

令和元年6月13日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14110

研究課題名(和文)窒素極性面AlNの接触抵抗低減と分極効果トランジスタの実現

研究課題名(英文)Reduction of contact resistance and demonstration of nitrogen-polar AlN field-effect transistors

研究代表者

奥村 宏典(Hironori, Okumura)

筑波大学・数理工学系・助教

研究者番号：80756750

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、次世代高周波パワー素子として期待される、窒化アルミニウム(AlN)を主体としたトランジスタを作製した。AlNはバンドギャップが非常に大きい(6.1 eV)、高い接触抵抗と低いキャリア濃度が問題である。これらの問題克服のため、窒素極性面AlN層を用いた分極電界効果トランジスタ(POLFET)構造を採用した。

(i)有機金属気相成長法を用いて、窒素極性面AlNの高品質結晶成長に成功した。これは、AlN素子の展開可能性を広げる成果である。

(ii)AlN層中の不純物濃度を制御することで、窒素極性面AlN層を用いたFET動作に世界で初めて成功し、100mA/mmを超える動作電流を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、AlNの物性を活かした高耐圧素子の実現を目指す、実用的な研究である。時には絶縁体にも分類される、超ワイドバンドギャップ半導体のAlNを用いた素子を作製することは、半導体物性の物理限界を知る研究になり、学術的に大きな意義がある。本研究により、高性能AlNトランジスタを実現できたことで、新しい高耐圧素子用材料の分野開拓および普及に大きく貢献できると期待する。

研究成果の概要(英文)：In this work, we aimed to develop Aluminum-nitride (AlN) based electrical devices, which have attracted much attention for high-frequency and high-power applications.

AlN-based devices have suffered from the high contact resistances and low carrier concentrations because of the large band-gap of AlN (6.1 eV). To solve these issues, we challenged to fabricate the new structure of nitrogen-polar AlN polarization field-effect transistors (POLFETs).

(i) High crystalline-quality AlN films with a nitrogen-polar orientation were grown by metal-organic vapor-phase deposition system.

(ii) We firstly achieved the demonstration of nitrogen-polar FETs by controlling the unintentionally doped impurities.

研究分野：窒化物半導体の結晶成長と電子素子作製

キーワード：パワーデバイス 窒化物半導体 結晶成長 窒素極性面 電界効果トランジスタ 有機金属気相成長 接触抵抗

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

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、既に実用化が始まっている。

現在、市販されている GaN 系電子デバイスは、AlGa_xN/GaN 構造を有する高電子移動度トランジスタ(HEMT)である。GaN-HEMT は、 piezoelectric 分極と自発分極によって、AlGa_xN/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と、不純物無添加による電子の高い移動度により、GaN-HEMT は高速動作が可能となる。近年、デバイスの高出力化に向けて、窒化アルミニウム(AlN)を含む高 Al 組成 AlGa_xN を用いた HEMT が注目されている。AlN は、GaN と比較して絶縁破壊電界強度が 5 倍高く、無線通信の更なる大容量化が期待できる。しかし、絶縁体に近い AlN は、デバイス作製技術が確立されておらず、AlN を主体とするトランジスタの動作報告は限られている。特に、AlN の接触抵抗が高く、且つキャリア濃度が小さいため、高い動作電流を持つデバイスの実現していない。

2. 研究の目的

本研究では、AlN の物性を活かしつつ素子作製が比較的容易な窒素極性面 AlN 分極電界効果トランジスタ(POLFET)の作製(図 1)を提案する。窒素極性面を用いることで、表面層に Al 組成の低い AlGa_xN 層を設けられるため、接触抵抗の低減が可能である。窒素極性面では、AlN から Ga 組成を傾斜増大させた AlGa_xN を AlN 上に積層すると、自発分極により AlGa_xN 層全体に高いキャリア濃度($\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)を発生させることができる。POLFET 構造では、徐々に組成傾斜させるため、AlGa_xN の膜厚が数百 nm 程度でも格子緩和の恐れが少なく、結晶成長の観点で作製しやすい。以上の点から、窒素極性面 AlN-POLFET 構造を用いて、超高性能デバイス実現を目指す。

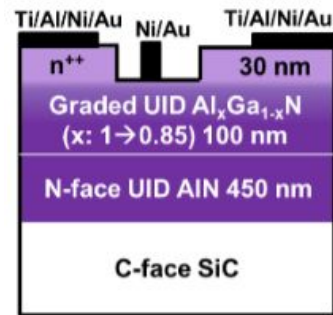


Fig. 1: Schematic figure of high-Al content AlGa_xN POLFET.

3. 研究の方法

(1) 窒素極性面 AlN の高品質結晶成長

有機金属気相成長(MOVPE)法を用いて、炭素面炭化ケイ素(SiC)基板の上に AlN を結晶成長させる。成長温度、V/III 比、基板のオフ角度を制御し、高品質 AlN 成長に適した条件を模索する。AlN 層の結晶性、表面平坦性、不純物濃度を、それぞれ X 線回折(XRD)装置、原子間力顕微鏡(AFM)、2 次イオン質量分析(SIMS)法により調べる。

(2) 窒素極性面 AlN デバイスの作製

窒素極性面 AlN 層上に、100 nm 厚さの高 Al 組成 AlGa_xN 層を組成傾斜して結晶成長させる。コヒーレント成長可能な Al 組成を模索し、得られた AlGa_xN/AlN 構造を用いて、POLFET を作製する。AlGa_xN 層の格子緩和の有無は、逆格子空間マッピング(RSM)により評価する。POLFET の電気的特性評価として、電流電圧(*I-V*)特性と容量電圧(*C-V*)測定を行う。

(3) 接触抵抗低減による AlN デバイスの高性能化

デバイス性能を律速する最大懸念は、高い接触抵抗である。電極下に高濃度 Si ドープした n⁺-AlGa_xN 層を設ける、またはチャネル層までエッチングを行うことで、接触抵抗低減を図る。得られた知見を下に、高性能 AlN デバイスを作製する。

4. 研究成果

(1) 窒素極性面 AlN の高品質結晶成長

MOVPE 法により C 面 4H-SiC 基板の上に AlN の結晶成長を行った。SiC 基板のオフ角度は $\langle 1-100 \rangle$ 方向に 4 度ある。異なる V/III 比で成長した AlN 層の表面モフォロジを図 2 に示す。V/III 比が高いほど、ステップバンチングが促進され、表面荒れが大きくなっているのが分かる。一方で、V/III 比=100 では、3 次元成長が生じ、表面荒れが大きく、結晶性も悪かった。

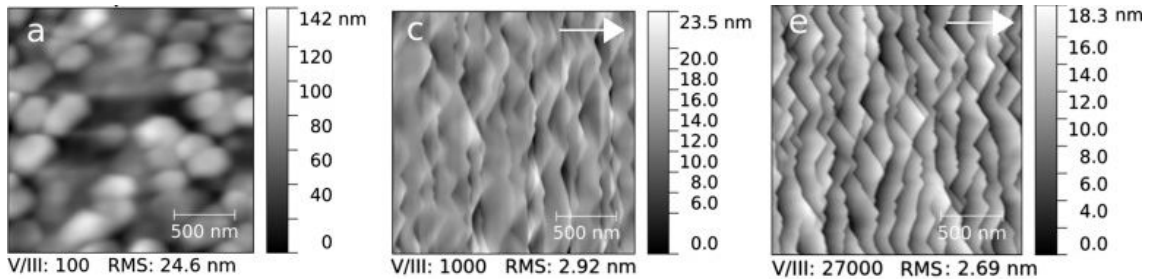


Fig. 2: Surface morphology of N-polar AlN films grown with various V/III ratios.

異なる成長温度で成長した AlN 層の結晶性を比較した。成長温度が高いほど結晶性に優れ、1165 度成長における AlN 層の(002)対称面および(102)非対称面 XRC 半値幅は、それぞれ 220 秒と 510 秒であった。

AlN 層の結晶性に対する SiC 基板のオフ角度依存性を調べた。オフ角度が 1 度および 4 度である SiC 基板の上に成長した AlN 層の表面モフォロジを図 3 に示す。オフ角度を低減することで、ステップバンチングが抑制され、平坦な表面が得られた。それに伴い、結晶性も改善され、1 度オフ基板上 AlN 層の(002)対称面および(102)非対称面 XRC 半値幅は、それぞれ 200 秒と 390 秒であった。現時点で最も結晶品質の高い窒素極性面 AlN 試料の一つである。

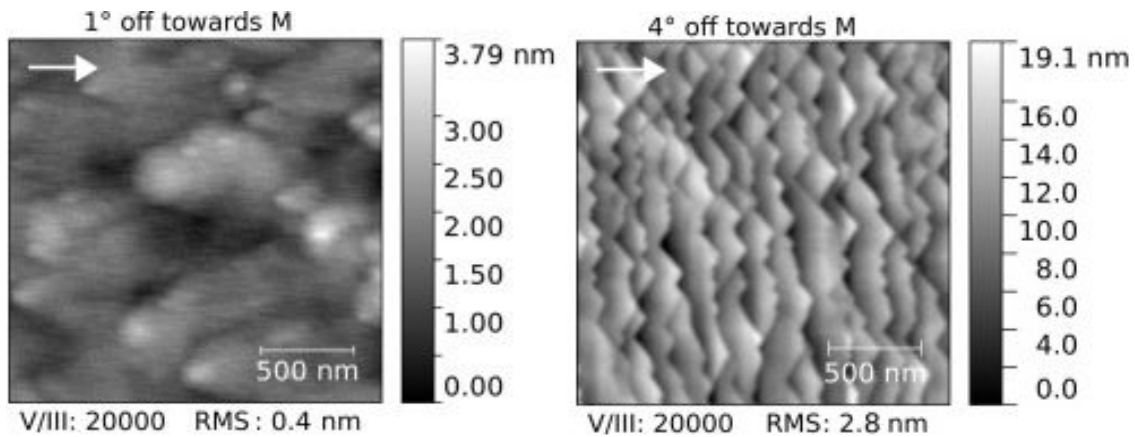


Fig. 3: Surface morphology of N-polar AlN films grown on SiC substrates with various off angles.

成長した窒素極性面 AlN 層中の不純物濃度を調べたところ、シリコンが意図せず混入することが分かった。Si 濃度は、V/III 比との関連性は小さかったが、成長温度には大きく影響した。1150 度成長時は $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の Si が検出された。不純物添加をしていないにもかかわらず、1150 度で成長した AlN 層は、電気伝導性を示した。AlN を 1050 度で成長した場合、Si 濃度は 10^{16} cm^{-3} 以下まで低減でき、優れた絶縁性を示した。

(2) 窒素極性面 AlN デバイスの作製

窒素極性面 AlN デバイスとして、窒素極性面 AlN 層をチャンネルとした電界効果トランジスタ(MESFET)を作製した。デバイス構造と電流電圧特性を図 4 に示す。AlN チャンネル層中の Si 濃度は $6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である。結晶性向上のため、成長初期は高温(1150 度)で成長しているが、下地層からのリーク電流を低減するため、低温(1050 度)バッファ層を設けている。メサ構造により、素子分離を行っている。リーク電流は 100 pA/mm 以下である。ドレイン電流が小さいものの、ゲート電圧によりドレイン電流を制御できた。これは、窒素極性面 AlN トランジスタの世界初動作である。ドレイン電流の増大には、接触抵抗の低減が不可欠である。

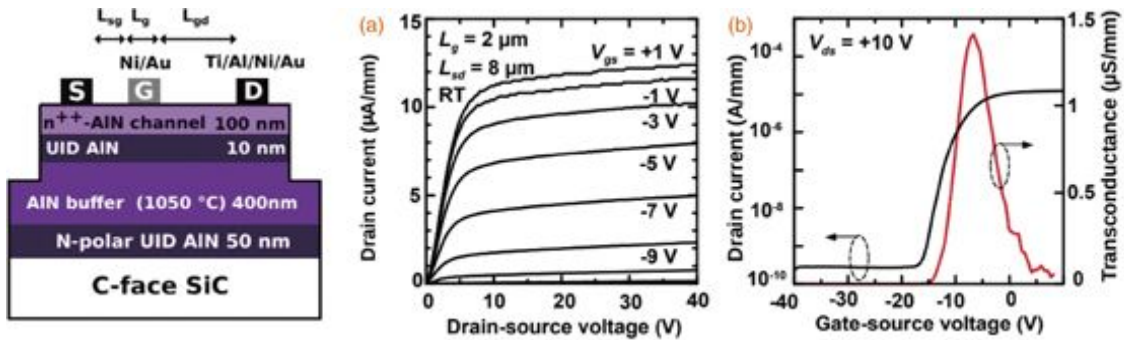


Fig. 3: Schematic figure of N-polar AlN MESFET, DC output and transfer characteristics.

窒素極性面 AlN-POLFET(図 1)を作製した。AlGa_xN 層の再表面における Al 組成は 80% であり、AlN に対してコヒーレントに成長していた。AlN 下地層の詳細は図 3 と同様の構造になっており、リーク電流は 100 pA/mm 以下である。AlGa_xN 層に不純物を添加していないが、電流が流れることを確認した。分極によるキャリア誘起は、窒素極性面高 Al 組成 AlGa_xN 層では初めての成果である。Al 組成を 70%にしたところ、AlGa_xN 層が格子緩和し、AlGa_xN 層中に電流が流れなかった。シートキャリア濃度を制御するには、AlGa_xN 層の Al 組成と膜厚の制御が非常に重要である。

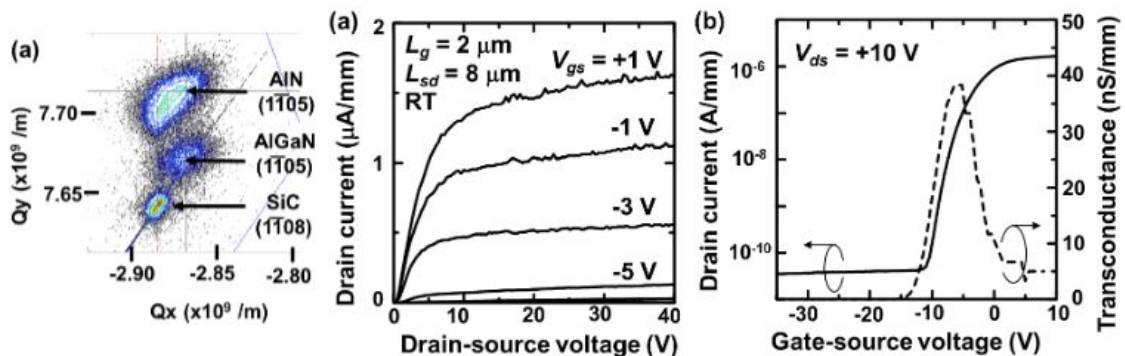


Fig. 4: RSM of graded AlGa_{1-x}N grown on N-polar AlN and *I*-*V* characteristics of AlGa_{1-x}N POLFETs.

(3) 接触抵抗低減による AlN デバイスの高性能化

基本的なデバイス構造は先の AlN-POLFET と同様のまま、接触抵抗を低減するため、ソース/ドレイン電極下をチャンネル層までエッチングした(図 5 参照)。このプロセスによりドレイン電流は 2 桁以上増大した。さらに、ゲート電極下に Al₂O₃ 酸化膜を挿入することで、100 mA/mm を超えるドレイン電流

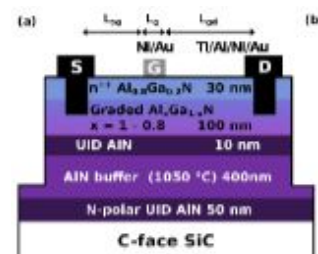


Fig. 5: Schematic figure of improved AlGa_{1-x}N POLFETs.

を有する高 Al 組成 AlGa_N トランジスタ動作に成功した。この値は、現在、高 Al 組成 AlGa_N をチャンネルとするトランジスタで最も高いドレイン電流である。

上記(1)~(3)の通り、当初計画通り、2年間で高い動作電流を持つ高 Al 組成 AlGa_N トランジスタ動作に成功した。しかし、接触抵抗が依然高く、オーミック性接触が得られていない。電極構造や電極下のデバイス構造を工夫することで、更なる高性能化が期待できる。

窒化物半導体以外でバンドギャップの大きい半導体として、(AlGa)₂O₃ がある。比較検討のためデバイスを作製してみたところ、(Al_{0.15}Ga_{0.85})₂O₃ 層において、オーミック性接触が得られた。(AlGa)₂O₃ は、AlGa_N と同様、パワーデバイスとして将来有望な半導体材料である。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

1. H. Okumura, Y. Kato, T. Oshima, T. Palacios, “Demonstration of lateral field-effect transistors using Sn-doped β -(AlGa)₂O₃ (010)”, Jpn. J. Appl. Phys. 査読有 **58**, SBBD12 (2019). DOI: 10.7567/1347-4065/ab002b.
2. H. Okumura, “Fabrication of an AlN ridge structure using inductively coupled Cl₂/BCl₃ plasma and a TMAH solution”, Jpn. J. Appl. Phys. 査読有 **58**, 026502 (2019). DOI: 10.7567/1347-4065/aaf78b.
3. J. Lemettinen, H. Okumura, T. Palacios, S. Suihkonen, “N-polar AlN buffer growth by metal-organic vapor phase epitaxy for transistor applications”, Appl. Phys. Exp. 査読有 **11**, 101002 (2018). DOI: 10.7567/APEX.11.101002.
4. J. Lemettinen, H. Okumura, I. Kim, C. Kauppinen, T. Palacios, S. Suihkonen, “MOVPE growth of N-polar AlN on 4H-SiC: Effect of substrate miscut on layer quality”, J. Cryst. Growth 査読有 **487**, 12-16 (2018). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2018.02.013.
5. J. Lemettinen, H. Okumura, I. Kim, M. Rudzinski, J. Grzonka, T. Palacios, “MOVPE growth of nitrogen-and aluminum-polar AlN on 4H-SiC”, J. Cryst. Growth 査読有 **487**, 50-56 (2018). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2018.02.020.
6. H. Okumura, S. Suihkonen, J. Lemettinen, A. Uedono, Y. Zhang, D. Piedra, T. Palacios, “AlN metal-semiconductor field-effect transistors using Si-ion implantation”, Jpn J. Appl. Phys. 査読有 **57**, 04FR11 (2018). DOI: 10.7567/JJAP.57.04FR11.

〔学会発表〕(計 7 件)

1. H. Okumura, J. Lemettinen, S. Suihkonen, T. Palacios, “Demonstration of Nitrogen-face AlN-based polarization field-effect transistors”, Int. Workshop on Nitride Semiconductor (2018).
2. H. Okumura, Y. Kato, T. Oshima, T. Palacios, “Demonstration of beta-(AlGa)₂O₃ (010) metal-semiconductor field-effect transistors with high breakdown voltage over 900 V”, 2018 Int. Conf. Solid State Devices and Materials (2018).
3. H. Okumura, J. Lemettinen, S. Suihkonen, T. Palacios, “Nitrogen-face AlN-based field-effect transistors”, 45th Int. Sym. Compound Semiconductors, 30th Int. Conf. Indium Phosphide and Related Materials, Compound Semiconductor Week (2018).
4. H. Okumura, S. Suihkonen, J. Lemettinen, A. Uedono, T. Palacios, “AlN

metal-semiconductor field-effect transistors using Si-ion implantation”, Material Research Society Fall meeting (2017).

5. H. Okumura, S. Suihkonen, J. Lemettinen, A. Uedono, T. Palacios, “AlN metal-semiconductor field-effect transistors using Si-ion implantation”, International Conference on Solid State Devices and Materials (2017).
6. H. Okumura, S. Suihkonen, T. Palacios, “Electrical Properties of Si-Ion Implanted AlN”, 12th Int. Conf. Nitride Semiconductors (2017).
7. J. Lemettinen, H. Okumura, T. Palacios, S. Suihkonen, “MOVPE growth of nitrogen-polar AlN on C-face 4H-SiC with miscut”, 12th Int. Conf. Nitride Semiconductors (2017).

〔その他〕

ホームページ等

<https://sites.google.com/view/okumura>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

上殿 明良 (筑波大学 数理物質系 教授)

UEDONO, Akira

大島 孝仁 (佐賀大学 理工学部 准教授)

Oshima, Takayoshi

Tomas Palacios (MIT 大学, Electrical engineering and Computer Science, 教授)

Sami Suihkonen (Aalto 大学, Electronics and Nanoengineering, Scientist)

Anelia Kakanakova (Linkoping 大学, Physics Chemistry and Biology, 准教授)