

令和元年6月10日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06268

研究課題名(和文)酸化ガリウムワイドギャップ化合物半導体薄膜のn型ドーピングの制御

研究課題名(英文) Study on n type doping of gallium oxide wide bandgap semiconductors

研究代表者

郭 其新 (GUO, QIXIN)

佐賀大学・シンクロトン光応用研究センター・教授

研究者番号：60243995

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、パワーデバイス及び深紫外固体光源用材料として注目されているワイドギャップ半導体である酸化ガリウムに着目し、結晶膜の電気伝導性制御の実現を目的とした。パルスレーザー堆積法を用いて、ターゲット中のシリコン濃度を変化させ、シリコンドープ酸化ガリウム薄膜の成長を行い、ホール測定法等により評価した結果、結晶膜中のキャリア濃度は、ターゲット中のシリコンの含有量を変えることにより、制御できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

パルスレーザー堆積法を用いて新規ワイドギャップ半導体である酸化ガリウム膜の電気伝導度の制御に成功し、ドーピング機構の解明に関する知見が得られたことは学術的に大きな意義がある。これにより、酸化ガリウムを用いた超低損失のパワーデバイスの研究が進み、各種電源、家電、ハイブリッド車、電気自動車、電車、変電所など、あらゆる電気・電子装置に搭載されているパワーデバイスの電力利用効率が飛躍的に向上することが可能であるので、社会的な意義は極めて大きいと思われる。

研究成果の概要(英文)：We have investigated the growth and properties of wide gap gallium oxide films which are attracting attention for power devices and deep ultraviolet solid light sources. The Si doped gallium oxide films were grown by pulsed laser deposition. We found that the carrier density of the films determined by Hall and Kelvin force microscopy measurements can be controlled by changing Si compositions in the gallium oxide targets. The results pave a way to develop gallium oxide based electronic devices.

研究分野：電子材料

キーワード：化合物半導体 電気特性 ワイドギャップ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 温室効果ガス削減、化石燃料に替わる革新的なエネルギーの創出などの研究が、地球規模の大きな課題になっている。そのため、シリコンデバイスより高効率で高出力のマイクロ波デバイス（無線通信用）や超低損失のパワーデバイス（様々な電源の基幹部品となる）の実現が期待できるワイドギャップ半導体として酸化ガリウム、シリコンカーバイド及び窒化ガリウムなどが注目されている。しかし、これらの材料にはそれぞれまだ課題が残されており、理想的なパワーデバイスの実現には至っていないのが現状である。

(2) 本研究で取上げる酸化ガリウムは、安定な単斜晶系構造を有しており、直接遷移型のバンド構造を持ち、バンドギャップが  $4.9\text{eV}$  であり、パワーデバイス材料として期待されている。また、この材料は波長に換算すると約  $253\text{nm}$  と深紫外光に相当することから、高輝度深紫外光固体光源材としても有用である。我々は、パルスレーザー堆積法を用いて、サファイア基板上に酸化ガリウムのエピタキシャル成長を行い、 $500^\circ\text{C}$  という低い成長温度で高品質の酸化ガリウム薄膜の作製に成功した。さらに最近世界に先駆けてこの結晶成長方法を用いてシリコンを添加することにより、**n** 型酸化ガリウム薄膜の電気伝導性の制御が可能であることを実証した所である。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究では、パワーデバイス及び深紫外固体光源用材料として注目されているワイドギャップ化合物半導体である酸化ガリウムに着目し、**n** 型酸化ガリウム結晶膜の電気伝導性制御の実現を目的としている。

(2) 具体的には、パルスレーザー堆積法を用いて高品質 **n** 型酸化ガリウム結晶膜の成長技術を確立し、デバイス応用に向け、**Si** ドープの化学組成、電子状態などを観測することにより、ドープ機構を解明する。

### 3. 研究の方法

(1) パルスレーザー堆積法により、ターゲット中の **Si** 含有量を変化させ、サファイア基板上に **Si** ドープ酸化ガリウム薄膜を作製し、異なる電子密度を持つ酸化ガリウム薄膜を得ようとする。具体的には、サファイア基板上に、成長温度  $500^\circ\text{C}$ 、ガス圧力  $0.1\text{ Pa}$  を一定とし、異なる **Si** 含有量のターゲットを用いて、酸化ガリウム薄膜の作製を行う。

(2) 作製された **Si** ドープ酸化ガリウム薄膜の結晶構造は X 線回折法、表面形態は原子間力顕微鏡を用いて調べた。キャリア濃度は、電子ビーム蒸着法を用いて **Ti/Au** 電極を作製し、ホール効果測定法及びケルビン力顕微鏡法により評価した。

### 4. 研究成果

(1) 図 1 に異なる濃度の **Si** をドープした酸化ガリウム薄膜の X 線回折プロファイル及び原子間力顕微鏡により観察された表面形態を示す。18.8、39.3 及び  $59.0^\circ$  付近に観測された回折ピークはそれぞれ単斜晶系酸化ガリウムの (-201)、(-402) 及び (-603) 面に対応していることが分かった。また、ドープした **Si** 濃度が変化しても、形成された薄膜の表面形態は殆ど変わらず、光学特性などにも影響を与えないことが明らかになった。

(2) 図 2 に酸化ガリウム膜のキャリア濃度のターゲット中の **Si** 含有量に対する依存性を示す。酸化ガリウム膜は **n** 型導電性を有しており、0.01、0.05、0.1 及び 0.3wt.% の **Si** 含有量のターゲットで作製された膜のキャリア濃度は、それぞれ、約  $1.0 \times 10^{15}$ 、 $1.0 \times 10^{18}$ 、 $1.7 \times 10^{19}$  及び  $2.4 \times 10^{20}\text{ cm}^{-3}$  であった。また、得られた膜のキャリア濃度は、キャリア濃度の増加と共に増加した表面仕事関数を示すケルビン力顕微鏡を用いた測定結果（図 3）と一致し、ターゲット中の **Si** 含有量を変えることによって  $10^{15} \sim 10^{20}\text{ cm}^{-3}$  の範囲の所望のキャリア濃度を得ることができた。

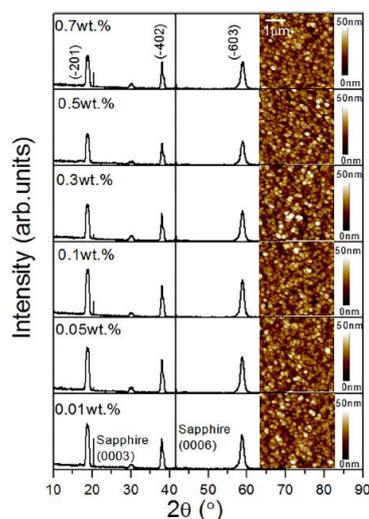


図 1 異なる濃度の **Si** をドープした酸化ガリウム薄膜の X 線回折プロファイル及び表面形態

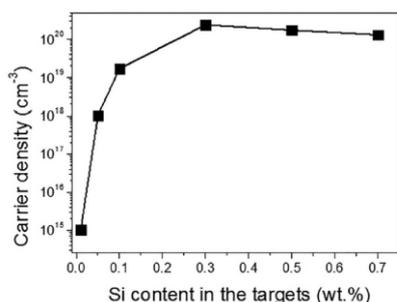


図2 酸化ガリウム膜のキャリア濃度のターゲット中の Si 含有量に対する依存性

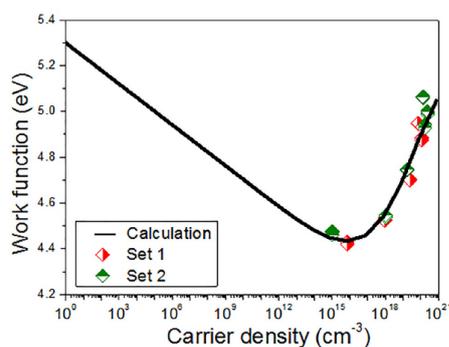


図3 表面仕事関数のキャリア濃度依存性

(3) 得られた酸化ガリウム膜中の Si 濃度を調べるために、二次イオン質量分析法を用いて、異なる Si 濃度を有する多層膜の成分測定を行った。各層は、図 4 (a)に示されるように、0.01~0.7wt.%の Si 含有量を有する酸化ガリウムターゲットを用いて堆積された。酸化ガリウム膜中の Si 濃度は、図 4 (b)に示されるように、ターゲット中の Si 含有量の増加と共に、 $7 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  から  $4 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$  まで増加した。また Si の拡散は観測されず、高い熱安定性を示唆している。

(4) 電気特性を改善させるため、ターゲット中のシリコン含有量を一定とし、基板温度 ( $100 \sim 600^\circ\text{C}$ ) を変化させて調べた結果、結晶性及び電気特性が基板温度に強く依存していることが明らかになった。また、カソードルミネッセンス及び光電子分光法を用いて、酸化ガリウムの光学特性及び電子構造特性を明らかにすることにより、酸化ガリウムにおける Si のドーピング機構に関する知見が得られた。さらに酸素ラジカル源による活性酸素を導入することにより、Si ドープ酸化ガリウム薄膜の成長速度及び結晶性を向上させられることが分かった。

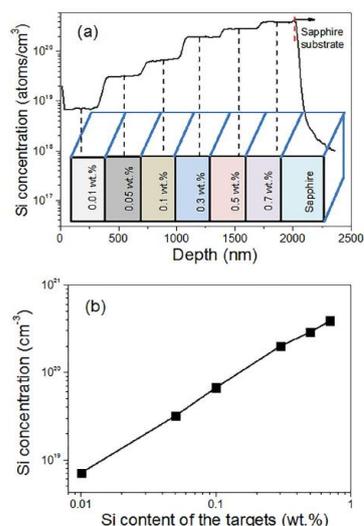


図4 (a)酸化ガリウム膜中の Si 濃度プロファイル  
(b) 酸化ガリウム膜中の Si 濃度のターゲット中の Si 含有量に対する依存性

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Zhang, F., Li, H., Guo, Q., Structural and Electrical Properties of  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  Films Deposited under Different Atmospheres by Pulsed Laser Deposition, Journal of Electronic Materials, 査読有, 47 (2018) 6635-6640.  
DOI: 10.1007/s11664-018-6545-6
- ② Fabi Zhang, Haiou Li, Yi-Tao Cui, Guo-Ling Li, and Qixin Guo, Evolution of optical properties and band structure from amorphous to crystalline  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  films, AIP Advances, 査読有, 8 (2018) 045112-1-7.  
DOI: 10.1063/1.5021867
- ③ Zhang, F., Arita, M., Wang, X., Chen, Z., Saito, K., Tanaka, T., Nishio, M., Motook, T., Guo, Q., Toward controlling the carrier density of Si doped  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  films by pulsed laser deposition, Applied Physics Letters, 査読有, 109 (2016) 102105-1-5.  
DOI: 10.1063/1.4962463

[学会発表] (計 6 件)

- ① Qixin GUO, Characteristics of gallium oxide based semiconductors, The 7th Global Conference on Materials Science and Engineering, Xi'an, Shaanxi, China, CMSE3619, 2 Nov., 2018.
- ② Qixin GUO, Characteristics of gallium oxide based wide bandgap semiconductors, 7th International

Symposium on Transparent Conductive Materials, 4th EMRS & MRS-J Bilateral Symposium on Advanced Oxides and Wide Bandgap Semiconductors, Crete, Greece, BS2-I10, 17 October, 2018.

- ③ Qixin GUO, Growth and characterization of gallium oxide based wide bandgap semiconductors, International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures, Chengdu, China, Invited Talk 13, Session 2, 16 May, 2018.
- ④ Qixin GUO, Characteristics of gallium oxide based wide bandgap semiconductors, TACT2017 International Thin Film Conference, National Dong Hwa University, C-I-0039, 17 Oct., 2017.
- ⑤ C. Hu, K. Saito, T. Tanaka, and Q. Guo, Characteristics of gallium oxide films grown by oxygen plasma assisted pulsed laser deposition, International Workshop on UV Materials and Devices, Fukuoka, Japan, Th-P1 14-18 November, 2017.
- ⑥ Qixin Guo, Katsuhiko Saito, Tooru Tanaka, Mitsuhiro Nishio, Crystal growth of gallium oxide based wide bandgap semiconductors, International conference on applied crystallography, Houston, USA, 16:45-17:10, 18 Oct. 2016.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

<http://www.slc.saga-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8桁)：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：