

ダイヤモンド半導体を用いた耐高温パワーデバイスの作製

Fabrication of high-temperature and high-power diamond devices



植田 研二 (Kenji UEDA, Dr. Sci.)
名古屋大学 工学研究科 准教授
(Associate Professor, Graduate School of Engineering, Nagoya University)
応用物理学会 日本金属学会 日本磁気学会
研究専門分野：半導体工学

あらまし 電子デバイスとして非常に高いポテンシャルを有するダイヤモンド半導体を用い、耐高温性、省電力性等に優れたパワーデバイスの作製を試みた。Cu/ダイヤモンドショットキーパワーダイオードは700°Cまでの高温で動作すると共に、車載応用等でターゲットとなる数百°Cの温度領域で高い熱安定性を示した。また、高温下(400°C)での電流-電圧特性から見積もられたダイオードの耐圧及び抵抗値(オン抵抗)は、1000V以上及び65 mΩ cm²となったが、これらの値はSi半導体の理論限界値を越え、SiCの理論限界値に匹敵する結果である。この結果はダイヤモンド半導体が耐高温パワーデバイスとして非常に有望である事を示している。

1. 序論

半導体パワーデバイスは、コンバータやインバータの様な電力変換器の中核デバイスであり、車載応用や太陽電池、エアコン等の幅広い産業分野で省エネルギー化に貢献している。現在多くの用途で使用されているSi半導体パワーデバイスは、デバイス構造の工夫やプロセス技術の開発により著しい進歩を遂げてきたが、その性能改善は限界に近づいている。また、Siパワーデバイスは100°C程度の高温で熱暴走等が起こる為、現在は大きな水冷機構と共に使用されているが、これも大きなデメリットの一つである。一方、ダイヤモンドは5.5 eVのバンドギャップを持つワイドギャップ半導体であり、高絶縁破壊電圧、高熱伝導率、高移動度等の優れた特性を持つ事から、SiC, GaNに続く次世代パワーデバイス用ワイドギャップ半導体材料として期待されている。ダイヤモンド半導体を初めとするこれらのワイドギャップ半導体を用いる事で、Siよりも格段に高い電圧かつ高温下で、低損失、高効率の電力変換を可能とするパワーデバイスの開発が可能となる。半導体材料の物性値(表1)からパワーデバイスとしての性能指数(パワーデバイスとしての性能を表わす尺度で、値が大きいほど性能が高い)を求める事ができるが、代表的な性能指数としてJohnson指数((絶縁破壊電圧×飽和電子速度)²に比例)がある。ダイヤモンドのJohnson指数はSiの2500倍、SiCの6倍となり、他の半導体よりもパワーデバイスとして高いポテンシャルを有している事が分かる[1]。

表1 様々な半導体材料の物性値

材料	バンドギャップ (eV)	絶縁破壊電圧 (MV/cm)	飽和電子速度 (×10 ⁷ cm/s)	移動度 (cm ² /Vs)	誘電率	熱伝導率 (W/cmK)
Diamond	5.45	10	1.5	~ 4500	5.7	22
SiC	3.27	3.0	~ 2.0	~ 1000	9.7	4.9
GaN	3.4	2.5	1 - 2.5	~ 2000	8.9	1.5
Si	1.1	0.3	1.0	~1400	11.8	1.5

ダイヤモンド半導体を用いた耐高温パワーデバイスの作製

Fabrication of high-temperature and high-power diamond devices

本研究では、この様に電子デバイスとして非常に高いポテンシャルを有するダイヤモンド半導体を用い、耐高温性、省電力性等に優れたパワー半導体デバイスの作製を試みた。

2. 研究の背景と国内外の研究動向

上述の様に、Si パワーデバイスを置き換えるべく、SiC やダイヤモンド等のワイドギャップ半導体を用いたパワーデバイスの開発が行われている。現在、SiC や GaN を用いたパワーデバイスは製品化が為されており、Si より高電圧 (~1200 V) で動作する SiC や GaN パワーデバイスが各社から販売され始めている状況である。一方で、ダイヤモンドパワーデバイスは、バンドギャップが SiC や GaN より格段に大きいことから、より高電圧かつ高温等の過酷環境下での動作を想定し開発が行われているが、製膜やプロセス技術がまだ十分にこなれていない為、実用レベルには至っていない。

現在、幾つかのグループからダイヤモンドパワーショットキーダイオードの高温下での出力特性についての報告があるが、絶縁耐圧: 842V、抵抗値(オン抵抗) $9.4 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2 @ 250^\circ\text{C}$ が現状での最高値であると思われる[2]。絶縁耐圧とオン抵抗にはトレードオフ(一方が向上すると他方が低下する)の関係があるが、特性をうまくコントロールし、両者をバランス良く向上させていく事が、高性能パワーデバイスの創製に不可欠となる。ダイヤモンドは、高温下で SiC の理論限界を遥かに上回る性能を示すと理論予測もされており[3]、耐高温高性能ダイヤモンドパワーデバイスの作製に向け、現在精力的に研究が進められている。

3. 研究方法

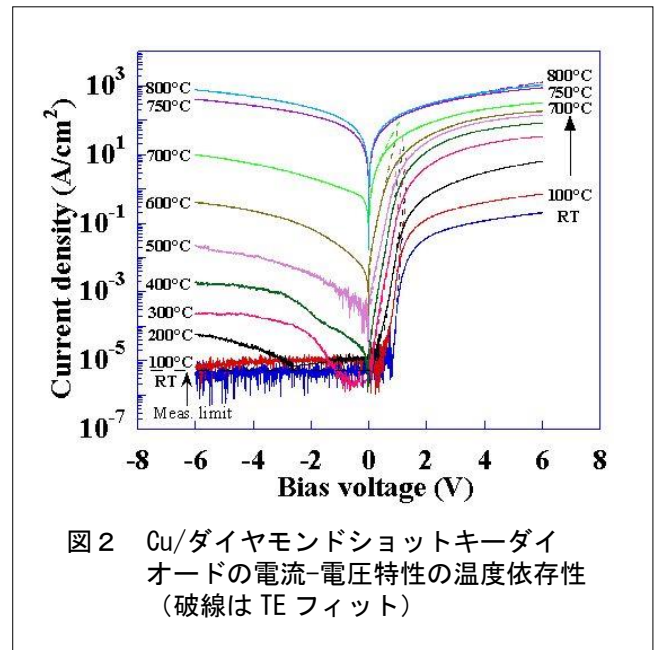
ダイヤモンド p 型半導体薄膜はマイクロ波プラズマ化学気相成長 (CVD) 法により、市販のダイヤモンド(100)基板上に作製した。CH₄/H₂ 流量比は 0.1-1%、ガス圧は 50 Torr、成長温度は 700-900°C、膜厚は 1~3.5 μm 程度とした。不純物ホウ素源としてトリメチルホウ素 (TMB ; TMB/CH₄= 1 ppm)を用いた。ダイヤモンド薄膜の電気特性は、ホール効果測定により評価しているが、この成長条件下でキャリア濃度 : $10^{16}\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、室温移動度 : ~1000

cm²/Vs の p 型半導体薄膜が再現性良く得られている[4]。

フォトリソグラフィ法と反応性イオンエッチング (RIE) により、Cu をショットキー電極、Cu/Ti をオーミック電極として用いたダイヤモンドパワーショットキーダイオードの作製を行い、真空高温下(室温~800°C)で電流-電圧(I-V)測定を行った。なお、ショットキーダイオードは半導体デバイスとして最も基本的なもので、整流機能を有しており、大電力用の整流器として用いられる。本研究では Cu をショットキー電極としてダイオードを作製しているが、以前の研究でショットキー電極について Ag, Ni, Cu 等を比較して吟味した所[4][5]、Cu が高温特性に優れていた為、Cu ショットキー電極を採用した。

4. 研究結果と考察

図 2 に、作製した Cu/ダイヤモンドショットキーダイオードの電流-電圧 (I-V) 特性の温度依存性を示す[5]。



室温で 5 桁程度の整流性(順方向(正電圧側)で大きな電流が流れ、逆方向(負電圧側)であまり電流が流れない)が現れた。測定温度の増加と共に、順方向及び逆方向電流が増加したが、~600°C でも 3 桁程度の整流比(順方向電流/逆方向電流)を示し、700°C でも 1 桁の整流比が維持されていた。これは、Cu/ショ

ダイヤモンド半導体を用いた耐高温パワーデバイスの作製

Fabrication of high-temperature and high-power diamond devices

ットキーダイオードが 700°C の高温下でも整流素子として動作する事を意味している。

次に、デバイス劣化に関する知見を得る為に熱電子放出 (TE) 理論による I-V 特性の解析を行った所、Cu ショットキー接合のショットキーバリア高さ (ϕ_B) は 1.6 eV と求まった。なお、バリア上部から熱エネルギーを得て電子が放出される過程が熱電子放出 (TE) 過程であり、ショットキーダイオードでは通常、この TE 過程が順方向電流の挙動を支配する。理想因子 (n) は室温から 650°C の範囲で~1.5 と理想値 (n=1) に近い値であったが、700°C 以上で n の増加が始まり、750-800°C では TE 理論から完全に外れる挙動を示した。これらの結果から、~700°C でダイオードの劣化が開始し、温度の上昇と共に劣化が進んでいくと思われるが、劣化メカニズムについては今後の検討課題である。

車載応用等でターゲットとなる数百°C 程度の温度領域での動作を想定し、詳細なデバイス特性の検討を高温下 (400°C) で行った。図 3 に、400°C で長時間 (0~30 hr) ダイヤモンドショットキーダイオードを保持しながら連続して行った I-V 測定の結果を示す。400°C で 30 時間保持後も I-V 特性に変化は見られず、400°C でダイオードが安定動作し、劣化しない事が示唆された。

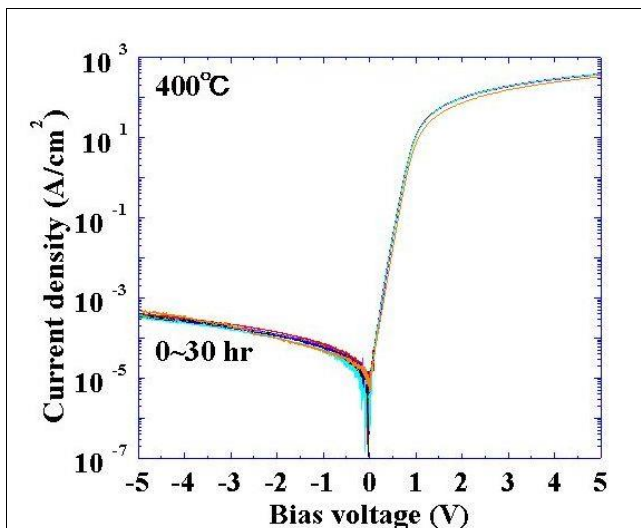


図 3 高温下 (400°C) での Cu/ダイヤモンドショットキーダイオードの電流-電圧特性の時間依存性

次に Cu ショットキーダイオードの耐電圧について評価する為に 400°C での逆方向電流の電圧依存性について調査した (図 4) [6]。1000V の高電圧を印可しても絶縁破壊に伴う急激な電流上昇は見られず、絶縁破壊電圧 (V_B) は 1000 V 以上となった (測定装置の限界の為 1000V 以上の電圧は印可できず)。また、順方向電流から求められたダイオードの抵抗値 (オン抵抗) は 65 mΩ cm² となった。これらの値は Si 半導体の理論限界値を越え、SiC の理論限界値及びダイヤモンドショットキーダイオードのトップデータ (9.4 mΩ cm², 842V@250°C) に匹敵する値である。なお、ダイヤモンドショットキーダイオードのトップデータは、高濃度ホウ素ドーピング層やフィールドプレート及び縦型素子構造の利用など、素子構造をかなり工夫して得られた結果であるのに対し、筆者らの物は非常に単純な横型の素子構造で得られた結果である事から、今後ドーピング技術を駆使し、素子構造を工夫する事で、高温下で、更に優れたパワー特性を有するデバイスの作製が行えると思われる。

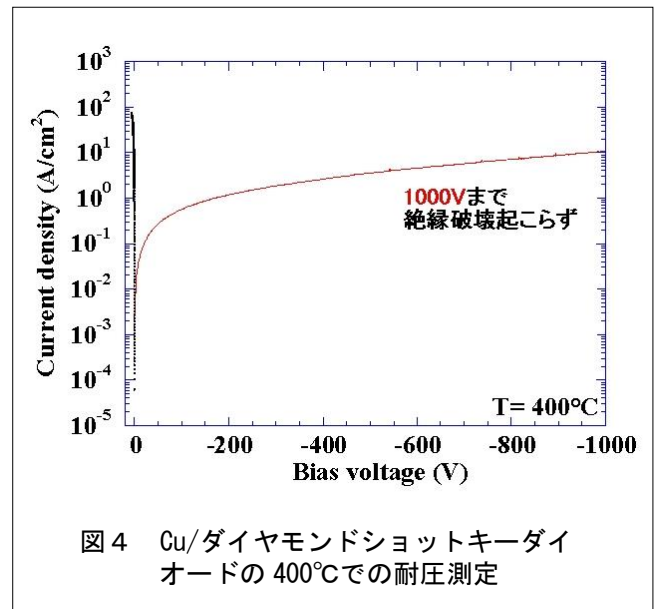


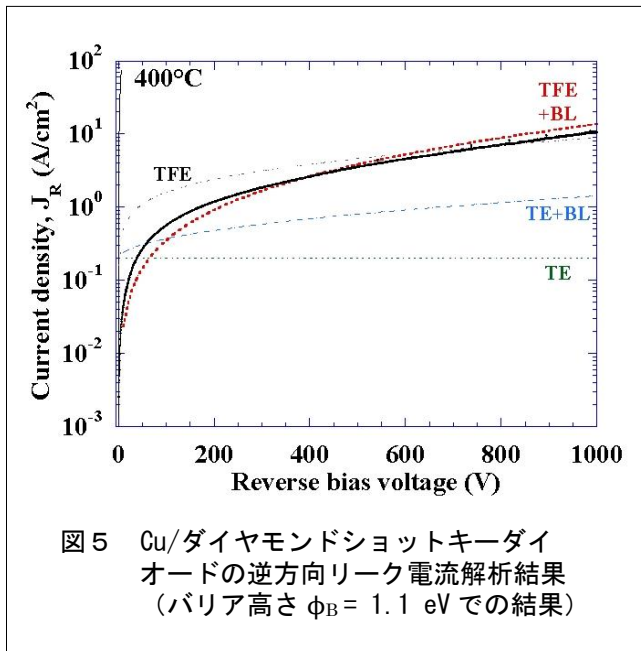
図 4 Cu/ダイヤモンドショットキーダイオードの 400°C での耐圧測定

耐圧を下げる要因について考察する為に、逆方向リーク電流の電圧依存性について様々なモデルを用いて解析を行った (図 5)。用いたモデルは 4 つであり、熱電子放出 (TE)、熱電界放出 (TFE)、熱電子放出+バリア低下 (TE+BL)、熱電界放出+バリア低下

ダイヤモンド半導体を用いた耐高温パワーデバイスの作製

Fabrication of high-temperature and high-power diamond devices

(TFE+BL) モデルである[6]。TE 過程に加え、TFE では電子のトンネル過程、BL では鏡像力によるバリア高さの低下を考慮している。TE や TE+BL モデルではリーク電流が小さくなり過ぎていて、実験値を再現できないのに対し、TFE 又は TFE+BL モデル、即ち電子のトンネル過程を考慮したモデルでは、実験値とかなり近い値が得られた。特に、TFE+BL モデルで実験値と計算値が良く一致した。SiC や GaN の様なワイドギャップ半導体を用いたショットキーダイオードでは、一般的に Si ダイオードよりリーク電流が高く、トンネル伝導を考慮した TFE や TFE+BL モデルで逆方向リーク電流の挙動について説明できる事が良く知られている[7][8]。その為、ダイヤモンドショットキーダイオードの逆方向リーク電流が TFE+BL モデルで再現できるのは妥当な結果であると思われる。



しかし、TFE+BL フィッティングから得られるバリア高さ (ϕ_B) は 1.1 eV となり、順方向電流の TE モデルによるフィッティングから得られた $\phi_B (=1.6$ eV) より 3 割程度小さい値となった。2 つの値は理想的には一致するはずであり、これらの結果は TFE+BL モデルでもダイヤモンドショットキーダイオードの逆方向リーク電流について完全には説明しきれておらず、リーク電流を増加させる他の機構 (電極エッジ効果等)

の影響を考慮する必要がある事を意味している。これらを取りこんだ新しいモデルの構築は、ダイヤモンドショットキーダイオードの精密動作解析に重要であり、今後取り組んでいく予定である。

5. 将来展望

ダイヤモンドパワーデバイスは高温下でも高い性能を維持できる為、SiC 等の他のワイドギャップ半導体を用いたデバイスよりも、より高温かつ高電圧で動作するデバイスをターゲットとし、開発が進んでいくと思われる。ダイヤモンド半導体の製膜やプロセス技術が今後洗練化され、デバイス特性が向上していけば、他の半導体を用いたデバイスでは不可能な過酷環境下 (高温下や放射線下等) で動作するダイヤモンドパワーデバイスの実用化が見えてくるとと思われる。

参考文献

- [1] H. Okumura, Jpn. J. Appl. Phys. 45 (2006) 7565.
- [2] H. Umezawa, Y. Kato, and S. Shikata, Appl. Phys. Express 6 (2013) 011302.
- [3] C. Raynaud, D. Tournier, H. Morel, and D. Planson, Dia. Relat. Mater. 19 (2010) 1.
- [4] K. Ueda, K. Kawamoto, T. Soumiya, and H. Asano, Dia. Relat. Mater. 38 (2013) 41.
- [5] K. Ueda, K. Kawamoto, and H. Asano, Jpn. J. Appl. Phys. 53 (2014) 04EP05.
- [6] K. Ueda, K. Kawamoto, and H. Asano, Dia. Relat. Mater. 57 (2015) 28.
- [7] S. Oyama, T. Hashizume, and H. Hasegawa, Appl. Surf. Sci. 190 (2002) 322.
- [8] T. Hatakeyama, and T. Shinohe, Mat. Sci. Forum 389-393 (2002) 1169.

この研究は、平成 24 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、平成 25 ~ 26 年度に実施されたものです。