

半導體 研究

6

752.1

半導体 研究

財団法人
半導体研究振興会
編

(2005/5/7)

6

ガン発振とナダレ発振

2KU37cc

発行
工業調査会



1970 年 3 月 25 日 印刷発行

©Kogyo Chosakai Publishing Co., Ltd., Tokyo
1970
Printed in Japan

半 導 体 研 究 6 卷
定価 2,200 円

換 印 廃 止

編 者 財団法人 半 導 体 研 究 振 興 会
発 行 人 吉 本 肇
◎ 発 行 所 株式会社 工 業 調 査 会
東京都文京区本郷2丁目14番7号
郵便番号 113
電話 東京 (813) 9171~9
振替 東京 123234 番

印 刷 所 株式会社 東 京 印 刷 セ ン タ ー
製 本 所 菊 川 製 本 株 式 会 社

3055-7006-2219

序

願みれば昭和 38 年に本財団の半導体研究所が 東北大学に隣接して 設立されたが、同年夏これを契機として本財団が幹事役をつとめ、電子通信学会半導体トランジスタ研究専門委員会および電気学会トランジスタ専門委員会との共催で第 1 回の半導体専門講習会が開かれたのであった。これに参加された数 10 名にのぼる講師、受講者の一致した希望によってこの専門講習会はその後継続して毎年夏開かれ、その回を重ねて第 7 回にいたっている。

そしてこの講習会における第一線級の研究者の権威ある講義と参加者の熱心な質疑討論や意見を集録して「半導体研究」と題して上梓しているのである。半導体分野の研究技術者にとって有意義な貢献をもたらしていると信じている。

すでに公刊された「半導体研究—1」は半導体における強電界現象とトランジスタの高周波における等価回路を、「半導体研究—2」は半導体におけるトンネル効果とその応用、および半導体レーザとその測定を、ついで「半導体研究—3」はトランジスタと集積回路のパッシベーションなどを、「半導体研究—4」は Si および III-V 族金属化合物半導体の成長と薄膜結晶の構造を、また「半導体研究—5」は薄膜単結晶の構造と物性、II-VI 族金属化合物半導体薄膜の成長などを、主要なテーマとした。

いまここに発刊する「半導体研究—6」は、半導体を用いたマイクロ波素子について、特に Si によるナダレダイオード、GaAs によるガンダイオードに関する問題がとりあげられている。

これら「半導体研究」の各巻が取扱う主要な研究テーマからみられるように、半導体分野における研究課題は年とともに変わりつつ急速な進展を示しているのである。戦後の全世界の科学技術の情報量は 10 年間に倍増するといわれているが、半導体分野を含めたエレクトロニクスの分野では爆発的ともいうべき激増を示すのである。

かかる現代にあって科学技術の進歩に遅れをとらず、さらにわが国が自主的な開発に努力を傾注しなければならない今日において、毎年行なわれるわが半導体専門講習会ならびにそのプロシーディングであるこの「半導体研究」の公刊の寄与が少なくないことを期待してやまない。

本書は講習会に参加された各位の熱心な研究努力の成果であり、文部省科学研究費補助金（研究成果刊行費）の交付をうけた。文部省大学学術局、とくに情報図書館課のご援助をいただいたことに対して深甚なる謝意を表するしだいである。

昭和 45 年新春

財団法人 半導体研究振興会会長 渡 辺 寧

半導体はエレクトロニクスやオプトエレクトロニクスなどの分野で不可欠のものになっており、これを用いた電子工学ならびに電子工業の分野は日進月歩の勢いで急速な発展をつづけている。このように隆盛をきわめた半導体工学は、基礎となる固体物理学はもとより、化学、金属学、電子工学など広範にわたった知識を必要とし、それだけに新しい技術の開発途上、あるいは研究の遂行上基礎からやり直さなければならぬ問題に遭遇することがしばしばである。

半導体研究振興会が中心となって毎年催される半導体専門講習会の大きな貢献はそのときどきの主要な問題点を基礎的に勉強することができ、しかも討論がきわめて盛んでよく意見の交換ができるので、問題の核心を十分把握できる点にある。したがってその成果を余すところなく集録したこの「半導体研究」は、現在起こっている問題の動きや重要性、教科書や文献では得られない要点を示唆する良き指導書であって、研究者や現場で新技術の開発にたずさわる第一線の技術者はもとより、半導体工学を現在学んでいる学生にもよく活用されるものと信じて疑わない。

集積回路の基礎となる表面の不活性化、エピタキシャル成長、レオタキシャル成長については、すでに第 3, 4, 5 巻として刊行された。今回は、従来の超高周波真空管に代わるものとして、集積回路と同様に注目されている半導体による超高周波負性抵抗素子に関して刊行されることになったことは、きわめて意義のあることである。

本書の出版にあたり、多大な努力を傾注された半導体研究振興会の諸氏が、日本の半導体の基盤になる数多くの研究業績をあげたことは、学会ならびに電子工業界から非常に高く評価されている。本書を上梓するにあたり、表面に出ない努力も多々あることとおもわれるので特に敬意を表したい。

昭和 45 年 1 月

元電気学会トランジスタ専門委員会委員長 安 達 芳 夫
東京大学生産技術研究所教授

いまは断絶の時代といわれている。老人と若者、教授と学生、右派と左派、左派とウルトラ左派 etc. 心を閉ざし話し合いは進行しない。ところが片方では、情報時代ともいわれ、コンピュータを設置したからは、なんでもかんでもデータをブチ込んで結果を得ようと目を血走らせている一群の人たちもいる。目まぐるしい世の中である。

わが国の学会でもアメリカなどの学会でも、いわゆる General Meeting では10分やそこの講演を数百、数千と並べたて、そのくせ必要な情報はサッパリ得られないことがままある。会って話したい人にもすれ違って会えず、時間もうまくつくれない。ずっと前、イギリスに留学していたころ、かの国の Meeting では、せいぜい50人ぐらいの専門家だけが集まり、地方のカレッジに泊りこみ、一人が30分ぐらい話をして質疑応答の時間もたっぷりとしてあった。とくに晩食をすませたあとの夜の会合はよかった。そのとき、なるほどこれが学会というものかとおもったことがある。また、先年 New Hampshire の田舎のカレッジで開かれた Particle-Solid Interaction に関する Gordon Research Conference に出席したときの感慨も同様であった。予稿なし、朝と夜の会合のほかはいっさい自由、午後はスポーツか午睡か樹陰でのお喋り、4泊5日の滞在でなんとなく脳味噌がふくらんだ感じがした。

わが国にもこの種のソフトタッチの学問的会合が欲しいとおもっていた。一昨年招かれて半導体研究振興会主催の会合に出席して、久しぶりに自由討論の楽しさを味わった。さまざまな方面の人たちが小さなホテルに泊りこみ、公式の会合のほかにロビーや廊下の隅で話合ったことは、蔵王のスロープに咲き乱れた華麗なダリヤのお花畑とともに、よい思い出となって胸底に残った。いつもの学会ではしることもできない多くの友人を得たことも嬉しかった。

この Proceedings では、とくにパネルディスカッションのところが面白い。この種の収録はさぞ大変だろうとおもわれるけれども、さらにいっそう充実していただけると有難い。自然科学でも『未完の告白』はとくに大切である。

こんごとも、さまざまなテーマでこの Proceedings が発刊され、われわれの渴をいやしてくれることを期待したい。

昭和45年1月

応用物理学会薄膜・表面物理研究会委員長
早稲田大学理工学部教授

上 田 隆 三

日本の電子工学ならびに電子工業は戦後長足な発展をとげて、いまや生産高において世界第2位の電子工業国としての地位を得るにいたっている。

しかし、先般 TI 社の集積回路の日本上陸にさいしてかなりの動揺をきたしたことは周知の事実であって、残念ながら、わが国独自の技術の開発という観点からは、まだとても十分なところには達していない。資源の乏しいわが国では、独創的技術こそ生命線であり、特に独自技術の開発は他国に比して重要である。いまや日本の重要産業となった半導体の分野で世界に魁けるためには国内の研究者および技術者が協調して、討議検討する機会を設け、深く諸問題を掘りさげ、基礎研究の立場から考え直してみることが必要である。例えば半導体企業のみならず日本の全工業の焦眉の急である集積回路など、これにたずさわる現場技術者だけでは解決できない困難な問題点を多く含んでおり、基礎研究者の成果を採用して究明しなければならないことも多い。

これに対処するため、本財団が中心となり、関係学会の協力の下に、up to date な問題をテーマに、この分野の権威者を招聘して講師とし、また一線級の研究者ならびに技術者に参加していただき、昭和 38 年以来毎年半導体専門講習会を催してきた。

この「半導体研究」はその講演ならびに、その出席者全員が参加して行なった討議の内容を余すところなく集録したもので専門的に高度であるが、また同時に今後の研究にすぐ役だつようによく結びついていると信じている。さらに講習会でとりあげられなかったが、その後に進展をみた重要な成果を特別寄稿としてあわせて載せた。

この第6巻は、クライストロンなど高周波真空管にとって代わる可能性をもつ半導体による走行時間効果負性抵抗素子をとおりあげた。この素子は、1958 年に筆者らおよび Read により提案されたが、技術的な問題によりしばらく実現されなかったが、最近急速に研究が進み、実用化されようとしている。しかし、その機構については、不明の点も多い。また新たにみいだされたガンダイオードも同様であり、本書はこれらを中心に、マイクロ波素子としての可能性を比較しながらできるだけ広い視野にたって見直し、かつ展望したものである。

幸いにして、講師にも、討論参加者にもわが国のこの分野の第一線で活躍されている方がたに集まっていたが、新鮮で示唆に富んだ、独創的な内容にすることができた。最近になってトンネル注入形が海外で注目を集めはじめたことも誇りとするにたると信ずる。本書が今後の開発に大きく寄与するものと信ずるしだいである。

昭和 45 年 1 月

電子通信学会半導体トランジスタ研究専門委員会委員長 西 沢 潤 一
東北大学教授・財団法人 半導体研究振興会常務理事

本文

執 筆 者

日本電気中央研究所	植之原 道 行
日本電気中央研究所	内 田 一 三
東京大学工学部	大 越 孝 敬
東北大学電気通信研究所	岡 部 健 明
東京芝浦電気中央研究所	久 留 勇
RCA基礎研究所	鈴 木 公 男
日本電信電話公社電気通信研究所	角 正 雄
日本電信電話公社電気通信研究所	二 井 理 郎
東北大学電気通信研究所	西 沢 潤 一
日本電信電話公社電気通信研究所	深 津 良 治
東京工業大学電子物理工学科	古 川 静二郎
日本電信電話公社電気通信研究所	木 島 宜 彦

討 論 参 加 者

東京芝浦電気電子管技術部	赤 田 邦 雄
日立製作所武蔵工場	吾 妻 孝
東京工業大学電子工学科	池 上 徹 彦
日本電気中央研究所	植之原 道 行
日本電気中央研究所	内 田 一 三
東京大学工学部	大 越 孝 敬
東京工業大学電子工学科	大 見 忠 弘
東京芝浦電気半導体技術部	大和田 敦 之
東北大学電気通信研究所	岡 部 健 明
半導体研究振興会	岡 本 孝太郎
東京芝浦電気中央研究所	久 留 勇
富士通研究所	篠 田 政 一
三菱電機鎌倉製作所	白 幡 潔
RCA基礎研究所	鈴 木 公 男
日本電信電話公社電気通信研究所	角 正 雄
サンケン電気研究所	立 川 巖
富士通研究所	時 田 正 隆
松下電子工業研究所	中 島 信 一
特許庁審査第5部	中 村 和 年
日本電信電話公社電気通信研究所	二 井 理 郎
東北大学電気通信研究所	西 沢 潤 一
静岡大学電子工学研究所	林 敏 也
日本電信電話公社電気通信研究所	深 津 良 治
東京工業大学電子物理工学科	古 川 静二郎
日立製作所中央研究所	右 高 正 俊
日本電信電話公社電気通信研究所	水 島 宜 彦
三菱電機北伊丹製作所	三 井 茂
国際電気試作部	安 田 斌
松下電器産業東京研究所	山 下 貞 彦
東北大学工学部	横 尾 邦 義

目 次

【本 文】

1. 半導体中の走行時間効果 (概論)	植之原 道行
1.1 歴史的考察	2
1.2 キャリヤ走行時間効果	4
1.3 ドメイン走行時間効果	9
討 論	13
2. ガンドメインの電気的特性について	久留 勇
2.1 GaAs における v_d - E 曲線	19
2.2 ダイオードの低電界での性質	21
2.3 ガンドメインの発生機構	22
2.4 ドメインの電気的特性	23
2.5 共振モードの発振	28
2.6 ドーピングの不均一のドメインモード発振への影響	28
2.7 ドメインによるアバランシェ現象	29
2.8 空間電荷の発生, 成長をおさえること	29
討 論	34
3. ガン発振とマイクロ波回路	二井 理郎
3.1 素子製作法	40
3.2 発振回路	43
3.3 発振特性	46
3.4 ガンダイオードの同調範囲	50
3.5 LSA 動作	51
3.6 injection locking	52
3.7 並列動作	52
3.8 ガンダイオードの高周波出力限界	53
3.9 ガンダイオードの雑音	55
討 論	56

4. 半導体マイクロ波発振器の近似解析	大越 孝敬
4.1 本報告の範囲と意義	63
4.2 高電界ドメインの形状とその特性に関する理論	64
4.3 高電界ドメインの生成・消滅に関する理論	69
4.4 負荷特性を含めた解析	70
4.5 LSA 発振の動作解析	71
4.6 インパットダイオードの近似解析	77
討 論	80
5. ナダレ増倍とインパットダイオード	水島 宜彦
5.1 ホットエレクトロンとイオン化の過程	87
5.2 ナダレダイオードの静特性	89
5.3 ナダレ発振ダイオード (IMPATT)	90
5.4 実際の発振素子	98
討 論	101
6. インパットダイオードとマイクロ波応用	深津 良治
6.1 小信号理論と高周波化への問題	111
6.2 高出力化と熱放散の問題	118
6.3 インパットダイオードの雑音, 雑音の低減方法, 周波数安定 化	125
6.4 パラメトリック増幅とスプリアス発振	131
討 論	135
7. 電子と音響量子の相互作用による走行領域の発生	内田 一三
7.1 TWT 形電子—音波相互作用	146
7.2 チェレンコフ輻射形電子—音波相互作用	148
7.3 ピエゾ半導体の非オーミック特性	150
7.4 電流振動および高電界ドメイン	152
7.5 CdS における 2 種類の電流飽和現象	159
7.6 走行高電界ドメインを応用した電子装置の可能性	160
討 論	165

8. 半導体プラズマとマイクロ波素子	鈴木 公男
8.1 プラズマについて	171
8.2 固体プラズマの分類とその作り方	172
8.3 ピンチ効果	172
8.4 半導体プラズマ共鳴	173
8.5 半導体プラズマの検波作用	178
8.6 半導体プラズマによるマイクロ波発生	179
討 論	183
9. 半導体発振の将来と応用	角 正雄
9.1 インパットと GaAs パルク発振素子の比較	187
9.2 その他の発振増幅現象と素子	191
9.3 今後の方向	195
討 論	200

【パネルディスカッション】

半導体負性抵抗素子の問題点と将来	司 会 西沢 潤一
------------------	-----------

【特別寄稿】

1. アバランシェダイオードの高効率動作に関する諸問題	古川 静二郎
1.1 アバランシェダイオードの基礎現象	233
1.2 アバランシェダイオードの負荷特性	244
1.3 新しい形式の高効率動作	259
2. トンネル効果注入による走行時間発振	西沢 潤一・岡部 健明
2.1 走行時間効果発振の歴史的背景	271
2.2 リード形ダイオードの小信号等価回路	271
2.3 注入領域について	274
2.4 GaAs p-n 接合におけるトンネル降伏	276
2.5 GaAs p-n 接合におけるトンネル降伏の雑音特性	277
2.6 GaAs p-n 接合ダイオードによるミリ波発振実験	278

1. 半導体中の走行時間効果 (概論)

植之原道行*

ガンダイオードと IMPATT ダイオードの開発によって、半導体中の走行時間効果が近年大きくとりあげられてきた。もちろん走行時間効果が、これらの素子の中で新しく認識されたことを意味するものではなく、これらが走行時間効果を利用する半導体素子として、その実用性を大きくあらわしてきたことによる。走行時間効果は、マイクロ波電子管では古くから大きな課題として長く研究され、利用されてきた。トランジスタや他の半導体素子でも走行時間効果はいろいろと吟味されてきている。しかし、トランジスタの場合には、走行時間効果はその特性を劣化するとしても、それによる利益はあまり得られない。他の素子でもいろいろな形で走行時間効果は入ってくるが、それらは実用性の点から走行時間効果を大きく打出してくるものではなかった。

半導体素子をマイクロ波領域までその使用範囲を拡張しようとするころみは、トランジスタ発明後急激に活発になってきた。1950年代初期にはすでに多くの特許が出願され、その中には走行時間効果を利用するものも含まれている。しかし、その実現は技術的基礎の不完全によって長く闇の日をみなかった。p-n 接合ダイオードとかエサキダイオードなどはマイクロ波素子として比較的長く実用化されているものであるが、

これらの中で電子が高周波電界中に存在する時間は省略できるほど短い。

走行時間効果を利用する半導体素子の開発は、マイクロ波機器の固体化にともなって、その必要性によっておおいに推進され、ガンダイオードの発明によって強力に実行化されたといつてよい。必要と競争と技術的基礎の確立によって、新素子の道は拓けてきたといふことができる。

ガンダイオードと IMPATT ダイオードとは、開発段階から生産段階に移りつつある。これらの応用はいまだに十分に開発されていないが、これからおおいに開発され、かなり重要な半導体素子として進出する可能性は大きい。マイクロ波機器を簡略化し、マイクロ波 IC とともに大衆化のきっかけをつくることを期待している。

走行時間効果は真空中でも半導体中でも結果的には同じであるが、その現象としてはかなりの相違がある。これがマイクロ波真空管の原理を直接半導体素子に拡張することを困難にしている。本論では走行時間効果の研究応用の経過を調べ、真空中の電子の運動と半導体中のそれとを比較検討し、いかに過去の知識を応用し、また半導体の特色を生かして新しい素子を開発すべきかを考える。ガンダイオードと IMPATT ダイオードについては後に詳細な解説があるので、それらの

* 日本電気中央研究所

詳細な説明はさけるが、これらの素子がいかなる問題を現在ふくみ将来いかに発展するかを論ずることにする。

1.1 歴史的考察

超高周波電子管の研究開発にあたって、常に電子の走行時間が問題になってきた。古くは、格子制御管での電子走行時間を最小にするためにあらゆる努力がはられ、第1格子と陰極との機械間隙を最小にすることがなされた。現在のトランジスタが同じ方法をとっている。しかし、これでは実用性と信頼性が悪いので考えられたのが電子振動管であり、さらにクライストロンである。この場合には完全に電子走行時間効果が用いられている。

電子管の場合には、電子が真空中を飛翔するときはいオンとの衝突はほとんどなく、電子の運動量は常に保存され、電子の運動は過去の歴史にのっとって左右される。そのために運動の慣性が電子の場所における密度を大きく左右する。クライストロンの場合、電子走行時間が問題にならないような小間隙にかかった交流電圧で電子速度を変調し、電子が直流電界あるいは無電界中を走行する間に電子密度変調に変化し、次の出力間隙を電子群が通過する場合に、電子密度の最大部分が最大交流減速電界を通るように走行時間が調整されていれば、最大の負性抵抗が得られるようになっている。

Llewellyn¹⁾らは二極管を用い、電子が交流電界中を走行するときの走行時間効果を用いて負性抵抗を得ることを試みた。負性抵抗は走行角が 2π から 3π の間にあらわれ、その大きさは電流と発振波長の4乗とに比例する。しかし、真空管では電流密度が高くできないために、得られた負性抵抗の最大値は非常に小さく、能率は数分の1%で、3GHz帯での出力は0.2~0.3Wであった。陽極は水冷にし、発振回路は損失が非常に小さくなるように作らなければ、能率は極度に

減少した。

熱陰極からとりだせる電流密度は高だか! A/cm^2 である。これに反して、半導体を用いれば数千倍の電流密度は容易に得られる。また、真空管では不可能に近いような電極間隔が容易に得られる。このことが半導体ダイオードを用いて実用性あるマイクロ波走行時間効果素子の可能性を考えさせたゆえんである。

しかし、半導体中における電子や正孔は、格子や不純物と毎秒 10^{12} 回の衝突を繰り返す。その結果、電子や正孔には慣性がほとんどなく、外部からの電界がかかっている間のみ電界の方向に移動する。真空管中のように電界が零の場合でも、一定の初速度でキャリアが移動を継続することはない。このことは、速度変調を密度変調にかえるような細工はなかなか行なわれない。しかし、半導体中では他の方法で大きな密度変調を得ることができるので、走行時間効果によって負性抵抗を発生することができる。

点接触形トランジスタから接合形トランジスタに発展するにつれて、いろいろの新しい可能性があらわれてきた。初期におけるトランジスタ開発者の中には多くのマイクロ波帯やガスプラズマ研究の経験者が混じっていたので、当然の動きとして半導体を用いた超高周波の発振・増幅素子の検討がなされ、多くの特許が1952年から1956年の間に出願されている。例えば、W. Shockleyによって、(a) 1953年1月に出願された“high frequency negative resistance device” (米特 2,794,917, June 4, 1957), (b) 1954年2月に出願された“negative resistance device” (米特 2,772,360, Nov. 27, 1956), W. T. Readによって、(c) 1954年6月に出願された“high frequency negative resistance device” (米特 2,809,652, August 11, 1958)などはその例である。(a)ではp-p-nとp-n-p形が例としてあげられており、(b)ではp-n-p, p-n-pとp-i-n-p形が、(c)では例のリードダイオードとよばれているp-n, p-n-p, p-n-pとp-n-

$n-n$ 形が例にあげられている。K. G. McKay は、現在 IMPATT ダイオードの一部に入っている $p-i-n$ 形のもを 1954 年 10 月に “negative resistance semiconductor apparatus” (米特 2,908,871, Oct. 13, 1959) として出願しているが、これは周波数特性をもたない負性抵抗素子として出願しており、走行時間効果は考慮していない。

わが国でも 1954 年ごろから $p-n$ ダイオードやトランジスタから高周波発振が観測され、その原因として走行時間効果が考えられるようになってきた。西沢らはかなり詳細な理論解析を $p-n-n$ 形について行ない、Read の論文²⁾ 発表直後に発表している³⁾。日米以外の情報はないが、おそらく諸外国でも同じような研究が行なわれていたとおもわれる。しかし、これらのかなり活発な研究にもかかわらず、実用的素子と可能性はつい最近になるまであらわれなかった。これは結晶技術、素子技術がまだ不充分であったがために、かなり理論がはっきりした時点においては、その実行の困難性が明瞭であった。また、電子計算機の利用がおくられていたために、極度の非直線方程式の解析が困難で理論的検討も不充分であった。現在の進歩した理論と実験結果からおして見て、かなり索引に実験が行なわれたとしても、未熟な技術をもってしては、例え結果が得られたとしても、その特性は非常に悪かったであろうことが推察できる。

結晶と素子技術が進歩するにつれて、またマイクロ波固体発振器の必要性が強調されるにつれて、ベル研究所では再びリードダイオードの重要性に着眼し、1962 年ごろからほぼそそとその研究に着手した。しかしリード構造は複雑なために、その発展が遅れ、初期の成果ができたのが 1964 年の中ごろであった。その結果は実用にはほど遠いものであったが、リードダイオードがその発表後長年月のうちに実現されたことにおいては、後のち走行時間効果素子の開発に大きな基礎となった。

われわれパラメトリック増幅器やバラクタ通波器を開発していた者にとっては、直流電源から直接マイクロ波電力が得られる素子の必要性を強く感じていた。いろいろの素子の可能性を検討し、半導体中のバラクタ素子も検討したが、いろいろの点で実用性はでてこなかった。このころ、IBM 社の Gunn が 1963 年の Solid State Device Research Conference で n 形の GaAs に抵抗性電極をつけたものに高電界をかけること、素子の寸法できまるような電流振動が得られることを報告した。その原理は不明であり、発振はパルス発振であったが、その尖頭出力と発振周波数はマイクロ波電源としての可能性を含んでいた。

日米英の多くの研究所でガンダイオードの研究がその直後に開始されたが、Gunn の結果を再現するまでには 1 年近い年月を経過した。ベル研究所でも半年近くの時間を要した。これは原理が不明であったことと、GaAs の結晶が未開発であり、その特性に大きなバラツキがあったことに起因する。電流振動が得られないと原理の追究もできないので、がむしやりに素子を作る時期がつついた。GaAs のバラクタに引いた最長の抵抗性電極をつけ、よりよい低抵抗性接触を得れば得るほど電流振動が得られず、整流性電極ほど電流振動が容易に得られるという結果も出た。このために、ガンダイオードはバルク効果であるか、接合効果と走行時間効果であるかの意見が対立し、とうとうバルク効果派とリードダイオード派に分けてしまった。もしガンダイオードがリードダイオードであるならば、GaAs でなくてはならぬ理由はないので、Si の $p-n$ ダイオードや $p-i-n$ ダイオードに GaAs タイオードに流すぐらいの電流を流してみたら発振すべきだということ。で、がむしやりに負のパルス電圧をかけてナダレ電流をうんと流して発振をみいだしたのが、B. C. DeLoach らである。その最初の結果が得られたのが 1964 年の春であった。バルク効果を主張するわれわれと、avalanche transit time effect を主張する

4 半導体研究 VI

DeLoach らが平行して開発をつづけ、ガンダイオードは1964年の9月に、IMPATT ダイオードは翌年の1月に連続発振に成功した。この成果は両ダイオードの実用性を大きくあらわし、開発を推進することになった。

ガンダイオードはIMPATT ダイオードより構造が簡単なために、初期の進歩はかなり速かったが、結晶の未開発によるいろいろの問題は、素子開発途上における進捗速度を決定的に左右した。バルク効果素子は材料固有の物理現象を利用するので、材料研究の不充分はことさらに素子の性能、再現性に影響する。これがベル研究所におけるIMPATT ダイオードの目ざましい進歩にくらべて、ガンダイオードの進歩が遅れている原因である。

1.2 キャリヤ走行時間効果

1.2.1 真空中と半導体中の差異

いままでおりにふれて真空中と半導体中のキャリヤ運動の差異についてのべてきた。古い歴史をもち、多種多様の電子走行時間効果素子¹⁾が開発された電子管の知識を半導体素子に応用するために役だつとおもわれるので、ここにまとめて考えてみたい。

半導体中のキャリヤの運動は、ガス管中の電子とイオンの運動に非常に近似している。しかし、開発されているマイクロ波管はおもに真空管であるので、真空中と半導体中のキャリヤ運動について比較する。

先にものべたように、いちばん大きな差異は、真空中の電子は運動量保存の法則にのっとって運動するので、各瞬間における電子の運動は過去の歴史にしがっている。他方半導体中のキャリヤは、 10^{12} Hz 以上の衝突周波数で格子や不純物と衝突するので、キャリヤは電界がかかっている間のみその方向に移動し、電界のない領域に突入すれば急速に熱運動にかわる。このために、真空中の電子の加速度が電界に比例するが、半導体中ではキャリヤの速度が電界に比例する。

真空中の電子の速度は光の速度に近づくまでは電界によって加速されるが、半導体中ではキャリヤのエネルギーがいろいろの形に変遷されるので、電界が上昇すると速度の上昇率は急激に減少し、ついには速度はほぼ一定値に近づく。この飽和速度は、Si では電子が $15,000$ V/cm 付近で約 8.5×10^8 cm/sec、正孔の値は約 5×10^8 cm/sec とされている。この速度は電子が真空中で加速される場合、約 0.02 V の電圧で加速されたものに相当する。真空中で数 $1,000$ V の電圧で電子を加速すれば、電子の半導体中の飽和速度の数 100 倍の速度が得られる。このことは、半導体中で真空管中の走行時間と同等なものを考える場合、電極間隔はかなり小さなものになる。数 μ の電極間隔は容易に得られるので、これは問題はない。しかし、進行波管と同一な動作をさせようとする、電波の実効伝播速度を伝播速度の $1,000$ 分の 1 以下に下げねばならぬことになり、これは実用上ほとんど問題にならない。

真空中での電子の拡散、再結合、発生はほとんど問題にならないが、半導体中では無視できない。再結合と発生は無視できる場合が多いが、拡散は無視できない場合が多い。電界が低くてもキャリヤ密度に大きな差がある場合には、拡散によってかなり大きな電流が流される。この拡散運動を用いて電圧と電流の間に大きな位相差を生じさせることができる。Shockley はこの拡散電流による位相差を用いて、走行時間効果をしようと試みた。電界が十分に高く飽和速度領域に入ると、拡散はほとんど無視できるようになる。

拡散と再結合は密度変調された minority carrier をかなり長距離走行させる場合には、その密度変調を減少させる作用をなす。このために走行時間効果を大きく減少させる。しかし、飽和速度領域にある半導体中に majority carrier を走行させると、拡散と再結合がほとんど無視できるので、密度変調を劣化させることがほとんどない。しかし、移動度が正である領域では、密度変調を大きくすることはできない。CdAs の

ように負の移動度をもち得る材料においては、小さな密度変調を大きく成長させることができる。これを空間電荷波の成長ともよび、バルク効果増幅器にはこの現象を利用している。

1.2.2 半導体中の走行時間効果

以上のべたように、半導体中では速度変化を慣性によって密度変化に変える走行時間効果を用いることができないので、交流電界は最初から密度変調がかかるように用いるか、バルク効果によって空間電荷波が成長するような状態で走行時間効果を利用せねばならぬ。トランジスタの場合には minority carrier の注入量を交流電圧で変化させている。しかし、この場合には、電流はほとんど拡散によって流れるので、長時間走行させると再結合と拡散によって密度変調が減衰する。このことが拡散電流による走行時間効果では大きな負性抵抗が得られない原因である。

この欠点を解決するために、Read がナダレ電流によって大きな密度変調を得ることを考えた。そのうえキャリアの走行空間の不純物密度を小さくし、電界が飽和速度領域にあるようにして拡散と再結合の問題をなくしようとした。これが有名なリードダイオード²⁾である。

図 1.1 にその基本図を示す。

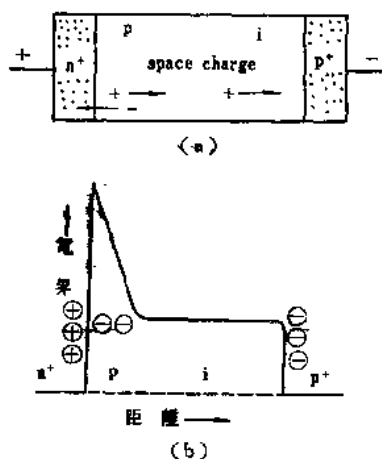


図 1.1 リードダイオードの基本図

図では n^+p-i-p^+ 形を示しているが、なにも正孔の走行時間効果のみを使用する必要はなく、 p^+n-i-n^+ 形で電子を用いてもよい。図(b)に示すように、 n^+p 接合にナダレ電界がかかり、おもに i 領域が移動領域になるようにしてある。p 領域がナダレ領域、 i 領域が移動領域とふたつの領域に区別できる。Read はナダレ領域に“hyperabrupt”の不純物分布を仮定し、電子と正孔のイオン化率 α と β が等しいと仮定した。IMPATT ダイオードの結果からわかるように、この仮定は必ずしも必要でなく、 α と β は一般に等しくない。これらの相違は特性や雑音に影響するが、基本的動作を変えることはない。

先にものべたように、真空管との相違は、ナダレ現象で約 90° の位相差が生じることと、移動領域で電界に無関係に速度が一定であることである。まずナダレ領域でいかにして位相差が生じるかを考えてみる。いまキャリアの走行時間が無視できるような薄いナダレ

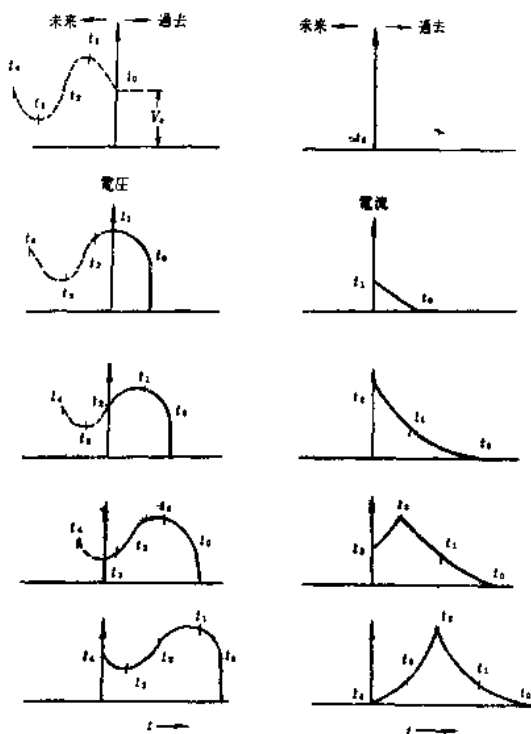


図 1.2 ナダレ電流の位相ずれを示す図