

## 非破壊で次世代パワーデバイス材料の結晶欠陥を検出できる技術を開発 ～ ラマンマッピングによる窒化ガリウム(GaN)半導体結晶の高品質化を促進 ～

### ■ ポイント ■

- ・ GaN 半導体のラマンマッピング像から刃状成分の貫通転位を検出する技術を開発
- ・ 欠陥の分布や方向を非破壊で特定することが可能
- ・ GaN 半導体単結晶の改良や歩留まり向上に期待

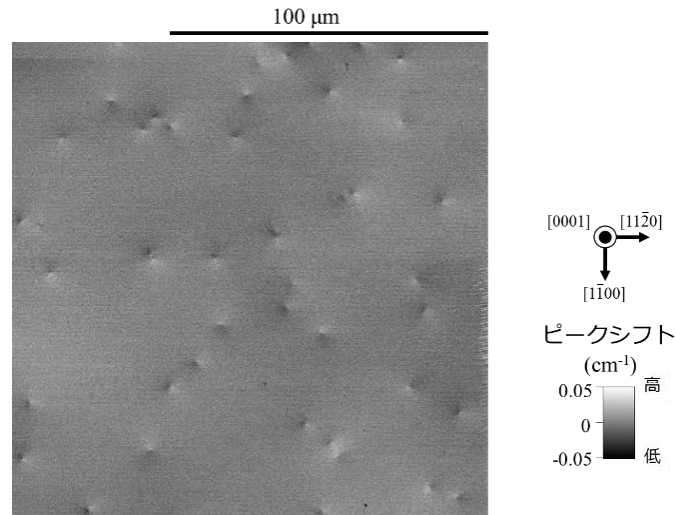
### ■ 概要 ■

国立研究開発法人 産業技術総合研究所【理事長 中鉢 良治】(以下「産総研」という)窒化物半導体先進デバイスオープンイノベーションラボラトリ【ラボ長 清水 三聡】(以下「GaN-OIL」という)GaN パワーエレクトロニクスチーム 山田 永 主任研究員、小久保 信彦 元リサーチアシスタント、角岡 洋介 リサーチアシスタントは、国立大学法人 名古屋大学【総長 松尾 清一】(以下「名古屋大」という)未来材料・システム研究所 未来エレクトロニクス集積研究センター 宇治原 徹 教授(兼)GaN-OIL 副ラボ長と共同で、ラマンマッピング像から窒化ガリウム(GaN)半導体結晶の欠陥を検出する技術を開発した。

近年、次世代パワーデバイスとして期待されている GaN 半導体のより高性能化・高寿命化のための研究が行われている。この中で、GaN 半導体の結晶欠陥を、非破壊で簡便に検出できる評価技術確立することが求められていた。今回開発した技術により、GaN 結晶の刃状成分の貫通転位を非破壊で検出できるため、GaN 半導体デバイスの製造プロセス改良への貢献が期待される。

なお、この技術の詳細は、5月22日(英国時間)に *Applied Physics Express* のオンライン版に掲載された。

\_\_\_\_\_は【用語の説明】参照



ラマンマッピングによる GaN 半導体単結晶の欠陥イメージング像

### ■ 開発の社会的背景 ■

近年、GaN 半導体が次世代パワーデバイスや高輝度発光デバイスとして期待され、研究開発が盛んに進められている。GaN 半導体の更なる高性能化・高寿命化のためには、欠陥の少ない単結晶 GaN 基板が必要である。これまで GaN 半導体単結晶の構造欠陥である転位を検出するには、大型放射光施設を用いた実験や、試料を破壊するエッチピット法、電子顕微鏡などでの評価を行う必要があったため、より簡便で非破壊の転位検出技術が求められていた。

### ■ 研究の経緯 ■

産総研と名古屋大は、窒化物半導体デバイスに関する広範な研究開発を連携して行い、実用化と社会実装を推進させていくために、平成 28 年 4 月 1 日に GaN-OIL を名古屋大内に設置した。GaN-OIL では、クロスアポイントメント制度を活用した人事交流による産学連携を促進するとともに、産学官ネットワークを構築し、「橋渡し」につながる目的基礎研究を強化し、窒化物半導体技術の産業化・実用化のために必要な結晶技術、デバイス技術、回路技術などの開発を行っている。また、産総研リサーチアシスタント制度を活用し、名古屋大の博士前期・後期課程の学生を受け入れ、次世代を担う優秀な人材の育成を行っている。

今回、両者は GaN 単結晶基板上的のパワーデバイス応用を実現するため、GaN 半導体中に存在する構造欠陥の形成・消滅過程の解明やその評価技術の研究開発に取り組んだ。

なお、この成果は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務「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／GaN パワーデバイス等の実用化加速技術開発／低不純物・高成長速度の次世代 HVPE 法による低価格・大電力 GaN パワーデバイス製造プロセスの研究開発」(平成 29～31 年度)による支援を受けた。

### ■ 研究の内容 ■

今回開発した欠陥検出技術は、ラマン散乱を応用した技術である。図 1 に示す GaN のラマン散乱スペクトルでは、結晶にひずみがあると、圧縮ひずみでは高波数側、引張ひずみでは低波数側にピークがシフトする。

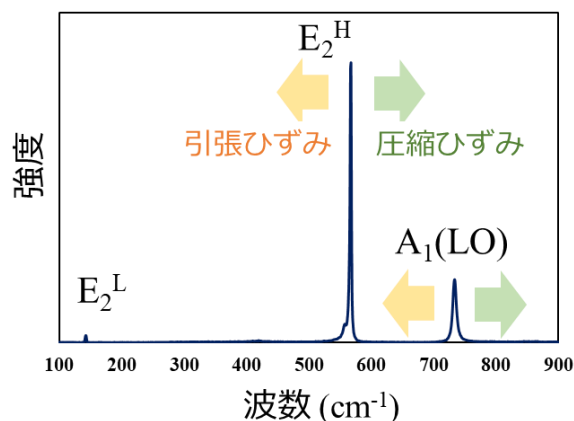


図1 GaN 半導体のラマン散乱スペクトル

最も強度の大きい  $E_2^H$  ラマン散乱ピークを拡大したものが図2である。実験で得られた生データを解析モデルによる数値フィッティングをすることで  $0.1 \text{ cm}^{-1}$  の波数分解能で GaN 結晶のピークシフトを観測し、わずかなひずみの検出を試みた(従来、測定検出器の波数分解能が  $0.8 \text{ cm}^{-1}$  であり、 $1 \text{ cm}^{-1}$  以上のピークシフトを観測していた)。

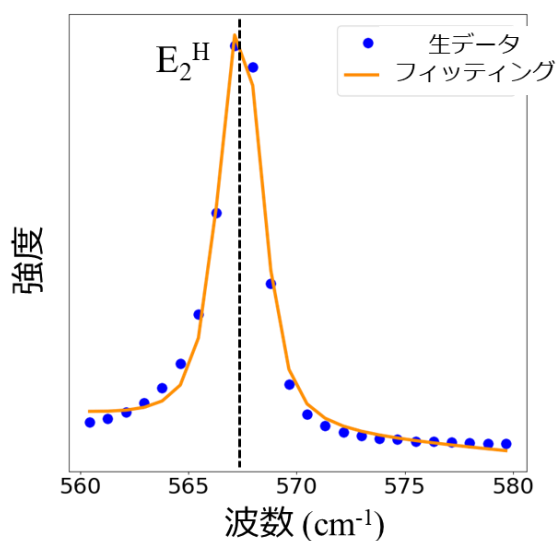


図2  $E_2^H$  ピークのフィッティング結果

HVPE 法 で作製した自立 c 面 GaN 基板のラマン散乱スペクトルを測定し、フィッティングによって得られた高分解能の  $E_2^H$  ピークのシフトを  $0.1 \text{ cm}^{-1}$  の波数範囲で可視化した結果を示す。白色の高波数側にシフトした領域と黒色の低波数側にシフトした領域が対となるコントラストが明瞭に観察できた。また、その方向は GaN 結晶の 6 方向に対応していた。

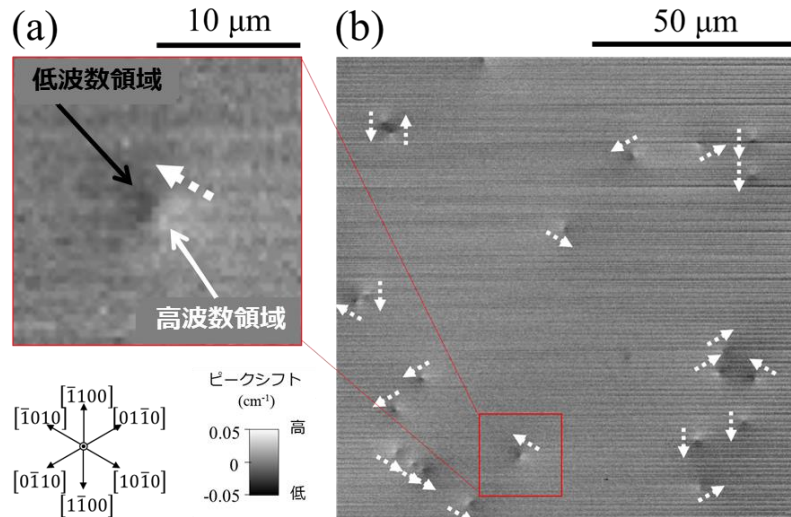


図 3 GaN 半導体の  $E_2^H$  ラマン散乱ピークのシフトをマッピングした像  
白破線矢印は高波数から低波数への方向を示す。

今回開発したラマンマッピング法の測定結果と、従来、GaN 基板の欠陥評価法として使用されてきた水酸化カリウム溶液によるエッチピット法による結果とを比較した(図 4)。水酸化カリウム溶液による処理後の GaN 単結晶を光学顕微鏡で観察すると、六角形状の黒色(刃状転位)、灰色(混合転位)のエッチピット(図 4 の▽)が観察された。エッチピットを形成する前の  $E_2^H$  ピークシフトのラマンマッピング像は、エッチピットと同一箇所にも明瞭なコントラストが観察された。また、白色のエッチピット箇所(図 4 の数字 1~6)は転位によるエッチピットではなく、ラマンマッピング像ではコントラストに差は見られない。

以上のように、今回開発したラマン散乱を利用した手法により GaN 結晶の刃状転位や混合転位の分布や方向を簡便に非破壊で測定できた。

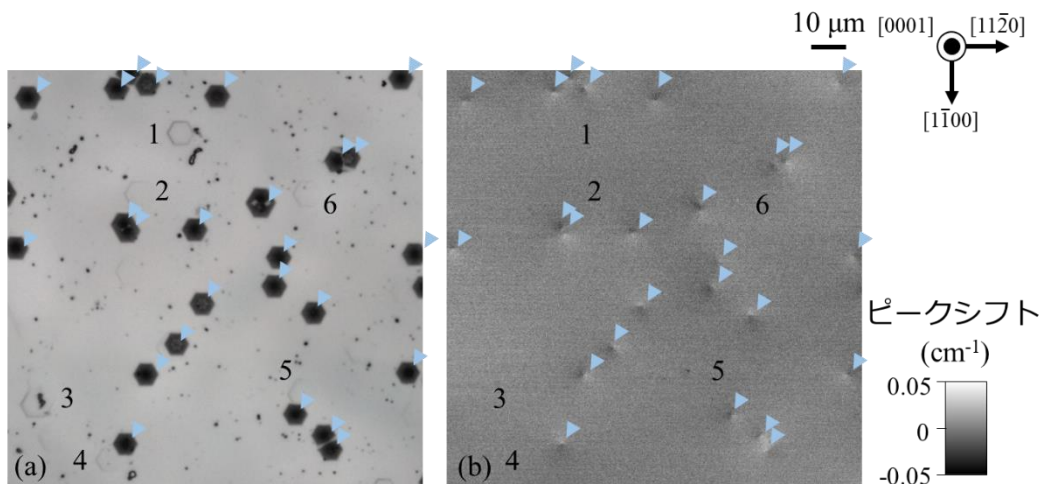


図 4 GaN 半導体結晶の(a)エッチピット像と(b)ラマンマッピング像

■ 今後の予定 ■

今回開発した結晶の欠陥検出技術を利用して GaN や他の半導体の高品質化に繋げる取り組みを実施する。

## ■ 論文情報 ■

雑誌名 : *Applied Physics Express*

論文タイトル : Detection of Edge Component of Threading Dislocations in GaN by Raman Spectroscopy

著者 : Nobuhiko Kokubo, Yosuke Tsunooka, Fumihito Fujie, Junji Ohara, Kazukuni Hara, Shoichi Onda, Hisashi Yamada, Mitsuaki Shimizu, Shunta Harada, Miho Tagawa, and Toru Ujihara

掲載日 : 平成 30 年 5 月 22 日 (英国時間)

### 【用語の説明】

#### ◆ラマン、ラマン散乱、ラマン散乱スペクトル、ラマンマッピング

物質に光が入射したとき、散乱された光の中には強度が非常に弱いが入射した光の波長と異なる波長の光が含まれる現象があり、発見者の名前からラマン散乱とよばれる。単一波長のレーザーを照射して得られる異なる波長の散乱光と入射光の波長差(エネルギー差)は、物質の構造に特有の値をとることから、分子の振動や結晶の格子振動などを測定できる。ラマン散乱を分光して得られるスペクトルをラマン散乱スペクトル、試料のある領域における特定波長のラマン散乱の分布をラマンマッピングという。

今回測定に用いた配置では GaN のラマン散乱スペクトルは、波数の低い領域から、 $145.0\text{ cm}^{-1}$ 、 $567.8\text{ cm}^{-1}$ 、 $734.2\text{ cm}^{-1}$  にピークが観測され、これらを  $E_2^L$ 、 $E_2^H$ 、 $A_1(\text{LO})$  と呼ぶ。GaN 結晶に圧縮ひずみ、あるいは引っ張りひずみがかわるとピーク位置がシフトする。今回は  $E_2^H$  のシフトを利用した。

#### ◆窒化ガリウム (GaN)

窒素とガリウムからなる半導体で、青色発光ダイオードやレーザーダイオードの材料として用いられる。熱伝導率が大きく、電子飽和速度が高く、絶縁破壊電圧が高いことから高温・高速動作が可能で、低損失パワーデバイスや高周波電子デバイスとしての利用が期待されている。これらの特性を達成するための高品質な単結晶 GaN 基板が必要となる。ウルツ鉱構造の c 面 GaN 基板が一般に使用されている。

#### ◆パワーデバイス

電力機器向けの電力用半導体素子のことであり、整流ダイオード、パワートランジスタ、サイリスタ、トライアックなどがある。半導体技術の進歩によって大電力化、低損失化が進み、電力制御装置全体の小型化に貢献している。省エネルギーと低発熱の観点から次世代パワーデバイスとしてワイドバンドギャップ半導体であるシリコンカーバイド (SiC) や GaN が期待されている。

#### ◆貫通転位

結晶の理想的な結合からのずれにより生じる線状欠陥のこと。GaN では、ずれの方向により余分な原子面が刃状に入り込んだ刃状転位、転位線のまわりでらせん状に配列するらせん転位、およびこれらを足し合わせた混合転位に分類される。近年、貫通転位を低減させた GaN 自立基板が開発されており、貫通転位の密度・種類の同定とデバイスの性能・寿命との関係が調べられている。

#### ◆エッチピット法

結晶表面を化学薬品で処理すると現れる表面の腐食孔をエッチピットと呼ぶ。この孔は線状の結晶の格子欠陥である転位が結晶表面と交差している点に対応し、格子欠陥のためにこの点付近の領域が他の領域と比べて化学的に反応しやすい、あるいは腐食されやすいことを利用した転位評価方法がエッチピット法である。

#### ◆HVPE 法

HVPE 法 (Hydride Vapor Phase Epitaxy、ハイドライド気相成長法) は、気相成長法の一つで、気相(ガ

ス状態)から固体を析出させて方位の揃った結晶軸をもった単結晶をエピタキシャル成長させる方法である。GaN 基板を作製する場合は、原料に金属ガリウム(Ga)と塩化水素ガス(HCl)から生成した塩化ガリウム(GaCl)とアンモニアガス(NH<sub>3</sub>)を反応炉に供給し、高温反応させることで単結晶を成長させる。