

令和元年6月12日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18074

研究課題名(和文)窒化物半導体デバイスに印加される分極電界の観測と制御

研究課題名(英文)Control of Polarization-Induced Electric Field in Nitride-Semiconductor-Based Devices

研究代表者

谷川 智之(Tanikawa, Tomoyuki)

東北大学・金属材料研究所・講師

研究者番号：90633537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：様々な面方位のGa_N上にInGa_N/Ga_N LED構造を作製し、内部電界の定量評価を電界変調反射スペクトル測定により行った。その結果、バイアス印加時のGa_N障壁層およびInGa_N井戸層の電界を反映した反射信号が得られ、反射信号の位相および周期から電界の向きや強度を求めることができた。

N極性InGa_N/AlGa_N/Ga_N構造を作製し、分極効果による最上層に形成される二次元電子ガス濃度の増強を試みた。まず最上層をGa_Nとし、AlGa_Nの組成・膜厚を最適化し、二次元電子ガス濃度1E13cm⁻²程度が得られた。次に最上層をInGa_Nとし、In_Nモル分率0.11で電子濃度は二倍程度に増加した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

窒化物半導体などの次世代半導体材料は強い分極を有し、誘電体的性質がデバイス性能を左右する。このような観点でデバイス開発を俯瞰すると、分極効果を定量評価する技術が必要といえる。本研究ではInGa_N/Ga_N発光ダイオードとGa_N/AlGa_N/Ga_Nヘテロ接合電界効果トランジスタを例として、デバイス動作時の電界強度を定量評価する技術と分極効果を制御する技術について研究を展開した。その結果、分極電界の定量評価に変調分光法が有用であることを示し、混晶などの分極不連続量の制御により電子の偏りを制御できることを示した。これらの成果は、発光デバイスや電子デバイスの性能改善に向けて役立つ知見といえる。

研究成果の概要(英文)： InGa_N-based light-emitting diodes on Ga_N films with various crystal orientation were fabricated, and internal electric fields were evaluated using a electroreflectance method. Electroreflectance signals were originated from internal electric fields applied in Ga_N barrier and InGa_N well layers. From the signal phase and the signal period, direction and intensity of electric fields could experimentally be measured.

N-polar InGa_N/AlGa_N/Ga_N-based heterostructure field-effect transistors were fabricated and concentration of two-dimensional electron gas was investigated. first, Ga_N/AlGa_N/Ga_N structures were fabricated and alloy composition and thickness of AlGa_N were optimized. Two dimensional electron gas in N-polar Ga_N/AlGa_N/Ga_N had a high density of two-dimensional electron gas with 1E13 cm⁻². InGa_N channel could enhance the electron density. When In_N alloy composition of was 0.11, electron concentration was twice.

研究分野：結晶工学

キーワード：変調分光 窒化物半導体 分極電界 有機金属気相成長

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

低炭素社会実現に向けて、既存デバイスの省エネルギーデバイスによる代替が求められている。特に高エネルギーの光や電子を扱うデバイスの高効率化に向けて、窒化物半導体や酸化物半導体を含む新規材料の開発が進められている。これらの材料は、半導体としての性質を示す一方、強い誘電体の性質を併せ持つ材料である。具体的には、材料自身がもつ自発分極や、歪により発生する分極を生じ、ヘテロ接合界面に巨大な分極不連続が発生する。分極不連続は固定電荷(以下、分極固定電荷と呼ぶ。)として振る舞い、巨大な電界(以下、分極電界と呼ぶ。)を誘起する。デバイス中のキャリアはこの分極固定電荷および分極電界に強く影響を受けるため、分極は性能を決定づける主要因となる。窒化物半導体デバイスを例に挙げると、InGa_N/Ga_N量子井戸を用いた発光デバイスでは、InGa_N活性層内に1 MV/cm以上の強い分極電界を生じ電子と正孔を空間的に分離するため、内部量子効率の低下を招く。AlGa_N/Ga_N電子デバイスでは、 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 程度の分極固定電荷がヘテロ界面近傍に発生し、電子を引き寄せ高密度かつ高移動度の二次元電子ガスを形成する。このような巨大な分極を有する材料系においてデバイスの性能を向上させるためには、界面の固定電荷を考慮した素子構造設計が必須である。分極固定電荷の密度は自発分極の大きさと圧電定数から見積もることができるが、ヘテロ界面に誘起される電荷は歪や点欠陥により容易に変わるため、計算から予測される結果と実験的に得られる結果は必ずしも一致しない。

2. 研究の目的

巨大な分極を有する半導体デバイスの性能向上に向けて、デバイス動作時に極めて近い状態で分極電界を定量評価し、バンドプロファイルを制御する技術を確認することを目的とする。まず、窒化物半導体の発光ダイオードやトランジスタに印加される内部電界を変調分光法を用いて定量的に観測し、デバイス特性との相関を明らかにする。次に、ヘテロ界面の電荷を制御するために分極ドーピングなどを用い、分極固定電荷密度を制御する方法を構築する。本研究を通じて、窒化物半導体や酸化物半導体など巨大な分極を有する材料を用いたデバイスの高性能化に向けた設計指針を得ることを目指す。

3. 研究の方法

窒化物半導体薄膜は有機金属気相成長法(MOVPE法)によりサファイア基板上またはGa_N基板上に成長させた。分極電界の効果を調べるために、成長面方位の異なるGa_N薄膜を結晶成長させ、その上にInGa_N/Ga_N光デバイス構造やAlGa_N/Ga_N電子デバイス構造を成膜した。特に、分極電界が最大となり電界の向きが逆方向にかかるデバイスを作製するために、Ga極性Ga_NおよびN極性Ga_Nをサファイア基板上へ成長させた。サファイア基板上へのGa_N薄膜成長において、アンモニアガスの先行供給の有無により極性を制御できることが分かっている。本研究ではこの手法を用いた。さらに、分極電界の大きさが異なる面方位として、(1-101)Ga_N上にも同様の構造を成長させた。この面方位の結晶成長を行うために、自立Ga_N基板を斜めに切り出して作製した(1-101)Ga_N基板を用いた。

はじめに、InGa_N/Ga_N多重量子井戸を発光層としたLED構造において井戸層および障壁層にかかる内部電界の定量的評価を行った。サファイア基板上に成長させたGa極性Ga_Nテンプレート、N極性Ga_Nテンプレート、および、(1-101)Ga_N基板を成長用基板として用い、n型Ga_N、5周期のInGa_N/Ga_N多重量子井戸、p型Ga_Nの順に結晶成長した。InGa_NのIn_Nモル分率はおよそ0.2程度とした。成長方位によって最適な成長条件が異なるため、それぞれの成長方位ごとに温度やV/III比を最適化した。作製した多重量子井戸の混晶組成および膜厚はX線回折測定により求めた。次に、フォトリソグラフィ、ドライエッチング、電子線蒸着等によりp型Ga_NにNi/Au電極を形成し、n型Ga_NにTi/Al/Ni/Au電極を形成した。内部電界の評価にあたり、デバイス動作状態に最も近い状態でかつ非破壊で測定可能なことから変調分光法を用いた。試料に交流電圧を重畳した直流電圧を印加し、単色光を試料に照射し反射信号を得る。反射信号の位相と周期から内部電界の方向と大きさを求めた。

次に、InGa_N/AlGa_N/Ga_Nからなるヘテロ接合電界効果トランジスタ(HFET)を作製し、分極効果による二次元電子ガス濃度の増強効果を調べた。サファイア基板上にN極性Ga_N薄膜を成長させ、その上にHFET構造を成膜した。事前準備として、下地層の残留電子濃度を低減させるために、N極性Ga_Nの成長条件と電子濃度との関係を調べ、残留電子濃度を $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ まで低減させた。成長後の試料に対し、ソースとドレインにTi/Au/Ni/Auを形成し、ゲートにSiN_x/Ni/AuのMOS電極を形成した。AlGa_N層やInGa_N層の混晶組成により分極の大きさを制御し、分極の大きさと誘起される二次元電子ガス濃度との関係を電圧-容量特性およびホール効果測定により調べた。

4. 研究成果

(1) InGa_N/Ga_N LEDの作製と内部電界の評価

InGa_N/Ga_N LEDの電界変調反射スペクトルを図1に示す。多重量子井戸を構成するInGa_NおよびGa_Nに起因した反射信号が得られた。電界変調反射スペクトルの位相や振幅は格子極性によって異なっていた。スペクトル形状をフィッティングし電界強度を求めると、格子極性によりGa_N障壁層とInGa_N井戸層の内部電界の向きと強度が異なることが実験的に確認でき

た。例として、ゼロバイアス時における InGaN 井戸内に印加される電界強度は、Ga 極性 GaN 上の InGaN では -1.3 MV/cm 程度、N 極性 GaN 上の InGaN では $+2.0 \text{ MV/cm}$ 程度、(1-101) GaN 上の InGaN では $+1.00 \text{ MV/cm}$ 程度と求められた。これらの傾向は、バンドシミュレータ SiLENSe を用いてシュレディンガー方程式とポアソン方程式を自己無頓着に解くことにより得られた計算結果と一致した。さらにバイアスと電界との関係も得られ、電流が流れ始める $+2 \text{ V}$ 以下の範囲における電界を実験的に調べることができた。

(2) InGaN/AlGaIn/GaN HFET の作製と二次元電子ガス濃度の評価

GaN/AlGaIn/GaN HFET 構造では、AlGaIn の混晶組成および膜厚が大きいときにクラックが発生するため、クラックの生じない組成および膜厚範囲で構造最適化を試みた。その結果、AlN モル分率 0.32、膜厚 25 nm 程度までクラックのない膜が得られた。電極を形成しトランジスタ動作を得ることができた。作製した試料の電子濃度とホール移動度の温度依存性を図 2 に示す。室温における二次元電子ガス濃度は $1.8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 、移動度は $1124 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ だった。

次に、最上層の GaN に In を添加し、電子濃度の増加を試みた。最上層の GaN を InGaN に置き換えると、圧縮歪に起因した圧電分極が印加される。圧電分極により、InGaN/AlGaIn 界面の分極不連続量が増加し、より電子を引き寄せることができる。InGaN の混晶組成が 0 から 0.11 の InGaN/AlGaIn/GaN 構造を成長し、二次元電子ガス濃度をホール効果測定により評価した。InN モル分率とキャリア濃度の関係を図 3 に示す。InGaN 中の InN モル分率の増加に伴い電子濃度が増加し、InN モル分率 0.11 の時に電子濃度が 2 倍程度となった。よって、分極不連続量の増加に伴い誘起されるキャリア濃度が増加することが示された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 6 件)

K. Prasertsuk, T. Tanikawa, T. Kimura, S. Kuboya, T. Suemitsu, T. Matsuoka, N-polar GaN/AlGaIn/GaN metal-insulator-semiconductor high-electron-mobility transistor formed on sapphire substrate with minimal step bunching, Appl. Phys. Express, 査読有, 11, pp. 015503-1-4 (2018) DOI: 10.7567/APEX.11.015503.

T. Tanikawa, K. Shojiki, R. Katayama, S. Kuboya, T. Matsuoka, Y. Honda, H. Amano, Absolute

Technique for Measuring Internal Electric Fields in InGaN/GaN Light-Emitting Diodes by Electroreflectance Applicable to All Crystal Orientations, Appl. Phys. Express, 査読有, 10, pp. 082101-1-4 (2017) DOI: 10.7567/APEX.10.082101.

T. Tanikawa, S. Kuboya and T. Matsuoka, Control of Impurity Concentration of Undoped N-polar (000-1) GaN Grown by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy, Phys. Status Solidi B, 査読有, 254, pp. 1600751-1-4 (2017) DOI: 10.1002/pssb.201600751.

J. Yoo, K. Shojiki, T. Tanikawa, S. Kuboya, T. Hanada, R. Katayama, T. Matsuoka, Polarity control of GaN grown on PLD-AlN/GaN templates by MOVPE, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 55, pp. 05FA04-1-4 (2016) DOI: 10.7567/JJAP.55.05FA04.

T. Tanikawa, K. Shojiki, R. Katayama, S. Kuboya, T. Matsuoka, Large Stokes shift in N-polar (000-1) InGaN/GaN multiple-quantum-well light-emitting diodes, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 55, pp. 05FJ03_1-05FJ03_4 (2016) DOI: 10.7567/JJAP.55.05FJ03.

R. Nonoda, K. Shojiki, T. Tanikawa, S. Kuboya, R. Katayama, T. Matsuoka, Effects of Mg/Ga and V/III source ratios on hole concentration of N-polar (000-1) p-type GaN grown by MOVPE, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 55, pp. 05FE01_1-05FE01_4 (2016) DOI: 10.7567/JJAP.55.05FE01.

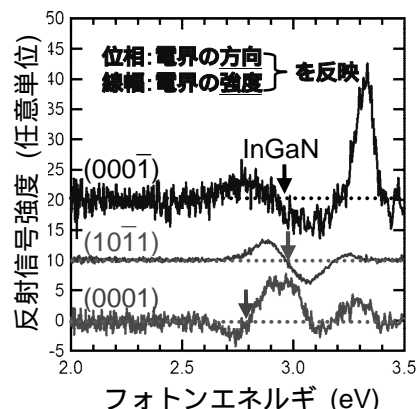


図 1 InGaN/GaN LED の電界変動反射スペクトル

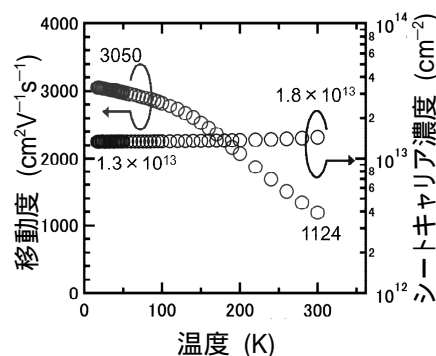


図 2 N 極性 GaN/AlGaIn/GaN HFET の電子濃度と移動度

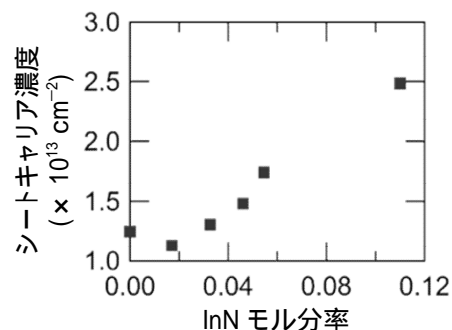


図 3 N 極性 InGaIn/AlGaIn/GaN HFET における InN モル分率と電子濃度との関係

[学会発表](計18件)

谷川智之, 山口智広, 藤川誠司, 佐々木拓生, 高橋正光, 松岡隆志, 「InGaN/GaN ヘテロ構造の RF-MBE 成長における格子緩和過程のその場観察: 格子極性の影響」, 第 47 回結晶成長国内会議 (JCCG-47), 01a-B01, 2018 年 11 月 1 日.

谷川智之, 松岡隆志, 「N 極性 GaNHEMT の結晶成長と貫通転位の三次元イメージング」, 応用物理学会 シリコンテクノロジー分科会 研究集会 テーマ「窒化物半導体パワーデバイスの研究動向」, -, 2017 年 11 月 16 日.

S. Tanaka, K. Prasertsuk, T. Kimura, T. Tanikawa, T. Suemitsu, T. Matsuoka, 「Improvement of heterointerface abruptness in N-polar InGaN/AlGaIn/GaN heterostructures grown by metalorganic vapor phase epitaxy」, 第 36 回電子材料シンポジウム, Fr1-13, 2017 年 11 月 10 日.

K. Prasertsuk, T. Tanikawa, T. Kimura, S. Kuboya, T. Suemitsu, T. Matsuoka, 「N-polar GaN MIS-HEMTs on Small Off-cut Sapphire Substrate for Flat Interface」, ワイドギャップ半導体光・電子デバイス第 162 委員会 平成 29 年度特別事業企画 委員会 100 回記念特別公開シンポジウム『ワイドギャップ半導体の基盤技術と将来展望』~パワー半導体を中心として~, P10, 2017 年 10 月 26 日.

K. Prasertsuk, T. Tanikawa, T. Kimura, S. Kuboya, T. Suemitsu, and T. Matsuoka, 「N-polar GaN MIS-HEMTs with Flat Interface Grown by Optimized MOVPE」, 電子情報通信学会, 26, 2017 年 5 月 26 日.

K. Prasertsuk, T. Tanikawa, T. Kimura, T. Suemitsu, and T. Matsuoka, 「N-polar GaN/AlGaIn/GaN MIS-HEMTs on sapphire substrates with small off-cut for flat interface by MOVPE」, Compound Semiconductor Week 2017, P1.43, 2017 年 5 月 15 日.

プラスラットスック キャットアウト, 三浦輝紀, 田中真二, 谷川智之, 木村健司, 窪谷茂幸, 末光哲也, 松岡隆志, 「N 極性 GaN HEMTs における MIS 構造導入によるリーク電流の低減」, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 15p-315-11, 2017 年 3 月 15 日.

K. Prasertsuk, T. Tanikawa, T. Kimura, A. Miura, S. Kuboya, T. Suemitsu, and T. Matsuoka, 「Reduction of gate leakage current in N-polar GaN metal-insulator-semiconductor high electron mobility transistors」, 2017 Annual Meeting of Excellent Graduate Schools for Materials Integration Center and Materials Science Center, P19, 2017 年 3 月 21 日.

J. Yoo, T. Tanikawa, S. Kuboya, T. Hanada, R. Katayama, and T. Matsuoka, 「InGaIn growth on AlN protection layer deposited ZnO substrates by metalorganic vapor phase epitaxy」, 2017 Annual Meeting of Excellent Graduate Schools for Materials Integration Center and Materials Science Center, P35, 2017 年 3 月 21 日.

K. Prasertsuk, T. Tanikawa, T. Kimura, A. Miura, S. Kuboya, T. Suemitsu, and T. Matsuoka, 「MOVPE Growth of N-polar GaN/AlGaIn/GaN Inverted HEMT Structures and Their Electrical Properties」, 3rd Intensive Discussion on Growth of Nitride Semiconductor (IDGN-3), I-IV, 2017 年 1 月 17 日.

T. Tanikawa, S. Kuboya and T. Matsuoka, 「Control of Impurity Concentration of Undoped N-polar (000-1) GaN Grown by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy」, International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN 2016), A2.9.03, 2016 年 10 月 6 日.

R. Nonoda, T. Tanikawa, K. Shojiki, S. Tanaka, S. Kuboya, R. Katayama, and T. Matsuoka, 「Improvement of Emission Wavelength Homogeneity in N-polar (000-1) InGaIn Grown by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy」, International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN 2016), A2.9.04, 2016 年 10 月 6 日.

R. Nonoda, T. Tanikawa, K. Shojiki, T. Kimura, S. Tanaka, S. Kuboya, R. Katayama and T. Matsuoka, 「Dependence of group-III source ratio on photoluminescence of N-polar (000-1) InGaIn grown by metalorganic vapor phase epitaxy」, 第 35 回電子材料シンポジウム, Th2-5, 2016 年 7 月 7 日.

T. Tanikawa, K. Shojiki, R. Nonoda, S. Kuboya, R. Katayama and T. Matsuoka, 「Localized emission from quantum-dot-like InGaIn islands formed in N-polar InGaIn/GaN multiple quantum wells」, 第 35 回電子材料シンポジウム, We2-19, 2016 年 7 月 6 日.

K. Prasertsuk, S. Tanaka, T. Tanikawa, K. Shojiki, T. Kimura, A. Miura, R. Nonoda, F. Hemmi, S. Kuboya, R. Katayama, T. Suemitsu, and T. Matsuoka, 「MOVPE Growth of N-polar GaN/Al_xGa_{1-x}N/GaN Heterostructure on Small Off-cut Substrate for Flat Interface」, Compound Semiconductor Week 2016, WeB1-3, 2016 年 6 月 29 日.

T. Tanikawa, K. Prasertsuk, A. Miura, S. Kuboya, R. Katayama, and T. Matsuoka, 「Influence of Growth Conditions on Transport Properties in Undoped N-polar (000-1) GaN Grown by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy」, The 4th International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications (LEDIA '16), LED3-6, 2016 年 5 月 19 日.

谷川智之, 正直花奈子, 野々田亮平, 窪谷茂幸, 片山竜二, 松岡隆志, 高宮健吾, 矢口裕

之，秋山英文，「N 極性 InGaN/GaN 量子井戸の微視的構造・光学特性」，第 8 回窒化物半
導体結晶成長講演会，Tu-9，2016 年 5 月 10 日。

野々田 亮平，谷川智之，正直花奈子，木村健司，窪谷茂幸，片山竜二，松岡隆志，「N 極
性(000-1)InGaN における局所発光の III 族原料供給比依存性」，第 8 回窒化物半導体結
晶成長講演会，Mo-2，2016 年 5 月 9 日。

〔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〕

特になし。

6 . 研究組織

(2)研究協力者

研究協力者氏名：松岡 隆志

ローマ字氏名：(MATSUOKA, takashi)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。