

ダイヤモンドパワーデバイスの高速・高温動作を実証

ー 次世代半導体材料としての優位性を確認 ー

平成 22 年 9 月 8 日

独立行政法人 産業技術総合研究所

国立大学法人 大阪大学

■ ポイント ■

- ・ダイヤモンドダイオードを用いたパワーデバイス用整流素子の動作を世界で初めて確認
- ・高速かつ低損失の動作を確認でき、将来の実用化に期待
- ・将来のパワーデバイスとして省エネルギー効果に期待

■ 概要 ■

独立行政法人 産業技術総合研究所【理事長 野間口 有】（以下「産総研」という）ダイヤモンド研究ラボ 鹿田 真一 研究ラボ長、梅澤 仁 主任研究員は、国立大学法人 大阪大学【総長 鷺田 清一】大学院工学研究科 電気電子情報工学専攻 舟木 剛 教授と共同で、ルテニウム (Ru) 電極とダイヤモンドを組み合わせたパワーデバイス用ダイオード整流素子を作製し、世界で初めてダイヤモンド半導体ダイオード整流素子のスイッチング性能を測定し、高速・低逆回復電流動作を確認した。

ダイヤモンドは、硬度、熱伝導率の大きさ、光透過波長帯の広さ、化学的安定性などに優れるだけでなく、半導体としても絶縁破壊電界や電荷移動度などに優れた特性をもつため、高耐電圧・低損失・高速応答の半導体デバイス、特に電力を制御するパワー半導体デバイス（電力用半導体素子）としての応用が期待されている。ダイオード整流素子はパワーデバイスの基本部品であるが、今回、ダイヤモンド半導体と以前に産総研で開発した Ru ショットキー電極を組み合わせたショットキー型のダイヤモンドダイオードを用いて整流素子を作製した。シリコン半導体の MOSFET（トランジスタの一種）を用いて駆動回路を構成し、ダブルパルス法を用いてダイヤモンドダイオード整流素子のスイッチングの回復（リカバリー）特性を計測したところ、0.01 マイクロ秒の高速スイッチングと 40 A/cm² の小さな逆回復電流（低損失）が確認できた。

本研究成果は 2010 年 9 月 10 日に電子情報通信学会の英文学術誌「Electronics Express」(<http://www.elex.ieice.org/index.html>) に掲載され、また 9 月 13 日から長崎で開催される応用物理学会で報告される（発表は 15 日）。

は【用語の説明】参照

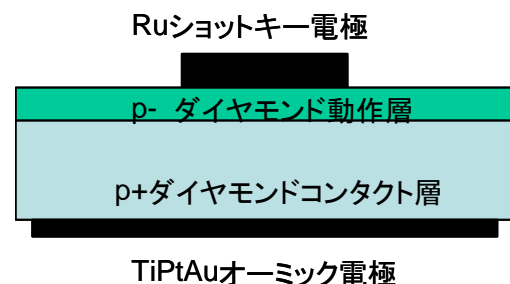
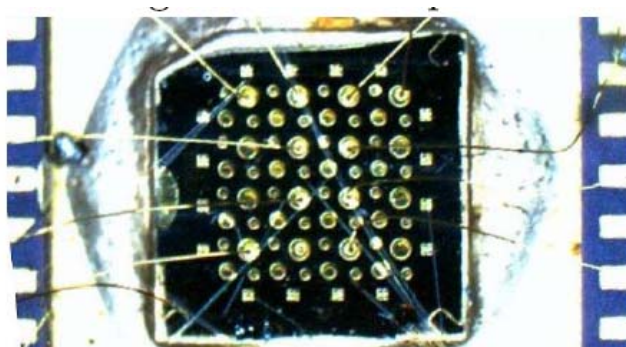


図 1 試作したダイオード整流素子の外観(左)と模式図(右)

■ 開発の社会的背景 ■

パワーデバイスとは、電気機器の電力制御に不可欠な半導体デバイスであり、インバーターの普及に伴い省エネルギー技術の基盤となっている。最近では高電圧・大電流動作が技術的に可能になり、ハイブリッド自動車のモーター駆動にも使われるなど急速に普及し、市場規模は 2 兆円に及ぶといわれる。パワーデバイスの高性能化による電力エネルギー使用量の削減は、CO₂ 排出量の大幅削減に向け経済産業省が策定した「Cool Earth - エネルギー革新技術計画」でも、重点的に取り組むべきエネルギー革新技術の 1 つとされている。

現在、パワーデバイスにはシリコン (Si) 半導体が使われているが、耐熱、耐電圧、電力損失、電流密度などに課題があるため、炭化ケイ素 (SiC)、窒化ガリウム (GaN) など新材料の開発が進められている。ダイヤモンドもこれら新材料の 1 つであるが、それ自体が熱を放散するヒートシンク (放熱部) 材料であり、高温に耐え、かつ高温で電流密度が上がると、特異な物性をもつことから、ダイヤモンドパワーデバイスによって高温動作・冷却不要、高耐電圧、大電流密度などが実現できると期待されている。

■ 研究の経緯 ■

産総研では、硬度、熱伝導率、弾性定数、光学的透過率、化学的安定性、電気化学特性など物質中で最も優れた特性をもつダイヤモンドについて、半導体特性と組み合わせることによって新しい応用を開拓するための研究を行っている。また、既に材料技術として大型単結晶接合ダイヤモンドウエハーを開発している (2010 年 3 月 1 日プレス発表)。ダイヤモンドを用いた各種デバイスとそれに関する材料基礎研究も行っており、耐熱性、低抵抗、密着性、ショットキー接合に優れる Ru ショットキー電極を用いたダイヤモンドダイオードの開発 (2009 年 1 月 8 日プレス発表) などに成功している。

なお、本研究の一部は、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構の省エネルギー革新技術開発事業の支援を受けて実施された。

■ 研究の内容 ■

今回使用したショットキー型ダイヤモンドダイオードは、ダイヤモンド半導体と Ru ショットキー電極を組み合わせで作製した (図 1 右)。このダイオードは、ダイヤモンドや Ru 電極の特性から、高温動作、冷却不要、大電流密度動作などを可能とする。このダイオードは電極サイズが小さいため、ダイオード 7 個をワイヤで並列接続し (図 1 左)、高温動作もできるように高温に耐える封止材を用いて封止した。駆動用トランジスタには市販の Si MOSFET を用い、図 2 に示した回路を作成して、ダイオード整流素子を作製した。

スイッチング特性は、デバイスの温度変化の影響を受けない手法であるダブルパルス法により計測した。その結果、図 3 に示すような電流値に依存しないユニポーラーダイオードの特徴を示した。0.01 マイクロ秒の高速スイッチングを確認できたほか、測定回路の寄生インダクタンスと高速スイッチング動作の高 di/dt にのみに依存した逆回復電流は 40 A/cm² と小さく、エネルギー損失が抑えられることがわかった。以上の結果から、このダイオードは、常に安定して高速動作することがわかった。

温度依存性を測定した結果では (図 4)、回復電流に温度依存性が無く、またスイッチング速

度も温度変化していない。200 °C まで安定した動作を示し、冷却しなくても良好な動作をすることがわかった。

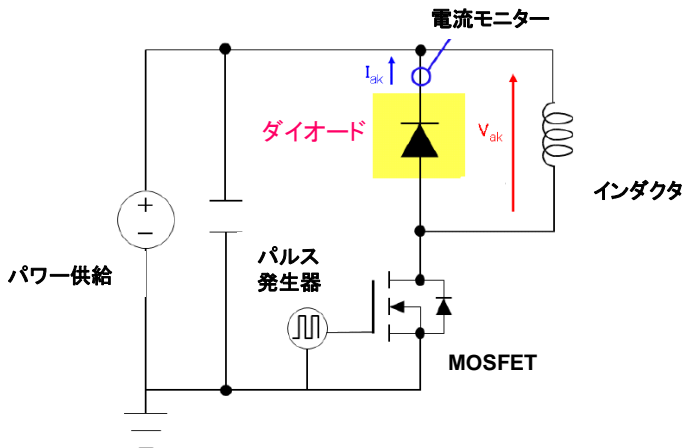


図 2 測定に用いた回路図

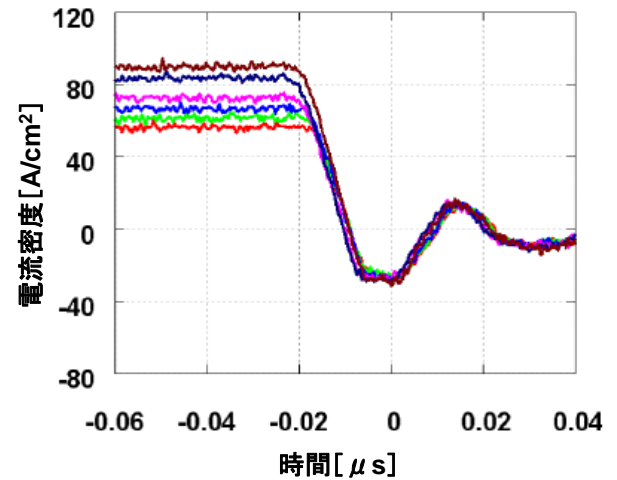


図 3 さまざまな電流値（赤～茶色の線）
に対しても安定なスイッチング特性

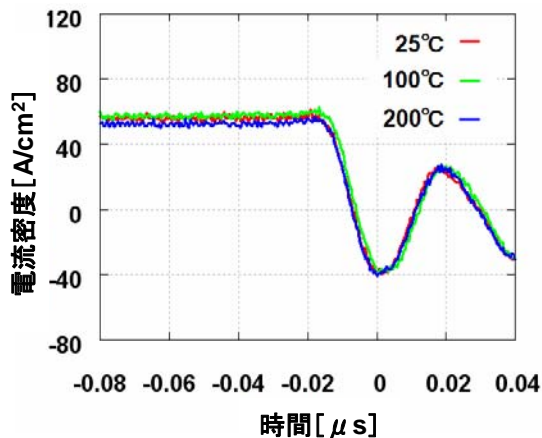


図 4 スwitchング特性の温度依存性

■ 今後の予定 ■

今回、高耐電圧、大出力、高速、低損失のダイヤモンドダイオード整流素子としての実証ができたので、今後、実用パワーデバイスに必要な大電流が流せるように、1 cm 角級のデバイス実現を目指す。このために、大面積の基板製造技術、低欠陥高品質膜成長技術、デバイス設計技術などに取り組む。またショットキー型ダイオード整流素子だけでなく、ダイヤモンドトランジスタ素子の研究も並行して進め、省エネルギー型パワーデバイスの実現を目指す。

■ 本件問い合わせ先 ■

独立行政法人 産業技術総合研究所 ダイヤモンド研究ラボ
研究ラボ長 鹿田 真一 〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第 2
TEL : 029-861-2770 FAX : 029-861-2773
E-mail : s-shikata@aist.go.jp

【プレス発表／取材に関する窓口】

独立行政法人 産業技術総合研究所 広報部 広報業務室 小林 達哉
〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第 2
つくば本部・情報技術共同研究棟 8F
TEL : 029-862-6216 FAX : 029-862-6212
E-mail : presec@m.aist.go.jp

国立大学法人 大阪大学 工学研究科 総務課 評価・広報係 西山 浩治
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1
TEL : 06-6879-7209 FAX : 06-6879-7210
E-mail : kou-soumu-hyoutakouhou@office.osaka-u.ac.jp

【用語の説明】

◆ルテニウム (Ru)

原子番号 44 の元素。貴金属であり、白金鉱石からの副産物として得られる。

◆パワーデバイス

電源系を制御する半導体デバイスで、電気を使って動作する全ての機器に使用されている基本デバイスである。最近では、自動車のモーター駆動などにも使われてきており、心臓部品となっている。半導体材料として通常シリコン (Si) が用いられているが、動作速度、電圧、電流、冷却系などで、ほぼ限界に近くなってきている。そのため、炭化ケイ素 (SiC)、窒化ガリウム (GaN)、ダイヤモンドなど新しい半導体材料の開発が期待されている。

◆ダイオード整流素子

一方向だけに電流を流す半導体デバイス。pn 型とショットキー型がある。

◆逆回復電流

誘導性負荷に蓄積された還流電流が原因で、ダイオードが一旦ゼロ電流になった後、短時間逆方向に電流が流れるが、これを逆回復電流という。これが大きいと回路のエネルギー損失が大きくなる。

◆ショットキー電極

半導体と金属電極を接合させると、半導体から金属またはその逆のどちらか一方に電子が流れやすくなる。この金属電極をショットキー電極というが、ここに電圧をかけることによって電流の向きを変えられる。この整流現象を利用して、交流を直流に変えるなど工業的に利用されている。

◆ダブルパルス法

スイッチング動作特性評価において、短時間パルスで温度変化を抑制するとともに、順方向電流パラメータをパルス間隔で調整する方法。特にダイオードのターンオフにおける逆回復特性評価において標準的に使用されている方法である。

◆インバーター

直流電力から交流電力に変換する電源回路をもつ電力変換装置のこと。制御装置と組み合わせることなどにより、省エネルギー効果が大きく、応用が拡大している。

◆Cool Earth - エネルギー革新技術計画

経済産業省が中心となって策定した地球環境問題対応プログラムで、2050年にCO₂排出量を50%削減するためのエネルギー革新技術計画。北海道洞爺湖サミットで提案された。

◆ユニポーラーダイオード

pn接合を用いず、かつ単一キャリアにより動作するダイオード。高速・低損失の利点がある。

◆寄生インダクタンス

電流が流れる回路の周りに形成される磁界により寄生的に発生するインダクタンス（コイル）成分。