

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01711

研究課題名(和文) 高品質窒化ホウ素半導体への表面ドーピング

研究課題名(英文) Surface doping of high-quality boron nitride semiconductors

研究代表者

堤井 君元 (Teii, Kungen)

九州大学・総合理工学研究院・准教授

研究者番号：10335995

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：資源およびエネルギーの有効利用や利便性に優れた電気・電子機器の開発には、ワイドバンドギャップ半導体を用いたパワー半導体デバイスの開発が必要である。本研究では、放電プラズマ蒸着法によって窒化ホウ素半導体膜を形成し、得られた膜表面へのドーピングに取り組んだ。そしてドーピングした膜の構造、組成、電気特性等の評価を通して、電気伝導性を向上させるドーピング条件を見出し、電気伝導性を制御するための指針を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ワイドギャップ半導体の電気伝導性を向上させるドーピング手法を見出し、電気伝導性を制御するための指針を得るに至った。また電気伝導性を高めた膜を基にした表面デバイスの動作性能の評価を通して、本研究手法の有用性を実証することが出来た。これらの成果は、高出力・高効率なパワー半導体デバイスの開発に有用であり、資源およびエネルギーの有効利用や利便性に優れた電気・電子機器の開発に資するものである。

研究成果の概要(英文)：For effective use of resources and energy and development of high performance electric and electronic devices, power semiconductor devices using wide band gap semiconductors are highly required. In this study, boron nitride semiconductor films were deposited by vapor phase deposition process using a discharge plasma, and doping on the surface of the films was carried out. As a result, the doping condition for increasing the electrical conduction of the films was found and the research direction for controlling the electrical conduction was established by characterization of the structure, composition, and electrical properties of the films.

研究分野：材料工学

キーワード：ドーピング プラズマCVD パワー半導体

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 資源およびエネルギーの効率的利用や利便性に優れた電気・電子機器の必要性の高まりから、電気・電子機器に搭載されるパワー半導体デバイスの高出力化および高効率化が切望されている。パワー半導体デバイスはわれわれの身のまわりのモバイル機器、家電製品、自動車など、各種電気・電子機器を駆動する際の電力変換・供給・制御に必要不可欠なものであり、交流を直流に変換したり、電圧を低減したり、モータを駆動したり、バッテリーを充電したり、大規模集積回路を動作させるなどの役割を担っている。パワー半導体デバイスのなかでも、電圧をある一定の方向へ印加したときに電流を流し、交流を直流にする整流作用を有するものが整流ダイオードであり、様々な種類の整流ダイオードが開発されている。半導体中に共存している電子と正孔のうち、数の多いほうのキャリアを多数キャリアと呼ぶが、正孔が多数キャリアを担う p 型半導体と、電子が多数キャリアを担う n 型半導体を接合させた pn 接合ダイオード、p 型または n 型半導体と金属を接合させたショットキーバリアダイオード、トンネル効果による降伏現象を利用して比較的低い逆方向電圧で電流が流れ出すツェナーダイオード、p 型半導体と n 型半導体の間に真性半導体 (i 型) を挿入することにより少数キャリアの蓄積効果を高めて逆回復時間を短くした 3 層構造の pin 接合ダイオードなどが挙げられる。また pn 接合を組み合わせたパワートランジスタやサイリスタは、電気信号の増幅や、電気信号のスイッチングが可能である。ダイオードやトランジスタを、ひとつのシリコンチップの上に集積したものが集積回路あるいは大規模集積回路であり、情報記憶・四則演算・電力制御等の働きを担うことから、工業製品や産業機器に必要な不可欠である。

(2) モバイル機器をはじめとする各種電気・電子機器の機能性向上やハイブリッド車・電気自動車などの低燃費エコカーの動作性能向上の必要性が高まるにつれて、電力変換や電力制御を担うパワー半導体デバイスに求められる動作条件や使用環境等は、ますます過酷になっている。現状のパワー半導体デバイス用の半導体材料には、主としてシリコンが用いられてきた。しかしながらシリコンを用いた半導体デバイスの電力損失は大きいため、高出力化や高効率化の要求には対応できない。また高温条件下での安定動作にも対応できない。それゆえシリコンよりも優れた電気的特性を有する半導体材料を用いた次世代パワー半導体デバイスの開発が強く望まれている。

(3) 価電子帯と伝導帯の間に位置する禁制帯のエネルギー幅 (バンドギャップ) が、シリコンのものよりも大きい半導体がワイドギャップ半導体である。すなわちシリコンのバンドギャップは約 1.1 eV 程度と小さいが、炭化ケイ素やダイヤモンドなどのバンドギャップが大きい半導体を用いたパワー半導体デバイスは、潜在的にシリコンの場合よりも電力損失が小さいうえ、高出力・高温条件にも対応可能であるため、電気・電子機器の小型・軽量化も見込むことが出来る。それゆえワイドギャップ半導体を用いたデバイスの研究開発が、国内外の研究機関において進められている。

(4) 半導体のもつバンドギャップは、半導体デバイスとして利用する際の動作性能の指標であり、一般的にはバンドギャップが大きいほど潜在的な動作性能は高いと予想される。窒化ホウ素はホウ素と窒素から成る化合物で、六方晶、立方晶、ウルツ型などいくつかの多形をもつ半導体である。とりわけ立方晶窒化ホウ素は、大バンドギャップのみならず、優れた電気電子特性をもつことから、炭化ケイ素やダイヤモンドさえもしのぐ潜在性を有するパワー半導体の有力候補である。

(5) 窒化ホウ素の作製法は、大別して高温高压法と低温低压法が存在する。一般に半導体デバイス応用には後者による薄膜化が必要である。その際、放電プラズマやイオンビームを用いたさまざまな気相蒸着法が用いられる。しかし従来のプラズマ蒸着法では、膜生成のために基体 (基板) へ強いイオン衝撃を与えることが必要であり、高品質な膜が得られなかった。我々は弱いイオン衝撃下で高品質な膜を形成する独自のプラズマ蒸着法を開発してきた。

(6) 窒化ホウ素を半導体デバイスへ利用するには電気伝導性を制御するためのドーピング技術が必要である。p 型は正孔が多数キャリアとなるのに対し、n 型は電子が多数キャリアとなる。しかし窒化ホウ素へのドーピング技術はいまだ確立されていない。

2. 研究の目的

(1) 放電プラズマ蒸着法によって得られた膜に対し、ドーパントの働きをもつ高分子物質を蒸着し、膜表面へのドーピングを行う。

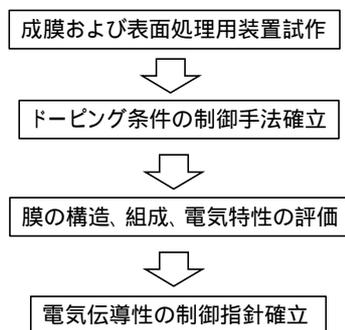


図1 研究のスキーム

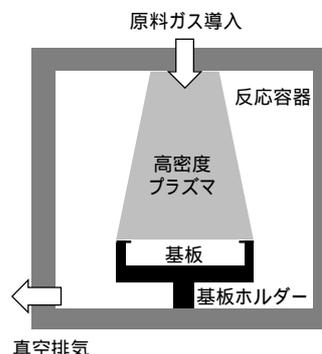


図2 実験装置の概略

(2) 高分子物質の膜厚および種類や、膜の表面状態などを変化させてドーピングした膜の構造、組成、電気特性を明らかにする。

(3) 以上により、電気伝導性を向上させるドーピング条件を見出し、電気伝導性を制御するための指針を確立する。図1に本研究のスキームを示す。

3. 研究の方法

(1) 高品質な膜の作製と、膜の表面処理を行うための放電プラズマ蒸着装置を試作した。図2に本研究で用いた実験装置の概略を示す。実験装置は反応容器、水冷設備、プラズマ発生部、電源、ガス制御装置、真空排気設備、バイアス印加機能付き基板ホルダー、温度計、電圧計等で構成されている。

(2) 電源から電力を放電プラズマ発生部に供給し、低気圧下にて高密度プラズマを発生させた。窒素とホウ素を含む混合ガスを反応容器へ導入してプラズマ中で分解し、高活性な粒子種を生成させ、基板ホルダー上の基板へ膜を形成した。その後、高分子物質を膜へ蒸着することで、ドーピングを行った。

(3) ドーピングを施した膜の構造と組成を、フーリエ変換赤外分光法、X線回折法、走査型電子顕微鏡、原子間力顕微鏡、X線光電子分光法、紫外線光電子分光法等によって調べた。膜の電気特性を、電流プローバー、電流ソースメータ、LCRメータ等を用いて調べた。

(4) 上記手法によって電気伝導性を高めるドーピング条件を検証した。また電気伝導性を制御するための指針を検討した。

4. 研究成果

(1) 高品質な膜の作製および膜の表面処理を行うための放電プラズマ蒸着装置を試作することが出来た。

(2) 上記実験装置を用いて、放電プラズマ蒸着法によって基板上へ高品質な膜を形成することが出来た。同じくプラズマを用いた表面処理によって、膜の表面状態を制御することが出来た。その後、得られた膜上へ高分子物質を蒸着する際、高分子物質の膜厚および種類を変化させることで、ドーピング条件を制御することが出来た。ドーピングによって得られた膜の構造、組成、電気特性の評価を行い、電気伝導性を向上させるドーピング条件を検証し、電気伝導性を制御するための指針が得られた。

(3) ドーピング条件と膜の相純度、結晶性、表面形態、表面粗さ、化学組成、表面結合状態等の相関関係を調べ、ドーピングにより膜の化学組成や表面結合状態は大きく変化したのに対し、結晶性や表面形態は比較的变化しないことが分かった。以上により、ドーピング条件と膜の構造および組成の関係を明らかにすることが出来た。

(4) ドーピング条件と膜の室温から高温における電気伝導性の相関関係を調べた。ドーピングにより、電気伝導率やキャリア密度は大きく変化したのに対し、キャリアの活性化エネルギーは比較的变化しないことが分かった。また電気伝導率やキャリア密度は、膜表面の電気的性質に依存すること、プラズマによる表面処理によって制御可能なことが分かった。以上により、ドーピング条件と膜の電気特性の関係を明らかにすることが出来た。

(5) ドーピング条件の制御により電気伝導性を高めた膜を用いて表面デバイスを試作し、その基本動作性能を評価した結果、標準的な動作性能を示すことが分かった。デバイス構造の設計を推し進めることによって、動作性能をさらに向上できることが示唆された。

(6) 上記のように、電気伝導性を向上させるドーピング手法を見出し、電気伝導性を制御するための指針を得るに至った。また電気伝導性を高めた膜を基にした表面デバイスの動作性能の評価を通して、本研究手法の有用性を実証することが出来た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Z. Sun, M. Cho, L. Huang, R. Hijiya, Y. Kato, K. Teii	4. 巻 11
2. 論文標題 Electrical characteristics of metal contacts to carbon nanowalls	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ECS J. Solid State Sci. Technol.	6. 最初と最後の頁 61012
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1149/2162-8777/ac6a77	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 L. Huang, X. Wu, R. Hijiya, K. Teii	4. 巻 33
2. 論文標題 Control of electrostatic self-assembly seeding of diamond nanoparticles on carbon nanowalls	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 105605
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6528/ac3358	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 L. Huang, S. Harajiri, S. Wang, X. Wu, K. Teii	4. 巻 14
2. 論文標題 Enhanced field emission from ultrananocrystalline diamond-decorated carbon nanowalls prepared by a self-assembly seeding technique	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Appl. Mater. Interfaces	6. 最初と最後の頁 4389 - 4398
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acscami.1c17279	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Y. Kuboki, H. Zhu, M. Sakamoto, H. Matsumoto, K. Teii, Y. Kato	4. 巻 135
2. 論文標題 Low temperature annealing of nanocrystalline Si paste for pn junction formation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mater. Sci. Semicond. Process.	6. 最初と最後の頁 106093
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.mssp.2021.106093	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Kamimura, M. Torigoe, K. Teii, S. Matsumoto	4. 巻 121
2. 論文標題 Electrical insulation characteristics of metal-insulator-metal structures using boron nitride dielectric films deposited with low-energy ion impact	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mater. Sci. Semicond. Process.	6. 最初と最後の頁 105353
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mssp.2020.105353	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Kamimura, T. Matsuura, K. Teii, S. Matsumoto	4. 巻 706
2. 論文標題 Effect of the boron-to-nitrogen ratio on leakage current characteristics of boron nitride films prepared by surface-wave plasma enhanced chemical vapor deposition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Thin Solid Films	6. 最初と最後の頁 138029
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tsf.2020.138029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Nakakuma, K. Teii, S. Matsumoto	4. 巻 47
2. 論文標題 Lowering of the substrate bias voltage for deposition of cubic boron nitride in microwave plasma	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Plasma Science	6. 最初と最後の頁 1205-1209
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPS.2018.2872425	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Torigoe, Y. Kamimura, K. Teii, S. Matsumoto	4. 巻 51
2. 論文標題 Effect of low-energy ion impact on the structure of hexagonal boron nitride films studied in surface-wave plasma	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Surface and Interface Analysis	6. 最初と最後の頁 126-130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/sia.6573	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 神村勇馬、松浦貴志、鳥越雅敬、堤井君元、松本精一郎	4. 巻 ED-18-115/PPP-18-044
2. 論文標題 表面波プラズマCVDを用いた窒化ホウ素膜の合成と構造および電気特性評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電気学会放電/プラズマ・パルスパワー合同研究会資料	6. 最初と最後の頁 5-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 原尻 駿吾, Huang Lei, Nahar Arijun, 堤井 君元
2. 発表標題 ダイヤモンドナノ粒子で修飾したナノウォール構造体の電界放出特性と電界分布シミュレーション
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原尻 駿吾, Huang Lei, 堤井 君元
2. 発表標題 炭素ナノウォール構造体の電界放出特性と電界分布シミュレーション
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原尻駿吾, Huang Lei, 堤井君元
2. 発表標題 ナノウォール構造体からの電界放出における電界シミュレーション
3. 学会等名 令和4年度電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堤井君元
2. 発表標題 プラズマCVD法による高品位cBN膜の成膜技術と応用展開
3. 学会等名 表面技術協会関西支部令和4年度第2回表面物性研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原尻駿吾, Huang Lei, 堤井君元
2. 発表標題 電界シミュレーションを用いたナノウォール構造体の電界放出特性に関する研究
3. 学会等名 2022年度(第75回)電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Teii, J. H. C. Yang, S. Matsumoto
2. 発表標題 Plasma deposition of high-quality cubic boron nitride films for applications to ultrahard coatings and electronic devices
3. 学会等名 7th International Symposium on Advanced Ceramics and Technology for Sustainable Energy Applications toward a Low Carbon Society（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Ikematsu, T. Nakakuma, K. Teii, S. Matsumoto
2. 発表標題 Lowering of the substrate bias voltage for formation of cubic boron nitride films in microwave plasma
3. 学会等名 International Thin Films Conference (TACT) 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 J. H. C. Yang, K. Teii, S. Matsumoto
2. 発表標題 Wetting behavior of plasma-treated ultrahard boron nitride films
3. 学会等名 International Thin Films Conference (TACT) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堤井君元
2. 発表標題 プラズマCVDでつくる高品質立方晶窒化ホウ素とその応用
3. 学会等名 第75回 CVD研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Kamimura, T. Matsuura, M. Torigoe, K. Teii, S. Matsumoto
2. 発表標題 Effect of low-energy ion impact on the structure of boron nitride films studied in surface-wave plasma
3. 学会等名 40th International Symposium on Dry Process (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 神村勇馬、松浦貴志、鳥越雅敬、堤井君元、松本精一郎
2. 発表標題 表面波プラズマCVDを用いた窒化ホウ素膜の合成と構造および電気特性評価
3. 学会等名 電気学会放電/プラズマ・パルスパワー合同研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Teii, S. Kawakami, S. Matsumoto
2. 発表標題 Enhanced wettability of cubic boron nitride films for biomedical applications
3. 学会等名 69th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究者情報 (九州大学) http://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/details/K001514/research.html</p>
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------