

## 一般論文

関連するSDGs



## 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

Compact and Portable Quantum Sensor Module Using  
Diamond NV Centers

出口 洋 成 Deguchi Hiroshige	林 司 Hayashi Tsukasa
済 藤 紘 矢 Saito Hiroya	西 林 良 樹 Nishibayashi Yoshiki
寺 本 三 記 Teramoto Minori	藤 原 正 規 Fujiwara Masanori
森 下 弘 樹 Morishita Hiroki	水 落 憲 和 Mizuochi Norikazu
辰 巳 夏 生 Tatsumi Natsuo	

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。

### 概要

この度、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、住友電気工業株式会社の独自の超高压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、株式会社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、高感度のものを製作した。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。

### Synopsis <sup>(23)</sup>

We developed a compact and portable measuring instrument using diamond NV centers that operates on the USB 3.0 power supply of a laptop computer with the low power consumption of 3 W. Using high-quality general-purpose diamonds manufactured using Sumitomo Electric Industries, Ltd.'s unique high-pressure high-temperature method, and electron beam process by NHV Corporation, we produced a highly sensitive NV sensor. Its portability is achieved by the low power consumption of the optics, realized by the diamond corner cube that enhanced the current of the photodiode to 2.1 times higher than that of the planar diamond, and that of the microwave source, reduced by 20 dB, which was realized by a microwave resonator using a  $\lambda/4$  transformer and a  $\lambda/4$  open stub that strongly magnetically drives the NV center. The compact sensor head with the size of  $5 \times 10 \times 20$  mm enables magnetic field and temperature measurement. These results contribute to the social implementation of diamond sensors.

Used with permission of Institute of Pure and Applied Physics., from "Compact and portable quantum sensor module using diamond NV centers", Hiroshige Deguchi, Tsukasa Hayashi, Hiroya Saito, Yoshiki Nishibayashi, Minori Teramoto, Masanori Fujiwara, Hiroki Morishita, Norikazu Mizuochi, and Natsuo Tatsumi, 16, 062004 (2003) of copyright; permission conveyed through Copyright Clearance Center, Inc.

## 1. はじめに

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、特にダイヤモンド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。

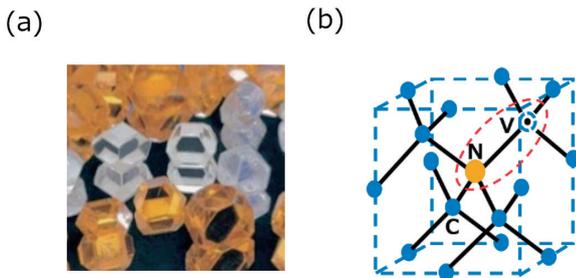


図1 単結晶ダイヤモンドの外観 (a) とNVセンターの結晶構造 (b)

当社では、住友電気工業株式会社(以下、住友電工)にて合成したダイヤモンドに当社グループ企業である株式会社NHVコーポレーション(以下、NHVC)の電子線照射、もしくは日新イオン機器株式会社のイオン注入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。

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。

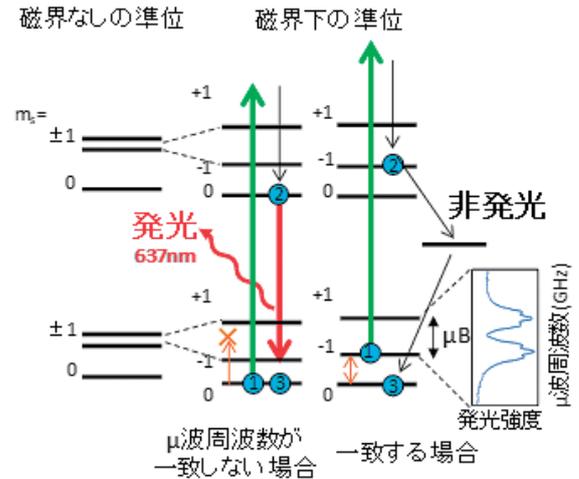


図2 NVセンターの電子状態

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、集光の効率を大幅に向上させた。また $\lambda/4$ 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、マイクロ波源の電力を低減することも示した<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、集光の効率を大幅に向上させることができた (図3)。

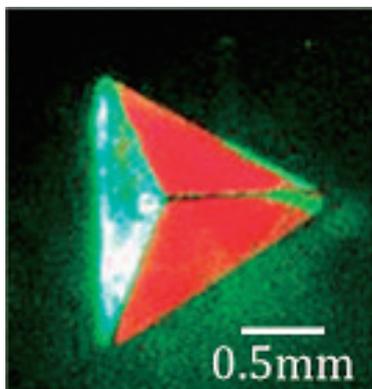


図3 コーナーキューブダイヤモンドの外観写真<sup>(23)</sup>

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、

$$\text{式 } \eta \propto \frac{1}{qC\sqrt{N_{NV}T_2^*}}$$

(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センターの数が増えるため、その数が多いほど、感度が良くなる。コーナーキューブカットは低消費電力化と感度の向上の両方に役立つことができる。

#### 2. 1. 1 蛍光の集光効率の向上の効果

ダイヤモンド基板をコーナーキューブカットにすると、蛍光の集光の量子効率を向上できる。一例として、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(NA)を0.5、ダイヤモンドの屈折率を2.4として、蛍光の集光効率を計算する。この時、ダイヤモンドの内部での吸収を無視し光ファイバのコアまたは対物レンズはダイヤモンド基板より十分大きいとすると、ダイヤモンドの屈折率が高いため、平面のダイヤモンド基板では、蛍光のうち集光できるのは、前方の $\pm 12.0^\circ$ に放射される1.1%のみに留まる(図4(a))。これに対して、コー

ナーキューブカットのダイヤモンド基板では、それに加えて、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、2面に1回ずつ反射して前方を向く方向が3通り、3面に1回ずつ反射して前方を向く方向が1通りあり、合計で、すべての方向で全反射した場合の最大で、 $1+3+3+1=8$ 通りの方向の $\pm 12.0^\circ$ で放射される蛍光が集光できる(図4(b))。

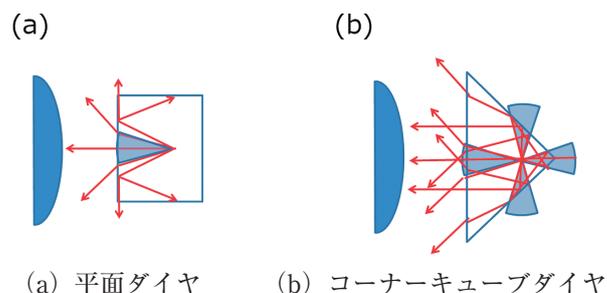


図4 デイヤ基板の形状の違いによる集光量の変化<sup>(23)</sup>

図4(b)の例では集光できる蛍光は最大8.8%に向上する。図5に、コーナーキューブダイヤモンド内の蛍光の光路を示す。

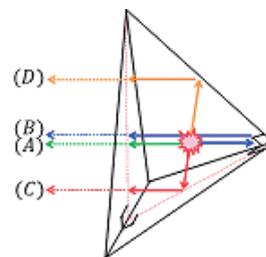


図5 コーナーキューブダイヤモンド内の蛍光の光路<sup>(23)</sup>

#### 2. 1. 2 励起光の吸収効率の向上の効果

ダイヤモンド基板をコーナーキューブカットにすると、励起光の光吸収の効率を向上できる。平面のダイヤモンド基板では、ダイヤモンド基板の平面に垂直に入射した励起光の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モンド基板はリトロフレクターのため、底面に垂直に入射した励起光は、側面の3面に1回ずつ反射して入射方向に戻り、光路長が平面ダイヤモンドの2倍長くなる。これにより、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6)。

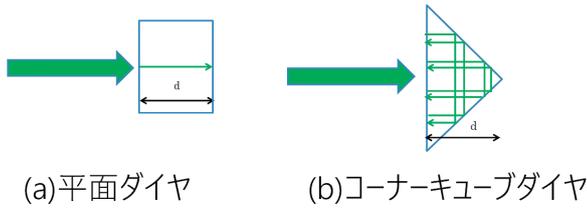


図6 ダイヤ基板の形状の違いによる励起光の光路長の変化<sup>(23)</sup>

### 2. 1. 3 励起光のパワー密度の向上の効果

ダイヤモンド基板をコーナーキューブカットにすると、励起光のパワー密度を向上できる。励起光のパワー密度を1とすると、平面のダイヤモンド基板では、正面からの励起光のみがNVセンターに到達する。コーナーキューブカットのダイヤモンド基板では、それに加えて、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、2面に1回ずつ反射して到達する経路が3通り、3面に1回ずつ反射して到達する経路が1通りあり、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、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。励起光のパワー密度の比較を図6 (b) に示す。

### 2. 1. 4 コーナーキューブカットの感度向上の効果

蛍光を集光する光学系（光ファイバーや対物レンズ）の開口数を0.5として、また途中での吸収が小さく、光ファイバーのコアまたは対物レンズはダイヤモンド基板より十分大きい場合を考える。蛍光の集光効率を計算すると、集光効率は8倍、また励起光の吸収効率を計算すると2倍の効果が期待できる。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。

### 2. 1. 5 比較実験

平面とコーナーキューブカットで、ダイヤモンド基板から測定される蛍光量を比較した。コーナーキューブの寸法は斜辺1.3mm、底辺1.7mmとした。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。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。蛍光の光電流で比較すると、平面のダイヤモンド基板では610nA、コーナーキューブのダイヤモンド基板

では1300nAであった。

実験値(2.1倍)と2. 1. 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ーのコア径( $\phi 400 \mu\text{m}$ )に対して、ダイヤモンドの底辺1.7mmが大きく、光ファイバーのコアはダイヤモンドの底面の約1/10を覆うに留まるため、ダイヤモンドの側面での反射光が光ファイバーに十分入らなかったためと考えている。また、Ib型ダイヤモンドのため内部で吸収された影響も考えられる。この実験により、光ファイバー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加工や取り扱いが課題であることが分かった。

## 2. 2 マイクロ波源の低消費電力化

マイクロ波源の消費電力の低減を目的として、マイクロ波の出力を低減させ、NVセンターに照射するマイクロ波の磁界を強くするため、マイクロ波共振器を $\lambda/4$ 変成器と $\lambda/4$ オープンスタブで構成したので解説する。

### 2. 2. 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るので、マイクロ波の電流を大きくした。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

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

であり、負荷のインピーダンスが $0 \Omega$ の時に最大値が得られる。つまり、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で、マイクロ波の電流を大きくすることができる。

$\lambda/4$ オープンスタブの付け根を基準面と考え、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. 2. 2 マイクロ波の磁界を強くする効果

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考察する。

線路の特性インピーダンスは

$$Z_0 = \sqrt{L/C} \text{ (\Omega)}$$

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と、導体配置が対称なことより、平行2線の線路形状を採用する必要がある。

このような考察から、インピーダンス変換を $\lambda/4$ 変成器により、直列共振を $\lambda/4$ オープンスタブにより、マイクロ波共鳴器を構成した(図7)。

$\lambda/4$ 変成器の線路はマイクロストリップラインで特性インピーダンスは $Z_0=20\Omega$ 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平行2線で特性インピーダンスは $Z_0=200\Omega$ とし、銅ワイヤで試作した。

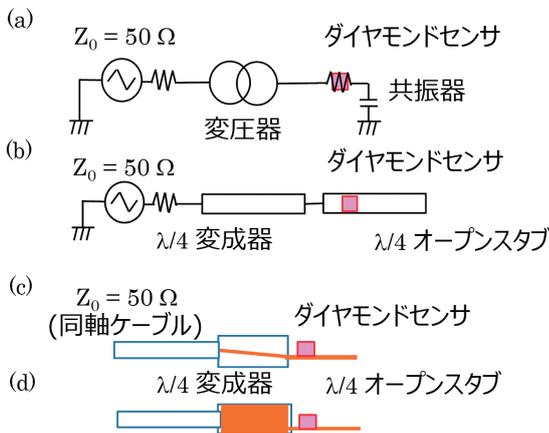


図7  $\lambda/4$ 変成器と $\lambda/4$ オープンスタブで構成されたマイクロ波共鳴器<sup>(23)</sup>

- (a) 集中定数回路による共鳴器の構想。
- (b) 分布定数線路による共鳴器の構想。
- (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。

### 2. 2. 3 比較実験

この共鳴器を $50\Omega$ 終端のマイクロストリップラインや、 $50\Omega$ 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。なお、NVセンターの磁気共鳴した時の蛍光の減光量で比較し、励起光は波長515nm、15mW、スポットサイズ $60\times 120\mu\text{m}$ とした。光学系は市販の顕微鏡を改造し、照明の位置にLD(レーザーダイオード)を、接眼レンズの位置にPD(フォトダイオード)を置

いた。マイクロ波の磁界の方向は(100)基板に対して $\langle 100 \rangle$ 方向または $\langle 010 \rangle$ 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8に示す。

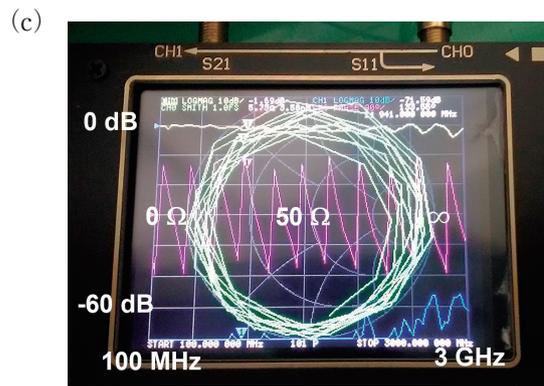
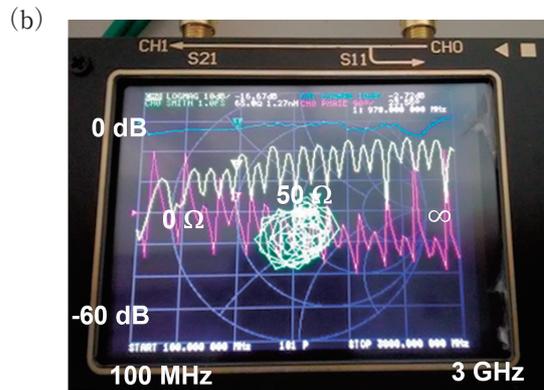
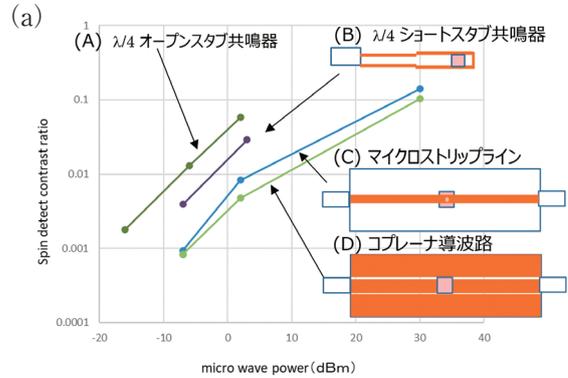


図8 各形状の共鳴器の比較<sup>(23)</sup>

- (a) 各形状の共鳴器のスピンドットコントラスト比とマイクロ波パワーの関係
- (b) コプレーナ線路による共鳴器のスミスチャート
- (c)  $\lambda/4$ 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 $\lambda/4$ オープンスタブでマイクロ波共鳴器を構成することにより、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、2 dBm未満でCWでのODMRが計測できた。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-4~5 dBm）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の測定結果を見ると、50Ω終端のコプレーナ線路では100MHz~3GHzの広い範囲でS21パラメータが1に近く、スミスチャートで50Ω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S11パラメータが1に近く、スミスチャートで50Ω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9 (a), (b) 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。

また、センサヘッドは5mm×10mm×20mmの直方体形状とした。センサヘッドをコンパクトにするため、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か所で折り曲げて使用した。

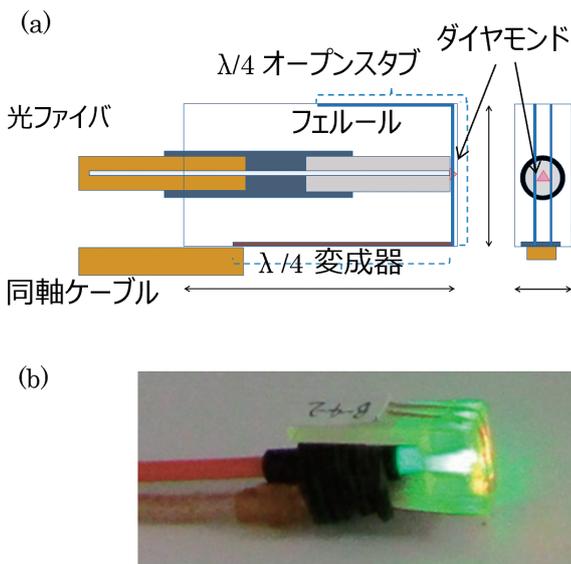


図9 センサヘッドの構成<sup>(23)</sup>

(a) センサヘッドの構成 (b) センサヘッドの写真

#### 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 515nm, rated 10mW
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	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	-1dBm, 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)	-1dBm, 2.88GHz 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 (図10)。

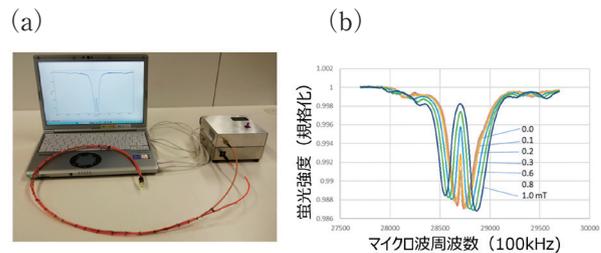


図10 センサモジュールの構成と測定例<sup>(23)</sup>

(a) ノートPCに接続されたセンサモジュール  
(b) CW-ODMR測定結果

測定では0~1mTで100方向のDC磁界を印加した。蛍光強度は500nAで蛍光ノイズは50pArmsであった。この時の感度は図10 (b) より、半値幅を8MHz、コントラスト比の1.3%を読み取り、100方向の磁界に対する磁気回転比を28MHz/mT  $\times$  cos 54.7 $^{\circ}$  = 16MHz/mTとし、蛍光のS/Nはこの時は

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  
 ヤのサイズの最適化や、一辺が1mmを下回るダイ  
 ヤ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。

#### ■ 4. 結言

用途開発のデモ機として、卓上のUSB電源で計測で  
 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

森下より東北大学スピントロニクス学術連携研究教  
 育センター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。

#### 参考文献

- (1) G. Davies et al., Proc. R. Soc. Lond. A. 348, 285 (1976)
- (2) I.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, 住友電気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., "Compact and portable quantum sensor module using diamond NV centers", Applied physics express,16,062004 (2023), <https://doi.org/10.35848/1882-0786/acd836>
- (24) Y. Masuyama et al., Rev. Sci. Instrum. 89, 125007 (2018)

執筆者紹介



**出口 洋成** Deguchi Hiroshige  
研究開発本部  
ビーム・プラズマ技術開発研究所  
主幹  
技術士(電気電子部門)



**林 司** Hayashi Tsukasa  
研究開発本部  
ビーム・プラズマ技術開発研究所  
参与 博士(工学)



**済藤 紘矢** Saito Hiroya  
研究開発本部  
ビーム・プラズマ技術開発研究所



**西林 良樹** Nishibayashi Yoshiki  
住友電気工業株式会社  
アドバンストマテリアル研究所  
主幹 博士(工学)



**寺本 三記** Teramoto Minori  
住友電工ハードメタル株式会社  
主席



**藤原 正規** Fujiwara Masanori  
京都大学  
化学研究所 特定研究員  
博士(理学)



**森下 弘樹** Morishita Hiroki  
東北大学  
先端スピントロニクス研究開発センター  
准教授  
材料科学高等研究所  
准教授 博士(工学)



**水落 憲和** Mizuochi Norikazu  
京都大学  
化学研究所 教授  
化学研究所  
スピントロニクス学術連携研究教育センター  
教授 博士(理学)



**辰巳 夏生** Tatsumi Natsuo  
研究開発本部  
ビーム・プラズマ技術開発研究所  
主幹 博士(工学)