

原子精度ナノ物質による次世代オンチップ光デバイス： 低エネルギー高速光スイッチと決定論的量子光源作製

加藤 雄一郎

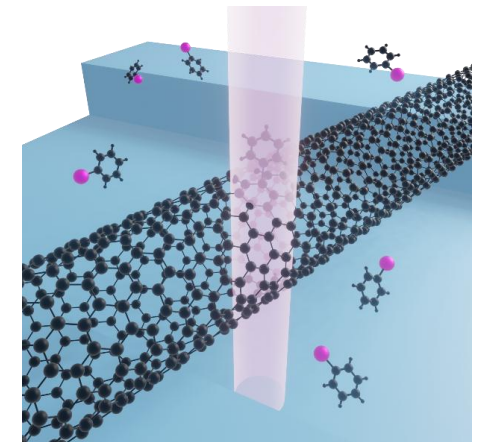
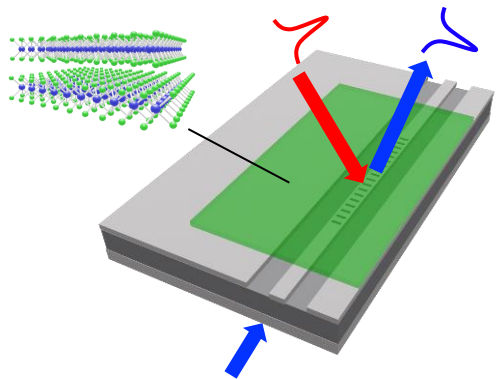


理化学研究所

開拓研究本部加藤ナノ量子フォトンクス研究室

光量子工学研究センター量子オプトエレクトロニクス研究チーム

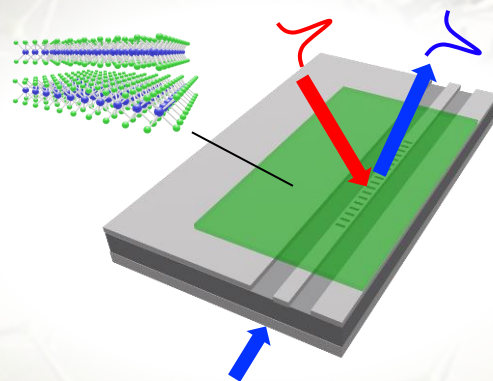
<http://katogroup.riken.jp/>



[Adv. Opt. Mater. **13**, 2402531 \(2025\).](#)

2026年6月16日

[Nano Lett. **25**, 13103 \(2025\).](#)



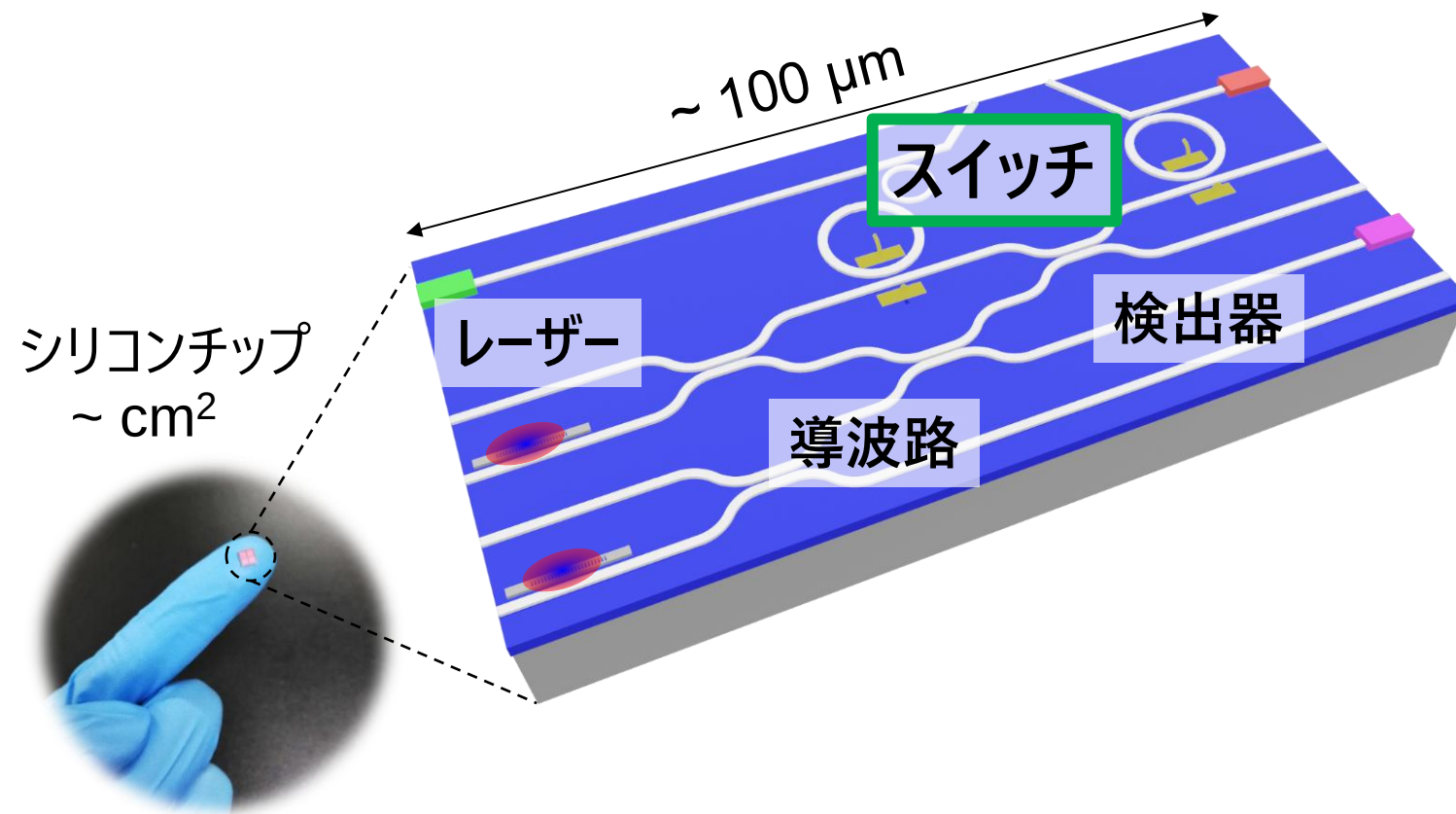
[Adv. Opt. Mater. 13, 2402531 \(2025\).](#)

低エネルギー・高速
全光スイッチング

決定論的
量子光源作製

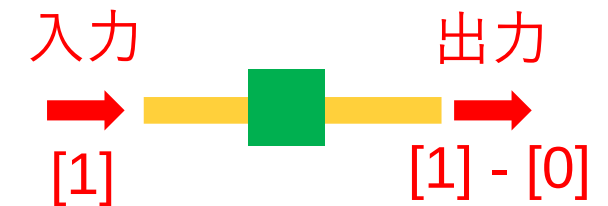
光スイッチングとは

シリコンフォトニクス・プラットフォーム

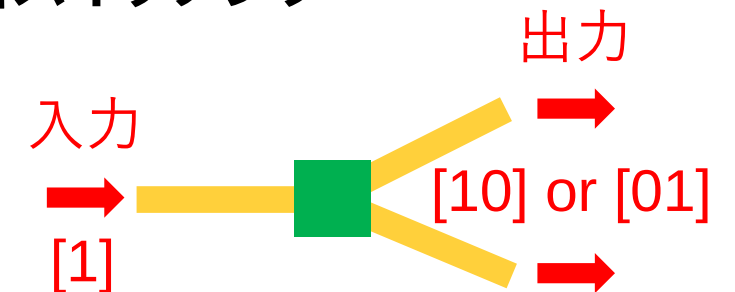


光スイッチ

信号変調



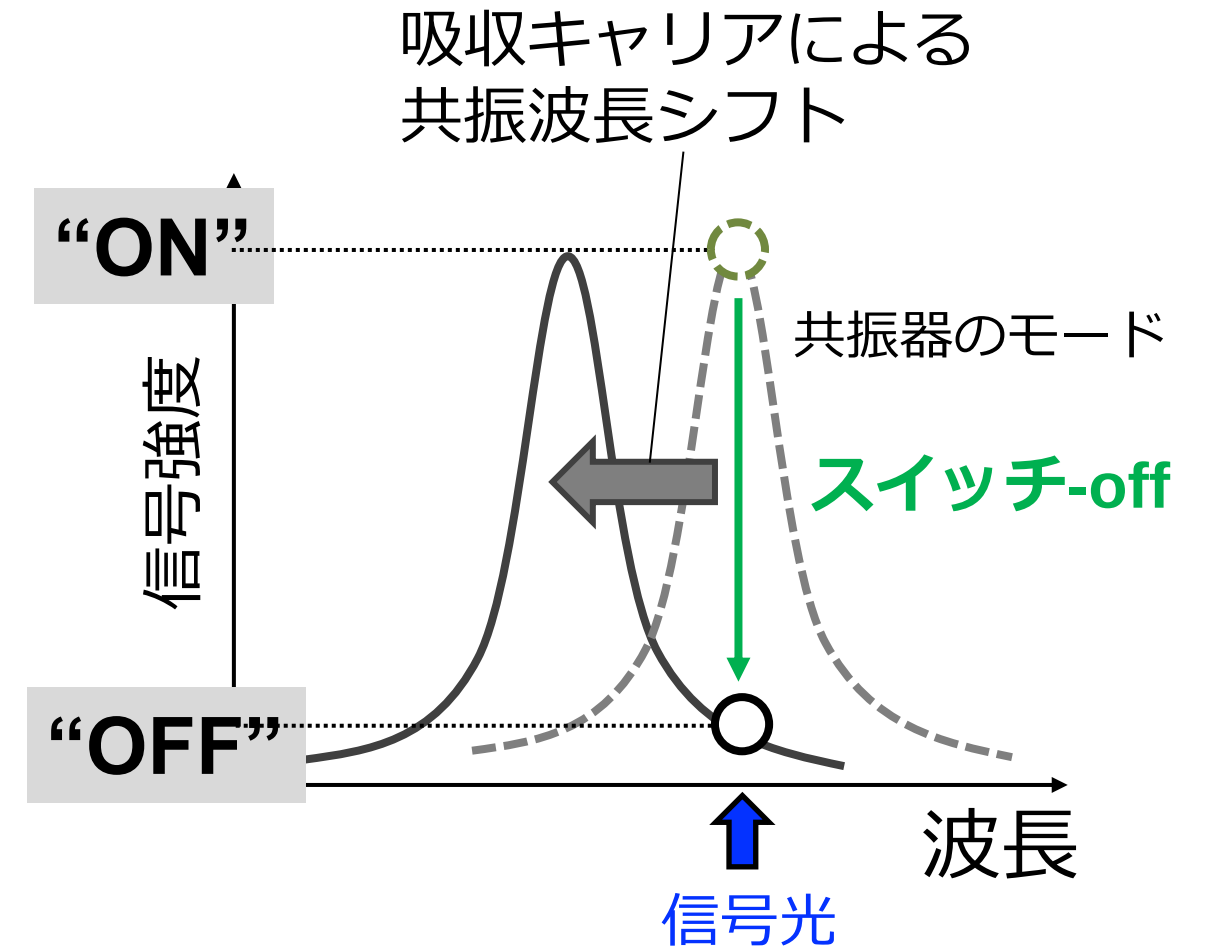
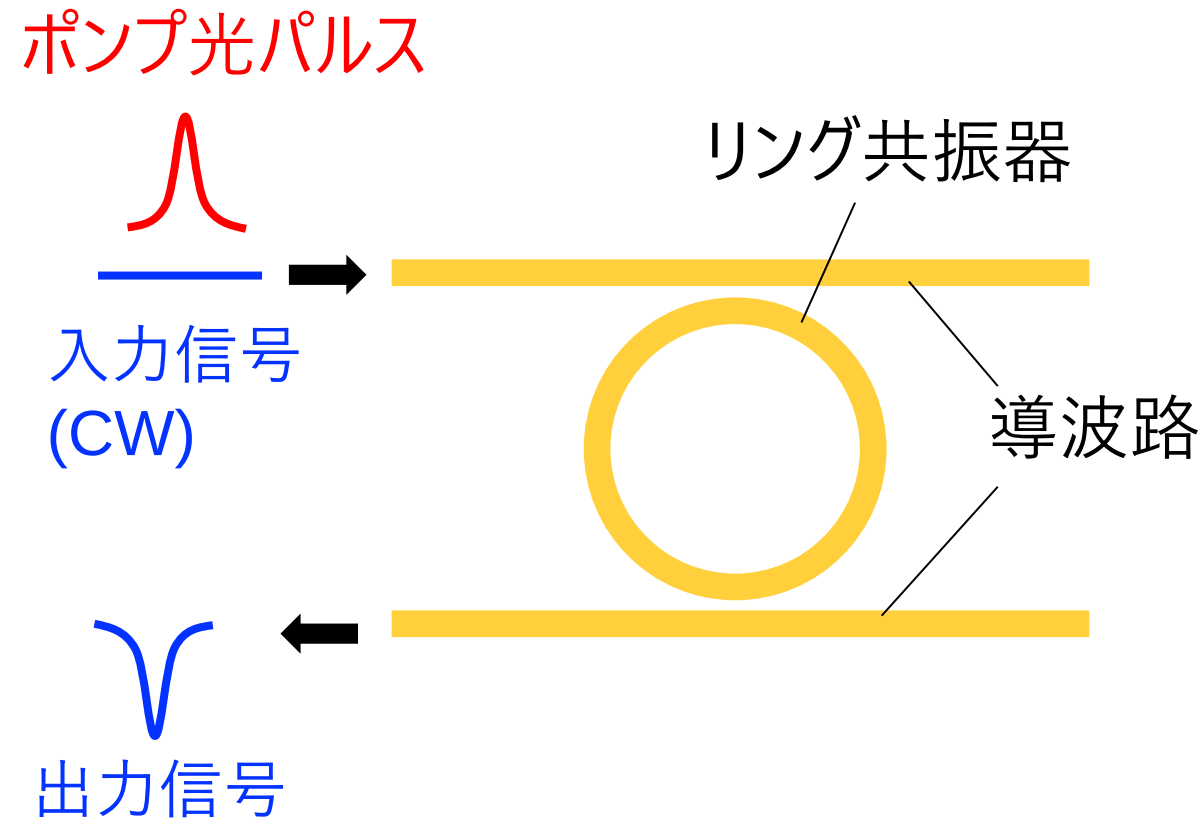
経路スイッチング



より高速かつ低エネルギーの光スイッチが必要とされている。

微小共振器を用いた全光スイッチング

スイッチングの原理



V. R. Almeida, et al., Nature 431, 1081 (2004).

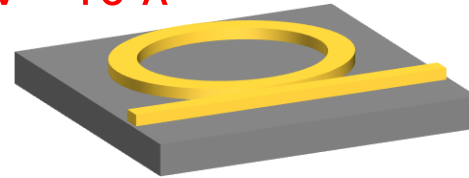
より高速・低エネルギーのスイッチングに向けて：

- ✓ より小型の微小共振器を使い、イオン注入によりキャリア寿命を短くする

リング共振器

$Q < 10^9$

$V > 10 \lambda^3$



スイッチング時間: 500 ps,
スイッチングエネルギー: 25,000 fJ

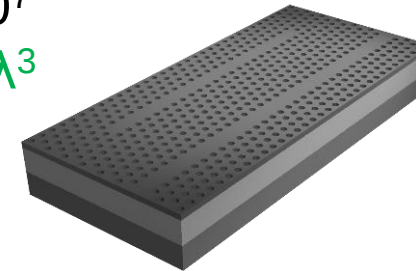
V. R. Almeida, et al.,
Nature 431, 1081 (2004).

フォトニック結晶共振器

+ イオン注入

$Q < 10^7$

$V \sim 1 \lambda^3$



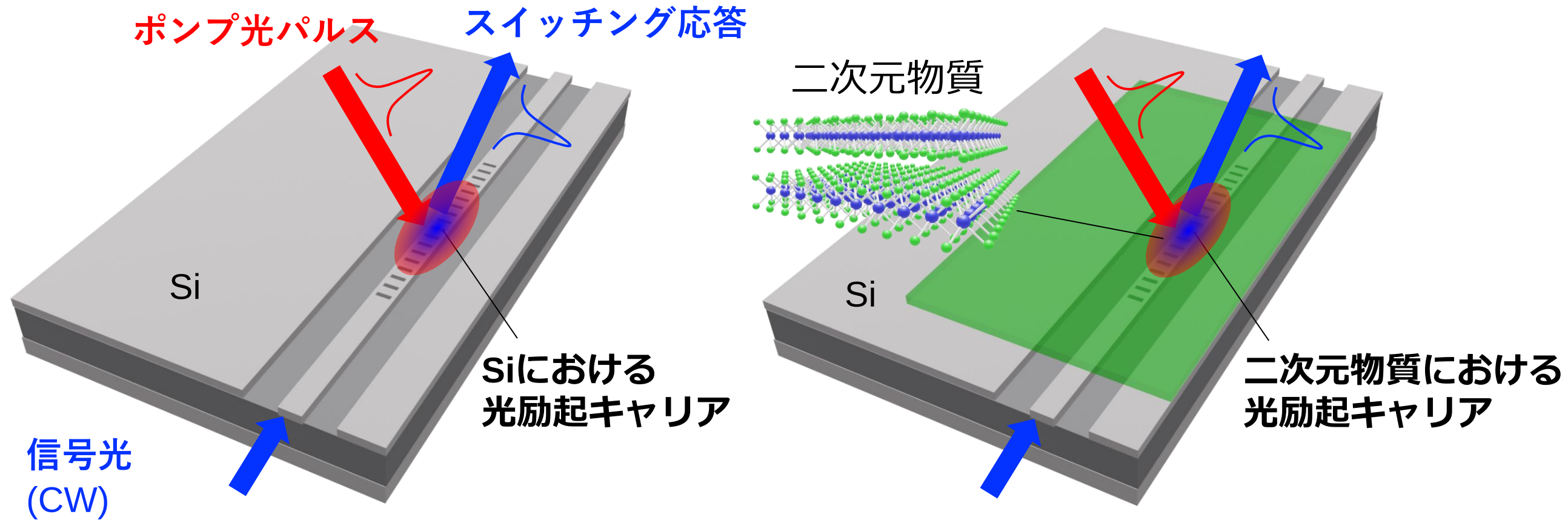
スイッチング時間: 70 ps,
スイッチングエネルギー: ~100 fJ

T. Tanabe, et al.,
Appl. Phys. Lett. 90, 031115 (2007).

課題 基板であるシリコンの材料特性が、スイッチング性能を律速している！

デバイス動作原理

微小共振器と二次元物質を集積したハイブリッド・シリコン全光スイッチング素子



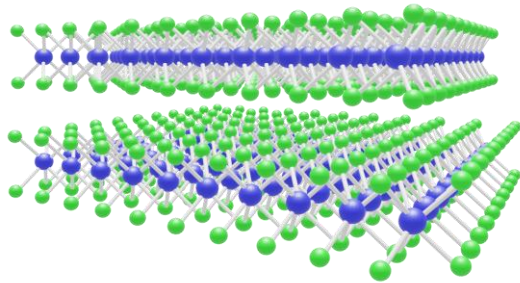
シリコンデバイスの利点を維持しつつ、性能限界を超えられる！

デバイスデザイン

二次元物質の要件：

- キャリアの寿命が短いこと
- 光学吸収が大きいこと
- 信号光に対して透明であること
- 挿入損失が低いこと

二次元物質: MoTe_2



キャリア寿命

MoTe_2 1-100 ps [1]

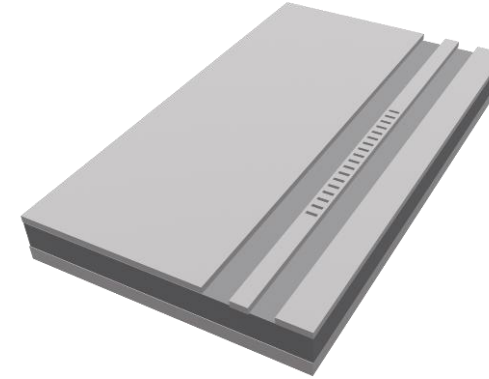
Si ~ ns [2]

MoTe_2 はSiの10倍以上速い

[1] Z. Chi, et al., J. Chem. Phys. 151, 114704 (2019).

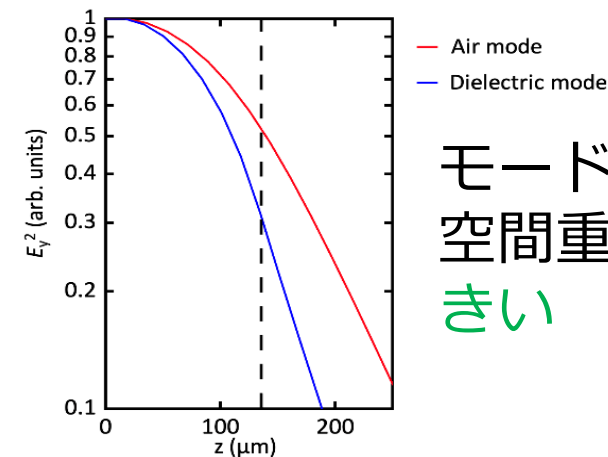
[2] M. Fujita, et al., Appl. Phys. Lett. 97, 121111 (2010).

微小共振器の要件：



- モード体積が小さいこと
- 二次元物質との空間重なりが大きいこと
- Q 値 $> 10,000$

空気モード フォトニック結晶ナノビーム共振器

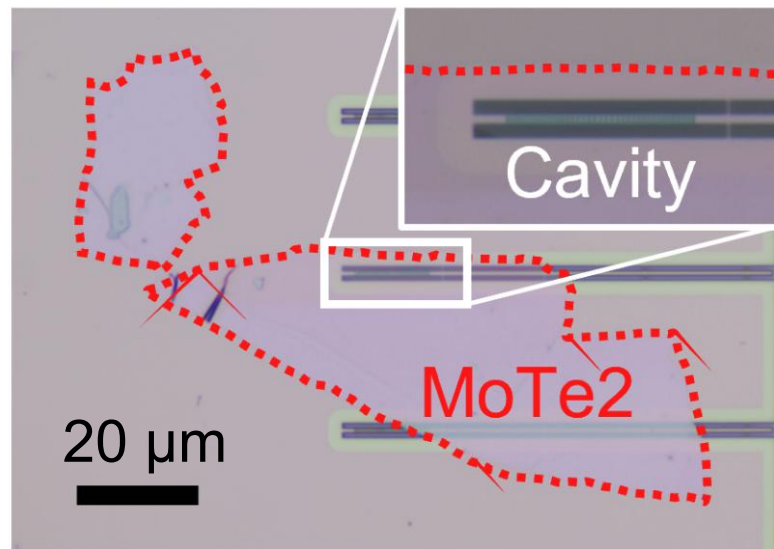


モード体積: $10^{-2}(\lambda/n)^3$

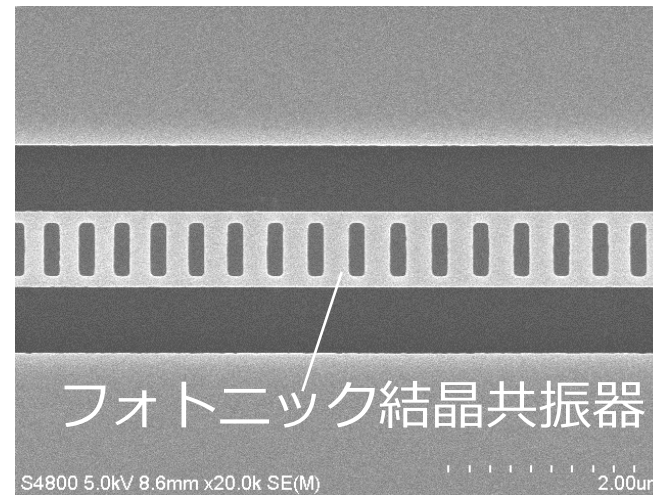
空間重なり: 誘電モードより2倍大きい

[Adv. Opt. Mater. 10, 2200538 \(2022\).](#)

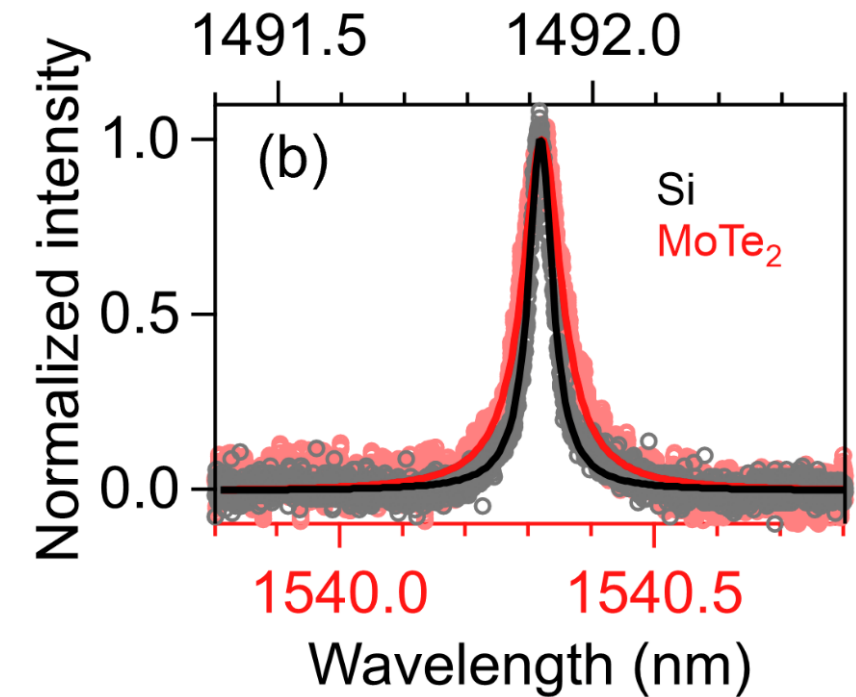
共振器-二次元物質のハイブリッドデバイス



MoTe₂ の厚さ: 11 nm



共振スペクトル



Q 値

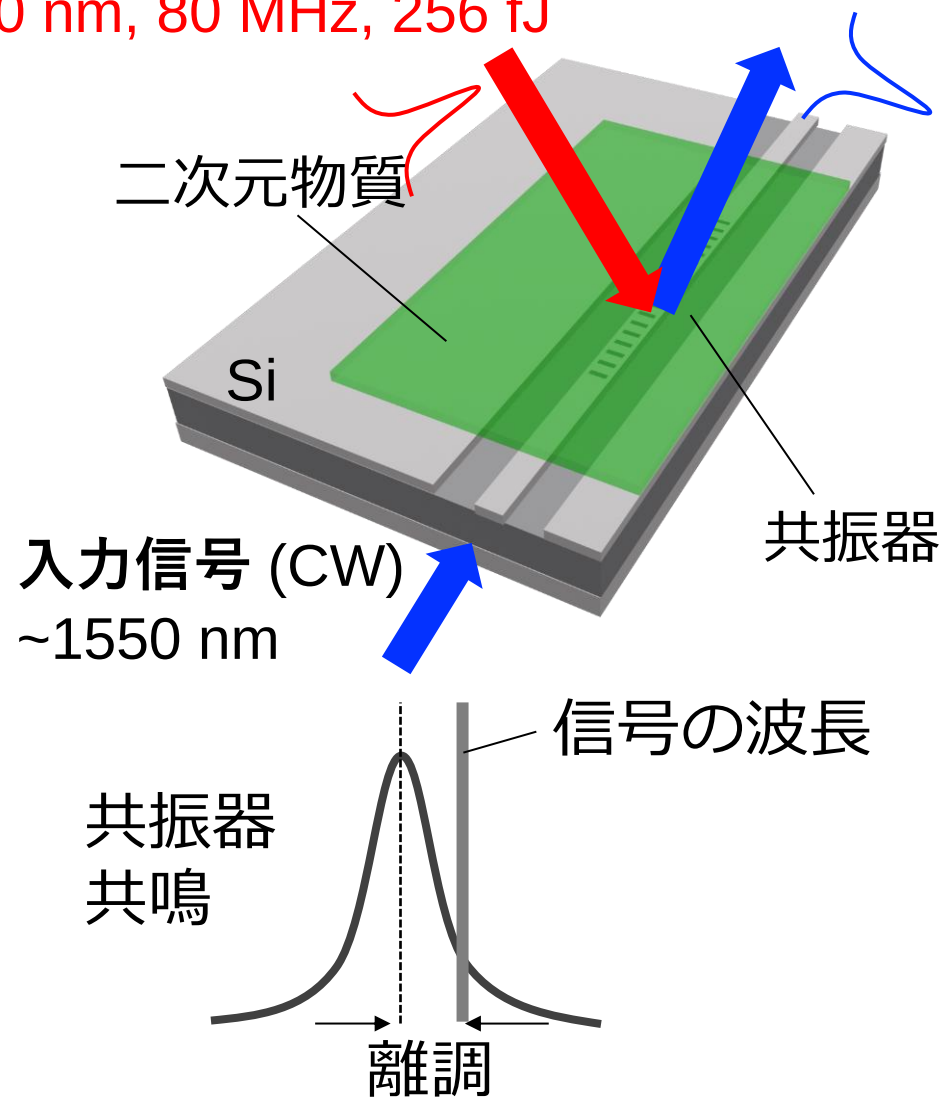
33,000 -> 20,000

測定結果 – スイッチングのダイナミクス

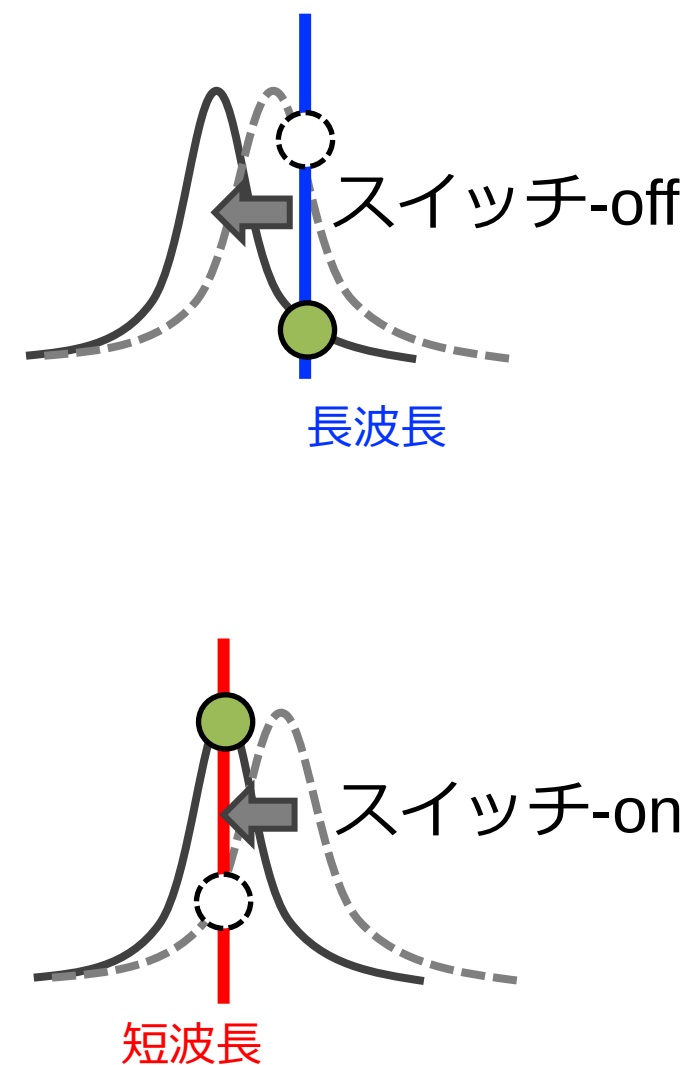
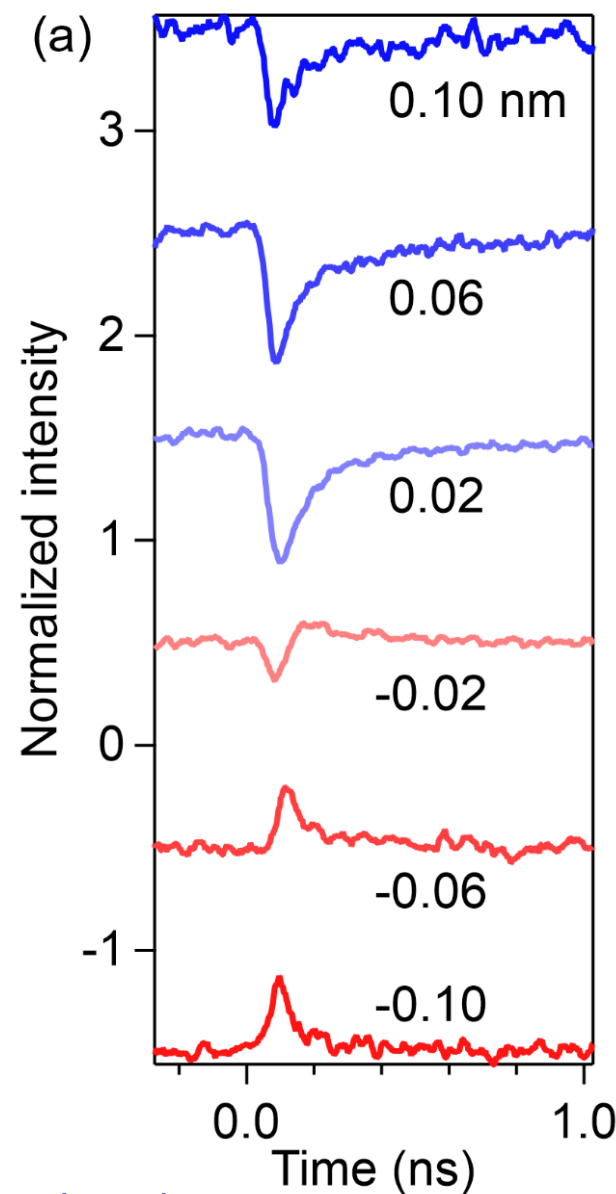
実験方法

ピコ秒ポンプ光パルス
950 nm, 80 MHz, 256 fJ

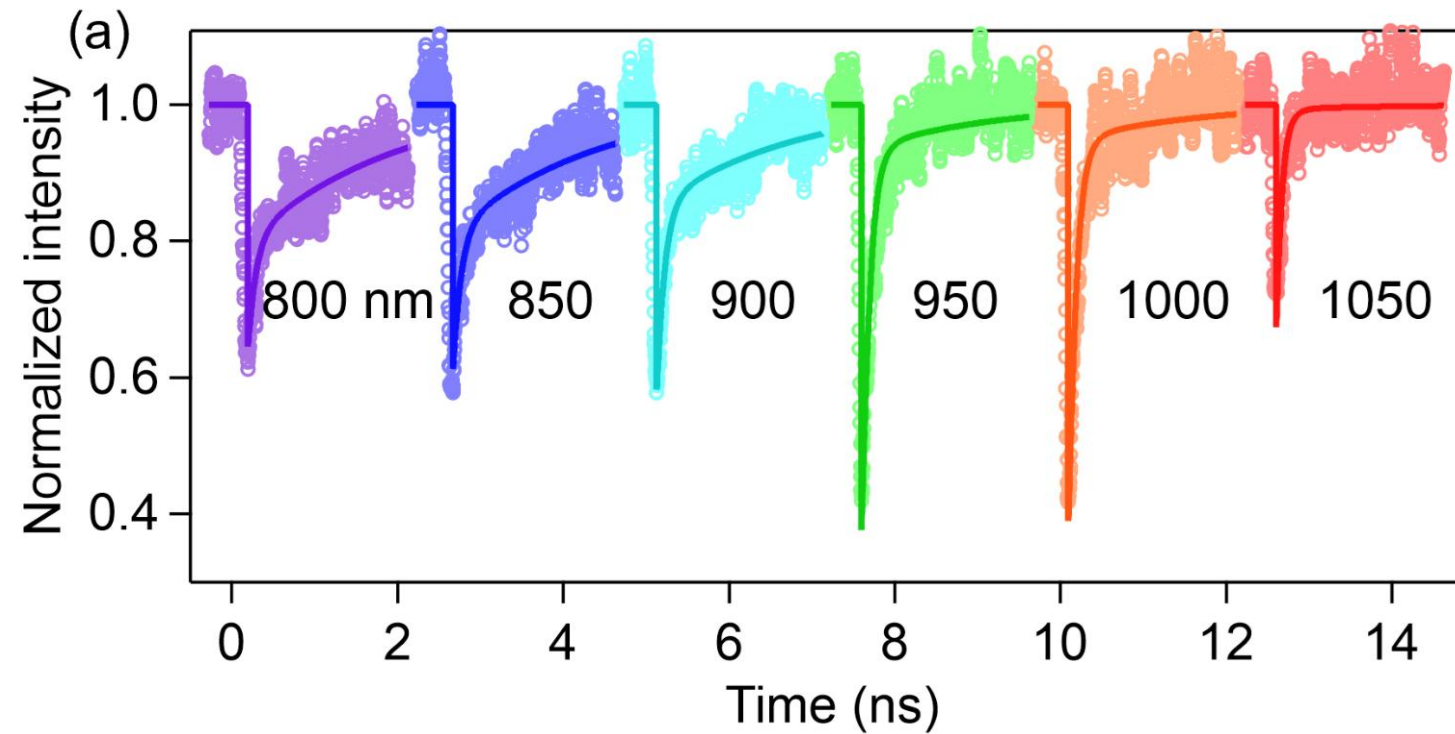
スイッチング応答



信号波長依存性



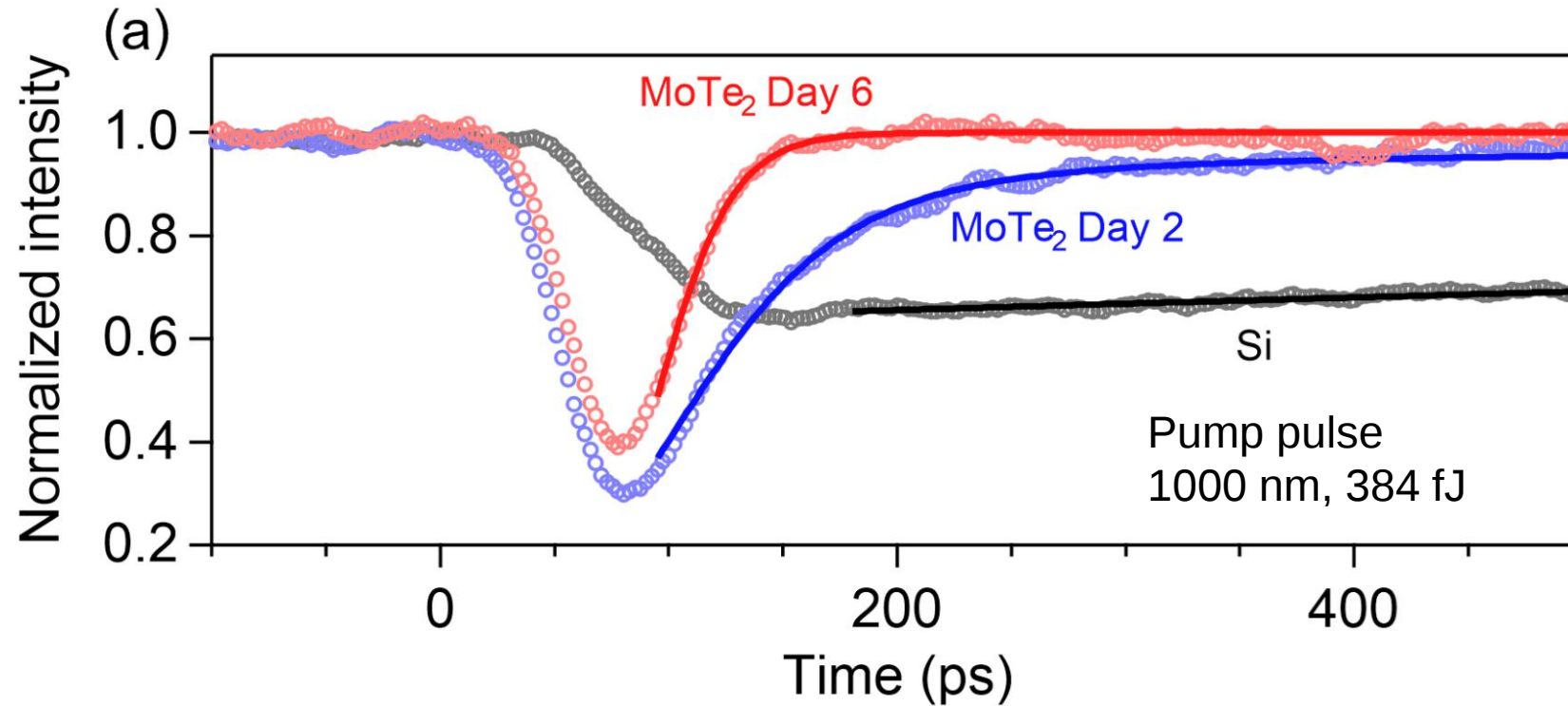
測定結果 – ポンプ光のパルス波長依存性



MoTe₂ による吸収が強いポンプ光波長において、大きな変調が見られる。

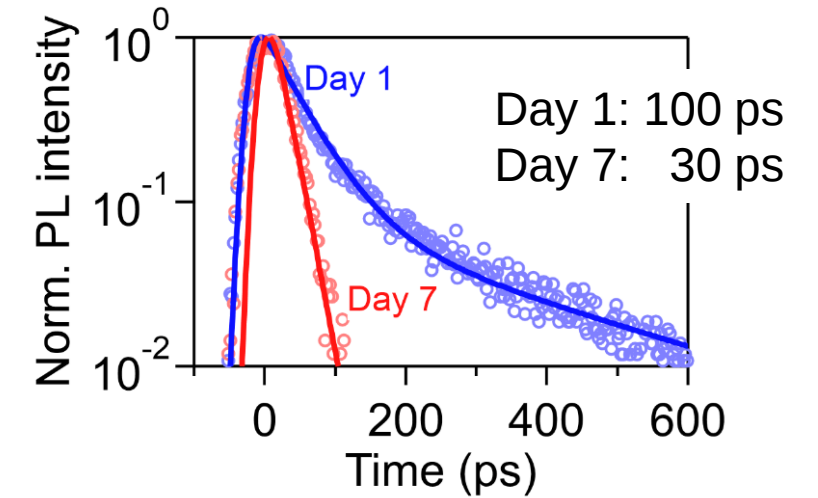
高速スイッチング

スイッチング応答

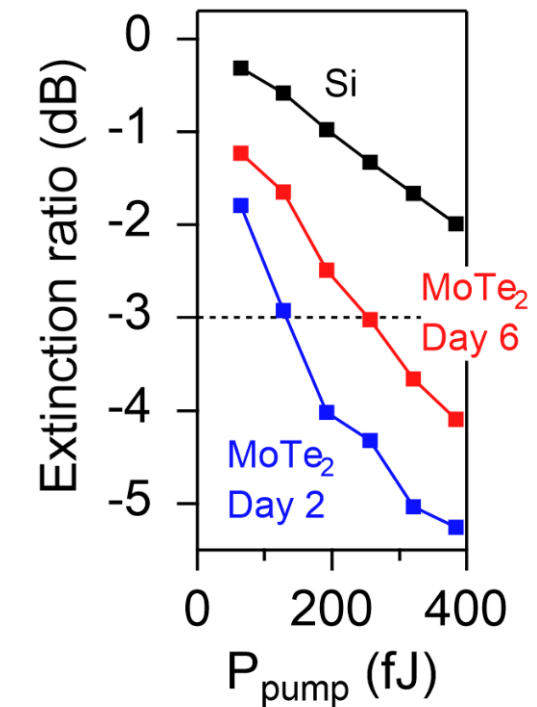


高速スイッチング (**33 ps**) かつ低エネルギー (**254 fJ**)

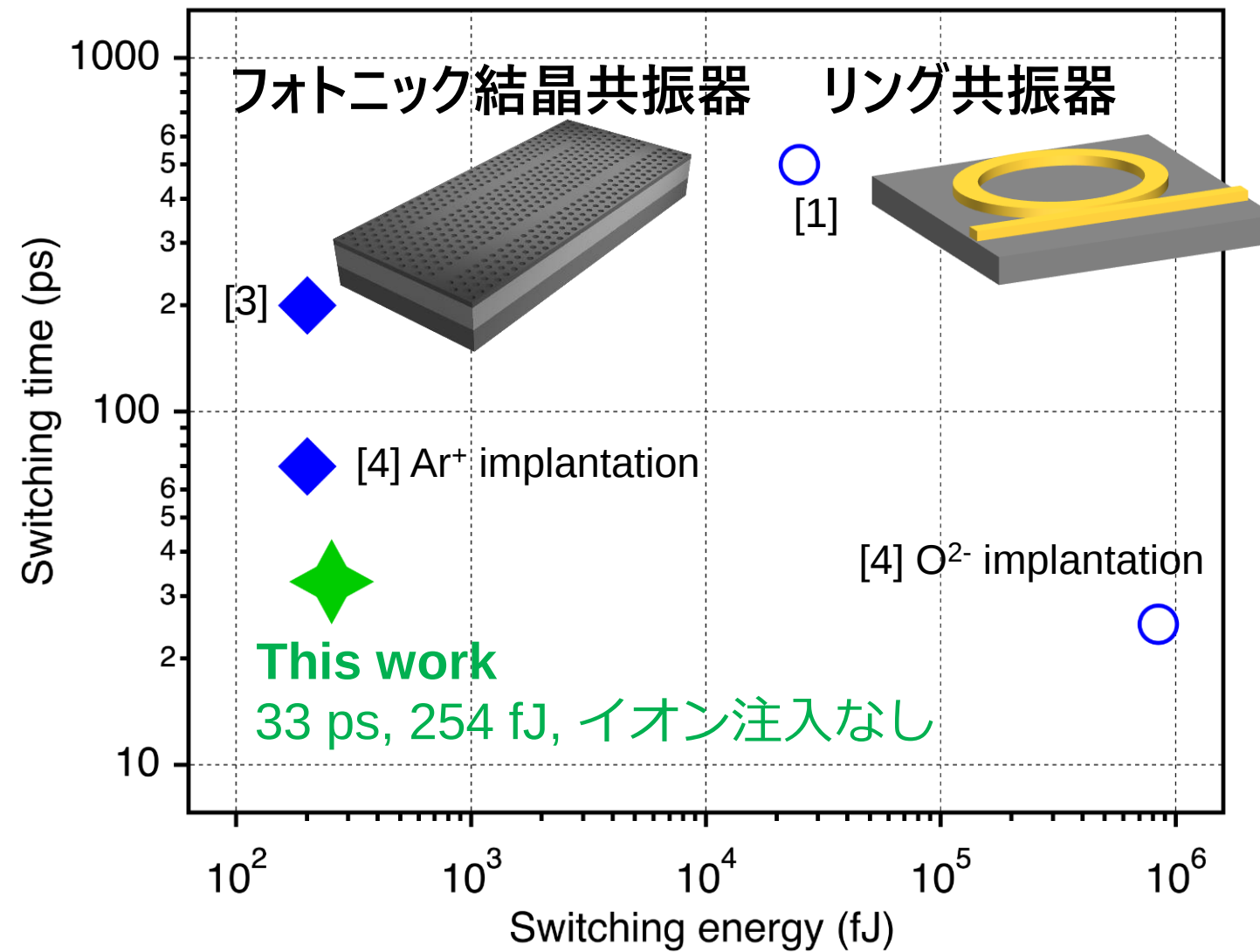
PL 減衰曲線



ポンプ光エネルギー vs, 消光比



従来技術によるSi共振器ベースの全光スイッチとの比較

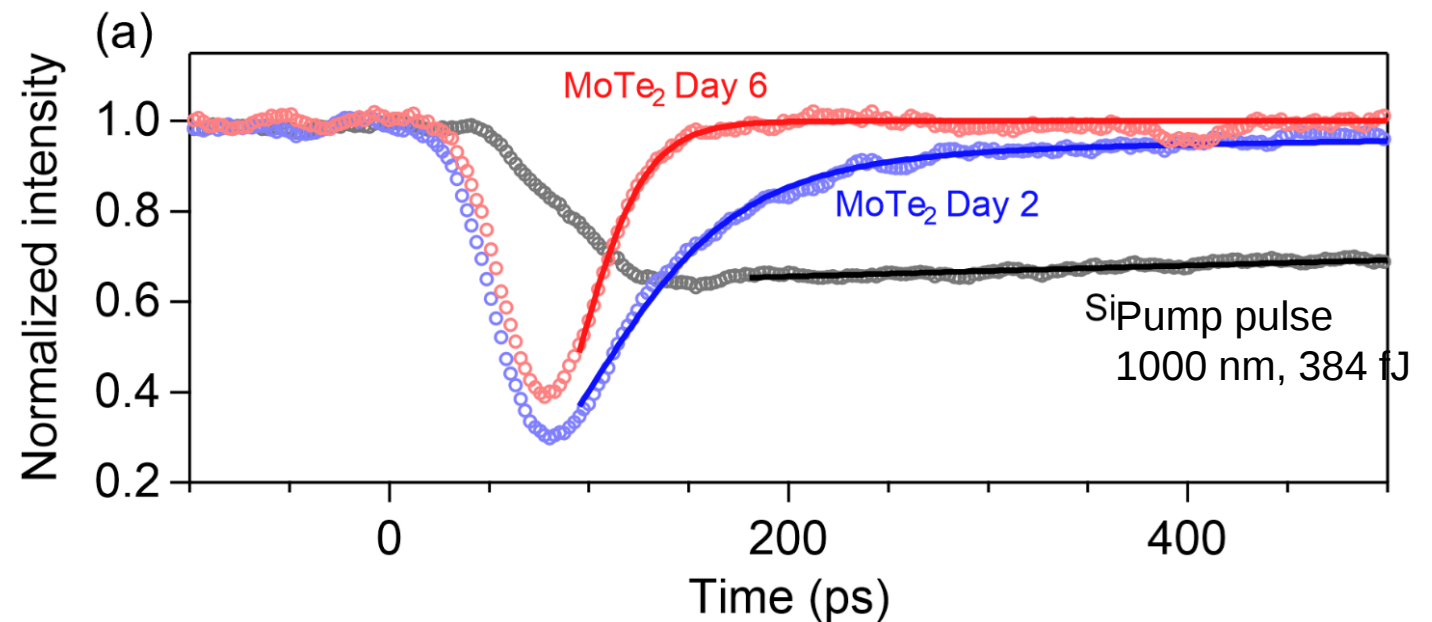
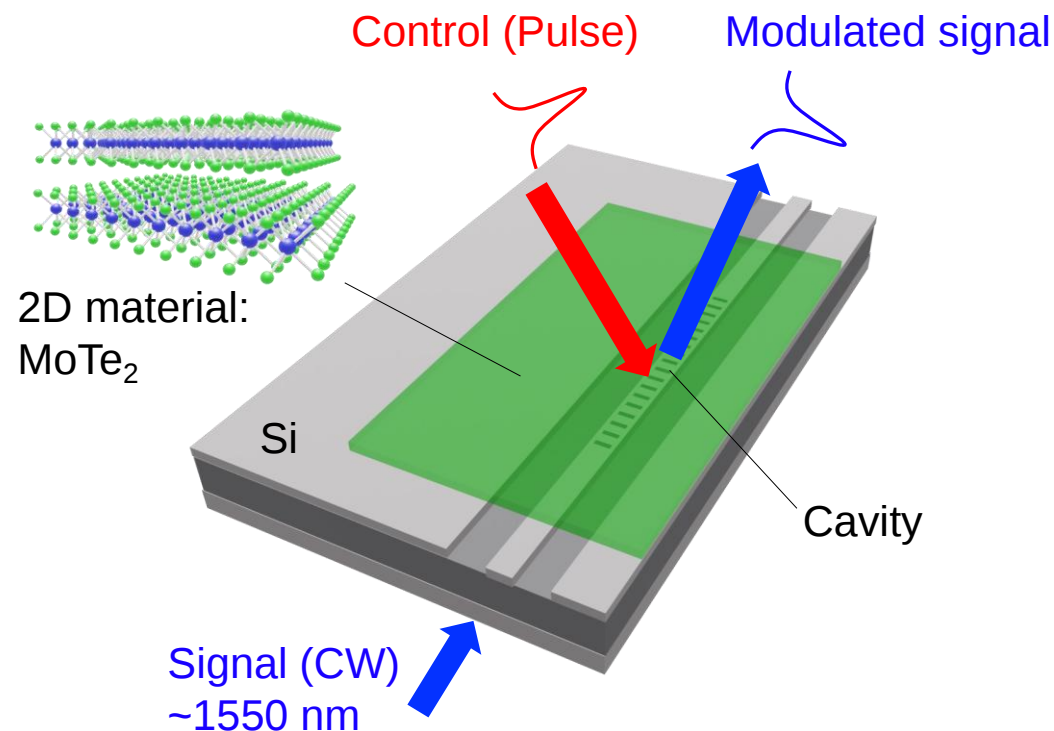


- [1] Almeida et al., Nature 431, 1081–1084 (2004).
 [2] Waldow et al., Opt. Express 16, 7693 (2008).
 [3] Tanabe et al., Appl. Phys. Lett. 87, 151112 (2005).
 [4] Tanabe et al., Appl. Phys. Lett. 90, 031115 (2007).

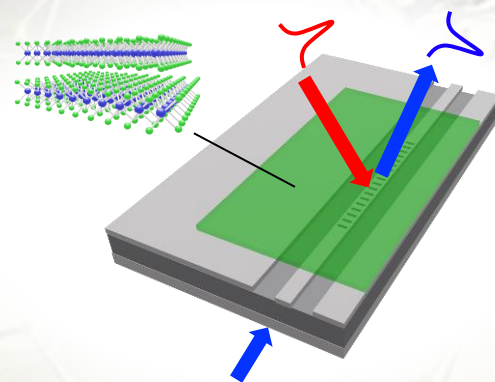
本素子は、Si基板を用いた中では最速のフォトニック結晶共振器全光スイッチング素子である。

まとめと実用化への課題（光スイッチング素子）

- 二次元物質を集積したハイブリッドシリコン全光スイッチング素子を提案
- 二次元物質における短いキャリア寿命により、スイッチング特性が向上
- 高速 (33 ps) ・ 低エネルギー (254 fJ) なスイッチングを実証
- 課題：この実験配置では光集積回路での利用が難しい
 - 他の利用方法もしくはデバイスデザイン改善が必要

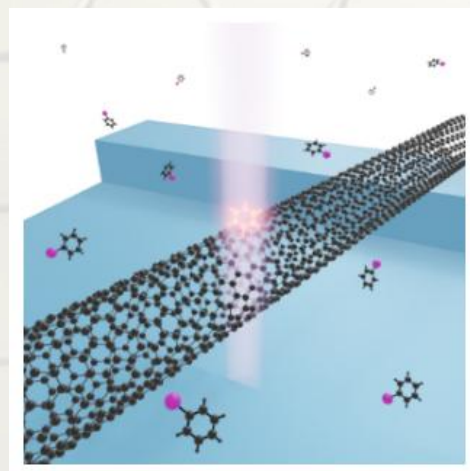


[Adv. Opt. Mater. 13, 2402531 \(2025\).](#)



[Adv. Opt. Mater. **13**, 2402531 \(2025\).](#)

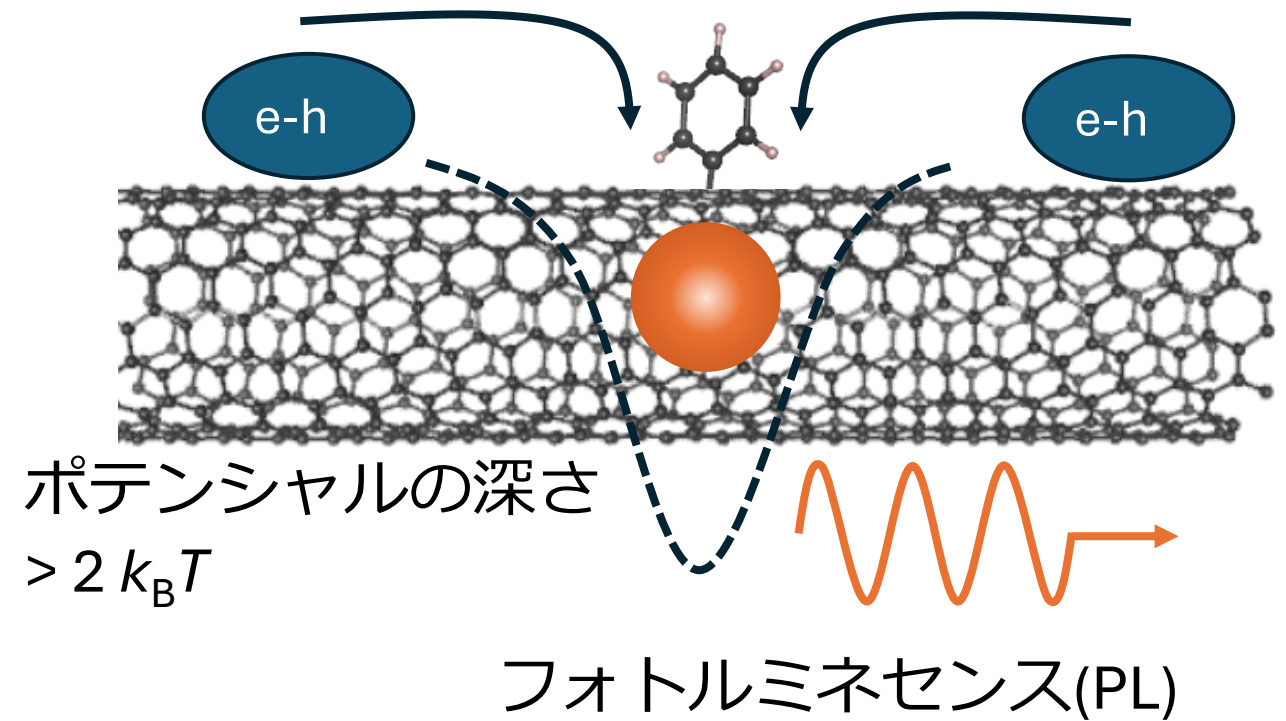
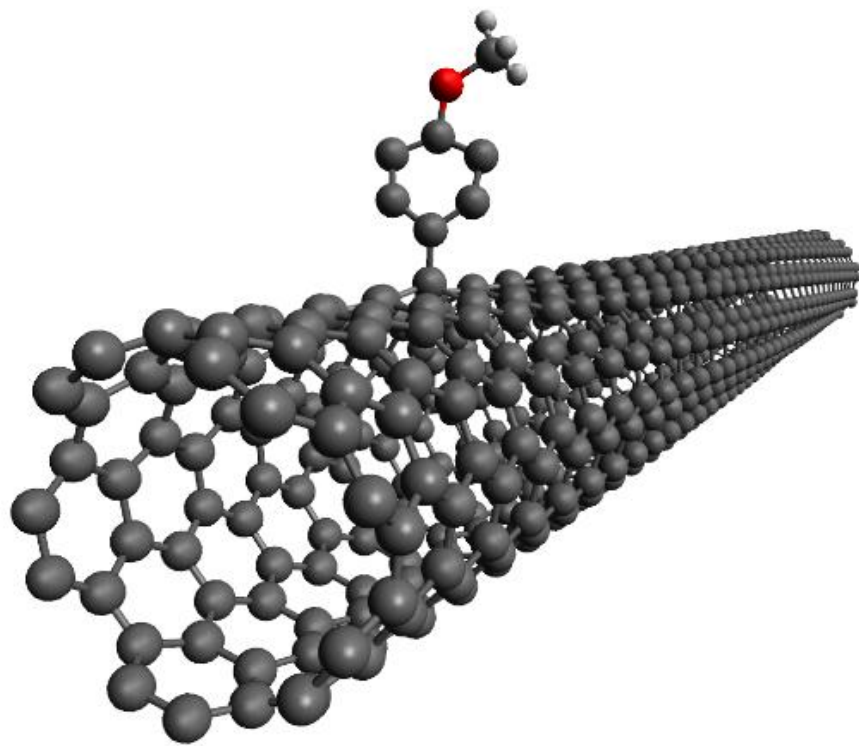
低エネルギー・高速
全光スイッチング



[Nano Lett. **25**, 13103 \(2025\).](#)

決定論的
量子光源作製

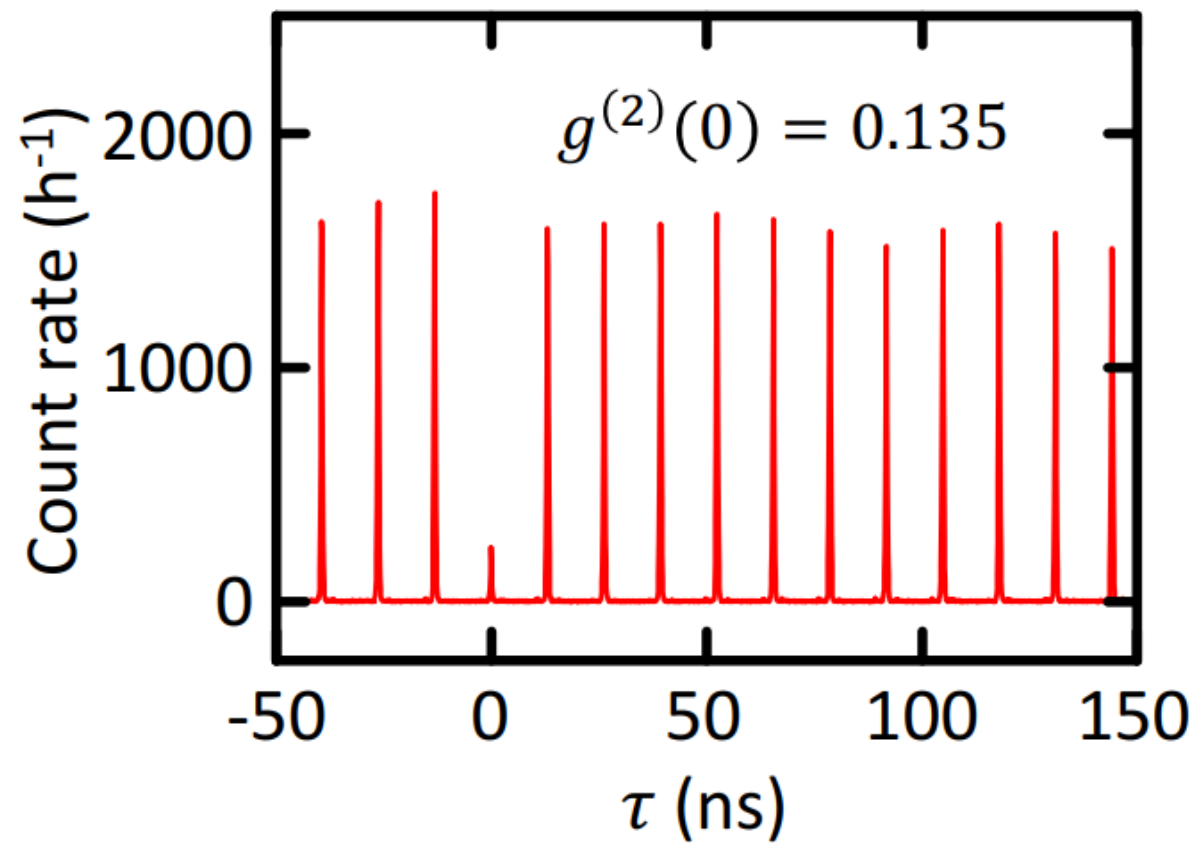
カーボンナノチューブの量子発光中心



分子修飾により有機発光中心が形成される

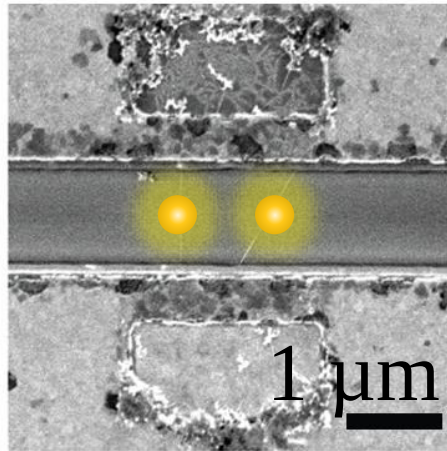
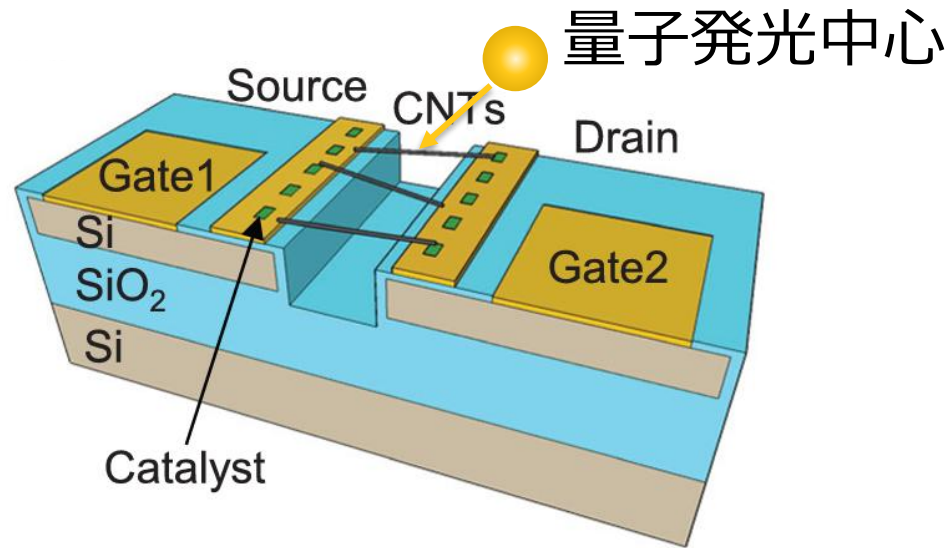
量子発光中心からの室温単一光子放出

光子相関測定結果

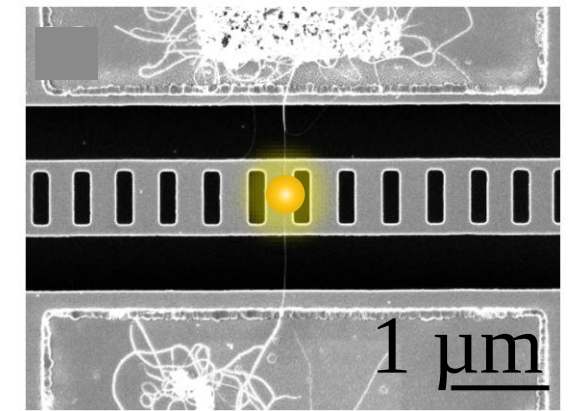
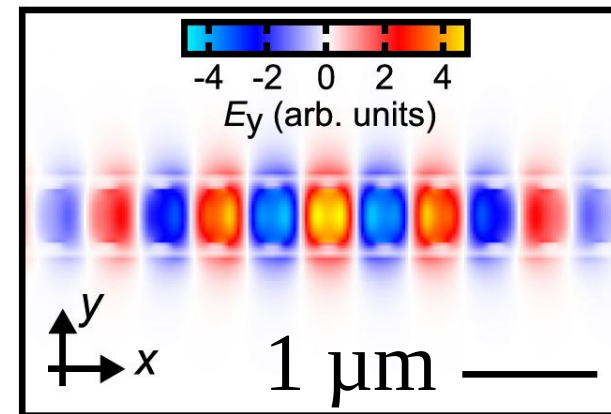
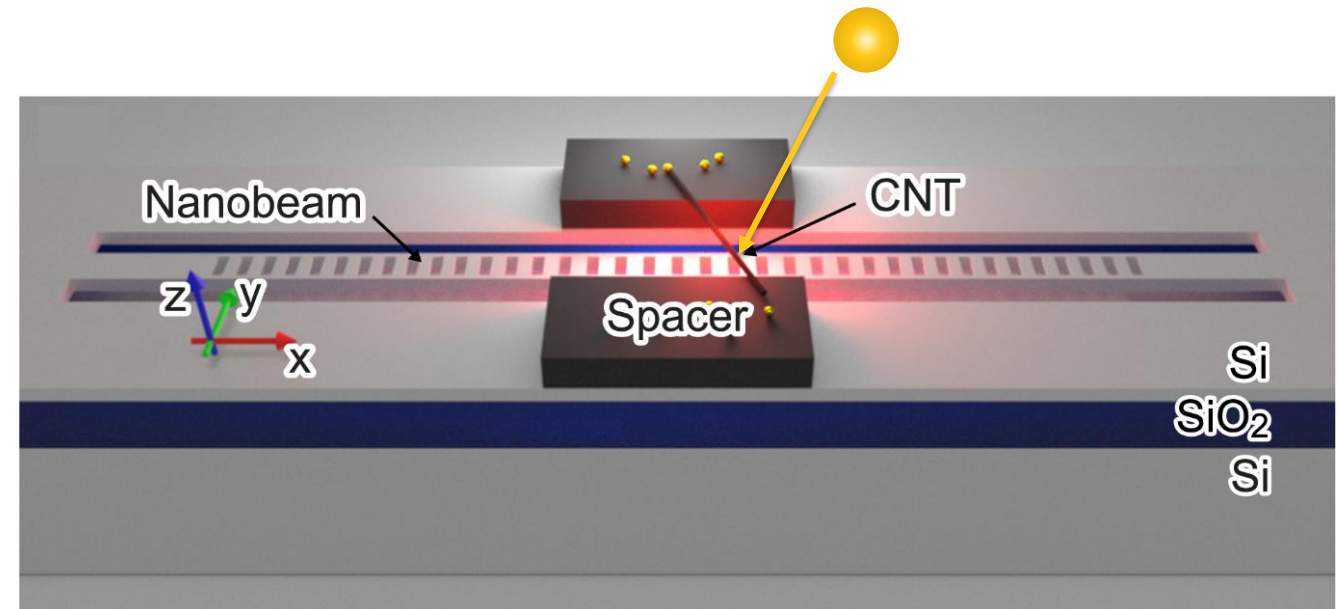


- 室温動作
- 通信波長帯
 - ✓ 光ファイバー互換
 - ✓ シリコンフォトニクス互換

量子発光中心とフォトニクス



[Appl. Phys. Lett. 110, 191101 \(2017\).](#)



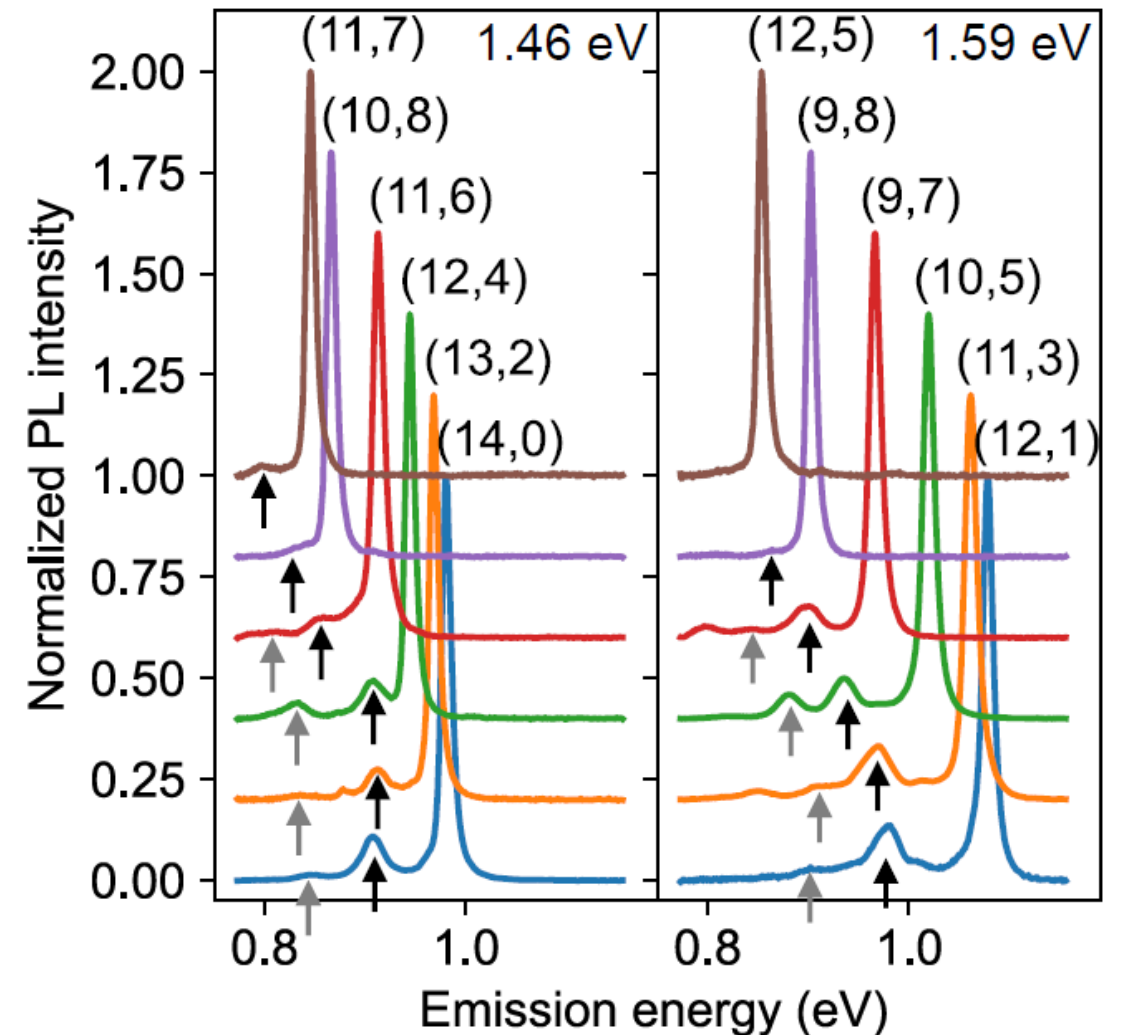
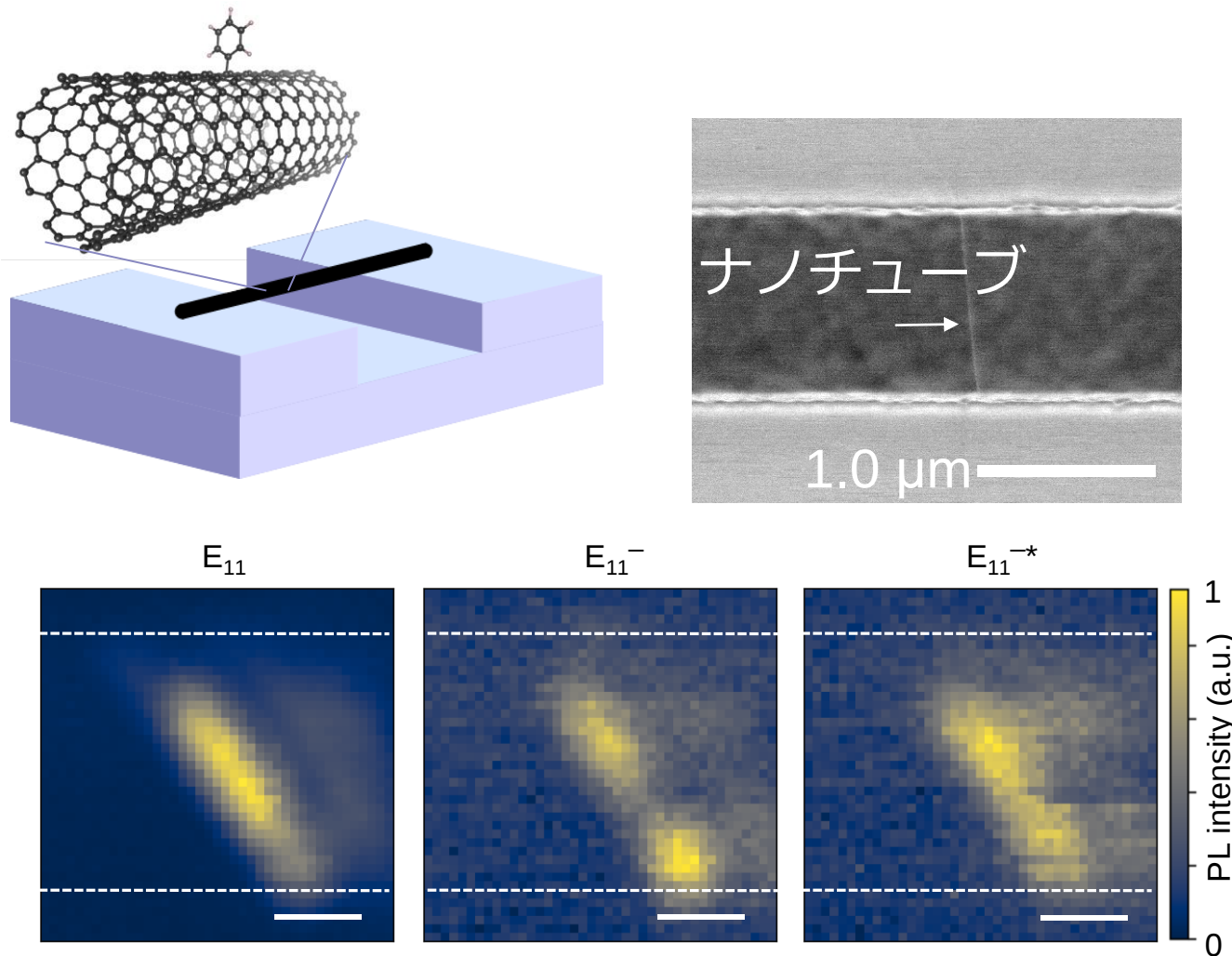
[Phys. Rev. Research 4, L022011 \(2021\).](#)

架橋 CNTをどのようにして分子修飾する？

架橋ナノチューブにおける量子発光中心の形成

分子修飾ナノチューブ

[Nature Commun. 13, 2814 \(2022\).](#)

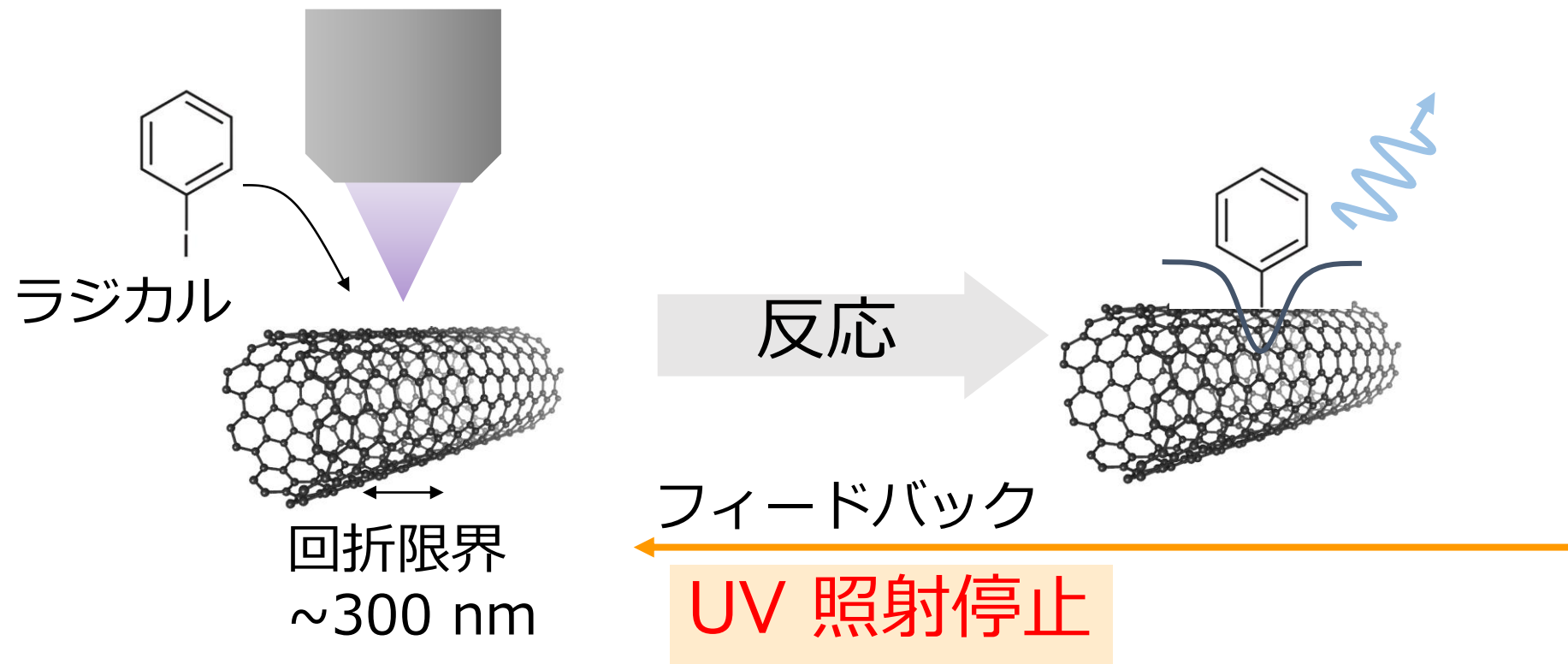


E_{11}^- と E_{11}^{-*} は空間的に E_{11} と重なる:
量子発光中心は同一チューブ上に存在

局所光化学反応による量子発光中心形成

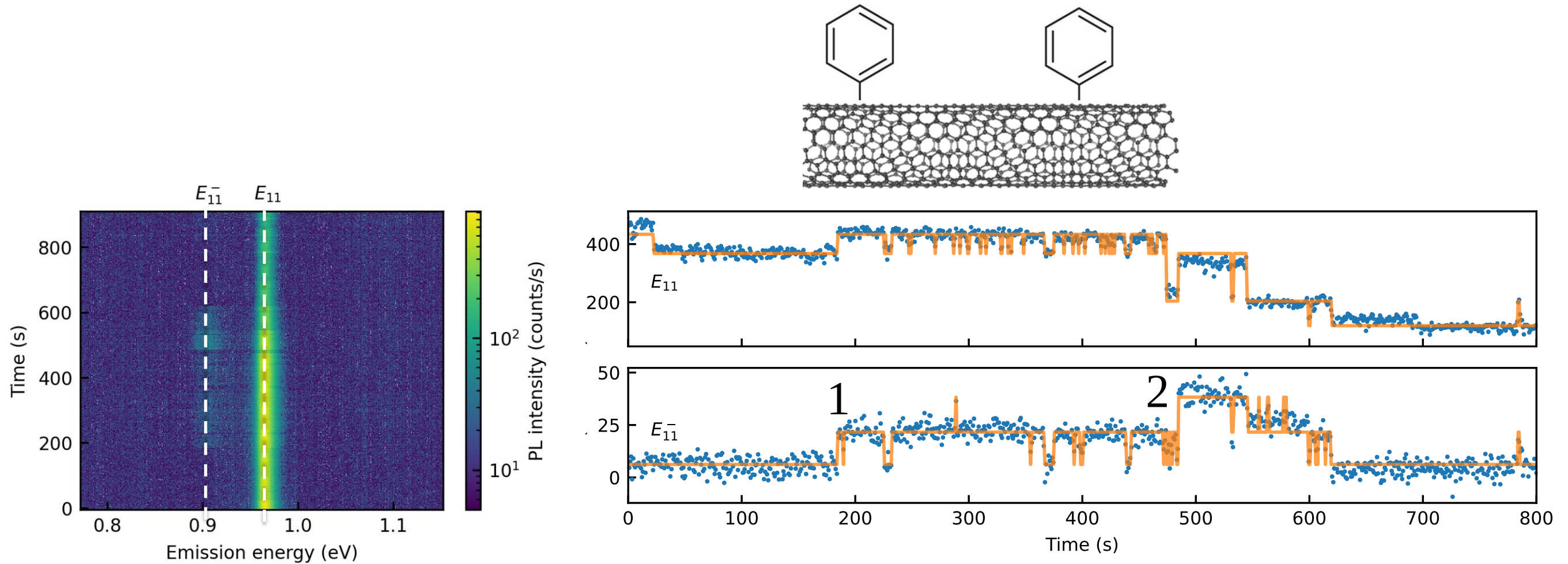
ラジカル生成

量子発光中心からのPL



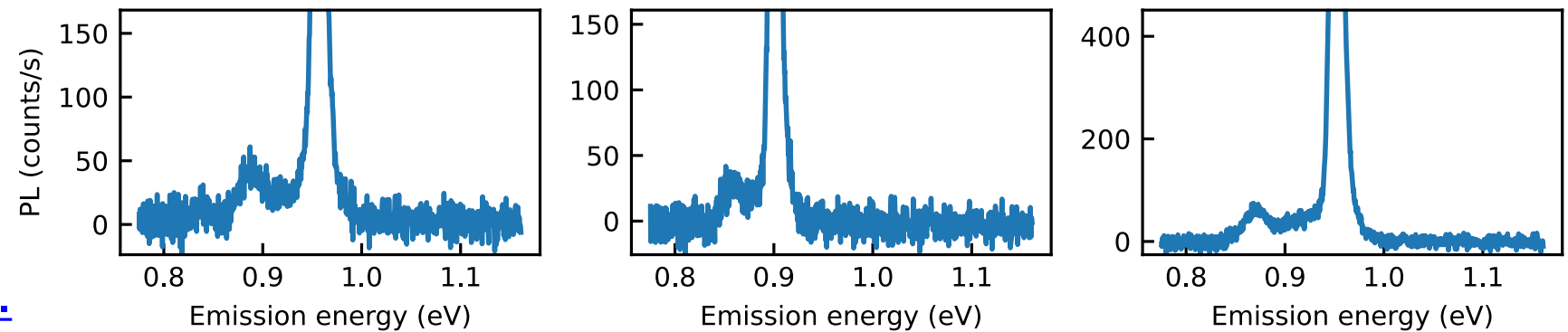
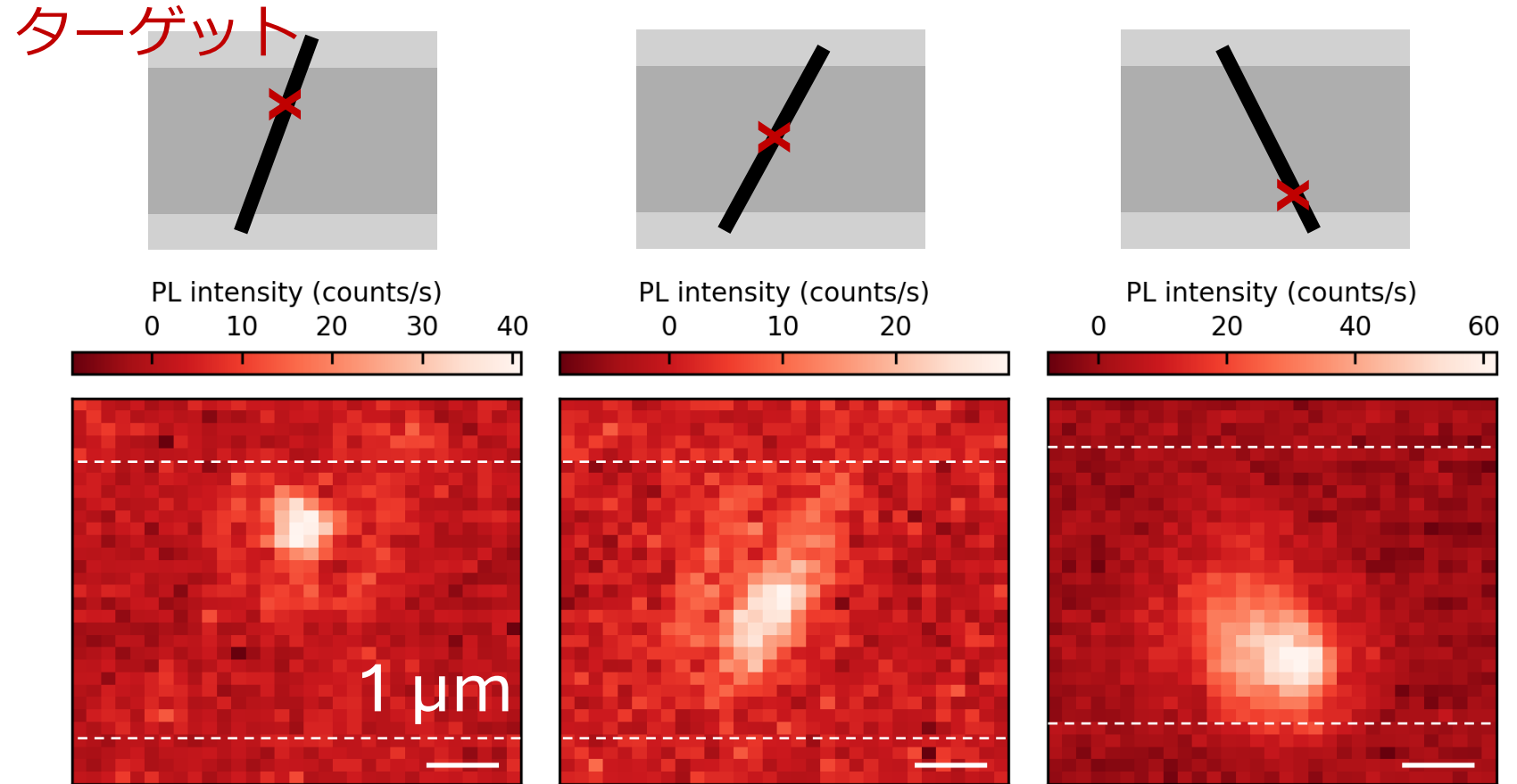
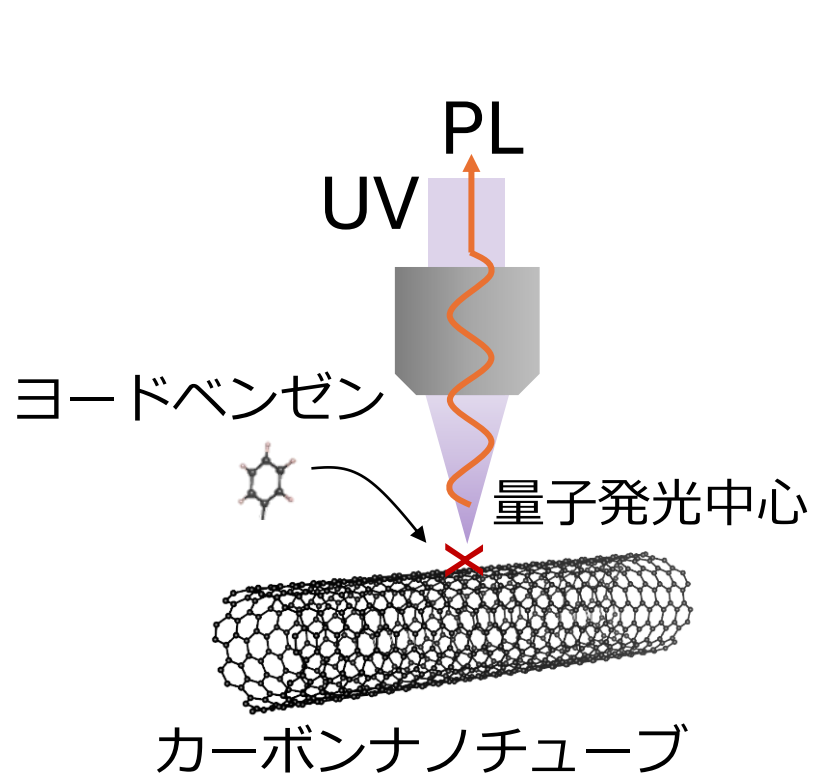
- ❑ 決定論的に単一欠陥を生成
- ❑ 量子発光中心の位置を制御
- ❑ 発光エネルギーに関する統計情報

その場観測による量子発光中心形成



個々の量子発光中心の形成に応じた、離散的な強度ステップを観測

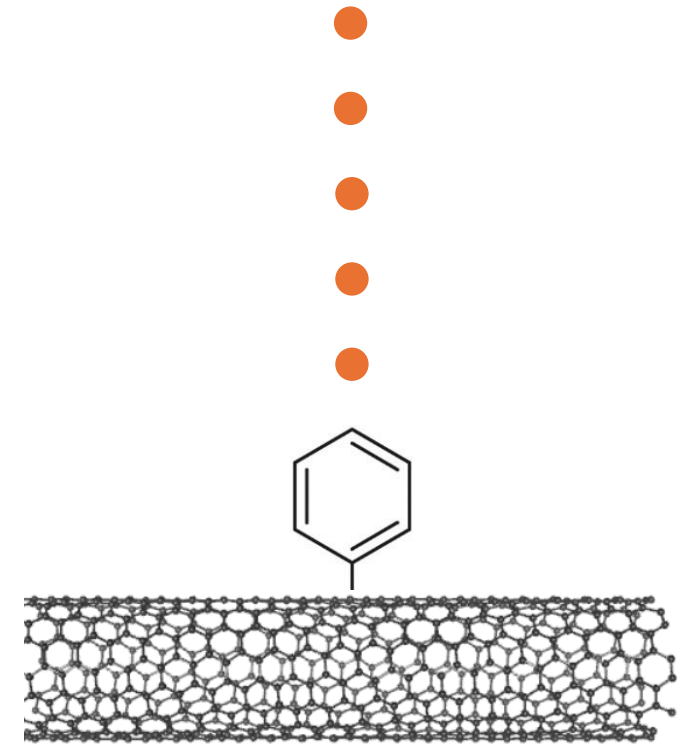
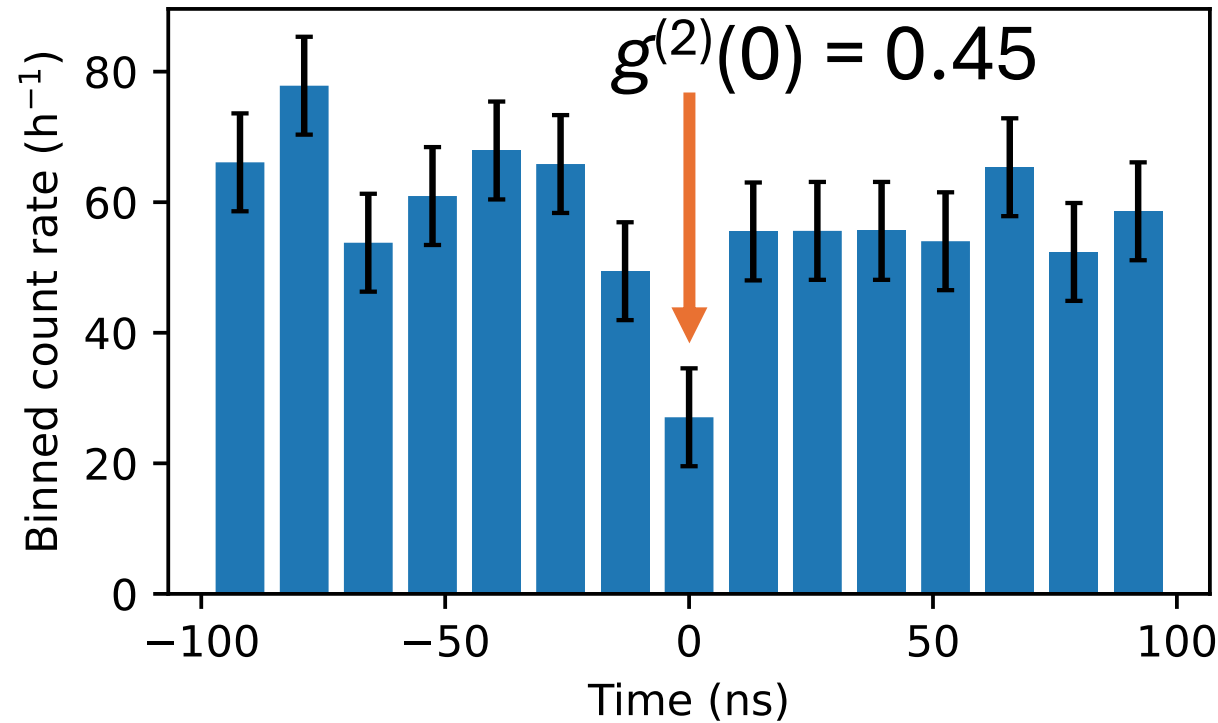
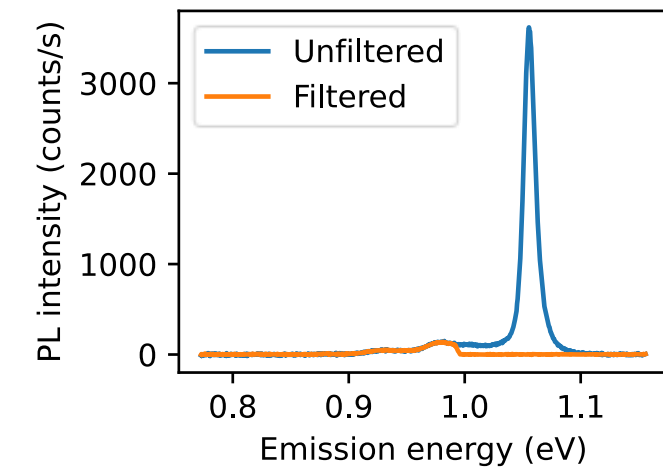
位置制御



室温単一光子放出の実証

$(11,3) E_{11}^-$

Excitation power 200 nW
Excitation energy 1.59 eV



単一光子レベルのアンチバンチング ($g^{(2)}(0) < 0.5$) を観測

想定される用途

- 光情報処理・光通信デバイス
 - － 低エネルギー高速光スイッチを用いた光インターコネクト、シリコンフォトニクス回路、データセンター向け光情報処理デバイス
- 量子通信・量子暗号デバイス
 - － 通信波長帯の単一光子源を用いた量子通信装置、量子鍵配送（QKD）光源、量子フォトニクス回路
- 高感度光センシング・計測技術
 - － ナノフォトニクスと原子精度ナノ物質の強い光物質相互作用を利用した高感度光センサー、分光計測デバイス

実用化に向けた課題（量子発光中心）

- 周辺技術も含めて未成熟
- 現在、CRESTで光集積回路との融合と光ファイバーへの高効率結合に取り組んでいる
- 今後、量子光学実験での利用から始まり、量子通信・量子情報処理応用への展開を期待

企業への期待

•新しい応用可能性の探索

全光スイッチングや単一分子反応制御について、研究者側では想定していない用途・市場ニーズ・システム応用の視点のご提案をいただけると嬉しい。

•実用化に向けた技術課題の明確化

光集積回路、量子光源、分子制御技術として活用する際に必要となる性能、信頼性、集積性、評価手法などについて、産業応用の観点からご意見をいただきたい。

•基礎研究から応用へつなぐ連携の構築

現時点では基礎研究段階の技術であるが、将来的な応用可能性が見込まれるテーマについて、共同研究や技術評価を通じて企業との連携を深めたい。

本技術に関する知的財産権

①低エネルギー・高速全光スイッチング

- 発明の名称 : 光スイッチング素子及び光スイッチング素子の製造方法
- 出願番号 : 特願2024-107561
- 出願人 : 理化学研究所（単願）
- 発明者 : 加藤 雄一郎、山下 大喜、Fang Nan、藤井 瞬

②決定論的量子光源作製

- 発明の名称 : 反応制御装置及び反応制御方法
- 出願番号 : 特願2023-190561(特開2025-78177)
- 出願人 : 理化学研究所（単願）
- 発明者 : 加藤 雄一郎、小澤 大知、塩田 勇人

お問い合わせ先

株式会社理研イノベーション
ライセンス部

license-contact@innovation-riken.jp

TEL : 048-235-9308 (代表)

まとめと参考文献

二次元物質とのハイブリッドフォトンクスによる 低エネルギー高速光スイッチ

[*Adv. Opt. Mater.* **13**, 2402531 \(2025\).](#)

カーボンナノチューブ量子発光中心の決定論的生成

[*Nano Lett.* **25**, 13103 \(2025\).](#)

空気モード共振器: [*Nature Commun.* **5**, 5580 \(2014\).](#)

[*Adv. Opt. Mater.* **10**, 2200538 \(2022\).](#)

ナノチューブデバイス: [*Appl. Phys. Lett.* **110**, 191101 \(2017\).](#)

[*Phys. Rev. Research* **4**, L022011 \(2021\).](#)

分子修飾ナノチューブ: [*Nano Lett.* **18**, 3873 \(2018\).](#)

[*Nature Commun.* **13**, 2814 \(2022\).](#)

