

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

|                   |  |
|-------------------|--|
| 題目(和文)            | 酸化ガリウム系混晶の薄膜成長とヘテロ接合界面の物性評価に関する研究  |
| Title(English)    | Thin-film growth and evaluation of heterojunction properties of Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> based solid solutions   |
| 著者(和文)            | 若林 諒   |
| Author(English)   | Ryo Wakabayashi  |
| 出典(和文)            | 学位:博士(工学),<br>学位授与機関:東京工業大学,<br>報告番号:甲第11158号,<br>授与年月日:2019年3月26日,<br>学位の種別:課程博士,<br>審査員:大友 明,原 正彦,一杉 太郎,神谷 利夫,吉本 護   |
| Citation(English) | Degree:Doctor (Engineering),<br>Conferring organization: Tokyo Institute of Technology,<br>Report number:甲第11158号,<br>Conferred date:2019/3/26,<br>Degree Type:Course doctor,<br>Examiner:,,,, |
| 学位種別(和文)          | 博士論文   |
| Category(English) | Doctoral Thesis  |
| 種別(和文)            | 論文要旨   |
| Type(English)     | Summary  |

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

|  |              |          |  |
|--|--------------|----------|--|
| 系・コース：<br>Department of, Graduate major in | 応用化学<br>応用化学 | 系<br>コース | 申請学位 (専攻分野)： 博士 (工 学)<br>Academic Degree Requested Doctor of |
| 学生氏名：<br>Student's Name                    | 若林 諒         |          | 指導教員 (主)： 大友 明<br>Academic Supervisor(main)                  |
|  |              |          | 指導教員 (副)：<br>Academic Supervisor(sub)                        |

### 要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters )

本論文は「酸化ガリウム系混晶の薄膜成長とヘテロ接合界面の物性評価に関する研究」と題し、7章よりなっている。

第1章「序論」では、大きな省エネ効果が期待されているワイドギャップ半導体を用いたパワーデバイスの開発について工業的および学術的観点からまとめ、現在の課題について述べている。耐電圧性能・コストの両面から他のワイドギャップ半導体に比べて優れている $\beta$ 型酸化ガリウム ( $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) について、課題となっている高移動化に向けてヘテロ接合界面設計の鍵となる  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系混晶に着目し、その薄膜成長指針やヘテロ接合界面設計に資する物性値を得ることの重要性について述べ、本研究の目的と意義を明らかにしている。

第2章「酸素ラジカル支援パルスレーザ堆積法による  $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜の成長」では、混晶薄膜の成長に向けた薄膜成長手法として酸素ラジカル支援パルスレーザ堆積 (PLD) 法が有効であることを明らかにしている。酸素ガスを酸素源として用いる従来の PLD 法では、高温成長時の還元反応に由来する成長速度の低下や組成制御性の悪化が問題となっている。酸素ラジカルを酸素源に使用することで、高温でも還元反応を抑制し、それらの問題を解決できること、さらには高品質  $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜の成長が可能であることを明らかにしている。

第3章「 $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 混晶薄膜のエネルギーバンド構造」では、 $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ヘテロ接合界面におけるエネルギーバンド構造を明らかにしている。まず、電子分光法による評価において必要となる試料の表面平坦性について検討している。複数の単酸化物から原料供給を行う打ち分け法を適用することで粒状構造を抑制しつつ、表面マイグレーションの促進につながる劈開面 (100) を成長面を選択することで、表面が平坦な  $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜の成長が可能であることを明らかにしている。電子分光法により同界面がタイプ I のバンドオフセットを有し、かつ大きな伝導帯バンドオフセット比 ( $\geq 4$ ) をもつことを明らかにしている。

第4章「全率固溶  $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜のエピタキシャル成長」では、全率固溶体  $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の非平衡薄膜成長に有効な基板表面処理法と同固溶体の物性値について明らかにしている。まず、酸素プラズマ処理を行うことで、理想的な二次元成長モードによりホモエピタキシャル成長が進行することを見出している。この表面処理法を適用することで溶解度ギャップの組成範囲でも単相の  $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜が得られること、バンドギャップが 4.51 eV ( $x=0$ ) から 6.91 eV ( $x=1$ ) まで増大することを明らかにしている。また  $x=0.5$  付近で格子定数やバンドギャップの組成依存性に屈曲点が現れることに着目し、そのことが  $\beta$ -gallia 型構造における Al と Ga の占有位置の選択性に起因すると述べている。

第5章「MgO (100) 基板上への導電性 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系薄膜成長と電気特性評価」では、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 混晶薄膜の電気特性を評価する上で絶縁性基板 MgO (100) が有効であることを明らかにしている。基板と薄膜の酸素配列構造の類似性に由来する特殊なエピタキシャル関係により、結晶性、表面平坦性、導電率のいずれにおいても、汎用絶縁性基板である  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0001) 基板上の薄膜に比べて高い特性が得られることを見出している。

第6章「 $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x-y</sub>Sc<sub>y</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三元混晶薄膜の成長と物性評価」では、三元混晶がヘテロ接合界面のコヒーレンシー向上に有効であると述べている。 $\beta$ -(Ga<sub>1-y</sub>Sc<sub>y</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> では、 $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> よりもヘテロ原子の同一組成においてバンドギャップの増分が大きいこと、前者では Al 組成の増加とともに結晶格子が収縮するのに対して後者では Sc 組成の増加とともに膨張することを見出している。これらの知見から  $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x-y</sub>Sc<sub>y</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三元混晶薄膜が特定の組成において  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と完全に格子整合し、コヒーレントなヘテロ接合界面を実現できることを明らかにしている。

第7章「総括」では、本研究で得られた成果をまとめ、その学術的および工業的意義を明らかにしている。これを要するに本論文は、組成制御性、表面平坦性、成長面依存性、基板表面処理法の観点から  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系混晶の薄膜成長を検討した成果であり、物性評価において問題となる各要因に対して有効な薄膜成長手法を示すとともに、ヘテロ接合界面設計に必要な物性値を明らかにすることに成功している。以上は薄膜成長法やデバイス設計の指針を示すなど工学上および工業上貢献するところが大きい。よって本論文は博士 (工学) の学位論文として十分な価値があるものと認められる。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)  
Doctoral Program

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

|  |              |          |   |                      |
|--|--------------|----------|---|----------------------|
| 系・コース：<br>Department of, Graduate major in | 応用化学<br>応用化学 | 系<br>コース | 申請学位 (専攻分野)：<br>Academic Degree Requested | 博士 (工学)<br>Doctor of |
| 学生氏名：<br>Student's Name                    | 若林 諒         |          | 指導教員 (主)：<br>Academic Supervisor(main)    | 大友 明                 |
|  |              |          | 指導教員 (副)：<br>Academic Supervisor(sub)     |                      |

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

A wide-gap semiconductor  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> has attracted increasing attention for power electronics applications. Development of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based solid solutions is a key to realizing practical devices having high carrier mobility. In this dissertation, epitaxial growth and characterizations of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based solid-solution films are described with particular focus on pulsed-laser deposition (PLD) method and the heterojunction properties.

Following the general introduction in Chapter 1, preparation of  $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films using a pulsed-laser deposition (PLD) system with oxygen radical is described in Chapter 2. This oxygen-radical assisted PLD is revealed to be useful for realizing stable growth rate at high temperatures and regulating cation composition.

Chapter 3 describes heteroepitaxy method and the band alignment of  $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Repeating alternating ablation of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> single crystals and the use of (100) plane are found to be effective for eliminating the formation of protrusions on  $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> surface, which are often observed when continuously ablating single polycrystals. The band alignment is determined to be type-I with using electron spectroscopies, where the conduction-band offset is 4 times greater than that of the valence-band offset.

In Chapter 4, epitaxial growth and the bandgap of complete solid-solution  $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films are investigated. Oxygen-plasma treatment to  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substrate surface is found to be effective for realizing a layer-by-layer growth of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and complete solid-solution  $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films. Moreover, the bandgap of  $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is determined to be  $E_g = 4.51-6.91$  (x = 0-1).

Chapter 5 describes epitaxial structure and electronic properties of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films grown on MgO (100). MgO (100) substrate enables to grow  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films having both of crystallinity and conductivity higher than those grown on  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0001).

In Chapter 6, epitaxial growth of  $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films is investigated. Alloying Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> to  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is found to increase the bandgap with expanding its lattice. Ternary  $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system is found to be an ideal barrier with perfect lattice mismatch and large bandgap offset to  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

It is concluded that high-quality  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> solid-solution films can be obtained by using a PLD system and a number of methods revealed in this dissertation. The present study provides fundamental knowledges of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based solid-solution being useful for further development of semiconductor power devices.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).