

窒化ガリウムを用いた ナノメートル領域の温度計測

量子科学技術研究開発機構

量子ビーム科学部門

高崎量子応用研究所 先端機能材料研究部

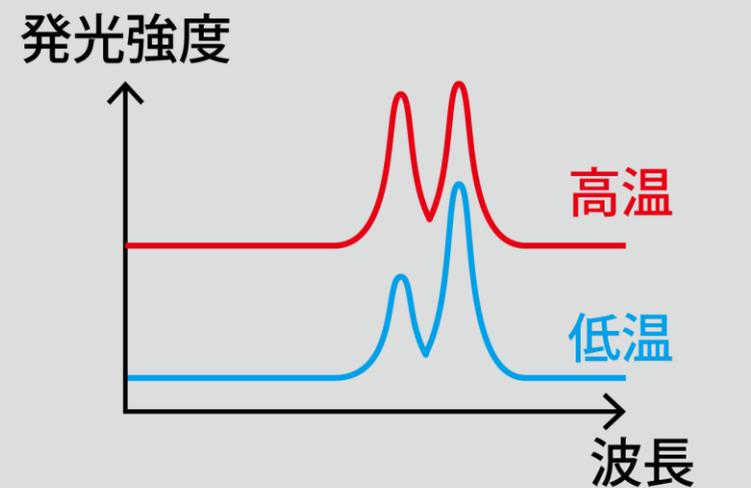
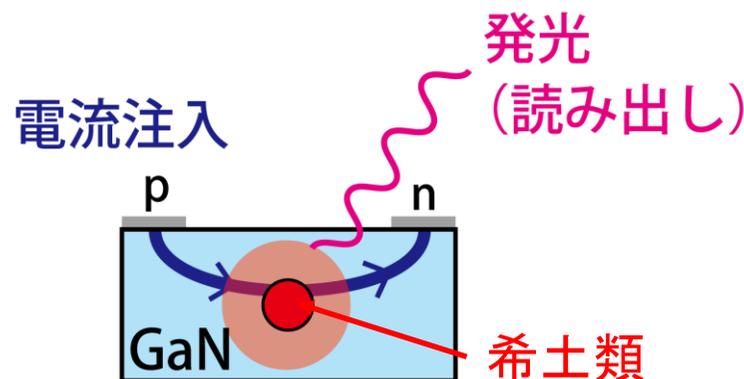
主幹研究員 佐藤 真一郎

2021年7月13日

新技術の概要

窒化ガリウム中に希土類元素を極微量混入させ、電流注入発光を用いることで、**励起光源不要でナノメートル領域の温度を精密に測定する**技術です。以下のような応用例を想定しています。

- ナノサイズの位置分解能での温度分布の時間変動測定
(二次元温度分布モニター)
- 細胞活動に伴う温度変化の計測
(細胞内温度イメージング)
- 半導体デバイス内部の温度分布計測
(リアルタイムデバイス診断)



従来技術・競合技術との比較

“希土類元素の発光を用いた温度計測”

従来技術例: 特許4147057「温度センサおよびそれを用いた温度測定装置」

【従来技術】

- 母材料として**絶縁体**(セラミック、酸化物)を使用
- 電氣的制御が不可能 = **小型化や配列化に難**
- 励起光源としてレーザー光などが必要 = **高価**

【本技術】

- 励起光源が**不要**(あってもよい)
- 電流を流すだけで簡便に温度計測ができる
- センサの**微細化(小型化)**、**配列化**、**低コスト化**が実現できる

関連技術：“量子”センサ

結晶(半導体)中の点欠陥・不純物の電子スピン・発光特性を利用した温度や磁場・電場の高感度計測

- 特長: 高感度 & マルチスケーラビリティ
- ナノメートルスケール領域の高感度計測
- 量子センサをうまく導入すれば、デバイス特性を悪化させずに、**デバイス内部の局所的な温度(等)のリアルタイム計測**が可能
→ **診断、故障等の事前検出**

半導体中の量子センサ

ダイヤモンド・・・窒素・空孔複合欠陥
(NVセンター)等

SiC ... シリコン空孔(V_{Si})等

GaN ... 希土類元素(本技術)

量子技術の最近の動向

2020年1月 内閣府「量子技術イノベーション戦略」策定

- 量子コンピュータ・量子シミュレーション
- **量子計測・センシング**
- 量子通信・暗号
- 量子マテリアル(量子物性・材料)

2021年5月31日

「量子技術による新産業創出協議会」の設立発起人会が開催

「量子」技術で産業創出へ 大手企業11社が官民の協議会設立 | IT・ネット | NHKニュース

<https://www3.nhk.or.jp/news/html/20210601/k10013061151000.html>

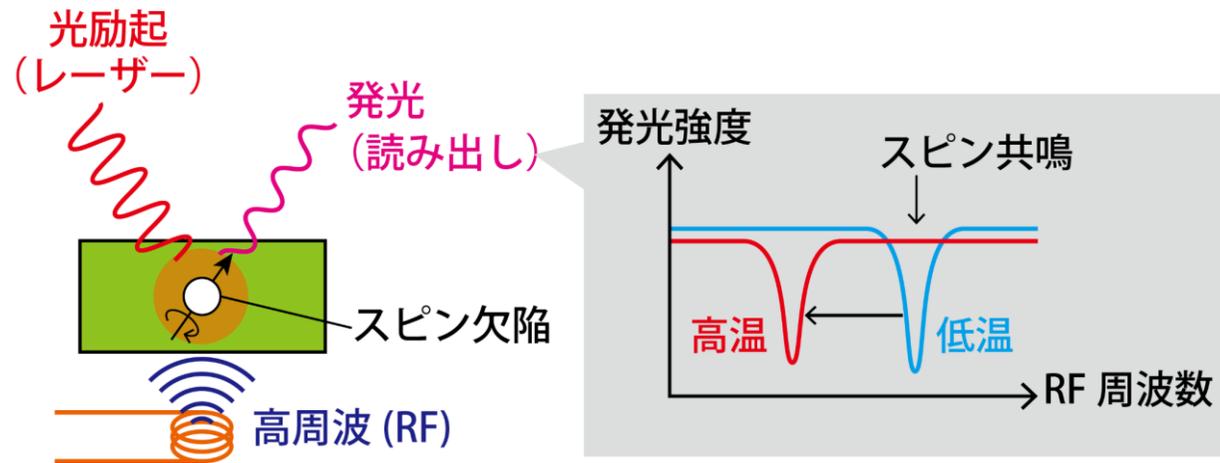
**産学官における、量子技術(量子センシング含む)の
研究開発が今まさに加速しています！**

量子センサによるデバイス内部診断

動作中デバイスのリアルタイム内部診断は、その材料中の量子センサでなければ行えない

【従来の量子センサ】

- 多くの場合、光検出磁気共鳴(ODMR)に基づく方法で温度(等)を計測するため、**高周波印加が必要**
- 母材料は主にダイヤモンドやSiC中のスピン欠陥



【本技術】

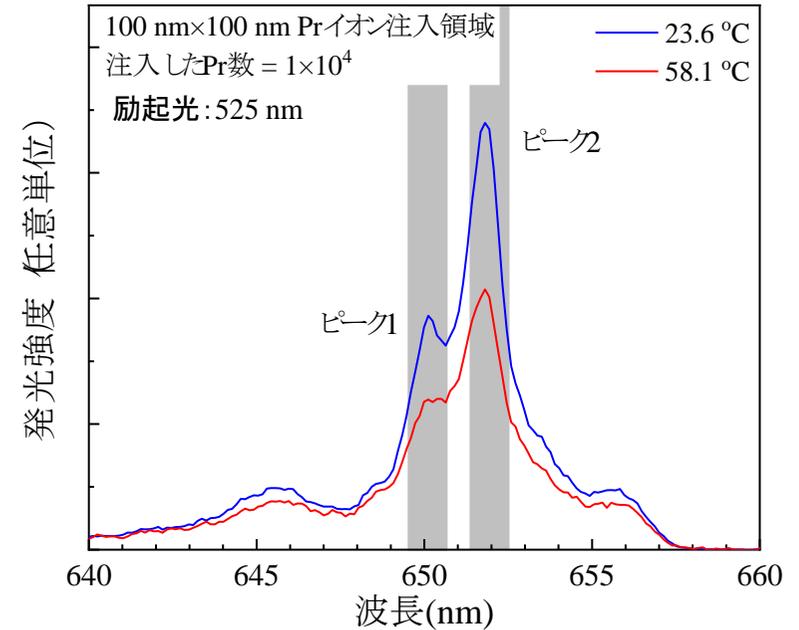
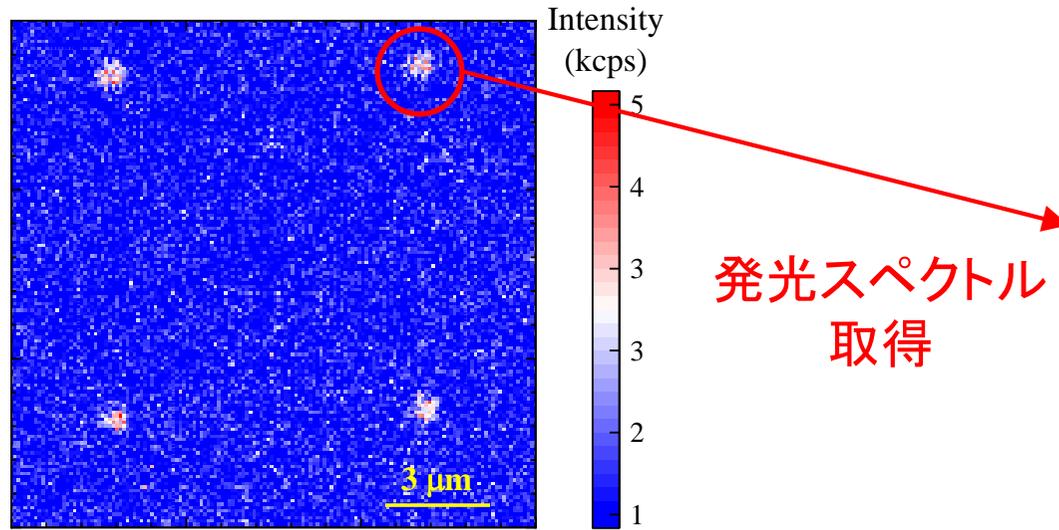
- 高周波印加が**不要**で、計測系がシンプル
- GaNを母材料とする量子センサとしては(現状では)唯一

従来技術との比較(まとめ)

	本技術	従来技術		
母材料	GaN	ダイヤモンド	SiC	セラミック 酸化物
センサ	希土類元素 (プラセオジウム等)	NVセンター等	シリコン空孔等	希土類元素
量子センサ?	Yes	Yes	Yes	No
ナノ領域計測	△(→○) ナノスケール	○ 原子スケール	○ 原子スケール	×
電氣的制御	○	△	○	×
微細化・配列化	○	△	○	×
低コスト化	○ レーザー・高周波 不要	△	△	△
デバイス 内部診断	GaNデバイス	ダイヤモンドデバイス	SiCデバイス	×
検出感度	? (今後定量化)	○	○	○

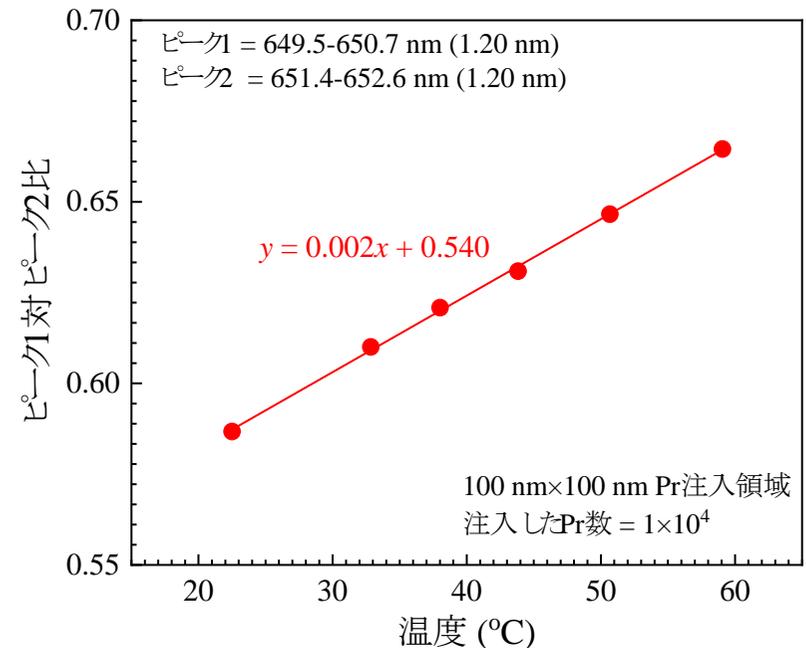
ナノ領域温度計測

2次元発光分布 (525nm光励起、38.3°C)

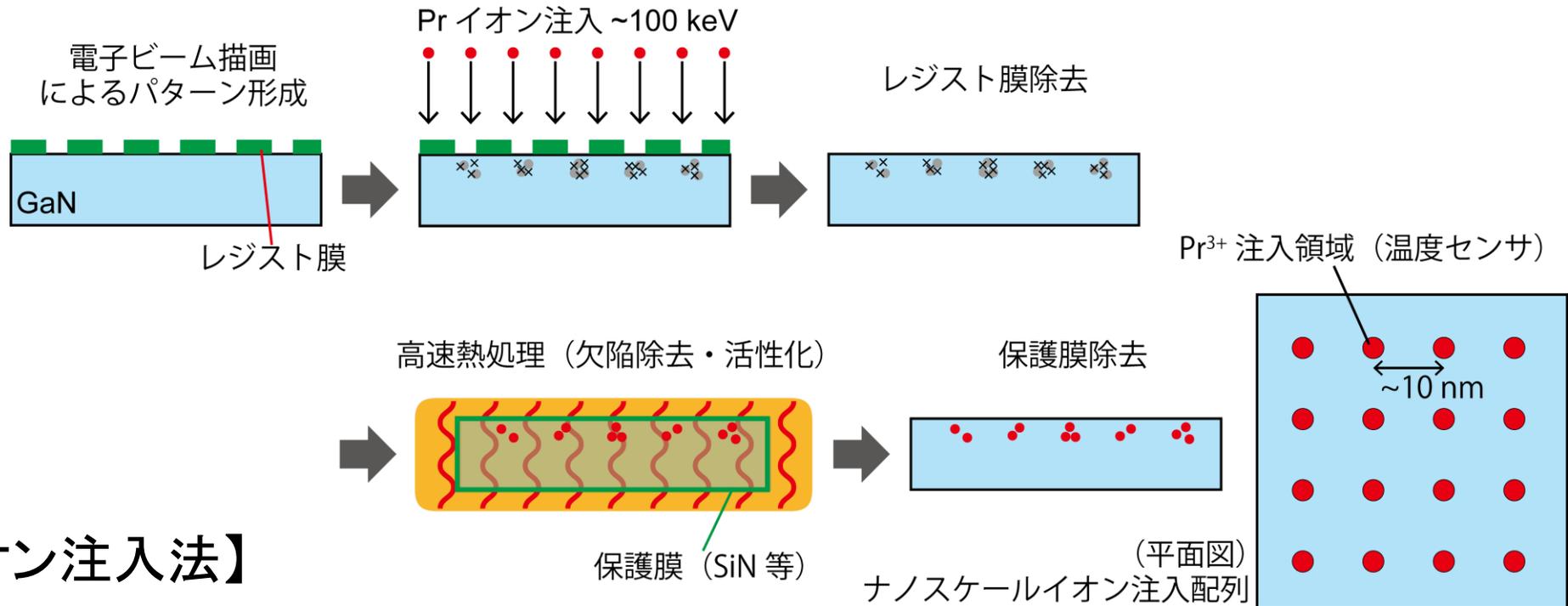


- GaNのナノスケール領域 (100 nm x 100 nm領域) に Pr(プラセオジウム) イオンを1万個注入
- Prイオンは主に650nm(ピーク1)、652nm(ピーク2)の発光を示す
- 温度が高くなると、ピーク2に対するピーク1の強度(比率)は増加
- ピーク1とピーク2の比率から温度が求められる

感度 $S = 3 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ $S = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$



ナノ領域温度センサの形成方法

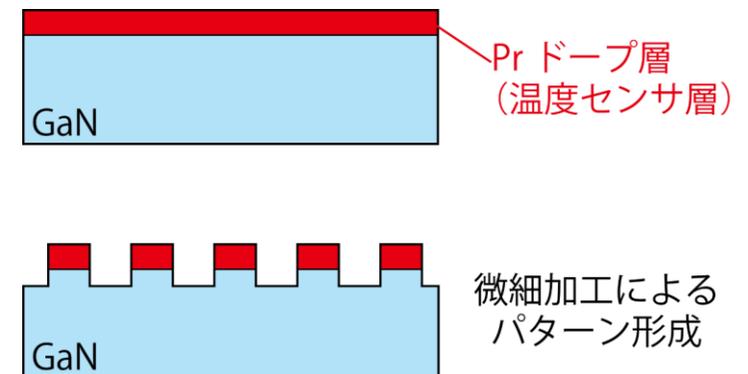


【イオン注入法】

- センサのサイズ・間隔 = ~10 nm以上
(電子ビーム描画精度に依存)
- 任意のパターンを形成可能

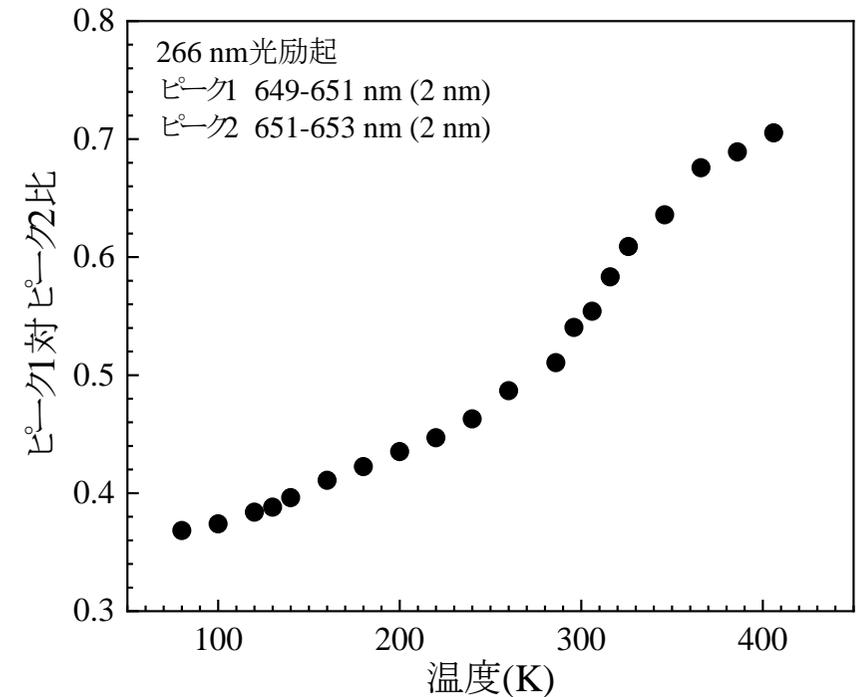
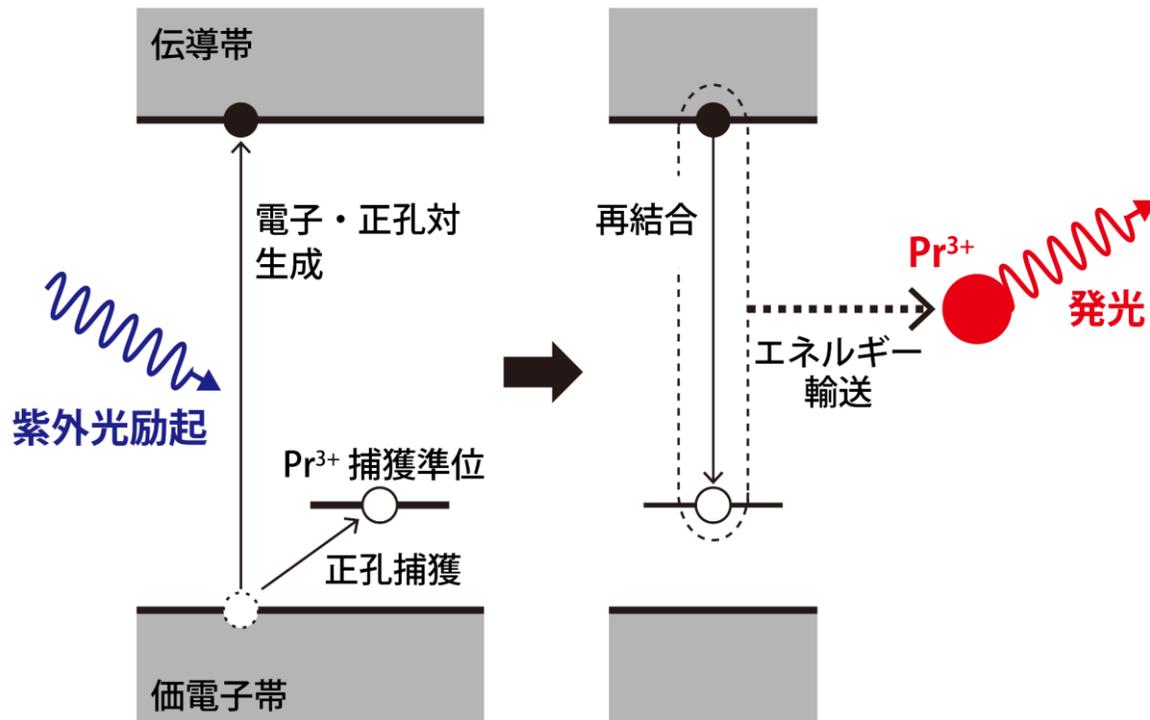
【GaN結晶成長時に直接Prをドーピングする方法】

- nm厚さのセンサ層を形成可能
- 微細加工によるパターン化



電気制御による温度計測

GaNエネルギーバンド

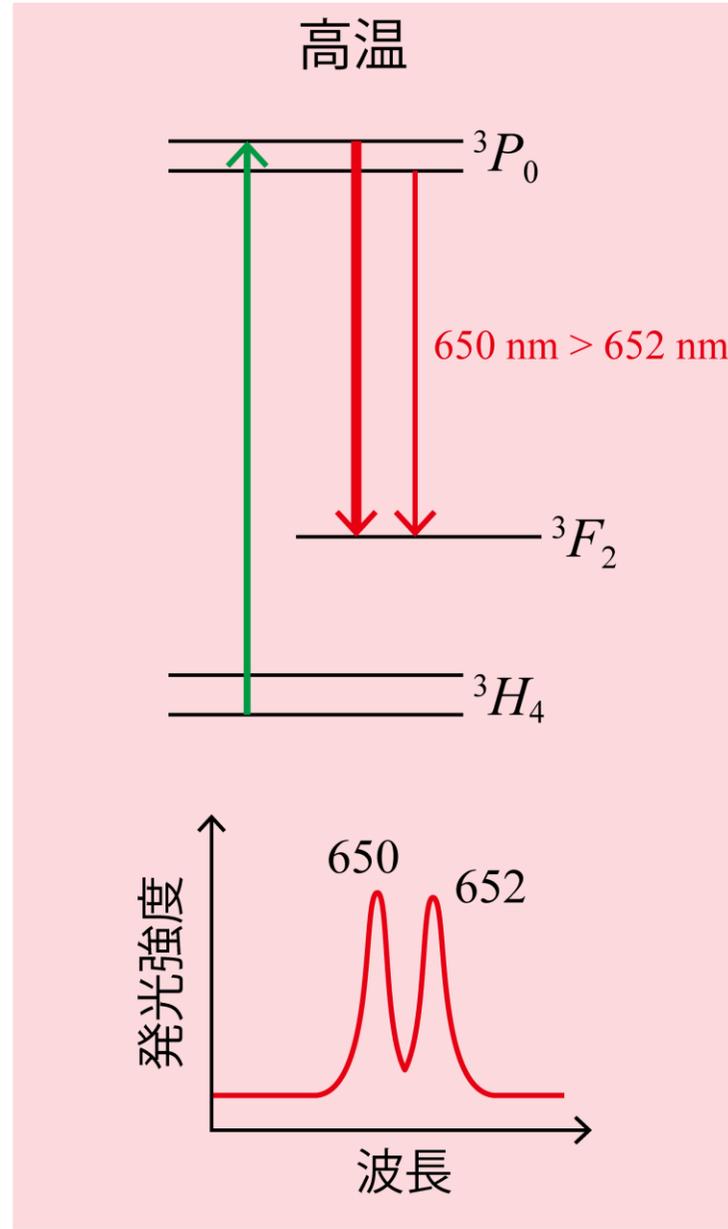
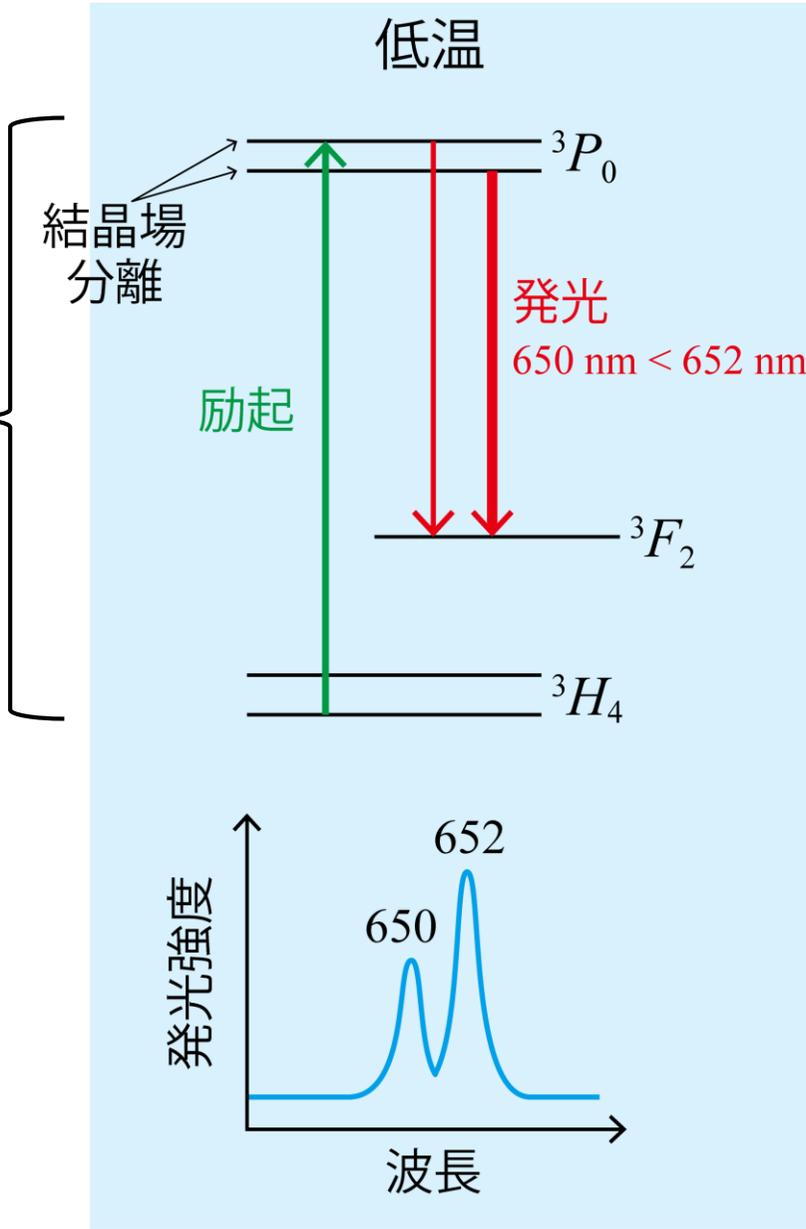


- 紫外線励起 (GaNバンド間励起) によるPr³⁺発光でも同様に温度計測可能
- 紫外線励起発光と電流注入発光はメカニズムが同じ
- **電流注入発光 (=励起光源不要) による温度計測**
- 計測可能範囲: (少なくとも) 80~400 K、室温付近で感度良好

発光スペクトル変化のメカニズム

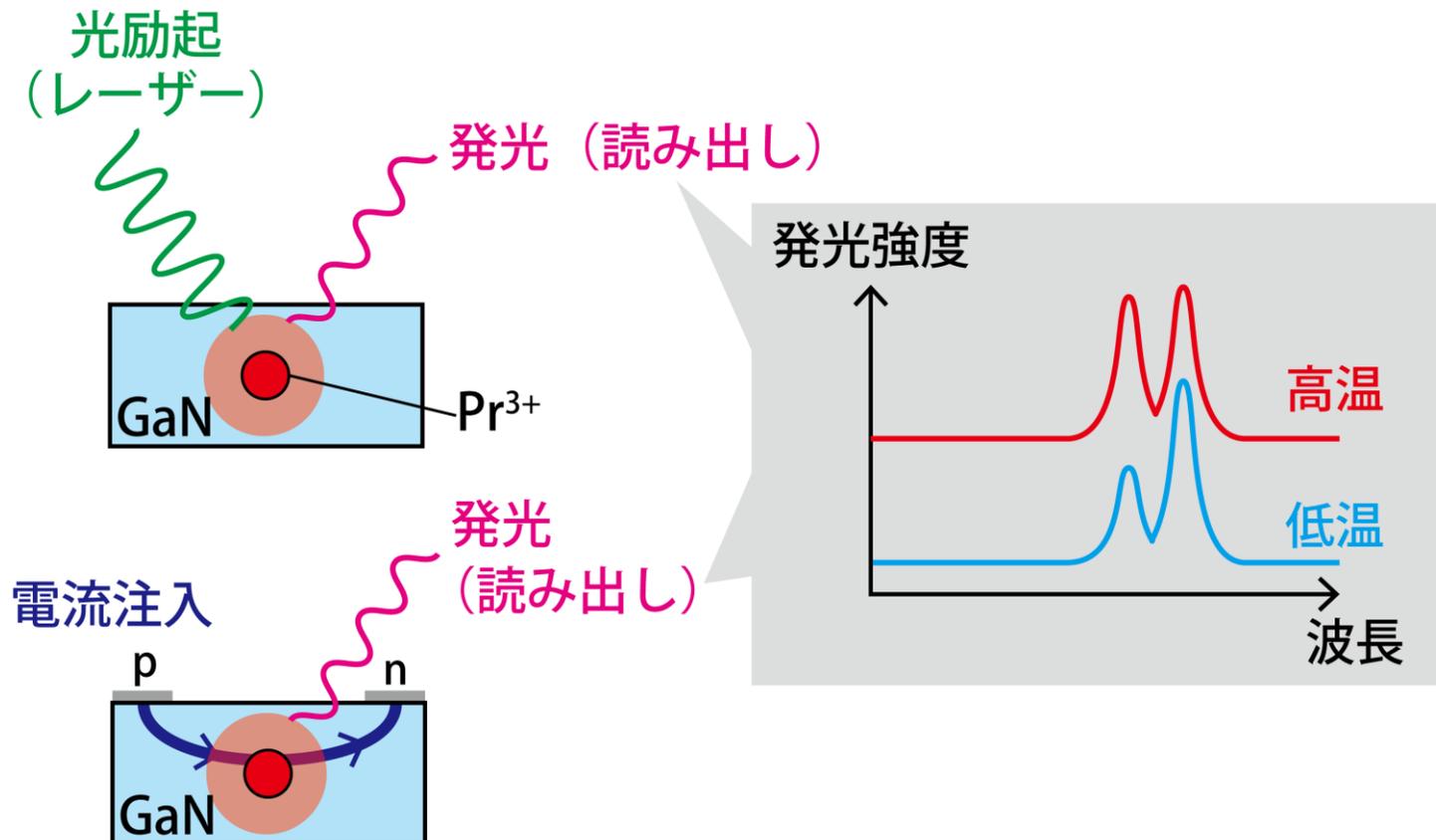
＊ ＊ 暫定 ＊ ＊

Pr³⁺ 4f殻
電子準位



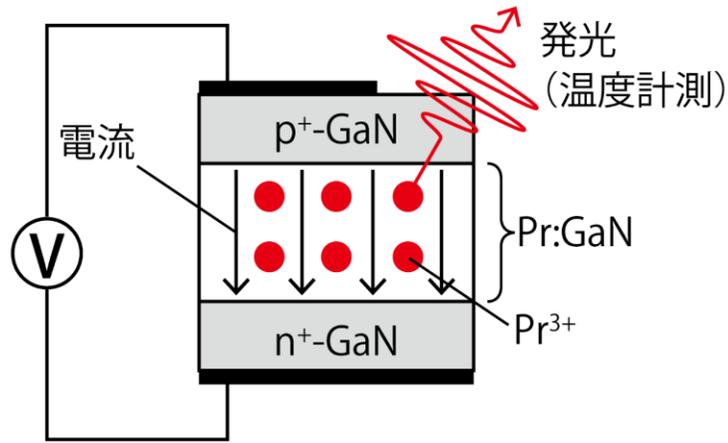
Pr:GaN量子センサ(温度センサ)

- Pr^{3+} = 原子サイズの温度センサ = 量子センサ
- シンプルな計測手法(レーザー・高周波不要)
- 電氣的制御が可能(現在実証中)
- 電界／磁界の計測法についても研究中



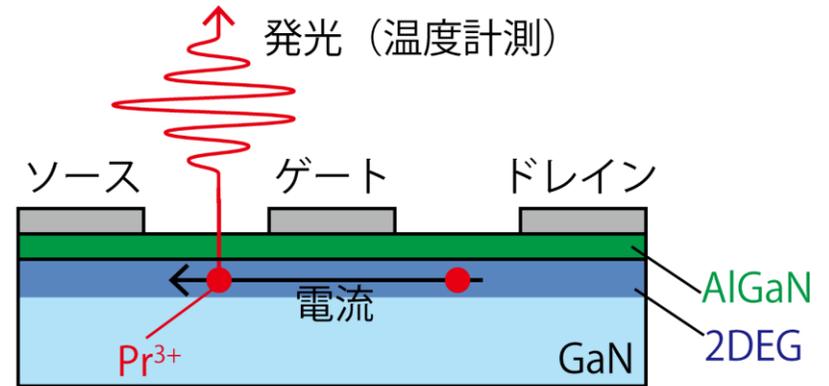
想定される用途

電流注入発光



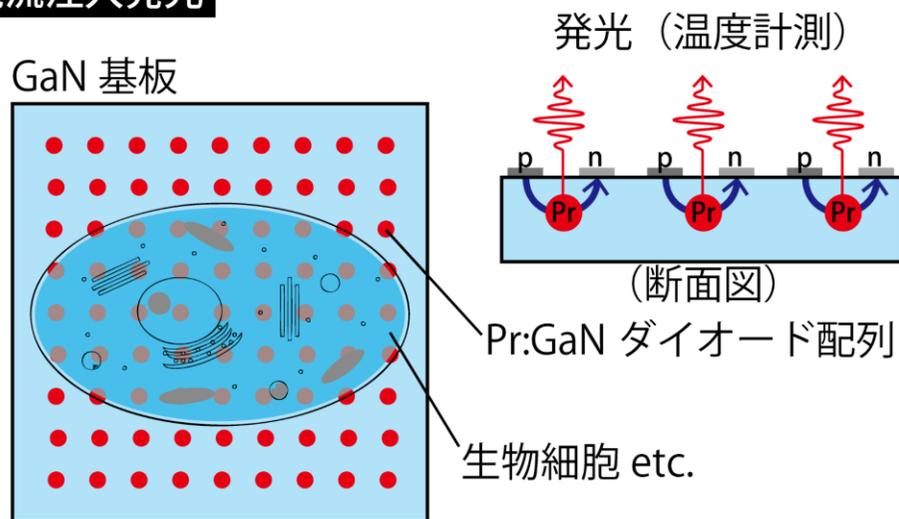
Pr:GaN 温度センサ

電流注入発光



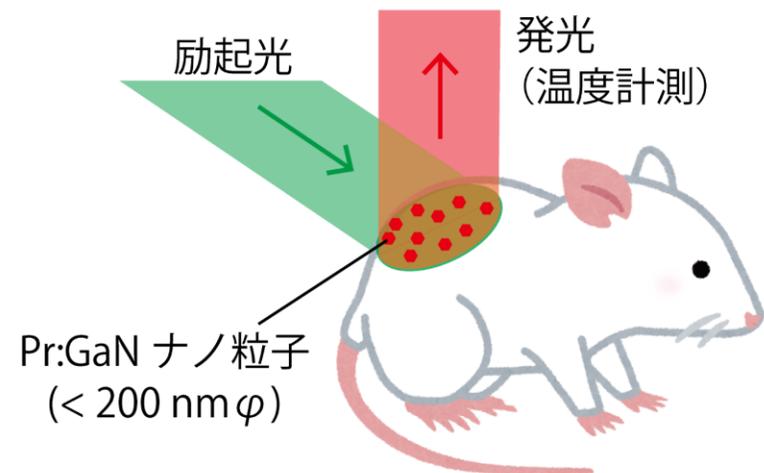
動作中 GaN デバイスのリアルタイム診断

電流注入発光



2次元温度モニタープレート

レーザー励起発光



バイオイメーキング・センシング

実用化に向けた課題

- 導入したPr³⁺を電流注入発光でGaNデバイス内部のナノ領域温度計測を実証するには至っていない(現在、デバイス作製中)
- リアルタイム計測(高速計測)のためには高感度化が必要(現状、30sec程度)
- 温度以外にも、電界や磁界の計測手法を開発すれば、**リアルタイム同時計測**が実現
- 発光観測によらない、電気的検出に基づく計測手法についても検討中

企業への期待

具体的な活用例は
まだない

- 実デバイス(GaNパワー素子、LED、HEMT等)へ実際に利用したい企業(機関)との共同研究を希望

Pr発光の電気制御による
温度計測は未実証

- GaNデバイス設計・製作が可能な企業(機関)との共同開発を希望

電界・磁界計測に
ついては研究中

- 共同研究の希望
- 原理実証からデバイス開発まで

電氣的検出に基づく
計測手法の発案

- 共同研究の希望
- 原理実証からデバイス開発まで

まずはお気軽に御連絡ください！

共同研究機関の募集

2021年～7年間 JST創発的研究支援事業

「ランタノイド・フォトニクス量子デバイス」

ランタノイド=希土類

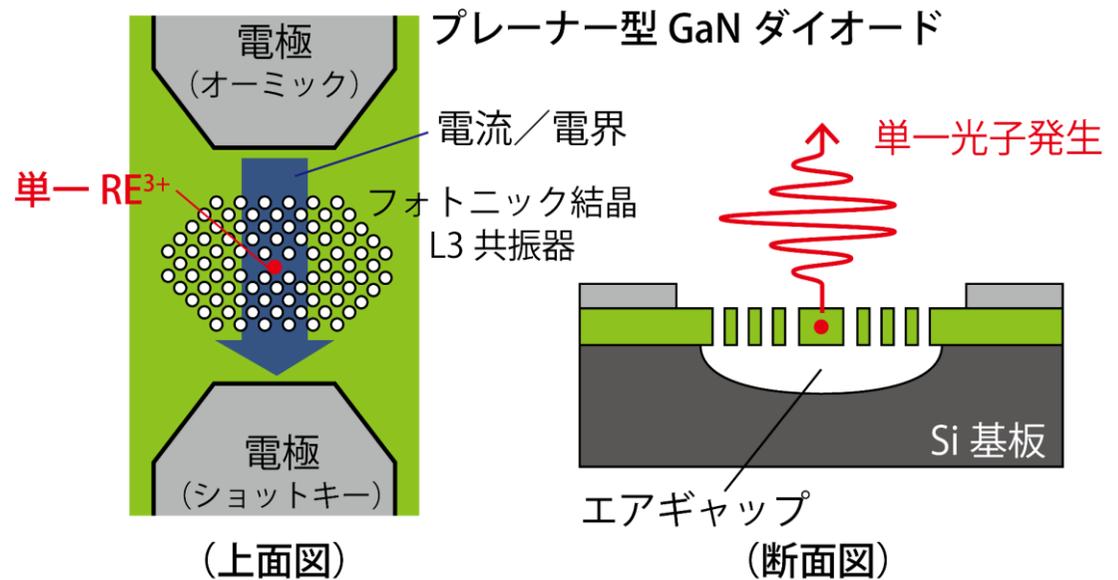
希土類単一光子源

+

GaNデバイス

+

ナノフォトニクス



- GaNデバイス内部診断のための量子センシング(ナノスケール温度・電界同時計測)の研究
- 「室温動作」「電気制御」「光通信波長帯」の単一光子源・量子もつれ光源
→ “オンチップ”光量子コンピュータへ

企業・研究所・大学との共同研究を強く希望します

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 温度検出装置、温度センサ、温度検出方法、および温度検出プログラム
- 出願番号 : 特願2021-032894
- 出願人 : 量子科学技術研究開発機構、東海国立大学機構(名古屋大学)、法政大学
- 発明者 : 佐藤 真一郎(量研)、出来 真斗(名古屋大)、西村 智朗(法政大)

- 発明の名称 : 温度センサ、温度検出装置、温度検出方法、温度検出プログラム、および温度センサの製造方法
- 出願番号 : 特願2021-032895
- 出願人 : 量子科学技術研究開発機構、東海国立大学機構(名古屋大学)、法政大学
- 発明者 : 佐藤 真一郎(量研)、出来 真斗(名古屋大)、西村 智朗(法政大)
-

お問い合わせ先

量子科学技術研究開発機構

イノベーションセンターまでお願いいたします。

TEL 043-206-3146 (共同研究)

043-206-3027 (ライセンス)

FAX 043-206-4061

e-mail innov-prom1@qst.go.jp (共同研究)

chizai@qst.go.jp (ライセンス)