

2011年10月4日 SCOPE 第7回成果発表会

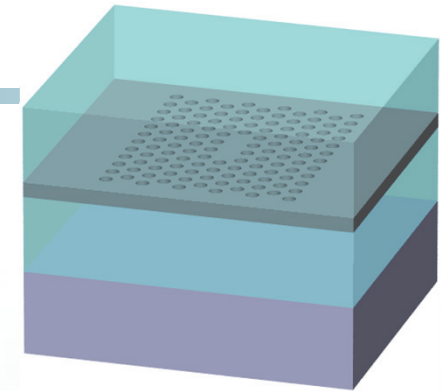
C会場（102A会議室）16:40～17:00

Si/SOI基板上への 量子ドット・フォトリック結晶微小光源の集積

若手ICT研究者育成型

研究期間

2008年度～2010年度（3年間）



独立行政法人 産業技術総合研究所
岡野 誠

○ 研究背景

○ 本研究の狙い

○ 研究成果

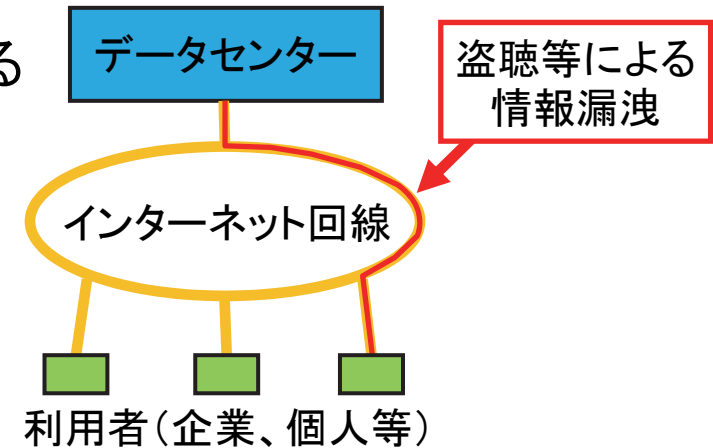
1. Si基板上への化合物半導体光デバイスの集積
2. 低屈折率材料クラッド型フォトニック結晶光共振器の利用
3. アモルファスSi細線光導波路を用いた光取り出し方法の提案

○ まとめ

個人・企業情報の漏洩が大きな問題になっている



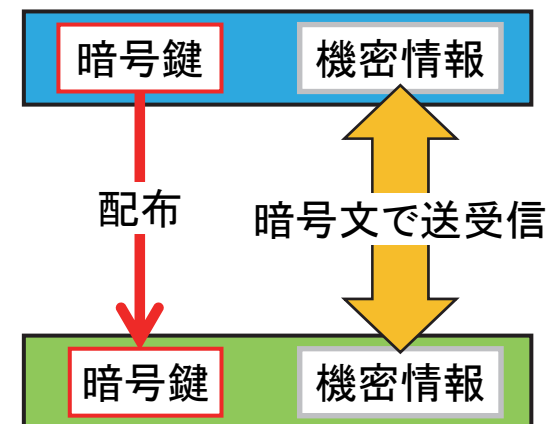
安全・安心なネットワークの実現が求められる



近年、物理法則(量子力学)に基づいて、安全性を保障する
「量子暗号通信」が、注目を集めている



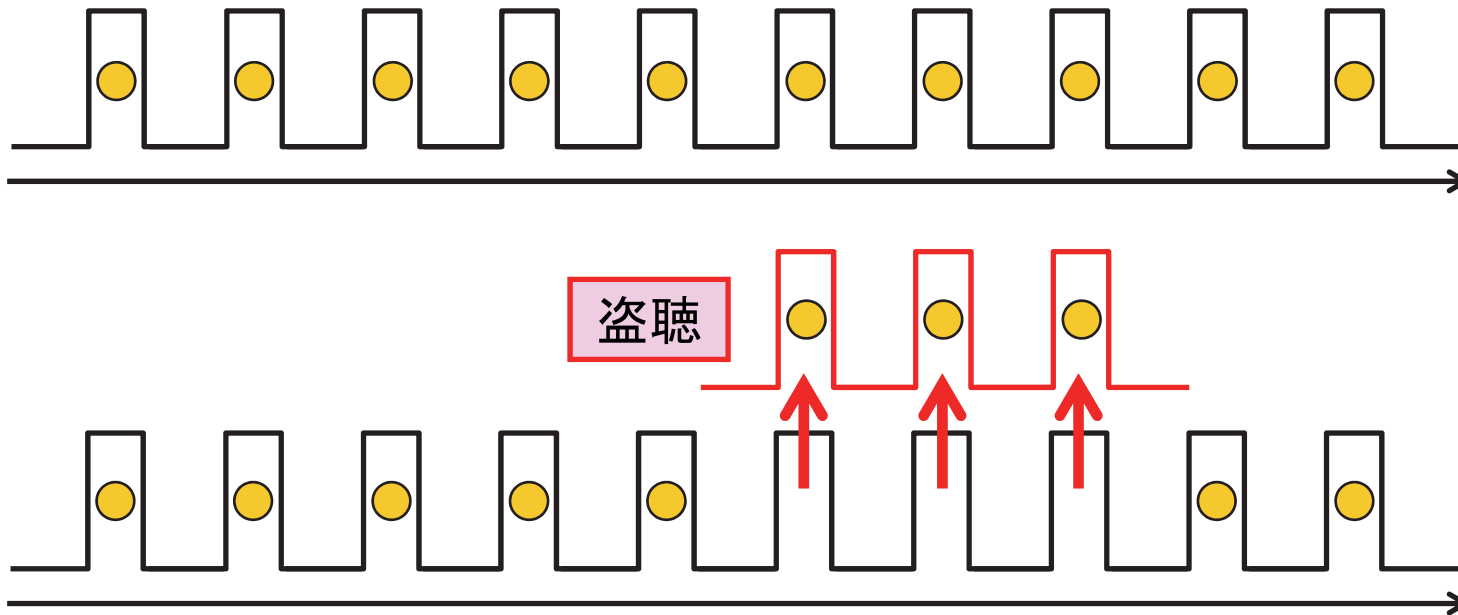
「**単一光子**」を用いた量子暗号通信は、
「暗号鍵配布」に適した方法として期待されている



単一光子を用いた量子暗号通信

2/28

光子を1個ずつ送信



盗聴が行われた場合、通信路上の光子が完全に失われる
つまり、従来のような「盗み聴き」はできない

➡ 「原理上」、絶対的な安全性が保証される
但し、そのためには「理想的な装置の実現」が必要となる

単一光子源

3/28

従来の単一光子源

1パルス当たりの光子数10万

1パルス当たりの光子数0.1

半導体レーザー
パルス光源

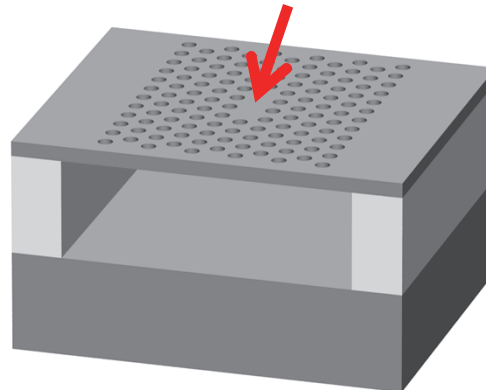
光減衰器
1/100万

単一光子の生成確率: 約10%

→ 理想的な単一光子源の実現は難しい

近年、理想的な単一光子源の実現方法として、
「量子ドット・フォトニック結晶微小光源」が、注目を集めている

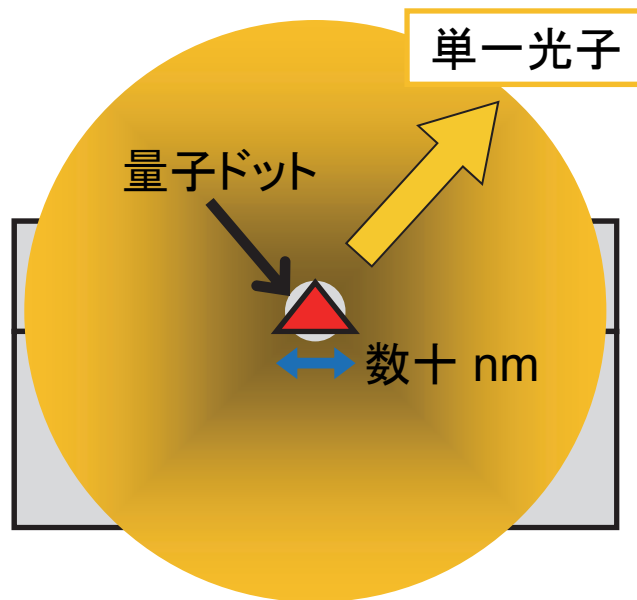
量子ドット + フォトニック結晶光共振器



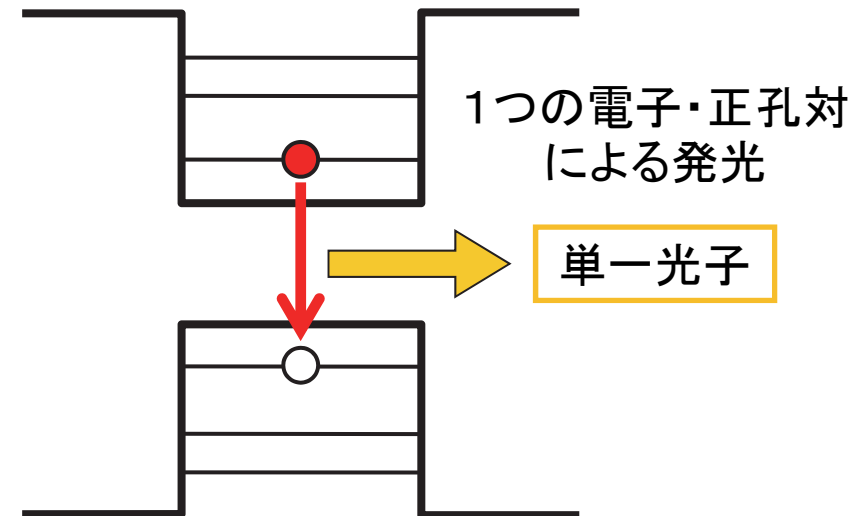
量子ドット・フォトリック結晶微小光源の原理 (1)^{4/28}

量子ドット (電子制御)

量子ドットによる3次元的閉じ込め



量子ドット内のエネルギー準位

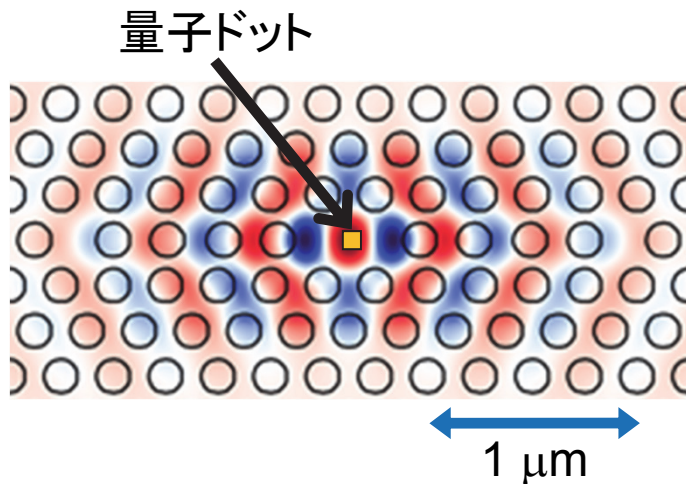


➡ 量子ドットは、効率良く単一光子を生成できる
但し、どの方向に放出されるかは、全く制御できない

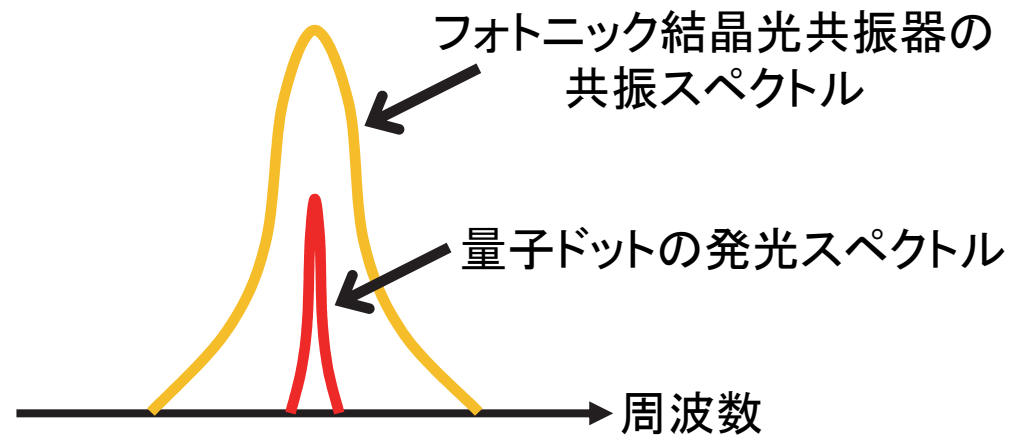
量子ドット・フォトニック結晶微小光源の原理 (2) ^{5/28}

フォトニック結晶光共振器 (輻射場制御)

輻射場の局在化による発光の増強



共振スペクトルによる発光の増強

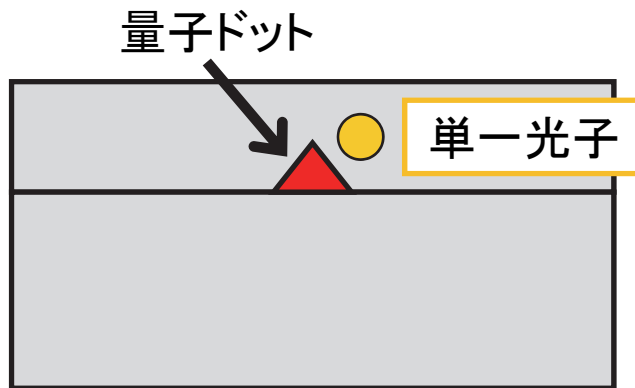


- ➡ フォトニック結晶光共振器では、共振モードへの発光が劇的に増強される
- ➡ ほぼ100%の単一光子が、共振モードに放出される

量子ドット・フォトニック結晶微小光源の原理 (3) ^{6/28}

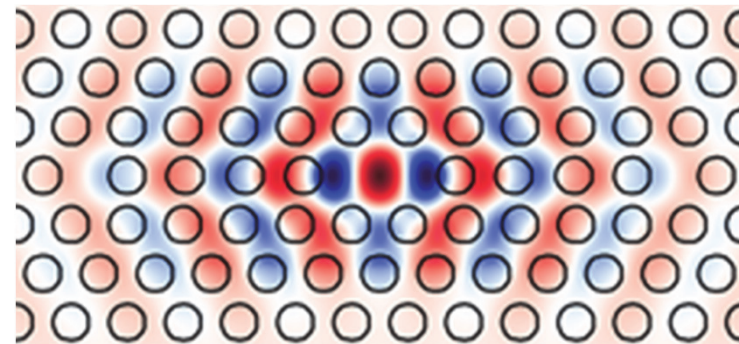
量子ドット

単一光子の生成



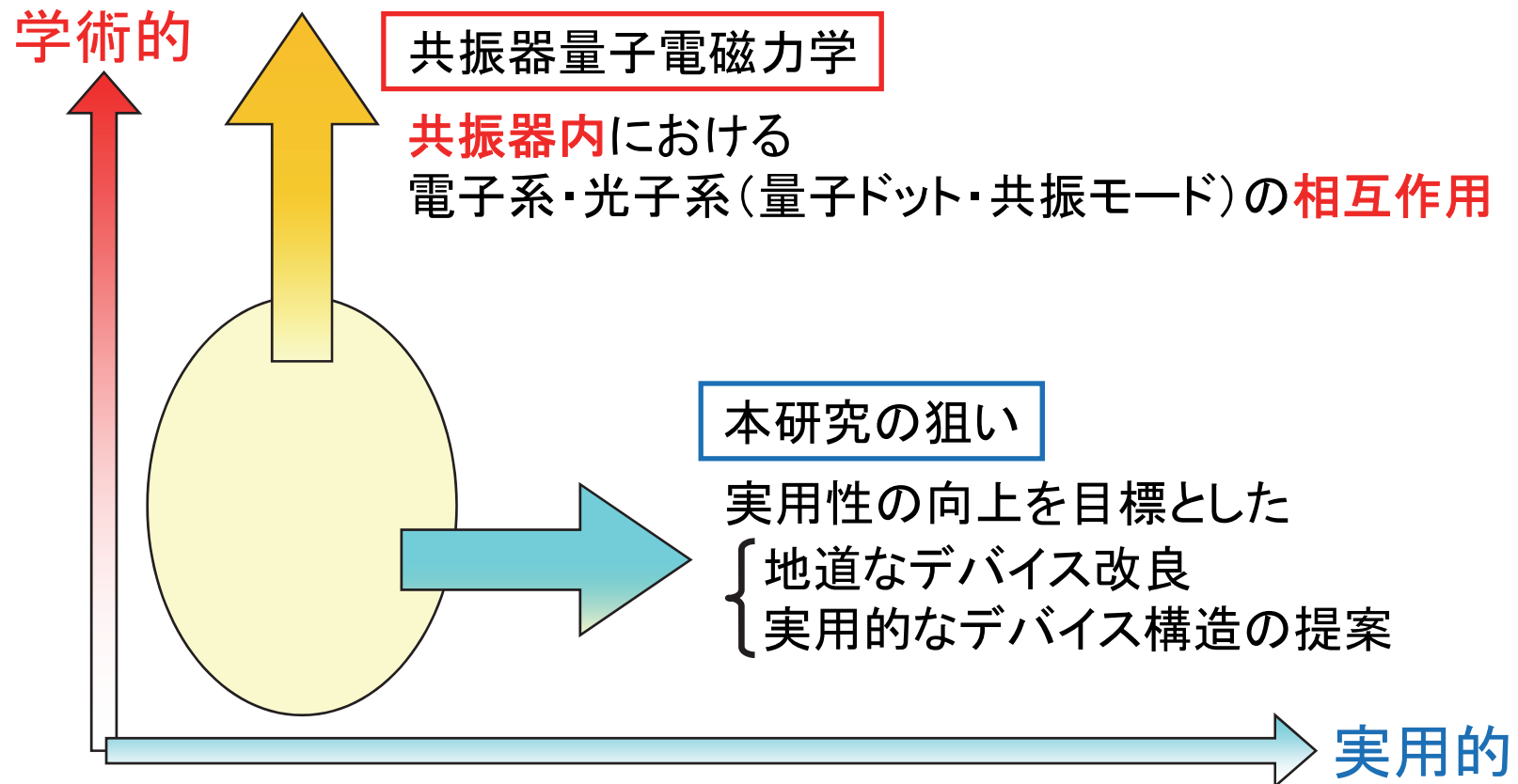
フォトニック結晶光共振器

単一光子を、共振モードの状態で捕獲



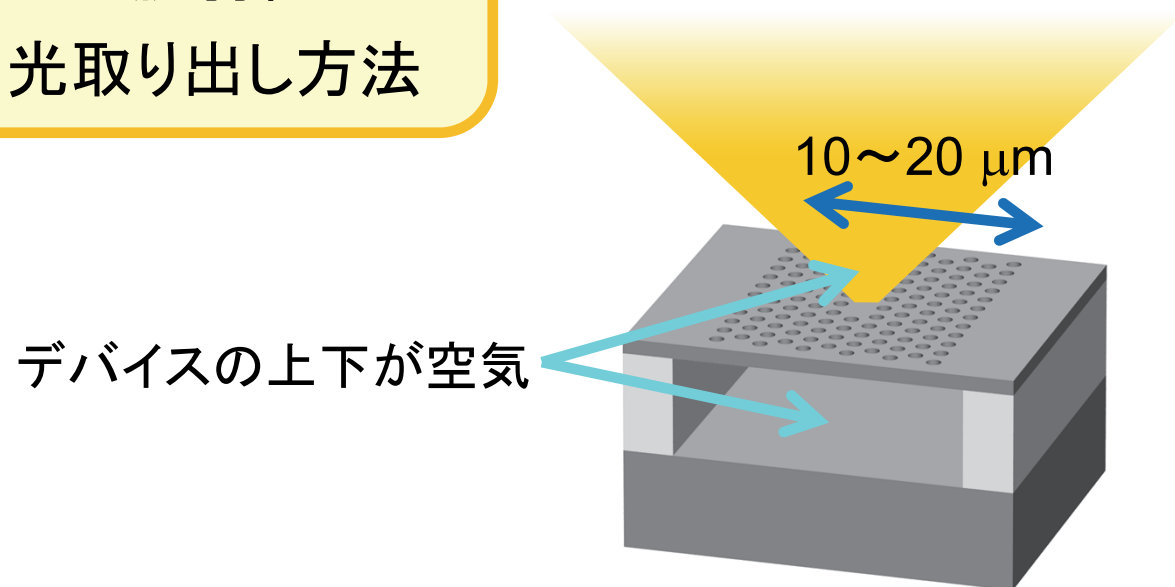
→ 究極的な電子制御、輻射場制御による、
理想的な単一光子源の実現が期待されている

当該分野の研究状況



当該分野で、長年、指摘されている実用面での課題

1. 微小光源の実装方法
2. 空気クラッドによる脆弱性
3. 共振器からの光取り出し方法



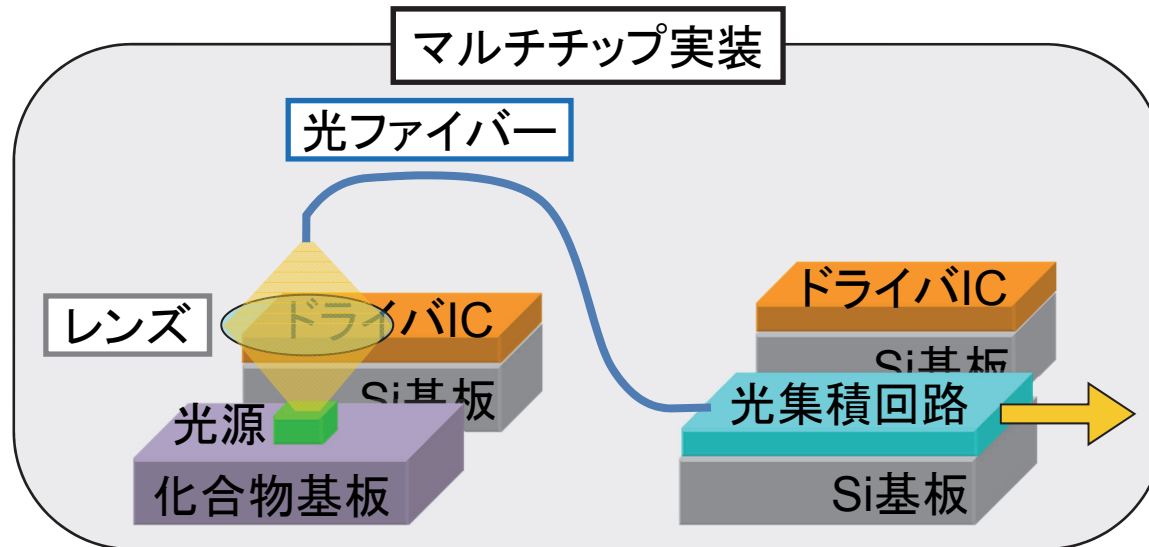
➡ 「3つの研究課題」の解決手段を明らかとすることを目標に、研究開発を行った

課題1: 微小光源の実装方法の検討

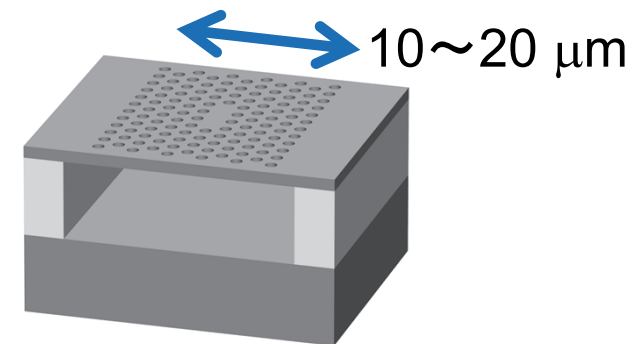
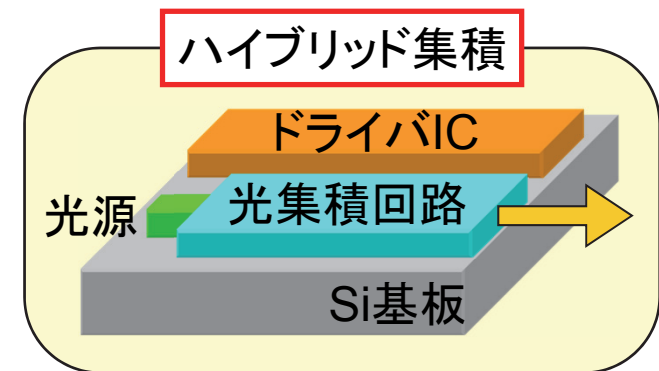
9/28

量子暗号通信用送信モジュール

マルチチップ実装



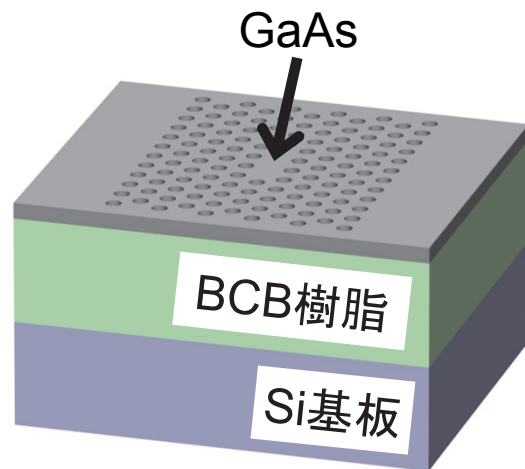
ハイブリッド集積



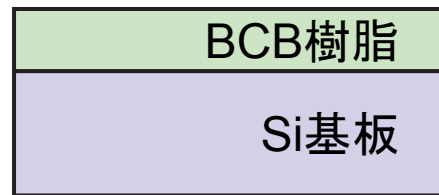
→ ハイブリッド集積による光電子集積回路の実現が、
有力な解決手段と考えられる

Si基板上への化合物半導体光デバイスの集積 10/28

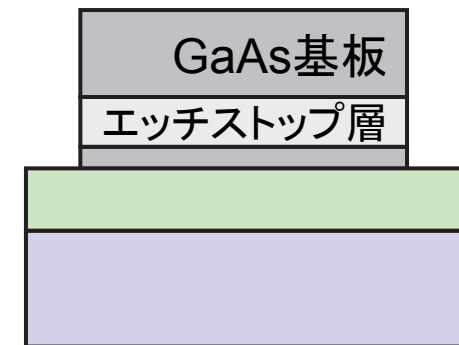
LSIの層間絶縁膜としても利用可能な
BCB樹脂を用いた異種接合技術の研究開発を行った



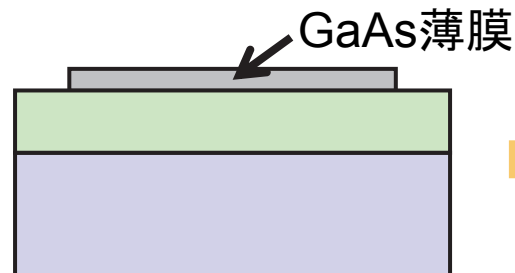
(1) BCB樹脂の塗布



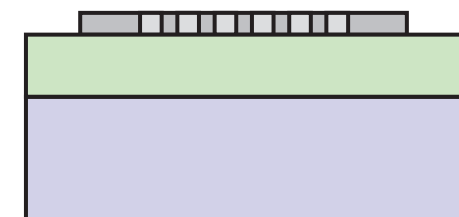
(2) ウエハ接合 (200~250°C)



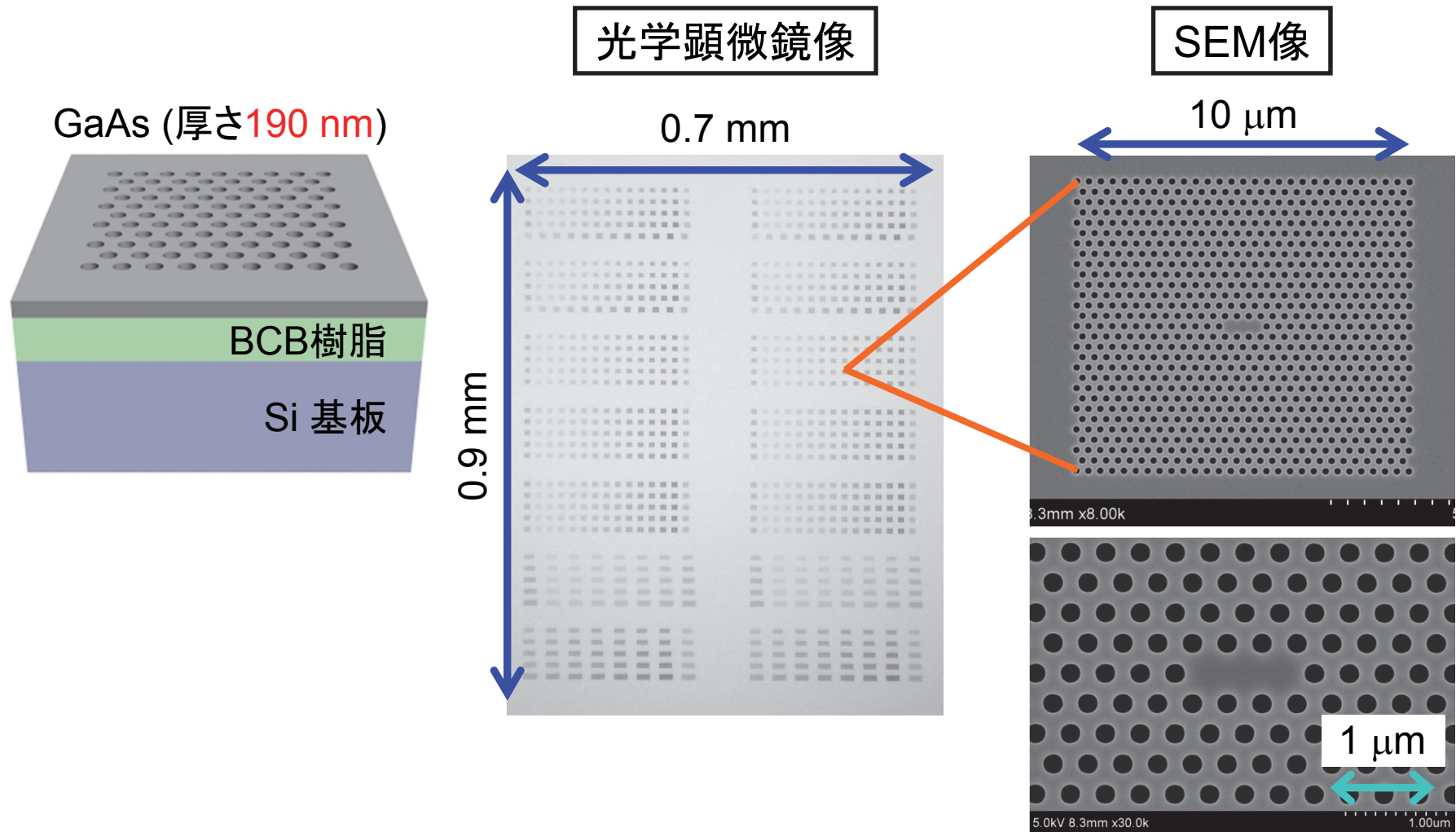
(3) GaAs基板の除去



(4) フォトニック結晶の形成

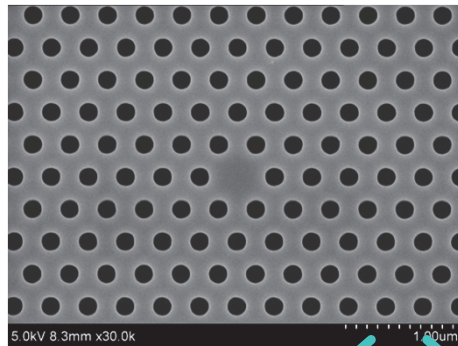


Si基板上へのGaAsフォトリソニック結晶の集積 11/28



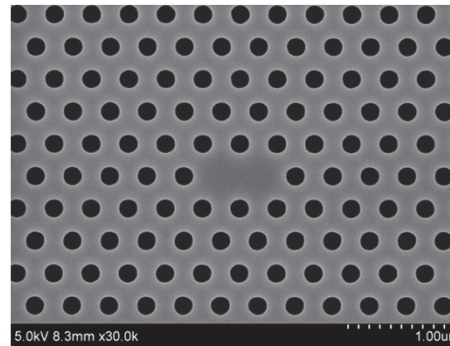
➡ Si基板上へのGaAsフォトリソニック結晶の集積を実現

1個孔埋め共振器

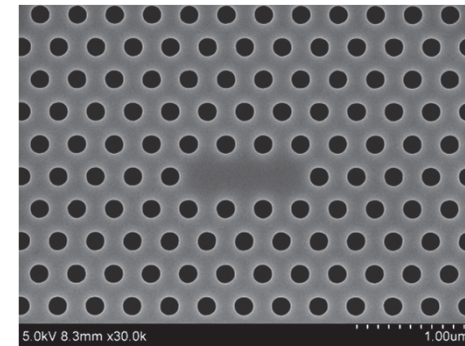


1 μm

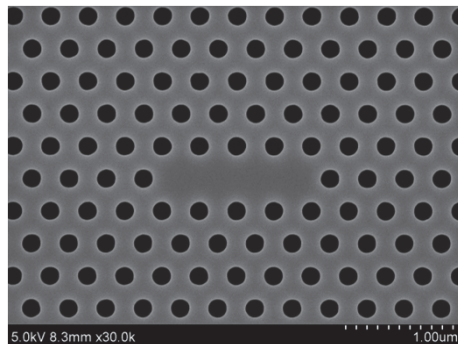
2個孔埋め共振器



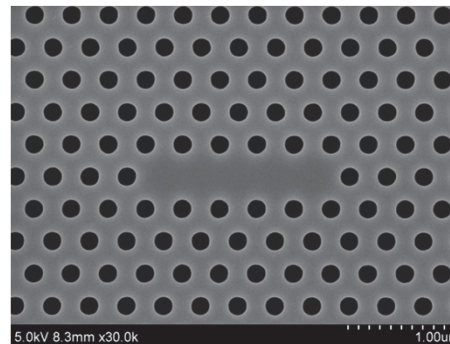
3個孔埋め共振器



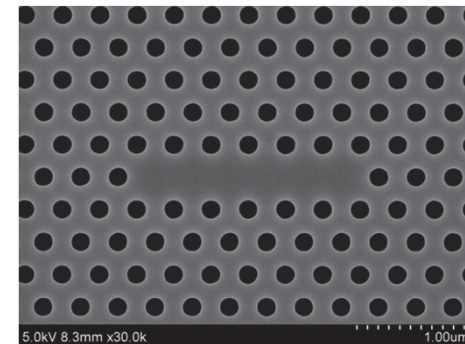
4個孔埋め共振器



5個孔埋め共振器

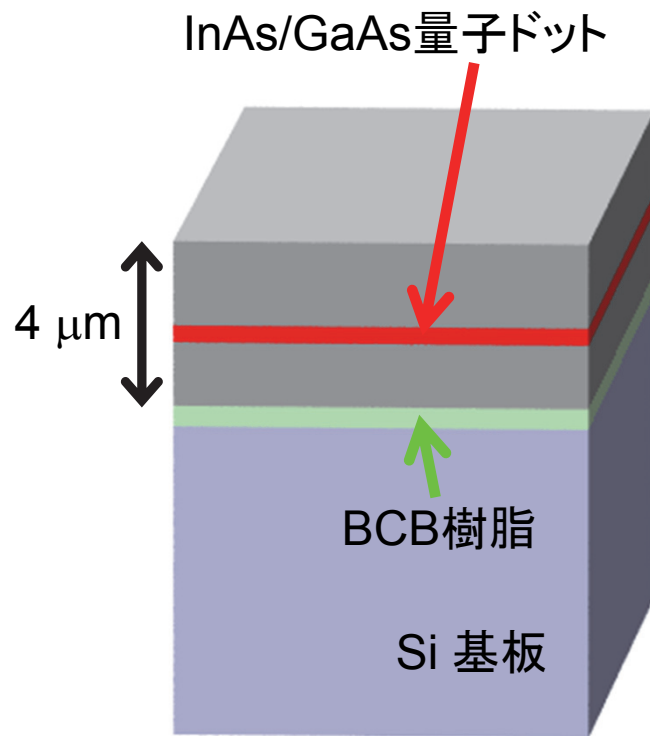


6個孔埋め共振器

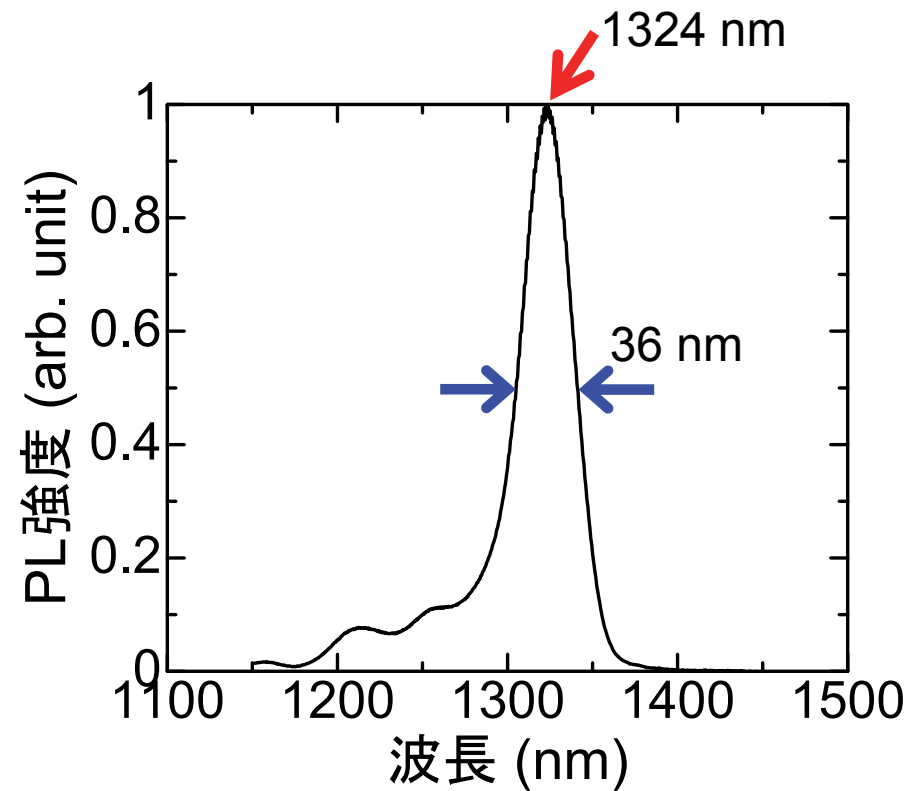


→ 良好なフォトリソ結晶パターンが形成されている

Si基板上へのInAs/GaAs量子ドットの集積 13/28



フォトルミネッセンス特性



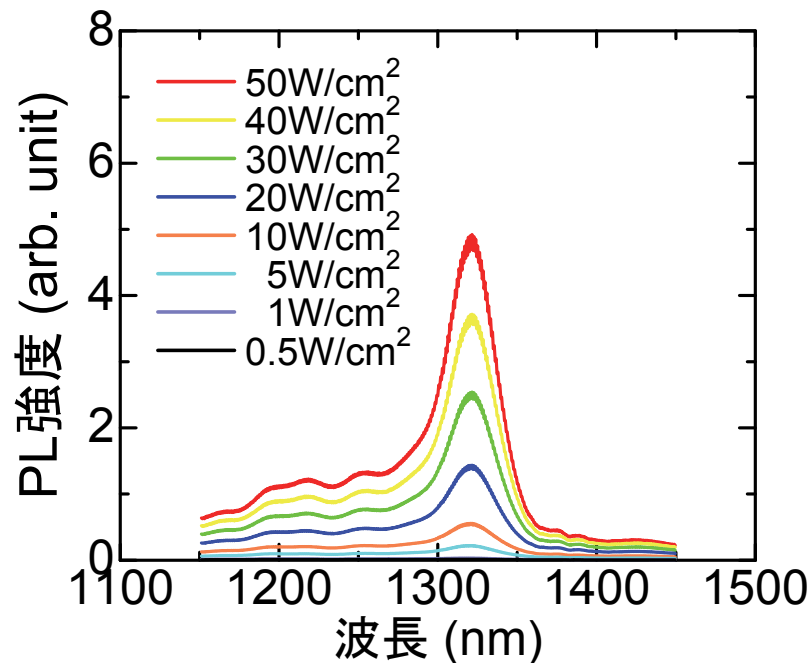
➡ Si基板上へのInAs/GaAs量子ドットの集積を実現

Si基板上への集積前後のPL特性を比較

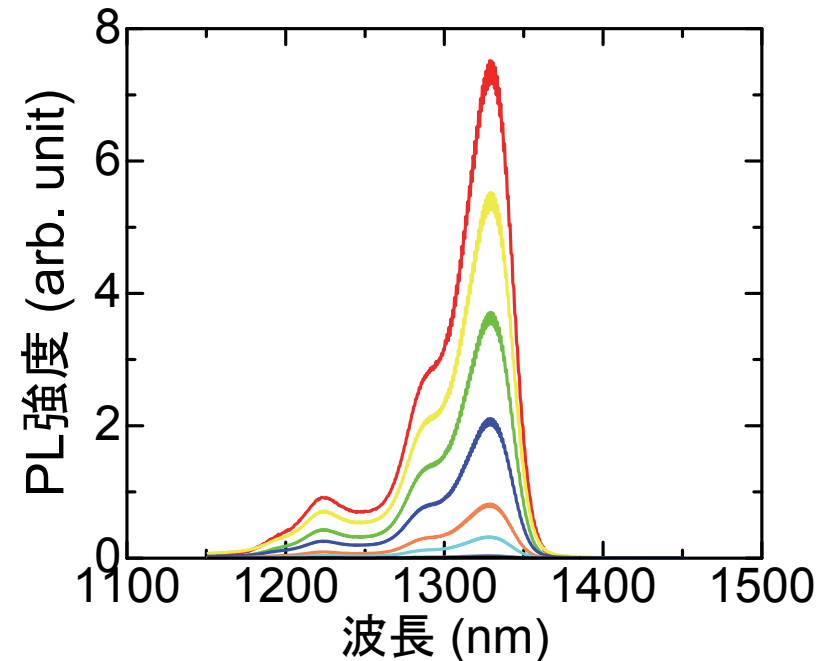
14/28

同一測定条件でPL特性を測定 (励起強度 0.5~50 W/cm²)

GaAs基板上 (集積前)



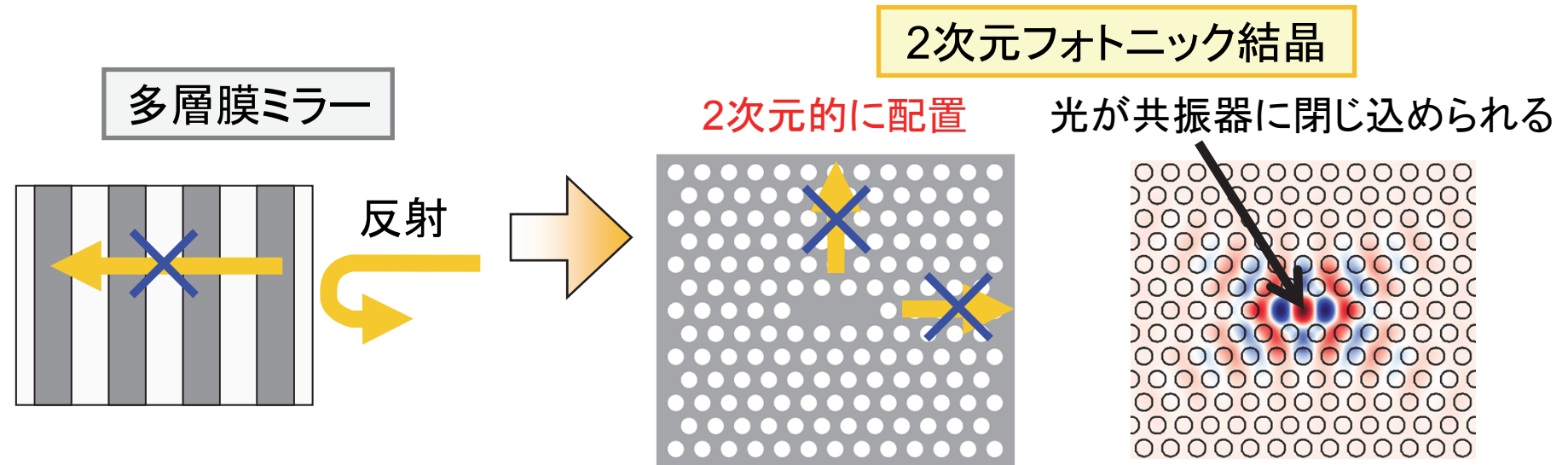
Si基板上 (集積後)



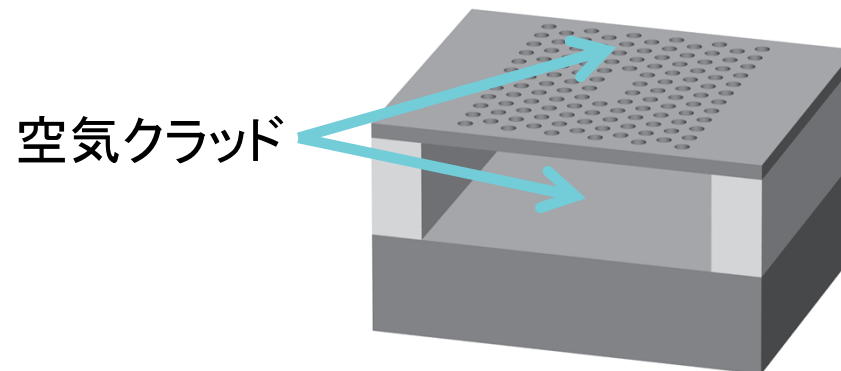
➡ 異種接合プロセスによる発光特性へのダメージは見られず、
良好な発光特性が観測されている

課題2: 空気クラッドによる脆弱性

15/28



上下方向は、屈折率差 (全反射) で光を閉じ込めている



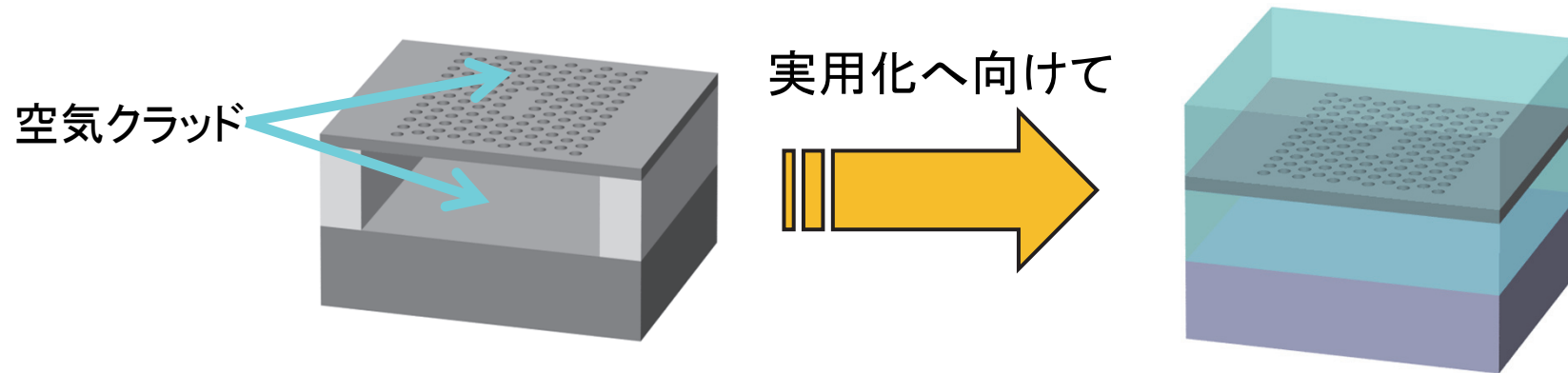
→ 強い光閉じ込めの実現には、空気クラッドが**必須**と考えられてきた

空気クラッド型からの脱却

16/28

空気クラッド型 (実用化困難)

低屈折率材料クラッド型



	空気クラッド型	低屈折率材料クラッド型
光閉じ込め性能	○	△
機械的強度	×	○
既存デバイスとの整合性	×	○

3次元電磁界解析を用いて、
低屈折率材料クラッド型フォトニック結晶光共振器の設計を行った

光共振器の性能指数：Q値

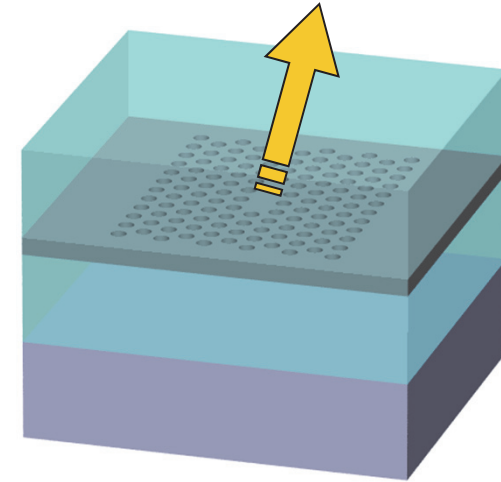
17/28

光共振器の性能を表すQ値

$$Q = 2\pi f \frac{\text{共振器内のエネルギー}}{\text{単位時間当たりの放射損失}}$$

Q値が大きいほど、光閉じ込め効果が高い

上下方向への放射損失



微小光共振器におけるQ値の目安

Q値 1000～1万：単一光子源、微小レーザー

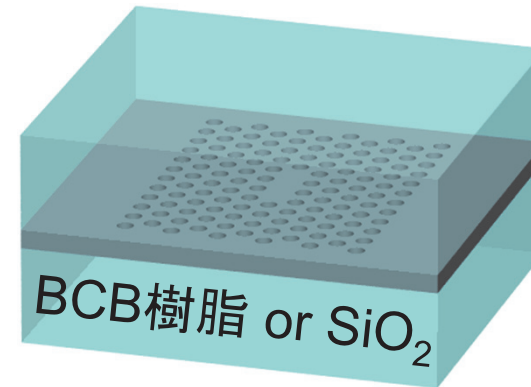
Q値 1万以上：光導波路への光出力が可能 (詳細は、後で説明)

→ 高い光閉じ込め性能(Q値=1万～10万)を目指して、設計を行った

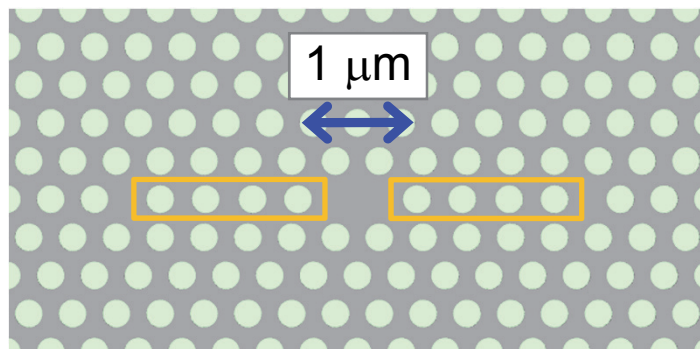
L3 (3個孔埋め) 光共振器の高Q値化

18/28

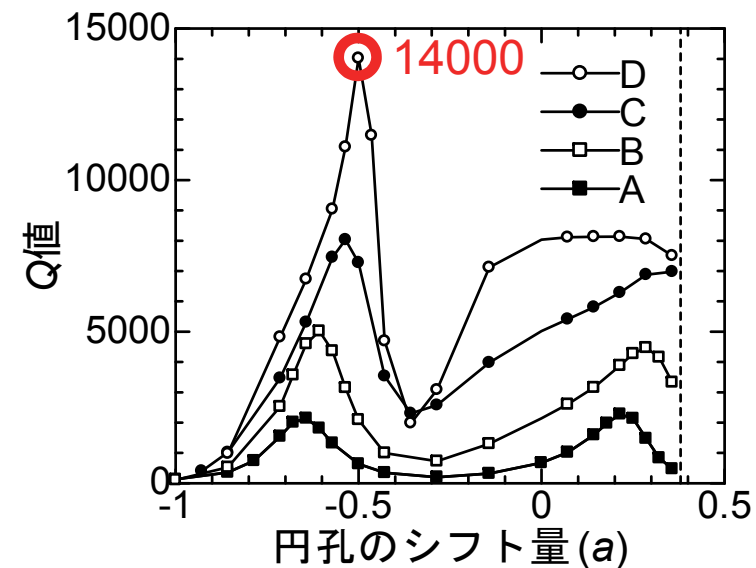
GaAs $n = 3.4$
BCBクラッド $n = 1.535$
SiO₂クラッド $n = 1.45$



円孔位置を調整



Q値 680 $\Rightarrow$ 14000 (BCB)
880 $\Rightarrow$ 24000 (SiO₂)

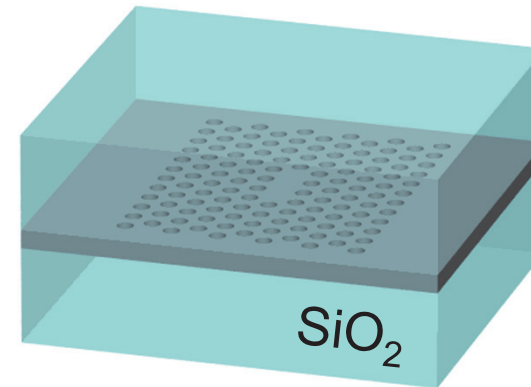


➡ 円孔位置の調整により、Q値が20倍以上向上
1万以上のQ値が可能

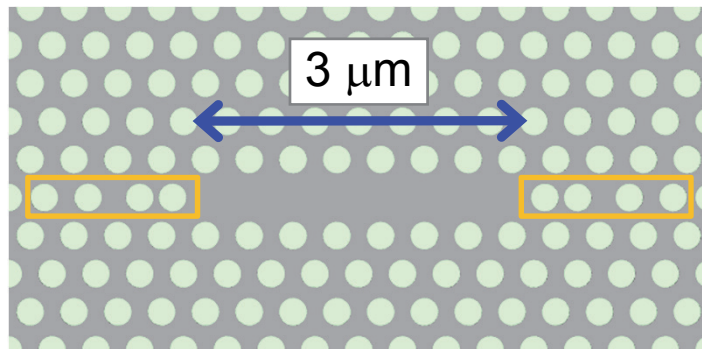
L7 (7個孔埋め) 光共振器の高Q値化

19/28

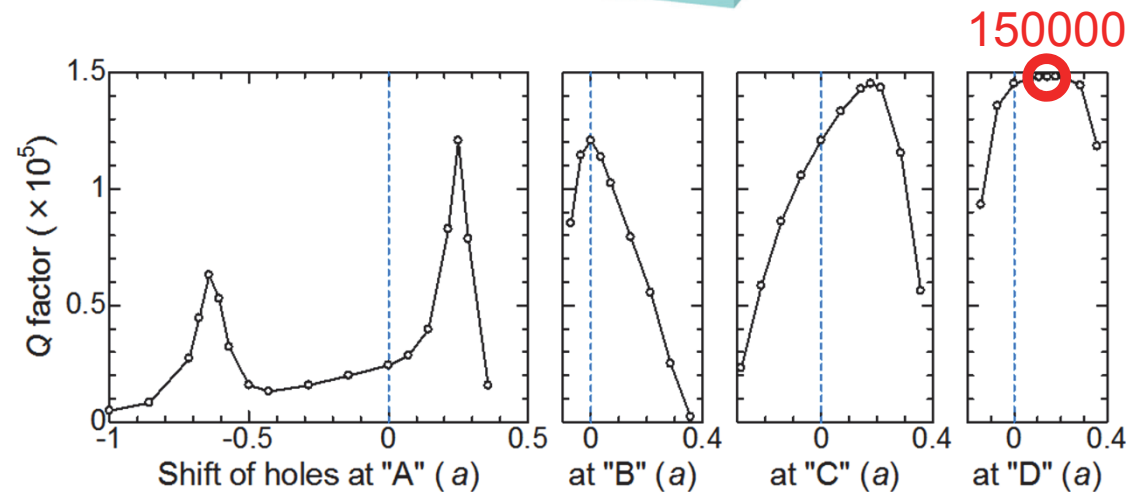
GaAs $n = 3.4$
SiO₂クラッド $n = 1.45$



円孔位置を調整



Q値 24000 ⇒ 15万



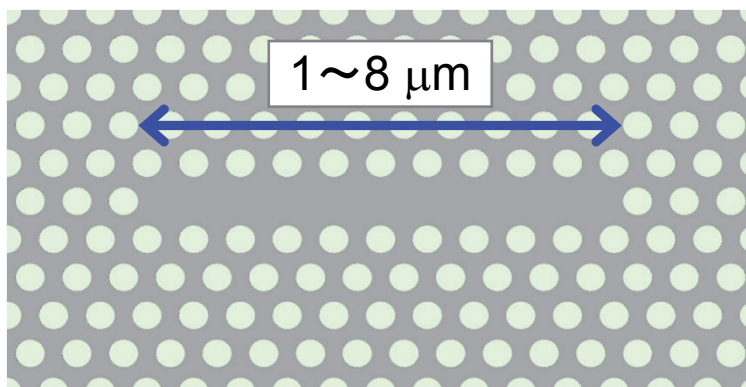
➡ 共振器サイズの拡大、円孔位置の調整により、Q値が向上
10万以上のQ値が可能

光共振器サイズの拡大による高Q値化

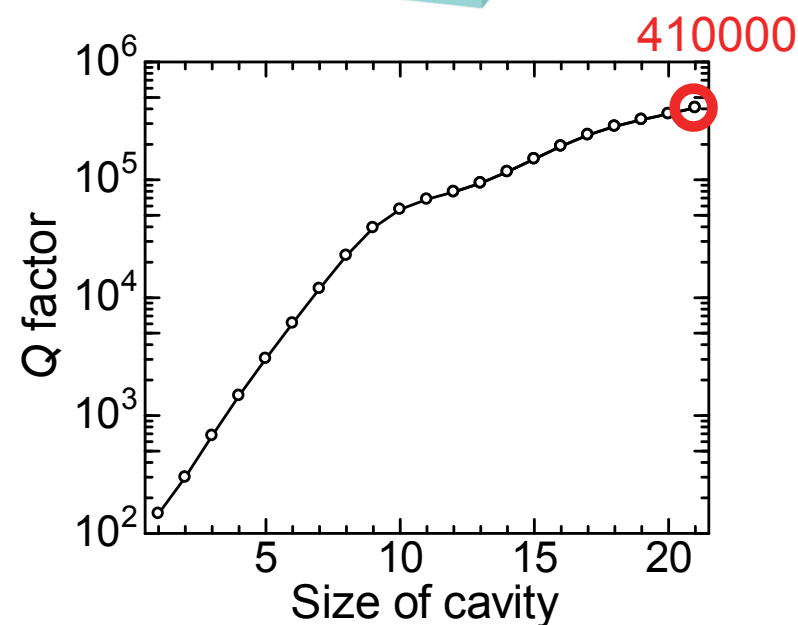
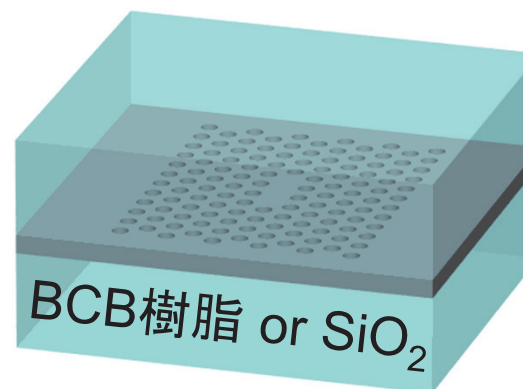
20/28

GaAs $n = 3.4$
BCBクラッド $n = 1.535$
SiO₂クラッド $n = 1.45$

共振器サイズを拡大

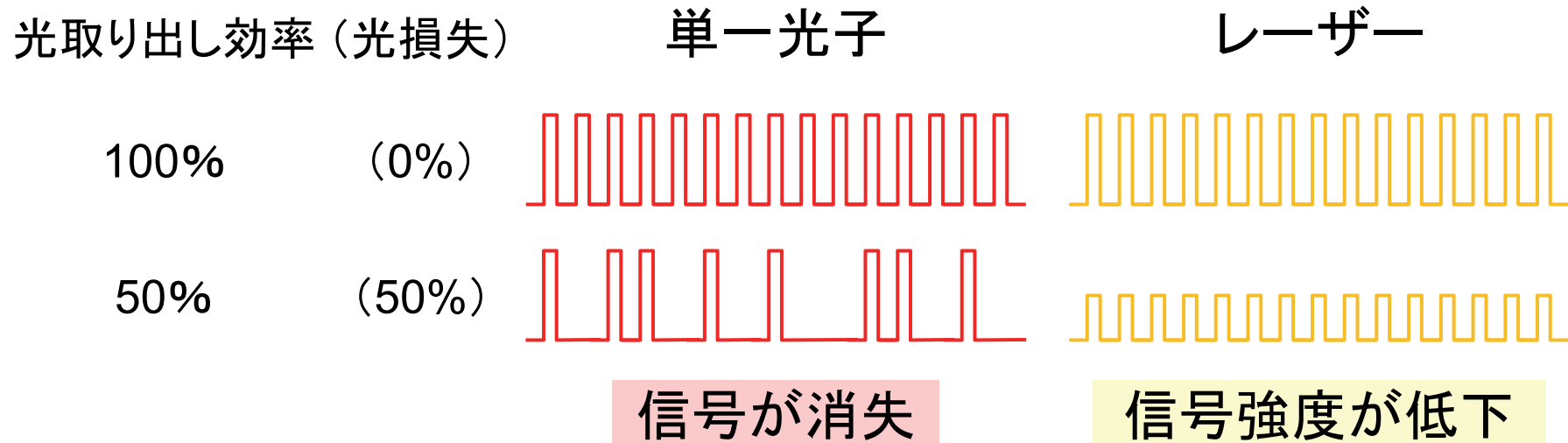


共振器長 8 μm Q値 41万 (BCB)
78万 (SiO₂)



単純に、共振器サイズの拡大により、50万以上のQ値も可能
空気クラッドでなくとも、高Q値を実現できる

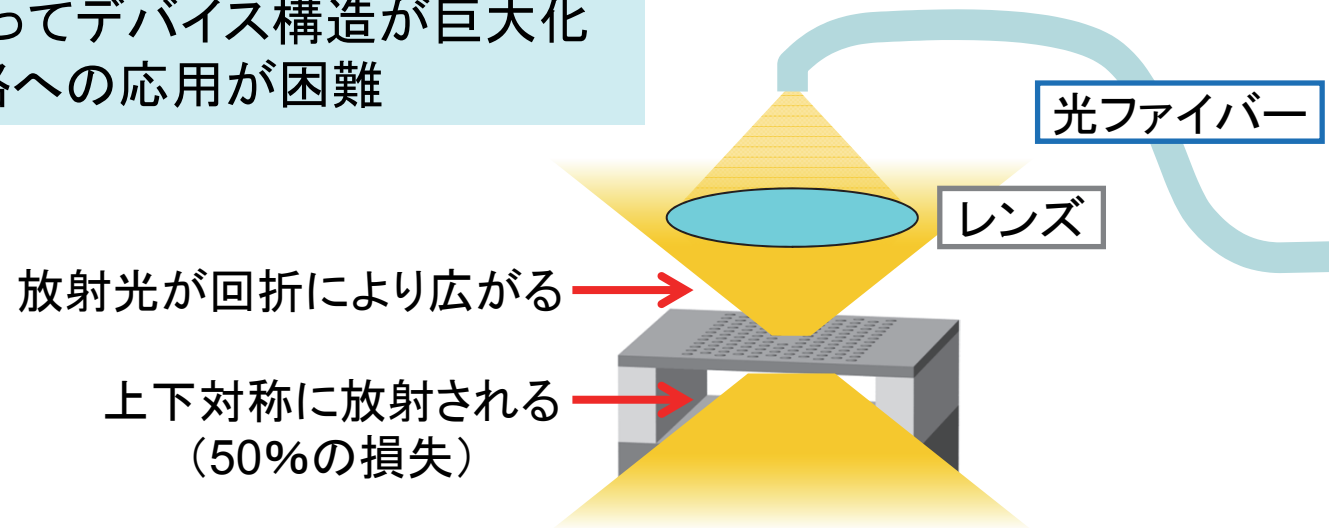
単一光子伝送システムにおける 光取り出し効率(光損失)の重要性



➡ 単一光子の伝送では、光損失は「信号の消失」に直結する
高い光取り出し効率(低い光損失)の実現が重要

レンズを用いた光取り出し

- (1) 光取り出し効率が低い (10~20%程度)
- (2) レンズによってデバイス構造が巨大化
- (3) 光集積回路への応用が困難

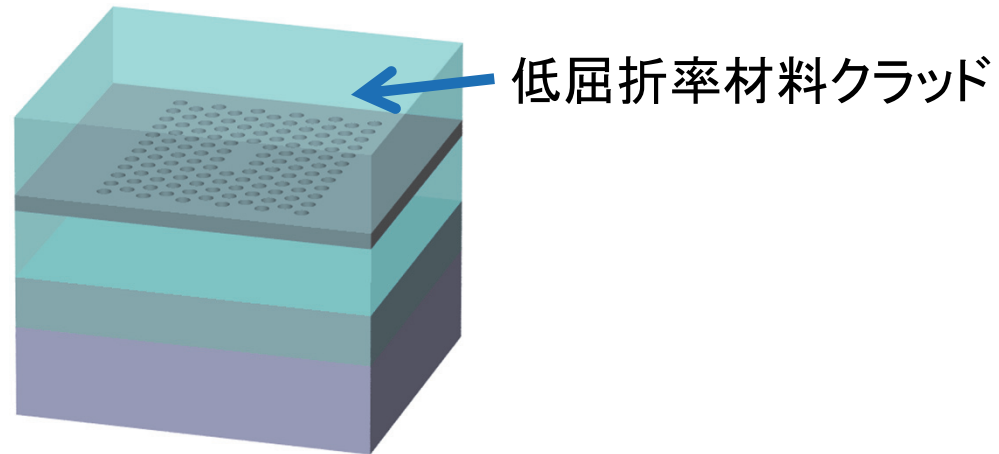


{ 高効率の実現
光集積回路への応用 に適した光取り出し方法の実現が望まれる

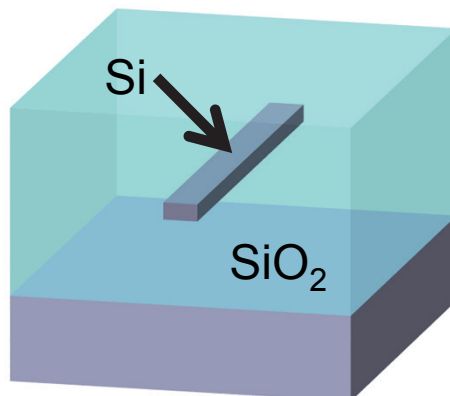
光導波路を用いた光取り出しの検討

23/28

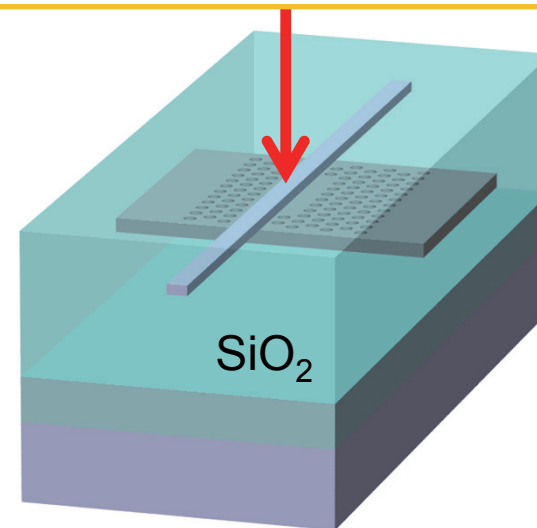
フォトニック結晶光共振器 (単一光子源)



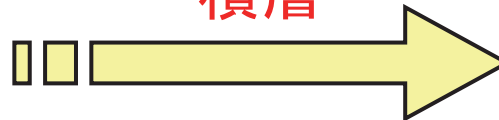
Si細線光導波路



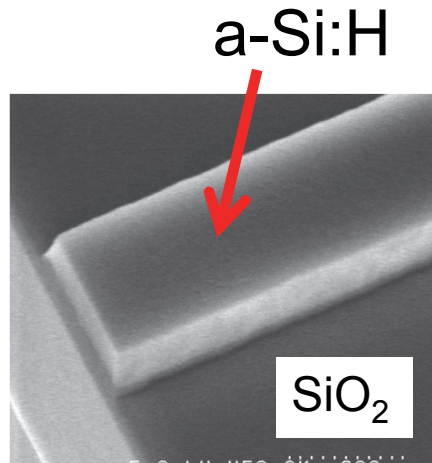
水素化アモルファスSi細線光導波路



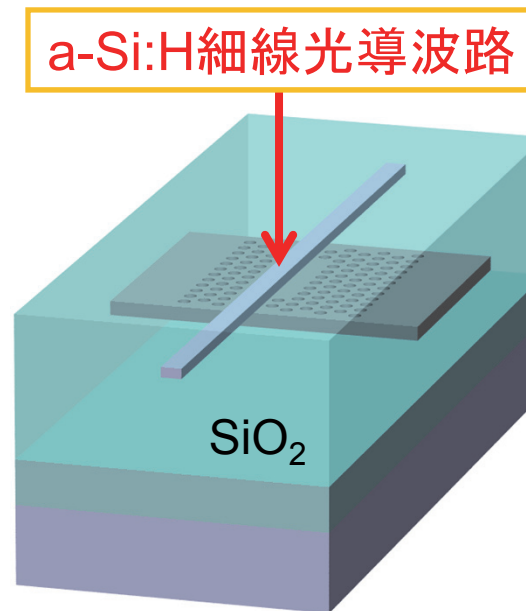
積層



水素化アモルファスSi (a-Si:H) 細線光導波路 24/28

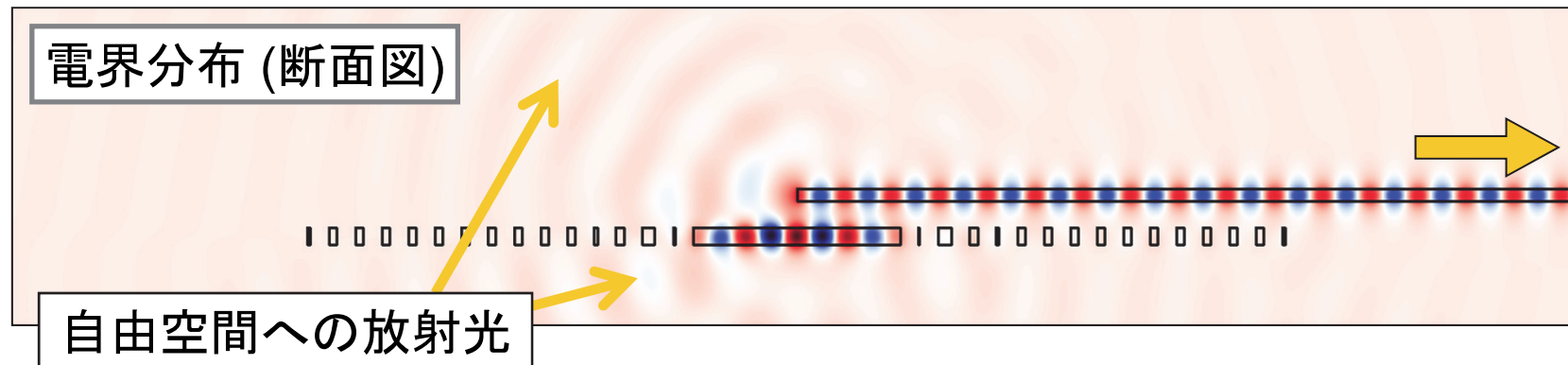
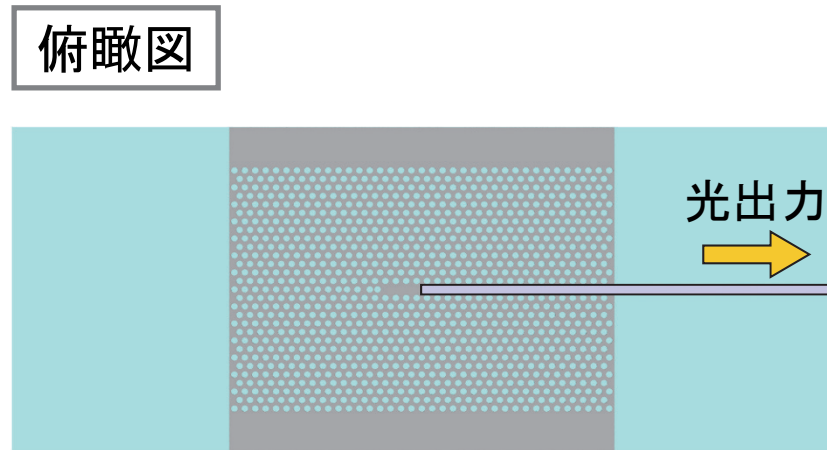
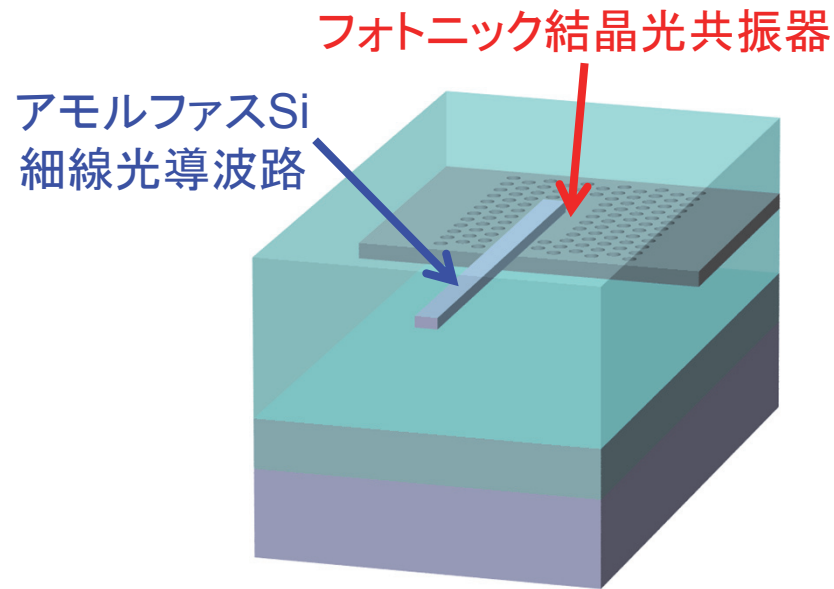


- (1) 結晶Siと同等の低損失光導波路を実現可能
- (2) プラズマCVD法によって、任意の構造上に配置可能



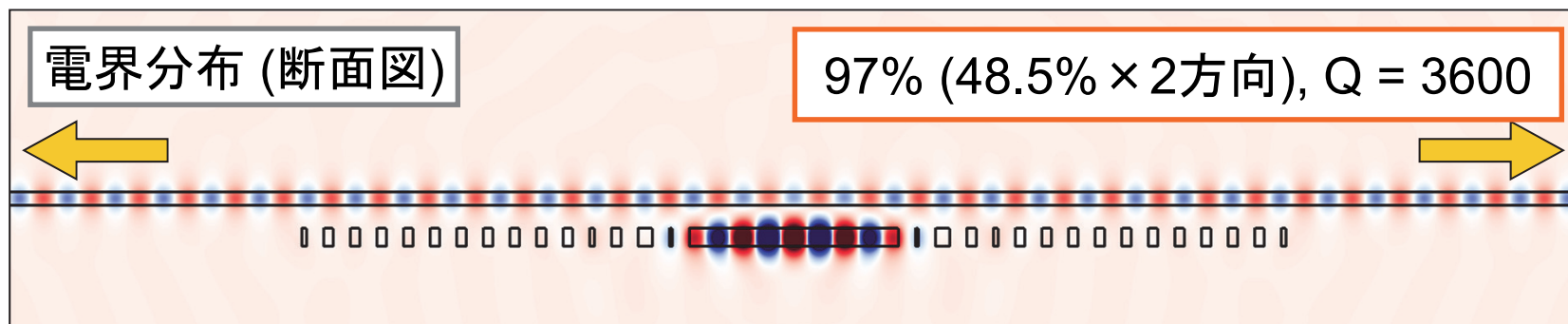
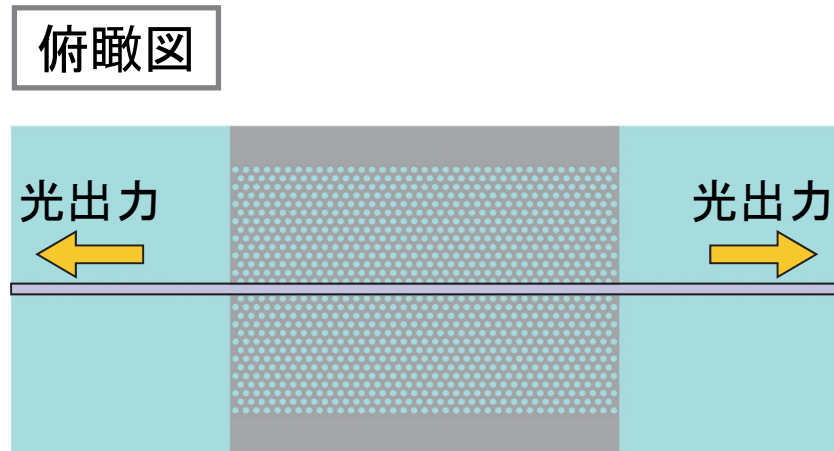
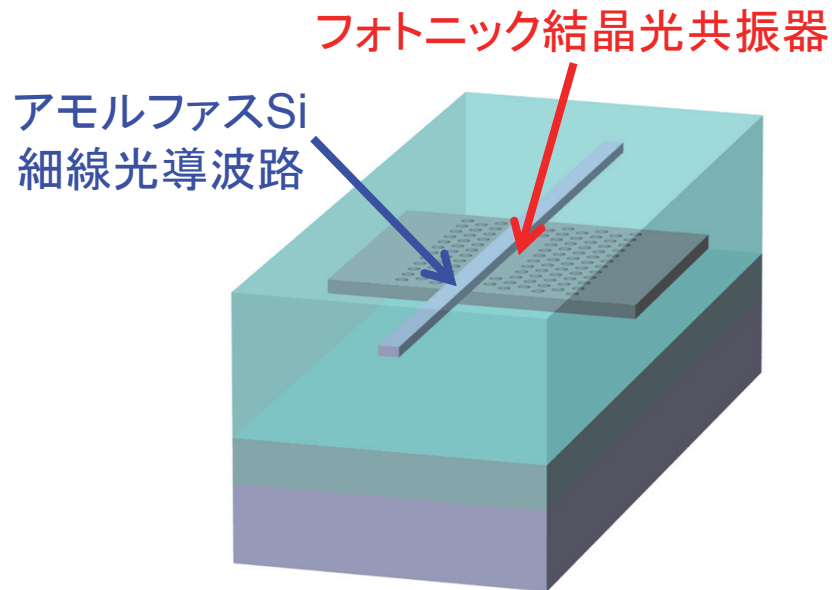
3次元電磁界解析を用いて、
a-Si:H細線光導波路を用いた光取り出し構造の設計を行った

光取り出し構造 (1) : 1方向への光取り出し 25/28



→ 最大73%の光取り出し効率が可能

光取り出し構造 (2) : 2方向への光取り出し 26/28

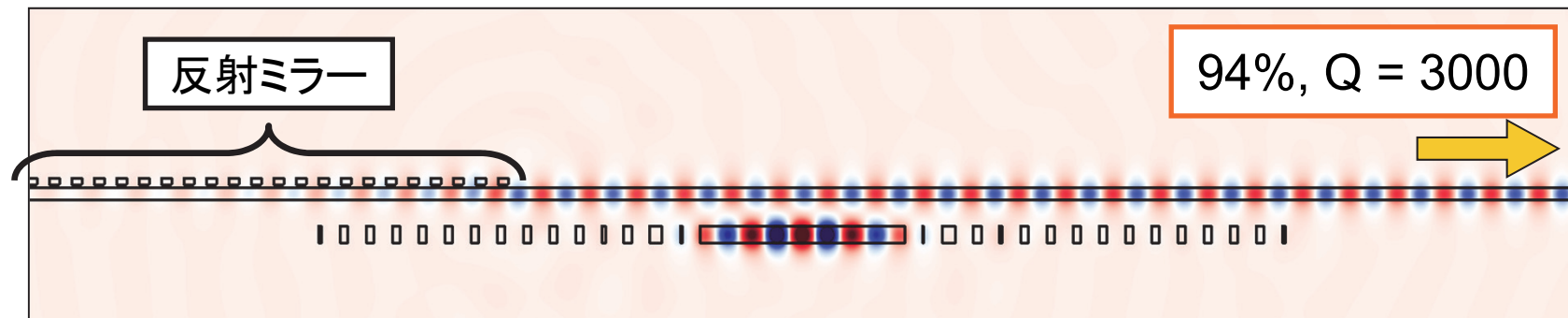
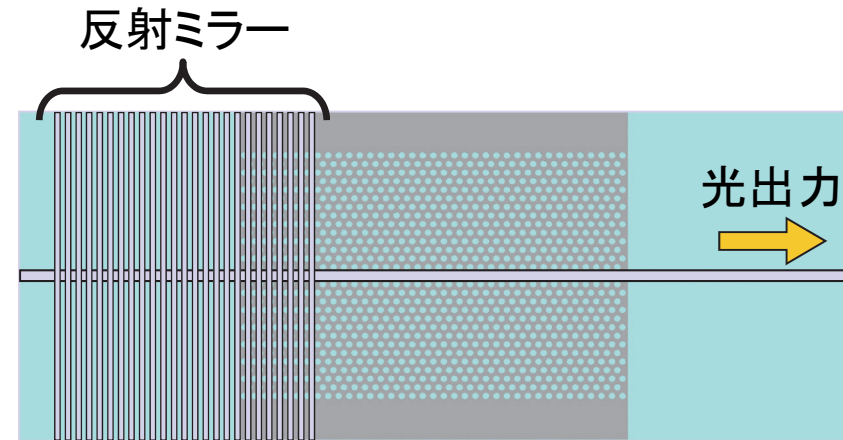
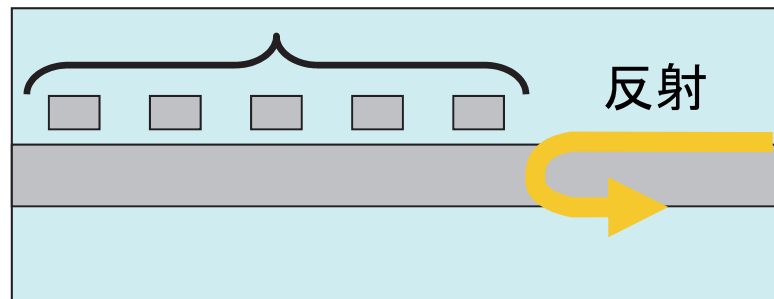


➡ 97% (48.5% × 2方向) の高い光取り出し効率が可能

光取り出し構造 (3) : 反射ミラーの導入

27/28

反射ミラー (グレーティング) の設置



➡ 94% (1方向) の高い光取り出し効率が可能

量子ドット・フォトニック結晶微小光源の実用化を推し進める上で、長年、指摘されてきた「3つの課題」の解決手段を明らかとすることを目標に研究開発を行った。

1. 微小光源の実装方法

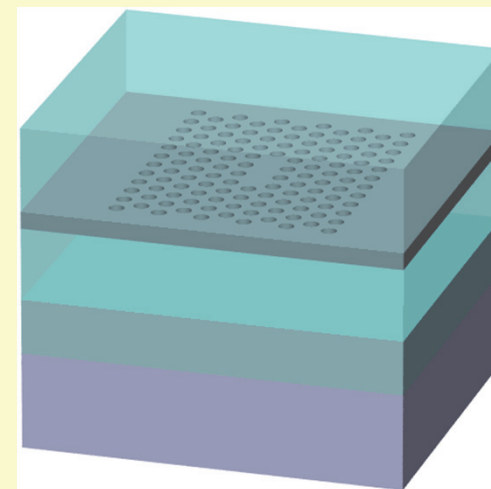
光電子集積回路の実現へ向けて、**Si基板上への化合物半導体光デバイス集積化技術**の開発を行った。

2. 空気クラッドによる脆弱性

低屈折率材料クラッド型の利用を提案し、**10万以上**の高Q値化が可能であることを示した。

3. 共振器からの光取り出し方法

水素化アモルファスSi細線光導波路を用いた光取り出し方法を提案し、**90%以上**の高い光取り出し効率が可能であることを示した。





National Institute of
Advanced Industrial Science
and Technology
AIST

ご清聴ありがとうございました