

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686074

研究課題名(和文) 超低損失ダイヤモンドパワーデバイス開発のための基盤研究

研究課題名(英文) Basic study for development of ultra-low loss diamond power devices

研究代表者

徳田 規夫 (Tokuda, Norio)

金沢大学・電子情報学系・准教授

研究者番号：80462860

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,400,000円

研究成果の概要(和文)：ダイヤモンドは、次世代パワーデバイス材料として最も高い省エネ効果が期待されている半導体材料である。本研究は、その材料・プロセス技術の高度化を行うことで、超省エネ化実現のための革新的デバイス特性を創出することを目的とした。本研究で、高品質なp型ダイヤモンド膜の成長技術の開発、超低抵抗率のドーパドダイヤモンドの実現、そして、高品質なAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ダイヤモンド界面を有するダイヤモンドMOS構造の作製に成功した。

研究成果の概要(英文)：Diamond is a semiconductor material for the next-generation power devices. The purpose of this study was to create the novel device performances for the realization of ultra-energy saving by elevating its material and process techniques. In this study, we succeeded in the development of the growth techniques of high-quality p-type diamond films, the realization of delta-doped diamond with ultralow resistivity, and the fabrication of diamond MOS structures with high-quality Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/diamond interfaces.

研究分野：半導体物理、表面科学、結晶成長

キーワード：カーボン材料 ダイヤモンド パワーデバイス 半導体

## 1. 研究開始当初の背景

平成 22 年度に閣議決定された新成長戦略の戦略分野の 1 つであるグリーン・イノベーションに関して、また昨今の原発問題によりエネルギー利用の省エネ化は極めて重要な課題である。その解決策の一つとして、幅広い分野において高効率な電力の制御と利用を行うパワーデバイスの超低消費電力化が期待されている。現在のパワーエレクトロニクスの主役は Si であるが、更なる高電圧・高温環境下での動作、そして省エネ化などのニーズにより、Si の物性そのものによる限界が近いことから、新規半導体材料を用いた次世代パワーデバイスの創出が必要とされている。その候補は、SiC、GaN、ダイヤモンドのワイドバンドギャップ半導体である。その中でも、ダイヤモンドは最高の絶縁破壊電界と高キャリア移動度による超低損失パワーデバイスの実現、そして、5.5 eV のワイドバンドギャップと物質最高の熱伝導率、高い耐熱性による高温動作、冷却装置フリーが可能になることから、究極のパワーデバイス材料と期待されている。実際、ダイヤモンドパワーエレクトロニクスは、経済産業省の次世代省エネデバイス技術の技術戦略ロードマップ及び Cool Earth エネルギー革新技術ロードマップにも挙げられている。しかし、ダイヤモンド半導体は以下に示す課題がある。

技術的な課題：現在、国内外においてダイヤモンドを用いたパワーデバイスに関する研究において、絶縁破壊電界の報告値は 2~3 MV/cm 程度（理想絶縁破壊電界の 1/3 以下）に留まっている。その解決のためにはダイヤモンド膜の高品質化と表面の不活性化技術の開発が必要である。

本質的な課題：ダイヤモンドはドナー及びアクセプターレベルが深い（リンによる  $E_D = 0.6 \text{ eV}$ 、ボロンによる  $E_A = 0.37 \text{ eV}$ ）。これは、デバイスの動作温度において、キャリアがほとんど活性化しない（抵抗が高い＝消費電力が大きい）というパワーデバイスにおいて致命的な欠点である。

## 2. 研究の目的

本研究では、超高品質ダイヤモンドの成長技術、界面準位を抑制したヘテロ界面の制御技術、そして、ダイヤモンド表面の不活性化技術の開発を行い、更に我々が作製した半導体ダイヤモンド基板を用いることにより、上述した『技術的な課題の解決』を行う。

また、 $\delta$  ドーピング技術の開発を行うことで、高キャリア密度と高キャリア移動度を同時に実現し、上述した『本質的な課題の解決』を行う。

これらの基盤技術を用いて SiC で提案されている  $\delta$  ドープ積層構造をチャンネルに用いたダイヤモンド DACFET<sup>®</sup>に関する基盤要素技術の開発を目指す。

## 3. 研究の方法

### (1) p 型ダイヤモンド半導体膜の高品質化

我々の独自の技術であるダイヤモンド(111)のホモエピタキシャル成長制御技術を応用し、p 型ダイヤモンド半導体膜の高品質化を行った。具体的な数値目標は、p 型ダイヤモンド(111)膜の室温の移動度  $800 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  以上を目指した。

### (2) $\delta$ ドーピング制御

$\delta$  ドーピングの利点は、高濃度不純物ドーパされた高キャリア濃度を有する  $\delta$  層から低濃度不純物ドーパ層へ浸み出し、その高濃度キャリアが高移動度で伝導可能である点である。そのため、高キャリア濃度×高移動度で、低抵抗化が可能となる。具体的な数値目標は、均一不純物ドーパしたダイヤモンド膜の抵抗率よりも一桁以上の低減を目指した。

### (3) ダイヤモンド MOS 構造の最適化

ダイヤモンド MOS 構造の作製と電気的特性の評価を行い、低リーク電流、低界面準位密度が実現する構造・プロセスの最適化を目指した。具体的には、ダイヤモンドよりも大きなバンドギャップを有する  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を絶縁膜に使用し、その原子層堆積法 (ALD) プロセスに最適なダイヤモンド表面構造の形成を行った。

## 4. 研究成果

### (1) p 型ダイヤモンド半導体膜の高品質化

マイクロ波プラズマ化学気相堆積法 (MPCVD) を用いてダイヤモンド(111)ホモエピタキシャルラテラル成長をオフ角オフ方向制御した基板上で行うことで、表面平坦性の高い高品質なダイヤモンド(111)厚膜 (0.1 mm 以上) の成長を可能にした。その成長条件とホウ素ドーピングを組み合わせ、高品質な p 型ダイヤモンド(111)厚膜の成長技術を開発した。その厚膜をレーザーカットにより自立化させ、p 型半導体の CVD ダイヤモンド(111)自立基板を開発した。その自立基板をホール効果測定したところ、移動度は室温で  $830 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  を示し、研究課題の目標を達成した。

### (2) $\delta$ ドーピング制御

上述のダイヤモンド(111)ホモエピタキシャルラテラル成長技術を低濃度不純物層と高濃度不純物層の積層構造を原子層レベルで制御することで、ホウ素  $\delta$  ドープダイヤモンド構造の作製を行った。その二次イオン質量分析法 (SIMS) によるホウ素  $\delta$  ドープダイヤモンド(111)膜中のホウ素濃度の深さ分布の結果を図 1 に示す。

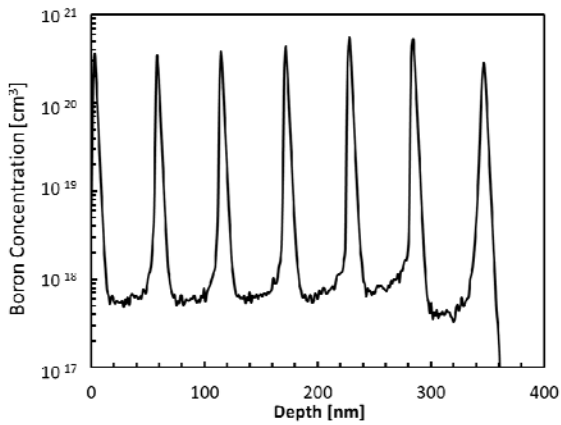


図1 ホウ素 $\delta$ ドープダイヤモンド(111)膜中のホウ素濃度の深さ分布

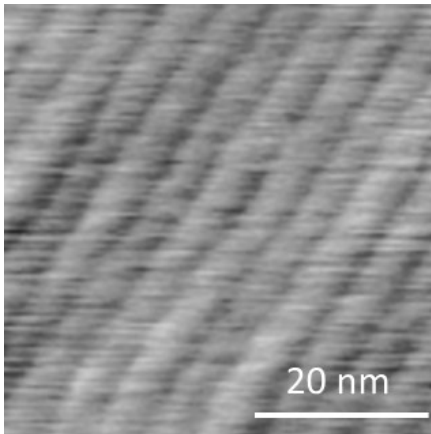


図2 ホウ素 $\delta$ ドープダイヤモンド(111)膜表面のAFM像

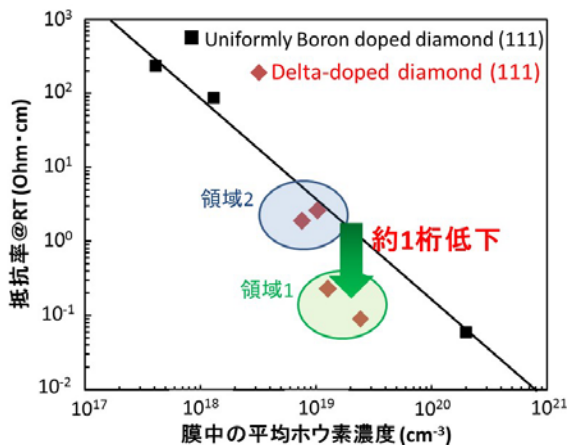


図3 均一ドープ及び $\delta$ ドープダイヤモンド(111)膜中の平均ホウ素濃度対室温の抵抗率の関係。領域1は $\delta$ 層にモット転移密度以上のホウ素を含み、領域2はモット転移密度未満のホウ素を含む $\delta$ ドープダイヤモンド膜を示す。

その結果から、 $\delta$ 層では、モット転移密度 ( $n_{motto} = 2.7 \times 10^{20}$  atoms/cm<sup>3</sup>) を超えるホウ素濃度  $3 \times 10^{20}$  atoms/cm<sup>3</sup> を持ち、 $\delta$ 層/p層界面のホウ素濃度の立ち上がりは、1

nm/dec.、立下りは 4 nm/dec. と非常に急峻な界面の形成に成功した。また、 $\delta$ ドープダイヤモンド(111)膜表面は、ステップテラス構造を有する原子的平坦面であり、layer-by-layer 成長されたことが分かった (図2 参照)。更に、 $\delta$ 層にモット転移密度のホウ素濃度を持つ $\delta$ ドープダイヤモンド(111)膜の室温の抵抗率は、同一の平均ホウ素濃度を持つ均一にドープされたダイヤモンド(111)膜に比べて、約一桁低減し (図3の領域1 参照)、目標を達成した。一方、モット転移密度以下の場合には、大きな効果を得ることはできなかった (図3の領域2 参照)。

### (3) ダイヤモンドMOS構造の最適化

ダイヤモンドMOSFETの実現のために、酸化膜/ダイヤモンド界面構造制御は極めて重要である。反転層チャネルを用いる場合、電子にも正孔にも十分なオフセットを有する酸化膜が必要となる。本研究では、その条件を満たし、かつ高品質な酸化膜が堆積可能なALD-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜を用いた。図4に、熱混酸処理されたO終端ダイヤモンド(111)表面と我々が開発したウェットアニール処理されたOH終端ダイヤモンド(111)表面上にALD-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜を堆積し、作製したダイヤモンドMOSキャパシタのquasi-static C-V測定の結果を示す。その結果、O終端ダイヤモンド表面を用いたMOSキャパシタのフラットバンド電圧は、-7 V程度シフトした。一方、OH終端ダイヤモンド表面を用いたMOSキャパシタのフラットバンド電圧は、ほぼ理想的な値となった。これらの結果から、OH終端ダイヤモンド表面を用いたMOSキャパシタ構造は、O終端ダイヤモンド表面を用いたMOSキャパシタ構造と比べて、界面準位密度及び固定電荷密度の原因となるAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ダイヤモンド界面のダングリンボンド密度が低いことが考えられる (図5 参照)。

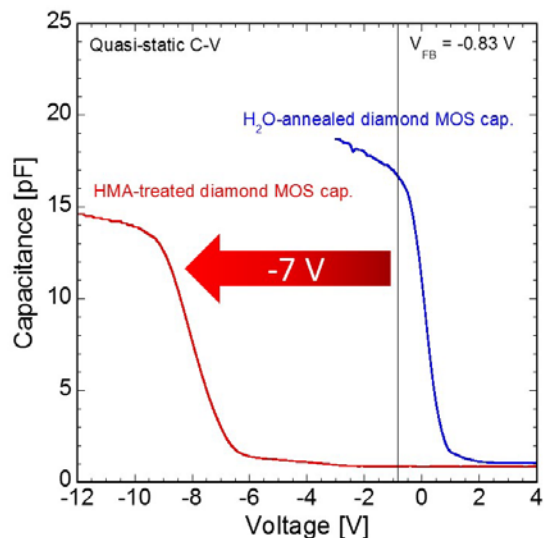


図4 ダイヤモンドMOSキャパシタのquasi-static C-V特性

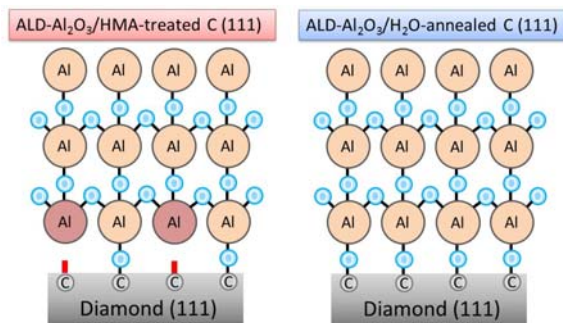


図5 (左) O 終端と (右) OH 終端ダイヤモンド(111)表面上に ALD- $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜を堆積したダイヤモンド MOS キャパシタ構造の断面模式図。赤い線は、ダングリングボンドを示す。

#### (4) 今後の展開

今後は、本研究で得られた高品質な  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /ダイヤモンド構造を用いて、ノーマリーオフ動作・低オン抵抗・高耐圧のダイヤモンド MOSFET の実現を目指す。また、 $\delta$ ドーピングにおいて、更なる高移動度かつ高キャリア濃度を持つ超低抵抗  $\delta$  ドープダイヤモンドの実現を目指し、上記 MOSFET と組み合わせることで、ダイヤモンド DACFET の実現を目指す。

#### <引用文献>

- ① M. Kitabatake, SiC-DACFET, *Microelectronics Engineering* 83, 2006, 135-138

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

- ① N. Tokuda, M. Ogura, S. Yamasaki, T. Inokuma, Anisotropic lateral growth of homoepitaxial diamond (111) films by plasma-enhanced chemical vapor deposition, 査読有, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 53, 2014, 04EH04  
DOI: 10.7567/JJAP.53.04EH04
- ② 徳田規夫, 山崎聡, 猪熊孝夫, 原子的に制御されたダイヤモンド表面の創出, 精密工学会誌, 査読無, Vol. 80, No. 5, 2014, 433-438  
DOI: 10.2493/jjspe.80.433
- ③ N. Tokuda, M. Fukui, T. Makino, D. Takeuchi, S. Yamasaki, T. Inokuma, Formation of Graphene-on-Diamond Structure by Graphitization of Atomically Flat Diamond (111) Surface, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読有, Vol. 52, 2013, 110121  
DOI: 10.7567/JJAP.52.110121
- ④ 徳田規夫, 牧野俊晴, 猪熊孝夫, 山崎聡, プラズマ CVD 法によるステップフリーダイヤモンド(111)表面の形成, 日本結晶成長学会誌, 査読無, Vol. 39, No. 4,

2012, 185-189

<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009578688>

- ⑤ N. Tokuda, T. Makino, T. Inokuma, S. Yamasaki, Formation of Step-Free Surfaces on Diamond (111) Mesas by Homoepitaxial Lateral Growth, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読有, Vol. 51, 2012, 090107  
DOI: 10.1143/JJAP.51.090107

[学会発表] (計40件)

- ① (*Invited*) N. Tokuda, D. Miyata, A. Ueda, T. Chonan, T. Minamiyama, T. Inokuma, M. Imura, Y. Koide, M. Ogura, T. Makino, D. Takeuchi, S. Yamasaki, Atomically controlled diamond surfaces and interfaces, 2014 International Conference on Diamond and Carbon Materials, 2014.9.10, Madrid (Spain)
- ② T. Minamiyama, N. Tokuda, M. Ogura, S. Yamasaki, T. Inokuma, Electrical characteristics of boron delta-doped diamond (111) structures, 12th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures, 2013.11.5, つくば国際会議場 (茨城県・つくば市)
- ③ T. Chonan, N. Tokuda, M. Ogura, S. Yamasaki, T. Inokuma, Hydrogen termination of diamond surfaces, 12th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures, 2013.11.5, つくば国際会議場 (茨城県・つくば市)
- ④ (*Invited*) N. Tokuda, S. Yamasaki, T. Inokuma, Atomically controlled diamond: homoepitaxy, doping, and surface structures, 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2013), 2013.9.25, ヒルトン福岡シーホーク (福岡県・福岡市)
- ⑤ N. Tokuda, S. Kamiya, T. Makino, D. Takeuchi, S. Yamasaki, T. Inokuma, Atomically flat oxidized diamond (111) surfaces, International Conference on Diamond and Carbon Materials 2013, 2013.9.3, Riva del Garda (Italy)
- ⑥ T. Chonan, N. Tokuda, M. Ogura, S. Yamasaki, T. Inokuma, Hydrogen-terminated diamond (111) surface by hydrogen annealing, The 4th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies, 2013.6.19, 石川県立音楽堂 (石川県・金沢市)
- ⑦ T. Minamiyama, N. Tokuda, M. Ogura,

S. Yamasaki, T. Inokuma, Boron delta-doped diamond structures, The 4th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies, 2013.6.18, 石川県立音楽堂 (石川県・金沢市)

- ⑧ N. Tokuda, T. Minamiyama, M. Ogura, S. Yamasaki, T. Inokuma, Formation of boron delta-doped diamond structures by lateral growth of diamond (111) films, International Conference on Diamond and Carbon Materials, 2012.9.5, Granada (Spain)
- ⑨ N. Tokuda, H. Kato, M. Ogura, T. Makino, D. Takeuchi, S. Yamasaki, T. Inokuma, Influence of substrate misorientation angle and direction in diamond (111) homoepitaxy by plasma-enhanced CVD, The sixth international New Diamond and Nano Carbons Conference, 2012.5.22, San Juan (Puerto Rico)

[図書] (計2件)

- ① Norio Tokuda et al., Springer, Novel aspects of diamond, 2014, 1-29
- ② 徳田規夫 他、電子ジャーナル、2013 ナノカーボン技術大全、2012、88-90

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.o-fsi.kanazawa-u.ac.jp/about/section/research/solutiontype2/>

[http://www.kanazawa-u.ac.jp/research\\_bulletin/highlights\\_005.html](http://www.kanazawa-u.ac.jp/research_bulletin/highlights_005.html)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

徳田 規夫 (TOKUDA, Norio)  
金沢大学・電子情報学系・准教授  
研究者番号：80462860

### (2)研究分担者

該当なし

### (3)連携研究者

該当なし