

半導体の歴史

— その8 20世紀後半 集積回路への発展(3) —



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

■ 接合型トランジスタ製法の改良

再び、1950年代後半のアメリカに話を戻す。トランジスタの製法は、前稿で触れた合金型（インジウム（In）などの不純物の粒をGeの上に乗せ、熱処理することで不純物を拡散する方法）及び成長型（Ge結晶を引き上げる段階でN型、P型のそれぞれの不純物をドーピングする方法）の2つが初期に取られた手法であり、1955年までに用いられている。これらの合金、成長の手法は次第に不純物拡散技術の進歩に伴い拡散法に置き換わってゆく。この手法により、より狭いベース幅のトランジスタ構造が得られるためである。1956年になるとベル研究所のリー（Charles A. Lee）がメサ型トランジスタを開発する。従来の合金型トランジスタに対し、拡散層をベース形成に利用する方法が確立される。半導体単結晶の板を高温度で不純物金属の蒸気中（気相拡散法）に放置しておく、不純物の気体原子は結晶表面に衝突して結晶内部に徐々に拡散してゆく原理を利用して、半導体中に不純物をドーピングする方法である。拡散層ベースの最初のものである。この技術はその後の研究と相まって、ベースのみならず、エミッタ、抵抗その他広く利用展開されてゆく。拡散法では不純物の制御が、熱処理条件（温度、砒素の流量比、処理時間など）の調節が自由で容易なことからベース幅も1 μ m程度にせまく制御することができ、またドリフト効果も利用できる、高周波特性が大幅に向上する画期的な製法である。Siで100MHz、Geで500MHzに達し、この手法がその後のプレーナー型トランジスタが開発されるまでのトランジスタ製法の主流となる。具体的には砒素（As）を含んだ雰囲気中でP型のGe板を熱処理することでGeの表面にベース層となるN型不純物層を形成し、その後にN型層の上にアルミニウム（Al）と金（Au）の電極を付け、Alの融点以上で熱処理することでAlがGeに溶け込み、N型層の上にP型

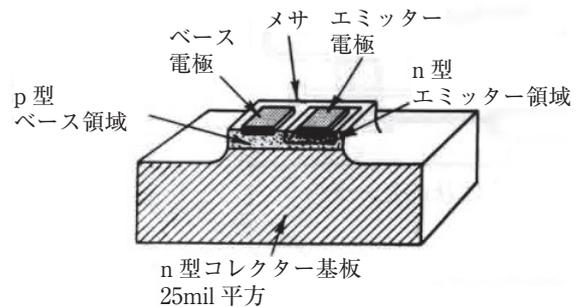


図1 拡散型メサトランジスタ
『エレクトロニクスと情報革命を担うシリコンの物語』より

の層が形成されることでPNPのトランジスタを形成する方法である。このトランジスタは、その外形構造がメサ（台形）状をしているので、メサ型トランジスタと呼ばれた。

翌年の1957年になるとイギリスのバール（Beale）が合金拡散型トランジスタを発表する。合金接合と拡散接合の混合型で、合金型のもつ量産性と拡散法のもつ優れた高周波特性を考慮したものである。すなわちGeでは一般にp型不純物の偏析係数はn型不純物のそれよりおおいのに対して、拡散係数はその逆になる。この現象を利用して、まずp型Ge基板にn型不純物（たとえばSb）を表面より拡散する。これは後にベース引出導体になる。つぎに、SbとGaを含むn型拡散面上で合金層をつくり、その後温度を上げて合金拡散を行なう。このときSbは合金面の下に拡散して、n型拡散層を押し広げてn層を形成しこれがベースとなる。つぎの冷却過程に入ると偏析係数の大きいGaが再結晶中に多量にドーピングされてp層となってエミッタを形成する方法である。当時高周波トランジスタとして多く用いられている。

1956年から1957年にかけてGe結晶にかわりシリコン（Si）結晶のトランジスタ開発が勢いを増してくる。Siトランジスタは1953年頃からベル研究所やTI社を中心に進められてきたが、Si結晶引き上げ技術や気相拡散手法の発達などや表面の安定化にすぐれている点などのプロセス面と、Siトランジスタそのものが広い動作温度で安定して使用できることなどから各社とも将来デバイスとして見据えつつあった。プロセス上でSiの最も大きな特徴はSi表面に

安定な酸化膜 (SiO₂) を形成できる点である。その利点を生かすことで出てきたのが選択拡散法である。この選択拡散法は1957年にベル研究所のフロッシとデリックによって開発されている。この方法ができるまでは、不純物の拡散方法はシリコン基板の全面で行なわれて、必要な部分だけを残して不要部分を取り除くやり方であった(メサ型トランジスタ)。シリコン酸化膜が表面からの不純物の拡散を妨げることに注目したのがこの選択拡散法のポイントである。最初にSi基板の表面を酸化膜で覆い、不純物を拡散させようとするところだけ酸化膜を取り除く。その後、高温において拡散させようとする不純物をガス化してその表面に流してやれば、酸化膜が取り除かれた部分だけに不純物がドーピングされる。必要なところだけ酸化膜を取り除く方法はホットエッチング法を用いる。ホットレジスト(感光樹脂)を酸化膜で覆われたSi基板の表面に塗り、必要なところ以外に光を当てる。光が当たったところはホットレジストが硬化するが、他の部分は薬品で処理するとすぐに溶けてしまう。その上で酸化膜を削る(エッチング)ための化学処理をすることで、光が当たったところ以外の酸化膜は溶けて、この部分の酸化膜が無くなることになる。この発明により、自由な場所に選択的に拡散層を形成できるようになり、その後のプレーナー技術へと移行しやすくなる。

III フェアチャイルド半導体社の設立

プレーナー技術の中心となったフェアチャイルド半導体社の成り立ちから触れてみる。1957年8月にショックレー半導体会社を辞めたロバート・ノイス (Robert Noyce) を中心とする8人は同年10月に「フェアチャイルド半導体社」を設立する。ショックレーのやり方について行けずに止めた当初は会社設立の当てもなく、8人がばらばらになる可能性もあった。この危機を救ったのは8人の中の1人であるユージン・クライナーの父が紹介した投資会社ハイドン・ストーンである。ハイドン・ストーンはビジネス・スクールを出たばかりのアサー・ロックを派遣する。ロックはノイスらの話を聞き面白いと思い、半導体に興味のあるような会社を30社以上回るが良い反応を得られなかった。8人のメンバーの誰かが「百万長者のフェアチャイルドがどうだろう」と言った一言で、ロックはシャーマン・フェアチャイルドに会いにニューヨークに行く。新しい物好きのフェアチャイルドはロックの話に興味を持ち、即決で投資を決める。フェ



ロバート・ノイス (Robert Noyce)

アチャイルドが創設した会社の1つのフェアチャイルド・カメラ・アンド・インスツルメント (FCI) が130万ドルを出資して、10月に「フェアチャイルド半導体社」の設立に到る。設立した場所はショックレー半導体研究所と同じパロアルトで同研究所から2.2キロメートルしか離れていない。

1957年10月はソ連が人工衛星(スプートニク)の打ち上げに成功した時であり、ソ連とアメリカの宇宙衛星打ち上げ競争の幕開けで、冷戦下での両国の宇宙技術開発をもとにした核弾道ミサイルのロケット技術の凌ぎあいが始まった時でもある。この為、ロケットに載せる電子回路の小型化が重要な技術となり、議会も人口衛星用ロケットの開発予算承認には前向きであった。この為、アメリカの半導体会社は需要に恵まれた環境下で、フェアチャイルド半導体社は設立の翌年には早くも黒字となる。翌々年の1959年には売り上げが700万ドルに達している。こうして設立されたフェアチャイルド半導体社がSiプレーナートランジスタを開発し、Siプレーナー集積回路(IC)への道を切り開いて行くことになる。

III プレーナー型トランジスタの発明

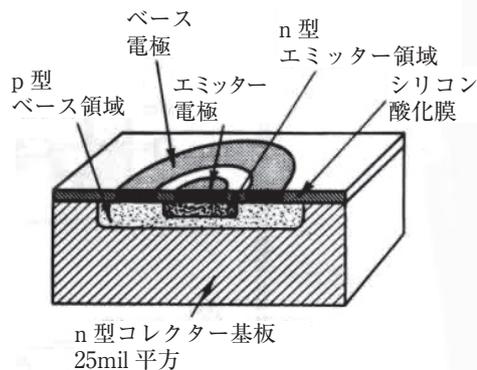


図2 拡散型プレーナー型トランジスタ 『エレクトロニクスと情報革命を担うシリコンの物語』より

フェアチャイルド半導体社創業時の8人のひとりであるジーン・ヘルニ (Joan Hoerni) が1959年5月にSi接合型トランジスタの製法としてSiプレーナー型トランジスタのプロセスを発表するとともに特許化する。これは、先の選択拡散法を活用したトランジスタの製法である。Si基板をコレクタとし、これを熱酸



ジーン・ヘルニ (Joan Hoerni)

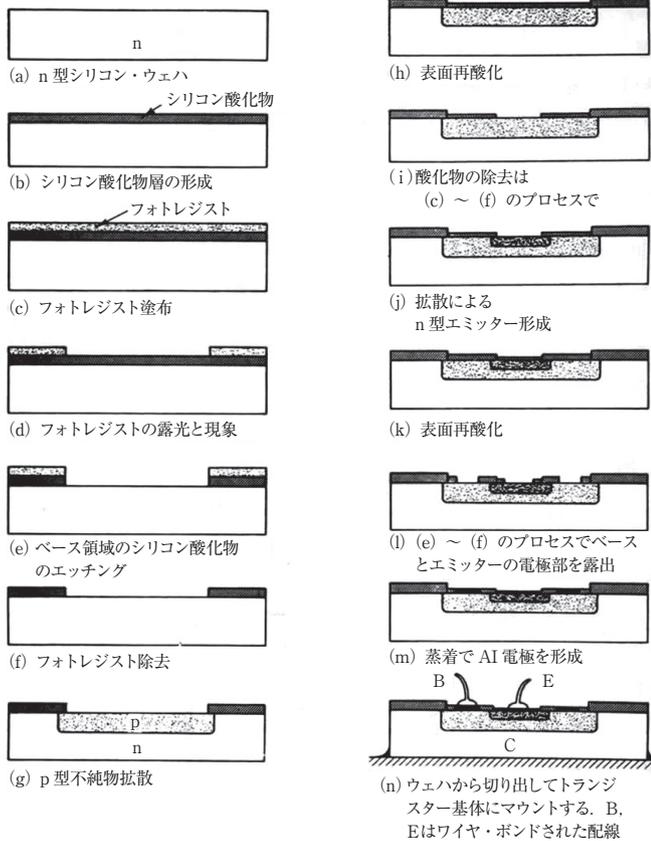


図3 拡散型プレーナートランジスタの製造工程
『エレクトロニクスと情報革命を担うシリコンの物語』より

化して表面にシリコン酸化膜 (SiO_2) 層をつくり、これを拡散マスクとして用いる技術で、この SiO_2 層にホットエッチング法によって窓孔をあけて、この窓孔から拡散を行い、1工程の拡散が終わるごとに、再び SiO_2 層を表面に構成させるプロセスである。これをベース層、エミッタ層と必要回数順次上面から選択拡散を繰り返してゆくことによってトランジスタが構成されるというプロセスを確立する。半導体史上の画期的な技術である。これによってトランジスタの量産技術が確立され、さらにこの技術が基礎となって2年後の半導体集積回路技術へ展開してゆくことになる。更にこの製法はSi表面に構成されるPN接合の境界部分を自己整合的に SiO_2 膜で覆う構造となるため、トランジスタを使用しているときに外部から浸入してくる水分や稼動イオンの浸入を防ぐ事で動作上の信頼性を大幅に向上している。さらにまた、結晶の表面問題にはばまれて実現を見るに到らなかった電界効果 (FET) トランジスタも、この SiO_2 酸化膜技術の展開によって後年の MOS トランジスタに結びついてゆく。

ヘルニの発明したプレーナートランジスタ特許でフェアチャイルド半導体社は莫大な利益を得るが、ショックレーの発明と同様でヘルニにはその利益の何割しか入らない。ショックレーがそのためにショックレー自身の会社を興した時と同じように、ヘルニもフェアチャイルド半導体社を辞め、1964年にユニオン・カーバイド・エレクトロニクス社の半導体部門を創設、1967年にはインターシール社を設立する。

トランジスタから IC (Integrated Circuit ; 集積回路) へ

このプレーナートランジスタの特許から3ヶ月遡った1959年2月にテキサス・インスツルメント社 (TI社) のジャック・キルビー (Jack. S. Kilby) が IC を発表し特許化している。Ge、Si などの結晶基板上に何回かの不純物拡散処理を行なうことによって、同じプロセスでトランジスタ、ダイオード、コンデンサ (ダイオードに逆バイアス印加、



ジャック・キルビー
(Jack. S. Kilby)

または誘電体膜の蒸着処理)、抵抗器 (バルクの抵抗または抵抗体膜の蒸着)、配線などを実現するものであり、優れている点は回路を構成するあらゆる素子を Si や Ge の半導体物質で形成することであり、それまでは半導体物質は抵抗やコンデンサに向いていないという考え方が常識で、半導体物質でこれらの部品を作ろうと考える人はいなかった。この原理を展開して、1つの結晶基板内にこれら一連の素子を、半導体プロセスを介して一括して組み込み、ブロック全体として1つの機能をもたせた IC を開発する。実際には TI ではまだ Si 拡散技術が十分でなかった為、Ge 結晶のチップ上に2個のトランジスタと抵抗とコンデンサを設け、これらの部品間の配線は細い金線でつないだものである。キルビーはこの構造の特許出願するとともに IRE (Institute of Radio Engineering、IEEE の前身) で発表している。これによって、個別部品を基板の半田付けで組み立てて機能ブロックを構成するという、従来の電子回路組み立て技術の概念を一変したものである。現実的には、この技術そのものは素子間の相互干渉が強く、歩留まりがわるく量産むきではないため、その後の Si プレーナ IC 技術がこれにかわって IC の主流となってゆく。しかしながら、同一 Si チップ上に上記の種々のデバイスを搭載し IC を構成すると言う概念は特許として残り、後年、日本も含めた半導体メーカーを苦しめる事になる。

1つの固体結晶中に複数のデバイスを形成する着想を最初に示したのはイギリスのデュンマー (G. W. A. Dummer, Royal Radar Establishment) である。1952年の電子部品の会議で「トランジスターの出現と今日の半導体技術の仕事は、絶縁体・導体・整流器・増幅器などの層からなり、各層のある面積をきりだして直接結ぶことにより、接続線のない固体ブロックからなる電子装置のイメージを描かせる可能性がある」と述べている。当時の成長接合の技術によってこれを実現しようとするアプローチを取ったため、彼自身はそれを実現できなかったが、その着想はアメリカ空軍のモレクロナクス、およびこのICという2つの指向にわかれて、ひきつがれて行ったと考えられる。キルビーはこの研究成果を軍にもっていったところ「海軍はほとんど関心を示さず、陸軍は関心を示したが提示された要求と合わず、空軍は当初モレクロナクスへの固執あって、一時的な紆余曲折はあったが、最終的には最も強力な支持者となった」と語っている。前述のようにソ連との冷戦における軍事技術競争により、1956年から1958年にかけて、アメリカ陸海空の3軍とも電子回路の各機能ブロックを超小型化する動きが急速に高まり、超小型化技術の最大のスポンサーであった。しかし当時としてはトランジスターの出現以外はまだ特に新しい技術導入はなく、そのためもっぱら印刷配線板ないしセラミック板を用いて、これに抵抗・コンデンサ・能動素子などを立体的ないし平面的に巧みに高密度実装するかという点に努力の焦点がおかれていた。しかもこの研究は、常に軍および宇宙開発が背景にあるだけに、常に高信頼の問題もあわせて追及せねばならない。これらの開発活動のアプローチは、従来の超小型部品を立体的に高密度に格納する方法であり、もうひとつは、印刷・蒸着処理の抵抗・コンデンサを開発して2次元的に薄く処理してゆこうとする技術の確立であった。Signal Corp (陸軍) はRCAと組んで1958年にマイクロモジュール計画を具体化し、海軍はG.E. バロウが進めていた蒸着技術による薄膜2次元(2-D)計画を支持し、DOFL (Diamond Ordnance Fuze Lab) とセントラル・ラボ (Centralab) はスクリーン方式による厚膜2-D方式を進めている。一方、空軍はWH社と組んで“モレクロナクス”技術 (molecular electronics の略。多くの固体物理現象、例えばゼーベック効果、ベルチェ効果、半導体の整流現象などを利用し、エネルギー制御、変換を行なうという方法) の開発計画をほぼ固めており、1958年頃にはアメリカ3軍とも超小型指向の選択が決定されている。しかしながら、今日の半導体技術を生み出す直接の研究計画はこれらの中に含まれていなかったと言う事、それにも関わらず、それを成功させるのはキルビー (キルビーは1958年TI社に勤める前に11年間、大学卒業後セントラル・ラボに所属していた) などの実際にこれらの計画に携わり、その技術と経験を足がかりとし

た人々であったということである。言い換えると、技術革新のための国家プロジェクトの様な大きなプロジェクトは、その場限りの成果を求めるのではなく、研究開発者に、ある目的にそった経験を積む機会を与えるとと言う点で重要であることを示しているとも考えられる。現在ではナノテクノロジーなども、今後の研究方向にもよるがそれに相当するかも知れない。

話をICに戻すと、キルビーの研究内容を実現に近づけたのは、先に述べたプレーナー型トランジスター技術と、その後、1961年に同じフェアチャイルド半導体社のノイスにより製品発表されたシリコン (Si) プレーナー IC 技術である (特許出願は1959年7月)。この技術が今日のLSIの根幹をなす技術となる。キルビーの特許は同一基板上に多くの素子を配置した機能ブロックとしてのICを発表したものであるが、これは前にものべたように素子間の相互作用が強く、量産の問題をはらんでいた。これに対して、SiプレーナーIC技術は、先のリーのプレーナー技術を利用してSi基板上にそれぞれ独立した素子を多数配置したのち (各素子間の独立化はpn接合分離・絶縁分離などによる)、これらの素子間の必要箇所を、絶縁層を介して配線接続を行なうプロセス技術である。キルビーのIC技術がバルクとしての機能化素子に向って大きく前進しかけた点から比較すると、このプレーナーIC技術は一步後退した感もなしとしないが、反面、キルビーのICに比べて生産性と信頼性をはるかに向上させた高密度ICの道をひらくことに成功し、その後のICの本流となってゆく。フェアチャイルド半導体社は1961年に世界初のSiプレーナーICを売り出す。

TI社とフェアチャイルド半導体社は長期間この特許に関してあらそうことになる。TI社は特許の優先権を主張し、1960年代にこの特許紛争に勝利を収める。これによって、TI社は大きな利益を得る。特に、日本の半導体製造業を含め、世界の半導体産業を占有するのにこの強力な特許を使用している。特許の面では大きな差があったが、専門家や社会は時代を超えてキルビーとノイスの功績を平等に称えている。

1966年、フランクリン財団はキルビーとノイスの2人をICの発明と実施貢献に対して表彰する。キルビーに対しては「実際に動作するモノリシック (1つの結晶内に作りこんだ) 回路を最初につくった」、ノイスには「モノリシック回路をとくに工業用に応用できるように洗練された形に仕上げた」と役割を表している。

旧フェアチャイルド半導体社本社の玄関前にはノイスの偉業を称えたプレートがある。「世界初の商業的に実用性のあるIC。1959年、この場所でフェアチャイルド半導体社のロバート・ノイス博士は世界初の商業的に製造可能なICを発明した。ノイスの発明は初期のフェアチャイルド半導体社の発明であるプレーナー技術に基づき、小さなシリコン・

チップ内の1つの完全な電気的回路からなるものだった。彼の発明は、シリコンバレーの半導体電子産業に革命をもたらし、世界各地の人々の生活に大きな変化を持ち込んだ」

III フェアチャイルド半導体社の果たした役割

ノイスが中心となって8人で設立したフェアチャイルド半導体社は、プレーナー技術を駆使したトランジスター、ICと言う、その後のLSI（大規模集積回路）の基本プロセスを開発した。このプレーナー技術はSi表面の安定化をもたらし、この後に登場するメタル-酸化膜-シリコン電界効果型(MOSFIT)トランジスターの実用化をも可能にする。このことから半導体産業の歴史上、トランジスターの発明に次ぐ、重要な基本技術と考えられる。

一方、フェアチャイルド半導体社からは多くの人材が育ち、飛び出してゆき、多くの新しい半導体会社を生み出してゆく。フェアチャイルド半導体社からスピアウトした人によって創設された半導体会社は、リーム・セミコンダクタ、アメルコ、ユニオン・カーバイト・エレクトロニクスの半導体部門、インターシール、インテル、アドバンスト・マイクロデバイス (AMD)、ナショナル・セミコンダクタ (NS) などであり、特にこの中で最も成功した会社はノイス、ムーア、グローブが創設したインテルである。このようにフェアチャイルド半導体社はプレーナー技術を元にしたICとそれを元にした数多くの新製品を生み出しただけでなく、多くの人材を育成し、半導体業界に供給している。これらの会社とその関連企業などが核となり、サンフランシスコから南15キロにあるサンマテオからさらに47キロ南のサンノゼまでの間に半導体関連企業の集合体が形成され、シリコンバレーと呼ばれるようになる。その中心部がサン

マテオから南18キロにあるパロアルトであり、ここに前稿にて紹介したショックレー半導体研究所とノイスらのフェアチャイルド半導体社、そしてインテルなどが創設された。ショックレーがこの地に優秀な若者を集め、トランジスターのイロハを教育することで種をまき、ノイスがそれを引き継ぎ、大きく育てて花咲かせたと言っても過言ではないと思われる。ショックレー半導体研究所の近くにフェアチャイルド半導体社が創設されたのはショックレー半導体社で働いていた8人が既にパロアルトに住居を構えていたためである。ノイスはプレーナーIC技術で新製品を送り出した後、インテルを創立しメモリ技術、MCU技術を産業として育成してゆくことで、1959年以降の20世紀末までのほぼ40年間の半導体産業隆盛期の牽引者となってゆく。

参考文献

1. 堂田昌男・北田正弘 訳 フレデリック サイト・ノーマン アインシュバラッハ 著 『エレクトロニクスと情報革命を担うシリコンの物語』
2. 城阪俊吉 著 『エレクトロニクスを中心とした年代別科学技術史』
3. 谷光太郎 著 『半導体産業の奇跡』
4. 谷光太郎 著 『半導体産業の系譜』

次回

第10回 半導体の歴史 —その9 20世紀後半 集積回路への発展(4)—