

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月24日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560334

研究課題名（和文） SiCバッファ層を用いたSi基板上へのダイヤモンド薄膜の成長

研究課題名（英文） A diamond thin film growth on SiC buffer layer on a Si substrate

研究代表者

加藤 喜峰 (KATO YOSHIMINE)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：60380573

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は安価なSi基板上にSiC（シリコンカーバイド）/ナノ結晶ダイヤモンド（NCD）ダイオードデバイスを製作し、将来のパワーデバイス応用への基盤技術を確認することにある。p型Si基板上にSiC薄膜を成長させ、その上にn-NCDを成膜することによりpnダイオードを製作する事に成功した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to use low cost Si substrate for fabricating future power devices using nanocrystalline diamond (NCD) on SiC/Si substrate. We have succeeded in fabricating pn diode using n-type NCD film on a SiC film grown on p-type Si substrate.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子・電気材料工学

キーワード：電気・電子材料（半導体、誘電体、磁性体、超誘電体、有機物、絶縁体、超伝導体など）、結晶成長

## 1. 研究開始当初の背景

シリコンカーバイド（SiC）やダイヤモンドなどはワイドバンドギャップ半導体の新材料として低損失であり、パワーデバイス、高温用デバイス、耐放射線用デバイスなど、様々な分野に向けて開発され、高温でも動作し冷却機構が不要なので、大規模な省エネルギー、CO<sub>2</sub>削減に貢献でき、軽量化や省スペースにもなる。特にSiCデバイスは実用化が始まっており、現在のSiインバータを全てSiCに取り替えると、140万kW（原発1-2機分）もの省エネ効果が得られると試算されている。また、ダイヤモンドのデバイ

スにおいては近年ようやく単結晶のpn接合デバイスが製作されたが、面積がまだ小さい。SiC、特にダイヤモンド基板は高価であり、広く実用化されるためには大面積で安価な基板を用いることが必須である。ダイヤモンドの単・多結晶に比べ、NCDはプラズマCVDなどで容易に大面積に均質に成膜でき、p型n型の制御が可能であり、金属よりも耐熱性がある。そこで我々は安価で大面積なSi基板上にSiC/NCD薄膜を製膜し高温用パワーデバイスに応用することを試みた。

## 2. 研究の目的

安価な Si 基板上に SiC (シリコンカーバイド)/ダイヤモンド半導体パワーデバイスを製作する基盤技術を確立することにある。目標値としては従来の Si/NCD 構造のデバイスに対して、4桁以上のリーク電流の低減、逆方向の耐圧で5倍以上の電圧、そして 300°C 以上でも動作するデバイスを製作することを目指す。

## 3. 研究の方法

本研究は上記の目標値を達成させるために、図 1 に示すように p-Si 基板/SiC/n- $\mu$ Cダイヤモンド構造の半導体パワーデバイスを製作する基盤技術を構築しようとしている。Si とダイヤモンドの間に SiC 薄膜を挟むことにより、正孔側の障壁が高くなり、電子と正孔の再結合確率を低減させることができ、リーク電流を抑えることが可能となる。これを実現するために、Si 基板上の SiC の成長が重要な鍵となり、以下の様な手法で SiC 薄膜の成長を実施した。

### (1) p 型 4H-SiC/n 型 NCD

まず、研究の第一段階として、p 型 4H-SiC/n 型 NCD のデバイスを製作し、NCD を用いて性能の良いダイオードが出来るかどうか確認するために、p 型 4H-SiC 基板上に n 型の NCD 薄膜を成長させた。NCD はマイクロ波プラズマ CVD 法により形成し、成膜条件は  $\text{CH}_4:\text{N}_2:\text{Ar}=2:60:138$  のガスを使用し、成膜時間:120min、圧力 100Torr、基板温度 830°C で統一した。また、スパッタリング法により Ni 電極を形成した。

### (2) p 型 Si/SiC/n 型 NCD

本研究の目的である p 型 Si/SiC/n 型 NCD 構造を、まず高濃度に B をドーピングした p 型 Si 基板上に SiC 薄膜を成長させ、そのための最適製膜条件を確立させた。

基板温度 700–800°C において Si (001) 基板上にエチレンガスを当てて表面の炭化を行い、その後、基板温度 600–800°C の基板温度でトリメチルシラン

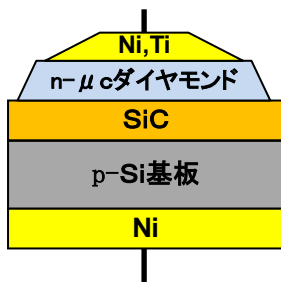


図 1 p 型 Si/SiC/n 型 NCD pn ダイオードの構造。

$(\text{CH}_3)_3\text{SiH}$  ガスを用いて、3C-SiC 膜の成長を行った。さらに、その上に n-NCD を成膜することにより pn ダイオード製作を行なった。

高濃度の B 元素を添加した Si 基板を用いた理由は、SiC の C により近い径の B を Si 中に入れることにより、格子不整合の影響を緩和する目的であった。

## 4. 研究成果

### (1) p 型 4H-SiC/n 型 NCD

まず、本研究の基礎として我々は p 型 4H-SiC/n 型 NCD のデバイスを製作し、NCD を用いて性能の良いダイオードが出来るかどうか確認した。図 2 に示す様に高性能のダイオード特性を得ることができた。逆方向における電流が抑えられ、室温における整流比は  $5 \times 10^7$ 、600°C においても整流比  $5 \times 10^4$  と十分な整流特性が得られた。このことにより、バンドギャップの大きい SiC により、ナノダイヤの  $\pi\pi^*$  準位や DB バンドからの正孔による漏れ電流 (図 3 参照) を劇的に低減できることが実証できた。引き続き本研究の目的である Si/SiC/NCD 構造の基礎研究を進めた。

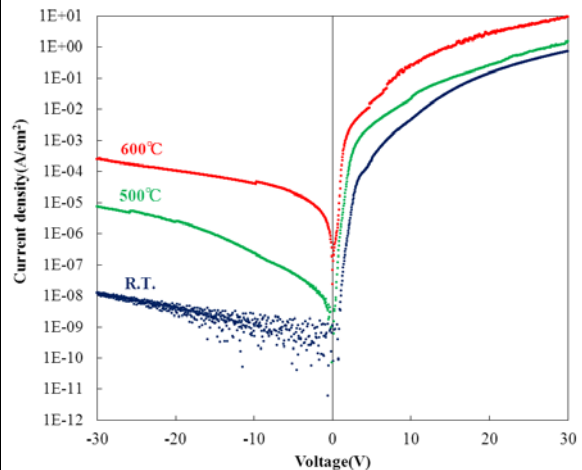


図 2 p-SiC/n-ナノダイヤモンドのダイオード特性。

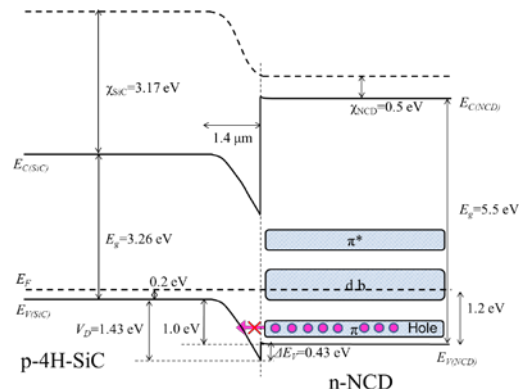


図 3. p 型 4H-SiC/n 型 NCD のバンド構造

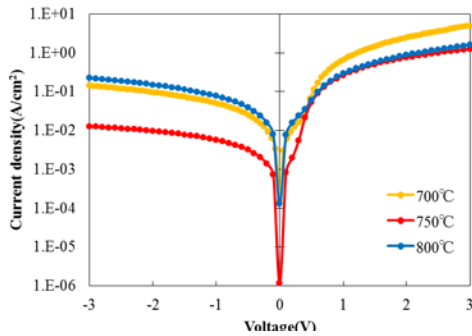


図 4 p-Si/3C-SiC/n-NCD ダイオードの室温でのI-V特性。各温度は炭化温度。

(2) p型Si/SiC/n型NCD

高濃度にBをドーパしたp型Si基板の上にSiC薄膜を成長させるための最適化条件の確立および、その上にn-NCDを成膜することによりpnダイオード製作を行なった。

① p型Si基板へのSiC薄膜の成長

エチレングラスを用いたSi基板表面の炭化では750°CのSi基板表面には逆ピラミッド型のボイドができなく、良好なSiC膜が成長できることを見出した。しかし、結晶性などの膜質はまだ改善の余地があり、今後もまだ最適条件を見いだして行く必要がある。結晶評価にはXRD、FTIR(赤外吸収)、ラマン分光、SEMなどを用いて評価した。

② p型Si基板/SiC薄膜上へのNCD成長

上記で見出した最適条件で、p-Si基板上に成長したSiC上にn-NCD薄膜を成長させ、pnダイオードを製作した。現時点で整流比約150程度のダイオード特性(室温)が得られた。(図4参照) 逆方向電流が大きく、高い整流性を得られなかった理由として、Si基板上に成長したSiC中の欠

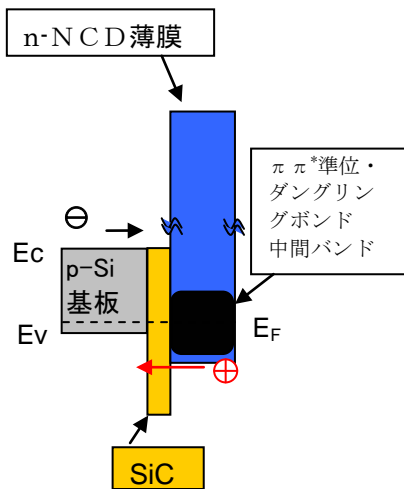


図 5 Si基板/SiC/ $\mu$ Cダイヤモンドのバンド構造の略図

陥準位が多く、図5に示すように、NCD膜側からの少数キャリア(ホール)がSiCの欠陥準位を介して、Si側にリークしたことによるリーク電流の増大によるものと考え

る。今後の継続的研究において、pnダイオードのリーク電流を押さえ、特性を向上を図るためには、p型Si基板の上のSiC薄膜の結晶性向上が不可欠である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5件)

- ① Ryo Amano, Masaki Goto, Yoshimine Kato, and Kungen Teii, Fabrication of 4H-SiC/nanocrystalline diamond pn junctions, Materials Science Forum, 査読有, Vol. 717-720, 2012, pp. 1009-1012.
- ② Yoshimine Kato, Masaki Goto, Ryota Sato, Kazuhiro Yamada, Akira Koga, Kungen Teii, Chenda Srey, and Satoru Tanaka, Formation of epitaxial 3C-SiC layers by microwave plasma-assisted carbonization, Surface & Coatings Technology, 査読有, Vol. 206, 2011, pp. 990-993.
- ③ M. Goto, A. Koga, K. Yamada, Y. Kato, and K. Teii, Fabrication of n-type nanocrystalline diamond/3C-SiC/p-Si(001) junctions, Materials Science Forum, 査読有, Vol. 679-680, 2011, pp. 524-527.
- ④ Akira KOGA, Kungen TEII, Masaki GOTO, Kazuhiro YAMADA, and Yoshimine KATO, Growth and electrical properties of 3C-SiC/nanocrystalline diamond layered films, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 50, No. 1, 2011, pp. 01AB08-1 - 01AB08-4.
- ⑤ Yoshimine Kato and Kazuo Sakumoto, Island formation of SiC film on striated Si(001) substrates, Materials Science Forum, 査読有, Vol. 600-603, 2009, pp. 227-230.

[学会発表] (計 10件)

- ① 下田尚孝、加藤喜峰、堤井君元、ナノクリスタルダイヤモンド薄膜のオーミック電極特性、日本金属学会他九州支部平成25年度合同学術講演会、2013年6月8日、熊本県民交流館パレア
- ② 天野僚、五島正基、下田尚孝、加藤喜峰、堤井君元、p型4H-SiC/n型ナノクリスタルダイヤモンドダイオードの高温動作、第21回シリコンカーバイド(SiC)及び関連ワイドギャップ半導体研究会、

- 2012年11月19日、大阪市中央公会堂
- ③ Y. Kato, M. Goto, R. Amano, N. Shimoda, and K. Teii, Electrical Characteristics of 4H-SiC/Nanocrystalline Diamond pn Junctions, Diamond and Carbon Materials 2012, 2012年9月4日、Spain, Granada.
- ④ 下田尚孝、天野僚、加藤喜峰、堤井君元、高温時におけるナノクリスタルダイヤモンド薄膜のオーミック電極の特性、日本金属学会他九州支部 平成24年度合同学術講演会、2012年6月9日、北九州国際会議場
- ⑤ Masaki Goto, Ryo Amano, Yoshimine Kato, Kungen Teii, Fabrication and characterization of Si/ and SiC/nanocrystalline diamond pn junctions, International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2011 (ICSCRM 2011), 2011年9月14日、Cleveland, Ohio, USA
- ⑥ Yoshimine KATO, Akira KOGA, Masaki GOTO, Kazuhiro YAMADA, Kungen TEII, Growth of 3C-SiC/nanocrystalline diamond films on Si (001) by microwave plasma-assisted carbonization and deposition, European Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ECSCRM 8th), 2010年8月31日、Oslo, Norway.
- ⑦ 天野僚、五島正基、加藤喜峰、堤井君元、半導体基板上へのナノダイヤモンド成膜とダイオード特性に関する研究、日本金属学会他九州支部 平23年度合同学術講演会、2011年6月11日、九州大学
- ⑧ 五島正基、古閑彰、山田和広、加藤喜峰、堤井君元、マイクロ波プラズマCVD法を用いたp-Si上の3C-SiC/n型ナノクリスタルダイヤモンド薄膜の成長、平成22年度 応用物理学会九州支部学術講演会、2010年11月27日、九州大学
- ⑨ 五島正基、古閑彰、加藤喜峰、堤井君元、マイクロ波プラズマCVD法によるSi/SiC/NCD膜の成長及び評価、日本金属学会他九州支部 平22年度合同学術講演会、2010年6月5日、熊本大学
- ⑩ Yoshimine Kato, Tomohiko Horikawa, Tomohiro Ikeda, and Kungen Teii, SiC and nanocrystalline diamond coating on Si substrates fabricated by microwave plasma CVD, International Conference on Surface Modification of Materials by Ion Beams -SMMIB2009-, 2009年9月15日、東京

〔図書〕(計 0 件)

〔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.kato-lab.org/content#device>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

加藤 喜峰 (KATO YOSHIMINE)

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：60380573

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

堤井 君元 (TEII KUNGEN)

九州大学・大学院総合理工学研究院・准教授

研究者番号：10335995