

〈3〉ダイヤモンド半導体を巡る最近の動向と今後の見通し

佐賀大学 研究戦略マネジメント室／リージョナル・イノベーションセンター
シニアリサーチ・アドミニストレーター
海洋エネルギー研究所 特命教授
フューチャー・リソース推進プラットフォーム 副代表
博士（農学） **平山 伸**

■半導体業界における ダイヤモンド半導体の位置づけ

近年、再生可能エネルギーを安定供給するための大型発電設備や大型の駆動装置等に向け、各種パワー半導体の研究が加速している。このパワー半導体の素材としては、現在シリコン（Si）が主流であるが、次世代素材として、炭化ケイ素（SiC）の新規工場が国内外で稼働したところである。また、東日本大震災や能登半島地震の発生を機に、大規模災害時の安定的な電力供給の必要性から 50Hz と 60Hz の異なる周波数の連系容量の増強が課題として顕在化してきている。これらを陰で支えているのがサイリスタバルブ（交直変換装置）であり、本邦では FC（Frequency Converter）設備においては光直接点弧サイリスタを使用した空気絶縁純水冷却方式が採用されているが実情である^(1, 2)。ちなみに、周波数が 50Hz の電源は、1 秒間に変わる電圧の向きは 50 回となる。本邦では、東西で周波数が異なり、東日本は 50Hz、西日本は 60Hz のため、どちらでも電化製品を使えるようパワー半導体が機能している。

さらに、5G や Beyond 5G 等の通信の大容量化に伴い、半導体電子デバイスの高周波数化と高出力化が要求されている。テレビの放送地上局や通信衛星等の大規模施設では 10GHz・1kW レベル以上、Beyond 5G では 100GHz・100W レベル以上の高周波・高出力化が必要になってくるが、これらの周波

数帯域では、対応できる半導体電子デバイスがなく、エネルギー効率のロスが大きい大型の真空管が未だに用いられ（図 1）、近年 GaN HEMT^{*1} の登場によって信頼性向上を目指した固体化が進展しつつある⁽³⁾。しかし、増幅素子である GaN HEMT 素子の出力レベルが必要とされる送信出力よりも低いため、増幅素子をモジュール化し複数台を並列動作させることで目標の出力レベルの達成を図っている。半導体の素材については、シリコン、ヒ化ガリウム（GaAs）、炭化ケイ素（SiC）、窒化ガリウム（GaN）等が実用化段階になってきているが、究極の半導体と云われているダイヤモンド半導体が実現できれば、その理論上の物理的性質から、SiC や GaN を超える周波数や出力が容易に達成できることが知られている。

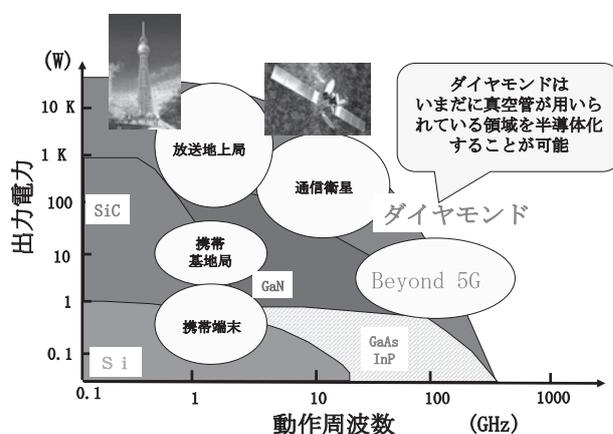


図 1 Beyond 5G に向けた半導体の高周波化・高出力化の必要性とダイヤモンド半導体の位置づけ
(出所：嘉数、NTT Technical Journal, vol. 8, No. 8 (2010))

一方、半導体素材の GaAs は発がん性や生殖毒性が化学物質の有害性を分類した GHS の区分 1A に分類され、国際がん研究機関（IARC）の発がん性リスク一覧においても Group 1 に分類されており、加工工程の取り扱いや後処理を含めた安全上の対応が必要になる。さらに資源供給の面から、ガリウムはボーキサイトからアルミニウムを精錬する際の副産物として得られ、主要生産国として中国が約 98% と圧倒的なシェアを占め、ロシア、日本等がそれに続く。これに対しダイヤモンド半導体に利用されるダイヤモンドは、天然のダイヤモンドではなく、天然ガス（メタンガス）と水素を原料に密閉されたチャンパー内で化学気相成長法（Chemical Vapor Deposition：CVD 法）にて作製されるため、安全上や資源確保の点からも優位性を示す。

ダイヤモンドの物性を他の半導体素材と比較してみる。図 2 のようにダイヤモンドは、シリコンに比べ約 50,000 倍の大電力高効率化、約 1,200 倍の高速特性、5 倍の高温での動作、17 倍の放熱性等が期待される。

そのため、ダイヤモンドパワー半導体が成立できれば、パワー半導体の課題である放熱や電力損出を抑え、かつ、従来の半導体を凌駕する性能を実現できる可能性がある。

このように半導体素材の中でその性能ポテンシャルの高さから究極の半導体素材と呼ばれているのがダイヤモンドである。そのためダイヤモンドパワー半導体の実現できれば、格段に省エネルギーで効率

的な大電力の制御が期待できる。

■新動作原理のダイヤモンド半導体デバイスの研究開発

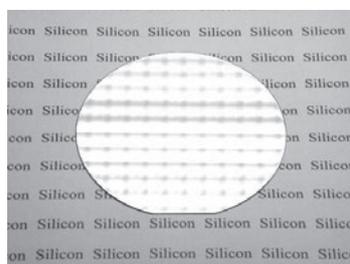
これまでダイヤモンド半導体デバイスは動作していたものの、出力電流値が低く、短時間で劣化してしまうため、究極の半導体と言われてきたものの、実用化には多大な障壁があるものとされてきた。すなわちダイヤモンド半導体には、2つの大きな障壁といえる課題があった。

1つ目は、大口径のダイヤモンドウェハの製造である。以前は、人工ダイヤモンド結晶基板は 4mm 角の寸法であり、実証試験に使える大きさではなかった。佐賀大学と共同研究先の企業は、大口径のものが入手可能な絶縁性のサファイア基板の上に、ダイヤモンドを結晶成長できることを突き止め、最大 2 インチ径（直径約 5cm）のダイヤモンドウェハの開発に成功してきた⁽⁴⁾。さらに佐賀大学では、独自に面方位の解析視点から結晶評価を進め、その学理を明らかにして特許出願を加速させている。その技術基盤の一翼を担っているのが、佐賀県立九州シンクロトロン光研究センター（SAGA-LS）である。この SAGA-LS は、2004 年にオープンした研究施設で、この中には佐賀大学の専有ビームラインに加え、県有の照射・結晶構造ビームラインや局所構造ビームライン等、合計 10 本のビームラインが備えられ、研究者が比較的容易に利用できる環境条件が整備されて

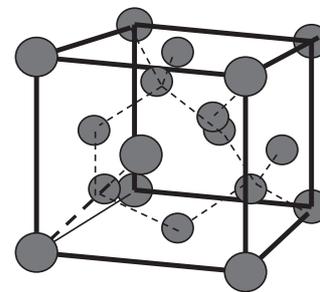
ダイヤモンド



シリコン



半導体の結晶構造



物性の指標	シリコン	炭化ケイ素	窒化ガリウム	ダイヤモンド	ダイヤモンド半導体の特性
バンドギャップ	1	2.9	3	4.9	約 5 倍の高温で動作
絶縁破壊電界強度 ^{*2}	1	9.3	16.6	33	33 倍の高電圧で動作
熱伝導度	1	3.8	1.2	17	17 倍放熱しやすい。温度上昇がない
バリガ性能指数	1	580	3,800	49,000	約 5 万倍大電力で高効率のデバイス特性
ジョンソン性能指数	1	420	1,100	1,225	約 1,200 倍の Beyond G 向け高速パワーデバイス特性

図 2 種々の物性値から期待されるダイヤモンドデバイスの優位性

いる。佐賀大学で独自に作製したダイヤモンド結晶は、X線回折の強度や半値幅から原子レベルの欠陥や平坦性の解析において世界最高品質であることもこのビームラインの解析で確認しており（図3）、その知見をもとに、導電性基板上にもダイヤモンドヘテロエピタキシャル成長が可能であることを突き止め、研究を加速している。

2つ目の課題は、半導体デバイスに必要なドーピング技術である。これまでは、活性化エネルギーが低く、十分な濃度の電子やホールを生成できるドナー不純物、アクセプタ不純物を見出せていなかった。一方、佐賀大学は、NO₂でp型ドーピングできることを世界で初めて発見し、デバイス動作に十分なp型ドーピングができるようになった⁽⁵⁾。さらに、原子層堆積法（ALD）でゲート絶縁膜、パッシベーション膜としてAl₂O₃を低温堆積させれば、NO₂-p型ドーピングで形成したホールチャンネルは高温でも安定化できることを見出した。このように独自に開発した基盤技術を土台にダイヤモンドMOSFETを作製し、他の研究機関の性能数値を格段に上回る世界最高の出力電力875MW/cm²、出力電圧3,659V

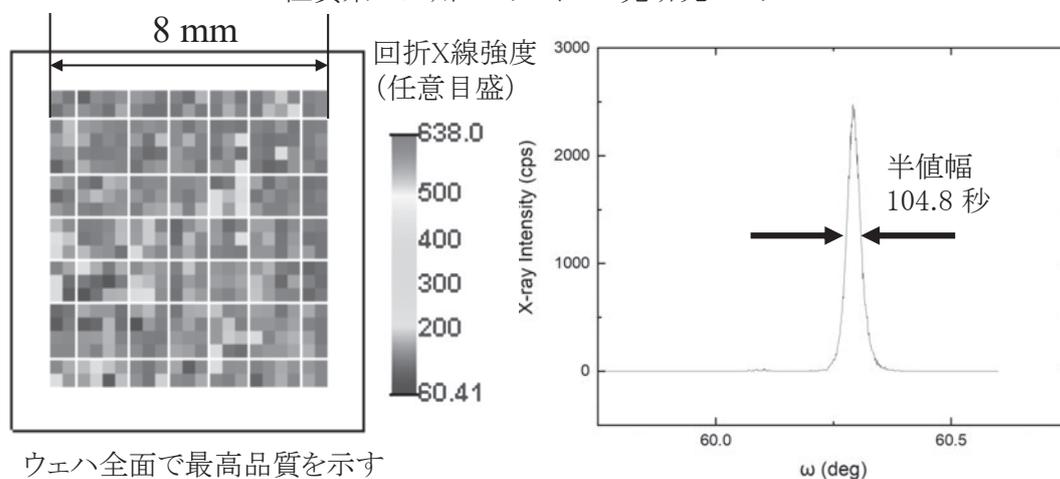
を達成した（図4）⁽⁶⁾。さらに、独自のダイヤモンド半導体パワーデバイスを開発し（図5）、10nsを切る高速のスイッチング動作を確認すると共にダイヤモンド半導体パワー回路で百時間レベルの連続動作が可能なることを明らかにした⁽⁷⁾。さらにこの2年ほどで研究が進展し、最新データとしては3,360時間を達成する等、実用化に向けた信頼性データの構築が進んでいる（図6）⁽⁸⁾。

■ダイヤモンド半導体の適用が期待される分野

ダイヤモンド半導体が期待される適用分野として、1) 航空・宇宙向け高出力化並びに高周波特性による演算高速化、2) Beyond 5G 向けの大容量高速通信、3) 電気自動車・鉄道向け制御用パワー半導体、4) 量子コンピュータでの高い放熱性と省エネを兼ね備えた演算高速化等が挙げられる。これらは、ダイヤモンド特有の物性、すなわち、高周波、高出力、高放熱性、高耐放射線等の特性から期待できる分野と言えよう。例えば、Beyond 5Gで要求される



佐賀県立九州シンクロトロン光研究センター



ウェハ全面で最高品質を示す

世界最高のダイヤモンド結晶品質データ

図3 シンクロトロン光の解析によって実証したダイヤモンド結晶の世界最高品質