

一般セッション(ポスター講演) | 15 結晶工学：15.4 III-V族窒化物結晶

2025年3月14日(金) 13:30 ~ 15:30 皿 P05 (森戸記念体育館)

[14p-P05-1~12] 15.4 III-V族窒化物結晶

[14p-P05-1]

AlN/GaNにおける混晶化機構の解明

○(M1)藤田 大輝¹、小田 将人¹、寒川 義裕² (1.和歌山大シス工、2.九州大応力研)

[14p-P05-2]

ナノプレート選択成長法によるSi(100)ナノインプリント基板全面への規則配列窒化物ナノコラム成長

○織間 裕悟¹、星野 航太¹、富樫 理恵^{1,2}、岸野 克巳^{1,2} (1.上智大理工、2.上智大ナノテク)

[14p-P05-3]

ステップレス構造LEDを用いたマイクロLEDフィルムの作製

○松井 壺渡¹、神田 稜太¹、西川 敦²、Loseing Alexander²、関口 寛人¹ (1.豊橋技大、2.ALLOS)

[14p-P05-4]

p-AlGaIn/n-ZnOトンネル接合層を有するAlGaIn LEDの作製と評価

○(M2)小島 苑珠¹、浮田 駿¹、田尻 武義¹、内田 和男¹ (1.電通大)

[14p-P05-5]

AlGaIn/GaNヘテロ構造を用いたUVセンサーの作製と評価

○白須 翔¹、森田 廉¹、藤岡 洋²、前田 就彦¹ (1.東京工科大工、2.東大生研)

[14p-P05-6]

THz-TDSEによるAlGaIn/GaN-HEMTの非接触・非破壊電気特性測定 of 検討

○藤井 高志^{1,2}、山田 大進¹、岩本 俊志²、荒木 努¹ (1.立命館大学、2.日邦プレジジョン)

[14p-P05-7]

陽極酸化順バイアス条件および逆バイアス条件にて電気化学的通電をしたAlGaIn/GaNヘテロ構造の電気伝導特性

○森田 廉¹、安藤 陸¹、福井 駿¹、須田 順子¹、藤岡 洋²、前田 就彦¹ (1.東京工科大工、2.東大生研)

[14p-P05-8]

陽極酸化順バイアス条件および逆バイアス条件にて電気化学的通電をしたn-GaNの電気伝導特性

○安藤 陸¹、森田 廉¹、井浦 隆斗¹、李 照北¹、須田 順子¹、神尾 岳¹、藤岡 洋²、前田 就彦¹ (1.東京工科大工、2.東大生研)

[14p-P05-9]

プラズマLPE法によるGaN層の成長 (III)

○廣瀬 大輝¹、中川 治紀¹、三根 秀斗¹、吉田 圭佑¹、篠田 宏之¹、六倉 信喜¹ (1.東京電機大工)

[14p-P05-10]

窒化ガリウム結晶内部の点欠陥に対する塩素終端構造の電子状態解析

○山岸 佑真¹、屋山 巴¹、本田 徹¹ (1.工学院大)

[14p-P05-11]

MOVPE法で作製したGaNナノ結晶光触媒による水素生成

○次六 寛明¹、影島 洋介²、錦織 広昌² (1.セイコーエプソン(株)、2.信州大)

[14p-P05-12]

光無線給電システムに向けたGalN系受光素子における結晶品質改善に向けた検討

○石田 颯汰朗¹、小嶋 智輝¹、江川 孝志¹、三好 実人¹ (1.名工大)

AlN/GaN における混晶化機構の解明

Elucidation of the atom mixing mechanism in AlN/GaN

和歌山大シスエ¹, 九州大応力研² ◦(M1) 藤田 大輝¹, 小田 将人¹, 寒川 義裕²

Wakayama Univ.¹, Kyushu Univ.², ◦Daiki Fujita¹, Masato Oda¹, Yoshihiro Kangawa²

E-mail: s256235@wakayama-u.ac.jp

近年、次世代パワーデバイス材料として優れた物性値をもつ GaN, AlN が注目されている。これらを用いたヘテロ接合により、高出力 HEMT(高電子移動度トランジスタ)の開発が可能となり、通信基地局やレーダー等の電波送信部への応用が期待される。しかし、GaN と AlN の原子間隔の差に起因して GaN と AlN の界面に欠陥や歪みが生じる。また、発生した欠陥を介した原子の拡散によって混晶化が起こることが問題となっている。ヘテロ構造を応用したデバイスの性能において、欠陥の存在や原子拡散によって決まる界面の品質は重要なファクターとなることから、本研究では、AlN/GaN 界面における混晶化機構について調べることを目的としている。

以前、我々は DFT 計算(密度汎関数理論に基づく第一原理計算)によって、GaN における複合空孔欠陥の拡散反応障壁を求め、複合空孔欠陥が GaN 中を移動することを明らかにした[1]。本研究では、この複合空孔欠陥の移動を AlN/GaN の界面に適用する。c 軸方向を成長方向とした AlN/GaN モデルを作成し、格子定数を GaN のものにした AlN on GaN モデルと格子定数を AlN のものにした GaN on AlN モデルの 2 種類を対象とした。さらに、III 族極性における結晶成長と V 族極性における結晶成長を表す 2 種類をそれぞれのモデルで考え、計 4 種類のモデルにおいてそれぞれ図 1 に示すような界面近傍に位置する複合空孔欠陥($V_{\text{Ga or Al}}-V_{\text{N}}$)の形成エネルギーを算出した。エネルギーを算出する際、構造最適化を行い、安定となる原子配置におけるエネルギーを算出した。全ての計算は PHASE/0 を用いた。k 点メッシュは $3 \times 3 \times 1$ 、カットオフエネルギーは 30 Ry、構造最適化における力の最大値の閾値は 0.9×10^{-3} Hartree/Bohr とした。拡散反応障壁の評価には CI-NEB 法を用いる。

図 2 に結果を示す。格子定数や成長面の極性によって界面に複合空孔欠陥が位置する場合におけるエネルギーが最小となる時と最大に近い値となるときがあり、両極端な傾向を示した。どの種類のモデルにおいても AlN 側に複合空孔欠陥が位置している際のエネルギーが大きいという傾向も見られた。講演では各位置における複合空孔欠陥の拡散反応障壁についても議論する。

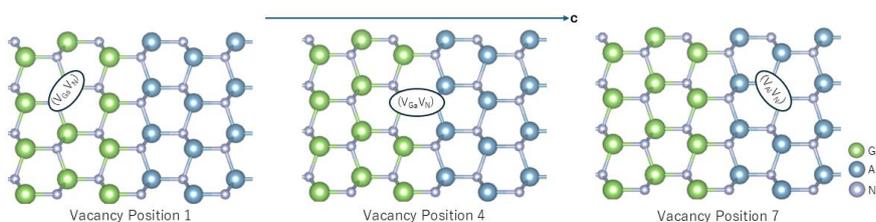


Figure 1 : Examples of complex vacancy defect locations near the interface.

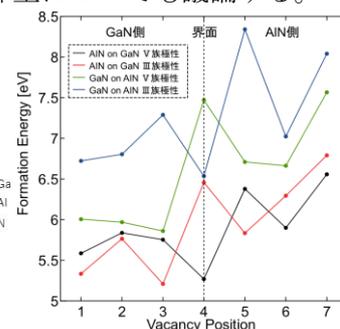


Figure 2 : Formation energy of complex vacancy defects.

[1] J. Nakamura, M. Oda, Y. Kangawa, Phys. Status Solidi B, **261**, 2400026(2024).

ナノテンプレート選択成長法による Si (100) ナノインプリント基板全面への規則配列窒化物ナノコラム成長

Growth of ordered nitride nanocolumns on the entire surface of a Si(100) nanoimprinted substrate via nanotemplate selective-area growth

上智大理工¹, 上智大ナノテク² ○(B)織間 裕悟¹, 星野 航太¹, 富樫 理恵^{1,2}, 岸野 克巳^{1,2}

Sophia Univ.¹, Sophia Nanotech. Res. Center², °Yugo Orima¹, Kota Hoshino¹,

Rie Togashi^{1,2}, Katsumi Kishino^{1,2}

E-mail: y-orima-3g5@eagle.sophia.ac.jp

はじめに: ナノコラム(NC)は直径数 10~数 100 nm の柱状結晶で、無転位性や格子歪緩和などのナノ結晶効果により優れた発光特性を示す。そして、Si 基板上に InGaN/GaN NC LED を作製することで、フリップチップボンディングによる駆動 IC チップへの低ダメージ転写や、安価で大面積な NC LED の実現につながる[1,2]。一般に、GaN の成長基板には c 軸配向して成長する Si(111)が用いられ、我々のグループはナノテンプレート選択成長法[2]により、AlN/Si(111)基板上への均一な GaN NC の成長に成功した。さらに、厚膜 InGaN 活性層を成長させ、純色性の高い赤色の PL 発光を得た[3]。一方、Si(100)は Si(111)と比較してエッチングが容易であり、Si(100)基板上に InGaN/GaN NC を成長できれば、Si プロセス技術を活かした NC LED の産業応用が期待できる。そこで、本研究ではナノインプリントパターンを用いて、ナノテンプレート選択成長法により AlN/Si(100)基板全面に InGaN/GaN NC の成長を行った。

実験・結果: スパッタ法により AlN が成膜された Si(100)基板全面に、ナノインプリントリソグラフィでパターンニングを行った。そして、パターン部分であるレジストをマスクに ICP ドライエッチングをすることで、三角格子配列、周期(L) = 280 nm のナノテンプレートを作製した。その後、RF-MBE 法により MEE-AlN/AlGaIn バッファ層を成長させ、2 インチ基板を 1/4 カットした基板上に n-GaN:Si NC を成長させた。Fig.1 に n-GaN 成長後の鳥瞰 SEM 像による面内分布を示す。Si(100)基板全面に独立した n-GaN NC の成長を確認した。得られた n-GaN NC 上に、InGaN/GaN の SL 構造を 0.5 nm/0.5 nm 周期で 25 ペア成長させ、InGaN/GaN MQW を活性層として 3 nm/12 nm 周期で 5 ペア成長させた。Fig.2 は成長結晶の室温 PL 発光スペクトルである。波長 609 nm, 半値幅 33.3 nm のシングルピーク発光が確認できた。詳細は当日議論する。

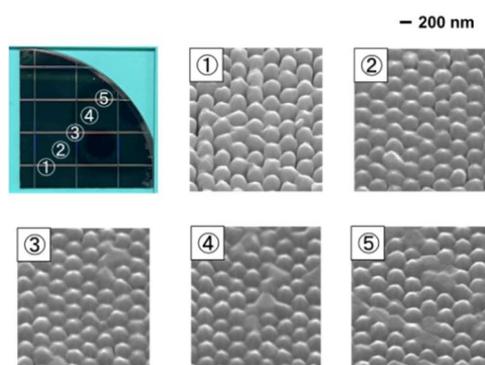


Fig. 1 Bird's-eye view SEM images of n-GaN NC grown on the AlN/Si(100) nanoimprinted substrate (L=280 nm).

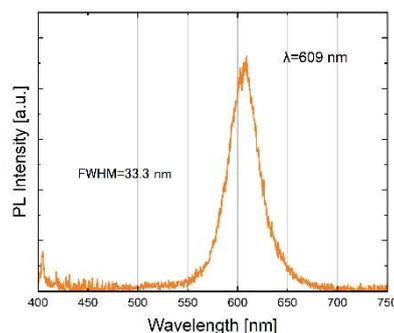


Fig. 2 Room temperature PL emission spectrum (405 nm laser excitation) of InGaN/GaN NC grown on the AlN/Si(100) substrate.

参考文献: [1] H. Hayashi, ..., K. Kishino, Phys. Status Solidi A **212**, 992 (2015). [2] K. Yamano and K. Kishino, Appl. Phys. Lett. **112**, 091105 (2018). [3] K. Hoshino, R. Togashi, and K. Kishino, Phys. Stat. Sol. B **261**, 2400064 (2024).

謝辞: ナノインプリント基板は (株) 協同インターナショナルにご提供いただいた。

ステップレス構造 LED を用いたマイクロ LED フィルムの作製

Fabrication of MicroLED film with step-less structure

豊橋技大¹, ALLOS²

松井 孝渡¹, 神田 稜太¹, 西川 敦², A. Loesing², 関口 寛人¹

Toyohashi Tech¹, ALLOS²

K. Matsui¹, R. Kanda¹, A. Nishikawa², A. Loesing², H. Sekiguchi¹

E-mail: sekiguchi@ee.tut.ac.jp

神経活動と行動の因果関係を捉えるために、神経活動を精密に制御できる光遺伝学手法が注目されている。そこで、我々はマイクロ LED 中空構造の作製技術と生体適合パリレンフィルムへの LED アレイ一括転写技術を確立することで、脳などの組織全体を覆うように取り付けて、目的の神経細胞のみに光を当て、その活動を自在に光操作できる小型のマイクロ LED フィルムデバイスを開発してきた。しかし、従来のマイクロ LED フィルム作製プロセスでは、一括転写後に半導体プロセスを用いてマイクロ LED の段差に金属配線を 3 次元的に形成するため、金属配線の段切れや曲げによる破断などの問題が生じていた。そこで、生体適合フィルム上に 2 次元金属配線を用意し、LED の電極金属と直接接合することで 3 次元金属配線を避けることを考えた。本研究では、LED の電極金属と電気配線の接合の歩留まりを高めるため、ステップレス LED 構造を検討し、マイクロ LED フィルムへの適用について検討したので報告する。

まずステップレス構造による LED デバイスの特性への影響について調査した。Fig.1(a) に従来のステップ構造をもつ LED とステップレス構造の LED の構造図を示す。ステップレス構造では、一部分だけ n-GaN 層までエッチングを行い、メサ上および n-GaN を覆うように n 型電極(Ti/Au)を蒸着した。Fig.2 にそれぞれの LED の電流-電圧特性を示す。ステップ構造、ステップレス構造ともに立ち上がり電圧 2.6 V 程度の明瞭な整流特性が観察され、両者に違いは観察されなかった。次に、2 次元金属配線上へのマイクロ LED アレイの転写法について検討する。Fig.3 に本研究で提案するマイクロ LED 転写プロセスを示す。熱剥離シートを用いてマイクロ LED アレイの中空構造を一括でピックアップする(Fig.3(a))。このままでは、LED 金属電極と金属配線を接合することはできないので、剥離温度の異なる別の熱剥離シートへと再度マイクロ LED アレイを一括転写する(Fig.3(b))。このようにすることで、マイクロ LED アレイの向きを上下反転させることが可能となり、LED 金属電極と金属配線を向かい合わせることができ(Fig.3(c))。フリップチップ接合装置により位置合わせをして貼り付ける。このとき、LED の p 型電極と n 型電極の高さを正確に揃えておく必要があるが、ステップレス構造では容易に再現性良く高さを合わせることができる。また単純に接合しただけでは接合しないため、接合部分となる LED 金属電極と金属配線上部には In 系合金を 50 nm ほど EB 蒸着法により用意してあり、接合時に 150°C で 5 分間加熱することで In 系合金が熔融し、金属接合が形成される。接合後の電流-電圧特性を評価したところ、接合前と違いのない明瞭な整流特性が観察され、明るい青色発光が観察された。本結果は、動物実験への応用に向けた安定したマイクロ LED フィルム作製の基盤技術になると考えられる。

参考文献: [1] H. Sekiguchi, *et al.*, *Appl. Phys. Express*, **15**, 046501 (2022).

謝辞: 本研究の一部は、科研費(23H01465, 24K21735)、キャノン財団、中部電気利用基礎研究振興財団の援助を受けて行われた。

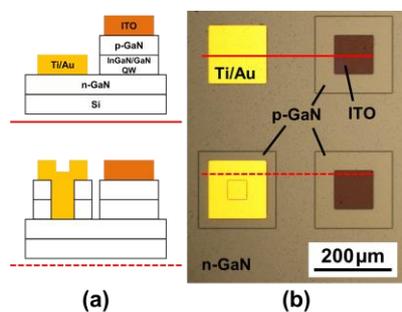


Fig.1 Microscopic and cross-sectional views of step structure and step-less structure n-electrode

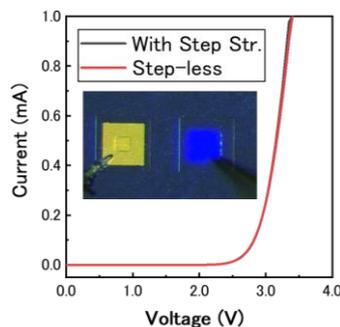


Fig.2 I-V characteristics of n-electrodes with step structure and step-less structure

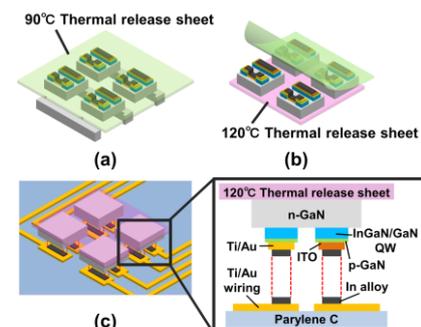


Fig.3 Joining process diagram using thermal release sheet and In alloy

p-AlGaN/n-ZnO トンネル接合層を有する AlGaN LED の作製と評価

Fabrication and Evaluation of AlGaN LED with p-AlGaN/n-ZnO Tunnel Junction Layer

電気通信大学, ○(M2)小島 苑珠, (D)浮田 駿, 田尻 武義, 内田 和男

University of Electro-Communications., S. Kojima, S. Ukita, T. Tajiri and K. Uchida

E-mail: k2331060@edu.cc.uec.ac.jp

AlGaN は、その組成によってバンドギャップを幅広く制御できる点や材料の安定性から深紫外 LED の材料としての応用が期待されている。p 型コンタクト層の電気特性改善に向けた手法の一つとして、p 型層の上に薄い n 型層を成膜し、トンネル接合を形成することによる、バンド間トンネリングを介した正孔注入の促進が検討されている[1-3]。これまでの研究でⅢ族窒化物半導体 LED に用いられてきたトンネル接合は窒化物半導体同士の接合が主であり、新規材料の利用には検討の余地がある[3-5]。本研究では、GaN と同じ結晶構造を持ち、かつ高濃度ドーピングが可能な ZnO に着目し、p-AlGaN とのトンネル層への応用可能性を検討した。p 型コンタクト層に p-AlGaN/n-ZnO トンネル接合を有した AlGaN LED を作製し、電気的特性の評価を行ったので報告する。

本研究で作製した LED の模式図を Fig.1(a)(b)に示す。c 面サファイア基板の上に AlN をバッファ層として、n-Al_{0.3}Ga_{0.7}N(1000nm)/p-Al_{0.3}Ga_{0.7}N(750nm)を MOVPE 法により成膜した。p 型ドーパントには Mg を使用し、RTA 装置を用いたアニールによって活性化を行なった。また、p 型コンタクト層として RF マグネトロンスパッタリング法(RF 電力 30W、基板温度 200℃、スパッタリング時間 15min/45min)によって n-ZnO 層(厚み 40nm/140nm キャリア濃度 2.33×10²⁰cm⁻³)を p-AlGaN 層上に成膜した。AlGaN LED のメサ構造の形成にあたってはフォトリソグラフィを用いてパターンを転写し、n-ZnO のエッチングには塩酸を用いたウェットエッチング、AlGaN のエッチングには Cl₂/BCl₃/Ar ガスを用いた反応性イオンエッチングを行なった。Fig.1 に示すように、メサ構造の形成後、n-AlGaN 層の上部に LED の下部電極として Ti/Al/Ti/Au を蒸着し、n-ZnO を上部電極として LED の電流-電圧特性の測定を行なったところ、Fig.2 のように整流性が確認された。

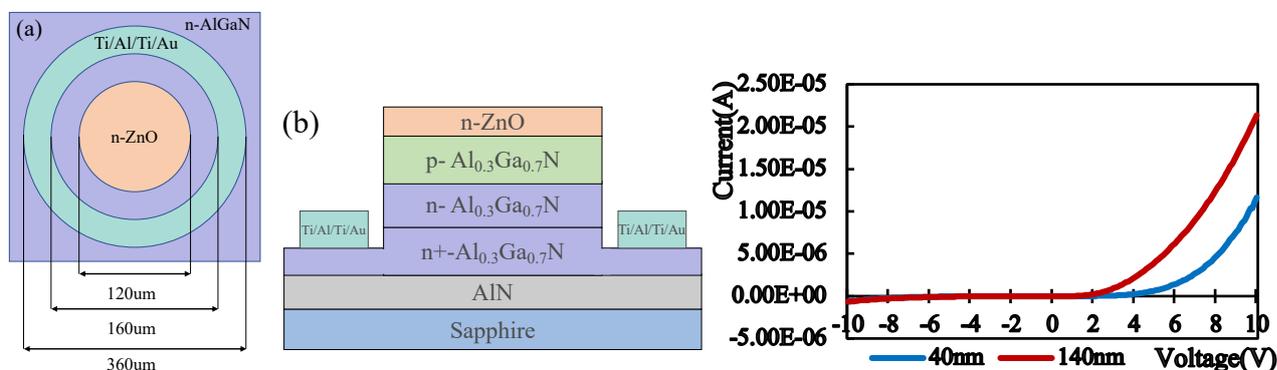


Fig.1 (a)Top views (b)Cross sections of the AlGaN LED

Fig.2 I-V Characteristics of the AlGaN LED

参考文献：[1] J. Simon, et al., PRL 103, 026801 (2009) [2] T. Takeuchi, et al., Semicond. Sci. Technol. 36, 063001 (2021). [3] Y. Zhang, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 58, SC0805 (2019). [4] T. Takeuchi, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 40, L861 (2001). [5] M. Malinverni, et al., Appl. Phys. Lett. 107, 051107 (2015).

AlGaN/GaN ヘテロ構造を用いた UV センサーの作製と評価

Fabrication and characterization of UV sensors

using AlGaN/GaN heterostructures

東京工科大学¹, 東京大学生産技術研究所²

°(M1)白須 翔¹, (M1)森田 廉¹, 藤岡 洋², 前田 就彦¹

Tokyo University of Technology¹, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo²

°Sho Shirasu¹, Ren Morita¹, Hiroshi Fujioka², Narihiko Maeda¹

E-mail: g51240230c@edu.teu.ac.jp

センサー応用等で電子空乏に近い AlGaN/GaN ヘテロ構造を活用することで感度の向上が期待できる場合がある。そのような応用を念頭に、これまでに我々は前述のヘテロ構造におけるオーミック構造の検討を行ってきた[1]。今回我々は、電子空乏に近い AlGaN/GaN ヘテロ構造を用いた紫外光(UV)センサーについて検討したので報告する。

Fig. 1 に今回作製した UV センサーのデバイス構造を示す。試料は、1.5 nm GaN cap/6 nm Al_{0.21}Ga_{0.79}N/2 μm GaN/Buffer/p-Si substrate なる試料を用いた。本構造へのオーミック電極構造としては、6 nm エッチングしてから電極を形成した構造を作製した[1]。オーミック電極は、20 nm Ti/80 nm Al/20 nm Ti/100 nm Au なる層構造を堆積した後、窒素雰囲気中でアニール (850 °C, 1 min.) することで形成した。UV センサーのゲートとして NiO を DC スパッタリングにより形成した。

UV 光は 365 nm の紫外光 LED を使用した。Fig. 2 にゲート形成前デバイス構造の UV 応答特性を示す。紫外光を照射しない状態でも電流が流れているのは少数のチャネル電子のためだと考えられる。紫外線を照射すると電流が増加しているのは紫外光より電子正孔対が形成されたためと考えられる。Fig. 3 に UV センサー(ゲート形成後)の UV 応答特性を示す。紫外光を照射しない状態で電流が非常に小さいのは NiO を堆積したことによりチャネルがほぼ空乏化したためだと考えられる。紫外光を照射すると電流が増加しているのは紫外光より電子正孔対が形成されたためと考えられる。このように、今回の作製構造が UV センサーとして機能していることが示された。

[1] 白須他, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 18a-P07-10 (2024).

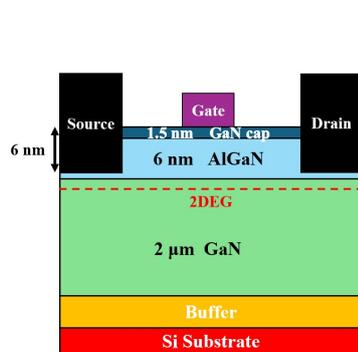


Fig.1 UV センサー構造

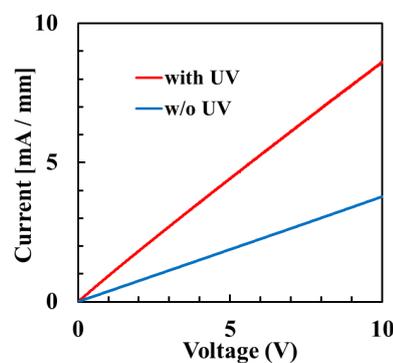


Fig. 2 ゲート形成前デバイス構造の

UV 応答特性

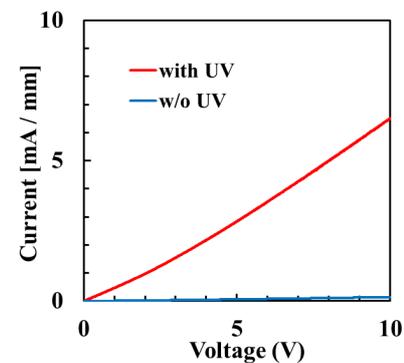


Fig. 3 UV センサーの

UV 応答特性

THz-TDSE による AlGaN/GaN-HEMT の非接触・非破壊電気特性測定の見直し

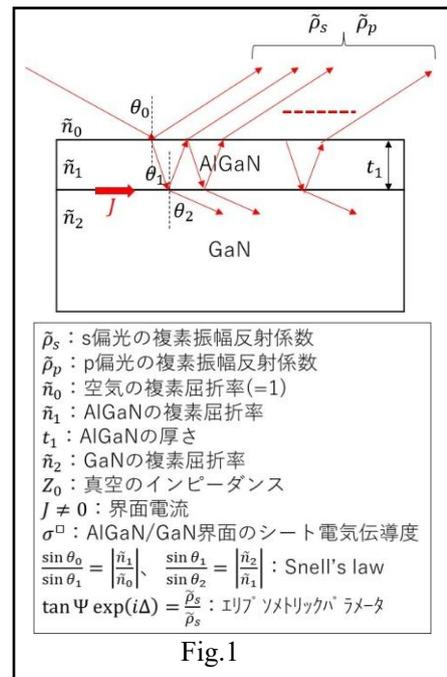
Study of Measuring Non-contact and Non-destructive Electrical Properties for AlGaN/GaN-HEMT using THz-TDSE

立命館大¹, 日邦プレジジョン² (B4)山田 大進¹, ○藤井 高志^{1,2}, 岩本 敏志², 荒木 努¹
Ritsumeikan Univ.¹, Nippo precision Co., Ltd², T. Yamada¹, ○T. Fujii^{1,2}, T. Iwamoto², and T. Araki¹
E-mail: tafujii@fc.ritsumei.ac.jp

我々は、THz 時間領域分光エリプソメトリー (THz Time-Domain Spectroscopic Ellipsometry: THz-TDSE) を用いて半導体エピタキシャル膜の電気特性 (抵抗率、キャリア濃度、移動度) と膜厚の非接触・非破壊測定を提案し、開発している[1]。この手法は、THz 周波数帯電磁波 (1~3THz、波長は 100~300 μ m) をサンプルに照射し、その反射光の s 偏光と p 偏光測定結果からエリプソメトリックパラメーター ($\tan \Psi$ 、 Δ) を求めるものである。一方で測定サンプルの層状構造をモデル化して Fresnel Model と Drude Model を適用してキャリア濃度や移動度などをパラメータとしてエリプソメトリックパラメータを計算し、測定値との比較により電気特性を求めている。

しかしながら、AlGaN/GaN-HEMT は AlGaN と GaN の界面に 2 次元電子ガスが存在しており、従来の Fresnel Model ではこの 2 次元電子ガスの取り扱いが難点であった。我々はグラフェンや GaN 極薄膜 (厚さ数 100nm 以下) の計測に関しては CI Model を提唱して解析している[2]。また、永井は従来の Fresnel Model の境界条件に界面電流の存在を加えたモデル (THz-Fresnel 式と称す) により基板表面上の極薄膜の解析を行っている[3]。我々の CI Model と永井の THz-Fresnel 式はモデルの結果としては等価である。

今回は AlGaN/GaN-HEMT の層構造モデルとの整合性がよい THz-Fresnel 式を採用してこの AlGaN/GaN-HEMT の電気特性についての検討を行った。Fig.1 に今回用いた HEMT の構造とパラメータを示す。通常用いる Fresnel Model では境界面において電流=0 としているが、HEMT では AlGaN/GaN 界面に電流が発生する。そのため THz-Fresnel 式を適用して振幅反射強度を求めた。その結果を Fig.2 に示す。比較のために通常の Fresnel 式をあわせて示す。最表面の空気と AlGaN の界面は従来の Fresnel 式を用い、これらにより得られた s 偏光、p 偏光の複素振幅反射係数 ($\tilde{\rho}_s$ 、 $\tilde{\rho}_p$) を用いて $\tan \Psi$ 、 Δ を計算し、THz-TDSE により AlGaN/GaN-HEMT の電気特性測定が可能かについての検討を行った。



$$\tilde{\rho}_{12,s} = \frac{\tilde{n}_1 \cos \theta_1 + Z_0 \sigma^\square - \tilde{n}_2 \cos \theta_2}{\tilde{n}_1 \cos \theta_1 + Z_0 \sigma^\square + \tilde{n}_2 \cos \theta_2}$$

$$\tilde{\rho}_{12,p} = \frac{(\tilde{n}_2 + Z_0 \sigma^\square \cos \theta_2) \cos \theta_1 - \tilde{n}_1 \cos \theta_2}{(\tilde{n}_2 + Z_0 \sigma^\square \cos \theta_2) \cos \theta_1 + \tilde{n}_1 \cos \theta_2}$$

AlGaN/GaN 界面の振幅反射係数

$$\tilde{\rho}_{12,s} = \frac{\tilde{n}_1 \cos \theta_1 - \tilde{n}_2 \cos \theta_2}{\tilde{n}_1 \cos \theta_1 + \tilde{n}_2 \cos \theta_2}$$

$$\tilde{\rho}_{12,p} = \frac{\tilde{n}_2 \cos \theta_1 - \tilde{n}_1 \cos \theta_2}{\tilde{n}_2 \cos \theta_1 + \tilde{n}_1 \cos \theta_2}$$

通常の Fresnel 式

Fig.2

[1] 藤井高志「次世代パワーエレクトロニクス of 課題と評価技術」 pp.127-138 (2022 年 S&T 出版)

[2] H. Watanabe et al., Phys. Status Solidi B **2024**, 2400017 (2024).

[3] M. Nagai et al., Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves **45**, 949 (2024)

陽極酸化順バイアス条件および逆バイアス条件にて 電気化学的通電をした AlGaN/GaN ヘテロ構造の電気伝導特性

Electrical properties of AlGaN/GaN heterostructures anodized by forward bias
and AlGaN/GaN heterostructures electrochemically energized by reverse bias

東京工科大学¹, 東京大学生産技術研究所²

°(M1)森田 廉¹, 安藤 陸¹, 福井 駿¹, 須田 順子¹, 藤岡 洋², 前田 就彦¹

Tokyo University of Technology¹, Institute of Industrial Science, the University of Tokyo²

Ren Morita¹, Riku Ando¹, Shun Fukui¹, Yoriko Suda¹, Hiroshi Fujioka², and Narihiko Maeda¹

E-mail: g512404351@edu.teu.ac.jp

近年、GaN 系デバイスの作製において、低損傷なエッチング技術の開発が注目される中、我々はこれまでに n-GaN を陽極酸化後にウェットエッチングする 2 段階ウェットエッチング法を提案してきた[1]。本研究では新規材料として活用することを念頭に、順バイアス(陽極酸化) および逆バイアスそれぞれで通電した AlGaN/GaN ヘテロ構造の X 線光電子分光(XPS)評価およびホール効果測定を行った。その結果、順および逆バイアスいずれの通電条件でも AlGaN の表面の酸化が確認され、また、いずれの通電条件でも電気伝導特性の変化が確認された。

AlGaN/GaN ヘテロ構造試料は、2 nm i-GaN/25 nm Al_{0.25}Ga_{0.75}N /1 nm AlN/300 nm i-GaN/Si substrate を用いた。10 mm 角の試料中央部 2×2 mm² に対して電解液(H₂SO₄ + H₃PO₄) 中にて 4 V(陽極酸化)および-1 V(逆バイアス)の条件で電気化学的通電を 60 min 行った。通電領域に対する XPS 評価の結果を Fig. 1 に示す。無通電試料よりも 4 V の試料では酸素組成の増加が確認され、また興味深いことに、逆バイアス(-1 V)ではさらに酸化されるという結果が得られた。高低温ホール効果測定(78~473 K)の結果を Fig. 2, 3 に示す。Fig. 2 よりホール移動度が無通電と比較して-1 V では低下し、4 V ではさらに低下していることがわかる。Fig. 3 より電子濃度は無通電と比較して 4 V では低下しており、-1 V では無通電と比較して僅かに増大していることがわかる。このように、AlGaN に対する逆バイアス条件(-1 V)での通電においても順バイアス条件(4 V)と同様に AlGaN 表面の酸化が生じており、順および逆バイアス条件いずれの通電においても電気伝導特性の変調が可能であることがわかった。機構は検討中である。

[1] Kiyoto et.al, JJAP 58 SCCD18 (2019).

[2] Kamio et.al, JJAP 62 110907 (2023).

[3] Kamio et.al, Phys. Status Solidi 2300585 (2024).

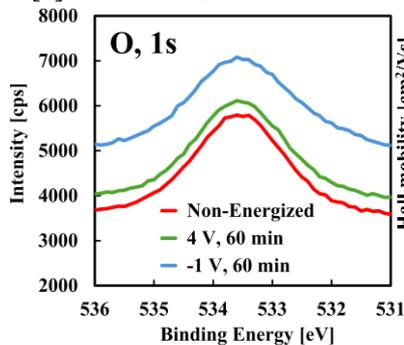


Fig. 1 XPS による酸素 1s 軌道ピーク

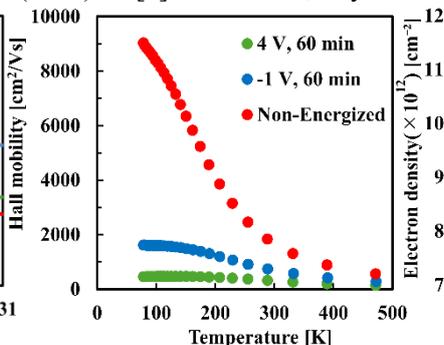


Fig. 2 ホール移動度の温度依存性

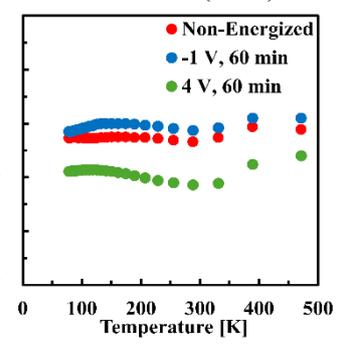


Fig. 3 ホール移動度の温度依存性

陽極酸化順バイアス条件および逆バイアス条件にて 電気化学的通電をした n-GaN の電気伝導特性

Electrical properties of n-GaN anodized by forward bias and n-GaN electrochemically energized by reverse bias

東京工科大学¹, 東京大学生産技術研究所²

°(M2)安藤 陸¹, 森田 廉¹, 井浦 隆斗¹, 季 照北¹, 須田 順子¹, 神尾 岳¹,
藤岡 洋², 前田 就彦¹

Tokyo University of Technology¹, Institute of Industrial Science, the University of Tokyo²

Riku Ando¹, Ren Morita¹, Ryuto Iura¹, Li Zhaobei¹, Yoriko Suda¹, Gaku Kamio¹,

Hiroshi Fujioka², and Narihiko Maeda¹

E-mail: g5123003ad@edu.teu.ac.jp

GaN 系デバイスの作製において、近年低速度かつ低損失なエッチング技術の開発が求められており、我々はこれまで n-GaN を陽極酸化後にウェットエッチングする 2 段階ウェットエッチング法を提案してきた[1]。さらに我々は本手法において形成される陽極酸化 n-GaN を新規材料として活用することを念頭に、陽極酸化による n-GaN の電気伝導特性変調を検討し、陽極酸化 n-GaN の X 線光電子分光(XPS)評価による n-GaN 表面の酸化と Hall 効果測定による電気伝導特性の変化を報告した[1- 3]。本研究では電气的通電による n-GaN の電気伝導特性変化のさらなる追究のため、順バイアス条件(陽極酸化)に加えて逆バイアス条件でも n-GaN への電気化学的通電をおこない、XPS による通電 n-GaN の表面組成評価および Hall 効果測定で電気伝導特性の評価をおこなった。

n-GaN 試料は、280 nm n-GaN / 520 nm i-GaN / LT-Buffer / Si substrate を用いた。Fig. 1 に電気化学的通電の様子を示す。通電条件は 4 V(陽極酸化)と-2 V(逆バイアス)にて 60 分通電とした。興味深いことに、逆バイアス通電領域の n-GaN 表面でも XPS 評価により酸化が確認された。Fig. 2, 3 に 78-473 K の温度範囲の Hall 効果測定を示す。Fig. 2 よりホール移動度は、無通電の n-GaN と比較して 4 V の通電 n-GaN では低下し、-2 V の通電 n-GaN ではさらに低下していることがわかる。Fig. 3 より電子濃度は、無通電の n-GaN と比較して 4 V の通電 n-GaN では低下しており、-2 V の通電 n-GaN では 4 V の通電 n-GaN よりも大幅に低下していることがわかる。これらの結果より、n-GaN に対する逆バイアス条件での通電においても順バイアス条件と同様に n-GaN 表面の酸化が生じており、順および逆バイアス条件いずれの通電においても電気伝導特性の変調が可能であることがわかった。機構は検討中である。 [1]清藤他, JJAP 58 SCCD18 (2019),

[2]神尾他, JJAP 62, 110907 (2023),

[3]神尾他, Physica Status Solidi (b), 261, 2300585 (2024),

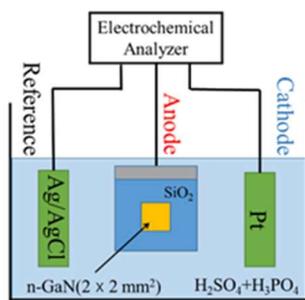


Fig.1 n-GaN に対する電気化学的通電

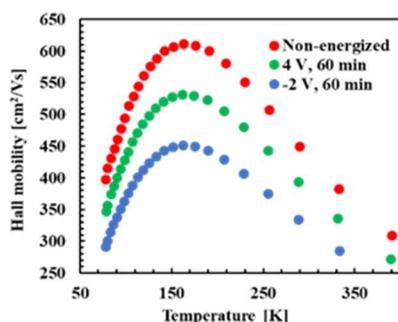


Fig. 2 n-GaN 試料のホール移動度の温度依存性

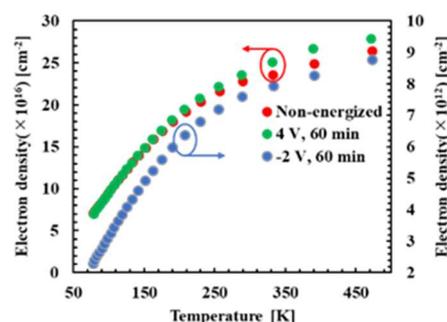


Fig. 3 n-GaN 試料の電子濃度の温度依存性

プラズマ LPE 法による GaN 層の成長 (III)

Growth of GaN layer by plasma-enhanced LPE method (III)

東京電機大工, °廣瀬 大輝, 中川 治紀, 三根 秀斗, 吉田 圭佑, 篠田 宏之, 六倉 信喜

School of Engineering, Tokyo Denki University

°Daiki Hirose, Haruki Nakagawa, Syuto Mine, Keisuke Yoshida, Hiroyuki Shinoda, Nobuki Mutsukura

E-mail: 21eh080@ms.dendai.ac.jp

1. 研究背景

我々は、プラズマ LPE (Plasma-enhanced LPE) 法を用いた GaN 層の成長について検討を行っている。前回は、スパッタリング法にて堆積した Ga 層へ窒素プラズマを照射する事によって GaN 層を成長し、その結晶性について報告した^{[1][2]}。

今回は、基板温度を変化させて GaN 層の成長を行い、得られた結晶性等について検討を行ったので報告する。

2. 実験方法

2.1. Ga の堆積

スパッタリング法を用いて、 α -Al₂O₃(0001)基板上に Ga を堆積した。ターゲットには Ga(6-N)を、反応ガスに Ar(6-N)を用いた。プラズマの発生には高周波 (13.56 MHz) 電力を用いた。

2.2. GaN 層の成長

プラズマ LPE 法を用いて GaN 層の液相成長を行った。反応ガスには N₂(6-N)を用いた。Ga/Al₂O₃ 表面へ窒素プラズマを照射させる事で、Ga と Al₂O₃ 界面に GaN 層を成長した。

2.3. GaN 層の評価

成長した GaN 層の評価には、電界放出型走査電子顕微鏡 (FE-SEM) や、X 線回折 (XRD) 装置等を用いた。

3. 実験結果

各基板温度にて成長した GaN 層の表面 SEM 像を Fig. 1 に示す。基板温度が比較的高い 600 °C 及び 700 °C において六角形や三角形のファセットが明瞭に現れている事が解る。

また、各基板温度で成長した GaN 層の XRD 測定結果から膜中に六方晶系 GaN (h-GaN) 及び立方晶系 GaN (c-GaN) が含まれている事が解った。また、h-GaN(10-12)面と c-GaN(200)面における XRD ピーク強度比 (I_{h-GaN}/I_{c-GaN}) を Fig. 2 に示す。基板温度の上昇によりそのピーク強度比が増加し、700 °C では六方晶系 GaN が優先的に成長している事が解る。

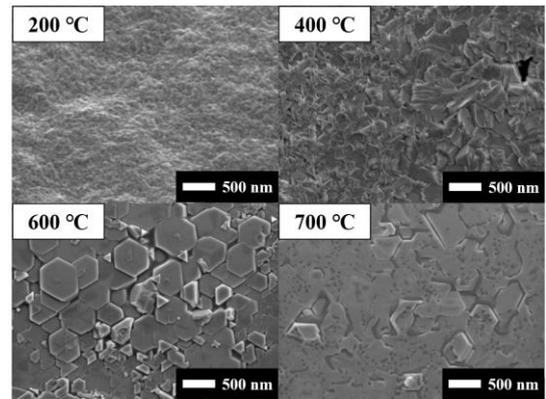


Fig. 1 Surface SEM images of GaN layers grows at various substrate temperatures.

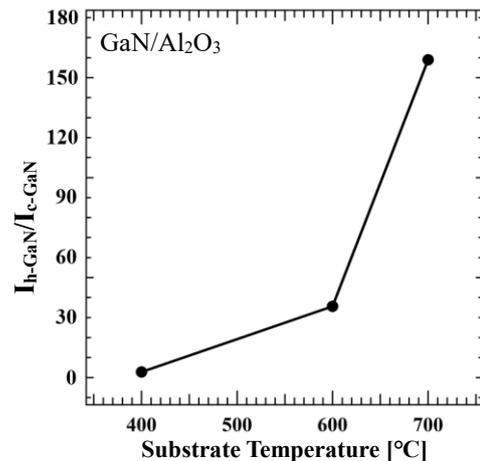


Fig. 2 I_{h-GaN}/I_{c-GaN} ratio as a function of substrate temperature.

謝辞

本研究の一部は、文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業 (課題番号: 24UT-0050) の支援を受けて実施されました。また、東芝デバイス&ストレージ株式会社学術奨励制度の支援を受けて実施されました。

参考文献

- [1] 三根 他, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 18a-P07-11 (2024).
- [2] 中川 他, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 18a-P07-12 (2024).

窒化ガリウム結晶内部の点欠陥に対する塩素終端構造の電子状態解析

The electronic states of the gallium-nitrides with a point defect terminated by chlorine atoms

工学院大¹ ○(B)山岸佑真¹, 屋山巴¹, 本田徹¹Kogakuin Univ.¹, °Yuma Yamagishi¹, Tomoe Yayama¹, Tohru Honda¹

E-mail: s421069@ns.kogakuin.ac.jp

1 研究背景と目的

窒化ガリウム(GaN)結晶の成長過程で生じる欠陥はデバイスの誤作動や性能の低下を招く原因となり、GaN結晶の欠陥に対しては高温下で安定した欠陥終端手法が求められている。本研究グループの先行研究ではGaNの結晶内部にある欠陥に対して、フッ素を用いた終端(F終端)が欠陥に起因する準位を除去する方法として有効であることが示唆されている^[1]。本研究ではGaN結晶内部の欠陥に対して、フッ素と同族元素かつ窒素に近い電気陰性度を持つ、塩素を用いた終端(Cl終端)の有効性を調べるため、量子論的観点からGaN結晶内部の欠陥に対するCl終端構造の安定性と電子状態の解析を行った。

2 実験/計算条件

本研究では密度汎関数理論に基づく第一原理計算により電子状態を計算した。計算に使用したGaNモデルは欠陥の無いモデル(defect-free)、窒素点欠陥が1つあるモデル(defect)と塩素原子の個数と初期配置が異なる6種類の塩素終端(Cl終端)モデルである。カットオフエネルギー800 eV、k点数4×4×4という条件のもとで計算を行った。各モデルに対して構造最適化を行い、生成エネルギーを用いて構造の安定性を評価した。また、電子状態密度(DOS)および電荷密度分布から各モデルの電子状態についても考察を行った。

3 計算結果と考察

窒素点欠陥1つが生じると4つのGa未結合手が生じる。この4つの未結合手に対して1-4つの塩素原子を、対称性を考慮してすべてのパターンについて配置した。すべてのCl終端モデルに対して構造最適化計算を行った結果、塩素原子4つを配置したモデルを除いたいずれのモデルでも塩素原子が欠陥近傍にとどまる構造を確認することができた。

欠陥のない(defect-free)モデル(左)、欠陥のある(defect)モデル(中央)、塩素原子を欠陥点に配置した

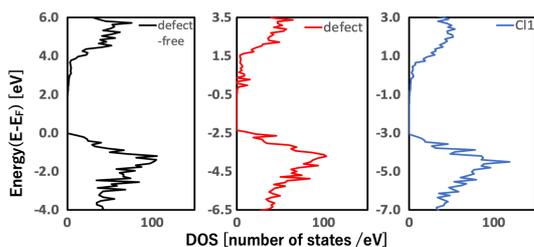


図1 (左)defect-free、(中央)defect、(右)Cl1のDOS

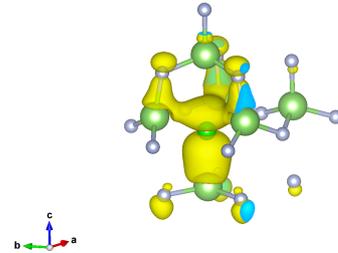


図2 欠陥近傍におけるCl1モデルの電荷密度分布

Cl1モデル(右)のDOSを以下の図1に示す。それぞれを比較したところ、Cl1のDOSには欠陥のあるモデルに見られた準位がなくなっており、欠陥のないモデルに似たDOSになっていることがわかった。

図2にCl1モデルの電荷密度分布を調べた結果を示す。Cl原子近傍の電荷密度分布は sp^3 混成軌道に似た電荷密度を形成していることが確認できた。このことから欠陥終端に関してF原子では3個必要だったが、Cl原子では1個欠陥位置に配置することでGaN本来の状態に近い電子状態が再現され、欠陥終端が出来ていると考えた。

一方、欠陥のあるモデルを基準としたCl終端の各モデルの生成エネルギー計算を行った結果、どのモデルも欠陥のあるモデルよりもエネルギーが高いことがわかった。GaN結晶内部でのCl終端構造のエネルギーが高い理由の1つとして、Cl原子がN原子よりも大きいため、結晶内部では空間的にCl原子の存在する場所が少なく、構造が不安定になると考えられる。しかし、DOSや電荷密度分布などの電子状態の結果からは、Cl原子1つで欠陥準位なくN原子と置き換わる可能性が示されるなど、GaNとの親和性の高さが示唆されている。今後、表面近傍など、より構造的自由度の高い箇所において、安定にClが存在する可能性を検討する。

4 まとめ

GaN結晶内部の点欠陥に対して、様々なCl終端モデルの電子状態を調べた。その結果、欠陥点に塩素原子を配置したCl1モデルに関して欠陥のないモデルのDOSと似たDOSになることや、電荷密度分布ではCl原子が sp^3 混成軌道に似た電荷密度を形成していることからCl原子はF原子よりも少ない原子数で終端できる可能性があることがわかった。

参考文献

[1] 藤代裕貴, 第71回応用物理学会春季学術講演会, 25a-P03-10 (2024).

MOVPE 法で作製した GaN ナノ結晶光触媒による水素生成

Hydrogen production using GaN nanocrystal photocatalysts fabricated by MOVPE

セイコーエプソン(株)¹, 信州大学² ○次六寛明¹, 影島洋介², 錦織広昌²Seiko Epson Corp.¹, Shinshu Univ.², ○H. Jiroku¹, Y. Kageshima², H. Nishikiori²

E-mail: jiroku.hiroaki@exc.epson.co.jp

【研究背景】地球温暖化が問題となるなか、二酸化炭素を排出しないエネルギーとしてグリーン水素が注目されており、太陽光エネルギーを利用した光触媒による水分解反応の研究が進められている。GaN は、光腐食という課題はあるものの、In 導入によってエネルギーバンドギャップが狭くなることから可視光応答光触媒のホスト材料として期待できる材料であり、MBE (Molecular Beam Epitaxy) 法で作製した InGaN/GaN ナノ結晶光触媒による高効率な水分解が報告されている^[1]。また、GaN ナノ結晶構造の研究として、MOVPE (Metalorganic Vapor Phase Epitaxy) 法で作製した c 面サファイア基板上 GaN 薄膜をエッチング加工してナノ結晶化し、極性面と非極性面のバンド曲がりの違いを利用して、水分解の効率を向上させたことが報告されている^[2]。本研究では、将来的な In 導入を見据えつつ、まずはナノ結晶の優位性を検証することを目指した。結晶への悪影響が懸念されるエッチング加工を用いずに、MOVPE 法で極性面と非極性面を持つ GaN ナノ結晶を成長させ、水素生成効率へのナノ結晶化の効果を調査した。

【実験・結果】MOVPE 法にて成膜したφ2 インチ c 面サファイア基板上 n-GaN テンプレートに SiO₂ マスク選択成長 MOVPE 法を用いて n-GaN ナノ結晶を作製した。図 1 に示すような極性面と非極性面を有する六角柱の GaN ナノ結晶が作製できた。この GaN ナノ結晶を光触媒として、閉鎖循環系による水素生成半反応評価を行った。蒸留水に犠牲試薬としてメタノールを添加し、in-situ 光析出法によって Pt を助触媒として修飾した。光源は 300W の Xe ランプ (λ<500nm) を使用した。比較対象として c 面サファイア基板上 n-GaN テンプレート基板の評価も行った。水素生成半反応評価結果を図 2 に示す。GaN ナノ結晶の水素生成量は、GaN テンプレート基板に比べて少なくなった。その原因としては、GaN ナノ結晶の表面構造に起因する反応性の低下が考えられる。実験結果や考察の詳細は、当日報告する。

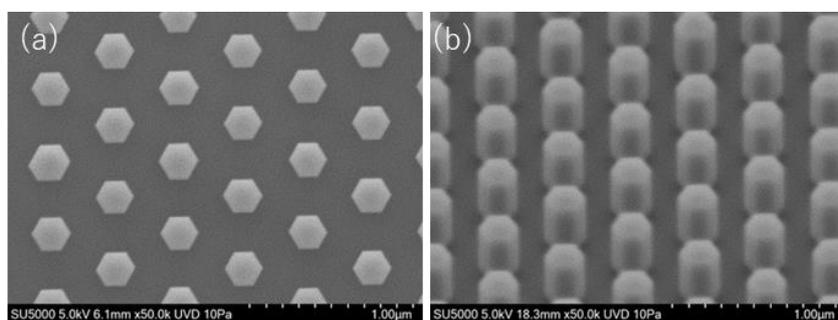
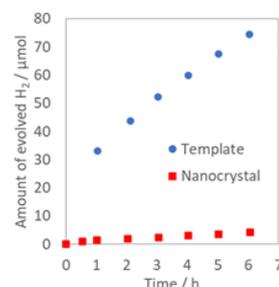


Fig.1 SEM images of the GaN nanocrystals (a)top-view (b)45°tilt-view

Fig.2 Time course of H₂ evolution

【参考文献】 [1] P. Zhou *et al.*: Nature, 613, 66 (2023). [2] Z. Li *et al.*: Angew. Chem. Int. Ed., 59, 935 (2020).

光無線給電システムに向けた GaInN 系受光素子における 結晶品質改善に向けた検討

Study on crystal quality improvement in GaInN-based photovoltaic cells for optical wireless power transmission system

○石田颯汰朗、小嶋智輝、江川 孝志、三好 実人 (名工大)

°S. Ishida, T. Kojima, T. Egawa, M. Miyoshi (Nagoya Inst. Tech.)

E-mail: miyoshi.makoto@nitech.ac.jp

【はじめに】 半導体レーザと受光素子を組み合わせた「光無線給電システム」は、無線電力伝送技術の有望候補の一つであり、広範囲の応用分野への適用が期待されている[1,2]。これまで我々は、光無線給電システムへの適用を目指して、GaInN/GaN 多重量子井戸 (MQW) 構造を光吸収層として備える受光素子について研究報告を行ってきた[3,4]。そして、現在、このような GaInN 系受光素子の性能向上には、エピタキシャル構造のさらなる結晶品質向上が必要との結論に至っている。本研究では、GaInN 系受光素子を構成する要素構造について、成長条件の最適化による結晶品質向上を試みたので報告する。

【実験方法】 c 面自立 GaN 基板に MOCVD 法を用いて図 1 に示す受光素子構造を成長した。この構成としては、厚さ 200nm の n-GaN コンタクト層、厚さ 3nm の GaInN 井戸層と厚さ 3nm の GaN バリア層からなる 42 周期の MQW 光吸収層、厚さ 250nm の p-GaN コンタクト層を備える。各要素構造 (MQW 層、p-GaN 層) について、表 1 に示す成長温度プロファイルによる成長実験を実施し、AFM、XRD、STEM による結晶評価を行った。

【結果と考察】 図 2、図 3 に AFM、XRD による成長試料の評価結果を示した。これらの結果より、実験を実施した 2 水準の試料を比較したところ、両者は同等の層構成・組成を維持しつつも、より高温成長を適用した試料において結晶品質が大幅に向上している事が確認された。

【謝辞】 本研究は、NEDO 先導研究プログラム「移動体への光無線給電システムの研究開発」の支援を受けて実施された。

Table 1. Growth conditions examined in this study

| Sample ID | MQWs (thickness 250 nm) | p-GaN contact layer (thickness 250 nm) |
|-----------|---------------------------|--|
| A | $T_g = 835^\circ\text{C}$ | $T_g = 835 \rightarrow 975 \rightarrow 1025^\circ\text{C}$ |
| B | $T_g = 825^\circ\text{C}$ | $T_g = 825 \rightarrow 900 \rightarrow 950^\circ\text{C}$ |

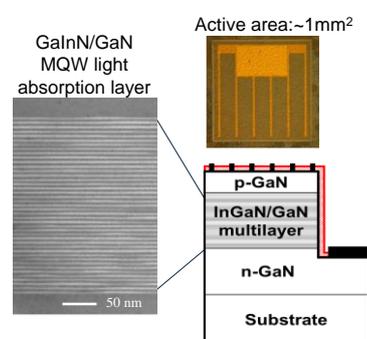


Fig.1 Schematic of GaInN-based PTs.

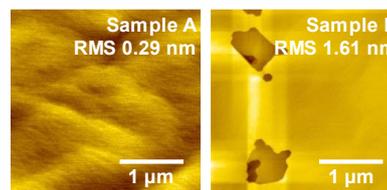


Fig.2. Surface AFM images for samples A and B.

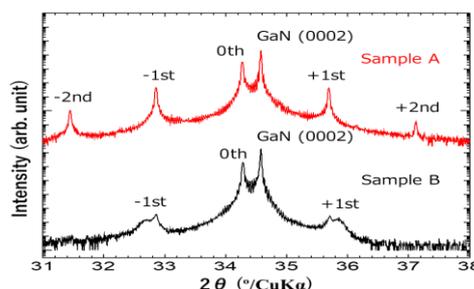


Fig.3. XRD ω - 2θ profiles for samples A and B.

参考文献

- [1] Miyamoto, Proc. of SPIE. 10682, 1068204 (2018).
- [2] Miyamoto, Trans. IEICE J103-C, 270 (2020).
- [3] Miyoshi *et al.*, AIP Advances 11, 095208 (2021).
- [4] Fujisawa *et al.*, Semicond. Sci. Technol. 39, 045010 (2024).