

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6795803号  
(P6795803)

(45) 発行日 令和2年12月2日(2020.12.2)

(24) 登録日 令和2年11月17日(2020.11.17)

(51) Int.Cl.		F I	
GO 1 R	33/02 (2006.01)	GO 1 R	33/02 A
C 3 O B	29/04 (2006.01)	C 3 O B	29/04 A
GO 1 N	24/00 (2006.01)	GO 1 N	24/00 E
HO 1 L	29/82 (2006.01)	HO 1 L	29/82 Z

請求項の数 10 (全 10 頁)

(21) 出願番号	特願2018-37624 (P2018-37624)	(73) 特許権者	504132272 国立大学法人京都大学
(22) 出願日	平成30年3月2日(2018.3.2)		京都府京都市左京区吉田本町36番地1
(65) 公開番号	特開2019-152524 (P2019-152524A)	(73) 特許権者	301021533 国立研究開発法人産業技術総合研究所
(43) 公開日	令和1年9月12日(2019.9.12)		東京都千代田区霞が関1-3-1
審査請求日	令和2年9月7日(2020.9.7)	(74) 代理人	110001298 特許業務法人森本国際特許事務所
(出願人による申告) 委託期間：平成28年2月1日から平成30年3月31日まで、国立研究開発法人科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業「NVセンタ評価技術及び電気検出技術」委託研究、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願 委託期間：平成25年10月1日から平成31年3月31日まで、国立研究開発法人科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業「センサデバイス性能向上及びプロセス基盤技術」委託研究、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願		(72) 発明者	水落 憲和 京都府京都市左京区吉田本町36番地1 国立大学法人京都大学内
		(72) 発明者	加藤 宙光 茨城県つくば市東1-1-1 国立研究開発法人産業技術総合研究所つくばセンター内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 センサ素子、測定装置、センサ素子の製造方法、電子回路素子、および量子情報素子

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

n型にリンドープされており、かつ1つ以上の窒素 - 空孔中心を結晶構造中に含んでいるダイヤモンドのみからなるセンサ素子であって、

前記ダイヤモンドの結晶を構成する炭素原子のうち $^{12}\text{C}$ の割合が99%超であり、  
前記ダイヤモンドの前記結晶に含まれるリンの濃度が $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上かつ $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下である、センサ素子。

【請求項2】

前記ダイヤモンドに含まれる前記窒素 - 空孔中心のデコヒーレンス時間 $T_2$ が300K条件下でのHahn Echo法による測定で2.1msより長く、対応の $T_2^*$ が0.5msより長いことを特徴とする、請求項1に記載のセンサ素子。

【請求項3】

前記ダイヤモンドに含まれる前記窒素 - 空孔中心が、単一で交番磁場に対し $3.1 \text{ nT Hz}^{-1/2}$ 未満の値の感度を有し、単一で定磁場に対し $20 \text{ nT Hz}^{-1/2}$ 未満の値の感度を有する、請求項1に記載のセンサ素子。

【請求項4】

動作環境温度が $10^{-3} \text{ K}$ 以上かつ $10^3 \text{ K}$ 以下である、請求項1に記載のセンサ素子。

【請求項5】

請求項1に記載の素子を有し、

磁場、  
電場、  
温度、  
力学量、

のうち少なくとも1つを測定する測定装置。

【請求項6】

医療機器に組み込まれた測定装置、  
車載装置に組み込まれた測定装置、  
ライフサイエンス用装置に組み込まれた測定装置、

のうち少なくとも1つであることを特徴とする、請求項5に記載の測定装置。

10

【請求項7】

炭素化合物、  
リン化合物、  
窒素原子、

を含む雰囲気下において、n型にリンドーブされており、かつ1つ以上の窒素 - 空孔中心を結晶構造中に含んでいるダイヤモンドであって、前記ダイヤモンドの結晶を構成する炭素原子のうち $^{12}\text{C}$ の割合が99%超であり、前記ダイヤモンドの前記結晶に含まれるリンの濃度が $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上かつ $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下であり、そのみでセンサ素子をなすダイヤモンドを製造する工程を含む、センサ素子の製造方法。

【請求項8】

前記ダイヤモンドを製造する工程において、化学気相成長法によって基板上にダイヤモンド膜を成長させる、請求項7に記載のセンサ素子の製造方法。

20

【請求項9】

n型にリンドーブされており、かつ1つ以上の窒素 - 空孔中心を結晶構造中に含んでいるダイヤモンドのみからなる電子回路素子であって、前記ダイヤモンドの結晶を構成する炭素原子のうち $^{12}\text{C}$ の割合が99%超であり、前記ダイヤモンドの前記結晶に含まれるリンの濃度が $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上かつ $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下である、電子回路素子。

【請求項10】

n型にリンドーブされており、かつ1つ以上の窒素 - 空孔中心を結晶構造中に含んでいるダイヤモンドのみからなる量子情報素子であって、前記ダイヤモンドの結晶を構成する炭素原子のうち $^{12}\text{C}$ の割合が99%超であり、前記ダイヤモンドの前記結晶に含まれるリンの濃度が $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上かつ $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下である、量子情報素子。

30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、センサ素子に関するものであり、特にダイヤモンドを有するセンサ素子に関するものである。また本発明はこのセンサ素子を有する測定装置、センサ素子の製造方法にも関するほか、ダイヤモンドを有する電子回路素子、ダイヤモンドを有する量子情報素子にも関するものである。

40

【背景技術】

【0002】

ダイヤモンドの結晶構造において、窒素 - 空孔中心と呼ばれる複合欠陥が見られることがある。この窒素 - 空孔中心は、結晶格子の炭素原子の位置に置き換わる形で入った窒素原子と、その窒素原子の隣接位置に存在する（炭素原子が抜けている）空孔との対からなるもので、NV中心（Nitrogen Vacancy center）とも呼ばれる。

【0003】

このNV中心は、空孔に電子が捕獲された状態（負電荷状態、以下「 $\text{NV}^-$ 」と呼ぶ）においては、電子が捕獲されていない状態（中性状態、以下「 $\text{NV}^0$ 」と呼ぶ）に比べて

50

、外部磁場の縦方向に揃えた電子スピンの磁化を横方向に傾けた後、個々のスピンの歳差運動が原因となり個々の向きがずれていって全体としての横磁化が消失するまでの時間が長い。つまりNV<sup>-</sup>は長い横緩和時間（デコヒーレンス時間、以下「T<sub>2</sub>」と呼ぶ）を示す。また、室温（約300K）下であっても長いT<sub>2</sub>値を示す。

【0004】

NV<sup>-</sup>の電子スピン状態は外部の磁場に反応して変化し、この電子スピン状態の測定も室温下で可能であるため、NV中心を含むダイヤモンドは磁場センサ素子の材料として利用できる。

【0005】

さらにNV<sup>-</sup>の電子スピン状態はマイクロ波照射などの方法により、外部から人為的に操作する（特定の電子スピン状態に置く）こともできる。この操作も室温下で可能であるため、T<sub>2</sub>が長いことと合わせて、NV中心は量子状態の書き込み・読み出しが安定して行える量子ビットとして利用可能なことが期待され、NV中心を含むダイヤモンドは量子情報素子や電子回路素子の材料として利用できる。

10

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0006】

【非特許文献1】www.nature.comにて2009年4月6日にオンラインで公開された、Nature Materials volume 8, pages 383-387 (2009)内の、Gopalakrishnan Balasubramanian、水落憲和らの論文「Ultralong spin coherence time in isotopically engineered diamond」

20

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

ところが、従来のダイヤモンドではNV中心がNV<sup>-</sup>の状態に安定しない。特に表面付近では電荷が不安定であり、NV<sup>0</sup>状態のNV中心が多くみられる。電荷が不安定であることに起因して、室温におけるT<sub>2</sub>の値はある程度以上長くできず、非特許文献1に示されているような1.8ms程度がT<sub>2</sub>の限界となっていた。そのため、このダイヤモンドを有するセンサ素子の性能にも限界が生じていた。

【0008】

30

そこで本発明では、NV中心がNV<sup>-</sup>に安定するダイヤモンドのみからなるセンサ素子を提供することを目的とする。また本発明は、このセンサ素子を有する測定装置、センサ素子の製造方法、およびダイヤモンドのみからなる電子回路素子や量子情報素子を提供することも目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0009】

上記課題を解決するため、本発明に係るセンサ素子は、n型にリンドープされており、かつ1つ以上の窒素-空孔中心を結晶構造中に含んでいるダイヤモンドのみからなることを特徴とする。

【0010】

40

そしてこの本発明に係るセンサ素子をなすダイヤモンドは、ダイヤモンドの結晶を構成する炭素原子のうち<sup>12</sup>Cの割合が99%超であり、前記ダイヤモンドの前記結晶に含まれるリンの濃度が $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上かつ $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下である。

【0011】

またこのダイヤモンドについて、前記窒素-空孔中心のデコヒーレンス時間T<sub>2</sub>が300K条件下でのHann Echo法による測定で2.1msより長く、対応のT<sub>2</sub><sup>\*</sup>が0.5msより長いことが好ましい。

【0012】

またこのダイヤモンドについて、前記窒素-空孔中心が、単一で交番磁場に対し3.1nTHz<sup>-1/2</sup>未満の値の感度を有し、定磁場に対し20nTHz<sup>-1/2</sup>未満の値の

50

感度を有することが好ましい。

【0013】

また本発明のセンサ素子は、動作環境温度が  $10^{-3}$  K 以上かつ  $10^3$  K 以下であることが好ましい。

【0014】

また本発明のセンサ素子を含む装置として、磁場、電場、温度、力学量、のうち少なくとも1つを測定する測定装置を作ることができる。

【0015】

この測定装置は、医療機器に組み込まれた測定装置、車載装置に組み込まれた測定装置、ライフサイエンス用装置に組み込まれた測定装置、のうち少なくとも1つとすることができる。

10

【0016】

また本発明のセンサ素子の製造方法は、炭素化合物、リン化合物、窒素原子、を含む雰囲気下において、n型にリンドーブされており、かつ1つ以上の窒素-空孔中心を結晶構造中に含んでいるダイヤモンドであって、前記ダイヤモンドの結晶を構成する炭素原子のうち  $^{12}\text{C}$  の割合が99%超であり、前記ダイヤモンドの前記結晶に含まれるリンの濃度が  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  以上かつ  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以下であり、それのみでセンサ素子をなすダイヤモンドを製造する工程を含むことを特徴とする。

【0017】

この製造方法は、化学気相成長法によって基板上にダイヤモンド膜を成長させるものであることが好ましい。

20

【0018】

また本発明の電子回路素子は、n型にリンドーブされており、かつ1つ以上の窒素-空孔中心を結晶構造中に含んでいるダイヤモンドを有することを特徴とする。

【0019】

また本発明の量子情報素子は、n型にリンドーブされており、かつ1つ以上の窒素-空孔中心を結晶構造中に含んでいるダイヤモンドのみからなる電子回路素子であって、前記ダイヤモンドの結晶を構成する炭素原子のうち  $^{12}\text{C}$  の割合が99%超であり、前記ダイヤモンドの前記結晶に含まれるリンの濃度が  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  以上かつ  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以下であることを特徴とする。

30

【発明の効果】

【0020】

本発明のセンサ素子をなすn型にリンドーブされたダイヤモンドは、NV中心が  $\text{NV}^-$  の状態に安定し、従来よりも長いデコヒーレンス時間  $T_2$  が得られる。このダイヤモンドを用いることにより、本発明のセンサ素子は従来に比べて優れた性能を有する。またこのセンサ素子は測定装置に使用するのに好適である。また同様のダイヤモンドを用いることにより、優れた電子回路素子や量子情報素子が得られる。

【図面の簡単な説明】

【0021】

【図1】実施形態の一例において用いられるリンドーブn型ダイヤモンドと、従来のダイヤモンドにおける、NV中心の蛍光ダイナミクスをヒストグラム化したグラフであり、上側の図はリンドーブn型ダイヤモンドのグラフ、下側の図はノンドーブダイヤモンドのグラフ。

40

【図2】本実施形態のセンサ素子を有する測定装置の一例を示す模式図。

【図3】本実施形態において用いられるリンドーブn型ダイヤモンドの  $T_2$  値測定結果を示すグラフ。

【図4】本実施形態において用いられるリンドーブn型ダイヤモンドと従来のダイヤモンドの空間分解能、および従来の磁場センサの空間分解能を比較して示すグラフ。

【発明を実施するための形態】

【0022】

50

本発明に係る実施形態の一例のセンサ素子において用いられる、 $n$ 型にリンドープされたダイヤモンドについて説明する。このダイヤモンドは、単原子窒素を含む $Ib$ 型ダイヤモンド結晶基板の(111)面上へダイヤモンド膜をホモエピタキシャル成長させたことにより製造された合成ダイヤモンドである。

【0023】

$n$ 型にリンドープされており、かつ $NV$ 中心を1つ以上結晶構造中に含むダイヤモンドを製造可能な方法で合成ダイヤモンドを製造し、結晶を構成する炭素原子のうち $^{12}C$ の割合が99%超であり、リン濃度が $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上・ $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下となっているリンドープ $n$ 型ダイヤモンドを用意する。

【0024】

この $n$ 型にリンドープされたダイヤモンドに含まれる $NV$ 中心は、従来のダイヤモンドに比べて $NV^-$ の状態に安定しやすい。図1に、リンドープ $n$ 型ダイヤモンドにおける $NV$ 中心の蛍光ダイナミクスと、リンドープを施されていない従来の合成ダイヤモンドにおける $NV$ 中心の蛍光ダイナミクスとをヒストグラムにして示す。図1上側の図に示す通り、本実施形態のリンドープ $n$ 型ダイヤモンドでは $NV^0$ の状態に由来する蛍光ダイナミクスがほとんど現れておらず、従来の合成ダイヤモンドに比べて $NV$ 中心が $NV^-$ の状態に安定しやすくなっている。

【0025】

さらに、 $NV$ 中心が $NV^-$ の状態に安定しやすいことにより、このダイヤモンドでは従来1.8ms程度が限界であった $T_2$ が2.1ms超となり、また対応のデフュージング時間も、従来より長い0.5ms超の値となる。

【0026】

またこのダイヤモンドの結晶中に存在する $NV$ 中心についても、単一の $NV$ 中心による交番磁場感度が従来の $4.3 \text{ nT Hz}^{-1/2}$ に比べて優れた感度を示す。そしてこのダイヤモンドは単一の $NV$ 中心で優れた磁場感度を示すため、空間分解能についても優れた性能を示す。

【0027】

以上のように、 $n$ 型にリンドープされたダイヤモンドは、室温下で長い $T_2$ を示し、また磁場に対する感度が $NV$ 中心1つあたり非常に高くなっており空間分解能も優れているため、センサ素子の材料として非常に優れている。

【0028】

本実施形態のセンサ素子20を有する測定装置10の一例を図2に示す。ここでは一例として磁場を測定する装置について説明する。なお具体的な装置としては原子間力顕微鏡などの走査型プローブ顕微鏡とすることができる。測定装置10のプローブ12先端に本実施形態のセンサ素子20が取り付けられる。このセンサ素子20は上述のリンドープ $n$ 型ダイヤモンドを有するもので、ダイヤモンドの他にプローブ12に取り付けるための接続部材などを含んでいてもよい。

【0029】

測定装置10には、センサ素子20にレーザー光を照射するレーザー部14と、センサ素子20にマイクロ波を照射するマイクロ波照射部16と、センサ素子20から放たれる光子または電磁波を検出する検出部18が設けられている。なお検出部18はデータ処理部30と接続されている。このデータ処理部30は測定装置10と一体化したものであってもよいし、あるいは測定装置10の外部に設けられたコンピュータなどの外部装置であってもよい。

【0030】

この測定装置10により、測定対象50から発生している交番磁場52の測定を行うことができる。測定にあたっては、レーザー部14から照射されるレーザー光により、センサ素子20が有するダイヤモンドの $NV$ 中心を基底状態に偏極させ、マイクロ波照射部16から照射されるマイクロ波により、 $NV$ 中心を特定の電子スピン状態(基底状態と他の準位との重ね合わせ状態)に置く。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 3 1 】

プローブ 1 2 を測定対象 5 0 に近づけて、上述の操作により特定の電子スピン状態となった NV 中心の電子スピンを、測定対象 5 0 の交番磁場 5 2 と相互作用させる。十分な時間の相互作用をさせると、NV 中心の電子スピン状態は交番磁場 5 2 の強度に応じた状態となる。そしてレーザ部 1 4 からレーザ光をセンサ素子 2 0 へ照射し、センサ素子 2 0 から放たれる光子または電磁波を検出部 1 8 によって検出することにより、相互作用後の電子スピン状態を読み出す。

## 【 0 0 3 2 】

検出部 1 8 が検出した相互作用後の電子スピン状態をデータ処理部 3 0 が受信し、その検出データを処理する。相互作用後の電子スピン状態はマイクロ波照射部 1 6 が設定した特定の電子スピン状態および測定対象 5 0 の交番磁場 5 2 に応じたものとなっているので、検出データを適切に処理することにより、交番磁場 5 2 がどのような磁場であるかを調べることができる。例えば相互作用後の電子スピン状態が基底状態となる確率を求めるなどの処理を行うことにより、測定対象 5 0 の交番磁場 5 2 の強度を算出することができる。

10

## 【 0 0 3 3 】

以上のようにして測定装置 1 0 により交番磁場 5 2 が測定される。そして、リンドープ n 型ダイヤモンドの NV 中心は室温でも安定であるため、測定を室温下で行うことができる。また、この NV 中心は非常に安定であるため、環境温度が  $10^{-3}$  K の極低温や、 $10^3$  K の高温環境であってもセンサ素子 2 0 は正常に動作する。その一方で、室温下での測定であれば、超伝導量子干渉計 (superconducting quantum interference device, SQUID) のような従来の装置では必須となる冷却機構を必要としないため、測定装置 1 0 は小型に作ることができる。

20

## 【 0 0 3 4 】

なお、以上においては磁場の測定について説明したが、NV 中心の電子スピンを測定対象と相互作用させることにより、磁場だけでなく測定対象の様々な情報を調べることができる。NV 中心の電子スピン状態は、測定対象からの電場、測定対象の温度、測定対象に加わっている力学的ストレス (圧力) などの力学量、といった様々な要因によって変化するので、検出された相互作用後の電子スピン状態のデータを適切に処理することにより、測定対象の電場、温度、力学量などについても調べることができる。

30

## 【 0 0 3 5 】

また、以上においては測定装置の具体例として走査型プローブ顕微鏡を挙げたが、本発明のセンサ素子を用いて測定対象の情報を調べる際、プローブを直接測定対象に接触させる必要はなく、量子状態を相互作用させるだけでよいため、例えば医療機関において非侵襲的に患者の状態を調べることが可能であり、医療機器に本発明のセンサ素子を有する測定装置を組み込むことも可能である。

## 【 0 0 3 6 】

また、以上においては微視的な状態を調べるための測定装置を挙げたが、 $10^3$  K の高温環境であっても動作可能であることを利用して、走行中は非常に高温となることがある自動車の車載機器に本発明のセンサ素子を有する測定装置を組み込むことも可能である。例えば電気自動車のバッテリー残量を検知する装置に本発明のセンサ素子を用いることができる。本発明のセンサ素子は非常に優れた磁場感度を有するため、従来のバッテリー残量検知装置に比べてより正確にバッテリー残量を調べることができる。従来のバッテリー残量検知装置では一定以下の残量を正確に調べることができないため、正確に調べられる残量以下となった時点 (例えば満量の 3 割程度) でバッテリー切れと判定していたが、本発明のセンサ素子を用いた残量検知装置であれば、それよりも少ない残量でもバッテリー稼働させても大丈夫だと判定することができ、バッテリーの蓄電量をより有効に使用することができるようになる。

40

## 【 0 0 3 7 】

また、測定装置は従来に比べ小型化が可能であるので、例えば人間の頭部に装着される

50

ヘッドギアに組み込むことも可能であり、この場合には人間の脳から発せられる脳波を調べる脳磁計として用いることができる。また高感度・高分解能であるため、1個から数個程度の原子からなる分子の構造解析や、タンパク質の構造解析にも用いることができる。また、ナノ粒子のダイヤモンドを生命体に導入し、そのナノ粒子のNV中心の電子スピンを調べることで生命体の生命活動を追跡することも可能である。このように、いわゆるライフサイエンス用装置に組み込まれるセンサ素子としてリンドープn型ダイヤモンドを用いることが可能である。

【0038】

また、以上においてはリンドープn型ダイヤモンドをセンサ素子に用いることを説明したが、NV中心の電子スピン状態が電磁場に反応することを利用して、リンドープn型ダイヤモンドを有する電子回路素子を作ることにもできる。

10

【0039】

また、NV中心の電子スピンのコヒーレンス時間 $T_2$ が非常に長い、つまり量子状態が長時間安定することを利用して、量子状態を記録する量子メモリや、量子通信において他の量子デバイスの量子状態を写し取って別の量子デバイスへ伝える量子中継器といった量子情報素子にも、リンドープn型ダイヤモンドを用いることができる。

【実施例】

【0040】

本発明の実施例に係る合成ダイヤモンドの製造にあたっては、原料ガスとして炭素同位体 $^{12}\text{C}$ の割合が天然存在比98.89%を超える比率(ここでは99.99%)となっている炭素化合物(ここではメタン $\text{CH}_4$ )と、少量のリン化合物(ここではホスフィン $\text{PH}_3$ )を含む雰囲気下での化学気相成長(CVD)法を用いた。雰囲気中には、これらの原料ガスの他に、大気由来の水素分子 $\text{H}_2$ や窒素分子 $\text{N}_2$ もわずかに含まれていた。その結果、製造されるダイヤモンドの結晶構造には雰囲気中の窒素原子が取り込まれ、1つ以上の窒素-空孔(NV)中心が結晶構造中に含まれることとなった。

20

【0041】

上記のCVD法により、本実施例で使用されるダイヤモンドとして、結晶を構成する炭素原子のうち $^{12}\text{C}$ の割合が99%超であり、リン濃度が $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上・ $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下となっている、n型にリンドープされた合成ダイヤモンド試料が得られた。試料は複数種類製造されたが、以下に説明する実施例としては、 $^{12}\text{C}$ の割合が99.99%、リン濃度が $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ となっている合成ダイヤモンド試料に関して説明する。

30

【0042】

このダイヤモンドについてHahn Echo法により $T_2$ の測定を行ったところ、図3に示す結果が得られた。図3に示す通り、従来1.8ms程度が限界であった $T_2$ が $2.3 \pm 0.1 \text{ ms}$ と飛躍的に向上している。このように、本実施例のダイヤモンドは2.1ms超の $T_2$ を有する。なお、対応のディフェージング時間 $T_2^*$ についても測定したところ、これも $0.620 \pm 0.096 \text{ ms}$ と、従来の $0.470 \pm 0.100 \text{ ms}$ から飛躍的に向上した0.5ms超の値が得られた。なおこの測定は室温(約300K)にて行うことができた。

40

【0043】

またこのダイヤモンドの結晶中に存在するNV中心についても、単一のNV中心による磁場感度がどの程度であるかを調べたところ、 $3.0 \text{ nT Hz}^{-1/2}$ 以下の値という、従来の $4.3 \text{ nT Hz}^{-1/2}$ に比べて優れた感度を示した。なおこれは交番磁場に対する感度であるが、定磁場感度についても $16 \text{ nT Hz}^{-1/2}$ という、従来の $40 \text{ nT Hz}^{-1/2}$ に比べ優れた感度を示す。

【0044】

このリンドープn型ダイヤモンドは単一のNV中心で上記の磁場感度を有するため、空間分解能についても優れた性能を示す。図4に、本実施例のリンドープn型ダイヤモンドによる磁場感度に関する空間分解能と、従来の磁場センサの空間分解能を示す。なお点線

50

は従来のダイヤモンドによる空間分解能を示す。

【0045】

従来のSQUIDでは低温環境を確保するために厚い断熱層が必要となるため空間分解能が低くなり、磁場感度およそ $10 \text{ nT Hz}^{-1/2}$ に対して分解能 $1 \mu\text{m}$ 程度であった。これに対し、リンドープn型ダイヤモンドでは磁場感度 $10 \text{ nT Hz}^{-1/2}$ に対して $10 \text{ nm}$ 未満という分解能が得られた。さらに、この分解能は室温(約 $300 \text{ K}$ )条件下でのものである。すなわち、本実施例のリンドープn型ダイヤモンドは、SQUIDのような液体ヘリウムによる冷却を必要とする極低温( $4 \text{ K}$ 以下)でなくとも優れた空間分解能を示すものであった。

【0046】

本実施例においては測定装置50のセンサ素子20にリンドープn型ダイヤモンドを用いることにより、高い磁場感度(単一のNV中心で交番磁場に対し $3.0 \text{ nT Hz}^{-1/2}$ 以下すなわち $3.1 \text{ nT Hz}^{-1/2}$ 未満、定磁場に対し $20 \text{ nT Hz}^{-1/2}$ 未満を感知可能)、高い空間分解能( $10 \text{ nT Hz}^{-1/2}$ に対し $10 \text{ nm}$ 以下)が実現された。

10

【0047】

なお、上述の実施例において使用したリンドープn型ダイヤモンドにおいて具体的な $^{12}\text{C}$ の割合を $99.99\%$ としたが、これは天然比の $98.89\%$ を超える $99\%$ 超であればよく、例えば $^{12}\text{C}$ の割合が $99.7\%$ でも $1.8 \text{ ms}$ 超の良好な $T_2$ が観測されている。

20

【0048】

また上述の実施例において使用したリンドープn型ダイヤモンドにおいて具体的なリン濃度を $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ としたが、優れたセンサ素子として使用できるダイヤモンドとして有効なリン濃度はある程度の幅があり、 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上・ $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下の範囲であれば十分である。

【0049】

またリンドープn型ダイヤモンドを製造する方法としてCVDを挙げたが、 $^{12}\text{C}$ の割合が $99\%$ 超、リン濃度が $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上・ $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下のダイヤモンドを安定して製造することが可能であれば、それ以外の方法でリンドープn型ダイヤモンドを製造してもよい。

30

【符号の説明】

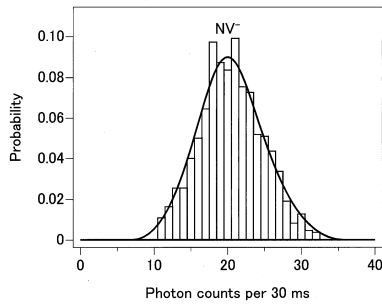
【0050】

- 10 測定装置
- 14 レーザ部
- 16 マイクロ波照射部
- 18 検出部
- 20 センサ素子
- 30 データ処理部
- 50 測定対象

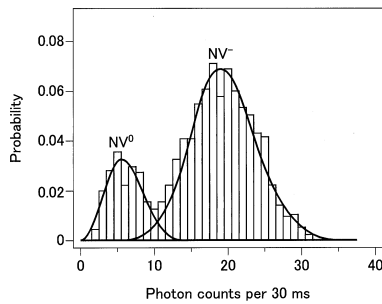


【図1】

リンダーブn型ダイヤモンド

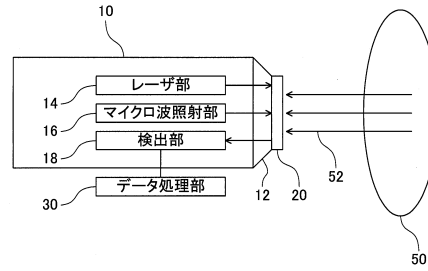


リンダーブダイヤモンド



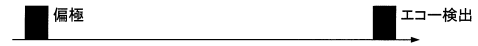
\* 測定条件  
 初期化 30 μW, 532nm, 20ms  
 ↓ 10ms後  
 検出 1 μW, 593nm, 30ms

【図2】

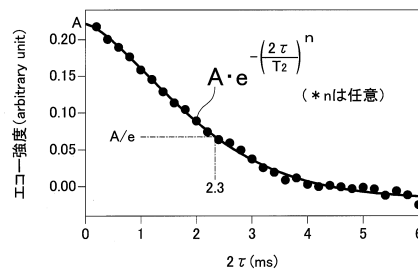
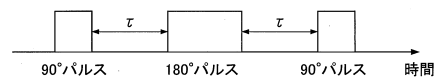


【図3】

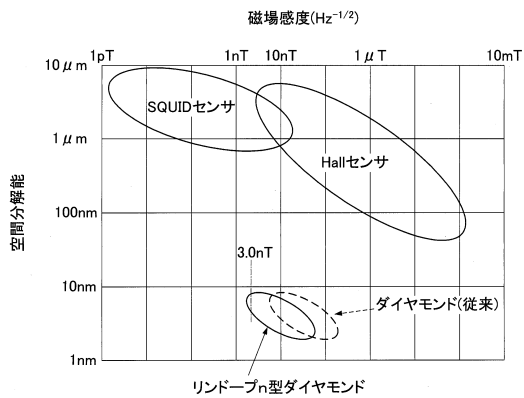
レーザシーケンス



照射マイクロ波パルスのシーケンス



【図4】



---

フロントページの続き

早期審査対象出願

(72)発明者 牧野 俊晴

茨城県つくば市東1-1-1 国立研究開発法人産業技術総合研究所つくばセンター内

(72)発明者 山崎 聡

茨城県つくば市東1-1-1 国立研究開発法人産業技術総合研究所つくばセンター内

審査官 青木 洋平

(56)参考文献 国際公開第2015/107907(WO, A1)

特表2011-529018(JP, A)

特表2014-516905(JP, A)

特開2012-110489(JP, A)

特開2016-023965(JP, A)

米国特許出願公開第2017/0139017(US, A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01R 33/02

C30B 29/04

G01N 24/00

H01L 29/82