

(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
2016 年 12 月 22 日(22.12.2016)



(10) 国際公開番号

WO 2016/204273 A1

- (51) 国際特許分類:
H01L 39/22 (2006.01) H03B 7/00 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2016/068107
- (22) 国際出願日: 2016 年 6 月 17 日(17.06.2016)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2015-122057 2015 年 6 月 17 日(17.06.2015) JP
- (71) 出願人: 国立大学法人筑波大学 (UNIVERSITY OF TSUKUBA) [JP/JP]; 〒3058577 茨城県つくば市天王台一丁目 1 番 1 Ibaraki (JP). ユニバーシティ オブ セントラル フロリダ リサーチ ファウンデーション, インコーポレイテッド (UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA RESEARCH FOUNDATION INCORPORATED) [US/US]; 32826 フロリダ州オーランド, スイート 501, リサーチ パークウェイ 12201 Florida (US).
- (72) 発明者: 柏木 隆成 (KASHIWAGI Takanari); 〒3058577 茨城県つくば市天王台一丁目 1 番 1 国立大学法人筑波大学内 Ibaraki (JP). 門脇 和男

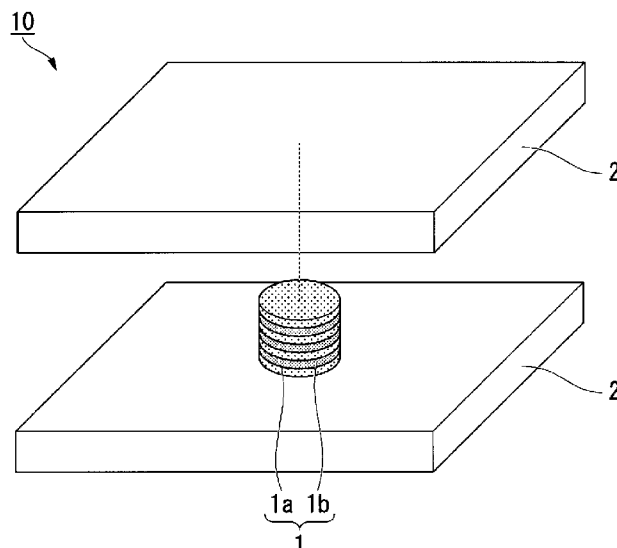
(KADOWAKI Kazuo); 〒3058577 茨城県つくば市天王台一丁目 1 番 1 国立大学法人筑波大学内 Ibaraki (JP). 南 英俊 (MINAMI Hidetoshi); 〒3058577 茨城県つくば市天王台一丁目 1 番 1 国立大学法人筑波大学内 Ibaraki (JP). クレム リチャード アンドリュウ (KLEMM Richard Andrew); 328162385 フロリダ州オーランド, セントラル フロリダ ビーエルヴィディー, 4000, ユニバーシティ オブ セントラル フロリダ, デパートメント オブ フィジックス Florida (US).

- (74) 代理人: 棚井 澄雄, 外 (TANAI Sumio et al.); 〒1006620 東京都千代田区丸の内一丁目 9 番 2 号 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, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, KE, KG, KN, KP, KR, 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, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM,

[続葉有]

(54) Title: TERAHERTZ-BAND ELECTROMAGNETIC WAVE OSCILLATION ELEMENT AND TERAHERTZ-BAND ELECTROMAGNETIC WAVE OSCILLATION DEVICE

(54) 発明の名称: テラヘルツ帯域電磁波発振素子およびテラヘルツ帯域電磁波発振装置



(57) Abstract: A terahertz-band electromagnetic wave oscillation element is provided with an independent terahertz wave oscillation unit for oscillating terahertz-band electromagnetic waves. The terahertz wave oscillation unit comprises a disc-shaped superconductor having a multilayer Josephson junction capable of oscillating terahertz-band electromagnetic waves by the coordinated vibration of a plurality of Josephson junctions using the AC Josephson effect, the superconductor being circular in the cross section parallel to the layering surfaces of the multilayer Josephson junction.

(57) 要約: テラヘルツ帯域電磁波発振素子は、テラヘルツ帯域電磁波を発振する独立したテラヘルツ波発振部を備え、前記テラヘルツ波発振部は、交流ジョセフソン効果を利用して複数のジョセフソン接合が協調して振動することによりテラヘルツ帯域電磁波を発振できる多重積層型ジョセフソン接合を有し、かつ、前記多重積層型ジョセフソン接合の積層面と平行な切断面が円形である円板状の超伝導体からなる。

WO 2016/204273 A1



ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US,
UZ, VC, VN, 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：

テラヘルツ帯域電磁波発振素子およびテラヘルツ帯域電磁波発振装置

技術分野

[0001] 本発明は、テラヘルツ帯域電磁波発振素子およびテラヘルツ帯域電磁波発振装置に関する。本願は、2015年6月17日に、日本に出願された特願2015-122057号に基づき優先権を主張し、その内容をここに援用する。

背景技術

[0002] テラヘルツ（THz）波は、電波と光（遠赤外）の中間領域の波長をもつ電磁波である。テラヘルツ波の周波数は明確な定義はないが、300GHz～10THz（波長30μm～1mm）と言われている。この周波数帯域は、分子の配向や回転、高分子の振動、水素結合などで結合した分子間の振動、結晶格子振動などの周波数とほぼ等しい。そのため、有機物、高分子化合物、酵素、タンパク質、生体物質の同定に用いることができる。これらの物質の同定だけでなく、非破壊検査、セキュリティ、医療診断、気象観測、環境モニター、天文学、高速大容量通信等の極めて幅広い範囲での応用が可能であり、注目を集めている。

[0003] テラヘルツ波の発振手段としては、例えば量子カスケード・レーザー（QCL）、共鳴トンネルダイオード（RTD）、超伝導体における超伝導層と絶縁層とのジョセフソン結合を利用した発振器、等が知られている。

[0004] 量子カスケード・レーザーは、半導体量子井戸中に形成されるエネルギー準位間の光学遷移を利用して発振する。半導体量子井戸中に形成されるエネルギー差が小さい場合は、熱エネルギーによる遷移が生じ、窒素沸点以上の温度領域では、適切な駆動が難しい。共鳴トンネルダイオードは、半導体中の伝導電子の運動を利用している。そのため、伝導電子の駆動を適切に制御する必要がある。特定の周波数域を発振する際には、この電子の駆動を適切

に行うことが難しい。

- [0005] そこで、近年、高温超伝導体がもつ固有ジョセフソン接合を利用した発振器に注目が集まっている（例えば、特許文献 1、2 及び非特許文献 1）。この発振器は、超伝導体の交流ジョセフソン効果に伴うジョセフソンプラズマを用いて、テラヘルツ波を放射する。幾何学的な構造体が有する固有周波数と、このジョセフソンプラズマと、を共振させることで、この発振器は強いピーク強度を有するテラヘルツ波を放射する。

先行技術文献

特許文献

- [0006] 特許文献1：特開 2009-43787 号公報
特許文献2：特開 2005-251863 号公報

非特許文献

- [0007] 非特許文献1：Tsujimoto et al. Phys. Rev. Lett. 105, 037005 (2010).

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0008] 高温超伝導体を持つ固有ジョセフソン接合を利用したテラヘルツ帯域電磁波発振素子は、原理的には、15 THz 程度の発振は実現可能とされている。しかしながら、高周波領域のテラヘルツ波の発振が実現できたという報告はなされていないというのが現状である。現在、高温超電導体を持つ固有ジョセフソン接合を利用したテラヘルツ帯域電磁波発振素子として報告されている例としては、1.6 THz のテラヘルツ波の観測例が最大のものである。
- [0009] 一般に発振されるテラヘルツ波は、超伝導体に印加される電圧に比例する。そのため、原理的には超伝導体に印加する電圧を高くすれば、高周波数のテラヘルツ波を発振できるはずである。しかしながら、現実の素子においては、超伝導体に印加する電圧を高くすると、超伝導体が発熱してしまう。超

伝導体が発熱すると、超伝導層と絶縁層の積層構造を有する超伝導体の絶縁層の絶縁性が低下する。場合によっては、超伝導体に部分的なホットスポットと呼ばれる高温部が形成される。この部分は、短絡抵抗として振る舞い、絶縁層の絶縁性が低下させる。そのため、超伝導体の単結晶に印加する電圧を単純に高めることができず、1.6 THz以上の周波数のテラヘルツ波を発振できる超伝導体を利用したテラヘルツ帯域電磁波発振素子の報告はされていない。

[0010] 超伝導体を利用したテラヘルツ帯域電磁波発振素子及びテラヘルツ帯域電磁波発振装置の利用範囲を高めるために、高周波数のテラヘルツ波を発振できる超伝導体を利用したテラヘルツ帯域電磁波発振素子及びテラヘルツ帯域電磁波発振装置が切に求められている。

[0011] 本発明は上記問題に鑑みてなされたものであり、発生する熱を効率的に排熱することができるテラヘルツ帯域電磁波発振素子およびテラヘルツ帯域電磁波発振装置を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0012] 本発明者らは、鋭意検討の結果、所定の形状を有し、その構造下部に超伝導体からなる基板を有さない単独の超伝導体に、電圧を印加することで、高周波数のテラヘルツ波が発振することを見出した。

すなわち、本発明は、上記課題を解決するため、以下の手段を提供する。

[0013] (1) 本発明の一態様に係るテラヘルツ帯域電磁波発振素子は、テラヘルツ帯域電磁波を発振する独立したテラヘルツ波発振部を備え、前記テラヘルツ波発振部は、交流ジョセフソン効果を利用して複数のジョセフソン接合が協調して振動することによりテラヘルツ帯域電磁波を発振できる多重積層型ジョセフソン接合を有し、かつ、前記多重積層型ジョセフソン接合の積層面と平行な切断面が円形である円板状の超伝導体からなる。

[0014] (2) 上記(1)に記載のテラヘルツ帯域電磁波発振素子において、前記超伝導体の両端面に接続された電極をさらに備えてもよい。

[0015] (3) 上記(2)に記載のテラヘルツ帯域電磁波発振素子において、前記電

極のいずれかを支持する基板をさらに有し、前記基板の熱伝導率が、前記超伝導体の熱伝導率よりも高くてもよい。

[0016] (4) 上記(1)に記載のテラヘルツ帯域電磁波発振素子において、前記基材はサファイア、ダイヤモンドまたは銅のいずれかであってもよい。

[0017] (5) 上記(1)～(4)のいずれか一つに記載のテラヘルツ帯域電磁波発振素子において、前記超伝導体が前記電極の間に複数配置されていてもよい。

[0018] (6) 本発明の一態様に係るテラヘルツ帯域電磁波発振装置は、上記(1)～(5)のいずれか一つに記載のテラヘルツ帯域電磁波発振素子と、前記電極に電圧を印加する電圧印加手段とを備える。

発明の効果

[0019] 本発明の一態様にかかるテラヘルツ帯域電磁波発振素子およびテラヘルツ帯域電磁波発振装置は、2 THz以上の周波数のテラヘルツ波を発振できる。

図面の簡単な説明

[0020] [図1]本発明の一態様に係るテラヘルツ帯域電磁波発振素子の斜視模式図である。

[図2]超伝導体の単結晶の結晶構造を模式的に示した図である。

[図3]従来のテラヘルツ帯域電磁波発振素子の一例であり、非特許文献1に記載されたテラヘルツ帯域電磁波発振素子の斜視模式図である。

[図4]本発明の他の態様に係るテラヘルツ波発振素子の斜視模式図であり、超伝導体が複数配列した構造を模式的に図示した斜視模式図である。

[図5]本発明の一態様に係るテラヘルツ波発振素子の斜視模式図であり、電極をホーンアンテナ状に加工した場合の断面模式図である。

[図6]本発明の他の態様に係るテラヘルツ帯域電磁波発振素子の斜視模式図である。

[図7]本発明の一態様に係るテラヘルツ帯域電磁波発振装置を模式的に示した斜視模式図である。

[図8]実施例1の発振スペクトルを示す。

発明を実施するための形態

[0021] 以下、テラヘルツ帯域電磁波発振素子およびテラヘルツ帯域電磁波発振装置について、図を適宜参照しながら詳細に説明する。

以下の説明で用いる図面は、特徴をわかりやすくするために便宜上特徴となる部分を拡大して示している場合があり、各構成要素の寸法比率などは実際とは異なっていることがある。以下の説明において例示される材料、寸法等は一例であって、本発明はそれらに限定されるものではなく、その要旨を変更しない範囲で適宜変更して実施することが可能である。

[0022] (テラヘルツ帯域電磁波発振素子)

図1は、本実施形態にかかるテラヘルツ帯域電磁波発振素子の斜視模式図である。図1に示すように、本実施形態にかかるテラヘルツ帯域電磁波発振装置10は、テラヘルツ帯域電磁波を発振するテラヘルツ波発振部が円板状の超伝導体1からなる。

[0023] 超伝導体1の両端には、電極2が接続されている。図1では、超伝導体1に対して電極2を大きく図示しているが、この場合に限られない。例えば、点接点でもよい。また図1では、発明の構成を理解しやすくするために、一方の電極を離して図示しているが、実際には超伝導体1の端面に接続されている。超伝導体1の周囲は、熱伝導性の高いサーマルグリース等で覆ってもよい。

[0024] 超伝導体1は、超伝導層と絶縁層の積層構造を有する。すなわち、超伝導体1は、ジョセフソン接合を積層した構造をしている。図2は、超伝導体1の一例である $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi_2212)の結晶構造である。図2において、三角錐はCuとOで形成されており、白丸はSr、黒丸は酸素、斜線が付された丸はCa、点状の模様が付された丸はBiを示す。図2の場合、 CuO_2 層が超伝導層1aであり、 Bi_2O_2 層が絶縁層1bとなる。すなわち、超伝導体1は、超伝導層1a／絶縁層1b／超伝導層1aが原子レベルで積層した構造である。

[0025] 各超伝導層 1 a 同士は、ジョセフソン効果により絶縁層 1 b を介しても超伝導電流が流れる。Bi₂Te₂の場合、1 μm の単結晶中に約 670 接合のジョセフソン接合が形成されている。

[0026] 図 2 では、単結晶 1 の一例として Bi₂Te₂を提示したが、超伝導体 1 は交流ジョセフソン効果を生じることができれば、当該結晶構造に限られない。例えば、結晶構造の異なる Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+δ} (Bi₂Te₂) 等を用いることもできる。

[0027] 超伝導体 1 は、ジョセフソン接合の積層面と垂直な方向に電圧が印加されると、テラヘルツ波を発振する。テラヘルツ波の発振の原理を以下に簡単に説明する。

超伝導体 1 のジョセフソン接合の積層面と垂直な方向に電圧が印加すると、交流ジョセフソン効果が生じる。交流ジョセフソン効果は、極めて薄い絶縁層を介した二つの超伝導体の間に一定の電圧 V_J を印加すると、交流電流が流れる現象のことを言う。

[0028] このときの交流電流の振動数 f_J は以下の式 (1) で表示することができる。 e は電気素量、 h はプランク定数である。

$$f_J = (2e/h) V_J \quad \dots (1)$$

[0029] 電気素量およびプランク定数は一定であるため、式 (1) で示すように、交流電流の振動数 f_J は、ジョセフソン接合一層当りに印加した電圧 V_J に比例する。このように、単結晶 1 内に電流が流れることで、電磁波（以下、「非共振のテラヘルツ波」ということがある）が発生する。この電磁波がテラヘルツ波であり、超伝導体 1 からなるテラヘルツ波発振部から外部に放射される。

[0030] ここで発振されるテラヘルツ波は、それほど強度が強くない。強度の強いテラヘルツ波は、超伝導体 1 の幾何学的構造により生じる固有周波数 f_0 と共振することで得られる。

[0031] 固有周波数 f_0 とは、物質の形状およびサイズによって影響を受ける周波数である。ある物質が閉じられた領域を有すると、その物質内では、境界条件

に基づいた定在波が形成される。この定在波の周波数が固有周波数 f_0 である。

例えば、図 1 に示すように、超伝導体 1 が円板状である場合、超伝導体 1 内に定在波が形成される。形状が円板の場合、固有周波数 f_0 は、以下で表される。

$$f_0 = \chi_{11} c_0 / 2 \pi n a \cdots (2)$$

ここで、基本波の場合 χ_{11} は 1.841 であり、 c_0 は真空中の光速、 n は屈折率、 a は円板の半径である。

[0032] この固有周波数 f_0 と交流ジョセフソン効果に伴う振動電流の周波数 f_J が一致すると、積層するジョセフソン接合間で振動電流が位相を揃えて（コヒーレントに）流れ、共振が生じる。その結果、強い強度ピークを有するテラヘルツ波（以下、「共振のテラヘルツ波」ということがある）が超伝導体 1 からなるテラヘルツ波発振部から外部に放射される。

[0033] テラヘルツ波発振部は、円板状の超伝導体 1 からなる。従来のテラヘルツ帯域電磁波発振素子では、円板状の超伝導体に加えて、その下方に基板上の超伝導体が設けられていることが一般的であり、この点が異なる。

[0034] 図 3 は、従来のテラヘルツ帯域電磁波発振素子の一例であり、非特許文献 1 に記載されたテラヘルツ帯域電磁波発振素子の斜視模式図である。図 3 に示すように、従来のテラヘルツ帯域電磁波発振素子 50 は、大きな超伝導の単結晶を集束イオンビーム（FIB, Focused Ion Beam）で削るように加工することで形成されている。すなわち、加工によってメサ部 51 の下方に形成された部分が基板 52 として機能する。換言すると、メサ部 51 と、メサ部 51 の下方に設けられた基板 52 は、同一の超伝導体からなり一体化している。

[0035] 従来のテラヘルツ帯域電磁波発振素子 50 に電圧が印加されると、同一の超伝導体の単結晶からなるメサ部 51 と基板 52 のいずれにも交流電流が生じる。すなわち、テラヘルツ波はメサ部 51 及び基板 52 で生じる。実際には、固有振動数 f_0 を決める主要因はメサ部 51 であるため、共振のテラヘル

ツ波はメサ部 5 1 から発振されるが、メサ部 5 1 は基板 5 2 と一体化され独立しておらず、その境界は明確ではない。

[0036] これに対し、本実施形態に係るテラヘルツ波発振部は、円板状の超伝導体 1 からなる。

超伝導体 1 は、その両端に電極 2 が接続されているが、超伝導体 1 と電極 2 は異なる物質である。このように、テラヘルツ波発振部が円板上の超伝導体 1 のみからなることを、本明細書においては「単独」と表現することがある。

[0037] 超伝導体 1 が単独で存在すると、2 つの利点がある。

まず一つ目の利点は、固有振動数 f_0 の値が明確になるということである。テラヘルツ帯域電磁波発振素子 5 0 のように、メサ部 5 1 と基板 5 2 が一体化していると、メサ部 5 1 と基板 5 2 の間の境界が不明確になる。そのため、閉じられた空間内に形成される定在波の波形も不明確になる。その結果、固有振動数 f_0 の波長のピークがブロードになる。これに対し、超伝導体 1 が単独で存在すると、超伝導体 1 は明確な閉空間を形成するため、固有振動数 f_0 の値が明確になる。したがって、より高強度のテラヘルツ波を発振しやすくなる。

[0038] 二つ目の利点は、超伝導体 1 の温度が高くなることが抑制されることである。式 (1) に示すように、高い周波数領域のテラヘルツ波を発振するためには、超伝導体 1 に印加する電圧を高める必要がある。しかしながら、超伝導体 1 に印加する電圧を高めればそれだけ、超伝導体 1 が発熱する。超伝導体が発熱すると、超伝導層と絶縁層の積層構造を有する超伝導体の絶縁層の絶縁性が低下する。交流ジョセフソン効果は、極めて薄い絶縁層を介した二つの超伝導体の間に一定の電圧を印加すると、交流電流が流れる現象である。そのため、絶縁層の絶縁性が低下すると、所望の交流ジョセフソン効果を得ることができず、テラヘルツ波を発振することができない。

[0039] テラヘルツ帯域電磁波発振素子 5 0 のように、メサ部 5 1 と基板 5 2 が一体化していると、基板 5 2 が排熱を阻害する。基板 5 2 は超伝導体からなる

ため、熱伝導性が極めて悪い。これに対し、本実施形態における超伝導体 1 のように単独で存在すると、超伝導体 1 の周囲全方向に排熱することができ、超伝導体 1 の温度が高くなることを抑制できる。その結果、高電圧を印加することができ、式 (1) に示すように高い周波数領域のテラヘルツ波を発振することができる。

[0040] 次いで、超伝導体 1 の形状について説明する。

超伝導体 1 は、円板状である。ここで円板状とは、その多重積層型ジョセフソン接合の積層面と平行な切断面が円形であるものを意味し、円柱も含む。超伝導体 1 が円板状かつ単独で存在することで、2 THz 以上のテラヘルツ波を発振することができる。

[0041] 2 THz 以上のテラヘルツ波は、超伝導体 1 の形状を円板状にした際のみを確認される。この理由は明確ではないが、現時点では超伝導体 1 の形状を多重積層型ジョセフソン接合の積層面と平行な切断面が矩形である直方体状とした際には確認できていない。

[0042] また図 3 で示すような下方に基板を有するテラヘルツ帯域電磁波発振素子を用いた場合に、そのメサ部の形状を直方体状から円板状に変更することで、発振するテラヘルツ波の波長が高周波数になるという訳でもない。

すなわち、超伝導体 1 を円板状かつ単独とすることで、2 THz 以上のテラヘルツ波を発振することができることは、本発明者らが種々の検討の結果、初めて見出したものである。

[0043] 超伝導体 1 の高さは、 $1\ \mu\text{m} \sim 10\ \mu\text{m}$ であることが好ましい。超伝導体 1 の高さをこの範囲にすることで、超伝導体 1 が高温になることを避けつつ、高強度のテラヘルツ波を発振できる。超伝導体 1 の高さとは、多重積層型ジョセフソン接合の積層面に対して垂直な方向の超伝導体 1 の厚みを意味する。

[0044] 超伝導体 1 の高さは、超伝導体 1 内に形成されるジョセフソン接合の数 N として換算される。

例えば、超伝導体 1 の高さを h 、超伝導体の結晶の c 軸長を h_c とすると以

下の関係が成り立つ。

$$N = h / (h_c / 2) \cdots (3)$$

[0045] ジョセフソン接合の数 N が増えれば、それだけ発振するテラヘルツ波を高強度になる。

超伝導体 1 の高さが十分であれば、より高強度のテラヘルツ波を発振することができる。また $1 \mu\text{m}$ 以下であると、薄すぎて取り扱いが困難になる。

[0046] 式 (1) に示す電圧 V_J は、あくまでジョセフソン接合一層当りに印加する電圧である。そのため、実際に超伝導体 1 全体に印加する電圧 V は、ジョセフソン接合の数が N であれば、 $V = N \times V_J \cdots (4)$ となる。すなわち、超伝導体 1 の高さが高くなると、それだけジョセフソン接合の数 N が増加し、超伝導体 1 全体に印加する電圧 V が非常に大きくなる。その結果、超伝導体 1 が発熱しやすくなる。例えば、長期間の使用における絶縁層 1 b の絶縁性の劣化を避ける観点から、超伝導体 1 の高さは $10 \mu\text{m}$ 以下であることが好ましい。

[0047] 円板状の超伝導体 1 の直径は、適宜設計できる。ここで、円板状の超伝導体 1 の直径とは、多重積層型ジョセフソン接合の積層面と平行な切断面における直径を意味する。切断面の直径が変化する場合、それらの平均値を意味する。

[0048] 式 (2) に示すように、超伝導体 1 が円板状である場合の固有振動数 f_c は、その円板の直径に影響を受ける。円板状かつ単独の超伝導体 1 による 2 THz 以上の周波数のテラヘルツ波は、非共振のテラヘルツ波であるか、共振のテラヘルツ波であるかは明確になっていない。そのため、円板状の超伝導体 1 の直径が、式 (2) から求められる値であることは必ずしも必要ではない。しかしながら、円板状の超伝導体 1 の直径をこの範囲とすることで、超伝導体 1 における交流電流の振動数 f_J と共振しやすくなり、より高強度のテラヘルツ波を得やすくなる。

[0049] 円板状の超伝導体 1 において、その上底部と下底部の幅は一致していることが好ましい。超伝導体 1 の上底部と下底部の幅は一致していることは、す

なわちその端面（側面）が基板に垂直となっていることを意味する。そのため、超伝導体 1 内で形成される定在波が特定の周波数のみとなる。この一定の固有振周波数 f_0 と交流ジョセフソン効果に伴う振動電流の周波数 f_J が一致すると、より単色のテラヘルツ波を得ることができる。積層したジョセフソン接合同士が共振してテラヘルツ波が発振するため、その端面が基板に垂直となっていれば、特定の波長で高い強度を示す、より単色のテラヘルツ波を得ることができる。

[0050] 超伝導体は、1つである必要はない。例えば、図 4 は、本発明の他の態様に係るテラヘルツ波発振素子の斜視模式図である。図 4 に示すテラヘルツ波発振素子 20 は、2つの電極 22 の間に、複数の超伝導体 21 が配置されている。ここで、それぞれの超伝導体 21 は、電圧が印加される方向を同一にして配置されている。

超伝導体 21 が複数あると、テラヘルツ波の発振源が複数となるため、テラヘルツ波の発振強度を高めることができる。

[0051] また超伝導体 21 が、所定の間隔で規則的に並置されていることがより好ましい。超伝導体 21 を所定の間隔で規則的に並置すると、複数の超伝導体 21 が協調して動作することができ、テラヘルツ波の発振強度を飛躍的に高めることができる。

[0052] このとき得られる発振強度は、複数の超伝導体 21 の協調動作に影響を受ける。そのため、超伝導体 21 の個数の 2 乗に比例する。また一つの超伝導体 21 内に積層されたジョセフソン接合同士も同様に協調動作するため、発振強度は積層数の 2 乗にも比例する。すなわち、M 層積層されて形成された単結晶が、N 個所定の間隔で並置されていると、 $M^2 \times N^2$ の発振強度を実現することができ、極めて強いテラヘルツ波の発振を実現することができる。所定の間隔は、それぞれの超伝導体 21 が共振する間隔であり、発振する周波数から算出される。

[0053] このような複数配列は、従来のテラヘルツ帯域電磁波発振素子 50 でも原理的には実現可能である。しかしながら、従来のテラヘルツ帯域電磁波発振

素子 50 では、それぞれの超伝導体での発熱による温度上昇が非常に大きく、超伝導体同士により熱的な相互干渉が生じたり、各超伝導体に印加される電圧が減少する等の問題が発現する。そのため、現実の実現することは難しい。これに対し、超伝導体 21 を単独で用いることで、超伝導体 21 の集積密度を高めることができる。すなわち、協調動作によるテラヘルツ波の発振をより高強度とすることができる。

[0054] 図 4 では、2つの電極 22 の間に、複数の超伝導体 21 を配置したが、この場合に限られない。超伝導体 21 のそれぞれに電極を接続してもよい。ただし、素子構造を簡素化する点からは、図 4 の構成であることが好ましい。

[0055] 図 1 に戻り、電極 2 は、超伝導体 1 の両端面に接続される。超伝導体 1 は円板状であるため、両端面とは平面視円形の 2つの端面を意味する。すなわち、電極 2 は、多重ジョセフソン接合を有する超伝導体 1 の積層面と垂直な方向に存在する。

[0056] 電極 2 は、超伝導体 1 の熱伝導率よりも高い熱伝導率を有することが好ましい。電極 2 がある程度の厚さを有する場合、電極 2 は超伝導体 1 の排熱に大きく寄与する。そのため、電極 2 の熱伝導率を、超伝導体 1 よりも高くすることで、超伝導体 1 が高温になることを抑制できる。電極 2 が非常に薄い場合、電極 2 は超伝導体 1 の排熱に大きく寄与することはないが、排熱の観点から超伝導体 1 の熱伝導率よりも高い熱伝導率を有していることが適切である。

[0057] 電極 2 は、高い導電性を有することが好ましい。高い熱伝導率及び高い導電性を有する材料としては、銅 (Cu)、金 (Au)、銀 (Ag)、アルミニウム (Al) 等を用いることができる。

[0058] 電極 2 は超伝導体 1 に接続されていればよく、その形状は問わず、使用の態様に合せて適宜変更することができる。超伝導体 1 自体は、ジョセフソン電流によって電荷を運ぶことができるため、いずれかで接点を有していれば、超伝導体 1 に電圧を印加することができる。

[0059] ジョセフソン接合の積層面に均一に電圧を印加させる観点からは、電極 2

は超伝導体 1 の端面全面に形成されていることが好ましい。一方、電極 2 が金属からなる場合は、電極 2 はテラヘルツ波を完全反射する。そのため、電極がテラヘルツ波の放射を阻害しない様に、電極 2 は超伝導体 1 の一部に形成されていてもよい。

[0060] また図 5 に示すように、電極 3 2 をホーンアンテナ状に加工してもよい。図 5 は、電極 3 2 をホーンアンテナ状に加工したテラヘルツ帯域電磁波発振素子 3 0 の断面模式図である。ここで、ホーンアンテナ状とは、電極 3 2 と超伝導体 3 1 が接合していない非接合部分において、電極 3 2 間の距離が超伝導体 3 1 から離れるに従い広くなる構造を意味する。換言すると、テラヘルツ波の発振源から波が徐々に広がるように形成された構造である。図 5 では、超伝導体 3 1 に対して上方の電極 3 2 を加工したが、下方の電極 3 2 にも同様な加工を施してもよい。

[0061] 電極 3 2 をこのような形状に加工することで、電極 3 2 間につくられる空間と自由空間とのインピーダンスの整合性が高まる。そのため、開口端における電磁波の反射が抑制され、かつ高い指向性が付与される。つまり、効率的に発生したテラヘルツ波を取り出すことができる。

[0062] 電極の構造はホーンアンテナ状には限らない。例えば、曲面側が超伝導体と接合された半球レンズ状でもよい。半球レンズ状とは、必ずしも「半球」には限られず、電極と超伝導体が接合していない非接合部分において、電極間の距離が超伝導体から離れるに従い広くなるような曲面が形成されていればよい。電極を半球レンズ状に加工することで、発生する熱を効率的に排熱すると共に、電波を効率的に集光することができる。またホーンアンテナ状に加工した場合と同様に、インピーダンスの整合性が高まる。

[0063] 電極 2 は、超伝導体 1 に対して、半田、銀ペースト等、従来公知の方法で接合できる。また電極 2 が薄い場合は、超伝導体 1 に金属膜を被覆し、この金属膜を電極として用いてもよい。

[0064] 図 6 に示すように、電極 2 のいずれかを支持する基板 3 を設けてもよい。図 6 は、本発明の他の態様に係るテラヘルツ帯域電磁波発振素子 4 0 の斜視

模式図である。超伝導体 1 は、極めて薄い。電極 2 はその態様により厚みが異なるが、電極 2 をスパッタ等で形成した場合は、その厚みは極めて薄くなる。そのため、電極 2 が薄い場合、電極 2 及び超伝導体 1 を支持する基板 3 を設けることで、テラヘルツ帯域電磁波発振素子 40 のハンドリング性を高めることができる。

基板 3 は、上述のようなホーンアンテナ状、半球レンズ状に加工してもよい。基板 3 をこのように加工することで、発生する熱の排熱性、電波の集光性、インピーダンスの整合性が高まる。

[0065] 基板 3 は、電極 2 を介して超伝導体 1 に接続されているため、超伝導体 1 より熱伝導率が高いことが好ましい。基板 3 にはサファイア、ダイヤモンドまたは銅、あるいはそれらと同等以上に排熱効果の高い他のもの等を用いることが好ましい。これらの物質は、テラヘルツ帯域電磁波発振素子が駆動する窒素の沸点付近の温度において、高い熱伝導性を示す。そのため、超伝導体 1 の排熱を基板 3 側から効率的にサポートできる。

[0066] 上述のように、本発明のテラヘルツ帯域電磁波発振素子は、単独かつ円板状の超伝導体を用いることで、2 THz 以上の周波数のテラヘルツ波を発振できる。

[0067] (テラヘルツ帯域電磁波発振装置)

図 7 は、本発明の一態様にかかるテラヘルツ帯域電磁波発振装置を模式的に示した斜視模式図である。本発明の一態様にかかるテラヘルツ帯域電磁波発振装置 100 は、上記のテラヘルツ帯域電磁波発振素子 10, 20, 30, 40 と、多重積層型ジョセフソン接合を有する超伝導体 1 における積層面と垂直な方向に電圧を印加する電圧印加手段 110 とを備える。テラヘルツ帯域電磁波発振素子は、図 1、図 4、図 5、図 6 のいずれを用いてもよいが、以下、図 1 のテラヘルツ帯域電磁波発振素子 10 を基に説明する。

[0068] 電圧印加手段 110 から供給された電圧は、電極 2 に印加される。電圧印加手段 110 は、電極 2 と電氣的に接続されていればよく、基材 3 が導通を有する場合は電圧印加手段 110 と電極 2 との電氣的な接続を、基材 3 を介

して行ってもよい。

[0069] 電圧印加手段 110 と電極 2 を電氣的に接続することにより超伝導体 1 の積層面に垂直な方向に電圧を印加することができる。超伝導体 1 の積層面に垂直な方向には、超伝導層 1a と絶縁層 1b の積層構造が形成されているため、電圧が印加されることで交流ジョセフソン効果が生じる。この印加された電圧に比例する振動電流の周波数と、超伝導体 1 の固有振動数が一致すると積層するジョセフソン接合間で共振が生じ、振動電流が位相を揃えて（コヒーレントに）流れることで、テラヘルツ波が外部に発振される。

[0070] またテラヘルツ帯域電磁波発振装置 100 は、図視略する冷却装置をさらに備えることが好ましい。冷却装置は、テラヘルツ帯域電磁波発振素子 10 を冷却できるものであれば、特に限定されない。本実施形態では、超伝導体 1 を効率的に冷却できるため、冷却媒体として液体ヘリウムを用いずに液体窒素とすることもできる。液体ヘリウムに対し、液体窒素は扱いが簡便である。そのため、冷却装置も安価で小型のものをを用いることができる。

[0071] このテラヘルツ帯域電磁波発振装置 100 は、上述のテラヘルツ帯域電磁波発振素子 10 を備えるため、効率的な排熱を実現することができ、2 THz 以上のテラヘルツ波を発振することができる。

電圧印加手段 110 は特に限定されるものでなく、超伝導体 1 に直流を流すことができるものであればよい。

[0072] 以上、本発明の好ましい実施の形態について詳述したが、本発明は特定の実施の形態に限定されるものではなく、特許請求の範囲内に記載された本発明の要旨の範囲内において、種々の変形・変更が可能である。

実施例

[0073] 以下、実施例により上述の実施形態の効果をより明らかなものとする。実施形態は以下の実施例に限定されるものではなく、その要旨を変更しない範囲で適宜変更して実施することができる。

[0074] （実施例）

直径 80 μm 、厚み約 3.5 μm の Bi₂Te からなる円板状の超伝導

体を準備した。この超伝導体に異なる3つの電圧をそれぞれ印加した。3つの電圧は、原理的に高周波数のテラヘルツ波を発振するのに十分な5 V程度とした。3つの電圧は、バイアスポイントA, B, Cであり、 $A < B < C$ の関係である。この電圧には、接触抵抗等の種々の寄与が加わっている。また厚さ方向に積層されたジョセフソン接合の全てがこのバイアスポイントによって動作しているとは限らない。そして温度15 Kで得られた発振スペクトルを測定した。電圧無印加時のスペクトルをバックグラウンド(B. G.)とした。

[0075] 図8は、実施例1の発振スペクトルを示す。縦軸は測定強度を示し、横軸は波数を示す。発生したテラヘルツ波は、日本分光社製のFARIS-1を用いて計測した。図8に示すように、約 80 cm^{-1} 付近にシグナルが確認される。波数を約30倍すれば、発振する周波数に換算することができる。すなわち、このシグナルは、 2.4 THz 付近を指す。このように、円板状かつ単独の超伝導体に電圧を印加すると、 2.0 THz 以上でテラヘルツ波が発振することが確認できた。また印加する電圧を大きくするにつれて、ピーク位置が大きくなっている。これは式(1)の関係を示している。

[0076] (比較例)

比較例は、図3の構成のテラヘルツ帯域電磁波発振素子を用いて、発振スペクトルのピークを確認した。比較例と実施例の構造上の違いは、超伝導体が単独で形成されているかどうかの違いのみである。

その結果、 0.54 THz 程度の周波数のテラヘルツ波が確認された。この際の発振出力は、マイクロワットレベル以下の弱いものであった。

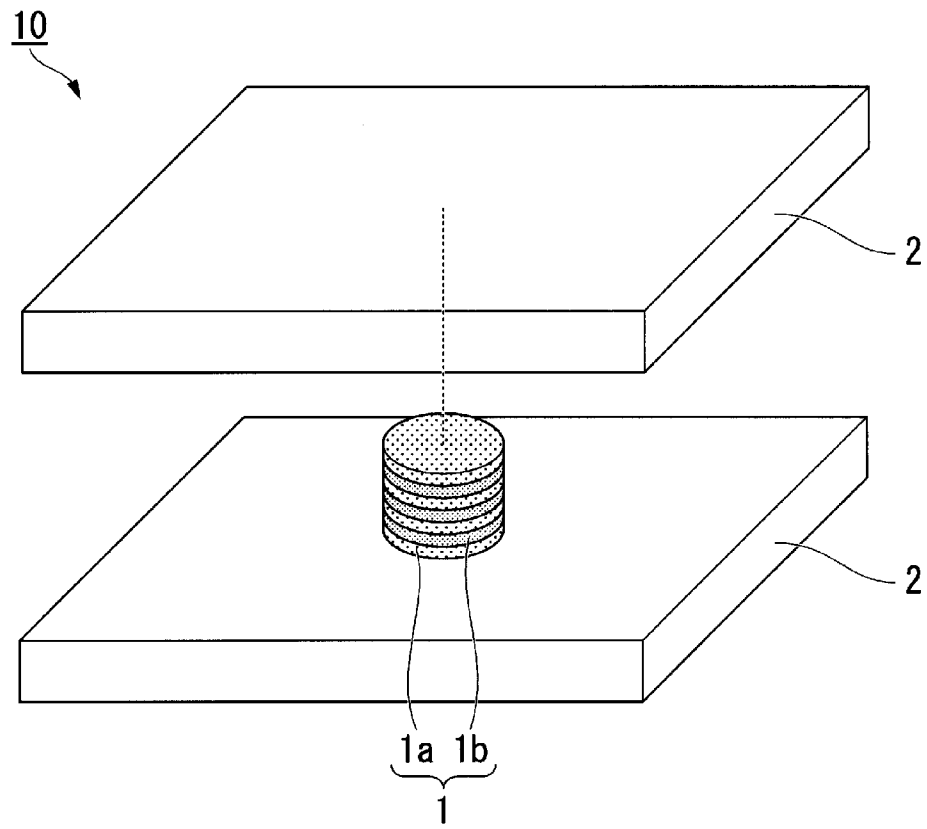
符号の説明

[0077] 1, 21…超伝導体、1a…超伝導層、1b…絶縁層、2, 22…電極、10, 20, 30, 40, 50…テラヘルツ帯域電磁波発振素子、51…メサ部、52…基板、100…テラヘルツ帯域電磁波発振装置、110…電圧印加手段

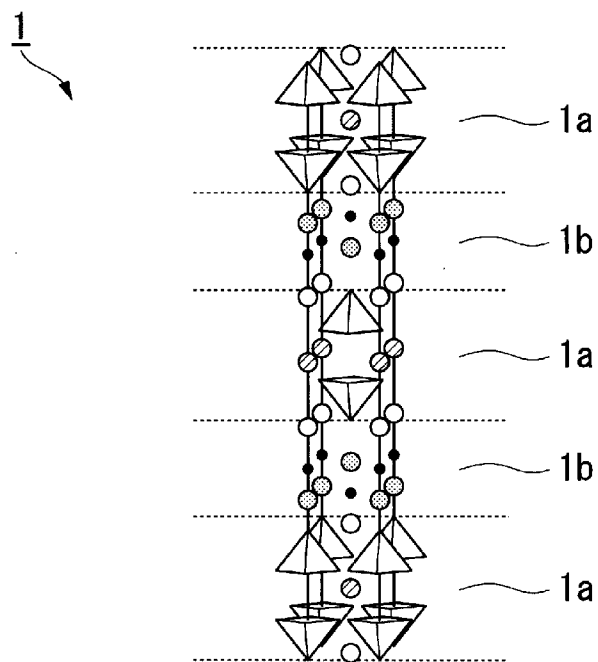
請求の範囲

- [請求項1] テラヘルツ帯域電磁波を発振する独立したテラヘルツ波発振部を備え、
- 前記テラヘルツ波発振部は、交流ジョセフソン効果を利用して複数のジョセフソン接合が協調して振動することによりテラヘルツ帯域電磁波を発振できる多重積層型ジョセフソン接合を有し、かつ、前記多重積層型ジョセフソン接合の積層面と平行な切断面が円形である円板状の超伝導体からなる、テラヘルツ帯域電磁波発振素子。
- [請求項2] 前記超伝導体の両端面に接続された電極をさらに備える請求項1に記載のテラヘルツ帯域電磁波発振素子。
- [請求項3] 前記電極のいずれかを支持する基板をさらに有し、
 前記基板の熱伝導率が、前記超伝導体の熱伝導率よりも高い請求項2に記載のテラヘルツ帯域電磁波発振素子。
- [請求項4] 前記基板がサファイア、ダイヤモンドまたは銅のいずれかである請求項3に記載のテラヘルツ帯域電磁波発振素子。
- [請求項5] 前記超伝導体が、前記電極の間に複数配置されている請求項2に記載のテラヘルツ帯域電磁波発振素子。
- [請求項6] 請求項2に記載のテラヘルツ帯域電磁波発振素子と、
 前記電極に電圧を印加する電圧印加手段と、を備えるテラヘルツ帯域電磁波発振装置。

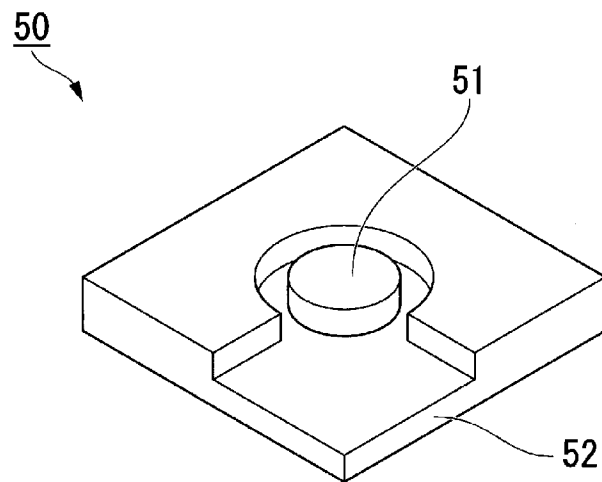
[図1]



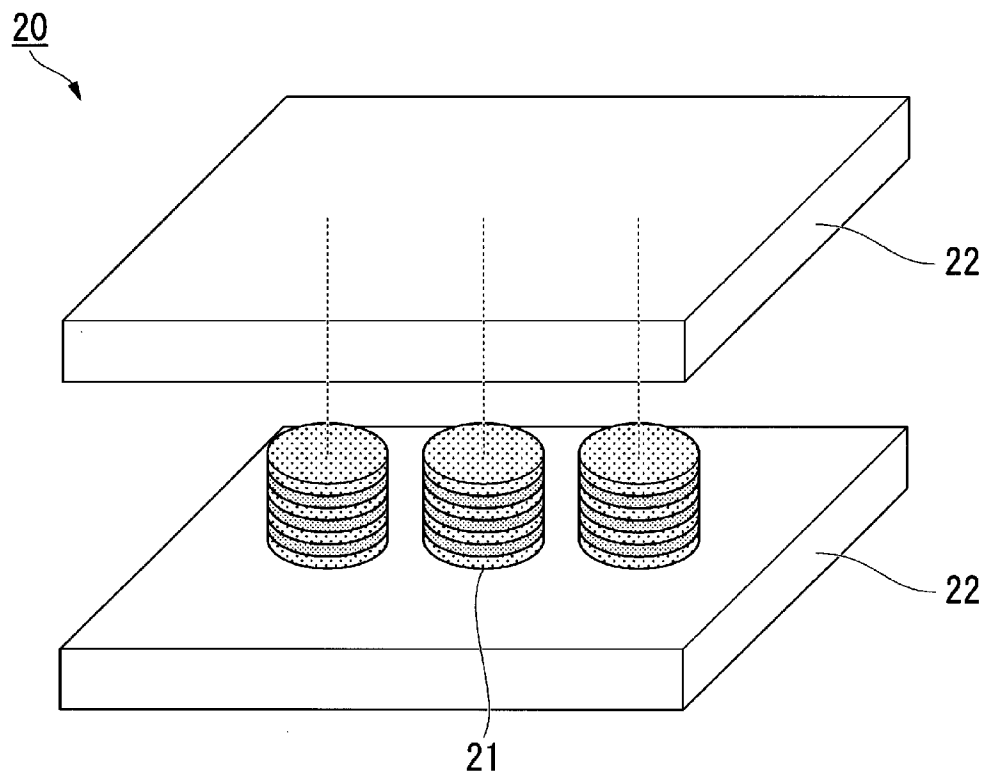
[図2]



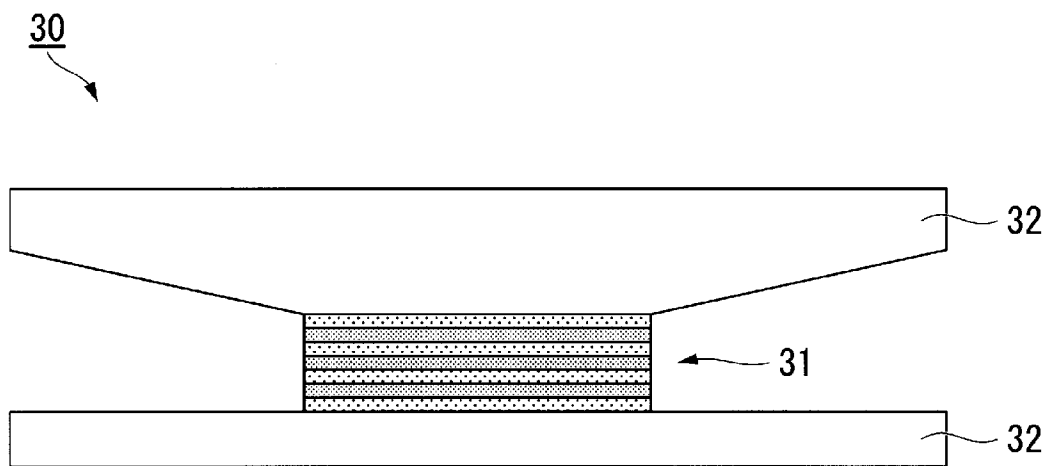
[図3]



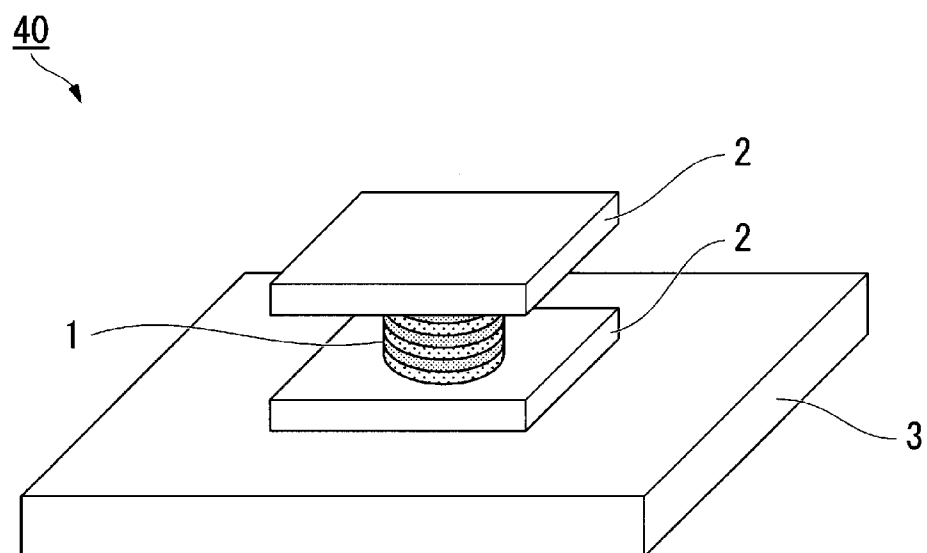
[図4]



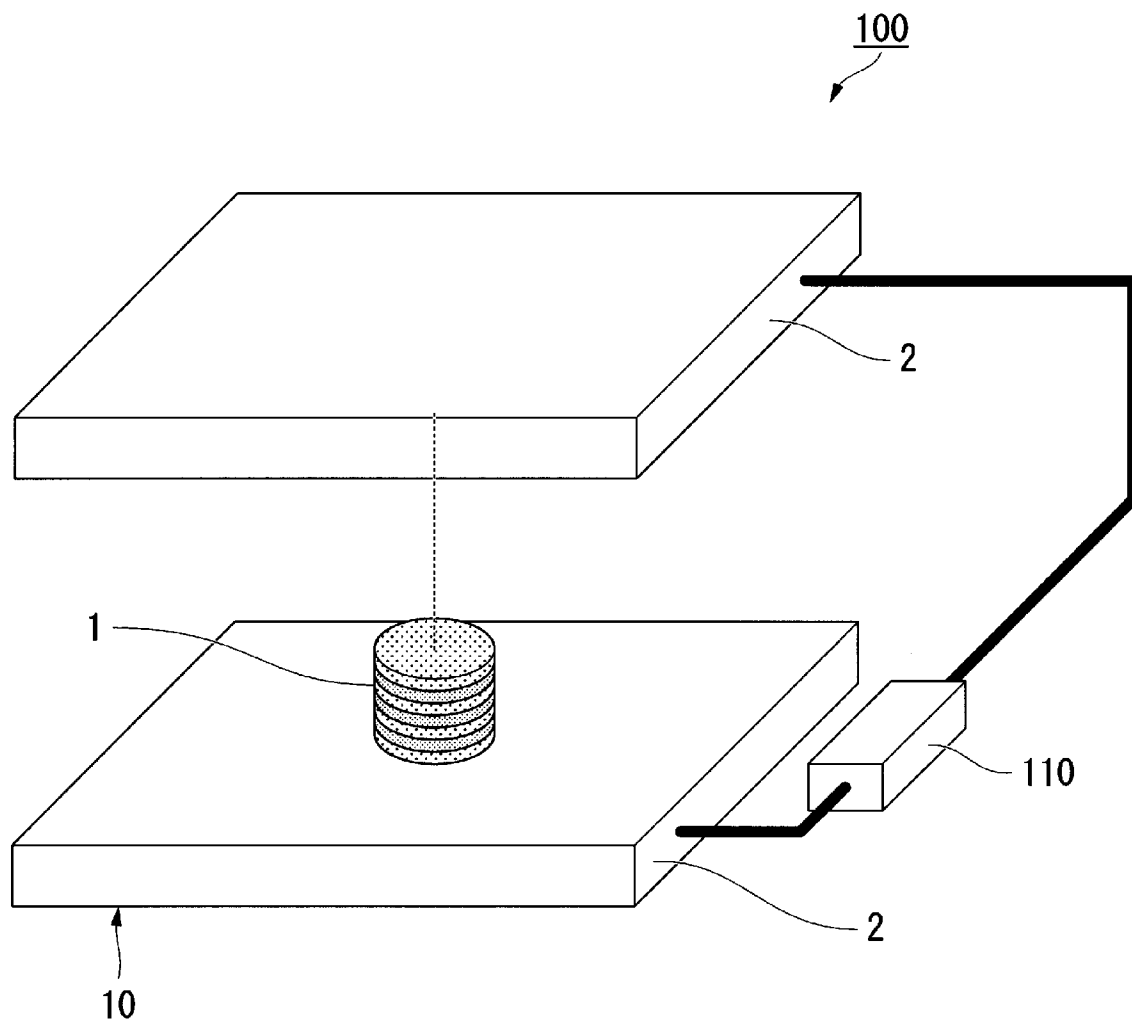
[図5]



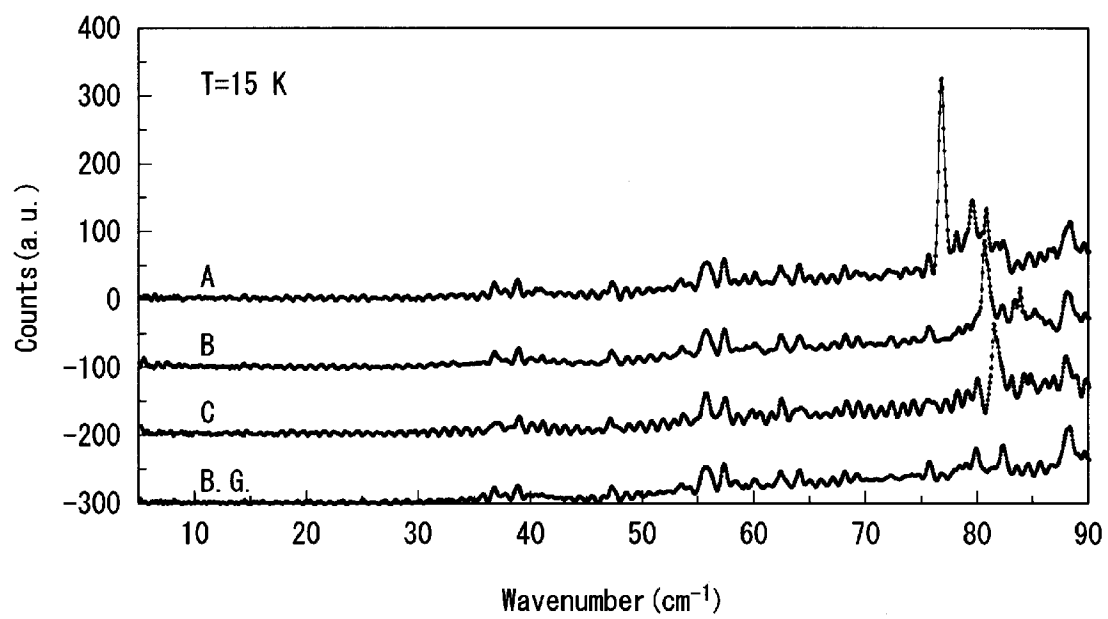
[図6]



[図7]



[図8]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/068107

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01L39/22(2006.01)i, H03B7/00(2006.01)i

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)

H01L39/22, H03B7/00

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

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2016
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2016	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2016

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.
X	JP 2010-027812 A (Tokyo Instruments, Inc.), 04 February 2010 (04.02.2010), paragraphs [0002] to [0007], [0030] to [0042] (Family: none)	1-6
A	JP 2000-514957 A (Oxxel Oxide Electronics Technology GmbH), 07 November 2000 (07.11.2000), page 12, lines 19 to 23; page 31, lines 8 to 18; fig. 1 & US 2001/0035524 A1 paragraphs [0016], [0142]; fig. 1 & US 6348699 B1 & WO 1998/004003 A2 & EP 823734 A1	1-6

☒ 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
01 September 2016 (01.09.16)

Date of mailing of the international search report
13 September 2016 (13.09.16)

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

International application No.

PCT/JP2016/068107

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2005-251863 A (Research Organization for Information Science and Technology), 15 September 2005 (15.09.2005), paragraph [0028] (Family: none)	1-6

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. H01L39/22(2006.01)i, H03B7/00(2006.01)i

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))

Int.Cl. H01L39/22, H03B7/00

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	1971-2016年
日本国実用新案登録公報	1996-2016年
日本国登録実用新案公報	1994-2016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
X	JP 2010-027812 A (株式会社東京インスツルメンツ) 2010.02.04, 0002 段落ないし 0007 段落、0030 段落ないし 0042 段落 (ファミリーなし)	1-6
A	JP 2000-514957 A (オクセル・オクサイド・エレクトロニクス・テ クノロジー・ゲゼルシャフト・ミット・ベシュレンクテル・ハフツ ング) 2000.11.07, 第12頁第19行ないし同頁第23行、第31頁第8 行ないし同頁第18行、図1 & US 2001/0035524 A1, 0016 段落、0142 段落、図1 & US 6348699 B1 & WO 1998/004003 A2 & EP 823734 A1	1-6

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	「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矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「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	「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
「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)	「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
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献	「&」 同一パテントファミリー文献
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願	

国際調査を完了した日

01.09.2016

国際調査報告の発送日

13.09.2016

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)

郵便番号 100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

棚田 一也

5 F

9361

電話番号 03-3581-1101 内線 3516

C (続き) . 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
A	JP 2005-251863 A (財団法人高度情報科学研究機構) 2005.09.15, 0028 段落 (ファミリーなし)	1-6