

〈一般研究課題〉 ダイヤモンドリング共振器を用いた
量子情報デバイスの開発
助成研究者 豊橋技術科学大学 勝見 亮太



ダイヤモンドリング共振器を用いた 量子情報デバイスの開発

勝見 亮太
(豊橋技術科学大学)

Development of Quantum Information Devices Using Diamond Ring Resonators

Ryota Katsumi
(Toyohashi University of Technology)

Abstract :

Nitrogen-vacancy (NV) centers in diamond have recently attracted significant attention in various light-based quantum technologies. Thanks to their excellent spin properties, NV centers enable sensitive detection of magnetic fields and pressure, and can emit single photons at room temperature—making them promising for quantum computing and quantum communication. As such, they are expected to serve as a key platform for future quantum photonic devices. To realize such devices, strong coupling between NV centers and optical resonators is essential. However, diamond microfabrication is still under development worldwide, and current diamond resonators show relatively low quality factors ($Q \sim 10,000$), mainly due to limitations in reactive ion etching (RIE). Optimization of RIE alone is insufficient for fabricating resonators suitable for quantum applications. In this study, we developed a novel fabrication technique for ultra-high-quality diamond ring resonators using our original transfer-printing process, aiming to advance high-performance diamond-based quantum photonic devices.

1. はじめに

近年、ダイヤモンド中の不純物欠陥である窒素－空孔(NV)センターが、光を用いる様々な量子技術分野から注目を集めている[1]。NVセンターは優れたスピン特性により、磁場や圧力などを高

感度にセンシングすることが可能である。またNVセンターは室温において単一光子発生も可能であり、光を用いた量子計算や量子光通信をも可能にする。よってダイヤモンドNVセンターはセンシング技術から量子情報技術といった幅広い量子光分野で有望視されており、将来の光量子基盤技術の担い手として期待されている[2]。

上記のNVセンターを利用した量子光デバイスの実現に向けて、NVセンターと光共振器との高い相互作用は極めて重要となる。ところがダイヤモンドの微細加工は世界的にもまだ発達段階であり、Harvard大学やMITのグループより報告された微小共振器のQ値は、他のフォトニクスに比べて低い値Q値(～10,000)に留まっている[3]。詳しいダイヤモンドの作製に関するレビューは[3]を参照されたい。これまでの研究では、ダイヤモンドのエッチングが反応性イオンエッチングのみにより行われていたため、同条件の最適化のみで高品質な量子情報処理向けのリング共振器を作製するのは難しい。

そこで本研究では、高度なダイヤモンド量子光デバイスの実現に向けて、独自技術である転写プリント技術を活用した超高品質ダイヤモンドリング共振器の作製技術開発に取り組んだ。今回、提案する方法を通じてNVセンターを内包するダイヤモンドリング共振器の量子センサーとしてのチップ上動作に成功した。

2. 試料および実験方法

ダイヤモンドのナノ構造を作製する技術開発に取り組んだ。試料にはNVセンターを高密度で内包するダイヤモンド基板(DNV-1, Element 6)を用いた。以下にデバイスの作製順序を示す。あらかじめ窒化シリコン(SiN)からなるマスク構造を作製する[図1(a)]。同マスク構造はダイヤモンドのエッチングに対して高い耐性を持つ。また同手法により、非常に小さくかつチャージアップしやすいダイヤモンド基板に電子線描画を施すことなく半導体加工プロセスを適用できる。続いて同マスク構造をダイヤモンド基板に転写プリントし[図1(b)]、垂直方向、および斜め方向より酸素プラズマベースの反応性イオンエッチングを施すことで作製した[図1(c),(d)]。

続いてリング共振器の作製に移る。上記エッチングプロセスで中空化されたリング構造を粘着力の弱い透明フィルムを用いてピックアップし[図1(e)]、同フィルムを反転させてより粘着力の強いフィルムへ転写する[図1(f)]。最後に図1(g)右に示すように、通常の転写プリントプロセスと同様に

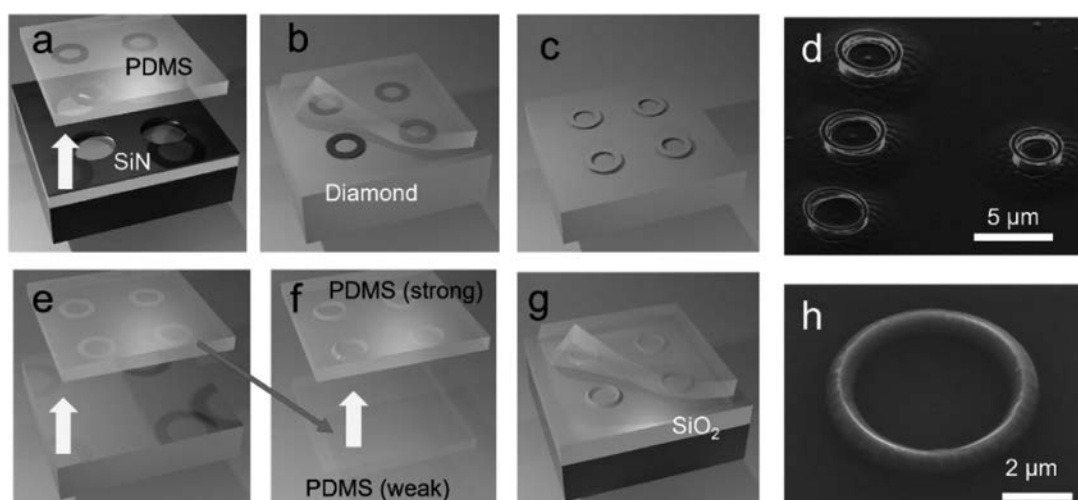


図1 ダイヤモンド微細加工技術の詳細[4]

試料を所望の低屈折材料(SiO_2)上の位置に集積する。図1(h)に転写プリント集積したダイヤモンドリング共振器構造の走査型電子顕微鏡写真を示す。90%を超える高い歩留まりで共振器構造を集積することに成功した。

3. 実験結果

作製したデバイスの特性評価を、共焦点顕微分光により行った。構造上部に設置した対物レンズ(x50)を通じて励起光(532 nm、連続光)の入力と発光読み出しを行った。CCDカメラ付きの分光器で取得信号を解析したところ、図2(a),(b)のスペクトルが得られ、ローレンツ関数でフィッティングを行ったところ、共振器のQ値としては約2000程度と、多数のNVセンターを含む共振器としては非常に高いQ値を得られた。

続いてスピン特性について評価した。ストリップラインを介したマイクロ波の入力により、図2(c)に示すNV中心のスピン共鳴スペクトルを得た。特筆すべき点として、 μm オーダーの構造サイズによりマイクロ波強度の空間的な不均一性を抑制することで、スピン状態間の発光コントラストは 25 % と理論限界とほぼ同等の値を得ることができた。さらに同構造に対して、励起光とマイクロ波を連続的に照射しながら交流磁場に対する発光量変化をロックイン検出したところ、 $1\mu\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$ の感度評価に至った。これらの結果より、高感度なダイヤモンド量子センサーを集積化することに成功したといえる。これらの成果が論文[4,5]に掲載された。

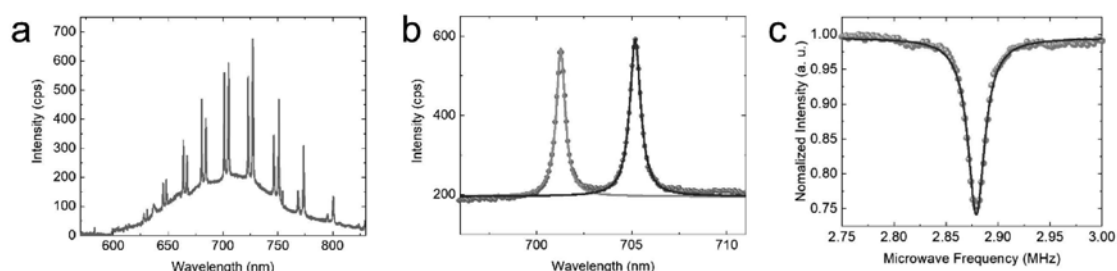


図2 集積ダイヤモンド量子センサーの特性評価[4]

参考文献

- [1] M. Ruf, *et al.*, *Journal of Applied Physics* **130**, 070901 (2021).
- [2] J. F. Barry *et al.*, *Rev. of Mod. Phys.* **92**, 015004 (2020).
- [3] R. Katsumi, *et al.*, *Commun. Eng.* **4**, 85 (2025).
- [4] R. Katsumi, *et al.*, *Commun. Mat.* **6**, 1 (2025).
- [5] R. Katsumi, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **123**, 111108 (2023).