

スピネル型酸化ガリウム系ヘテロ接合トランジスタの開発 Development of Spinel-structured Ga₂O₃-related Heterojunctions for Transistor Applications

H30助自13

代表研究者 大 島 孝 仁 佐賀大学 理工学部 准教授

Takayoshi Oshima

Associate Professor, Faculty of Science and Engineering, Saga University

For years, γ -Ga₂O₃-related semiconductor has not been spotlighted in spite of rapid development of α -, β -Ga₂O₃ semiconductors because of the little knowledge about the novel metastable γ -phase. In such a situation, we have recently investigated and verified that γ -Ga₂O₃ can be treated like α -, β -Ga₂O₃ in terms of doping and alloying. In particular, γ -(Al_xGa_{1-x})₂O₃-alloy attracts attention because its E_g can be engineered from 5.0 to 7.0 eV, which allow us to design γ -(Al_xGa_{1-x})₂O₃ heterojunction-based devices, particularly, modulation-doped field-effect transistors. In this study, for such future applications, we performed fundamental studies on heterostructures consisted of γ -Ga₂O₃ and γ -Al₂O₃, or end members of γ -(Al_xGa_{1-x})₂O₃ alloy. We first characterized 3.0-nm γ -Ga₂O₃, 3.0-nm γ -Al₂O₃, and 1.0/3.0-nm γ -Ga₂O₃/Al₂O₃ films grown on (100) MgAl₂O₄ substrates. X-ray diffraction measurements revealed that γ -Ga₂O₃ and γ -Al₂O₃ films were coherent to the substrate with Poisson's ratios of 0.31 and 0.28, implying critical thicknesses of 5.3 and 4.0 nm, respectively. While, X-ray photoelectron spectroscopy found that band gaps of the γ -Ga₂O₃ and γ -Al₂O₃ films were 5.6 and 7.4 eV, respectively, and that the γ -Ga₂O₃/Al₂O₃ heterojunction had type-I band-alignment with conduction- and valence-band-offsets of 1.6 and 0.2 eV, respectively. These findings regarding the end members of γ -(Al_xGa_{1-x})₂O₃ will be beneficial for further study on γ -(Al_xGa_{1-x})₂O₃-based heterostructures. Therefore, we then attempted to fabricate 10-period coherent γ -Al₂O₃/Ga₂O₃ superlattices (SLs) on MgAl₂O₄ substrates by molecular beam epitaxy. By varying the each layer thickness, we tuned the average Al composition (x_{ave}) of the coherent SLs from 0.26 to 0.86, and obtained nearly-lattice-matched SLs to the substrate at $x_{ave} \sim 0.5$. The lattice-matched SLs maintained coherent interfaces up to a period length of X nm in spite of a large lattice mismatch between the end members. Our results suggest lots of flexibility in designing γ -(Al_xGa_{1-x})₂O₃-based heterostructures for future functional heterojunction devices.

研究目的

近年、結晶多形を含めたGa₂O₃の研究が盛んに行われている。我々は、その中でも準安定立方晶欠陥スピネル構造の γ -Ga₂O₃に注目し、特に γ -(Al_xGa_{1-x})₂O₃混晶が全組成範囲で実現できることが明らかになり、将来的なヘテロ接

合エレクトロニクス、特にヘテロ接合を利用した高電子移動度トランジスタへの展開が期待される。本研究は、そのトランジスタの開発を目指したものであるが、分子線エピタキシーでのドーピングが困難であったため、目的をトランジスタ開発に必要なヘテロ接合系の基礎物性評価とした。とくに、 γ -(Al_xGa_{1-x})₂O₃混晶の母

物質である γ -Ga₂O₃と γ -Al₂O₃の基礎物性評価とした。なお、ヘテロ接合系では、薄膜の面内格子定数が基板と一致するコヒーレントな状態が望ましいが、そのような薄膜を作製して、基礎的な物性評価を行った報告は本研究以前に存在していなかった。そこで本研究では、まず γ -Ga₂O₃と γ -Al₂O₃のコヒーレント薄膜を作製可能性を検討し、作製できるならその歪んだ薄膜の構造解析を行い、最終的に臨界膜厚の導出を行うことを第一の目的とした。また、さらに γ -Ga₂O₃/Al₂O₃ヘテロ接合における電子と正孔のバンド不連続量を評価することを第二の目的とした。さらに、種々の層厚を持つ γ -Ga₂O₃/Al₂O₃超格子を作製し、ヘテロ接合構造の制御性の検討を第三の目的とした。

概 要

1. はじめに

準安定立方晶欠陥スピネル構造の γ -Ga₂O₃の半導体研究について、MgAl₂O₄基板上的エピタキシャル安定化や、不純物ドーピングによる導電性発現、全率固溶可能な γ -(Al_xGa_{1-x})₂O₃混晶系などが近年報告されており、 γ -Ga₂O₃が α -Ga₂O₃や β -Ga₂O₃と同じ伝導性や E_g の制御が可能なワイドバンドギャップ半導体であることを示している。

そこで、我々はさらなる γ -Ga₂O₃系半導体の開発のために、 γ -(Al_xGa_{1-x})₂O₃混晶系を用いたヘテロ接合に注目した。この混晶ヘテロ接合系は、将来的には変調ドーブを利用した高電子移動度トランジスタへの応用が期待される。本研究では、その混晶の母材料となる γ -Ga₂O₃と γ -Al₂O₃のコヒーレント薄膜に対する構造解析や γ -Ga₂O₃/Al₂O₃ヘテロ接合におけるバンドアライメント評価、さらに γ -Ga₂O₃/Al₂O₃超格子を作製して、 γ -(Al_xGa_{1-x})₂O₃混晶系ヘテロ接合の可能性を模索した。

実験としては、薄膜作製と物性評価に分かれる。薄膜作製については、酸素ラジカル支援分子線エピタキシー法を用いて、(100) MgAl₂O₄基板上に、極薄の γ -Ga₂O₃、 γ -Al₂O₃薄膜、ならびに γ -Ga₂O₃/Al₂O₃ヘテロ構造を作製した。また、さらに10周期の γ -Al₂O₃/Ga₂O₃多層構造を作製した。このときの、 γ -Ga₂O₃と γ -Al₂O₃の1層厚みを d_{Ga} と d_{Al} と定義した。また、平均Al組成を x_{ave} と1周期の格子長を L と定義した。

得られた γ -Ga₂O₃、 γ -Al₂O₃薄膜に対して、放射光X線回折(XRD)により結晶構造を評価した。このとき、これらの薄膜がコヒーレントであることを確認したが、それぞれの面直の格子定数も求めた。また、 γ -Ga₂O₃、 γ -Al₂O₃薄膜、ならびに γ -Ga₂O₃/Al₂O₃ヘテロ構造に対して光電子分光(XPS)により、電子準位を比較して、ヘテロ接合のバンドオフセットを見積もった。

γ -Ga₂O₃、 γ -Al₂O₃単膜に対してXRD測定を行った。この測定と解析から、薄膜は基板に対してコヒーレント成長しており、垂直方向の格子定数 a_{Ga} と a_{Al} がそれぞれ、8.376と7.778 Åと求められた。また、バルクの格子定数を考慮して、ポアソン比がは0.31(γ -Ga₂O₃)と0.28(γ -Al₂O₃)であることが分かった。さらに、臨界膜厚(h_c)を推定すると、5.3 nm(γ -Ga₂O₃)と5.0 nm(γ -Al₂O₃)であった。それら、単膜に加えて、 γ -Ga₂O₃/Al₂O₃ヘテロ接合に対して、XPSからヘテロ接合のバンド不連続を評価した。XPSスペクトルの解析から、価電子帯オフセット(ΔE_v)が0.2 eV、伝導帯オフセット(ΔE_c)が1.6 eVであり、バンドアライメントはType-I型であることがわかった。

10周期の γ -Al₂O₃/Ga₂O₃積層構造について、はじめに、我々は L を保ち、 d_{Al} の割合を制御して、 x_{ave} を変えた試料を作製した。いずれの試料においても超格子を反映したピークが確認でき、 x_{ave} が0.20から0.85の広い範囲で超格子

構造作製が可能であった。なお、 $x_{\text{ave}} = 0.48$ では格子整合することが分かった。次に、我々は格子整合条件を維持し、 L を制御して試料を作製した。 L が3.4-7.2 nmと小さな試料では、コヒーレントな超格子構造であったが、 $L \geq 10.7$ nmの試料では、長周期性が失われ単なる緩和した積層構造になっていた。

このように、我々は、コヒーレントな $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 、 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ヘテロ接合、超格子を作製し、その解析から、ポアソン比、臨界膜厚、バンドアラインメントなどを明らかにした。これらの基礎的な物性は、任意の組成の $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3/(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ ヘテロ接合系デバイスの研究開発にとって有益な情報になると考えられる。

－以下割愛－