

エレクトロニクスの展望

大阪大学工学部 熊谷三郎

1. 電子の発見とエレクトロニクスの誕生

1891年ストーニー (G.J. Stoney) によつて命名された電子 (electron) はトムソン (J.J. Thomson) およびミリカン (R.A. Millikan) によつて粒子としての性質が明かにされ、さらにトムソン (G.P. Thomson), 菊池正士などによつてその波動性が実証された。

これを工学の立場から見ると1879年白熱電球を発明したエジソン (T.A. Edison) は1883年熱電子放出現象であるエジソン効果を発見したが、これが基になつて1904年フレミング (J.A. Fleming) の二極真空管の発明となり、つづいて1906年デホレー (De Forest) によつて三極真空管が発明されて、ここにエレクトロニクス (電子工学) の実質的の誕生を見たわけである。

真空管のもつ増巾、発振、および検波の諸機能は直ちに電気通信技術の中に取り入れられ、これによつて電気通信技術は躍進した。つづいて多くの電子装置が発明されたが、それらのほとんどすべては電気通信に利用されて偉功を示した。他面、電気通信技術の進歩は多くの電子装置の発明、開発を促進した。かつては通信工学の一分野と考えられた電子工学は驚異的發展をとげて、いまでは電気工学、通信工学とならぶ重要な大きな部門に成長し今日なお目覚しき成長を示している。

2. エレクトロニクスとは何か

エレクトロニクス (Electronics) の定義は確立しているわけではないが 1950年4月米国無線学会誌 (IRE, 1950, April, p433) に載つたものが一応基準になると考えてよかろう。それによると

「エレクトロニクスとは電子装置およびその応用に関する科学と工学の分野である。ここで電子装置というのは電子の伝導が真空、ガス体または半導体の中で行われる装置のことである」

となつている。この定義ははつきりしてよくわかる。たとえば、電子の伝導が銅、タングステンのような金属導体の中で行われている発電機、電動機、白熱電球は電子装置とはいえないが、電子の伝導がゲルマニウム

のような半導体の中で行われるトランジスタや、伝導がガス体の中で行われる蛍光灯は電子装置である。もつとも、他の多くの定義と同様に多少の例外的のものもあるし、また、境界において他の定義と干渉するところもある。たとえば蛍光材料その他ある種の固定電子装置では電子は必ずしも伝導の形式をとらない。たとえ伝導でなくても半導体内の電子現象とそれを利用した装置およびその応用はエレクトロニクスの中に入れていく。

Electronics は米国製の新語で、英国では正確に Electronic Engineering といっている。日本でエレクトロニクスが日本語になりかけているが本来の日本語で表現すれば電子工学である。ここで特筆すべきことはエレクトロニクスという言葉がわが国へ輸入される前からわが国には電子工学という言葉が使われていたことである。今から約30年前、昭和4年10月、電気学会東京支部は“電子工学の理論と応用”について専門講習会を開催し、講習内容を刊行した。その内容は、I. 電子応用工学。II. 水銀弧整流器。III. 真空管の特性とその応用。IV. 電子応用工学の4篇から成り、その進歩的な計画は全く敬服に値する。電子工学という言葉が学会の通用語として登場したのはこのときからではあるまいか。当時米国にも Electronics という言葉はなかつたように思われる。

上記講習会の内容はすべて真空中またはガス体中のエレクトロニクスであるが、これは当時の電子工学の実態を示したものである。近年 (特に最近10年間)、エレクトロニクスは固体の分野で異常な進展を示した。トランジスタはその代表的な一例にすぎない。固体エレクトロニクス (Solid-state electronics) は広く固体の電氣的、磁氣的、光学的特性を利用するもので、今後期待され最も有望な分野である。

筆者はこの小篇においてエレクトロニクスの大まかな展望を試みたいと思う。

3. 電子管

電子管は真空中またはガス体中の電子の運動を利用したもので、後に述べる固体内の電子を利用した固体電子装置、たとえばトランジスタと並んでエレクトロニク

生産と技術

スの二大分野を形成している。

上に述べたように、電子管の中の真空管はエレクトロニクスの先駆者である。電気通信技術の進歩は真空管の開発と歩調を合せたともいえる時期があつた。真空管は加熱された陰極から放出される電子を利用しているので熱電子放射に関する多くの研究が行われた。

現在の電子管は単なる真空管のみでなく、ガス入放電管もあり、多くの種類からなつている。その主なものを挙げると熱電子管、放電管、光電管、二次電子管、陰極線管、記憶管、計数管、切換管などである。これらの電子装置の設計製作の基礎になるものは熱電子放射、冷電子放射、二次電子放射、光電子、電子運動、空間電荷伝導、放電現象などである。

4. 固体エレクトロニクス

(1) 半 導 体

固体半導体内の電子現象を利用した装置とその応用を取扱うものである。種々の固体の電気抵抗を測定すると、その間に第1表に示すように、非常に大きな比抵抗

第 1 表

固 体	比 抵 抗 (Ohm-cm)
銀	1.6×10^{-6}
銅	1.7×10^{-6}
アンチモン	4.3×10^{-5}
蒼 鉛	1.2×10^{-4}
雲 母	$\sim \times 10^{15}$
硫 黄	2×10^{17}
石英ガラス	$\sim \times 10^{18}$

の差が認められる。普通、導体と呼ばれるものは 10^{-6} Ohm-cm の程度であるが絶縁体になると 10^{15} Ohm-cm 以上の値を示す。この中間の比抵抗を有するものの中でたとえばアンチモン、蒼鉛は 10^{-4} Ohm-cm で半金属と呼ばれる。金属、半金属は温度が上昇すると抵抗が増大する。これに対して抵抗が導体と絶縁体の中間にあつて、その抵抗の値が温度上昇とともに低下するものがある。これを半導体という。第2表に半導体の例を示す。現在、導体、不導体、半導体の区別は固体のエネルギー帯

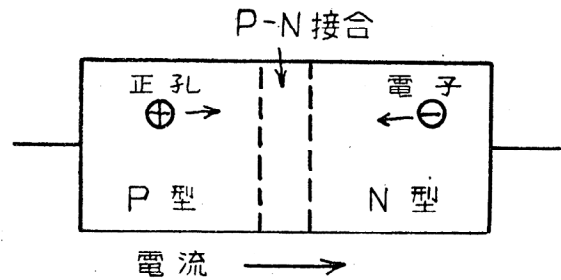
第2表 半 導 体 の 例

単 体	Si, Se, Te, Ge 等
ハロゲン化物	AgI, CnI 等
酸 化 物	CnO, ZnO, BaO, CaO, Cu ₂ O, PbO ₂ 等
硫 化 物	PbS, Ag ₂ S, CdS, MoS ₂ 等
セレン化物	Ag ₂ Se 等
金属間化合物	InSb, InAs, GaSb, InP, GaAs, AlSb 等

構造から説明されている。

半導体は電気伝導の機構によりP型とN型とに分けられる。電気伝導を行う荷電体が負電荷を有する電子である場合はN型半導体といい、正電荷を有する正孔（電子の抜け孔）である場合はP型半導体という。正孔の移動も本質的には電子の移動である。

ゲルマニウム (Ge), シリコン (Si) のような、元素の周期律表で第IV属のものは、微量の第III属元素を加えるとP型になり、第V属の元素を加えるとN型になる。一つの結晶内で加える不純物の分布により第1図のよう



第1図 半導体の P-N 接合

にP型とN型ができ、その境界に整流層ができる。これをP-N接合という。

(2) 金属間化合物半導体

半導体の研究と応用とは元素の周期律表における第IV属元素を中心として近年異常な進展を遂げたが、これに関連して新しい半導体の特性をもつ要求が起り、特に結晶成長と精製技術の進歩と相まって2種あるいはそれ以上の元素の組合せによる新しい半導体の研究が組織的に行われるようになった。

第3表は元素の周期律表の中から説明に必要な部分だけを取り出して示したものである Al·P と Si, Ga : As と Ge, 等はそ

第 3 表

族 \ 周期	III	IV	V
II	B	C	N
III	Al	Si	P
IV	Ga	Ge	As
V	In	Sn	Sb

れぞれ同様の特性をもっている。例えば第IV属元素と第III, 第V元素でつくられる金属間化合物との格子定数を比較して見ると第4表のように両者よく一致している。その他, InSb, GaSb, AlSb, GaAs, InP 等はいずれも第IV属半導体に類似の特性をもつ。

金属間化合物半導体の研究開発によつて多くの新しい優れた電子装置がつけられるようになった。今後の一層の発展が期待される。以下、半導体を使った主要な電子装置について紹介する。

第4表 格子定数の比較

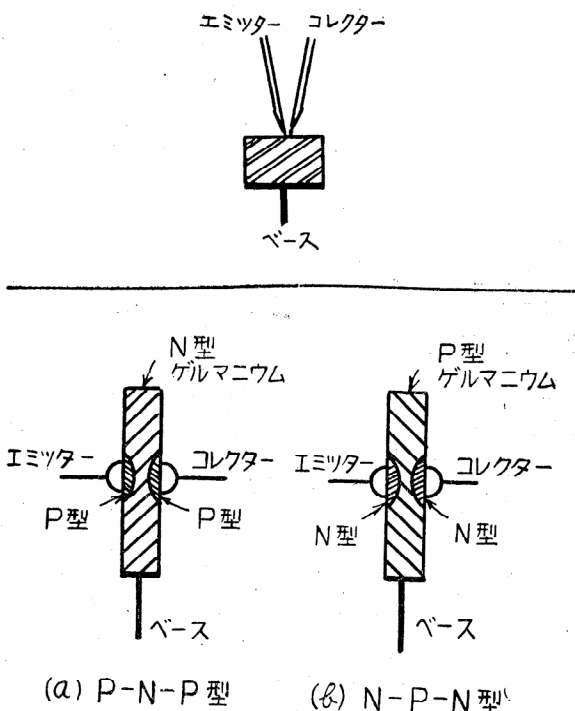
結 晶	格 子 定 数
Si	5.42
Al·P	5.44
Ge	5.62
Ga·As	5.62
Sn	6.46
In·Sb	6.46

(3) トランジスタ (Transistor)

固体エレクトロニクスの現在の立役者はトランジスタである。真空管の強力な競走者として素晴らしい発展を示している。真空管の二大欠点は高真空容器を必要とすること、熱電子放射を利用するため陰極加熱用の電力を要することである。トランジスタではこの二つの欠点が全く取り去られている。

トランジスタはマイクロ波用鉱石検波器 (半導体整流器) の研究に伴って Schockley, Bardeen, Brattain 3氏によつて発明されたもので1948年6月に特許申請が行われ、更に3氏はこの発明によつてノーベル賞を授与された。

最初に発装されたものは点接触型で、第2図のようにN型ゲルマニウム結晶の小薄片 (1mm²×0.5mm程度) の上面にタングステンまたは磷青銅の細い針金 (直径0.05mm程度) の先端を尖がらせ0.1mm程度の間隔で2本接触させ、下面は全面を金属電極につないだものである。上面の2本の針金電極のうち1本をエミッタ (emitter), 他をコレクタ (Collector), 下面の電極をベース (base) と呼ぶ。その後、接合型が開発され、現在では特殊目的以外には接合型が使われている。



第2図 点接触型トランジスタ

第3図 接合型トランジスタ

接合型には第3図 (a) に示す如きP-N-P型と同図 (b) に示すN-P-N型の2種がある。点接触型およびP-N-P型はいづれもベースに対してエミッタに正、コレクタに負の電圧をかけて使用する。N-P-N型のときはこれと逆である。

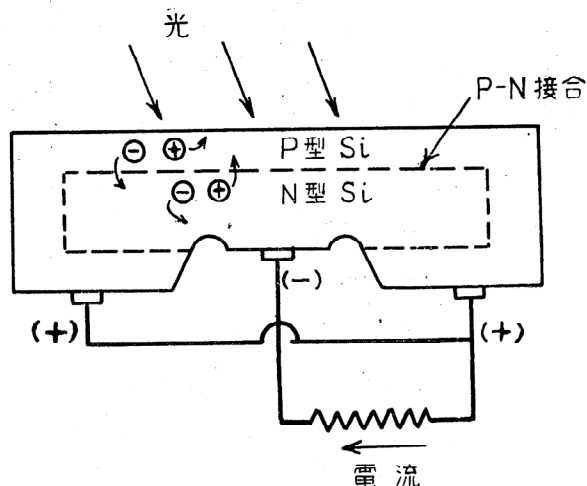
回路的にはトランジスタのベース、エミッタおよびコレクタはそれぞれ真空管の陰極、格子および陽極に対応する。トランジスタは真空管に比較して小型軽量で、耐衝撃性、耐震動性は真空管の追従を許さず寿命は10⁵時間に及んでいる。最近トランジスタの表面の状態に対する究明が進められ信頼度の検討が行われている。

トランジスタは超高周波に使えない欠点があるが、最近高周波用のスペイスタ (Spacistor) が発明され、その打開が行われた。半導体としてはゲルマニウムの代りにシリコンの面積P-N接合の製法が開発されたことは一つの福音である。

フォト・トランジスタの開発も著しく、多くの点で従来光電管に勝つたものが現われている。一例を示すと、感度についていえばAgCs面ガス入光電管の約30倍、AgCs面真空光電管の約200倍、またSe光電池の約50倍の高感度をもっている。しかも容積は光電管の約1/100という小型である。

(4) 太陽電池と原子電池

太陽電池は太陽のエネルギーを直接電気にかえるものである。高純度のシリコンの表面に微量の硼素を入れてP-N接合をつくる。硼素の入る深さは1/4000cm程度で構造は第4図のようなものである。



第4図 太陽電池

わが国でもすでに太陽電池の製作が始められている。発電能率は今のところ15%程度である。太陽エネルギーは地上が1m²当り1キロ・ワット程度であるから、太陽電池を1m²の面積に並べると150ワット程度の電力が得られることになる。100m×100mの面積に電池を並べると1500キロ・ワットの電力を発生することになり、なかなか大きなものである。

原子電池は放射線を当てて電気エネルギーを取り出すもので、原理は太陽電池に似たものである。

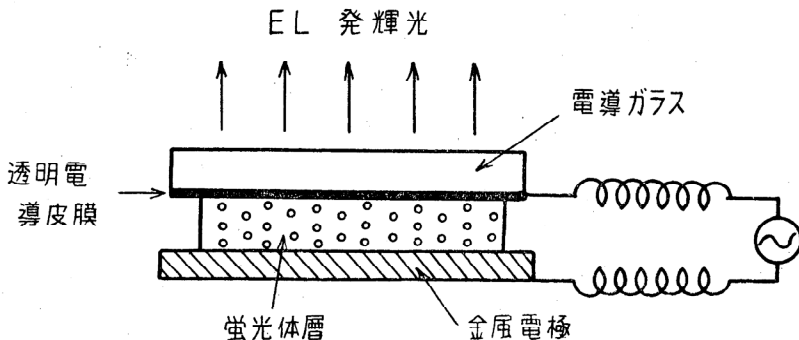
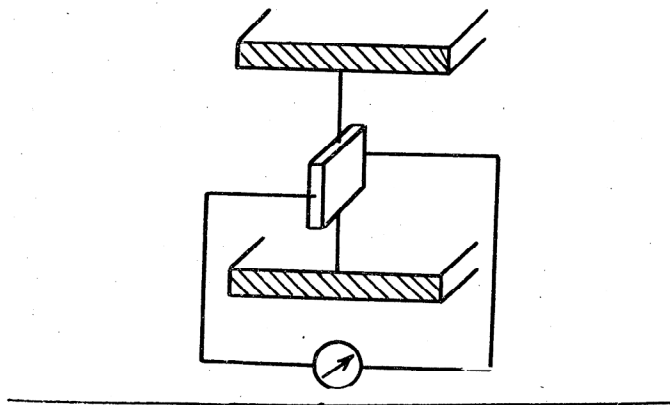
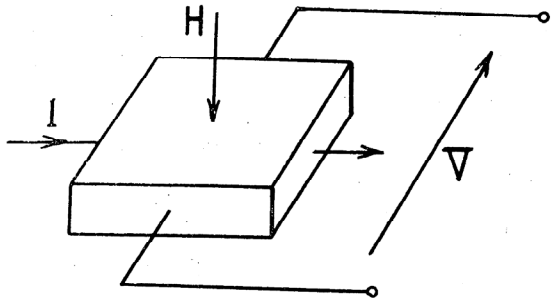
(5) 電子冷凍

異種の金属の接触点を通して直流電気を流すと接触面

生産と技術

でジュール熱以外の熱の発生または吸収が起る。電流の方向を逆にすると熱の発生と吸収が逆になる。これをペルチェ効果 (Peltier effect) と呼ぶ。この熱の吸収の方を利用すると冷凍器ができるわけである。この原理は古くから知られていたが、適当な材料が見当らなかつたため実用にならなかつた。それが半導体の研究によつてはじめて実用化の曙光が見えてきたのである。

電子冷凍器というのがそれである。電子冷凍に使う導電材料としては電気伝導がよくて、熱伝導の悪いものが要求される。金属にはこのような特性のものはない。即ち金属では電気伝導のいいものは熱伝導もよいし、熱伝導の悪いものは電気伝導も悪い。ところが半導体、特に金属間化合物の中には電気伝導がよくて熱伝導の悪いものが見出される。このような材料 (例えば $\text{Bi}\cdot\text{Te}$) を使つて電子冷凍器の実用化が行われている。



第5図 ホール効果

第6図 ホール効果を応用した電力測定

第7図 エレクトロ・ルミネッセンス

(6) ホール効果の応用

第5図のように、導体に電流 (I) を流し、これに磁界 (H) を働かせると、両者に直角の方向に電圧を発生する。これをホール効果 (Hall effect) と呼ぶ。ホール効果は金属導体よりも半導体において強く起ることが認められる。半導体の場合、ホール効果は単位体積中の自由電子の数および正孔の数に反比例するから同一半導体材料では高純度のものほど大きい。Si や Ge のような半導体とか InSb のような金属間化合物がよく使用される。応用例を示すと次の通りである。

(イ) 磁界の測定：電流を一定にしておけば発生電圧は磁界の強さに比例するから磁界の測定ができる。

(ロ) 直流電流計：電流によつて生ずる磁界を測定して電流を知ることができる。

(ハ) 電力計：電磁界の中に半導体を適当に挿入すると発生するホール起電力は電力に比例するようになる。第6図はブスバー (busbar) の中に Ge 素子を入れて送電線の電力を測定する例である。ホール効果を利用した電力測定では精度が波形の影響をうけない。実験結果によれば 300MC まで誤差なしに測定できる。広い範囲の周波数に使える特徴がある。

(ニ) アナログ・コンピュータの要素：二つの電気量の積、または一つの電気量の自乗を求めることができる。回転角の正弦または余弦を電気量に変換することもできる。

このほか、機械—電気変換器、直流—交流変換器その他多くの応用例がある。

(7) エレクトロ・ルミネッセンス

ある種の蛍光体は電界を作用させた場合に発光する。この現象を総称してエレクトロ・ルミネッセンス (Electro luminescence 略して EL) と呼ぶ。蛍光体を発光させるには何らかの刺戟エネルギーが必要で、従来は紫外線、X線、電子線、 α 線などが使われていた。EL は電気エネルギーによるもので全く新しい分野の開拓である。

第7図のように蛍光体を分散させた誘電体の薄層を電導ガラスと金属との2枚の電極の間に挟んだものである。即ち1種のコンデンサで、これが充電または放電されるときに発光する。従つて交流電圧を加えると発光が持続するが、直流電圧では電圧を加えたときと取り去つたときだけ発光する

誘電体にはメタクリル、ポリスチロールの如きプラスチックを用い、蛍光体としては ZnS 系のものが現在用いられている。電導ガラスはガラスの表面に酸化錫半導体の皮膜をつけたものである。

EL は照明に革新的手法を与えるもので、これによって理想的な面光源が得られる。光増巾も可能になる。

(8) 半導体整流器と障壁容量の利用

セレン整流器は半導体整流器のうちで現在最も多く用いられている。ゲルマニウム整流器は最近大いに開発され好評を得ている。シリコン整流器は今後の開発が期待されるものである。このほかガリウム砒素のような金属間化合物を用いた整流器も近く実用になるであろう。要するに整流器として半導体は極めて重要なものである。

半導体整流器の障壁容量（堰層静電容量）は逆電圧の大きさによつて広い範囲に変わる。この特性を利用して増巾器、周波数、変調器、可変同調器をつくることができ、パラメーター励振を行わせることもできる。

以上、半導体を利用した主要なものについて記述したが、この他に沢山の半導体電子装置があり、今後益々進展するものと思われる。

(9) 磁性体および誘電体

本文の始めに掲げたエレクトロニクスの定義に従えば磁性体や誘電体はエレクトロニクスの範囲には入らないが、その使いかたによつてこれらもエレクトロニクスの部門に入れる場合がある。そして磁性体や誘電体を使った電子装置の研究開発も極めて活潑である。

磁性体を使ったものとしては磁気増巾器が既に広く実用され、制御機器としての地歩を確立している。同種の超小型素子マグニスタ (magnistor) は開閉装置としても使われる。開閉用電子装置トランスフラクサ (transfluxer) は強磁性体を使った新型である。フェライト (ferrite) もパラメトロン (parametron) を始め多くの電子装置に利用される。

誘電体としてはチタン酸バリウムのような強誘電体が使われる。誘電体増巾器も実用に近づいているし、強誘電体を使ったパラメトロンも出来ている。

5. 電子機器

以上で電子装置の基礎的事項の概要を述べたが、電子応用機器の主要なものを書きならべると次のようなものがある。

工業用テレビジョン、電子顕微鏡、電子計測器、交換機、計算機、統計機、分類機、相関機、予報機、翻訳機、等々。

これらについてそれぞれ記すことは紙面が許さないが、このうちのいくつかについては別に記述があるの

で、そちらを見ていただきたい。

この機会に特に述べておきたいことは、航空電子機器の重要性である。今後益々、航空機が交通機関として重要性を増すことは論をまたないが、航空機装備の重点は電子機器で現在でも航空機製作費の半分に近いものが電子機器で占められている。飛行場の地上装置においては当然電子機器が中心になる。航空電子工学のことを米国ではエビオニクス (avionics) と呼んでエレクトロニクスの中の重要部門としてその進展を促進している。

6. オートメーションとエレクトロニクス

オートメーション (automation) は今後の産業機構を特徴づけるものである。この新語は automatic operation を簡略化したもので、その内容はいくつかの自動制御および自動操作のループを有機的に組合せたものである。オートメーションの重要性については今更申すまでもないが、オートメーションの実施にはエレクトロニクスが極めて重要な役割を果していることを強調しておきたい。オートメーションの目的は人間のすることを機械で代行させることだけではなく、人間ではできないことを機械でさせることである。後者が特に重要である。例えば人間では不可能な迅速、精緻な操作とか、眼で見ることのできない場所の操業などを行うのがオートメーションの真髄である。そして最近のオートメーションの特徴は人間の頭脳の代りをする機械が登場したことで、これはエレクトロニクスの発展に負うところが極めて多い。ここに詳しく記す余裕はないが、最新の一、二の例を示しておく。

(1) インテレクス (Intelex=automatic reservation)

: これは電子計算機に非常によく似た機械で、広範囲にわたつて複雑な交通網をもつた航空機の座席などを予約決定する装置である。米国では年間1500万人を扱う航空会社は従来この仕事に700人の事務員を使い、1人の客の座席の決定に電話連絡などを行い時には数時間を要したのであるが、この装置を設けてから700人の事務員の大半は不要となり、座席決定は10秒以内にでき、サービスがよくなったといわれている。

(2) 字をよむ機械 (Letter leading machine or

Character recognition device) : 印刷された文字を音声にして出す装置である。この電子装置を無線送信機と組合せると、タイプ印刷された文字から直接に電信を自動送信することもできる。将来は書物から直接に計算機を制御するようになるかも知れない。

例をあげると限りがないが要するにエレクトロニクスの進歩はオートメーションを益々精巧なものに仕上げ

(21頁に続く)