



# GaAsフレーク中の窒素不純物発光中心を用いた シングルモード光ファイバへの長期安定な光結合

## Long-term stable optical coupling to a single-mode optical fiber using nitrogen impurity centers in GaAs flakes



筑波大物理<sup>1</sup>, 物材機構<sup>2</sup>, ○石田 峻之<sup>1</sup>, 佐久間 芳樹<sup>2</sup>, 池沢 道男<sup>1</sup>

### 1 | 研究背景

#### □ 単一光子源

光を用いた量子情報通信技術におけるキーデバイス。

- 光子取得の安定性
- 光源間のエネルギーマッチング

#### □ シングルモード光ファイバ(SMF)への直接接合

- SMFへの単一光子の安定な導入は重要。
- 試料として半導体量子ドットを用いた**長期安定な単一光子源**の研究が行われている。

[H. Sasakura, Appl. Phys. Express **6**, 065203 (2013).]

#### □ 窒素不純物発光中心 (NNセンター)

- **よく定義された発光エネルギー**による単一光子発生は重要。

- 量子干渉のための光源間エネルギーマッチング。
- 光共振器への導入に伴うエネルギー整合。

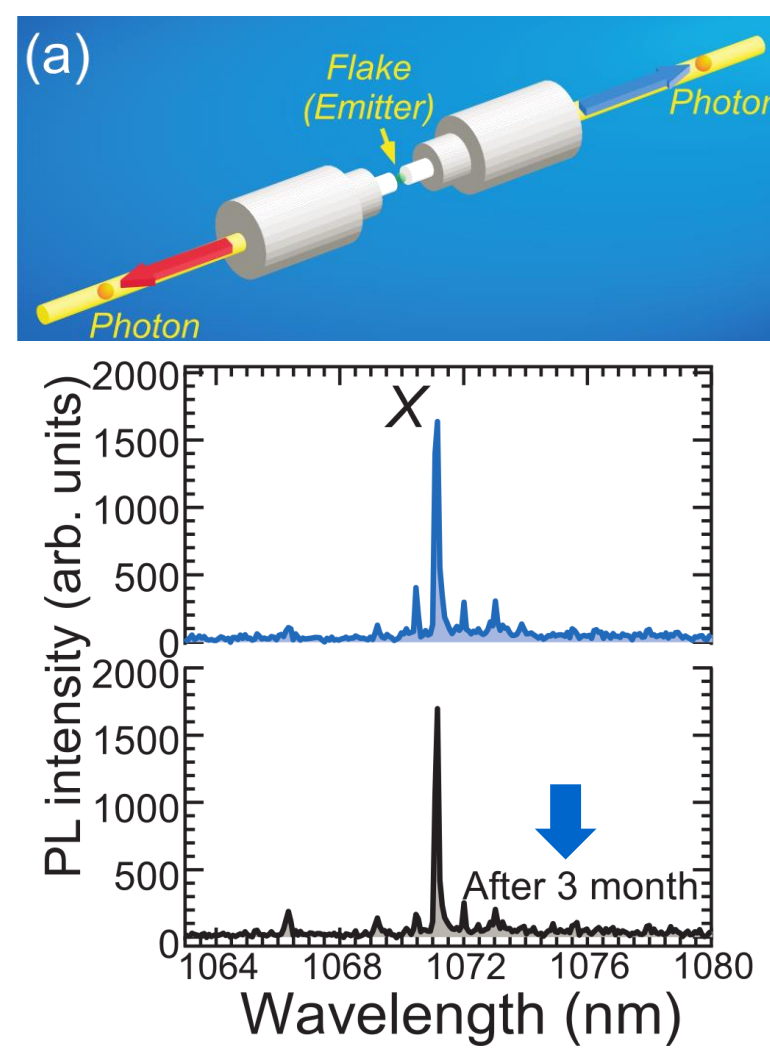
[R. Wang, ACS Photonics **7**, 321 (2020).]

- GaAs中に形成される等電子トラップのNNセンターは窒素原子の配置によって離散的に発光エネルギーが決まる。

[T. Makimoto, Jpn. J. Appl. Phys. **36**, 1694 (1997).]

- 単一光子発生が実証されている。

[L. Zhang, Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 04CG11 (2013).]



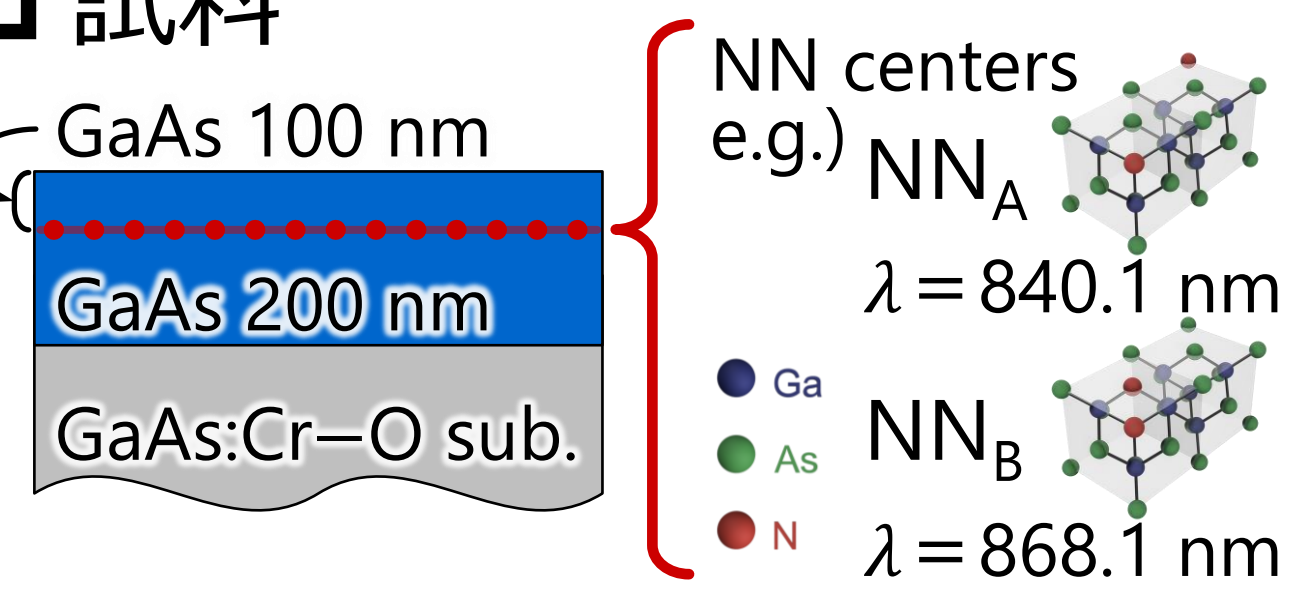
### 2 | 目的

SMFベースの単一光子供給デバイスの実現に向けて、まだ研究例のない、NNセンターとSMFの直接接合構造を作製し、以下について知見を得る。

- NNセンターとSMFの**光結合の実証**と光学特性の評価。
- SMF結合構造の**長期安定性と単一光子取得の可能性**の検討。
- 励起スペクトル(PLE)測定によるNNセンターの励起準位探索を行い**効率的励起条件**を探る。

### 3 | 実験方法

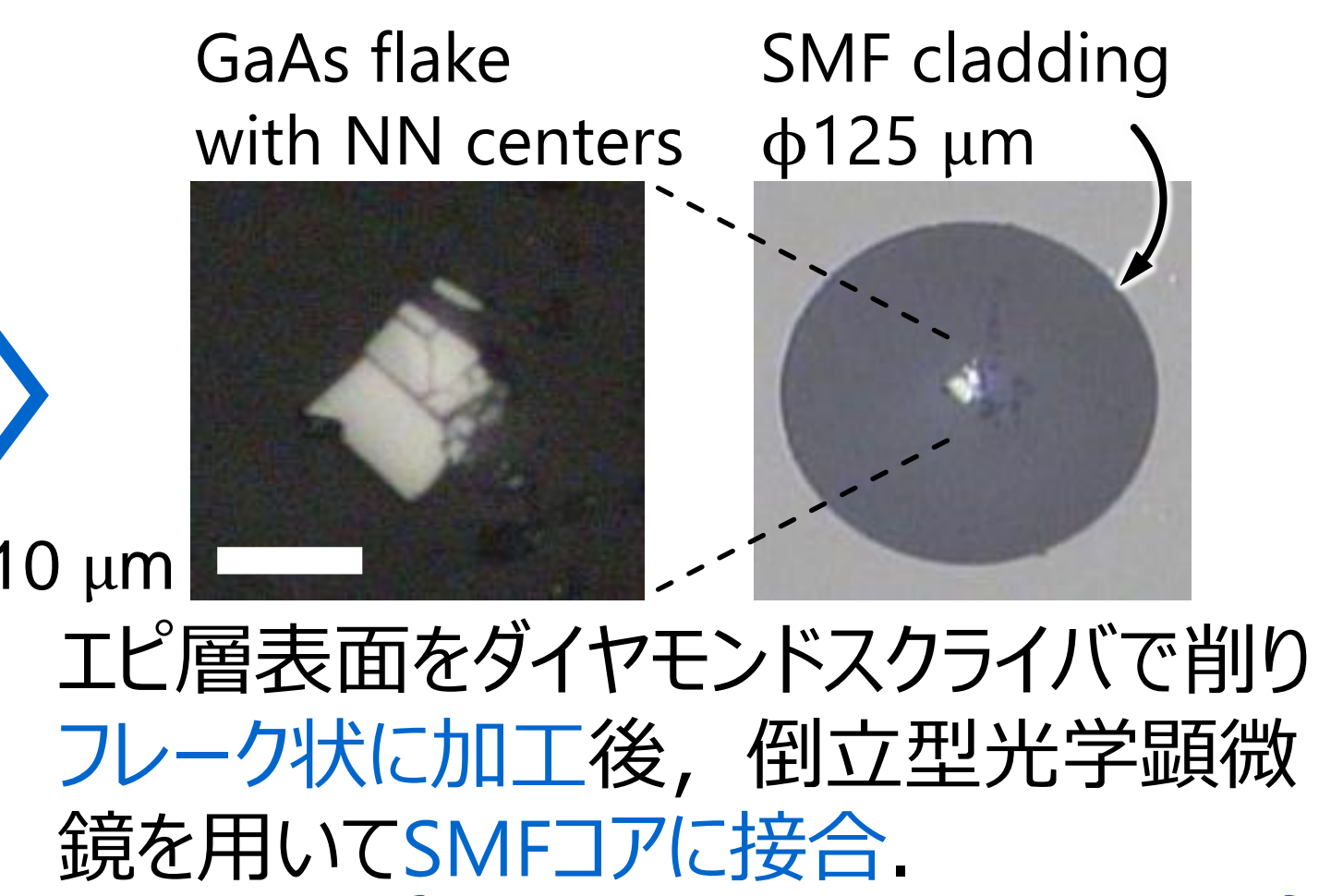
#### □ 試料



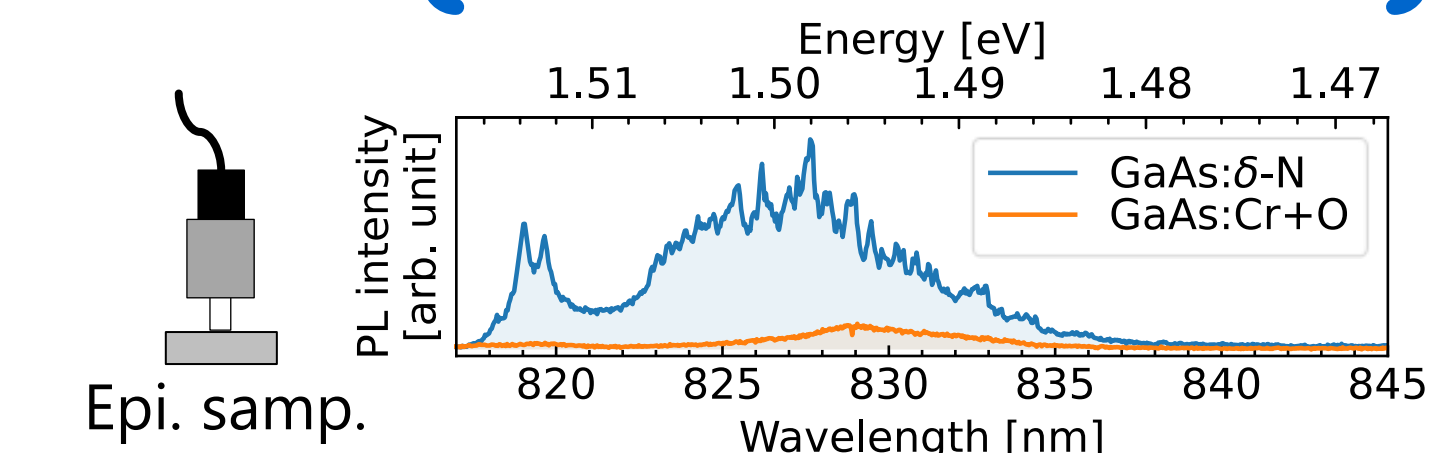
有機金属気相成長法を用いてCr-Oドーパの半絶縁性基板に温度550 °Cでエピタキシャル成長。

原料 { GaAs : TEG+AsH<sub>3</sub>, 窒素δドーパ層 : TEG+DHMy. }

	Nの面密度 [cm <sup>-2</sup> ]
Flake-	42.3 × 10 <sup>11</sup>
顕微鏡	77.0 × 10 <sup>11</sup>

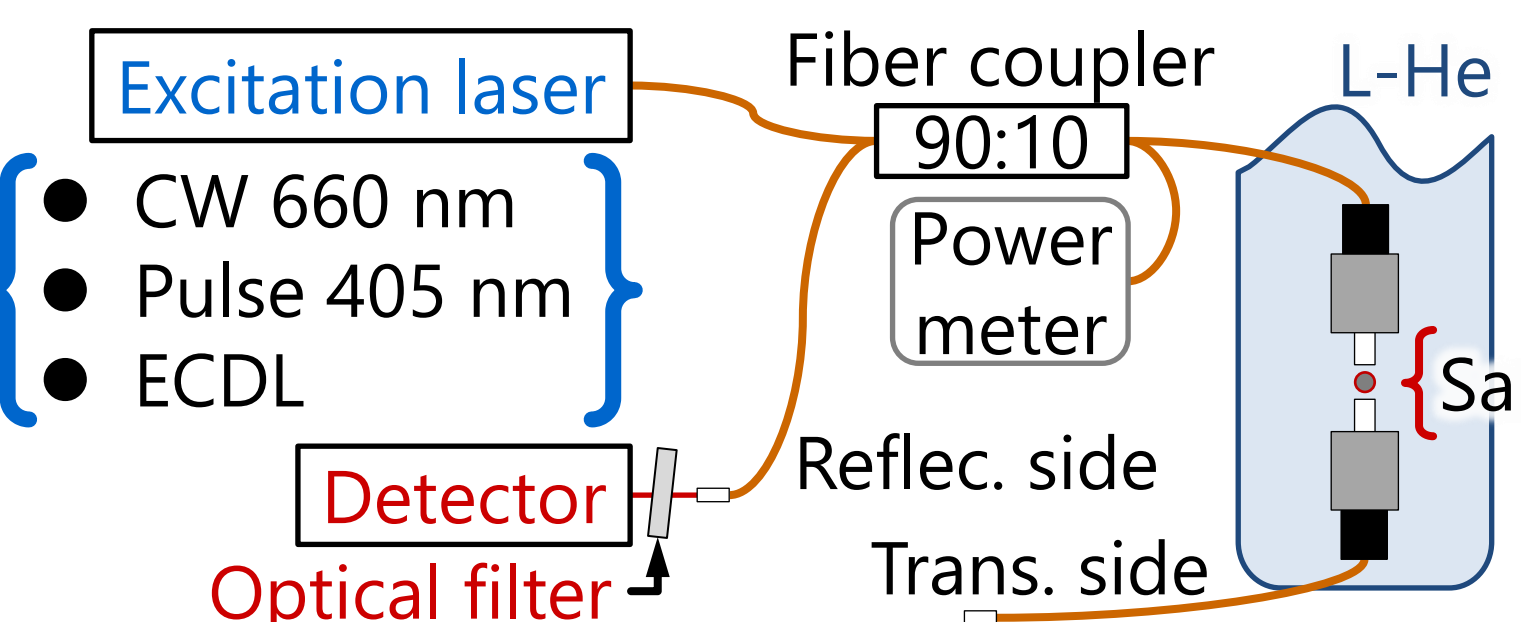


エピ層表面をダイヤモンドスクライバで削り**フレーク状に加工**後、倒立型光学顕微鏡を用いて**SMFコアに接合**。



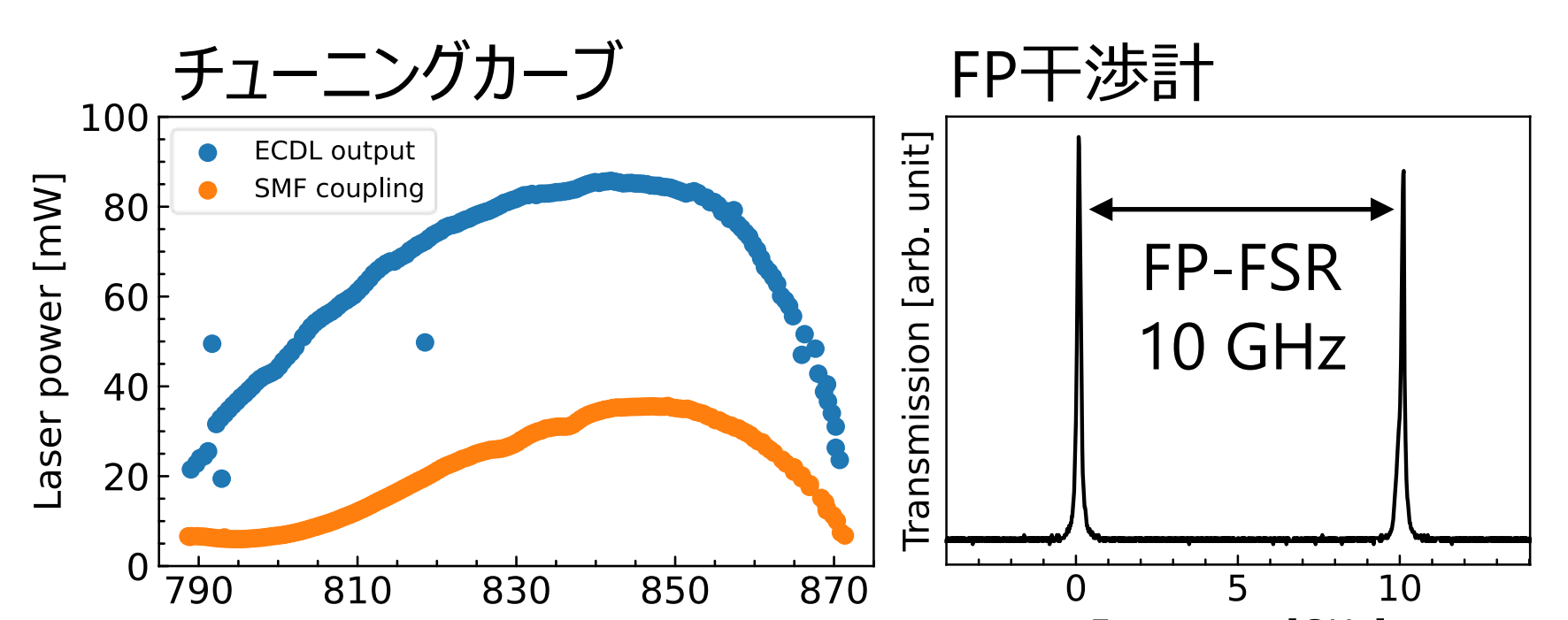
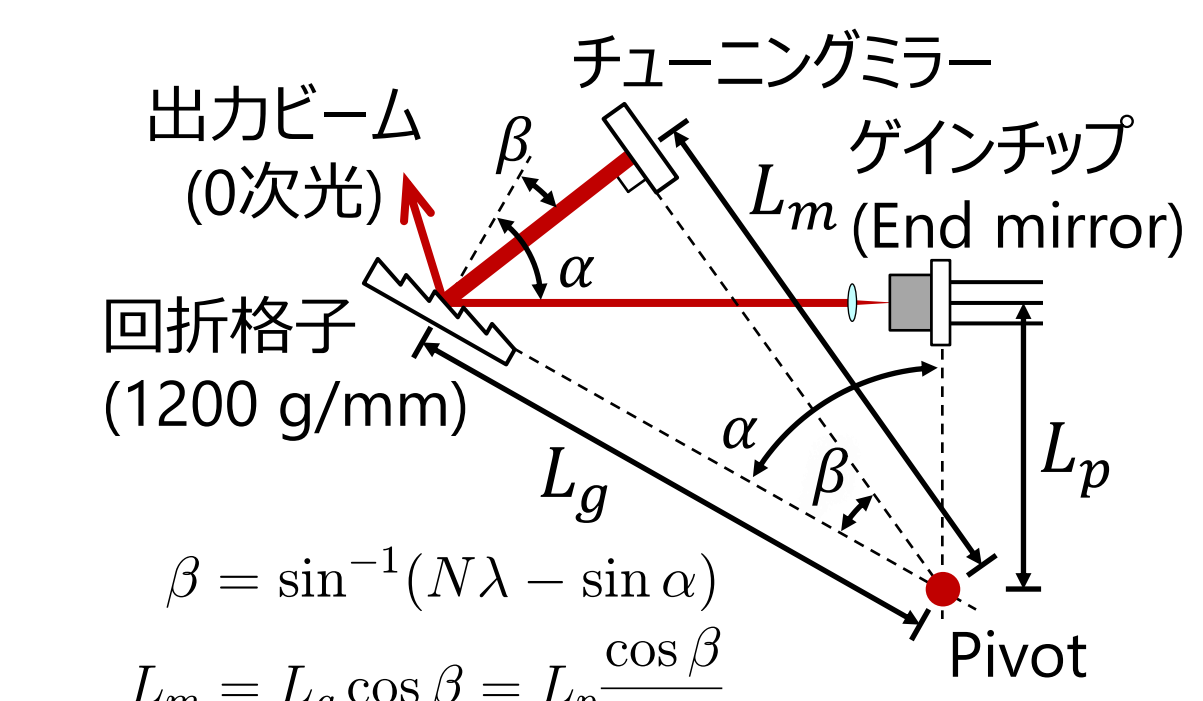
期待効果 { ● 単一NNセンターの局在化。 ● 光取り出し効率向上。 ● 基板からの背景光の低減。 }

#### □ 測定光学系



- 光学系はSMFベースに構成されており、試料は**液体ヘリウム浴**中で冷却される。
- GaAsフレーク試料は**アダプタ**を用いて2本のSMFの端面間に**機械的に固定**される。

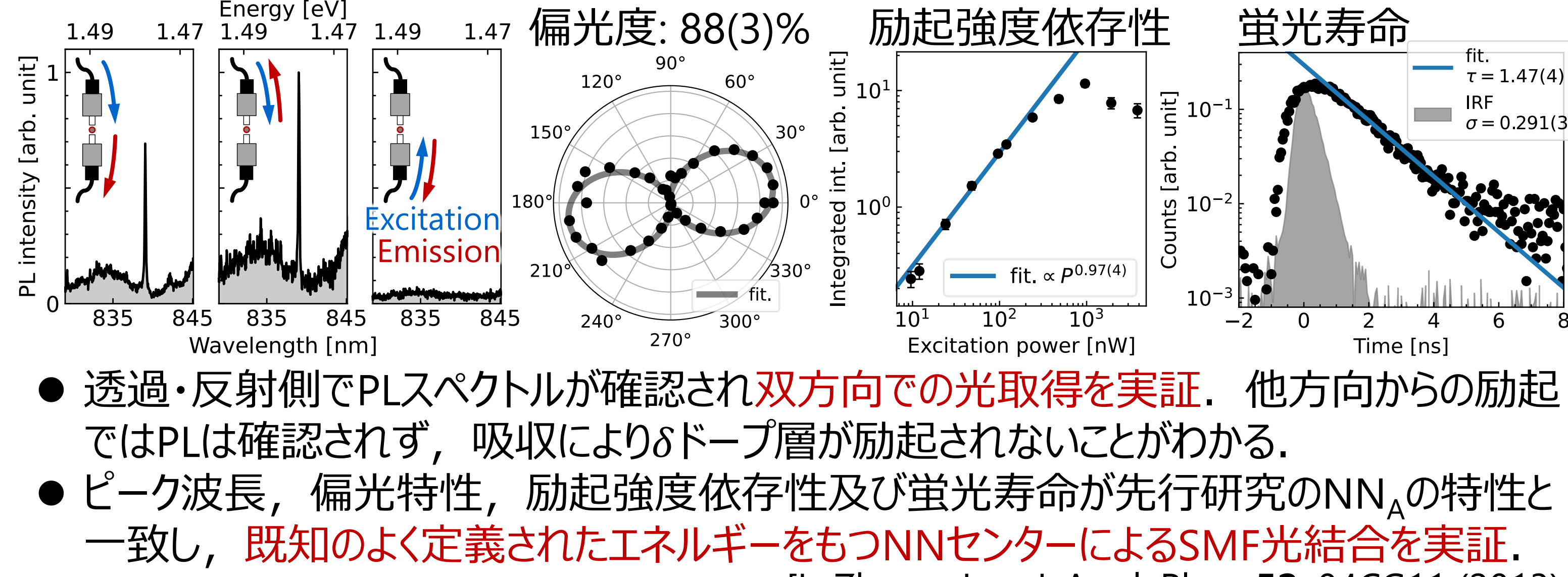
#### Littman-Metcalf型外部共振器半導体レーザー(ECDL)の作製



- ECDLのFSR : ~2.7 GHz.
- 周波数安定性(30 min.) : <800 MHz.
- FP干渉計(Res. 67 MHz)によるスペクトルから単一モード動作を確認。

### 4 | 実験結果と考察

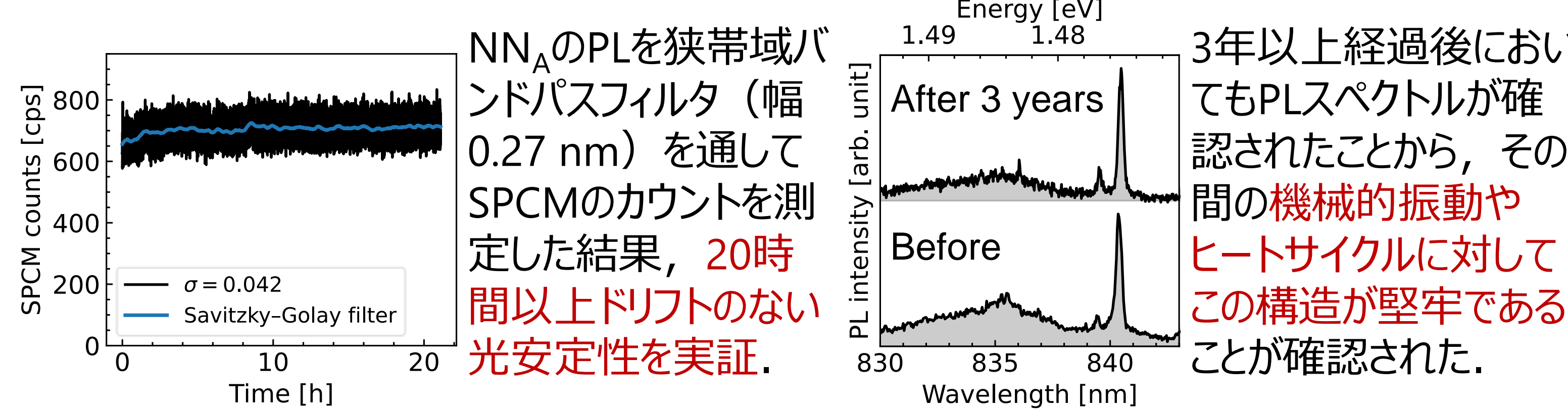
#### □ NN<sub>A</sub>センターの光学特性 (Flake-A)



- 透過・反射側でPLスペクトルが確認され**双方向での光取得を実証**。他方向からの励起ではPLは確認されず、吸収によりδドーパ層が励起されないことがわかる。
- ピーク波長、偏光特性、励起強度依存性及び蛍光寿命が先行研究のNN<sub>A</sub>の特性と一致し、**既知のよく定義されたエネルギーをもつNNセンターによるSMF光結合を実証**。

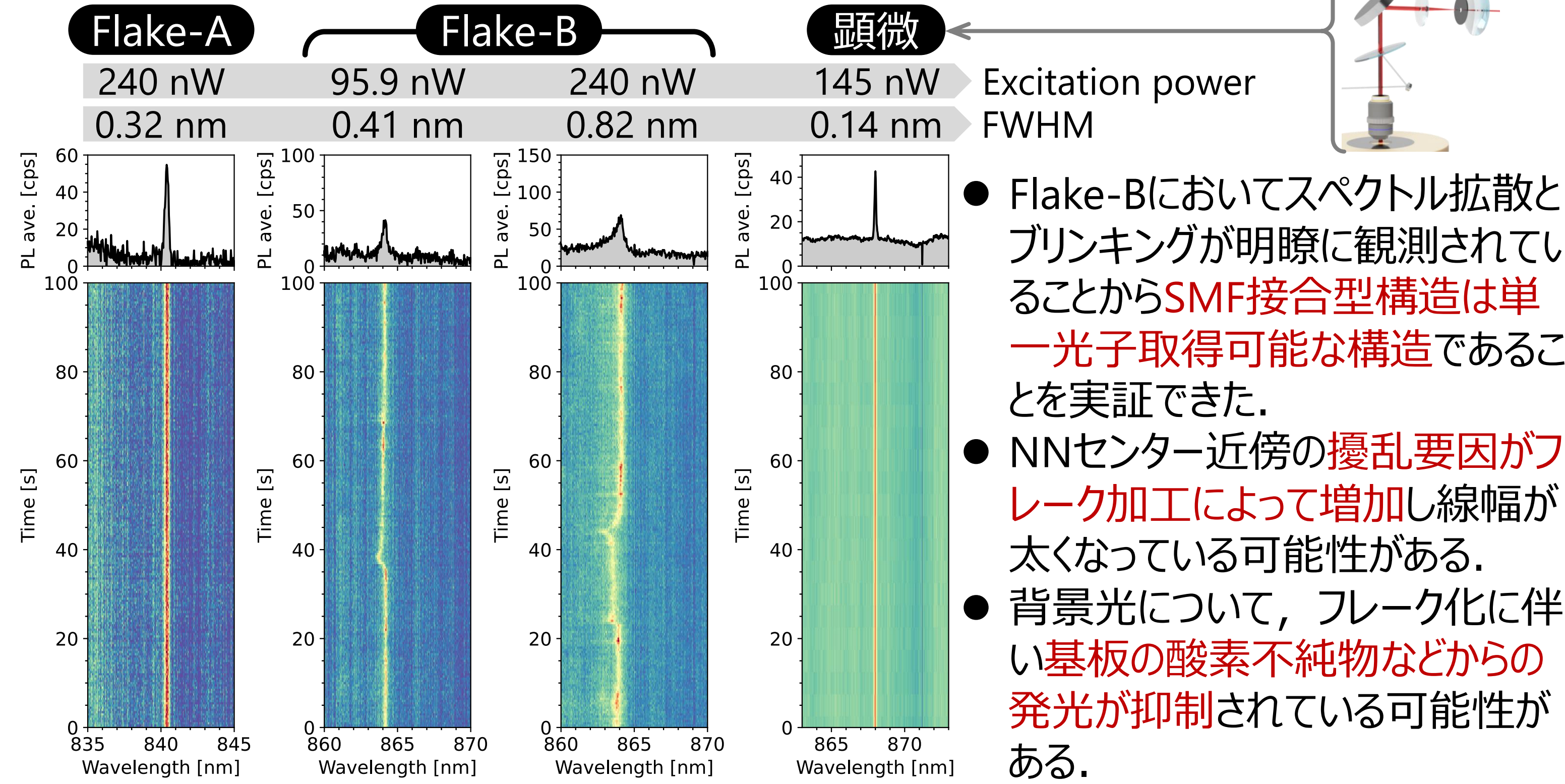
[L. Zhang, Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 04CG11 (2013).]

#### □ SMF接合構造の光安定性と堅牢性 (Flake-A)



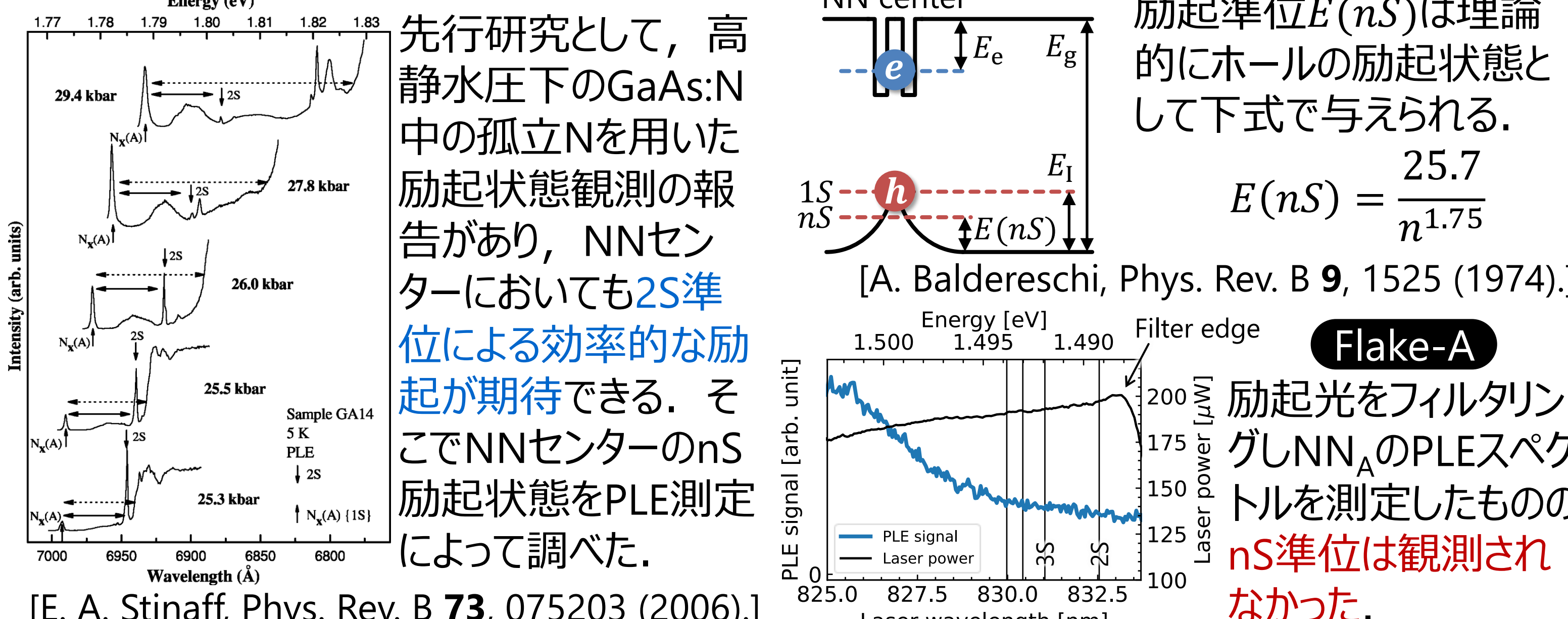
- NN<sub>A</sub>のPLを狭帯域バンドパスフィルタ(幅0.27 nm)を通してSPCMのカウントを測定した結果、**20時間以上ドリフトのない光安定性を実証**。
- 3年以上経過後においてもPLスペクトルが確認されたことから、その間の**機械的振動やヒートサイクル**に対してこの構造が**堅牢**であることが確認された。

#### □ タイムトレース測定によるスペクトル安定性



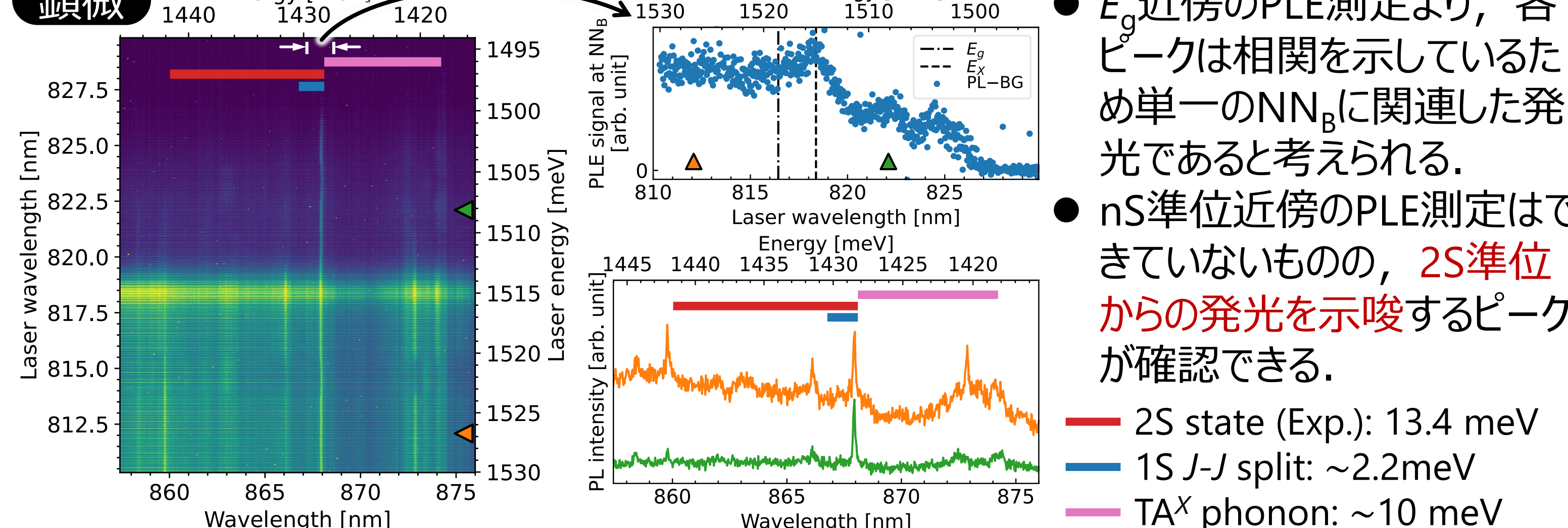
- Flake-Bにおいてスペクトル拡散とプリンキングが明瞭に観測されていることから**SMF接合型構造は単一光子取得可能な構造**であることを実証できた。
- NNセンター近傍の**擾乱要因がフレーク加工によって増加し線幅が太くなっている**可能性がある。
- 背景光について、フレーク化に伴い**基板の酸素不純物などからの発光が抑制**されている可能性がある。

#### □ PLE測定による最適励起条件探索



- 先行研究として、高静水圧下のGaAs:N中の孤立Nを用いた励起状態観測の報告があり、NNセンターにおいても**2S準位による効率的な励起が期待**できる。そこでNNセンターのnS励起状態をPLE測定によって調べた。
- 励起準位E(nS)は理論的にホールの励起状態として下式で与えられる。  
$$E(nS) = \frac{25.7}{n^{1.75}}$$
- 励起光をフィルタリングしNN<sub>A</sub>のPLEスペクトルを測定したものの**nS準位は観測されなかった**。

[E. A. Stinaff, Phys. Rev. B **73**, 075203 (2006).]



- E<sub>g</sub>近傍のPLE測定より、各ピークは相関を示しているため**単一のNN<sub>B</sub>に関連した発光**であると考えられる。
- nS準位近傍のPLE測定はできていないものの、**2S準位からの発光を示唆するピーク**が確認できる。
- 2S state (Exp.): 13.4 meV
- 1S N-N split: ~2.2 meV
- TA<sup>x</sup> phonon: ~10 meV

### 5 | まとめ

- 光源間**エネルギーマッチング**に有望な既知のNN<sub>A</sub>の光学特性を示す**NNセンターとSMFの光結合を実証**した。
- 連続的な**光安定性と長期の堅牢性**が確認され**SMF結合型構造の有効性**を示し、**単一光子取得可能な構造**であることを示せた。
- 効率的励起条件**は明らかにはできていないものの、単一NNセンターのPLE測定では等電子トラップのキャリア結合機構を理解する上で興味深い結果を得た。**SMF結合方法の改善**とともに**キャリア結合機構の理解**を深めることが課題である。