



ムーンショット目標 6

2050 年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる
誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現

終了報告書

量子計算網構築のための

量子インターフェース開発

小坂 英男

横浜国立大学 量子情報研究センター／
大学院工学研究院・先端科学高等研究院



1. 研究開発プロジェクトの実施期間

令和2年12月1日～令和7年11月30日

2. 研究開発プロジェクトの実施概要

(1) 研究開発プロジェクトの概要

誤り耐性をもつ大規模な分散型量子コンピュータの実現に向け、超伝導量子コンピュータチップを光ファイバ量子通信で接続する量子インターフェースの開発を行った。超伝導量子ビットから出力するマイクロ波光子と、光通信用の光学帯光子を量子変換するため、量子メモリとなる単一色中心を微小共振器中心に配置したダイヤモンドオプトメカニカル結晶ナノ共振器(OMC)をコア技術とし、ダイヤモンド成長、色中心形成、ナノ加工、光・音・マイクロ波共振器、3次元実装までを一貫して開発した。当初計画に従い開発を進め、全目標を達成した。特に、窒素—空孔(NV)中心に共鳴したダイヤモンド OMC 作製に世界で初めて成功し、マイクロ波から音共振器と色中心を介した光子への、入出力の忠実度 90%以上を確認した(本実験ではマイクロ波/音/光共振器の周波数整合をしていないので、変換効率は 10^{-8} 程度と見積もられる)。光共振器の Q 値 12,000、音共振器の Q 値 550、マイクロ波共振器の Q 値 20,000(300MHz 周波数可変)を達成し、量子インターフェースに必要な主要部品を確立した。また、ダイヤモンド光/音 OMC と超伝導マイクロ波共振器の集積化、SiN 光導波路回路への 3次元チップレット実装、16 芯アレイ光ファイバピグテール実装に成功し、10mK の極低温下で 50%程度の高効率光結合に成功した。加えて、通常を負電荷 NV 中心より 3 桁マイクロ波結合が強い中性 NV 中心を用いた高効率量子操作を実証し、錫—空孔(SnV)中心の導入によりスペクトル拡散の課題を解決し、2光子干渉実験により 90%以上の高忠実度で量子もつれ生成が可能であることを示した。さらに、NV 量子メモリの高速高忠実量子操作、NV 周囲の核スピンを用いた量子誤り訂正、光子から量子メモリへの量子状態転写、SFQ 集積量子制御回路にも成功した。なお、物質・材料研究機構(NIMS)、産業技術総合研究所(AIST)、量子科学技術研究開発機構(QST)との連携により、量子純度ダイヤモンド製造、ダイヤモンド OMC 準量産体制、レーザー冷却イオン注入設備などのナノテク基盤も整備した。

(2) 研究開発プロジェクトの実施概要

課題 1-1「ダイヤモンド量子メモリの研究開発」では、大容量・誤り耐性量子インターフェースの基盤となるダイヤモンド量子メモリ技術を開発した。ゼロ磁場下で電子スピンの誤り耐性万能量子ゲートを 0.4GHz、忠実度 99.97%で実現し、発光光子と電子スピンの量子もつれ生成を忠実度 98%で達成、さらにゼロ磁場 DDRF(ラジオ波同期幾何学的デカップリング)法により深層炭素核スピンへアクセスし、完全ベル測定と量子誤り訂正を忠実度 86%で達成した。通信用光子から量子メモリへのヘラルド付き量子メディア変換を忠実度 98%で達成し(変換効率はヘラルド効率を含め 0.1%程度)、5 m 離れた NV 間の発光吸収接続を実証し、遠隔量子もつれ生成に推定忠実度 81%の見通しを得た。

課題 1-2「ダイヤモンド量子構造の研究開発」では、ダイヤモンドの微細加工・実装技術を開発した。リンドープによる NV 中心電荷安定化やシリコン—空孔(SiV)中心導入を進め、100 nm オーダの微細パターンニングを実現した。AlN/ダイヤモンドヘテロ構造で表面弾性波共振器を開発し、ピエゾ効果による NV スピン制御を可能とした。さらに、SiN マスクによるドライエッチング、FIB(フォーカスイオンビーム)によるエアブリッジ作製、スマートカット法による NV 含有薄膜の自立化・異種基板転写を実現し、量子デバイス集積の基盤技術を確立した。

課題 1-3「ダイヤモンド量子結晶の研究開発」では、高純度ダイヤモンド厚膜 CVD(化学気相成長法)成長と不純物ドーピング制御を進めた。超高真空 CVD 装置における窒素ドーピングの最適化ならび

にアクセプタ不純物の 1 ppb 以下への制御により、表面より 10 μm 以内に安定に発光する NV-中心を形成し、PLE(光励起発光)線幅 100 MHz 以下、光学励起状態歪み 20 GHz 以下、さらに SiV-中心の表面近傍形成を達成した。

課題 1-4「ダイヤモンド色中心の研究開発」では、色中心の生成、位置制御、電荷安定化技術を開発した。イオン注入および電子線照射により、NV⁻、SiV⁻などの形成条件を体系的に検討し、高結晶性を保った NV 中心形成が可能であることを示した。IV 族色中心では、深部注入と高温熱処理を最適化し ZPL(ゼロフォノン遷移)強度を増大させた。その結果、光周波数をゼロフォノン遷移に合わせれば、光と NV 中心が効率的に結合することを検証できた。さらに、同位体制御有機分子イオンビームにより NV 近傍へ ^{13}C を配置する技術確立し、レーザー冷却単一イオン注入装置による単一イオンの捕獲・配列・射出技術も開発した。

課題 2-1「フォトニック結晶光共振器の研究開発」では、ダイヤモンド色中心と光子の相互作用を高めるフォトニック結晶共振器の設計・作製と、光集積回路への実装技術を開発した。AlN-ダイヤモンドハイブリッド型結晶ナノビーム共振器により、理論パーセル増強因子 3,900 超を達成する構造を設計した。また、電子線描画、垂直・横方向エッチングによりダイヤモンドエアブリッジ作製技術確立した。Q 値 10,000 超のフォトニック結晶ナノ共振器や、フォノン構造と統合したオプトメカニカル共振器を作製し、共振器モード発光を観測した。さらに、PDMS(ポリジメチルシロキサン)転写プリンティングにより、ダイヤモンドナノ構造を SiN 光回路上へ高歩留まりで集積した。

課題 2-2「フォトニック結晶光共振器実装技術開発」では、高 Q 値 OMC をアレイ光ファイバ結合し、極低温下で動作する SiN 光量子インターフェースプラットフォームを構築した。進化計算により Q 値 9850、モード体積 $0.48(\lambda/n)^3$ 、パーセル係数 1560 の共振器を設計した。また、ファイバからダイヤモンド導波路への伝搬損 0.77 dB、導波路から共振器への結合損 1.7 dB の SiN 構造を設計・製作し、光伝搬・結合を実現した。さらに、極低温下でのファイバ固定、超伝導電極、LN 小片形成に成功した。

課題 2-3「フォノン結晶音共振器の研究開発」では、フォノンと量子メモリの結合を増強するダイヤモンドフォノン結晶ナノ共振器を設計した。フォノンを微小体積に強く局在させ、増強された歪みにより量子メモリとの相互作用を高め、弾性パーセル効果を利用した高効率量子メディア変換を可能にする構造を検討した。加工精度を考慮した設計を課題 2-1 と連携して進め、シリコン系については課題 1-1 および 3-1 と協力した。また、量子変換効率を評価する計算ツールを開発した。

課題 3-1「piezoマイクロ波共振器の研究開発」では、希釈冷凍機の極低温下で動作する超伝導マイクロ波共振器—ダイヤモンド音/光共振器—SiN 光導波路回路—光ファイバ接続システムを開発した。光共振器による NV 発光増強を観測し、「色中心—光共振器—光導波路」の接続と低温動作を実証した。さらに、音共振器による「色中心—音共振器」相互作用の観測、超伝導マイクロ波共振器による広帯域周波数可変(300MHz@1.5mT)にも成功した。加えて、超伝導量子ビットとの接続に向けた計測システムも構築した。

課題 3-2「量子制御電子集積回路の研究開発」では、超伝導回路および低温 CMOS 技術により極低温で超伝導量子回路を制御する電子集積回路を開発した。4 ビット DAC(D/A 変換回路)を設計・試作し 4.2 K 動作を確認した。超伝導論理ゲート・セルライブラリを開発し SFQ(単一磁束量子)論理ゲートの安定動作を実証、SFQ パルス密度変調型および 2 パルス合成型のマイクロ波発生器を開発し量子回路制御用 5 GHz 帯マイクロ波信号生成を実現した。これにより、多数の超伝導量子回路を極低温下で高効率に制御する基盤技術を実証した。

課題 3-3「量子インターフェースの理論研究」では、量子トランスデューサの理論解析を行い、マイクロ

波一光子変換の性能評価および設計指針を整理した。論文投稿に向けた準備を進めている。

(3) プロジェクトマネジメントの実施概要

代表機関である横浜国立大学先端科学高等研究院 (IAS) に、代表機関内外の課題推進者の進捗管理、機関間連携、労務管理等を支援する体制を整備した。また、学外の課題推進者全員を IAS 客員教員として招聘し、効果的なプロジェクトマネジメント体制を構築した。さらに、ドイツの研究者 4 名を IAS 招聘教授・アドバイザーボードとし、PM 補佐に加えて、INPIT から知財戦略プロデューサーを招聘した。広報・アウトリーチを担う産学官連携コーディネーターや非常勤教員も配置し、多様な人材による支援体制を整えた。月 1 回程度開催した課題推進者会議は、課題間連携とプロジェクト全体の進捗把握に重要な役割を果たした。

3. 研究開発プロジェクトの顕著な成果

(1) 目標達成に最も寄与する成果

課題 1-1: 誤り耐性のある量子インターフェースに向けて、通信用光子から量子メモリへのヘラルド付き量子メディア変換を行う独自の手法を開発した。本手法により 98% の高い変換忠実度を達成したことに加え、入力光子や物質側に周波数誤りが生じた場合でも忠実度が劣化しない仕組みを実証した。これは、実装上避けられない NV 中心のスペクトル拡散による共鳴波長のばらつきという課題を克服するものであり、従来の量子メディア変換手法を刷新する重要な成果である。入力光子に対する量子メディア変換の成功確率は、現時点でヘラルド効率を含め 0.1% 程度である。

課題 1-2: 研究開発項目 3 と連携で開発を進めているピエゾマイクロ波共振器において、AlN/ダイヤモンド基板上にアルミニウム IDT (楕円型) 電極の共振器構造を形成するプロセス工程を構築し、収束型表面弾性波共振器を開発することで、室温にて 5GHz 付近の共振に成功した。研究開発項目 2 と連携で開発を進めているフォトニック結晶、フォノン結晶などの量子構造の作製において、ナノビーム構造の作製スループット向上に向け、高加速電圧の電子ビーム露光装置によるパターン形成および SiN マスクを用いたドライエッチング等の微細加工プロセス技術を構築し、ダイヤモンドへのナノビーム構造の形状転写に成功した。

課題 1-3: 本プロジェクト専用のダイヤモンド CVD 成長装置を独自設計し、運用した。その結果、高純度ダイヤモンドの成長に成功した。

課題 1-4: ダイヤモンド中の任意位置に色中心を形成することを目的とした、レーザー冷却単一イオン注入装置の開発では、詳細な分子動力学シミュレーションに基づき、100keV の単一イオンをコリメーションなしで数 nm のスポットに集束できる装置を設計できた。また、実際に量子科学技術研究開発機構 (QST) 高崎研に構築した単一イオン注入装置を用い、ドップラー冷却により形成したクーロン結晶から極低温イオンをひとつずつ引き出すことに成功した。

課題 2-1: (i) ダイヤモンドのナノ構造形成プロセス技術を確立し、国内で初めてダイヤモンドフォトニック結晶ナノ共振器を実現することに成功した。これは本プロジェクトの目標達成に資する不可欠な技術、成果である。(ii) 転写プリント法を用いてダイヤモンドフォトニック結晶ナノ共振器構造を光回路上に集積する技術を開発し、本プロジェクトが目指す集積素子のプロトタイプ実現に貢献した。

課題 2-2: 極低温でも利用できる SiN 導波路プラットフォームを構築、ダイヤモンド搭載により、量子インターフェースの基本的な機能、すなわち極低温下でアレイ光ファイバからダイヤモンド共振器への低損失結合を実現した。

課題 2-3: 加工限界と精度を考慮したダイヤモンドオプトメカニカル共振器系を設計し、その設計に基

づいて実際に作製されたダイヤモンドオプトメカニカル共振器の構造を SEM(走査電子顕微鏡) 観察し、得られた構造パラメータでシミュレーションを行ったところ、光および音子共振器 Q 値 6,000 と 30,000、光と音子のパーセル係数 40 と 10^6 を得て、達成目標を大幅に超えて本プロジェクトに重要な共振器系の構造設計を完了した。

課題 3-1: ダイヤモンド色中心、ダイヤモンド光共振器、SiN 光導波路チップを集積し、10 K 程度の低温でそれらの複合動作の観測に成功した。これはダイヤモンド量子インターフェースの 5 つの構成要素、すなわちマイクロ波共振器、機械振動共振器、ダイヤモンド色中心、ダイヤモンド光共振器、SiN 光導波路チップのうち、3 つを接続し、その動作に成功したことを示す。加えて、別のデバイスではあるが、機械振動共振器とダイヤモンド色中心の接続にも成功している。これは 5 つの構成要素のうち、機械振動共振器とダイヤモンド色中心の 2 つを接続できたことに対応する。このように部分的な構成要素の接続には成功しており、最終的な全構成要素の統合、デバイス作製までも完了している。

課題 3-2: 超伝導デバイスを用いて、極低温環境で量子回路を制御するための電子集積回路を開発した。SFQ 2 パルス合成型のマイクロ波発生器を開発し、量子回路制御用の 5 GHz 帯マイクロ波信号生成を実現した。特に、出力電力を制御電流により可変できることや、狭帯域のマイクロ波出力が得られることを確認した。これにより、多数の超伝導量子回路を極低温下で高効率に制御するための基盤技術を実証した。

課題 3-3: 本プロジェクトで開発をすすめている、マイクロ波共振器・フォノン共振器・ダイヤモンド NV 中心(NV⁰)・光共振器の結合系を用いた量子トランスデューサ(マイクロ波光子→通信波長帯光子への変換器)の理論解析を行い、内部ロスを考慮した現実系および内部ロスを完全に排除した理想系の双方について、本デバイスの性能指標を評価した。

(2) 代表的な論文

- Byunggi Kim, Hodaka Kurokawa, Katsuta Sakai, Kazuki Koshino, Hideo Kosaka, and Masahiro Nomura, “Diamond optomechanical cavity with a color center for coherent microwave-to-optical quantum interfaces”, *Physical Review Applied*, 20, 044037 (2023).

ダイヤモンドの色中心を組み込んだ 1 次元フォトニック結晶オプトメカニカルキャビティを用いた、マイクロ波-光子間量子変換スキームを提案したものである。AlN 圧電薄膜による機械的結合と、超微小モード体積を有する機械共振器による強い機械-色中心結合 (16.4 MHz) を活用し、理論的に 15% の変換効率と 10% 以上のコヒーレント変換効率を達成できることを示した。

- Hodaka Kurokawa, Keidai Wakamatsu, Shintaro Nakazato, Toshiharu Makino, Hiromitsu Kato, Yuhei Sekiguchi, and Hideo Kosaka, “Coherent electric field control of orbital state of a neutral nitrogen vacancy center”, *Nature Communications*, 15, 4039 (2024).

新規色中心である中性電荷 NV 中心(NV⁰)の探索と、その軌道基底状態の操作について報告した論文である。微細電極を用いて 12.8GHz に共鳴するマイクロ波電場を印加することで、電子基底状態の軌道を共鳴操作することに成功し、従来の磁場駆動による電子スピン操作と比較して約 3 桁高速なラビ振動を実証した。また、50% を大きく超える高い操作忠実度を確認し、中性電荷 NV 中心が超伝導量子ビットとの接続等に向けた高感度な量子インターフェースの候補として極めて有用であることを示した。

- Hodaka Kurokawa, Shintaro Nakazato, Toshiharu Makino, Hiromitsu Kato, Shinobu Onoda, Yuhei Sekiguchi, and Hideo Kosaka, “Quantum Orbital-State Control of a Neutral Nitrogen-Vacancy

Center at Millikelvin Temperatures, Physical Review Letters, 135, 016902 (2025).

ダイヤモンド中の中性窒素—空孔(NV)中心は、基底状態のゼロ磁場でのスピン—軌道分裂が 10 GHz 程度であり、超高効率なマイクロ波—光量子インターフェースへの応用が期待される色中心である。本研究では、希釈冷凍機を利用し 20 mK 程度の極低温で NV^0 の光学応答を測定することにより、その温度領域で量子インターフェース応用に十分な寿命、コヒーレンスを NV^0 が持ちうる可能性を示した。

(3) 代表的な特許

- 特願 2025-038645, 特願 2025-118108(優先権主張出願), PCT/JP2026/8727
量子ルータ、量子情報中継方法、量子ネットワークシステムおよび量子コンピュータ
(小坂英男、黒川穂高、関口雄平)
- 特願 2023-143180
IV族—空孔センターの生成方法、及び、IV族—空孔センターを有するダイヤモンド結晶の製造方法
(小野田忍、馬場智也、木村晃介、飯澤正登実、加田渉、宮川仁)
- 特願 2024-107406
イオンビーム照射装置
(百合庸介、細谷青児、穂坂綱一、石井保行、宮脇信正、飯澤正登実、柏木啓次、齋藤勇一、山縣諒平、鳴海一雅、小野田忍、岡本宏己、伊藤清一、室尾健人)

4. 研究開発プロジェクトの実施内容および成果

(1) 研究開発項目1: ダイヤモンド量子メモリ

研究開発課題1: ダイヤモンド量子メモリの研究開発

① 量子もつれ光源の開発の実施(令和2年12月～令和5年11月)

【実施内容】ダイヤモンド NV 中心を用い、発光した光子と残された電子スピンの間の高忠実度での量子もつれ生成について、共鳴励起、非共鳴励起、準共鳴励起(光波マイクロ波二重励起)の3種類の手法を順次実施し、量子もつれ状態の生成と高効率化に向けた技術開発を行った。

【成果】NV 中心の A_2 励起状態からのゼロフォノン線発光を用い、準共鳴励起手法により発光した光子の偏光と NV 中心に残した電子スピンの間に量子的なもつれ状態を 98%の忠実度で生成した(図 1-1-1a)。また、多段励起手法の導入により、60%の高効率な量子もつれ生成を実現した。

② 量子メモリの誤り耐性万能量子ゲート操作の実施(令和2年12月～令和5年11月)

【実施内容】ダイヤモンド NV 中心の電子スピンに対する誤り耐性万能量子ゲート操作について、マイクロ波直交アンテナを用いたホロノミック(幾何学的)な量子操作の実施、ダイヤモンド素子上のアンテナ構造の工夫による高速化、および量子ゲート操作の忠実度劣化の原因となるダイヤモンド基板中の同位体炭素濃度の制御を行った。

【成果】完全ゼロ磁場下において、NV 中心のホロノミックな万能量子ゲート操作を 99.97%の忠実度で実現した(図 1-1-1d)。アンテナ構造の改良により複雑な加工プロセスを回避しつつ、第 2.5 世代デバイスにおいて電子スピンのラビ周波数を最大 400 MHz に向上させ、高速な量子ゲート操作を達成した。

③ 量子メモリ内での完全ベル測定の実施(令和2年12月～令和5年11月)

【実施内容】二つの強結合炭素同位体核スピンをもつ NV 中心を用いた完全ベル測定について、超微細分裂を介した幾何学的 CZ ゲートを含むユニバーサルな量子ゲートセットの開発および波形最適化(GRAPE アルゴリズム)による操作忠実度の向上を行った。また、表層炭素と深層炭素間の量子もつれ生成に向け、完全ゼロ磁場下でのラジオ波同期幾何学的デカップリング(ゼロ磁場 DDRF)手法の開発を行った。

【成果】完全ゼロ磁場下において、炭素同位体核スピン間の完全ベル測定に単体忠実度約 90%で成功した(図 1-1-1e)。さらにゼロ磁場 DDRF を用いることで、NV 中心より遠方にある深層炭素へのアクセスを可能とし、表層炭素と深層炭素間の量子もつれを平均忠実度 90%以上で生成することに成功した。

④ 通信用光子から量子メモリへのヘラルド付き量子メディア変換の実施(令和5年12月～令和7年11月)

【実施内容】通信用光子から量子メモリへのヘラルド付き量子メディア変換について、NV 中心の A_2 準位を利用したベル測定による成功事象の抽出(ヘラルド)機能の実装、および開発したダイヤモンドデバイスの利用によるスピン操作忠実度と吸収効率の向上を行った。合わせて、入力光子の周波数誤りおよび時間誤りに対する耐性の評価を行った。

【成果】量子プロセストモグラフィーにおいて量子メディア変換の忠実度 98%を達成した。入力光子に周波数誤りがある場合でも効率低下と引き換えに忠実度が維持されること(図 1-1-1b)、また時間誤りに対しても電子スピンのコヒーレンス時間(約 $1\mu\text{s}$)の間で忠実度が維持されることを実証した。

⑤ 量子メモリの多ビット化による量子誤り訂正の実施(令和5年12月～令和7年11月)

【実施内容】ダイヤモンド NV 中心に付随する窒素核スピンと近傍の二つの炭素同位体核スピンを論理量子ビットとして用いた量子誤り訂正について、マイクロ波周波数による各準位の選択制御を通じて 2 量子ビットゲートを実装し、完全ゼロ磁場下における量子誤り訂正符号の実装および評価を行った。

【成果】意図的に入力した誤りに対して誤り訂正が機能することを実証し(図 1-1-1f)、状態準備と測定(SPAM)誤りを差し引いた量子誤り訂正プロセスの忠実度として 86%を達成した。

⑥ 通信用光子を介した量子メモリ間の量子もつれ生成の実施(令和5年12月～令和7年11月)

【実施内容】通信用光子を介した離れた量子メモリ間での量子もつれ生成について、直線距離で 5m 離れた二つの量子ノードを光ファイバで接続し、シュタルクシフトによる共鳴波長制御を利用した発光吸収スキームの実証を行った(最大レートは 7mHz)(図 1-1-1c)。また、量子もつれ生成速度の高速化を目的とし、マッハツェンダー干渉計の経路長安定化システムや波長チェック法を導入した 1 光子干渉方式の要素技術開発と実証実験を行った。

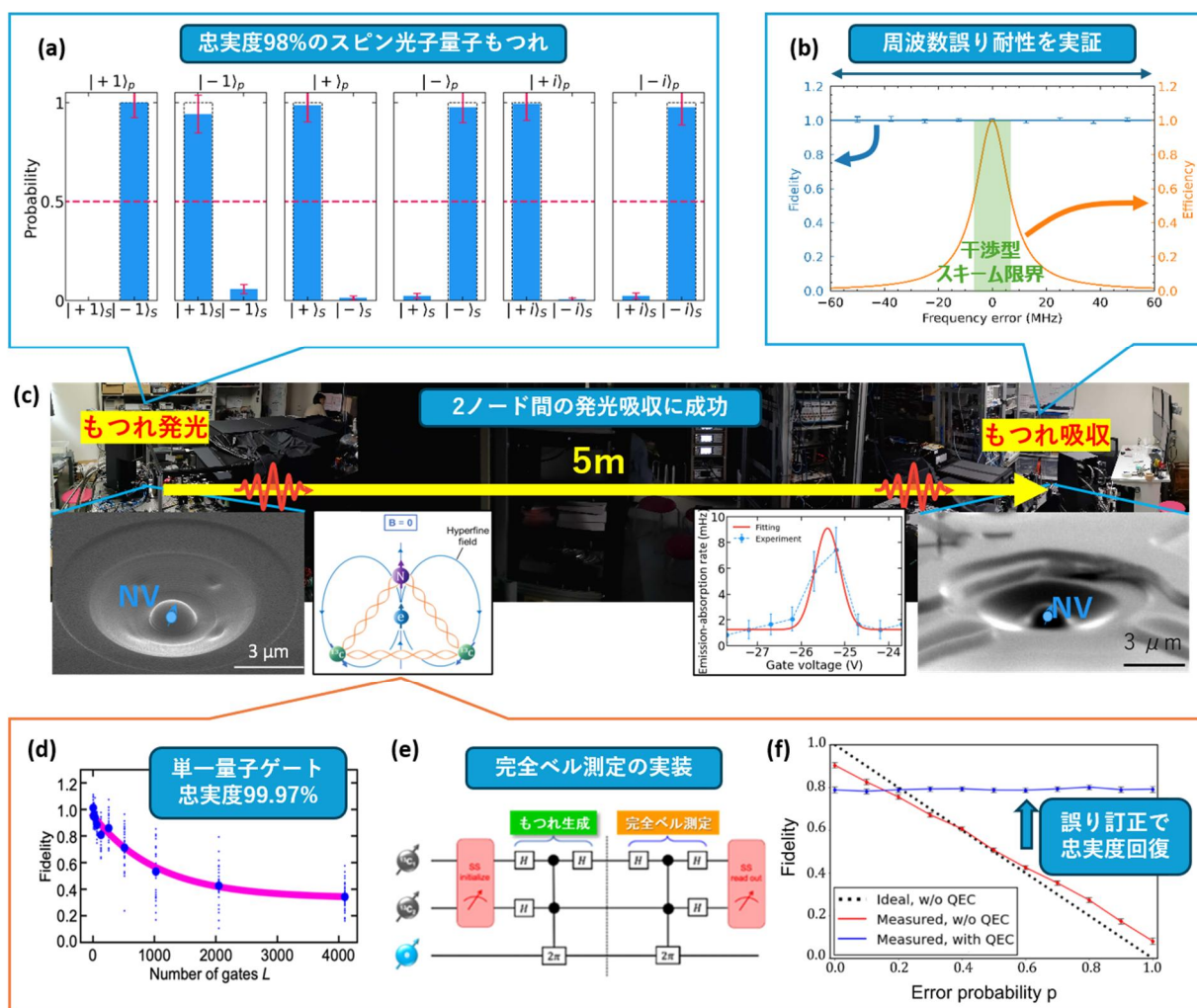


図 1-1-1. (a) 量子もつれ発光による電子スピンと光子の量子もつれ生成。(b) もつれ吸収型量子メディア変換の周波数誤り耐性。(c) 2 ノード間 NV 中心の発光吸収実験。(d) 電子スピンのランダム化ベンチマーキング。(e) 2 個の炭素量子メモリの完全ベル測定。(f) 3 個の量子メモリによる誤り訂正の検証。

【成果】離れた完全ゼロ磁場環境下の NV 中心間における発光吸収プロセスを実証し、遠隔量子

もつれ忠実度 81%に相当する信号雑音比 5.5 を得て、量子もつれ生成(発生レート:7mHz)に向けた技術を確立した。また、1 光子干渉方式において 2 ノードの NV 中心発光による HOM 干渉を観測し、電子スピンを用いた量子もつれ生成のデモンストレーションにおいて Z 軸のスピン相関 42%を得た。

⑦ マイクロ波による量子メモリの量子操作の実施(令和5年12月～令和7年11月)

【実施内容】ダイヤモンド基板上に作製した微細電極構造による中性電荷 NV 中心へのマイクロ波電場印加について、軌道基底状態の操作技術の実証およびその特性評価を行った。また、静電方式によるダイヤモンドフォトリソニック結晶の機械共振を実装した。

【成果】12.8GHz に共鳴する軌道基底準位の操作を実証した。ラビ振動周波数は磁場駆動の電子スピンに比べ約 3 桁高速であり(図 1-1-2a)、50%を大きく超える操作忠実度と、10mK 環境下での寿命 $4.7 \mu s$ を確認し、量子インターフェースの候補としての有用性を示した。さらに、機械モードと SnV 中心を介したマイクロ波と光の干渉の測定に成功した(図 1-1-2b)。

⑧ レーザー照射によるダイヤモンド中の色中心の生成(令和4年4月～令和7年11月)

【実施内容】ダイヤモンドナノ構造中への決定論的な量子メモリ形成に向け、電子線照射や窒素イオン注入と超短パルスレーザーによる局所アニールを組み合わせた NV 中心の生成技術の開発を行った。TypeIb ダイヤモンド基板および超高純度ダイヤモンド基板を用い、生成位置精度と光学特性の検証を行った。

【成果】TypeIb 基板上において、 $1 \mu m$ 間隔での NV 中心の決定論的生成(図 1-1-2c)、およびフォトリソニック結晶共振器中心への NV 中心の形成に成功した。また、超高純度基板においては、生成位置精度約 $1 \mu m$ 、PLE 線幅最小 87MHz の良好な光学特性を示す NV 中心の局所生成に成功した。

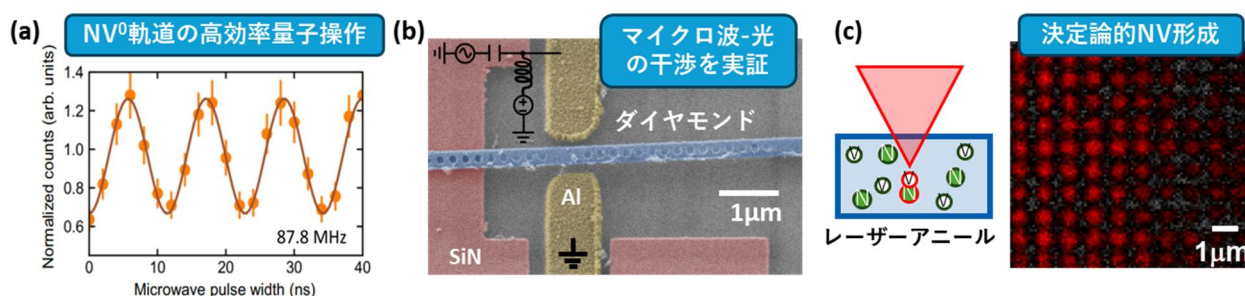


図 1-1-2. (a)中性電荷 NV 中心のマイクロ波電場による電子軌道のラビ振動。(b)ダイヤモンドフォトリソニック結晶の機械共振構造の SEM 像。(c)レーザーアニールによる $1 \mu m$ 間隔の NV アレイ形成。

課題推進者: 小坂英男(横浜国立大学)

研究開発課題2: ダイヤモンド量子構造の研究開発

① ダイヤモンド電荷状態の安定化の実施(令和2年12月～令和5年11月)

【実施内容】ダイヤモンド中の NV 中心および SiV 中心等の色中心について、電荷状態が安定化するようドーピング条件等の最適化を行った。特に NV 中心の形成に関しては、発光励起スペクトル(PLE)の線幅 100 MHz 以下の性能を維持することを目標とし、研究開発項目 1 に参画する 4 機関と連携して研究開発を推進した。

【成果】リンドーピングによる n 型フェルミ準位制御および、NV 含有層をリンドーピング n 型ダイヤモンド層で挟み込む n/i(NV ダイヤモンド層)/n 接合を用いたバンドエンジニアリング制御により、NV

中心の電荷状態を NV⁻に安定化できることを示した。さらに、マイクロ波プラズマ成膜時にダイヤモンド基板近傍へ高純度 Si 基板(小片)を配置することで、ダイヤモンド薄膜中への SiV 中心導入に成功し、中心波長 738 nm の SiV 発光を観測した。加えて、PLE 線幅については、1000 °C の高温ポストアニーリング処理により、約 700 MHz まで低減可能であることを明らかにした。

② ダイヤモンドナノ構造の作製の実施(令和2年12月～令和5年11月)

【実施内容】ダイヤモンド上にフォトニック結晶およびフォノン結晶等の量子構造を作製するための基盤技術確立を目的として、ダイヤモンド表面に対するサブミクロンサイズの穴加工を含むナノ構造の試作に取り組んだ。本課題では構造作製を主に担当し、研究開発項目2と密に連携しながら、作製した構造の評価結果を設計およびシミュレーションへフィードバックすることで、量子構造作製に向けた研究開発を推進した。

【成果】ダイヤモンド基板上へのナノ構造作製に向け、プロセス工程の構築およびパターン形成条件の最適化を進めた。あわせて、さらなる微細化を目的として高加速電圧型の新規電子ビーム露光装置を導入し、露光条件の検討を行った。その結果、加速電圧 150 kV の条件下において、3 mm 角ダイヤモンド基板上でも 100 nm オーダの微細パターンニングが可能であることを確認した。

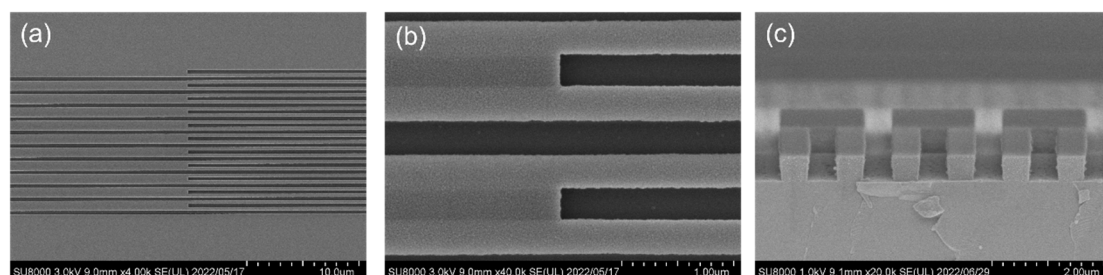


図1-2-1. 電子線描画装置を用いて形成したL/SパターンのSEM像。(a)全体像、(b)L/S部分拡大像、(c)L/S部分断面像。

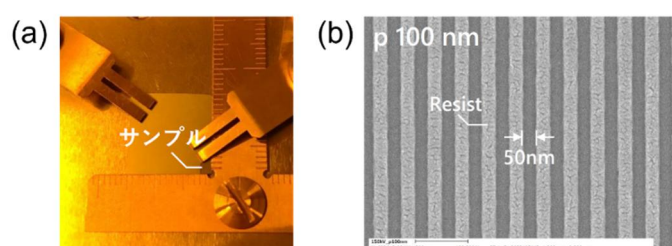


図1-2-2. (a)サンプル設置した下面基準ホルダ写真。(b)加速電圧150kV、ビーム電流100pA、ドーズ量 $420 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ の条件下で描画した3mm $\square$ ダイヤモンド基板上レジストの微細パターンSEM像。

③ ダイヤモンドピエゾ構造の作製の実施(令和2年12月～令和5年11月)

【実施内容】ダイヤモンド上にピエゾ効果を有する材料を薄膜形成し、音子(弾性波)を生成するための IDT(楕型)電極構造の作製を実施した。本課題では、主として構造作製を担当し、研究開発項目1の研究開発課題1および研究開発項目3の研究開発課題1と密に連携しながら、評価・設計・シミュレーション結果を構造設計およびプロセス条件へフィードバックすることで研究開発を推進した。さらに、令和4年度の追加配分を受け、研究開発を前倒しで実施し、デバイス構造および作製プロセスの高度化を図った。

【成果】ピエゾ効果を有する窒化アルミニウム(AlN)薄膜について成膜条件の最適化を進めた結

果、結晶性の高い c 軸配向 AlN 結晶をダイヤモンド(111) 面上にヘテロエピタキシャル成長させることに成功した。さらに、「2) ダイヤモンドナノ構造の作製の実施」で確立したプロセス条件を基に、音子(弾性波)を生成するための櫛型電極(Interdigital Transducer: IDT 電極)構造の作製および構造改良を行った。その結果、効率的な NV スピン制御が可能な収束型表面弾性波共振器を開発し、ピエゾ効果を利用した NV 中心のスピン操作を実証した。

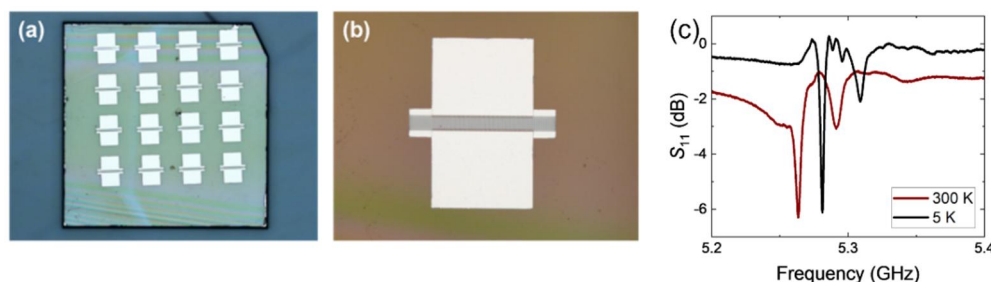


図 1-2-3. ダイヤモンド IDT 電極構造の光学顕微鏡像。(a)全体像、(b)1 ポートの形状 および(c)ネットワークアナライザで計測した反射特性(S_{11})スペクトル。

④ フォトニック結晶、フォノン結晶の作製の実施（令和5年 12 月～令和7年11月）

【実施内容】 ダイヤモンド基板上にフォトニック結晶およびフォノン結晶などの量子構造を作製するための研究開発を実施した。SOI(Si on Insulator)技術が進展しているシリコンとは異なり、ダイヤモンドではエアブリッジ構造の作製が困難であることから、特殊なイオンビームエッチング技術やダイヤモンドスマートカット技術の適用も視野に入れ、プロセス開発を進めた。本課題では主としてダイヤモンドナノ加工を担当し、研究開発項目 1 の研究開発課題 1 および研究開発項目 2 と密に連携しながら、評価・設計・シミュレーション結果を加工プロセスへフィードバックすることで研究開発を推進した。さらに、令和4年度の追加配分を受け、研究開発を前倒しで実施し、量子構造作製技術の高度化を図った。

【成果】 フォトニック結晶およびフォノン結晶に代表される量子構造作製において、ナノビーム構造の作製スループット向上を目的としたプロセス技術の高度化を達成した。高加速電圧(150 kV)の電子ビーム露光装置を活用し、mm サイズのダイヤモンド基板上においても 100~200 nm スケールの微細レジストパターンを高い再現性で形成可能な露光条件を確立した。さらに、従来用いていた SiO_2 マスクに代えて SiN マスクを導入し、プラズマ CVD 法による高稠密 SiN 薄膜形成およびドライエッチング条件の最適化を行った。その結果、ダイヤモンド/SiN 間で高い選択比を維持しつつ、メサ側壁の平滑性に優れたナノビーム構造の形状転写に成功した。

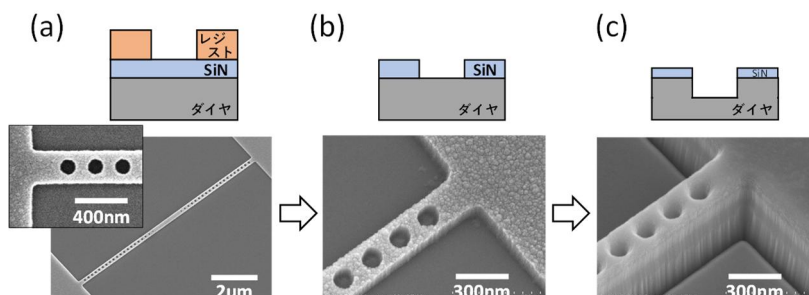


図 1-2-4. 量子構造作製に向けた微細加エプロセス。(a)電子ビーム露光によるレジストへのナノ構造

の形成、(b)レジストパターンの SiN マスクへの転写、(c)ドライエッチングによるダイヤモンドへのナノ構造の転写。

⑤ ダイヤモンドハイブリッド実装技術の検討の実施（令和 5 年 12 月～令和7年11月）

【実施内容】 量子ネットワーク化に向けた光インターフェース開発を目的として、ダイヤモンドハイブリッド実装技術に関する検討を実施した。高純度成長が可能なバルクダイヤモンドからダイヤモンド薄膜を形成するスマートカット技術や、ダイヤモンド薄膜を異種材料基板へ転写するダイヤモンド転写プリンティング技術等を対象として、適用可能性および技術課題の整理を行った。本課題では、研究開発項目 1 の研究開発課題 1 および研究開発項目 2 と密に連携しながら、量子デバイス集積を見据えたハイブリッド実装技術の検討を推進した。

【成果】 フォーカスイオンビーム(FIB)法を用いたエアブリッジ作製において、垂直加工を可能とする特注治具を開発することで、断面形状が矩形のダイヤモンドエアブリッジ構造の作製に成功した。また、FIB 装置内においてタングステンプローブを用い、作製したエアブリッジ構造をピックアップし、他の基材へ移設可能であることを実証した。さらに、スマートカット技術を用いることで、NV 中心含有ダイヤモンド薄膜を自立化させ、Si 基板上へ転写可能であることを示した。

さらなる薄片化を目的として複合微細加工プロセスを実施した。ダイヤモンドは最高硬度を有する物質であるが、基板全面を 1 μm レベルで薄片化することは極めて困難である。そこで、スマートカット法による薄片化領域を、ナノビーム構造が十分に収まる 50 μm 角、100 μm 角、200 μm 角の局所領域に限定する手法を採用した。ダイヤモンド基板上にメタルマスクを形成し、室温で炭素イオン注入(185 keV、 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$)を行った後、CVD 法により NV 含有ダイヤモンド層を約 1 μm 成長させた。続いて、MESA 構造を ICP エッチングで形成し、側壁に露出したグラファイト層を熱混酸処理により除去することで、1 μm 未満の薄膜化領域の形成に成功した。

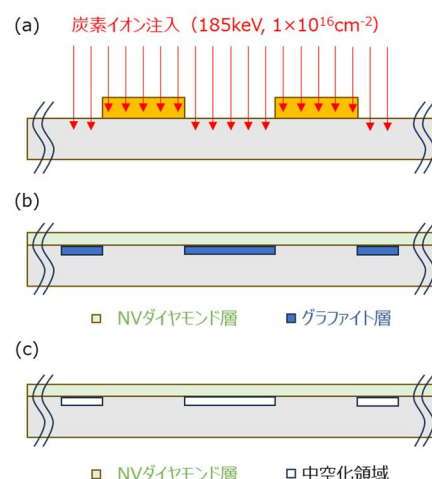


図 1-2-5. スマートカット法を用いた NV 含有ダイヤモンド薄膜の薄片化コンセプト図。(a) パターニングした Ti マスクを用いた領域限定の炭素イオン注入、(b) NV 含有ダイヤモンド層の形成と炭素イオン注入領域のグラファイト化、(c) グラファイト層のウェットエッチングによる薄片化。

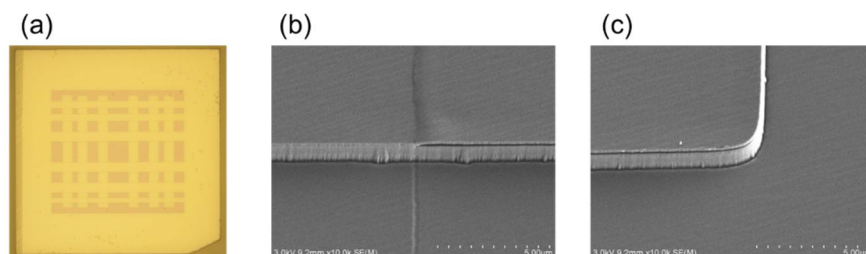


図 1-2-6. スマートカット法を用いた NV 含有ダイヤモンド薄膜の薄片化。(a) 光学顕微鏡像、ピンク色の箇所が薄片化した NV 層、(b) 薄片化した NV 層の SEM 像(中央付近)、(c) 薄片化した NV 層の SEM 像(端部)。

課題推進者：加藤 宙光(産業技術総合研究所)

研究開発課題3: ダイヤモンド量子結晶の研究開発

① ダイヤモンド高純度結晶の作製の実施(令和2年12月～令和5年11月)

- ・【実施内容】高純度ダイヤモンド薄膜による量子メモリ実現について、適切な濃度の不純物を有する高純度ダイヤモンドを CVD 成長し、量子メモリとして良好に機能する色中心形成のためのアプローチを検討した。
【成果】超高純度ダイヤモンド薄膜の CVD 成長に成功し、不純物ドーピング制御により NV⁻中心や SiV⁻中心が検出限界以下の「ホワイトキャンバス」ダイヤモンド薄膜を実現、厚膜でも下地基板の影響が少なく、単一光子源研究に有用な薄膜作製法を確立した。
- ・【実施内容】高純度ダイヤモンド薄膜における NV⁻中心の安定形成について、適切な不純物濃度ダイヤモンド薄膜の成長および評価を行った。
【成果】ごく微量の窒素添加により成長直後からブリンキングを示さない安定な NV⁻中心を作製できることを示した。
- ・【実施内容】単一欠陥の電荷安定性向上について、CVD 成長条件の最適化と不純物制御を行った。
【成果】低マイクロ波出力・低温・低圧条件により、アクセプタ混入を抑えた CVD ダイヤモンド薄膜を実現し、1 μ W 以下の励起で不安定性が抑制された NV⁻中心を表面 10 μ m 以内に作製することに成功した。
- ・【実施内容】NV⁻中心の光学特性向上について、PLE 線幅と励起状態歪み低減のため成長条件・原料ガス純度の最適化および SiV⁻中心生成プロセス評価を行った。
【成果】NV⁻中心の PLE 線幅 100MHz 以下および励起状態歪み 20GHz 以下を低温(5K 以下)で達成し、SiV⁻中心も表面 10 μ m 以内に高精度成長できた。

② ダイヤモンド高純度結晶の作製の実施(令和5年12月～令和7年11月)

- ・【実施内容】単一欠陥の電荷安定性向上について、NV⁻中心および SiV⁻中心を表面から 10 μ m 以内に作製し、それらの歪と内部量子効率の向上を目的とした結晶成長および不純物ドーピング制御を行った。
【成果】ガス供給シーケンスと成長温度プロファイルの最適化や成長装置の真空性向上により、結晶の高純度化・高品質化を達成、NV⁻中心のさらなる PLE 線幅低減を実現した。SiV⁻中心についても濃度制御と線幅低減を進め、高品質な Si ドープダイヤモンド結晶の作製に成功した。

課題推進者: 寺地 徳之(物質・材料研究機構)

研究開発課題4: ダイヤモンド量子構造の研究開発

① ダイヤモンド色中心の生成の実施(令和2年12月～令和7年11月)

- ・【実施内容】ダイヤモンド色中心を形成するために、ダイヤモンドに対してイオン注入もしくは電子線照射を行った。初めに、電子線及び窒素イオン注入によって NV⁻中心の形成を行った。電子線照射では孤立した原子空孔が形成できる一方、窒素イオン注入では数十 nm の範囲に数十個の原子空孔ができる。例えば、2MeV, 10^{13}cm^{-2} といった低線量率の電子線照射の場合、原子空孔密度は約 0.1ppb 以下である一方、10keV, 10^8cm^{-2} といった極低線量率の窒素イオン注入の場合、原子空孔密度は約 10ppb となる。原子空孔密度が大きいと、NV⁻中心の量子特性を損なう複空孔が形成される確率が高くなる。以上のように、電子線照射はイオン注入に比べ、ダイヤモンドの結晶

性を損なわずに NV 中心を形成できる利点がある。電子線照射による NV 中心形成実験の結果、結晶成長時に導入されている NV 中心と同程度の量子特性 (PLE 線幅等) を持つ NV 中心が形成できることが分かった。

SiV を含む IV 族-V (GeV、SnV) に関しては、イオンビームの開発から着手し、同位体を制御した注入が可能となった。注入エネルギーの検討では、熱処理によるダイヤモンド表面の劣化を抑える目的で可能な限りダイヤモンド量子結晶の深部へ注入できる条件とした。具体的には、5 価の ^{28}Si 、 ^{74}Ge 、 ^{120}Sn の 18MeV と決定した。それぞれの、飛程は、計算によって求めると $3.5 \pm 0.11 \mu\text{m}$ 、 $3.3 \pm 0.15 \mu\text{m}$ 、 $3.0 \pm 0.14 \mu\text{m}$ である。最後に熱処理の検討を実施した。1800°C の熱処理では、熱処理時間の増加に伴い ZPL 強度が増減することが分かった。SiV については総保持 5 分で ZPL 強度が最大となり、その後の追加熱処理で強度は減少に転じた。GeV と SnV は総保持 40 分以上で強度が最大化し、以降は微減またはほぼ横ばいとなった。総じて、IV 族原子の質量が大きいほど形成量最大化までの保持時間が長くなる傾向があり、拡散係数の違いと注入時に生成される原子空孔の数と分布、ダイヤモンド中の不純物との相互作用が最適時間を規定していると推定された。また、IV 族-V は、複空孔の間に IV 族原子が収まる構造をしている。複空孔は 600°C で形成が始まり、850°C で消滅することが知られている。複空孔を IV 族-V 中心の前駆体として生成することを意図した 600°C 長時間アニーリングを高温処理の前段に挿入する二段階熱処理を実施した。二段階熱処理によって ZPL 強度が約 18% 増加した。各試料は面内 5 箇所測定による標準偏差付き評価であり、エラー範囲を超える有意な増加であった。600°C における複空孔の生成が、1800°C 短時間熱処理時の IV 族原子の取り込みを促進した結果と考えられる。本結果は特許出願[特願 2023-143180: IV 族-空孔センターの生成方法、及び、IV 族-空孔センターを有するダイヤモンド結晶の製造方法、小野田他]に至り、欧州・米国移行手続きも行った。

挑戦的目標として、有機化合物イオンの注入技術を高度化し、NV 中心近傍の数～数 10 nm の範囲に量子メモリとして機能し得る ^{13}C (炭素同位体) を配置させる技術を確認した。R4 年度は、天然存在比の L-アルギニンビームを開発し、R5 年度は、同位体濃縮した L-アルギニンビーム開発を行った。マスペクトルから天然存在比の L-アルギニンと同位体濃縮 L-アルギニンでは、その質量差 (10amu) に相当するピークのシフトが見られ、ビーム形成に成功したことを示唆する結果が得られた。これを受け R6 年度は、窒素 (^{15}N) と炭素 (^{13}C) で同位体濃縮した L-アルギニン塩酸塩ビームをダイヤモンドに注入した。パルス ODMR (ラムゼー測定) を行って、イオン注入後に形成された NV 中心が ^{14}NV か ^{15}NV の何れであるかを判別する実験を行った。 ^{14}NV が検出されれば、ダイヤモンド中に予め含まれていた ^{14}N (天然存在比 99.63%) 若しくは同位体濃縮されていないビームに含まれる ^{14}N が NV 中心になったことを意味する。一方、 ^{15}NV 中心が検出されれば、注入したビームに含まれる ^{15}N が NV 中心になったと断定できる。同位体濃縮した L-アルギニン塩酸塩が ^{15}N と ^{13}C で構成されていることを鑑みれば、 ^{13}C 濃縮したイオンビーム注入が成功したことを示すことができる。

図 1-4-1(a) は、90 keV に加速した同位体濃縮 L-アルギニン塩酸塩ビームを面密度 $1 \times 10^8 \text{ ion/cm}^2$ で注入し、1000°C・2 時間の熱処理を真空中で行った後の共焦点顕微鏡 (CFM) 像である。スキャン範囲は $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ である。CFM 像の観察前には 200°C・30 分の熱混酸処理を行い、ダイヤモンド表面の酸素終端化を行っている。およそ 30 個の蛍光点は NV 中心からの蛍光であり同図 (b) に示す CW-ODMR スペクトルから、 $m_S=0 \leftrightarrow m_S=-1$ の共鳴周波数は 2.830 GHz であることが分かる。同図 (c) は、 $m_S=0 \leftrightarrow m_S=-1$ のラビ振動測定結果であり、ラビ周期は 286ns、コントラスト 30% であ

ることが分かる。同図(d)は、2.825 GHz(共鳴周波数から-50kHz)におけるラムゼー測定結果である。 T_2^* は 1.37 μs であった。同図(e)に示すように、同図(d)のデータをフーリエ変換した結果から、2つのピークが得られた。ローレンツ関数でフィッティングした結果、2つのピーク間が 3.04 MHzであることが分かった。これは、観察したNV中心が ^{15}N であることを示している。以上のように、有機分子の ^{15}N が NV 中心になったことを示せたことから、 ^{15}N と ^{13}C に同位体濃縮した有機分子を用いたイオンビーム開発が成功したといえる。

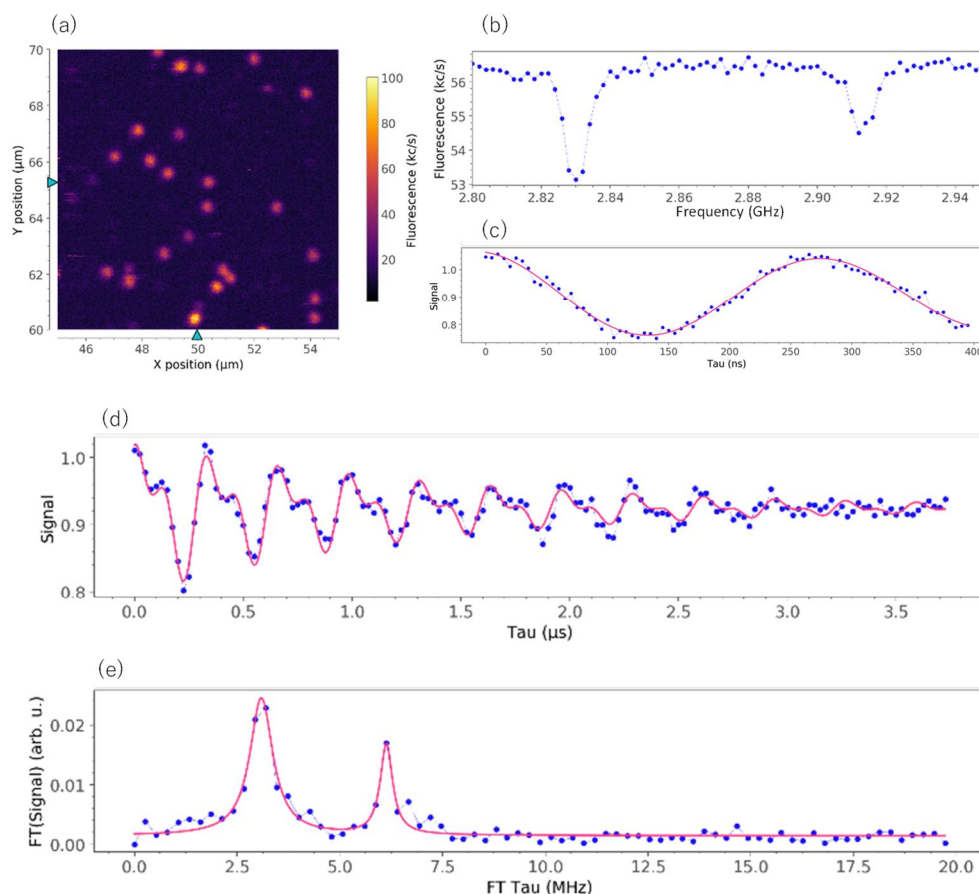


図1-4-1. 90keVに加速した同位体濃縮L-アルギニン塩酸塩ビームを注入して形成したNV中心の共焦点顕微鏡(CFM)及び光検出磁気共鳴(ODMR)測定結果。(a) 10 μm $\times$ 10 μm のスキャン範囲のCFM像。(b) CW-ODMRスペクトルであり、 $m_s=0 \leftrightarrow m_s=-1$ の共鳴周波数は2.830 GHz。(c) $m_s=0 \leftrightarrow m_s=-1$ のラビ振動測定であり、ラビ周期は286ns、コントラスト30%。(d) 2.825 GHz(共鳴周波数から-50kHz)におけるラムゼー測定。(e) ラムゼー測定結果をフーリエ変換した結果。

【成果】以上のように、ダイヤモンドに対するイオン注入および電子線照射により、NVや SiVをはじめとする各種色中心の形成技術を確立した。特に注入エネルギーと熱処理条件を最適化することで、表面近傍における単一色中心形成や狭線幅特性を実現した。さらに同位体制御有機分子ビームを用いた量子メモリ配置技術を確立するに至った。以上の様に、量子インターフェース創成に資するダイヤモンド色中心形成技術を達成した。

② ダイヤモンド色中心の生成位置の制御の実施(令和4年4月～令和7年11月)

【実施内容】ダイヤモンドの任意の位置に色中心を形成するためのレーザー冷却単一イオン注入装置の開発を実施した。これらにより、微小構造を有するダイヤモンド試料に対し、超高精度にイオン注入が可能となる。窒素イオンやシリコンイオンに加え、量子メモリとして利用できる炭素同位体イオンをレーザー冷却によって1つずつ捕獲して並べ(イオントラップ)、点光源とみなすことのでき

るイオントラップからのイオンビーム輸送・集束系を構築・最適化した。

R4 年度は放射線管理区域内に専用の実験室を確保し、100 keV 級の単一イオン注入装置の仕様を検討した。イオントラップへ任意のイオンを供給する外部イオン源として、スパッタ方式を採用することを決定し、シミュレーション研究に基づいたシステム設計を進めた。システム構成については特許を申請した[特願 2024-107406:イオンビーム照射装置、百合他]。

R5 年度は、前年度の設計に基づいて単一イオン注入装置を製作した。装置の概要を図 1-4-2(a)に示す。システムは、(i)外部イオン源部、(ii)イオントラップ部及び加速レンズ部、(iii)注入ターゲット部で構成される。

外部イオン源部(i)では、6keV 程度の Ga イオンを固体ターゲットに衝突させ、様々な質量、価数のイオンを発生させビームとして引き出す。ウィーンフィルターで速度選別し、四重極偏向器を使って軌道を 90 度曲げてイオントラップ部(ii)に導く。イオントラップ部(ii)では、光イオン化した Ca 原子をレーザー冷却シークロン結晶化させる(図 1(b))。この冷却 Ca⁺を冷媒として用い、窒素イオン等の注入イオンを共同冷却により、同時に静止・配列(混合結晶化)させる。+50 kV のイオントラップ部(ii)から引き出された注入イオンは、グラウンド電位の注入ターゲット部(iii)(図 1-4-2(c))では、1 価イオンでは 50 keV に、2 価イオンでは 100 keV に加速される。詳細なシミュレーション研究を実施し、加速レンズの収束効果により、ターゲット位置で数 nm のビーム径まで収束可能な設計となっている(図 1-4-3)[Prog. Theor. Exp. Phys. 2025 023G01]。

(2-1) 外部イオン源部(i)で発生させた注入イオンのイオントラップ部(ii)への輸送

Ga⁺ビームによる Si 結晶のスパッタで生成した種々のイオンを、+900V の静電場で加速し、磁場と電場を直交させた速度フィルター(ウィーンフィルター)で速度分析した(図 1-4-4)。ウィーンフィルターを通過したイオンを四重極偏向器で 90° 偏向させてイオントラップ部(ii)へ輸送した。イオントラップ部(ii)

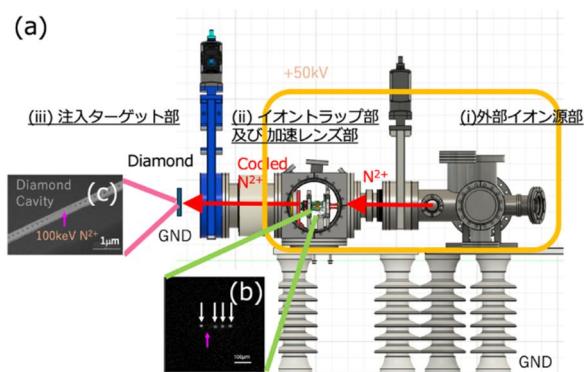


図1-4-2. (a) 単一イオン注入装置の概要。(b)冷却イオン結晶からの蛍光像の一例。白↓の白い輝点の1つ1つが静止したCaイオン。ピンク↑の位置に注入イオンが静止している。(c)注入ターゲットの一例。

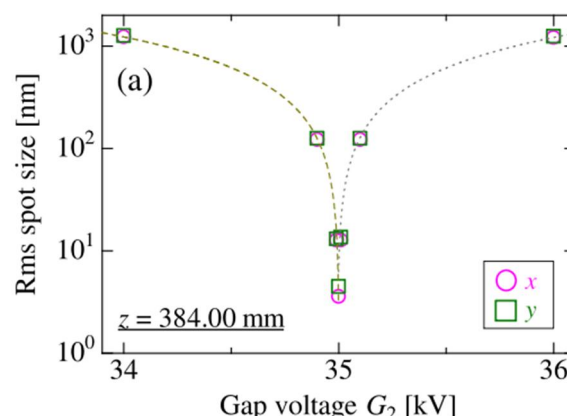


図1-4-3. 収束ビームサイズに関するシミュレーション結果

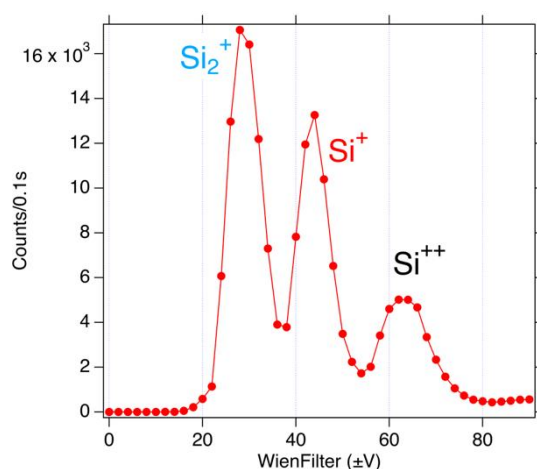


図1-4-4. Ga⁺によるSi基板スパッタイオンの速度スペクトル

透過後のイオンを CEM 検出器で計数し、イオン輸送条件を最適化した。高周波イオントラップの安定条件を用い、図 1-4-4 の各ピークを帰属した。

注入イオンを冷却 Ca^+ で共同冷却するためには、その初期速度を極力下げておく必要がある。そこで外部イオン源部(i)全体を、イオントラップ部(ii)に対し -900V とすることで、イオントラップ部(ii)におけるイオンの速度を 0eV 近くまで減速した。この状態でイオントラップの gate 電極電位を変え、 Si^+ イオンのエネルギー分布を測定した(図 1-4-5)。

スパッタで生成するイオンは 10eV 以上のエネルギー分布を持ち、トラップでの捕捉に適した低速イオンの導入には一層の条件最適化を要する。

(2-2) イオントラップ部(ii)での共同冷却

注入イオンのトラップへの導入・捕捉に先立って、トラップ内で冷媒 Ca イオンとは別の Ca 同位体を同時にトラップし、共同冷却条件の探索を行った。 Ca 原子の天然同位体比存在比は(^{40}Ca : 97%, ^{44}Ca : 2%, ^{48}Ca : 0.2%)である。天然存在比の Ca 蒸気の共鳴光イオン化の共鳴エネルギーを調整することで、同位体の混在した Ca イオンをトラップし、レーザー冷却 ^{48}Ca を冷媒とした、 ^{40}Ca と ^{44}Ca の共同冷却に成功した(図 1-4-6)。

(2-3) イオントラップ部(ii)からの Ca イオンの射出

図 1-4-7(a)に Ca イオンが一行に並んだ紐状クーロン結晶の一例を示す。このイオン列を注入方向にそのまま射出するため、閉込電位(DC 閉込)の制御条件を探索した。図 1-4-7(b)はターゲットの代わりに CEM 検出器を配置して計測した飛行時間スペクトルである。図 1-4-7(a)の 7 つの Ca イオンを、そのままの順番で、ほぼ等時間間隔で検出器に到達させることに成功した。また、全イオンの一括射出だけではなく、単一イオンの選択的射出条件も見出した[Muroo ら accepted to PRAB]。最後に、加速レンズにより収束させたビーム径を実測するため、ピエゾステージによるナイフエッジ評価システムを構築した。

【成果】以上の様に、ダイヤモンド中の任意位置に色中心を形成することを目的として、レーザー冷却単一イオン注入装置の開発を行った。外部イオン源で準備したイオンを一つずつ捕獲・配列し、点光源とみなせるイオントラップから高精度に輸送・集束する系を構築した。これにより微小構造ダイヤモンドへの超高精度注入が可能となった。

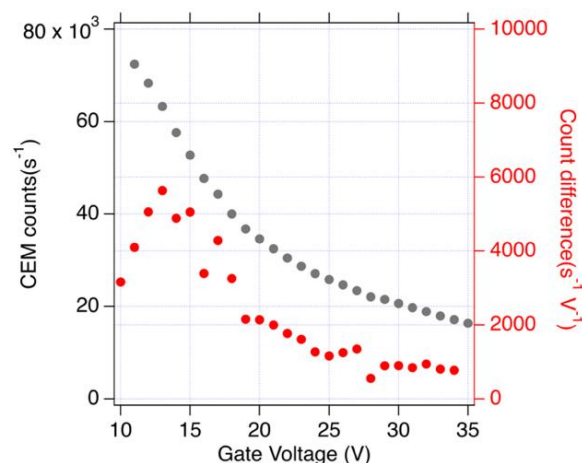


図1-4-5. Si^+ のエネルギースペクトル

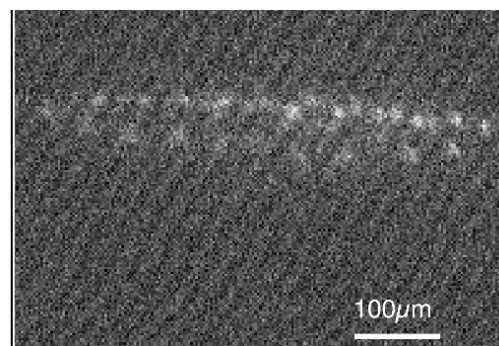


図1-4-6. Ca 同位体の混合結晶の一例(^{40}Ca : 5個, ^{44}Ca : 25個, ^{48}Ca : 24個)。光っている ^{48}Ca が外周に、光らない ^{40}Ca , ^{44}Ca が中央部に分布している。

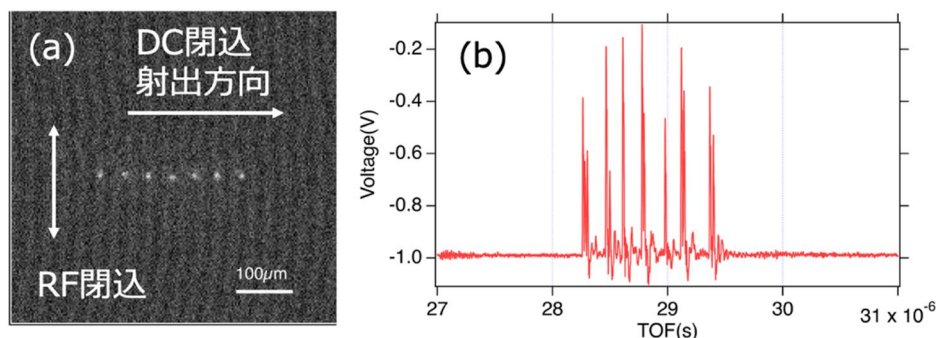


図1-4-7. (a) Caイオン蛍光像の一例。(b)Caイオン飛行時間スペクトルの一例

③ ダイヤモンド色中心の電荷安定性向上の実施(令和5年12月～令和7年11月)

【実施内容】 イオン注入・電子線照射及び熱処理を行い、励起状態の歪みが小さく、PLE 線幅が狭く、低温でブリンキングを示さない電荷状態の安定な色中心の形成条件を探索した。まず、10 keV-¹⁵N⁺(飛程:約 14 nm)、380 keV-¹⁵N⁺(飛程:約 0.4 μm)、及び 20 keV-¹⁵N₂⁺(飛程:約 14 nm)を 1×10^8 、 2.5×10^7 、及び 1×10^8 cm⁻² で注入した IIa 型 CVD 単結晶(エレメントシックス社の Electric Grade を研磨した試料(試料名:E6EL17))に注入した。イオン注入後、1000℃・2 時間・真空中において熱処理を行って NV 中心を形成した。すべてのイオン注入条件で、NV 特有の PL スペクトルを得た。PLE 測定を行った結果、PLE 線幅の平均値は、それぞれ 70 MHz、690 MHz、及び 100 MHz であった。注入に伴って形成されてしまう照射欠陥があるにもかかわらず狭い励起線幅が得られることが分かった。380 keV 注入では、50 MHz という狭い励起線幅の NV 中心があるものの、3 GHz といた広い励起線幅を示す NV 中心があることで平均値が他の注入条件と比べて大きくなったと考えられる。このことは、再現実験(試料名:E6EL20)でも同様であることが確認できた。全体の傾向としては、PLE 線幅は注入エネルギーが大きいほど大きく分布するものの、全ての注入エネルギーで 10 GHz 以下の歪を持つ NV 中心が発見できた。PLE の線幅も同様に、全ての注入エネルギーで 100 MHz 以下の線幅を持つ NV 中心があった。また、PLE 測定した全ての測定点において、ブリンキングは見られなかった。以上のことから、励起状態の歪みが小さく、PLE 線幅が狭く、低温でブリンキングを示さない電荷状態の安定な色中心の形成に成功した。なお、ダイヤモンド量子構造形成した試料に対しても NV 中心形成及び洗浄・表面酸素終端処理を実施した。その結果、全てのプロセスを経た前後において量子構造の変形・欠損は見られず、本項目で取り組んできた NV 中心形成プロセスが適用できると分かった。

【成果】 イオン注入・電子線照射および熱処理条件を制御することで、励起状態の歪みが小さく、PLE 線幅が狭く、低温でブリンキングを示さない電荷状態の安定な NV 中心の形成条件を明らかにした。注入エネルギーに依らず狭線幅 NV 中心の生成を確認し、量子構造形成試料にも適用可能であることを実証した。

課題推進者： 小野田 忍(量子科学技術研究開発機構)

(2) 研究開発項目2: オプトメカニカル共振器

研究開発課題1: フォトニック結晶光共振器の研究開発

① ダイヤモンドフォトニック結晶共振器の構造設計(令和2年12月～令和5年11月)

【実施内容】 ダイヤモンド量子メモリと光子の相互作用を高め、高効率な量子メディア変換を実現することを目的に、ダイヤモンドフォトニック結晶共振器の最適化設計を実施した。特に、マイクロ波から高効率なフォノン生成が期待される AlN-ダイヤモンドハイブリッドプラットフォームに着目し、共振波長、Q 値、モード体積、パーセル増強因子について数値解析を行った。また、作製時に生じる構造揺らぎや側壁の傾斜が共振器特性に及ぼす影響等も評価し、実際に作製可能な形状での最適化を進めた。

【成果】 完全フォトニックバンドギャップを利用できるハイブリッド型フォトニック結晶ナノビーム構造を見出した。これにより、共振器のモード体積を従来構造の約半分に抑えることが可能となり、理論パーセル増強因子 3,900 超を達成する共振器構造の設計に成功した。

【マイルストーン達成状況】 パーセル因子 10 以上という当初目標を大幅に上回る設計を完了し、当初目標を大きく超える成果が得られた。

② ダイヤモンドフォトニック結晶共振器による光子と量子メモリの結合増強(令和4年4月～令和7年11月)

【実施内容】 当初は設計を主担当としていたが、令和4年度の追加配分を受けてダイヤモンドフォトニック結晶共振器作製についても担当することとなり、その技術開発を推進した。加工が極めて困難なダイヤモンドに対し、電子線描画、2 段階垂直エッチング、および横方向エッチングの条件を最適化し、薄膜のエアブリッジ化(中空化)技術を開発した。開発技術を活かし、小坂グループでの各種評価実験への試料提供を行った。さらに、フォノンと光子、色中心の結合を可能とするため、野村グループ設計のオプトメカニカル結晶と馬場グループ設計の SiN 導波路結合構造を統合した集積用デバイスの作製を推進した。

【成果】 プロセス技術の高度化により、エッチング側壁や裏面の平坦性を向上させ、直径 100nm 程度の微細孔を精度よく形成するナノ加工技術を確立した(図 2-1-1(a))。結果として、厚さ約 200nm のエアブリッジ構造を有し、Q 値 10,000 を超えるフォトニック結晶ナノ共振器(図 2-1-1 (b)(c))やオプトメカニカル共振器の作製に成功した。同技術を用いて、NV や SnV などの色中心形成用ダイヤモンドフォトニック結晶ナノ共振器試料(オプトメカニカル結晶試料を含む)や集積デバイスを連携グループへ提供する体制を構築した。

【マイルストーン達成状況】 Q 値 1,000 超という目標値を大きく上回る Q 値 10,000 超の共振器実証およびオプトメカニカル共振器構造の作製に成功し、当初設定目標を達成した。

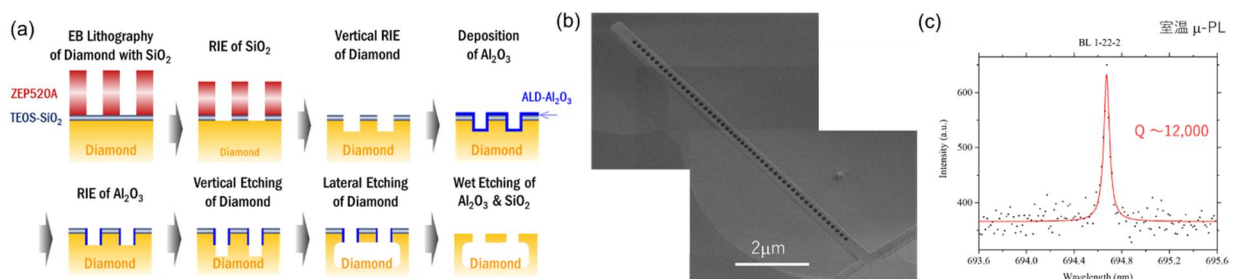


図 2-1-1. (a)開発したプロセスフロー、(b)エアブリッジ型ダイヤモンドフォトニック結晶ナノ共振器の SEM 写真、(c) 約 12,000 の Q 値をもつダイヤモンドナノ共振器の室温顕微発光スペクトル。

③ ダイヤモンドハイブリッド実装技術の検討(令和3年4月～令和7年11月)

【実施内容】 ダイヤモンドナノ構造を SiN 光回路へ集積するための、ハイブリッド実装技術および転写プリンティング技術の要素プロセス開発を実施した。共振器構造を基板から高い歩留まりで剥離するため、直交する支持用ナノビーム構造に意図的な脆弱部を設けた「T 字形構造」などのチップパターン周辺構造(図 2-1-2(a))を考案し、そのプロセス技術開発を行った。さらに集積用デバイスを実際に SiN 光回路に実装した。

【成果】 PDMS スタンプを用いた転写プリント法を高度化し、作製したダイヤモンドフォトニック結晶ナノ共振器およびオプトメカニカル共振器を基板から高い歩留まりで剥離することに成功した。さらに、これらを馬場グループが作製した SiN 光回路上へ精度良く転写・集積することに成功した(図 2-1-2 (b) (c))。これにより、本プロジェクトの最終目標である集積型素子構造のプロトタイプ実現に不可欠な基盤技術を確立した。

【マイルストーン達成状況】 光導波路が形成された基板へのダイヤモンド薄膜の転写プリント集積化という当初設定目標を達成した。

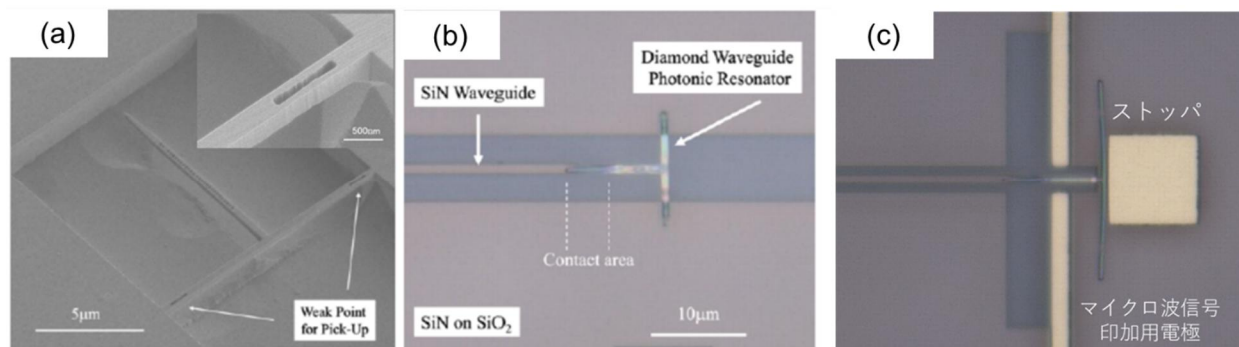


図 2-1-2. (a) T 字形構造の SEM 写真、(b)(c) SiN 光導波路に集積されたダイヤモンドナノ共振器構造の光学顕微鏡写真。(c)はマイクロ波信号印加用電極も装荷された光回路への実装例。

課題推進者：岩本 敏(東京大学)

研究開発課題2：フォトニック結晶光共振器実装技術開発

② 結合構造設計(令和2年12月～令和5年11月)

【実施内容】 本プロジェクトでは、ダイヤモンドオプトメカニカル共振器のパーセル効果を利用して窒素空孔(NVC)量子メモリと光子の相互作用を増強し、さらに光導波路を介してNVCの遷移波長の光子(波長 637 nm)を高効率に単一モード光ファイバへ接続する光量子インターフェースの SiN 導波路プラットフォーム構築を目指した。共振器は 1 次元フォトニック結晶ナノビーム構造とし、別途、製作して、マイクロ転写プリントにより SiN 導波路の上に搭載することを想定した(図 2-2-1)。ダイヤモンドナノビーム構造は加工を考慮して厚さ 200 nm、幅 300 nm、SiN 導波路は上下非対称性を補償するため厚さ 120 nm、幅 1 μ m と大きめにした。そして、両者の先端を長さ 5 μ m のテーパ状にして重ねることにより結合効率 95%を計算、位置ずれに対するトレランスも明らかにした。一方、SiN 導波路とファイバの接続では、SiO₂でオーバークラッドされた先端幅 100 nm のスポットサイズ変換器(SSC)で結合効率 93%を見積もった。ただし Si フォトニクスで標準的なテーパ長 200 μ m だと効率が 60%まで低下し、理想的な高効率はテーパ長 3 mm で得られることがわかった。また、オーバークラッドの端部での通過効率は 96%と計算された。以上より、ファイバからダイヤモンドま

での伝搬効率は 85% (損失 0.72dB) と計算された。

【成果】 当初目標の損失を十分に下回る高効率な SiN 導波路プラットフォームの設計に成功した。

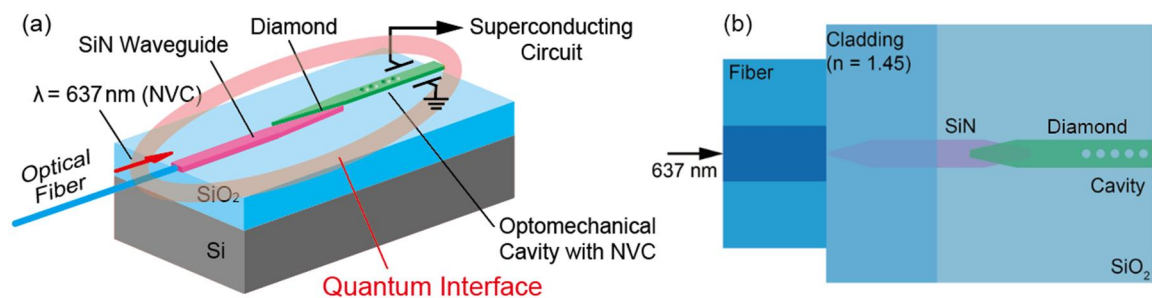


図 2-2-1. 光量子インターフェース。(a) 全体概要。(b) 光伝搬に関わる構造の平面図。

③ ダイヤモンドフォトニック結晶共振器による光子と量子メモリの結合増強 (令和4年12月～令和7年11月)

【実施内容】 ダイヤモンドナノビーム構造に空孔列を配置し、波長 600 nm 帯で高 Q 値と微小モード体積 V を生じさせ、大きなパーセル係数を示す構造を設計した。様々な構造を検討したが、製作の容易さを考慮し、円孔配列の中央の 2 個をわずかに外側にずらして共振器とし、その左右の円孔のサイズや位置も微調整した構造に注力した。FDTD 法による計算と共分散行列適応進化戦略アルゴリズムを用いて、 Q/V を最大化する最適構造を探索した。光学遷移を高速化するパーセル効果の大きさは、NVC の位置がモードの腹にあり、偏波が一致している条件で、パーセル係数 $F = (3/4\pi^2)(Q/V)(l/n)^3$ で与えられ、その期待値も導出した。その結果、 Q 値 9850、モード体積 $0.48 (\lambda/n)^3$ 、パーセル係数 1560 を示す構造 (図 2-2-2) を得た。また、共振器左端の 6 個の円孔に調整を加え (アポダイゼーション)、導波路伝搬光の結合を高め、効率 68% (損失 1.7 dB) を計算した。よって、ファイバから共振器までの効率は 57% (損失 2.4 dB) となった。

【成果】 十分に大きなパーセル係数の共振器を設計し、ファイバとの結合の見通しを得た。

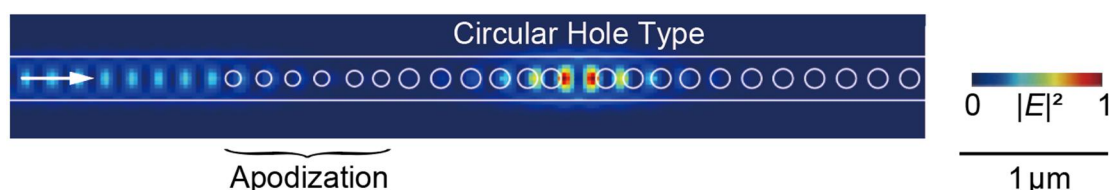


図 2-2-2. ダイヤモンド光共振器の最適構造、および伝搬光と結合する共振モード分布。

④ ダイヤモンドハイブリッド実装技術の検討 (令和4年12月～令和7年11月)

【実施内容】 プラットフォームとなる SiN 導波路チップは、産業技術総合研究所 (AIST) のシリコンフォトニクス 300 mm ウエハプロセスにより製作した。ここでは、厚さ $2 \mu\text{m}$ の表面酸化膜を形成した Si 基板上に LP-CVD 法により SiN 層を 120 nm 堆積させた。導波路加工には液浸 ArF 露光が用いられ、導波路に加え、超伝導電極形成用レジストパターンも形成した。チップ分離にはステルスダイシングが用いられ、64 個のチップが完成した。チップ分離後、Al、または NbTiN を堆積、リフトオフによって電極を完成させ、電界印加を可能にした。また、シャドウマスクスパッタ法によりチップ端面のみに SiO₂ オーバークラッドを選択的に堆積させた後、端面研磨を行い、ファイバを接続、紫外硬化樹脂により固定した。このような実装基板に対して、極低温下

でも安定して波長 600 nm 帯の光伝搬が得られることが確認された。最終的に、岩本・小坂グループによるダイヤモンド共振器の製作・搭載を通じて、光が実際に共振器に結合でき、電界印加による特性操作も可能なことが確認された。

これとは別に、圧電材料となる薄膜 LiNbO_3 を電子ビーム描画と ICP ドライエッチングにより加工し、サブミクロンサイズの小片を多数製作した。これを小坂グループに提供し、ダイヤモンド共振器に搭載することで、フォノン・マイクロ波変換の実験にも用いられた。

【成果】 SiN 導波路プラットフォームを試作し、ダイヤモンド共振器搭載で光結合を実現した。

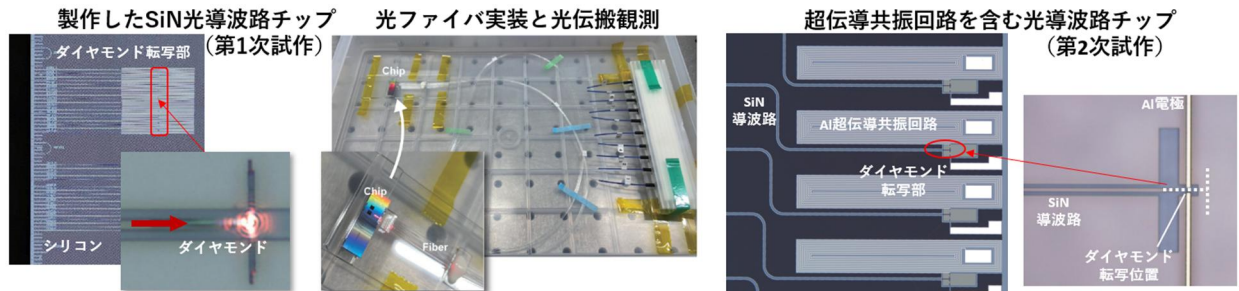


図 2-2-3. 製作した SiN 導波路チップ、ダイヤモンド搭載と光結合、ファイバ結合、超伝導電極等。

課題推進者：馬場 俊彦(横浜国立大学)

研究開発課題3：フォノン結晶音共振器の研究開発

① ダイヤモンドフォノン結晶共振器の設計の実施(令和2年12月～令和5年11月)

【実施内容】 音子と量子メモリの結合増強を可能にするダイヤモンドフォノン結晶共振器について、有限要素法を用いた構造設計と結合増強性能評価を行う。また、研究開発項目2課題1との連携により、フォトニック結晶も両立した構造の設計を行った。

【成果】 ダイヤモンドを母材とし、フォノン(音子)と量子メモリの結合増強を可能にするダイヤモンドフォノン結晶ナノ共振器(音共振器)について設計を行った。フォノンを可能な限り小さな体積を有する共振器に時間的および空間的に強く局在させることで、増強されたひずみによって共振器内に設置された量子メモリとの相互作用を介して、弾性パーセル効果による高効率な量子メディア変換を可能にする系を設計することを目的として行った。

有限要素法を用いた線形弾性モデルにより、ダイヤモンド構造中のフォノン伝搬に伴う変位およびひずみ解析を行い、フォノン結晶ナノ共振器の固有機械振動モード解析と機械 Q 値解析を行うシミュレーターを構築した。フォノン結晶ナノ共振器を設計する際には、最終的にマイクロ波や通信波長帯フォトンも含めたシステム全体として機能する必要がある。そのため、フォノン系単体の検討にとどまらず、フォトニック結晶系や現在検討されているフォトニック・フォノンサーキットとの連続性を持った系となるような設計を行った。フォノン結晶ナノ共振器近傍に電極を配置し、発生する電場を圧電材料である AlN を介してフォノン励起する系の検討を進めた。小坂グループと馬場グループと連携しながら、電気および光回路との結合性も検討し、高性能な構造を探索した。また、歪テンソルを用いて量子メモリとなる NV や SiV などの色中心とフォノンの結合強度を計算し、最大化するダイヤモンド基板の面方位と共振器の方向を決定し、作製グループに知見を提供できるよう検討を進めた。本トピックは、小坂グループ、岩本グループ、馬場グループとの総合的な議論によるインターフェースの全体設計のアップデートに伴い設計を行うため、下記の②に引き継いで行われた。系の概念図は②内の図に示す。

② ダイヤモンドフォノン結晶共振器の実験的評価の実施(令和4年1月～令和7年11月)

【実施内容】音共振器の Q 値の測定系を構築し、ダイヤモンドフォノン結晶共振器について、研究開発項目1課題2および研究開発項目2課題1との連携で作製された音共振器の Q 値を実験的に測定し特性評価を行うとともに、プロセスへのフィードバックを行った。

【成果】フォトンおよびフォノンを時間的および空間的に強く局在させることで、共振器内に設置された量子メモリとの相互作用を介して、高効率な量子メディア変換を可能にする系の設計を目的として研究を実施した。項目2課題1において、岩本グループがダイヤモンドを母材としたオプトメカニカル結晶構造の作製を進める中、現時点でプロセス可能な構造パラメータ(最小円孔やピッチなど)を設定し、設計 Q 値とプロセス Q 値のバランスを考慮しながら、有限要素法を用いた線形弾性モデルによりオプトメカニカル共振器系の設計を進めた。先行研究では、プロセスによる光学 Q 値が 10,000 程度であることから、フォノン Q 値と極小モード体積を優先したオプトメカニカル共振器を設計する戦略を採用した。図 2-3-1(a)に示すようなモードコンセンレータ付きの共振器を用いるが、フォノンは電極によりピエゾ結合で AlN により励起されて左から注入され、フォンは右からアクセスさせる非対称設計である。すなわち、共振器の左側は、フォノン導波路かつフォトンミラーになっており、右側はその逆であり、高性能な一方で構造パラメータが多い。そのため、広大なパラメータ空間を高速で自動探索可能な遺伝的アルゴリズムを用いた自動設計プログラムを開発した。

図 2-3-1(b)は、その PoC として、異方性フォノン結晶の設計を行った例であるが、世代を経るごとに所望の性能が高まっていくことが確認できた。遺伝的アルゴリズムを用いた自動設計をフォノン系に適用した例はなく、本研究が世界で初めてである [ACS Nano 18, 18307 (2024)、日経新聞に掲載]。また、実際にピエゾ材料である AlN とダイヤモンドフォノン結晶が接続した共振器を自動設計することで、両構造間でのフォノンモードマッチングを最適化し、単純構造の 104 倍の高効率フォノン結合を実現した[Phys. Rev. Applied 21, 064064 (2024)]。

加工限界と精度を考慮したダイヤモンドオプトメカニカル共振器系を設計した。その設計に基づいて岩本グループが実際に作製した構造を SEM で測定し、シミュレーションによって性能評価を行った。理論光および音子共振器 Q 値それぞれ 5,000 と 30,000 を得た。また、フォノン生成を行う構造を AlN/ダイヤモンド上に作製し、GHz フォノン共振器 Q 値の実測値 20,000 を得てマイルストーンを達成した。

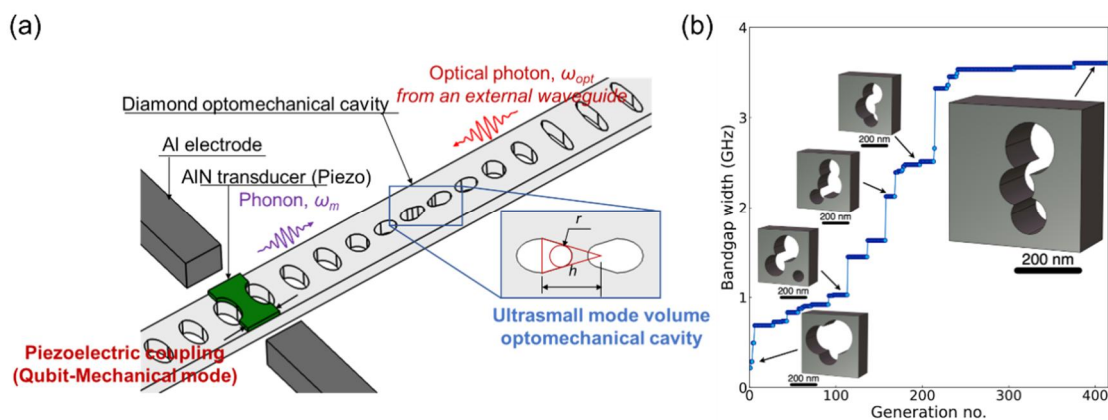


図2-3-1. (a) 設計したピエゾ材料を有するオプトメカニカル共振器系の概略図。(b) 開発した遺伝的アルゴリズムによる自動設計ツールを用いたフォノン結晶系の設計の例。広大な構造パラメータ空間を自動で高速に探索可能で、多様な共振器デザインについて即座に設計と性能評価が可能なツールを開発した。

③ ダイヤモンドフォノンニック結晶共振器による音子と量子メモリの結合増強評価の実施(令和5年12月～令和7年11月)

【実施内容】 音子と量子メモリの結合増強を可能にするダイヤモンドフォノンニック結晶共振器について、研究開発項目1課題2および研究開発項目2課題1との連携で作製された構造について、実測された音共振器の Q 値と計算によって得られるモード体積から算出される音響パーセル増強因子により結合増強性能評価を行った。

【成果】 ダイヤモンドフォノンニック共振器構造の作製(岩本グループ担当)と並行し、量子変換効率を計算するツールを作成した。それを用いて、先行研究で 2021 年に Joe らが報告したフォノン Q 値 22,000 を用い、モード体積はシミュレーションで計算された値を用いて量子変換効率を試算した。シミュレーションに用いた系とモデルは、図 2-3-1(a)と同じ構造であり[Phys. Rev. Appl. 20, 044037 (2023)]、損失を有する系であるため下記の Lindblad マスター方程式を用いて解析した。超電導量子ビットからのマイクロ波フォトン、ピエゾ結合により生成される GHz フォノン、量子メモリにおけるスピン系、情報を読み出す光通信波長帯のフォトンの 4 つについて、その population の時間発展を解析した。その結果、マイクロ波フォトンから光通信波長帯のフォノンへの変換効率は、約 15%であった。そして、実験的に報告されている量子メモリの緩和時間 $T_2^* = 10$ ns を用いてコヒーレント変換効率を計算したところ、10%が期待できることを見出した。加工限界寸法と精度を考慮した我々の設計に基づいて岩本グループが実際に作製したダイヤモンドフォノンニック結晶共振器における音子と量子メモリの結合を計算した。実測構造パラメータを用いて音子共振器モードを計算し、理論音子共振器 Q 値とモード体積から、音子のパーセル因子 10^6 を得た。超微小モード体積アプローチを採用したことで、極めて高い音子パーセル因子が実現され、達成目標を大幅に超えてマイルストーンを達成した。

課題推進者：野村 政宏(東京大学)

(3) 研究開発項目3: ピエゾマイクロ波共振器

研究開発課題1: ピエゾマイクロ波共振器の研究開発

① ピエゾマイクロ波共振器の材料探索、構造設計の実施(令和2年12月～令和5年11月)

【実施内容】 マイクロ波―光量子インターフェース(図 3-1-1)について、項目2で開発したダイヤモンド光共振器とSiN 光導波路チップとを集積し、その低温評価を行った。

【成果】 ダイヤモンド光共振器、SiN 光導波路チップを図 3-1-1 のように集積し、希釈冷凍機を用いて低温で光学特性を評価した。ここでは希釈冷凍機中での光学特性評価システムだけでなく、希釈冷凍機中への窒素ガスの導入とレーザー照射により、光共振器の共振周波数を数 nm の範囲で調整する技術も開発している。これにより低温で、共振周波数が NV 中心のゼロフォノン線に一致する際に NV 中心からの発光が増大し、かつ光学緩和時間が短くなる振る舞いの観測に成功した。これは Purcell 効果と呼ばれる現象であり、光共振器と NV 中心との相互作用効果が期待通り得られていることを実証するものである。これにより、ダイヤモンド量子インターフェースの 5 つの構成要素のうち、そのうち 3 つを接続し、その動作に成功したこととなる。

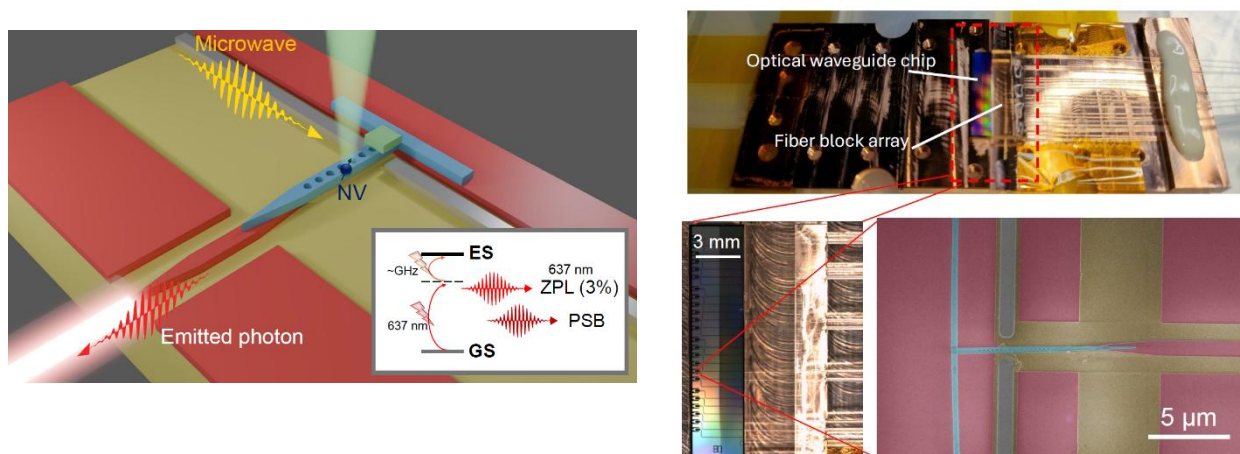


図3-1-1. (左)ダイヤモンドマイクロ波―光量子インターフェースの概念図。(右)実際に作製したデバイスの光学顕微鏡像とSEM像。

② マイクロ波から音波への変換の実施(令和5年12月～令和7年11月)

【実施内容】 マイクロ波から音波への変換について、研究開発項目2で作製したダイヤモンドナノビーム構造と、LiNbO₃ 薄片とをヘテロ集積することで、ナノビーム構造中に音波を励振する技術を開発した。更に、励振した音波とナノビーム構造中の色中心との相互作用の観測にも成功した。

【成果】 まず、圧電材料である LiNbO₃ の薄片(数 100 nm 角)を作製し(項目2との連携)、更にそれをダイヤモンドナノビーム構造上にピックアンドブレース法で集積することに成功した(図 3-1-2(a))。配置した LiNbO₃ に電極からのマイクロ波を印加しつつ、ナノビーム構造中の SiV 中心の発光励起スペクトルを測定することで、図 3-1-2(b)のようなサイドバンド遷移を観測した。これは最も初歩的な形のマイクロ波―光変換でもある。マイクロ波の周波数を掃引しつつサイドバンド強度を測定することで機械モードの Q 値を見積もることができるが、ここでは Q 値 550 が得られた。

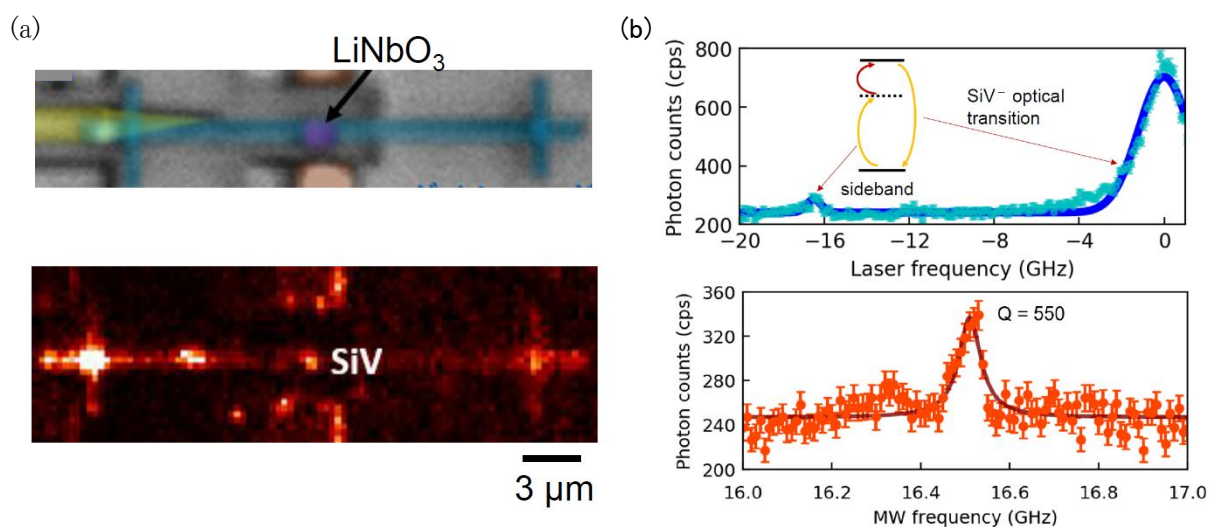


図3-1-2. (a) LiNbO₃をのせたダイヤモンドナノビーム構造(水色)と、その共焦点PL像。(b) マイクロ波をLiNbO₃に印加して測定したSiV中心のサイドバンドと、そのマイクロ波周波数依存性。

③ マイクロ波による量子メモリの量子操作の実施(令和5年12月～令和7年11月)

【実施内容】 ダイヤモンド中の中性窒素-空孔(NV)中心は、基底状態のゼロ磁場でのスピン軌道分裂が10 GHz程度であり、超高効率なマイクロ波-光量子インターフェースへの応用が期待される色中心である。NV⁰についてマイクロ波電場でのコヒーレント操作と極低温での寿命測定を行った。

【成果】 ダイヤモンド中のNV⁰について、マイクロ波電場を利用した軌道基底状態のコヒーレント操作を世界で初めて実証した。更に、希釈冷凍機を用いた測定により、20 mKでの量子状態の寿命が1～数μsに達することを示した。加えてこれらの結果を前提として、研究開発項目3課題3との連携の中で、NV⁰が超高効率な量子インターフェースのプラットフォームとなりうることを実証した。

課題推進者：小坂 英男(横浜国立大学)

研究開発課題2：量子制御電子集積回路の研究開発

① ダイヤモンド量子インターフェース用量子制御電子集積回路の開発(令和4年4月～令和7年11月)

【実施内容】 超伝導デバイスおよびCMOSデバイスを用いた電子集積回路技術により、超伝導量子回路、ダイヤモンド量子メモリ、ならびに音子共振回路を高速かつ高忠実度に制御するための電子集積回路を開発した。さらに、量子回路と同一の温度ステージにある極低温環境において、多数の超伝導量子回路を量子操作するための1～10 GHz帯のマイクロ波制御信号を生成する回路の開発を行った。

【成果】 低温CMOS集積回路を用いた量子回路向け直流バイアス印加回路として、4ビットD/A変換器(DAC)の基本設計を行い、4.2 Kにおける動作を確認した。本回路はCMOS 180 nmプロセスを用いて試作した。100 kHzのクロック周波数に対して、良好な線形性を有する出力が得られた。

また、量子回路と同一の極低温環境において、量子回路を操作するためのマイクロ波パルス信号を生成可能な超伝導回路を実現するため、極低温動作の超伝導論理ゲート・セルライブラリを開発し、4.2 Kにおいてその動作検証を行った。開発したプロセスでは、従来の超伝導集積回路プロ

セスに対して、臨界電流値を $1/10$ 、臨界電流密度を $1/10$ 、電源電圧を $1/3$ に低減した。これにより、SFQ 回路の消費電力は $1/30$ 、バイアス電流は $1/10$ 、動作周波数は $1/3$ となる。また、抵抗層を Md から Pd に変更することで、極低温における超伝導転移を防止した。主要な SFQ 論理ゲートセルについて、十分な動作余裕度をもって動作することを確認した。

さらに、従来の SFQ セルライブラリおよび極低温用セルライブラリを用いて、2 方式のマイクロ波発生器を開発した。

第 1 の方式は、SFQ パルス密度変調型マイクロ波発生器である。この方式では、密度変調した 100 GHz の SFQ パルス列から高調波成分をフィルタで除去することにより、5 GHz の任意波形マイクロ波パルスを生成する。動作温度は 1 K～4.2 K を想定しており、 -80 dBm のガウシアン形状マイクロ波パルスの生成を実証した。図 3-2-1 に、試作した SFQ パルス密度変調型マイクロ波発生器のチップ写真を示す。

第 2 の方式は、2 パルス合成型 SFQ マイクロ波発生器である。この方式では、2 つの SFQ パルスの位相を変えて合成することで、出力振幅を制御する。動作温度は 10 mK～100 mK を想定しており、超伝導量子ビットと同一の極低温環境で動作可能である。4.2 K における測定により、 -90 dBm 程度の任意振幅マイクロ波出力が得られることを確認した。図 3-2-2 に、2 パルス合成型 SFQ マイクロ波発生器のチップ写真を示す。また、図 3-2-3 には、2 パルス合成型 SFQ マイクロ波発生器における、(a) マイクロ波出力の周波数スペクトルの制御電流依存性、および (b) 4.2 K 用セルライブラリ(HSTP)と極低温用セルライブラリ(1KP)を用いたマイクロ波発生器の出力電力の制御電流依存性を示す。制御電流を印加することで、 -100 dBm から -70 dBm の範囲でマイクロ波出力を可変できること、ならびに狭帯域のマイクロ波出力が得られることを確認した。

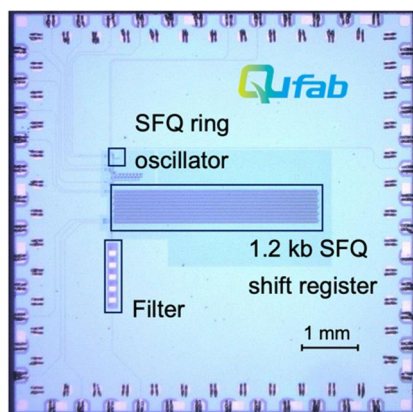


図 3-2-1. SFQ パルス密度変調型マイクロ波発生器のチップ写真。

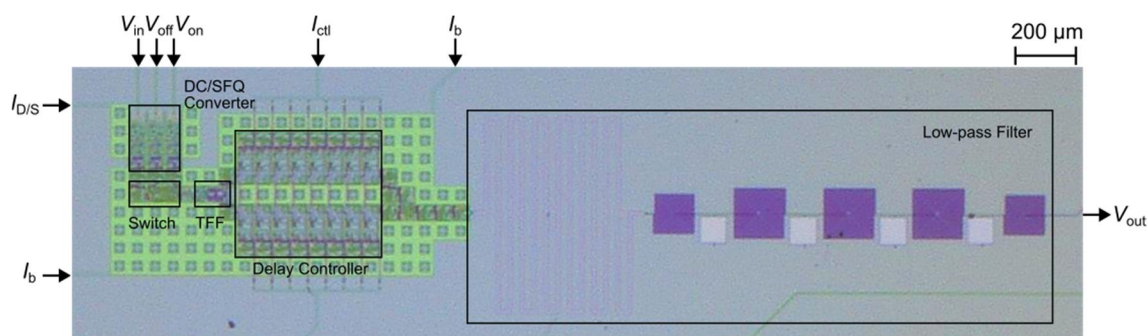


図 3-2-2. 2 パルス合成型 SFQ マイクロ波発生器のチップ写真

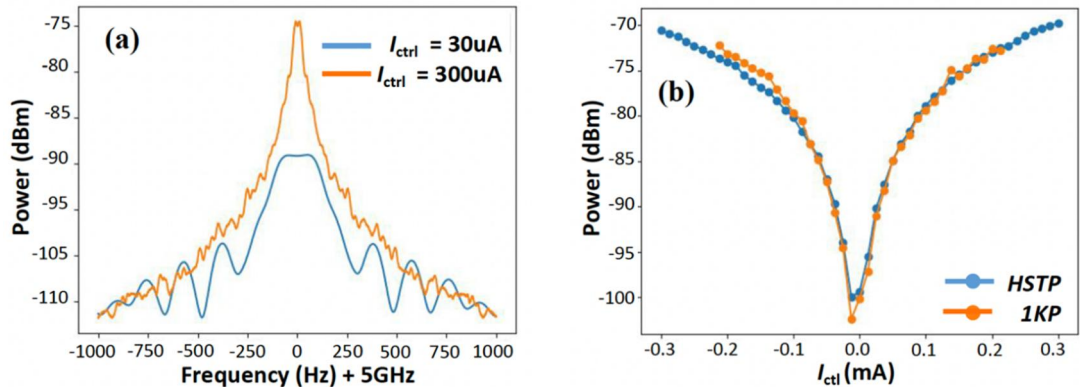


図 3-2-3. 2 パルス合成型 SFQ マイクロ波発生器の(a)マイクロ波出力の周波数スペクトルの制御電流依存性、および(b) 4.2K 用セルライブラリ(HSTP)と極低温用セルライブラリ(1KP)を用いたマイクロ波発生器の出力電力の制御電流依存性。

課題推進者：吉川 信行(横浜国立大学)

研究開発課題3：量子インターフェースの理論研究

① 超伝導量子ビット—光子量子ビット間インターフェースの理論(令和4年4月～令和7年11月)

【実施内容】空間的に離れた超伝導量子ビット間を量子的に結合するには、超伝導量子ビットから放出されるマイクロ波帯光子を、伝送ロスの少ない通信波長帯光子へと変換する必要がある。本研究では、マイクロ波共振器・フォノン共振器・ダイヤモンド NV 中心(NV0)・光共振器の結合系を用いた量子トランスデューサ(マイクロ波光子→通信波長帯光子への変換器)の理論解析を行い、変換効率を評価した。

【成果】本デバイスのエネルギー準位構造を図 3-3-1 に示す。変換対象であるマイクロ波光子(周波数 10GHz)は、マイクロ波導波路を介してマイクロ波共振器(共鳴周波数 10GHz)に入射される。マイクロ波共振器はフォノン共振器(共鳴周波数 10GHz)に結合しており、更にフォノン共振器はダイヤモンド NV 中心の $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ 遷移(遷移周波数 10GHz)に結合している。ダイヤモンド NV 中心は通信波長帯周波数の $|0\rangle \rightarrow |2\rangle$ 遷移(遷移周波数 500THz)および $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$ 遷移(遷移周波数 499.99GHz)も有しており、これら2つの遷移は光共振器(遷移周波数 500THz)と結合している。光共振器には光導波路が結合されており、ここから光共振器へのドライブ光(周波数 499.99GHz)を

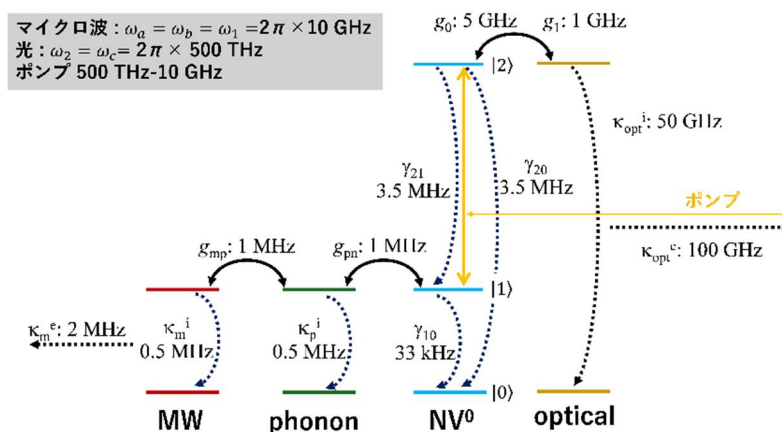


図 3-3-1. 量子トランスデューサのエネルギー準位構造。左から、マイクロ波共振器・フォノン共振器・ダイヤモンド NV 中心(NV0)・光共振器。共振器については 0 および 1 量子状態のみ示している。

入射する。光導波路には、反射されたドライブ光と、マイクロ波帯から通信波長帯へと周波数変換を受けた信号光子(周波数 500THz)が出力され、周波数フィルタにより両者を分離して信号光子を取り出す。

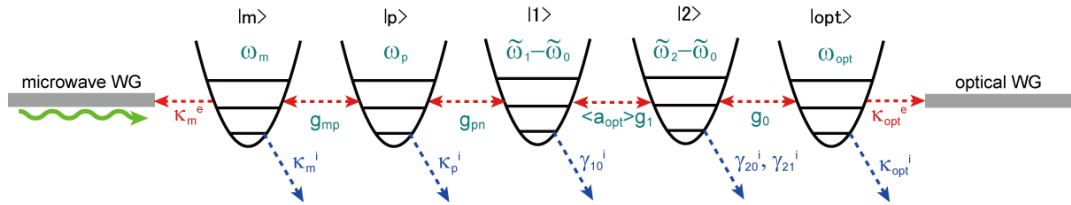


図 3-3-2. 量子トランスデューサの現象論モデル。左から、マイクロ波共振器・フォノン共振器・NV0 の $|1\rangle$ 準位・NV0 の $|2\rangle$ 準位・光共振器に対応している。

本研究ではまず、ドライブ周波数での回転座標へと移行することにより、5つの調和振動子が直列に結合した現象論的モデル(図2)を導出した。ここで5つの振動子はそれぞれ、マイクロ波共振器の1光子状態、フォノン共振器の1量子状態、NV 中心の $|1\rangle$ 状態、NV 中心の $|2\rangle$ 状態、光共振器の1光子状態、に対応している、この現象論モデルでは、NV 中心の $|1\rangle$ 状態と $|2\rangle$ 状態(左から3番目と4番目の二準位系)との結合強度がドライブ強度によって可変である。この現象論モデルのマイクロ波応答を解析することにより、入射マイクロ波光子→通信波長帯光子の変換効率を最大にする「最適ドライブ強度」の解析的表式を得ることに成功した。

次に、本デバイスの性能をより定量的に評価するために、系の全自由度を量子力学的に扱い変換効率を評価した。数値計算を簡略化するため、次の3点の工夫を行った。(1)マイクロ波共振器・フォノン共振器・光共振器の自由度を断熱的に消去することにより、NV 中心が2種類の導波路に直接結合している形に書き直した。(2)マイクロ波導波路から(単一光子ではなく)微弱なコヒーレント光を入射して変換効率を評価し、得られた効率を入射光子数で微分することにより、単一マイクロ波光子入射に対する変換効率を求めた。(3)実際に入力するマイクロ波光子およびドライブ光は有限の時間幅をもつパルスであるが、これらを連続光として扱った。これは入射マイクロ波光子の長パルス極限に相当する。

数値計算の結果、内部ロスを考慮した現実系(内部ロスを完全に排除した理想系)における本デバイスの性能指標は次の通りであった。入射マイクロ波光子の全変換効率:30.6%(94.7%)、干渉性を失わず周波数変換されるコヒーレント変換効率:28.1%(87.6%)、パルス長を 2.5 マイクロ秒と仮定した場合の暗計数確率:1.18%(1.35%)。

課題推進者：越野 和樹(東京科学大学)

5. プロジェクトマネジメント実施内容

(1) 研究開発プロジェクトのガバナンス

① 代表機関のマネジメント体制

代表機関である横浜国立大学の先端科学高等研究院(IAS)に小坂 PM がセンター長を務める量子情報研究センター(QIC)を設置し(令和2年10月)、図5-1に示すようなPM支援体制を構築した。主たるメンバーとして、PM補佐1名、知的財産プロデューサー(知財戦略プロデューサー)1名、非常勤教員1名、事務職員3名、URA1名、事務補佐員5名が、代表機関内外に所属する課題推進者の研究開発の進捗管理、研究開発機関間の連携、労務管理等の様々なPM活動を支援する形とした(上記人数は、研究開発期間内で若干の変動あり)。令和4年6月には各課題推進者を客員教授および客員准教授としてIASに招聘し、より効果的なプロジェクトマネジメントを実施できる体制を構築した。PM補佐は事業化戦略、研究環境整備、産学官連携、報告書のとりまとめ等を実務的に支援しているほか、科学技術振興機構(JST)担当者とも随時連絡を取りながら活動を推進した。令和3年9月より工業所有権情報・研修館(INPIT)から知的財産プロデューサー(知財戦略プロデューサー)を招聘していたが、令和4年度にそれまでの準備派遣Bから通常支援派遣に、更に令和7年度は国プロ支援制度 iNat による派遣に切り替わり、知財戦略の構築がより本格的に進められるようになった。また、令和5年1月から産学官連携コーディネーター1名を採用し、渉外・アウトリーチ業務を強化した。なお、IASでは院長を学長が兼任し、トップダウン型の効果的な運営ガバナンス体制が整備されており、IASと学内組織との協働を軸として代表機関全体としてもPM活動を支援する体制である。

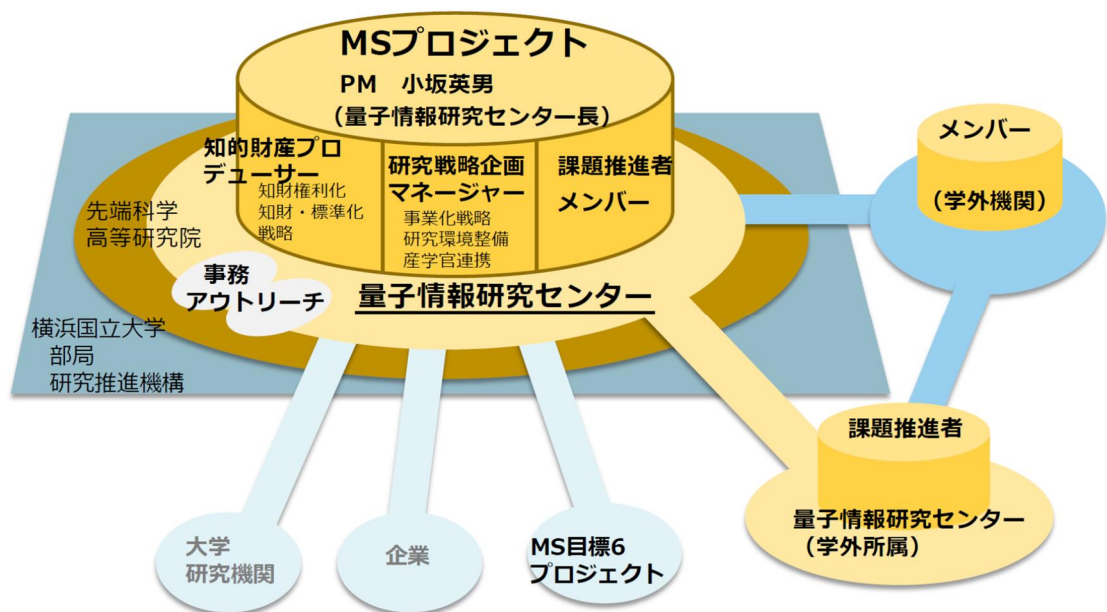


図 5-1. 横浜国立大学先端科学高等研究院を中心としたプロジェクトマネジメント体制

② 各種マネジメントに係る会議開催等

ほぼ月1回の頻度で90～120分の課題推進者会議をオンラインで開催した(JSTの担当課長の承認が必要な案件がある場合は、運営会議としても開催)。PM、課題推進者、PM補佐、知財戦略プロデューサーなどの主たるプロジェクトメンバーが集まり、重要事項の連絡・調整、進捗状況の把握や課題間の連携推進など、プロジェクトの実行に大きく寄与した。知財運用会議も必要に応じて

開催した。またプロジェクトメンバーの量子インターフェースについての理解を深めるため、横浜国立大学の関口助教、黒川 IAS 助教を講師として勉強会を計 4 回開催、録画して随時確認できるようにした。プロジェクト全体に関係するこれまでの会議開催は下記の通りである。

会議名	日時	場所
量子計算網構築のための量子インターフェース開発キックオフ	令和3年1月15日(金)9:45～12:30	オンライン(Zoom)
令和3年度第1回課題推進者会議	令和3年7月13日(火)16:45～18:00	オンライン(Zoom)
令和3年度第2回課題推進者会議	令和3年8月25日(水)16:00～18:00	オンライン(Zoom)
令和3年度第3回課題推進者会議	令和3年9月22日(水)16:00～17:30	オンライン(Zoom)
令和3年度第4回課題推進者会議 (中止、内部会議に変更)	令和3年10月28日(木)16:00～17:30	オンライン(Zoom)
令和3年度第5回課題推進者会議	令和3年11月25日(木)16:00～17:30	オンライン(Zoom)
令和3年度第6回課題推進者会議	令和3年12月23日(木)16:00～17:30	オンライン(Zoom)
令和3年度第7回課題推進者会議 (令和3年度第2回運営会議)	令和4年1月27日(木)16:00～17:30	オンライン(Zoom)
令和3年度第8回課題推進者会議	令和4年2月24日(木)16:00～17:30	オンライン(Zoom)
第1回量子インターフェース勉強会	令和4年3月28日(月)10:00～12:00	オンライン(Zoom)
令和3年度第9回課題推進者会議	令和4年3月30日(水)16:00～17:30	オンライン(Zoom)
知財運用会議	令和4年4月26日(火)14:00～15:00	オンライン(Zoom)
第2回量子インターフェース勉強会	令和4年4月26日(火)17:00～18:30	オンライン(Zoom)
令和4年度第1回課題推進者会議	令和4年4月27日(水)15:30～17:00	オンライン(Zoom)
令和4年度第2回課題推進者会議	令和4年5月31日(火)17:00～18:30	オンライン(Zoom)
令和4年度第3回課題推進者会議	令和4年6月21日(火)17:00～18:30	オンライン(Zoom)
第3回量子インターフェース勉強会	令和4年6月24日(金)17:30～19:30	オンライン(Zoom)
令和4年度第4回課題推進者会議	令和4年7月20日(水)17:00～18:30	オンライン(Zoom)
令和4年度第5回課題推進者会議	令和4年8月10日(水)15:00～16:30	オンライン(Zoom)
第4回量子インターフェース勉強会	令和4年8月24日(水)10:00～12:00	オンライン(Zoom)
令和4年度第6回課題推進者会議	令和4年9月14日(水)15:00～16:30	オンライン(Zoom)
令和4年度第7回課題推進者会議	令和4年10月25日(火)17:00～18:30	オンライン(Zoom)
令和4年度第8回課題推進者会議	令和4年11月17日(木)17:00～18:30	オンライン(Zoom)
令和4年度第9回課題推進者会議	令和4年12月13日(火)17:00～18:30	オンライン(Zoom)
令和4年度第10回課題推進者会議	令和5年1月13日(金)17:00～18:30	オンライン(Zoom)
令和4年度第11回課題推進者会議	令和5年2月14日(火)17:00～18:30	オンライン(Zoom)
令和4年度第12回課題推進者会議	令和5年3月3日(金)17:00～18:30	オンライン(Zoom)
令和5年度第1回課題推進者会議	令和5年4月12日(水)16:30～18:00	オンライン(Zoom)
令和5年度第2回課題推進者会議	令和5年5月16日(火)16:30～18:00	オンライン(Zoom)
令和5年度第3回課題推進者会議	令和5年7月5日(水)16:30～18:00	オンライン(Zoom)
令和5年度第4回課題推進者会議	令和5年8月2日(水)16:30～18:00	オンライン(Zoom)

令和5年度第5回課題推進者会議	令和5年10月24日(火)16:30～18:00	オンライン(Zoom)
令和5年度第6回課題推進者会議	令和5年11月14日(火)16:30～18:00	オンライン(Zoom)
令和5年度第7回課題推進者会議	令和6年1月10日(水)16:30～18:00	オンライン(Zoom)
令和5年度第8回課題推進者会議	令和6年2月9日(水)17:00～18:30	オンライン(Zoom)
令和6年度第1回課題推進者会議	令和6年4月17日(水)16:30～18:00	オンライン(Teams)
令和6年度第2回課題推進者会議	令和6年5月15日(水)16:30～18:00	オンライン(Teams)
令和6年度第3回課題推進者会議	令和6年6月11日(水)16:30～18:00	オンライン(Teams)
令和6年度第4回課題推進者会議	令和6年7月10日(水)16:30～18:00	オンライン(Teams)
令和6年度第5回課題推進者会議	令和6年9月24日(火)16:30～18:00	オンライン(Teams)
令和6年度第6回課題推進者会議	令和6年10月23日(水)16:30～18:00	オンライン(Teams)
令和6年度第7回課題推進者会議	令和6年12月11日(水)16:30～18:00	オンライン(Teams)
令和6年度第8回課題推進者会議	令和7年1月7日(火)16:30～18:00	オンライン(Teams)
令和6年度第9回課題推進者会議	令和7年2月4日(火)16:30～18:00	オンライン(Teams)

③ 研究開発体制の構築、および連携

本プロジェクトの研究開発項目・研究開発課題およびそれらの関係性を図 5-2 に示す。研究開発項目1がプロジェクト全体の目的遂行に責任を持ちつつ、各研究開発項目と連携しながら目標達成を目指す体制が整えられた。上述した毎月の課題推進者会議に加え、個別の課題推進者間の会合も必要に応じて不定期に実施した。素子の設計・作製を産業技術総合研究所、物質・材料研究機構、量子科学技術研究開発機構、東京大学が担当、その評価を横国大が担当しフィードバックするなど、各研究開発機関間の協働により研究開発が進められた。

また、INPIT より招聘した知的財産プロデューサー(知財戦略プロデューサー)を中心に、関係特許の調査および知財戦略の構築も進められた。

研究開発項目 1 : (ダイヤモンド量子メモリ)

- 研究開発課題 1 : (ダイヤモンド量子メモリの研究開発)
- 研究開発課題 2 : (ダイヤモンド量子構造の研究開発)
- 研究開発課題 3 : (ダイヤモンド量子結晶の研究開発)
- 研究開発課題 4 : (ダイヤモンド色中心の研究開発)

研究開発項目 2 : (オプトメカニカル共振器)

- 研究開発課題 1 : (フォトニック結晶光共振器の研究開発)
- 研究開発課題 2 : (フォトニック結晶光共振器実装技術開発)
- 研究開発課題 3 : (フォニック結晶音共振器の研究開発)

研究開発項目 3 : (piezoマイクロ波共振器)

- 研究開発課題 1 : (piezoマイクロ波共振器の研究開発)
- 研究開発課題 2 : (量子制御電子集積回路の研究開発)
- 研究開発課題 3 : (量子インターフェースの理論研究)

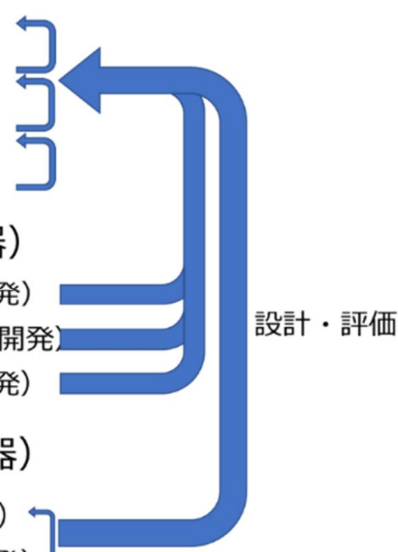


図 5-2. 研究開発項目・研究開発課題、およびそれらの関係性

④ 国際連携による効果的かつ効率的な推進

令和 5 年 1 月～2 月にミュンヘン工科大学・ウルム大学・ザールラント大学の4名の教授を IAS 招聘教授とし、アドバイザリーボードの機能を持たせることとした。

令和 6 年 3 月にデルフト工科大学、同年 7 月にシュトゥットガルト大学、令和 7 年 4 月にザールラント大学と、それぞれ協力覚書(Memorandum of Collaboration, MOC)を締結した。また、令和 6 年 12 月にウルム大学との協力覚書(Memorandum of Understanding, MOU)を締結した。令和 5 年 6 月には、ドイツで開催された QR.X の年会(Statusseminar)にて本プロジェクトの紹介を行った。

更に、国際連携および研究者間の交流を強化すべく、日独の大学・研究機関(QST、横浜国立大学、東京工業大学、京都大学、産業技術総合研究所(AIST)、物質・材料研究機構(NIMS)、沖縄科学技術大学院大学(OIST)、筑波大学、ウルム大学、ザールラント大学、ヨハネス・グーテンベルク大学マインツ、シュトゥットガルト大学)が共同で先端国際共同研究推進事業(ASPIRE)の提案を行って採択され、令和 7 年 2 月から若手研究者の派遣・受け入れなどの活動を推進している。

なお、量子情報研究センター(QIC)は横浜国立大学の YNU 国際ネットワークハブに認定され、大学の協力を得て国際連携活動を極めて活発に推進している。

⑤ 産業界との連携・橋渡し

研究成果の社会実装へ向けた活動として民間企業との共同研究を推進する一方で、量子情報研究センター(QIC)が令和 4 年 4 月より一般社団法人「量子技術による新産業創出協議会(Q-STAR)」の最初のアカデミア会員となり、量子技術の発展と将来の社会実装に向けて多くの会員企業との連携を深める機会を得た。令和 4 年 7 月の Q-STAR 定例会では小坂 PM による「量子インターネット/量子中継」というタイトルの勉強会が、令和 7 年 9 月には Q-STAR 第 26 回量子 MDS 部会講演会にて小坂 PM の講演が行われ、それぞれ企業メンバーとの意見交換も行われた。小坂 PM は、量子 ICT フォーラムの実行委員・推進委員として産業界との連携活動・橋渡しも行った。

⑥ ELSI/数理科学等の取組み

周辺分野の研究者を本分野に引き込むため、令和 4 年度に素粒子・原子核物理研究者のメーリングリストに研究者公募を投稿した。これを受けて KEK で素粒子論を研究していたポスドク 1 名が東京医科歯科大学(現 東京科学大学)のプロジェクト助教となった。課題推進者の越野和樹氏と共に研究を推進し、他のプロジェクトメンバーとも密な議論を重ねてプロジェクト全体に寄与した。

(2) 研究成果の展開

工業所有権情報・研修館(INPIT)から招聘した知的財産プロデューサー(知財戦略プロデューサー)を中心に、量子技術に関わる世界の主要な企業・研究機関について知財の動向調査・分析を行い、それを基に知財戦略を策定、知財獲得に向けた取り組みを開始した。特許出願に際しても、知的財産プロデューサーが中心となって科学技術振興機構(JST)を活用するスキームを構築、国内出願および PCT 出願に結び付けている。

研究成果の社会実装へ向けた取り組みとして、産学官連携コーディネーターを中心に他研究機関や企業との共同研究や連携協定等の締結を積極的に進めているほか、(1)⑤で述べたような企業関係者向けの講演や意見交換の機会も重要視している。

プロジェクト終了後は、本事業で確立したダイヤモンド量子メモリ、色中心形成、ナノ加工、光・音共振器、低温実装、量子制御回路などの要素技術を統合し、マイクロ波―光量子インターフェースおよび量子コンピュータネットワーク技術へ展開する。特に、NV 中心・SiV 中心・SnV 中心などのダイヤモンド色中心を用いて、光子・音子・スピンを高効率に結合するハイブリッド量子デバイスを高度化し、超伝導量子ビットと光量子ビットを接続する量子インターコネクトの実証を目指し、分散型量子計算機の実現に貢献する。これらの成果を大型研究開発プロジェクトや国内外連携に展開し、量子ネットワーク研究拠点形成と社会実装につなげる。

(3) 広報、アウトリーチ

横浜国立大学の量子情報研究センター(QIC)、本プロジェクト、小坂研究室の各ホームページにおいて、研究活動・研究成果・プレスリリース・人材募集などの情報を適宜掲載した。小坂研究室ホームページについては、令和 4 年 10 月に大幅リニューアルし、情報発信性をより高めることが出来た。また、小坂研究室の公式 X アカウントでは、小坂 PM 自身が本プロジェクトに関する情報を頻繁に発信している。

令和 3 年 12 月、令和 4 年 4 月および 7 月に計 3 回の論文発表プレスリリース(そのうち最後のものは文科省での記者レクチャーも実施)により広く研究成果を公表し、日本経済新聞などでも紹介された。令和 5 年 11 月には量子科学技術研究開発機構との連携について、令和 6 年 7 月には理化学研究所との連携について、令和 7 年 6 月には産業技術総合研究所 量子・AI 融合技術ビジネス開発グローバル研究センター(G-QuAT)との連携について、同年 10 月には高エネルギー加速器研究機構(KEK)との連携について、それぞれプレスリリースを行った。

令和 5 年 11 月に日経テックフォーサイトの WEB、令和 5 年 12 月に日経クロステックの WEB に、小坂 PM の研究を紹介する記事が掲載されたほか、令和 6 年 1 月には日経産業新聞に小坂教授紹介の記事が掲載された。令和 5 年 6 月、Newton 大図鑑シリーズ 量子論大図鑑、「第 8 章 もっと知りたい！量子テレポーテーション・量子暗号」で分担執筆を行い、日本経済新聞や各種ネット記事でも内容が掲載された。令和 6 年 2 月に Nature の特集版にムーンショットプロジェクトに関する記事が掲載され、日本経済新聞、日刊工業新聞や各種ネット記事でも内容が掲載された。令和 6 年 8 月、Newton 2024 年 10 月号の特集「“量子時代”のかぎをにぎる もつれる量子」の監修を小坂 PM が行い、この特集記事については 2024 年 8 月 25 日付の朝日新聞デジタルでも取り上げられた。朝日新聞においては、2024 年 10 月 8 日付の朝日新聞デジタル及び 12 月 3 日付の朝日新聞(紙面・デジタル両方に掲載)で小坂 PM へのインタビュー記事が掲載された。また、令和 7 年 3 月の Newton 別冊「量子力学 100 年」でも小坂 PM が分担執筆を行った。同月には米国物理学会(APS Global Physics Summit)にて QIC の紹介動画(APS TV)を配信し、本プロジェクトの取り組みをアピールした。この動画は YouTube でも公開され、公開からの 2 か月間だけでも 3 万 2 千回以上視聴されている。

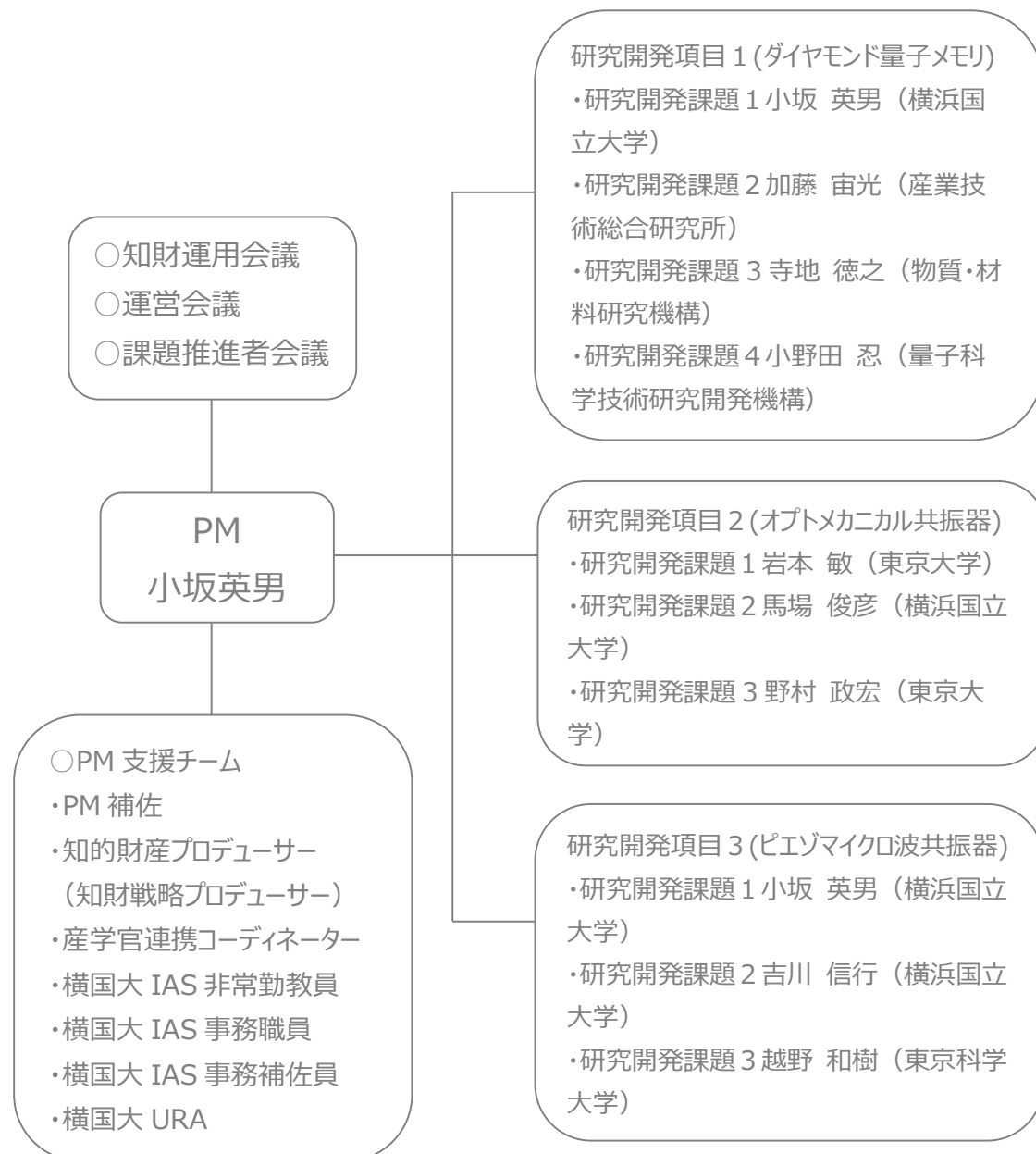
また、小坂 PM は情報通信研究機構(NICT)が主催する NICT Quantum Camp の運営委員かつ講師も担当しており、参加者との科学・技術対話の中でムーンショットの活動についても紹介している。応用物理学会の量子情報工学研究会では、課題推進者の岩本教授が委員長(～2023 年 3 月、2021 年 12 月までは小坂 PM が委員長)、藤井 PM 補佐(～令和 5 年 9 月)が庶務幹事を務め、シンポジウムや研究会などの開催を通して量子コンピュータ全般に対する人々の理解を深めることに貢献した。その活動の一環として、令和 5 年 9 月、第 84 回応用物理学会秋季学術講演会にてシン

ポジウム「量子技術の最先端と社会実装の潮流」の企画、運営を小坂 PM が行った。令和 5 年 10 月および令和 7 年 10 月、QIC との共催により沖縄科学技術大学院大学 (OIST) で開催された「International Workshop on Quantum Information Engineering (QIE2023, QIE2025)」においては、小坂 PM が実行委員としてワークショップの企画、運営を行った。

(4) データマネジメントに関する取り組み

データマネジメントプラン(様式 405-1)に基づき、データを各機関の施錠された実験室内の設計用、測定用、制御用、データ処理用の各 PC に保存しているほか、OneNote や Slack に実験情報などを加え保存している。また、本プロジェクトメンバー用の共用 Slack もあり、メンバー間の情報共有に利用している。特に秘匿が必要な情報についてはプライベートチャンネルを設け、招待されたメンバーしかやり取りできないようにした。

6. 研究開発プロジェクト推進体制図



知財運用会議 構成機関と実施内容

PM、PM 補佐、及び知的財産プロデューサーが連携して、本プロジェクトメンバーのバックグラウンド特許、競合グループの特許、マクロな技術動向等の調査を行い、知財戦略のベースをつくる。また、本プロジェクト研究内容で特許につながりうるコア技術の発掘を行う。

課題推進者会議及び運営会議 実施内容

毎月 1 回程度、PM、課題推進者、PM 補佐、知的財産プロデューサー等のメンバーが集まる課題推進者会議を開催する。各種報告、進捗状況の確認等を行い、課題推進に向けた新たなアイデアの創出を目指す。また重要事項については運営会議を開催し、決議を行う。