

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：13904

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20428

研究課題名（和文）ハイブリッド集積法による高感度ダイヤモンド磁気量子センサーの開発

研究課題名（英文）Development of a high-sensitivity diamond magnetic quantum sensor using hybrid integration method.

研究代表者

勝見 亮太（Katsumi, Ryota）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：40908505

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：ダイヤモンド中の窒素-空孔(NV)中心からの発光を利用する量子センサーは、高感度な磁気検出が室温で可能なことが理論上知られており、次世代高性能磁気センサーとして大変注目されている。しかし、これまでに報告されたNV中心に基づく磁気検出感度は既存の量子センサーに比べて数桁も検出感が劣っているのが現状である。本研究では、光素子の自在な集積を可能にする転写プリント法を活用することで、グレーティング構造をダイヤモンドNV基板上に集積し、NV中心からの発光取り出し効率を約1.6倍向上させることに成功した。磁気検出感度の改善も確認しており、ダイヤモンド量子センサーの高感度化に重要な成果といえる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の目的とする、ダイヤモンド中集団NV中心からの発光を高効率に取り出す量子光デバイス構造が実現できれば、ダイヤモンド量子センサーにおいて大きな課題であった、磁気検出の飛躍的な感度向上が期待される。これにより、高感度な磁気検出が室温で可能となり、既存の量子センサーに代わる新しい量子磁気センサーの実現が期待される。医療分野への応用のみならず、高感度な磁気検出が必要な物性・化学分野への応用を通じて新たな学術的探求をも可能にする。

研究成果の概要（英文）：A quantum sensor utilizing the luminescence from nitrogen-vacancy (NV) centers in diamond has been theoretically known to enable highly sensitive magnetic detection at room temperature, and has been attracting attention as the next-generation high-performance magnetic sensor. However, the magnetic detection sensitivity based on NV centers reported so far is several orders of magnitude lower than that of existing quantum sensors. In this study, we succeeded in improving the extraction efficiency of luminescence from NV centers by about 1.6 times by integrating a grating structure on a diamond NV substrate using transfer printing, which allows for flexible integration of photonic components. We have also confirmed an improvement in magnetic detection sensitivity, which is an important achievement for the high sensitivity of diamond quantum sensors.

研究分野：ナノフォトニクス

キーワード：ダイヤモンド ハイブリッド集積 量子光学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、ダイヤモンド中の NV 中心が、量子光源や量子メモリー、量子センサーなど幅広い観点から注目を集めている。NV 中心とは、ダイヤモンド格子中の炭素の置換位置に入った窒素と、それに隣接する炭素原子が抜けてできた空孔からなる不純物欠陥であるが、室温下における優れたスピンコヒーレンス特性を有し、光によるスピンへのアクセスが可能のため、磁場や温度、圧力といった様々な物理量の高感度量子センサーとしての応用が期待されている。特に集団の NV 中心を利用するダイヤモンド量子センサーは、理論上、超伝導量子干渉素子といった従来型の磁気センサーに匹敵する磁気感度が室温で到達可能であることから、次世代の高性能磁気センサーとして盛んに研究が進められている。しかし、これまでに報告されてきた集団 NV 中心に基づく磁気検出の感度は高々 pT/ Hz 程度での実証に留まっており、従来型の量子センサーに比べて数桁も性能が劣っているのが現状であった。そこで、ダイヤモンド量子センサーの実用化に向けて、磁気検出感度の向上が至上命題であった。

2. 研究の目的

本研究では、ダイヤモンド量子センサーの磁気検出感度向上に向けて、ダイヤモンド NV 中心からの発光を高効率に検出可能な新奇デバイス構造を、オリジナルのコア技術である、転写プリント法を基軸としたハイブリッド集積法により実現する。

3. 研究の方法

本研究では初めに、ダイヤモンド NV 中心から発光取り出しを最大化するデバイス構造を設計する。そこで申請者は、光素子構造の周期と形状のみで NV 中心からの発光を基板中から高効率に面外へ取り出せる上、光閉じ込め効果による NV 中心の発光効率促進が期待されるブルズアイ型グレーティング構造を利用する。本研究ではより詳細な数値計算によって NV 中心からの発光強度が最大となるよう、グレーティング素子の設計を行う。なお、NV 中心は 637 nm で発光するため、グレーティングに用いる材料系として、同波長における動作と光ロスの低減が可能な上、半導体加工技術の成熟している窒化シリコン (Si_3N_4) の利用を検討する。本研究では、ダイヤモンド NV 中心からの発光を高効率に検出可能なブルズアイ型グレーティング構造を、転写プリント法を基軸としたハイブリッド集積法により実現する。

4. 研究成果

NV 中心の発光波長 (700 nm) で透明かつ半導体加工技術の発達した Si_3N_4 をグレーティングの材質に選定した。グレーティングを導入することで光取り出し効率がおよそ 3 倍になることを電磁界計算により確認している。図 1(a) のように中空構造を有した Si_3N_4 グレーティング構造 (周期 2.1 μm) を作製し、図 1(b) に示す転写プリント法を用いて同構造をダイヤモンド NV 基板上に集積した。図 1(c) に転写プリント集積した Si_3N_4 グレーティング構造の光学顕微鏡写真を示す。試料に励起光 (532 nm) を照射して発光スペクトルを取得したところ、図 1(d) のようにグレーティング構造の導入による光強度の増加を確認した。磁気検出感度の改善も確認しており、ダイヤモンド量子センサーの高感度化に重要な成果といえる。

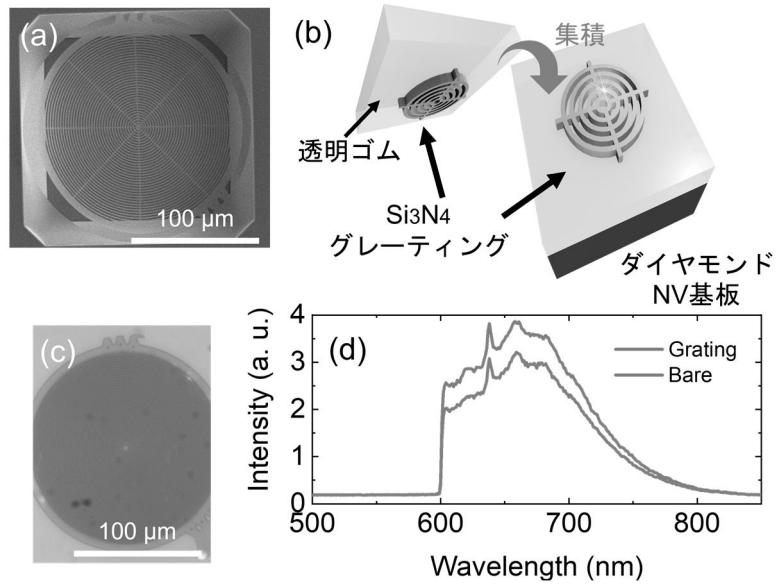


図. 1. (a) Si₃N₄ グレーティングの SEM 画像。(b) 転写プリントプロセスの概略図。(c) 製造されたデバイスの顕微鏡画像。(d) グレーティング構造あり(赤)となし(青)で測定された PL スペクトル。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Katsumi Ryota, Hizawa Takeshi, Kuwahata Akihiro, Naruse Shun, Hatano Yuji, Iwasaki Takayuki, Hatano Mutsuko, Jelezko Fedor, Onoda Shinobu, Ohshima Takeshi, Sekino Masaki, Yatsui Takashi	4. 巻 121
2. 論文標題 Transfer-printing-based integration of silicon nitride grating structure on single-crystal diamond toward sensitive magnetometers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 161103 - 161103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0107854	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 佐藤 大地, 勝見 亮太, 飛沢 健, 鳴瀬 駿, 高田 晃佑, 河合健太, 八井 崇
2. 発表標題 プラズモニック共振器を用いたダイヤモンドNVナノレーザーの検討
3. 学会等名 2023年応用物理学会春季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河合 健太, 勝見 亮太, 飛沢 健, 鳴瀬 駿, 高田 晃佑, 佐藤 大地, 八井 崇
2. 発表標題 単結晶ダイヤモンドにおける中空リング構造の作製
3. 学会等名 2023年応用物理学会春季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高田 晃佑, 勝見 亮太, 飛沢 健, 鳴瀬 駿, 河合 健太, 佐藤 大地, 八井 崇
2. 発表標題 転写プリントSiNマスクを活用したダイヤモンド中空構造の作製
3. 学会等名 2023年応用物理学会春季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名	Ryota Katsumi, Takeshi Hizawa, Akihiro Kuwahata, Shun Naruse, Yuji Hatano, Takayuki Iwasaki, Mutsuko Hatano, Fedor Jelezko, Shinobu Onoda, Takeshi Ohshima, Masaki Sekino, Takashi Yatsui
2. 発表標題	Transfer-printing-based integration of SiN grating structure on diamond toward highly sensitive quantum sensor
3. 学会等名	The 5th International Forum on Quantum Metrology and Sensing (5th IFQMS) (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	鳴瀬 駿, 勝見亮太, 飛沢健, 八井崇
2. 発表標題	転写プリント法によるダイヤモンドナノ構造の新規作製技術の検討
3. 学会等名	第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	Ryota Katsumi, Takeshi Hizawa, Akihiro Kuwahata, Takayuki Iwasaki, Mutsuko Hatano, Fedor Jelezko, Masaki Sekino, Takashi Yatsui
2. 発表標題	Efficient photon extraction of NV centers in diamond by integrating Si ₃ N ₄ grating structure on diamond
3. 学会等名	The 13th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNF013) (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	勝見亮太, 飛沢健, 桑波田晃弘, 岩崎孝之, 波多野睦子, Fedor Jelezko, 関野正樹, 八井崇
2. 発表標題	転写プリント法によるダイヤモンドNV基板上Si ₃ N ₄ グレーティングのハイブリッド集積
3. 学会等名	応用物理学会
4. 発表年	2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------