

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：12102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06070

研究課題名(和文) InAlN層におけるデバイスプロセス中に発生した欠陥評価とその電気的特性への影響

研究課題名(英文) Defect Evaluation of InAlN after Device Process and their Electrical Properties

研究代表者

奥村 宏典 (OKUMURA, Hironori)

筑波大学・数理物質系・助教

研究者番号：80756750

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、次世代の高周波パワーデバイスとして着目されている、窒化物半導体を用いた電子デバイスの高性能化を行った。結晶成長技術の向上に伴って転位密度が低減してきたが、点欠陥については十分に研究されていない。特に点欠陥の影響が大きいp型GaN層とAlN層を用いて、点欠陥と電気的特性の関係を調べた。

(i) p型GaNを窒素過剰条件かつ低温で結晶成長することで、世界最高の正孔濃度が得られた。本成果は、p型GaN電極界面の電流輸送機構の解明に繋がった。

(ii) Siイオンを注入したAlNに1500度の熱処理を行うと、n型電導性を示した。本試料を用いて、AlN電界効果トランジスタを世界で初めて動作させた。

研究成果の概要(英文)：In this work, we aimed to improve the performance of III-nitrides electrical devices, which have attracted much attention for high-frequency and high-power applications. There are fewer reports on point defects in comparison with dislocations in III-nitride semiconductors. We investigated the relation between point defects and electrical properties in p-type GaN and n-type AlN films.

(i) The highest hole concentrations was achieved in the p-type GaN layer, which was grown at low growth temperature under nitrogen-rich conditions.

(ii) The n-type conductance of Si-ion implanted AlN was shown after very high temperature annealing of 1500 degreeC. Using the n-type AlN films, the first demonstration of AlN-channel transistors was achieved.

研究分野：窒化物半導体の結晶成長

キーワード：パワーデバイス 窒化物半導体 点欠陥 結晶成長 電気的特性評価 p型半導体 イオン注入 高温熱処理

## 1. 研究開始当初の背景

高度ネットワーク社会による無線通信の大容量化や高速化に伴い、現在使用されているガリウム砒素(GaAs)系高周波パワーデバイスを凌ぐ、高性能デバイスの実現が求められている。新規高周波パワーデバイスとして、窒化ガリウム(GaN)系電子デバイスが注目されており、一部で実用化が始まっている。GaNに代表されるIII族窒化物(III-N)半導体は、青色発光ダイオードに限らず、電子デバイスでも広く使われるようになってきた。

GaN系電子デバイスとして、AlGaN/GaN構造を有する高電子移動度トランジスタ(HEMT)がよく使われる。GaN-HEMTは、ピエゾ分極と自発分極によって、AlGaN/GaNヘテロ接合界面付近に2次元電子ガス(2DEG)層を形成する。2DEG中の高密度の自由電子層とバルク中より高い電子移動度により、GaN-HEMTは高速動作が可能となる。

近年、デバイスの更なる高性能化に向けて、InAlN/GaN構造を有するGaN-HEMTが注目されている。In組成17~18%のInAlNはGaNと格子整合するため、InAlN/GaN界面で発生する転位密度を低減できる。また、InAlNはAlGaNよりも自発分極が大きいため、2DEG中の自由電子密度を増大させることができる。しかし、結晶成長が困難であったため、InAlN研究の歴史は浅く、様々な環境下におけるInAlN層の特性変化に関して未解明な点が多い。特に、デバイスプロセスや結晶成長中に発生する点欠陥がInAlN層に与える影響は、GaN-HEMTの更なる性能向上の手掛かりを掴むための重要課題であるが、まだ報告は寡少である。

## 2. 研究の目的

本研究では、点欠陥がIII-N半導体の電気的特性に与える影響を系統的に調べる。得られた知見から、デバイス構造の改良提案を行い、究極のIII-N電子デバイス実現を目指す。InAlN層の知見が少なく、結晶成長も容易ではないため、初めは不純物を混入させたGaNの点欠陥と電気的特性を調べる。具体的には、以下の(1)~(3)を行う。

- (1) 様々な不純物濃度を有するP型GaN成長層の点欠陥濃度と種類を特定する。P型GaN成長には、分子線エピタキシ(MBE)法と有機金属気相成長(MOVPE)法の両方を用いて、結晶成長装置の違いも明らかにする。
- (2) デバイスプロセス前後に発生したInAlN半導体中の欠陥と電気的特性の関係を明らかにする。また、プロセス後に発生した点欠陥によるInAlN/GaN界面に発生する2DEGへの影響も調べる。
- (3) GaNおよびInAlN中の点欠陥に着目したデバイスプロセスを改良することで、高性能GaN系デバイスを実現する。

## 3. 研究の方法

(1) アンモニアMBE法およびMOCVD法を用いて高濃度Mg添加したp型GaN成長を行い、その点欠陥を陽電子用滅(PAS)法により調べる。結晶成長後のp型GaNにNi電極を蒸着し、酸素雰囲気中で熱処理することにより、p型オーミック電極を形成する。温度依存ホール効果測定、electrolyte C-V測定、伝送線路モデル(TLM)を用いてp型GaNの電気的特性を調べ、PAS法で調べた点欠陥の種類や密度と比較する。

(2) InAlN層に、イオン注入や高温熱処理、塩素系プラズマ処理を施し、そのプロセス前後の点欠陥の種類と密度をPAS法により調べる。N型電極を形成し、ホール効果測定およびTLM法を用いて、点欠陥と電気的特性の関係を調べる。また、同様に、デバイスプロセスによるInAlN/GaN界面の2DEGへの影響についても調べる。

(3) デバイスプロセスがInAlN層およびInAlN/GaN界面の2DEGに与える影響を元に、最適なデバイスプロセスを設定し、InAlN/GaN-HEMTの高性能化を図る。

## 4. 研究成果

(1) p型GaN層の点欠陥と電気的特性

アンモニアMBE法によりp型GaNをサファイヤ基板上に成長した。アンモニアMBEでは、一般的に800度程度で成長を行うことで、平坦な表面と高い結晶品質が得られることが知られている。

本研究において、750度以上の成長温度では、実効アクセプタ濃度が激減してしまうことが分かった。この原因として、アクセプタを補償する窒素空孔の増大が考えられる。一方、成長温度を730度以下にすると、表面荒れと結晶性の劣化が確認された。これらの結果から、高い実効アクセプタ濃度を得るには、730-750度の低温成長が最適であることが分かった。

プラズマMBE法では、成長温度が低い(740度前後)ものの、高品質GaN層を得るためには、Ga過剰条件が不可欠であった。Ga過剰条件では、高密度の窒素空孔が混入していると予想され、実際、高濃度の実効アクセプタは得られ難い。また、MOCVD成長では、窒素過剰条件で成長を行えるが、一般的に1000度近い成長温度を用いるので、プラズマMBEと同様に、高密度の補償欠陥が発生している可能性がある。これまでのp型GaN成長において、 $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 台の実効アクセプタ濃度を実現するのは非常に困難だった。

本研究では、窒素過剰条件で高品質GaN層が得られる、アンモニアMBE法を用いた。この条件で低温成長することにより、図1に示すように、 $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の実効アクセプタ濃度を得ることに成功した。この時、補償ドナー濃度は $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下であり、自由正孔濃度は室温で $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ であった。これは世界最高水準の高い正孔濃度である。

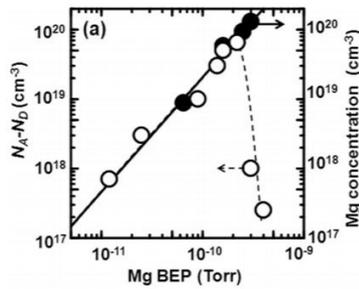


図 1: GaN 中における Mg フラックスと実行アクセプタ濃度および Mg 濃度との関係

本研究では、MOCVD 法とアンモニア MBE 法で結晶成長した高 Mg 添加 GaN 中の点欠陥を PAS 法により調べた。アンモニア MBE 法では、Mg 濃度が  $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  でも点欠陥密度が低いことが分かった。しかし、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  を超えると急激に点欠陥が増大した。 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  以上の高 Mg 濃度 GaN 層では、実効アクセプタ濃度および自由正孔濃度が急激に低下しており、PAS 法により調べた点欠陥の結果とよく一致した。

p 型 GaN 電極の典型的な接触抵抗率は  $10^{-4} \Omega \text{ cm}^2$  程度である。一般的に、半導体/金属の接触抵抗を下げるため、デバイス作製時には、高濃度の不純物を添加したコンタクト層を設ける。高アクセプタ（またはドナー）濃度を有する半導体を用いると、半導体/金属界面に存在する薄い空乏層幅をキャリアがトンネルし、実質的に接触抵抗を下げるができる。しかし、GaN では、高アクセプタ濃度が得られ難いため、接触抵抗の低減が困難であった。また、GaN デバイスによく用いられるコンタクト層には、よく  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  の台の Mg 濃度が用いられるが、この場合の GaN/金属界面における電流輸送機構は不明な状態である。

本研究では、 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  の高アクセプタ濃度を有する GaN を用いることで、図 2 に示すように、接触抵抗率を一桁低減することに成功した ( $2 \times 10^{-5} \Omega \text{ cm}^2$ )。また、 $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  台の Mg 濃度を有する GaN と比較した。我々は、 $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  台の高 Mg 濃度を有する GaN では、GaN/金属界面において、欠陥を介したトンネルによりキャリアが半導体に流れているとの提案に至った。

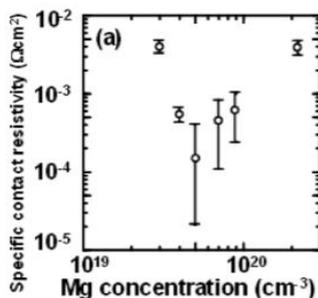


図 2: Mg 濃度と p 型 GaN の接触抵抗率の関係

### (2) InAlN 中の点欠陥と電気的特性

残念ながら、研究代表者が EPFL から MIT に移動したため、InAlN 試料を取り扱うことができなくなった。代わりに、AlN 試料を外部から購入し、AlN 中の点欠陥と電気的特性を調べることにした。デバイスプロセスとして、Si イオン注入を試みることにした。イオン注入による AlN の n 型化に関する報告は寡少である。デバイス応用に向けてイオン注入を用いるため、AlN への Si イオン注入およびイオン注入損傷の回復条件を確立する必要がある。

本研究では、様々なイオン注入条件および高温熱処理条件を試みた。 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  以上のドーズ量を用いた場合、および  $1300$  度以下の熱処理の場合、AlN は電気的に不活性であった。我々は、 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  のドーズ量の Si をイオン注入し、 $1500$  度で熱処理することにより、図 3 に示すように、AlN の n 型化に成功した。イオン注入および高温熱処理前後における AlN 中の点欠陥の種類と密度については、現在も調査中である。

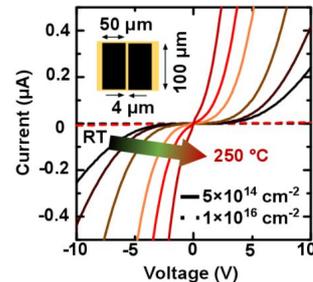


図 3: Si イオンを注入した AlN の電流電圧特性

### (3) 高性能 GaN 系デバイスの作製

研究代表者の移動に伴い、InAlN/GaN HEMT の作製には至らなかったが、高 Mg 濃度 p 型 GaN および AlN を用いた高性能デバイスを動作させることができた。

これまで報告されている GaN バックワードダイオードは、pn 接合界面に AlN もしくは InGaN を挟み、分極を用いることでキャリアをトンネルさせている。高濃度 p 型 GaN 成長が難しかったため、PN-GaN のみを用いた報告はこれまでなかった。

(1) で実現した高濃度の実効アクセプタを有する GaN を用いることで、図 4 に示すように、分極を用いない GaN バックワードダイオードの動作に世界で初めて成功した。

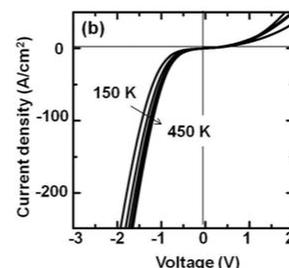


図 4: GaN pn ダイオードの電流電圧特性

現在、GaN を用いた青色面発光レーザー (VCSEL) の電流狭窄構造に、透明導電膜がよく使われるが、ITO は光吸収の要因にもなる。最適な電流狭窄構造の一つに、トンネル接合があげられる。トンネル接合を用いることで、高抵抗の p 型電極の代わりに、低抵抗 n 型電極が使えるため、立ち上がり電圧の低減につながる。また、高抵抗 p 型層の代わりに、低抵抗 n 型層を用いることでキャリアの広がりが大きくなる。

本研究では、(3) の成果をもとに、GaN VCSEL の作製を試みた。図5に示すように、トンネル接合を用いた電流狭窄に成功した。しかし、lasing には至らなかった。Cavity 長の正確な制御が必要であると考えられる。

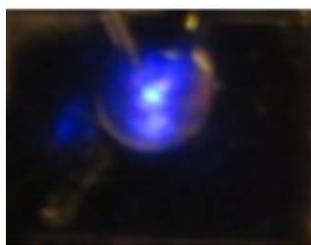


図5: トンネル接合を用いた GaN VCSEL 試作

AlN はバンドギャップが非常に大きい(6.1 eV)ため、高いキャリア濃度が得られない。現在、AlN チャンネルを用いたデバイスは、UV-LED とショットキーダイオードに限られている。

初め、電解質ドーピングを用いて AlN デバイスを作製したが、電解質を介したリーク電流が圧倒的に大きいため、トランジスタ動作には至らなかった。そこで、(2)の成果をもとに、イオン注入を用いて n 型化した AlN チャンネルのトランジスタを作製した。電界効果トランジスタ(MESFET 構造)を作製したところ、低いリーク連流とともにドレイン電流の飽和が確認され、トランジスタ動作に世界で初めて成功した。250 度の高温でも動作確認され、また逆方向電圧耐性は 2 kV を超えた。現在、電流電圧特性の詳細な評価とともに、論文執筆中である。

(1)~(3)を通じて、これまで GaN デバイスの大きな壁であった高正孔濃度を実現したことで、p チャンネルデバイスへの応用が期待できる。現在、GaN 電子デバイスは n 型が主流である。P チャンネル GaN デバイスが実用できれば、高周波パワーCMOS の実現が見えてくる。また、本成果で得られた高アクセプタ濃度による低接触抵抗を用いることで、可視光域のレーザーや LED、縦型 GaN パワーデバイスの省電力化にもつながる。さらに、これまで報告されている中で最も大きなバンドギャップを有する AlN トランジスタ動作に成功したことは、高温・高耐圧デバイス開発に大きく貢献するだろう。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

1. Hironori Okumura, Denis Martin, and Nicolas Grandjean: “Low p-type contact resistance by field-emission tunneling in highly Mg-doped GaN”, Appl. Phys. Lett. 109, 252101 (2016). 査読有  
DOI: 10.1063/1.4972408
2. Akira Uedono, Marco Malinverni, Denis Martin, Hironori Okumura, Shoji Ishibashi, and Nicolas Grandjean: “Vacancy-type defects in Mg-doped GaN grown by ammonia-based molecular beam epitaxy probed using a monoenergetic positron beam”, J. of Appl. Phys. 119, 245702 (2016). 査読有  
DOI: 10.1063/1.4954288
3. Hironori Okumura, Denis Martin, Marco Malinverni, and Nicolas Grandjean: “Backward diodes using heavily Mg-doped GaN growth by ammonia molecular-beam epitaxy”, Appl. Phys. Lett. 108, 072102 (2016). 査読有  
DOI: 10.1063/1.4942369

〔学会発表〕(計 3 件)

1. Hironori Okumura, Marco Malinverni, Denis Martin, and Nicolas Grandjean: “Electrical Properties of Mg-doped GaN with High Acceptor Concentrations”, 2016 Materials Research Societies Fall meeting, Boston US, Dec. 2016, oral
2. Hironori Okumura, Marco Malinverni, Denis Martin, and Nicolas Grandjean: “Highly p-type GaN for Advanced Optoelectronic Devices”, 2016 IEEE Photonics Conference, Waikoloa US, Oct. 2016, invited
3. Hironori Okumura, Marco Malinverni, Denis Martin, and Nicolas Grandjean: “Electrical Properties of Mg-doped GaN with High Acceptor Concentrations”, 19th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Montpellier France, Sep. 2016, oral

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<https://scholar.google.com/citations?user=A2KcE0cAAAAJ&hl=en>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

奥村宏典 ( OKUMURA, Hironori )  
筑波大学・数理物質系・助教  
研究者番号：80756750

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

上殿明良 ( UEDONO, Akira )

GRANDJEAN, Nicolas

PALACIOS, Tomas

SUIHKONEN, Sami