

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14210

研究課題名（和文）極低抵抗・低転位密度自立基板を利用した窒化ガリウムにおける大規模伝導度変調制御

研究課題名（英文）Large-scale conductivity modulation control in gallium nitride using freestanding substrates with ultra-low resistivity and low dislocation density

研究代表者

宇佐美 茂佳 (Usami, Shigeyoshi)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：30897947

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：酸化物気相成長（OVPE）法で作製した高キャリア濃度GaN基板上にPN接合ダイオードを作製しGaNにおける伝導度変調に基板キャリア濃度が与える影響について調査した。自己発熱の影響をパルスIV測定によって排除して評価を行ったところ、基板キャリア濃度の増大によって伝導度変調が促進されドリフト層の抵抗は通常のGaN基板上デバイスに比べて約半分に低減されることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は高キャリア濃度基板を用いれば直接遷移半導体であるGaNにおいても伝導度変調によるオン抵抗の低減効果を増大させられること、適用耐圧範囲を拡張できることを示した。直接遷移半導体においても伝導度変調を積極的に利用可能な高耐圧デバイスが作製可能となれば、従来トレードオフとなっていた導通損失とスイッチング損失の両方を低減可能な高効率スイッチング素子を実現できる。当該技術は省エネルギー社会実現に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：We fabricated a PN junction diode on a high carrier concentration GaN substrate grown by oxide vapor phase epitaxy (OVPE) and investigated the effect of the substrate carrier concentration on the conductivity modulation in GaN. When we performed an evaluation after eliminating the effect of self-heating by pulse IV measurement, we found that the increase in the substrate carrier concentration promoted the conductivity modulation and reduced the resistance of the drift layer to about half that of devices on normal GaN substrates.

研究分野：結晶工学および電子デバイス

キーワード：GaN 伝導度変調 pn接合ダイオード パワーデバイス OVPE法

1. 研究開始当初の背景

伝導度変調とは、半導体内に多数キャリアを上回るレベルで少数キャリアを注入することによって、半導体の抵抗がユニポーラリミットを超えて低減するバイポーラデバイス特有の現象である。当該現象は大電流駆動時の導通損失低減に効果的であり Si 半導体の絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT) が代表的である。次世代パワー半導体材料として期待される GaN は高耐圧・高周波動作が可能であるが、直接遷移半導体であるがゆえに少数キャリア寿命が短く伝導度変調を利用することが難しいと思われていた。研究開始当初、酸化物気相成長 (OVPE) 法で作製された超低抵抗かつ低転位密度な GaN 自立基板を用いることで大規模伝導度変調の発現を示唆する結果が報告された。これは基板の低転位化によるキャリア寿命の延伸と電子注入量の増大によってフォトンリサイクリング効果が促進されたためと解釈されていたが、高キャリア濃度基板の伝導度変調はこれまで系統だった調査が皆無であり、GaN における伝導度変調がどのようなメカニズムで発生し、どこまでの耐圧範囲まで適用可能となるのか、また、キャリア濃度のさらなる高濃度化や欠陥の低密度化によってその範囲が拡張可能であるのか調査が必要な状況であった。

2. 研究の目的

本申請研究では、GaN における伝導度変調の発生メカニズムを解明しその適用範囲を推定する。さらに OVPE 法で作製した GaN (OVPE-GaN) 基板の高キャリア濃度化と低転位化を進め、伝導度変調によるオン抵抗低減効果への影響を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) OVPE-GaN のキャリア濃度向上

OVPE 法は III 族原料に Ga₂O を用いる GaN の気相成長法であり、Ga₂O 由来の酸素が GaN 中に高濃度でドーピングされる。酸素は GaN の窒素サイトを置換してドナーとなるため、キャリア濃度を上げるためには酸素ドーピング量を高めれば良い。本研究では V/III 比および成長圧力を変更することで、結晶性を維持したまま酸素ドーピング量を増加させ OVPE-GaN 基板の高キャリア濃度化を図った。

(2) OVPE-GaN の転位密度低減

OVPE 法では種 GaN 結晶上にホモエピタキシャル成長して GaN 基板を得る。エピタキシャル成長では基本的には種基板の結晶性を引き継いで成長するため、低転位密度な種基板を用いれば、OVPE-GaN の転位密度も低減可能と考えられる。本研究では低転位密度 GaN 基板として、同グループの Na-flux 法で作製した基板 (Na-flux 基板、転位密度: 10⁵ cm⁻² 台)、市販のアモノサーマル法で作製した基板 (アモノサーマル基板、転位密度: 10⁴ cm⁻² 台) を用いて OVPE-GaN が低転位密度となるか検証した。

(3) 伝導度変調のメカニズム解明と適用範囲推定

伝導度変調のメカニズムを調査するため、断面の発光からドリフト層内のキャリア分布が観察可能か調査した。評価用素子として OVPE-GaN (キャリア濃度: ~1×10²⁰ cm⁻³) と市販 HVPE-GaN 基板 (キャリア濃度: ~3×10¹⁸ cm⁻³) 上にドリフト層膜厚の異なる縦型 PN 接合ダイオード (PND) を作製した。図 1 に構造模式図を示す。Mg ドープした p 型 GaN のイオン化エネルギーは 200 meV 程度と大きい室温では 1%程度しか活性化していない。そのため、通電中の自己発熱は正孔濃度を増加させ微分オン抵抗の過少評価につながる。本研究ではパルス IV 測定によって発熱の影響を排除したオン抵抗を求め、ドリフト層膜厚に対するオン抵抗の変化量から伝導度変調のメカニズム考察および高注入キャリア寿命 (τ_{HL}) の導出を試みた。高レベル注入寿命から適用耐圧範囲を推定した。

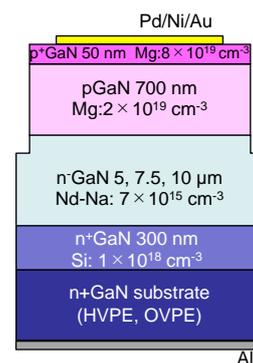


図 1. 縦型 PND 構造

4. 研究成果

(1) OVPE-GaN のキャリア濃度向上

酸素ドープ量の成長圧力依存性を確認するため成長圧力を 0.5 atm、V/III 比約 20 として減圧成長を行った。育成結果を図 2 に示す。減圧環境においても成長レートは 60 μm/h 程度 (4.5 時間成長) で GaN が成長し、その結晶性は種基板と同等であった。SIMS によって不純物濃度を分析したところ酸素濃度は 9.1×10²⁰ cm⁻³ と報告値の約 2 倍となった[1]。酸素ドープ量の増加は、圧力の他に水素分圧や基板上的実効的なガス分圧の変化等様々な理由が考えられる。当該結晶を自立化してホール測定を行ったところ、キャリア濃度は 1.3×10²⁰ cm⁻³、従来 8.9×10¹⁹ cm⁻³ よりも 46%程度キャリア濃度を高めることに成功した。キャリア濃度は酸素濃度の約 14%であり、酸素濃度との乖離が大きい。この傾向は酸素ドープ量を増加させるほど顕著となるため[2]、ドーピング濃度に依存してアクセプタ性点欠陥が生成されているものと考えられる。さらに酸

素濃度が $3 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ を超えると結晶性が著しく悪化することも近年明らかとなった。酸素濃度の増大による抵抗率低減は $2 \cdot 3 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$ が到達できる最低ラインと考えられる。

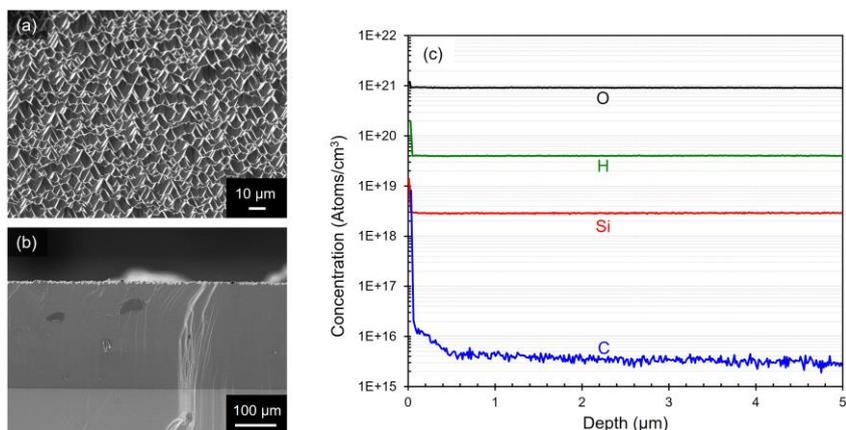


図 2. 減圧成長した OVPE-GaN の (a)鳥瞰 SEM 像、(b)断面 SEM 像、(c)SIMS 分析結果

(2) OVPE-GaN の転位密度低減

低転位 GaN 基板として用意した阪大製 Na-flux 基板とアモノサーマル基板の転位密度は $1.2 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 、 $1.7 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ であった。その上に成長した OVPE-GaN の鳥瞰 SEM 像を図 3(a)-(c)に示す。基板転位密度が減少するほどグロースピット密度も低下した。これはグロースピットが主に転位を起点として形成されるためと考えられる。育成後に表面を研磨してからエッチピットを形成して転位密度を評価した結果を図 3(d)に示す。リファレンスとして HVPE 基板の結果もプロットしている。どの基板上でも OVPE 層の転位密度が低下する結果となったが、これは OVPE のファセット成長によって種基板の転位が収束・会合して減少したものと考えられる。この実験で使用した成長条件では酸素濃度は約 $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ となる。このように高濃度の酸素を含む GaN は格子膨張が発生することが知られている [3]。格子ミスマッチによる転位の増殖が危惧されたが、育成結晶において転位の増殖は確認されず、種基板の低転位化で低転位 OVPE-GaN 基板の製造が可能であることが示された。

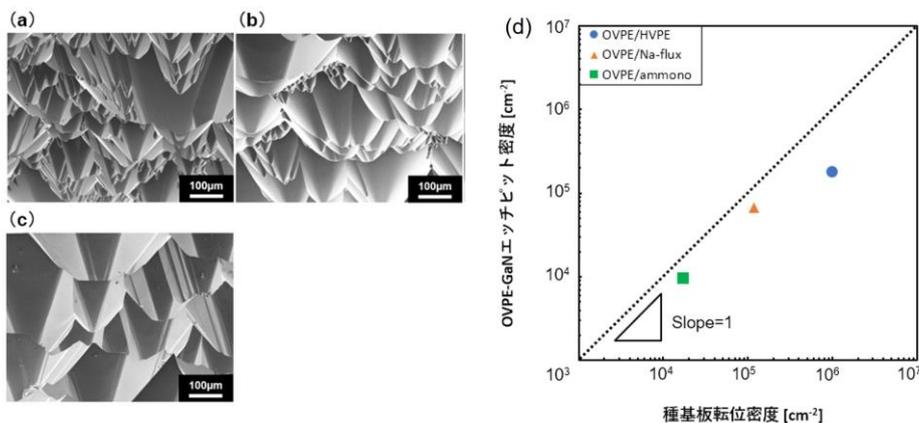


図 3. (a)OVPE/HVPE、(b)OVPE/Na-flux、(c)OVPE/アモノサーマル基板の鳥瞰 SEM 像、(d)種基板と OVPE 層の転位密度比較

(3) 伝導度変調のメカニズム解明と適用範囲推定

図 4 に OVPE 基板上に作製したドリフト層膜厚 $10 \mu\text{m}$ の PND の断面発光像を示す。電圧を上げるほど発光色が黄色から紫に変化し、発光領域が pGaN 近傍からドリフト層全体に広がる様子が確認できた。しかしながら、電圧を上げるにつれて発光強度が増大し、それと同時に発光分布は不明瞭となった。PND の発光は断面近傍だけでなく電極直下全域で発生するため、結晶内部で発生した光は広がりながら端面へと向かい出射する。そのため、印加電圧が低く発光強度の弱いときは内部で発生した光が基板等に自己吸収され、端面近傍のみの発光分布を観察できたが、発光強度が強くなると吸収されずに端面に到達する光が増え発光分布は不明瞭になったと考えられる。発光分布からキャリア濃度分布を直接観察することは困難であると判断し、オン抵抗のドリフト層膜厚依存性からキャリア寿命を推定することとした。

図 5 にドリフト層膜厚 $5, 7.5, 10 \mu\text{m}$ と変化させ、パルス幅 $20 \mu\text{s}$ で測定した HVPE-GaN 基板上と OVPE-GaN 基板上の PND の順方向 IV カーブを示す。ドリフト層膜厚が増加するほど順方向電圧が上昇する様子がわかる。これはドリフト層での電圧降下が増大するためと定性的に理解できる。次に 3 kA/cm^2 において計算したオン抵抗 (微分抵抗) の膜厚依存性を図 6 に

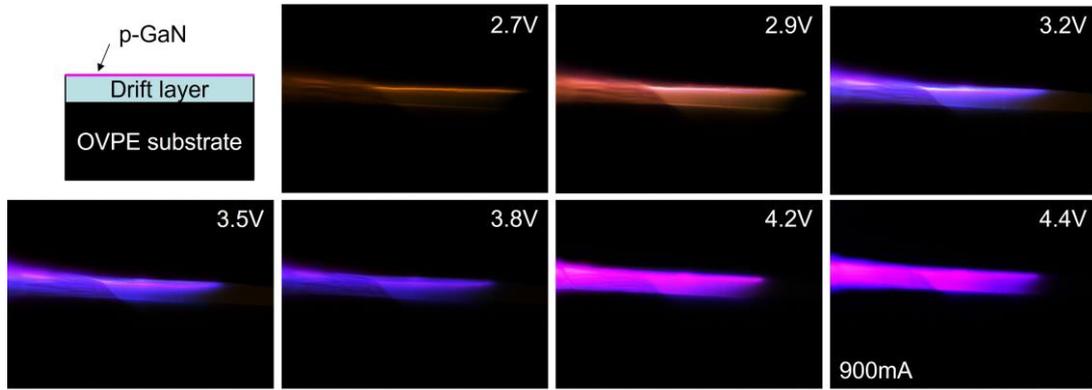


図 4. OVPE 基板上 PND の断面発光像の電圧依存性

示す。実効キャリア濃度と移動度から計算したドリフト層の抵抗増分は $2.5 \mu\text{m}$ ごとに $0.17 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ である。それに対し、実験的なオン抵抗の増分は約 $0.06 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ と $1/3$ に縮小していた。さらに OVPE-GaN 基板上では $0.03 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ と通常の基板に対して抵抗増分は約半分となった。これは通常の GaN 基板上でも伝導度変調が発生しドリフト層の抵抗が減少していること、及び OVPE-GaN 基板上ではその抵抗低減効果が増大していることを示唆している。TLM パターンから求めた p 型オーミック電極の接触抵抗は $10 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ であり、測定されたオン抵抗の値よりも 2 桁以上高い。これはデバイス通電時に接触抵抗がほぼゼロにまで低減することを意味している。パルス測定で自己発熱を排除しているため、この抵抗低減は電界発光を pGaN が再吸収することで正孔濃度が増大するフォトリサイクリング効果によるものと考えられる[4]。

次にオン抵抗の膜厚依存性を解析式でフィッティングし、 τ_{HL} を求めたところ HVPE-GaN 基板上で 2.5 ns と求まった。ここから推定される適用耐圧範囲は 2 kV 程度となる。OVPE-GaN 基板上では、基板界面に低ドナー濃度のバッファ層が存在すること、OVPE-GaN のバンドギャップが不明であることから寿命推定に至っていない。ここに載せていないが、ドリフト層膜厚 $15 \mu\text{m}$ の PND まで作製しており、そのオン抵抗の推移から OVPE-GaN 基板を用いることで適用耐圧範囲は 3 kV 程度まで拡張可能と考えられる。しかしながら、この耐圧範囲はワイドバンドギャップ半導体の適用が期待される超高耐圧域 (数 10 kV) よりも低く少数キャリア寿命の短い GaN において伝導度変調を積極的に利用するためには超接合など構造の工夫が必要であることを示す結果である。

本研究を通して基板キャリア濃度の高濃度化と転位の低密度化を達成し、伝導度変調の評価手法も確立できたが、基板キャリア濃度と転位密度の影響に関する調査が未完了であるためメカニズムの解明に至っていない。今後、他の研究費等で基板キャリア濃度や転位密度依存性について引き続き解析を進め、GaN における伝導度変調のメカニズムを解明し、成果を学術誌に投稿する予定である。

<引用文献>

- ①J. Takino, T. Sumi, Y. Okayama, A. Kitamoto, M. Imanishi, M. Yoshimura, N. Asai, H. Ohta, T. Mishima, and Y. Mori, Appl. Phys. Express **13**, 071010 (2020).
- ②J. Takino, T. Sumi, Y. Okayama, A. Kitamoto, S. Usami, M. Imanishi, M. Yoshimura, and Y. Mori, Jpn. J. Appl. Phys. **60**, 095501 (2021).
- ③M. Imanishi, T. Yoshida, T. Kitamura, K. Murakami, M. Imade, M. Yoshimura, M. Shibata, Y. Tsusaka, J. Matsui, and Y. Mori, Cryst. Growth Des. **17**, 3806 (2017).
- ④K. Mochizuki, K. Nomoto, Y. Hatakeyama, H. Katayose, T. Mishima, N. Kaneda, T. Tsuchiya, A. Terano, T. Ishigaki, T. Tsuchiya, R. Tsuchiya, and T. Nakamura, 2011 International Electron Devices Meeting, pp. 26.3.1-26.3.4, (2011).

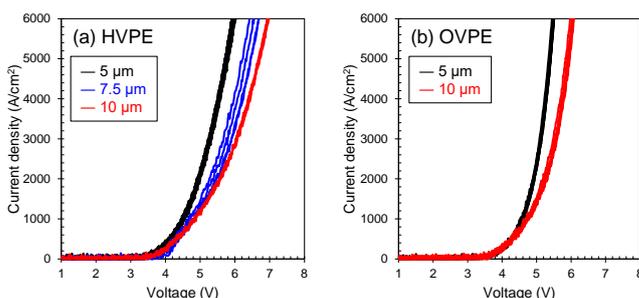


図 5. パルス幅 $20 \mu\text{s}$ で測定した縦型 PND の順方向 IV 特性(a)HVPE 基板上、(b)OVPE 基板上

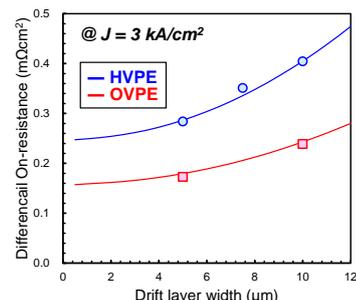


図 6. 注入電流密度 3 kA/cm^2 におけるドリフト層膜厚とオン抵抗

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名	宇佐美茂佳, 太田博, 滝野淳一, 渡邊浩崇, 隅智亮, 今西正幸, 新田州吾, 本田善央, 森勇介, 三島友義, 岡山芳央, 天野浩
2. 発表標題	OVPE基板上pnダイオードにおける伝導度変調の解析
3. 学会等名	第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	宇佐美茂佳, 香川美幸, 今西正幸, 滝野淳一, 隅智亮, 岡山芳央, 秦雅彦, 伊勢村雅士, 森勇介
2. 発表標題	OVPE法で育成したGaNのグロースピット径制御
3. 学会等名	第51回結晶成長国内会議
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	相原 正実, 宇佐美 茂佳, 今西 正幸, 丸山 美帆子, 吉村 政志, 秦 雅彦, 伊勢村 雅士, 森 勇介
2. 発表標題	低転位自立基板を用いたOVPE-GaN結晶の転位低減
3. 学会等名	第41回 Electronic Materials Symposium(EMS-41)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	宇佐美茂佳, 今西正幸, 滝野淳一, 隅智亮, 岡山芳央, 丸山美帆子, 吉村政志, 秦雅彦, 伊勢村雅士, 森勇介
2. 発表標題	OVPE-GaN基板上MOVPE成長におけるピット低減と表面平坦性の改善
3. 学会等名	第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名 宇佐美茂佳, 太田博, 渡邊浩崇, 今西正幸, 新田州吾, 本田善央, 森勇介, 三島友義, 天野浩
2. 発表標題 ドリフト層の異なるGaN pnダイオードを用いた伝導度変調の解析
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宇佐美茂佳, 東山律子, 滝野淳一, 太田博, 渡邊浩崇, 今西正幸, 隅智亮, 岡山芳央, 三島友義, 新田州吾, 本田善央, 吉村政志, 秦雅彦, 伊勢村雅士, 天野浩, 森勇介
2. 発表標題 OVPE法を用いたGaNのエピタキシャル成長とパワーデバイス応用
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Usami, J. Takino, M. Imanishi, T. Sumi, H. Watanabe, S. Nitta, Y. Honda, Y. Okayama, H. Amano, and Y. Mori
2. 発表標題 Origin of reverse leakage current in vertical pn junction diode on OVPE-GaN substrate
3. 学会等名 LEDIA 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------