

各報道機関文教担当記者 殿

世界で初めてダイヤモンド-on-シリコン技術を用いてヘテロエピタキシャルダイヤモンド反転層チャネル MOSFET を開発！

金沢大学ナノマテリアル研究所の徳田規夫教授，松本翼准教授，張旭芳特任助教らの研究グループは，国立研究開発法人産業技術総合研究所先進パワーエレクトロニクス研究センター新機能デバイスチームの牧野俊晴チーム長，加藤宙光主任研究員らとドイツフランクフルター研究機構クリストフ E. ネーベル部門長（本学リサーチプロフェッサー（招へい型））との共同研究により，単結晶 シリコン上にヘテロエピタキシャル成長（※1）によるダイヤモンド膜から作製したダイヤモンド自立基板を用いて反転層チャネル MOSFET（※2）を作製し，その動作実証に世界で初めて成功しました。

半導体デバイスの省エネ化とともにインテリジェント化のコア技術として，次世代ワイドバンドギャップ半導体の開発が期待されています。その中でも特に高い絶縁破壊電界とキャリア移動度，熱伝導率，長時間の量子情報保持などの特長を有するダイヤモンドは，究極の半導体デバイス材料として期待されていますが，基板コストや製造プロセスに関する課題がダイヤモンド半導体の応用を大きく制限しています。

これまで，徳田らの研究グループは単結晶ダイヤモンドを用いた反転層チャネル MOSFET での動作実証には成功していましたが，単結晶ダイヤモンド基板は 10 ミリメートル角程度が最大であり，ダイヤモンド MOSFET の社会実装にはダイヤモンド基板の大面積化が大きな課題の一つでした。今回，現在の半導体エレクトロニクスに主に用いられている 単結晶シリコン基板上にヘテロエピタキシャル成長によるダイヤモンド膜を成膜（ダイヤモンド-on-シリコン技術）し，そこから作製したダイヤモンド自立基板を用いて反転層チャネル MOSFET の作製，動作実証に世界で初めて成功しました。

今後，本研究成果を発展させ，市販されている 300 ミリメートルウェハの単結晶シリコンを使用することにより，単結晶ダイヤモンドウェハの課題であった大面積化・低コスト化を解決し，従来の大量生産可能なプロセス装置をそのまま利用できるメリットもあるため，ダイヤモンド半導体の実用化に向けて大きく前進することが期待できます。

本研究成果は，2020 年 12 月 4 日に Elsevier のオンライン雑誌『Carbon』の“Articles in press”に掲載されました。

【研究の背景】

持続的発展可能な社会を実現するために、再生可能エネルギーの利用とエネルギー消費量の削減が世界的に要求されています。また、高度情報化社会とのセクターカップリングの中では、IoT 技術とともに量子情報技術の利用も期待されており、半導体エレクトロニクスがコア技術として注目され、シリコン半導体を用いたデバイスが自動車から新幹線、飛行機、工業機器、医療機器、通信機器、情報機器など身の回りの至る所で社会実装され利用されています。しかし、シリコン半導体デバイスの性能をさらに超える大幅な省エネ化や過酷な環境下における使用、量子情報技術の高度化が可能な次世代デバイス材料として、絶縁破壊電界や熱伝導率がシリコンよりも優れているシリコンカーバイドなどのワイドバンドギャップ半導体が注目されています。

ダイヤモンドは、それらの次世代デバイス材料よりも、さらに広いバンドギャップと高い絶縁破壊電界や熱伝導率を有しており、より大きな電力の制御が必要な領域や、放射線環境下、高温環境下といった過酷な応用領域における省エネ化、さらに室温での量子情報制御の技術領域につながると期待されています。

しかし、ダイヤモンドは、結晶成長の難しさから、ウェハの大面積化が他の半導体材料と比べて遅れており、大きな課題の一つとして挙げられています。近年では、ヘテロエピタキシャル成長法によるダイヤモンドウェハの大面積化も進みつつありますが、高温高压合成法やホモエピタキシャル CVD 成長法による単結晶ダイヤモンドよりも結晶性は低いため、ヘテロダイヤモンドを用いた反転層チャンネル MOSFET の動作実証は得られていませんでした。

【研究成果の概要】

本研究グループは、単結晶シリコン (111) 基板上にヘテロエピタキシャル成長によるダイヤモンド膜 (ダイヤモンド-on-シリコン技術) から作製したダイヤモンド自立基板を用いて反転層チャンネル MOSFET を作製し (図 1)、その動作実証に成功しました。

反転層チャンネル MOSFET は、原理的にノーマリーオフ特性 (※3) を示し、ゲート電圧制御であるため、省エネ性にも優れ、例えば世界で最も広く利用されるパワーデバイス構造です。一方で、反転層チャンネル MOSFET は、表面構造など、結晶品質にそのデバイス特性が大きく左右されます。ヘテロエピタキシャルダイヤモンド自立基板上に作製した MOSFET の動作を調べると、明確なノーマリーオフ特性を示しました。ホモエピタキシャルダイヤモンドと比べると結晶品質が劣るものの、そのデバイス特性としては遜色のないドレイン電流が流れることを確認しました (図 2)。

【今後の展開】

本研究成果は、ダイヤモンド半導体エレクトロニクスの創出における一つのブレークスルーになると考えられます。

今後は、ダイヤモンドの半導体材料としての優位性を十分に引き出すために、MOS 界面の高品質化による移動度の向上、大電流化、ドレイン領域に耐圧層を導入することによる高耐圧化を進め、近い将来、日本発のダイヤモンド半導体エレクトロニクス産業

の創出が期待されます。

本研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務「NEDO 先導研究プログラム未踏チャレンジ 2050」、日本学術振興会科学研究費助成事業（JP17H02786, JP18KK0383, JP19K15042, JP20K14773）および金沢大学戦略的研究推進プログラム（先魁プロジェクト 2018, 2020）の一環として行われました。

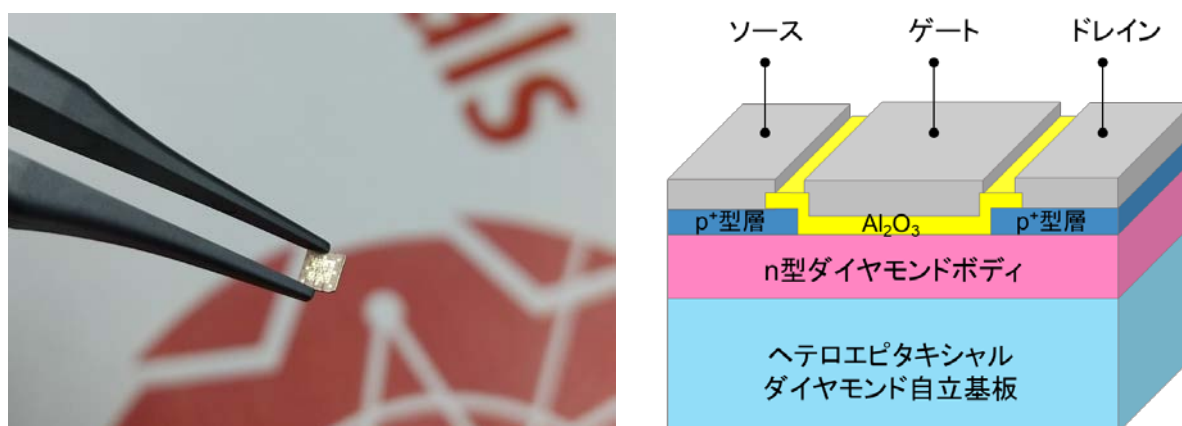


図 1.

今回作製したヘテロエピタキシャルダイヤモンド自立基板上の反転層チャンネルダイヤモンド MOSFET の写真（左）とその断面模式図（右）。

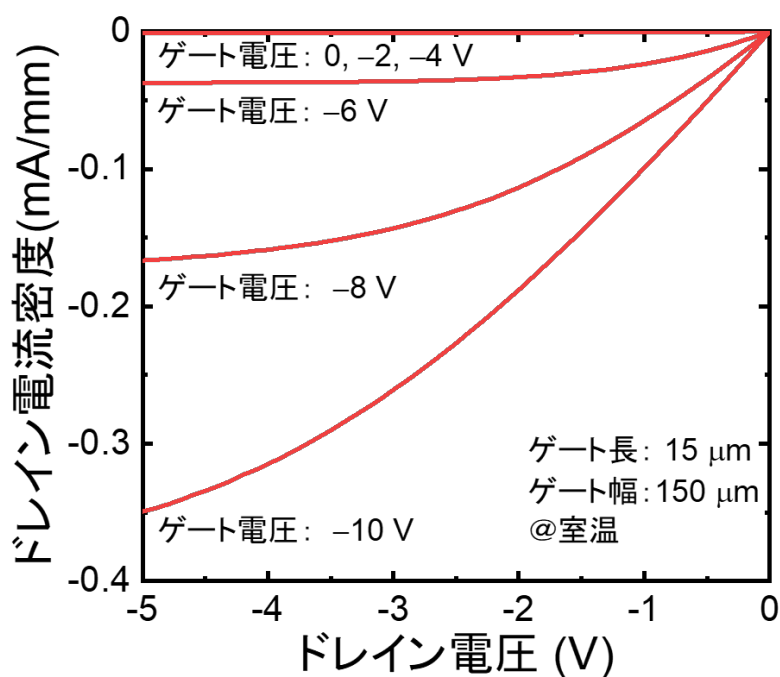


図 2. ゲート電圧を変化させたときのドレイン電圧に対するドレイン電流の変化
n 型ダイヤモンド薄膜の MOS 界面にかける負のゲート電圧を増加させるとドレイン電流が増加していくため、少数キャリアであるホールがドレイン電流に寄与しており、反転層チャンネルが形成されていることが分かる。

【掲載論文】

雑誌名：Carbon

論文名：Inversion channel MOSFET on heteroepitaxially grown free-standing diamond
(ヘテロエピタキシャル自立ダイヤモンド上の反転層チャンネル MOSFET の開発)

著者名：Xufang Zhang, Tsubasa Matsumoto, Yuta Nakano, Hitoshi Noguchi, Hiromitsu Kato, Toshiharu Makino, Daisuke Takeuchi, Masahiko Ogura, Satoshi Yamasaki, Christoph E. Nebel, Takao Inokuma, and Norio Tokuda

(張旭芳, 松本翼, 中野裕太, 野口仁, 加藤宙光, 牧野俊晴, 竹内大輔, 小倉政彦, 山崎聡, クリストフ E. ネーベル, 猪熊孝夫, 徳田規夫)

掲載日時：2020 年 12 月 4 日に “Articles in press” に掲載

DOI：doi.org//10.1016/j.carbon.2020.11.072

※pre-proof のため、最終修正が加わる可能性があります。

【用語解説】

※1 ヘテロエピタキシャル成長法

下地基板となるある結晶上に、それとは異なる結晶を一定の結晶方位関係を保ちながら成長させる手法である。反対の言葉として、下地基板と同じ結晶を成長させるホモエピタキシャル成長法がある。

※2 反転層チャンネル MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

金属と酸化膜、半導体からなる界面を有する電界効果トランジスタのこと。この MOSFET のゲートに、母体である半導体と同じ極性のゲート電圧をかけると、MOS 界面に少数キャリアが蓄積し、母体と反転した極性のチャンネル(低抵抗層)が形成される。このチャンネルを反転層チャンネルと呼ぶ。現在普及しているトランジスタの多くが反転層チャンネル MOSFET である。これは、反転層チャンネル MOSFET が基本的にノーマリーオフ特性を有しており、高い信頼性を有しているためである。

※3 ノーマリーオフ特性

システムとしては動作中であっても、真に動作すべき構成要素以外の電源を積極的に遮断することで、誤動作を防ぎ、消費電力を最小限に抑える特性のことで、スイッチングデバイスにおいて最も重要で最低限必要とされる特性である。このスイッチングデバイスは、自動車や新幹線、飛行機といった大電力を利用した輸送機器に広く用いられている。このため、安全性は最も重視され、壊れたときに出力が0となるノーマリーオフ特性はパワーデバイスにとって最低限必要な特性とされている。また、待機消費電力の観点からも、OFF状態でリーク電流がほとんどないノーマリーオフ特性が有効である。

【本件に関するお問い合わせ先】

■研究内容に関すること

金沢大学ナノマテリアル研究所 教授

徳田 規夫 (とくだ のりお)

TEL : 076-264-4875 (直通)

E-mail : tokuda@ec.t.kanazawa-u.ac.jp

■広報担当

金沢大学総務部広報室広報係

本田 彩子 (ほんだ あやこ)

TEL : 076-264-5024

E-mail : koho@adm.kanazawa-u.ac.jp

金沢大学理工系事務部総務部総務課

吉田 和史 (よしだ かずちか)

TEL : 076-264-6821

E-mail : s-somu@adm.kanazawa-u.ac.jp