

歴史絵巻

半導体

米インテル社が誕生、 時代はMOSトランジスタへ

20世紀エレクトロニクスの歩み(12)

相良 岩男

KOA 顧問

プレーナ技術が考案され、バイポーラ・トランジスタの特性が飛躍的に向上する。トランジスタ市場ではバイポーラが主流となったが、MOSトランジスタの開発に入れ込む技術者たちがいた。消費電力が少なく電圧で駆動できるため、本質的にはMOSトランジスタのほうが使いやすいと彼らは信じていた。ただし信頼性に問題があった。そのころ米フェアチャイルド社は半導体技術で世界の頂点に立っていたが、経営は行き詰まっていく。ついにR.ノイスとG.ムーアが退社し、米インテル社を設立する。(本誌)

1956年ころ、トランジスタの応用といえば「ラジオ受信機だ」とほとんどの人が思っていた。

だが、トランジスタ開発のきっかけは電話交換機の性能に対する苦情や電話の普及発展のためであり、ベル電話研究所はトランジスタの開発成功によって、すでに電子交換機の開発に着手しているらしいとの情報が日本にも流れてきた。

当時、日本の電話用機械交換機(おもにクロスバ交換機)を製造していた富士通、日立製作所、日本電気(NEC)、沖電気工業は、この情報を聞くや否や一斉に電子交換機用トランジスタの開発に着手している。この技術指導をしたのは、東京・三鷹にある電気通信研究所である。

だが、どのようなトランジスタが電子交換機に適しているのかまったく不明で、W.ショックレーが提案

しているpnpnサイリスタや、ダブルベースのダイオード、合金型トランジスタなどがスイッチング素子として話題となっていた。

やがて信頼性が高く、かつ高速スイッチングに向くGe合金型トランジスタが適しているのではないかということになり、これを開発することにした。

トランジスタは、ラジオなどのアナログ増幅器に用いる場合には非飽和領域で使用するが、電子交換機ではデジタル・スイッチング動作のため飽和領域で使うことになる。しかも高速動作が必須だ。高速化のために、いかに少数キャリアの蓄積時間を短くするかなどの設計技術や、試作品の測定技術、実用化のための信頼性向上が課題だった。交換機は40年間も性能を保証する必要があるのだ。

相良岩男(さがら いわお)氏

1956年東京理科大学理学部物理学科卒業。同年沖電気工業入社。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月から現職。

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)、3回目は1997年7月28日号(no.695)、4回目は1997年8月18日号(no.696)に掲載した。

このとき開発された信頼性技術が、その後の半導体の品質向上におおいに貢献し、日本が世界的な半導体大国になるための基盤になったと言ってもよいだろう。

トランジスタによる電子交換機が完成したのは、米国では1965年、日

本では1966年である。期待通り、電話事業は一段と発展した。

新構造Siトランジスタの時代へ

合金型トランジスタから合金型ドリフト・トランジスタへ、さらにメサ型トランジスタへ、そして半導体

材料はGeからSiへと米国では技術が次々に開発され、日本メーカはこういった技術を競って導入した。日本でも1958年になると、ようやくほとんどのメーカがSiのメサ型トランジスタの実用化にメドをつけ量産化を検討しつつあった。

一方、米フェアチャイルド社は、さらに特性の優れたSiのプレーナ型トランジスタを開発したと発表した。しかも米GE (General Electric) 社が提案したエピタキシャル技術を用いたトランジスタの開発に成功したという情報も1960年9月に流れてきた。この技術によって、コレクタ抵抗が低く、耐圧の高いトランジスタが実現可能となったのである。

日本メーカが衝撃を受けたことは言うまでもない。なぜならメサ型トランジスタは最も重要なpn接合部が露出しているが、プレーナ型トランジスタはSiの表面に露出していたpn接合部がきわめて安定なSiO₂膜で覆われている。これにエピタキシャル技術を採用すれば信頼性の高いトランジスタができると、日本の技術者も直感したからである。もはやメサ型トランジスタは過去の技術になったと、だれしもが感じた。

実はプレーナ型トランジスタの発表前の1960年5月、R.ノイスが来日している。トランジスタ市場の視察を目的としたようだ。再度来日した1961年、つまりプレーナ型トランジスタ発表後には、目的はもっと具体的だった。最先端のプレーナ型トランジスタを日本で生産するための工場建設を申請しに来たのである。

ところが通産省は色良い返事をしなかった。R.ノイスは作戦を変更し、

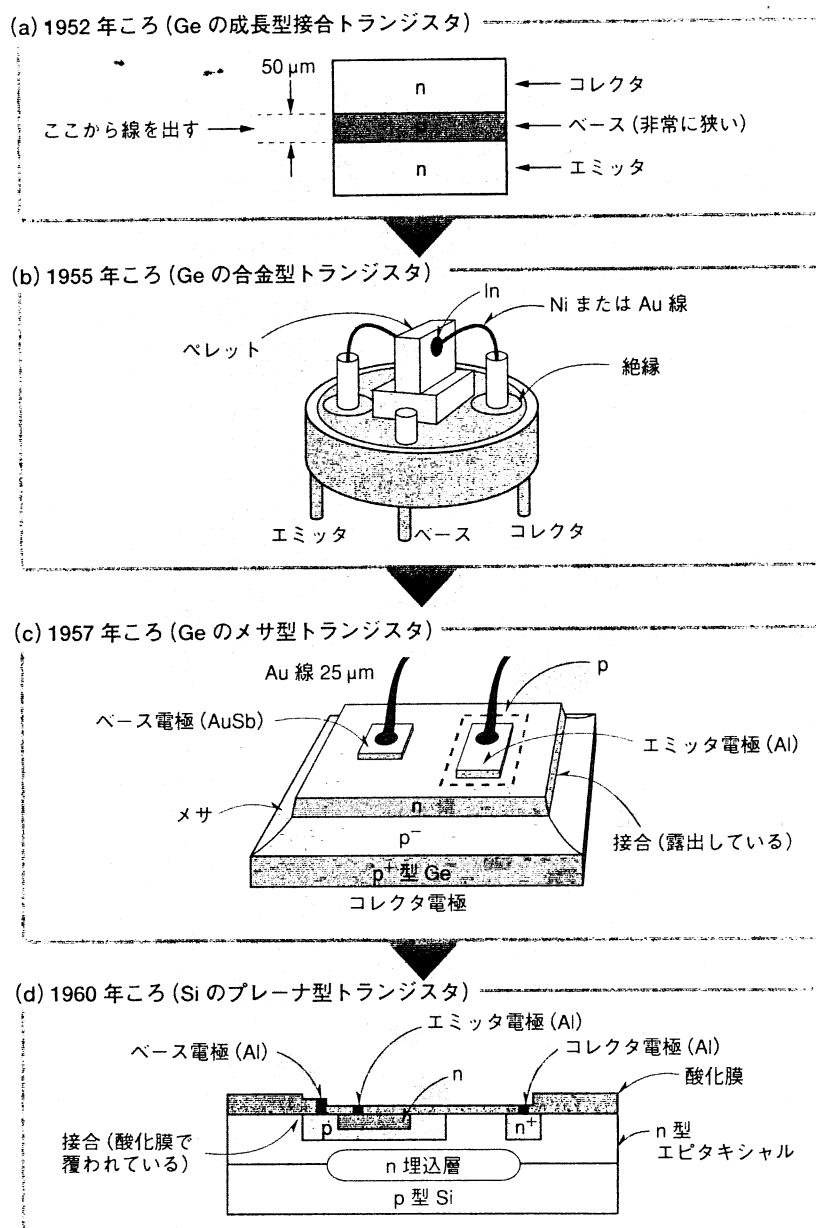


図1 IC実現に向けた画期的な発明「プレーナ構造」 J.ホーリーニーのプレーナ構造とR.ノイスのAl電極の採用によってICの基本的な構造が確立された。さらにJ.キルビーは1958年7月、セラミック基板ではなく、半導体基板に回路を構成するICを考案した。

プレーナ特許を日本企業に売り込むことにした。交渉先として白羽の矢が立ったのはNECで、1961年に特許料4.5%という高額で専用実施権を得るという契約をフェアチャイルド社と交わしている。なぜNECなのか——日本の他メーカから反感を買ったことは言うまでもない。

実はこの年、米TI (Texas Instruments) 社のハガチー社長がNECを訪れ、合併会社を作りたいと申し出ている。これへのけん制だったのかもしれない。ただし、TI社との合併会社は実現しなかった。

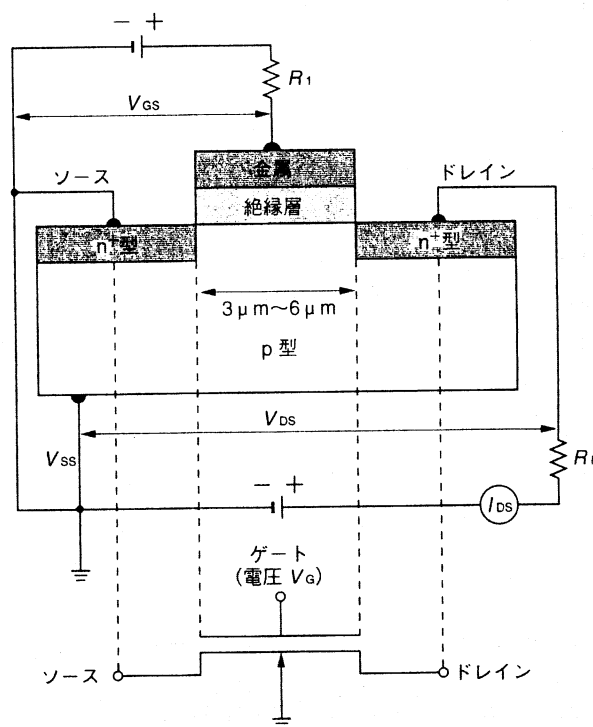
日本でも優れた技術が開発された

半導体に関する技術はすべて米国からの導入かという点必ずしもそうではない。1962年、日立の徳山巍^{たかし}はLTP（低温処理による表面安定化）法を開発し、これをSiのプレーナ型トランジスタに応用したところ、きわめて低雑音のトランジスタが開発できた。

このトランジスタは早速、音響機器に使われ好評を博したという。LTP法は、 SiO_2 とPb(鉛)ガラスの2層膜を用いて、半導体の表面を保護する技術である。その後、半導体の表面保護はP(リン)ガラス膜や窒化珪素(Si_3N_4)膜へと代わった。LTP法はその先べんを築いたのである。

1962年になると、SiとGeの優劣が次第にはっきりしてきた。Geの場合、ベースの形成は金属マスクによる拡散で、エミッタは合金で作らなければならない。大変に制御が難しい。これに対してSiは2重拡散だけですみ、露光方式のためガラス・マスクでよく、Geよりも簡単だった。

図2 MOSトランジスタの構造 MOSトランジスタにはpチャンネルとnチャンネルがある。図はnチャンネルMOSトランジスタの構造。ゲート電圧 V_G を印加すると、ソースとドレインの間に電流が流れる。電流の量は V_G で制御する。



温度特性の良さも含めて革命的ともいえるSiのプレーナ型トランジスタは次第に不動の地位を堅めていったのである。

クレームがプレーナ技術を生む

革新的なプレーナ技術を発明した人はフェアチャイルド社にいたJ.ホーリーニである。発明のきっかけはクレーム対策からだった。

1958年ころ、フェアチャイルド社は2重拡散法によるSiのメサ型npnトランジスタを軍や米IBM社に売っており、事業はきわめて順調だった。だが突然、このトランジスタが動作中にショートするという重大問題を引き起こしたのである。

原因を調べると、どうも金属封止のときに金属粒子が飛び散り、メサ部分のpn接合がショートするらしい。この問題解決にあたったのがR.

ノイスとJ.ホーリーだった。このころJ.ホーリーは新たにpnpトランジスタを開発中だったが、ただちに対策に取り組んでいる。

彼はこの問題を解決する方法として、プレーナ構造というアイデアを思いついた。pn接合を作るとき常にトランジスタ全体を酸化物で覆っておき、必要なところのみ取り除いて、そこに不純物を拡散するという方法である(図1)。

従来のメサ構造のGeトランジスタは、n型のベース領域を除いて酸化膜をすべて取り去り、p型領域を可能な限り小さく作るといった構造である。pn接合部が酸化膜で覆われていないのだ。

注1) ここでいう半導体製造技術とは、不純物をドーブしたり、半導体表面をきれいにするための化学的処理をしたりする技術の総称である。

これに対し新しい構造のトランジスタは、製造工程中でpn接合部をいっさい露出させずにすべて酸化膜の下に作るため、金属封止時の金属粒子は影響しなくなる。つまり、特性が環境に左右されず安定化する。表面が平坦なことから、これをプレーナ型トランジスタと名付けた。当然、この方法は即刻採用された。

その結果、クレームの問題は解決し、歩留まりが飛躍的に向上した。

また当時、歩留まり低下の原因となっていた、人間の唾などから発生するNa（ナトリウム）や水分が、P

（リン）を含んだ酸化膜によって閉じこめられてしまうという問題もあった。

プレーナ構造はこれらの問題を同時に解決したのである。

クレーム対策から出てきたプレーナ技術は、半導体製造技術^{注1)}にとって画期的な発明であると同時に、J.ホーリニーは世界的に有名な技術者となった。やがて、この技術の延長線上として、電界効果を利用したMOSトランジスタが誕生する。そしてMOSトランジスタによるICが実用化するのである（図2）。

メサ型の電極はAgからAlへ

1957年にスタートしたフェアチャイルド社は、まず2重拡散法によるSiのメサ型トランジスタを作った。

当時、メサ構造から電極を取り出す材料は、完全なオーミック性と密着性の面からp領域とn領域とで異なる物質が良いと考えられていた。そこで、共通に使える金属としてAg（銀）を蒸着していた。

これに対してRノイズは、マイグレーションの危険性があるAgよりも、Al（アルミニウム）を蒸着するほうがよいのではないかと提案してい

シリコンバレー物語

サンフランシスコ国際空港からベイ・シュアに沿ってフリーウェイ101を30分ほど南下した所から、なだらかな丘陵地帯が広がっている。半導体で世界に名を馳せた有名なシリコンバレーが、ここから姿を現す（図A）。いつごろからシリコンバレーと呼ばれるようになったのだろうか。

米国が独立する1776年以前の1500年ころ、スペイン軍はサンフランシスコからサンタクララを通りサンディエゴにかけての地帯を次々と征服していった。彼らは征服する過程で新しく切り開いた道をエル・カミノ・リアルロード（現在の州道82号線）と名付けた。「王様の道」という意味である。

このとき約30マイル（1マイルは約1.6km）おきに教会を建てていった。もはやその面影はないが、こ

の道沿いにある記念の鐘が教会の名残をとどめている。ロウレンス・エクスウェイとエル・カミノ・リアルロードとの交差点近くにある緑の鐘もその一つだ。

温暖で素晴らしい環境のこの地をスペイン軍は見逃さなかった。それまでの穀倉地帯は農場や果樹園となり、野菜やバレンシア・オレンジなどの果物が栽培され、王様の道を通してサンフランシスコに駐留しているスペイン軍に届けられたといわれている。

いつしかこの一帯はサンタクララ・バレーと呼ばれるようになった。バレンシア・オレンジはきっとスペインのバレンシア地方から持ってきたのだろう。サンフランシスコとかサンノゼとかサンタクララのサンは「セント（聖者）」というラテン語である。

その後、果物栽培がますます盛んに営まれるようになり、全米中にバレンシア・オレンジや、グレープ・フルーツ、サクランボが出荷され、サンシャイン・ステイツ（フロリダ州）と同様にサンタクララ・バレーは人々の憧れの地となった。この状態は1960年ころまで続いている。

ところが1956年4月、サンタクララ・バレーにW.ショックレーがショックレー・セミコンダクタ・ラボラトリ社を創立したところから、静かな農園や果樹園地帯に激変が起り始めた。

燦々と降り注ぐ太陽光によってすくすく育っていた野菜や果物の畑は、頭脳と若さに象徴される真新しいベンチャー企業群へと変ぼうし、多くの人々に親しまれたサンタクララ・バレーでは、Siトラ

る。AIは抵抗値が小さく密着性が良いなどの特徴がある。実行してみると、オーミック性が良く、しかもきわめてよく密着する。彼の先見性はみごとに適中したのだ。

その後、配線をAIの蒸着によって形成するという技術は、メサ型トランジスタのみならず、MOSトランジスタやIC技術にとって不可欠なものとなった。

シリコンバレーの歴史が始まる

ところがフェアチャイルド社は組織が肥大化し、経営も技術もすべて

の面で行き詰まり始めた。これを解決するため、親会社からの独立を考えたが、これが不可能なことがわかると、プレーナ技術を開発したJ.ホーリーが1961年に米アメルコ社へ転職するなど、有能な技術者が会社を去っていった。

去っていた技術者はそれぞれの技術分野のエキスパートであり、この人たちによって半導体関連の新しい会社が次々に設立されていく。こうしてシリコンバレーが形成されていくのである（下掲の「シリコンバレー物語」参照）。

まるで細胞分裂するかのごとく次から次へと会社が設立され、そして分裂し…、新会社がどんどん生まれた。これを繰り返して、1980年代にはついに50社以上の半導体会社が設立されていたという。

そのころ、フェアチャイルド社は「フェアチャイルド学校」と呼ばれた。多くの技術者が卒業式を迎えたかのごとく去り、みるみるうちに経営が悪化していった。やがてシュルンベルジェ社に売却され、その後、ナショナル・セミコンダクタ社に吸収された。

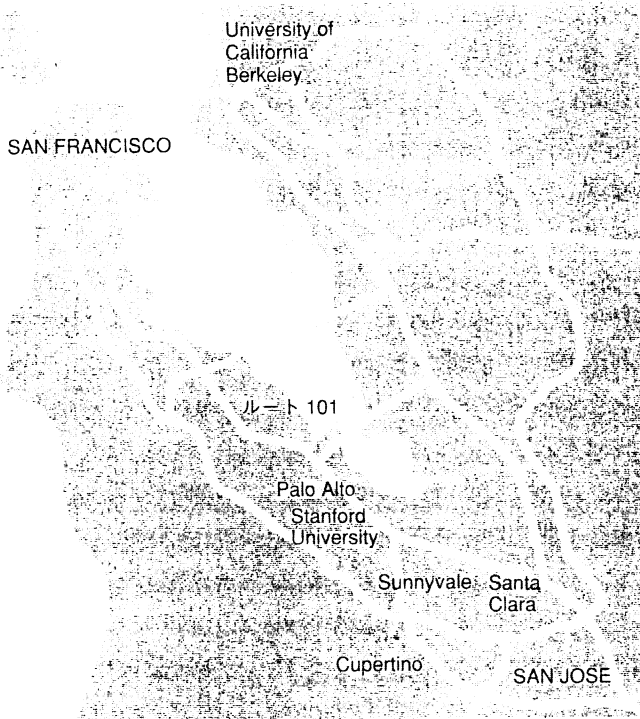
ンジスタが実用化し始めた（その後1971年ころから、シリコンバレーと呼ばれるようになった）。

そのころW.ショックレーが学位を取るために学んだMIT（マサチューセッツ工科大学）のあるボストン近くのルート128にもシリコンバレーと同様にハイテク・ベンチャー企業が芽生えたが、いまではルート101沿いのシリコンバレーがベンチャー企業誕生の地として確固たる地位を固めている。

あまりにも有名になりすぎたシリコンバレーという言葉は世界中を一人歩きしている。まるで日本各地の商店街に「・銀座」というのがたくさんあるのと同じだ。

ICで急成長したシリコンバレーは1990年ころになると、一時的に静けさを取り戻したが、1992年ころから再び、今度はコンピュータ・ソフトウェアや、ネットワーク関連装置、サービスに関するベン

図A シリコンバレー ルート101周辺が半導体やパソコンのベンチャー企業が續々と生まれているシリコンバレーである。



チャー企業の設立が相次ぎ、最近ではスマート・バレーとも呼ばれているようだ。

シリコンバレーでは、現在、ベンチャー企業をバスで巡るツアー

が繁盛しているという。ベンチャー企業を生み出すためのコツを会得しようとしてのことだろう。そこには日本のビジネス・パーソンが殺到しているらしい――。

新時代に向け、インテル社が誕生

衰退していくフェアチャイルド社を再建すべく最後まで残ったR.ノイスとG.ムーアだったが、ついにオーナの経営方針と合わず退社した。そして米インテル(Intel)社を1968年7月に設立している。インテル社は、インテグレートッド・エレクトロニクス(integrated electronics)を略した名称である。

同社はのちに、記憶容量1KビットのダイナミックRAM(型番1103)や、4ビットのマイクロプロセッサ(同4004)を開発し世界をリードする企業に成長することになる。

その後に入社したアンドリュウ(A)・グローブが1979年に社長となり、R.ノイスは会長になった。この2人にG.ムーアを加えた3名が、インテル社を大企業へと成長させた立役者である。A.グローブは“Only paranoia survive(妄想狂しか生き残れない)”,つまり常にいろいろなことに注意を払った人のみが勝ち残れるという哲学をもっていた。

インテル社を軌道に乗せたR.ノイスは1988年、米国政府の支援のもとに設立された官民共同の半導体開発会社SEMATECHの最高責任者に就任している。日本に遅れをとった米国のIC技術を再生させようと自ら陣頭指揮をとっていたが、ついに力尽き1990年6月3日、63歳でこの世を去った。

彼の残した言葉は“Don't be encumbered by history go off and do something wonderful(歴史の重さにとらわれることなく、新しいことをやれ)”である。チャレンジ精神が彼の信条だった。

こういった指導者のもとに、情熱に燃える若き技術者たちが集まったインテル社は、現在ではマイクロプロセッサで世界を席卷し、ほとんどのパソコン・メーカーに“Intel Inside”のラベルを張らせるまでに強大な力

MOS FETが 頭角を現し始める

W.ショックレーは卓越した能力でpn接合を用いた接合トランジスタを発明している(p.158の「pn接合とトランジスタ」参照)。理想的と思われていた接合トランジスタにも実用化とともにいくつかの問題点がでてきた。初めのころ作られた合金型の接合トランジスタは、不安定な結晶の表面を利用するのではなく、結晶の中を利用する構造となっていたため、信頼性はなんの問題もないと思われていた。

ところが、pn接合面の一部が構造的にわずかに露出しており、このわずかな露出部分に外界の水やゴミが付着し、逆方向特性や利得を劣化させるという思わぬ変化を招くことがわかってきたのだ。

加えて、合金型接合トランジスタは電気特性、つまり高周波特性が良くない、消費電力が大きく発熱する、電流制御で動作するため真空管向けに考えた回路が使えない、といった欠点が目立ち始めてきた。

そこで、合金型接合トランジスタの表面の安定化や高周波特性の改善に取り組むグループと、まったく新しい素子を開発するグループに別れて研究が進められていた。後者のグループはおもにFET(field effect

transistor)の開発を目指すことになった。両グループの開発は、一見なんの関係もないようにみえたが、その後、前者のグループの成果がFETの開発に重要な役割を果たすことになるのである。

FETは構造で二つに分けられ、バルクを利用する接合ゲートFETと、表面を利用する絶縁ゲートFETとがある。当初、接合ゲートFETが開発されたが、やがて開発の中心は絶縁ゲートFETへと移った。

特に、絶縁ゲートFETはきわめて消費電力が小さくほとんど発熱しない、電圧で制御するので真空管と同じ感覚で設計できるという特徴がある。これだけみれば合金型接合トランジスタよりも優れていることは明らかだ。最大の難関は、表面が不安定であり、これをどのようにして克服するかということだった。高周波特性についても改善の見込みがあったわけではない。

絶縁ゲートFETは、いくら消費電力が少なくても、信頼性の点で実用化の見込みはなく無謀な挑戦だと多くの技術者は考えていた。しよせん砂上の楼閣にすぎないと冷やかに見られていたのである。

だが、絶縁ゲートFETの代表的ト

ランジスタであるMOS FETはその後ICに採用され、大発展を遂げることになる。人の意見に左右されることなく信念をもって行動する技術者に神は喜びを授けたのだらう。

FETに関する新提案が相次ぐ

まだ半導体理論が確立されていない1926年に、早くも独ライプチヒ大学のJ.リリーフェルドは絶縁ゲートFETの概念を発表した。この構造はガラス板の上にPt(白金)またはCu(銅)の電極を二つ置き、この上にCu₂S薄膜を形成した。動作させるときは、Cu₂SにAlを接触させてここに電圧を加え、Cu₂Sの抵抗値の変化を利用して電流を制御しようとした。実用化はしなかったが、FETに関する初めての提案だった(p.160の「複雑さのなかに鍵が…」参照)。

1939年になると、O.ヒルはTe(テルル)などの半導体薄膜の両端に電極を着け、絶縁層を介して電極の上に電圧を加えると半導体薄膜の抵抗値が変化するという絶縁ゲートFETを考案している。

さらに1952年になると、W.ショックレーは空乏層を利用した接合ゲートFETを発表した。n型のGeチップの両端にソース電極とドレイン電極を設け、Ge表面にpn接合のゲートを設けた構造となっている。ソースとドレインの間のチャネル電流がゲート電圧によって生じた空乏層によって変化するはずだと考え、早速、実験を開始した。翌年の1953年、ベル電話研究所のG.デシーとI.ロスが動作を確認している。しかし実用化にはほど遠かった。

W.ショックレーの偉いところは

素子構造を理論的に提案したあと、必ず実験によって動作を確認していたことだ。歴史上、理論と実験によって開発を進めて成功した天才的な研究者はW.ショックレー以外に見当たらない。

製法革命につながるSiO₂膜の発見

1953年当時、SiO₂膜のことを考えた開発者はだれもいないだろう。もちろん、SiO₂膜の詳しい性質など知らなかったはずだ。

Siは高温で化学的に活性なため、メサ型トランジスタを試作し始めたころ、O₂雰囲気での処理を敬遠していた。O₂がSi表面に悪さをするのはないかと恐れていたからだ。このため、もっぱらN₂やH₂などのガス雰囲気中で不純物の拡散が行なわれていた。

あるとき偶然に、水蒸気中で不純物の拡散を行なったところ、Si表面に安定な薄い酸化膜(SiO₂膜)ができることをC.フロッシュとL.デリックが1954年に発見したのである。その後、O₂雰囲気中で拡散し、安定に処理できることを確かめている。

SiO₂膜が手軽に作れるようになったということが、半導体技術発展のなかで非常に大きな役割を演じたことは言うまでもない。これが基本となって、やがてMOS FET(metal-oxide semiconductor field effect transistor: 金属酸化物半導体電界効果トランジスタ)の発明へとつながるのである。

SiO₂膜は、あるときは表面の保護膜として、あるときは絶縁膜として、そしてあるときは不純物拡散マスクとして、メサ型トランジスタや、

MOS FET、ICなどの製造に用いられるようになっていった。

その後、SiO₂膜の代表的な形成法として「酸化法」と「被着法」が考案された。酸化法には、高温酸化法、低温酸化法、陽極酸化法がある。被着法にはCVD(chemical vapor deposition)法とPVD(physical vapor deposition)法がある。

ついにMOS FETが登場

接合ゲートFETは製造が困難であるうえ、予想通りに動作しなかった。薄膜構成で新しいFETが実現できないものだろうか——J.リリーフェルドの考えについて再び研究者の探求が始まっている。

1960年、ベル電話研究所のカーニーとアタラは学会で絶縁ゲートFET(MOS FET)を発表し、ウエスタン・エレクトリック社から特許を申請した。

これはp型のSiチップ表面に、絶縁膜である酸化膜(厚さ100nmくらいのSiO₂膜)を着け、その上にゲート電極を形成し、その左右に接近させてn型のドレイン電極とソース電極を設けた構造となっていた。当然、ドレイン電極とソース電極はSiO₂膜を突き抜けてSi結晶とつながっている。その後、このトランジスタはMOS FETと呼ばれるようになった。構造的にはnチャネルMOS FETであ

注2) MOS FETは、Si基板がp型のときpチャネル、n型のときnチャネルと呼ぶ。動作モードは2種類あり、入力ゲート電圧がゼロの状態でもドレイン-ソース間電流が流れるデプレッション・モードと、入力ゲート電圧をある程度加えたときに初めてドレイン-ソース間電流が流れ始めるエンハンスメント・モードがある。

る^(注2)。ここにSiO₂膜が使われていたのだ。

この発表は技術者の注目を浴びたが、SiとSiO₂との境界がきわめて不安定で電流特性が時間とともに変化してしまうという問題があった。このため、ほとんどの技術者は、MOS FETが実用化できるものとは思わなかったという。

しかし、一部の技術者はなんとかでもMOS FETを実用化しようと開発に全力投球した。そのなかでプレーナ型トランジスタのクレームから偶然に発見された安定化方法を使うことになるのである。

SiO₂膜だけで表面は征服できない

当初、開発者はまだSiO₂膜についてそれほど知識をもっていたわけではない。

MOS FETの構造は、まずSi基板の表面上に良質で薄いSiO₂膜を作り、次にこの薄いSiO₂膜上の一部にゲート電極を形成するという構造だ。SiO₂膜はゲート電極下の能動部分に用いられたのである。

SiO₂膜の製法は高温酸化法、つまり1100℃くらいに熱したSi基板の上でO₂またはH₂Oを流して作る。このため膜厚が薄く、表面はむき出し同然だった。動作することは確認でき

たが、どうも特性が不安定だ、ということになった。

原因を探ってみると、作業中になんらかの成分がSiO₂膜に進入し表面を不安定にしていることがわかった。薄いSiO₂膜のみでは侵入した成分を阻止できないらしい。これをいかに解決するか、開発に当たった技術者をおおいに悩ませていた。

前述したように、フェアチャイルド社が1958年に開発したプレーナ型トランジスタがこれを解決することになる。このプレーナ構造をMOS FETにも採用した。プレーナ構造にすると、ゲート電極下では薄いSiO₂

pn接合とトランジスタ

半導体には、仮性半導体のn型とp型があり、真性半導体のi型がある。

n型は、SiにP(リン)などのドナー不純物を1/1000万(10⁻⁷)くらいドーピングする。ドナー不純物は、常温ではほとんどイオン化して、動くことのできない+の固定電荷と、自由に動くことのできる-の電子nに分かれる。

p型は、SiにB(ホウ素)などのアクセプタ不純物を添加する。この結果、動くことのできない-の固定電荷と自由に動くことのできる+の正孔pが生じる。電子nと正孔pが「マジョリティ・キャリア(多数キャリア)」として伝導に寄与する。

このほか、n型にもわずかな正孔pが、p型にもわずかな電子nが

存在している。これを「マイノリティ・キャリア(少数キャリア)」という。多数キャリアと少数キャリアとの間には $p \cdot n = n_i^2$ という関係が成り立つ。 n_i は温度依存性を持ち、常温で約10¹⁰/cm³である。

固定電荷はpn接合形成に重要な役割を果たす。温度が-273℃から上昇するに従い、不純物は次第にイオン化し始めていく。ほぼ完全に不純物がイオン化する温度から、nとpとがほぼ同数になる温度(i型半導体)までを「枯渇半導体領域」と呼んでいる。この温度範囲がトランジスタやICの動作温度範囲になるといってよい。

i型半導体は、nとpの数がほぼ同数になったときをいう。不純物をまったく含まないとき、温度が高くなったときの状態である。つ

まり、不純物によるキャリア発生よりも熱によるキャリア発生が非常に大きいということである。

バイポーラ・トランジスタ

接合トランジスタは、不安定な半導体表面に存在するキャリアを利用するのではなく、可能な限り半導体内部のキャリアを利用するところに大きな特徴がある。結晶の乱れがないようにして作られたpn接合のエミッタに順方向電圧を印加したとき、p型領域の多数キャリアである正孔が、n型領域の少数キャリアとして注入されていく。これがエミッタ電流である。

ベース領域(バルク)は+にチャージされていく。バルクは常に中性になるという自然条件のため、+にチャージされたときの情

膜となり、その他の部分を厚い SiO_2 膜で覆うことが可能だ。厚い SiO_2 膜が外気成分を阻止し、表面がきわめて安定になるのである。

やがて、不安定だという汚名をブレーナ構造の採用によって跳ね除け、MOS FETは実用化に向けて大きく前進する。ようやく実用化にメドが立ったMOS FETは、鳴り物入りで騒がれ、1963年ころにはGMI社、RCA社、フェアチャイルド社などが生産を開始している。

たが、どうも SiO_2 膜は完全には安定でなく、しきい電圧 V_t が変動してしまうらしい。信頼性の高いMOS

FETが得られない。もう一押しの努力が必要だ、ということがわかってきた。 SiO_2 膜のみでは外気成分を完全に阻止できないようだ。その原因は何か。どのような解決方法が有効なのか。挑戦が再び始まった。

一方、実用化の可能性がでてきたことで、接合トランジスタと比べて低消費電力なMOS FETへのユーザの関心は非常に高まってきた。

素晴らしい解決方法を提案

MOS FETが不安定な原因は、実は、ゲート下の能動部分に用いる SiO_2 膜にあるということがわかって

きた。どのような SiO_2 膜を作ればよいのだろうか——開発者はこの難問解決に向けて没頭する。

やがて、人間の唾に含まれているNaや水分が SiO_2 膜に進入し不安定になることがわかった。 SiO_2 膜はアルカリ汚染となる Na^+ イオンを阻止できない。では、どのようにして防ぐのか。IBM社のD.クールとRCA社はそれぞれ、ほぼ同じ1963年ころ、リン・ガラス(PSG)を付着させて Na^+ イオンを不活性化するリン処理方法を考えたのである。さらに、アルカリ汚染に対し、より高い阻止能力をもつ窒化珪素(Si_3N_4)膜が開発

報が瞬間に伝わりベース電極から多数キャリアである電子が入っていく。この正孔と電子は過剰キャリアとなるため、 n_i になるように再結合していく。この時間がライフ・タイム(キャリア濃度が $1/e$ に減少する時間)である。

ベース幅を狭くすると、ほとんどの正孔は再結合せず濃度勾配による拡散電流(濃度差による電流、これに対して電界による電流をドリフト電流という)によって正孔はコレクタへと流れていく。このわずかな再結合電流がベース電流となる。

コレクタとベースの間は逆方向電圧が印加されており、正孔も電子もまったく存在しない絶縁層を作る。これによって耐圧をもたせるのである。正孔はここを雪崩落ちながらコレクタ電流となる。コレクタ電流がほぼエミッタ電流と

等しくなると飽和し一定となる。接合トランジスタは正孔と電子の両方を使うことからバイポーラ・トランジスタとも呼ばれている。バイとは二つのことである。

ユニポーラ・トランジスタ(FET)

FETは接合トランジスタと動作がまったく異なっている。FETには接合ゲートFETと絶縁ゲートFETとがある。

接合ゲートFETは、入力電圧によって生じる電界によって空乏層が広がり、その結果、基板(サブストレート)両端に電圧を印加すると、多数キャリアに伝導度変調が起こり、出力電流が変化するようになったトランジスタである。

絶縁ゲートFETは、ゲートに入力した電圧によって生じる電界によって、しきい電圧 V_t (threshold voltage)以上の電圧を印加すると

空乏層で熱的に発生した少数キャリアが基板表面に集められてチャネルが生じるようにしたトランジスタである。このチャネルを反転層と呼ぶ。このタイプの代表例がMOS FETである。

このチャネルは、 n 型では正孔が、 p 型では電子が電界によって集められて形成される。正孔または電子は注入によって得られるのではなく、基板内の少数キャリアが集められたにすぎない。基板の電荷は中性のままであり、再結合は生じない。この状態でドレインとソースの間に電圧を印加すると、チャネルを通るチャネル電流が変化し、これが出力となる。

正孔または電子のいずれかのキャリアを一つしか使用しないことから、FETはユニポーラ・トランジスタとも呼ばれている。ユニとは一つということである。

された。難攻不落と思われていたSiの表面問題を、ついに征服するメドをつけたのである。

現在、ほとんどのMOS FETはプレーナ構造で、かつSiO₂膜とSi₃N₄膜を用いた構造となっている。

実は、Si₃N₄膜は面白い性質を持っている。その一つにO₂を通さないという性質がある。このためICの素子間分離にSi₃N₄膜が利用されている。さらにSiO₂膜とSi₃N₄膜を組み合わせると電荷の蓄積作用を実現できるため、不揮発性メモリにも使われている。

ようやくMOS FETの信頼性向上にメドが立ったが、SiO₂膜とSi₃N₄膜はいずれも、摩擦電気に弱いという欠点があった。これは入力にツェナ・ダイオードを入れることで解決した。次第にMOS FETは完成の度合いを高めていく。

だが、そのころ世の中はSiトラン

ジスタやMOS FETという個別部品(ディスクリート部品)から、ICという集積(インテグレート)部品への転換期にあった。その後、MOS FETは新しい方向へ進んでいくことになるのである。

日本のMOS FET事始め

1963年、日本ではフェアチャイルド社が開発したプレーナ型トランジスタの実用化に向けて半導体業界が揺れていた。IC(integrated circuit: 集積回路)のことも気がかりな状態にあった。当時、ICの実現には半導体ICかハイブリッドICか——二つの考えがあり、意見が分かれていた。

もし半導体ICになったとしてもバイポーラ・トランジスタが有力視されており、まして信頼性に不安のあるMOS FETについて検討する技術者はほとんどいなかった。

このような時期に、日立製作所の

大野稔は1963年の電気通信学会でMOS FETに関連した論文「SiO₂膜の加電冷却効果について」を発表している。この発表は日本ではほとんど注目されなかった。ところが、RCA社が評価したのである。

大野が学会発表に至るまでの経緯を追ってみよう。

大野は2重拡散によるSiのメサ型トランジスタの開発を担当しており、1960年には日本でいち早く試作に成功していた。そのころすでに、米国ではプレーナ型トランジスタが生産中であり、大野の目標はメサ型からプレーナ型へと大きく方向変換することになる。

そして大野のところで、メサ型トランジスタの特性が劣化するという重大問題が発生したのである。

フェアチャイルド社のクレームのときと同様に、どうも表面に起因しているらしいということがわかつ

複雑さのなかに鍵が…

自然現象は、混沌として誠に複雑怪奇だ。むしろ複雑でないほうが異常なのかもしれない。だが、この複雑さを逆に利用して、驚くべき解決法や素晴らしい発見をした物理学者が何人もいる。

その1人は、熱力学で大きな業績を残したJ.マイヤーである。彼は熱力学を、一つひとつの分子がもつエネルギーから計算するのではなく、総合的な全体のエネルギーとして取り扱った。気体には1モル(22.4l)当たり 6.025×10^{23} の分子が

含まれており、分子の一つひとつについてニュートン力学で解を求めることなどほとんど不可能だ。

J.マイヤーは、複雑さを逆に利用し、総合的に処理する方法を考えて難問を解決したのだ。彼はこの成功について“The very complexity of problem is secret of it's solution”, つまり「複雑さこそ問題を解決する鍵である」という素晴らしい言葉を残している。

この名言を半導体に巧みに利用したのが、W.ショックレーたち半導

体物理学者ではないだろうか。初めは、複雑な挙動を示す半導体表面に多くの物理学者は戸惑った。これを厳密に解析するのではなく、複雑さを逆手に取って開発したのがバイポーラ・トランジスタやMOS FET (metal oxide field effect transistor) の誕生につながったといえるだろう。

技術開発のみならず社会環境も複雑になってきている。ときには、J.マイヤーのこの言葉を思い浮かべてみではどうだろうか…。

た。このクレーム対策のなかから大野は新しいアイデアを生むヒントを得たのだ。

彼はSi表面についてもう一度見直し、表面をなんらかの方法で処理できないかと考えた。まず高温状態でpn接合に電圧を加えてみたところ、電界の作用でSi表面に反転層ができることを確認した。そして、このまま常温に戻すと反転層がそのまま残るという現象を発見したのである。

これはしきい電圧 V_t が変動するなど不安定なSi表面の反転層を人為的に制御できることを示しており、MOS FETにとっては重要な発見となったのである。彼はこれを「加電冷却効果」と命名し、電気通信学会

で発表した。

その後、彼はこの反転層を利用し日本で初めてMOS FETを開発し、1962年に電子通信学会で発表した、あまり反応はなかった。

同じ研究が米国でも行なわれていた

IBM社のD.クールは、MOS FETが不安定になる原因として、常温で動作中に Na^+ イオンが移動するからであるということをも1960年に発見した技術者である。

彼は1963年になると、リン処理法を開発すると同時に、金属と半導体の間に電圧を印加したまま、 150°C ～ 300°C の温度で10～20時間加熱し、引き続き電圧を加えたまま冷却する

というBT (bias temperature treatment) 処理法を開発した。実に、これは大野稔の考えとまったく同じだったのである。

現在は、一般に加電冷却法とは言わず、BT処理法と呼ばれている。この効果は、 SiO_2 膜中に含まれる電荷や表面準位などから生じる容量の電圧依存性として観測でき、これをC-V特性曲線と言う。

こうして安定したMOS FETが作れるようになってきた。だが、まだ完全とはいかなかった。たとえばSiの結晶軸問題がある。これは、結晶軸を $\langle 100 \rangle$ 方向とすることに決まった(下掲の「常識を見直すことも必要だ」参照)。

常識を見直すことも必要だ

常識が真理だとは限らない。なぜこの方法が採用されているのだろうか、と開発者は常に原点に立ち戻り、真の理由を自分なりに確かめる必要があるのだ。その一つにSiの結晶軸の話がある。

当時、GeもSiも結晶軸は $\langle 111 \rangle$ 方向を使うのが常識だった。その理由はGeの合金型接合トランジスタを開発していたころにさかのぼる。Ge合金型接合トランジスタでは、移動度や化学的エッチング特性に優れ、エミッタとコレクタの接合面を平行にするために $\langle 111 \rangle$ 方向が選ばれていた。

この流れがなんとはなしにSiのMOS FETの開発にも採用されていたのだ。これに疑問をはさむ技術

者は少なかった。だが、日立の大野稔は、これでよいのだろうか疑問に思ったのである。

磁性材料に精通していた大野は磁化特性が $\langle 100 \rangle$ 方向で、最も磁化されやすいことを知っていた。これから類推して、Siの結晶軸が不純物による界面電荷に関係するのではないかと思いを巡らせていたのである。つまり SiO_2 膜の中に含まれる不純物の影響をなくすために、彼はまずマイナスのBT処理をしたあとに測定するC-V特性曲線に注目した。次に、Siの結晶軸を変えると不純物による界面電荷が示す容量が最小になるのではないかと期待した。

実験の結果、なんと磁化特性と

同じ $\langle 100 \rangle$ 方向がいちばん不純物の影響を小さくできることを発見したので。これはSiのMOS FETにとって、驚くべき発見となったのである。

早速、この発見は1963年に世界に特許申請されている。しかし、あまりにも重要な特許となったため、世界の半導体メーカから異議申し立てが相次いだ。特許権が確立するまで米国で7年、日本で10年、ドイツではなんと20年の歳月を必要としたのだった。

その後、この特許は世界の半導体メーカにライセンスされ、日本の技術の高さを誇示すると同時に、大野稔の名声は広く世界に知れわたったのである。

MOS FETの実用化について、米国では多くの期待があったにもかかわらず、日本における応用は計測分野にとどまっていた。おそらくトランジスタのユーザはMOS FETの信頼性を疑問視していたのだろう。

米国では、RCA社がMOS FETは将来有望なデバイスだと確信し、開発を強力に進めていたのである。

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』, ダイアモンド社, 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』, ダイアモンド社, 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, 永田穰, 『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』, につかん書店, 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," 同上, no.76, vol.180, July 1949.
- 45) Shockley, W., "Electrons and Holes in Semiconductors," *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," *Bell System Technical Journal*, 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。