

令和2年10月29日

報道機関 各位

東北大学 多元物質科学研究所

## 窒化ガリウム結晶の発光量子効率と光吸収の関係を解明

### 【発表のポイント】

- 窒化ガリウム自立結晶の発光量子効率\*1 と光吸収の関係を解明
- 半導体結晶の光吸収スペクトル計測の簡便な方法を開発
- 発光効率や点欠陥濃度の測定精度向上により、発光ダイオードやパワートランジスタなど、様々な半導体デバイスの省エネ化に寄与

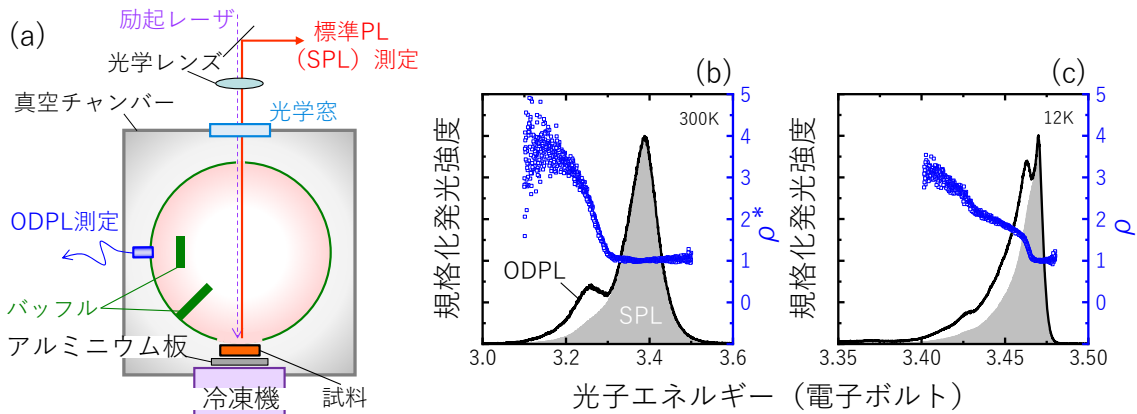
### 【概要】

照明や通信、太陽光発電などの分野においては、電気エネルギーと光エネルギーとを相互に変換する発光ダイオード（LED）や半導体レーザ\*2、太陽電池などの活用が不可欠です。これら半導体デバイスの性能は、ウェハの構成材料となる結晶の品質に強く左右されます。東北大学多元物質科学研究所 小島 一信 准教授、秩父 重英 教授は、全方位フォトルミネセンス（ODPL）計測法\*3にて観測される発光スペクトル（ODPLスペクトル）に特有の双峰性形状が、結晶のもつ光吸収に起因していることを発見しました。

本研究は、高性能な電子デバイスや光デバイスの製造に適する省エネ材料である窒化ガリウム結晶の発光量子効率と光吸収の関係を明らかにするものであり、簡便な方法にて半導体結晶の光吸収スペクトル計測を可能にします。

本研究成果は、米国物理協会（AIP）の科学誌「Applied Physics Letters」誌にて、2020年10月28日（米国東部時間）にオンライン公開されました。

本研究の一部は、文科省の「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」およびキャノン財団 研究助成プログラム「新産業を生む科学技術」、新学術領域研究「特異構造の結晶科学」の助成を受けています。



\*  $\rho$  は ODPL 強度と SPL 強度の比を表す。

【参考画像】 (a) 温度可変全方位フォトルミネセンス (ODPL) 計測装置の概略図。(b) 室温および (c) 極低温下において計測された ODPL スペクトルおよび標準 PL (SPL) スペクトル。発光強度比  $\rho$  は ODPL スペクトルを SPL スペクトルにて除したもの。光吸収が強いエネルギー領域では  $\rho$  が 1 に収束 (規格化した ODPL スペクトルと SPL スペクトルとが一致) している。

#### 【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

准教授 小島 一信 (こじま かずのぶ)

教授 秩父 重英 (ちちぶ しげふさ)

電話： 022-217-5363

E-mail： kkojima@tohoku.ac.jp

(報道に関すること)

東北大学多元物質科学研究所 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

価値観の多様化や経済格差の鮮明化など、先を見通すことが困難になりつつある現代において、持続可能な社会を実現して安心・安全な生活環境を構築することは、多くの人々が願うところであると考えられます。このためには、限りあるエネルギー資源の高効率な利活用技術の開発が一つの方策と言えます。例えば、鉄道や電気自動車のような電力を強い動力に変換して利用する社会インフラ応用では、高耐圧かつ低損失にて電流の整流や電圧変換を行うダイオードやトランジスタといった電子デバイスが重要です。また、照明や通信、太陽光発電などの光応用分野においては、電気エネルギーを光エネルギーに変換するLEDや半導体レーザ、また逆に、光エネルギーを電気エネルギーに変換する太陽電池のような光デバイスの高効率化が不可欠です。これら半導体デバイスは、用途に応じて様々な材料を用いて製造されますが、なかでも窒化ガリウム (GaN) は、高性能な電子デバイスや光デバイスに適する材料の一つとして注目され、国内外における各種デバイスの開発競争が激化しています。

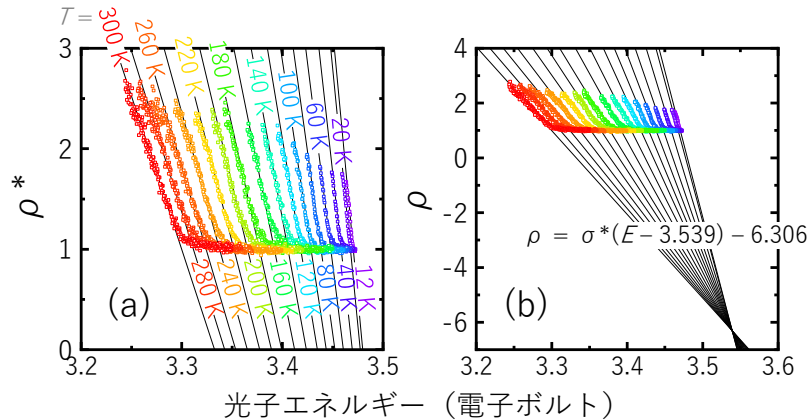
GaNに基づく高耐圧トランジスタや高出力LEDの性能を支配する要因として、不純物や原子空孔欠陥\*4が挙げられます。不純物や原子空孔欠陥の中には、特有のエネルギー準位を形成することにより、光デバイスの発光効率を低下させるものがあります。また結晶に強い電界が印加されると、このような準位は電子の発生源として働くため、トランジスタがOFFの状態でも電流が流れてしまう「電流リーク」が発生します。さらにこのような不純物や原子空孔欠陥は、極めて微量であっても結晶の発光効率を低下させるため、高感度かつ高精度な検出手法が望まれています。これまで小島准教授らは、半導体結晶の高精度な発光効率計測法 (ODPL法) を提案し、積分球\*5を核とする分光技術を駆使した半導体ウェハの高速・高感度検査手法の確立や、極低温下における発光量子効率測定を実現させてきました。

### 2. 研究手法と成果

本研究にて着目しているGaNは直接遷移型半導体\*6と呼ばれ、外部から励起を受けると特有の光を放出します (例えば、GaNにInNを混ぜたInGaNは青色LEDの発光層に利用されています)。この時、結晶欠陥の少ない結晶ほど強く発光するため、発光量もしくは発光効率を指標とすることによって結晶の品質管理が可能となります。光計測は一般に瞬時かつ感度が高いという利点がありますが、一方で計測者の技量によってその強度が簡単に揺らぐため、再現性に乏しいことが知られています。このため小島准教授らは、積分球と呼ばれる装置内に試料を配置して、結晶から放出された光を全方位に渡って集めることで発光量や効率を絶対測定する方法に着目し、評価技術の改善に取り組んできました。

本研究では、結晶を冷却しつつも積分球が熱的に分離できる独自の温度可変ODPL装置を用いて、室温から絶対零度に近い極低温 (約-261℃) まで、幅広い温

度域においてGaN結晶の発光スペクトルを測定しました。また理論モデルを構築し、結晶内部にて生じた発光が、結晶の光吸収の度合いに応じて結晶内を伝搬する様子をコンピュータを用いて再現することを試みました。その結果、ODPLスペクトルに特徴的に見られるスペクトルの双峰性形状が、結晶のバンドギャップエネルギーよりも低いエネルギー領域に存在する光吸収の裾（Urbach-Martienssen tail）に起因することを発見しました。



\*  $\rho$  はODPL強度とSPL強度の比を表す。

【参考画像 2】 (a) ODPL スペクトルを SPL スペクトルにて除した発光強度比  $\rho$  を様々な温度にて計測した結果。(b) (a)を拡大し、 $\rho$  を外挿したもの。異なる温度にて計測したにもかかわらず、すべてのデータ外挿線が座標上の共通点  $(E, \rho) = (3.539 \text{ eV}, -6.306)$  を通過した。これは、 $\rho$  が Urbach-Martienssen tail と同じ性質を持つことを意味している。

本研究成果は、GaN結晶の発光量子効率と光吸収の関係を明らかにするものであり、さらには簡便な方法にて半導体結晶の光吸収スペクトル計測を可能にするものです。そのため、GaNウェハ上に作製されるパワートランジスタやLED、半導体レーザ、太陽電池など、様々な半導体デバイスの開発・製造を加速させるものと期待されます。

### 3. 今後の展望

ODPL 計測法は、直接遷移型半導体であれば無機材料だけでなく有機材料にも適用が可能であるため、GaN 以外の様々な光材料についても検証を行いたいと考えています。

#### 【論文情報】

タイトル: Urbach-Martienssen tail as the origin of the two-peak structure in the photoluminescence spectra for the near-band-edge emission of a freestanding GaN crystal observed by omnidirectional photoluminescence spectroscopy

著者名: K. Kojima and S. F. Chichibu

雑誌名: Applied Physics Letters

DOI: 10.1063/5.0028134

## 【用語解説】

### \*1. 発光量子効率

対象となる発光材料に（本研究では励起レーザーによって）入射・吸収された光子数に対する、発光に利用された光子数の割合のこと。

### \*2. 半導体レーザー

光通信やCD・DVDなどの光メディアの情報読み込み・書き込みなどに利用される、指向性の高いレーザー光を放出する半導体光デバイスのこと。

### \*3. 全方位フォトルミネセンス（ODPL）法

積分球を使った分光法の一つ。基礎吸収端エネルギー以上の光の放出方向が決まっていることを利用し、結晶の発光効率を再現性良く測定できる。

### \*4. 原子空孔欠陥

結晶を構成する原子が本来存在する位置に原子が存在せず空虚となっている欠陥。結晶の周期性は乱さないが、周囲の電気的なバランスが崩れており、結晶の特性を大きく変化させる欠陥。

### \*5. 積分球

内壁が硫酸バリウムやスペクトラロンといった拡散反射率の極めて高い（つまり、真っ白な）材料にて覆われた球状の装置。硫酸バリウムは、胃のレントゲンで造影剤としても用いられる。

### \*6. 直接遷移型半導体

光を強く放出し、かつ、基礎吸収端エネルギーよりも大きなエネルギーの光を強く吸収する性質を持つ半導体のこと。