

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2021年9月16日(16.09.2021)



(10) 国際公開番号

WO 2021/181444 A1

(51) 国際特許分類:
H01L 27/10 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2020/009939

(22) 国際出願日: 2020年3月9日(09.03.2020)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(71) 出願人: 日本電信電話株式会社 (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION) [JP/JP]; 〒1008116 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 Tokyo (JP).

(72) 発明者: 太田 竜一 (OTA, Ryuichi); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 NTT 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 俵 毅彦 (TAWARA, Takehiko); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 NTT 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 岡本 創 (OKAMOTO, Hajime);

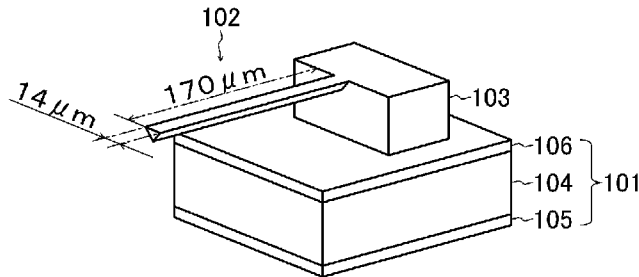
〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 NTT 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 山口 浩司 (YAMAGUCHI, Hiroshi); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 NTT 知的財産センタ内 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 山川 茂樹, 外 (YAMAKAWA, Shigeki et al.); 〒1006104 東京都千代田区永田町2丁目11番1号 山王パークタワー4階 山川国際特許事務所内 Tokyo (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,

(54) Title: SOLID-STATE QUANTUM MEMORY

(54) 発明の名称: 固体量子メモリ



(57) Abstract: A solid-state quantum memory comprises an oscillating portion (102) supported on a substrate (101) so as to be displaceable (capable of oscillating), and an exciting portion that excites the oscillating portion (102). A rare earth element is introduced into the oscillating portion (102), and an electron two-level system composed of the introduced rare earth element is formed. The oscillating portion (102) is supported by a support portion (103) on the substrate (101). The substrate (101) composed of a piezoelectric element (104) configured of a piezoelectric material, and a first electrode (105) and a second electrode (106) formed to sandwich the piezoelectric element (104) serves as the exciting portion.

(57) 要約: 固体量子メモリは、基板(101)の上に変位(振動)可能に支持された振動部(102)と、振動部(102)を励振する励振部とを備える。振動部(102)には、希土類元素が導入され、導入されている希土類元素から構成された電子2準位系が形成されている。基板(101)の上に、支持部(103)によって振動部(102)が支持されている。圧電材料から構成された圧電素子(104)と、圧電素子(104)を挟んで形成された第1電極(105)、第2電極(106)とから構成された基板(101)が励振部となる。

QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第21条(3))

明 細 書

発明の名称： 固体量子メモリ

技術分野

[0001] 本発明は、振動部に導入した電子2準位系によりメモリを構成する固体量子メモリに関する。

背景技術

[0002] 半導体や固体中の不純物によって形成される電子2準位系は、この光吸収・発光特性を利用することで、光の量子状態を電子の量子状態として保持することが可能である。特に、希土類元素のエルビウム（Er）を内包する固体材料は、通信波長帯に共鳴した電子準位を有しており、また、電子準位における量子状態の保持時間（コヒーレンス）が非常に長いことから、量子メモリとしての応用が期待されている（非特許文献1）。

[0003] ここで、Erは、エネルギー準位がクラマース縮退を持つイオンとなる。この種の元素は、無磁場においてエネルギー縮退した電子準位を有しており、長いコヒーレンスを得るためには、電子準位の不均一広がりを超える大きなエネルギー変化を与えることが必要である。

[0004] Erについては、これまでに、7 Tの外部磁場を印加することで、電子-核スピン結合で現れる超微細構造において、1 GHz以上のエネルギー制御が報告されており、Er中の電子スピンにおいて1秒以上の長いコヒーレンスが実現されていた（非特許文献2）。また、マイクロ波を用いた電子制御を行うために、外部磁場による電子準位のエネルギー制御が用いられていた（非特許文献3）。

先行技術文献

非特許文献

[0005] 非特許文献1：E. Saglamyurek et al., "Quantum storage of entangled telecom-wavelength photons in an erbium-doped optical fibre", Nature Photonics, vol. 9, pp. 83-87, 2015.

非特許文献2: M. Rancic et al., "Coherence time of over a second in a telecom-compatible quantum memory storage material", Nature Physics, vol. 14, pp. 50-54, 2018.

非特許文献3: J. R. Everts et al., "Microwave to optical photon conversion via fully concentrated rare-earth-ion crystals", Physical Review A, vol. 99, no. 6, 063830, 2019.

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] 上述したように、従来は、量子メモリ実現のため電子準位における量子状態の保持制御に、外部磁場を用いていた。この外部磁場を発生するためには、巨大な超電導コイルが必要となり、量子メモリを実現するためのシステム全体の小型化や低消費電力化が困難であった。

[0007] 本発明は、以上のような問題点を解消するためになされたものであり、量子メモリを実現するためのシステム全体の小型化、低消費電力化を目的とする。

課題を解決するための手段

[0008] 本発明に係る固体量子メモリは、基板の上に変位可能に支持された振動部と、振動部を励振する励振部と、振動部に導入されている希土類元素から構成された電子2準位系とを備える。

発明の効果

[0009] 以上説明したように、本発明によれば、振動部に導入した希土類元素から電子2準位系を構成したので、量子メモリを実現するためのシステム全体の小型化、低消費電力化が実現できる。

図面の簡単な説明

[0010] [図1]図1は、本発明の実施の形態に係る固体量子メモリの構成を示す斜視図である。

[図2A]図2Aは、振動部102の2次の振動モードにおける共振特性を示す

特性図である。

[図2B]図2Bは、励振した振動部102の歪の分布を示す分布図である。

[図3]図3は、振動部102に導入された希土類元素による電子2準位系における、エネルギー制御の状態を測定するための測定系の構成を示す構成図である。

[図4]図4は、振動部102に形成されている電子2準位系の、各束縛励起子準位からフォトルミネッセンス光の測定結果を示す分布図である。

[図5]図5は、本発明の実施の形態に係る他の固体量子メモリの構成を示す斜視図である。

発明を実施するための形態

[0011] 以下、本発明の実施の形態に係る固体量子メモリについて図1を参照して説明する。この固体量子メモリは、基板101の上に変位（振動）可能に支持された振動部102と、振動部102を励振する励振部とを備える。振動部102には、希土類元素が導入され、導入されている希土類元素から構成された電子2準位系が形成されている。希土類元素は、振動部102にイオンの状態で導入されている。

[0012] この例では、基板101の上に、支持部103によって振動部102が支持されている。振動部102は、支持部103に支持された片持ちの梁である。この例では、支持部103と振動部102とは、一体に形成されている。振動部102は、例えば、底面の形状が2等辺三角形の三角柱であり、長さ $170\mu\text{m}$ 、幅 $14\mu\text{m}$ 、厚さ $7\mu\text{m}$ とされている。三角柱とされている振動部102の底面の2等辺三角形の底辺の長さが $14\mu\text{m}$ であり、高さが $7\mu\text{m}$ である。

[0013] 振動部102は、例えば、イットリウムシリケート (Y_2SiO_5) から構成することができる。希土類元素は、例えば、エルビウム (Er) とすることができる。Erは、エネルギー準位がクラマース縮退を持つイオンとなる。希土類元素は、振動部102に分散されている。また、希土類元素は、このクラスターが、振動部102に分散された構成することもできる。例えば、

E_r が導入されている Y_2SiO_5 材料を、公知の収束イオンビーム（FIB）により立体加工することで、振動部102（支持部103）が形成できる。

[0014] また、柱状とされている振動部102は、例えば、分子線エピタキシャル成長法などを用いることで、この厚さ方向に、振動部102を構成する材料の層と、希土類元素の層とを積層した積層構造とすることもできる。例えば、振動部102を構成する材料の層と、希土類元素の層とを交互に積層して振動部102とすることができる。

[0015] 例えば、基板101を圧電材料から構成することで、基板101を励振部とすることができる。例えば、圧電材料から構成された圧電素子104と、圧電素子104を挟んで形成された第1電極105、第2電極106とから基板101を構成することができる。第1電極105と第2電極106との間に励振信号（電気信号）を印加し、圧電素子104を振動させることで、基板101に支持部103を介して支持固定されている振動部102を励振することができる。また、上述した励振信号の制御により、振動部102の励振状態（振動部102に発生する動的な歪）を制御することができる。

[0016] 次に、振動部102の2次の振動モードにおける共振特性と、1.57MHz付近の電気信号により励振した振動部102の歪の分布について、図2A、図2Bを参照して説明する。まず、図2Aに示すように、振動部102の共振周波数は、1.57MHz付近であることがわかる。また、共振周波数の励振信号による励振部の励振で、図2Bの動的歪分布に示すように、梁構造の振動部102の中央部近傍に、大きな歪（動的歪）が発生していることがわかる。

[0017] 次に、振動部102に加わる歪による、振動部102に導入された希土類元素の電子準位のエネルギー制御について説明する。この電子準位のエネルギー制御の状態は、発光励起（Photo luminescence excitatio）測定により測定できる。この測定を実施する測定系について、図3を参照して説明する。この測定系は、光源201、音響光学素子202、信号生成器203、分光器204を備える。まず、信号生成器203から、励振部となる基板10

1の電極および音響光学素子202に所定の高周波信号を印加する。

[0018] これにより、励振部を振動させて振動部102を励振した状態で、レーザからなる光源201より出射する波長1536nmの連続波レーザ光を、音響光学素子202によりパルス状として振動部102に照射する。波長1536nmは、 E_r の光学遷移波長である。パルス状のレーザ光照射により、振動部102に形成されている電子2準位系(E_r)の、各束縛励起子準位からフォトルミネッセンス(PL)光が得られる。このPL光を分光器204で測定する。この測定において、振動部102に照射するレーザ光のパルス波形と、励振している振動部102の振動と間の相対位相を変化させることで、様々な歪を印加した状態における束縛励起子準位のエネルギーを測ることが可能になる。なお、測定は、原理確認のため極低温高真空(4K, 1×10^{-4} Pa以下)の環境下において実施した。

[0019] 上述したPL光の測定結果を図4に示す。図4に示すように、電圧が5Vの高周波信号の印加により、 ± 2 GHz程度のエネルギー制御が行われていることを示している。この値は、一般的な E_r の電子準位の不均一広がり(1GHz程度)よりも十分大きく、無磁場環境下においても、コヒーレンスの向上が可能であることを示唆している。実施の形態に係る固体量子メモリを用いた、電子準位における量子状態の保持制御(記憶制御)では、磁場を用いないことから、素子の集積化、低消費電力化において、磁場を用いる場合に比較して優位性を有する。また、実施の形態の技術によれば、磁場の不安定性によるコヒーレンスの減少が起きないことも特徴である。

[0020] ところで、本発明の固体量子メモリは、図5に示すように、振動部122を両持ちの梁構造とすることもできる。この固体量子メモリは、基板121の上に変位(振動)可能に支持された振動部122と、振動部122を励振する励振部とを備える。振動部122には、希土類元素が導入され、導入されている希土類元素から構成された電子2準位系が形成されている。

[0021] この例では、基板121の上に、第1支持部123aと第2支持部123bとによって振動部122が支持されている。振動部102は、2つの第1

支持部 1 2 3 a、第 2 支持部 1 2 3 b に両端が支持固定された両持ちの梁である。振動部 1 2 2 は、例えば、底面の形状が 2 等辺三角形の三角柱とすることができ、長さ $100\ \mu\text{m}$ 、幅 $20\ \mu\text{m}$ 、厚さ $10\ \mu\text{m}$ とすることができる。三角柱とされている振動部 1 2 2 の底面の 2 等辺三角形の底辺の長さが $20\ \mu\text{m}$ であり、高さが $10\ \mu\text{m}$ である。この場合においても、例えば、 E_r が導入されている Y_2SiO_5 材料を、公知の収束イオンビームにより立体加工することで、振動部 1 2 2（第 1 支持部 1 2 3 a、第 2 支持部 1 2 3 b）が形成できる。

[0022] また、この例においても、基板 1 2 1 を圧電材料から構成することで、基板 1 2 1 を励振部とすることができる。例えば、圧電材料から構成された圧電素子 1 2 4 と、圧電素子 1 2 4 を挟んで形成された第 1 電極 1 2 5、第 2 電極 1 2 6 とから基板 1 2 1 を構成することができる。第 1 電極 1 2 5 と第 2 電極 1 2 6 との間に励振信号（電気信号）を印加し、圧電素子 1 2 4 を振動させることで、基板 1 2 1 に第 1 支持部 1 2 3 a、第 2 支持部 1 2 3 b を介して支持固定されている振動部 1 2 2 を励振することができる。また、上述した励振信号の制御により、振動部 1 2 2 の励振状態（振動部 1 2 2 に発生する動的な歪）を制御することができる。

[0023] この構造では、2 つの第 1 電極 1 2 5、第 2 電極 1 2 6 の配置方向、言い換えると、両持ち梁構造とされている振動部 1 2 2 の延在方向に伸縮する圧電素子 1 2 4 を用いることで、振動部 1 2 2 に加わる引張応力を電氣的に制御可能となる。所定の周波数の電気信号（電圧信号）を第 1 電極 1 2 5 と第 2 電極 1 2 6 との間に印加することで、振動部 1 2 2 の両端の変位が $100\ \text{nm}$ となると、振動部 1 2 2 に $10\ \text{MPa}$ 程度の応力が発生することが数値計算から見積もられる。この応力は、 $4\ \text{GHz}$ 程度のエネルギー変化を生むため、両持ちの梁構造とした振動部 1 2 2 を用いることで、振動部 1 2 2 に含まれる希土類元素から構成された電子 2 準位系の共鳴エネルギーの精密制御が可能となる。

[0024] なお、上述では、振動部の母材として Y_2SiO_5 を用い、これに E_r を導入

したが、これらの限るものではない。固体量子メモリとしては、例えば、通信波長帯に共鳴を有する E_r が最も注目を集めているが、希土類元素として、ネオジウム（光学遷移波長例：1064 nm）やイッテルビウムなども用いることができる。これらも、エネルギー準位がクラマース縮退を持つイオンとなり、 E_r を用いた場合と同様の作用効果が得られる。

[0025] また、実施の形態に係る固体量子メモリの、電子準位のエネルギー制御の状態に関する測定（発光励起測定）は、原理確認のため極低温高真空（4 K， 1×10^{-4} Pa 以下）環境下において実施したが、本発明に係る固体量子メモリの動作は、特定の環境下に限られるものではない。

[0026] また、上述した実施の形態では、振動部を、三角柱の梁構造としたが、これに限るものではなく、他の様々な機械的駆動機構（平板型振動子、表面弾性波など）を同様に用いることができる。また、歪の印加手段として圧電素子を用いた例を示したが、他の電気（静電力）、光（放射圧）、熱（熱膨張）などを用いた歪印加手段も同様に用いることができる。

[0027] 以上に説明したように、本発明によれば、振動部に導入した希土類元素から電子2準位系を構成したので、量子メモリを実現するためのシステム全体の小型化、低消費電力化が実現できる。

[0028] なお、本発明は以上に説明した実施の形態に限定されるものではなく、本発明の技術的思想内で、当分野において通常の知識を有する者により、多くの変形および組み合わせが実施可能であることは明白である。

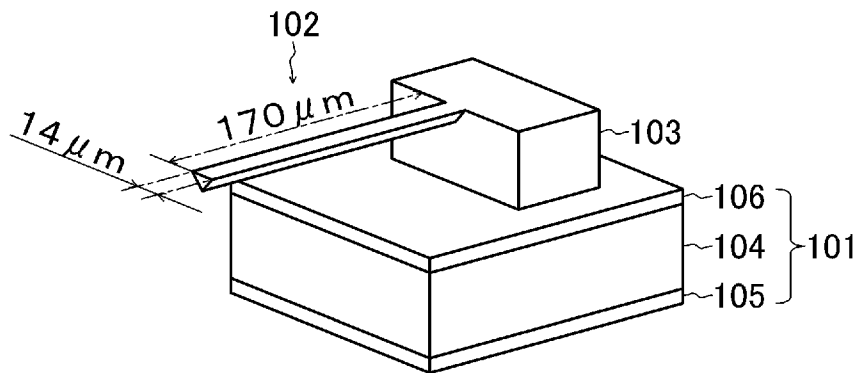
符号の説明

[0029] 101…基板、102…振動部、103…支持部、104…圧電素子、105…第1電極、106…第2電極。

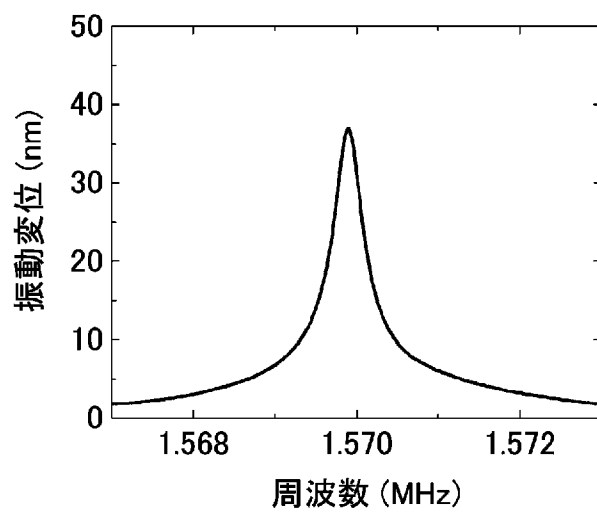
請求の範囲

- [請求項1] 基板の上に変位可能に支持された振動部と、
前記振動部を励振する励振部と、
前記振動部に導入されている希土類元素から構成された電子2準位系と
を備える固体量子メモリ。
- [請求項2] 請求項1記載の固体量子メモリにおいて、
前記希土類元素は、前記振動部にイオンの状態で導入されていることを特徴とする固体量子メモリ。
- [請求項3] 請求項1または2記載の固体量子メモリにおいて、
前記希土類元素は、イオンのエネルギー準位がクラマース縮退を持つことを特徴とする固体量子メモリ。
- [請求項4] 請求項1～3のいずれか1項に記載の固体量子メモリにおいて、
前記振動部は、片持ち梁構造とされていることを特徴とする固体量子メモリ。
- [請求項5] 請求項1～3のいずれか1項に記載の固体量子メモリにおいて、
前記振動部は、両持ち梁構造とされていることを特徴とする固体量子メモリ。
- [請求項6] 請求項1～5のいずれか1項に記載の固体量子メモリにおいて、
前記励振部は、圧電材料から構成されていることを特徴とする固体量子メモリ。

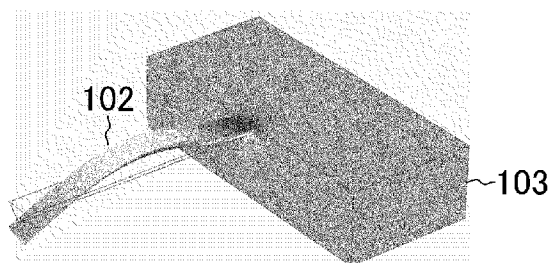
[図1]



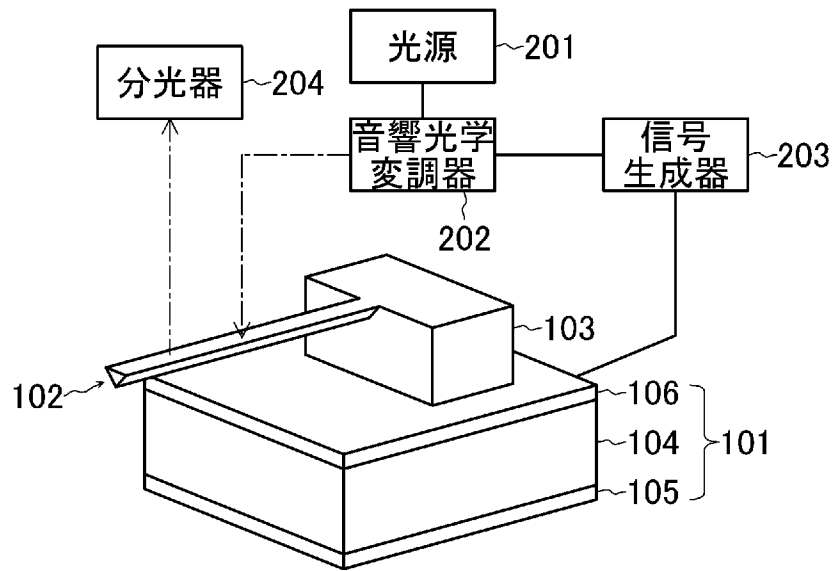
[図2A]



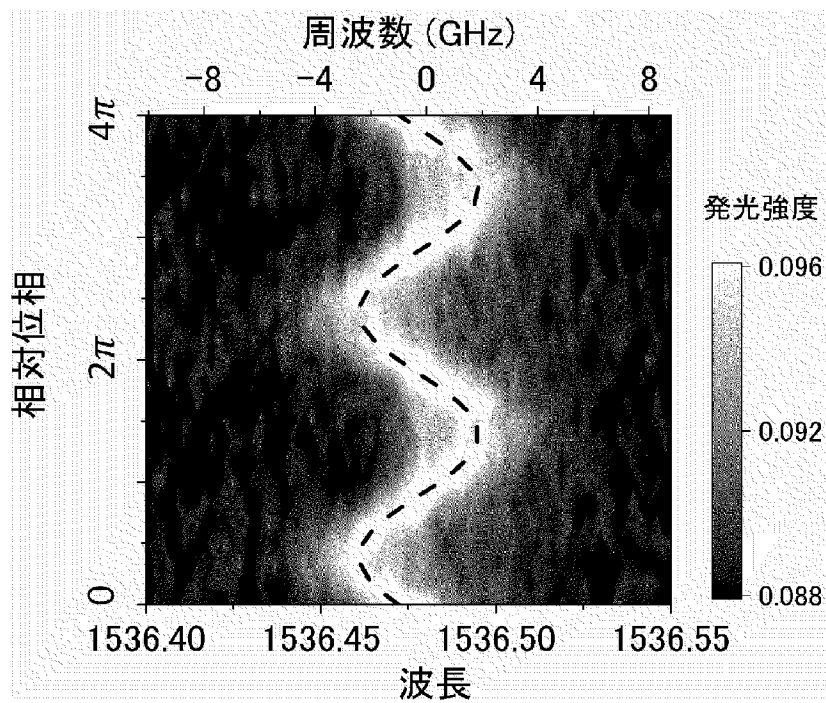
[図2B]



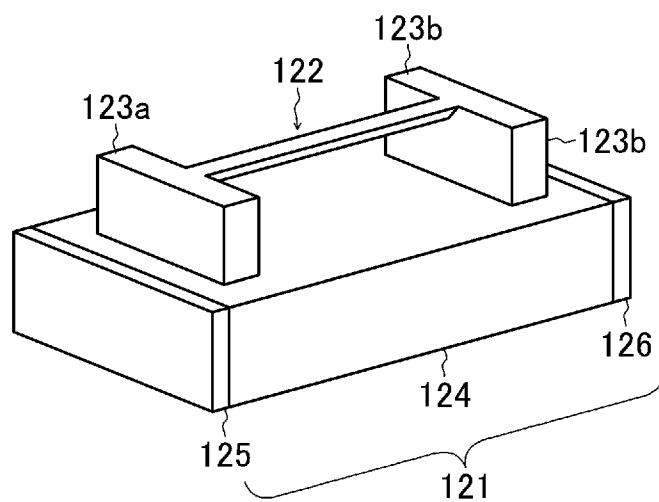
[図3]



[図4]



[図5]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2020/009939

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int. Cl. H01L27/10 (2006.01) i
FI: H01L27/10 451

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int. Cl. H01L27/10

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996

Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2020

Registered utility model specifications of Japan 1996-2020

Published registered utility model applications of Japan 1994-2020

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2019-29511 A (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORP.) 21 February 2019, paragraphs [0015], [0017], [0022], [0040], fig. 1-6	1-6
Y	JP 2017-151248 A (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORP.) 31 August 2017, paragraphs [0002], [0004], [0008], fig. 1, 2	1-6
Y	WO 2011/036814 A1 (TOSHIBA CORP.) 31 March 2011, paragraph [0006], fig. 1-12	3-6

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
15.05.2020

Date of mailing of the international search report
26.05.2020

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2020/009939

Patent Documents referred to in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
JP 2019-29511 A	21.02.2019	(Family: none)	
JP 2017-151248 A	31.08.2017	(Family: none)	
WO 2011/036814 A1	31.03.2011	US 2012/0170091 A1 paragraph [0009], fig. 1-12	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） H01L 27/10(2006.01)i FI: H01L27/10 451		
B. 調査を行った分野		
調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC）） H01L27/10		
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2020年 日本国実用新案登録公報 1996-2020年 日本国登録実用新案公報 1994-2020年		
国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）		
C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	JP 2019-29511 A（日本電信電話株式会社）21.02.2019（2019-02-21） 段落0015, 0017, 0022, 0040, 図1-6	1-6
Y	JP 2017-151248 A（日本電信電話株式会社）31.08.2017（2017-08-31） 段落0002, 0004, 0008, 図1-2	1-6
Y	WO 2011/036814 A1（株式会社東芝）31.03.2011（2011-03-31） 段落0006, 図1-12	3-6
☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。 ☒ パテントファミリーに関する別紙を参照。		
* 引用文献のカテゴリー “A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの “E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの “L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） “O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 “P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献 “T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの “X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの “Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの “&” 同一パテントファミリー文献		
国際調査を完了した日 15.05.2020		国際調査報告の発送日 26.05.2020
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		権限のある職員（特許庁審査官） 小山 満 5F 9458 電話番号 03-3581-1101 内線 3516

PCT/JP2020/009939

様式 PCT/ISA/210 (パテントファミリー用別紙) (2015年1月)