

## 第23章 電力用素子の展望

- 東工大講義資料 第III部 (第2版) 第23章の改訂 -

高田 育紀

2019/11/21

著者が電機会社に入社した1974年は、W. Newell が“Power Electronics”という概念を提起した<sup>1</sup>翌年であった。その頃、今日のように電気エネルギーが自在に制御できる時代が来るとは誰も思わなかった。その10年前に運用が始まった新幹線は、25kV 交流架線から引き入れた電流をタップトランスで降圧後に整流して、直流モーターを駆動していた。

それから“Power Electronics”は目覚ましい発展を遂げて、例えば新幹線にはGTOとIGBTがそれぞれ1993年と1998年から使われ始めた。ハイブリッド電気自動車は1997年から販売され始めた。Newellが期待した“汎用スイッチングモジュール”は、この時期に実現したと言えよう。

そして、同じ頃からシリコンパワーデバイスは限界に達したとの声が上がりはじめた。ところが、それ以降も高耐圧化、低オン電圧化は着実に進行した。一方、その当時既に期待されていたSiC等の新しい半導体材料を用いたパワーデバイスの実用化は、期待されたほどは進んでない。

本章では、パワーデバイスに今後どのような発展が期待できるのか議論したい<sup>2</sup>。

### 23.1 新規半導体素子の出現経緯

半導体における新機能、新構造デバイスとして目ばしいものを、通信用と電力用に分けて、製品レベルに達した順に並べる。

<sup>1</sup>第I部1.2節“パワーエレクトロニクスの黎明期”を参照。

<sup>2</sup>本章においても世の慣例に倣い、GTOサイリスタやGCTサイリスタをしばしばGTO、GCTと呼んでいる。

#### 23.1.1 通信用の新規半導体素子

- ・点接触ダイオード (1943年頃).
- ・拡散接合ダイオード<sup>3</sup>(1950年頃).
- ・*pn* ダイオード (1948年).
- ・点接触形BJT (1950年)<sup>4</sup>.
- ・接合形BJT (合金形, 成長形: 1953年).
- ・接合形FET (1953年).
- ・Esakiダイオード<sup>5</sup>(1957年).
- ・MOSFET (1960年).
- ・Laser Diode<sup>6</sup>(1962年).
- ・Gunn diode<sup>7</sup> (1963年).
- ・IMPATT diode<sup>8</sup> (1965年).
- ・Charge Coupled Device<sup>9</sup> (1969年).
- ・シリコンSBD (1974年).
- ・HFET (HEMT) (1979年).
- ・flash memory (1984年).

#### 23.1.2 電力用の新規半導体素子

(High Voltage IC (HVIC) や横形デバイスを除いた範疇の電力用素子)

- ・サイリスタ (1957年).

<sup>3</sup>第I部5.2.1項“ダイオードの構造”図5.2を参照。

<sup>4</sup>1956年ノーベル物理学賞“トランジスタ効果の発見”(W. B. Shockley, J. Bardeen, W. H. Brattain)。

<sup>5</sup>1973年ノーベル物理学賞“トンネル現象の実験的発見”(L. Esaki)。

<sup>6</sup>1964年ノーベル物理学賞“maser-laser原理による発振、増幅装置”(C. H. Townes, N. G. Basov, A. M. Prokhorov)。

<sup>7</sup>J. B. GunnはIBM社の開発者。

<sup>8</sup>Impact Avalanche Transit Time diode.

<sup>9</sup>2009年ノーベル物理学賞“CCDセンサーの発明”(W. S. Boyle, G. E. Smith)。

- ・ *pin* ダイオード (1960 年頃)<sup>10</sup>。
- ・ 高耐圧 BJT (1970 年頃: テレビ水平偏向用回路)。
- ・ GTO (1973 年: Sony テレビ用, 1976 年: 東芝 電力用)。
- ・ SIT, SIThy (1974 年)。
- ・ 汎用高耐圧 BJT (1982 年: スナバレス動作が可能)。
- ・ IGBT (1985 年: MOS 制御不完全ダイオードの実現)。
- ・ 高速 *pin* ダイオード (1993 年頃: IGBT module 用)。
- ・ Russian devices (1995 年頃: DSRD, Dynistor)。
- ・ GCT (1997 年: スナバレス動作が可能な GTO)。
- ・ 超接合 MOSFET (1998 年: MOSFET の高耐圧化)。
- ・ SiC SBD (2001 年: Si diode リカバリー問題の改善)。
- ・ SiC MOSFET (2010 年頃: MOSFET の高耐圧化)。
- ・ GaN HFET (2017 年頃: 小容量 OA 電源用途)。

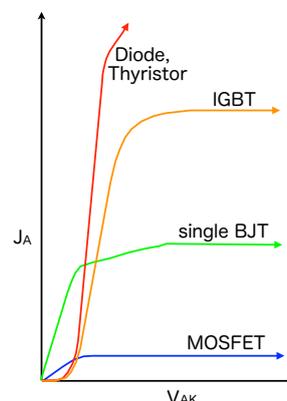


図 23.1: 各デバイスの立ち上がり特性 (模式図) [図 18.87]

このうち、一般にはそう認識されていないが、*pin* ダイオード、(汎用) 高耐圧 BJT、高速 *pin* ダイオード、GCT サイリスタは新機能デバイスであると著者は考える。それまで出来なかった機能が、新しい構造を採用することによって確実に行われるようになった為である。同じ観点からすれば、SiC の SBD と MOSFET や GaN HFET も、新材料デバイスと云うよりも、新機能デバイスと云った方が良いように思える。

## 23.2 電力用素子への要望と制限

現在、電力用半導体素子の解決すべき技術課題として、次の案件が存在すると著者は考える<sup>11</sup>。

1. IGBT の立ち上がり電圧の解消。
2. 高速 diode の立ち上がり電圧の低減。
3. 新材料デバイスの長期信頼性。
4. 半導体素子用新材料の低コスト化、高品質化。

<sup>10</sup>ただし、結果的に同じ構造の Diffused Junction diode が 1953 年に市販されていた。(第 I 部 5.2.1 項 “ダイオードの構造”)

<sup>11</sup>他に、IGBT や高速ダイオードの高温動作限界の向上等もあるが、一応の目処が着いていると見なして取り上げない。

5. ギャップ (gap) スイッチ<sup>12</sup>や熱電子を使った電子管である 1MW クライストロン (klystron: 数十万 V, 500MHz 動作が可能)、水素ガスを封入した放電管 (thyatron)<sup>13</sup>、あるいは電子レンジのマグネトロン等を置き換え得る半導体素子。

以下に、これらの技術課題に対する現状を示す。なお、各種半導体素子は、基本的に図 23.1 のような順方向電流-電圧特性を示す。新材料デバイスの説明で使われる figure of merit 中のオン電圧は、この図の立ち上がり部を評価した値である。

(1.) SiC の高耐圧 MOSFET が電鉄用途で注目されているのは、主にこの課題克服のためである<sup>14</sup>。

(2.) スイッチング電源では整流ダイオードの代わりにトランジスタ (MOSFET, HFET) を使う同期整流方式を用いることで、整流素子の立ち上がり電圧を 0 に出来る。ところが、インバータの還流回路では、整流動作が不定期なため同期整流方式は使えず、専ら単純なダイオードを用いざるを得ない。高性能を求める機器では、高速動作において *pin* ダイオードに優る SiC 製の SBD が用いられ始めている<sup>15</sup>。

<sup>12</sup>単に電極が対向しているだけのデバイスで、光誘起電流等で一度通電を開始させると、アーク電流が流れ続ける。

<sup>13</sup>第 I 部 1.1 節 “半導体パワーデバイス以前” の説明を参照。

<sup>14</sup>SiC の単体トランジスタ (BJT) が期待された時期もあった。

<sup>15</sup>4H-SiC の SBD の立ち上がり電圧は 1V 程度なので、シリコン *pin* ダイオードよりも少し大きい程度である。詳しくは、21.2.1 項 “ダイオードの立ち上がり電圧” を参照されたい。

(3.) SiC デバイスがバイポーラ動作すると、結晶欠陥が成長してオン電圧  $V_F$  が増大する現象が発生し得る<sup>16</sup>。エピタキシャル層の基板結晶の欠陥を減らす等の対策はあるものの、完全に解決する目処が立っていない。これが、3,000V 以上の高耐圧 SiC デバイスで、本来高耐圧に適した *pin* ダイオード、GTO サイリスタや IGBT の開発よりも、SBD と MOSFET の開発が進んでいる主な理由である。

ところが、インバータの主素子に MOSFET を用いると、(逆並列に SiC SBD の還流ダイオードを接続していても) 還流動作時に MOSFET に寄生する *pn* ダイオードが必然的に動作する。この還流電流を避けるために、かつては低耐圧 SBD を MOSFET に直列に挿入していたが<sup>17</sup>、近年は MOSFET 内に SBD を内蔵する構造が採用され始めた [1]。寄生 *pn* ダイオードの動作が、それよりも立ち上がり電圧が低い SBD が動作することで抑制される為である<sup>18</sup>。

一方、新材料パワーデバイスとして SiC と双璧の GaN デバイスは、600V クラスのスイッチング電源分野で近年急速に実用化され始めた。これは、懸案であった電流コラプス問題が *p* 形ゲート構造を採用することで解決の目処が着いたためである<sup>19</sup>。すると、降伏電流に対する耐量が弱いという“アバランシェ破壊”が顕在化して来た<sup>20</sup>。現在の 600V GaN HFET は、 $V_{DS} \approx 1,000V$  程度の実力を有して、降伏動作を避けるように使用されている。

実は、これに似た現象は電力用半導体ではむしろ普通であった。サイリスタや GTO が花形であった 1980 年頃には、大電力用半導体素子は降伏電流を流すと破壊すると言われており、十分な耐圧マージンを取ったり<sup>21</sup>、電圧制限回路 (clamp 回路) を素子に並列に接続していた。電力用素子の *pn* 接合の降伏動作の観測 (BJT では  $BV_{CBO}$  の観測) が可能であ

ると広く認知されたのは、トランジスタ モジュールが流布して、 $BV_{CBO}$  よりも遙かに厳しいベース逆バイアス状態における C-E 間のサステイン動作  $BV_{CEX}(sus)$  が数十  $A/cm^2$  まで観測出来ることが認知された 1980 年代の中頃以降であった [2]<sup>22</sup>。

降伏動作が危険ならば、L 負荷をハードスイッチングすることは出来ないが、耐圧マージンを十分に取れば共振回路に使える。それが、1980 年代前半までの、電力用半導体素子の基本的な使われ方であった。横形の GaN 素子は、そのような段階にあると著者は考える。

トランジスタ モジュールの電圧定格は  $BV_{CEX}$  で表されて、AC200V 電源用では 600V、AC440V 電源用では 1,200V とされているが、その値は BJT の使用可能限界 (破壊限界) を示すものではない。ところが、1980 年代の前半までは、実際に BJT が扱える最大 DC 電圧で表わそうとする観点から、電圧定格は  $V_{CEO}(sus)$  値で表した。 $V_{CEO}(sus)$  を指標としたのは、それが最重要特性である短絡動作に耐える電圧の目安となるという経験則からであった<sup>23</sup>。

ともかく、当時の AC200V 用トランジスタの定格電圧は  $V_{CEO}(sus) \geq 450V$  で、AC400V 用は  $V_{CEO}(sus) \geq 900V$  であった<sup>24</sup>。そして、 $V_{CEO}(sus) \geq 450V$  BJT は  $BV_{CBO} \approx 1,100V$  の実力を有した。

<sup>22</sup>もともと、小電流 BJT では、プレーナ形が実用化した頃から、*pn* 接合を降伏動作させても破壊しないことは経験的に知られていた。(トランジスタ モジュール用の BJT を含めた) プレーナ形素子では、電界が高めとなる有効動作周りの線状領域だけがまず降伏することで降伏動作の不安定さが軽減される為であると予想される (第 II 部 12.5.3 項 “降伏開始点近傍の動作” を参照)。

$BV_{CBO}$ 、 $BV_{CEX}(sus)$  等については第 I 部 付録 A.3 節 “3 端子素子のリーク電流値や電圧値の命名法” を参照されたい。

<sup>23</sup>三菱電機のインバータ製造技術者からそのように聞いた。  
<sup>24</sup> $V_{CEO}(sus)$  値は本来  $V_{CEO}$  値に等しいのであるが、当時の大型トランジスタの *E-B* 間には製造工程の不備で往々にして抵抗が付随したので、 $V_{CEO}$  を測ろうとして降伏電流を流すと大抵破壊した。このため、電力用トランジスタについては、精々 1A 程度の  $V_{CEO}$  サステイン動作を (過大な電圧が加わらないようにクランプ回路を並列に付けた上で) 恐る恐る行っていた。なお、その指標が  $BV_{CEX}$  値に変わった経緯は、第 I 部 付録 A.4 節 “パワーデバイスの耐圧を規定する有効な方法” で述べている。

<sup>16</sup>19.1.7 項 “ $V_F$  劣化問題” を参照。

<sup>17</sup>第 I 部 5.4.2 項 “MOSFET” の図 5.26 の形態である。

<sup>18</sup>なお、MOSFET では一般的にゲート酸化膜の長期信頼性が問題になるのだが、SiC MOSFET ではシリコン MOSFET と同程度あると見なされていて、特に問題視はされていないようだ。

<sup>19</sup>19.2.2 項 “GaN-HFET の電流コラプス問題” を参照。

<sup>20</sup>19.2.3 項 “GaN デバイスのアバランシェ破壊問題” を参照。

<sup>21</sup>例えば、サイリスタや GTO の定格電圧は実使用 DC 電圧の 2 倍が目安であった。

すなわち、( $BV_{CBO}$  観測で破壊しない) BJT の実力電圧と使用電圧の関係も現在の GaN HFET と似ていた。使用可能電圧が(静的な)実力電圧よりも大幅に低くなることは、電力用素子では珍しくなかった。

(4.) エネルギーギャップ  $E_g$  は結晶を構成する原子の結合エネルギーの一つの指標である。 $E_g$  が大きい結晶ほど結合エネルギーが大きいので、その成長にはより高いエネルギー(温度)が必要である。また、化合物からなる結晶は、構成原子の大きさの差が大きいほど歪になると予想できる。

実際、SiC の結晶成長は  $2,200^\circ\text{C}$  以上もの高温で行われて(改良 Lely 法)<sup>25</sup>、それが溶融せず昇華するために成長速度が極めて遅い。さらに、GaN は結晶成長自体が大変難しい。これらの結晶は、シリコンよりも製造費用が高くなることは避けられない。

また、SiC は単結晶の品質が劣るために、デバイスの能動部分は成長させた単結晶自体に作る事が出来ずに、その表面に成長させたエピタキシャル層中に作る。さらに、GaN デバイスは、単結晶が出来難いことから、SiC、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  や強いては Si 上に緩衝(buffer)層を介して成長させたエピタキシャル層中に作る事が通例で、GaN 基板を使うことは稀である。緩衝層を挿入しても、異種材料基板上的エピタキシャル層の品質が劣ることは避けられない。

エピタキシャル成長は、単結晶の成長温度(液相と固相の熱平衡温度)よりも数百 $^\circ\text{C}$ 以上低い温度で行い得る。しかしながら、低温成長した結晶の原子間の結合は単結晶よりも弱くなって、特に成長時に温度差等のストレスが加わった場合には、成長時はもとより成長後に外からの刺激によって欠陥が成長し易いことが一般に予想される。

(5.) 現在、最も大電力を制御できる機器は、単に電極が対向しているだけの原始的なギャップスイッチであるが、それは遮断状態からオン状態に移行し得るだけのクロージング(closing)機能のみ有する。高

<sup>25</sup>シリコンの融点は  $1,414^\circ\text{C}$  でゲルマニウムは  $938^\circ\text{C}$  である。

電圧、大電流を自由に制御できる電子機器は、熱的に発生させた電子流を制御する電子管に限られている。大型加速器で粒子の加速源となる  $1\text{MW}$  を越えるクライストロン(klystron: 数十万  $V$ ,  $500\text{MHz}$  動作が可能)や、高出力レーザーを励起する水素ガスを封入した放電管(thyratron)、通信衛星の出力段で主に使われている進行波管(TWTA: Traveling Wave Tube Amplifier)、あるいは電子レンジのマイクロ波<sup>26</sup>を作るマグネトロン等がこの範疇に入る。電子レンジの固体素子化は昔からの家電技術者の夢であるし、自動車等への遠隔給電においてもこの分野は注目されている。

一方、半導体素子に関しては、マグネトロンやクライストロンのように固定周波数を発生する素子として、Gunn ダイオード<sup>27</sup>と IMPATT ダイオード<sup>28</sup>が昔から知られているのだが、前者は数百  $mW$ 、後者は数  $W$  程度しか扱えない上に、どちらも直列接続はもとより並列接続も原理的に出来ないので、家庭用の電子レンジにさえ使用し得ない。

大電力増幅器として代表的な進行波管の機能を有する半導体素子として GaAs MESFET と GaN HFET が存在する。しかしながら、半導体素子は信頼性が高く線形特性も良好であるが、電力効率と最大出力電力に劣るので適用が限られている。例えば、GaAs 素子は比較的低周波数( $<6\text{GHz}$ )で1素子当たり  $10W$  程度に限られており、電源電圧を上げ得る GaN 素子でもその数倍程度の電力に過ぎない。

最もパワフルで高速な半導体素子は Russian デバ

<sup>26</sup> $2.45\text{GHz}$  動作で、家庭用では  $1\text{kW}$ 、業務用で  $3\text{kW}$  程度。

<sup>27</sup>C.13 節“ワイドバンドギャップ半導体の飽和速度”図 C.24 に示すようなドリフト移動度-電界強度特性( $v_d - EF$  特性)に負性抵抗が現れる半導体結晶(例えば  $n$  形 GaAs)の両端に抵抗性接触の電極を設けて、 $v_d$  のピーク辺の  $EF$  を加える。結晶中での不均一要因で  $EF$  の大きい箇所が生じると、その箇所の速度が遅いので自由電子の密度が高くなる。そして、それ以外の箇所の平均電界強度  $EF'$  は僅かに低下する。この高密度自由電子箇所は、平均電界強度  $EF'$  に対応した速度  $v'_d$  で結晶内を動く。結晶端に達すると  $EF'$  は元の値に回復する。結局、結晶長  $L$  を  $v'_d$  で除した周期  $L/v'_d$  の電流脈動が生じる。<sup>28</sup> $pin$  ダイオードに降伏電圧近くの逆電圧を加えた上で微小な電圧変調を加えると、電圧のピーク辺で  $p-i$  接合部で正孔-自由電子対発生を起こさせ得る。発生した自由電子が  $i$  領域を走行する時間が変調周期の  $3/4$  と一致すれば、変調周期毎にパルス電流が発生し得る。実際には、 $p$  領域と  $i$  領域の境界に薄い  $n$  領域を設けて、この  $p-n$  接合箇所に対発生し易くしている

イス<sup>29</sup>である。従来の半導体とは異次元の電力とスイッチング速度を誇って、半導体の限界を実現しているデバイスであるが、なかなか世の中に拡がらない。それは、用途が特殊なパルス動作に限られる為でもあるが、何よりも製造が安定して出来ないためであろうと、著者は予想する。

進行波管は高速運動する電子を、マイクロ波の波長の数倍の空間を走行する過程で変調する構造を有している。その出力電力は、熱電子源と無駄な電子流の処理能力の大きさで決まる。それに対して、半導体素子を用いる増幅器は、半導体素子とその周辺のL, C要素の分布定数回路として成立するので、(半導体素子の並列接続は可能だが)増幅ユニットの寸法が動作周波数に応じた特定の大きさ以上に出来ない。すると半導体素子に許される発熱量も下がるので、扱える電力は低下する。半導体素子とL, C要素からなる分布定数回路を用いる限り、電力、動作周波数とも進行波管の能力には太刀打ちできないであろう。ただ、進行波管の熱電子放出源を電界放出素子(FED: Field Emission Device)<sup>30</sup>で置き換える案だけが可能性を残していようと、著者は予想する。

### 23.3 新しい電力用素子の可能性

電力用半導体の中核であるIGBTの半導体チップ技術が成熟しつつあることは、既に1990年代の後半から言われて来たが、それから20年余り立ってようやく現実味を帯びている。その一方で、SiCデバイスは、SBDが確たる地位を占めて、3,000VクラスのMOSFETが電鉄分野で実用化している。近年は、600V定格のGaN HFETが携帯機器用電源等に急速に使われ始めた。さらに最近、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>デバイスの優位性を唱える声も聞こえる。

先節のような要望がある電力用半導体素子は、今後どのような方向に向かうのだろうか。また、ワイドバンドギャップ半導体は、シリコンに対してどのような位置を占めるようになるのだろうか。

<sup>29</sup>第I部5.3.2項“Russian デバイス-I(Dynistor)”や5.4.6項“Russian デバイス-II(DSRD)”に記す高速の大電力デバイス。

<sup>30</sup>19.4.2項“ダイヤモンド デバイスの開発経緯”を参照。

#### 23.3.1 新構造デバイスの可能性

先節(1.項目)のIGBTに立ち上がり電圧が存在する問題は、FETや単体BJTでは起きない。しかしながら、どちらの構造も、そもそもの通電能力がIGBTより全く劣っているので、数百V以上のデバイスでは競合し得ず、高電圧になるほどその差は開く。しかしながら、SiCを用いると、 $i$ 領域長をほぼ1/10に出来るために、IGBTと競合し得るようになる。BJTの方が基本的な通電能力が高いのであるが、バイポーラ動作で $V_F$ 劣化する問題が解決できないために、専らMOSFETの実用化が進められている。既に3,000Vまでは電鉄用のMOSFETを用いたインバータが実用化しているので、この問題は価格を度外視すればSiC MOSFETが解決策になっている。

そもそも、電力用素子の電流動作では電荷担体のドリフト運動が主要となるので、低電圧動作するためには、(I.)電荷担体密度を増やして、(II.)領域長を短くすることが鉄則である。始めから電荷担体密度が大きい材料を使った場合には、(I.)の為に何も複雑なバイポーラ動作(すなわちpinダイオード動作)をさせる必要がない。さらに、電流経路中のp-n接合を、それよりも障壁の小さなn-n<sup>-</sup>接合に置き換えることが出来るので、その障壁の差分だけオン電圧を下げる得る。

(2.項目)のダイオードの立ち上がり電圧は、pinダイオードとSBDのどちらも(機構は異なるのだが)エネルギーギャップ $E_g$ の約半分から定数項を差し引いた値になる。 $E_g \approx 3V$ のSiCの場合、SBDの定数項がpinダイオードの定数項よりも1V程度大きいので、SBDの立ち上がり電圧が、シリコン( $E_g \approx 1.2V$ )のpinダイオードと概ね同じになる<sup>31</sup>。ダイオードの立ち上がり電圧が $E_g$ と共に大きくなることは避けることが出来ない。

(3.項目)の長期信頼性は、SiCではバイポーラ動作に伴って発生する $V_F$ 劣化が、それが発見された

<sup>31</sup>21.2.1項“ダイオードの立ち上がり電圧”を参照。第II部付録B.25項“pinダイオード順方向電流の立ち上がり電圧”や19.1.5項“SiC pnダイオードの小電流 $J_F-V_F$ 特性”、19.1.6項“SiC SBDの小電流 $J_F-V_F$ 特性”に詳しい説明がある。

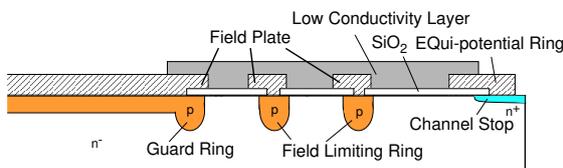


図 20.7: プレーナ チップ終端構造の典型例

2000 年頃から未だに主要な問題である。これは、単結晶やエピタキシャル層の品質が根本の原因であるが、MOSFET チップに SBD を内蔵する構造で還流時の内蔵  $pn$  ダイオード動作を抑制しようとする対策も取られ始めた [1]。それでも、アバランシェ降伏が起こった場合には正孔も発生するし、SBD の大電流オン動作時に金属-半導体境界に正孔が生じるので<sup>32</sup>、万全の対策ではない。

一方、GaN では、HFET の電流コラプスは  $p$  形ゲートの採用によって目処がついて、主な注目点はアバランシェ耐量に移った。さて、半導体チップの表面のアノード電極とカソード電極の間で高電圧を保持することは、HFET のような横形デバイスに限らず、プレーナ形デバイス全てが解決せねばならない問題である。単体の  $pin$  ダイオードや IGBT 等の縦形素子では、20.1.2 項 “プレーナ構造で高耐圧を安定して得る方法” で述べたように、チップ終端部の表面絶縁膜の上下間の電位差を小さくすることと、その状況を時間的に安定に保つことが鍵である。具体的には、図 20.7 に示す多数の Field Limiting Rings とその夫々に接続した Field Plates、そしてそれらの間の絶縁膜表面電位を線形に保つための低伝導度膜を組み合わせた方策が基本になっている。定格電圧が高くなるほど Field Limiting Rings の数が増え、数千 V デバイスでは 10 本以上設けることもある。長期信頼性を含めた安定した耐圧特性を得る為には、チップ面積が増えて価格が上昇しても、十分な終端構造の幅が必要であると認識されている。

ところが、横形デバイスでは、動作電流が流れる領域がそのまま耐圧を保持する領域になるので、オン特性と耐圧保持特性が相反する。その高耐圧化は、

<sup>32</sup>第 II 部 10.9.3 項 “大電流動作時の少数電荷担体電流” 参照。

シリコンの MOSFET, IGBT や特に IC において色々な工夫がなされた経緯があるが<sup>33</sup>、400V ~ 500V 程度の横形の電力用素子を製造することは難しい。多大な苦勞を伴って 6ヶの IGBT と制御回路からなる 1 チップ インバータが開発されたが、1A 程度の小容量の特定用途しか拡がっていない。

$E_g$  が大きくなると、この横形デバイスにおける相反した 2 特性の両立はさらに難しくなる。半導体材料の価格上昇分以上に高性能化する為、(耐圧保持領域を大幅に縮小できることを生かして) 通電領域を大幅に短くしている為である。GaN (や SiC) はシリコンの 1/10 の厚みで同じ耐圧を保持できることを謳っているの、横形デバイスではシリコンの 1/10 の距離で正味の耐圧を保持することが設計目標となる<sup>34</sup>。シリコンの開発経緯からは、これは極めて難しい課題であると著者は考える。

さらに、局所でアバランシェ増倍が起こると、発生した自由電子と正孔は発生点からそれぞれ逆方向に円錐状に拡がろうとするが、HFET では厚みのない平面的な領域に制限されるので実質的な電荷担体密度が増大して、縦形デバイスの場合よりも激しい現象となることが予想できる。

なぜなら、宇宙線誘起破壊の再現を試みるシミュレーションにおいて、図 23.2 のような円筒形の中心部で電荷を発生させたが、この円筒の中心を通る厚さ  $1\mu\text{m}$  の断面を切り出した薄膜に領域を制限すると (すなわち通常の 2 次元シミュレーションでは)

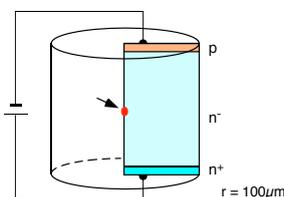


図 23.2: ダイオード構造と中性子の停止点 [図 14.3]

<sup>33</sup>20.1.3 項 “シリコン横形素子での高電圧保持方法” を参照。

<sup>34</sup>SiC MOSFET のような縦形デバイスでは、チップ終端部の幅をその比率よりも大幅に増やすという経済問題で済む。

約 300 倍の電流が流れた<sup>35</sup>。それは、3 次元計算では新たに発生した電荷担体が広く拡散して密度が下がるためであろう。

それに加えて、(23.2 節の脚注で述べたように) 降伏点では元々破壊の心配があるのだが、(現在主流の) プレーナ形の縦形デバイスではカソード側能動領域のごく周辺だけが(電界強度が他よりも高いために) 先行して降伏する。それは線状領域での降伏現象なので、周辺の内外方向へ電荷担体が拡がる余地があるので、主要領域面で降伏が起こるよりも緩やかな現象となっていることを考慮せねばならない<sup>36</sup>。

シリコン素子では初期耐圧を出すことと長期信頼性は相反する傾向があったが<sup>37</sup>、GaN HFET に代表されるワイドバンドギャップ横形デバイスにおいても同様と推定できて、オン電圧を十分低くするという条件が増えるので一層難しくなる。そうすると、アバランシェ時の破壊を避けることも一層難しくなる、著者は予想する。

GaN HFET の逆方向特性については Al-GaN 層内に生じるトラップに関連づけた説明が多いが、その前に上述のような構造問題や発生した正孔や自由電子の局所への単純な蓄積を検討すべきであると、著者は考える。

そして、次の 2 種類の解決手段が考えられよう。

- (i.) L 負荷をハードスイッチングする用途に用いずに、電源 DC 電圧の 2 倍以上の耐圧を有する素子を共振回路に限って使用する。(現在採用されているのはこの手法である)
- (ii.) 耐圧制限機構を設ける。それは、チップ内部に

<sup>35</sup>円筒領域を対象とした計算は疑似 3 次元シミュレーションで、断面領域は通常の 2 次元シミュレーションに当たる。(第 II 部 14.3.5 項 “新しいシミュレーションの意義と課題” (E.. 項目) “疑似 3 次元シミュレーションの可否” で言及している)

<sup>36</sup>詳しくは、第 II 部 12.5.3 項 “降伏開始点近傍の動作” を参照されたい。

<sup>37</sup>20.1.3 項でも言及しているが、ウエハ工程ではチップ表面の空乏層は延びにくい、長期信頼性では逆に延びる傾向を有する。

本来よりも低い電圧で降伏する箇所を設けるか、耐圧の低いダイオードを逆並列に接続すればよい。

(4. 項目) は半導体材料の問題なので次項で扱う。

(5. 項目) の電子管に替わり得る半導体素子は、パルス動作分野については Russian デバイスが既に存在し、使用実績もある。ただ、単純な原理通りの動作を得るために、一切の寄生要因を除いた一次元構造であることが求められる。そのため、小面積チップの周辺をベベル構造にエッチングして形成した上で、多数のチップを放熱板と互い違いに接触させながら積み上げる構造となっている。その製造には、1970 年代以前の電力用半導体素子を作る職人技をしても難しく、とてもロシアで安定して作れるとは思えない。日本でなら可能でないかと著者は考える。

一方、連続動作が可能で、進行波管を置き換え得るような高周波大電力半導体は現れないであろうと、著者は予想する。23.2 節 “電力用素子への要望と制限” の最後に記したように、電子管は、放熱機構と電子流の変調機構を一体構造で構成できるが、半導体素子は回路の 1 要素の位置を占めざる得ないので、両方の機能を有しながら大容量化することは無理であると、著者は考える。ただし、電子管が用いる電子流は、カソード電極を熱して発生させている。電界放出素子 (FED: Field Emission Device) が高効率で高信頼度になれば、この電子放出部を置き換えることはあり得よう。

以上、新構造の電力用素子ばかり取り上げたが、伝統的なシリコン IGBT や高速ダイオードについても洗練を加えねばならない。これまでも、新しいデバイスが開発される度に、それまでの電力用素子を置き換える可能性への期待が膨らんだが、ほとんどが期待倒れに終わった。古くは 1980 年代には GaAs MESFET, 縦形 MOSFET が脚光を浴びた。1990 年代後半からの SiC デバイス (SBD, *pin* ダイオード, GTO, MOSFET) も近い将来シリコン デバイスを置き換えると喧騒されたが、それから 1/4 半世紀経過して、3kV MOSFET が実用化したものの期待とは程遠い状況である。1985 年に実用化されたが BJT

を凌駕するまでほぼ 10 年を要した IGBT は<sup>38</sup>、危うくそれらと同類に組みする寸前であった。

ところで、電力用素子として最も古く最もパワフルであったサイリスタは、ターンオフ機能を構造上持ち得ないのだが、転流回路を用いると直流電源を遮断できた。そのためには、逆方向だけでなく順方向にも電圧保持能力(耐圧)が必要であった<sup>39</sup>。サイリスタの進化形である GTO サイリスタは、転流回路なしのスイッチングを可能にしたが<sup>40</sup>、自立的にオフするために、オン時の内部に蓄積される電荷担体密度を下げねばならなかった。その為にアノード短絡構造が採用されて順方向耐圧を失った<sup>41</sup>。

かつての IGBT に  $n^+$  バッファとカライフタイム制御とか煩わしい工程が必要であったのも、結局はオン時の内部蓄積電荷担体を少なくする為であった。現在は、その代わりに低不純物濃度で浅い  $p$  コレクタ構造を採用している訳である (Light Punch Through IGBT、あるいは FS-IGBT)。伝統的な IGBT の順方向耐圧は数  $V$  程度はあるものの、定格として保証されてない。それは、IGBT と競合した BJT や GTO サイリスタが実質的な逆方向耐圧を持たなかったため、コレクタ側の  $p-n$  接合の耐圧について全く配慮されなかった為で、構造的には (サイリスタがそうであったように) 順方向耐圧を持ち得る。この構造の IGBT は逆導通 IGBT として、主に matrix converter 用に製品化されている。

さらに、GTO には還流ダイオードを内蔵する構造の逆伝導 GTO が存在した<sup>42</sup>。トランジスタ モジュールでも BJT チップ内に高速ダイオードを内蔵する製品があって、素子の外形を大幅に小さく出来るので、エアコン向け等の小容量品では主流であった<sup>43</sup>。近

<sup>38</sup>付録 C.7 節 “主観的 IGBT 開発史” を参照されたい。

<sup>39</sup>16.1.2 項 “サイリスタ (Thyristor)” を参照されたい。なお、順方向耐圧とは、陽極 (anode) を正、陰極 (cathode) を負電圧にした際の耐圧である。

<sup>40</sup>ただし、電力損失を伴う “放電スナバ” 回路が必要であった。

<sup>41</sup>16.1.3 項 “GTO (Gate Turn-Off) サイリスタ” を参照。GCT サイリスタは、さらに “放電” スナバ回路が不要となるように改善した。もっとも、順方向耐圧を保証する GTO や GCT も少数だが製品化されている (逆導通 GTO、逆導通 GCT or symmetrical GCT)。

<sup>42</sup>逆伝導 GCT も製品化されている。

<sup>43</sup>第 I 部付録 A.6 節 “還流ダイオード内蔵 BJT のトラブルと

年、同様の構造の逆伝導 IGBT が製品化されている。BJT ではチップ内のトランジスタ動作部とダイオード動作部を離さないと微妙な不都合 (市場での破壊) が発生したが、IGBT では特別なダイオード領域を設けずに、エミッタ側の MOSFET 構造に寄生する  $p-n$  ダイオードを使うことが多い<sup>44</sup>。そうすれば一層の小形化が実現できることになる。ただし、還流動作時に逆アームの IGBT がオンした際には、ダイオード部の内部蓄積電荷が存在する分だけ余分な損失が生じることは覚悟せねばならない。

トランジスタとダイオード部分の共存は BJT では破壊の心配から避けられたが、IGBT では、少なくとも破壊は深刻な問題にならないようだ。それは、IGBT はダイオード動作するので、主電流が流れるだけで内部蓄積電荷が排出されるが、BJT でベース電流で引き出される分だけの内部蓄積電荷が減少するためであろう<sup>45</sup>。

結局、電力用素子が何であろうと、電力システムが要求する機能は昔から変わらず、どの素子も同じような開発経緯を辿ると予想される。現在、SiC MOSFET が電車に使われ始めたが、当時画期的なデバイスであった GTO が電鉄や製鉄分野から使用が始まったことを思い起こされる。

大容量 GTO の電鉄や製鉄分野での実用化に少し遅れてトランジスタ モジュールが現れて中容量分野で汎用的に使われ始めた頃、GTO モジュールが三菱電機から製品化されたが短期間で撤退した。GTO は、BJT が扱えない高電圧、大電流分野でないと感じがなかった。それは、BJT が短絡耐量 (SCSOA) を有する点とスナバが不要な点で、GTO よりも決定的に優っていたからである<sup>46</sup>。

そして、IGBT の汎用デバイスとしての BJT に対する優位性は、ゲート駆動電源がベース駆動電源の解決策”を参照されたい。

<sup>44</sup>数千  $V$  品でも、そのような形で試作されている。

<sup>45</sup>第 I 部 4.5 節 “正孔と自由電子が共存する素子のターンオフ機能” を参照。

<sup>46</sup>前日まで行っていた GTO 装置の研究を突然止めて、BJT 研究に乗り換えた大学の研究室もあったそうである。

数分の1になったと言う人もいる。これらデバイスの代表的な用途である汎用インバータのIGBT化は1994年頃から始まったが、当時の販売カタログを調べてもIGBTに変えた時点が分からなかった。そのことから、IGBTが採用されたのは、デバイスの優秀さ自体よりも、汎用インバータを小型化する流れの一方策として選ばれたことが窺えよう。

デジタル操作や通信用に用いられる半導体は、動作速度や効率、出力の線型性など明確に数値化できる評価指標があるが、電力用半導体は単純には評価できない<sup>47</sup>。現在、パワーデバイスとしてSiC MOSFETやGaN HFETが持て囃されているが、世の中の評価基準は市場規模を基にしているようである<sup>48</sup>。

パワーデバイスを考える際には、特にオフ動作時に大電流が流れているか (hard switching) 否か (soft switching) の区別が必要である。汎用的な使用には、高電圧下で少なくとも定格電流程度をオフ出来ねばならない。縦型MOSFETはこの要件を満たすが、現在のGaN HFETは満たさない。

電車で3kVものSiC MOSFETが使われるのは、それがIGBTよりも低損失であるだけでなく、システムを小型化に出来るので減速時の電力の回生機能を十分に働かし得るようになった寄与が大きいとのことである。しかしながら、汎用インバータにSiC MOSFETの名を出さずに掲載する状況は、この先もあり得ないと思われる。その前に、小形化を切望する自動車用途で広範に使われた後になるはずである<sup>49</sup>。

一方、小容量電源分野でGaN HFETが急速に使われ始めたのは、それまでのGaAs MESFETに比べて格段に基本特性が良い上に、横形デバイスであるので安価で大面積のシリコン基板を用い得るとい

<sup>47</sup>例えば、世に知られているパワーデバイスのfigure of meritはユニポーラ形の高周波増幅素子を専ら評価する指標で、バイポーラ形の特に高耐圧素子の評価には適さない。

<sup>48</sup>そもそも、マスコミが言う半導体業界には通常パワーデバイスは含まれていない。特にパワーデバイスと特定する場合にも、売上高が大きい200V程度以下の分野であることが多い。

<sup>49</sup>それまでには、著者が心配しているMOSFETやSBDでのVF劣化問題も、善かれ悪しかれ決着しているであろう。

う利点がある。現行デバイスを置き換えるので<sup>50</sup>、十二分な事業規模が見込み得る。

要は、新しいデバイスは必要とする要望度に応じて使い分けだけのことで、潜在的な優劣の議論は役に立たないと、著者は考える。

ただ、一般的に機能デバイスは単純なほど優れていると言えよう。従来、電力用素子としてバイポーラ素子の方がユニポーラ素子よりも優秀であると見なしがちであった<sup>51</sup>。しかしながら、それはシリコンを材料とする限り、ユニポーラ動作では甚だ不十分なので、より複雑な構造にして(電荷担体密度を増やす構造を付加して)バイポーラ動作させねばならなかった為であるとも言える。

専らシリコンを開発してきたデバイス屋は、SiC MOSFETが電車で使えると聞いて、その欠点をあげつらいがちである。しかしながら、ユニポーラ素子で出来る可能性があるなら、それを優先するのが公平な技術的観点であろうと、著者は考える。

本当に新しいと言えるデバイスは、サイリスタからGTOや、GTOからトランジスタモジュールに移行する際に、それを用いるシステムを変えるものであろう。トランジスタモジュールからIGBTモジュールや、電車におけるSi IGBTからSiC MOSFETの移行は同じシステムで装置の容積や効率が改良された範疇に入ると考えれば、Si IGBTやSiC MOSFETは本当の新構造デバイスと言えない。

さらに、半導体材料を変えるだけでは新構造デバイスと言えない。電力用半導体素子の基本構造は既に出尽くしていると、著者は考える。しかしながら、それらは全て電荷担体が熱速度 $v_{th}$ で動くことを前提としているのだが、それ以上の速度で電荷担体が移動する現象が存在する。すなわち、金属中の自由電子は熱速度 $v_{th}$ の10倍程度のフェルミ速度 $v_F$ で移動する。量子力学では周回運動すると見なすのは

<sup>50</sup>スイッチング電源回路には、ハードスイッチングほどのアバランシェ耐量は要らない。

<sup>51</sup>少なくとも著者はそう思い込んでいた。しかしながら、IPEC'83の“パワーデバイス動向”をテーマとしたパネルディスカッションでは、BJTの優位性を主張するのに“原理的に単純なMOSFETが優れているが、それが寄生ダイオードを内蔵していることが深刻な問題である”と自ら言ったことがあった。

間違いとされているが、この速度は前期量子論における水素原子中の電子の周回速度に匹敵する。そして、それは炭素とかシリコンの最外殻電子の周回軌道とも同等であろうと予想できる<sup>52</sup>。

このフェルミ速度  $v_F$  で移動する電子による電気伝導を司るデバイスは、全く新しいデバイスとなろう。そのようなことは起こり得そうもないと思うかもしれないが、グラフェンやカーボンナノチューブ等の低次元半導体では、実際に超伝導に似た特異な伝導現象が室温で起こることが注目されている<sup>53</sup>。

著者は、原子中の周回運動と同じ速度で電子がマクロな物体中を移動する現象が超伝導であると考えている。すると、新構造デバイスは超伝導デバイスと呼ぶのが相応しいことになる。

### 23.3.2 半導体素子用新材料の可能性

23.2 節 “電力用素子への要望” では (4.) 番目の項目に “半導体素子用新材料の低コスト化, 高品質化” を上げたが、それを SiC や GaN, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> で実現することは、シリコンを比較対象にする限り極めて困難である。エピタキシャル層はともかく、これらの単結晶の品質が将来においても (単一元素からなる) シリコン並みになる目処はないと予想する。

また、これら物質の移動度等の物性値は、現在知られている以上の値に改善される余地は少ないと、著者は予想する。例えば、1990 年代、SiC の正孔のドリフト移動度  $\mu_h$  が  $\leq 100\text{cm}^2/\text{Vs}$  と小さい状況は結晶品質が改善されれば良くなると言われていたが、その後、改善されることはなかった。SiC の結晶欠陥は著しく改善されたが、それに連れて物性値が明白に改善されたという話は聞かない。

さらに、SiC や、特に原料が豊富でないガリウム Ga の化合物が、その特性の優位性が際立つ限られた用途にのみ使われることは明らかであろうと、著者は考える。ガリウム <sup>31</sup>Ga は、希元素に区分されて、主にボーキサイトからアルミニウムを作る際の

<sup>52</sup>第 IV 部 27.4.10 項 “新しい電子軌道モデルに到る経緯” 項目 (7.) を参照されたい。

<sup>53</sup>第 IV 部 付録 D.19 節 “低次元半導体の伝導機構” を参照。

副産物として僅かに取れる。現在 年間 100 トン程度しか新たに製造されておらず、とてもシリコンに代わり得る材料とはなり得そうもない<sup>54</sup>。

結晶成長の行い易さは多面的な評価方法があつて、例えば成長した結晶品質と成長速度のように、それらは必ずしも両立しない。一般に、結晶を構成する原子間の結合が高いほど高品質になると考えられるが、成長速度は遅くなる。その典型がダイヤモンド結晶で、不純物が存在しても自ら結晶化する唯一の結晶であるようだ<sup>55</sup>。

シリコンやゲルマニウムは、熔融液に種結晶を浸すことで比較的容易に大口径の高品質の単結晶を成長させることが出来る (チョコラルスキー法)<sup>56</sup>。化合物結晶を高品質に成長させることは難しいようだ。チョコラルスキー法で GaAs や Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は作製し得るが<sup>57</sup>、GaN は可能であるが難しい。高輝度の赤色 LED に必要な良好な Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 結晶は新たに開発した成長方法を用いて初めて可能になった<sup>58</sup>。

また、ゲルマニウム素子やシリコン素子では、最初から単結晶中にデバイスの能動領域を形成していた。そして、エピタキシャル層は、デバイス設計の自由度を増やす目的で、後から使用され始めた。ところが、化合物半導体ではエピタキシャル層の中に能動部分を作り込む。SiC や GaN の単結晶は、その中に能動領域を作り得る品質に至らないので、専らエピタキシャル層の基板として用いられている<sup>59</sup>。

<sup>54</sup>日本が最大の消費国であるそうだが、また、30 °C で液体になって固体よりも体積が減少したり、アルミニウムや銀の中に常温で染み入ってそれらをボロボロにするとした特異な物質である。

<sup>55</sup>19.4.1 項 “ダイヤモンドの半導体特性” を参照されたい。例外的に、水晶 SiO<sub>2</sub> は高温の加圧水溶液で単結晶成長する。シリコンも、自然界に多結晶塊が存在して、第二次世界大戦ではそれに細針を当ててレーダー波の検出に使っていた。

<sup>56</sup>Czochralski 法。SiC やダイヤモンドは溶融せずに昇華するばかりなので不可能である。SiC では、多くの多形体が容易に出現するという問題もある。(19.1.2 項 “SiC 結晶の構造” を参照)

<sup>57</sup>Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は大気圧下で高速融液成長できるとのことである。

<sup>58</sup>それまでの気相エピ成長法から温度差を設けた連続液相成長法を変えた。特に、蒸気圧の高い Ga を含むと難しいようだ。(第 II 部 13.3.1 項 “赤色 LED の高輝度化” を参照)

<sup>59</sup>GaAs MESFET や Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MOSFET が (半絶縁性) 単結晶上のエピタキシャル層に素子を作るのは、単結晶品質の制限よりも (シリコンの低耐圧プレーナ素子と同様に) 能動領域の設計自由度が第一の理由のようだ。それらの単結晶がデバイスの能動箇所を作り込むだけの品質なのか否か知らないが、少なくとも (SiC と違って) エピタキシャル層の結晶性に影響することはないよう

さて、化合物半導体を用いてバイポーラ素子が作られた報告を、著者は知らない。それは、化合物半導体の正孔のドリフト移動度は自由電子に比べて際立って小さい為であると言われているが、元来正孔が存在し難いのだと著者は考えている。何にしろ、化合物半導体はバイポーラ素子に適していない。

著者は、そもそもバイポーラ素子に向いてない化合物半導体を用いて、バイポーラ素子を無理に作る必要はないと考える。SiCのようにバイポーラ動作で $V_F$ 劣化が生じる可能性が拭えず、GaNのように再結合が多いのならば尚更である。電車のSiC MOSFETやインバータ還流ダイオード用のSBD、そして高周波のスイッチング電源用のGaN HFETやSBDといった(現在主流のシリコンIGBTに勝る)得意分野だけでも十二分に活躍の価値がある。余程の半導体材料の技術革新がないのならば、それ以上の分野を目指すのは無理があろうと、著者は考える。

なお、ダイヤモンド素子については、高エネルギー加速器等の価格を度外視した特別な装置用にのみの需要で、電力用半導体に大量に使われることはあり得ないだろう。

## 23.4 電力用素子の開発手法

パワーデバイスは、ダイオード、サイリスタ、高耐圧BJT (Bipolar Junction Transistor)、GTO<sup>60</sup>、IGBTの順に製品化した。これらの開発で、最も人工(延べ人数×時間)の掛かったのがIGBTで、最も長い期間を費やしているのがダイオードである<sup>61</sup>。どちらも、今なお開発活動が続いている。

IGBTの開発活動の動機は、目覚ましく発展したMOSFET製造技術をパワーデバイスに応用しようとするにあつた。第I部5.4.4項“絶縁ゲート形バイポーラトランジスタ(IGBT)”で詳述したように、

だ。なお、低電力用のGaN HFETは、GaN単結晶基板を用いずに大面積シリコン基板を用いるのが主流である。基地局用等ではSiC基板を用いることが多い。

<sup>60</sup>1996年頃からは、GTOサイリスタの進化形であるGCT (Gate Commutated Turn-off)サイリスタが専ら使われている。

<sup>61</sup>例えば、第II部10章“半導体と金属の接触”の前書きにあるように、SBDの動作機構について未だに議論が続いている。

多くの構造と手法が試みられた後に、“ $n^-$ 領域の望ましい電荷密度分布を実現する”という原則が明らかになったのは、15年以上経過した2000年頃であった<sup>62</sup>。それでも、未だに基本動作についての議論がなされている[3]。

還流ダイオードも、リカバリー時間の短さとオン電圧の兼ね合い、そして製造方法の安定性やコストが問題であり続けている<sup>63</sup>。そもそも、電力用の高速ダイオードの需要は、1980年にトランジスタモジュールの出現以前には実質的に無かった<sup>64</sup>。その還流ダイオードには、BJTからエミッタ領域を除いただけのpin構造に金拡散を施したものを用いた。1990年代に入りIGBTが流布し出して、さらに高速なダイオードが求められて、ようやくダイオードの構造(p形, n形領域の厚みや不純物濃度)が検討され始めたのである。

振り返りみて、どちらの場合においても決して効率の良い開発活動だったとは言えない。しかしながら、これはIGBTや高速ダイオードに限ったことではない。BJTは、1947年の発明からインバータ用の1,000V品が完成するまで35年を要した。また、サイリスタは、商品化された1957年から、GTOを経てGCTサイリスタとして完成するまで40年掛かっている<sup>65</sup>。

ところが、BJTとサイリスタ(GCT)の最終段階の開発は2,3年で済んだ。そこで問題だったのはプレーナ形の高耐圧保持(BJT)と二次破壊耐量の改善(BJT, GCT)であった。それらが短期間で解決したのは、問題の現象を引き起こす機構のモデルを立て、それからの予想を実際に確認したためであった<sup>66</sup>。

BJTの試作は、一応の製造設備があれば、開発者

<sup>62</sup>IGBT開発において、有効な成果が出始めるまでに10年を要した。付録C.7節“主観的IGBT開発史”を参照されたい。

<sup>63</sup>高価値品ではSiC SBDを用いることで決着が付きつつある。

<sup>64</sup>例えば、サイリスタをインバータに用いる際のダイオードのlife timeを短くしたが、その程度はトランジスタモジュール用のダイオードに比べて桁違いに小さかった。

<sup>65</sup>それ以降の改善がないことを以て、完成と判断している。

ちなみに、著者が各デバイスを理解したと思った時期は、これらのデバイスが完成した時期にほぼ一致している。

<sup>66</sup>例えば二次破壊耐量の改善方策は、BJTでは寄生動作箇所の省減、GCTサイリスタではゲート駆動回路の低インピーダンス化だった。

が手ずから行うことが出来た<sup>67</sup>。写真製版のマスクは4種類(ベース, エミッタ, コンタクト, 電極の各パターン)で、それぞれA0サイズの手書き図面1枚<sup>68</sup>で済ませることが出来た。拡散条件は好きなように変えることが出来た。ところが、IGBTのそのように簡便に出来ない。10枚程度のマスクを使い、トレンチ溝の側面にMOSゲートを形成する等の極めて高度な工作技術が使われている。大規模で高価な製造設備と装置が必要なことは勿論であるが、定まった製造方式から外れた作業が行い難い硬直したシステムにならざるを得ないことも大きな難点である。的確なる開発指針の必要性は益々高くなっている。

なお、デバイスシミュレータは、基本条件が揃った上での最適解を求めることと、基本動作のアイデアを確認する点では極めて有効であったが、的確な動作モデルを見出す点では無力であった<sup>69</sup>。さらに、デバイスシミュレータは、未だ半導体中の基本現象を十分再現できないことに留意せねばならない。室温の $J_F-V_F$ 特性の再現ですら、15.4節“pinダイオード順方向特性のシミュレーション”に示すように、独自の再結合モデルを使う必要があった。降伏現象等は尚更である<sup>70</sup>。

何にしる、開発活動が学会等で長期間話題になると新機能、新構造デバイスと呼ばれて話題になったが、比較的すんなりと改善が行われたものは特段の評価を受けなかった嫌いがあるのは残念である。

## 23.5 電力用半導体素子 開発活動における反省

著者は、三菱電機で当時唯一の半導体製造工場である1974年に働き始めた。それから退職までの36年間、

<sup>67</sup> 著者は、量産ライン中で写真製版でのマスク合わせ、現像、エッチング、前処理、拡散等、蒸着を除く全ての工程を自ら作業して、試作や少量量産を行った。

<sup>68</sup> 第I部5.4.3項図5.55の3段ダーリントンBJTチップでは、各パターンを重ねた多数の構成図を数枚に分けて描いた。

<sup>69</sup> 例外として、IEGT構造の発見がある[4]。

<sup>70</sup> 降伏現象のシミュレーションは、第II部12章“pinダイオードのオフ状態-静的な耐圧と動的な耐圧-”を参照されたい。

個別(discrete)半導体の製造、開発に一貫して従事してきた。担当した機種は、数十V、数十mAの小信号トランジスタ(BJT)の量産、当時は最新のパワートランジスタであった250V~350V<sup>71</sup>、10A~5A BJTの開発、小信号BJTの長期信頼性、600V~1,200V<sup>72</sup>、10A~100Aのトランジスタモジュール用BJTの開発と量産であった。1992年に半導体研究所に移動してからは、トレンチIGBTや数千V IGBTの開発マネージャーとなって、さらに基礎研究所でSiCデバイスの予備的开发に数年従事した後、パワーエレクトロニクス研究所でデバイスシミュレーションを用いた基礎的なパワーデバイスの動作解析を担当した。定年退職の前年からは、東工大の非常勤講師となって、2016年まで主にパワエレ専攻の学生にパワーデバイス特論を講義した<sup>73</sup>。

このように長期間に渡って、個別半導体の広い分野に関わった技術者はまず居ないであろうと自負している<sup>74</sup>。何よりも、世の中にダイオードとサイリスタだけが存在して<sup>75</sup>、パワーエレクトロニクスという分野がない時代から<sup>76</sup>、同僚と開発したトランジスタモジュールを用いた汎用インバータやエアコンが瞬く間に広がって、電気自動車がガソリン車を駆逐しそうだという時代まで、その技術革新の核であった電力用半導体の製造、開発を親しく体験できたことは幸運であった。

このような経験から、電力用半導体の将来動向を予想する一定の資格があると思うが、これまでそのような予想がほとんど外れて来たことを知っているのも、それは余り行いたくない作業である。

私が外して嬉しかった予想は、トランジスタモ

<sup>71</sup> Base解放Collector-Emitter降伏電圧 $BV_{CEO}$ の規格。

<sup>72</sup> Base逆バイアスCollector-Emitter降伏電圧 $BV_{CEX} \approx$  Collector-Base降伏電圧 $BV_{CBO}$ で表した定格。それ以前の伝統的では、Base解放Collector-Emitterサステイン電圧 $V_{CEO}(sus) = 450V \sim 900V$ に相応する。(名称は第I部付録A.3節“3端子素子のリーク電流値や電圧値の命名法”を参照)

<sup>73</sup> 13回各8頁の講義内容が東工大ocwよりdown load可能。

<sup>74</sup> 空間的にも、九州から関東まで色々な所で動きました。定年後は、専ら本講義録を書くことに時間を費やしています。  
<sup>75</sup> テレビの水平偏向用にフライバックトランスを共振駆動させる1,500V、5Aトランジスタが存在したが、電流が流れているL負荷をオフするハードスイッチングは出来なかった。

<sup>76</sup> W. Newellが“Power Electronics”の概念を第1回Power Electronics Specialist Conferenceで提起したのが1973年。

ジュールが製品として成功したことだった。チップと放熱板の間にアルミナの板や銅電極を挟んで、その間を4層もの半田で接着した構造が、それまで過渡熱抵抗を大事な検査項目として来たパワートランジスタで市場で通用するとは思えなかった。ところが、伝統的なパワートランジスタは、シリーズレギュレータのように数V～数十Vの電圧が加わった状態で動作したが(活性部動作)、トランジスタモジュールが専ら使われたインバータではスイッチング動作で使われて、十分なベース電流を流すのでオン状態で2～3V程度の動作電圧となる(飽和動作)。それで過渡熱抵抗は余り意味がなかったのである<sup>77</sup>。

トランジスタモジュールが成功すると予想したのは、1982年に短絡破壊の原理を見出した頃であった。その原理を発表すると共に[5]<sup>78</sup>、1,200V、300Aトランジスタジュールを展示した1983年のIPEC-Tokyoで、それは確信となった。

最も残念だったのは、1990年代前半にIGBTが世に広がりだした頃、トランジスタ(BJT)はIGBTと共存し続けるとする予想であった。実は、その直前までIGBTは胡散臭いと思っていた<sup>79</sup>。それが当時の主流意見だったように思う。

例えば、1988年10月に開催されたIEEE IAS年次総会では<sup>80</sup>、パワーデバイスの優劣をテーマとしたパネルディスカッションの討議者は、GTO、BJT、SiRET<sup>81</sup>のそれぞれを代表する三菱電機、Powerex<sup>82</sup>、Sea-

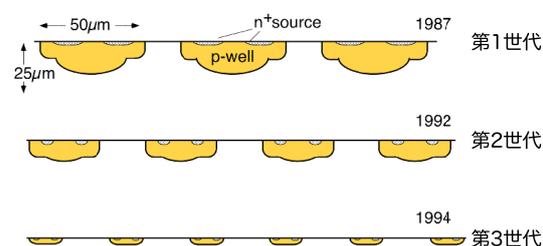


図 23.3: IGBT オン電圧の改善手法 [図 5.59]  
(表面  $p$  領域比率の低減) ([7] 図 18.)

mens の技術者のみで、IGBT 側の討議者は招かれてなかった。

BJT 派であった著者が、IGBT 派に乗り換えたのは1993年頃で、IGBTが基本的に  $pin$  ダイオードとして動作していると気付いたからであった<sup>83</sup>。さらに、しばらくして図 23.3 に示す関係を見出して<sup>84</sup>、それが確信に変わった。1986年に1,000V品が製品化されたIGBTモジュールが主流デバイスになると判断(予想)するまで7年ほど掛かった訳である。

一方、SiCがパワーデバイスの分野で話題になり始めたのは1993年頃である。パワーデバイスを代表する学会であるISPSD'92で松波教授がSiCの製造方法を、翌年のISPSD'93 MontereyでもSBDの簡単な試作が招待講演されて一躍注目された<sup>85</sup>。1990年代の後半には、“IGBT技術は成熟域に達しており、近々シリコンデバイスはSiCデバイスに取って替わられる”と予想する開発者も少なくなかった<sup>86</sup>。

それから約25年経った今日、この予想は大きく外れた。IGBTはLight Punch Through (Field Stop) 構造とIEGT構造を組み合わせた形に進歩して、依然主流デバイスであるし、SiCはSBDを除いて広

立し、後に三菱電機も同じ資本比率で加わったパワーデバイスの製造と販売を行った会社で、Pittsburgh郊外に工場があった。

<sup>83</sup>1992年には、まだBJTの改善方法を提起していた[6]。

<sup>84</sup>この図は、1996年に“IGBTのMOS部分の世代変化”と名付けて発表した([6] 図 18)。IGBTのオン電圧の改善が、当時言われていたパターンの微細化による  $p$ -well 間の抵抗の低下(J-FET効果の低減)ではなく、表面  $p$  領域の影響が小さくなることと対応していることを示している。

<sup>85</sup>1993年にはデバイス試作例が米国大学から3件発表された。

<sup>86</sup>これらの経緯は、第I部付録A.16節“ワイドバンドギャップパワーデバイスの開発経緯”を参照されたい。

<sup>77</sup>活性部動作では、電流の正帰還的な増大要因となる温度上昇を極力抑えねばならなかったが、飽和動作では逆に温度が上がると通電能力が下がるので熱抵抗は問題にならない。

<sup>78</sup>この時、バイポーラトランジスタの2次破壊を解決したと言っている。勿論、逆バイアス破壊(RBSOA)が残っており、その解析と解決方法を発表したのは1985年であった[2]。

<sup>79</sup>1,200V BJTは3段ダーリントン構造、600V BJTでも2段ダーリントン構造にせねば実用的なオン電圧まで低減できなかった。ところが、当時の600V IGBTは2段ダーリントン構造のBJTよりもオン電圧が高く、1,000V品ではその差は広がって、高速スイッチングとゲートの電力駆動が優れるだけで、汎用的には全く競争力を持たなかった。

<sup>80</sup>私は、PowerexのBJT製造計画を支援するために出張していたので、このPittsburghで開かれたミーティングに参加した。

<sup>81</sup>Siemens社が提起した当時の先進技術を盛り込んだ単体BJT。第I部5.4.3項“接合形バイポーラトランジスタ(BJT)”(ii. 高耐圧BJT)の最後で簡単に説明している。

<sup>82</sup>GEのパワーデバイス部門とWestinghouseが1986年に設

範に使われていない。新幹線の主電動機を制御する 3kV MOSFET の出現も予想外で、当時のもとより 2000 年代に入っても、数千 V 以上の高電圧ではオン電圧が高くなる為に SBD や MOSFET は使えずに、まずは GTO サイリスタが有力とされていた。

その頃 “1,600V MOSFET には広大な市場がある” というスイッチング電源分野開発者の講演を電気学会 技術調査専門委員会で聞いたことがあったが、その分野の開発が行われる風はなかった。需要があるのに何故開発しないかと、著者は訝った記憶がある。

そして、少なくとも 2 つの SiC デバイスの開発が成功したと、著者は考える<sup>87</sup>。まず、Westinghouse が GaAs よりも 1 桁高い 250V 動作の高周波用 SIT を 600MHz, 1kW のマイクロウエーブ中継器に用いた (1995 年頃)[8]。もう 1 つは関西電力と Cree 社が、GCT サイリスタに相応する SiCGT (SiC Commutated Gate turn-off Thyristor) を 250 °C まで可能なパッケージ等を含めて開発して [9]、2006 年には DC 電圧 2kV、動作周波数 2kHz で 100kVA の 3 相インバータの実証試験を行った [10]<sup>88</sup>。両者ともその後の動向は不明なのだが、実用的なデバイスを開発したことは高く評価できると、著者は考える。

2000 年以降、SiC のバイポーラ素子の開発は、それまで本命であった GTO サイリスタから、単体 BJT や IGBT に方向が変わった<sup>89</sup>。2010 年代前半には、それぞれ  $\geq 10kV$  の BJT や IGBT の試作が報告された。

結局、25 年間に渡る SiC パワーデバイスの開発は、SBD が Si IGBT の優秀な還流ダイオードになって、3kV MOSFET で新幹線を動かすという輝かし

<sup>87</sup>19.1.1 項 “SiC パワーデバイスの開発経緯” (iii. “SIT, MESFET の開発”), (iv. “GCT(GTO), BJT, IGBT の開発”) を参照。

<sup>88</sup> $V_F$  劣化の問題に対しては前もって予備試験をして素子の選別をせねはならなかった。しかしながら、現在も完全に解決されていない問題なので、当時としては止むを得ない。

<sup>89</sup>著者は、通電能力が乏しい為に高電圧向きでない SiC BJT の開発が ( $V_F$  劣化問題があるのに) 新に始まったことを意外に思った。ところが、MOSFET よりは大電流動作できるし、単体 BJT は MOSFET と同じく立ち上がり電圧が 0V であること、さらに作り方が IGBT よりも遥かに簡便である等から納得した。

い成果を得た。しかしながら、どちらも 2010 年を過ぎる頃までは積極的に目指した方向ではなく、穴馬的な分野であった。開発当初のシリコン素子を凌駕するという目標からすれば、SiC デバイスの開発は総じて失敗の連続であったと言えよう。

一方、第 I 部 5.4.4 項 “絶縁ゲート形バイポーラトランジスタ (IGBT)” に記した 35 年に渡るシリコン IGBT の開発経緯も<sup>90</sup>、決して成功を積み上げた歴史とは言えず、むしろ迷走史であったと言うべきであろう。なぜ、そのようなことに立ち至ったのか十分に反省する必要がある。効率的な開発を目指す為には、二つの大きな要点に留意せねばならないと著者は考える。(A.) デバイスの開発に臨む担当者の姿勢と、(B.) デバイスを使うシステムの要求である。

(A.) 著者は「トランジスタ (BJT), サイリスタ, *pin* ダイオードの理解に、それぞれ 10 年, 20 年, 30 年かかった」と 2006 年に発表した [11]。ところが、“バイポーラ トランジスタの動作モデルを再考察” して電流増幅率  $h_{FE}$  を最終に説明し得たのは退職した 2010 年であった [12]。入社後 10 年で二次破壊を解決してトランジスタ (BJT) を判った気になっていたが、実は  $h_{FE}$  等の基本動作機構を理解してなかった。その迂闊さは、他のデバイス開発者も似たようなものであったろう。

その前に、トランジスタ動作よりも簡単なはずの *pin* ダイオードのオン動作さえも判ってなかったことに気づいた。その動作原理の理解を基にして、初めてトランジスタ動作の説明が可能になった [13]。

さらに、物理現象は電圧よりも電界強度の方が意味を持つことが多いのだが、電界強度が比較的低くともそれが広く分布することで、電界強度だけでは決まらない現象群が現れる。それらは、実際にそのような効果が現れる高電圧半導体素子が表れるまでは予想できなかったのも、高電圧現象の理論解析が大幅に遅れた。著者が、この降伏

<sup>90</sup>付録 C.7 節 “主観的 IGBT 開発史” も参考にされたい。

動作を巡る現象に納得できるようになったのは退職する2,3年前であった[14], [15]。

それでも、本書で述べてきたように、デバイスシミュレータを活用することで、電力用半導体素子の諸動作の全容がようやく明らかになって来たように思える<sup>91</sup>。しかしながら、そのような基礎理論への注力が余りに遅すぎたと、著者は反省している。電力用半導体素子に限らず、課題がある限りそれを解決する手段が見い出されるはずである。現役の方々には、目前の喫緊の問題ばかりに捉われることなく、基礎理論に立ち戻ることを忘れずに技術開発を行うて欲しいと著者は願います。

(B.) 電力用デバイスはシステム内の一つの部品として意味があるのに過ぎないので、いかにそれが重要な部品であっても電力用デバイスが先導してシステムを変えることは難しい。システムの要求に合致するデバイスのみが採用されるのが当然である。また、同種のより特性の良いデバイスが現れると、新機器を設計する際には新デバイスが使われるが、それまでの装置もその所定寿命までは使用される。したがって、その切り替えには時間が掛かり、それは機器の規模が大きいほど緩やかとなる。このため、新しいデバイスの急激な進展は、新たな機能を有する機器システムが現れて、それが世の中に容易に受け入れられる状況がまず存在して、新デバイスがその新システムの要求に合う場合に限られる。また、システム中の該当デバイスの重要度が高い場合には、新システムは該当デバイスにも新機能を求める場合が多くなる。すると、新機能デバイスは新システムの開発期間内に開発されねばならない。

電力用半導体素子の歴史を顧みた時、新システム開発の成功例として、1980年代前半のトランジスタモジュールとここ2,3年のGa<sub>N</sub> HFETが挙げられよう。1980年頃、インバータ需要の拡大には、スナバと電流制限リアクトルが必要なGTOでなくBJTが不可欠とするシステム設計側の狙いがあった、それに必要とされたのがトランジスタモジュールの機能

<sup>91</sup>ただし、ダイオードのリカバリー破壊や宇宙線誘起破壊の最終段階には未だ不明点も残っている。

だった訳である。また、最近のスマートフォンに代表される情報端末の増大が要求する、基地局の増大や一層小型軽量の電源に応えたのが200Vで数MHzスイッチングが可能なGa<sub>N</sub> HFETであった<sup>92</sup>。

GCTサイリスタとIGBTの実用化は、それぞれGTOサイリスタとBJTの改善デバイスが現れた例であると、著者は判断する。しかしながら、GCTは2,3年で開発を終えたが、IGBTは1982年の試作発表から1,200V品で3段ダーリントン構成のBJTを凌ぐ1995年頃まで10年余りを要した。両機種が開発された後は、新規装置でGTOやBJTは低価格、低機能品にのみ使われることになった。

## 23.6 まとめ: 電力用素子の展望

先項の(B.)の観点に立てば、SiC MOSFETはIGBTを凌ぐデバイスとは言い難い。SiC MOSFETが新幹線や電車へ採用されたのは、それらの回生効率の改善とか故障時の補完装置があるという独自システムの要求に一致したからで、一般のインバータへの採用されるにはコストや信頼性面で異なる要求に応えねばならない。現状の実力では、SiCデバイスはシリコンIGBTを置き換える実力がないのは明らかで、その使用は特定市場に限られよう。SiCデバイスでないと不可能な著しく性能の良い装置(システム)<sup>93</sup>が現れない限り、SiCデバイスが画期的に広がることはない、著者は予想する。

Ga<sub>N</sub>の横形素子は、通信とか小型電子機器の電源分野で、10倍程度の高電圧を扱える利点を生かして現在主流のGaAs横形素子を置き換えて、さらに小型化面で新規な市場を開いて行くことが期待できよう。ガリウムGaは大量の材料供給が難しいが、横形素子(HFET, SBD)なら、シリコン等の廉価、大口径基板上に成長させたエピタキシャル層内に形成するので問題ない。アバランシェ耐量が小さいのは横形

<sup>92</sup>さらに、文献[16]には、自動車用の高電力密度インバータとそれに使われた両面冷却IGBT“パワーカード”の詳しい開発事例の紹介がある。“半導体屋よりも実装屋の力が強い開発チームの方が製品化は上手くいく”と著者(戸倉)は言っている。

<sup>93</sup>還流ダイオード用にSiC SBDを用いたインバータが、それに準ずる装置と言えよう。

素子の宿命であると著者は考えるので、その用途は電源等のソフトスイッチングに限るべきであろう。

GaNの縦形素子(MOSFET, SBD)は、ハードスイッチングが可能でインバータ等で一般的に使いよう。しかしながら、ガリウムGaの希少さからSiC以上に結晶の価格が高くなって、 $V_F$ 劣化問題が解消する可能性が高くと、SiCよりも優位になり得ないと、著者は予想する。

$Ga_2O_3$ は、GaNのような圧電効果がないのでHFETは期待できない。また、主要デバイスとなるには、シリコン並みに、すなわちデバイスの能動領域をその中に形成し得るほどの高品質な結晶を大量に供給できるのか疑わしい。何よりも、GaN同様にガリウムGaが希少材料であるのが問題である。正孔のドリフト移動度が小さいことと、何よりも $p$ 形ができてないことからバイポーラ素子は無理であろうから、原料の豊富さに勝るSiCに対しての優位性は、 $V_F$ 劣化がないことと単結晶とエピタキシャル成長の容易さになる。差し引きして、特段の優位性があるようには思えない。

結局、電力用素子の将来は、素子自体の優劣よりも、それらを使用する装置(システム)の動向に左右されよう。その本当の発展は、新しい需要が生じるシステムの開発に掛かっていると、著者は考える。

ところで、半導体デバイス屋は、その原理や機能、現状の特性と将来の改善予想等を明らかにする責務があるが、それらのデバイスが将来どのように使われるかの予想は、(デバイス屋の提供する情報を基にして)それを使用する装置(システム)設計者が行うのが合理的である。むしろ、デバイス屋は、何を開発するかよりも、どのように開発するかという開発姿勢を正しく見通すべきであると、著者は考える

大学や研究所の研究者はともかく、開発に直面している技術者は、第一に現在のデバイスの課題を解決して完成度を高めることに注力すべきであろう。そうすれば、何らかの成果を上げることが出来る。

新たな開発目標として新規デバイスを選ぶのなら、それが使われる装置(システム)が本当に切望されている手応えを感じるものにすべきである。そう

すれば、大成功を取め得る可能性が高い。

自由に開発課題が選べない人は、与えられた課題について、出来るだけ精緻なデータを積み上げることがまず肝心である。広く調べて深く考察すれば、その目の前の現象について、自らが最も知っている状況になり得る。新しい方策は、そのような後に見いだせよう。

何にせよ自ら納得すること、さらに納得した説明を積み上げることが大事である。その結果、バンド理論を用いずに半導体を説明しようとする本書は極端であるが、そのような姿勢がなければ、一介の工場技術者が長年デバイス開発に携わることはあり得なかった<sup>94</sup>。

著者のこれまでの発表は大きく的を外してなかったと自負している。例えば、BJTの短絡動作原理とその動作限界(SCSOA)の提示[5](1983年)、BJTのサステイン動作の解析とその動作限界(RBSOA)の説明[2](1985年)、IGBT動作を不完全なpinダイオードと見なす解釈[7](1996年)、pinダイオードやBJTの動作原理[13],[12]<sup>95</sup>(2010年)等である。

半導体技術は、メモリに代表される微細加工技術がまず成熟し、LEDやLDの発光デバイス、HBTやGaAsやGaNの高周波デバイス、そしてようやく電力用素子も成熟しつつあるのが現在だと、著者は考える。半導体素子の飛躍的な進歩は、23.3.1項“新構造デバイスの可能性”の最後に述べたように、熱速度 $v_{th}$ よりも高速に移動する電荷担体の移動現象を利用することでもたらされ得ると、著者は考える。

<sup>94</sup>もともと、以下の事項については十分に納得し得てない。

- A. 衝突電離係数(第II部7.5.7項を参照).
- B. 再結合現象(第II部7.4節を参照).
- C. 伝導現象(第II部7.5節を参照).
- D. 電界放出素子(FED: Field Emission Device).  
19.4.2項“ダイヤモンドデバイスの開発経緯”を参照.

<sup>95</sup>これらの文献は必ずしも要領よくまとまってないので、本書の関連箇所を参照されたい。

それは“超伝導デバイス”とすることが出来る。そのような量子現象は、まず微小なデバイスに適用されて、構成要素の寸法が大きくなる電力用素子では利用し難いと予想されるが、原理が共通していることには変わらない。ポリアセチレンやベンゼン環、グラフェンやナノチューブからゲルマニウムやシリコン、そしてダイヤモンドまで共通した、一般的な原理や機構が存在するはずであると、著者は考える。それが明らかになれば、半導体素子分野も将来大きく発展しようと、著者は期待する。

## 参考文献

- [1] K. Kawahara, S. Hino, K. Sadamatsu, Y. Nakao, Y. Yamashiro, Y. Yamamoto, T. Iwamatsu, S. Nakata, S. Tomohisa and S. Yamakawa, “6.5 kV Schottky-Barrier-Diode-Embedded SiC-MOSFET for Compact Full-Unipolar Module,” proceeding of ISPSD2017, pp.41-44, 2017
- [2] I. Takata, H. Nishiumi, H. Iwamoto, and Y. Yuu, “A Basic Analysis of High Voltage Operation of High Power Transistors and Diodes,” conference record of IEEE IAS’85, pp.900-904, 1985
- [3] 高田 育紀, “非対称  $pin^+$  ダイオードの意義 -シリコン IGBT 限界に関する考察-,” H24 電学研究会資料, EDD-12-071/ SPC-12-144, pp.65-70, 2012-10-26
- [4] M. Kitagawa, I. Omura, S. Hasegawa, T. Inoue, and A. Nakagawa, “A 4500V Injection Enhanced Insulated Gate Bipolar Transistor (IEGT) Operating in a Mode Similar to a Thyristor,” Tech. Digest on IEDM’93, pp.679-682, 1993-12
- [5] H. Nishiumi, I. Takata, Y. Takagi, and S. Kojima, “High Voltage High Power Transistor Modules for 440V Line Voltage Applications,” Conference Record of IPEC-Tokyo, pp.297-305, 1983
- [6] I. Takata, T. Hikichi, and M. Inoue, “High Voltage Bipolar Transistor with New Concept,” IEEE IAS annual meeting ’92, pp.1126-1134, 1992
- [7] 高田 育紀, “IGBT 最先端 -デバイスからモジュールまで-,” H08 電気学会全国大会 先端技術セミナー資料, pp.17-25, 1996-3-27
- [8] R. C. Clarke, R. R. Siergiej, A. K. Agarwal, and P. A. Orphanos, “SIC Static Induction Transistors,” DTIC Accession Number ADA299605, 1995-1, <<http://www.dtic.mil/get-tr-doc/pdf?AD=ADA299605>>
- [9] Y. Sugawara, K. Asano, S. Ogata, A. Agarwal, S. Ryu, J. Palmour, S. Okada, and Y. Miyanami, “4.5 kV 60A SICGT and Its Half Bridge Inverter Operation of 20kVA Class,” proceedings of ISPSD2004, HV5-2, pp.295-298, 2004
- [10] Y. Sugawara, Y. Miyanagi, K. Asano, A. Agarwal, S. Ryu, J. Palmour, Y. Shoji, S. Okada, S. Ogata, and T. Izumi, “4.5 kV 120A SICGT and Its PWM Three Phase Inverter Operation of 100kVA class,” proceedings of ISPSD2006, pp.1-4, 2006
- [11] 高田 育紀, “IGBT に至るまでのパワーデバイス開発概史：この30年間のパワーデバイス動作モデルの進歩,” 電子情報通信学会技術研究報告. ED2006-263, pp.33-38, 2007-3
- [12] 高田 育紀, “バイポーラ トランジスタの動作モデルの再考察,” H22 電気学会研究会資料, EDD-10-111/SPC-10-168, pp.63-68, 2010-11-30
- [13] 高田 育紀, “バイポーラモード静電誘導トランジスタ (BSIT) の動作機構 -BJT 動作の理解のために-,” H21 電気学会研究会資料, EFM-09-035/EDD-09-069/SPC-09-136, pp.29-34, 2009-10-30
- [14] 高田 育紀, “pin ダイオードの逆方向電流-電圧特性と降伏限界の解析,” H19 電気学会研究会資料, EDD-07-78/ SPC-07-104, pp.49-54, 2007-10-27
- [15] 高田 育紀, “アバランシェ降伏現象の過渡シミュレーションによる解析,” H20 電気学会全国大会, 4-163, Vol. 4, pp.272-273, 2008-03
- [16] 戸倉 規仁, 牧野 友厚, “両面放熱パワーモジュールの具現化を牽引した FS-IGBT とその経緯 -シリコンチップの電子的・熱的・機械的特性を活かした実装技術-,” H30 電学研究会資料, EDD-18-060/ SPC-18-154, pp.51-58, 2018-11-01.