

半導体の応用

神戸工業KK*

大阪大学工学部

前川俊一

犬石嘉雄

1. はしがき

一昔前迄は半導体の用途といえばセレン，酸化銅等の整流器に限られていた。今次大戦中に始つたシリコン，ゲルマニウム系半導体，更にトランジスタの急激な発達は一躍半導体工学をエレクトロニクスの中心にのし上げた。従つて今日では半導体の工業的応用は多岐にわたり到底わずかの紙数でつくせるものではない。

ここでは主としてゲルマニウム(Ge)；シリコン(Si)の半導体の応用(前川)と物理的に新しく将来有望な用途(犬石)について述べる。さて半導体の応用を原理的に眺めると次のようになる。

a. 電気伝導を用いるもの

1. 温度による抵抗値変化(サーミスタ，抵抗温度計)
2. PN接合の特性(整流器，トランジスタ及び其の応用機器即ちポータブル・ラジオ，電子計算器等)
3. ホール効果(ホール発電機，ホール電力計，ジャイレータ)
4. ペルチェ効果(半導体冷凍機)

b. 光電効果を用いるもの

1. 光による電流発生(フォト・トランジスタ，光電池，感光導体，太陽電池)
2. 放射線による電流発生(原子電池，螢光膜)
3. 電流による発光(エレクトロ・ルミネッセンス発光体)
4. イ及びハの組合せ(光増巾器)

c. 磁氣的性質(スピン)を用いるもの

半導体メーサ(マイクロ波増巾及び発振器)

d. 誘電的性質を用いるもの

障壁容量増巾，変調器

等となる。以下その主なものについて述べる。

2. Ge及びSiの応用

半導体の中でゲルマニウム Ge 及びシリコン Si はトランジスタの誕生以来物性論的研究と工業の見事な直結により急速にその応用分野を開拓しつつある。Si 半導体素子に関してはわが国では未だ実験室の域を脱してい

ないが，アメリカでは工業用，軍用として Si が大量に使用され，昨年度の消費量は Ge の25トンに対して Si は約7トンといわれている。アメリカでSiが大量に使用される理由はその耐熱性が Ge に比べて勝れているため用途によつてはコストが高いことは第2義的になつて来る。しかし日本では少し事情が異なり，世界で2番目の半導体工業国ではあるがここ当分は Ge が Si に席を譲るとは考えられない。資源の面から考えると Ge はさておき Si は無尽蔵といえるのだから Ge の約20倍の金を払つて外国から輸入するのは何といつても馬鹿馬鹿しい話で，Si の精製技術の確立が切に望まれる。

Ge, Si の応用分野をここでは単結晶，P-N 接合，トランジスタの3つに大別して述べて見たい。

2.1. 単結晶

Ge, Si は最も典型的な半導体であつて完全結晶に近い単結晶が得られるのでその中で電子が動きやすく又不純物を人為的に制御して任意の電導度や電子と正孔の割合に出来る。単結晶としていろいろ興味ある性質を持っているがそれ自体を応用した例というのは未だあまり見当たらない。ここには1例としてホール発電機と抵抗温度計について述べる。

a. ホール発電機とホール電力計

電流 I を通じた半導体に垂直に磁界 H を加えると I と H に垂直にこの積に比例するホール起電力を生ずる。半導体ではホール起電力が非常に大きく物によつては1V以上にもなる。これを利用したものがホール発電機であつて2つの量 I と H の積や2乗を計算するアナログ計算素子として使用したり，5mm角程度の小さいものが作れるので磁界の強さの場所的分布を測るのに適している。また角変化を電気量に変化したり，強電流の測定をしたり，磁界と電流に関係した各種測定器への応用が考えられる。周波数特性のよいホール電力計はその一例である。

b. 抵抗温度計

低温測定に従来用いられて来たカーボン抵抗温度計は測定温度範囲が狭く再現性があまりよくなかつたが，最近1°Kから35°Kにわたつて正確な値の得られる Ge 抵抗温度計が実用されるようになった。これは As を添加した Ge の単結晶をヘリウムを充填した白金ケースに封じ

* 神戸市兵庫区和田山通1の5

たもので、He によつて0.25°Kの極低温迄周囲との熱接触が可能となり、精度は4.2°Kで±10⁻⁴°K、電気抵抗の変化は10Ω-cm (10°K) ~1000Ω-cm (1°K) 程度である。

2.2. P-N接合 (P-Nジャンクション)

Ge, Si のP型とN型の部分の接合部即ち P-N 接合を利用したものにはダイオード、整流器、太陽電池、原子力電池等があるが以下これ等について簡明に述べる。

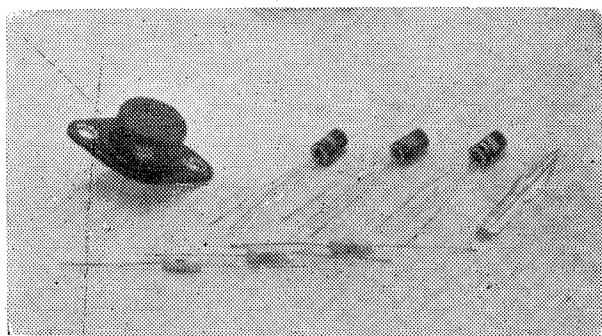
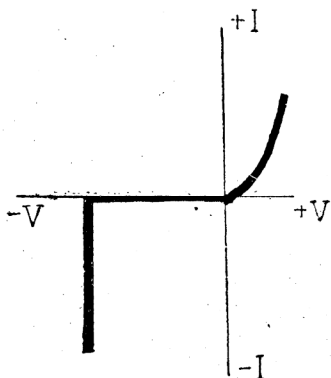


写真1 ゲルマニウム、ダイオードとトランジスタ (右端のペン先と比較)

a. ダイオード (二極管) (写真1参照)

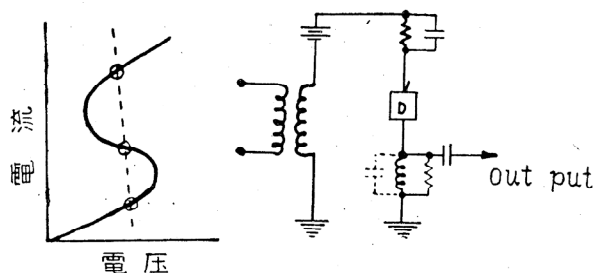
Ge, Si のダイオードはトランジスタと共に最も大量に使用されている半導体製品で点接触型と接合型とがあり、一般に接合型は電流容量、逆方向特性に優れ、点接触型は周波数特性がよい。之等は主として二極真空管に代つて小電流の整流、検波用等に使用されている。



第1図 シリコンダイオードの整流特性

シリコンダイオードは第1図のように逆電圧に対して鋭い折線特性をもっているから放電管の代りに基準電圧回路、過電圧継電器等に使用される。

パルス回路素子として期待されるものに正ギャップダイオードがある。これはN型Geに、Asを含むAg線を結合させたもので第2図のように正方向特性に負性抵抗範囲をもつてパルス発生回路に使用出来る。図の回路では繰返し周波数20MC、立上り及び回復時間0.01μS 出力は20mA、数ボルトである。その他計数回路、高周波のフリップ、フロップ等に使用される。同じスイッチ



第2図 正ギャップダイオードの正方向特性とパルス発生器

ング素子として電話交換機、計数回路等に用いられるものとしてP-N-P-Nダイオード、ダブルベースダイオード等がある。

b. 整流器

1925年アメリカで酸化銅整流器、次いで33年にドイツでセレン整流器がつくられて以来、低電圧整流にはこれ等半導体整流器が専ら使用されて来たが、Ge, Si は特性が従来のものに比べて格段に勝れている。(第1表)

整流器としてはGeが順方向特性、Siが逆方向特性においてすぐれているから低電圧用にはGe、高電圧用に

第1表 半導体整流素子の性能

種別	許容温度 °C	許容電流密度 A/cm ²	耐電圧 V
硫化銅	130	3.5	4
酸化銅	60	0.1	10
セレン	80	0.2	30
酸化チタン	150	0.1	30
ゲルマニウム	65	100	100
シリコン	150	100	300

はSiが適している。写真2の右は100アムペアのGe整流素子で約30kwの出力が得られる。高出力であるため相当の発熱量となり空冷、液冷の方式が考えられている。Siは耐熱性に勝れているため同じ容量では体積が

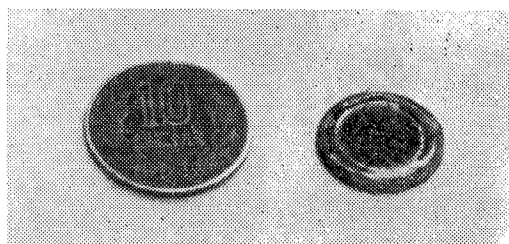


写真2 電力用Ge整流素子 (左側の10円銅貨と比較)

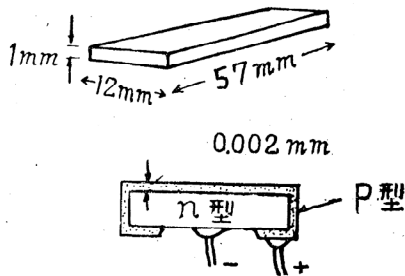
Geの1/3になる。アメリカでつくられたGe整流器の例として24V40.000A, 65V16.000A, 130V12.000A等がある。変換効率は廻転変流機、水銀整流器に比べて勝っているから直流低電圧を使用する電気化学工業、金属工業用電源としてはGe整流器が最も良い。又交流電化に伴う、電気機関車用電源としてSi整流器が有望視されている、これ等のGe, Si整流器の欠点はP-N接合部の焼

生産と技術

損によって導通状態になることで、高速度熔断ヒューズを使用する必要がある。

c. 太陽電池と原子力電池

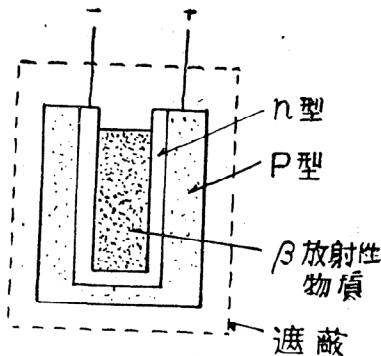
P-N 接合を応用した興味ある例は太陽電池、及び原子力電池で一方は太陽光線から他方は放射線からエネルギーを吸収して電気エネルギーを作り出そうというもので、いずれも未だ研究段階にあり将来の発展が期待される。太陽電池は第3図のようにN型Siの薄板の表面に



第3図 シリコン太陽電池

薄いP型層を硼素Bの拡散によりつくったもので太陽光線の吸収によつてP-N接合附近に作られた電子と正孔の対は接合の電界によつて電子はN側へ、正孔はP側へと分離され、起電力を生じる。理論的最大効率は22~25%であるが、実際には直列、並列にはいる内部抵抗、入射光線の反射、内部の電子、正孔の再結合等の原因で今のところ最大効率は11%で、太陽照射を $0.1\text{w}/\text{cm}^2$ とすれば出力は $11\text{mw}/\text{cm}^2$ となる。Bell研究所では図のような板を39枚組合せて12V、1Wの太陽電池をつくり携帯用無線電話や通信用中継装置の電源として実用化を図っている。

原子力電池(第4図)は主として β 線によつて電子正孔の対をつくる。 β 線源としては $\text{Sr}^{90}-\text{Y}^{90}$ 等が用い



第4図 原子力電池

られる。実際には放射線源を適当な金属層で遮蔽して或る限界以上のエネルギーをもつ放射線を遮断するような方法が採られGeやSiの放射線損傷を防いでいる。得られる電気エネルギーは 1cm^2 のSiに 0.2 キューリー放射させるとして、 $80\mu\text{A}$ 、 0.16V 、 $13\mu\text{W}$ 程度で効率は3.8%位である。今の所軍事的用途(潜水艦)から注目

されている程度で太陽電池の方が有望である。

2.3. トランジスタとその応用

Ge, Siを応用した素子では何といてもトランジスタが最も重要であり、多種多様のものがつくられている。

先ず代表的なトランジスタの種類をあげ、次いでそれ等の主な用途をピックアップして述べて見たい。

a. トランジスタの種類

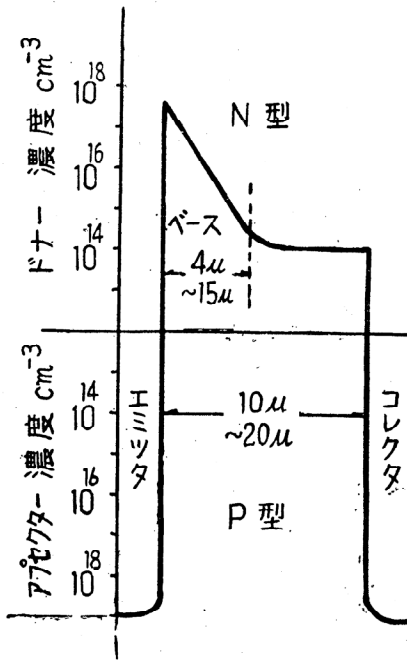
トランジスタの種類を大別すると、点接触型、合金型成長型、表面障壁型、抗散型等に分けられるが、これはP-N接合の製造方法による分類で、用途から分けると低周波用、高周波用、電力用、スイッチング用等になる。

トランジスタがベル研究所のBardeen, Brattain, Shockley等によつて発表されたのは1948年で将に日進月歩の勢いで今日まで発展して来たが、トランジスタには当初から真空管という目標があつたためその進歩の方向は自ら高周波、高出力という方向に向けられて来た。最近ではこれに加えてスイッチ回路用等の特殊な用途の開発が非常に活潑である。

トランジスタと真空管を比較すると真空管が格子、陰極間の電圧で陽極電流を制御するのに対してエミッタ電流によつてコレクタ電流を制御するという相異があり、入力インピーダンスが低い。トランジスタは小型、軽量、堅牢、長寿命、小電力等に加えて真空管では得られない特性をもっているが、温度変化に敏感で、大電力、高周波特性では未だ真空管に及ばない。トランジスタの能は電流増巾度 α とその低下を始める周波数 $f_{c\alpha}$ で性決まる。 $f_{c\alpha}$ を α 遮断周波数という。

a. 1. 高周波トランジスタ

高周波でのトランジスタの利得指数は $f_{c\alpha}/\gamma_{bb}' C_b'$ で表されるが分子の α 遮断周波数 $f_{c\alpha}$ を上げることと分母のベース抵抗 γ_{bb}' コレクタ容量 C_b' を小さくすることは互に相反することでこれをうまく調和させなければならない。その1例としてドリフトトランジスタについて説明する。 $f_{c\alpha}$ はベースを拡散で流れる電子正孔の通過時間によつて支配されるがベース巾をうまくコントロールしてせまくし $f_{c\alpha}$ を増す技術には限度がある。ドリフト型はこの通過時間を短くするために第5図のようにベースに固体拡散によつて不純物の濃度分布をつくり、そこに出来る内部電界で正孔を加速しているから $f_{c\alpha}$ が高く高周波迄使える。その他電解エッチングでベース巾をせまくした表面障壁型、固体拡散によりうすいベースをつくる拡散型、成長型の単結晶をつくるに際して拡散によつてベースをつくる拡散成長型等それぞれ巧妙な方法で高周波利得を改善している。商品化され



第5図 ドリフトトランジスタの不純物分布

ているもので最大周波数が250MC,というのが現在の所最高である。又コレクタの空間電荷層に電子や正孔を直接注入して電子や正孔の走行時間を小さくしようという考からつくられたのがスペーシスタ, デプリーション層トランジスタ等で10⁴MC迄使用出来るといわれている。

a. 2. 高出力トランジスタ

トランジスタの遮断周波数 f_{ca} と出力は互に逆の関係になつていて高出力のものを得ようとすると必然的に最高使用周波数が小さくなる。トランジスタの出力はコレクタ接合に発生する熱の放散と最大コレクタ電流及び電圧で制限されるので高出力トランジスタはコレクタを直接銅の放熱体に熔着してある。現在、60Wのシリコントランジスタが商品化されている。高周波でしかも高出力というのでは10MC, 5WというのがBell研究所でつくられた。これは拡散型であつて将来のトランジスタはこの方向に発展して行くものと思われる。

a. 3. フォトトランジスタ

普通のトランジスタのエミッタの代りに光を使つて電荷を注入し電流に変えるのがフォトトランジスタで第2表にあるように古来の光電管に比べて感度が高く, 分光

第2表 各種光電素子の性能

種別	暗電流 μA	光感面積 m^2	感度 $A/lumen$	0.1lumen/cm ² の束に対する感度 mA
929 真空光電管	0.0125	3.17	25 μA	0.014
931A 光電子増倍管	0.1	1.9	20	3660
点接触フォトダイオード	1~3mA	0.006	0.1	0.055
P-N接合フォトダイオード	1~10	0.006	0.03	0.017
P-N-P接合フォトトランジスタ	1~10	0.01	2.3	2.25

感度が可視部から近赤外までほとんど平坦でしかも低電力で働くため各種コントローラー, テープリーダー, 写真機器等広い応用が考えられる。しかし温度特性が悪いこと及び暗流が大きいことが欠点で精密な測定には使用出来ない。

b. トランジスタの応用

b. 1. ラジオ

現在我が国で生産されているトランジスタの大半はポータブルラジオ用に消費されており, 電子計算機, 電子交換機, 伝送装置, 各種制御装置等今後大いに発展すると思われるものは未だ研究室の域を脱していない。

標準型のポータブルラジオはトランジスタ6個, ダイオード1個を使用して, 感度は大体 $100\mu V/m$ で出力100mW 前後である。(写真3参照) f_{ca} が20MC 程度の

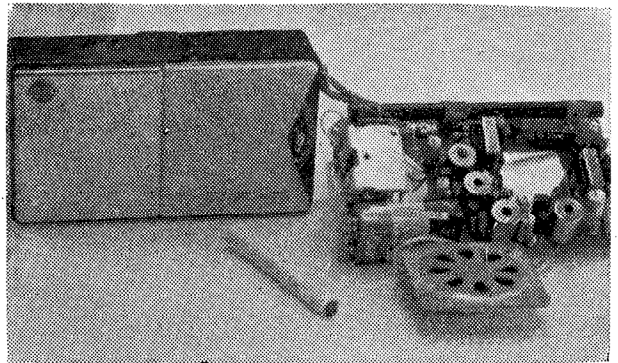


写真3 トランジスタポータブルラジオ (前方のシガレットと比較して小さいことが判る)

高周波トランジスタを使った2バンドのラジオも姿を見せるようになり間もなくホームラジオもトランジスタ化される状態にある。自動車用ラジオはトランジスタ化によつてバイブレーターとトランスが不要になり電力消費も従来の $1/10$ になるので将来は全部この方式になるものと考えられている。ポータブルラジオと同様に電池の消耗率が問題になる補聴器もトランジスタ化されて非常に小型軽量(約120g)になり単3電池で300~500時間の使用が可能となつた。

テレビ機器については高性能のトランジスタが要求されるので未だコストが高くつくことと, 高周波特性, 出力, 耐圧, 雑音等の点で真空管に一步譲るためトランジスタ化は今後の製造技術の進歩にかつているといえる。

b. 2. 有線通信

クロスバ方式に代るものとして現れた電子交換機の素子としては真空管, 放電管, パラメトロン等が使用され得るがスイッチ時間, 消費電力等から見てトランジスタ, P-N-

生産と技術

P-N ダイオード, ダブルベースダイオード等半導体スイッチ素子が最も有望視されている. 又中継装置のトランジスタ化⁽³²⁾⁽³³⁾, 電話機に内蔵したトランジスタ増巾器⁽³⁴⁾等トランジスタの特徴を最も有効に生かし得る応用分野が開拓されている.

b. 3. 電子計算機⁽³⁵⁾~⁽³⁸⁾

デジタル計算機の大規模なものでは何万という能動素子を使用する. これを真空管方式で行うと消費電力だけでも数百KWにも達するものがあり, この方面はトランジスタの最適応用部門の一つである. 計算速度を上げるためには高周波特性のよいトランジスタでしかも相当高出力のものが要求されるので将来は拡散型 Si トランジスタが専ら使用されるものと思われる.

b. 4. その他

以上述べた以外にトランジスタを応用した装置は非常に多く限られた紙数では到底述べ尽すことが出来ないの以下ちよつと面白い応用例を拾つて見る.

DC-DC 変換機. トランジスタ発振器で適当な交流電圧を発生させ, これをトランスで昇圧整流して高圧直流を得るもので特に低電力(数 mW から数 W 迄)を取扱うのに適している. たとえばレイセオン社で試作したガイガー計数器用電源は 3 V のランプ用乾電池で出力電圧 700~900V, 負荷電流 2~50 μ A を得ている.

小型トランジスタ増巾器. ベル研究所で試作したテレビその他の広帯域伝送用小型増巾器で長さ 4 cm 足らず直径 3 mm ちよつとという小型のもので同軸ケーブルに組込んで使用し得る. この辺になるとトランジスタの独壇場で真空管では真似の出来ないところである.

トランジスタチョッパ. 直流増巾器に用いられる機械的チョッパを 2 個のトランジスタで置き替えて感度 0.1mV 以下のチョッパが得られる. このチョッパは機械的慣性がないので周波数を数百KC にも上げられる.

3. 半導体の新しい応用

前節では既に工業的に使用されている Ge, Si の半導体応用装置について述べたが, ここで最近物性物理の方で開発され将来工業的にも有用と思われる 2, 3 の現象を述べる.

a. サイクロトロン共鳴

半導体中の電子は充分低温で磁界 H を加えると之を軸として円運動をする. この円運動の角周波数 ω_c は eH/mc となりサイクロトロン周波数と呼ばれる. ここで e, m, c はそれぞれ電子電荷, 質量及び光速である. このように電荷をもつた電子が円運動をしていることは電氣的にみると一種の電気双極子が時間的に変化していることに相当するから外部から角周波数 ω_c の電波を加えると一種の共振現象で強く吸収される. これをサイク

ロトロン共鳴吸収という. この現象は半導体中の電子質量 m を決定するために物理学者によつて開発された方法であるがこれをうまく使うと可変減衰器やマイクロ波増巾, 発振器が出来そうである. 現在のところ低温を要するのが難点である.

b. 半導体メサー (Maser)

Ge 中に As や P を入れると As や P にとらえられた電子や正孔が出来る. これらはスピン磁気能率 μ を有するから外部磁場 H を加えるとスピンの磁場方向を向いたとき(下位)と磁場と反対を向いたとき上位で $2\mu H$ なるエネルギー差を生ずる. 適当な方法で(上位)のスピンを予め多くしておきこれに外部から h をプランク定数として $f = \frac{2\mu H}{h}$ なる周波数の電波を加えるとその刺激で上位スピンの下位へ落ち, その際に同じ周波数 f の電波を放射することによつて増巾作用を行う. これをメサー (Maser) というが Ge や Si の半導体中の不純物電子のスピンは周囲と余りエネルギー変換をしないのでこれに適しており, マイクロ波の増巾器や発振器に用い得る.

c. 半導体冷凍機

異種の金属や半導体の接点に電流を流すと発熱や吸熱が起る. これをペルチエ効果という. 最近ビスマス, テルルの半導体対を用いてその大きいペルチエ効果で物を冷却する方法が実用化され将来は現在のフロンガス電動機方式の電気冷蔵庫にとり代り得ることと思われる. このような半導体冷凍機は回転部分もなく寿命が半永久的な点で大きな利点がある.

この他光によつて電気伝導度の変る光電導性半導体と電界によつて光を発するエレクトロ, ルネッセンス性半導体を組合せて微弱な入射光を増巾して強い光として出す光増巾器 (light amplifier) や感光性半導体を用いた新しい写真—ゼログラフィ等興味ある用途があるが紙数の関係で割愛する. 数年前筆者の一人は IRE ショー (米国通信学会展示会) をみて “トランジスタ化” “プリント配線化”, がエレクトロニクス機器の大きな流れであるということを痛感したのであるが真に半導体工学の進歩によつて明日のエレクトロニクスは築かれるであろう.

(12頁より続く)

行くのである. 現在, 両者は全く不離の関係にある.

7. むすび

エレクトロニクスは真空中, ガス中および固体中の電子現象を利用した新しい科学および工学の分野で, 現在, 最も目覚ましい進展を示している分野の一つである. エレクトロニクスの進歩により, ひとり工業だけでなく, 広く吾々の生活環境まで大きく変つてくるであろう.