

半導体の歴史

— その5 20世紀前半 トランジスターの誕生 —



株式会社ルネサステクノロジ
生産本部技術開発統括部
MCU デバイス開発部 主管技師

おくやま こうすけ
奥山 幸祐

■ 前回までのあらすじ

1800年に人類が初めて電池を手にしてから、電気の活用が広がり1900年初頭までに電信・電話、電灯・照明、発電機、変圧器、電動機、そして無線通信などの技術が多くの科学者、技術者の手によって開発され、産業の発展をもたらしてきた。これらの電気技術の活用と共に、電気とは何かの解明が1800年代後半から活発になり、電磁気力学が生み出され、遂には電子が発見され、電気の素が電子であることが判明する。電子の挙動を本格的に解き明かすのは1900年から始まった量子力学である。物質を高温に加熱した時に発生する光の解析から始まる量子論の研究が第一次世界大戦をはさみ、四半世紀の間に続けられたことで量子力学が構築されてゆく。数人の天才科学者達によって構築された量子力学により、1926年までに電子の挙動が明らかになり、原子核周りの電子を物質波の存在確率として捉えられるようになり、原子模型が完成する。その後、1930年までに原子レベルの議論から金属や絶縁膜などの固体中の電子を取り扱う固体物理まで進歩し、1931年に半導体中の電子、正孔の挙動を現す半導体物理として量子力学の応用が広がる。

一方、半導体物性に関しては、1839年に物質を温めると伝導性が増加する半導体的性質が初めて発見される。その後、1873年に光を当てると伝導性が増加する光電効果が発見されるまで35年間音沙汰なしであったが、翌年の1874年に亜酸化銅の面接触整流作用が報告される。次いで、同年に点接触整流概念の原型となる、金属と半導体の接触面での整流特性が発見される。面接触整流器はセレン整流器や亜酸化銅整流器として1920年代初期から工業用に大量に生産され、点接触型整流器は鉱石検波器として、無線通信に使用されて行く。しかしながら、1883年に真空管の原理が発見されることで1904年に2極管検波器が発明され、その後3極真空管が出てくると鉱石検波器はそれらに置き換えられ、一時すたれて行く。1929年の世界恐慌を機にブロッ

ク経済などの保護主義が第二次世界大戦へと向かわせる。再び、鉱石検波器が脚光を浴びるのは第二次世界大戦の前になる。この時期に軍事目的にレーダーの改良が促進され、このレーダーの受信感度を上げる目的で、真空管に比べて高周波の電波に対応できる鉱石検波器が浮上してくる。鉱石検波器の性能を向上させるために、シリコン、ゲルマニウムの2つの半導体に絞られ、これらの結晶中の不純物濃度制御技術が確立されてくることで半導体材料の基礎が固められてゆく。1945年に戦争が終結すると、すでに科学技術開発の舞台がヨーロッパからアメリカに移っており、アメリカでの対戦争国家プロジェクトに従事していた研究者が各企業の研究所に戻るとことで企業内での半導体研究が活発になる。ベル研究所では後にトランジスターの父と呼ばれるマービン・J・ケリーが第二次世界大戦前の1936年から真空管に代る新たな半導体素子での増幅器を夢見て、ショックレーを初めとする新たな科学者を雇い入れ、それまで従事していたブラッティンらに加えた研究体制を敷いていた。第二次世界大戦の間は休眠状態であったが、1945年の終戦によりショックレーらが国家プロジェクトから戻ると再び研究を開始する。再開するに当たり、ケリーは量子力学に精通しているバーディンを加えるなど、更に研究体制を充実させたのである。

以下、城坂俊吉著『エレクトロニクスを中心とした年代別科学技術史—第2版—』、フレデリック サイト、ノーマン アイシュプラッハ著、堂山昌男、北田正弘訳の『シリコンの物語』などを参考に、ベル研究所におけるトランジスター誕生に至るまでの研究者の挑戦について述べる。

■ トランジスター発見以前の固体増幅素子の研究

いったい、トランジスターとは何であろうか。トランジスターは私達に大きな文明の発達をもたらした画期的なデバイスである。簡単にトランジスターの働きを言い表すと「電子回路の中でスイッチングと信号の増幅を行なうデバイス」と言って良い。電気信号を通す、切断するスイッチングの働きと、配線抵抗などで減衰し、小さくなった信号を大きな信号に増幅する働きをする機能をもつ。

このスイッチングと増幅の模式図を図1に模擬的に示す。A-C間に電気信号を通すか切るかをBから入力する電圧や電流で制御する。これはA-C間にある電気的な抵抗RsをBから入力する電圧や電流の信号が大きく変化させること

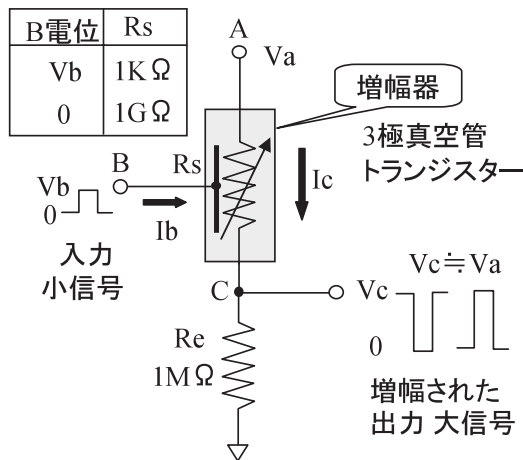


図1 増幅器の働き

である。例えば、RS の抵抗値が、B から電圧が印加されない場合 (Low 状態) に $1\text{ G}\Omega$ 、印加された場合 (high 状態) に $1\text{ K}\Omega$ のように大きく変化すると仮定する。B からの入力信号が有る無しにより、A から C に流れる電流の流れ易さを大きく変化させ、この仮定のように $1\text{ G}\Omega$ から $1\text{ K}\Omega$ に 6 桁程度の RS 抵抗を変動することができれば A の電位を C に伝えることが可能になる。C の下に設けた外部抵抗値 Re を、例えば $1\text{ M}\Omega$ 程度に設定したとすると C の電位は直列に配置された 2 つの抵抗 RS と Re との抵抗分割によって決まり、Low 状態ではほぼ 0 であるが、high 状態ではほぼ A の電位と同等になる。このことは、B の入力信号でスイッチング動作ができることを意味している。一方、このスイッチング動作において、B の入力電圧 Vb と C における電位 Vc の比率、または入力電流 Ib と C に流れる電流 Ic との比率を考えた場合、入力信号の Vb、Ib に対して出力信号となる Vc、Ic が大きいほど信号が増幅されることになる。つまり、入力信号に対して出力信号が増幅されることになる。

1947 年のトランジスタ発明まではこの増幅器として 3 極真空管が採用されていた。例えば、電話の信号が配線抵抗で減衰するのを中間に設けた真空管の増幅器で再び大きな信号に増幅するのである。真空管では A が加熱されたことで電子を放出するアノード電極、C が放出された電子を受けるカソード電極、B が電子の通り易さを制御するグリッド電極となる。B のグリッド電極に入力信号をいれ、C のカソード電極から出力信号を取り出す。

ケリーは電話システムの中の、この真空管を半導体デバイスに置き換えることにより、安定で小さく省力化を図れるものにしたかったのである。真空管ではアノード電極のフィラメントを加熱する必要がある、消費電力が大きいこ

と、フィラメントの耐久寿命があり、メンテナンスが必要であること、外形が大きく、今後の電話需要を考えると膨大な空間が必要になることなどの限界からである。一方ではレーダー受信器として半導体を用いた鉱石検波器の開発が半導体結晶精製技術や不純物制御技術の進歩を促進し、半導体応用の可能性が広がってきたのは前稿でも述べた。

しかしながら、真空管と同じ機能を持つ半導体デバイスができないかという考え方が出てきたのは、これらの技術進歩が始まる 20 年前で、量子力学が完成した年の 1926 年になる。ポーランド生まれで 1935 年にアメリカ市民となったリリエンフェルド (J. E. Lilienfeld) が絶縁膜基板上に形成した半導体薄膜による電力増幅器の特許を出願している。ガラス基板上の Cu_2S 薄膜両端 (図 1 の A、C にあ



リリエンフェルド
(J. E. Lilienfeld)

たる部分) に電極をつけ、 Cu_2S 薄膜の中央部で Al はく電極 (図 1 の B にあたる部分) の縁を線接触する構造において、制御ゲート電極になる Al はく電極の電位を Cu_2S 電位に対して正にすると (Cu_2S P 型半導体と金属との接触において逆バイアス印加)、 Cu_2S の抵抗に変化が生じ、Al 電極に小電力を供給して、 Cu_2S から大電力を得るデバイス特許である。Al 電極と Cu_2S 間はショットキー接合を介した逆バイアス印加になる電界効果型のトランジスタである。このリリエンフェルドの研究は後世の研究に結びつく事はなかった。当時は量子力学の基礎が完成したばかりであり、半導体の理論的背景がなく、また材料面でも単結晶技術が確立しておらず、当時の薄膜技術で処理しなければならなかったためでもある。しかしながら、半導体表面に電界を印加し、半導体の抵抗を変化させることで増幅効果を得ようとした最初のアイデアであった。リリエンフェルドに次いで特許を提案したのはイギリスのヘイル (O. Heil) である。1935 年に半導体抵抗を面電極によって制御するデバイス特許を出願している。半導体 (Te_2 , I_2 , Co_2O_3 , V_2O_5 etc.) の両端に電極を取付け、その半導体上面にコントロール電極を半導体ときわめて接近して非接触に配置し、この電位を変化して半導体の抵抗を変化させることにより、増幅された信号を外部回路に取り出すデバイスである。半導体材料は同じではないが、着想としては今日の後述する MOSFET (メタル/酸化膜/半導体の電界効果型トランジスタ) の先駆的なものと見なすことができる。更に 1938 年にドイツのヒルシュ、ポール (R. Hilsch, R. W. Pohl) が 3 電極結晶を使った電子流制御デバイスを報告している。

KBr 結晶と Pt 電極で形成した整流器の KBr 結晶内に格子電極を埋め込んだデバイス構造であり、このデバイスで初めて制御電極（格子電極として結晶内に埋め込んだ電極）に流した電流 0.02mA に対して陽極電流の変化 0.4mA の増幅を確認している。このデバイスは電子流の他にイオン電流の寄与もあって、1 サイクル程度の低い周波数しか使えなかったため、それ以後この研究は発展する気配はなかった。また、着想としては真空管の構造そのものを固体素子の中に実現しようとしたものであり、固体増幅器に夢を託しながらも、後述する半導体表面の基礎研究から実現してゆくトランジスタ技術とは一線を画す技術と思われる。しかしながら、以上述べたようにトランジスタが発見されるのはほぼ 20 年前から、半導体を用いた固体増幅器の考え方は幾度か提案されていたのである。このことから、ケリーが企画したベル研究所の固体素子研究の着想そのものは必ずしも真新しい発想ではなかった。この 20 年間に量子力学を基にした半導体物理が完成し、第 2 次世界大戦が原因となるレーダー技術開発が元になり半導体に関する技術が発達した事で、漸く、戦後になって機が熟してきたと考えられる。ケリーはその機会を逃さず、実現に向け他者よりも早く一步を踏み出したのである。しかも、万全な体制を整えて。

III トランジスタ発見への模索

1936 年にケリーにスカウトされ、ベル研究所に入所したショックレーはケリーの戦前戦後（1938 年、1945 年）2 度の組織改革の下で固体素子の増幅器を発見すべく研究に従事してゆく。戦争中の国家プロジェクト参加のため 4 年程ベル研究所を離れるが、バーディン、ブラッティンらが点接触トランジスタを発見するまでの正味 8 年間精力的に実験を繰り返してゆく中で、明確に電界効果型のトランジスタに直接挑戦したのは 1939 年と 1946 年の 2 度である。特に 2 度目の 1946 年にはシリコン蒸着膜を絶縁基板上に形成した半導体素子を用いて電界効果型の増幅作用を確認しようと試みたが、10% 程度のわずかな増幅作用しか確認されなかった。彼自身、1939 年に表面準位の論理的考察を発表し、半導体表面にエネルギー準位が存在することを示していたが、この表面準位に阻まれ、どうしても成功することができずにいた。トランジスタ発見はこの表面準位との戦いとなる。1947 年にショックレーはバーディン、ブラッティンらと会合を開き、これまでの失敗の原因について話し合う。ここでバーディンが 1 つの仮定を立てる。入社する前のプリンストン大学での博士研究でこの問題に取り組んだバーディンは固体表面に関するエネルギー状態について考えていた。ショックレーの失敗は電子のトラップ（捕獲）として働く、半導体表面に関係したエネルギー準位（表面準位）の存在によるものと推定した。このエネルギー準

位は電子を捕獲したり、放出したりすることで半導体の外部表面に双極子（電気二重層）をつくる。この電子を捕獲したり、放出したりするのに必要な時間は常温では極めて短く、ショックレーが使った入力信号の周波数領域で追従することで真の電界効果を隠してしまうのではないかと推定したのである。すなわち、半導体表面には内部と同一でない電子の占めることのできる量子状態（表面準位）が存在する。この表面準位からなるポテンシャルバリアは金属電極を付ける前から形成されており、その原因は、表面の不完全さ、表面に吸着した原子・分子などによるものであると考えた。これらの表面の欠陥からなる表面準位が邪魔をすることで入力電位の変化が半導体内部に伝わりにくいと考えたのである。

この推定は 2 つの方法で正しいことが確認される。1 つ目は低温での評価である。電子を捕獲したり、放出したりするのに必要な時間が室温に比べて非常に長いと考えられる低温にシリコンの蒸着膜を保ち、実験を行なうことで増幅作用が観測され、バーディンの仮説が正しいことが確認されたのである。

一方、バーディンは半導体表面のエネルギー準位によって、表面から 1 μm 程度の厚さの空乏層が存在し、半導体表面から基板に向って多数キャリア（p 型基板では正孔）を注入した時、表面にもう 1 つの電極を設け、この電極で空乏層に電界を加える事で、多数キャリアの流れに影響をおよぼし、この電界効果で増幅作用も確認できる仮説を立てた。2 つ目の方法はこの仮説「表面準位による空乏層に電界を加えることで多数キャリアの流れに影響をおよぼし、増幅作用を引き起こす（電界効果）」を実証することである。この 2 つ目の方法を実証する実験を繰り返す過程でトランジスタが誕生することになる。

これを実証するために、バーディンとブラッティンは図 2a に示した実験装置を作り、半導体表面に設けた電極 C から基板裏面電極 B に向けて注入した多数キャリアの電流が、もう 1 つ半導体表面に設けた電圧印加用の電極 E から空乏層へ印加した電圧により変調するかを見る事で電界効果の確認を試みる。半導体には当初、多結晶シリコンを用い、電極 E には電解液を用いた。この実験で明らかに空乏層に電圧を印加することで多数キャリアの正孔電流が変調され、増幅作用のあることを室温でも確認する。2 人はその後、半導体を欠陥の少ない n 型ゲルマニウム（Ge）の単結晶に切り替えて多結晶シリコンよりも大きな電界効果を確認している。仮説が正しい事はこれらの方法でも検証されたのである。しかしながら、この増幅作用は時定数が大きく、非常に低い動作周波数でしか使用できないレベルであった。実用化するためには半導体表面のトラッピング現象を無くすか、制御するか技術が必要であり、1950 年代後半からの技術改善を待たなければならなかったのである。この技

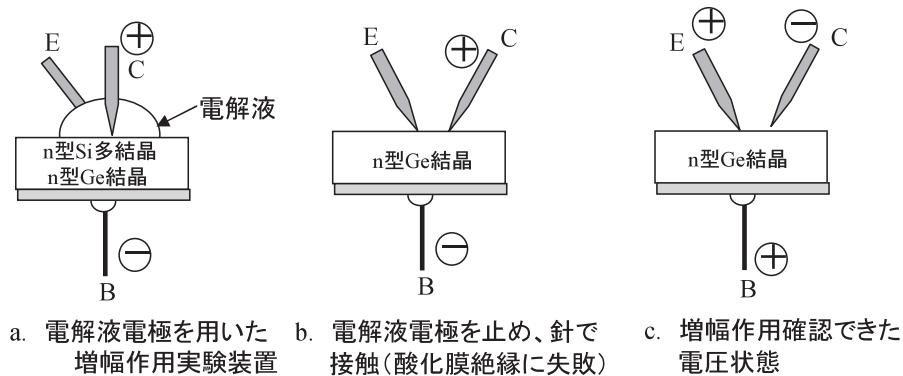


図2 バーディン、ブラッティンの点接触トランジスター発見実験

術改善の過程で理想的なメタル電極／酸化膜／半導体 (Metal/Oxide/Semiconductor : MOS) 技術が得られるようになり MOSFET (MOS 型電界効果トランジスター) として、特に1970年代以降に半導体の主役に躍り出てくるのである。

ショックレーとピアソンは1948年にバーディン、ブラッティンとは独立に電界効果型トランジスター (MOSFET) の検討結果を報告している。これは1946年に検討してきた内容を纏めたものと考えられるが、その中で、10%程度の増幅効果しかでない事、後の90%は n 型 Ge の表面準位に捕獲されてしまうことなどが記載されている。リリエンフィールド、ヘイルに次ぐ、MOSFET の先駆的な発表であったが、実使用レベルまで高めるためには上記の様な表面制御技術の確立を待たなければならなかったのである。

■ 点接触バイポーラ・トランジスターの誕生

バーディンとブラッティンは、その後、上記の電解液を介して電圧を印加する方法を変更し、半導体表面に酸化膜を形成し、電圧印加電極 E を酸化膜上に設け、酸化膜を介して半導体に直接接触させて電圧を印加する方法を試みたが、上質の酸化膜を形成することに失敗し、電極 E と半導体との間の絶縁性がない状態で半導体に電圧を印加することになる (図2b)。

この状態で実験を繰り返していた1947年12月16日のことである。半導体表面から電流注入する電極 C と基板裏面電極 B との電圧を、図2c に示すように、たまたま、これまでの実験に対して逆方向 (整流特性において電流が流れない方向の電圧、この場合は負電圧) に印加し、且つ電極 E に正の電圧を印加することで電流 I_e を流した時、図3 に示すように電極 C に電流 I_c が流れ、大きな増幅効果が見られる事を発見したのである。電極 E に電流を流さない場合は整流特性の逆方向特性で、電極 C からの電流は流れないが、

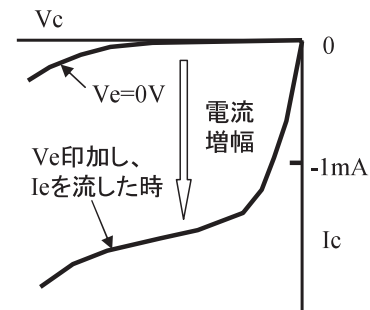


図3 点接触バイポーラ・トランジスターでの増幅効果

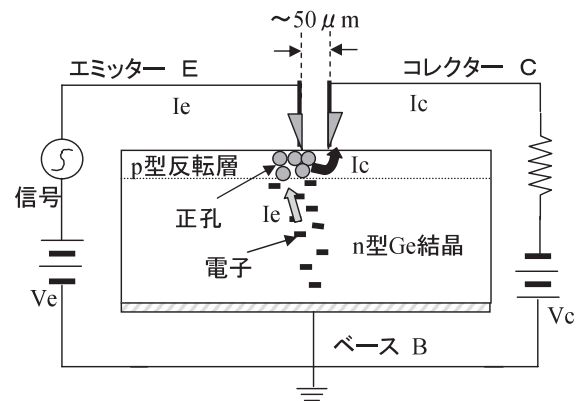


図4 点接触バイポーラ・トランジスタの模式図

電極 E に電流 I_e を流した時に電極 C の電流 I_c が大きく流れ、半導体の内部抵抗が大きく低下すると言う現象、更にこの現象の中に電流増幅作用があると言う画期的な発見をしたのである。点接触バイポーラ・トランジスターの誕生であり、半導体工学の幕開けのきっかけとなる大発見である。

この現象をバーディンらは次のように解釈した。図4に

点接触バイポーラ・トランジスタの模式図を示す。n 型 Ge の表面にはもともと p 型の反転層（n 型から p 型へ反転した層）が形成されており、ここに正孔が蓄えられていて、電極 E に正電圧をかけて正孔を Ge に注入することで、p 型反転層から n 型 Ge へ注入されていった正孔の供給は、p 型反転層にある電子帯の電子が電極 E に移ることで補われる。n 型 Ge の内部に注入された正孔は拡散して整流電極 C（コレクター電極）の方に移動し、そこで電極 C に吸収され逆方向電流 I_c （コレクター電流）となる。この結果、電極 E に電流を流さない状態では逆方向の漏洩電流のみであるが、電極 E に電流を流すと、E から B に流れるべき正方向電流分が C に流れ込むことになる。これは見方を変えたと、電極 E をエミッター電極、基板裏面電極 B をベース電極、電極 C をコレクター電極としたときに、エミッター電極を基準にして、エミッター電極とベース電極間の電位差と電流をそれぞれ V_e 、 I_e 、エミッター電極とコレクター電極の電位差、電流を V_c 、 I_c として考えると分かり易いかも知れない。 V_e を印加し、多数キャリアである電子電流 I_e を流すことで、エミッターとベース間の正孔に対するエネルギーバリアが低下し、エミッター領域からベース領域に正孔が流れやすくなり、ベース領域を通過してコレクター電極に電流 I_c として流れ込むとも理解することができる。エミッター電極とコレクター電極の距離を近づけるほどコレクターに正孔は流れやすくなり、バーディンとブラッティンの実験ではこの距離（電極 E と C との距離）を $50\mu\text{m}$ まで近づけている。この発明を利用するために十分に準備し、まもなく最適に設計した回路で約100倍の電圧利得（ V_c/V_e ）と約40倍の電流利得（ I_c/I_e ）を達成している。

注意深く準備された少数キャリア注入に基づく機能実験用の回路がベル研究所の副所長ボーン（Ralph Bown）に導かれた数人の幹部に示された。新しい発見の瞬間からちょうど1週間後の1947年12月23日であった。この日がベル研究所の公式発明日となる。特許出願は、バーディンとブラッティンの名前で1948年2月6日にウェスタン・エレクトリック社によってなされた。新聞公開は同年6月30日である。この7ヶ月間は完全な秘密研究としてグループが形成された。また、この発明デバイスの名称は所内公募され、トランジスタは Transfer Resistor の略でピアース（J.R.Pierce）の命名である。この名前はキャリアの注入でエミッターからコレクターへ電荷が移動する電流駆動型デバイスが入力と出力の間の転送（transfer）する抵抗（resistor）であることから、ピアースが「trans-sistor」としたことに由来している。このようにして“transistor”になった。

点接触バイポーラ・トランジスタ発明の発表は1948年夏にニューヨーク市で行なわれた。この時に展示した装置は15メガヘルツまでの周波数領域で動作している。



トランジスタ発明発表時の3人

この発明は、たまたまショックレーが出張中の時期になされたもので、ショックレーの名前は入っていない。ショックレーは固体増幅デバイスへの期待を夢みて半導体グループの研究をリードし、自らも1939年、1946年の2度にわたって固体増幅に挑戦しながらも、表面準位の壁に阻まれ、この問題に集中してきただけに、自らがその研究に直接タッチできなかったことを非常に残念がって、次のように言っている。「トランジスタの発明は我々グループ全体にとって非常に良いクリスマスプレゼントであった。私はその喜びをわかちあった。しかし私の気持ちは矛盾をはらんでいた。私の喜びは私が発明者の1人でなかったことによって薄められた。私は私の8年間にわたる努力が、この発明に関わり得なかったことにフラストレーションを感じた。そのフラストレーションに応えるために、つぎの5年間に私は私のベストを尽くした。……」そしてこの刺激と努力が日ならずして次の接合型トランジスタの構想を固め、その発明の栄誉をにうことになる。

ベル研究所グループのトランジスタ発明は偶然的発明であったか、意図的発明であったかが議論される事があるが、前稿にも述べたように、ケリーがレールを敷いたからこそこの発明が得られた事は誰もが認める所である。当時のベル研究所の副社長モートン（Morton）は「彼らのグループはかねてから、点接触型整流器は二極管との整流現象のアナロジ的な直感から、結晶内においても三極管同様の増幅作用が起こりうるはずという信念を抱いていた」と説明している。この直感こそ、ケリーが持ち合わせていたものであり、ショックレー、バーディンらも持ち合わせていた。

持ち合わせていたからこそ、一つ一つ解明してゆく過程で、最後の瞬間が偶然であろうと、統一的な意思を持って発明したものと考えられる。ショックレー自身は「始めは確かに意図的で試みたが、単なる既知の知識だけでは成功せずに中断となった。しかしそれを阻止するものが表面単位であり、それを探求する過程で偶然的発見に到達した。このことは基礎研究の根底に固体増幅器があったわけで、単なる偶然、ラッキーとも言いがたい……」「この研究は基礎研究と応用研究との関連を示す良い例だと思う」と言っている。このように動機付け、研究の狙いとしてみた場合、この発明は偶然的なものではないと言える。しかしながら、物性面などの科学的観点から見た場合はある程度偶然の産物と言える。最も大きな偶然は研究対象として取り扱った半導体 Si や Ge の物性である。特にこれらの少数キャリアが1つの点電極から他の電極への移動する間に生き延びることができた点である。正孔が半導体のバルクの n 型領域を通して移動するためには電子と正孔の再結合の為の寿命が実験条件下で十分に長くなければ、この新しい発見は実現しなかったのである。バーディンもブラッティンも当初からこの寿命を念頭において実験を進めた訳ではなく、この件は発見の後での幾つかある疑問の中の1つであった。この疑問は幸運にも発見から2ヶ月後に証明される。同じベル研究所のシーヴ (John Shive) が n 型 Ge の非常に薄い層を用いた実験で、層の片側に注入された正孔の電流は逆側の電極を横切って移動するだけではなく、その電流は注入電流源と第3電極における電圧を変える事によって変調することができることを見出している。この実験で初めて、この発見の事象の解釈が正しいものと実証されたことになる。そう言った意味ではある程度は偶然性をもった発見であったと言える。

pn 接合

点接触型トランジスターの発明を介して、トランジスター原理を探求する組織的研究を展開したベル研究所のグループが、表面単位によって n 型 Ge 表面が p 型に反転している層が存在する着想を固め、そこから正孔注入の概念を生み、その注入された正孔が移動する過程で、あらかじめそこに存在する多数キャリアとは再結合して消滅することなく、近接する整流器 (検波器) の逆方向電流を増加させるキャリアに転化する現象過程の考え方を確立する。このような背景のもとにショックレーらは1949年6月「pn 接合を流れる電流」と言う論文を発表し、はじめて pn 接合なる概念を明確にし、pn 接合を流れる順方向電流は、p 型—n 型いずれかの非抵抗の低い方の多数キャリアによって運ばれ、これが相手側領域の側に注入され、この注入された領域における過剰の少数キャリアが拡散しながら一部多数キャリアと再結合すると言う pn 整流理論を確立した。このような理

論では、電流はもはや従来の一電流理論ではなくなり、その流れの過程で正孔から電子、電子から正孔という乗り換えが起こることになる。ここに pn 接合理論の本質があると考えられる。

バイポーラ接合トランジスターの発明

少数キャリアが適当な条件下で反対符号のキャリアが主である領域を横切って移動しても生き残ることがわかると、ショックレーは点接触トランジスターの概念に基づきながらも更なる発展を考え、間もなく1948年に pn 接合を使ったバイポーラ・トランジスターの新たな素子の特許を出願し、1949年に上記 pn 接合理論の提案と接合型トランジスターの可能性の理論的提示を行なっている。pn 接合理論との関連においてその定量的な解析を行ない、さらにこの接合の概念を発展させて、点接触に比べて、より解析の容易な面接触型トランジスターモデルの理論的提示を行なった。pn 接合の理論を述べた最後の一節において、図5のような構造のものをつくれば、トランジスターになるとする可能性を提示した。

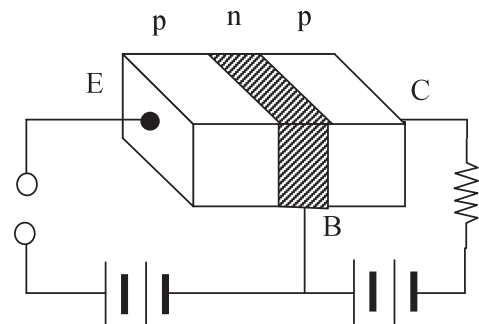


図5 バイポーラ接合トランジスタ

これによってさらに前進したトランジスター作用の概念を確立し、ショックレー自らが言うように「特性の計算できるトランジスター」として、今日の接合型トランジスターを予見している。この素子は2つの pn 接合を左右対称に設けたデバイス構造であり、一方の pn 接合はエミッターとして、注入されたキャリアの源として働き、これに対抗して配置された pn 接合がコレクターとして働く。中心領域に n 型または p 型のベース領域があり、ここにベース電極が取り付けられた構造である。

ベースの両側に pn 接合があり、ベース電極に対して適当な電圧をエミッターに印加すると、エミッター中の多数キャリアがベース領域に流れ少数キャリアとになり、これらの電荷はもう一方の pn 接合の内部電位や付加された電位によって、拡散電流やドリフト電流としてコレクター領域に

向って流れてゆく。エミッターからコレクターに流れてゆくキャリア数はエミッターとベースの間の電位に依存し、さらにエミッターとコレクターの間の電位差、距離にも依存する。このデバイスの最初の型ではエミッターとコレクターの間の距離（ベース幅）が十分に長かったためエミッターからコレクターへの移動はキャリアの拡散に依存していた。

この型は点接触トランジスターに比べて大きな pn 接合の接触面積とキャリア体積を採用し、非常に大きな少数キャリア電流を使える面から、これを生産する技術が開発されると、応用に関しては点接触トランジスターよりずっと融通が利き、有用である事が証明される。ただし、この発明の基本動作原理は、前述したバーディンとブラッティンによる点接触型トランジスターと同じであり、点接触型トランジスターがあったればこそ出てきたアイデアである。この点から考察すると点接触型トランジスターの改良版の域を出ていないとも考えられ、バーディンとブラッティンの注意深い研究の結果として点接触型トランジスターの基本的発見がなされなかったら、その設計に基づく原理は多分、同じチームのメンバーからは出てこなかったと思われる。この事実は事実として、ショックレーの執念で発明された新しいデバイス構造はバイポーラ・トランジスターの基本構造となり、個別トランジスターはもちろんの事、その後の集積回路を含む半導体デバイスの大きな牽引力となってゆくのである。ショックレーの正しい動作原理の捉え方から生まれた無駄のないデバイス構造であることをその後の歴史が示している。

このデバイスを実用化してゆく過程で Si や Ge の純度、結晶の完全性（無欠陥性）が求められ、結晶技術が育成されてゆく。ベースを横切って移動する少数キャリアはデバイスにとって重要な移動電流を運んでいるが、多数キャリアがたくさんある領域で反対符号のキャリアと再結合してしまう可能性や、不純物原子や他の欠陥によって捕らえられてしまうこともある。この様な少数キャリアの捕獲は電流の流れを妨げ、キャリア消滅の確率を増やすだけでなく、少数キャリアが変調される確率を低くする。このことから、デバイスの高い性能は Si や Ge の純度、結晶の完全性（無欠陥性）の度合いに依存するのである。1950年代以降の技術開発で結晶技術が飛躍的に成長してゆく事になる。

電界効果トランジスター

前述のように、バイポーラ・トランジスターの発見の前に20年間に渡って検討されてきたデバイスは電界効果型のトランジスター（FET）である。1948年初期にバーディンは点接触バイポーラ・トランジスターの研究を続け、ブラッティンと一緒に進めた電界効果の最初の研究によって考えついた電界効果トランジスターの独特な形を考案し、1948



往年のショックレー

往年のバーディン

年2月26日に基本特許を申請した。特許は1950年10月3日に権利化されている。いくつかのデバイス構造を提案し、例えば、バイポーラ接合トランジスターではベース領域となる領域に正常層と反転層を含む二重の層をつくり、この上部に酸化膜の絶縁膜を介して電圧印加電極（ゲート電極）を設け、ゲート電極から電圧をかけることで電場を変化させることにより電流を変化させる構造である。いわゆる、接合型電界効果トランジスターの基本特許である。ゲート電極からの電圧印加でベース領域（今日ではチャネル領域と呼ぶ）に空乏層と反転層を形成し少数キャリアが通過し易くするデバイスと考えられる。最初の型はショックレーの指示により1953年にデーシー（G.C.Dacey）とロス（I.M.Ross）がつくっている。この電界効果トランジスターは半導体の表面技術が確立されてゆく過程で、特にシリコン酸化膜による安定化技術が確立されてくることで表面チャネル型の電界効果トランジスターが可能となり、バイポーラ・トランジスターと取って代わり、今日のLSIの主役をシリコンとともに成してゆく事になる。

目的を遂げたマービン・J. ケリー

ベル研究所長のケリーは、1948年のトランジスター発表以降に、それまでの秘密主義を一転し、特許公開を決断する。トランジスターの更なる発展はベル研究所だけに限ってはいけなと考へ、出来る限り広い機関で開発すべきと考へ方を変換し、公開に踏み切る。当初、この決断はアメリカの国防総省によって反対される。新しい技術は軍事的にも非常に重要であり、その独占的所有と開発は国家の重要機密として保つべきだと考へた。副所長のボーンはこの意見を反生産的であるとして、国防総省を説得する困難な仕事を引き受け、遂に特許の公開は1954年に許される事になる。基本特許を使う契約は25,000ドルというそれほど高くない値段に決められ、この技術に興味ある人たちの手に入るようになる。

トランジスターが初めて実用化された製品はGeトランジスターを使用した軽量の補聴器であった。ベル研究所は

1875年、ベルとハバードとサンダースの3人が特許に関し Bell Patent Association の協定を成立させ、これが幾多の変遷を経て「ベル・システム」を完成させた AT&T (American Telephone and Telegraph Company) へ繋がり、1925年に当時の AT&T 社長ウォルター・グリフォードが独立事業として設立したものである。もともとはウェスタン・エレクトリック (WE) 社の研究部門を引き継いだもので、AT&T 社と WE 社がそれぞれ50%ずつ出資している。ベル研究所の名前の由来であるグレーム・ベルが難聴者である妻への愛から補聴器を研究している過程で電話を発明したことを考えるとトランジスターの最初の製品も補聴器であることは、単なる偶然とは言え、感慨深いものである。

ベル研究所からは、その後も優位な研究結果が出されてくるが、トランジスターが発見された1947年から1953年当たりまでの期間が絶頂期と思われる。特に、1948年からの2年間は最も華々しい時期であり、第二次世界大戦を間にはさみながらも1936年に研究所長に就任してから計画実行してきたケリーの固体素子研究プロジェクトの集大成となった時期である。ショックレー、バーディン、ブラッティ

ンの3人はトランジスターの発明により1956年にそろってノーベル賞を受賞する。このプロジェクトを率いて来たケリーは、後世の情報文明社会の礎となるデバイスを生み出し、3人ものノーベル物理学受賞者を輩出し得たことは、彼自身が時代を見通しながら、強い信念を貫き通したことで成しえたことであり、偉大な時代の牽引者と言える。ケリーは研究部長を務めた後、1936年から1959年までの23年間の長期間に渡ってベル研究所長を務め、その後、研究所を去り、1971年に77歳で生涯を終えている。前稿で述べたように、トランジスター研究に研究者として関わってはいないが、研究者を集め、鼓舞し、自分自身の描いた夢に向わせ、トランジスターを世に輩出したことから「スピリチュアル・ファーザー」、「トランジスターの父」と呼ばれている。

次回

第7回 半導体の歴史

—その6 20世紀後半 集積回路への発展—