

IGBT 発展の経緯と限界特性

History of IGBT development and the limit of IGBT electrical characteristics

中川 明夫

中川コンサルティング事務所(<http://www.ne.jp/asahi/capri/ocean/>) E-mail: akio.nakagawa@nifty.com

1. 概要

IGBTは今日、エアコン、洗濯機、エレベータ、太陽光発電、風力発電、鉄道や新幹線そしてハイブリッド車等その応用はエネルギー変換全般に及ぶ。電流値は数アンペアから数百アンペア、電圧は 600V から 6000V になる。IGBT はその誕生から 30 年あまりの新しい素子である。著者は幸運にもその初期の開発に携わって来たので開発経緯と限界特性に関して以下にまとめる。

2. IGBT の開発の経緯

【Non-latch-Up IGBT の開発】

IGBT の歴史は 1968 年の山上特許[1]にまで遡る。実験的に動作が確認されたのは 1978 年 B. W. Scharf と J. D. Plummer が ISSCC に発表した“MOS-Controlled Triac Devices” [2]が最初である。縦型 IGBT の原型は 1982 年に Baliga が IEDM で発表した[3]。しかし、初期の IGBT はラッチアップしやすく実用には適さなかった。著者等はラッチアップしない IGBT を考案し、世界初の Non-latch-Up IGBT を 1984 年 IEDM で発表した[4]。Non-latch-Up IGBT の実現によって、IGBT は壊れやすいというそれ以前の常識を打ち破り、負荷なしで素子を電源に直結して素子をオンさせても破壊しない負荷短絡耐量を初めて実現した。この時の破壊に至るパワーロスはいわゆる BTr の理論限界 $2 \times 10^5 \text{W/cm}^2$ を超える $5 \times 10^5 \text{W/cm}^2$ を実現した[5]。これによって Non-Latch-Up IGBT は IGBT の実質的設計標準となった。スイッチング時間は、1200V 素子で $1.8 \mu\text{s}$ と長かったが、その後、素子設計ルール微細化や素子構造の進展により現在では $0.1\text{-}0.3 \mu\text{s}$ に改善されている。

高耐圧パワーMOSFET は IGBT より早く 1980 年頃に製品化された。パワーMOSFET は BTr に見られるセカンドブレイクダウンがなく破壊に強くスイッチングスピードが早く、かつ絶縁ゲートで使い勝手が良いため、 BTr を置き換えると期待された。しかし、オン抵抗が高いため 200V 以下の BTr を置き換えるに留まった。そのため高耐圧の絶縁ゲート素子実現の要望が強まった。そのような期待の中で登場したのが Non-latch-Up IGBT であった。図 1 はラッチアップを防止するための設計原理を示す。Non-latch-Up IGBT では「素子の飽和電流値をラッチアップする電流値より小さく設計」した。具体的には素子のソース拡散層を周期的に切り取ることでチャンネル幅を短くした。また、切り取った部分は正孔電流が流れやすい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。

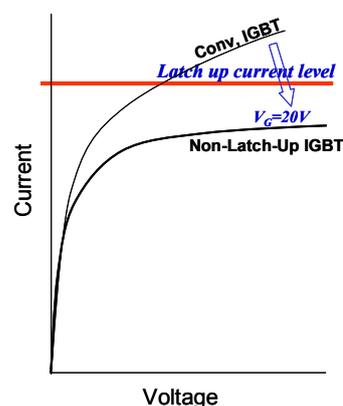


図 1 Non-Latch-Up IGBT

【高耐圧 IGBT と IE 効果】

IGBT は MOSFET が PNP Tr を駆動するという等価回路で表される。この構成では高耐圧化した場合、素子抵抗が増大する問題が起きるため IGBT の動作モードをトランジスタ動作からサイリスタ動作に変える必要がある。そのためには IGBT 内の MOS チャンネルから注入される電子電流の注入効率を高める必要がある。これを実現したのが著者のグループの北川が提案した IE 効果 (Injection Enhancement) [6] であり、紙面の関係で詳しい説明は文献に譲るが、これによって 4.5kV の IGBT が実現した。

【薄いウェハ IGBT (FS-IGBT)】

当初の IGBT ではスイッチングスピードを早くするため電子線照射等を行いキャリアの寿命を短くし

た。しかし、その後、ノンパンチスルー型 IGBT の出現によってキャリアの寿命を下げるよりも P エミッタの注入効率を下げるほうが全体の特性を改善できることが示唆された。更にウェハを 50 μm 程度に薄くすることが IGBT の特性改善には有効であることが 2000 年に著者のグループの末代[7]とインフィニオンの Laska 等[8]によって独立に提案された。今日ではこの薄いウェハを用いて、裏側に低濃度 N バッファと低濃度の P エミッタをイオン注入で形成する FS-IGBT が主流となっている。

【IGBT の理論限界と MOSFET-mode IGBT】

当初、IGBT の理想はパワー MOSFET の抵抗を低減することにあった。すなわち(1)正孔は N ベースに蓄積させて伝導度変調を起こし N ベースの抵抗を下げる(2)電流は移動度の大きい電子電流で流す、と言うように役割を分けることであった。電流を電子電流のみで流すことはトレンチゲート間のメサ幅を 40nm 程度に狭くすることで実現できる。著者は 2006 年にこの構造を提案し、IGBT の理論限界(図 2)を予測した[9]。今後、理論限界に近づける努力が重要になる。

一方、コレクタ P 層の注入効率を下げ、電子電流の全電流に占める割合を移動度の比: $\mu_n/(\mu_n+\mu_p)$ 以上にした IGBT を MOSFET-mode IGBT[10]と呼ぶ。この IGBT は FS-IGBT の高速化の上で有効な手法であるが、負荷短絡時に N バッファ-N ベース接合に高電界が表われ大きなインパクトイオン化が生じて電流集中が生じやすいことが TCAD の解析から明らかになっている[11]。今後、如何に MOSFET-mode IGBT を使いこなすかが課題である。

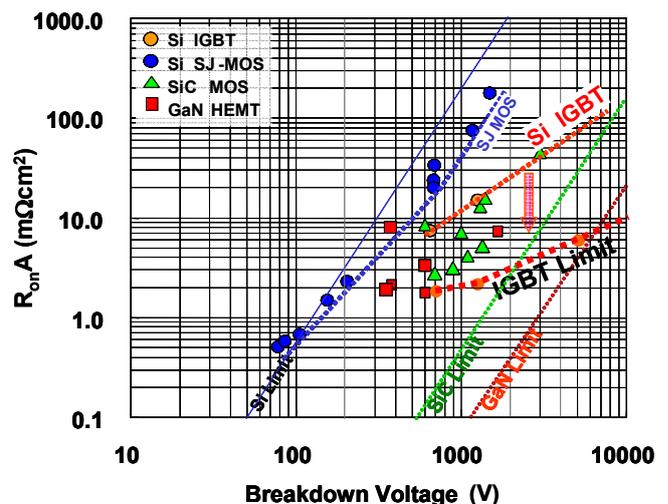


図 2 IGBT の理論限界

3. デバイス評価の新指標 NFOM

Si や SiC 等の材料が変わっても素子特性の正確な比較が重要である。従来はオン抵抗が比較の指標に用いられてきたが、新しい指標 NFOM としてオン抵抗 R_{on} と内部蓄積電荷 Q_{str} の積: $R_{on}Q_{str}$ を用いるのが素子の高速性能評価で有効であることを 2003 年春応物予稿集(29p-ZB-18, p. 456)に提案した[12, 13]。スイッチング時間 $T_{sw}=Q_{str}/J$ 、オン電圧 $V_F=R_{on} \cdot J$ であるから $NFOM=T_{sw} \cdot V_F$ とも書ける。ここで J は電流密度である。この指標では図 3 に示すように新材料素子とシリコンの差は縮まる。

【参考文献】

[1]山上他 日本特許 S47-21739
 [2] B.W. Scharf et al., 1978 ISSCC Digest, p.223
 [3] B.J. Baliga et al., 1982 IEDM Tech. Digest, p.264
 [4] A. Nakagawa et al., 1984 IEDM Tech Digest, p.860
 [5] A. Nakagawa et al., 1985 IEDM Tech Digest, p.150
 [6] M. Kitagawa et al., 1993 IEDM Tech Digest, p.679
 [7] T. Matsudai et al., Proc. of IPEC 2000, p.292
 [8] T. Laska et al., Proc. of ISPSD'2000, p.355
 [9] A. Nakagawa, Proc. of ISPSD'2006, p.5
 [10] A. Nakagawa et al., Proc. of ISPSD'2004, p.103
 [11] M. Tanaka et al., Proc. of ISPSD'2014, p.119
 [12] 中川明夫他, 電気学会誌, 平成 17 年 12 月号, p.758
 [13] A. Nakagawa et al., Proc. of MIEL 2006, p.167

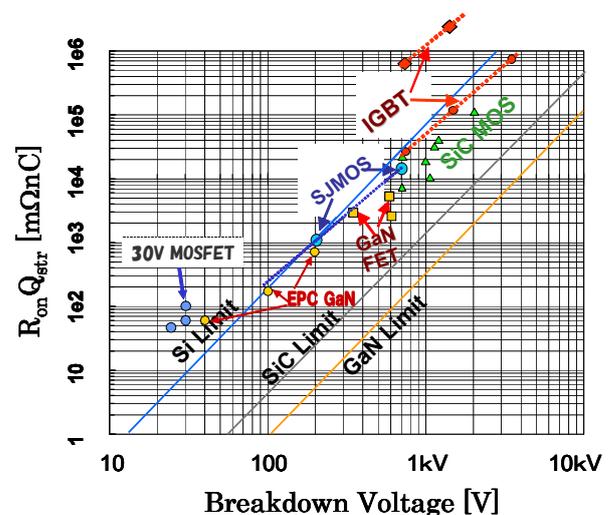


図 3 新しい指標 NFOM