

シリコンパワーデバイスの発展と新材料デバイスの展開（連載）

岩室 憲幸

筑波大学 数理物質系

第3回 絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ「IGBT」の誕生

概要

現在、中・高耐圧域のパワーデバイスの主役といえばシリコン IGBT であることに疑いの余地はない。しかしながらこのデバイスの誕生は古く、いまからちょうど 30 年前の 1985 年に(株)東芝から初めて製品化された。パワー MOSFET という「兄貴分」の存在を十二分に活用することで、IGBT は当時の主役であったサイリスタやバイポーラトランジスタからその座を奪ったのである。

本文

パワーエレクトロニクスという言葉は、1973 年に W.E.Newell 氏が第 1 回 PESC (Power Electronics Specialist Conference) の基調講演によって初めて提起された。彼は、エレクトロニクスと電力・制御にまたがる技術分野の重要性と可能性を示し、これをパワーエレクトロニクスと名付けた。また、将来の電気製品には半導体スイッチが必須となり、その製品の優劣はパワーエレクトロニクス技術で決まるであろうとも述べている。さらに W.E.Newell 氏は、パワーエレクトロニクス技術の進展には、ゲート信号で簡単にオフできる半導体デバイスが必要とも述べており、かつその誕生を切望していた。しかしながら 1973 年当時のパワーデバイスと言え、一度オンしたらオフできないサイリスタとダイオードが主流であった。ベース電極への信号によってオフできるバイポーラトランジスタは高電圧印加時の動作中に破壊する「二次降伏」という問題を抱えており、またゲート信号でオフできる GTO サイリスタも 1kV/100A 程度のものが試作されたにすぎず、共に市場に大きく展開されるというレベルではなかった。

1980 年代に入ると、パワーエレクトロニクスはようやく世界で認知されるようになる。1983 年、日本の電気学会主催で東京にて IPEC (International Power Electronics Conference) が開催された。日本がパワーエレクトロニクス技術で世界をリードするという姿勢を示した国際会議であった。このころから上述のサイリスタから、ゲート信号にてスイッチング制御が可能な GTO サイリスタやバイポーラトランジスタの開発が盛んになってくる。たとえば電車の直流モータの速度制御のためのチョッパ用に使われていた東芝が 2.5kV/2kA クラスの GTO サイリスタを開発、またトランジスタでは AC200V ラインの誘導モータや溶接機向けに富士電機が 450V/50A のダーリントントランジスタを製品化した。このデバイスは、当時の IC 技術では広く使われていたプレーナ技術、すなわち素子表面をシリコン酸化膜で覆う技術をいち早く適用したことにより、耐圧特性をはじめとする

長期信頼性に優れていたという特徴があった。その後、三菱電機からも 450V トランジスタが製品化され、低価格化と相まってバイポーラトランジスタは市場に広まっていったのである。その結果、1980 年代末までに、産業用インバータやエレベータ、さらには「インバータ」の名が世間に広まるきっかけとなった家庭用エアコンなどの中容量用途ではバイポーラトランジスタ、またそれ以上の大容量領域の電鉄、製鉄用の圧延機、大型電源等は GTO サイリスタ、という棲み分けも確立し、日本製のバイポーラトランジスタと GTO サイリスタがパワーデバイスの世界を席卷した。W.E.Newell 氏が切望した「ゲート信号で簡単にオン・オフできる半導体デバイスの出現」が 1980 年代末にようやく実現したのである。

絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ「IGBT」(Insulated Gate Bipolar Transistor)は 1982 年米国 RCA の Becke 氏らによって発明された。当時は COMFET という名で呼ばれており、Becke 氏は「IGBT の発明者」として世界では認識されている。しかしながらこの構成の素子は 1968 年に三菱電機の山上氏により出願され、1972 年には特許となっている⁽¹⁾(図 1 参照)。その意味で IGBT は日本発祥のパワーデバイスともいえる。図 2 は、GTO サイリスタ、バイポーラトランジスタ、パワー MOSFET、IGBT の素子断面構造の概略図である。IGBT (MOSFET) と GTO サイリスタならびにバイポーラトランジスタの構造上の大きな違いとして、IGBT (MOSFET) はゲート電極が絶縁膜であるシリコン酸化膜 (SiO_2) 上に形成されているのに対し、GTO サイリスタとバイポーラトランジスタはゲート電極 (バイポーラトランジスタではベース電極) が直接 p 型半導体に接触している点がある。IGBT (MOSFET) のオン、オフはこのゲート電極とシリコン酸化膜、さらには Si 半導体で構成される「コンデンサー」に少量の電荷を充電・放電させることで行うのである。つまり、ゲート電極から絶縁膜であるシリコン酸化膜を介して、シリコン半導体を制御する構造となっている。この構造が IGBT の名前の先頭の 2 文字「IG」、Insulated Gate なのである。これは、MOSFET の最初の 3 文字「MOS」、Metal-Oxide-Semiconductor と同じ意味である。一方 GTO サイリスタ、バイポーラトランジスタは p 型シリコン半導体に多くの電荷 (電流) を供給、または引き抜くことで半導体内の pn 接合をオン・オフさせてスイッチング動作を行う。このオン、オフ動作の違いにより、IGBT (MOSFET) はそのスイッチングに必要な電力 (駆動電力と言う) が極めて小さくて済むため、駆動回路が GTO サイリスタ等に比べ極めて簡略化できたのである。つまり「より一層簡単にオン・オフできる半導体デバイス」が出現したのである。これはパワエレ装置の小型化、高機能化等に非常にメリットをもたらすこととなる。しかしながら、開発当初の IGBT は、素子内寄生サイリスタがラッチアップしてすぐ壊れてしまうという大きな課題を抱えていた。それが、1984 年、東芝の中川氏が発表した Non latch up (ノンラッチアップ) 構造の発明により素子破壊耐量を大幅に向上することができた。この新構造の発明により、1985 年世界で初めて 1000V クラス IGBT モジュールが日本の東芝から製品化され、AC480V のインバータに使われたのである。

ここで、図 2 の IGBT とパワー MOSFET の断面構造を今一度比べてほしい。一見するとその構造はほとんど同じである。唯一の違いは Si 基板の導電型がパワー MOSFET は n 型であるのに対し IGBT は p 型である点だけである。これは IGBT が普及する上で非常に幸運なことであった。パワー MOSFET は IGBT 誕生

の数年前から販売されており、その駆動電力が小さいことによる使いやすさ、さらには高速スイッチングを有するという特徴から市場を拡大していた。しかしながら、600V クラス以上の中・高耐圧用途になると、n-層を厚くしなければならないためそのオン抵抗が大きくなるという欠点が顕在化していた。そこに MOSFET と同様の簡便な駆動回路が使える、かつ基板を p 型にすることによってバイポーラ動作を活用した低オン抵抗の IGBT が出てきたのである。これはデバイスの使い手であるパワーエレクトロニクス技術者だけでなく、作り手であるパワーデバイス技術者にもメリットがあった。つまり IGBT を作る際に、生産のために投入するシリコンウェハの極性を、単に n 型から p 型に置き換えるだけで、従来の MOSFET 製造ラインに新規投資をほとんどせず、低オン抵抗という特長を有する新型デバイスの IGBT がたちどころにできる、ということの意味しているからである。

このようにして、低オン抵抗で素子が壊れにくく、駆動電力が小さくて済み、かつ MOSFET 製造装置に対し新規設備投資がほとんどいらないという特長を持った IGBT が誕生したのである。発売当初の IGBT は、そのオン抵抗が同じバイポーラ動作のバイポーラトランジスタよりも高かったため大きな普及はみられなかったが、IGBT にとっての「兄貴分」である MOSFET の特性改善技術を踏襲する、具体的には表面セルの微細化、特に pwell 層の微細化によってオン抵抗が劇的に低減し、600V クラスでは 1990 年代前半にダーリントン接続バイポーラトランジスタのオン抵抗を凌駕するに至ったのである。こうして IGBT は 600V~1200V クラス IGBT で大きく普及し、パワーデバイスの主役の座を勝ち得たのである。

参考文献

(1)特許出願公告 特公昭 47-21739(1971)

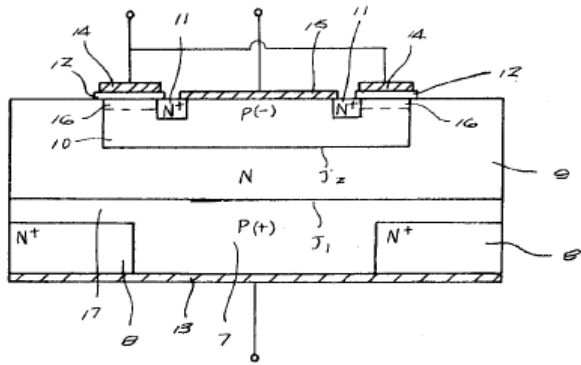


図 1 山上氏発明の素子断面構造

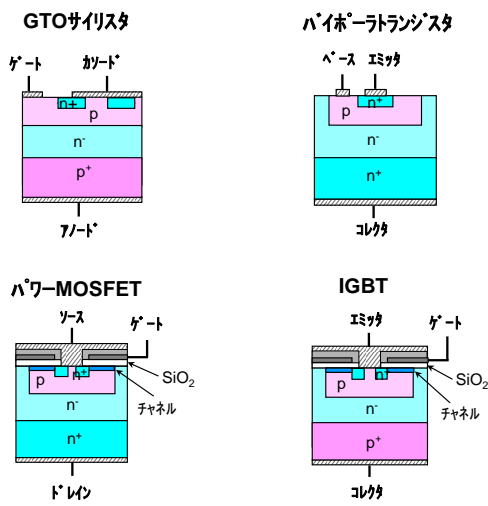


図 2 各種パワーデバイスの断面構造図