

ラジオ用ゲルマニウムグロン型 高周波トランジスタの開発

木内 賢（ソニー学園湘北短大名誉教授、
元ソニー株）



1. まえがき

ソニーの前身である設立間もない小さな東京通信工業が米国ウエスタンエレクトリック社（WE社と略す）とトランジスタの技術特許契約を締結したのは1953年（昭和28年）のことでした。当時はラジオには使えない低周波用トランジスタしかありませんでした。

井深大氏（社長）がアメリカに行かれてWE社の昼食会で、トランジスタは補聴器ぐらいの低周波用にしか使えないと言われていた時に、ラジオを作ると発言し一斉に笑われたそうです。

当時日本ではミニチュア真空管を使用したポータブルラジオの全盛時代で、A電池（低電圧の真空管のフィラメント用）とB電池（高電圧の真空管のプレート用）を使用していましたが高価なB電池のもちが悪く、もったいなくて、もったいなくてスイッチを入れたり切ったりして聞いていたものでした。井深さんの目的は個人一人ひとりが持つことのできる小さなトランジスタラジオだったのです。トランジスタは低電圧小電流で働きますから電池の心配もなく、また寿命も極めて長く小型化できると考えたに違いありません。

2. ゲルマニウムトランジスタの製造工程

私が東京通信工業に入社したのは1954年（昭和29年）4月でした。その時にお聞きしたのはWE社からの「トランジスタ・テクノロジー」という技術書を岩間和夫氏（後のソニー社長）が中心となって先輩の方々が一生涯懸命勉強し、いよいよ実行段階になったということでした。私たち新入社員は先輩方の準備した装置の使い方の指導を受けながら活動を開始しました。私の担当は二酸化ゲルマニウム（ GeO_2 ）の還元からアロイ型トランジスタ用とグロン型トランジスタ用の単結晶の製造でした。

2.1 GeO_2 の還元

輸入した白い粉末状の GeO_2 を輸入した高純度のグラファイトで作ったボードに入れ水素還元炉の温度を965℃までゆっくり上昇させながら長時間かけてGeインゴットを作ります。

そのインゴットの電気抵抗率を測定することで大凡99.99%の純度であることがわかります。当時のGeインゴットの値段は純金よりも高価になり、これを扱う私の作業意欲も非常に高く時たま発生する小さな粒や欠片も指先を舐めて回収したものでした。

2.2 Geインゴットの更なる精製

トランジスタ用の単結晶を作るには更なる精製が必要で、国産の高周波加熱装置とゾーンリファイニングという技術で純粋なGeインゴットになるまで精製を繰り返します。そして電気抵抗率を測定し純度が99.99999999%になっていることを確かめます。

2.3 アロイ型トランジスタ

pnpアロイ型トランジスタの場合は最初に純粋なGeインゴットにn型になる不純物アンチモン（Sb）をドーピングゾーンレベリング法か、引き上げ法でn型の単結晶を作ります。その単結晶からトランジスタのベースとなる部分を切り出し表面化学処理後、p型になる不純物インジウム（In）のペレットを両面からアロイし、pnp接合を作製し各層にリードを取り付け組み立てればpnpアロイトランジスタが出来上がります。

2.4 グロン型トランジスタ

グロン型トランジスタにはダブルドープグロン型とレイトグロン型がありますがレイトグロン型は省略します。npnダブルドープグロン型トランジスタの場合は、最初に純粋なGeインゴットにn型になる不純物Sbをドーピングし、単結晶のシードを用いてn型の単結晶を成長させながらp型になる不純物ガリウム（Ga）をドーピングp型層を成長させながら、再度n型になる不純物Sbをドーピングn型層を成長させます。完成した単結晶からnpn層を有する部分を棒状に切り出し、表面化学処理後に各層にリードを取り付け組み立てれば完成です。

3. npnダブルドープグロン型 トランジスタの開発

3.1 グロン型単結晶の製造装置

グロン型単結晶を成長させる引き上げ機は精密な

引き上げ機構、引き上げ軸を回転させる機構、不純物をドーピングする機構とその他必要な機能を備えた精密機械です。設計製作は茜部資躬氏でした。引き上げ機内でGeインゴットを加熱融解する高周波加熱装置（米国ウエスチングハウス社製）と融解温度精密制御装置（米国リーズアンドノースラップ社製）を連結稼働させたのは岩田三郎氏でした。

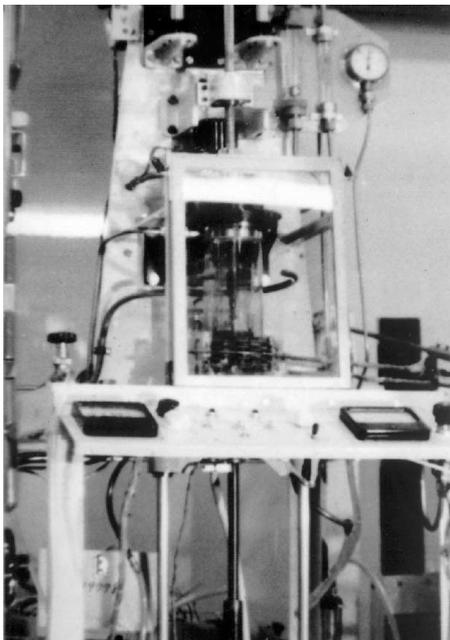


図1 引き上げ機の全形

3.2 グロン型単結晶の製造

グロン型単結晶の構造設計は私の直接上司の塚本哲男氏でした。私はこれらの装置を駆使して安定したグロン単結晶を成長させる引き上げ速度と温度を組み合わせた製造プログラムの開発に全力を注ぎました。引き上げシードの結晶軸はグロン単結晶の外形が角丸の六角形になる(111)を選びました。主な理由は単結晶に成長し易いことと外形が円形に近いので、回転させやすく温度分布も安定すると考えたからです。

高純度のグラファイト坩堝にトランジスタのコレクタになるn型部分から引き上げるために65グラムの高純度Geインゴットとn型濃度が $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 位になるようにSb-Geアロイを加え加熱融解します。温度が安定したらシードを回転させながら融液になじませ温度を少しずつ下げながら引き上げn型部分を成長させていきます(図2)。

直径が30mmになるまで成長させ、温度と成長速度が安定したらベースドーパントとしてGa-Geアロイをp型濃度が $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 位になるようにドーピング後数秒後にエミッタドーパントとしてSbをn型濃度が

$8 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 位になるようドーピングし、温度を下げながら引き上げ速度を上げながらエミッタ部分がnpnバーを切り出すのに十分な長さだけ引き上がったら、この結晶を融液から引き離し冷却してから取り出し、シードから切り離します。

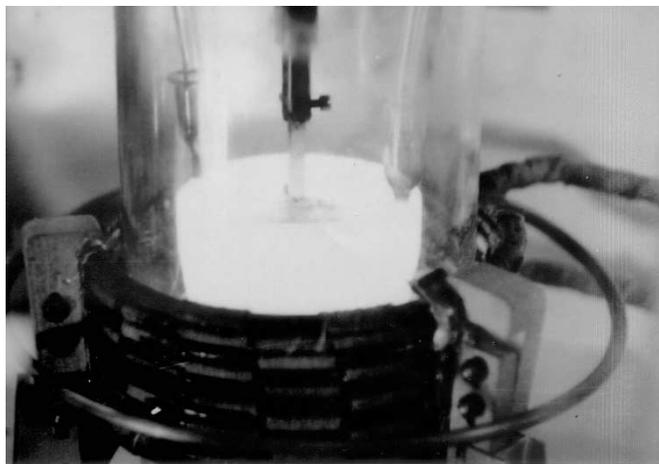


図2 n型部分が成長し始めたところ

3.3 グロン型単結晶の評価

引き上げたグロン単結晶がトランジスタになり得るかどうか評価する必要があります。まず単結晶から直径方向に沿って縦に断面となるように薄片を切り出しその両面が平面になるように丁寧に研磨しておきます。

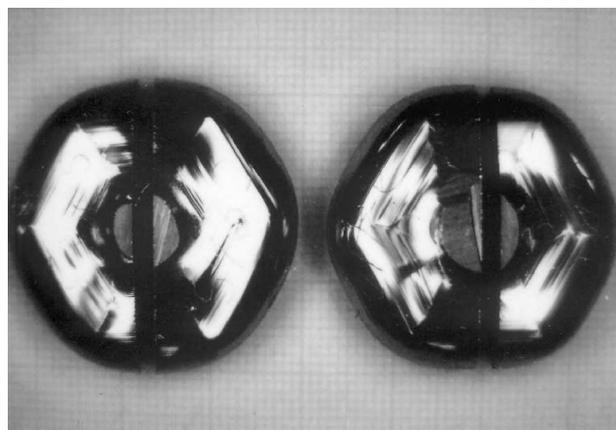


図3 単結晶から断面となる薄片の切り出し

- (1)単結晶本体のコレクタ部分の電気抵抗率測定
1.5Ωcm前後
- (2)単結晶本体のエミッタ部分の電気抵抗率測定
0.008 ~ 0.01Ωcm位
- (3)ベース層が出来ているかどうかの目視検査
研磨しておいた薄片を軽くエッチングし多数を目視検査した結果、直径30mmのグロン単結晶の周辺から5 ~ 6mmの範囲のベース層の全てがみつ

ているのです。npnバーの切り出せる有効面積は35%から45%しかなかったのです。

(4) ベース層の厚さ測定

薄片を再度研磨しコレクタ部とエミッタ部に測定電極を取り付け電気機械的に2 μm 単位で測定するのです。15 μm ~ 25 μm 位が望ましい厚さです。

3.4 グロン型npnトランジスタの組立

評価が終了したグロン型単結晶から細いnpnバーを切り出し化学処理後、n型のコレクタ端とエミッタ端をヘッダーの2本のリードにそれぞれ半田付けします。最も重要なp型のベース層への接続は直径25 μm のGa入り金線を、ベース位置を探りながらパルス電圧を加えボンディングします。わずかに溶解した部分はベース層のみならずコレクタ層エミッタ層にも広がりますが、急冷されるのでベース層にはオーミックコンタクト、コレクタとエミッタ層に対してはGa入り金線との間にpn接合が形成されるのでコレクタとエミッタ層がショートすることはなくnpn接合は健全しトランジスタとしての機能には全く問題はありません。このGa入り金線の片方をヘッダーの3本目のリードに取り付けます。

ベース層のできている部分で組み立てたトランジスタ(2T5型と命名、図4)の α 遮断周波数は一番高いものでも3メガヘルツ位しかありませんでした。

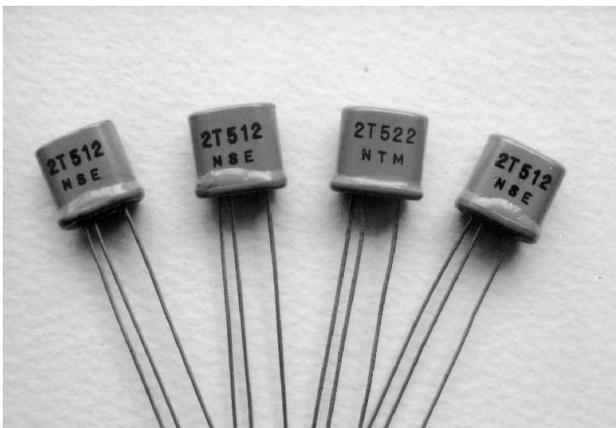


図4 2T5型トランジスタ

1個の単結晶から切り出せるnpnバーの数も少なく、組み立てた中から3メガヘルツ前後のものがとれる歩留も悪くラジオの量産どころではありませんでした。ラジオ開発担当部門は回路の設計、部品の開発に大変苦労し α 遮断周波数が3メガヘルツ前後のトランジスタが出来るのを待ちながら、その数だけのトランジスタラジオTR-55を製造販売していたのです。しかし、当時のミニチュア真空管ラジオと比較

すると感度がずっと悪く、そのメーカーの方々はソニーのラジオはオモチャだというわけで安心したとのことでした。

4 . npnダブルドープグロン型トランジスタの根本的改善

4.1 2T5型トランジスタの欠点

α 遮断周波数を高くして、高周波用トランジスタの歩留まりを高くするためにベース層を薄く10 μm 位にしたり、エミッタ効率を上げるためにエミッタ濃度を更に高くした実験をしました。その為の引き上げ条件とエミッタドーピング条件を詳細に検討しましたが、依然として単結晶周辺部のベース層は大きくつぶれていました。ベース層のつぶれは温度制御精度に起因するのではないかと考えましたが、結論としてベース層がつぶれるのはエミッタ部分の引き上げ中に高濃度のSbが中心部より温度の高い周辺部のベース層に拡散してつぶすのではないかと、またマイノリティキャリアの減速電界がベース中に生じ、ベース抵抗も高くなり結果として高周波特性を悪くしているという仮説を立てました。それを解決するためにエミッタ不純物のベース層への拡散を最少にし、ベース抵抗も下げる新しいエミッタドーピングを開発することになりました。

4.2 新しいエミッタドーピングの開発

Sbより拡散係数が小さいとされていた燐(P)を用いて色々な実験をしました。何しろPをドーブするために小さな錫(Sn)玉を作り大変乱暴な方法でしたがSn玉と赤燐を電気炉中で反応させてPを含むSn玉を作り上げました。これをエミッタドーパントとして正規のプログラムでグロン単結晶を引き上げたところ周辺部のベース層のつぶれは全くなく、予想より広いベース層になっていました。Pの拡散係数は当時の公表値より繰り返し実験の結果ずっと小さいことがわかりました。ベース層を20 μm 位に制御したグロン単結晶を引き上げ組み立てたところ α 遮断周波数はSbの場合より格段に高く15から20メガヘルツになっており高周波特性が大幅に改善されていました。一応実験には成功し早速2T7型と命名し生産を開始することになりました。

4.3 2T7型用グロン単結晶の更なる問題点とその改善

Pを含むSn玉をエミッタドーパントとして使用することにしましたが、Pの量を精密に秤定することができず困ってしまいました。しかし、天谷昭夫氏のSn-Pアロイの開発が成功し、これをエミッタドーパントと

して2T7型グロン単結晶の生産を開始しました。

先にも記したようにエミッタ効率を上げるためにエミッタをヘビードーピングにし、ベースとエミッタの濃度差が急激に大きく変化するpn接合になるようにしました。グロン単結晶周辺部のベース層のつぶれも全くなく高性能高周波グロン単結晶が完成したと思われました。しかし組み立ラインのベースボンディング工程でベースとエミッタのショートが頻発して大問題となっていました。

この危機を早急に解決するためにベースとエミッタの高濃度接合のボンディング限界を迫るためのサンプルを作り実験を開始しました。塚本さんの解析で、後でわかったことなのですが、Ga入り金線でベースリードを取り出すための電気パルスボンディングをしていたためにエミッタ側に非常に狭い高濃度どうしのpn接合ができ、このpn接合は常温でトンネル現象を起こすトンネル接合だったのです。実験の結果トンネル現象を起こさないエミッタの上限濃度がわかりました。

エミッタ濃度を精密に制御するにはSn-Pアロイでは無理で、もっと正確に秤定できるエミッタドーパントが必要になりました。最終的に天谷さんがInPを作り、それを細かくすりつぶしメトラータ秤で精密に秤量し薄いSn箔で小さく包んでエミッタドーパントを完成しました。エミッタを引き上げているときにInの偏析係数はPより約2桁小さいのでp型ドーパントとしての影響は無視できたのです。今度こそ2T7型用グロン単結晶を完成することができたのです。

5. 2T7型用グロン単結晶と 2T7型トランジスタの量産

2T7型グロン単結晶の生産が順調にスタートし引き上げ装置の台数が増えていきました。

今度はリーズアンドノーラップ社製の精密温度制御装置が時々不調になるのです。温度制御方式はグラファイト坩堝の温度を熱電対で検出しウエスチングハウス社製の高周波加熱装置のサイラトロン管を流れる電流を制御し、高周波加熱出力に変化を与え結果として坩堝の温度を制御するものでした。私はこの温度制御装置の国産化の必要性を痛感し当時の大倉電気(株)の木本照夫氏の絶大なご協力を得て達成することができました。一方ウエスチングハウス社製の高周波加熱装置は大変コンパクトで堅牢に出来ており、整流管、サイラトロン管、空冷式発振管、その他小物部品等を輸入して置き適時交換するだけ

で大きな故障に到ることなく最後の生産まで見事に働いてくれました。

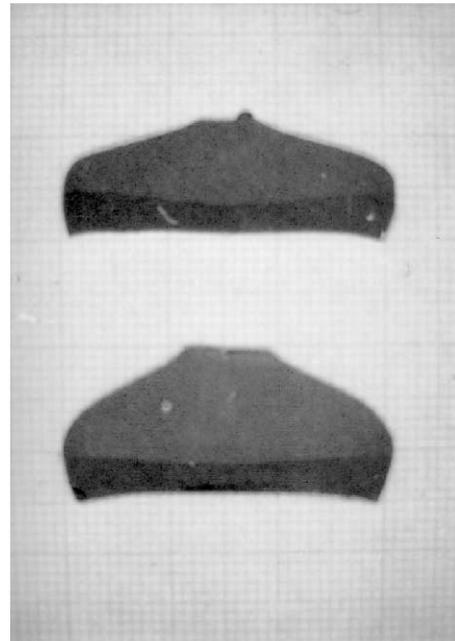


図5 2T7型グロン単結晶の断面

2T7型トランジスタの生産は1965年(昭和40年)頃までに約3,000万個が量産され、ゲルマニウムトランジスタラジオの黄金時代を築き上げたのです。私の記憶ではTR-610型ラジオだけでも百万台以上売れたと聞いております。「ソニーを買いたい」、「トランジスタを買いたい」とご来店下さったお客様もおいでになったようです。

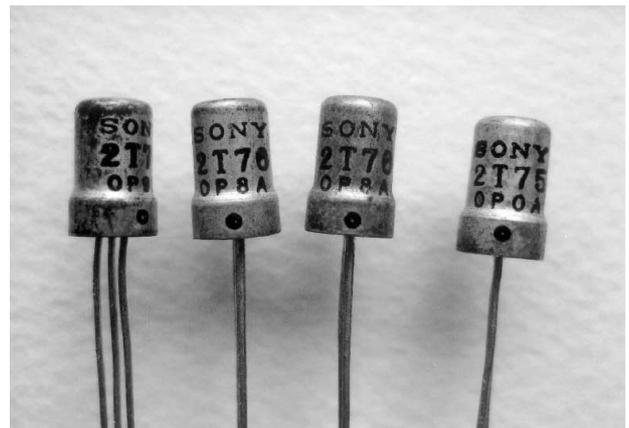


図6 2T7型トランジスタ

ゲルマニウムトランジスタの開発は周波数とパワー向上への挑戦が続きましたが、その座をゲルマニウムよりずっと耐熱性が高く坦体の移動度がずっと大きいシリコン(Si)トランジスタにバトンタッチすることになりました。