれも観察されていない⁽²⁰⁾。したがって、3V以下の降伏電圧をもつ試料では、降伏現象はツェナー効果のみによると考えることができる。

降伏現象が衝突イオン化によって起こると考えられる場合には、接合電流密度(J)は

$$J = M \int_0^W e U dx \quad \dots\dots\dots (10)$$

と書くことができる。ここで、 W は接合障壁層の厚さ、 e はキャリアの電荷、 M はキャリアの増倍率、 U は降伏前単位時間、接合の単位体積中に発生されるキャリア数である。シリコンpn接合では発生一再結合電流が飽和電流よりずっと多いので⁽¹⁸⁾、 U は主として発生一再結合によって生ずるキャリアに支配される。

シリコンpn接合の逆バイアス電圧が数ボルト以上のときには、 U は接合中で一定で $n_i / (2T_0)$ に等しい。ここで、 n_i はシリコン真性半導体のキャリア濃度、 T_0 はキャリアの寿命時間である。したがって、

$$J = \frac{M W e n_i}{2 T_0} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$n_i = 2 \left(\frac{2\pi m k}{h^2} \right)^{3/2} T^{3/2} \exp(-E_G / 2kT) \quad \dots\dots\dots (12)$$

キャリアの寿命時間の温度依存性が少なく、接合電流一定の場合、(11)式を T で偏微分し、 $W^2 \propto W_B$ の関係を用いると

$$\beta = -2 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T} \right) / \alpha - (3/T + E_G / kT^2) / (M \alpha W) \quad \dots\dots\dots (13)$$

を得る。ここで、常温では、 $E_G / kT^2 \simeq 10^{-11} (\text{deg}^{-1})$, $3/T \simeq 10^{-2} (\text{deg}^{-1})$ 。なだれ降伏の場合、 $\alpha W \simeq 1$ で M はじゅうぶん大きいから、(13)式の第3項は省略できる。そこで、 β は簡単になり、

$$\beta = -2 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T} \right) / \alpha \quad \dots\dots\dots (14)$$

図6よりわかるように、イオン化率の温度係数 $\frac{\partial \alpha}{\partial T} / \alpha$ は最大電界の $4 \sim 9 \times 10^5 \text{ V cm}^{-1}$ にわたってほとんど変化せず、 $-4.3 \times 10^{-4} \text{ deg}^{-1}$ に等しい。したがって、(14)式より $\beta = 8.6 \times 10^{-4} \text{ deg}^{-1}$ となり、図3で示すように、10V以上の降伏電圧をもつ試料で測定された温度係数の値 $8.0 \times 10^{-4} \text{ deg}^{-1}$ に非常に近い。これは、10V以上の降伏電圧をもつ試料の降伏現象にはツェナー効果の影響はほとんどなく、衝突イオン化が支配的であることを物語っている。

(10)式の U がツェナー効果のみで決まるときには、(10)式の積分の項に(5)式を代入して次式を得る。

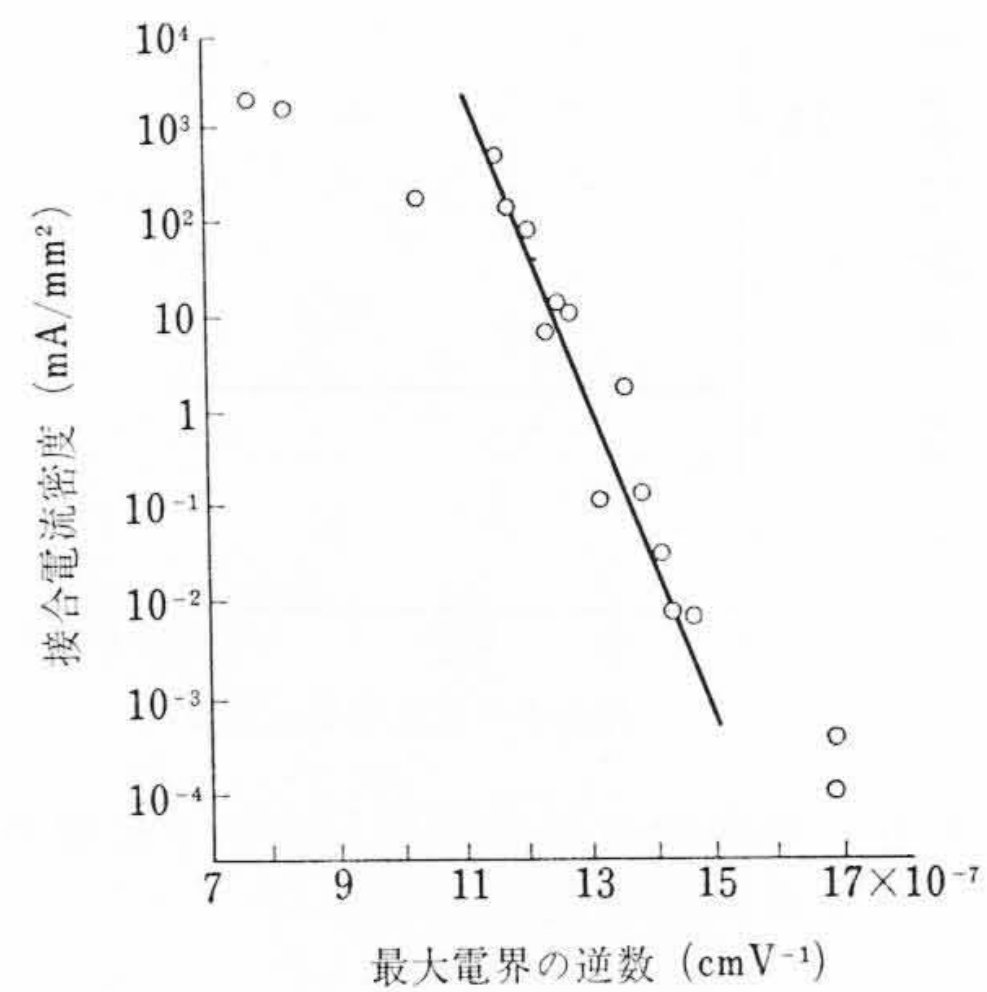


図12 接合中の最大電界の逆数と降伏電圧の温度変化がゼロとなる接合電流密度の関係

$$J = \frac{C V_a^p E^q \exp(-\alpha_I E_G^{3/2} E^{-1})}{1 - \alpha W_{\text{eff}}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 C は常数である。したがって、印加電圧の温度係数がゼロとなる接合電流密度(J_0)は、(15)式を温度(T)で偏微分することによって次式のように表わすことができる。

$$\log J_0 = D + \log \left\{ V_a^p E^{q-1} \left(\frac{-\partial \alpha}{\partial T} \right)^{-1}_{V_a=\text{const}} W_{\text{eff}}^{-1} \right\} + (-\alpha_I E_G^{3/2} E^{-1}) \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここで、 D は常数である。(16)式で電界(E)による第2項の変化は第3項より小さいので、 $\log J_0$ は E^{-1} にほぼ比例する。

図5の印加電圧から各試料の電界の逆数を計算し、電界の逆数と図5に示す接合電流密度との関係を求めると図12のようになる。電流密度 $10^3 \sim 10^{-2} (\text{mA/mm}^2)$ の範囲では各測定点はよく直線に乗っており、そのこう配は $3.9 \times 10^7 \text{ V cm}^{-1}$ である。この値は $\alpha_I E^{3/2}$ の理論値⁽¹¹⁾ $4.8 \times 10^7 \text{ V cm}^{-1}$ に近い。これより、降伏電圧5~9Vの試料ではツェナー効果によって接合に注入されたキャリアの衝突イオン化によってなだれ降伏が起こっていると結論される。

図5、12の測定点は印加電圧の温度変化に対して衝突イオン化の効果とツェナー効果がお互いに等しい点である。したがって、図5で求めた直線の左下側の領域にあたる状態では、ツェナー効果による電流が接合電流の大部分を占めていると考えられ、直線の上右側の領域では衝突イオン化による接合電流が大部分を占めていると考えられる。

3.2で述べたように、降伏電圧5V以下の試料では化学エッチングによって降伏特性が影響されにくい。降伏電圧3V以下の試料では、pn接合の境界にそって赤味がかった発光が一樣にみられる⁽¹⁹⁾。したがって、降伏電圧の低い試料ではツェナー効果がおもな役割を果たし、降伏現象は接合内の欠陥に鈍感で、降伏電流は接合全面に一樣に流れるものと思われる。しかし、降伏電圧10V以上の試料では、化学エッチングで接合周辺の欠陥を除去するとV-I特性が変化した。さらに、このような試料では赤色スポット状の発光がマイクロプラズマ雑音源と考えられる接合の端または周辺部で観察され⁽¹⁹⁾、永久破壊が起こりやすい。このことは、衝突イオン化によるなだれ降伏は接合の欠陥に左右されやすいので、降伏電流が接合の特定の個所に容易に集中するとすれば理解できよう。

図7~11に示した種々の条件の下で得られた電流雑音波形は、図7,8に代表されるような二つの型に分類することができた。そして、図7で代表される雑音波形は光、温度、ツェナー効果などによって衝突イオン化のための種キャリアが多量に接合に注入される場合に観測された。これに対し、図8で代表される雑音波形はなだれ

降伏が起こる直前に接合内に存在する種キャリアが少ない場合に観測された。これより、常温では、降伏電圧約 9V の試料では大部分の種キャリアがツェナー効果によって供給されるが、降伏電圧約 11 V の試料ではほとんどツェナー効果による寄与がないと考えることができる。

降伏電圧 5~10V の試料では、キャリアの増倍率は接合面のあらゆる点でほぼ等しく⁽¹⁹⁾、図 2 に示したように化学エッチングによって降伏特性がほとんど変化しない。これは、大部分の種キャリアがツェナー効果によって接合全面に様に注入される場合には、様ななだれ降伏が起こることを物語っている。このため、この種の試料では降伏特性が鋭く、したがって図 1 に示すように V-I 特性の電流立上り部分の交流動作抵抗が小さくなるものと考えられる。

5. 結 言

N 形シリコンにアルミニウム線を合金化して作った p⁺n 接合について降伏特性を調べた結果以下のことがわかった。

降伏電圧 5~10V の試料ではツェナー効果によって注入された種キャリアの衝突イオン化によってなだれ降伏が起こる。ツェナー効果が関与しないなだれ降伏では、接合中の特定個所に電流が不規則に集中しやすい傾向があるが、電流が一様に接合を流れるように降伏が起これば降伏特性は鋭くなる。ツェナー効果のみで降伏が起こる場合、電流は接合面全面に一様に流れやすいが、一様に流れても降伏特性は柔らかくなってしまふ。ツェナー効果によって接合全面一様に注入されたキャリアが衝突イオン化してなだれ降伏をするときには、ツェナー効果と衝突イオン化の両者の利点のみが生かされ鋭い降伏特性となるので、このような試料では V-I 特性の交流動作抵抗が小さくなる。ツェナー効果と衝突イオン化の相互作用によって、マイクロプラズマ雑音は小さくなり、素子が永久破壊されにくくなる。このような試料の降伏電圧の温度係数は小さいが、周囲温

度、接合電流、降伏電圧によって変化する。

終わりに臨み、本研究に有益なご助言を賜った名古屋大学工学部有住教授、日立製作所中央研究所徳山博士に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) 日立評論 43 (昭 36)
- (2) A. L. Johnston, et al.: B. S. T. J. 44, 369 (1965)
- (3) C. Zener: Proc. Roy. Soc. (London), 145, 523 (March, 1934)
- (4) K. B. McAfee, et al.: Phys. Rev., 83, 650 (August, 1951)
- (5) K. G. McKay: Phys. Rev., 94, 877 (May, 1954)
- (6) R. D. Knott, et al.: Proc. Phys. Soc. (London), 68B, 182 (March, 1955)
- (7) S. L. Miller: Phys. Rev., 99, 1234 (August, 1955)
- (8) L. Esaki and Y. Miyahara: Solid-State Electronics, 1, 13 (1960)
- (9) 徳山: 応用物理 30 (昭 36-2)
- (10) A. G. Chynoweth and K. G. McKay: Phys. Rev., 106, 418 (May, 1957)
- (11) A. G. Chynoweth, et al.: Phys. Rev., 118, 425 (April, 1960)
- (12) J. Shields: J. Electronic and Control, 6, 130 (February, 1959)
- (13) S. L. Miller: Phys. Rev., 105, 1246 (February, 1957)
- (14) B. Senitzky and J. L. Moll: Phys. Rev., 110, 612 (May, 1958)
- (15) 徳山: 応用物理 29, 837 (昭 35-12)
- (16) E. M. Conwell: Proc. IRE, 46, 1281 (June, 1958)
- (17) M. J. Sinnott: The Solid-State for Engineers, 372 (May, 1958)
- (18) Chin-Tang Sah, et al.: Proc. IRE, 45, 1228 (September, 1957)
- (19) M. Migitaka: Solid-State Electronics, 8, 295 (March, 1965)
- (20) 右高: 応用物理 32, 120 (昭 38-2)

Vol. 53

日 立 評 論

No. 5

目 次

■ 論 文

- ・ 1 kW 超 電 導 交 流 発 電 機
- ・ 並 列 直 流 電 源 し ゃ 断 時 の 交 流 発 電 機 電 流
- ・ 小 形 制 御 用 計 算 機 の 積 分 形 ア ナ ロ グ 入 力 装 置
- ・ 自 動 車 用 ク ー ラ お よ び エ ア コ ン デ ィ シ ョ ナ に お け る サ イ ク ル 物 理 諸 量 の 脈 動 現 象
- ・ 四 国 電 力 (株) 新 西 条 火 力 発 電 所 納 3,600rpm 250,000kW 再 熱 タービン
- ・ 同 期 起 動 方 式 揚 水 発 電 所 の 運 転 制 御 と 保 護

- ・ 22 kV 固 体 絶 縁 メ タ ク ラ の 開 発
- ・ 日 本 国 有 鉄 道 納 DE50 形 液 体 式 デ ィ ー ゼ ル 機 関 車
- ・ 静 止 形 偶 発 現 象 記 録 装 置
- ・ 音 声 多 重 テ レ ビ ジ ョ ン 受 信 機
- ・ HITAC 9411 ビ デ オ デ ー タ 端 末 装 置
- ・ Mn Mg フ ェ ラ イ ト 粉 末 の 粉 碎 に よ る 変 化
- ・ カ ー ク ー ラ 用 斜 板 式 圧 縮 機
- ・ プ ラ ス チ ッ ク 高 圧 ホ ー ス の 温 度 特 性
- ・ 公 害 防 止 技 術 関 係 よ り

発 行 所 日 立 評 論 社

東京都千代田区丸の内一丁目 5 番 1 号
郵便番号 100

取 次 店 株 式 会 社 オ ー ム 社 書 店

東京都千代田区神田錦町 3 丁目 1 番地
郵便番号 101

振 替 口 座 東 京 2 0 0 1 8 番