

シリコントランジスタの開発とソニー

会員 川名喜之



1. 始めに

現代はエレクトロニクスの時代である。1947年12月に発見された点接触型トランジスタがその基礎になっている。以来トランジスタは接合型トランジスタに移り、それがゲルマニウムからシリコンの時代に移行し、ICが発明され、今日のエレクトロニクス時代を築いた。ここではソニーがトランジスタテレビにシリコントランジスタを世界で最初に応用してシリコン時代を先導した歴史を振り返り、その後の発展を併せて記述する。

2. シリコン開発の先鞭を切ったベル研究所

1936年、ベル研究所の研究部長だったM. J. KerryはShockleyに真空管に代わる固体スイッチの開発を命じた。電話交換機の将来を思っていることであり、それがトランジスタ発明の端緒になった。戦争が終わって兵役から帰って、Shockleyらの研究は加速したが、そう簡単に研究は進まなかった。1947年12月トランジスタ現象が発見されるまで10年以上の歳月が流れた。J. Bardeen, W. Brattainの二人がトランジスタ現象を発見した時、Shockleyはその場にいなかったので発明者にならなかった。彼は悔しさのあまり猛然と勉強して翌年間もなくJunction Transistor理論を作り、現在に至るトランジスタ発展の道を開いた。最初の接合型トランジスタは成長接合型で1949年にベル研究所でサンプルが出来た。続いて1951年には合金型がRCAとGEで出来た。こうして1952年にはベル研究所でトランジスタ特許を公開するTransistor Symposiumが開かれ、製造技術も公開されて世界中で量産が始まることになったのであった。

1950年頃、J. Mortonはベル研究所の中でWestern Electric社で半導体を生産する研究室を作る任務を負わされていた。1952年、大学のPhDからこの研究室に配属されたJ. Mollの最初の任務はswitching transistorの特性を理解することだった。その後、機械的リレーを半導体デバイスに置き換える任務に就いた。それはかのM. J. Kerryが考えた固体スイッチそのもののことであった。そのためにはoffの電流が小さく、onの抵抗が低くなければならない。彼はoff電流を小さくするにはバンドギャップの大きいシリコンを使うしかないこと、また拡散接合を少なくとも一つは使わなくてはならないことを主張した。

これに対して研究所の中では誰も異論を唱える者はいなかった。こうして彼の研究室はシリコンデバイスの開発に猛然と取り掛

かった。1954年から1955年の頃である。

又、1952年、J. Bardeenがベル研究所からIllinois大学に移って1年後に彼はノートにシリコン二重拡散型トランジスタの概念を記していた。シリコンが重要になるとする期待は必然的に沸き起こっていたし、その中で不純物拡散技術が基本的な役割を演ずるであろうことは先見性のあるBardeenは予見していた。

その年、1954年、N. HolonyakとJ. Goldeyが大学から新しいPhDとしてMollの研究室に参加し、開発を加速した。他にM. Tanenbaum, C. Fuller, C. Froschなどがいた。彼らはスイッチとして優れていたPNPNスイッチの開発を目指したが、その間NPN, PNP拡散型トランジスタの開発も進めた。その過程でC. FroschとL. Derickが1955年春に偶然にもシリコンの酸化膜を発見し、これが拡散のマスクになることを見つけたのだった。こうして選択拡散技術を含む拡散ベース、アロイエミッタのトランジスタ、PNPNスイッチ、2重拡散型シリコントランジスタなど優れたデバイスが次々と誕生した。ベル研究所の黄金時代が続いていたと言っても良いと思われる。なお、N. Holonyakは真空蒸着によるMetallizationの開発も行っていて、その重要性を述べている³⁾。これらは殆ど1955年中に達成された。ただし、選択拡散技術は特許の確定まで秘密にされ1957年9月に公表された。シリコンの時代がここからこのように始まった。

また別の研究室では1954-1955年の頃、J. AndrusとL. BondがPhotolithographyの開発を行っていた。これは以後の重要な技術となった。



1956年

ウォルター・ブラッテン博士と岩間
SONY time capsule vol.12

3. 東京通信工業の対応

1956年1月、ベル研究所はトランジスタのライセンスに対し、最近の進歩を報告するための Symposium を開いた。1952年以来である。名付けて Diffusion Symposium とした。それだけ拡散に関する技術とデバイスが主たる内容だったからであり、1955年までの大きな研究成果が含まれていた。この Symposium の開催の知らせを聞いて東京通信工業(東通工)の岩間半導体部長は是非出席しようと決めたが、今回はゲルマニウムトランジスタの生産化に貢献した岩田三郎を同行することに決めた。今後のトランジスタの開発は岩田にゆだねるつもりであった。

この Symposium の内容は、

- 1、シリコンへの不純物拡散技術
- 2、拡散ベース型ゲルマニウム高周波トランジスタ
- 3、拡散ベース及び拡散エミッタ型シリコントランジスタ
- 4、拡散型シリコン整流器

であった。これからのトランジスタはシリコンになるとするベル研究所の信念が現れている Symposium であった。そして拡散技術が重要な生産手段になることを示していて、岩間は岩田にこの重責を与えようと思っていたと思われる。Bell System Technical Journal Jan. 1956には次の二つの論文が発表された。

“Diffused Base and Emitter Silicon Transistors” M. Tanenbaum and D. E. Thomas, pp1-22

“A High-Frequency Germanium Diffused Base Transistor” C. A. Lee, pp23-34

この Symposium ではこの論文の内容が詳しく説明された。

岩間は「これからはシリコンの時代だ、シリコンをやる」と決意したと思われる。同時に拡散ベースのゲルマニウム高周波トランジスタはテレビをやるために必要なデバイスであると認識し、これも着手することを決めたと思われる。ベル研究所のシリコンに対する信念は正しく岩間に伝わった様である。

この Symposium には内外から 72 社が参加し、日本からも東通工を含めて数社が出席したと考えられる。ベル研究所の副所長を勤めた J. A. Hornbeck はこの Symposium の後で「当面 Licensee の立場からみれば、市場の要求に対しては高周波の要望はあるものの、今はこれまでの技術で満足しているとして、この拡散技術は大きな技術革新を企画するような興奮をまき起こさなかった」と記している¹³⁾。岩間はそうしてみると Symposium 参加者の中では異例だったのかもしれない。日本の参加会社もトランジスタラジオをどう作るかに腐心していて、他に余裕がなかったと思われる。東通工はすでにラジオを発売しているという点もこの技術の受け止め方が、他社と異なっていた理由かと思われる。

岩間は帰国後、井深や会社の幹部に報告したであろう。井深は既にトランジスタテレビを次はやろうと心に決めていた。前の年に日本で初めてトランジスタラジオを発売したばかりである。トランジスタが如何に商品を変えたかを見て次の方向を見定めたであろう。トランジスタテレビをやるためにはブラウン管内の電子

流の水平、垂直偏向など高い電圧と電流を取り扱えるトランジスタが必要である。テレビ内の温度も上がるだろう。高温に耐えるトランジスタが必要である。それにはシリコンでなくてはならない、という論理であったであろう。ベル研究所で電話の交換機の機械的リレーを固体素子に変える時に低いリーク電流を達成するためにはシリコンでなければならないと決めた論理と通じるものである。

岩間は、その年アメリカから帰国後の 4 月には新人の機械設計技術者前川貢にシリコンの単結晶引き上げ装置の設計製作を命じた。ゲルマニウムの結晶引き上げは彼の上司の茜部が 1954年に設計製作を行っている。前川は極めて困難な装置を上司と相談しながらまた工夫もしながら設計製作を始めた。そしてその年末には何とか完成した。また拡散技術をもものにするために拡散炉を購入した。シリコンヒータによる 1300°Cまで上がる炉で長い石英炉心管を含むものを外注した。更に電極の形成には真空蒸着機が必要と言うので、それを発注した。

一方の井深はシリコンの単結晶が必要なのは分かるが、ゲルマニウムのように酸化ゲルマニウムを買ってきて還元し、ゾーン精製機で高純度化すれば良いというものではないことに注目し、これは化学を専門とする他社にお願いしなければならないと考えて、新日本窒素肥料株式会社の白石宗城社長にシリコンの精製、単結晶生産の事業化を提案した。1956年中ごろの事である。同社は検討の上この年の終わりにシリコンの事業化を決心し、担当に肥料部長だった前田一博を任命し、東通工に挨拶に来ている。この年の終わりにある。この会社は幾つかの変遷・合併を経て、現在の三菱住友シリコンに発展した⁶⁾。1956年はこうしてシリコントランジスタ開発に着手する準備で過ぎた。1956年は日本の電気会社大手はトランジスタラジオの開発に追われていた時であり、まだシリコンには着手していない。ただ NEC の長船は早くからシリコンを手掛け、早くも 1948年暮れにはシリコンのインゴットを作りマイクロ波シリコンダイオードを 1950年に試作している。しかし、これは本格的な拡散型シリコントランジスタ技術ではなく、彼が本格的にシリコンに参入するのはしばらく後の事である。こうして 1956年は東通工にとってシリコントランジスタ開発の前段階を過ぎたことになる。江崎玲於奈を神戸工業から採用し、人材の強化を図った。同時に 1957年に大学卒の新人技術者を大量採用する方針を立てた。ただ開発に大量の人員を投入する気ではなかったようで、岩間の 1956年早々のアメリカからの手紙にも 6、7名もいればかなりの事が出来るだろうと述べている。

4. シリコンへの拡散技術とシリコントランジスタの開発開始

1956年暮れ、岩間は多くの大学の理系の教授に電話を掛けて新卒の学生の採用活動を始めた。黙っていても人材の採用は難しいとみていた。東京大学工学部冶金学科の橋口教授にも電話を掛け、「出来の悪いので結構ですが一人世話をしていた

けませんか。」と頼んだ。教授は大学院生であった私を呼んで「小さい会社だがトランジスタの技術ではどこにも負けない会社だ。訪問して見てはどうか」と声を掛けた。品川の東通工の本社をすぐに訪れてみると社屋は木造3階建であった。ギシギシと音がする階段を上ると、岩間は機嫌良く会ってくれた。彼はトランジスタラジオの新製品の展示物を見せて、「こんなものは儲けるためにやっているのではない。次のトランジスタの研究開発費を稼ぐためにやっている。次はシリコンをやる。更に化合物半導体も控えている。」と言って私を驚かした。新鋭半導体工場を案内して、私に何も質問することなく、良ければ来年早々からアルバイトで働きに来ないかと私にすすめた。3月に卒業予定であったがその薦めに従うこととして、次の1月から東通工半導体部研究課(岩田課長)に出社した。今考えればシリコントランジスタを開発する準備であったことが分かる。私のアルバイトとしての最初の仕事は江崎先輩のゲルマニウム表面現象研究助手であった。

3月になったある日、江崎は松下電器中央研究所に電話してその研究員三沢敏雄を呼び出した。「何時こっちへ来るのか」と言うのであった。今ではリクルートは珍しくないが私は驚いた。こんなあからさまにやっついのか、と思ったものである。三沢は松下でゲルマニウム成長型トランジスタの開発を担当していた。おそらく物理学会で知り合いであったであろう。三沢は間もなく東通工に入社した。そして4月1日になった。数十人に上る理工系の学卒を雇って会社は活気付いていた。岩田課長は仕事の配分を発表した。シリコン担当は三沢と私になった。これが数十年も続いた私のシリコンとの付き合いの始まりであった。

ベル研究所の1956年のDiffusion Symposiumの資料を参考にしながら、まずはシリコンに対する拡散技術の検討を始めた。P型ではボロンとガリウム、N型ではリンとアンチモンが主な対象であった。拡散ソースは例えば、 B_2O_3 、 Ga_2O_3 、 P_2O_5 、 Sb_2O_3 などの酸化物であった。これを2段炉の低温部に入れて酸化物蒸気を高温部にあるシリコンに流して拡散を行わせるものであった。またシリコンと拡散ソースを比較的低い同じ温度にしていわゆるpre-depositionを行い、その後、シリコンのみを高温にして拡散させる、いわゆるdrive-inを行った。トランジスタのベースとなる部分の拡散は比較的低濃度が要求されるためボロンのpre-depositionとdrive-inを主に検討した。

エミッタ拡散は高濃度のリン拡散を想定してpre-depositionなしの一回拡散を採用した。三沢の優れていたところはこのような拡散sequenceに対して表面濃度を拡散深さとSheet Resistivityの測定から数学的に決定する方式を決めたことである。当然一回拡散とpre-depositionとdrive-inの工程では表面濃度一定のExponential分布と拡散不純物量一定のComplementary error function分布との違いを考慮し、Mobilityの濃度依存性を考慮に入れた図表計算も取り入れての方式であった。もとよりout-diffusionもあり、drive-in或いは高温拡散中の不純物の酸化膜への取り込みなど考慮すべき要因は他にもあったが、とりあえず一つの方式を確立した事が大きな前

進であった。三沢の指導のもと、私はどのようなプロセスでやれば表面濃度と拡散深さをそれぞれコントロールできるかを考察し、報告書にまとめた。これはその年の8月のことであった。岩間は喜んだようである。

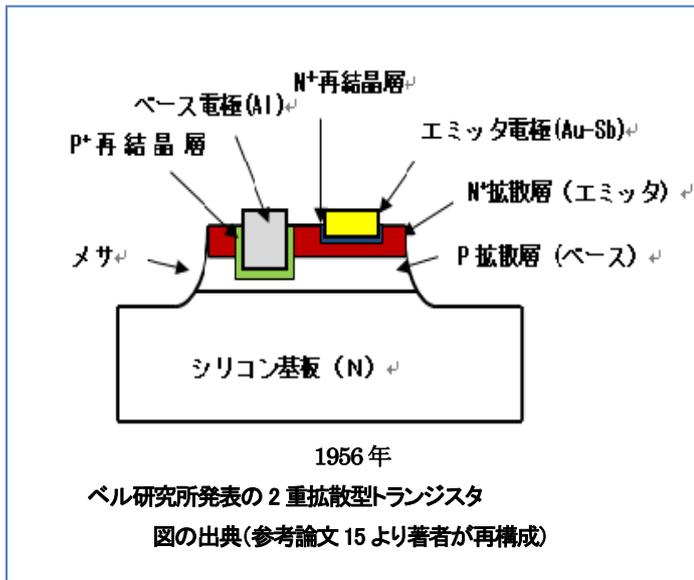


1963年
ウィリアム・ショックレー博士と岩間
SONY time capsule vol.12

5. シリコントランジスタの開発

こうして1957年秋になった。当然、我々の目標であるシリコンパワートランジスタをどう作るべきか検討を進めた。当時東通工はGEと技術援助契約を結んでいたため、GE社のパワートランジスタを入手して解析した。エミッタ1本、ベース2本の単純な構造であったが、電極の形成が複雑な金属構成であるのみならず、シリコンと半田合金の直接合金化を行っていた。これは試してみたら容易に出来るものでは無かった。プロセスの詳細はGEから教えてもらっていない。また特性を評価したが、2重拡散でベース電極はエミッタを一部エッチングして現れたベース部分に取り付けてあるため、E-B間で電圧が高くてとても使えるものではなかった。またコレクタ抵抗も目標よりもはるかに大きすぎてこんなものを真似してもだめだとすぐに思った。

この年の9月には先に述べたベル研究所のFroschとDerickの酸化膜マスクの選択拡散技術が公開された。直ちにこの追試を行ってこれを確認するとともにこれでエミッタ、ベース領域を形成すればGEのパワートランジスタの問題の大きな部分を取り除くことができると確信して、これでパワートランジスタを設計することを決めた。これによればエミッタとベースの間の抵抗を格段に減らすことが出来るだけでなく、表面濃度が高い状態での電極の形成がエミッタ、ベース一緒に出来る可能性が見えたのである。



一方先に述べた 1956 年の Tanenbaum の 2 重拡散型シリコントランジスタの開発も捨てがたかった。三沢と私は論文に従ってトランジスタを作っては評価した。2 重拡散で NPN 構造を作り、ベースの電極はアルミニウムを蒸着、合金化してベース電極を取り出す方法であった。実験は私が担当した。しかし、何回やってもトランジスタ動作は確認できなかった。三沢は自分でトランジスタ動作測定器を設計して、それで測定を繰り返した。こうしてこの年も終わりに近い頃、三沢のトランジスタ測定器(ベース接地)でベース電流に対して僅かにコレクタ電流が流れたのであった。三沢は岩田、江崎を呼んできて、これはトランジスタが出来たということでしょうか、と興奮しながら聞いた。α(電流増幅率)は 0.1 にも達していなかった。何故だろう、どうして今まで出来なかったのが出来るようになったのだろう。もっと特性を良くするにはどうしたらよいだろう、などと自問する事が出来た。分かったことは簡単な事であった。アルミニウムの合金がベースまで達していなかったのである。アルミニウムの真空蒸着量を増せばよい、と分かってからは、特性は完全になった。歩留まりも良くなり、いくらでも出来るようになった。1958年1月のことであった。シリコン2重拡散型メサトランジスタが出来たのは他社より2年以上早いと思われるが、ソニーは何も発表していない。三沢は特性を測って、高周波特性が極めて優れている(40MHz 動作)ことを確認した。デモのオーディオ装置などを作って皆に見せたりした。ベル研究所で開発が進んだ時から約2年強の遅れである。でも開発を始めて10カ月の快挙であった。

この際、エミッタとベース電極の作り方を念のため述べると、真空蒸着装置にウェファを入れる前にメタルマスクを掛けておいて始めに金-アンチモンをエミッタになるところに穴が開くようにしておく。一旦取り出して、顕微鏡付きのジグでベースになる部分に穴が来るように調節して再度真空蒸着機に入れ、アルミニウムを蒸着し、取り出して、今度はストリップヒータで加熱合金化するのであった。当然その後メサエッチする。メサマスクはワックスを熱で融かし顕微鏡下で先端のとがった棒でワックスをすくい、手

でポタリとワックスの一滴をメサ部に落とすのである。

次にパッケージの仕方について説明する。まだその頃 thermo-compression bonding は知られていなかったの、アメリカでも使われた点接触型の電極をベース及びエミッタ電極金属の上に立て、スプリング作用で押しながら、反対部分をパッケージのベース及びエミッタ電極棒に半田付けし、余分な部分は切り取り、蓋を掛けてシールするのであった。あまりに容易に出来るようになったので喜んでやっていたが、本来のパワートランジスタの開発を忘れたわけでは無かった。

6. シリコンパワートランジスタの開発

テレビの水平偏向用のパワートランジスタの必要特性を調べ、それを実現するためには酸化膜マスクでの選択拡散(2重拡散)によるエミッタ、ベース構造が必要であるとの認識で開発を始めた。1958年2月頃である。実はその前年に単純2重拡散でベース電極を表面からアルミニウムワイアの合金で形成しようとしたパワートランジスタも試作したが失敗している。今回はその経験も加味して、上に述べた方式を採用した。電極はエミッタ、ベース同一金属構成でやることを考えた。当時ベル研究所ではチップは小さいが同一の概念で試作されたトランジスタも発表されていた。電極は真空蒸着によるアルミニウムであった。この頃には三沢、川名のチームに藤田信二が加わっている。

当時のシリコン単結晶は極めて高価であったがフランスのペシネ社から購入して実験に使った。また先に述べたシリコン単結晶引き上げ装置が稼働するとアメリカの Dupont から多結晶粉末を購入してこれで単結晶を引き上げて使った。担当は研究課の鎌田と製造1課(塚本課長)の三沢明である。結晶の直径は20mm程度であった。

チップサイズは1枚のウェファから2チップ取れるように12mm×6.5mmとした。酸化膜の選択的除去にはフォトリソグラフィの技術がまだ存在しなかったの、スコッチテープを張り付けて、ジグを用いてメスで切りこみを入れ、ピンセットで一方を剥がす方法で行った。三沢のアイデアである。それをフッ酸に浸漬するとテープのプラスチック部は剥がれるがその下の接着剤がマスクとして有効に使えるのであった。電極の形成法は薄い金と少し厚い銀の連続真空蒸着によって実現した。当然その後の熱処理で金はシリコンと合金化し、強固な接着を確保し、その上の銀に電極を半田付けして完成させた。裏面はエミッタ拡散前にベース拡散層を除去しておいて後、エミッタと同様な拡散を施し、その後表面と同じ金属を蒸着してヘッダーに直接半田付けしてオーム接続を可能にした。表面の真空蒸着には金属マスクを用いてベース、エミッタの所定部分に蒸着できるようにした。ここに至る前には多くの試行錯誤を続けた。銅のヘッダーに直接チップを半田で接着するのはおそらく世の中で初めてであったのではないかと思われる。それまでは膨張係数の小さいタングステンやモリブデンなどの金属を介して接着するのが常識であった。銅ヘッダーに直接接着しても過酷な温度サイクル試験で問題のないこ

とを確かめた。



2SC41 1959-12

最も大きな困難はコレクタ接合のリーク電流の大きい事だった。とてもとても実用化出来る様なものでは無かった。何故だろう、どうしたら解決できるのかが最大の課題であった。一つの手掛かりは小面積のPN接合のリーク電流は大面積に比してけた違いに小さいものが多いという事であった。いわゆる欠陥の存在である。更に引き上げた結晶のトップとボトムではボトムが極めて悪い率が多いという事であった。ボトムに欠陥或いは金属不純物が多い事を示していた。当然拡散の前処理がプロセス起因の欠陥を引き起こすことは分かっていたので、洗浄には細心の注意を払った。それでも当時の技術は今のようきれいに出来るわけでもなかった。また P_2O_5 をソースにしたエミッタのリン拡散では拡散後に表面に欠陥が生じることが多かった。微小な particle にリンが選択的に集合しリン珪酸ガラスのようなものを作り、それが拡散層を突き抜けて (spike) リーク電流を増大させるのであった。様々な対策を行ったが、それでもチップが大きければ歩留まりは急速に悪化することは避けがたかった。何とかして小さなチップで大きな電流を取れるようにしたいとの気持ちで最後はチップの大きさを $6\text{mm} \times 3.8\text{mm}$ まで縮小し、エミッタストライブを長手方向に2本作り、ベースはその外側に3本のストライブを作った。コレクタ耐圧 150V 以上、低いコレクタ飽和抵抗で 3A 以上を目指した。これは 8 インチテレビの仕様であった。この製法は見てきた通り

チップ毎の金属マスクとスコッチテープの切り貼りである。エミッタ拡散はチップ毎である。これでは量産は難しい。1959 年春には著者は製造準備のために製造技術課(吉田課長)に移った。トランジスタテレビにシリコンパワートランジスタを搭載する準備である。その後このトランジスタのマスキングはスプレー法に改良され、電極は櫛型電極に改良され、1960 年 1 月量産に移行された。

7. ソニーのトランジスタテレビ開発

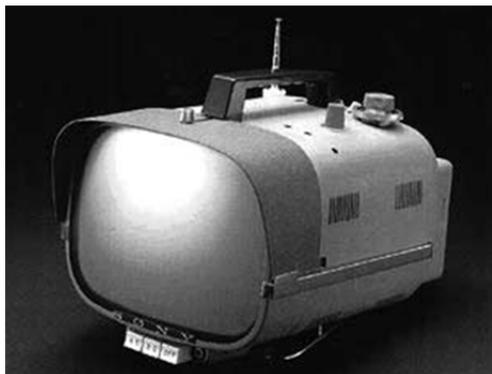
井深は先に述べたように、1956 年にはトランジスタテレビを次の開発目標として考えていた。実際にトランジスタテレビの開発に着手したのは 1957 年 1 月である。それでもトランジスタテレビ開発の実行指令は 1956 年 11 月に出されている。当時トランジスタテレビを商品として実現するために困難なトランジスタは:

- 1、チューナ用高周波トランジスタ
- 2、水平偏向用パワートランジスタ
- 3、垂直偏向用パワートランジスタ
- 4、ビデオドライブ用トランジスタ(ブラウン管のグリッド駆動)

である。1、の高周波トランジスタはベル研究所報告のゲルマニウムメサトランジスタで開発が行われた。2、は上に述べたシリコントランジスタである。3、はゲルマニウムパワートランジスタを当てることにした。4、は当時興味を持って開発されていたシリコングローン型トランジスタである。使用周波数帯域が広いだけでなくある程度消費電力も大きかったのでシリコンが望ましいとされた。これらのトランジスタの開発は平行して行われた。同時に試作したそれぞれのトランジスタの特性を評価し、実際に回路に組んでテレビの試作を行った。

最も困難だったのは 1、のチューナ用高周波トランジスタであった。試作品は出来るのだが歩留まりが低くて生産量が上がらないという問題が続いた。3、の垂直偏向用トランジスタでは生産は出来るのだが問題は信頼性であった。テレビ筐体内の温度が上がり、高い電圧を掛け続けると特性が劣化し、テレビ画像のゆがみが生じた。4、のビデオ出力用トランジスタは接合型でもチップからの熱放散を考慮してセラミックパッケージを採用した。問題は信頼性であった。チャンネルングの問題でリーク電流が増大することであった。

先の 2、のトランジスタの問題は飽和抵抗が大きいことである。先に述べたようにコレクタ飽和抵抗を下げるためには大きなチップを用いなければならない。すると歩留まりが exponential に低下するという問題であった。これらの問題は半導体開発とテレビ開発の技術者が一体となって開発を進めた。従って全社一丸となつての開発の様相を呈した。これらの問題はそう簡単に解決するわけではない。夜寝るのを惜しんで開発を続けたが、会社はトランジスタテレビの発売に向かってゴーサインを出した。



TV 8-301 8インチTV Tr 23石 Di 19石

1959年12月ソニーは東京三越でトランジスタテレビの展示会を開いた¹⁾。そして翌1960年春には世界最初のトランジスタテレビを発売した²⁾。世間は何時ソニーがトランジスタテレビを商品化するかという期待が高まっていた。井深が折に触れてその商品化について語っていたからである。でもこの発表はソニーのエンジニア全体の勝利であった。彼らは満足であった。その独自の形のテレビは注目を集めた。そして日本中がこのニュースに沸いた。ソニーはその誇りに酔いしれていた。

しかし、トランジスタテレビ8-301を発売して起こったことは不良返品が多い事だった。水平偏向用のパワートランジスタは良くショートして壊れた。原因はブラウン管内の放電である。高電圧がかかればこのトランジスタは持ち堪えられない。またチップのヘッダーへの半田付けの際に起こる小さいボイドが局部的に熱抵抗を大きくしてそこで破壊が起こった³⁾。

ゲルマニウムパワートランジスタは使用している内に画面のゆがみが生じて不評であった。シリコンのビデオ出力用トランジスタはリークが増大して壊れた。テレビ自身も好評とは言えなかった。返品が相次いだ。筆者はシリコンのパワートランジスタも飽和抵抗を下げなければこのトランジスタの将来性もテレビの将来性もないとみて、対応を考え続けた。遂にテレビ発売後間もなく、シリコンのチップの裏面を外側の額縁を残してその内側を極力薄くエッチングして後エミッタ拡散を行い(こうすればコレクタ側も高濃度に出来る)、真空蒸着電極形成後表面を下にしてそのへこんだ部分を半田で充填する方法を考えた。チップを薄くすれば良いのだが、薄くすれば、チップの取り扱いが難しく、チップの割れが生じてしまう。苦肉の対応であった。しかし、これによって特性は非常に改善された。コレクタ飽和抵抗は劇的に下がり、チップの半田付けの際のボイドも改善された。チップの裏側の半田は一旦チップの状態では溶解して吸蔵ガスを追い出すことにしたためもある。その後高耐圧パワートランジスタの世界では3重拡散型のコレクタ側の深い拡散層を有する構造になるのであるが、単純2重拡散型のパワートランジスタではこのトランジスタは世界最高の性能を達成したトランジスタであった。

更に大きな改善が1962年に行われた。それは POCl_3 によるリ

ンの拡散技術である。これは P_2O_5 をソースとした拡散が不安定でなお拡散のspikeを起こしやすい事は先に述べた。何とかこの改善を実現したいと液体ソースからの拡散に取り組み独力でこの新しい拡散技術を開発した(川名、矢木、特許出願成立したが独占権得られず。始めは PCl_3 と $\text{N}_2 + \text{O}_2$ を用いた)。 POCl_3 を用いてから直ちにこれを生産に適用した。プロセスの安定性が高まったのみならず、Clによる気相洗浄効果もあって歩留まりの向上に寄与した。

ソニーはこのTV 8-301に代わって小形ポータブルのトランジスタテレビを企画し、1962年4月5インチのトランジスタテレビTV 5-303を発売している。この際には水平偏向用及び電源用トランジスタはすべてシリコンパワートランジスタにし、新たに開発された2重拡散メサトランジスタをビデオドライブに採用し、また日本初のエピタキシャルシリコン2重拡散型メサトランジスタを垂直偏向用などに用いた。またブラウン管も工夫を凝らし、放電を起こりにくくし、また放電に際してもトランジスタに大電圧がかからない様な工夫も行われた⁴⁾。こうしてこのトランジスタテレビはアメリカに大量に輸出され大いに好評を博した。ソニーは次々と新しいテレビを開発し世に送り届けた。4インチから19インチの白黒のトランジスタテレビまでソニーは世に送り出したが、このシリコンパワートランジスタ12インチまでは使い続けられた。生産は10年以上続いた。岩間は水平偏向用パワートランジスタのテレビに使わない2級品の外販を命じ、電流増幅率の高いものは1960年当時1個34,200円という値段を付けたが、ユーザーには好評であった。



TV 5-303 5インチTV

エピタキシャル・シリコン中電力メサ型トランジスタは1960年塚本がアメリカからの新聞ニュースをいち早く見つけて、ベル研究所の後を追って直ちに開発を始めた。エビは三沢明、三沢敏雄が担当し、後に星の担当となった。トランジスタは川名が担当し1960年秋の電気学会で日本初のエピタキシャルトランジスタを発表した(川名、三沢、福井)。1961年早々にはテレビの垂直偏向用トランジスタの試作が完成したものである。この開発直後にこのトランジスタはエピタキシャル技術と共に塚本によってベル研究所に紹介されたが、ベル研究所が驚いてサンプルを置いてい

けと要望した話が伝わっている¹⁰⁾。この理由はテレビ用のトランジスタの仕様に合わせるように最小のチップ面積で対応しようとして、エピタキシャル層の抵抗率とその厚さを極限まで適正化したことによる。エピタキシャル層の基板との界面が気相中及びエピタキシー層への基板からの不純物拡散によってなだらかになっていたことも好都合であった。ソニーがその動きの先端を切っていたのである。この設計の有利さは後まで続いた。こうしてソニーはトランジスタテレビ時代の先鞭を切った。

8. トランジスタテレビの普及

1959年1月年頭に井深は週刊誌のインタビューで「私の正月の夢はトランジスタテレビの出現である」と抱負を語っている。そのための準備を進めていたからである。これを知って日本の電気各社は一層トランジスタテレビの開発に注力し、試作発表が続



1990年 ジョン・パーディーン博士と井深
SONY time capsule vol. 12

いた。3月には東芝が8インチテレビを、5月には日立が14インチ、17インチを発表している。そしてソニーは12月25日である。ソニーは発売のための発表であった。翌1960年4月30日に発売している。それに反し、他社は技術発表をしても商品発売は中々出来なかった。様々な問題があったと思われるが、中でも偏向回路のパワートランジスタの信頼性の問題が大きかった。ゲルマニウムトランジスタでは高温に耐えられないのである。シリコンのパワートランジスタが生産出来るまで待たなければならなかった。日立は1966年白黒トランジスタテレビを発売し⁹⁾、量産で成功を取めた。東芝はシリコンパワートランジスタの開発に注力し、テレビの水平偏向用として量産して1968年頃には生産量日本1位を誇った¹¹⁾。それでも、1960年に発売したソニーの白黒トランジスタテレビはシリコンパワートランジスタを用い、トランジスタテレビの先駆的な役割を果たした。白黒テレビが各社によって本格的にトランジスタ化されるのはかなり後のことであった。

カラーテレビが本格化するに伴いソニーも新たに開発してトリニオンというブラウン管を用いて業界に参入した。同時に発売に

当って全トランジスタにして13インチのセットを1968年に投入した¹¹⁾。日立は全トランジスタ化した19インチのカラーテレビを1969年に発売し⁹⁾、テレビのトランジスタ化の波は一気に広がった。水平偏向用のシリコンパワートランジスタも大幅な変革が行われた。そして、始めは信頼性の悪かった水平偏向用のトランジスタも次第に改善され、消費電力の低下も相まって本格的な普及を見たのだった。トランジスタの発展はこうして社会と産業に大きな変革をもたらした。

9. プレーナの時代

W. ShockleyがPalo Altoで始めたShockley Semiconductor Laboratoryから分かれたグループがFairchild Semiconductor Companyを作ったのは1957年で、シリコン拡散型のトランジスタをビジネスにした革命的なベンチャー企業であった。当然2重拡散型のシリコンメサトランジスタを始めたが、問題の一つは金属パッケージの蓋をハルス溶接で溶着する際の火花による金属片の飛散であった。これがメサ部に付着したり離れたりにするたびにリーク電流が変動した。

J. Hoerniはチップ表面全体を酸化膜で覆っておけば問題は防げると考えた。これが革命的な技術となったプレーナ技術の誕生の原点であった。基本的にはベル研究所の発見の延長であるが、技術の革新と特許としての意義は絶大であった。Fairchild社はこれによって急速に発展し、同時に1959年のR. NoyceによるICの発明につながった¹⁴⁾。

日本でもトランジスタ開発の先駆的な仕事をしてきたNECの長船は1959年会社の技術調査団のメンバーとして渡米し、GEを訪問している。帰国後シリコンメサトランジスタの開発に注力することを決め、翌年1960年2月にはシリコンメサトランジスタを完成させている。更に1961年、エピタキシャルトランジスタの開発も進め、この年の秋Fairchildの社長R. Noyceの訪問を受け、プレーナ技術の売り込みを提案された。嘗て長船がアメリカ訪問をした時に面識があったのを頼りにしての訪問であった。交渉は難航したが、翌1962年秋4.5%の特許料で合意に達した^{10,11)}。この間の長船の役割は大きかったと思われる。この1962年の秋、ソニーの岩間がFairchildのNoyceを訪問してプレーナ特許交渉を提案し、長船に後れを取ったことが分かった事実がある¹²⁾。NECがFairchildとプレーナ契約を結んだ利益は計り知れないと「日本半導体50年史」は記している。NECはEpitaxial planar transistorに注力し、Fairchildのトランジスタ技術に学んで一気にシリコントランジスタの生産量を拡大した。

日本の他社はプレーナ技術の特許料の高さに嫌気をさし、非プレーナ技術へと向かった。ソニーも会社としてはそうであったが、岩間はなんとしてもプレーナをやらなければならないと決めていた。当然epitaxial planar transistorが目標である。岩間は強引に組織を再編し、岩田に半導体開発課を作らせ、プレーナトランジスタ、IC、超高周波及び大電力のトランジスタの開発を主目的に定めた。epitaxial planar transistorの開発担当は川名、

矢木であった。epitaxy の担当は星であった。ここで先に述べた POCl_3 (特許ではハライド) によるリン拡散(川名、矢木)、planar high voltage 技術である guard ring 法(岩田、川名)、PN 接合の上の酸化膜上に張り出した金属による高耐圧技術(矢木)などが生み出され特許登録された。同時に planar で高耐圧、低飽和電圧の中電力トランジスタが開発された。またトランジスタラジオ用の IC なども開発された。一番の困難は酸化膜上の欠陥の低減であった。先のパワートランジスタも同じ問題を抱えていたのだが、今度はバルクの問題よりも酸化膜の欠陥の問題であった。この解決は中々出来ないうちに筆者が厚木工場転勤となり(1963年)、厚木まで引き継ぐことになった。それでもこの間に培った epitaxial planar transistor 技術は厚木工場で花開いて広く社内でも使われただけでなく、多く外販された。テレビに次いでオーディオの分野でもパワートランジスタは時代の先端を切って採用され、時代をリードした。ソニーは planar や IC、MOS などに対する開発規制があったりして、それ以後分野によっては他社に大きく後れを取った。それでもソニーはシリコントランジスタの先進的な一時代を作ったと信じている。

10. 井深、岩間のシリコンへ挑戦の意味

井深、岩間は日本初のトランジスタラジオ発売の翌年にはトランジスタテレビをやることを前提にシリコントランジスタ開発、生産を実行することを決意し、実行に移した。他社はゲルマニウムトランジスタの生産を始めたか、或いは開発中の頃であった。先にベル研究所の J. A. Hornbeck が述べたと記したように、1956年の Diffusion Symposium は参加会社に新技術導入への興奮を巻き起こさなかったが、東通工は違っていた。次はシリコンの時代になるというベルの信念が素直に東通工に伝わった。それはトランジスタテレビをやるという目標が明確だったことがその理由であると考えられる。この先進性がソニーを躍進させる原動力になった。井深の優れていたのは次の商品開発の目標が的確であったことである。それを考えると、その基本デバイスであるトランジスタは何でなければならぬかが明確になってきたのであろう。ベル研究所の今後はシリコン時代になるとする信念がそのままソニーの信念になった理由である。ベルがリレーを半導体に置き換えるためにはシリコンでなければならぬとした思想に通じるものである。岩間がその世界の流れを井深に的確に伝えたことも確かと思われる。

井深ははるか後に「自分は人より一寸先に仕事をやってきただけだ」と言ったと伝えられているが、この話はそれを良く表わしている。それは半導体と応用製品の発展の歴史の先端を行くものであったことが明らかである。彼は後に半導体の技術の流れに逆行する動きを見せたが、この時は時代の先端を正しく走り、世の中を牽引した。井深、岩間の先進的な指導によって、シリコントランジスタの技術の開発の歴史の一断面を記録出来たことを指導者に感謝しながら筆を置く。

以上

参考文献

1. “Microelectronics: Its Unusual Origin and Personality” Raymond M. Warner, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 48, No. 11, Nov. 2001
2. “Fifty Years of the Transistor: The Beginning of Silicon Technology” J. L. Moll, 1997 Symposium on VLSI Circuits Digest of Technical Papers
3. “The Origins of Diffused-Silicon Technology at Bell Labs, 1954-55” Nick Holonyak Jr., The Electro-Chemical Society Interface - Fall 2007
4. “Diffused Silicon Transistors and Switches (1954-55): The Beginnings of Integrated Circuit Technology” N. Holonyak Jr., Manuscript for 1998 ECS Silicon Symposium, (not published)
5. 「源流」ソニー創立40周年記念誌、ソニー、1986年
6. 「ソニーにおける初期のシリコントランジスタ」川名喜之、『技術史』第1号、日本科学史学会、2000年
7. 「ソニーもトランジスタテレビ用トランジスタの開発」川名喜之、半導体シニア協会ニュースレター No. 60 (2009年1月)
8. 「マイクロテレビの開発」沖栄次郎、平成15年度産業技術の集大成・体系化を行うことによるイノベーション創出の環境整備に関する調査研究報告書、2005年、日本機械工業連合会、研究産業協会
9. 「美しい映像を求めて一日立テレビ半世紀の歩み」由木幾夫、日立評論 Vol. 91, No. 03 (2009)、1999年
10. 「につぼん半導体半世紀」志村幸雄、ダイヤモンド社、1999年
11. 「日本半導体50年史」垂井康夫 監修、産業タイムス半導体産業新聞、2000年
12. 「ソニー初期の躍進と経営陣の苦闘」川名喜之、技術と経済543、2012. 5
13. “Diffusion Technologies at Bell Laboratories” Mark P. D. Burges, Western Electric - Main Page - Google Site
14. 「電子立国日本の自叙伝(中)」相田洋 NHK出版 1991
15. “Diffused Emitter and Base Silicon Transistors” M. Tanenbaum and D. E. Thomas, Bell System Technical Journal, Jan. 1956