

# 縦型反転層ダイヤモンド MOSFET 実現に向けた

## Ni 触媒エッチングを用いた横型 Schottky-pn ダイオードの開発

### Development of lateral Schottky-pn diode using Ni catalyst etching for realization of vertical inversion channel diamond MOSFET

金沢大学理工研究域電子情報通信学系 助教 松本翼

Kanazawa University, Tsubasa Matsumoto

#### 要旨

本研究では、絶縁破壊電界やキャリア移動度等の物性値が極めて高く、高周波かつ大電力動作可能なパワーデバイス材料として期待されているダイヤモンド半導体を用いて、極限の省エネ半導体パワーデバイス候補の縦型反転層チャンネル MOSFET の社会普及を目標に、その基本構造となる横型 Schottky-pn ダイオードの開発を目指した。横型 Schottky-pn ダイオードの作製にあたり、急峻な pn 接合形成技術の確立、化学的・機械的に優れた強度を有するダイヤモンドの加工技術の確立を課題として設定した。そこで、本研究では以下の二つの研究開発を主に行った。一つ目が、ドーピング濃度制御が容易な窒素をドーパントとした n 型ダイヤモンド膜が鍵になると考え、窒素ドーパダイヤモンドボディを用いた MOSFET の動作実証である。二つ目が、窒素ドーパダイヤモンド層が使えることを確認した上で、従来の研磨技術およびダイヤモンドの新しい加工技術である Ni 触媒エッチングを用いた横型 Schottky-pn ダイオードの開発である。

#### 1. はじめに

ダイヤモンドは、絶縁破壊電界やキャリア移動度が極めて高く、半導体パワーデバイス材料としての性能を数値化した Baliga 指数において Si や SiC、GaN、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> といった他の主要な半導体パワーデバイス材料を大きく凌駕する究極の半導体パワーデバイス材料である。そのため、電気自動車の普及等によって電力需要が益々高まる社会において、ダイヤモンドを用いた極限の省エネ半導体パワーデバイスを用いた大電力で低損失な電力変換器の開発が望まれる。

信頼性が高く、省エネ性に優れる半導体パワーデバイス構造として期待されるのが、世界で最も利用されている反転層 MOSFET である。我々は世界で初めて、究極の半導体パワーデバイス材料であるダイヤモンドを用いて、この反転層 MOSFET の動作実証に成功した[1]。大電力化のためには、図 1 に示す縦型

反転層チャンネルダイヤモンド MOSFET 構造の実現が必要である。この構造、特に V トレンチや U トレンチと呼ばれるチャンネルを形成する溝（トレンチ）の加工技術の確立が、ダイヤモンドの化学的・機械的安定性のため、重要な課題となっている。

この V トレンチ構造を形成する一つの手段として、着目しているのが炭素固溶を用いた Ni 触媒エッチングプロセスである。近年、



図 1. 目標とする縦型反転層チャンネルダイヤモンド MOSFET の構造

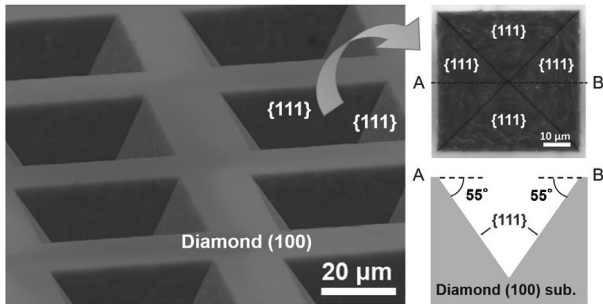


図 2. Ni 触媒エッチング技術を用いたダイヤモンドの加工[2]

我々は、Ni 触媒エッチングにおいて(111)面の炭素固溶が極めて遅い異方性があることを発見し、図 2 に示すように、(100)ダイヤモンド基板に対し 55°の(111)斜面を有する V トレンチの形成に成功した[2]。一方で、予備実験として行った積層構造に対する Ni 触媒エッチングでは、図 3 に示すように Ni 触媒エッチングがうまく進行せず、図 2 に示すような明白な(111)斜面は形成されなかった。この原因は明らかとなっていないが、積層構造形成ともなうダイヤモンド表面の荒れや、Ni 触媒によるダイヤモンドの異方性エッチングを阻害する欠陥が積層構造形成時に多く発生した可能性が考えられる。

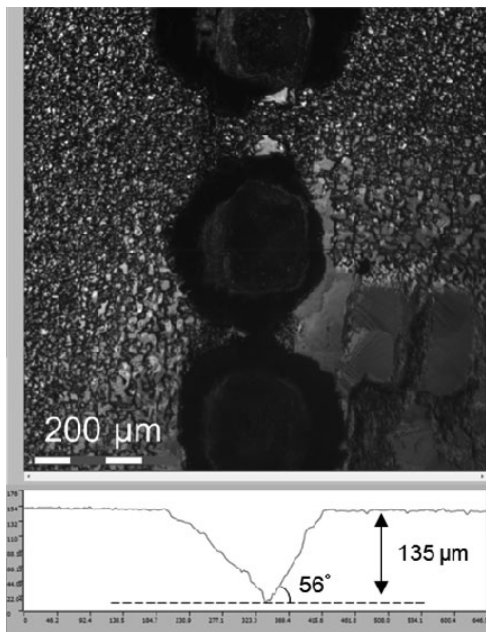


図 3. ダイヤモンド p<sup>+</sup>/n/p<sup>-</sup>/p<sup>+</sup>構造に対する Ni 触媒エッチング後の表面と断面。ここで、+は高濃度、-は低濃度を表す。

そこで、本研究では以下の二つの研究開発を主に行った。一つ目が、ドーピング濃度制御が容易で高品質なダイヤモンド膜の形成が期待できる窒素をドーパントとしたダイヤモンドボディを用いた MOSFET の動作実証である。ドーピング濃度制御の容易さと高品質なダイヤモンド膜は、積層構造の形成や Ni 触媒エッチングにおいて利点になると考えられる。しかし、これまでに報告した反転層チャンネルダイヤモンド MOSFET は、リンドープ n 型ダイヤモンドボディを用いたものであり、絶縁性を示す窒素ドーパダイヤモンドボディでも同様に動作するかは未知数であった。そのため、窒素ドーパダイヤモンドボディを用いた反転層チャンネル MOSFET の動作実証を最初の目標とした。窒素ドーパダイヤモンド層が使えることを確認した上で、二つ目に取り組んだ課題が、従来の研磨技術およびダイヤモンドの新しい加工技術である Ni 触媒エッチングを用いた横型 Schottky-pn ダイオードの開発である。これまで、Ni 触媒エッチングを用いて形成したダイヤモンドの斜面に対して、原子間力顕微鏡 (AFM) やレーザ顕微鏡によるエッチング表面の荒さ解析は行ってきたが、電気的な特性評価は行ってこなかった。図 1 の V トレンチ構造を見ると、エッチング面には、p<sup>+</sup>層と n 層との界面が存在する。この構造は、我々が報告した Schottky-pn ダイオード構造と同一であり[3]、エッチング表面の電気的な特性評価として、横型 Schottky-pn ダイオードを評価することは有効である。また、パワーデバイスとしての Schottky-pn ダイオードの研究開発も行っているため、本研究の成果はその方面でも生かされると考えられる。

## 2. 実験方法

本研究では、窒素ドーパダイヤモンドボディを用いた反転層チャンネル MOSFET と窒素ドーパ n 型ダイヤモンド層を用いた横型 Schottky-pn ダイオードを作製した。各ダイヤモンド層は、(株)アリオス社製の共振器プラ

プラズマ化学気相成長 (MPECVD) 装置を用いて、単結晶ダイヤモンド基板上に成長された。MOSFET 用の試料は、加湿窒素の雰囲気中で 500°C で 1 時間の熱処理により表面が OH 化されたのち、原子層堆積 (ALD) 法により  $\text{Al}_2\text{O}_3$  酸化膜が 300°C で 50 nm 堆積された。その後、Ti/Pt/Au 電極を堆積した。一方、Schottky-pn ダイオード用の試料の一部は、研磨会社の (株) シンテックに外注することで機械研磨によるダイヤモンドの斜面形成を行った。残りは、エッチング加工したい表面に Ni を 200 nm 程度堆積させ、加湿窒素の雰囲気中で 700~1100°C で数~数十分の熱処理により、ダイヤモンドに斜面形成を行った。その後、両試料の電気的特性の評価として、KEITHLEY の半導体パラメータアナライザ 4200-SCS による電流-電圧特性測定、SHIMADZU の SPM-9700 による電流同時 AFM 測定を行った。また、Hitachi の走査型電子顕微鏡 S-4500 による表面構造観察も行った。

### 3. 実験結果

図4に作製した窒素ドーパダイヤモンドボディを用いた反転層チャンネルダイヤモンド MOSFET の写真と動作実証に成功したドレイン電流 - ドレイン電圧特性を示す。これまでに報告したリンドーパボディを用いた反転層

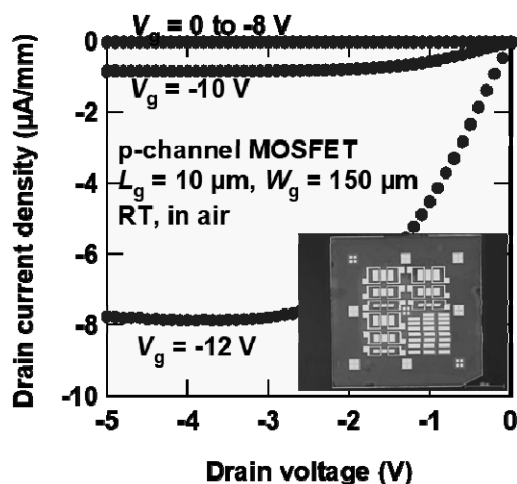
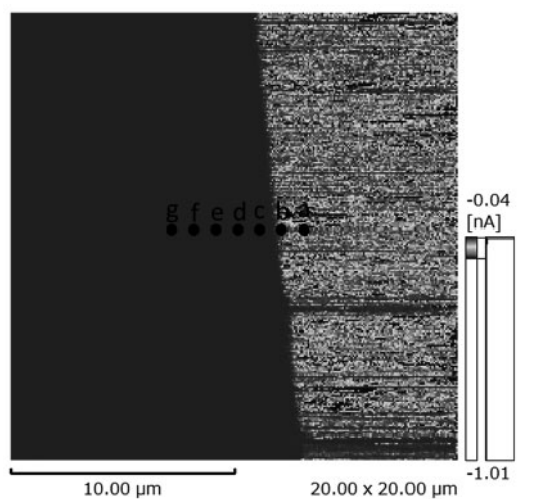


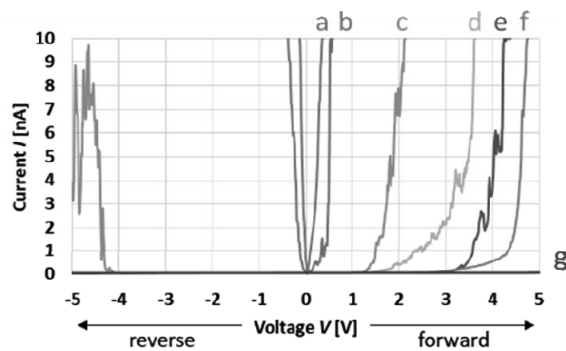
図 4. 窒素ドーパダイヤモンドを用いた反転層チャンネルダイヤモンド MOSFET の写真とドレイン電流 - ドレイン電圧特性

チャンネルダイヤモンド MOSFET と遜色ない FET 特性が得られた。窒素ドーパダイヤモンドボディで動作実証したのは、世界で初めてであり、今後の反転層チャンネルダイヤモンド MOSFET の研究開発においても大きいインパクトとなった。

次に、従来の研磨技術で斜面形成を行い作製したダイヤモンド Schottky-pn ダイオードの電気的特性を紹介する。図 5(a)および(b)に従来の研磨技術で得られたダイヤモンド斜面に形成された Schottky-pn ダイオードの電流マッピング像と電流 - 電圧特性を示す。図 5(a)において、黒く見えているところが n 層で電流が流れていないことを表し、白く見える領域が p 層で電流が流れていることを表す。Schottky-pn ダイオードに対して、印加する電圧を高くしていくと、電流の流れる領域が n



(a) ローカルI-V測定の測定箇所



(b) I-V測定結果

図 5. 従来の研磨技術で得られた斜面に形成された Schottky-pn ダイオードの (a)電流マッピング像と(b)電流 - 電圧特性

層側へ伸びていく様子が観察された。その境界は、直線的ではなく、いびつであったため、積層構造を形成する前の p 層表面のラフネスや欠陥密度を反映したものであると考えられる。また、本実験を介して、窒素の低濃度化が新たな課題として浮き彫りとなった。窒素濃度が低ければ低いほど、電流が流れる領域が広がる予定であったが、数  $\mu\text{m}$  程度しか広がらなかった。窒素濃度分析を行った結果、ダイヤモンド成長条件から予想される窒素濃度より高く、その原因が原料ガスの一つである水素ガス中の不純物窒素であることが明らかとなった。今後は、精製器を導入し、本研究をステップアップさせる予定である。一方で、図 5(b)においては、SiC や GaN の物性値を超える  $3.3 \text{ MV/cm}$  の高い耐電界をダイヤモンドの斜面に形成した pn 接合で達成することができた。この値は、縦型 Schottky-pn ダイオードと同等の値であり[3]、斜面形成時の加工ダメージがデバイス特性に影響していないことを意味する。

そして、ダイヤモンド積層構造に対する Ni 触媒エッチングでは、新たな課題が二つ明確となった。図 6 および図 7 に、Ni 触媒エッチングで加工したダイヤモンド表面の拡大像を示す。図 6 では、 $\text{p}^+/\text{n}$  積層に対して  $700^\circ\text{C}$  で Ni 触媒エッチングを行ったが、表面側の  $\text{p}^+$

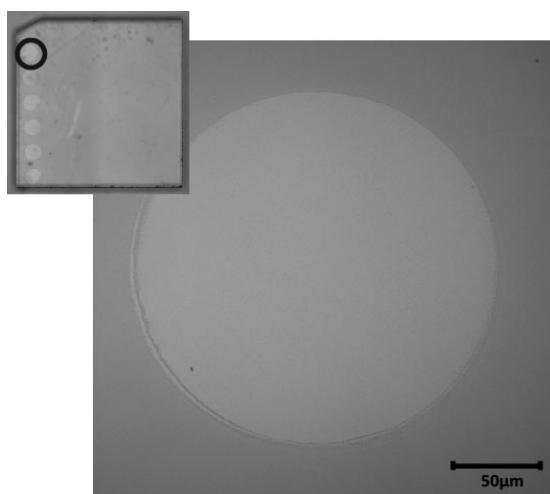


図 6. ダイヤモンド  $\text{p}^+/\text{n}$  層の積層構造に対して  $700^\circ\text{C}$  で Ni 触媒エッチングを行った後のダイヤモンド表面の拡大像

層だけがエッチングされ、斜面は形成されなかった。これは、面方位による異方性エッチングではなく、高濃度ホウ素ドーパ  $\text{p}^+$  層が選択的にエッチングされた結果である。ホウ素の高濃度化にともなう欠陥密度の増加やホウ素濃度に依存した結果か、温度とそれらの相関と考えられるが、その詳細はわかっておらず、今後の課題の一つである。一方、図 7 では、 $\text{p}^+/\text{n}$  積層に対して  $1000^\circ\text{C}$  で Ni 触媒エッチングを行った結果、明確な斜面の形成が確認された。特に深さ  $10 \mu\text{m}$  あたりからは SEM レベルでの平坦面が確認できた。しかし、深さ  $10 \mu\text{m}$  までの表面側の斜面においてジャストの(111)面は得られなかった。これは、エッチングが進むことで、Ni がダイヤモンドの方向へ沈んでいくため、表面側の斜面での十分な接触時間が得られなかったことが一つの原因と考えられる。特に、深さ  $1 \mu\text{m}$  の領域では、細かい荒れが観察され、図 6 と同様に、 $\text{p}^+$  層の影響があると考えられる。今後は、ダイヤモンドにおける Ni 触媒エッチングのドーピング濃度依存および温度依存を明確にしておくことと、高濃度ホウ素ドーパ  $\text{p}^+$  層の高品質化の二つのアプローチが必要である。

#### 4. まとめ

本研究により、初めて窒素ドーパボディを用いたダイヤモンド MOSFET の反転層動作に成功した。この成功により、縦型反転層ダイヤモンド MOSFET の実現に大きく前進した。

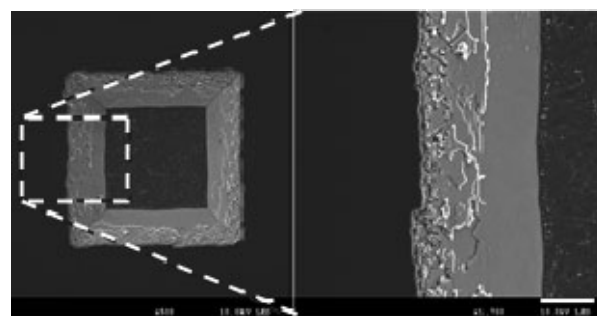


図 7. ダイヤモンド  $\text{p}^+/\text{n}$  層の積層構造に対して  $1000^\circ\text{C}$  で Ni 触媒エッチングを行った後のダイヤモンド表面の拡大像

季学術講演会、11p-M113-1、東京工業大学、2019年3月11日。

また、機械研磨を用いた横型 Schottky-pn ダイオードにおいて、従来の縦型 Schottky-pn ダイオードと同等の 3.3 MV/cm の絶縁破壊電界が得られた。この値は、SiC や GaN の物性値を超える値である。

Ni 触媒エッチングでは、高濃度ホウ素ドーピング  $p^+$ 層が含まれることで、エッチングの様相がアンドーピング層だけの構造に施すときより、荒れやすく、エッチングの選択性が変化する可能性が示唆された。

本研究において得られたいくつもの重要な知見を活かして、横型 Schottky-pn ダイオードの高い実耐圧を得ることと、実際に縦型反転層チャンネル MOSFET の作製を早期に進めたい。そのためにも、ダイヤモンドにおける Ni 触媒エッチングのドーピング濃度依存および温度依存を明確にしていくことと、高濃度ホウ素ドーピング  $p^+$ 層の高品質化の二つを目指す。

#### 謝辞

本研究の一部は金沢大学理工研究域電子情報通信学系の徳田規夫教授（現ナノマテリアル研究所所属）、猪熊孝夫教授、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の山崎聡博士、牧野俊晴博士、加藤宙光博士、竹内大輔博士、小倉政彦博士との共同研究です。本研究を援助していただいた公益財団法人京都技術科学センターに感謝致します。

#### 参考文献

- [1] T. Matsumoto, et al., Sci. Rep. **6**, 31585 (2016).
- [2] M. Nagai, et al., Sci. Rep. **8**, 6687 (2018).
- [3] T. Matsumoto, et al., Diam???

#### 研究成果発表

- 1) 松本翼、加藤宙光、小山和博、牧野俊晴、小倉政彦、竹内大輔、山崎聡、猪熊孝夫、徳田規夫、反転層チャンネルダイヤモンド MOSFET の実証、第 66 回応用物理学会春