

京都大学	博士（工学）	氏名	大島孝仁
論文題目	酸化ガリウム系半導体の機能とデバイス応用に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、新しいワイドギャップ半導体の創成により新たな光・電子機能を開拓することを目的として、酸化ガリウム(Ga_2O_3)半導体の育成と物性の研究に取り組み、その特徴的な性質や機能の探索、およびそれらを活用したデバイス応用についてまとめており、全6章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、酸化物全般について説明し、その物性・応用の可能性の豊かさについて述べている。特に、酸化物半導体の研究が比較的新しい分野であること、その中でGa_2O_3半導体が今後の新しいデバイス創成の基盤材料として望ましい機能を持つことを挙げて、Ga_2O_3半導体の研究意義を説明している。</p> <p>第2章では、本研究で対象とするGa_2O_3半導体が新しい半導体として社会に貢献しうる特性を持つことを明確にする目的で、分子線エピタキシー法によりc面サファイア基板上にGa_2O_3半導体を成長させ、その基礎物性を調べている。成長条件を探索することにより成長方向に(-201)配向するβ型結晶構造を持つGa_2O_3薄膜($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$)が得られたが、その薄膜が回転ドメインを持ち、さらにβ型の結晶の中に少量のα型の結晶が混入していることを明らかにしている。これは、基板に用いたc面サファイアの結晶構造に起因していることを説明している。さらに、Ga_2O_3薄膜のバンドギャップが約5 eVであることを確認し、その薄膜に楕形電極を形成することで深紫外光検出器として動作することを確かめている。以上を通じて、Ga_2O_3半導体が紫外領域光機能を持つ新しいワイドバンドギャップ半導体として期待できる物性を持つことを明確にしている。</p> <p>第3章では、単結晶$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$基板の特性について調べ、デバイス応用に向けた有用なプロセスを開発している。基板は、酸素欠損がドナーとなり、キャリア密度は$10^{17}\text{--}10^{18}\text{ cm}^{-3}$台、移動度は、$40\text{--}100\text{ cm}^2/\text{Vs}$程度であり電氣的伝導性に優れており縦型デバイスも想定できることを予想している。また、$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$の結晶構造を反映した強い異方性があることについても言及している。$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$のバンドギャップは4.8 eVであり、吸収係数も$10^5\text{ cm}^{-1}$台と大きいことから、$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$がソーラーブラインド光検出機能を持ち、ソーラーブラインド光検出器に応用可能であることを示唆している。また、ショットキー構造の逆方向電流解析より、$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$の破壊電界が2.2 MV/cmを大きく超えることを予想し、パワーショットキーダイオードやパワーHEMTへの応用が期待できることを示唆している。この半導体材料の大きな特徴として、酸素中で1000°C以上の熱処理により表面のステップエッジが綺麗に整い、表面近傍への酸素の拡散によって半絶縁層が形成すること、あわせて、インジウムによる良好な抵抗性接触が得られることを見出してい</p>			

る。さらに、熱燐酸が有効なウェットエッチング剤であることを示している。以上の結果は、表面へのショットキー接合の形成、ホモエピタキシャル成長、および縦型デバイスの作製にとって優位な特徴である。

第4章では、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基板に対して前章で明確になった良好なショットキー接合と抵抗性接触を得るプロセスを応用することにより、ソーラーブラインド光検出器作製と評価について述べている。この半導体光検出器は、炎検出や殺菌ランプ強度の常時監視などに応用可能である。ここで、透明ショットキー電極は、ソーラーブラインド領域である 250 nm まで光透過率の良い有機透明導電膜 PEDOT-PSS を用いている。この検出器の波長感度特性は、ソーラーブラインド光特性を示し、波長 250 nm で外部量子効率が 18%であることを確認している。応答速度は 9 ms であり、想定される用途では十分な性能であることを示している。そして、実際に検出器を炎検出システムに組み込み、炎検出を実演している。一方で、殺菌ランプ監視用途において $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 検出器が高い耐久性を持つことを示している。これらの結果は、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の受光デバイスへの応用を開拓する重要な成果である。

第5章では、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(100)$ 基板上の薄膜成長について述べている。まず、ホモエピタキシーである $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜成長に取り組み、次にヘテロエピタキシーである $\beta\text{-Al}_{2x}\text{Ga}_{2-2x}\text{O}_3$ 混晶薄膜成長について示している。いずれの場合にも、単結晶薄膜のステップフロー成長を幅広い成長条件で達成したが、ステップフロー膜には、劈開面による影響から異方性が表れ、ステップバンチングが起きやすいことを説明している。 $\beta\text{-Al}_{2x}\text{Ga}_{2-2x}\text{O}_3$ 混晶薄膜においては、Al組成 $x=0.61$ まで単結晶を維持し、しかも基板に対してコヒーレントに成長することを示している。ステップフロー成長の限界は、Al組成 $x=0.39$ である。さらに、この $\beta\text{-Al}_{2x}\text{Ga}_{2-2x}\text{O}_3/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 界面にバンドオフセットが存在し、キャリアの蓄積が生じていることを示している。これらの成果は、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の高い絶縁破壊機能を利用したデバイスであるパワー HEMT などの電子デバイス応用に繋がる重要な成果である。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約するとともに研究成果の波及効果および今後の展開について提言を行っている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、新しいワイドギャップ半導体の創成により新たな光・電子機能を開拓することを目的として、酸化ガリウム(Ga_2O_3)半導体の育成と物性の研究に取り組み、その特徴的な性質や機能の探索、およびそれらを活用したデバイス応用についてまとめたものである。特に単結晶 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基板の特性を応用したデバイス応用、エピタキシャル成長の研究は、世界的に見ても新規性が高く重要かつ有益な成果につながっている。以下に主な成果を挙げる。

1. c 面サファイア基板に $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜を作製し得た。回転ドメインや $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の混入があるが、深紫外光検出器を作製してその光機能を示した。
2. 酸素雰囲気下 1000°C 以上の熱処理により、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基板表面にステップエッジが形成されるとともに半絶縁層が得られ、あわせてインジウムによる良好な抵抗性接触が得られることを示した。
3. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基板を用いてショットキーダイオードを作製し、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の絶縁破壊電界が 2.2 MV/cm 以上と、非常に高い値を持つことを示した。
4. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基板に対して熱燐酸が有効なウェットエッチング剤であることを示した。
5. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基板と熱処理を組み合わせ、薄膜成長や真空プロセスを必要としないソーラーブラインド光検出器を作製した。また、 nW レベルの高感度炎検知を実証した。
6. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基板上に、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜をステップフロー成長し得た。とくに表面構造が結晶の異方性の影響を受けることを示した。
7. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基板上に、 $\beta\text{-Al}_{2x}\text{Ga}_{2-2x}\text{O}_3$ 混晶薄膜をステップフロー成長させ、Al 組成 0.61 まで歪んだ単結晶薄膜を得た。また、界面でのバンドオフセットの存在によるキャリア蓄積を確認した。

以上、本研究は、新しい酸化物半導体として Ga_2O_3 系半導体の育成と物性の解明を行い、炎検出器やヘテロ接合うトランジスタなどのデバイス応用に繋がる重要かつ有益な結果を示したものである。これは、新しいワイドバンドギャップ半導体として、 Ga_2O_3 系半導体の物性を活かしたデバイス応用が今後大いに進展することを示唆し、学術上および応用上寄与するところが少なくない。よって、博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 22 年 2 月 5 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。