

2026年 1月 5日

電気・電子情報工学 専攻	学籍番号	第 213239 号	指導教員	八井 崇
氏名	高田 晃佑		石川 靖彦	

論文内容の要旨 (博士)

博士学位論文名	フォトニック構造による高感度ダイヤモンド量子磁気センサの開発
---------	--------------------------------

(要旨 1,200 字程度)

量子系の外部物理量との相互作用を読み出すことで量子センシングと呼ばれる高感度測定が成立し、中でも量子磁気センシングについては生体・環境磁場の測定に際して有用である。ダイヤモンド中の点欠陥の窒素-空孔 (NV) 中心は室温・大気圧を含む広い環境下で動作可能な量子系であるため、同系を用いたダイヤモンド量子磁気センサは他の系の場合と比較してより汎用的に活用可能である。さらには原子スケールの点欠陥に由来した高い空間分解能や、磁場ベクトルの測定を可能とする異方的な複数感度軸をといた応用上有益な特性を独自に有する。しかし、ダイヤモンド量子磁気センサの感度に関しては、NV中心のスピン状態を光学的に読み出す際のショットノイズや応答性低下により大きく律速される。また、デバイスのパッケージ化については光学系やバイアス磁場によるサイズ律速が大きい。さらには、量子センサ動作に必須となるバイアス磁場についてはセンサ同士のクロストークやサンプル変質の原因となるため排除が望ましい。そこで本研究では、上記課題の解決が可能な形でフォトニクスに基づく新たなデバイス概念を提唱すると共に、その要素技術を実証した。フォトニクスを通じた光のエンジニアリングにより光学的なスピン読み出しにおける感度律速が抑制可能であることをいくつかの例と共に示した。またパッケージ化の観点では、コンパクトな光集積回路上実装において重要な光導波路間インターフェースの実験実証を行った。また、バイアス磁場フリー化に向けたマイクロ波メタサーフェス構造を提唱した。

まず、フォトニック導波路に着目し、カイラル導波路を用いた高感度化の理論提案を実施した。単一NV中心の微細構造励起時の円偏光選択測を介して、スピン状態がカイラル導波路中の進行方向状態に転写されることで、バルク基板に対しては2桁程度の高感度化が可能であることを数値的に示した。

また、量子磁気センサ素子のスケラブルな光集積回路上実装に向け、ダイヤモンドから成るフォトニック導波路を、窒化シリコン導波路上へとアラインメントトレラントな形でハイブリッド集積した。導波路間の結合部分には斜め交差型の構造を採用し、その動作実証を行った結果、結合効率約46%を得た。

続いて、NV中心の自然放出レート増強が可能な光共振器構造として、プラズモニクスを活用したリング共振器を開発した。ダイヤモンドリング構造を銀薄膜上にハイブリッド集積するという単純なプロセスに基づきながらも、ダイヤモンドを基調としたプラズモニク光共振器の中では最も高いQ値として179が観測された。発光レート増強を通じたダイヤモンド量子磁気センサの高感度化が期待される。

最後に、ダイヤモンド量子磁気センサをバイアス磁場フリーな形で実装するためのスピン制御用マイクロ波素子として、擬表面プラズモンに基づくメタサーフェス構造を検討した。バイアス磁場フリーな状況下で縮退したスピン状態を選択的に制御するための円偏光マイクロ波磁場について、メタサーフェス構造の固有モード内に発現することを見出した。また同構造に基づきながら、円偏光マイクロ波磁場の発生方向に関する三次元的な制御を検討し、バイアス磁場フリーなベクトル磁場計測への応用可能性を示した。

Date of Submission (month day, year) : January 5, 2026

Department of Electrical and Electronic Information Engineering	Student ID Number 213239	Supervisors Takashi Yatsui Yasuhiko Ishikawa
Applicant's name Kosuke Takada		

Abstract (Doctor)

Title of Thesis	Development of highly sensitive diamond quantum magnetometer using photonic structures
-----------------	--

Approx. 800 words

Quantum sensors enable high-sensitivity metrology by interrogating interactions between a quantum system and external physical quantities, including a quantum magnetometer used to examine weak biomagnetism and environmental fields. As a quantum magnetometer, a nitrogen-vacancy (NV) center in diamond is a promising candidate because of its compatibility with a wide range of temperatures and pressures. Furthermore, the NV-based magnetometry provides potentially atomic-scale spatial resolution and applicability to vector magnetometry. However, the sensitivity of the diamond quantum magnetometer is strongly limited by the optical readout of the NV spin state from the diamond substrate, which is dominated by photon shot noise and poor responsivity. In addition, because the diamond quantum magnetometer requires optical components and an external magnet, the miniaturization of devices is becoming difficult. The external magnet also causes unwanted effects, such as crosstalk among magnetometers and deterioration of magnetically sensitive samples; thus, a bias-free configuration is required.

In this thesis, the abovementioned problems were addressed by utilizing photonic structures, upon which an alternative configuration of a diamond quantum magnetometer is discussed. By engineering photon-NV interactions during the optical readout of the spin states, some scenarios of photonic-enhanced sensitivity were demonstrated. In terms of device miniaturization, hybrid integration of a diamond photonic waveguide with its optical coupling to a silicon nitride waveguide was demonstrated, meeting a key requirement for realizing a chip-integrated quantum magnetometer in a scalable manner. Furthermore, a microwave metasurface structure was investigated for the bias-free operation of a diamond quantum magnetometer.

First, as a photonic waveguide structure, a chiral waveguide was introduced to overcome the limited sensitivity. In the chiral waveguide structure, the spin state can be efficiently mapped to the photon's propagation-direction state via a polarization-dependent optical selection rule. Compared with a bulk diamond substrate, the numerically optimized chiral waveguide can enable two orders of magnitude higher sensitivity.

A photonic interface between two waveguides was also investigated for on-chip packaging of the required optical components and for low-loss treatment of optical inputs and outputs. Using a coupler design based on a crossed-waveguide geometry, a diamond photonic waveguide was hybrid-integrated onto a silicon nitride waveguide in an alignment-tolerant manner. The coupling efficiency between the two waveguides was experimentally verified to be exceeding 46 %.

To improve spontaneous emission rate of NV centers, a plasmonic optical cavity was demonstrated. The hybrid integration technique demonstrated the high feasibility of a plasmonic ring cavity, integrating a diamond ring structure onto the surface of silver. The fabricated device showed the highest quality factor as much as 179 among existing diamond-

based plasmonic cavities. The results are promising for improving the sensitivity of quantum magnetometry through cavity-enhanced spontaneous emission from NV centers.

The remaining problem regarding the external magnet was addressed by investigating microwave metasurface structures. The metasurface based on spoof surface plasmon polaritons was shown to be a promising platform for effectively engineering spatial confinement and polarization of microwave magnetic fields. Using the proposed metasurface, the generation of circularly polarized microwave magnetic fields was experimentally demonstrated, enabling selective excitation of NV spin states, which is a critical requirement for eliminating the bias fields. Furthermore, the circular polarization can be three-dimensionally oriented and aligned along NV axes, upon which bias-free vector magnetometry was proposed.