

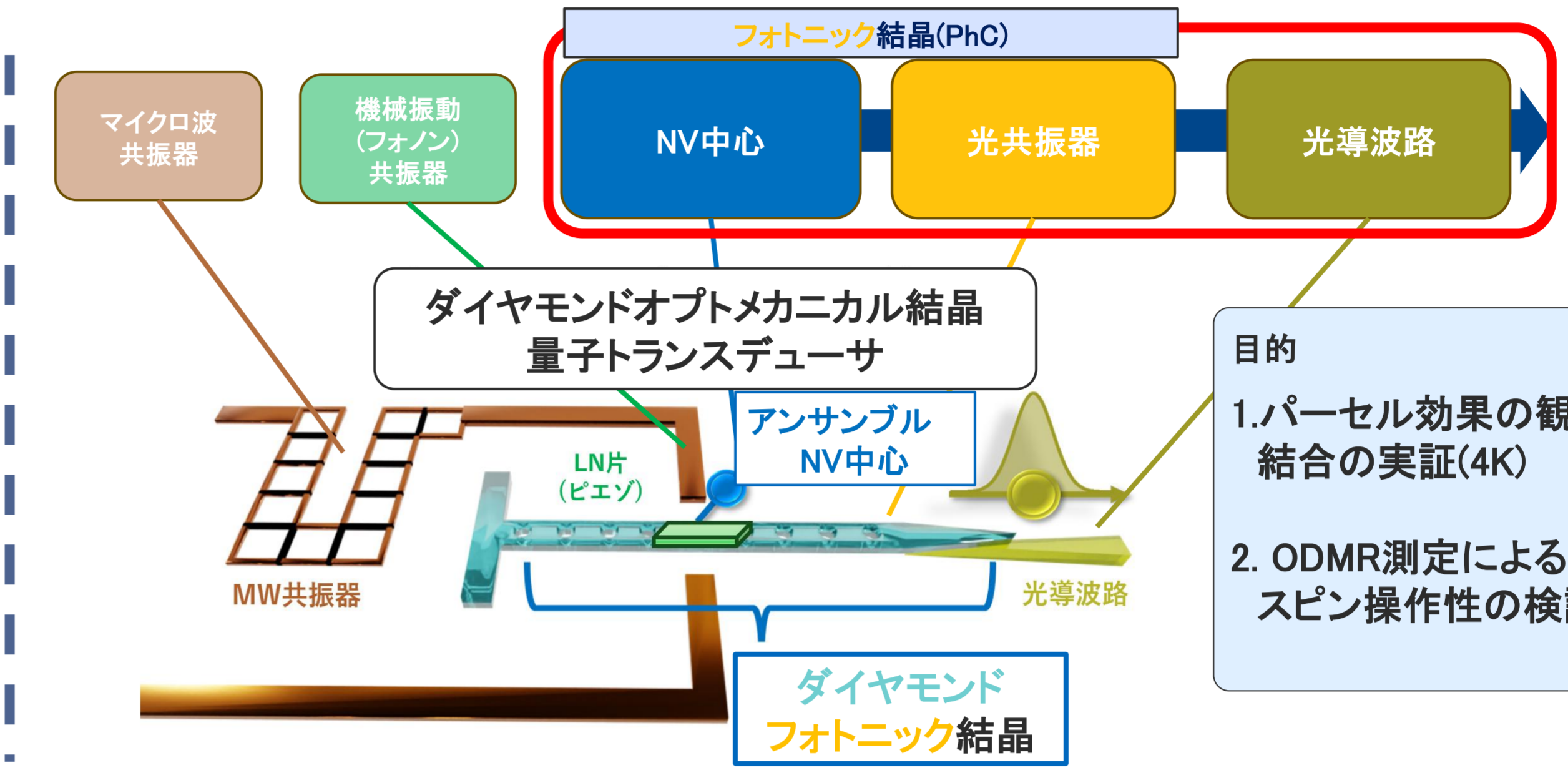
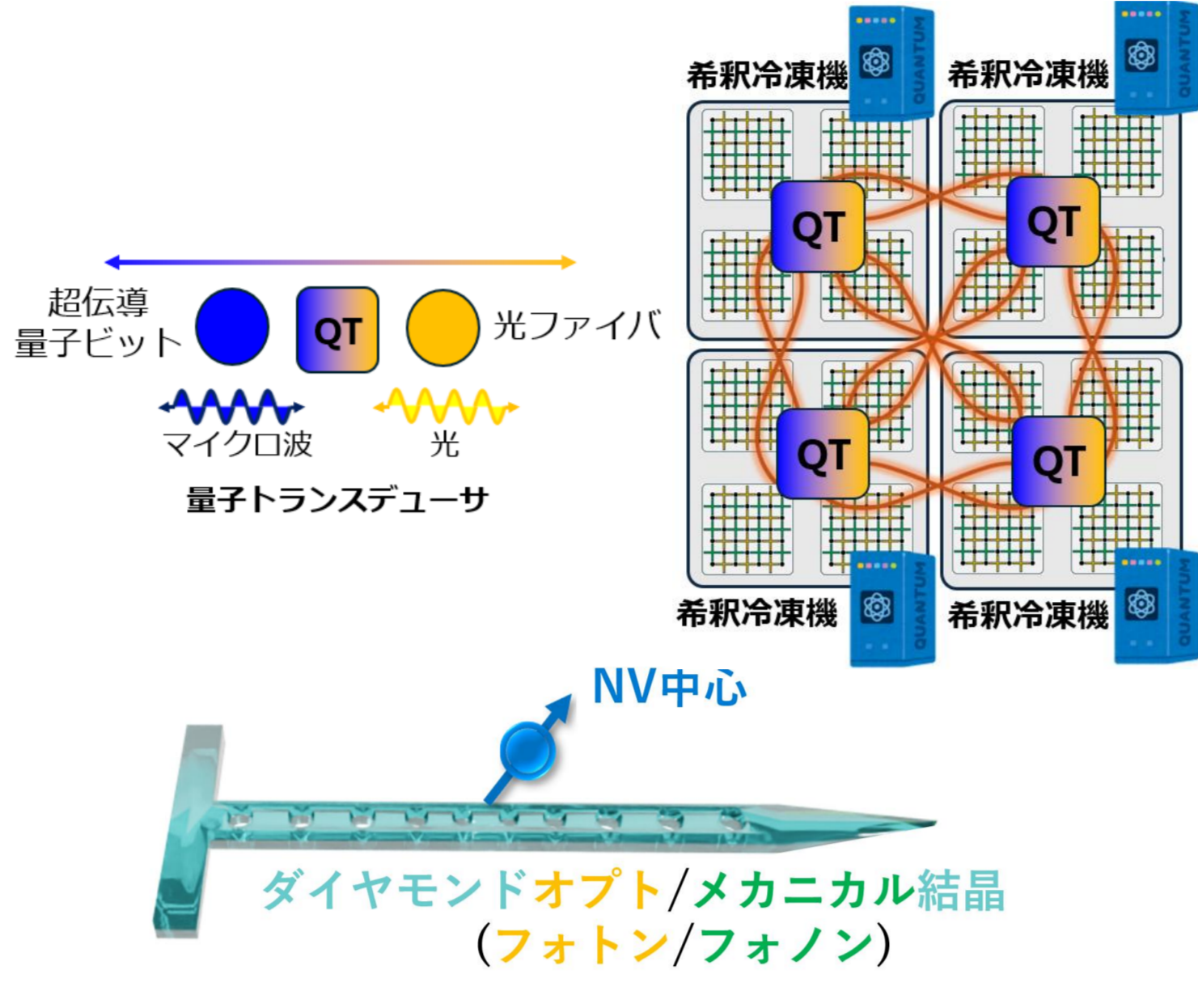
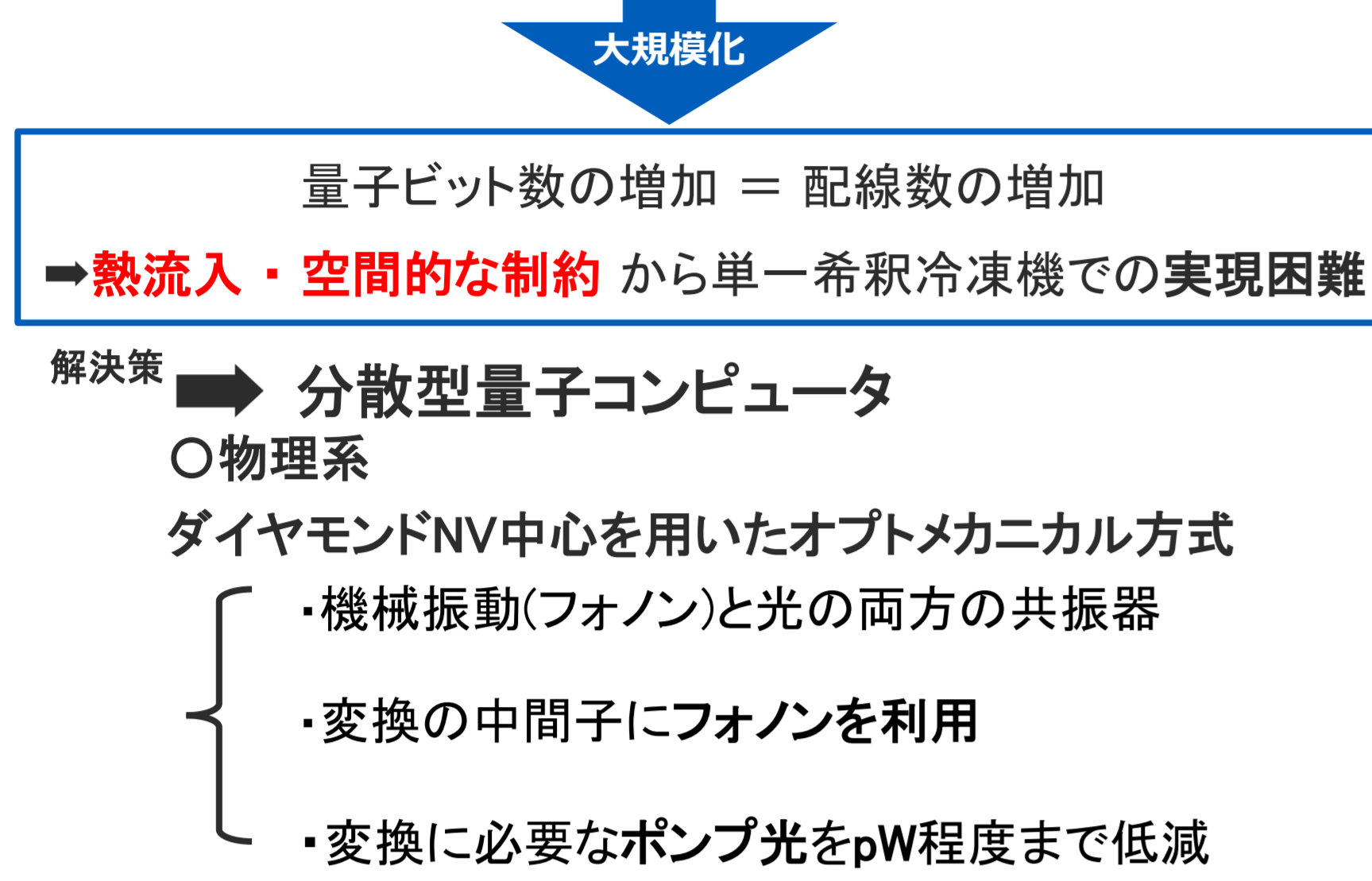
ダイヤモンド色中心を用いた集積型量子トランスデューサに関する研究

横浜国大 院工¹, 横浜国大 IAS², 横浜国大 QIC³, 東大 RCAST⁴, 東大 IIS⁵, 量子科学技術研究開発機構⁶

○ 吉岡 雅貴¹, 佐藤 清隆¹, 黒川 穂高^{2,3}, 関口 雄平^{2,3}, 鎌田 幹也^{1,2}, 羽中田 祥司^{1,2}, 国井 昌樹^{1,2}, 玉貫 岳正^{1,2}, 石田 悟己⁴, 松清 秀次⁵, ポンセン ナタチャック⁵, 西岡 政雄⁵, 池 尚政⁵, 大槻 秀夫⁵, 木村 晃介⁶, 竹中 康太⁶, 小野田 忍^{3,6}, 馬場 俊彦^{1,2,3}, 岩本 敏^{3,4}, 小坂 英男^{1,2,3}

ダイヤモンド色中心を用いたマイクロ波-光 量子トランスデューサ

超伝導量子ビット…動作速度、忠実度、集積性などバランスがいい



- 目的
1. パーセル効果の観測によるNVと共振器の結合の実証(4K)
 2. ODMR測定による実装デバイスでのスピン操作性の検証(室温)

モジュールーション

A) デバイス設計と作製

アンサンブルNV中心
 住友電工(タイプ: Ib, [N]:100 ppm)
 NV中心生成: QST
 窒素イオン注入($1 \times 10^{11} / \text{cm}^2$)
 電子線照射(2 MeV, $1 \times 10^{18} \text{ e/cm}^2$)
 1000°C真空アニール

ダイヤモンド OMC / PhC
 設計: 野村研究室, 馬場研究室
 作製: 岩本研究室

ファイバブロックアレイ
 実装: NTT-AT

光導波路
 設計: 馬場研究室
 作製: AIST

マイクロ波共振器
 設計: 小坂研究室
 作製: NICT

マイクロ波共振器 周波数調整コイル

フォトニック結晶 周波数調整 ガスライン

マイクロ波共振器チップ

ファイバブロックアレイ

光導波路チップ上の オプトメカニカル結晶

Coupling Efficiency

$t_{\text{offset}} [\mu\text{m}]$

OMC/PhC

SiN waveguide

t_{offset}

0.3 μm

5 μm

1 μm

PhCと光導波路間で高い結合効率を実現するため、
 ~100nmのアライメント精度が要求される。

B) 光導波路チップ上へのフォトニック結晶の実装

1) ナノプローブを用いたピックアンドプレイス法による実装

10 μm

フォトニック結晶

Tungsten probe

光導波路

- ✓ ナノプローブで導波路基板にダイヤモンドサンプルをピックアンドプレイス
- ✓ シミュレーションから得られた、高効率達成のためのアライメント精度 ~100nmを達成

2) 導波路,ファイバを通じた実装サンプルの発光取り出し

- ✓ 光導波路基板に実装
- PhC中のNV中心の発光を、光導波路、ファイバを通じて取り出すことが可能に
- ✓ 希釈冷凍機、室温系共に導波路を通じた光学特性評価を行うことが可能

実験

A) 光導波路実装サンプルの光学特性制御および測定 @希釈冷凍機 4K

1) ガスチューニング法による共振周波数制御

515 nm Green Laser

Spectrometer

N₂ gas

PCL f=40 cm

Gas line

Read out fiber

Objective lens

Piezo stage

x,y,z

Sample

Photon counts (a.u.)

Wavelength (nm)

1. 初期位置

2. ガス注入

3. レーザ照射

共振

レーザ照射後

✓ N₂ガス注入およびmW級レーザー照射によるガスチューニング法で能動的な光共振周波数の調整を達成

2) PhC中のNV中心の緩和寿命測定によるパーセル効果観測

Normalized Counts (a.u.)

Time from fit start (ns)

非共振: ($\tau_{\text{off}} = 18.55 \text{ ns}$)

共振: ($\tau_{\text{on}} = 15.63 \text{ ns}$)

パーセル効果による寿命短縮

ガスチューニングによって、導波路に実装したPhC中のNVのZPLと光共振器の共振、非共振状態をそれぞれ用意、緩和時間測定を行った。

共振時に、パーセル効果によるNV中心の緩和寿命の短縮を導波路経由で観測

パーセル因子: $F_p = 6.8$

→ PhCとNV中心の結合が実証された

$$F_p = \frac{1}{\alpha_{\text{QW}} \alpha_{\text{QE}}} \left(\frac{\tau_{\text{off}}}{\tau_{\text{on}}} - 1 \right) + 1$$

デバイラ因子: $\alpha_{\text{DW}} = \frac{\gamma_{\text{ZPL}}}{\gamma_{\text{ZPL}} + \gamma_{\text{PSB}}} \approx 0.03 \sim 0.04$

量子効率: $\alpha_{\text{QE}} = \frac{\gamma_{\text{ZPL}} + \gamma_{\text{PSB}}}{\gamma_{\text{ZPL}} + \gamma_{\text{PSB}} + \gamma_{\text{nr}}} \approx 0.8$

B) 光導波路実装サンプルのODMR測定 @実装機 室温

Camera

LED

515 nm Green Laser

fPGA

BS 50:50

SG

Switch

Ampl

Circulator

Sample

Fiber out

APD/ Spectrometer

fPGA: Field programmable gate array
 SG: Signal generator
 APD: Avalanche photodiode
 BS: Beam splitter
 BPF: Band pass filter

Normalized Intensity

MW Frequency (MHz)

(Fit: $f_c = 2870.0 \text{ MHz}$)

FWHM = 15.0 MHz

$F_c = 2870.0 \text{ MHz}$

項目/値	本研究	先行研究[1~3]
F_c (MHz)	2870.0	2870
FWHM (MHz)	15.0	5~10
Contrast(%)	2.0	5~30

✓ ゼロ磁場分裂と共振時にODMRのディップを観測

→ 実装デバイスに対して、電極からマイクロ波を印加することによる、Nvのスピン操作性を実証した

達成

1. フォトニック結晶を導波路チップに実装
 → 導波路からの発光の取り出しが可能になった。
2. 窒素ガスチューニング
 → フォトニック結晶、オプトメカニカル結晶の光共振周波数の能動的な制御が可能になった
3. 実装サンプルの光学特性評価
 → パーセル因子 $F_p = 6.8$ を観測
 実装したデバイスを用いた希釈冷凍機での観測は世界でもわずかであり、最先端の成果
4. 実装サンプルのスピン操作性の検証
 → 共振する周波数でODMRのディップを観測、スピン操作可能性を実証した
 - ・中心周波数 : 2870.0 MHz
 - ・半値全幅 : 15.0 MHz
 - ・コントラスト : 2.0%

まとめ・展望

- 達成
- ✓ フォトニック結晶を導波路チップ上に実装
 - ✓ 実装サンプルでの光学特性をファイバ経由で評価
 - ✓ 実装サンプルでのスピン操作性の検証

- 展望
- 単一NV中心のPhC, OMCの利用
 - マイクロ波-光変換の実証
 - 高Q値デバイスの作成、利用
 - 実装サンプルでラビ振動測定
 - 2次元構造のOMCの作成

謝辞

本研究はJST「ムーンショット型研究開発事業」(JPMJMS2062)、総務省「量子インターネット実現に向けた要素技術の研究開発」(JPMI00316)、JST-CREST(JPMJCR1773)、科研費基盤研究(A,S)、挑戦的研究(開拓)の支援を得た。