



令和2年6月1日

報道機関 各位

東北大学 多元物質科学研究所

省エネルギーに資する窒化ガリウム単結晶基板の量産法 を開発

-次世代パワーエレクトロニクスの実現に道-

【発表のポイント】

- ・ 2インチ以上の窒化ガリウム^{*1}単結晶基板を量産できる結晶作製法を開発
- ・ 反りが殆ど無く（曲率半径約 1.5 km）モザイクも極めて少ない結晶性と、励起子^{*2}による発光を呈する高純度な窒化ガリウム単結晶基板を作製可能
- ・ 高品質な窒化ガリウム基板の供給により次世代パワーエレクトロニクスに貢献

【概要】

持続可能な社会を実現するためには電力の変換効率を向上させることが喫緊の課題です。注目すべきその解決方法は、電力制御を担う高周波パワートランジスタ^{*3}の半導体材料を、従来の珪素から窒化ガリウム（GaN）に置き換えることです。しかし現状では、高性能 GaN トランジスタの土台になりうる高品質な GaN 単結晶基板の入手は非常に困難であるため、リーク電流^{*4}が少なく信頼性が高い GaN トランジスタの作製は困難です。

東北大学多元物質科学研究所 秩父重英 教授らは、株式会社日本製鋼所、三菱ケミカル株式会社と協力し、反りがほとんど無い、大口径且つ高純度な GaN 単結晶基板の量産を行える低圧酸性アモノサーマル法^{*5}の開発に成功しました。

本成果は、科学雑誌 Applied Physics Express にて 2020 年 4 月 17 日にオンライン公開されました。

【問い合わせ先】

（研究に関すること）
東北大学多元物質科学研究所
担当： 教授 秩父重英
電話： 022-217-5363
E-mail: chichibu@tohoku.ac.jp

（報道に関すること）

同研究所 広報情報室
電話：022-217-5198
E-mail: press.tagen@grp.tohoku.ac.jp

【詳細な説明】

1. 背景

豊かで安心安全な社会を持続させるためには、限りあるエネルギー資源を高効率に利用する技術が不可欠です。たとえば、電力を強い動力に変換する鉄道・電気自動車・産業機械や、高周波の電波を増幅させる通信基地局等において、電力の変換効率を向上させることは喫緊の課題です。その解決方法として、電力制御を担うパワートランジスタの半導体材料を、従来の珪素から炭化珪素、GaN、ダイヤモンド等に置き換えることが注目されています。なかでも、GaNは広い禁制帯幅 (3.4 eV)、高い絶縁破壊電界 (3.3 MV cm^{-1})、速い飽和電子速度 ($2.5 \times 10^7\text{ cm s}^{-1}$) などの優れた物性を有するため、高出力かつ高周波で動作する縦型パワートランジスタ (図1) への応用が期待されています。しかし、現状では GaN トランジスタの土台となる GaN 単結晶基板が入手困難であるため、リーク電流が少なく信頼性が高い GaN 縦型パワートランジスタを作製することが困難です。

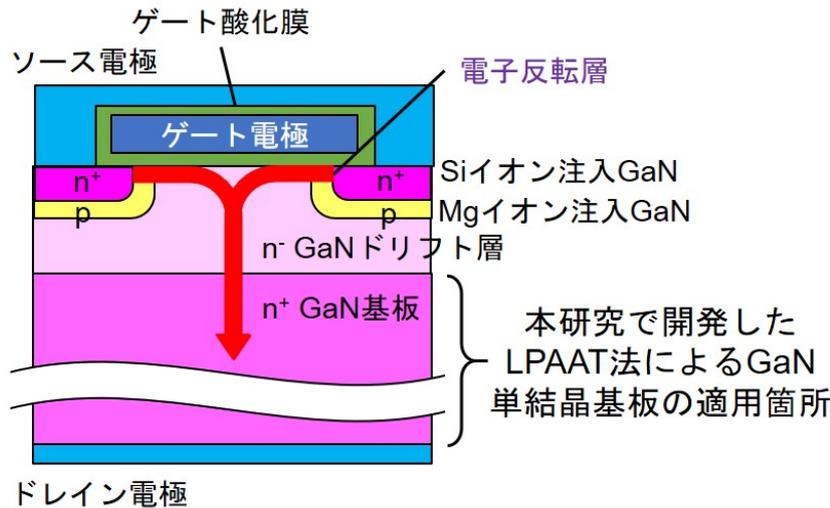


図1. GaN を用いた縦型パワートランジスタの模式図。

2. 研究手法と成果

本研究では、直径2インチ以上の GaN 単結晶基板を量産可能な、低圧酸性アモノサーマル (Low-pressure acidic ammonothermal; LPAAT) 法を独自に開発しました。既に実用化されている、高圧の超臨界流体アンモニアを用いる従来の酸性アモノサーマル (SCAATTM) 法とは異なり、低圧での結晶成長を実現したことにより、比較的小さな結晶成長炉で大型結晶の量産が可能となります。図2に示すように、SCAATTMによる GaN 種結晶上に LPAAT 法により作製された2インチ長の GaN 単結晶基板は、結晶モザイク性が低く (対称面・非対

称面の X 線ロックアップカーブ半値全幅が 28 秒以内)、基板の反りがほとんどない(曲率半径が約 1.5 km) 良好な結晶構造特性を有しました。さらに、結晶成長炉の材質である鉄やニッケルなどのコンタミネーション^{*6}を抑えるため、結晶成長炉の内壁を銀でコーティングした結果、GaN 結晶中に意図せず混入する不純物を減らすことができ、低温フォトルミネッセンス^{*7}からは GaN の励起子遷移の発光が確認される程度に優れた結晶性および高い純度を達成しました。LPAAT 法による大口径・低反り・高純度な GaN 単結晶基板が普及していけば、信頼性に優れる GaN 縦型パワーランジスタが実用化されていくと期待されます。

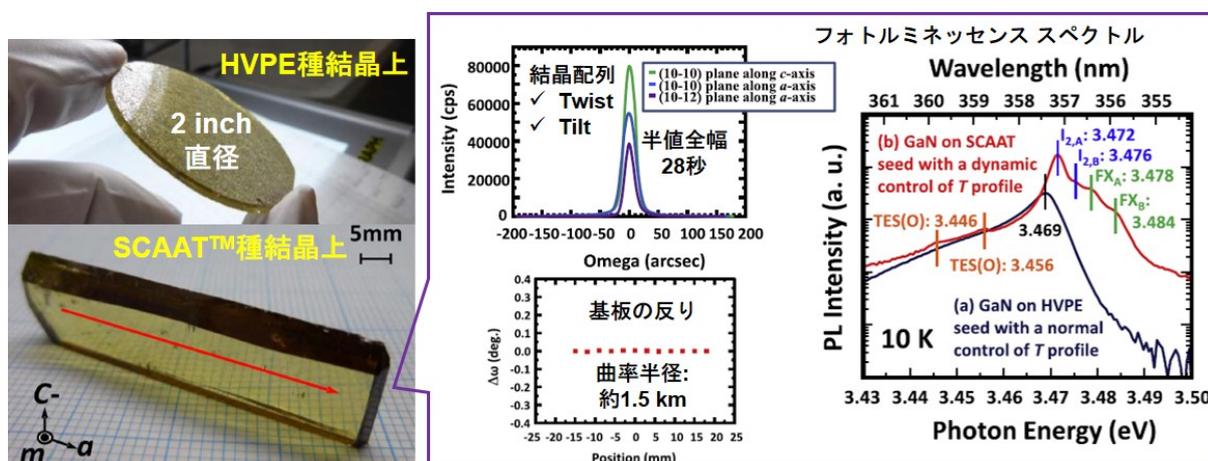


図2. LPAAT 法により、2 種類の GaN 種結晶 (Halide vapor phase epitaxy; HVPE および Supercritical acidic ammonia technology; SCAATTM) 上に作製された 2 インチサイズの GaN 単結晶基板の外観、結晶構造特性、およびフォトルミネッセンススペクトル。

3. 今後の展望

本研究で開発した LPAAT 技術を大型炉 (内径 120 mm 以上) に適用し、反りが少なく結晶モザイク性も殆ど無いような優れた結晶構造的特性をもつ 4 インチ以上の大口径 GaN 基板の実現を目指します。さらに、作製された GaN の輻射・非輻射再結合レートや空孔型欠陥濃度等を、東北大や筑波大の持つ特殊計測技術を用いて定量することにより、LPAAT 法による GaN 単結晶の光学的・電氣的な特性をさらに向上させます。

本研究の一部は、経済産業省・新エネルギー産業技術総合開発機構プログラム「低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト (JPNP10022)」、東北大「ビジネス・インキュベーション・プログラム」、および文部科学省「人・環境と物質をつなぐイノベーション創出ダイナミック・アライアンス」の助成を受けています。

【研究チーム】

東北大学多元物質科学研究所 秩父重英 教授、石黒徹 研究員、小島一信 准教授、嶋紘平 助教、富田大輔 助教 (2019年4月1日より名古屋大学未来材料・システム研究所 特任准教授)

株式会社日本製鋼所
三菱ケミカル株式会社

【論文情報】

タイトル : Ammonothermal growth of 2 inch long GaN single crystals using an acidic NH₄F mineralizer in a Ag-lined autoclave

著者名 : Daisuke Tomida, Quanxi Bao, Makoto Saito, Ryu Osanai, Kohei Shima, Kazunobu Kojima, Tohru Ishiguro, and Shigefusa F. Chichibu

雑誌名 : Applied Physics Express

DOI : 10.35848/1882-0786/ab8722

【用語解説】

*1. 窒化ガリウム (GaN)

ガリウムと窒素から成る化合物半導体。GaN、およびInNとGaNの混晶(InGaN)は青色発光ダイオードおよび青色レーザー等の発光デバイスの基幹材料として実用化されています。近年、半導体としての性能の限界を迎えつつある珪素の代替材料として、炭化珪素、GaN、ダイヤモンド等が注目されています。なかでも、GaNは広い禁制帯幅 (3.4 eV)、高い絶縁破壊電界 (3.3 MV cm⁻¹)、速い飽和電子速度 (2.5×10⁷ cm s⁻¹) などの物性を有するため、高出力かつ高周波で動作する電子デバイスへの応用が期待されています。

*2. 励起子

半導体や絶縁体の中で、伝導電子と正孔の対がクーロン引力により束縛しあった量子。不純物や欠陥が少なく、結晶の周期性が高いGaNのフォトルミネッセンススペクトルからは、励起子遷移に関わる発光ピーク群が明瞭に観察されます。

*3. 高周波パワートランジスタ

携帯電話の基地局、レーダー、通信衛星等における大容量・高速通信を実現するための電力変換・増幅器。GaNは、他の材料では難しい高出力(kWクラス)かつ高周波数(1 GHz~100 GHz)の領域におけるデバイス応用が期待されています。

*4. リーク電流

デバイスの縦方向に電流が流れる縦型パワートランジスタにおいて、縦方向に伸びる結晶欠陥（貫通転位など）が存在することにより、電流 OFF 時にも欠陥を起点にして電流が流れてしまうこと。デバイスの誤動作につながります。

*5. 低圧酸性アモノサーマル（Low-pressure acidic ammonothermal; LPAAT）法

通常の温度・圧力では溶解しない溶質を、高温・高圧の超臨界流体中に溶解させ、炉内の温度勾配に応じた溶解度差を利用して種結晶上に溶質を再結晶させるソルボサーマル法の一種です。使用する溶媒に応じてハイドロサーマル（水熱）法やアモノサーマル（安熱）法などと呼ばれます。超臨界アンモニア中への GaN の溶解を促進させる鉍化剤として、アルカリアミド（ MNH_2 , $M=Li, Na, K$ ）などの塩基性鉍化剤、ないしはハロゲン化アンモニウム（ NH_4X , $X=Cl, Br, I$ ）などの酸性鉍化剤を用います。東北大学では酸性鉍化剤を用いる酸性アモノサーマル法の開発を行ってきました。また、高圧の超臨界流体アンモニアを用いた酸性アモノサーマル法（SCAATTM）は既に実用化されていますが、高圧であるため超大型炉への適用は困難です。そこで本研究では、超大型炉に適用可能な低圧条件での酸性アモノサーマル法（LPAAT 法）を開発しました。

*6. コンタミネーション

大気由来の不純物（酸素、水、炭化水素など）や結晶成長炉の材質由来の不純物（鉄やニッケル等）が、結晶育成中に意図せず結晶中に入り込むこと。意図しない不純物は、GaN 結晶の結晶周期性を乱したり、キャリア（電子ないしは正孔）を捕獲する深い準位や非輻射再結合中心として働き、半導体の光学的・電気的特性を悪化させる原因となります。

*7. フォトルミネッセンス

半導体が禁制帯幅よりも大きなエネルギーの光を照射された際に、半導体内に励起された電子正孔対が再結合する過程で光が放出される現象。フォトルミネッセンスにより放出される光のエネルギースペクトルには、半導体内のバンド間の直接または間接遷移や励起子遷移、ドナーやアクセプター準位などに関係する光学遷移の情報が反映されるため、半導体結晶の周期性や不純物に関する情報を間接的に得ることができます。