

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 11 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420300

研究課題名(和文) AlGaN/GaNヘテロ構造の欠陥準位とデバイス・スイッチング特性の相関研究

研究課題名(英文) Correlation between deep-level defects and turn-on switching characteristics in AlGaN/GaN hetero-structures

研究代表者

中野 由崇 (NAKANO, Yoshitaka)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：60394722

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：窒化物半導体をベースとしたAlGaN/GaNヘテロ構造は次世代の高周波パワーデバイス材料として期待されているが、実デバイスでは高周波・高出力動作時にデバイス・スイッチング特性が不安定となる電流コラプスの問題が顕在化しており、実用化への障害となっている。本研究では、AlGaN/GaNヘテロ構造のバルク領域に起因する電流コラプスの原因解明を目的として、バルク領域での欠陥準位とキャリア捕獲の相関を系統的に調べ、スイッチング特性を支配する欠陥準位を特定した。

研究成果の概要(英文)：AlGaN/GaN hetero-structures are one of promising materials for the next generation of RF high power devices. At present, however, these GaN-based devices encounter undesirable current collapse issues, where actual device performances at high frequencies can be limited by the presence of deep-level defects in the AlGaN/GaN hetero-structures. In this study, we have systematically investigated a correlation between deep-level defects and carrier-trapping phenomena in AlGaN/GaN hetero-structures from a viewpoint of Carbon incorporation for MOCVD growth. As the result, we have revealed what kinds of Carbon-related deep-level defects are strongly responsible for the switching characteristics in the bulk region of the AlGaN/GaN hetero-structures.

研究分野：半導体物性工学

キーワード：AlGaN/GaNヘテロ構造 GaNバッファ層 炭素 欠陥準位 デバイス・スイッチング特性 MOCVD結晶成長 電流コラプス

1. 研究開始当初の背景

ワイドギャップ半導体は、高耐圧・低損失・高温動作などの優れた電子材料物性から Si 半導体の性能を超える省エネルギー型パワーデバイスへの応用が期待されている。中でも、窒化物半導体では AlGaIn/GaN ヘテロ界面に存在する 2 次元電子ガス(2DEG)を用いた高周波パワーデバイスの研究開発が進められ、GHz 帯の高出力トランジスタの製品化が始まると共に、情報通信基地局に用いられる高周波用パワートランジスタとして実用段階に到達している。しかし、研究開発当初から、高周波動作時に出力が低下する電流コラプス問題に直面してきた[1]。これは、AlGaIn 表面や AlGaIn/GaN ヘテロ構造内に存在する電氣的に活性な欠陥準位が 2DEG をトラップすることで、オン抵抗が増加しスイッチング特性が不安定となる現象である。この電流コラプス現象を低減させるには、デバイス構造と結晶材料の両面から検討する必要がある。現在では、表面パシベーション技術により AlGaIn 層の表面準位を不活性化したり、フィールドプレート構造によりゲート電極エッジ部の電界集中を緩和することで、電流コラプス現象を 7~8 割程度まで抑制できている[2,3]。しかしながら、プロセス技術やデバイス構造だけでは電流コラプス現象を完全に排除するには至っておらず、AlGaIn/GaN ヘテロ構造のバルク領域に存在する電氣的に活性な欠陥に関する基礎的な研究は益々重要となってきたおり、デバイス特性を大きく左右するエピタキシャル結晶の高品質化が残された重要な課題となっている。

2. 研究の目的

有機金属気相成長(MOCVD)法による結晶成長温度をパラメータとした多様な AlGaIn/GaN ヘテロ構造の GaN バッファ層に存在する欠陥準位の生成挙動に焦点を絞り、バルク領域での炭素取り込みに起因する欠陥準位と電流コラプス現象との相関を系統的に検討し、バルク領域における電流コラプス現象を引き起こす欠陥準位を特定することを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

AlGaIn/GaN ヘテロ構造における AlGaIn 層の結晶成長条件を固定し、GaN バッファ層の MOCVD 結晶成長温度のみを 1120、1150、1170 として 3 種類の AlGaIn/GaN ヘテロ構造 (uid-Al_{0.24}GaN(25nm)/uid-GaN(3μm)) をサファイア基板に作製し、評価用サンプル(サンプル 1,2,3)とした。それぞれのサンプルの GaN バッファ層における残留炭素濃度は、SIMS 分析から $6 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 、 $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 、 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ であることを確認した。また、AFM 観察による表面モフォロジーやホール効果測定による 2DEG 特性はほぼ同様であった。

次に、これらの AlGaIn/GaN ヘテロ構造サンプルに Ni をショットキー電極としたプレー

ナー型ショットキーバリアダイオードを作製し、単色分光励起を利用した光容量過渡分光(SSPC:Steady-State Photo-Capacitance Spectroscopy)法による欠陥準位評価とオフ状態からオン状態にした際のターンオン電流及び容量の回復特性評価を組み合わせることで、両者の相関を 2DEG キャリア捕獲の観点から系統的に検討した。

[光容量過渡分光(SSPC)測定]

周波数 100kHz で暗・室温で行った。キセノン光を分光器に通して波長 1600nm から 300nm まで単色分光化し、2nm ステップ毎にサンプル裏面から分光照射した。その際の測定バイアス電圧(逆バイアス)は差分容量-電圧($\Delta C-V$)特性のピーク電圧値とした。単色分光照射毎に、暗中で 1.0V、1.0s のキャリア注入電圧パルスにより欠陥準位をキャリアで充満し、測定バイアス状態に戻してキャリアの熱的な放出後に、所望波長の単色分光照射を行うことでキャリアの光学励起に伴う空乏層容量の過渡応答特性を 0 秒から 300 秒まで計測した。ここでは、SSPC シグナルを $\Delta C_{ss}/C_0$ と定義した。 C_0 は光励起前の暗・測定バイアス状態での空乏層容量である。 ΔC_{ss} は定常状態での光容量の変化量であり、単色分光照射下での光容量の飽和値とした。

4. 研究成果

GaN バッファ層の MOCVD 結晶成長温度をパラメータとした 3 種類の AlGaIn/GaN ヘテロ構造サンプルをフォトルミネッセンス(PL)特性、差分容量-電圧($\Delta C-V$)特性、SSPC 特性、ターンオン電流回復特性、ターンオン容量回復特性を多面的に評価し、下記に示す炭素取り込みに起因する欠陥準位に関する知見を得た。

(1)フォトルミネッセンス(PL)特性

どのサンプルも 3.43eV 付近に GaN のバンド端発光(BE)が、2.23eV 付近にシャロードナーとディープアクセプタのプロードな再結合発光であるイエローバンド(YL)が見られた。イエローバンドに関連したディープアクセプタは Ga 空孔(V_{Ga})や C_N の複合欠陥である $V_{Ga}-C_N$ 、 $V_{Ga}-O_N$ 、 C_N 、 C_N-O_N 等と報告されているが詳細は不明である。GaN バッファ層の成長温度が比較的高いサンプル 2,3 では 3.28eV 付近にドナーとアクセプタによる再結合発光(DAP)が明確に見られたが、成長温度が比較的低いサンプル 1 では DAP 強度は弱くなり 3.0eV 付近にブルーバンド(BL)が顕在化した。この発光は、 C_{Ga} ドナーと C_N アクセプタ間遷移に対応した炭素関連の再結合発光に起因する。また、サンプル 1,2,3 の室温でのバンド端発光に対するイエローバンドの強度比(YL/BE)はそれぞれ 3.30、1.00、0.69 であった。これらの結果は、PL 特性は GaN バッファ層の残留炭素濃度に大きく依存することを示唆している。

(2) 差分容量-電圧($\Delta C-V$)特性

波長 370nm 以上のキセノン光照射有無の C-V 特性(photo C-V, dark C-V)の差分 $\Delta C-V$ 特性から、サンプル 1,2,3 はそれぞれ -3.30V, -3.85V, -3.85V で最大の ΔC を有するピークをもち、これらのピーク積分値から光照射により増加した 2DEG 濃度を算出すると、サンプル 1,2,3 ではそれぞれ $1.8 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$, $1.1 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$, $1.1 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ となった。AlGaIn 層の結晶成長条件は固定しているため AlGaIn 層に存在する欠陥準位密度は同じであると仮定すると、光照射により増加した 2DEG 濃度の違いは GaN バッファ層に存在する欠陥準位密度の差を反映していると考えられる。すなわち、GaN バッファ層の成長温度が低いほど、原料であるトリメチルガリウム(TMG)の分解率が低くなる結果、膜中への炭素取り込みが促進し、炭素取り込み関連の欠陥準位密度が増加する傾向を示すことが分かった。

(3) SSPC 特性

$\Delta C-V$ 特性のピーク電圧値を測定電圧として SSPC 測定を行った。サンプル 1,2,3 の測定深さ領域は AlGaIn 表面からそれぞれ 103nm, 112nm, 82nm である。どのサンプルも、伝導帯下 1.70eV, 2.07eV, 2.5eV, 2.80eV, 3.23eV に光学的な閾値を有する 5 つのバンドギャップ内光電子放出状態(欠陥準位の光吸収)が見られた(図 1)。GaN バッファ層の成長温度が低いほど、2.07eV, 2.80eV, 3.23eV の欠陥準位密度が増加する傾向を示し、PL 特性, $\Delta C-V$ 特性, SSPC 特性には良い相関が認められた。したがって、AlGaIn/GaN ヘテロ構造における GaN バッファ層には MOCVD 結晶成長条件に大きく依存する炭素取り込みに起因した 2.07eV, 2.80eV, 3.23eV の欠陥準位が支配的であることが分かった。これら 3 つの特徴的な欠陥準位は Ga 空孔(V_{Ga})や残留炭素関連の欠陥準位であると考えられる。すなわち、2.07eV の欠陥準位は V_{Ga} あるいは $V_{Ga}-O_N$ に帰属し、3.23eV の欠陥準位は炭素が N サイトに置換し形成されるシャローアクセプタ(C_N)である。また、2.80eV の欠陥準位は PL のイエローバンドの起源である $V_{Ga}-C_N$ あるいは C_N-O_N 複合欠陥に関係していると考えられる。3.23eV の欠陥準位はシャローアクセプタであるためキャリア補償により有効キャリア濃度を低減する効果があるが、2.07eV と 2.80eV の欠陥準位はキャリアの捕獲準位として働くと考えられる。しかしながら、どの欠陥準位がバルク領域の電流コラプス現象を引き起こしているのか、不明のままである。

(4) ターンオン電流・容量回復特性

暗中所ける -30V(ストレス時間 30min)から +1.5V のターンオン時の電流回復特性から、炭素含有量が多くなる程、ターンオン電流回復は遅くなり、その電流量は減少する傾向を示した(図 2)。したがって、炭素取り込み関連の欠陥準位密度が多いほど、2DEG キャリア

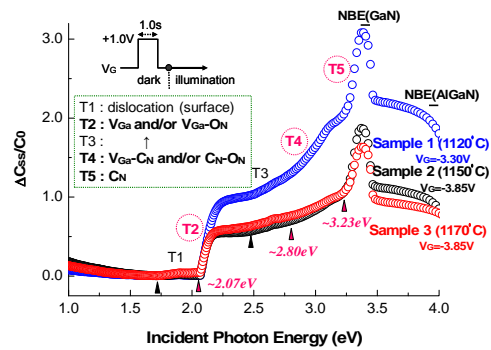


図 1 GaN バッファ層の成長温度が異なるサンプル 1,2,3 の SSPC スペクトル

の捕獲が進み、ターンオン時のスイッチングが遅くなることが分かった。次に、炭素関連の欠陥準位 2.07eV, 2.80eV, 3.23eV の欠陥準位の光吸収エネルギー値に相当するロングパスフィルター(540nm, 390nm, 370nm)を用いてキセノン光照射下でターンオン時の電流回復特性(ストレス電圧 -30V, 60min)を評価した。390nm と 370nm のフィルターを用いた場合、電流回復時間が著しく短くなり、白色光照射時と同程度になることが分かった(図 3)。したがって、2.80eV と 3.23eV の欠陥準位が電流コラプス現象に対して支配的な役割を担っていることが分かった。

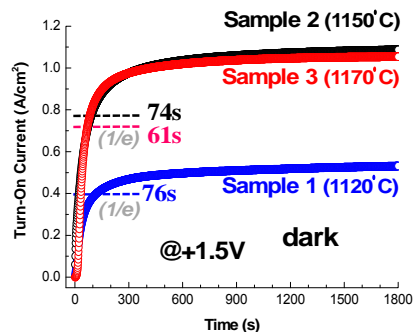


図 2 GaN バッファ層の成長温度が異なるサンプル 1,2,3 の暗中のターンオン電流回復特性

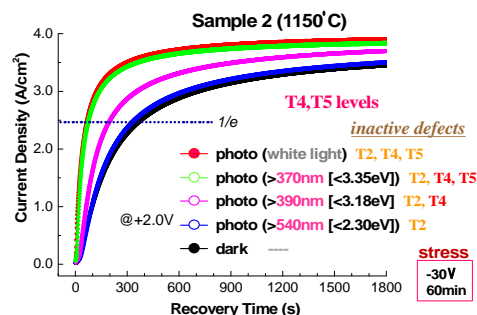


図 3 サンプル 2 のターンオン電流回復特性の光照射波長依存性

サンプル 1,2,3 の暗中所ける -30V から 0V に戻す際のターンオン容量回復特性(ストレス時間 30s)においても、炭素含有量が多く

なる程、容量回復特性は遅くなることが分かった(図4)。更に、欠陥準位エネルギーを基にした容量回復特性の光照射波長依存性からも、2.80eVと3.23eVの欠陥準位がターンオン回復特性を支配していることが分かった(図5)。

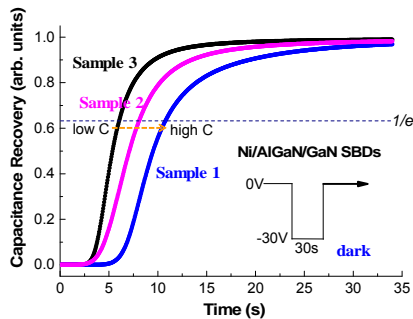


図4 GaN バッファ層の成長温度が異なるサンプル1,2,3の暗中のターンオン容量回復特性

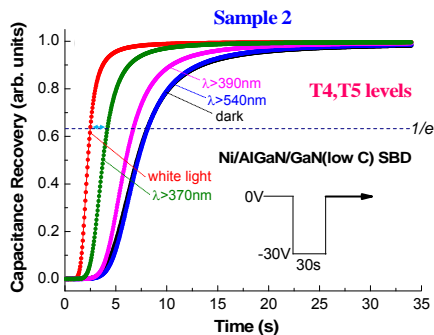


図5 サンプル2のターンオン容量回復特性の光照射波長依存性

(5)今後の展望

AlGaIn/GaNヘテロ構造は一般的にMOCVD法により結晶成長されており、膜中への炭素取り込みは不可避である。本研究では、この炭素取り込みにより形成される2.80eVと3.23eVの欠陥準位が2DEGキャリアを捕獲しバルク領域の電流コラプス現象を引き起こすことを欠陥準位計測から明らかにした。しかしながら、不純物炭素はリーク電流の低減などバッファ層の高抵抗化には必要であり、高抵抗化と電流コラプス現象は本質的にトレードオフの関係にあると思われる。したがって、デバイスの高品質チャンネル層と高抵抗バッファ層の2層構造にし、チャンネル層では炭素量を極力減らし炭素取り込み関連の欠陥準位を低減し電流コラプス現象の発生を阻止するとともに、バッファ層では積極的に炭素ドーピングを行い高抵抗化することが今後のデバイス開発上強く求められると考えられる。その上で、本研究で得た研究成果は大変貴重な基礎データとなりうる。また、AlGaIn/GaNヘテロ構造ウエハの電流コラプス量を簡易的に短時間評価する方法として、非侵襲的な水銀プローブ電極を用いて短時

間ストレス印加後のターンオン容量回復特性の評価がウエハ製造工程上きわめて有効であることも期待される。

<引用文献>

- S.T.Bradley, A.P.Young, L.J.Brillson, M.J.Murthy, W.J.Schaff, L.F.Eastman: Influence of AlGaIn/GaN 2-DEG carrier confinement, IEEE Trans. Electron Devices **48**, 412-415 (2001).
- B.Luo, J.W.Johnson, J.Kim, R.M.Mehandru, F.Ren, B.P.Gila, A.H.Onstine, C.R.Abernathy, S.J.Pearson, A.G.Baca, R.D.Briggs, R.J.Shul, C.Monier, J.Han: Influence of MgO and Sc₂O₃ passivation on AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors, Appl. Phys. Lett. **80**, 1661-1663 (2002).
- D.S.Green, J.D.Brown, R.Vetury, S.Lee, S.R.Gibb, K.Krishnamurthy, M.J.Poulton, J.Martin, J.B.Shealy: Status of GaN HEMT performance and reliability, Proc. SPIE **6894**, 68941M (2008).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計6件)

- Y.Nakano, Y.Irokawa, M.Sumiya: Deep-level defects and turn-on capacitance recovery characteristics in AlGaIn/GaN heterostructures, Philosophical Magazine Letters **95**, 333-339 (2015). 査読有.
DOI:10.1080/09500839.2015.1062154
- R.Kawakami, Y.Nakano, M.Niibe, T.Shirahama, T.Mukai: Electrical Investigation of Deep-Level Defects Introduced in AlGaIn/GaN Heterostructures by CF₄ Plasma Treatments, ESC Solid State Letters **4**, 36-38 (2015). 査読有.
DOI:10.1149/2.0011505ssl
- Y.Nakano, D.Ogawa, K.Nakamura, R.Kawakami, M.Niibe: Ar⁺-irradiation-induced damage in hydride vapor-phase epitaxy GaN films, Journal of Vacuum Science & Technology A **33**, 031403 1-5 (2015). 査読有.
DOI:10.1116/1.4922593
- M.Chen, K.Nakamura, Y.Qiu, D.Ogawa, R.Kawakami, M.Niibe, Y.Nakano: Optical and electrical investigation of Ar⁺-irradiated GaN, Applied Physics Express **7**, 111003 1-4 (2014). 査読有.

DOI: 10.7567/APEX.7.111003
Y.Nakano, Y.Irokawa, M.Sumiya,
Y.Sumida, S.Yagi, H.Kawai:
Carbon-Related Deep-Level Defects and
Turn-On Recovery Characteristics in
AlGaIn/GaN Hetero-Structures,
Materials Research Society Symposium
Proceedings **1635**, 1-6 (2014). 査読有.
DOI:10.1557/opl.2014.102
Y.Nakano: Steady-state photo
-capacitance spectroscopy
investigation of Carbon-related
deep-level defects in AlGaIn/GaN
hetero-structures grown by MOCVD,
Trends in Applied Spectroscopy **9**,
59-65 (2013). 査読有.
[http://www.researchtrends.net/tia/
title_issue.asp?id=31&in=0&vn=9&type=3](http://www.researchtrends.net/tia/title_issue.asp?id=31&in=0&vn=9&type=3)

[学会発表](計9件)

Y.Nakano, Y.Irokawa, M.Sumiya,
S.Yagi, H.Kawai: Carbon-Related
Deep-Level Defects and Carrier
Trapping Characteristics in
AlGaIn/GaN Hetero-Structures, 11th
International Conference on
Nitride Semiconductors (ICNS-11),
2015年9月2日, Beijing (中国).
Y.Nakano, R.Kawakami, M.Niibe,
T.Shirahama, T.Mukae: A Relation
between Pinch-Off Voltages and
Deep-Level Defects in AlGaIn/GaN
Hetero-Structures Treated by CF₄
Plasma, 11th International
Conference on Nitride
Semiconductors (ICNS-11), 2015年9
月2日, Beijing (中国).
Y.Nakano, Y.Irokawa, M.Sumiya, S.Yagi,
H.Kawai: Carbon-Related Deep-Level
Defects and Carrier-Trapping
Characteristics in AlGaIn/GaN
Hetero-Structures, 7th International
Symposium on Advanced Plasma Science
and Its Applications for Nitrides and
Nanomaterials/8th International
Conference on Plasma-Nano Technology &
Science (ISPlasma2015/IC-PLANTS2015),
2015年3月28日, Nagoya University (愛
知県・名古屋市).
中野由崇, 川上烈生, 新部正人, 高木健
司, 白濱達夫, 向井孝志: CF₄プラズマ処
理した AlGaIn/GaN ヘテロ構造の電氣的評
価, 第 62 回応用物理学会春季学術講演
会, 2015年3月13日, 東海大学湘南キ
ャンパス (神奈川県・平塚市).
中野由崇, 色川芳宏, 角谷正友, 八木修
一, 河合 弘治: C-t 法による AlGaIn/GaN
ヘテロ構造のターンオン回復特性評価,
第 75 回応用物理学会秋季学術講演会,
2014年9月19日, 北海道大学札幌キ

ンパス (北海道・札幌市).
中野由崇: AlGaIn/GaN ヘテロ構造におけ
る炭素関連の欠陥準位評価 (招待講演),
日本物理学会 第 24 回格子欠陥フォーラム
「パワーデバイス開発のための格子欠陥
評価・制御」, 2014年9月11日, かんば
の宿 恵那 (岐阜県・恵那市).
中野由崇, 色川芳宏, 角谷正友, 住田行
常, 八木修一, 河合弘治: AlGaIn/GaN ヘ
テロ構造の炭素関連欠陥準位とターンオ
ン電流回復特性, 第 61 回応用物理学会
春季学術講演会, 2014年3月18日, 青山
学院大学相模原キャンパス (神奈川県・
相模原市).
Y.Nakano, Y.Irokawa, M.Sumiya,
Y.Sumida, S.Yagi, H.Kawai: Deep-Level
Defects and Turn-On Recovery
Characteristics in AlGaIn/GaN
Hetero-Structures Containing Various
Carbon Concentrations, 2013 Materials
Research Society Fall Meeting, 2013年
12月2日, Boston (USA).
Y.Nakano, Y.Irokawa, Y.Sumida, S.Yagi,
H.Kawai: Carbon-Related Deep-Level
Defects and Turn-On Recovery
Characteristics in AlGaIn/GaN
Hetero-Structures, 40th International
Symposium on Compound Semiconductors
(ISCS-2013), 2013年5月20日, Kobe
Convention Center (兵庫県・神戸市).

[その他]

ホームページ等

[http://www.chubu.ac.jp/about/faculty/pr
ofile/18fda985f369f45f4e48e0e57ab46fa44
1142616.html](http://www.chubu.ac.jp/about/faculty/profile/18fda985f369f45f4e48e0e57ab46fa441142616.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中野 由崇 (NAKANO, Yoshitaka)
中部大学・工学部・教授
研究者番号: 60394722

(2) 連携研究者

色川 芳宏 (IROKAWA, Yoshihiro)
物質・材料研究機構・ワイドギャップ機能
材料グループ・研究員
研究者番号: 90394832

角谷 正友 (SUMIYA, Masatomo)

物質・材料研究機構・ワイドギャップ機能
材料グループ・研究員
研究者番号: 20293607

(3) 研究協力者

河合 弘治 (KAWAI, Hiroji)