

次々世代技術のダイヤモンド半導体が注目される

◆ダイヤモンド半導体が2023年半導体・オブ・ザ・イヤー優秀賞を受賞

2023年5月、電子デバイス産業新聞が、半導体・オブ・ザ・イヤーを発表した。この賞は、22年4月～23年3月の間に新製品として発表された製品・技術、および電子デバイス産業新聞紙上で紹介された新製品の中から、開発の斬新性、将来性などを基準に選定される。半導体デバイス部門では、佐賀大学、Orbray（旧アダマンド並木精密宝石）が「ダイヤモンド半導体パワーデバイスの世界最高の出力電力・電圧」というテーマで優秀賞を共同受賞した（表1）。なお、Orbrayは、22年も「2インチダイヤモンドウェハーの量産技術開発」というテーマで半導体用電子材料部門のグランプリを受賞している。

表1 半導体・オブ・ザ・イヤー2023から抜粋（出典：電子デバイス産業新聞）

■半導体デバイス部門

受賞名	受賞者	受賞テーマ名
グランプリ	キオクシア、 Western Digital Corporation	高度なスケールリング技術とウェハーボンディング技術を採用した218層 3次元フラッシュメモリー
優秀賞	ルネサスエレクトロニクス	xEV向けインバータ用新世代パワー半導体Si IGBT
優秀賞	佐賀大学、Orbray	ダイヤモンド半導体パワーデバイスの世界最高の出力電力・電圧

◆究極のパワー半導体と呼ばれるダイヤモンド半導体

今回の受賞は、佐賀大学工学部の嘉数教授のグループが、ダイヤモンド半導体パワーデバイスで世界最高の出力電力密度875MW/cm²と出力電圧3659Vを達成した成果に対するものである。

ダイヤモンドは、バンドギャップ、絶縁破壊電界、熱伝導率などの重要指標が全体的に高い（表2）。半導体材料として現在主流のSi、SiC、GaNと比較して、ダイヤモンドはバンドギャップが大きいので、高温、高電圧に耐えることができる。そのため、絶縁破壊電界がSiより30倍も高く、動作電圧を高く設定することができ、高い電力を出力できる。また、ダイヤモンドは電子飽和速度が他の材料と遜色なく、高周波特性も良い。さらに、ダイヤモンドは熱伝導率が1桁大きく、放熱性が優れている。そのため、動作時のデバイス温度があまり上がらず、

それだけ高い電力を出力することができる。以上を総合すると、ダイヤモンドは先行して実用化が進むSiCやGaNを凌駕する物性を持っており、究極のパワー半導体と呼ばれている。ダイヤモンド半導体パワーデバイスは、低炭素社会実現のためのキーデバイスとして、電力エネルギー変換や電動自動車などの民生用途の他、耐放射線特性にも優れるため宇宙用途への展開も期待されている。

表2 各種半導体材料の物性の比較（各種資料よりARC作成）

	Si	SiC	GaN	Ga ² O ³	ダイヤモンド
バンドギャップ*1 (eV)	1.1	3.3	3.4	4.9	5.5
絶縁破壊電界*2 (MV/cm)	0.3	2.5	3.3	8	10
電子飽和速度 (10 ⁷ cm/s)	1.0	2.2	2.7	2	2.7
熱伝導率 (W/cm・K)	1.5	4.9	2.0	0.1-0.2	20

注*1：結晶中における、化学結合に使われる価電子と物質中を動き回る伝導電子のエネルギーの差。

熱や電圧などバンドギャップを超えるエネルギーを与えると電気が流れる。

注*2：電界をかけたときに物質が壊れる(絶縁破壊)限界値。値が大きいほど物質は壊れにくい。

◆基礎研究段階における技術課題とブレークスルー

ダイヤモンド半導体の歴史は古く、国内では1980年代から物質・材料研究機構や産総研などが結晶合成法やp、n型半導体の実現、ダイオードやトランジスタといったデバイス開発といった要素技術を創出し、研究をリードしてきた。

しかし、これまでのデバイス開発は基礎研究段階にとどまっていた。その理由は、技術課題が山積していたからである。半導体デバイスレベルの基板の大口径化や高品質化が困難、ダイヤモンド結晶は非常に硬いため研磨が困難、ドーピング技術（不純物を微量に添加して半導体にすること）が成熟していないといった課題を抱え、物性のポテンシャルからするとデバイス特性が十分に引き出せない状態が続いていた。

これらの課題を克服するきっかけとなったのが、工業用宝石メーカーであるOrbrayが開発した大口径ダイヤモンド基板である。21年9月、ダイヤモンドの素材結晶成長と加工技術を有するOrbrayは、ヘテロエピタキシャル法を採用した直径2インチ（50mm）のダイヤモンド基板の量産技術を開発した。ヘテロエピタキシャル法では、イリジウム薄膜/サファイヤ基板を下地にCVD（Chemical Vapor Deposition）法を用いてダイヤモンドを成長させる。約1000度の高温で成長したダイヤモンドが室温に冷却される過程で、下地のサファイヤがダイヤモンドより

も縮み、大きな歪みが発生する問題があった。そこで、**サファイヤ基板に階段状の微傾斜を付けて結晶成長させる**ことで、冷却時に応力が横方向にかかってイリジウム層とサファイア層が自然に剥離する手法を開発した。今後のダイヤモンド基板の大口径化は、下地のサファイア基板の大きさ次第ではあるが、現状では最大6インチまで可能であるとしている。

また、ダイヤモンド基板の研磨による高品質化も技術課題だった。Orbrayは、ダイヤモンドの表面を、機械的研磨後にさらにCMP（Chemical Mechanical Planarization）研磨する技術を開発し、表面の加工変質層を除去することに成功した。これにより抵抗の因子となるダメージがなくなり、デバイス性能が飛躍的に向上した。ただし、ダイヤモンドは硬い材料であり、時間がかかる研磨は基板価格に直結する重要な項目である。コストダウンのためには、新たな研磨手法の確立が必要である。他にも、ティ・ディ・シー、大阪大学、産総研の研究グループがプラズマを援用したダイヤモンド研磨手法の実用化を進めている。

さらに、デバイス構造でもブレークスルーがあった。佐賀大学の研究グループは、Orbrayのダイヤモンド基板に半導体開発の可能性を見出し、5年以上前から共同研究を行っていた。しかし、従来のデバイス構造ではキャリアの移動度が極端に低下する問題があった。そこで、**新しいデバイス構造を考案して二酸化窒素をp型ドーピングした横型MOSFET**の作製に成功した。その過程で、同グループは、困難と言われていた、ダイヤモンドに二酸化窒素を添加するドーピング技術と、酸化アルミニウムの薄膜を形成するパッシベーション技術を確立した。

◆産業界の取り組みも活発に

23年5月、Orbrayは、トヨタ自動車とデンソーが出資する車載半導体研究のミライズテクノロジーズと縦型ダイヤモンドパワーデバイスに関して共同研究契約を締結し、研究を開始すると発表した。研究期間は3年間で、Orbrayはp型導電性ダイヤモンド基板の開発を担当し、ミライズテクノロジーズはパワーデバイスにおける耐圧保持構造の開発および縦型ダイヤモンドパワーデバイスの実現を目指す。本研究の終了後も、さらなる研究開発に向けて協業を検討する予定である。

パワー半導体の大口顧客である自動車メーカーがダイヤモンドに関心を示したことで、産学連携の活性化による技術革新が期待される。 【永田紘基】