

氏 名 ( 本 籍 )	岡 本 孝 太 郎 ( 秋 田 県 )
学 位 の 種 類	工 学 博 士
学 位 記 番 号	工 博 第 1 0 3 号
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 4 2 年 3 月 2 4 日
学 位 授 与 の 要 件	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項 該 当
研 究 科 専 門 課 程	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 ( 博 士 課 程 ) 電 気 及 通 信 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	強 電 界 中 の キ ャ リ ア の 拡 散 係 数 の 測 定
	( 主 査 )
論 文 審 査 委 員	教 授 西 沢 潤 一 教 授 吉 田 重 知 教 授 八 田 吉 典

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 言

半導体における強電界現象は、結晶中のキャリアの散乱機構に関する多くの情報を与えてくれるために半導体物性の研究分野で強い関心を持たれている問題であるが、半導体工学の分野においても装置の高周波化が進むにつれて、例えばドリフト・トランジスタなどに見られるような強いドリフト電界中をキャリアを走行させて走行時間を短縮し、それによって遮断周波数を高めようとする半導体装置の設計にあたって強電界下におけるキャリアの挙動に関する知識が強く要求されて来ている。すなわち半導体中を伝達される信号の遮断周波数は、走行するキャリアの位相回転と振幅減衰の双方に関係しているために強い電界を加えてドリフト速度を増して走行時間の短縮を計

っても強電界を加えることによって拡散効果が激しくなるのであれば、ドリフト電界の効果は相殺されてしまう。従って強電界下のドリフト速度を与える移動度と、振巾の減衰を与える拡散係がどのような電界依存性を示すかと云う問題は、高周波半導体装置の設計に際して極めて大切な問題である。従来の強電界現象は移動度の電界依存性に関するものであったが、ここではGe及びSi中の電子及び正孔の拡散係数の電界依存性の測定を行い、その結果を用いて高周波半導体装置の遮断周波数の検討を行った。

## 第2章 拡散係数の電界依存性に関して

ここでは移動度に関してすでに行われている議論を用いて、強電界下で拡散係数がどのような電界依存性を示すかを検討してみた。キャリアの分布函数が、キャリア温度 $T_c$ で記述出来る様なボルツマン分布をしているものとする。簡単な計算から

$$\frac{D(E)}{D_0} = \left( \frac{T_c}{T_L} \right)^{1/2}, \quad \frac{\mu(E)}{\mu_0} = \left( \frac{T_L}{T_c} \right)^{1/2}$$

なる関係が導びかれる。ただし $T_L$ は格子温度である。従って拡散係数と移動度の間には、

$$\frac{D(E)}{D_0} = \frac{\mu_0}{\mu(E)}$$

の関係が導びかれる。この関係に従来測定されている移動度の電界依存性を入れて拡散係数の電界依存性を求めて見ると(第1図)の様な結果が導びかれ、電界とともに拡散係数が増加することが分る。

## 第3章 測定

測定の原理を(第2図)に示した。すなわちGe, もしくはSiの棒状の試料を作り、オーム性接触を通して両端にパルス電圧を加えておいて一端から高周波で変調した少数キャリアを注入する。そうすると注入されたキャリア波は拡散効果と再結合によつてその粗密振巾を減じたながら電界中を走行する。この時再結合による減衰はキャリアの粗密周波数に無関係なのに対して、拡散による減衰は周波数に比例して激しくなるから二つの異なる周波数のキャリア粗密波についてそれぞれの減衰の割合を求めると、それらの差から拡散のみによる減衰を求めることが出来る。すなわち減衰を $e^{-m\alpha}$ の形で測定し、角周波数が $\omega_1$ の時の減衰の割合を $m_1$ 、 $\omega_2$ の時を $m_2$ とすると拡散係数は、

$$D_p = \frac{V_p^2 (m_2 - m_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}$$

又寿命は

$$\tau_p = \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{v_p (\omega_2^2 m_1 - \omega_1^2 m_2)}$$

で与えられる。更にキャリア粗密波は  $\exp\{j\omega(t - x/v_p)\}$  なる位相項を持っているから位相が  $2\pi$  だけ回転する距離から粗密波の波長  $\lambda_p$  が求まり、これからドリフト速度を  $v_p = f\lambda_p$  として求めることが出来る。(第3図)には振巾減衰の割合の測定のプロック・ダイアグラムを示した。強電界は高圧パルス発生器によって加え、粗密キャリアの注入にはタングステン針、もしくは燐青銅針によるポイント・コンタクトを用いた。又、試料の各点各点におけるキャリアの粗密振巾の測定にはキャリアの吸収によるマイクロ波の変調効果を用いた。(第4図)にはGe試料  $500 \text{ v/cm}$  の電界を加え  $2.5 \text{ MHz}$  の正孔波を注入した時の注入端から  $2 \text{ mm}$  毎の変調波形を示したものである。又、オッシロスコープの前置増巾器に差動増巾器を用い一端にはマイクロ波変調波形を、他端には発振器からの出力を基準信号としてそのまま分岐して入れ、両者の位相が同相になる二点間の距離から波長を測定しドリフト速度を求めた。

## 第4章 測定結果

第3章で述べた測定方法を用いてn型Ge中の正孔、P型Ge中の電子、及びSi中の正孔の拡散係数の電界依存性を測定した結果について述べる。

### 4-1 n型Ge中の正孔の拡散係数の電界依存性

リンを添加した比抵抗  $5.3 \Omega\text{-cm}$  のn型Geから試料を切り出し、オーム性接触にはAuSbを真空中、 $450^\circ\text{C}$  で10分間合金して作った。合金後CP4液でエッチを行い、その後過酸化水素雰囲気曝して表面を安定させた。ポイント・コンタクトにはタングステン針を用い、良好な注入特性が得られている。(第5図)にはGe中の正孔のドリフト速度の電界依存性の測定結果を示す。(第6図)には電界が  $1000 \text{ v/cm}$  の時に正孔波の周波数を  $2 \text{ MHz}$ 、 $4 \text{ MHz}$ 、 $6 \text{ MHz}$  と変えた時にそれぞれ注入端から  $1 \text{ mm}$  毎の振巾の減衰を測定した結果を示す。(第7図)にはドリフト速度と減衰の割合から求めた正孔の拡散係数の電界依存性を示したが、低電界では熱平衡状態における値に接近し、電界が増えて行くと大略電界の一乗に比例して拡散係数は増大している。(第8図)には同様にしてGe中の正孔の寿命の電界依存性を求めた結果を示す。

### 4-2 p型Ge中の電子の拡散係数の電界依存性

インジウムを添加した比抵抗  $5.3 \Omega\text{-cm}$  のp型Geの試料に電子粗密波を注入して、電子の拡散係数の電界依存性を測定した。

#### 4-3 n型 Si 中の正孔の拡散係数の電界依存性

砒素を添加した比抵抗  $9.7 \Omega\text{-cm}$  の n 型 Si の試料に正孔粗密波を注入して、Si 中の正孔の拡散係数の電界依存性を測定した。

### 第 5 章 検 討

拡散係数の電界依存性を測定した結果、

- (1) 減衰の測定結果が  $\exp(-mx)$  の形になることから連続の式を解く際に用いた境界条件  $p(x=\infty)=0$  の置き方は正しい。
- (2) 減衰の測定で周波数を高くすると必ず減衰が激しくなることから、 $\omega^2$  に比例した項、すなわち拡散効果による減衰が測定されている。
- (3) ドリフト速度の測定結果が従来得られている結果と良く一致することから、従来の測定結果とは異なる特別な効果が関与しているとは考えられない。
- (4) 拡散係数の形にすると周波数依存性が認められないことから、平方根の近似展開式で二次の項迄を取ったが、三次以上の項は測定した範囲では十分小さいものと考えられる。
- (5) キャリアの注入振巾を変えても減衰の割合が変化しないことから、微小注入振巾の条件が成立していて測定している特定の電界については  $V_p$ 、 $D_p$  は定数と考えて良く、又トラップの効果も関与していないものと考えられる。
- (6) 低電界になると再結合による減衰が支配的となり、拡散による減衰は検知出来なくなるが、測定が行えた範囲では電界が低くなるに従って、拡散係数は所謂熱平衡状態の値に収斂する傾向を示している。

以上 6 つの実験的な裏付けによって、測定の実質上かなり測定点に散乱があるにも拘らず測定結果は間違いなく拡散係数の電界依存性であると考えられる。

### 第 6 章 拡散係数の電界依存性と遮断周波数

強電界における拡散係数の電界依存性の測定結果を高周波半導体装置に適用して、その遮断周波数の検討を行って見た。

#### 6-1 ドリフト・トランジスタ

ドリフト・トランジスタの遮断周波数  $f_\alpha$ 、 $f_T$  はそれぞれ

$$f_\alpha = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{V_p^3}{W_b \cdot D_p}}, \quad f_T = \frac{V_p}{2\pi W_b}$$

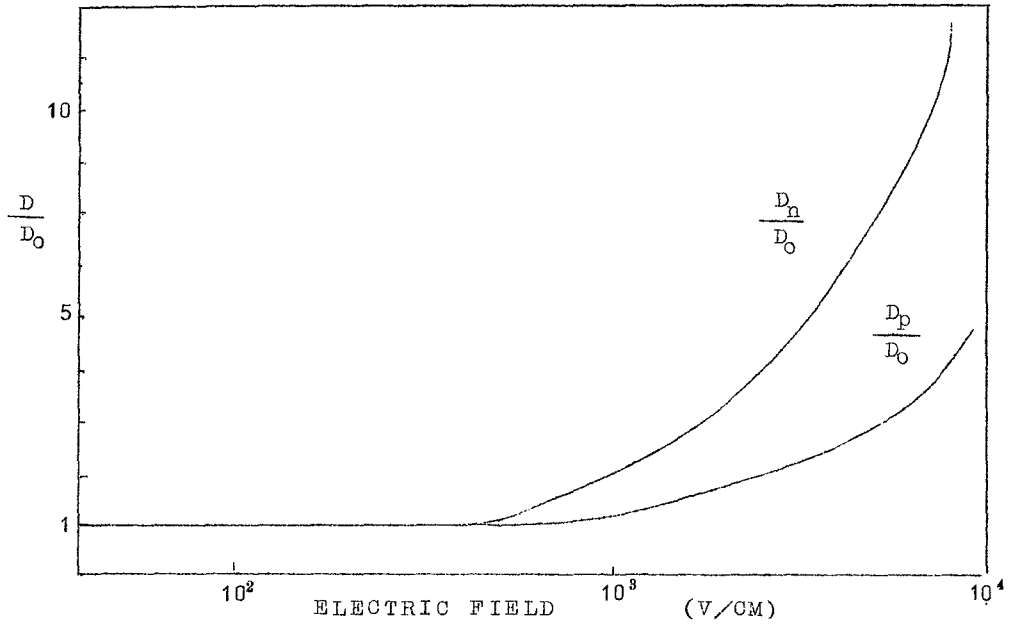
この  $f\alpha$  の  $D_p$  に求めた拡散係数の電界依存性を入れて遮断周波数のベース巾依存性を求めた一例として、PNP型ゲルマニウムドリフト・トランジスタの場合の計算結果を(第9図)に示す。なお拡散電位は0.3Vに取った。これから拡散係数が電界とともに増大するためにそのことも考慮するとドリフト・トランジスタの遮断周波数が著しく低減されることが分かる。

以下6-2では走行時間負性抵抗ダイオード、6-3では超音波増巾について遮断周波数の検討を行った。

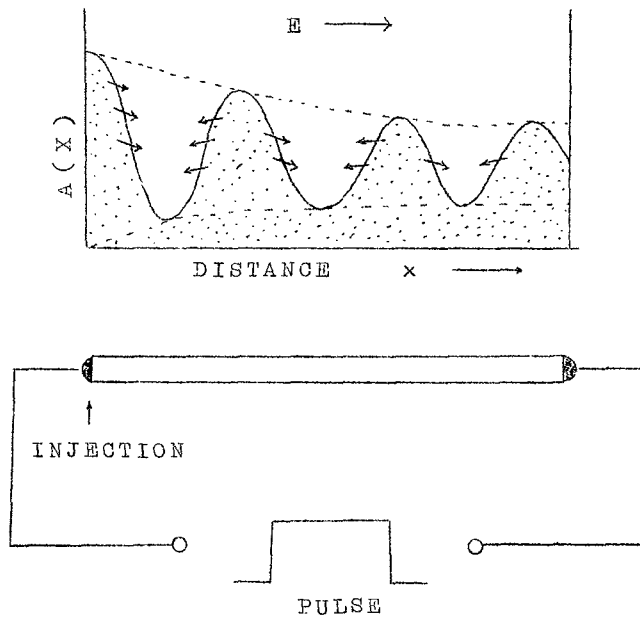
## 第7章 結 言

拡散係数の電界依存性の測定方法を示し、その測定方法を用いてn型Ge中の正孔、p型Ge中の電子、及びn型Si中の正孔の拡散係数の電界依存を測定した結果を示した。その結果、拡散係数は高電界領域で大略電界の一乗に比例して増大すると云う結果が得られ、これを用いて高周波半導体装置の遮断周波数の検討を行った。

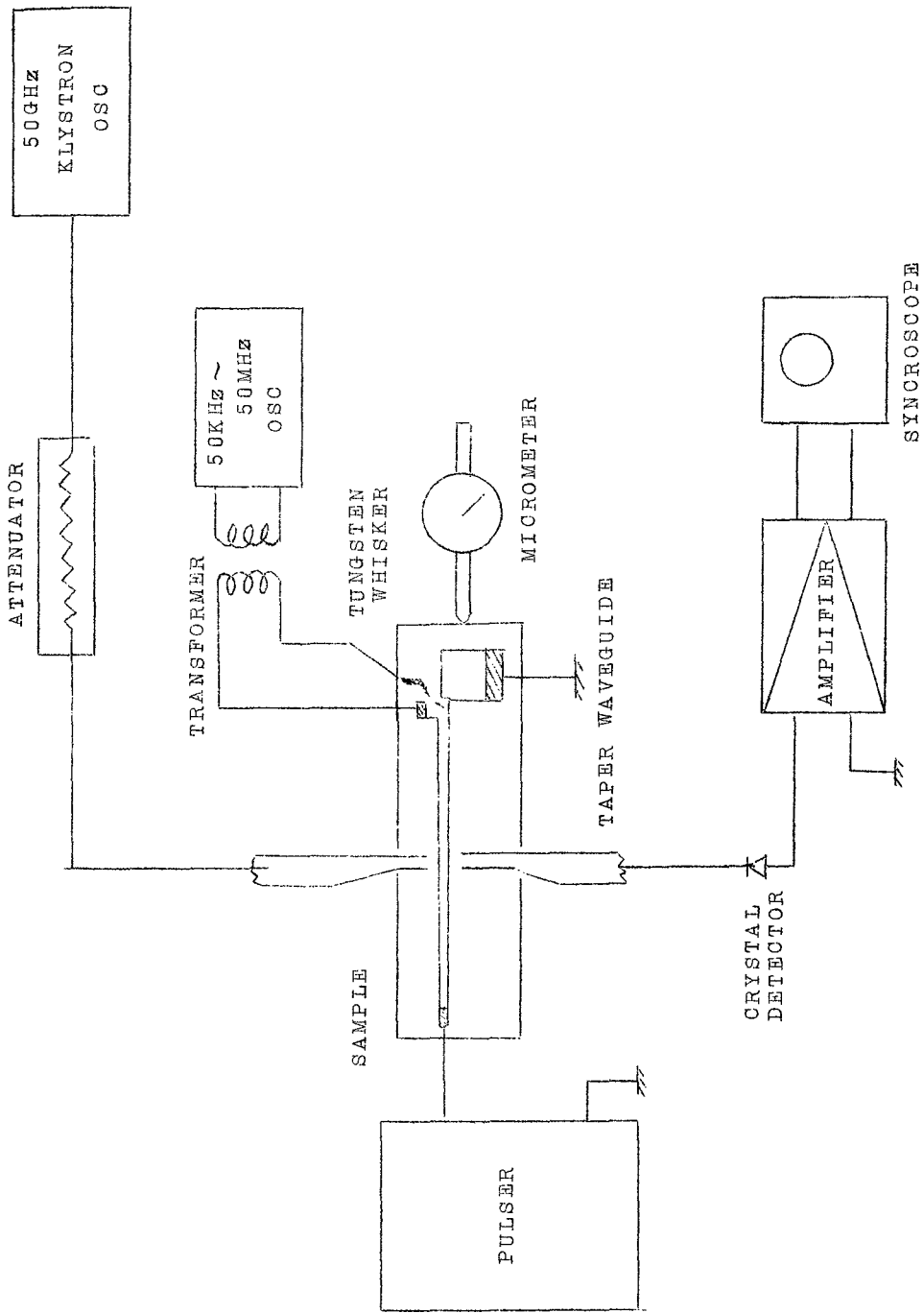
最後に終始御指導を賜った東北大学電気通信研究所、西沢潤一教授に対し深謝の意を表します。



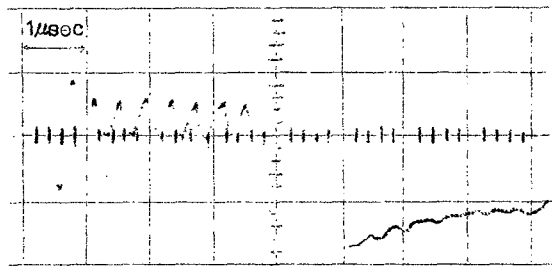
〔第1図〕 拡散係数の電界依存性 (Ge)



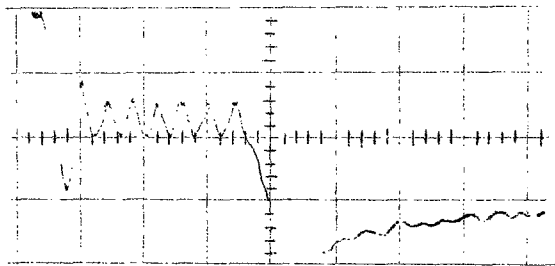
〔第2図〕 測定原理図



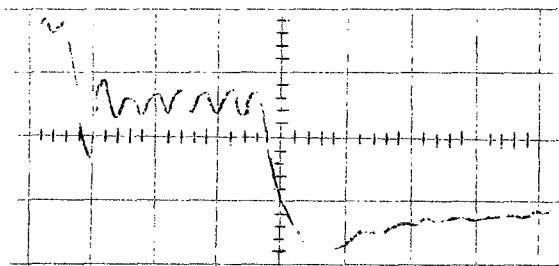
[第3図] 振巾減衰測定のプロック・ダイアグラム



0



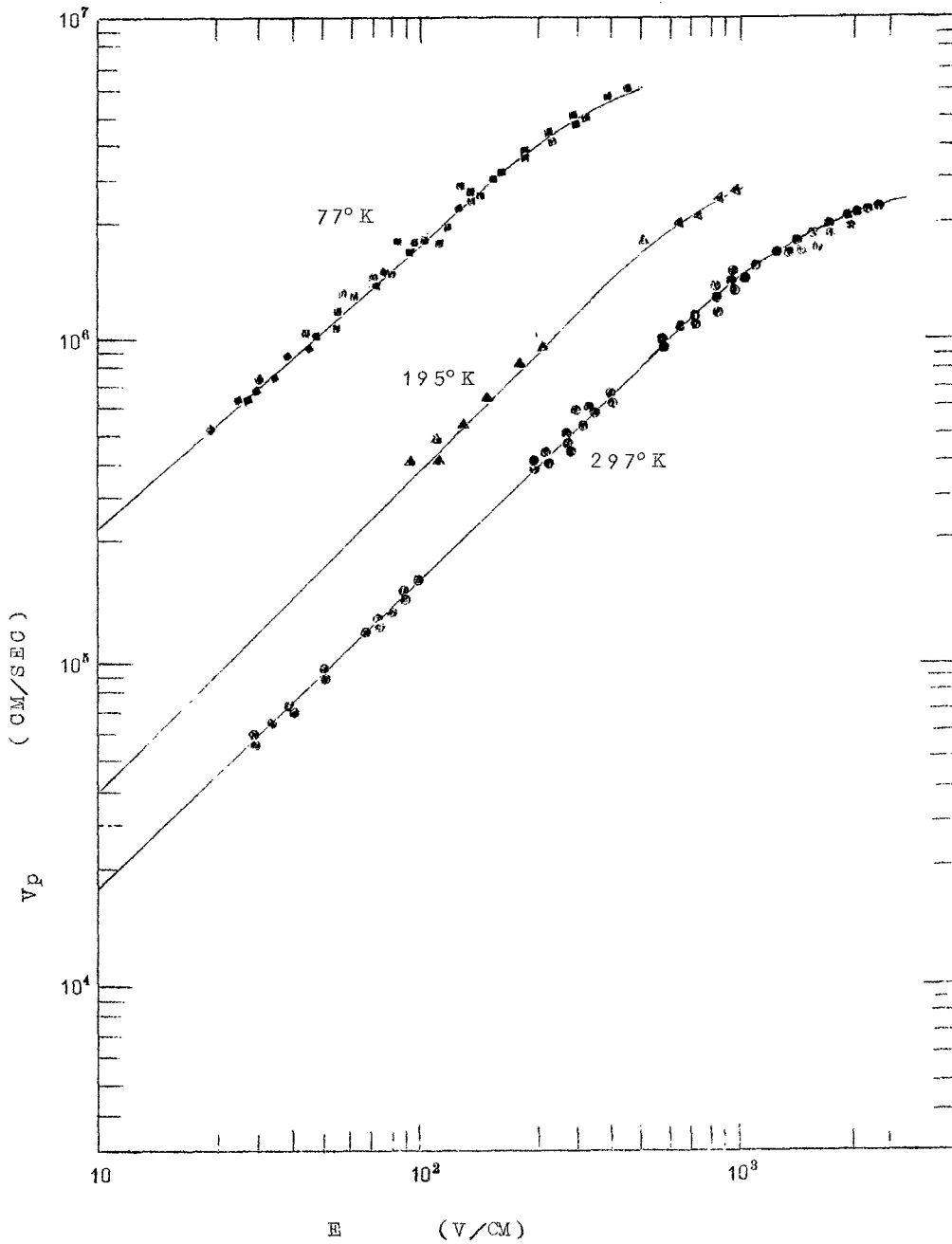
2 mm



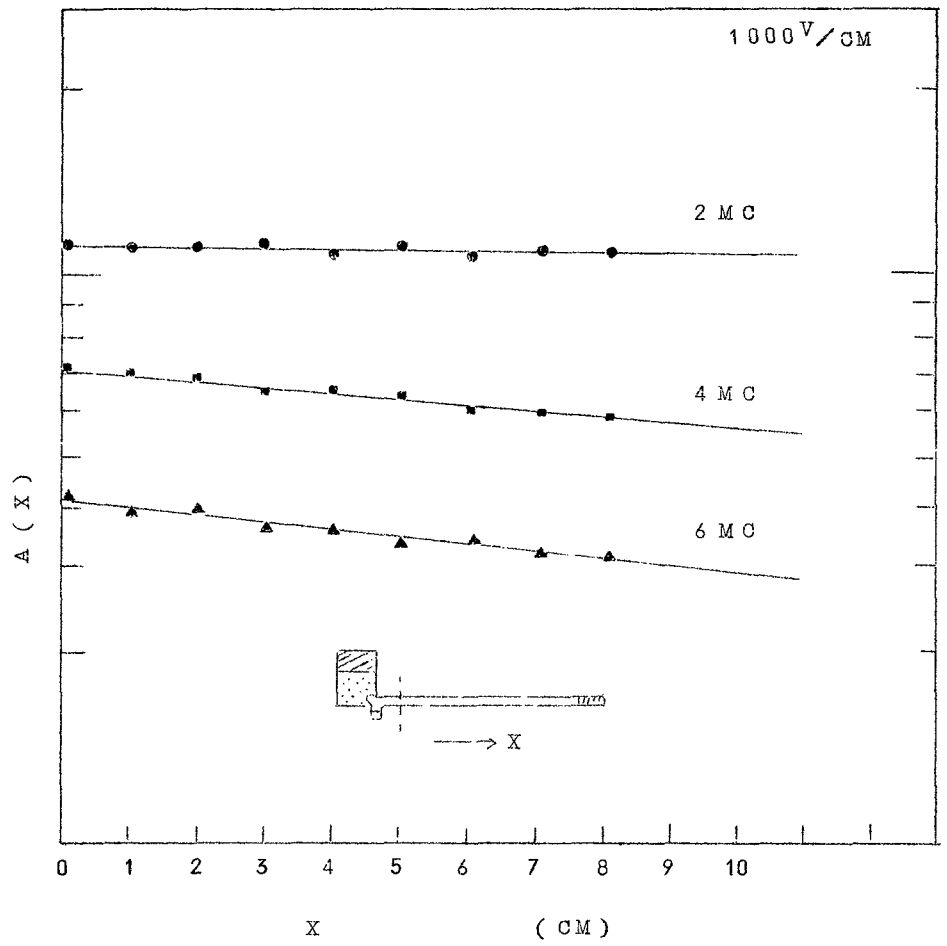
4 mm

[第4図] マイクロ波変調波形

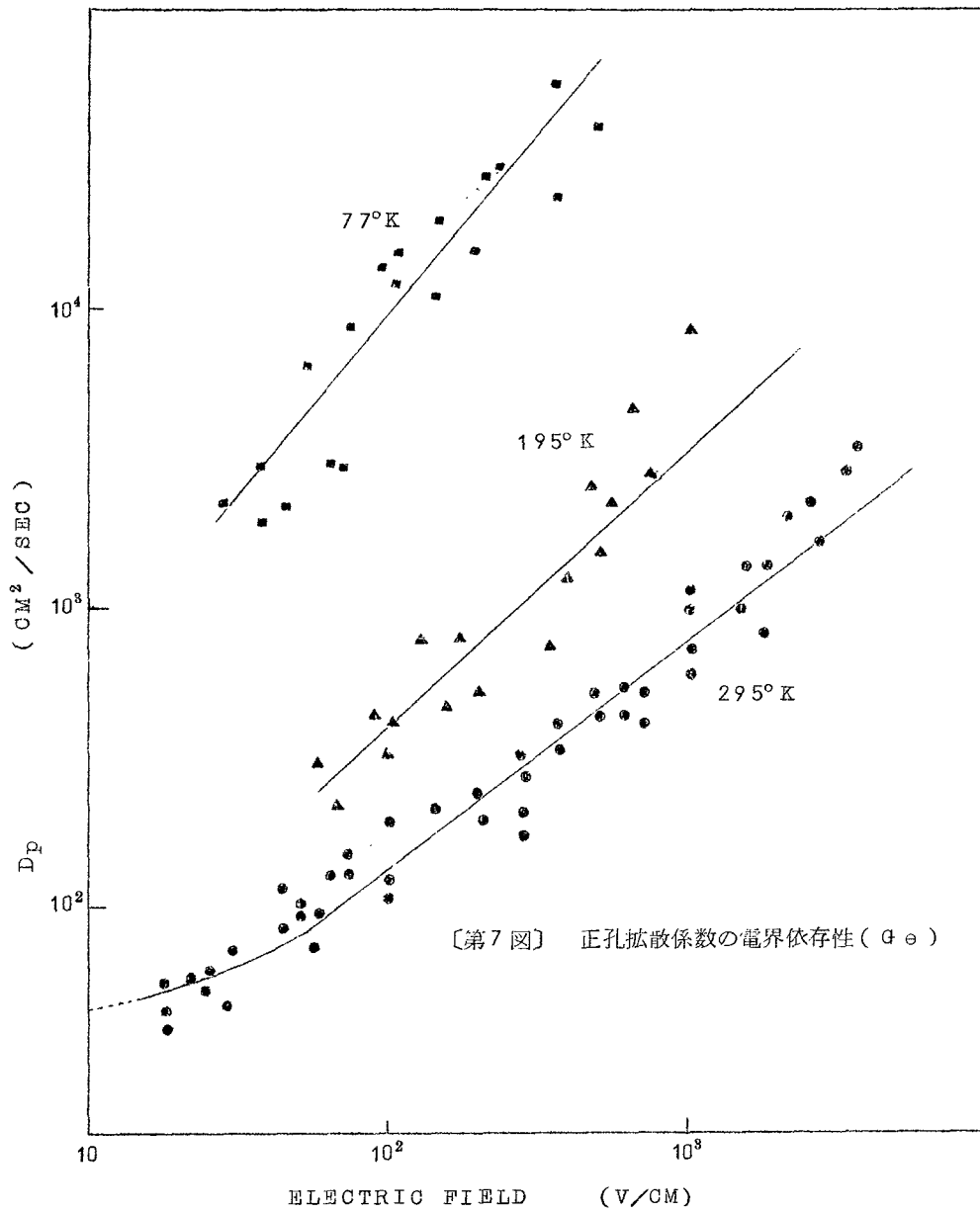




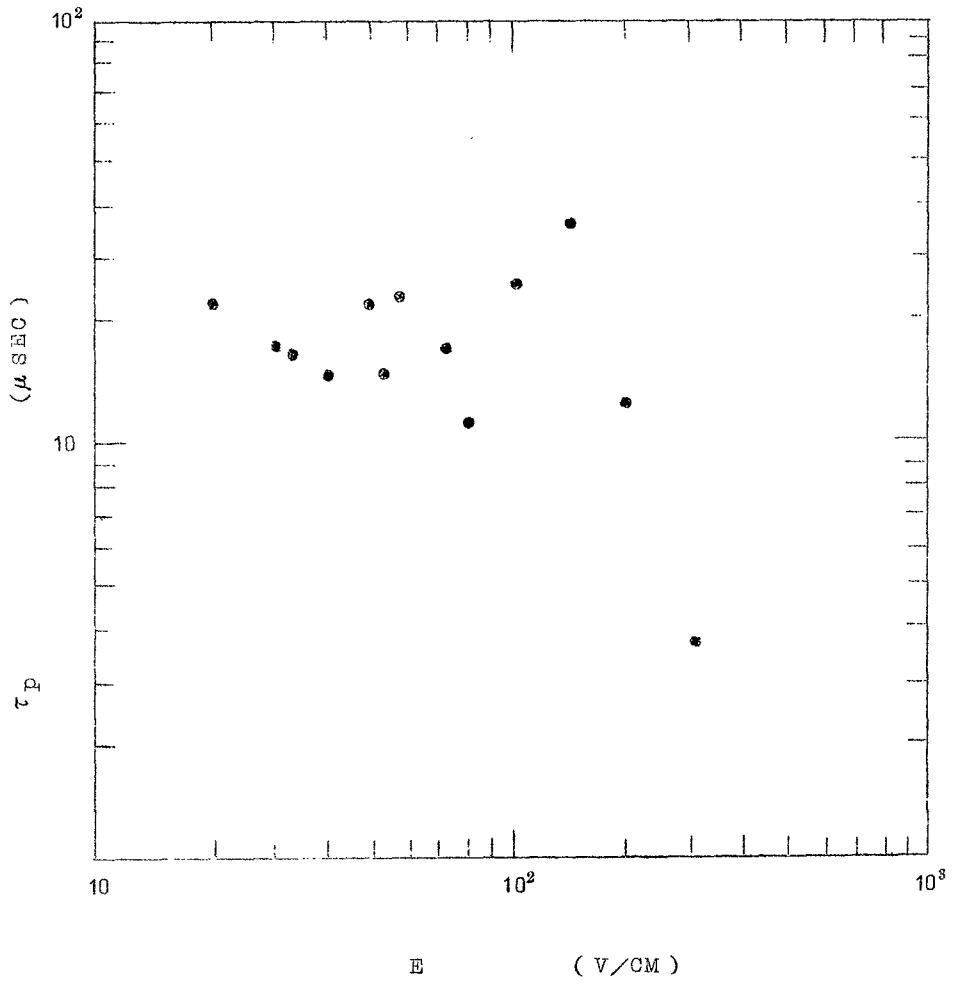
〔第5図〕 正孔ドリフト速度の電界依存性 (Ge)



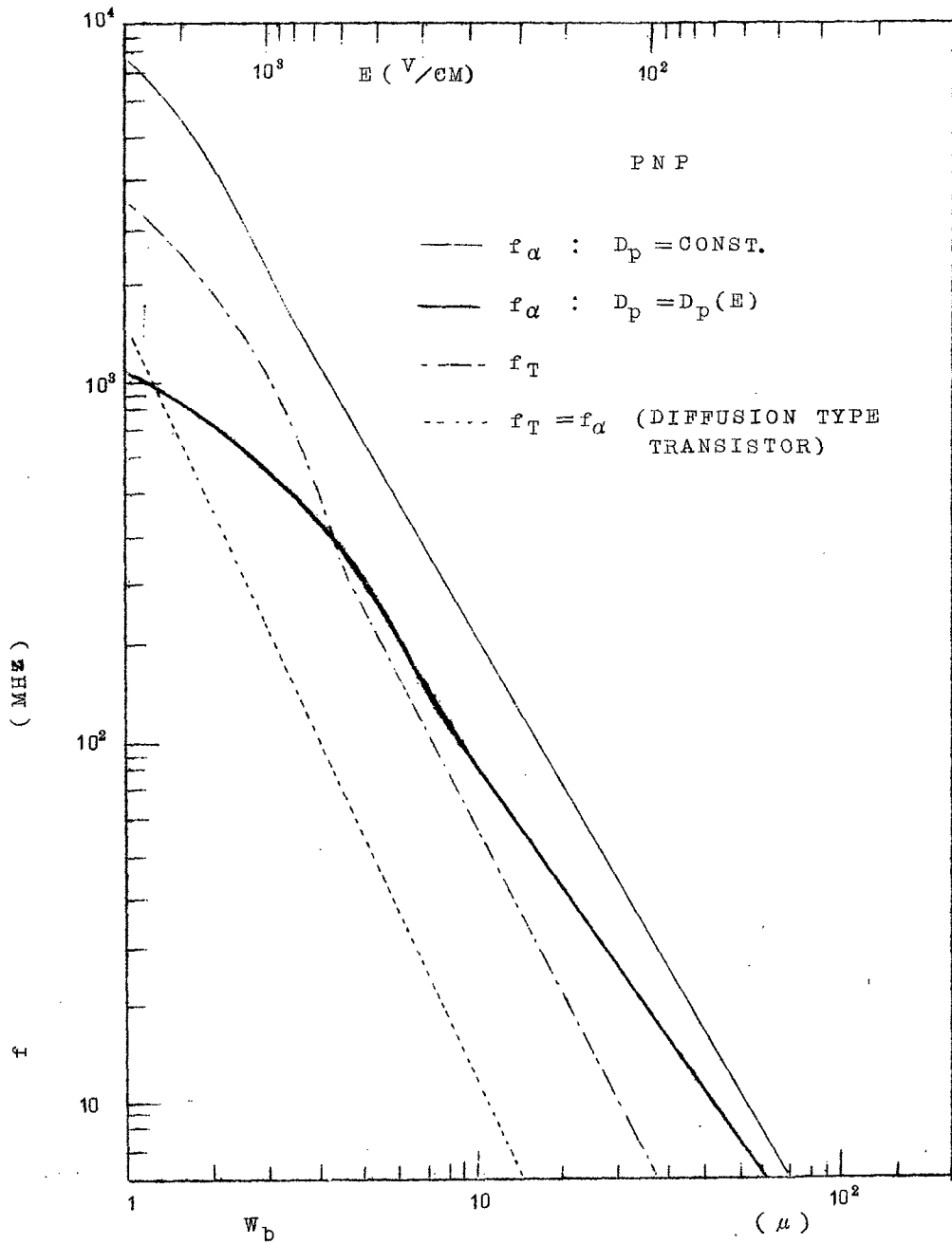
[第6図] 振巾減衰の測定例



〔第7図〕 正孔拡散係数の電界依存性 (Ge)



[第8図] 正孔寿命の電界依存性 (G o)



[第9図] PNP型ドリフト・トランジスタの遮断周波数( $f_c$ )

## 審査結果の要旨

近年半導体の強電界現象の応用が色々と注目されつつある。然るにその物理的把握については、重要な基本量であるところの拡散係数の測定すら行われておらず、定量的理解が不十分で応用装置の設計にも事欠いている現状である。本論文はこの様に物理的にも工学的にも重要な、拡散係数の強電界における測定を行い、実用上の問題との関連において検討を行ったものである。

本論文は、本文8章、付録2章よりなる。第1章は緒論である。第2章は従来の理論による考察であって、本論文の結果との対応上必要な事項がのべてある。

第3章は、著者が新しく提案した強電界における拡散係数の測定法と解析法についてのべてある。キャリアの統計力学的運動量分布の電界による摂動の2次の項の測定に対応するものであって、甚だ感度の高い方法が必要とされるが、著者は注入法として強電界に直交する電界を加えて注入する方法により、又分布を測定する方法としてマイクロ波吸収法を選び出して、それらから拡散係数が算出できることを示した。

第4章は測定結果であって、ゲルマニウム中の正孔と電子、シリコン中の正孔について電界強度の関数として拡散係数をいくつかの温度について調べた結果をのべている。第5章は、実験法に対する検討であって、色々な誤差を生じ得る原因について考察を行って、前章の測定結果がそれらの何れによつても影響されたのではない事を示している。

第6章は、第5章で得られた測定結果を用いて、現在注目されている半導体強電界現象応用装置の実用限界を推算したものであって、従来推定も難しかった限界周波数についておおよその推定が出来る事を示しており、半導体電子工学上、重要な知見である。

第7章は、第5章の結果から平均自由行程の変化を求めて見るとどの様になるか、またキャリア温度の変化として表わすとどのようになるかを示したもので、第2章に示した従来の理論による考察と可成異った値を示している事を明らかにして、物性論に対して新しい問題を提供している。

第8章は結論である。

付録1では、本文に示した測定を行うに当って注意すべき要件に対する二三の補充実験についてのべてある。付録2では半導体中を流れる伝導電流と変位電流について行った解析と実測結果についてのべ、充分の一致を得ているが、この結果も初めて得られたものである。

以上、本論文は半導体の強電界現象において、基本的な量である拡散係数を測定する独自の方法を開発し、はじめて詳細にその測定を行って、物理的に新しい知見を加えると共に、半導体装置としての設計法の展開を可能にしたものであって、変位電流成分の定量的検討と共に、半導体工学に資するところが少なくない。よって本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。