

## 中性子検出半導体 BGaN の高 B 組成結晶成長技術の開発

### [1] 組織

代表者：中野 貴之

(静岡大学大学院工学研究科)

対応者：伊藤 哲

(静岡大学電子工学研究所)

分担者：

本田善央 (名古屋大学工学研究科)

片山竜二 (東北大学金属材料研究所)

谷川智之 (東北大学金属材料研究所)

村上尚 (東京農工大学大学院)

岡田成仁 (山口大学工学部)

今出完 (大阪大学工学研究科)

光成正 (名古屋大学工学研究科)

久志本真希 (名古屋大学工学研究科)

### [2] 研究経過 (以下10.5ポイント)

放射線の物質に対する透過性は様々な分野で利用されており、非破壊装置における内部イメージング技術として様々な開発が行われている。特に、中性子線は新しい放射線源として期待されており、重金属機器の内部イメージングやホウ素中性子捕獲治療法などといった医療分野への応用も期待されている。しかしながら、中性子イメージング技術においては高精度な検出器が必要であり、更に現在利用されている $^3\text{He}$ ガス計数管はHeガスの枯渇により利用が制限されているといった状況である。そこで本プロジェクトでは、新しい中性子イメージングセンサーとして半導体検出器の実現を目指し、半導体材料であるGaと中性子のコンバーター材料となるB原子を混晶させたBGaNに注目し、その作製と中性子検出半導体としての可能性を検討した。

本プロジェクトは今年度が3年目である。これまでの我々の研究ではGaNが $\gamma$ 線に対する検出感度が低いことから、GaNをベースに中性子検出器を作製した場合には中性子を検出する際に問題となる中性子源からの $\gamma$ 線との分離が可能であることを明らかにしてきた。また、BはIII族原子であるためGaNにおけるGaサイトにB原子が置換して半導体材料として用いることが可能である。このようなことから有機金属気相エピタキシー(MOVPE)法によって

GaN上にBGaNを結晶成長条件の検討を行っており、高品質なBGaNの作製を実現している。作製したBGaN薄膜を利用したショットキーダイオードにより中性子検出を実現し、各種放射線における基礎検出特性を評価してきており、BGaNによる中性子半導体検出器の可能性を示してきた。

今回は中性子半導体検出器の有感層となるBGaN薄膜の高性能化を実現するために重要な結晶成長技術の開発を行った。結晶成長表面における状態の違いによってB原子がどのように取り込まれるかを検証し、明らかにした。

以下に研究活動状況の概要を記す。

研究打ち合わせ：3回(学会期間中に打ち合わせを実施)

研究討論会：1回(9/29-30)

### [3] 成果

#### (3-1) 研究成果

本年度は、以下に示す研究成果を得た。

まず第1に、BGaN/GaNの積層構造の原子組成の解析を行い、BGaN結晶成長中におけるBGaN薄膜のB組成について検討を行った。SIMS測定における分析結果を図1に示す。

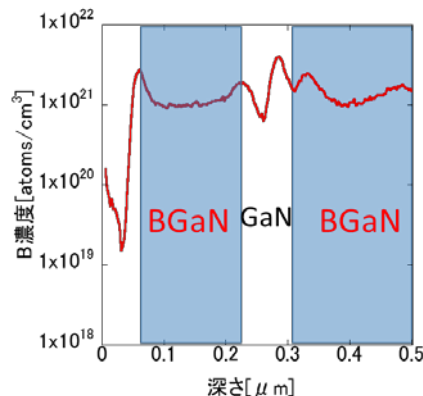


図1、BGaN薄膜のSIMS測定結果

図1より、BGaN薄膜中におけるB濃度は約 $1 \times 10^{21}$  atoms/cm<sup>3</sup>であり、 $\text{B}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ での組成値xは約0.012であることがわかった。一方で、XRD測定より組成の導出を行った場合には $x=0.006$ であり、結晶格子を構成しているB原子と薄膜中に存在するB原子の割合が異なることが確認された。これは、B原子が他の構成元素であるGaやN原子と比べ原子

半径が非常に小さいことなども影響していると考えられる。また、図1のBGaN層において界面近傍にてB組成が増加していることが確認できた。従来の結晶成長において界面近傍の組成増加が起こる場合には、偏析現象などが一因として存在するが、この場合には上下界面のいずれかのみが組成増加を起こす。BGaN薄膜においては上下両界面にて組成増加が起こっていることから、結晶を構成していないB原子が拡散により界面近傍に局在しているなどの現象が考えられる。今後、更なる解析を行い結晶成長モデルの解明をする必要がある。

次に、基板に off 角度をつけた結晶成長を行うことによって、B原子の取り込みについて検討を行った。Off 角度をつけることによってテラス幅を変化させステップ端でのB原子の取り込み状態を調べた。0° offから1° offまで変化させることでB組成値xは0.006から0.012まで向上したが、2° off基板の場合には、B原子の取り込みが確認されなかった。この原因には、off角度が大きくなり過ぎたためにステップ端においてステップバンチングなどが発生し、B原子が結合しにくくなったなどの原因が考えられる。また、N極性成長においては更にB組成率が減少していることから、B原子が吸着しやすいサイトが非常に限られていることがわかった。更なる解析によりBGaN成長におけるB原子の振る舞いを明らかにする必要がある、今後の本研究の課題である。

以上のような成果より、BGaN成長におけるB原子の振る舞いについて検証を行い、従来の結晶成長とは異なる現象を明らかにした。この結果を元に成長モデルを検討し、高品質BGaN成長技術へと展開を行っていく。

### (3-2) 波及効果と発展性など

本プロジェクトは、青色LEDなどで注目されているGaNを代表としたIII族窒化物であるBGaNの結晶成長技術の開発を行ったプロジェクトである。特に、中性子検出半導体の作製を目指し開発を行っており、従来は発光デバイスなどに利用されるIII族窒化物半導体を放射線検出に利用して、新しい可能性を検討している。これまでにBGaNといった新規材料によって中性子検出の可能性のあることを検証し、BGaNといった半導体材料の作製において新規半導体材料となる可能性を示した。

中性子イメージングといった分野は、これからの検出器分野における新しいイノベーションを創出する分野であり、更には中性子イメージング技術によって、新しい解析技術の確立が可能であることから他分野における様々な応用展開が期待できる。将来

的には本研究プロジェクトを進展させ、中性子半導体検出器を実現させることで様々な材料解析など多くの分野での新しい検出器が期待され科学技術の進歩への一助となることが期待される。

また、本プロジェクトにおいてIII族窒化物に関係する多くの研究者との交流が実現し、新しい応用を見据えた研究開発に展開しており新しいプロジェクトに向けた取り組みを始めている。

### [4] 成果資料 学会発表

- [1] M. Sugiura, *et. al.*, IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference; 21<sup>st</sup> Symposium on Room-Temperature Semiconductor X-ray and Gamma-ray Detectors, R05-3,
- [2] Takayuki Nakano, *et. al.*, IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference; 21<sup>st</sup> Symposium on Room-Temperature Semiconductor X-ray and Gamma-ray Detectors, J01-5 (*Invited talk*)
- [3] Takayuki Nakano, *et. al.*, The 21st International of The Society of Pure and Applied Coordination Chemistry (SPACC) Symposium (*Invited talk*)
- [4] K. Ueyama, *et. al.*, The 8<sup>th</sup> International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2014), WeGP11
- [5] Takayuki Nakano, *et. al.* The Third International Conference on Materials, Science and Environments (ICMEE'14), IN-4 (*Invited talk*)
- [6] K. Ueyama, *et. al.*; the Second Conference on LED and Its Industrial Application (LEDIA '14), LEDp6-1
- [7] 杉浦睦仁、他、第62回応用物理学会春季学術講演会、12a-B1-3
- [8] 上山他、第3回結晶工学未来塾、No.07
- [9] 上山他、第75回応用物理学会秋季学術講演会、17a-C5-2
- [10] 杉浦他、第75回応用物理学会秋季学術講演会、17p-B2-13
- [11] 上山他、第6回窒化物半導体結晶成長講演会、St-7
- [12] K. Ueyama, *et. al.*, 33<sup>th</sup> Electronic Materials Symposium (EMS33), Th3-9
- [13] 中野貴之、"III族窒化物半導体を用いた中性子半導体検出器の作製と結晶成長技術の開発"、第7回超領域研究会

## 出張報告

氏名：本田 善央  
所属：名古屋大学工学研究科  
期間：2014/9/29-30  
用務先：静岡大学浜松キャンパス  
用務内容：共同研究プロジェクト研究会およびⅢ族窒化物半導体結晶成長技術に関する打ち合わせ  
主たる対応者：中野貴之

氏名：村上 尚  
所属：東京農工大学大学院  
期間：2014/9/29-30  
用務先：静岡大学浜松キャンパス  
用務内容：共同研究プロジェクト研究会およびⅢ族窒化物半導体結晶成長技術に関する打ち合わせ  
主たる対応者：中野貴之

氏名：岡田 成仁  
所属：山口大学工学部  
期間：2014/9/29-30  
用務先：静岡大学浜松キャンパス  
用務内容：共同研究プロジェクト研究会およびⅢ族窒化物半導体結晶成長技術に関する打ち合わせ  
主たる対応者：中野貴之

氏名：今出 完  
所属：大阪大学工学研究科  
期間：2014/9/29-30  
用務先：静岡大学浜松キャンパス  
用務内容：共同研究プロジェクト研究会およびⅢ族窒化物半導体結晶成長技術に関する打ち合わせ  
主たる対応者：中野貴之

氏名：光成 正  
所属：名古屋大学工学研究科  
期間：2014/9/29-30  
用務先：静岡大学浜松キャンパス  
用務内容：共同研究プロジェクト研究会およびⅢ族窒化物半導体結晶成長技術に関する打ち合わせ  
主たる対応者：中野貴之

氏名：久志本 真希  
所属：名古屋大学工学研究科  
期間：2014/9/29-30  
用務先：静岡大学浜松キャンパス  
用務内容：共同研究プロジェクト研究会およびⅢ族窒化物半導体結晶成長技術に関する打ち合わせ  
主たる対応者：中野貴之