

最近の半導体素子について

Recent Advance in Semiconductor Devices

阿 部 亨*
Akira Abe

内 容 梗 概

整流素子から始まりトランジスタに至って、その全盛期を迎えた半導体工業では、高圧大電流の整流素子の開発、高周波と高出力トランジスタの開発、サイラトロンのような特性を呈する高性能制御素子、あるいは太陽電池などとして発展を続け、また材料面では熱特性を向上するため、ゲルマニウムよりシリコンさらに金属間化合物の方向に進展してきた。しかし最近ではまったく別の概念に立った研究が次第に活発になり、次の時代を準備している感が深い、ここでは着目すべき二、三のものについて解説する。なお日立製作所において最近に開発したパラメトリック整流素子、および高速スイッチングの双安定素子について略記する。

1. 緒 言

固体理論に基礎をおいた半導体素子の研究として、将来電子工業に応用を予測されるものが最近二、三現われた。これらは既存のトランジスタに置き変るといっても、新しい分野に発展するものと思われる。すなわち

- (i) NEMAG (負の実効質量をもつ増幅素子 Negative Mass Amplifiers and Generators)
- (ii) トンネルダイオード
- (iii) Cryosar (極低温における衝撃イオン化 (Impact Ionization) を利用した素子)

なおこのほかにダイオードの接合容量が電圧により非線形に変化するのに着目した、パラメトリック増幅器 (Parametric Amplifier) があげられる。

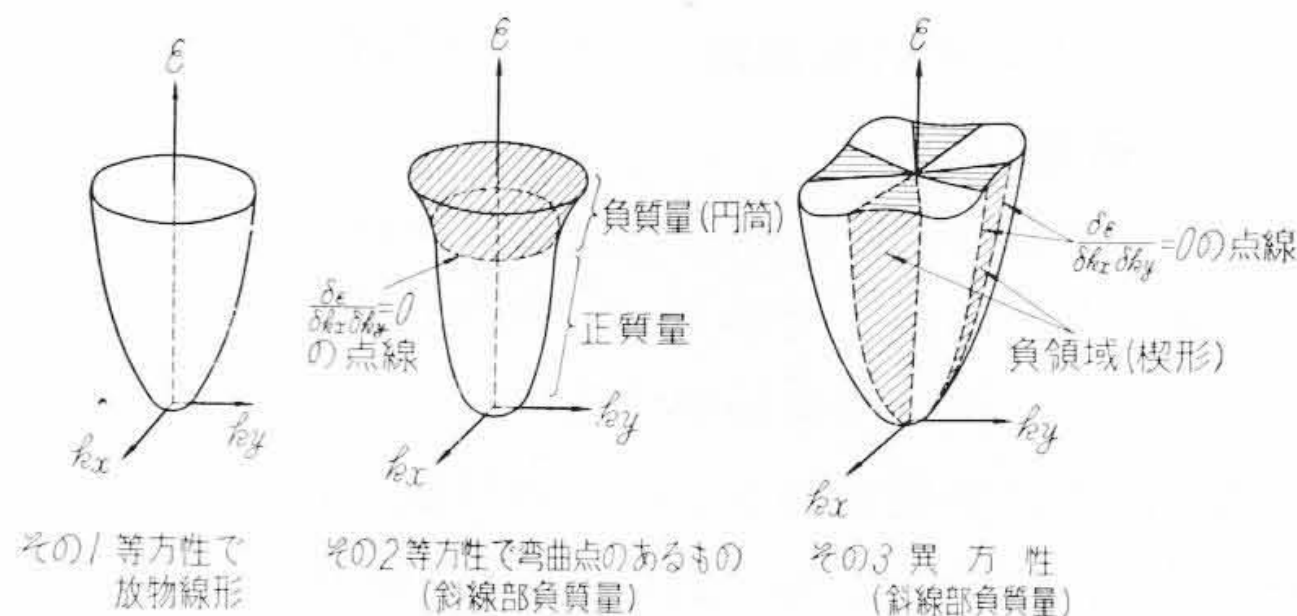
従来の技術的な改善向上については、まずトランジスタの高周波、高出力の特性においてそれぞれ、1,000 Mc, 100 Watt を目指して実用化が進んでいること、シリコントランジスタがいろいろ不利な特性を改良しつつ、150°C 付近までの高信頼度を要する分野で需要を広げていること、あるいは極度に小形化した製品が商品化されつつあることなどがあげられる。しかしここでは技術的進歩の面には触れず、上記新分野の研究について略述する。

2. 負の実効質量をもつ増幅素子⁽¹⁾

半導体結晶の物理的諸性質の研究が進み、結晶の異方性によるエネルギー準位の構造や、結晶格子あるいは不純物原子による荷電体の散乱の問題が定量化されるに伴ない、まったく新しい原理による負性抵抗素子が出現した。

量子力学によると立方結晶内の電子 (正孔も同じように考えられる) の実効質量は対称テンソルとして次式で表わされる。

* 日立製作所武蔵工場



第1図 波動ベクトルとエネルギー帯の構造

$$\left| \frac{1}{m} \right| = \frac{4\pi^2}{h^2} \left| \frac{\partial^2 \xi}{\partial k_i \partial k_j} \right| \dots \dots \dots (1)$$

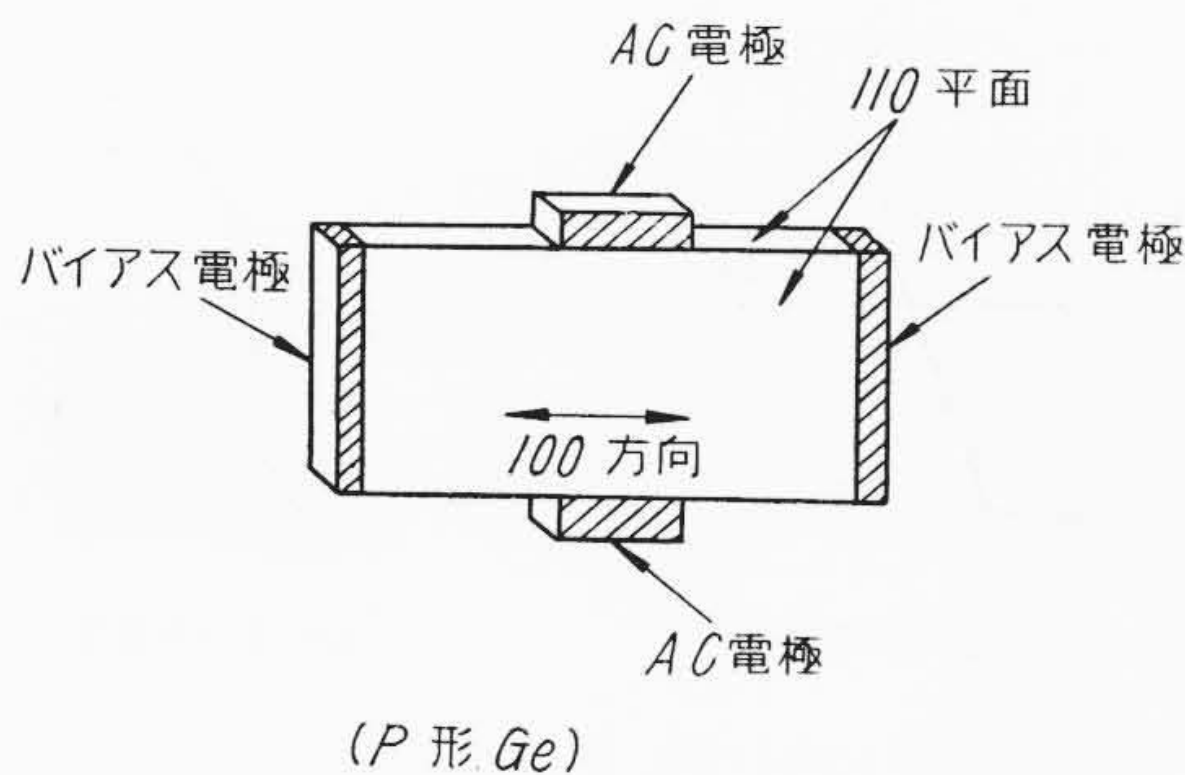
ここに h : プランクの常数

ξ : 電子のエネルギー

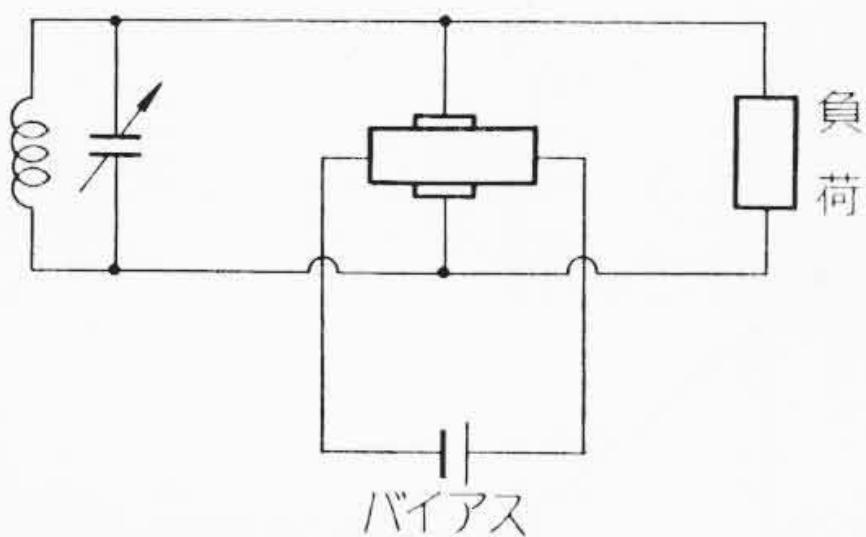
k_i, k_j : 電子の波動ベクトル成分

電子が光や放射線の照射、あるいは電磁界による加速など外からエネルギーを受けるとより高いエネルギー準位に上げられる。もしこのとき(1)式の実効質量が負になる条件があれば、この増幅素子が得られる。すなわち結晶に対し交流電界を適当な方向から重畳することにより入力信号に対し負性抵抗として作用し、共振回路を入れれば発振素子となり、また適当な整合回路とともに用いられれば増幅器ともなる。

第1図の結晶内電子の波動ベクトルとエネルギー帯の構造を考察すると、その1のように放物体形の場合は、(1)式より明らかなように全領域正質量である。その2では変曲線より上の部分が負質量になる。しかしこれでは波動ベクトルの低い部分が正質量のため、電子が加速される間に、正負相殺して負性抵抗素子とはならない。その3のように異方性の強い結晶では、 k_x または k_y の方向に沿って明らかに負性抵抗が出現する。量子力学的にはエネルギー帯の端で縮退している場合に相当し、 G_v , S_v では価電子帯 (Valence Band) などである。



第2図 NEMAG の構造



第3図 NEMAG 発振器の応用回路

金属間化合物でもこのような現象が起ることを示し応用の可能性がある。

電子に外部から加える信号エネルギーはなるべく少く、すでに励起して負質量の増幅効果を持った電子がその効果を失わぬようにしなければならぬ。その限界は、電子なだれを起し第1図その3の斜線部外に飛出した正質量の電子を新たに生ぜぬことが必要であり、価電子ではエネルギー禁制帯以下でなければならぬ⁽³⁾。また、Optical phonon (音響量子) との衝突確率の大きい材料では、一段と低くしなければならぬ⁽⁴⁾。Ge, Si では 5,000 V/cm の電界になる⁽⁵⁾

負質量を計算して見ると次のようになる⁽⁶⁾

$$m_{TGe} = -0.22 m_0 \dots\dots\dots (2)$$

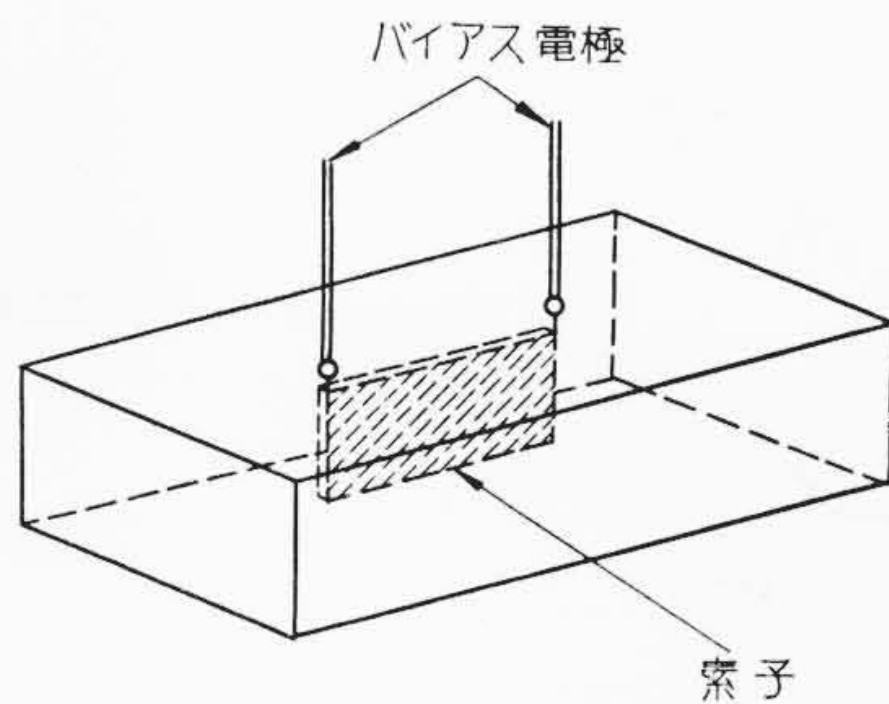
$$m_{TSi} = -0.43 m_0 \dots\dots\dots (3)$$

ここに m_0 は電子の静質量

m_{TGe} は加えたエネルギーに対し横方向の質量

増幅周波数の限度については、Optical phonon の平均衝突時間により定まりP形Geでは77°Kで大体1,000 kMcに達する。

構造の例を第2図に示す、電子を負質量にするバイアス電極。信号を入れるAC電極、いずれも抵抗接触のはんだまたはメッキである。発振回路の一例を第3図に示す。マイクロ波領域になれば、結晶は偏平な薄板で十分でありこのほうがバイアス電流も少なくて済む。またAC信号は変位電流を用いるため端子を付す必要はない、レーザーと同様第4図のように導波管内にそう入するのみで十分である。



第4図 導波管に接続した NEMAG

この素子の特色は、

- (i) 原子の共振周波数に依存するレーザーと異なり、素子自体まったくの負性抵抗であるから、全帯域で同調可能である
 - (ii) 素子の寸法は特性に影響しない
 - (iii) 雑音は、Optical phonon の散乱が非弾性である限り非常に少ない
 - (vi) 直流に対しても負性抵抗を示すため増幅器としては安定性を十分考えた設計が必要である。
- しかし反面、これを利用し、スイッチングなどに用いる双安定素子の可能性もある。

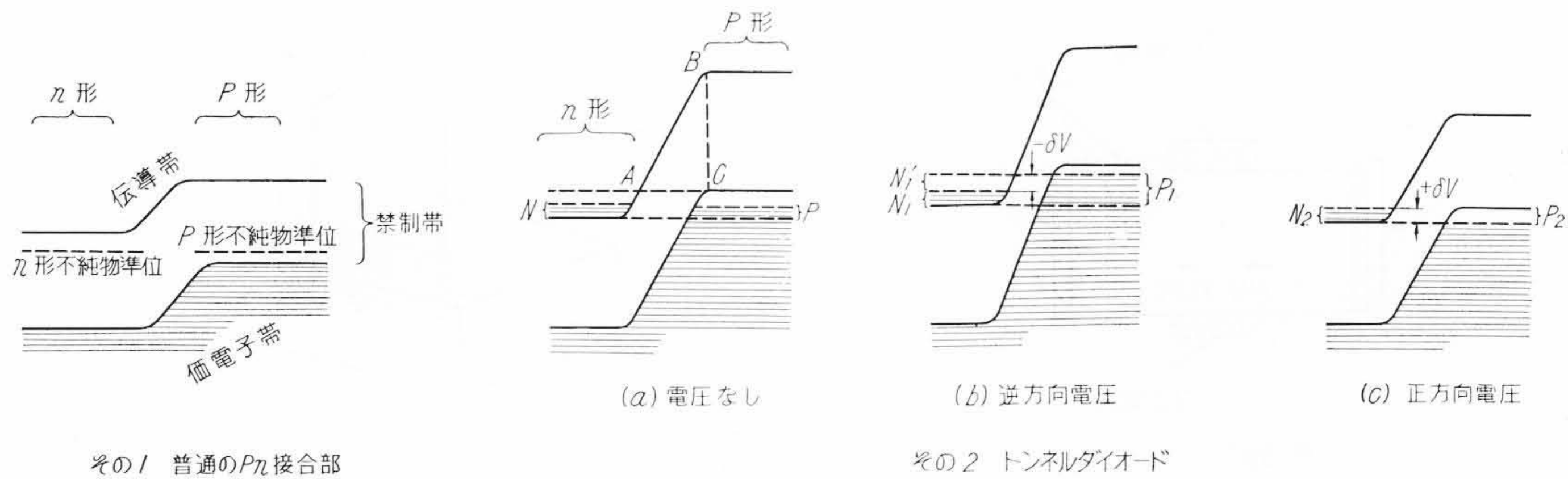
3. トンネルダイオード⁽⁷⁾

1948年 Shockley がトランジスタ作用を発見して以来、そのあまりにも権威ある理論の展開により誰もかえりみなかったところに重大な発見がなされた。量子力学の直接の応用であり、技術的には高純度の結晶を要しないものである。普通のトランジスタに用いる結晶は不純物濃度が $10^{17}/\text{cm}^3$ 以下であるが、このトンネルダイオードでは $10^{19}/\text{cm}^3$ 以上の高い濃度である。

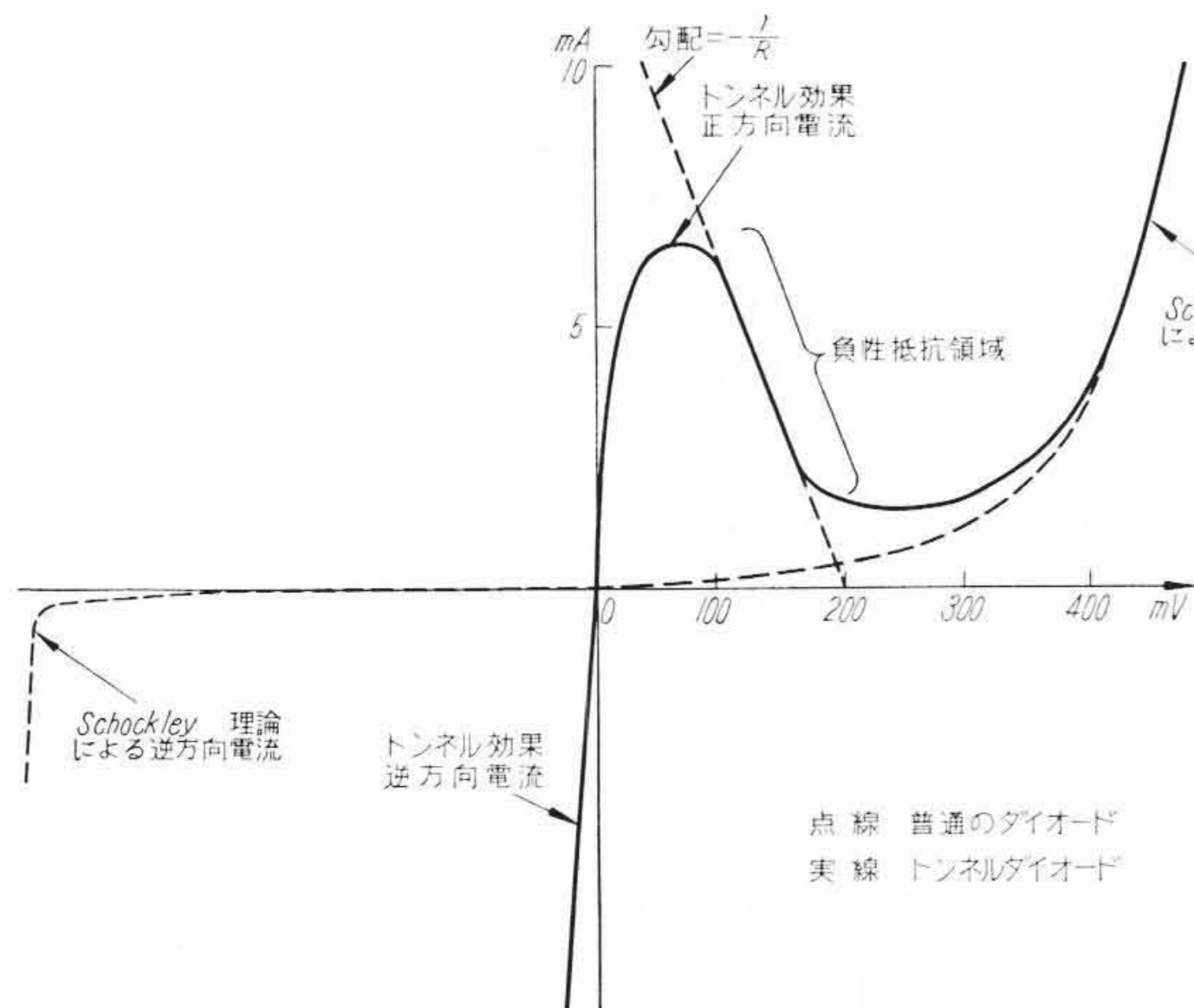
そのため、結晶電子のエネルギー状態は第5図に示すように普通のものに比し、n形では伝導体により多くの自由電子が存在し、またp形では、価電子帯の電子が不純物準位に移るため禁制帯に近い部分はある程度空虚な状態と考えられる。そこでpn接合部では電圧の加わらない状態で第5図その2(a)のように普通の場合と異なり、n形の電導体とp形の価電子帯とが上下方向に重なることになる。

もしpn接合部がアロイのような方法で非常にせまく作ることができれば、第4図その2(a)N部の電子とP部の電子とはポテンシャル障壁ABCを介しいわゆる量子作用のトンネル効果によりお互いに行ききして $10 \text{ amp}/\text{cm}^2$ にも及ぶ数が動的平衡状態を保つことになる。

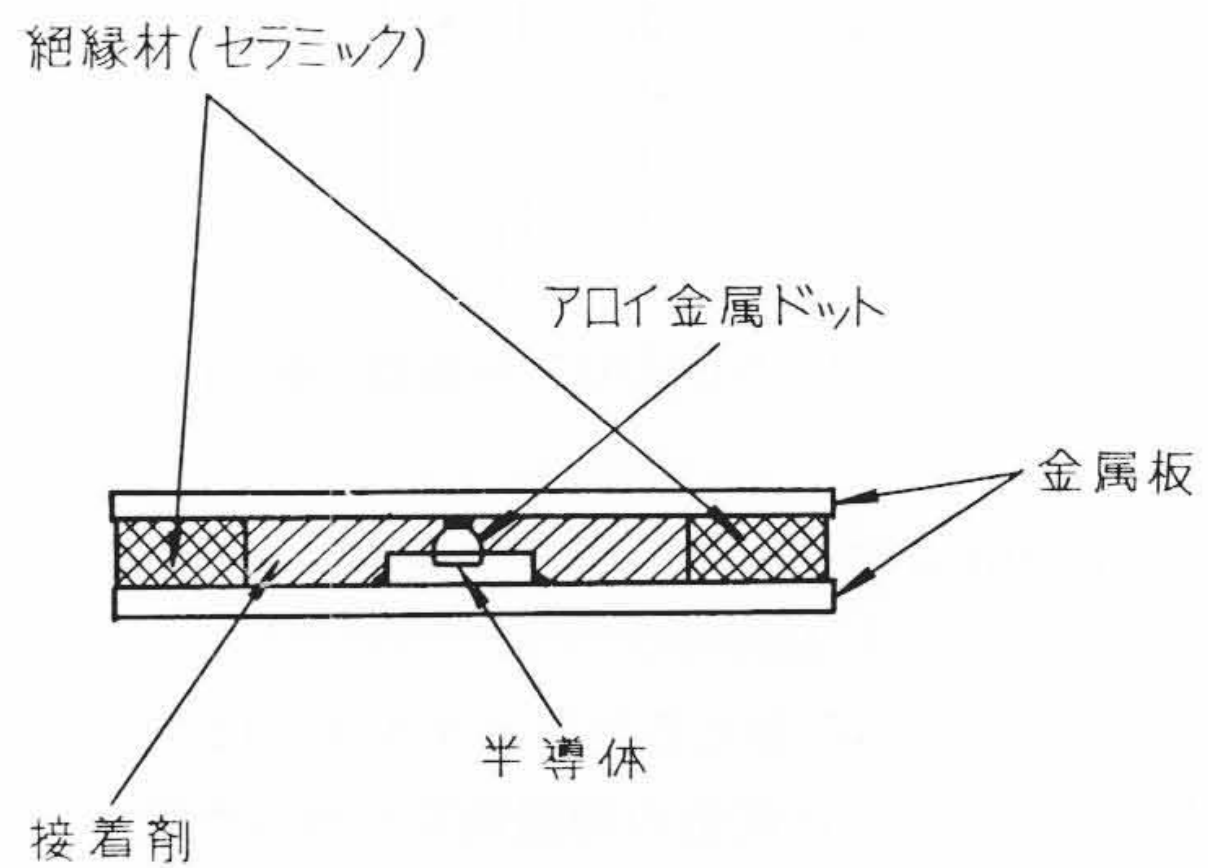
今逆方向に電圧を加えると、第5図その2(b)のようにP₁側のトンネル効果を起す電子が多くなり電圧に比



第5図 結晶電子のエネルギー状態



第6図 電圧—電流特性曲線



第7図 トンネルダイオードの構造

例した電流が生ずる⁽⁸⁾。すなわち N_1' と同じ単位にある P_1 の電子が電流にあずかる。次に正方向に電圧を加えると、第5図その2(c)に示すような、最初電圧が低い間は、電圧に比例して電流が流れ、次に P_2 の電子が減少し逆に零になったところで電流最大となる。その後は減少し、遷移すべき部分 N_2 が p 形の禁制帯に入ると電流は最小になる、さらに電圧を増すと普通の pn 接合と同じく Schottky の理論に従う整流電流が生ずる。

電圧—電流の関係は、第6図に示すように負性抵抗領域が現われ回路素子として各種の応用が期待されるが、その特色は

- (i) 半導体中の電導がいわゆる少数電荷 (Minority Carrier) による、拡散またはドリフト作用でなく、金属電導のように多数電荷 (Majority Carrier) であるため⁽⁹⁾、原理的には 1,000 kMc まで使用可能である。
- (ii) 温度による特性変化はきわめて少なく、またふんい気、素子の表面状態にはほとんど影響されない。
- (iii) 電力消費は少なく、数 mW 以下である。これは太陽電池と組合わせて広い用途が期待される。
- (vi) 接合部の静電容量は大きく (100 $\mu\mu f$ 前後) イ

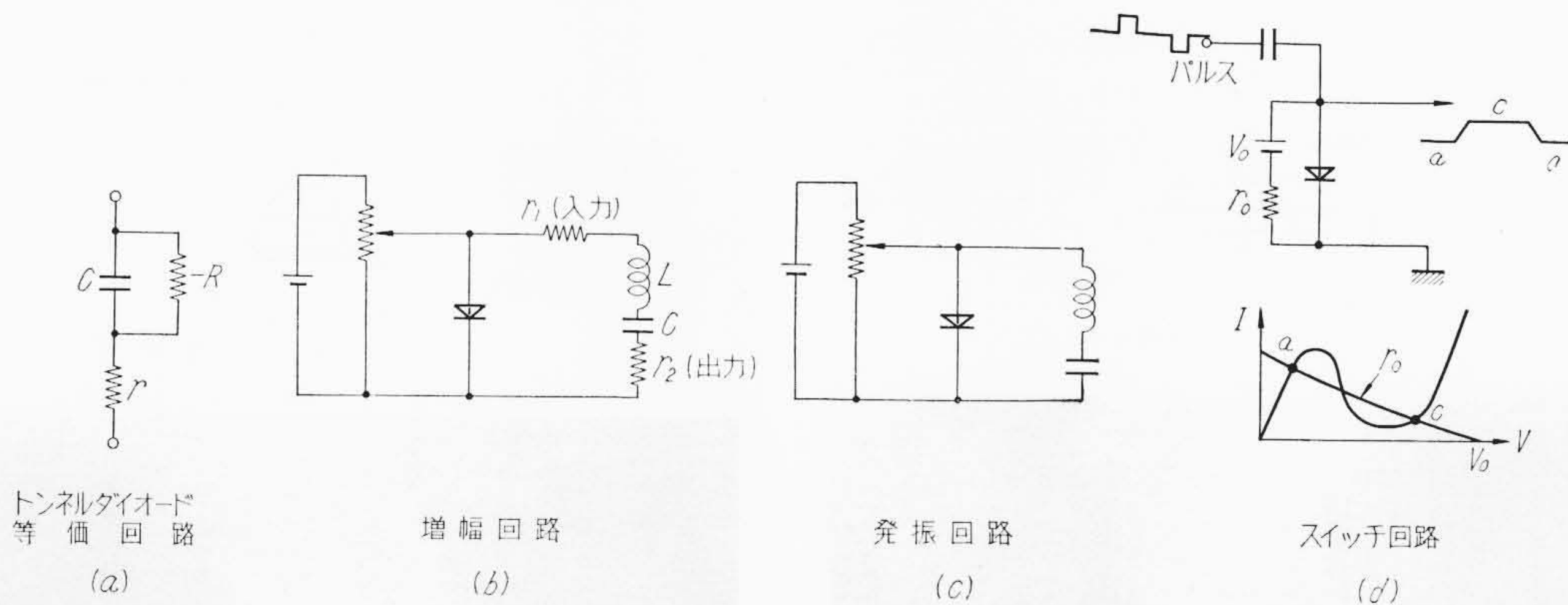
ンピーダンスは非常に低いため素子の構造および回路に特別の考慮が必要である。

構造は従来のダイオードと同じであるが、気密封止の必要はない。マイクロ波に使用する場合は、接合容量の大きいのに見合うように直列インピーダンスを極力低下するため、リード線は用いられず、第7図のようにリード板とする⁽¹¹⁾。

応用の一例を第8図に示す、発振増幅などの場合にはダイオードを 100~200 mV にバイアスして第6図の負性抵抗領域におく、この負抵抗を $-R$ とすると等価回路は(a)のようになる、(b)(c)に増幅発振の原理回路を、また(c)にスイッチ回路を示す。低出力でしかも高周波という魅力はいろいろの不利を補って次第に応用されるであろう⁽¹⁰⁾、また記憶装置、定電流装置などの用途も考えられる。

4. 極低温の衝撃イオン化素子 (Cryosar)⁽¹²⁾⁽¹⁵⁾

液体ヘリウムを用いた極低温の研究はさきに超電導の現象究明によって計算機の記憶装置をはじめ各種の応用分野を開いているが、半導体においても最近非常に重要

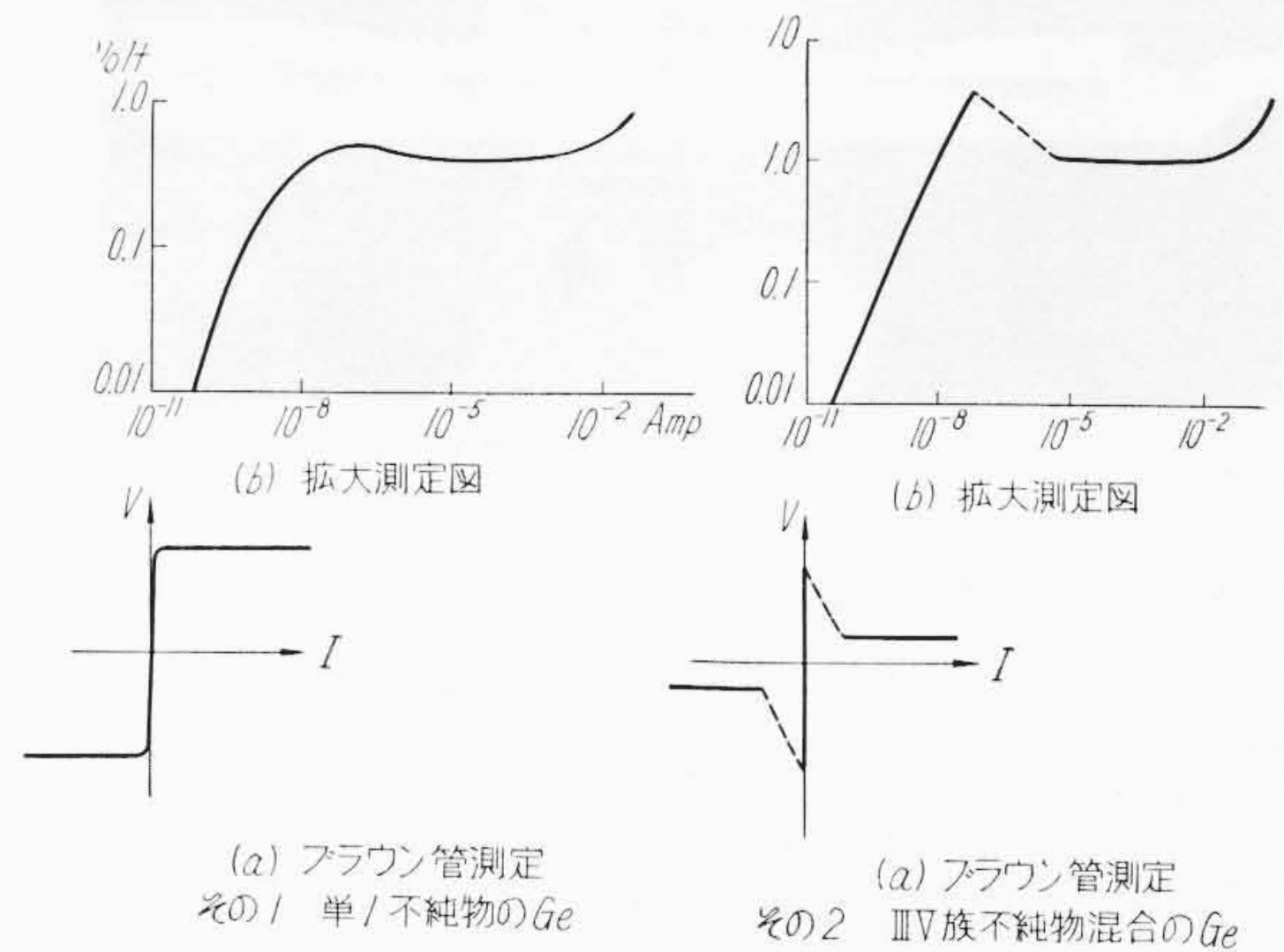


第8図 回路例と特性

な発見がなされ、まだ現象の究明されないうちに早くも計算機のスイッチングなどに応用されようとするすう勢にある⁽¹⁶⁾。

その原理は、ゲルマニウムのような半導体を極低温 (4.2 °K) におくと、結晶内不純物原子から離れていた電子または正孔は、ほとんど全部ふたたび不純物原子にとられ結晶はまず絶縁物と見なされる。一方極低温のため結晶格子の熱振動はほとんどなくわずかに残った電子または正孔の移動度 (mobility) は非常に高い、そのため微小電界によって加速され不純物原子と非弾性衝突を行いここから新たに電子または正孔を生む。この現象はなだれのように進み、あたかもガス入放電管のように導電状態になる。しかし導電状態は非常にせまい範囲に局限される。その理由は不純物原子が動かないことと電子または正孔の平均自由行程が非常に短いためである。主要な特色を示すと

- (i) 非導電状態から導電状態に移る時間は印加電圧により異なるが 10m μ s 以下である。
- (ii) 動作電圧は 0.3~10 V で不純物濃度により相異があるが低電圧動作が可能
- (iii) 動作電流は非常に低くてよく 1 μ A で十分動作し、消費電力は 1 μ Watt 以下である
- (iv) すべての抵抗接合であるから、pn 接合に関する不良、特に表面の影響は受けず、結晶の一様性が保証される限り、一枚の結晶片に多数の素子を集約製作できる。各素子の導電状態は局限することができほかの素子に影響を与えないため、厚さ 0.012 cm の結晶片で 625個/cm² まで可能である。
- (v) 双方向性で両端子に極性がないため回路構成が便利
- (vi) 極低温に保つ特別の装置が入用であるが、消費電力は少ないからデュワーびんで移動取扱いも可能である。



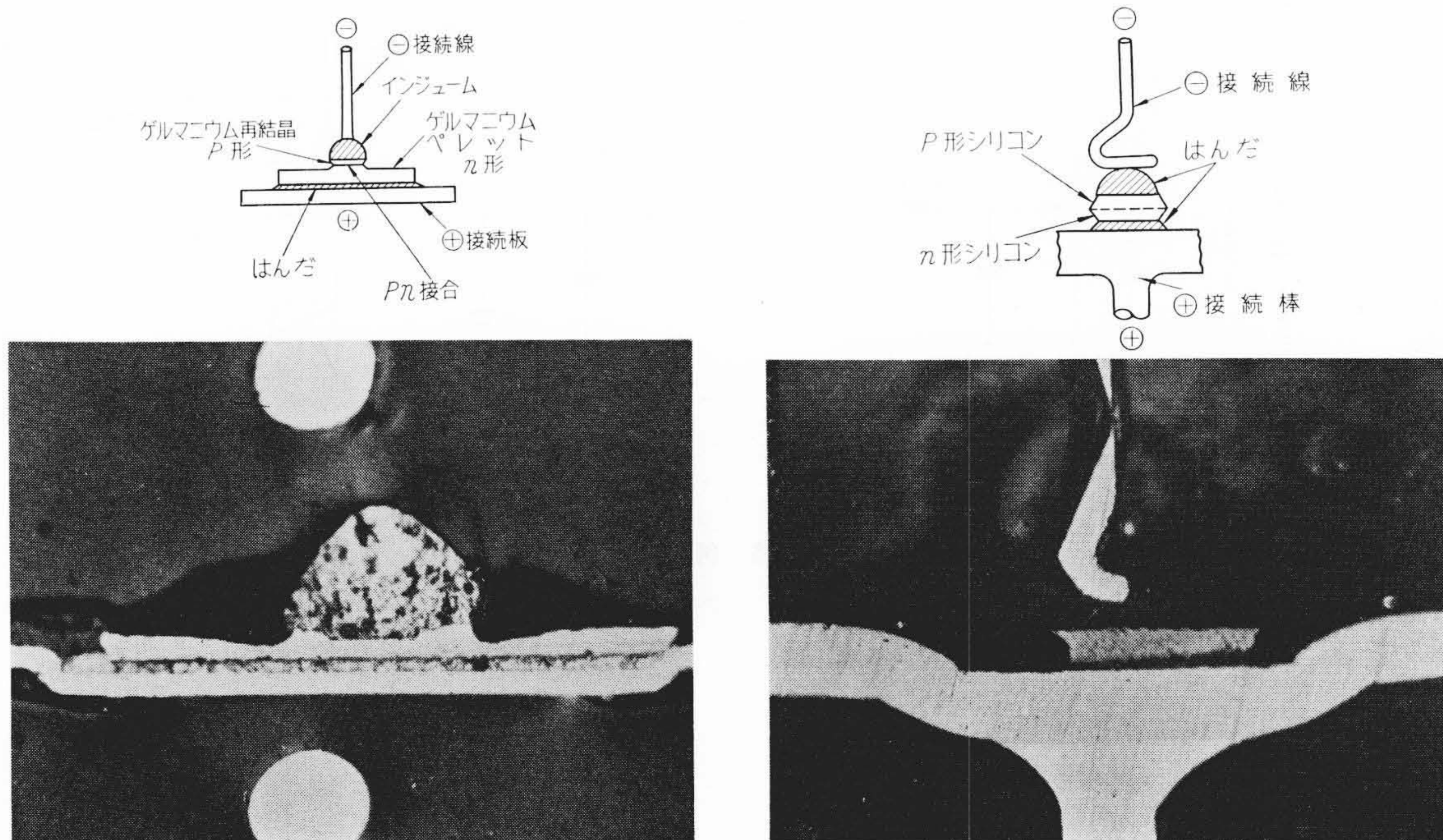
第9図 Cryosar の電流—電圧特性

回路例特性を第8図に示す、注目すべき点は、ゲルマニウムにⅢ族Ⅴ族の不純物を混入した場合には負性抵抗領域が現われることである。しかもこれが双方向であるため安全動作点は3個生じ、計算機の記憶装置として非常に有望である。現象理論⁽¹⁷⁾として不純物濃度の多い場合に起り、不純物準位内の電気伝導において非抵抗性を起すものと考えられている。なお光照射⁽¹⁸⁾をすると、動作電圧が低下する。

応用方面では2端子あるいは3端子でパルス信号の増幅に⁽¹⁹⁾用いる研究が行われている。すなわち信号は導電破壊を起すに十分な電圧を短時間加え、なだれ現象が発達して電流が多くなった状態を出力として取出すわけである。

5. パラメトリック素子とサイリスタ

以上で最近注目を集めている半導体素子の概説を終る。応用方面がまだ開発途上にあるため、その重要性の全ぼうは将来に待たねばならない。これらがいずれも近來急速に進展した非直線特性を利用する、いわゆるパラ



第 10 図 パラメトリック素子説明図

メトリック素子と関連があることは見のがせない。つぎに最近実用性を増しつつある，pn 接合を用いた可変容量素子（バリキャップ）およびサイラトロン的動作を行うサイリスター（Thyristor）のうち，日立製作所で近く製品化を予定するものについて述べる。

5.1 バリキャップダイオード

pn 接合部の電気容量は接合の構造によって電圧依存性が異なる。バリキャップダイオードではほかの特性が同じである限り電圧依存度の大きい合金形接合が用いられる。その容量は次式で示される。

$$C = \left(\frac{K}{2V\mu\rho} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

ここで K 半導体の電媒常数

ρ 半導体の比抵抗

μ 多数荷電体の移動度

V 印加電圧

しかしシリコンでは製作条件の容易さ，または入力抵抗を著しく高くするためしばしば拡散接合形が用いられる。このときは(4)式の $1/2$ 乗が $1/3$ 乗に近くなる。なおマイクロ波領域で使用する場合には，ボンデッドダイオード^(20~22)や特殊の拡散形⁽²³⁾も用いられる。

日立製作所で製作したものには次の2種類がある。一つは計算機用演算素子に用いる，ゲルマニウムダイオード HS 110 であり，ほかはテレビ用自動周波数調整装置に用いる，シリコンダイオード HS 109 である。前者は合金形であり後者は拡散形である。その電気的特性の大

第 1 表 パラメトリックダイオード特性一覧表

品 種	HS 110	HS 109
特 長	ゲルマニウム，合金形	シリコン拡散形
I_{B} (逆電流)	$20 \mu A$ ($-15V$) $5 \mu A$ ($-10V$)	$0.5 \mu A$ 以下 ($-20V$)
C_d (接合容量)	$150 pf$ ($-0.5V$ $20MC$)	$20 pf$
Q	50 ($-0.5V$ $20MC$)	
V_{ose}		$0.1V$ ($-10V$ $240MC$)

要を第 1 表に，また構造の概要を第 10 図に示す。

5.2 パラメトリック素子による増幅機構

以上のバリキャップダイオードは特殊な用途に設計されたものであるが，一般には増幅素子としてさらに広い用途が期待される。次にその動作機構について略述⁽²⁴⁾する。

今損失のほとんどない非直線特性を持つ L, C のようなリアクタンス素子に対し，強い局部発振（周波数 f_p ）と弱い信号（ f_s ）とを混合すると一般に次式の周波数が発生する。

$$m f_p + n f_s \dots\dots\dots (5)$$

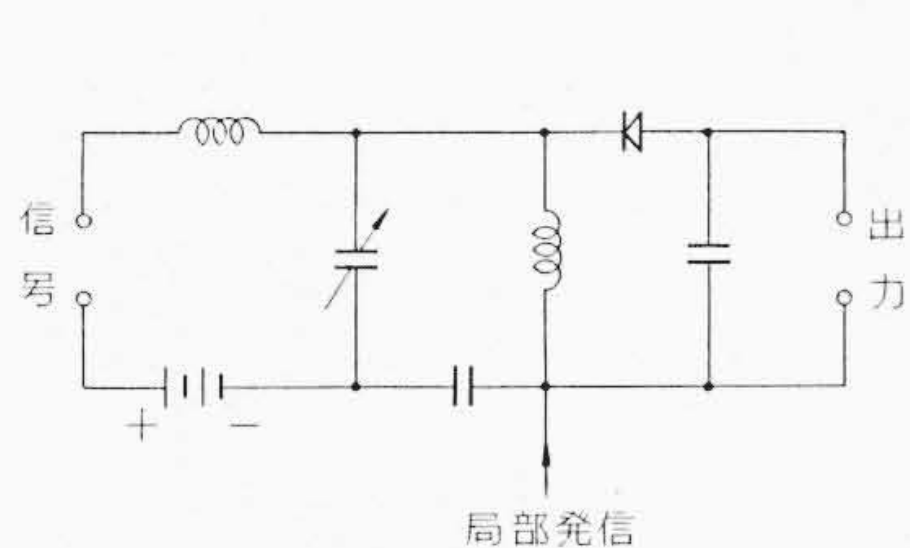
ここで m, n は整数

信号 f_s は $m=0 \quad n=1$

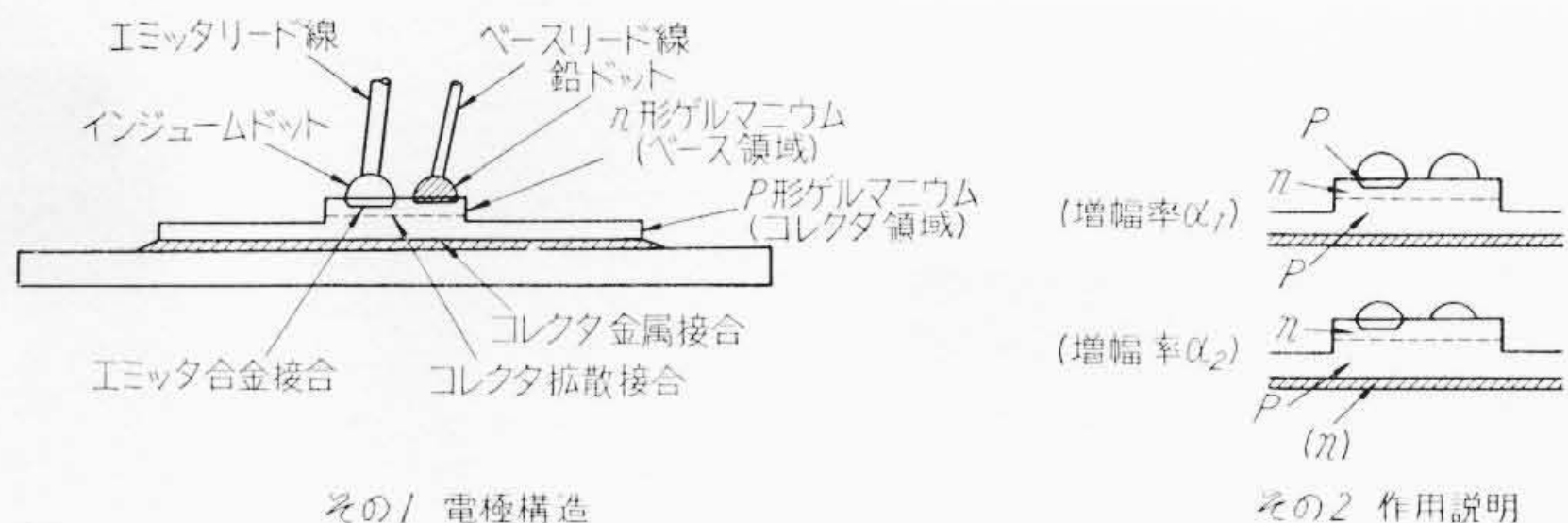
上側帯波 $f_{p+s} \quad m=1 \quad n=1$

下側帯波 $f_{p-s} \quad m=1 \quad n=-1$

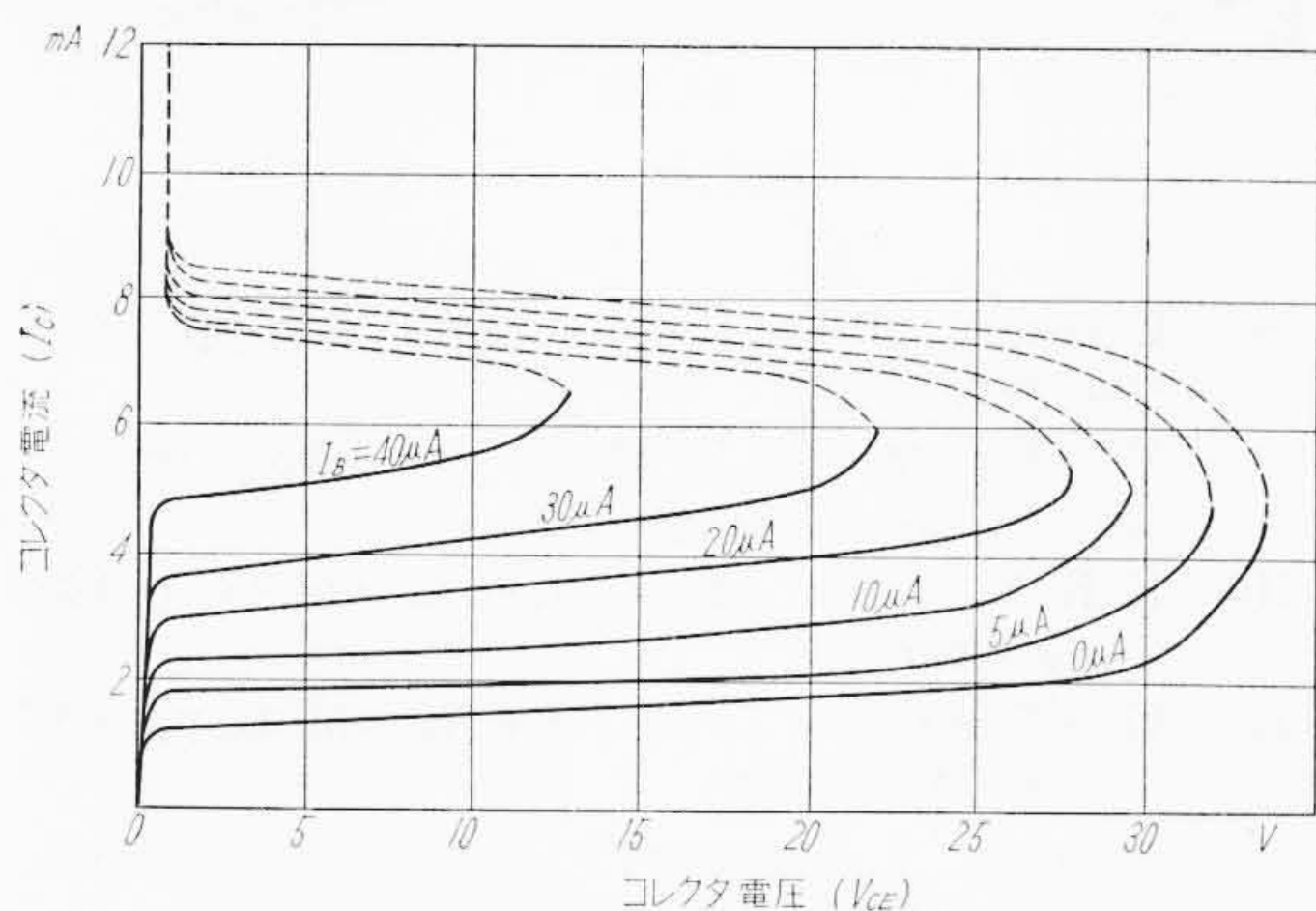
信号および上下両側帯波以外を無視すると次式が成立する。



第11図 バリキャップによる増幅回路



第12図 サイリスタの構造および作用説明図

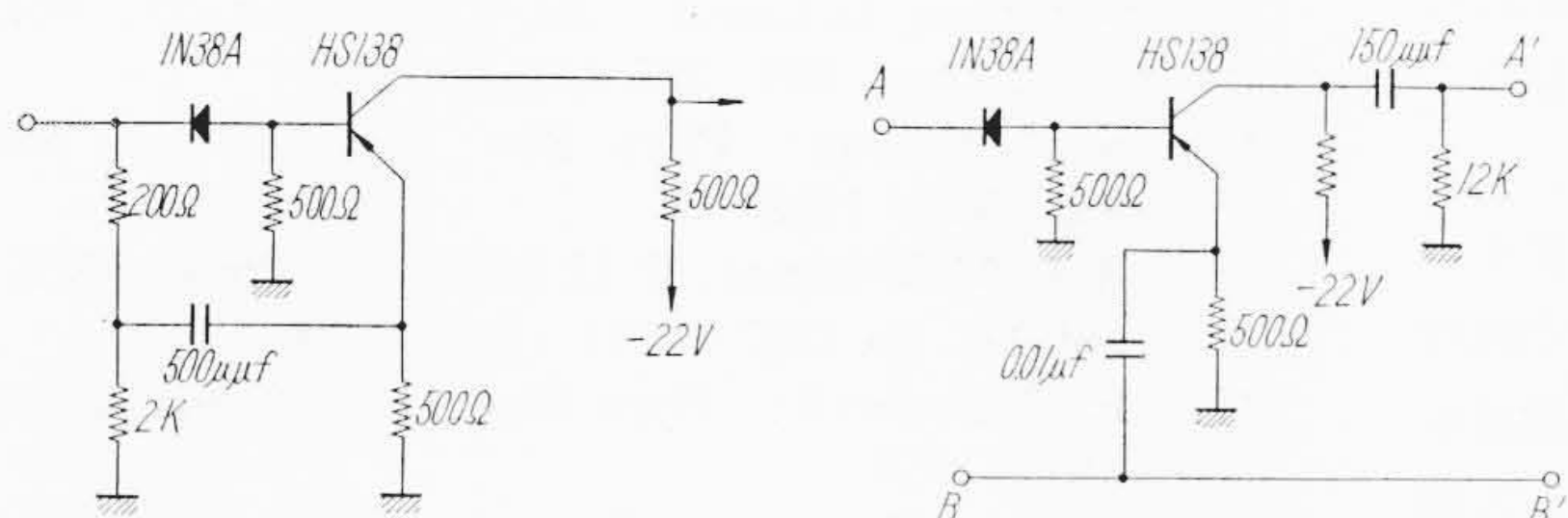


第13図 サイリスタの特性曲線(HS 138 の1例)

第2表 サイリスタの特性および定格表

定 格 表				
V_C	V_E	I_C	$V_{CE} (V_{be}=+0.3V)$	P_e
-25V	-0.5V	-100ma	25V	100mW
$V_{CO} (I_C=-20\mu A, I_E=0)$			-70V	
V_{E0}			-3V	
I_0^*			3ma	
τ^{**}				

- 注1. I_0^* ブレイクオーバー電流
コンダクタンスの低い状態から高い状態に移るに要するエミッタ電流
2. τ^{**} ブレイクオーバーのスイッチング時間



その1 フリップフロップ回路

その2 カウンタ回路

第14図 サイリスタを用いたスイッチング回路例

$$\frac{p_s}{f_s} + \frac{p_{p+s}}{f_{p+s}} - \frac{p_{p-s}}{f_{p-s}} = 0 \quad (6)$$

ここで p_s , p_{p+s} , p_{p-s} は各周波数の出力、もし回路を f_s , f_{p+s} に同期させれば、上昇コンバータとなり、 f_s , f_{p-s} に同調さすといわゆるパラメトリック増幅器となる。すなわち(6)式より次式のとおり信号周波数の出力が正で

$$\frac{p_s}{f_s} = \frac{p_{p-s}}{f_{p-s}} \quad (7)$$

となる。信号出力 p_s を大きくするには

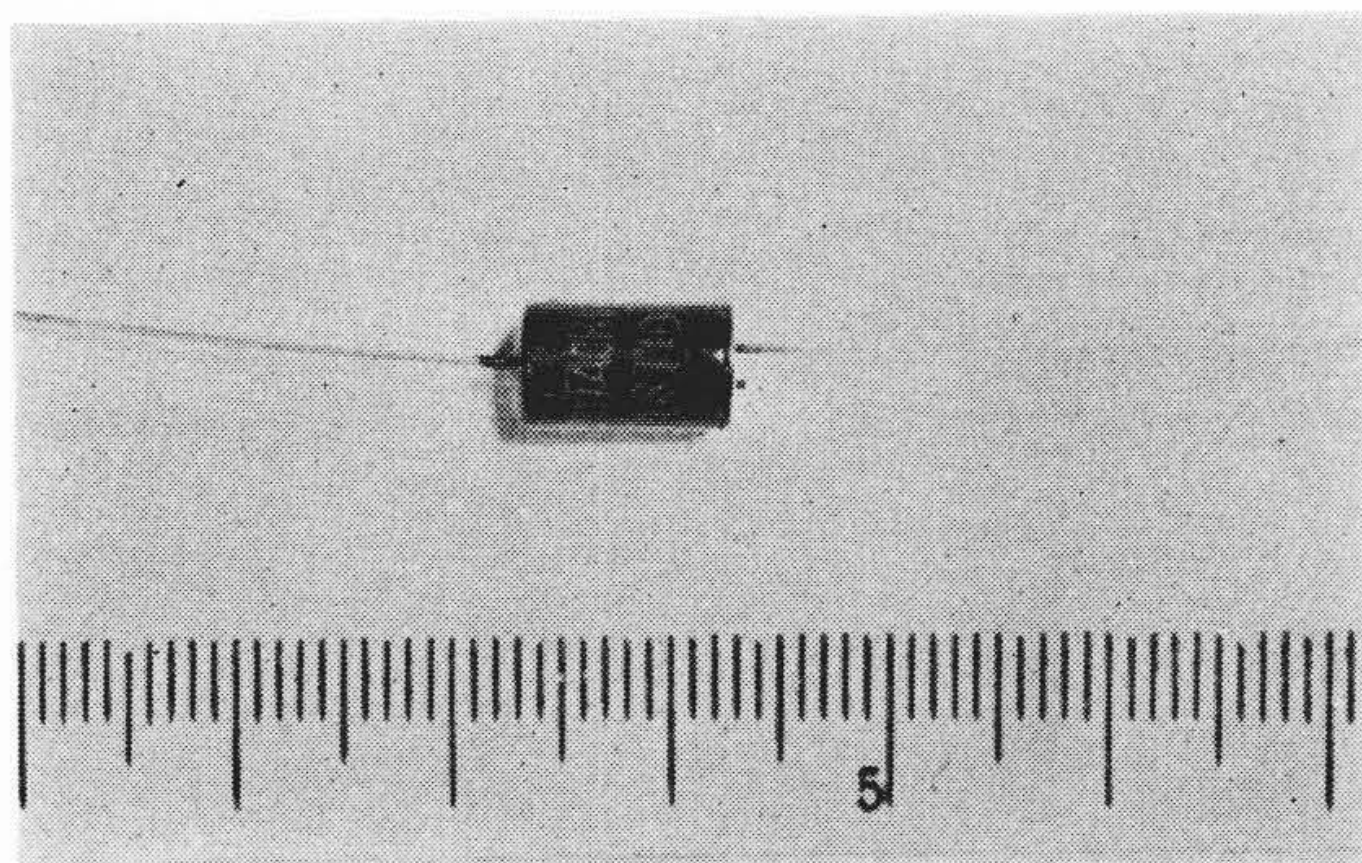
- (i) 局部発信出力を大きくする。
- (ii) 素子を含め回路の整合をよくし損失を極力少なくする。
- (iii) ダイオードの場合接合容量 C_d を小さくし電圧振幅を大きくする。

(vi) ダイオードの Q を大きくしなければならぬ。

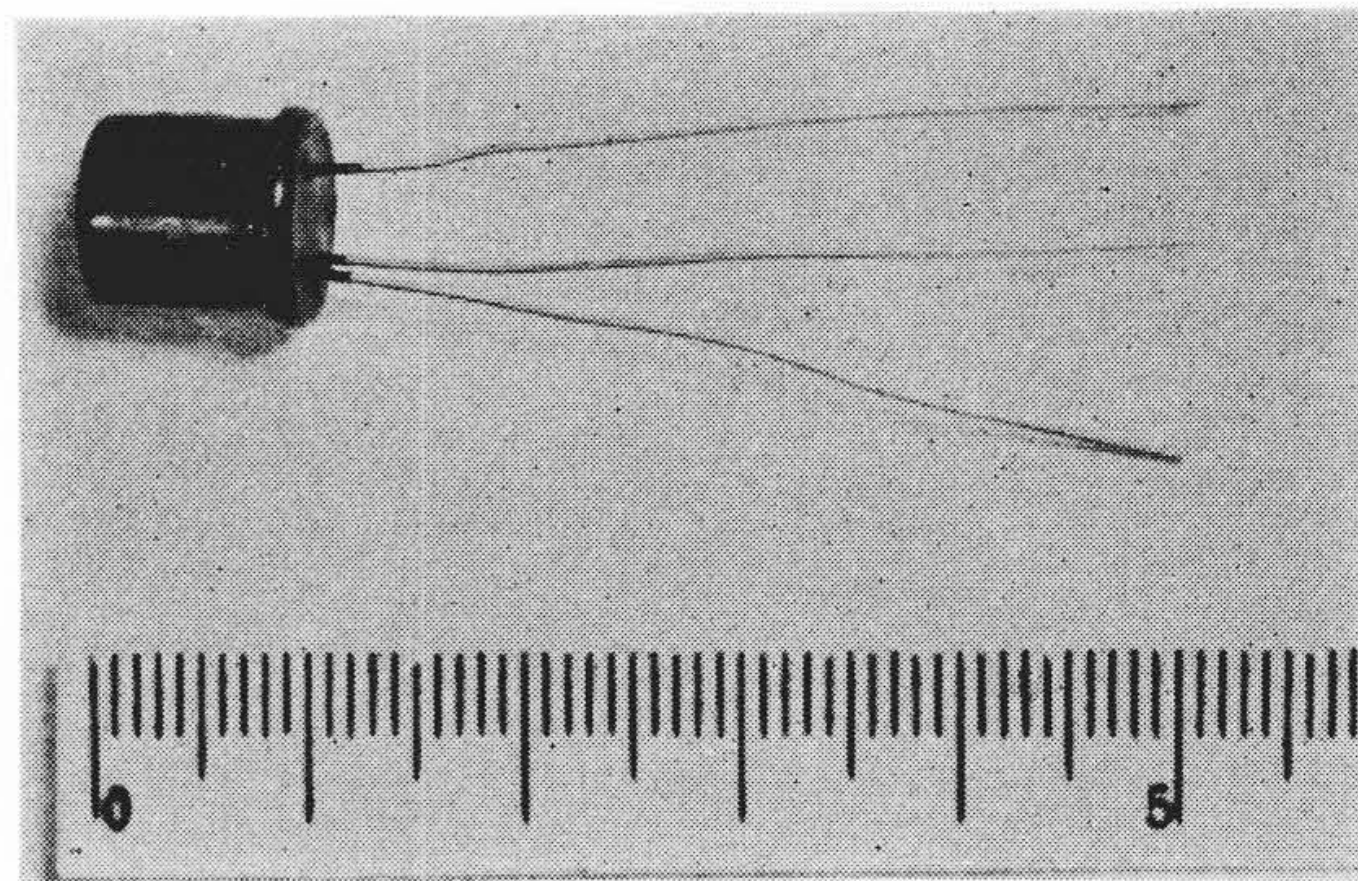
また雑音特性をよくするために、 f_p を $2f_s$ に等しくすると f_s と f_{p-s} が等しくなり有利である。なおこれは出力の点でもすぐれている。回路構成の一例を第11図に示す。

5.3 サイリスタ⁽²⁶⁾

半導体素子1個により安定動作点を2以上得んとする試みは最初の点接触形トランジスタ以来、Shockleyの発案になるpnpnダイオード、次にGEで開発した制御素子付pnpn整流器がある。われわれは100 Mc以上の超高周波スイッチング素子を開発した。これはメーサ形トランジスタの一変形でもあり、将来高速計算機などに広く使用されるものと期待している。その構造を第12図に示す。いわゆるメーサトランジスタの形状であるが、コレクタ金属接合部に特色がある。すなわちエミッタより注入された正孔が、ベース領域を拡散またはドリフト作用で通過した後コレクタ接合に入ると、ほとんど光の速さでp形のコレクタ領域に作用が伝ばし、コレクタ金属接合近傍にいた正孔がその接合部を通過する。もし正孔電流密度が次第に多くなると、コレクタ金属接合部の特性が正孔吸収と同時に電子注入の傾向を持ち、あたかも第12図その2のように、(pnp)(np(n))両トランジスタの直列接続のようになる。増幅率はそれぞれの和となり1よりも大きくなったところでスイッチング作用が起る。



HS 110



HS 101

第 15 図 サイリスタおよびパラメトリックダイオード完成図

この関係を特性曲線で示すと第 13 図のようになる。
素子の特性を第 2 表に、また応用回路の一例を第 14 図
に示す。

6. 結 言

最近トンネルダイオードに対する関心が非常に高まり、高速計算機に対する実用性も問題にされつつある。11年前トランジスタが発明されてからの進歩を見ると、原理発見より開発応用への速度は驚くべく加速されつつあり、ここに述べたものも次々と変化していくと思われる。また物性論と回路研究の協力によりこれらをしのぐ新素子の考案も期待してよからう。

上記のとおり日立製作所開発のパラメトリックダイオードおよび新スイッチング素子についてもようやく試作を終ったものであり将来さらに性能を改善した新品种を推進する予定である。終りに平素ご指導を受けている関係各位、および試作を担当された関係者に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) H. Kroemer: Phys. Rev. vol. 109, p. 1856, (March 1958)
- (2) H. Kroemer: Proc. I. R. E. vol. 47, p. 397, (March 1959)
- (3) K. G. McKay: Phys. Rev. vol. 94, pp. 877~884 (Dec. 1954)
- (4) W. Shockley: Bell Sys. Tech. J: vol. 30, pp. 990~1034 (Oct. 1951)
- (5) J. B. Gunn: J of Electronics: vol. 2, pp. 87~94 (July 1956)
- (6) R. N. Dexter, H. J. Zeiger, B. Lux: Phy. Rev. vol. 104 pp. 637~644 (Nov. 1956)
- (7) L. Esaki: Phy. Rev. vol. 109 p. 603 (1958)
- (8) C. Zener: Proc. Roy. Soc., vol. 145 pp. 523~529 (1934)
- (9) W. Shockley, W. P. Mason: J. Appl. phys., vol. 25, p. 677 (1954)
- (10) K. K. N. Chang: Proc., I. R. E. vol. 47, p. 1268 (July 1959)
- (11) H. S. Sommers: Proc., I. R. E. vol. 47, pp. 1201~1206 (July 1959)
- (12) N. Sclar, E. Burstein: J. Phys. Chem. Solids, vol. 2 pp. 1~23 (Jan. 1957)
- (13) S. H. Koenig, G. R. Gunther-Mohr: J. Phys. Chem. Solids vol. 2, pp. 268~283 (1957)
- (14) G. Finke, G. Lautz: Zs. f. Naturforsch., vol. 12 (a) pp. 223~225 (March 1957)
- (15) S. H. Koenig: Phys. Rev. vol. 110, pp. 986~988 (May 1958)
- (16) A. L. McWhorter, R. H. Rediker: Proc. I.R.E. vol. 47, pp. 1207~1213 (July 1959)
- (17) E. M. Conwell: Phys. Rev. vol. 103, pp. 51~61 (July 1956)
- (18) A. L. McWhorter: Bull. Am. Phys. Soc. ser. II, vol. 4, p. 186 (March 1959)
- (19) M. C. Steele, L. Pensak: Proc. I. R. E. vol. 47, pp. 1109~1117 (June 1959)
- (20) S. Kita, T. Fujii, E. C. L. Internal Rep. (Feb. 1954)
- (21) S. Kita: Proc. I. R. E. vol. 46, p. 1307 (June 1958)
- (22) B. Oguchi, S. Kita, N. Inage, T. Okajima: Proc. I. R. E. vol. 46, pp. 77~78 (Jan. 1959)
- (23) A. Uhlir, Jr.: Proc. I. R. E. vol. 46, pp. 1099~1115 (June 1958)
- (24) J. M. Manley, H. E. Rowe: Proc. I. R. E. vol. 44, pp. 904~913 (July 1956)
- (25) H. E. Rowe: Proc. I. R. E. vol. 46, pp. 859~860 (May 1958)
- (26) C. W. Mueller, J. Hilibrand: I. R. E. Trans. Elec. Dev. pp. 2~5 (Jan. 1958)