

講座

歴史絵巻

半導体

固体増幅器(点接触トランジスタ) 開発への道のり

20世紀エレクトロニクスの歩み(10)

相良 岩男

KOA 顧問

半導体シリーズの3回目である。W.ショックレーがベル電話研究所にスカウトされ、半導体の研究がスタートする。彼の研究グループには、W.ブラッテンとJ.バーディーンがいた。研究テーマは固体増幅器の開発。これを電話交換機に使うねらいである。最初に試作したトランジスタは、タングステン針2本をGeに突き立てこれを電極とする点接触トランジスタだった。ブラッテンとバーディーンの2名が特許出願した。実験に成功したとき、ショックレーは出張中で立ち会えなかった。運命とは皮肉なものだ。(本誌)

米ベル電話研究所所長のマービン(M)・ケリーが描いていた夢の電子スイッチは、真空管ではなく、固体による増幅器に違いない、とW.ショックレーは1938年ころから考え始めている。やがて彼は、W.ブラッテンが実験していた亜酸化銅整流器の研究に加わった。

W.ショックレーは、金属と半導体によるショットキー・バリア^{注1)}の整流について勉強し、ショットキー空乏層中に真空管と同様なグリッドを挿入した固体増幅器を1939年12月29日に考案している。W.ブラッテンとJ.ベッカもそれ以前から類似の考えをもっていたが、いずれもアイデアのみにとどまっていた。

その後、1941年に始まった第二次世界大戦のため、固体による増幅器の研究は中断している。この間、W.ショックレーは海軍でレーダ用

“cat's whisker”型検波器の研究に従事し、のちにペンタゴンにある陸軍でオペレーションズ・リサーチの仕事をしている。なにしろレーダ用検波器開発に米国の存亡がかかっていた時代である。

そのころ検波器に関する多くの研究が行なわれていたが、そのなかで注目すべきことは、Si(シリコン)やGe(ゲルマニウム)にアクセプタ不純物を添加するとp型、ドナー不純物を添加するとn型になることを、米国のJ.スカフとH.サウエレレが発見したことだ。

次に彼らは、n型Geを点接触型検波器に用いると、高い逆電圧での動作が可能になることを見いだしてい

注1) 金属と半導体とが接触したときに、どちらかに電子が移動したあとにできる境界面の障壁のことをショットキー・バリアという。

相良 岩男(さがら いわお)氏

1932年東京生まれ。1956年東京理科大学理学部物理学学科卒業。同年沖電気工業入社。半導体応用技術者として、オーディオ機器、ゲーム機、信号機などに向けたICの開発に従事。1990年ED事業部・電子応用技術部技師長で退職し、KOA常務取締役役に就任。1996年6月に現職。

ラジオの歴史は1996年4月8日号(no.659)に、テレビは1996年4月22日号(no.660)と1996年5月20日号(no.662)に、電話は1996年8月19日号(no.668)と1996年9月9日号(no.670)に、電子回路は1996年9月23日号(no.671)と1997年1月6日号(no.679)に掲載した。半導体の歴史の1回目は1997年6月2日号(no.690)、2回目は1997年7月14日号(no.694)に掲載した。

る。このため、このn型Ge検波器は高逆耐圧Geと呼ばれていたという。

さらにRオールがGe検波器の負性抵抗を利用して電力利得を得る方法を考案し、ラジオの音声をスピーカで鳴らせることに成功した。固体増幅器の負性抵抗を利用して音を鳴らしたのは彼が初めてである。だが、2端子のため不安定で実用的ではなかった。

W.ショックレーは1945年、SiやGeを用い、電界効果を利用する固体増幅器のアイデアを思いついている。pn接合で構成したデバイスの表面に制御電圧を印加し、これによって生じた空乏層を使って横方向の電流を変化させる構造だった。

戦争が終わる直前の1945年、ベル電話研究所のM.ケリーは早くも戦後の研究テーマについて考え始めた。この年の4月9日、ベル電話研究所で会議を開催し、Geによる固体増幅器の開発をテーマとして本格的に取り上げ、開発する方針を打ち出している。Geは、Siに比べて取り扱いが容易だったからである。

半導体理論の先覚者ウィルソン

p型やn型という概念はいつ頃から生まれたのだろうか。

1931年、英国のH.ウィルソンが、物質の電子の状態に初めて量子力学を適用して導体、半導体、絶縁体の相違を理論的に説明した。

このなかで特に注目すべきは、フェルミ・ディラックの分布則を用いて半導体理論を展開したことである。このころから、真性半導体と仮性半導体の2種があるということが明らかにになってきた。

真性半導体とは、不純物を含まない半導体であると定義した。絶対温度0Kで充満帯は電子で満たされており、温度上昇とともに電子が充満帯から励起されて空乏層に移る。充満帯には正孔が生じる。この電子と充満帯に生じた正孔が伝導（つまり電流）に寄与する。電子と正孔というキャリアが温度上昇に従って増加するため、抵抗値が減少するとH.ウィルソンは説明した。

ようやくM.ファラデーの謎が解けたのである。

さらに仮性半導体は不純物を含む半導体と定義した。ある種の不純物では空乏層のすぐ下にネガティブ準位（ドナー準位）を作り、温度上昇とともにここから電子が励起される。ある温度以上になると、電子が枯渇してしまう。これをn型半導体という。

これに対して他の不純物では充満帯のすぐ上にポジティブ準位（アクセプタ準位）を作り、温度上昇とともにここに電子が励起されて充満帯に正孔が生じる。ある温度以上になると正孔が枯渇する。これがp型半導体である。

ようやく半導体の概念が理論的に整然としてきた。

半導体はアレルギー体質？

アレルギーとは、ごく微量の物質を摂取したり触れたりすることによって敏感に反応する体質のことだが、実は半導体は数ある物質のなかでアレルギーをもつ物質といえるのではないだろうか。

つまり半導体のなかにP(リン)やSb(アンチモン)などの不純物をご

くわずかに入れると半導体の抵抗値が敏感に変化していく。不純物を入れることを「ドーピング」という。不純物に敏感な性質を「構造敏感(structure sensitive)」と呼んでいる。

ショックレー、ようやく研究に着手

第二次世界大戦後、W.ショックレーはベル電話研究所に戻った。彼は、M.ケリーの計画に従い、S.モーガンとともに固体物理グループの主任に就任している(図1)。

このグループのなかにサブグループがいくつかあり、その一つが半導体グループだった。半導体グループには、W.ブラッテンやG.ピアソンがいた。1945年、J.バーディーンがW.ショックレーの勧めで半導体グループに加わっている。

ここでW.ショックレーは、あらためて固体増幅器開発を自分の大きな目標にすることを決意したのである。まず電界効果による増幅器の研究が始まった。しかし理論的にはうまくいくはずの実験が予想と異なり何の増幅効果も得られなかった。

1946年になるとJ.バーディーンは「正バイアスの電界効果によってp型Geの表面に誘起された電子が、表面準位に捕獲され自由に動けなくなるためだ」と失敗の原因を説明した。表面準位が外部からの電界を遮蔽したわけだ。

しかも光の照射によって電子と正孔が発生するが、このとき表面準位によって電子がトラップされ、表面が負電位のn型になってしまう。半導体の表面は多数キャリアを寄せつけないように帯電する。結局、電界効果を用いた増幅器の研究は中断せ

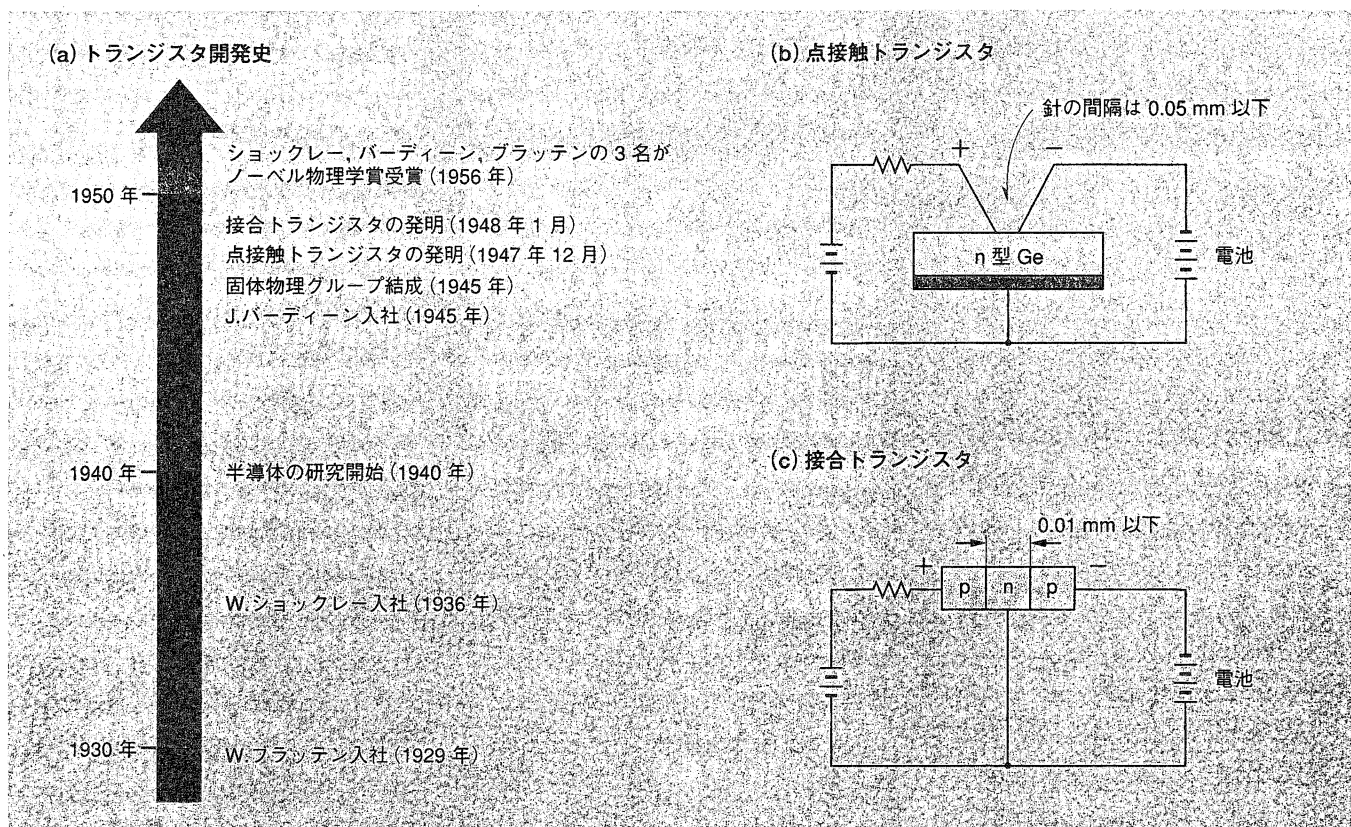


図1 接合トランジスタ発明への道のり まずタングステン針を2本立てて電極とした点接触トランジスタが開発された(b)。次いで接合トランジスタが考案された(c)。これがバイポーラ・トランジスタである。(c)はpnp型。このほかnpn型もある。

ざるを得なくなった。表面問題を克服できるかどうかには固体増幅器実現への鍵が隠されていたのだ。

pn接合が使えるはずだ

1947年3月12日、W.ショックレーはpn接合という構造を思いついている。pn接合を発想した目的は、増幅器へのアプローチとしてではなく、温度特性からエネルギー・ギャップ値などの物理常数を求めることくらいしか考えていなかった。

同年4月4日になると、さらにpn接合の考え方を進め、p型とn型を積層した構造も考えている。pn接合に高電圧のバイアスを加えようと高い導電率が得られるのではないかと思ひ、これを「高速アレスタ」と名

づけた。「トランジスタ」という概念はなかったが、ベル電話研究所長のO.バックレイはこの考え方を高く評価している。少数キャリアの注入については、まだ気づいていなかったようだ。

O.バックレイの励ましによって、W.ショックレーは、固体増幅器への研究意欲をさらに駆り立てられた。M.ケリーといい、O.バックレイといい、良きアドバイザーに恵まれるということは技術者にとって幸福なことである。と同時に、自分自身も良きアドバイザーになるように努力しなければならないと思う。

pn接合の性質解明に向けて

1947年4月14日には逆方向バイア

スされたpn接合において、p型領域における少数キャリアの振る舞いが明らかになってきた。W.ショックレーは、H.ウィルソンの半導体に関する考え方を導入し、空乏帯(empty band)を伝導帯(conduction band)に、充満帯(filled band)を価電子帯(valence band)と表現している。

1947年9月15日になると今度はnpn構造を取り上げ、その中間層のp型領域を流れる少数キャリアについて検討したが、まだ少数キャリア注入という発想は出てきていない。すでに固体物理グループが結成されて1年近く経過していたものの、失敗が多く、W.ショックレーは他の研究者からそっぽを向かれたこともあったという。

そのなかで唯一の成果はJ.バーディーン^{注2)}の発見だった。この発見はその後の半導体発展の歴史で重要な役割を演じることになる。

やがてW.ショックレーはpn接合という固体増幅器の基本機能を発明するのだが、当時、きわめて本質の近くまでたどりついていたわけだ。

表面問題の解明によりやく光明が

半導体の表面は混沌とし複雑怪奇である。簡単に、その姿が明らかになるわけではない――。

1947年11月になると固体物理グループにR.ギブニーと、電気技師としてH.ムーアの2人が加わった。

R.ギブニーは、金属とp型Geをいっしょに電解液（ほう酸グリコール：電解コンデンサに用いられていた材料）のなかに浸し、この両者の間に電圧を印加した。すると半導体（p型Ge）表面に垂直方向の強い電界が発生する。これは、半導体の表面にきわめて薄いグリコール絶縁膜ができるからだ、ということがわかった。

この強い電界を利用し、p型Si基板の表面のn型領域が正になるような電界を加えて表面に光を照射すると、光によって発生した電子がトラップされることなく、より多く引き寄せられていくのだ。負の電位ではこの効果がみられない。

このような構造にすると、表面準

注2) Si基板と表面にできたSiO₂との界面領域が不完全なため、内部とは異なる量子状態のエネルギー準位ができる。ここでSi基板と電荷の授受ができるようになる。これを表面準位という。表面準位にはドナー型とアクセプタ型がある。

位が克服でき、外部の電圧によってキャリアを制御できそうだ、ということがわかってきたのは同年11月17日である。

これを基にしてW.ブラッテンとR.ギブニーは、電界液を利用した電界効果増幅器を3日後に考え出している。

一方のW.ショックレーは半導体の表面上に絶縁層と金属を重ね、これをゲートとした場合、ゲート電圧によって反転層チャンネルが誘導されるのではないかと予測している。この反転層チャンネルを利用し、一度中止していた電界効果増幅器の試作を再び試みることにした。この構造の増幅器はIGFET（反転層チャンネルによる絶縁ゲート電界効果トランジスタ）と呼ばれている。

12月4日には、W.ブラッテンは、自分の考えた電界効果増幅器を發展させるため、W.ショックレーが以前から考えていたpn接合の中間点に電界液を垂らすか、もしくは半導体表面に双極子層を形成すれば、電界液中でなくても、固体でも増幅器が実現できるのではないかと考えたのである。

そこで、p型領域とn型領域へそれぞれ金属針を立てるという新しい構造を提案した。W.ブラッテンの提案を実証するために、G.ピアソンは電界液による実験を数多く行っている。

12月8日になるとW.ショックレーは、W.ブラッテンの実験をさらに發展させ、pn接合に逆バイアスを加えて電界液を垂らし、ここに電圧を加えればpn接合間に大きな電圧変化が生じるかもしれないと考えた。実

は、逆バイアスにするというアイデアから点接触トランジスタが生まれ、接合トランジスタの発明へとつながっていくのである。

点接触の固体増幅器誕生へあと一歩

難解な半導体表面についても次第に理屈が明らかになりつつあった。

1947年12月8日、W.ブラッテンとR.ギブニーは、増幅作用を実験で確認した。

まず、n型Ge基板の表面に形成した薄いp型反転層に、金属針を立てて一つの電極と見立てた。さらにこの金属針周辺に電解液を添加し、電界液をもう一つの電極とした。

ここで、電解液とp型反転層に立てた金属針とに+の電圧（入力）を、p型反転層に立てた金属針とn型Ge基板とに-の電圧（出力）を加えると、入力と出力の間に電力増幅が得られた。増幅作用の確認は、入力と出力の直流電圧を比較して行なっている。

ついに表面準位の問題を克服し、W.ショックレーの電界効果が確認されたのである。しかし電解液はイオンのため、低い周波数でしか応答できなかった。だが、確実にゴールに近づきつつあったのだ。

ついに点接触固体増幅器を発明

そこでW.ブラッテンとJ.バーディーンはn型Ge基板を用い、電解液の代わりにGe表面上に絶縁用の酸化膜を作り、その膜の上にAu（金）蒸着で電極を付けた。

この電極と基板との間に正バイアスを印加し、さらにAu電極の近くにもう1本のW（タングステン）針を立てて基板との間に逆方向バイアス

を加えることにした。Au電極の電圧変化に伴って、W針とGe基板との間の電流が変化するかどうかをみるためだった。n型Geの表面にはp型反転層があることが電解液の実験からわかっていた。この実験から電解液と同様にわずかな増幅という結果が期待できるはずだ。

しかし逆方向のW針の電流は非常に大きく増加し、大きな電圧利得が得られたのである。Au電極が不完全でピン・ホールがあったため、電界によって正孔がAu電極から表面上のp型Geに流れ込み、この正孔がn型Geを通して、もう一つの電極であるW針へ流れ込んでいるらしいとW.バーディーンは考えた。

あまり明確な説明ではない。だが、とにかくいままでにない新しい現象が観測された。まさに理想的な固体増幅器が誕生した歴史的瞬間だ。

ただし、電圧増幅は得られても電力増幅が得られているかどうかは、はっきりしない。そこで、もっと電極間を接近させるため、Au電極をくさび状に蒸着し、カミソリの刃でAuを50 μ mくらい切り離して実験した。そして確実に電力が増幅されていることを確認している。

＋の金属針を「エミッタ(放出する)」、－の金属板を「コレクタ(集める)」、n型Geを「ベース(基準)」と呼んだ。こうして、増幅作用のある点接触の固体増幅器が12月16日に生まれたのである。さらに、2本のW針を接近させて作ってみた。これが点接触トランジスタの原型となった(図1)。

2本の電極を接近させて、一方を正バイアスに、もう一方を逆バイア

スにするというアイデアと、Au電極が不完全だったことが、表面準位という難関を乗り越えて、この実験を思わぬ成功へと導いた。

このW針は「猫の髭(cat's whisker)」という。11月17日の表面準位の発見から12月16日の点接触固体増幅器の発明までは、「magic month(魔法の月)」と呼ばれている。この発明は、多くの技術者によって積み重ねられた実験の集大成から生まれたといえるだろう。

ショックレーの出張中に大発明

この実験成功のとき、あれほど固体増幅器の開発に執念を燃やし続けてきたW.ショックレーはたまたま出張中であり、点接触増幅器の世紀の大発明に立ち会えなかった。運命とは皮肉なものだ。ちなみに、現在、点接触トランジスタというのが一般的であるが、このときはまだ「トランジスタ」という言葉は存在し

ていない。

1947年12月23日、ベル電話研究所の幹部に、この成果が報告された。このとき出席した物理部長のH.フレッチャーは「増幅作用があることを実証するには、発振できるかどうかで確認すべきだ」と発言しており、これに基づいてW.ブラッテンはクリスマス・イブの12月24日、この点接触固体増幅器が間違いなく発振することを確認し、増幅作用があることを実証したのである。

W.ブラッテンとJ.バーディーンは、これを何と呼ぼうかと考えていたが、やがて点接触トランジスタと呼ばれるようになった(下掲の「新しい増幅器を何と呼ぼうか」参照)。

特許申請は1948年2月6日、米ウエスタン・エレクトリック社より出され、発明者はW.ブラッテンとJ.バーディーンの2人の名前だった。W.ショックレーは大きな欲求不満に襲われたのである。

新しい増幅器を何と呼ぼうか

ベル電話研究所では、新しく開発した固体増幅器の名称を所内で募集している。

早速、ジョン・R・ピアスが「この固体増幅器は真空管と類似している。真空管の利得は入力電圧と出力電流による相互コンダクタンスで表す。

これに対して、開発した固体増幅器の利得は入力の抵抗と出力の抵抗との相互レジスタンスで表す抵抗変換器 (transfer of a signal

through a variable resistorまたはtransfer resistor) である。そこで略して『トランジスタ(transistor)』と呼んだらよいのではないかと提案している。

点接触トランジスタの論文は1948年6月15日付の*Physical Review*誌に発表された。点接触トランジスタの応用として最初に採用されたのは、M.ケリーの望んでいた電話交換機ではなく米国空軍用無線機だった。

ショックレーが奮起 Geを使って接合トランジスタを開発

W.ショックレーは固体増幅器開発という使命に燃えて、1938年から電界効果増幅器というアイデアを実現しようとしたが、表面問題に阻止され実現できなかった。しかも固体物理グループの長として研究してきたのに、点接触トランジスタ誕生の瞬間にも立ち会えなかったのだ。

スッキリしない気持ちのなかで、点接触トランジスタの動作が不安定で、かつ動作原理が明快でないといった点から、W.ショックレーはより安定した固体増幅器の開発を目指して再び情熱を燃やし始めた。

素晴らしいヒント「注入」を発想

真空管と固体内の電子の動作は直感的に同じであり、必ず固体においても増幅作用が生じるだろうと当時の物理学者は考えていた。

これを既知の知識のみで実験を進めようとしていたことに無理があった。真空中の電子は電場に向かってまっすぐに加速されるが、結晶中の電子は原子との衝突を繰り返しながらランダムに向きを変えて進んでいく。ちなみに、電子がある原子に衝突してから次の衝突までの距離を「平均自由距離」という。

さて増幅器を作るにはいままでとまったく異なるドラスチックな展開が必要である。固体増幅器実現への大きな壁は表面準位の問題である。これを乗り越えたことで、点接触トランジスタが誕生したといえよう。

だがこれで表面準位の問題がすべて解決したのではなく、むしろここ

から本格的な苦闘が始まったと言ったほうがよいかもしれない。

W.ショックレーは、点接触トランジスタを乗り越えるべく研究を始めた。彼は早くも1947年末ころ、ユニークな二つのトランジスタ構造を思いついている。

一つは1947年12月31日に考えたアイデア。pn接合のデバイスに電解液を落とし、逆バイアスで動作させるトランジスタだった。

もう一つはセラミックの薄い板の間にSb(アンチモン)合金を挟んだ二つのセラミック基板の上に二つのp型Ge膜を形成し、次に加熱してp型の一部をSbに代えてn型にする。こうしてpnpトランジスタを作ろうというアイデアだった。これは失敗に終わっている。まだ少数キャリアや注入という考えには到達していない。

このとき、一方のp型を+にし、n型を負バイアスとすると正孔が表面を通り、-にしたもう一つのp型へ流れるのではないかと考えたという。ベル電話研究所のJ.スカッフがSiによるpn接合ダイオードを試作していたころのことである。

年が明けて1948年1月23日、ついにW.ショックレーは素晴らしいヒントをつかんだ。

後者の構造のとき、p型の多数キャリアが表面ではなくエミッタ接合(物質の内部)を通り少数キャリアとなってn型へ注入(injection)され、そしてp型のコレクタへと移動するのは、電界による電流ではなく拡散による電流ではないかと思いつ

らした。驚くべき洞察力である。ようやくpn接合の役割が明確になったわけだ。

ここから整流電流に関する有名な方程式が導き出された。この論文は1949年7月、W.ショックレー、G.ピアソン、M.スパークの連名で*Physical Review*誌に掲載され、世界中の物理学者に衝撃を与えた。

接合トランジスタを着想へ

W.ショックレーはpn接合理論の概念をさらに発展させ、表面ではなく、固体の中を利用した接合型の固体増幅器(のちに接合トランジスタと呼ぶ)ができる可能性を理論的に証明したのである。

この固体増幅器を「大電力、大面積半導体バルブ」と呼んでいたが、これは小電力でも十分動作する可能性があった。

もともと点接触トランジスタの特性改善実験をしようとして擬平衡状態「イムレフ」(ImrefとはFermiの逆つづりで擬フェルミ・レベルのこと)を用いて拡散理論によって動作解析していたときに思いついたものだが、あまり自信がなかった。

この思いつきを支えた現象は、薄いn型Ge結晶表面に、互いに反対の位置にそれぞれ針を立てると、表面に生じるp層を利用して増幅作用が得られるという実験結果だった。トランジスタ動作は表面ではなく、結晶内の現象とみたのである。拡散理論による解析は原子力で用いる黒鉛中での中性子拡散からヒントを得たという。

接合トランジスタのアイデアはしばらく公表されなかった。しかし

1948年2月18日、ジョン・シャイブが注入を証拠づける実験結果を発表したときに、W.ショックレーは初めてアイデアを披露した。その後、1949年には面接触による接合トラン

ジスタの理論解析を行ない、その結果を発表している。

接合トランジスタの大きな特徴は「計算できるデバイス」ということだった。これがトランジスタのみな

らず、ICの発展にも非常に寄与している。pn接合トランジスタの特許は、1948年6月26日に出願され、同月30日に公表された。同じころ、BSTJ (*Bell System Technical Journal*)

“創造的失敗”がW.ショックレーの信念

接合トランジスタという世紀の大発明を成し遂げたW.ショックレーは、研究意欲を支えるために常に座右の銘となる言葉をもっていた。

彼は、ベル電話研究所に入社したとき研究所の正面玄関ロビーに電話機を発明したA.グラハム・ベルの「ときには踏み慣らされた道を外れて、森の中を歩いてみてはどうだろうか。きっと新しいものを見つけることだろう」という言葉に研究の真義を見だし、深い感銘を受けたと語っている(図A)。

やがて、長い長い研究に没頭することになるが、常に貫き通した信念は“The will to think (考える意欲)”だったという。この言葉は中性子に関する研究をしていたエンリコ・フェルミが考えた。W.ショックレーは1947年11月17日、「表面準位問題という難問を突破したことが、固体増幅器を作ろうと考える意欲を刺激した」と述べた。

「考える意欲」は「現象を単純化して調べること」によって駆り立てられるものだ。つまり彼は“simple is best (単純が最上である)”と考えたのである。この例に、彼は「少数キャリア注入」をあげる。つまりキャリアという複雑な振る

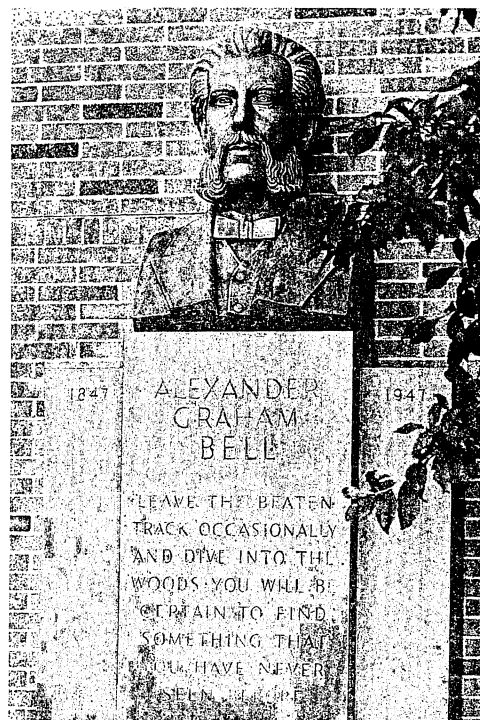
舞いをする電子や正孔を単純なモデルで表し、これによって初めて計算することができたのだ、と語る。研究者は常に複雑な場合を想定しがちだが、単純化こそが問題解決の鍵を握っているのだ。

困難な表面準位を克服できたとき、W.ショックレーは「偶然の出来事はまったくの偶然ではない。準備されたところで起こるべくして起こるのだ」と語っている。つまり用意周到な実験が論理的に進

行しているとき、ここに初めて新しい現象が“自然に”見つかる可能性があることを示唆した。人々がこれを「偶然」と呼んでいるにすぎない。

電界効果増幅器というアイデアを考えながら、失敗に次ぐ失敗の末に、ようやく発明された接合トランジスタについて、W.ショックレーは“creative failures (創造的失敗)”と自らの経験を述べている。人々の心を打つ素晴らしい言葉だ。

図A ベルの残した言葉がショックレーの座右の銘に



誌というベル電話研究所の研究報告誌に発表された。

20世紀最大級の発明にノーベル賞

1839年、M.ファラデーによる半導体の謎に満ちた現象の発見から、W.ショックレーによって解明されるまで、なんと109年の歳月が経過している。この間、多くの物理学者が半導体の謎に挑戦してきた。

そして謎を解明したのがW.ショックレーたち3人だった。ここから誕生した点接触トランジスタと接合トランジスタの発明によって1956年、W.ショックレー、J.バーディーン、W.ブラッテンの3人はノーベル物理学賞を受賞している。

20世紀後半のエレクトロニクスを驚異的に発展させる糸口となった接合トランジスタの発明は20世紀最大級の発明となったことはいまでもない。

W.ショックレーは晩年、スタンフォード大学の名誉教授になる。1975年に大学を退職してからは、人間の動態などについての研究に没頭していたという (p.145の「“創造的失敗”がW.ショックレーの信念」参照)。強烈な個性と洞察力をもつ彼の意見は、多くの人たちから非難されたようだ。1989年8月12日、79歳で生涯を閉じている。現在でも自宅の書斎は生前のまま保存され、彼の帰りを待っているという。

W.ブラッテンもすでに88歳でなくなり、J.バーディーンも1991年1月30日、82歳で他界した。

点接触トランジスタ、反応イマイチ
ベル電話研究所の所長となった

M.ケリーは1948年6月30日、点接触トランジスタをようやく一般に公開した。発明してから7カ月も秘密にしていたのだ。軍が関係していたらしい。公開の日、ラジオ受信機やハンディ・トーキなどに点接触トランジスタを応用し、新しい時代の開幕にふさわしい試作品がいくつか展示されていた。

まだまだ雑音が大きく、機械的ショックに弱く未完成だったが、この画期的な発表にベル電話研究所はおおいに期待していた。だが人々はこの偉大な発明が秘めた力を理解できなかった。

1948年7月1日付の*New York Times*紙はラジオ欄で簡単に紹介したにとどまっている。7月12日号の*Time*誌、9月6日号の*NewsWeek*誌も簡単に解説しただけだ。

このなかで*Time*誌には“Little Brain (小さな脳細胞)”と題し、「近代技術の脳細胞として用いられている真空管の機能を備えたトランジスタが公開された。真空管はフィラメント加熱によるウォーミングアップ時間が必要なうえ、形状も大きく振動に弱く壊れやすいが、トランジスタはこの欠点を克服している」と解説している。

少し技術的に詳しく述べたのは9月号の*Electronics*誌である。企業側と技術側とは考え方が異なっていた。つまり企業側の真空管メーカは「このひ弱な点接触トランジスタは真空管の脅威とならない」と判断した。だが技術側はまったく逆にとらえており、「真空管を乗り越えて、大きく発展するのではないか」と一部でささやかれていた。

そのころすでに成長型接合トランジスタが完成しており、トランジスタの将来性についてベル電話研究所は自信を深めていた。いち早く企業を取り上げて製品化を進められるようにとの考えから軍部を説得し、1951年9月～1952年2月にかけてトランジスタの技術に関する一般公開ということで、3回ほどセミナーを開催している。

トランジスタ特許が無償で公開へ

そしてトランジスタの特許料は無償ではなく、無償で米国企業に公開されることとなった。1952年のことである。

この理由は、ベル電話研究所の親会社であるAT&T社が司法省から反トラスト法（このときのAT&T社の電話市場占有率は90%）で訴えられており、その交換条件にトランジスタ特許の無償公開が要求されたのである。

W.ショックレーが電子交換機に先立って考えていた用途である爆弾の信管用に代えて、民生市場での開発が始まった。トランジスタの最初の応用は補聴器である。

補聴器という応用には、実に運命的な結び付きを感じる。A.グラハム・ベルは補聴器開発から電話機を発明し、やがてベル電話研究所を設立している。また、トランジスタ補聴器の開発に、やがてICを考案することになるJ.キルビーが加わっていたということもある。

ちなみに、トランジスタ特許を公開するというところに、米国以外の国で興味を示したのは日本のソニー（当時、東京通信工業）だった。

接合トランジスタの確認実験開始 高純度の単結晶が欲しい

W.ショックレーの提案した接合トランジスタの素晴らしい発想を実証せずに終わらせていたならば、今日のエレクトロニクス産業の隆盛はなかったかもしれない――。

W.ショックレーの発明した理論を確認するためにベル電話研究所では研究員を総動員したという。半導体材料にはSiよりも溶解温度が低く取り扱いやすいGeを採用し、実験

を始めている。

1949年4月7日、あまり純度の高くないp型Geを溶かしてn型Geの上に接近して落下させ、切断してようやく接合トランジスタが完成した。不完全ではあったが予想通りの電力特性が得られたという。だが、Geは単結晶ではなかったため、特性はきわめてひどかった。

この実験から、性能の良い接合ト

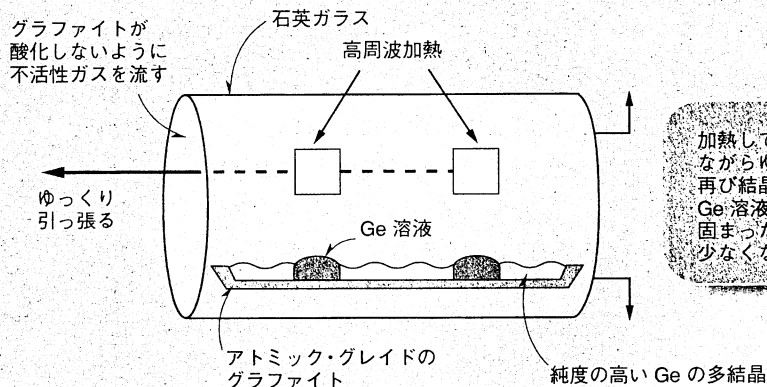
ランジスタを開発するためには、半導体材料の高純度化、単結晶化が非常に重要だということが初めて認識された。純度の高い単結晶を使ってはじめて接合トランジスタが作れるのだ。

高純度にしなければダメだ

W.ショックレーの提案する接合トランジスタを作るには、半導体の敏感な性質を利用しなければならない。このためにはまず高純度化が必須である。

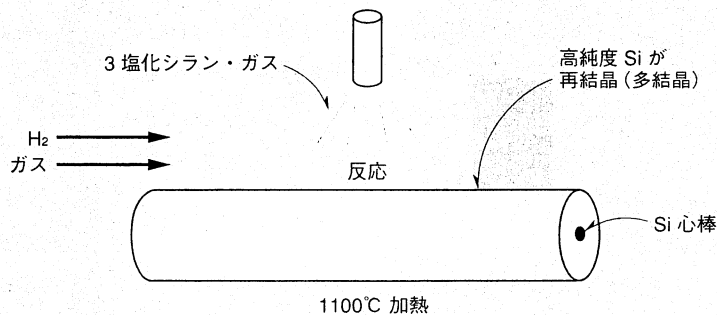
図2 高純度のGeとSiを得るための挑戦
トランジスタの性能向上の鍵は高純度の結晶を作ることが先決である。

(a) Ge の物理精製法 (1948 年ころ)



加熱して Ge の一部を溶かしながらゆっくり移動し、再び結晶化させる。このとき Ge 溶液の中に不純物が残り、固まった所の不純物は非常に少なくなる。

(b) Si の化学精製法 (1955 年ころ)



高純度化した半導体にわずか0.0001%の特定不純物を入れると、敏感な性質を示すようになる。0.0001%の特定不純物が有効に働くには初めの半導体の純度はテン・ナイン、つまり99.9999999%以上にしなければならない。驚異的な数字だ。たとえば、もし世界の人口が100億人（実際には1997年で約59億人）いたとして、たった1人しか風邪を引いた人がいないといった確率だ。

このような高純度化は1949年ころには実現不可能と考えられていた。ベル電話研究所は、この高純度化にあえて挑戦することにしたのだ。

だが、これを解決するには溶けたGeを入れる高純度グラファイトや、化学薬品、ガスなど周辺技術も同時に手に入れなければならなかった。のちにこの高純度化技術から得られた半導体材料は「半導体グレード」と呼ばれるようになったが、ベル電話研究所はこの未踏技術の開発に力を注いだのである。

暗中模索のなかで開発が始まった

Siの融点1420℃に比較して、Geの融点は958℃と低いことから、まずGeの高純度化に挑戦することにした。その開発はひと筋縄ではいかなかった。そのころのことについて若干述べてみよう。

ベル電話研究所と同時に、米GE (General Electric) 社のRホールは、偏析現象を応用してGeの精製にチャレンジしている。1950年のことである。

この偏析現象については1941年、J.スカップもすでに試みていた。偏析現象とはグラファイト・ルツボに

Geを一度溶融しておき、一方から温度を下げて固めていくと不純物が溶融したGeに残るという現象である。これを利用するとわずかな部分だけだが、高純度Geが得られる。ただし、このままでは量産に利用できない。

なにか良い方法はないものだろうか。この問題を解決することになるゾーン・リファイニング（精製）法が登場するまでには、もう少し時間が必要だった。

では、単結晶化の動きはどうか。当時の技術者は、多結晶よりも単結晶のほうが特性的に優れているという概念は明確にもっていなかった。多結晶でトランジスタができると信じていた技術者もいたという。

1950年、ベル電話研究所も単結晶化には積極的でなかった。だが、SiCバリスタの研究をしていたG.ティールは単結晶化が重要になると考え、J.リトルと共同で高純度Geを用いてチョクラルスキー法によって直径2cmで長さ20cmのGe単結晶棒を得ることに成功している。チョクラルスキー法とは、溶けたGe溶融の表面に小さな単結晶Geを置き、これを種にして引き上げ、結晶を成長させていく方法である(図2)。

この技術を利用して、G.ティール、M.スパークス、B.ビューエラーは、Ge単結晶成長過程中的溶融したGeに不純物を添加して、成長接合法による理想的なpn接合を作った。

いよいよトランジスタへの挑戦が始まった。W.ショックレーを中心にM.スパークス、G.ティールはついに2種の不純物を添加しながら引き上げる方法によって本格的なnpnトラ

ンジスタを完成させた。「成長型接合トランジスタ」と呼ばれ、1950年4月20日に一般公開されている。

この年、GE社のRホールはGeの上にIn(インジウム)を乗せて加熱し、pn接合を形成する合金法を考え、Geダイオードの試作に応用した。素晴らしい特性が得られている。

このように、成長接合法と合金法という二つの製造技術がこの年に考案されたのである。

トランジスタ開発の悪戦苦闘は続く

せっかくできたトランジスタだったが、周波数特性が良くなくこのままではM.ケリーの夢見た電話交換機には使えない。やはりトランジスタは物理屋のお遊びにすぎないのではないかと人々に思われている。

その後、約9カ月もの間、研究は中断されてしまった。この間、W.ショックレーは問題解決に向けて黙々と思考を凝らしていたのである。やがて、成長型接合トランジスタのベース層を薄くすることが問題解決の糸口になるのではないかという結論に達した。

1951年4月から研究を再開し、ようやく応用に耐えるトランジスタが誕生したのである。1952年になるとRホールは、溶液中から単結晶を引き上げるときの速度によって不純物の偏析係数が異なることを利用したレート・グロン法を開発した。この結果、トランジスタの歩留まりは著しく向上した。

成長型接合トランジスタの特性が改善されたとはいえ、まだ電話交換機に使うにはほど遠かった。この情報に飛びついたのは喉から手が出る

ほど小型部品を欲しがっていた空軍だった。爆弾の近接信管に使いたいというのだ。これを受けて、W.ショックレーたちはしばらくの間、近接信管開発に携わっている。

もっと高純度なGeが欲しい

トランジスタの性能向上は、Geの高純度化にかかっているということが明確になってきた。どのような方法でこれを解決するか——ベル電話研究所は総力を挙げてこの問題に取り組んだ。たまたま研究所内の手紙配達業務を担当していたメール・ボーイのW.プファンが仕事の合間に実験の手伝いをするようになった。彼の役割は実験の監視と道具作りである。

実験は、大量の不純物を含むGeを溶融して、そこから結晶を引き上げ、高純度のGeを得るというものである。偏析現象を利用する一般的な方法だ。変化の乏しいこの実験に彼は退屈し、しばしばとうとうと居眠りをしていた。

ある日のことである。居眠り中に椅子から転げ落ちそうになった。その瞬間、新しい方法が彼の頭にひらめいたのだ。

すなわち、まず細長いグラファイトのボートに大量の不純物を含むGeを入れてその一部のみを高周波加熱で溶かす。溶かした部分を一方の端から他の端まで移動させようというのである。溶けたところをゾーンという。

溶かした部分を移動させると、偏析現象によって固まった固体の中の不純物が掻き集められてしまう。これを何回も繰り返せばどんどん純度

が高まるはずだ。早速、この方法を試した。1952年、ものの見事に成功し、高純度の多結晶Geを大量に手に入れることができた。これをゾーン・リファイニング（精製）法という。ようやく高純度化のメドが立ったのである。

本来は、グラファイトの純度が問題となるのだが、すでに米国では原子力用に超高純度グラファイトが開発されており、この問題は難なくクリアしている。

新しい技術の開発には周辺技術の開発が鍵を握っているものだ。米国は1950年代にすでに素晴らしい周辺技術をもっていたのである。

この特許は1955年に公開され、ベル電話研究所は多額の特許料を得た。とはいえ、あまりにも半導体産

業に及ぼす影響が大きいので、その後、反トラスト法が適用され、無償で公開されている。

多結晶から単結晶へ

高純度の多結晶Geから単結晶化へは、チョクラルスキー法によって作する方法がすでに確立されていた。

とはいえ、もっと簡単にできないものだろうか。

単結晶とはGe原子を規則正しく並べてダイヤモンド構造とすることである。W.プファンはゾーン精製法を応用したゾーン・レベリング法を開発した。

まず高純度の多結晶Geの先にn型の場合にはSb（アンチモン）などの不純物を置き、Geの単結晶棒をセットする。次にGeの単結晶棒の端

不動の地位が崩壊したRCA社

1950年当時、RCA社はラジオ受信機やテレビ受像機など民生用電子機器の業界のみならず、半導体業界でも業界をリードしていた。その後、同社はIC化の波に乗り遅れ、半導体業界からの撤退を余儀なくされている。

1968年には半導体工場をGE社に移管し、後年、民生用電子機器分野の経営もうまくいかなかった。1987年にはついに会社ごとGE社の傘下に入ってしまう。さらにGE社から仏Thomson社へと転売されている。

大企業といえども、経営と技術の戦略を誤るとたちどころに転落

するということをまざまざと見せつけられる。大きな船は慣性のため舵を切りにくいが、日本の大企業も慣性に惑わされることなく、状況に対応して経営と技術の戦略がスピーディに立案できるようRCA社の出来事を他山の石としなければならない。

1942年にRCA社の研究所として設立され、テレビ方式など新技術を次々に生み出してきた名門のデビッド・サーノフ研究所も、RCA社がThomson社に売却されるときにSRIインターナショナル（スタンフォード研究機関の子会社）に譲り渡された。

のところから高温のゾーンを移動させていく。このようにすると、不純物が均一に入ったGeの単結晶が得られるのである。1950年から1952年にかけてのアイデアだ。

成長接合から合金接合へ

p型半導体には多数キャリアとして非常にたくさんの正孔が自由に結晶中を動き回っている。このなかにならずだが少数キャリアとして電子が存在している。n型半導体ではこの逆となる。正孔の濃度と電子の濃度との積は温度にのみ依存し、常に一定である。

ところで、p型半導体とn型半導体とを物理的に押しつけてpn接合を作ることはできるのだろうか。これは不可能だ。なぜなら、順方向でp型半導体の多数キャリアである正孔がn型半導体の中に注入されていくとき、接合からわずか数 μm でn型半導体に存在している少数キャリアの数まで減り、正孔が消滅してしまうからだ。

実は、このわずかな数 μm のところにもう一つのnp接合を作らないと、トランジスタ動作は起こらない。この幅をベース幅と言い、狭ければ狭いほど良い。このためには物理的な押しつけではなく原子同士が結晶的に一体化しなければならない。これが目標とするpn接合なのだ。

このpn接合を実現すべく、まず開発されたのが成長接合だった。ただし制御が難しく、歩留まりが悪かった。何か別の方法がないだろうか。

思わぬ効果を生み出した合金接合

米RCA社は、すでにGE社が開発

していた合金型接合ダイオードからヒントを得て、合金型接合トランジスタを開発している。pn接合は成長接合でしか作れない時代のことだったので、非常に注目されている。

合金型接合ダイオードは、Rホールが1950年に開発した方法でn型Geチップの上にIn粒を乗せて加熱して作る。つまり治具を用いて薄いGeチップの両表面にIn粒を装てんし、不活性雰囲気の中で500℃～600℃に加熱すると、InがGeチップの中に溶け込んでエミッタ領域とコレクタ領域が形成され、合金型接合トランジスタが完成する。

RCA社は精度の高い治具がなかったため、ベース層を挟んでIn粒が正しく向き合うように配置し、かつエミッタ用In粒をコレクタ用In粒よりも小さくした。こうするとベース中の少数キャリアが効率良くコレクタ領域に到達する。これは、トランジスタの電流増幅率を著しく改善するという役割を演じる。

RCA社は、この特許を1951年に取得し、世界の有名企業はRCA社詣でを始めた（p.149の「不動の地位が崩壊したRCA社」参照）。

E.W.アームストロングがスーパーヘテロダイン方式（本誌1996年4月8日号，no.659，p.174参照）を発明したのと同様に、実際に作ってみることがいかに大切かということをわれわれに教えてくれる。

民生機器の応用は補聴器から

電話交換機を目標にトランジスタの開発を進めていたが、最初の応用は米軍の爆弾用近接信管や無線機などだった。とりあえず応用がみつ

ったことで、開発が活発になった。

このなかで、いち早く民生機器に応用しようと考えたのが米レイセオン社である。同社は1953年にトランジスタ補聴器を開発した。小型だということで、多くの人々に好評を博したという。

1954年になると米リージェンシ社がGE社のトランジスタを用いてトランジスタ・ラジオを開発している。世界初の製品化ということになる。トランジスタを広く普及させるためには、低コスト化や高周波化などトランジスタ自体の問題解決と同時に、どういう機器に応用していくのかというアイデアが鍵を握っていたのだ。

この考えに基づき、米国も民生用途開発に挑戦したが、結果的にはその後の民生用電子機器市場は日本の独擅場となってしまった。

高周波へ、衝撃の提案現る

高周波トランジスタといえば成長接合と考えられていたが、これとはまったく異なるユニークなアイデアを提案したのがドイツのH.クレーマである。

彼はベース領域に不純物濃度勾配を作り、そこから生じるドリフト電界によってキャリアを加速し周波数特性を高めた。これをドリフト・トランジスタと命名した。高周波特性が非常に改善されている。従来の接合トランジスタはベース中のキャリアが拡散によって移動していたため、高周波特性は良くなかった。

1956年になると、ベル電話研究所のC.リーは、不純物が高温でガス状になっているところにGeウエーハを置くと、Geウエーハの中に不純物

が徐々に浸透していくことを利用して拡散型接合トランジスタを開発している。開発したトランジスタは、ドリフト電界を利用できるため、高周波特性が飛躍的に向上した。このトランジスタは構造が台地状になっていたためメサ型トランジスタと呼ばれた。

今回は半導体の量産化技術に焦点を当ててみよう。

参考文献

- 1) 平山秀雄,『わが回想録(一),(二)』,電波新聞社,1990年12月.
- 2) 沖電気工業編,『100年のあゆみ』,沖電気工業,1981年11月.
- 3) 日本電子機械工業会編,『電子工業20年史』,日本電子機械工業会,1968年9月.
- 4) 松下電器産業編,『社史松下電器激動の10年』,松下電器産業,1978年5月.
- 5) NEC編,『最近10年史,創立80周年記念』,NEC,1980年2月.
- 6) NEC編,『70年史』,NEC,1972年7月.
- 7) 日本放送協会編,『日本放送史(上),(下)』,日本放送協会,1965年12月.
- 8) 日本放送協会編,『放送50年史』,日本放送協会,1977年3月.
- 9) NHK放送技術研究所編,『研究史'80~'90』,NHK放送技術研究所,1991年9月.
- 10) 日本放送協会編,『50年史』,日本放送協会,1981年3月.
- 11) 東京芝浦電気編,『東芝100年史』,東京芝浦電気,1977年3月.
- 12) 日立製作所編,『日立製作所(1),(2),(3),(4)』,日立製作所,1980年12月.
- 12) 城阪俊吉,『科学技術史』,日刊工業新聞社,1990年7月.
- 13) ソニー,『ソニー創立40周年記念誌』,ソニー,1986年5月.
- 14) 日本ビクター,『日本ビクターの60年史』,日本ビクター,1987年9月.
- 15) 松下電器産業,『松下電器50年の略史』,松下電器産業,1968年5月.
- 16) 日本放送協会編,『放送50年史,資料編』,日本放送協会,1977年3月.
- 17) 小松左京,堺屋太一,立花隆,『20世紀全記録』,講談社,1987年9月.
- 18) 日経エレクトロニクス編,『エレクトロニクス50年史と21世紀への展望』,日経マグローヒル社,1980年11月.
- 19) CMOS D.H.編集委員会編,『CMOSデバイスハンドブック』,日刊工業新聞社,1987年.
- 20) 電子通信学会編,『LSIハンドブック』,電子通信学会,1984年.
- 21) 半導体H.編集委員会編,『半導体ハンドブック』,オーム社,1977年.
- 22) 菅野卓雄,『集積回路ハンドブック』,朝倉書店,1981年.
- 23) 相田洋,『電子立国日本の自叙伝(上),(中),(下),(完結)』,日本出版協会,1991年.
- 24) 中川靖造,『日本の半導体開発』,ダイヤモンド社,1981年.
- 25) 馬場玄式,『最新デバイス事典』,ラジオ技術社,1976年.
- 26) 菊池誠,『若きエンジニアへの手紙』,ダイヤモンド社,1990年.
- 27) 垂井康夫,『ICの話』,日本出版協会,1982年.
- 28) 菊池誠,『トランジスタ』,六月社,1959年.
- 29) 柳井久義,永田稜,『集積回路(1),(2)』,コロナ社,1979年.
- 30) 星合正治,島村道彦,『電子とその作用』,オーム社,1956年.
- 31) 徳山巍,橋本哲一,『MOS LSI製造技術』,日経マグローヒル社,1985年.
- 32) 吉田梅次郎,『半導体物性工学』,昭晃堂,1963年.
- 33) ダニエル・I・オキモト, F.B.ワインスタイン共著,菅野卓雄,土屋政雄共訳,『日米半導体戦争』,中央公論社,1985年.
- 34) 瀬見洋,『日米半導体戦争』,日刊工業新聞社,1979年.
- 35) 菊池誠,『半導体の話』,日本出版協会,1967年.
- 36) 天野伸一,『インテル急成長の秘密』,にっかん書店,1993年.
- 37) プレスジャーナル編,『日本半導体年鑑』,プレスジャーナル社,1987年.
- 38) 工業調査会編,『超LSI製造・試験装置ガイドブック』,工業調査会,1989年.
- 39) Sze, S.M., *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, Inc., 1950.
- 40) Shockley, William, *Electrons and Holes in Semiconductors*, D. Van Nostrand Co., Inc., 1950.
- 41) Hodges, David A. and Jackson, Horace C., *Analysis and Design of Digital Integrated Circuits*, McGraw-Hill Book Co., 1988.
- 42) Shea, Richard F., *Transistor Circuit Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 1957.
- 43) Bardeen, J. and Brattain, W.H., "The Transistor: A Semiconductor Triode," *Physical Review*, no.74, vol.230, June 1948.
- 44) Shockley, W., Pearson, G.L. and Sparks, M., "Current Flow across n-p Junctions," *Physical Review*, no.76, vol.180, July 1949.
- 45) Shockley, W., "Electrons and Holes in Semiconductors," *BSTJ (Bell System Technical Journal)*, vol.28, no.435, 1949.
- 46) Kromer, H., *Archiv der Elektrischen Uebertragung*, no.8, vol.223, 1954.
- 47) Shockley, W., "Unipolar Field-Effect Transistor," *IRE Issue*, 1952.
- 48) Shockley, W., "The Theory of PN Junction Transistors," *BSTJ*, no.28, vol.70, 1949.
- 49) Kahng, D. and Atalla, M.M., "MOS Transistor," IRE Solid-State Device Research Conference, 1960.
- 50) Spence, Eberhard, *Electronic Semiconductors*, McGraw-Hill, Inc., 1958.
- 51) Abraham, C. and Harry, O., *Theory and Applications*, McGraw-Hill, Inc., 1955.
- 52) Hall, X., "Recrystallization Purification of Ge," *Physical Review*, no.78, vol.70, 1950.

このほか、『朝日新聞』、『電波新聞』、『日本経済新聞』の各紙、および『電子技術』(日刊工業新聞社)、『日経エレクトロニクス』、『日経マイクロデバイス』(以上日経BP社)、『ラジオ技術』(ラジオ技術社)、『電子材料』(工業調査会)、『電子情報通信学会誌』(電子情報通信学会)の各誌を参考にした。