

氏名・(本籍)	か がわ たく ぞう 小 川 卓 三
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理 第 1 4 0 号
学位授与年月日	昭和42年1月18日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
最終学歴	昭和27年3月 東北大学理学部物理学科卒業
学位論文題目	シリコン pn および pin 接合のなだれ破壊 に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 日 比 忠 俊 教授 林 威 章 教授 森 田 章 夫 教授 袋 井 忠 夫

## 論 文 目 次

第1章	緒 論
第2章	pin 接合におけるなだれ増倍係数の測定
第3章	pin および pn 接合の破壊電圧の測定
第4章	異常増倍と不純物としてのAu およびCuの効果
第5章	結 論

# 論文内容要旨

## 第1章 緒 論

pn接合は周知のように $p \rightarrow n$ (順方向)に容易に電流を通すが、 $n \rightarrow p$ (逆方向)には電流を阻止する。逆方向印加電圧を次第に増してゆくと逆電流が急激に増加し、電気的な破壊がおこる。この現象は接合部の電場の大きい場合には電場によって価電子が引き離されるZener効果、電場が比較的小さいときはなだれ増倍効果によって発生することが知られているが、本研究で対象としたのはなだれ増倍に関する現象である。1953年以来、Si中のなだれ増倍効果に関して、破壊電圧50V以下(電場でいえば $2.5 \times 10^5$  V/cm以上)のpn接合についての多くの研究がある。しかしながら、破壊電圧の高いpn, pin接合すなわち、さらに低い電場範囲における増倍係数の測定は殆んど行なわれていないので、著者は比較的低い電場範囲でおこるSiのpinおよびpn接合の増倍および破壊についての研究を行なった。

## 第2章 pin接合におけるなだれ増倍係数の測定

pおよびn領域の間に高純度の領域が介在する構成の接合はpin接合と呼ばれている。破壊電圧の高いpin接合では特に低電場でなだれ増倍がおこるので、拡散法で作ったSiのpin接合についてその増倍係数と印加電圧の関係を測定した。ここで、増倍係数とは接合のp側またはn側から注入された電子または正孔が空間電荷領域を通り抜ける間におこる増倍の係数である。また、この実験値より、電子あるいは正孔が電場の方向に1cm移動する間に生成する電子-正孔対の数を表わすイオン化率を算出した。

### I 増倍係数の測定

試料として高純度Si単結晶にPとBを拡散して作った破壊電圧1,500~2,000V, i領域厚さ約100 $\mu$ , 接合面径約8mm $\phi$ のpin接合を用いた。そのp側またはn側に600e/sのchopped lightを照射し、生成される光電子または正孔を空間電荷領域(ほぼi領域と同じ厚さ)に注入、暗電流を除く600e/sの光電流だけを増幅するいわゆるchopped light techniqueによって増倍電流と電圧の関係を測定し、増倍係数を求めた。

その結果によると、常温において、電子の増倍係数は数百Vより急激に印加電圧とともに増加し始めるのに対し、正孔の増倍係数が急増し始めるのは千数百V以上である。また、電子の増倍係数が270となる印加電圧において正孔の増倍係数は約3で、このような破壊電圧の高い接合では電子は正孔に比して桁違いに大きい増倍係数をもつ。一方、電子の増倍係数を90~350°Kで測定し、温度の増加とともに減少することを確かめた。

### II 電子および正孔のイオン化率

上記測定結果より、均一電場に対するTownsendの理論を不均一電場に拡張した理論を用いて、 $2.5 \times 10^5$  V/cm以下の電場に対してイオン化率を求めた結果、電子と正孔について次のような

Chynoweth の実験式の形で表わされることがわかった。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_n &= 1.0 \times 10^6 \exp(-1.44 \times 10^6 / E) \text{ (電子)} \\ \alpha_p &= 1.9 \times 10^6 \exp(-2.20 \times 10^6 / E) \text{ (正孔)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

こゝで、Eは電場の強さである。これらの式を用いると、電子に関してはChynoweth<sup>1)</sup>、正孔に関してはMoll<sup>2)</sup>らがpn接合について測定した高い電場範囲のイオン化率にほぼつながる。

### 第3章 pinおよびpn接合の破壊電圧の測定

#### I pin接合の破壊電圧の測定

実際の接合では常に表面破壊が問題となるので、真のなだれ破壊電圧を求めるのに如何なる測定法をとればよいか決定するため次の三通りの方法を検討した。

- (1) 水蒸気はSi表面に正の電荷を与えることが知られているが、本実験中n<sup>+</sup>pp接合でn<sup>+</sup>領域をmesa形とした場合は正の表面電荷がmesa周辺の強電場を緩和する効果をもつことが知られた。N<sub>2</sub>雰囲気中で水蒸気の相対湿度で極大値をとる。この値をもって破壊電圧とした。
- (2) 電子の増倍係数と電圧の関係を測定し、その曲線を延長して増倍係数が∞となる電圧をもって破壊電圧とした。
- (3) 接合の表面にシリコン・ワニス(DC-997)を焼きつけると正の表面電荷が現われ、破壊電圧が上がるのが本実験中確認されたので、ワニス処理した試料の破壊電圧を測定した。

以上の中、(1)と(2)の方法による破壊電圧はほぼ一致するので、ほぼ真のなだれ破壊電圧を与えることがわかった。ただし、これらの方法は試料の作製が難しい。これに対し、(3)の方法では沿面の気中放電がなだれ破壊に先行することもしばしば観測され、測定値がばらつくが、多くの試料につき、破壊電圧を測定し、その最高値をとると(1)および(2)の測定値とかなりよく一致するので、厳密な値を要しない場合には便利な方法である。

一方、接合の容量をHoffmann回路で測定することにより空間電荷領域幅Wが求められるので、その幅が25~300μの範囲、破壊電圧0.5~4.5 kvの範囲で両者の関数関係を求めた。

この結果によると、i領域の不純物濃度が十分小さい(10<sup>13</sup> atoms/cm<sup>3</sup>以下)ときは破壊電圧は大体Wに比例して増加する。なお、W=200μに対して、破壊電圧は3.3 kvであった。

#### II 実効イオン化率とpn接合の破壊電圧

pin接合では実効イオン化率αは次式で表わされる。

$$\alpha(E) = \{ W \cdot f(W, N, b, E) \}^{-1} \dots\dots\dots (2)$$

こゝで、W:空間電荷領域幅、N:i領域の不純物濃度、b:定数、E:破壊電圧に対応するi領域中央の電場。

Wと破壊電圧の前述の実験的關係から(2)式により実効イオン化率を求めると

$$\alpha = 1.0 \times 10^6 \exp(-1.66 \times 10^6 / E) \dots\dots\dots (3)$$

となる。この値は高い電場範囲でMckay<sup>3)</sup>がα<sub>n</sub> = α<sub>p</sub> = αを仮定して求めた結果とかなりよくつ

なかり、前章で求められた $\alpha_n$ 、 $\alpha_p$ の値から拡張された Townsend 理論により計算される値とも大体一致する。

また、種々のドナー濃度の n 型 Si 単結晶に Ga を拡散して p+n 接合を作製し、n 型領域のドナー濃度の関数として破壊電圧を測定した。この結果は(3)式の $\alpha$ を用いて計算された p+n 接合の破壊電圧とドナー濃度の関係と  $10^{14} \sim 10^{16} \text{ atoms/cm}^3$  のドナー濃度範囲でかなりよく一致する。

## 第 4 章 異常増倍と不純物としての Au および Cu の効果

### I 異常増倍

Si 接合の中には印加電圧と増倍係数の関係が滑らかな曲線ではなく、いくつかの増倍係数のピークをもつものが観測された。これを異常増倍と呼ぶことにする。この種の試料は一般に逆電流が多く破壊電圧も低い。接合の表面処理を繰り返しても逆電流、破壊電圧は殆んど変化しない。

なお、同一単結晶棒より切り出した結晶板を素材として、B と P を拡散して試料を作製しても異常増倍の現われるものと現われないものがある。また、素材の転位は密度が  $10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^{-2}$  の範囲では破壊電圧に殆んど影響しない。したがって、異常の原因は素材結晶そのものにあるとは考えられない。一方、拡散の特定のロットでは大部分の試料に異常増倍が現われるので、異常の原因は P あるいは B を拡散する過程で発生すると考えられる。

### II Au および Cu が増倍に及ぼす効果

P と B を拡散する際、拡散係数が大きく、且つ、析出し易い重金属による Si の汚染は不可避的である。重金属析出物があると、その周辺に強電場が生ずるので、Batdorf ら<sup>4)</sup>が指摘しているように microplasma が発生し、異常増倍の現われる可能性が大きい。そこで、特に Au または Cu を pn 接合に拡散した試料を作り、その析出物を赤外顕微鏡で観察し、また、種々の拡散温度、冷却速度で作った試料の増倍電流を測定した。その結果、

- (1) Cu の析出物は Si の表面部に少なく、内部に多く観察された。Au の場合にはその析出物は赤外顕微鏡、X線微小回折法で見出すことができなかった。
- (2) Au または Cu を拡散すると三種類に分類される異常増倍がしばしば現われる。Type I は極めて大きいピークを示すもので、Cu のときだけ現われる。Type II は細かい、数多くのピークを示すもので Au、Cu 両方の場合にみられる。Type I および II のピークの大きさは照射光強度にほぼ逆比例して減少するので、Batdorf ら<sup>4)</sup>、Haitz ら<sup>5)</sup>が指摘しているように microplasma の発生によるものと考えられる。次に、Type III は高い電圧範囲で増倍電流が減少するもので、Au の場合にのみ現われる。この異常は逆電流が大きい試料程、顕著であるので恐らく接合の dynamic impedance の低下に起因するものであろう。

以上の実験結果より試料作製中における重金属による汚染は異常増倍の少くとも一つの原因となることがわかった。

## 第 5 章 結 論

### I pin 接合における増倍係数の測定

- (1) 破壊電圧の高い Si の pin 接合について chopped light technique により増倍電流と印加電圧の関係を測定し、電子は正孔に比して桁違いに大きい増倍係数をもつことを見出した。
- (2) この結果を拡張された Townsend 理論により考察し、Si における電子および正孔のイオン化率と電場の関係を表わす実験式を求めた。

### II pin および pn 接合の破壊電圧の測定

- (1) pin 接合のなだれ破壊電圧 (0.5~4.5 kv) と空間電荷領域幅 (25~300  $\mu$ ) の関係を測定し、i 領域が十分高純度の場合、破壊電圧と空間電荷領域幅の間には  $\propto$  比例的関係の成立することがわかった。
- (2) この関係を用いて、Si における実効イオン化率と電場の関係を表わす実験式を求めた。

### III 異常増倍と不純物としての Au および Cu の効果

- (1) 異常増倍の原因は素材単結晶とは関係なく、B あるいは P を拡散する過程で生じ、その際の重金属不純物の拡散によるものと推定された。
- (2) 接合試料に Au あるいは Cu を拡散すると、異常ピークが現われること、また、Au と Cu では異常の現われ方に相違のあることを見出した。なお、試料中の Cu の析出物は観察できたが Au の析出物は赤外顕微鏡、X 線微小折法では見出せなかった。

## 論文審査結果の要旨

小川卓三提出の学位論文は「シリコン pn および pin 接合のなだれ破壊に関する研究」と題するもので5章からなり、前半に正常な場合のなだれ破壊現象を後半に異常増倍現象を取扱っている。

シリコン中のなだれ増倍効果に関して今まで破壊電圧が50V以下のpn接合について多くの研究がなされてきたが、破壊電圧が高いpn, pin接合についての研究は、ほとんど行われていないので、本論文では破壊電圧の高い場合につき研究を行い種々の新しい結果を得ている。

まず、破壊電圧の高いSiのpin接合について Chopped light technique を用いて増倍電流と印加電圧の関係を測定し、電子は正孔に比して桁違いに大きい増倍係数をもつことを見出した。この結果を拡張されたTownsend理論を用いて考察して、シリコンに於ける電子及び正孔のイオン化率と電場の関係を表わす実験式を求めた。

次に、pin接合のなだれ破壊現象と空間電荷領域巾の関係を測定し、i領域が十分高純度の場合破壊電圧と空間電荷領域巾の間には、比例的関係の成立することをはじめて明らかにした。この関係を用いてシリコンに於ける実効イオン化率と電場の関係を表わす実験式を求めた。

最後に異常増倍をおこす試料の測定を行って、異常増倍の原因は素材単結晶とは関係なく、BあるいはFを拡散させる過程で生じ、その際の重金属不純物の拡散によるものと推定した。このことを確かめるために接合試料に重金属として金あるいは銅を拡散させ、異常ピークの現われること、また金と銅では異常の現われ方に相違のあることを見出した。

以上の結果は多くの新しい知見を含みなだれ破壊現象の解明に貢献する所が大きい。よって小川卓三提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。