

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13963

研究課題名(和文) ScAlMgO4基板を用いた窒化物半導体縦型トランジスタ作製プロセスの研究

研究課題名(英文) Study on GaN-based vertical transistors using ScAlMgO4 substrates

研究代表者

末光 哲也 (Suemitsu, Tetsuya)

東北大学・国際集積エレクトロニクス研究開発センター・教授

研究者番号：90447186

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：劈開にて形成した新鮮なScAlMgO4(以下SCAM)基板c面にGaN HEMT構造を有機金属気相成長法によって成長した。c軸に対してオフ角を付けて研磨したSCAM基板を用いて、サファイア基板に成長したものと同等の平坦性を有するHEMT層を得た。GaN HEMT作製プロセスでは、中性粒子ビームエッチングをGaN系半導体に初めて適用し、プラズマ損傷に起因する電流コラプスの低減への効果を確認した。縦型トランジスタ形成の要素技術の一つとして、SCAM基板の劈開によるGaN層の剥離技術を検討し、厚膜GaNが結晶成長後の冷却過程に基板から自然剥離する現象を確認した。

研究成果の概要(英文)：GaN HEMT heterostructures are grown on cleaved ScAlMgO4 (SCAM) substrates. By using small off-cut SCAM, HEMT structures with flat surface comparable to those grown on conventional sapphire substrates are confirmed. As a part of the GaN HEMT process, neutral beam etching is applied to the GaN material systems for the first time. By means of this advanced etching, significant reduction of current collapse in GaN HEMTs are observed. The cleaving of thin SCAM layers off from bulk SCAM substrates is also a key technology to achieve GaN vertical transistors. It has been confirmed that thick GaN layers are automatically cleaved off from SCAM substrates during cooling down after growth by means of the stain induced by thermal expansion.

研究分野：半導体デバイス工学

キーワード：窒化物半導体 パワーデバイス トランジスタ SCAM基板

1. 研究開始当初の背景

窒化ガリウム (GaN) 系半導体は、青色・白色発光ダイオード等の光デバイス用材料として発展してきたが、近年、その破壊耐圧の高さから、Si に代わる次世代パワーデバイス用材料としても注目されるようになってきた。一方で、これまで GaN 系材料は、サファイア、SiC、Si など GaN と格子定数が異なる異種材料の基板上に成長されることがほとんどであり、その結果、従来に実用化された他の半導体材料に比べて結晶欠陥密度が著しく高く、パワーエレクトロニクスへの応用ではその信頼性への影響が懸念されている。特に、パワーデバイスでは広く用いられる縦型デバイス構造 (電流が基板に対して垂直方向に流れるような構造) では基板・エピタキシャル層界面で欠陥密度を抑える必要があり、そのためには GaN との格子定数の違いが小さい基板を実現することが求められていた。

2. 研究の目的

GaN と格子定数が非常に近い ScAlMgO₄ を基板として用い、その上に GaN 系高電子移動度トランジスタ (High Electron Mobility Transistor: HEMT) 構造を形成する。また、ScAlMgO₄ 基板が c 面で容易に劈開できる性質を利用して、基板の片面に GaN 電子ドリフト層を成長し、基板を劈開後に反対面に HEMT 構造を成長して合わせて縦型トランジスタとして動作させる検討を行う。

3. 研究の方法

本課題の要素技術として、ScAlMgO₄ 基板上への GaN、および、AlGaN/GaN HEMT 構造の成長、GaN HEMT 作製のプロセス、ScAlMgO₄ 基板の劈開による GaN エピタキシャル層の剥離技術、の3点を並行して検討する。

ScAlMgO₄ 基板上への GaN、および、AlGaN/GaN HEMT 構造の成長検討では、まず単層の GaN を成長し、欠陥密度や残留不純物密度をデバイス作製可能なレベルに低減することを検討する。次いで、AlGaN/GaN HEMT 構造を成長し、デバイス特性を評価する。

GaN HEMT 作製のプロセス検討では、サファイア基板上に HEMT 構造が成長された基板を用いて、トランジスタ作製に必要なプロセス技術の確立を目指す。特に、デバイス特性やその安定性に大きな影響を及ぼすことが懸念される、プラズマエッチングによる半導体表面の損傷の評価を行う。

ScAlMgO₄ 基板の劈開による GaN エピタキシャル層の剥離技術の検討は、縦型トランジスタ作製に必要な要素技術として、結晶成長の熱履歴に伴う自然剥離や、機械的剥離等を検討する。

4. 研究成果

まず、劈開にて形成した新鮮な ScAlMgO₄ 基板 c 面に単層の GaN を有機金属気相成長法

によって成長した。結晶成長条件を検討することにより、従来より GaN 成長の基板として広く用いられているサファイア基板に成長した GaN と比較してほぼ同程度の欠陥密度の単層 GaN を ScAlMgO₄ 基板に成長することができた。また、成長した GaN 層には、基板の構成原子である Sc や Mg が不純物として含まれていることが分かった。特に Mg は GaN にとってアクセプターとして働く不純物なので、その混入への対策が必要である。これらの不純物は、基板から GaN 層へ直接拡散するほかに、結晶成長中に ScAlMgO₄ 基板の裏面から反応室内に拡散していると考えられる。これらの混入経路を防ぐ対策として、GaN 層中に AlN を拡散防止層として挿入することと、基板裏面を SiO₂ 等の保護膜でカバーすることを検討し、これらの不純物の混入を抑制できることが分かった。

次に、AlGaN/GaN HEMT 構造を ScAlMgO₄ 基板上に成長することを試みたが、期待された 2次元電子ガス (2-Dimensional Electron Gas: 2DEG) の形成を確認することは出来なかった。成長した結晶の表面を観察したところ、AlGaN の層厚を超えるようなマクロな凹凸が確認され、これが 2DEG の形成を阻害していると考えられる。凹凸発生の原因として、劈開した ScAlMgO₄ 基板の表面が平坦過ぎるために GaN の初期成長においてランダムな核が形成されるためと考え、その対策として c 軸に対して微細なオフ角を付けて研磨した ScAlMgO₄ 基板を用いて HEMT 構造を成長することを試みた。その結果、通常のサファイア基板に成長したものと同等の平坦性を有する HEMT 層を得るところまで、本研究期間内に確認することが出来た。

GaN HEMT 作製のプロセス検討では、まず市販の HEMT 構造付サファイア基板を用いて、各種プロセス技術の検討を実施し、良好なトランジスタ特性を得られることを確認した。しかし、GaN 系材料の加工に必須となるプラズマエッチングによるものと思われる素子間リーク電流やドレイン電流における電流コラプス現象が確認された。これらを抑制するために、東北大学流体科学研究所の寒川教授の協力を得て、プラズマ損傷の低減に効果が期待される中性粒子ビームエッチングを用いることを検討した。同エッチング技術を GaN 系半導体に初めて適用し、GaN HEMT において実際にプラズマ損傷に起因する素子間リーク電流と電流コラプスの低減に効果があることを確認した。

ScAlMgO₄ 基板の劈開による GaN エピタキシャル層の剥離技術の検討では、ハイドライド気相成長法によって厚膜 GaN を成長することによって、結晶成長後の冷却過程において GaN 層が基板から自然剥離する現象を確認した。剥離した GaN の界面には ScAlMgO₄ の薄層が残っており、縦型トランジスタ形成の際の電流ブロック層としての応用を目指して更に検討を継続する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

1. K. Ohnishi, M. Kanoh, T. Tanikawa, S. Kuboya, T. Mukai, T. Matsuoka, "Halide vapor phase epitaxy of thick GaN films on ScAlMgO₄ substrates and their self-separation for fabricating freestanding wafers," *Appl. Phys. Express*, vol. 10, 101001, 2017. (査読有り)
2. F. Hemmi, C. Thomas, Y.-C. Lai, A. Higo, Y. Watamura, S. Samukawa, T. Otsuji, T. Suemitsu, "Neutral beam process in AlGaIn/GaN HEMTs: Impact on current collapse," *Solid-State Electron.*, vol. 137, pp. 1-5, 2017. (査読有り)
3. F. Hemmi, C. Thomas, Y.-C. Lai, A. Higo, A. Guo, S. Warnock, J. A. del Alamo, S. Samukawa, T. Otsuji, T. Suemitsu, "Neutral beam etching for device isolation in AlGaIn/GaN HEMTs," *physica status solidi (a)*, vol. 214, 1600617, 2017. (査読有り)
4. T. Suemitsu, K. Kobayashi, S. Hatakeyama, N. Yasukawa, T. Yoshida, T. Otsuji, D. Piedra, T. Palacios, "A new process approach for slant field plates in GaN-based high-electron-mobility transistors," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 55, 01AD02, 2016. (査読有り)
5. T. Suemitsu, "InP and GaN high electron mobility transistors for millimeter-wave applications," *IEICE Electronics Express*, vol. 12, 20152005, 2015. (査読有り)

[学会発表](計 6 件)

1. 渡村遥, 邊見ふゆみ, C. Thomas, Y.-C. Lai, 肥後昭男, 寒川誠二, 尾辻泰一, 末光哲也, "AlGaIn/GaN HEMT のゲートリセス構造形成における中性粒子ビームエッチング適用効果," 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 横浜, 2017, 14p-315-10.
2. F. Hemmi, C. Thomas, Y.-C. Lai, A. Higo, S. Samukawa, T. Otsuji, T. Suemitsu, "Neutral beam process in AlGaIn/GaN HEMTs: Impact on current collapse," *Int. Semiconductor Device Research Symp. (ISDRS)*, Bethesda, MD, USA, 2016, FP1-03.
3. F. Hemmi, C. Thomas, Y.-C. Lai, A. Higo, A. Guo, S. Warnock, J. A. del Alamo, S. Samukawa, T. Otsuji, T. Suemitsu,

"Impact of neutral beam etching on isolation leakage current and breakdown voltage in AlGaIn/GaN HEMTs," 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 新潟, 2016, 16p-B1-8.

4. F. Hemmi, C. Thomas, Y.-C. Lai, A. Higo, A. Guo, S. Warnock, J. A. del Alamo, S. Samukawa, T. Otsuji, T. Suemitsu, "The effect of neutral beam etching on device isolation in AlGaIn/GaN HEMTs," *43rd Int. Symp. on Compound Semiconductors (ISCS)*, Toyama, Japan, 2016, WeB2-4.
5. F. Hemmi, C. Thomas, Y.-C. Lai, A. Higo, A. Guo, S. Warnock, J. A. del Alamo, S. Samukawa, T. Otsuji, T. Suemitsu, "Suppression of isolation leakage current in AlGaIn/GaN HEMTs by neutral-beam etching," 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京, 2016, 22a-W541-9.
6. N. Yasukawa, S. Hatakeyama, T. Yoshida, T. Kimura, T. Matsuoka, T. Otsuji, T. Suemitsu, "Drain depletion length in InAlN/GaN MIS-HEMTs with slant field plates," *42nd Int. Symp. on Compound Semiconductors (ISCS)*, Santa Barbara, CA, USA, 2015, pp. 68-69.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

末光 哲也 (Suemitsu, Tetsuya)

東北大学・国際集積エレクトロニクス研究

開発センター・教授
研究者番号：90447186

(2)研究分担者
松岡 隆志 (Matsuoka, Takashi)
東北大学・金属材料研究所・教授
研究者番号：40393730

(3)連携研究者
()

研究者番号：