

# ダイヤモンド窒素-空孔欠陥 (NV) を用いたコンパクトでポータブルな量子センサモジュール

Compact and Portable Quantum Sensor Module  
Using Diamond Nitrogen-Vacancy Centers

出口 洋成\*  
Hiroshige Deguchi

林 司  
Tsukasa Hayashi

西林 良樹  
Yoshiki Nishibayashi

寺本 三記  
Minoru Teramoto

藤原 正規  
Masanori Fujiwara

森下 弘樹  
Hiroki Morishita

水落 憲和  
Norikazu Mizuochi

辰巳 夏生  
Natsuo Tatsumi

USB3.0電源で3Wの低消費電力で動作するダイヤモンドNVセンターを用いたコンパクトでポータブルな量子センサモジュールを開発した。NVセンサは、住友電気工業(株)の独自の超高圧合成技術により製作された高品質な汎用のダイヤモンドを用い、(株)NHVコーポレーションにて電子線照射の処理を行うことで高感度のもを製作した。また、ダイヤ基板をコーナーキューブにすることにより、光電流を直方体の形状に比べて2.1倍に高めることに成功した。加えて、 $\lambda/4$ オープンスタブと $\lambda/4$ 変成器を用いたマイクロ波共振器によりNVセンターを強力に磁気駆動させ、マイクロ波の電力を20dB低減した。これら光学系とマイクロ波系の効率向上により、 $5 \times 10 \times 20$ mmの小さなセンサヘッドで磁界と温度を計測できるコンパクトでポータブルな量子センサモジュールを実現した。本稿では、ダイヤモンドセンサの社会実装に資するべく、これらの技術成果を報告する。

We have developed a portable measuring instrument that uses diamond nitrogen-vacancy (NV) centers. It operates on the USB 3.0 power supply of a laptop computer, consuming only 3 W of power. We use high-quality diamonds produced by Sumitomo Electric Industries, Ltd. and NHV Corporation's electron beam processing to create a sensitive NV sensor. The device's portability is achieved through low power consumption in both the optics and the microwave source. This is made possible by a diamond corner cube that increases the photocurrent by 2.1 times compared to planar diamonds and a microwave resonator using a  $\lambda/4$  transformer and  $\lambda/4$  open stub that reduces the power consumption by 20 dB. The sensor head is compact ( $5 \times 10 \times 20$  mm), and allows for magnetic field and temperature measurements. The successful implementation of these features contributes to the use of diamond sensors in various applications.

本稿は「Applied Physics Express 16, 62004 (2023)」に掲載の論文に、一部加筆したものである。

キーワード：ダイヤモンド、NVセンター、量子センサー、磁場、温度

## 1. 緒言

量子コンピュータや量子暗号通信など、活発に研究されている量子アプリケーションの中で、近い将来に社会実装が期待できる具体的な用途が多数提案されている量子センサのうち、特にダイヤNVセンターが着目されている。NVセンターとは、**図1**のようにダイヤモンド中の炭素原子(C)が窒素原子(N)と空孔(Vacancy)のペアに置き換わったものである。

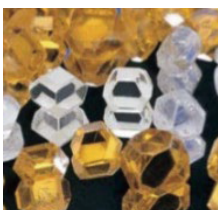


写真1 単結晶ダイヤモンド

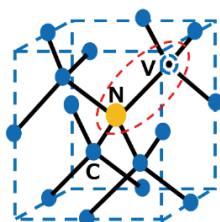


図1 NVセンターの結晶構造

日新電機(株)では、住友電気工業(株) (以下、住友電工) にて高温高圧法<sup>\*1</sup>で合成したダイヤモンドに日新電機グループ企業である(株)NHVコーポレーション (以下、NHVC) の電子線照射<sup>\*2</sup>、もしくは日新イオン機器(株)のイオン注入<sup>\*3</sup>を用いて空孔を作り出し、アニール処理を行ってNVセンターを形成している。

その基本特性は光学的手法や電子スピン共鳴法で測定され<sup>(1),(2)</sup>、電子状態が研究されてきた<sup>(3)~(5)</sup>。NVセンターは緑色の励起光を当てると赤色に蛍光を発生し、その蛍光の強さは磁界やマイクロ波共鳴によって変化する光検出磁気共鳴(Optically Detected Magnetic Resonance, ODMR)という特性を持っている。NVセンターはスピン三重項と呼ばれる基底状態を持ち、 $m_s = \pm 1$ の準位は磁界によってゼーマン分裂を起こす(**図2**)。光で励起すると電子は元の準位によらず最も低い $m_s = 0$ に落ち着くが、ここで $m_s = \pm 1$ に一致した周波数のマイクロ波を照射すると、NVセンターは非発光の状態となる。この共鳴周波数を測定することで、NVセンターは周囲の磁界・電界・温度を敏感に読み

取ることができる。このような動作原理のため、センサーとしての性能を上げるには、励起光とμ波強度の向上と、蛍光の高効率収集の技術が必要である。

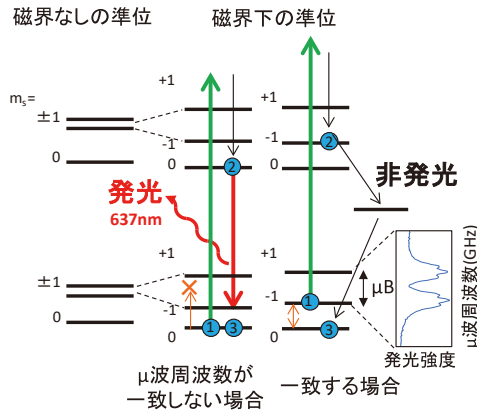


図2 NVセンターの電子状態

さらにNVセンター中のスピンは室温においてもコヒーレント時間が非常に長いことが示され<sup>(6)</sup>、さまざまな量子センサの可能性が提案されてきた<sup>(7)~(10)</sup>。現在ではNMRや<sup>(11)~(13)</sup>、心磁・脳磁センサ<sup>(14)</sup>、車載バッテリーセンサ<sup>(15)</sup>、細胞/生体センサ<sup>(16)、(17)</sup>、素粒子物理センサ<sup>(18)、(19)</sup>など、さまざまなセンサ応用が熱心に研究されている。

従来は光学ベンチ上でNVセンターの基本特性が研究されていたが、現在はこれら実際の応用に向けての検討が進んでいる。Stürnerらは、コインサイズのダイヤモンドセンサを研究し<sup>(20)</sup>課題として、励起光による発熱と、測定対象の磁界に対する電子部品によって生成される磁界の影響を挙げている。また、Herbschlebらは広いダイナミックレンジのパルスNVセンシング法を示し<sup>(21)</sup>、波多野らはCWセンシング法で電気自動車のバッテリーの充放電電流を広いダイナミックレンジで計測できることを示した<sup>(15)</sup>。これらはマイクロ波発生器とセンサ制御を光学台の上で行っていたため、自動車用途には小型化が期待されている。Marianiらは、科学教育のための卓上システムを構築し、量子操作を身近なものとした<sup>(22)</sup>。しかし、これは顕微鏡に類似した光学システムを使用しており、さまざまな外磁場のセンシングシステムとして使用するためのものではなかった。

社会実装に向けて、センサヘッドと励起光の光源、さらにマイクロ波の発生とセンサの制御も含めてコンパクトでポータブルなセンサシステムが求められている。今回の量子センサモジュールでは、励起光源とマイクロ波源およびセンサの制御をノートパソコンのUSB 3.0電源で動作するまで低消費電力に抑え、消費電流0.6A、3Wで駆動できるようにした。ダイヤモンドセンサをシンプルなコーナーキューブにカットすることにより、励起光や蛍光の、吸収

や密度や集光の効率を大幅に向上させた。またλ/4オーブスタブとλ/4変成器を用いたマイクロ波共振器により、マイクロ波源の電力を低減することも示す<sup>(23)</sup>。

## 2. 低消費電力化の技術

### 2-1 励起光源の低消費電力化

ダイヤモンド磁気センサの感度の理論式<sup>(7)</sup>は、比例記号を使用して簡略化すると、

$$\eta \propto \frac{1}{qC\sqrt{N_{NV}T_2^*}} \dots\dots\dots (1)$$

(ここでqは量子効率・集光効率、Cは蛍光コントラスト、 $N_{NV}$ はNVセンター数、 $T_2^*$ はスピンのコヒーレント時間)で表されるため、量子効率・集光効率qが良くなると感度が比例して良くなる。さらに励起光の吸収効率に比例して励起されるNVセンターの数 $N_{NV}$ が増えるため、その数が多いほど、感度が良くなる。これらを向上させるコーナーキューブカット (写真2) について説明する。

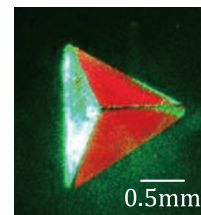


写真2 コーナーキューブダイヤモンドの外観写真

#### (1) 蛍光の集光効率の向上の効果

ダイヤモンドは宝石としてブリリアントカットされた場合は輝いて見えるが、単純な平面やウェハ状ではNVセンターの励起や蛍光検出には不利となる特徴がある。平面のダイヤモンド基板では、屈折率が2.4と周辺の空気より大幅に高いため、蛍光のうち集光できるのは、前方の±12.0°以内に放射される1.1%のみに留まり、残りの光は反射されてダイヤの外に取り出すことができない (図3 (a))。

これに対して、ダイヤモンド基板をコーナーキューブカットすると、蛍光取出面以外が傾斜していることにより蛍光が全反射し、取出面に垂直に向かう光路を増やすことができる。まずコーナーキューブの3面の側面のうちの1面に1回反射して前方を向く方向が3通り (図4 (C)) あり。次に2面に1回ずつ反射して前方を向く方向が3通り (図4 (D)) あり。さらに取出面と逆方向に向かう蛍光は3面に1回ずつ反射して前方を向く1通りがあり (図4 (B))、合計で最大1+3+3+1=8通りの方向の±12.0°で放射される蛍光が集光できるため最大8.8%まで蛍光収集効率が向上する。

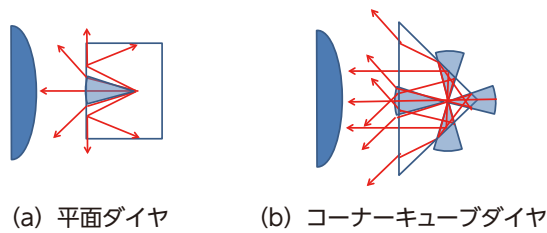


図3 ダイヤ基盤の形状の違いによる集光量の変化

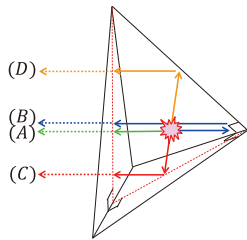


図4 コーナーキューブダイヤ内の蛍光の光路

(2) 励起光の吸収効率の向上の効果

平面のダイヤ基板では、ダイヤ基板の平面に垂直に入射した励起光はそのまま裏面から抜けてしまい、光路長は基板の厚み  $d$  に留まる。これに対して、コーナーキューブカットのダイヤ基板は、底面に垂直に入射した励起光は、斜面の3面に1回ずつ反射して入射方向に戻る全反射の機能を持つ (図5 (b))。これにより光路長が平面ダイヤの2倍に長くなり、励起される NV センター数  $N_{NV}$  が2倍となることで、励起光の光吸収の効率が (途中の吸収が小さい場合には) 2倍に向上する。励起光の吸収効率の効果の比較を示す (図5)。

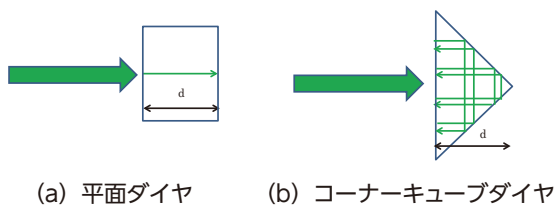


図5 ダイヤ基盤の形状の違いによる励起光の光路長の変化

(3) 励起光のパワー密度の向上の効果

励起光のパワー密度を1とすると、平面のダイヤ基板では、正面からの励起光のみが NV センターに到達するため、パワー密度は1のままである。コーナーキューブカットのダイヤ基板では図5の経路の逆をたどり、コーナーキューブの3面の側面の1面に1回反射して到達する経路が3通り (図4 (C))、2面に1回ずつ反射して到達する経路が3通り

(図4 (D))、3面に1回ずつ反射して到達する経路が1通りあり (図4 (B))、合計で  $1+3+3+1=8$  通りの経路の励起光が照射されることになり (途中での吸収が小さくそれぞれで全反射した場合、の最大で) NV センターに照射される励起光のパワー密度が8倍に向上する。

(4) コーナーキューブカットの感度向上の効果

これらの向上効果の合計値を計算すると、蛍光を集光する光学系 (光ファイバや対物レンズ) の開口数を0.5、また途中での吸収が小さく、光ファイバのコアまたは対物レンズはダイヤ基板より十分大きい場合を考えると、集光効率  $q$  は8倍、また励起光の吸収効率  $N_{NV}$  を2倍として先述の感度の理論式に当てはめると感度は最大で  $8 \times \sqrt{2} \approx 11$  倍の向上が期待できる。

(5) 比較実験

平面とコーナーキューブカットで、ダイヤ基板から測定される蛍光量を比較した。本稿での全ての試料は窒素を含む Ib 型ダイヤモンドを用い、NHVCにて3MeV、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ の電子線照射を行い、真空中900°Cで1時間アニール処理を行った。コーナーキューブの寸法は斜辺1.3mm、底辺1.7mmとし、両サンプルともコア径  $\phi 400 \mu\text{m}$ 、NA 0.5のマルチモード光ファイバを端に設置し、フォトダイオードに接続した。励起光は波長515nm、ファイバ端で強度3mWとした。蛍光の光電流で比較すると、平面のダイヤ基板では610nA、コーナーキューブのダイヤ基板では1300nAとなり、低消費電力のレーザーダイオードでもS/N比の良いデータ取得が可能になった。

実験値 (2.1倍) と (4) で示した理論値 (11倍) との乖離については、実験で用いた光ファイバのコア径 ( $\phi 400 \mu\text{m}$ ) に対して、ダイヤの底辺1.7mmが大きく、光ファイバのコアはダイヤの底面の約1/10を覆うに留まるため、ダイヤの側面で反射した光が光ファイバに入らず外に漏れてしまったためと考えている。この実験により、光ファイバのコア径とダイヤのサイズの最適化や、一辺が1mmを下回るダイヤの加工や取り扱いが課題であることがわかった。

2-2 マイクロ波源の低消費電力化

(1) マイクロ波の電流を大きくする効果

NV センターを強く磁気共鳴させるにはマイクロ波の磁界を強くする必要があり、出力が  $P$  (W) で特性インピーダンスが  $Z$  ( $\Omega$ ) の高周波回路の電流は

$$I = 2 \times \sqrt{P/Z} \text{ A}_{\text{rms}} \dots\dots\dots (2)$$

であるため、負荷のインピーダンスが  $0 \Omega$  の時に最大値が得られる。そのためには負荷インピーダンスを  $0 \Omega$  に近づけつつ、負荷から電源側を見た際の線路の特性インピーダンスと電源の短絡抵抗を下げることになる。

$\lambda/4$  オープンスタブの付け根を基準面とすると、基準面から先端を見た負荷インピーダンスを  $0$  ( $\Omega$ ) に近づけて直列共振させるため、 $\lambda/4$  オープンスタブを用いた。また、



基準面から電源側を見た際の線路の特性インピーダンスと電源の短絡抵抗とを下げるため、インピーダンス変換に  $\lambda/4$ 変成器を用いた。

(2) マイクロ波の磁界を強くする効果

次にマイクロ波の磁界を強くするための  $\lambda/4$ オープンスタブの線路の形状と特性インピーダンスについて説明する。

線路の特性インピーダンスは

$$Z_0 = \sqrt{L/C} \ (\Omega) \quad \dots\dots\dots (3)$$

であり、Lは単位長当たりのインダクタンス (H/m)、Cは単位長当たりのキャパシタンス (F/m) である。単位長当たりのインダクタンスは単位長当たりの磁束量であり、 $\lambda/4$ オープンスタブの線路の幅が同じであれば、磁束密度に比例する。

このことから、 $\lambda/4$ オープンスタブで磁界を強くするため、単位長あたりのインダクタンスの大きい、つまり特性インピーダンスの大きい線路形状を採用する必要がある。また、導体配置の対称な線路形状では、導体間に均一なマイクロ波磁界が発生する。線路の特性インピーダンスが大きいこと、導体配置が対称なことにより、平行2線の線路形状を採用した。

このような考察から、インピーダンス変換を  $\lambda/4$ 変成器とし、直列共振を  $\lambda/4$ オープンスタブとすることで、マイクロ波を強くする共鳴器を構成した (図6)。

$\lambda/4$ 変成器の線路は特性インピーダンスは  $Z_0 = 20\Omega$  のマイクロストリップラインとし、銅箔テープとポリイミドシートで試作した。 $\lambda/4$ オープンスタブの線路は特性インピーダンスは  $Z_0 = 200\Omega$  の平行2線とし、銅ワイヤで試作した。

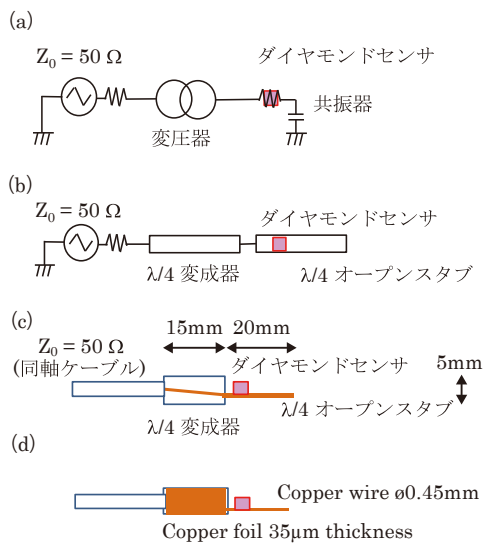


図6  $\lambda/4$ 変成器と $\lambda/4$ オープンスタブで構成されたマイクロ波共鳴器

- (a) 集中定数回路による共鳴器の構成
- (b) 分布定数線路による共鳴器の構成
- (c)  $\lambda/4$ 変成器と $\lambda/4$ オープンスタブで構成した共鳴器の上面図
- (d) (c) の下面図

(3) 比較実験

この共鳴器を50Ω終端のマイクロストリップラインや、50Ω終端のコプレーナ線路<sup>(24)</sup>と比較した。また、電気回路の双対性から、電流と電圧、開放と短絡、直列共振と並列共振を入れ替えて構成した  $\lambda/4$ ショートスタブの共鳴器とも比較した。共鳴器の性能はNVセンターの磁気共鳴した時の蛍光の減光量で評価し、励起光は波長515nm、15mW、スポットサイズ60×120μmとした。光学系は市販の顕微鏡を改造し、照明の位置にLDを、接眼レンズの位置にPDを置いた。マイクロ波の磁界の方向は(100)基板に対して<100>方向または<010>方向とした。直流バイアス磁界は印加せず、磁気遮蔽は行わなかった。共鳴器の特性の評価はベクトルネットワークアナライザ (NanoVNA) で行った。本比較実験の結果を図7と写真3に示す。

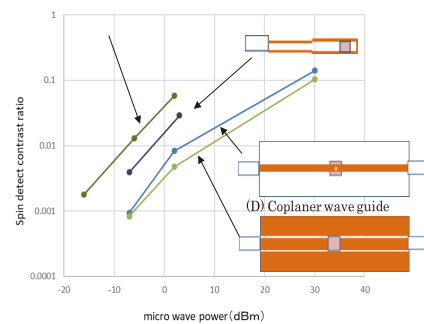


図7 各形状の共鳴器のスピン検出コントラスト比とマイクロ波パワーの関係

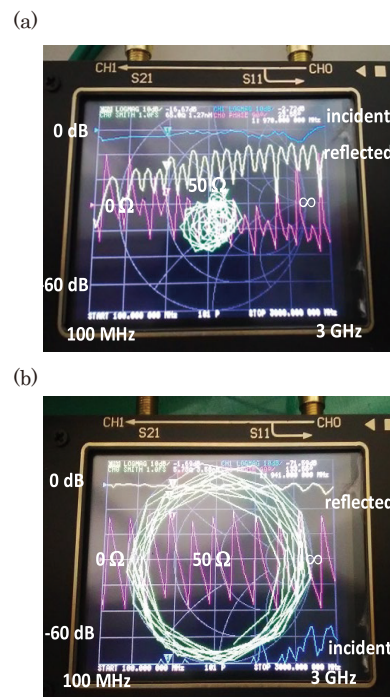


写真3 各形状の共鳴器のスミスチャート

- (a) コプレーナ線路による共鳴器のスミスチャート
- (b)  $\lambda/4$ 変成器と $\lambda/4$ オープンスタブによる共鳴器のスミスチャート

本図のように、 $\lambda/4$ 変成器と $\lambda/4$ オープンスタブで構成されたマイクロ波共鳴器により、他の線路に比べ約20dB低いマイクロ波出力で同等のコントラスト比を得ることができ、2dBm未満でCW-ODMRが計測可能になった。これにより、マイクロ波を発振するICの出力（例えばADF4351、出力-4~5dBm）を増幅せずに使用できるため、消費電力も低減を実現した。

また、ベクトルネットワークアナライザでこの共鳴器性能を測定すると、50 $\Omega$ 終端のコプレーナ線路では100MHz~3GHzの広い範囲で透過S21パラメータが1に近く、スミスチャートで50 $\Omega$ 付近に留まる特性が得られた。 $\lambda/4$ 変成器と $\lambda/4$ オープンスタブのマイクロ波共鳴器では反射S11パラメータが1に近く、スミスチャートで50 $\Omega$ 付近に近づかない特性が得られた。

### 3. ダイヤモンドNVセンサモジュール

#### 3-1 センサヘッドの構成

図8と写真4にセンサヘッドの構成を示す。マイクロ波の伝送は同軸ケーブルで行い、励起光と蛍光の伝送は1本の光ファイバで行った。先述のコーナーキューブカットのダイヤモンド基板と、 $\lambda/4$ 変成器と $\lambda/4$ オープンスタブで構成したマイクロ波共鳴器を使用した。

センサヘッドは5mm×10mm×20mmの直方体形状とし、マイクロ波共鳴器は $\lambda/4$ 変成器と $\lambda/4$ オープンスタブの接続部と、 $\lambda/4$ オープンスタブの中央の、計2か所で折り曲げてセンサヘッドをコンパクトにした。

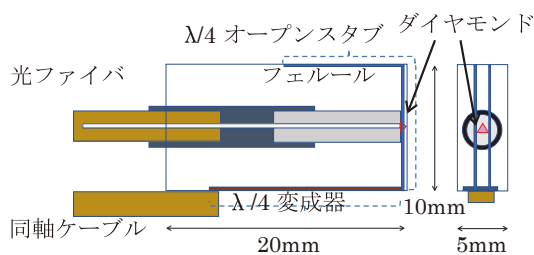


図8 センサヘッドの構造

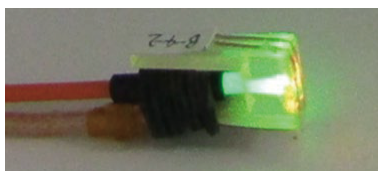


写真4 センサヘッドの外観

#### 3-2 制御モジュールの構成と計測機能

制御モジュールは、①励起光の発生、②マイクロ波の発

生、③蛍光の受光、④センサの制御を行う。表1に、制御モジュールの主要な部品構成と計測機能を示す。

表1 制御モジュールの主要な部品構成と測定機能

主要部品	
マイコン	Arduino Due
励起光源 レーザーダイオード	Thorlabs L515A1, wavelength 515 nm, 10 mW
フォトダイオード	Hamamatsu Photonics S6967 (Si series)
光ケーブル	Thorlabs M126L01, core diameter 400 $\mu$ m $\phi$ , NA 0.5
マイクロ波 シンセサイザー	Analog Devices ADF4351 (Kit Board)
受光回路オペアンプ	TI OPA627
直流電源 DCDCコンバータ	TDK-Lambda CC1R5-0512DF-E ( $\pm$ 12 V output)
計測機能	
CW-ODMR	-1 dBm, 2.77~2.97 GHz (100kHz間隔) 230秒
温度測定 (ゼロ磁場下)	-10~70 $^{\circ}$ C (1.4 $^{\circ}$ C刻み) 0.7秒
蛍光強度測定 (マイクロ波周波数固定)	-1 dBm, 2.88 GHz 0.015秒
温度測定 (商用AC磁界下)	-40~200 $^{\circ}$ C (1.4 $^{\circ}$ C刻み) 15秒

#### 3-3 センサモジュールによる測定例

センサモジュールに搭載した測定機能のうち、CW-ODMRによる測定例を示す(写真5)。測定では0~1mTでダイヤモンド結晶(100)方向のDC磁界を印加してセンサーモジュールの感度を測定した。蛍光強度は500nAで蛍光ノイズは50pA<sub>rms</sub>であった。図9より、半値幅は8MHz、コントラスト比は1.3%であった。(100)方向の磁界はN-Vの結合方向の(111)から54.7 $^{\circ}$ 傾いているため、磁気回転比は28MHz/mT  $\times$  cos 54.7 $^{\circ}$  = 16MHz/mTとなる。この時の蛍光のS/N比は50pA/500nA = 0.0001、また蛍光の測定は1秒間に9回行っているので、

$$8\text{MHz} / 16 / (0.013/0.0001) / \sqrt{9} = 1.34 \mu\text{T} / \sqrt{\text{Hz}}$$

相当と見積もった。現状の感度に対しては、光ファイバのコア径とダイヤモンドのサイズの最適化や、一辺が1mmを下回るダイヤモンドの取り扱いの改善や、NVセンター濃度の選択の最適化により、向上できると考えている。

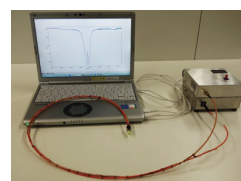


写真5 ノートPCに接続されたセンサモジュール

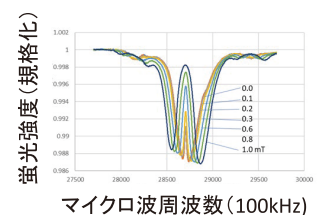


図9 CW-ODMR測定結果

## 4. 結 言

用途開発のデモ機として、卓上の USB 電源で測定できる量子センサーを開発した。コンパクト化とポータブル化と低消費電力化を実現するダイヤモンド基板のカットの技術（コーナーキューブカット）とマイクロ波共鳴器の技術（ $\lambda/4$ 変成器と $\lambda/4$ オープンスタブ）を紹介した。ダイヤモンドのこれらの技術がダイヤモンド磁気センサの社会実装に資することを願う。

## 5. 謝 辞

森下より東北大学先端スピントロニクス研究開発センタースピントロニクス学術連携研究教育部門に謝意を申し上げます。また本研究は部分的に MEXT Q-LEAP (No. JPMXS0118067395) とスピントロニクス学術連携研究教育センター (Spin-RNJ) の支援を受けました。

### 用語集

#### ※1 高温高压法

High Pressure High Temperature (HPHT) : 超高压発生装置を用いて、天然ダイヤモンドの結晶が生まれる環境を再現し、原料となる黒鉛をダイヤモンドへ変換させる方法である。

#### ※2 電子線照射

高エネルギーの電子線をサンプルに照射する技術で、ダイヤモンドなど樹脂・高分子製品の架橋処理等に用いられる。

#### ※3 イオン注入

高エネルギーのイオンをサンプルに照射する技術で、半導体などのドーピング層形成に用いられる。

### 参 考 文 献

- (1) G. Davies et al., Proc. R. Soc. Lond. A. 348, 285 (1976)
- (2) J. H. N. Loubser et al., Diamond Research.. 11, 4 (1977)
- (3) A. Lenef, S. C. Rand et al., Phys. Rev. B 53, 13441 (1996)
- (4) L. J. Rogers et al., New J. Phys. 17, 013048 (2015)
- (5) M. W. Doherty et al., Phys. Rev. B 85, 205203 (2012)
- (6) E. D. Herbschleb et al., Nat. Commun. 10, 3766 (2019)
- (7) J. M. Taylor et al., Nat. Phys. 4, 810 (2008)
- (8) T. Wolf et al., Phys. Rev. X 5, 041001 (2015)
- (9) C. L. Degen et al., Rev. Mod. Phys. 89, 035002 (2017)
- (10) 左亦康 他、住友電工テクニカルレビュー第198号、67 (2021)
- (11) S. Schmitt et al., Science 356, 832 (2017)
- (12) D. Glenn et al., Nature 555, 351 (2018)
- (13) E. D. Herbschleb et al., Phys. Rev. Applied 18, 034058 (2022)
- (14) K. Arai et al., Commun. Phys. 5, 200 (2022)
- (15) Y. Hatano et al., Sci Rep. 12, 13991 (2022)
- (16) R. Igarashi et al., Nano Lett. 12, 5726 (2012)
- (17) B. S. Miller et al., Nature 587, 588 (2020)
- (18) X. Rong et al., Nat. Commun. 9, 739 (2018)

- (19) S. Chigusa et al., arXiv2302.12756 (24 Feb 2023)
- (20) F. M. Stürner et al., Diam. Relat. Mater. 93, 59 (2019)
- (21) E. D. Herbschleb et al., Nat. Commun. 12, 306 (2021)
- (22) G. Mariani et al., AIP Adv. 12, 065321 (2022)
- (23) H. Deguchi et al., Appl. Phys. Express 16, 62004 (2023)
- (24) Y. Masuyama et al., Rev. Sci. Instrum. 89, 125007 (2018)

### 執 筆 者

出口 洋成\* : 日新電機(株) 主幹  
技術士 (電気電子部門)



林 司 : 日新電機(株) 参与  
博士 (工学)



西林 良樹 : アドバンストマテリアル研究所 主幹  
博士 (工学)



寺本 三記 : 住友電工ハードメタル(株) 主席



藤原 正規 : 京都大学 特定研究員  
博士 (理学)



森下 弘樹 : 東北大学 准教授  
博士 (工学)



水落 憲和 : 京都大学 教授  
博士 (理学)



辰巳 夏生 : 日新電機(株) 主幹  
博士 (工学)



\*主執筆者

出典元

出口 洋成 他、「ダイヤモンドNVセンターを用いたコンパクトでポータブルな量子センサモジュール」、日新電機技報 Vol.68 No. 2、pp.63-70 (2023年12月)