

Title	Naフラックス法における基板溶解技術を用いた低歪みGa _N 結晶の作製
Author(s)	山田, 拓海
Citation	大阪大学, 2020, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/76561
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

氏 名 (山 田 拓 海)

論文題名

Naフラックス法における基板溶解技術を用いた低歪みGa₂O₃結晶の作製

論文内容の要旨

現本論では、LEDとして実用化され、パワーデバイスへの応用が期待されているGa₂O₃結晶の低歪み化を目指し、新規基板溶解技術の確立及び、その応用に取り組んだ。第1章は序論であり、省エネルギー社会が求められている世の中の情勢から化合物半導体、中でもGa₂O₃の必要性を述べると共に、Ga₂O₃デバイスが実用化に至らない主要な問題点として、高品質なGa₂O₃結晶が容易に得られないことを述べた。Ga₂O₃結晶作製に関しては、これまでも様々な取り組みが行われているが、未だ多くの解決すべき問題が残されている。そこで、本章では、Ga₂O₃デバイス実用化へ向けたGa₂O₃結晶成長における課題を明確化し、本論文で取り組む内容及びその目的を述べた。第2章では、本論で用いるGa₂O₃結晶成長手法であるNaフラックス法と他のGa₂O₃結晶成長手法（HVPE法、アモノサーマル法など）を比較することで、Ga₂O₃結晶成長手法におけるNaフラックス法の位置づけを説明し、Naフラックス法の成長原理から昨今までの取り組みに関してまとめた。本章では、Naフラックス法を含めたGa₂O₃結晶成長手法における先行研究の成果を踏まえ、本論で用いるNaフラックス基板溶解技術の必要性を述べた。第3章では、基板溶解技術の確立を目指し、Naフラックス環境下で基板（サファイア）が溶解する条件及び当該環境がGa₂O₃結晶に及ぼす影響について調査を行った。サファイア基板は、リチウムを用いることで、溶解可能であり、その溶解量は溶解温度、溶解時間及びリチウム量に依存することが明らかになった。一方、Ga₂O₃結晶に対する影響はサファイアの溶解に影響しない因子である溶液中の窒素溶解量によって制御することが可能であることが明らかになった。以上のことから、本章では、成長させたGa₂O₃結晶に影響を与えることなく選択的にサファイアを溶解できることを示した。第4章では、第3章で明らかにしたサファイア溶解条件を用いて、Ga₂O₃結晶成長を行った後にサファイア基板を溶解し、Ga₂O₃結晶を自立化させる試みを行った。作製した結晶における結晶性、転位密度、結晶反りなどの評価を通して、サファイア溶解技術の有用性を示すと同時に、新たな課題を見出した。本章では、c面Ga₂O₃テンプレート（Ga₂O₃ on sapphire）上に成長させたGa₂O₃結晶に対して、サファイア溶解技術を用いることで、1.5インチ口径の自立Ga₂O₃基板の作製に成功した。第5章では、第4章で見出した新たな課題である結晶中のリチウム不純物の低減及び結晶のconcave状反りの低減について取り組んだ。結晶中のリチウム不純物は、サファイアを溶解する際に $\sim 10^{15}$ atoms/cm³程度取り込まれるが、当該結晶上にNaフラックス法又はHVPE法にてGa₂O₃結晶を再成長させることで、リチウム不純物フリーのGa₂O₃結晶作製が可能であることを明らかにした。これは、Naフラックス法においてリチウム不純物フリーのGa₂O₃結晶作製が可能であることを示すにとどまらず、最終的にHVPE法にて長尺化を目指す種結晶のスペックとして、Li不純物は問題とならないことを示唆している。結晶のconcave状反りに関しては、成長前及び成長中の応力を低減できるポイントシード成長にサファイア溶解技術を応用することで、低反り化を試み、ポイントシード面積（Ga₂O₃/サファイア接触面積）が小さくなるほど結晶反りが低減されることを示した。本章では、結果として、2インチ口径の低反りなGa₂O₃基板の作製に成功した。第6章は、第3章から第5章で得られた成果を総括し、今後の課題及び将来の展望について述べ、本論文の結論とした。本論文で行ったサファイア基板溶解技術は、これまで行われてきた様々な基板剥離技術と大きく異なり、冷却時に発生する熱応力をゼロにできる手法である。そのため、異種基板を種結晶としているGa₂O₃結晶成長分野における、基板剥離技術として理想的である。また、当該手法は、結晶成長後にリチウムを添加するだけという非常に簡便な手法でもあるので、今後Ga₂O₃デバイス実用化へ向けたGa₂O₃結晶作製技術として期待される。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (山 田 拓 海)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	森勇介
	副 査	教授	片山竜二
	副 査	准教授	山崎順

論文審査の結果の要旨

本論文は、Naフラックス法におけるサファイア溶解技術を用いた低歪みGaN結晶の作製を行ったものであり、全6章で構成されている。第1章は序論であり、温室効果ガス低減が求められる昨今において、省エネルギー化社会実現に必要とされているワイドギャップ化合物半導体、中でも本論文で注目している材料であるGaN結晶の現状と課題について述べている。加えて、ヘテロエピタキシャル成長を余儀なくされるGaN結晶成長において避けられない、下地基板との格子不整合や熱膨張係数差に由来する応力を低減してきた先行研究についてまとめ、本論における基板溶解技術の意義及び目的を説明している。第2章では、本論文で用いているGaN結晶作製手法であるNaフラックス法及びその他の手法に関する特徴をまとめ、比較することで、GaN基板上のGaNデバイスの実用化が可能なGaN基板作製手法に関して議論している。現在、Naフラックス法は、低転位かつ低反りな大口径GaN基板の作製が可能な手法であることから、GaN on GaNデバイス実現への一端を担っている技術であり、本章では、その現状に至るまでの過程及びそのきっかけとなったポイントシード技術について論じている。第3章では、本論文で用いるサファイア基板溶解技術の基礎検討として、選択的にサファイアを溶解可能な条件の探索を行っている。結果として、Liとサファイアの反応機構を明らかにするとともに、サファイア溶解量はLi添加量で制御可能であり、サファイア溶解環境において融液中窒素溶解量を増加させることで、GaNの溶解を抑制し選択的にサファイアの溶解が可能であることを明らかにしている。第4章では、第3章で得られた選択的サファイア溶解条件を用い、c面GaNテンプレート（サファイア基板上のGaN薄膜）上に結晶成長させた後に、サファイアを溶解しGaN結晶を自立化させる試みを行っている。本手法により得られたGaN結晶を評価したところ、結晶内にクラックはなく、半値幅50 arcsec程度の良好なGaN結晶が得られている。本結果より、Naフラックスサファイア溶解技術は、GaN結晶に熱応力をかけることなく自立化可能な手法であることが示されている。第5章では、サファイア溶解技術を用いて作製したGaN結晶中にLi不純物を取り込まれているという問題及び自立化させた結晶がconcave状の反りを有しているという問題について取り組んでいる。Li不純物を取り込まれているGaN結晶上にNaフラックス法、及びHVPE法を用いて再成長させることで、成長層ではLi不純物が検出されず、Li濃度の低減が可能であることが示されている。一方で、用いる種結晶のサファイア厚を厚くする、またはポイントシード技術を用いてGaN/sapphire 接触面積を低減することで結晶反りを低減できることも明らかにしている。本章では、結晶中Li濃度の低減及び結晶反りを低減すると共に、サファイア溶解技術をポイントシード技術に応用することで、汎用性の高い技術であることを示している。第6章では、本論文を通して得られた成果を総括し、結論及び今後の展望を述べている。

以上のように、本論文は、GaN基板上のGaNデバイスを実用化する上で必須であるGaN基板作製技術の研究開発を行い、結晶成長後にサファイア基板を溶解させることで、熱応力を与えることなく自立化できることを実証している。融液を変更することで、育成環境において基板を溶解させる技術は液相法ならではの技術であるため、熱応力を完全に抑制できる唯一の手法であると考えられる。また、本技術はNaフラックス法における他の技術とも併用可能な汎用性の高い技術であることも示されている。本技術により高品質なGaN基板を作製することで、GaN基板上のGaNデバイスの実用化が加速させることが期待される。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。