

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04501

研究課題名(和文) AlN/ダイヤモンドpin接合を用いたダイヤモンド電子デバイスの高性能化

研究課題名(英文) Development of diamond electronic devices using AlN/diamond heterojunction

研究代表者

井村 将隆 (IMURA, Masataka)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・主任研究員

研究者番号：80465971

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、窒化アルミニウム(AlN)/ダイヤモンドpin構造を用いたダイヤモンド電子デバイスの高性能化及び新機能デバイスの開発を試みた。有機金属化合物気相成長法を用いて成長温度1300℃以上でAlNを成長させることで、AlN結晶の品質を向上させ、結晶中の残留不純物濃度をSIMSの検出限界値以下に制御した。この条件下でSiドーパント濃度(流量)を従来より一桁増加させSiをドーピングすることに成功した。続いてSiドーパントAlNにTi/Al/Ti/Au電極を形成し、ポストアニール処理を窒素雰囲気下750℃以上で実施することで、オーミック特性に近い電流電圧特性を得ることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

窒化アルミニウム(AlN)及びダイヤモンドは材料・物質特性の観点から究極のワイドギャップ半導体であり、これら材料を用いた半導体デバイスは、自動車・無線通信・宇宙開発、医療等の幅広い分野で応用が可能である。そのため、本研究課題で得られた成果は、21世紀の基幹技術となる次世代光・電子デバイスの開発・活性化の一翼を担うものである。

研究成果の概要(英文)：In this study, we improved the performance of diamond electronic devices using an aluminum nitride (AlN) / diamond pin structure and developed new functional devices. The high-crystalline-quality AlN layers were obtained on the diamond by adopting a growth temperature of 1300°C or higher using the metal-organic vapor phase epitaxy. In addition, the concentration of residual impurities in the AlN layers was controlled to be below the detection limit of SIMS. Under these conditions, the Si dopant was doped by increasing the Si concentration (flow rate) by one order of magnitude compared to the conventional method. Subsequently, current-voltage characteristics showed close to ohmic behavior by forming Ti / Al / Ti / Au electrodes on Si-doped AlN and performing post-annealing treatment at 750°C or higher in a nitrogen atmosphere.

研究分野：半導体デバイス

キーワード：窒化アルミニウム ダイヤモンド 光デバイス 電子デバイス 有機金属化合物気相成長法 マイクロ波プラズマ気相成長法 ワイドギャップ半導体 窒化物半導体

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

次世代半導体エレクトロニクス分野では、過酷な環境下で安定動作可能な大電流・高耐压パワースイッチングデバイス及び紫外線領域で発光する光デバイスの開発・実現が急務である。従ってシリコン(Si)半導体に代替する屈強な材料や直接遷移型のバンド構造を有すワイドギャップ半導体の導入が不可欠である。また同分野の開拓には、新材料を探索し自由自在に駆使することが重要な鍵となる。本研究では、材料・物質特性の観点から究極のワイドギャップ半導体である窒化アルミニウム(AlN)・ダイヤモンドを選定し、これらの材料の特徴を最大限に利用した電子・光デバイスの開発に取り組んだ。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、まず AlN/ダイヤモンドヘテロ構造を用いた新規電子デバイスの開発に取り組んだ。ここでは高温有機金属化合物気相成長(HT-MOVPE)法を用いて高品質 AlN をダイヤモンド基板上に得ること、また AlN の結晶品質を評価することを第一の目的とした。続いて n 型導電特性を有す AlN を得るため Si ドープを行い、その電気的特性を評価することを第二の目的とした。

(2) 次に窒化ガリウムアルミニウム($Al_kGa_{1-x}N$)系窒化物半導体を用いた紫外発光ダイオードの開発に取り組んだ。ここでは上記同様 HT-MOVPE 法を用いて高品質 AlN をサファイア基板上に得ること、また AlN の結晶品質を評価することを第一の目的とした。続いて成長温度 1350°C の条件にて $Al_kGa_{1-x}N$ 結晶成長を実施し、急峻な界面を有す AlN/ $Al_kGa_{1-x}N$ 多重量子井戸を得ること、更に同量子井戸の発光特性評価をすることを第二の目的とした。

3. 研究の方法

(1) HT-MOVPE 法を用いた AlN 及び $Al_kGa_{1-x}N$ 結晶成長

AlN 及び $Al_kGa_{1-x}N$ 結晶成長は、HT-MOVPE 装置(EpiQuest, SH2001-HTA)を用いて成長温度 1300-1350°C、水素(H_2)雰囲気、成長圧力 20-23Torr の条件にて実施した。Al 原料に TMAI、Ga 原料は TMGa、N 原料に NH_3 、Si ドープは水素希釈 TMSi を用いた。ダイヤモンド基板上へ AlN 結晶を成長する際は、 H_2+NH_3 雰囲気にて成長前熱処理(プレアニール処理)を実施した。またサファイア基板上へ高品質な AlN を得るために AlN 成膜後に $TMGa+H_2+NH_3$ 雰囲気にて成長後熱処理(ポストアニール処理)を行った。

(2) 結晶評価方法

AlN の表面モルフォロジーは、原子間力顕微鏡法(Atomic Forced Microscopy: AFM)により評価した(SII Nanotechnology, SPI3800Ne)。結晶構造解析には、X 線回折(X-ray Diffraction: XRD)法(Bruker, D8 Discover)及び透過型電子顕微鏡(Transmission Electron Microscopy: TEM)法(JEOL, JEM-ARM200F)を用いた。電気的特性評価には、ホール効果測定 (TOYO Corporation, ResiTest8300)及び半導体パラメータアナライザ(Agilent, B1500A)を用いた。光学的特性評価には、カソードルミネッセンス(CL)法を用いた。

4. 研究成果

(1) HT-MOVPE 法を用いた高品質 AlN/ダイヤモンドヘテロ構造形成

HT-MOVPE 法を用いて H_2+NH_3 雰囲気プレアニール処理を実施した後にダイヤモンド(111)基板上に AlN を成膜した。XRD 法を用いて結晶構造を評価した結果、単結晶の AlN がダイヤモンド基板上に得られていることが明らかとなった(図 1)。また TEM 法を用いて結晶品質を評価した結果、結晶欠陥の少ない AlN が得られていることが明らかとなった(図 2)。

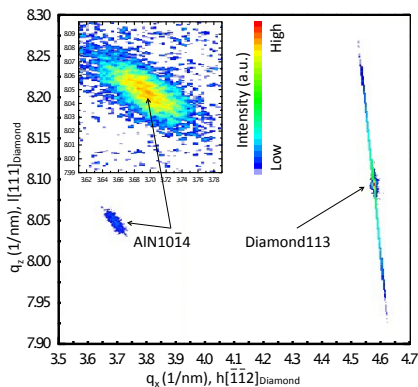


図 1 X 線逆格子マップ

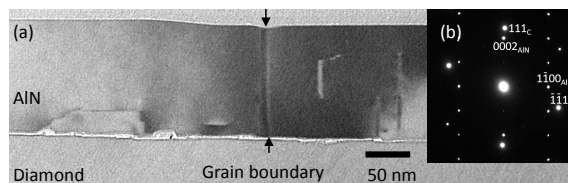


図 2 (a)断面 TEM 像と(b)電子回折パターン

(2) Si ドープ AIN の電気的特性評価

成長温度 1300°C 以上で AIN を成長させることで、AIN 結晶の品質を向上させ、結晶中の残留不純物濃度を SIMS の検出限界値以下に制御した。この条件下で n 型導電特性を得るために必要な Si ドープ濃度(TMSi 流量)を従来より一桁増加させ、Si をドーピングさせることに成功した。一方で、n 型 AIN と金属の接触抵抗低減化の課題に関しては、Si ドープ AIN に Ti/Al/Ti/Au 電極を形成し、ポストアニール処理を実施した。ポストアニール処理を窒素雰囲気下 750°C 以上で実施することで、オーミック特性に近い電流電圧特性が得られることを明らかにした。

(3) HT-MOVPE 法を用いた高品質 AIN/サファイア基板結晶成長

HT-MOVPE 法を用いて AIN 成膜後に TMGa+H₂+NH₃ 雰囲気にて成長後熱処理(ポストアニール処理)を行った。XRD 測定及び AFM 測定の結果、AIN の結晶配向性(図 3)及び表面モルフォロジー(図 4)が処理時間(図中に挿入)の経過とともに改善されることが明らかとなった。

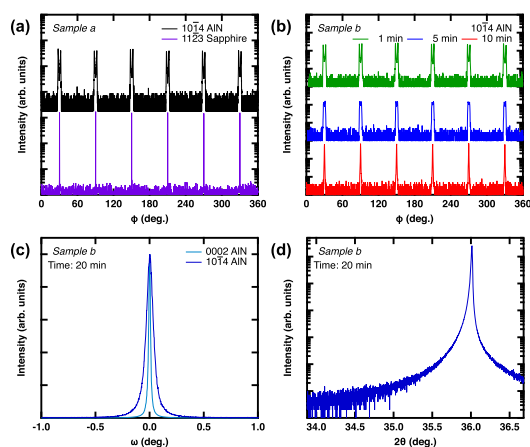


図 3 X 線回折プロファイル

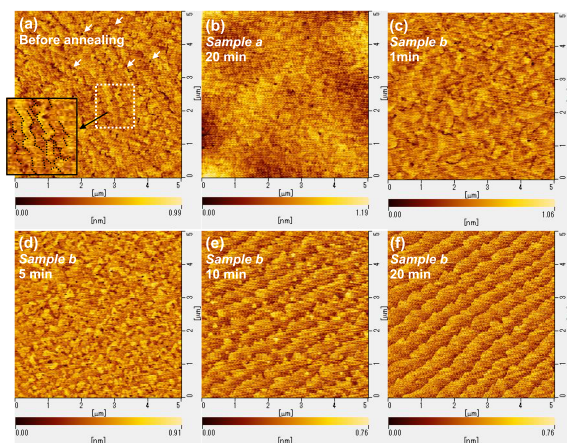


図 4 表面 AFM 像

(4) AIN/Al_xGa_{1-x}N 多重量子井戸の形成と発光特性評価

高品質 AIN 上に 1350°C にて Al_xGa_{1-x}N が成膜出来る条件を探索し、その後、AIN/Al_xGa_{1-x}N 多重量子井戸の形成を行った。HT-MOVPE 法を用いて AIN 成膜後に TMGa+H₂+NH₃ 雰囲気にて成長後熱処理(ポストアニール処理)を行った。XRD 測定において量子井戸形成に起因した明瞭なサテライトピークと周期(数)を反映したフリンジが観測されたため、急峻な AIN/Al_xGa_{1-x}N 界面が得られていると考えられる。また室温 CL 測定の結果、波長 220–250 nm の紫外線領域において明瞭な発光スペクトルが得られることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Wu Haihua, Zhang Zilong, Sang Liwen, Li Tiefu, You Jianqiang, Imura Masataka, Koide Yasuo, Liao Meiyong	4. 巻 170
2. 論文標題 Precise characterization of atomic-scale corrosion of single crystal diamond in H2 plasma based on MEMS/NEMS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Corrosion Science	6. 最初と最後の頁 108651 ~ 108651
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.corsci.2020.108651	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 Sasama Yosuke, Kageura Taisuke, Komatsu Katsuyoshi, Moriyama Satoshi, Inoue Jun-ichi, Imura Masataka, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Uchihashi Takashi, Takahide Yamaguchi	4. 巻 127
2. 論文標題 Charge-carrier mobility in hydrogen-terminated diamond field-effect transistors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 185707 ~ 185707
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0001868	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 Liao Meiyong, Sang Liwen, Shimaoka Takehiro, Imura Masataka, Koizumi Satoshi, Koide Yasuo	4. 巻 5
2. 論文標題 Energy Efficient Metal/Insulator/Metal Semiconductor Field Effect Transistors Based on 2D Carrier Gases	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 1800832 ~ 1800832
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aelm.201800832	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 Kato Yuji, Imura Masataka, Nakayama Yoshiko, Takeguchi Masaki, Oshima Takayoshi	4. 巻 12
2. 論文標題 Fabrication of coherent $\text{-Al}_{203}/\text{Ga}_{203}$ superlattices on MgAl_{204} substrates	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 065503 ~ 065503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab2196	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 Sun Huanying, Shen Xiulin, Sang Liwen, Imura Masataka, Koide Yasuo, You Jianqiang, Li Tie-Fu, Koizumi Satoshi, Liao Meiyong	4. 巻 14
2. 論文標題 Thermal mismatch induced stress characterization by dynamic resonance based on diamond MEMS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 045501 ~ 045501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abe7b0	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 Shen Xiulin, Wu Kongping, Sun Huanying, Sang Liwen, Huang Zhaohui, Imura Masataka, Koide Yasuo, Koizumi Satoshi, Liao Meiyong	4. 巻 116
2. 論文標題 Temperature dependence of Young's modulus of single-crystal diamond determined by dynamic resonance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Diamond and Related Materials	6. 最初と最後の頁 108403 ~ 108403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.diamond.2021.108403	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 Shen Xiulin, Sun Huanying, Sang Liwen, Imura Masataka, Koide Yasuo, Koizumi Satoshi, Liao Meiyong	4. 巻 15
2. 論文標題 Integrated TbDyFe Film on a Single Crystal Diamond Microelectromechanical Resonator for Magnetic Sensing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physica Status Solidi (RRL) Rapid Research Letters	6. 最初と最後の頁 2100352 ~ 2100352
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssr.202100352	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 Okumura Hironori, Jinno Riena, Uedono Akira, Imura Masataka	4. 巻 60
2. 論文標題 Optical and electrical properties of silicon-implanted -Al2O3	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 106502 ~ 106502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac21af	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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 井村 将隆
2. 発表標題 ダイヤモンド半導体のこれから
3. 学会等名 第1回ダイヤモンド・DLC関連若手研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井村 将隆
2. 発表標題 高放射線耐性半導体検出器の開発
3. 学会等名 茨城テックプランター2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井村 将隆, 外川 学, 奥村 宏典, 西永 慈郎, 宮原 正也, 松木 武雄, 小出 康夫
2. 発表標題 真空紫外線及び70MeV陽子線に対して高い耐性を有すダイヤモンドSBD
3. 学会等名 第39回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Imura, H. Oosato, M. Y. Liao, and Y. Koide
2. 発表標題 Selective growth of diamond (111) by metal mask and its application for hydrogen terminated diamond FET
3. 学会等名 13th Conference on New Diamond and Nano Carbons (NDNC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井村将隆, 津田俊輔, 長田貴弘, 山下良之, 吉川英樹, 小林啓介, 小出康夫, 太田優一, 村田秀信, 山口智広, 金子昌充, 荒木努, 名西やすし
2. 発表標題 InGaNの表面-バルク電子状態評価
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井村将隆, 太田優一
2. 発表標題 原子配列に対するInGaNの電子状態依存性評価
3. 学会等名 第38回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Imura and Y. Ota
2. 発表標題 Electronic structures of InGaN alloys
3. 学会等名 The 9th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors (APWS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Imura and Y. Koide
2. 発表標題 Development of Atomic Layer Deposition Technique of Al _x Ga _{1-x} N for Hydrogen-terminated diamond MIS-FETs
3. 学会等名 The 8th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology. 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------