



IGBT開発の経緯(後)

中川 明夫 (株)東芝 セミコンダクター社 首席技監)



6. ノンラッチアップIGBTの開発(つづき)

最初に試作したロットの特性が良かったのはイオン注入でN⁺バッファを作成したことで高濃度で2μm程度の薄いN⁺バッファが実現できたためでした。2回目にエピウェハの作成を同じ課にお願いしたら、IGBTの重要さが認識されたためか、問題なく高濃度P⁺基板の上にN型のエピが成長できると言われ、次からは20μm程度の厚いN⁺バッファに変わりました。これによって特性は悪くなるのですがコストの観点からこの方法で行くことにしたのです。

さて、せっかく作成した最初のIGBTの特徴であった薄いN⁺バッファはRCAに先に発表されたため、もっと大きな目標を設定することにしました。それはラッチアップしないIGBTの開発です。そこで、意識的にラッチアップを防ぐ対策を行いました。それは特性が少しくらい悪くなくてもラッチアップしない構造を作ろうと決めたことです。寄生のサイリスタがラッチアップする電流密度とMOSチャネルから制限される素子の飽和電流の大小関係に注目し、ラッチアップする電流密度より素子の飽和電流を小さくする設計を意識的に行いました。素子に流れる電流がラッチアップする電流密度を絶対を超えなければラッチアップしないわけです¹¹⁾。これを実現するためチャネルの一部を切り取り飽和電流値を下げ、そこに正孔電流が容易にソース電極に抜けられるような低抵抗のバイパスを形成し、ラッチアップ電流値を増大させたのです。正孔電流が流れることでおきる電圧降下がPN接合のビルトイン電圧を超えな

ければラッチアップは起きないからです。これで特性は少し悪くなりますが、ラッチアップしない図3の構造のIGBTが実現できました。

一旦ラッチアップしないIGBTが実現すると、最初に述べたようにIGBTも負荷短絡に持つことがわかり、バイポーラトランジスタを置き換えられるIGBTが実現可能とわかったのです。これ以降の開発は一直線に進みました。そして、世界初の大電流IGBTの製品化へと繋がり、多くのメーカーがIGBTの開発に参入することになったのです。

ラッチアップしないIGBTを開発しようと考えたのはBaligaが特性が悪くてもIGBTの原理を論文発表したように、たとえ特性が悪くても原理を最初に示すことの重要性を教えられたからでした。

7. デバイスシミュレータの効能

IGBTの開発にあたってデバイスシミュレータは設計に大いに役立ちました。いかにも見てきたように内部の電子・正孔の分布がわかり、動作原理を絵に描くように教えてくれたからです。

特に(1)電子電流と正孔電流が如何に流れるか、(2)ゲートポリシリコン幅が広がるとオン電圧が何故低下するか(3)ターンオフ時にキャリアが如何に振る舞うかを解析することでラッチアップする電流値がゲートポリシリコン幅に逆比例すること¹²⁾や、ターンオフ時のアバランシェ耐圧が正孔電流の存在で減少すること¹¹⁾などIGBT開発当初から高度な解析が可能となりました。

ラッチアップ電流はポリシリコン幅が広がると低下することから金属ゲートが存在する部分の広いゲートポリシリコンの下はP⁺拡散で覆いました。ターンオフ時の正の電荷N⁺はドナー濃度に加えて正孔電流J_pが流れる分だけ増加するため耐圧V_{BD}が次式に示すように実効的に下がることを1985年に発表しました¹¹⁾。

$$N_+ = N_D + J_p/qV_s$$

$$V_{BD} = 60(E_G/1.1)^{1.5}(N_+/10^{16})^{-3/4}$$

当社で開発したパワーデバイスシミュレータ

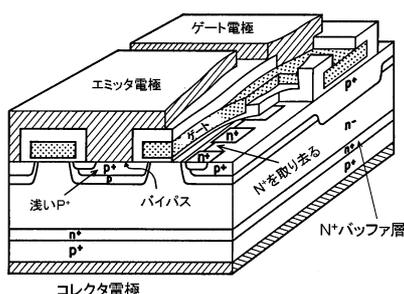


図3 最初のNon-Latch-Up IGBTの構造

TONADDEII¹³⁾は以下のような変遷をへて市販のシミュレータ導入まで有効さを発揮したのです。

- 1981年 TONADDE I 1次元モデル開発
- 1982年 TONADDE II 2次元モデル開発
- 1987年 効率的な反復解法ILUBCGの導入
- 1991年 TONADDE IIC 外部回路機能追加

8. 最初の製品化

実際の製品化はまた別の力学で進みました。開発は総合研究所、製品・商品化は事業部という区別がありました。私たちの総合研究所ではPベース拡散は5 μ m程度に浅いものを用い、リソグラフィのあわせ精度もキャノンのPLAを用いたため当時のマニュアル合わせの限界であるコンタクトエッジからポリシリコンのエッジまで7 μ mであったと思います。また、Pベースの幅30 μ m、ゲート幅は20 μ m、セルピッチは50 μ mと最初のIGBTは大きなセルピッチでした。しかし、工場での生産性を考えたらPベース拡散深さは10 μ m、コンタクトエッジからポリシリコンのエッジまで10 μ mというゆるい精度で当時の担当者である秀島氏が設計しました。チャンネル長が長くなったためチャンネルを切るまでもなく飽和電流値が下がり、Pベース拡散を深くしたためにシート抵抗値が下がりラッチアップ耐量も増えたため自然にノンラッチアップ構造になったのです。総合研究所と事業部の考え方の差で自ずと最終設計構造は異なったのです。これ以外のラッチアップ防止対策は総合研究所の思想をそのまま継承して1985年最初の製品500V25A、2in1のモジュールが製品化(図4参照)されたのです。

9. IGBT特許

IGBTの基本特許は現在ではBecke等が1980年に出願したUSP4364073となっていますが、これには裏話があります。「いかなる動作条件下でも寄生サイリスタがラッチアップしない(no thyristor action occurs under any device operating conditions)」と言う限定をつけることで

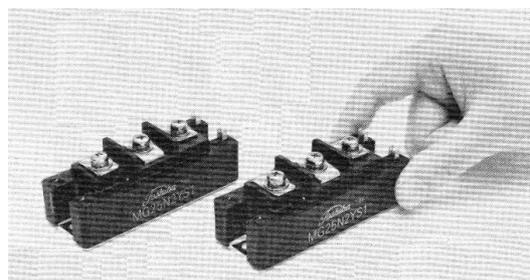


図4 最初に製品化したIGBTモジュール

IGBTの特許を成立させたのです。実はそれ以前にJ. D. Plummerが1978年に横型MOSサイリスタ構造でIGBTの動作モードを確認、論文発表し¹⁴⁾、特許出願します。PlummerはBeckeより早い出願であったためサイリスタ構成でのIGBT動作の特許¹⁵⁾を取得できましたが、その動作条件にはサイリスタ動作のモードが同時に共存するというのを含んでいたのです。1984年、ラッチアップしないIGBTが実現したことでサイリスタ動作を完全になくしたBecke特許がIGBTの基本特許になります。現在のIGBTはラッチアップしないIGBTを実質上意味していますが、開発の当初はサイリスタ構造でトランジスタ動作をさせることがIGBTであり、寄生サイリスタ動作の完全な排除ということは意識されていなかったと言って良いのです。実際、BaligaがIGBTの発見と言っているのはMOSサイリスタがIGBT的に動作することを発見したことを指して言っているのです。Beckeの特許はこのようなサイリスタでのIGBT動作が公知であったため「no thyristor action occurs under any device operating conditions」と言う限定をつけなければ特許化できず、逆にこれが幸いして基本特許に位置づけられるのです。しかし、いかにそれを実現するかは述べられていません。

一方、東芝総合研究所ではラッチアップしないIGBTの基本特許の取得を目指し、20件以上の継続、一部継続の米国出願を繰り返しました。その結果、数値限定したIGBT特許から、数値限定を省いた飽和電流とラッチアップ電流の大小関係に基づく特許、ストライプ構造の特許など10件以上のUSP取得に成功しました¹⁶⁾。特許取得には発明者の執念と努力が重要かつ必要です。

10. 1800V高耐压IGBTの開発

1983年4月から1985年3月までで600V、1200VのIGBTの開発が終了し、1985年4月からは1400V以上のIGBTの開発に着手しました。当時同じ電子部品研究所の内部で新保氏のグループがシリコンウェハを直接張り合わせる直接接合技術¹⁷⁾を開発し、エピに代えてウェハ接合技術を用いた高耐压IGBTの開発に着手しました。あまりクリーンネスが確保されていないクリーンベンチで接着したウェハは拡散炉でアニールするとウェハの2、3箇所火山が噴火したように穴が開いたのです。それでも一度アニールすれば以後の噴火はなくウェハを洗浄してその上にIGBTを作成できました。張り合わせる位置は(1)NバッファとPエミッタ界面、(2)Pエミッタ内部と2種類

を行いました。(1)はNバッファ拡散を行ったウェハにP⁺基板を接着し、(2)はNバッファと浅いP⁺拡散を行ったウェハにP⁺基板を接着することで実現しました。(1)は事業部で、(2)は総研が担当しました。接着界面に多量の欠陥が存在するため、特に(1)はPエミッタの注入効率が下がり良好な特性を実現し、実際に製品化まで進みました。総合研究所では1800V IGBTを開発し論文発表を行いました¹⁸⁾。

高耐圧素子になるほど最適なポリシリコンゲート幅が広がるため、1800V高耐圧IGBTでは最適なポリシリコン幅が40 μ m以上に広がり、ゲート幅が100 μ mと広いIGBTの試作も行いましたが、ラッチアップ電流値が低下してゲートポリシリコン幅の最適化に苦労したことを覚えています。当時は露光技術が稚拙で微細加工が思うようにできず、ラッチアップ電流値を大きくできなかったためです。その後、エピウェハの価格が下がり、接着ウェハ使用のメリットがなくなりました。

11. GTO置き換えへの取り組みとIE効果の発見

IGBTでバイポーラトランジスタの置き換えが確実となったころ、次はGTOのMOSゲート化であるということが合言葉になりました。1989年頃、GTOをMOSゲート化する研究開発が総合研究所で始まりました。IGBTを2500V以上に高耐圧化することは電圧降下が高くなりすぎて無理というのが当時の一般的な見解でした。そこで、GTOのゲート・カソード間をMOSFETでショートして電流を切るMOSGTO構造など最適な素子構造を探索する時期が数年間続きました。当時の私はSOIウェハを用いた1チップインバータICの開発が本務であり、傍らでデバイスシミュレータを用いて次世代GTOの新構造探索のための2、3人のチームをまとめる立場にありました。

GTO構造のMOSゲート化は遅々として進展しませんでした。デバイスシミュレータによる検討は意外な展開を迎えました。1992年、トレンチIGBTでトレンチで挟まれるメサの幅を狭くし、ゲートとなるトレンチ幅を広くした構造のIGBTは4.5kVでもGTO並みにオン電圧が低いことを北川氏が見出したのです。IGBTでもサイリスタと同様なU字型のキャリア分布が実現可能なことがわかりました。この計算内容を詳細に検討してまとめた結果を1993年のIEDMでIEGTとして発表しました¹⁹⁾。今で言うIE効果の発見でした。これはデバイスシミュレータの有効性

を示した最も良い事例のひとつです。この発見が契機となって、2000年には4.5kVのIGBTが製品化されることになり、GTOの置き換えが実現しました。

開発当初、IGBTは高耐圧にも向いていると考えたことが実現したわけです。しかし、GTOの置き換えにはIGBTの開発から実に15年の開発期間を要しました。それは4.5kVのような高耐圧IGBTは素子の電圧降下が大きくなりすぎてしまうという既成概念の打破に時間を要したためでありました。

12. 将来展望

エネルギー問題、地球温暖化などの環境問題が注目を集めています。電力を効率よく使いムダをなくして、これらを緩和する有力な手段としてパワーエレクトロニクスが注目を集めています。その有力素子がIGBTというわけです。IGBTは1990年代、および21世紀になってからも特性の改善が進みました。主な技術は電子の注入を促進して電圧降下を下げるIE効果と高速化を実現するため薄いウェハを用いる技術です。最近では薄いウェハを用い、イオン注入で低濃度のP層を形成して正孔の注入を抑え、ライフタイム制御を使わずに温度によらず高速化を実現する手法に変わっています。このようにIGBTは今後も特性の改善が期待できますが、SiCのような新材料を採用することで大幅な特性の改善を行う動きも出てきています。より良いパワー素子が生まれることでパワーエレクトロニクスの進展が加速されれば、地球温暖化などの地球環境やエネルギー問題の解決に大きく貢献することが期待できます。

参考文献

- 11) A. Nakagawa et. al., IEEE IEDM Tech Digest, p.150 (1985)
- 12) A. Nakagawa et al., IEEE EDL, EDL-6, p.378(1985)
- 13) A. Nakagawa et. al., Proc. of ISPSD, p.42 (1988)
A. Nakagawa et. al., Proc. of ISPSD, p.32 (1990)
- 14) B. W. Scharf et. al., ISSCC Digest Technical Papers p.222 (1978)
- 15) J. D. Plummer, USP 4199774 and B1 Re33209
- 16) USP 6025622, 5086323, 4672407 etc.
- 17) M. Shimbo et. al., Ext. Abs. 169th Electrochem. Soc. Meeting, p.337 (1986)
- 18) A. Nakagawa et. al., IEEE IEDM Tech Digest, p.122 (1986)
- 19) M. Kitagawa et. al., IEEE IEDM Tech. Digest p679 (1993)