

(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
2022年6月16日(16.06.2022)



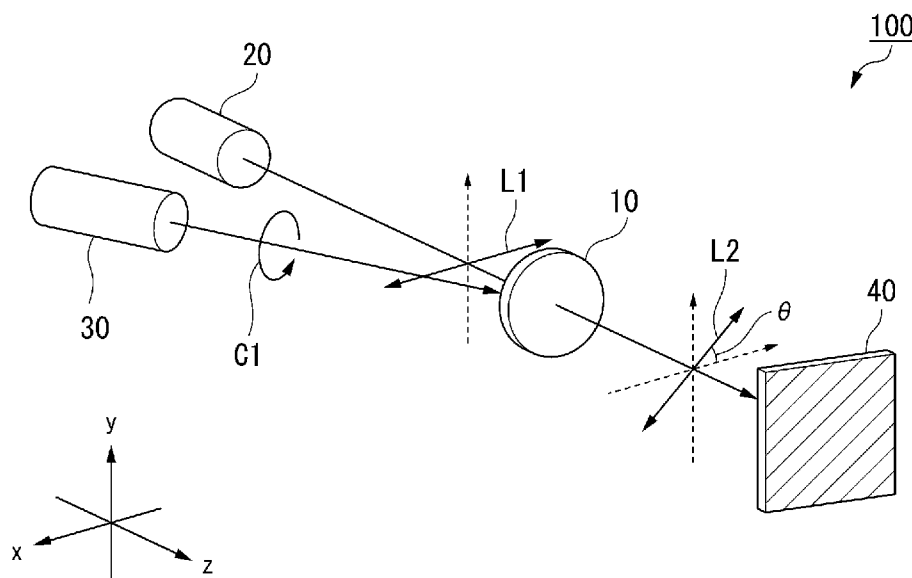
(10) 国際公開番号

WO 2022/124205 A1

- (51) 国際特許分類:
G02F 1/09 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2021/044368
- (22) 国際出願日: 2021年12月2日(02.12.2021)
- (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 2020-203352 2020年12月8日(08.12.2020) JP
- (71) 出願人: 国立大学法人東北大学 (TOHOKU UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒9808577 宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 Miyagi (JP). 学校法人中央大学 (CHUO UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒1920393 東京都八王子市東中野742-1 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 岩井 伸一郎 (IWAI Shinichiro); 〒9808577 宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 国立大学法人東北大学内 Miyagi (JP). 川上 洋平 (KAWAKAMI Yohei); 〒9808577 宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 国立大学法人東北大学内 Miyagi (JP). 天野 辰哉 (AMANO Tatsuya); 〒9808577 宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 国立大学法人東北大学内 Miyagi (JP). 大串 研也 (OHGUSHI Kenya); 〒9808577 宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 国立大学法人東北大学内 Miyagi (JP). 米満 賢治 (YONEMITSU Kenji); 〒1128551 東

(54) Title: OPTICAL SWITCH ELEMENT, OPTICAL SWITCH DEVICE, OPTICAL COMMUNICATION SYSTEM, AND OPTICAL COMPUTER

(54) 発明の名称: 光スイッチ素子、光スイッチ装置、光通信システム及び光コンピュータ



(57) Abstract: The objective of the present invention is to provide an optical switch element, an optical switch device, an optical communication system, and an optical computer capable of operating even in a higher temperature range than the Néel temperature. An optical switch element (10) according to the present invention includes a substance comprising a plurality of transition metal elements having electrons in d-orbitals, and a plurality of anions arranged around each of the plurality of transition metal elements, wherein: the plurality of transition metal elements are arranged in a lattice formation; the t_{2g} -orbitals into which the d-orbitals of each of the plurality of transition metal elements are split are connected in a ring shape; and in a state in which the substance does not have long range magnetic order, signal light (L1) is polarized and rotated when control light

京都文京区春日 1 - 1 3 - 2 7 中央大学
後樂園キャンパス内 Tokyo (JP).

(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, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, 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, 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:

一 国際調査報告 (条約第21条(3))

(C1) is radiated.

(57) 要約: 本発明は、ネール温度より高い温度域でも動作できる光スイッチ素子、光スイッチ装置、光通信システム及び光コンピュータを提供することを目的とする。本発明の光スイッチ素子(10)は、d軌道に電子を有する複数の遷移金属元素と、前記複数の遷移金属元素のそれぞれの周囲に配置された複数の陰イオンと、を有する物質を含み、前記複数の遷移金属元素は格子状に配列し、前記複数の遷移金属元素のそれぞれのd軌道が分裂した t_{2g} 軌道は環状に繋がり、前記物質が長距離の磁気秩序を持たない状態で、制御光(C1)が照射された際に信号光(L1)を偏光回転させる。

明 細 書

発明の名称：

光スイッチ素子、光スイッチ装置、光通信システム及び光コンピュータ
技術分野

[0001] 本発明は、光スイッチ素子、光スイッチ装置、光通信システム及び光コンピュータに関する。本願は、2020年12月8日に、日本に出願された特願2020-203352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] 近年、物質のスピンを利用した素子に注目が集まっている。光磁気スイッチは、スピンを利用した素子の一例である。光磁気スイッチは、円偏光パルスを反強磁性体や弱強磁性体等の磁気秩序を有する物質に照射すると、旋光性が変化するという性質を利用したスイッチである。例えば、特許文献1には、磁気光学効果を利用した光磁気スイッチが記載されている。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特表2009-538490号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] 特許文献1に記載の光磁気スイッチは、隣接する副格子のスピンが磁気秩序を有する必要がある。これは特許文献1に記載の光磁気スイッチは、逆ファラデー効果を利用しているためである。逆ファラデー効果は、これまで長距離の磁気秩序をもつ磁性体（例えば、反強磁性体、弱強磁性体）に限られる現象であると考えられてきた。これらの反強磁性体や弱強磁性体における逆ファラデー効果では、円偏光によって励起された電子の軌道運動が、スピン軌道相互作用により物質中の磁化を顕在化させる。そのため、特許文献1に記載の光磁気スイッチは、反強磁性体や弱強磁性体等が長距離の磁気秩序

を持つネール温度 T_N 又はキュリー温度 T_C 以下でしか動作しない。しかしながら、多くの磁性体において、ネール温度 T_N 及びキュリー温度 T_C は極めて低温（例えば、7 K以下）である。特許文献1に記載の光磁気スイッチは、キュリー温度が比較的高い物質を用いているが、それでも使用できる温度範囲が制限される。

[0005] 本発明は上記問題に鑑みてなされたものであり、ネール温度より高い温度域でも動作できる光スイッチ素子、光スイッチ装置、光通信システム及び光コンピュータ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

[0006] 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。

[0007] (1) 第1の態様にかかる光スイッチ素子は、d軌道に電子を有する複数の遷移金属元素と、前記複数の遷移金属元素のそれぞれの周囲に配置された複数の陰イオンと、を有する物質を含み、前記複数の遷移金属元素は格子状に配列し、前記複数の遷移金属元素のそれぞれのd軌道が分裂した t_{2g} 軌道は環状に繋がり、前記物質が長距離の磁気秩序を持たない状態で、制御光が照射された際に信号光を偏光回転させる。

[0008] (2) 上記態様にかかる光スイッチ素子において、前記複数の遷移金属元素の配列がハニカム格子状、三角格子状、カゴメ格子状のいずれかであってもよい。

[0009] (3) 上記態様にかかる光スイッチ素子において、物質が $\alpha\text{-RuCl}_3$ であってもよい。

[0010] (4) 上記態様にかかる光スイッチ素子において、制御光の波長が、 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以上であってもよい。

[0011] (5) 第2の態様にかかる光スイッチ装置は、上記態様にかかる光スイッチ素子と、前記光スイッチ素子に前記信号光を照射する光源と、前記光スイッチ素子に前記制御光を照射する制御素子と、前記光スイッチ素子を透過又は反射した光を偏光する偏光板と、を有する。

[0012] (6) 第3の態様にかかる光通信システムは、上記態様にかかる光スイッチ

装置を備える。

[0013] (7) 第4の態様にかかる光コンピュータは、上記態様にかかる光スイッチ装置を備える。

発明の効果

[0014] 上記態様にかかる光スイッチ素子、光スイッチ装置、光通信システム及び光コンピュータは、ネール温度より高い温度域でも動作できる。

図面の簡単な説明

[0015] [図1]第1実施形態に係る光スイッチ装置の斜視図である。

[図2]第1実施形態に係る光スイッチ素子を構成する物質の結晶構造（または原子配列）の一例である。

[図3]結晶場分裂を説明するための模式図である。

[図4]遷移金属元素のd軌道が分裂した t_{2g} 軌道の電荷分布を示す。

[図5] $\alpha\text{-RuCl}_3$ のネール温度未満の温度域におけるスピンの状態を示す。

[図6]第1実施形態にかかる光通信システムのブロック図である。

[図7]第1実施形態にかかる光コンピュータのブロック図である。

[図8]第1変形例にかかる光スイッチ装置の斜視図である。

[図9]実施例1の光スイッチ素子における円偏光励起による偏光回転の時間変化を示す。

[図10]実施例2の光スイッチ素子における円偏光励起による偏光回転の時間変化を示す。

[図11]実施例3の測定結果であり、円偏光励起による偏光回転の回転角の最大値の温度依存性を示す。

[図12]実施例4の理論計算によって求められた円偏光励起によって $\alpha\text{-RuCl}_3$ に生じる磁化の面直成分の時間変化を示す。

[図13]実施例5の測定結果を示す。

[図14]制御光の光子エネルギーを 1.55 eV （波長 800 nm ）に変更した際に、偏光方向の回転角度の時間変化を示す。

発明を実施するための形態

- [0016] 以下、本実施形態について、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、本発明の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。
- [0017] まず方向について定義する。光源20から照射される信号光L1の進行方向をz方向、z方向と直交する面内の一方向をx方向、z方向及びx方向と直交する方向をy方向とする。また物質を構成する結晶構造において、結晶の成長方向をc軸方向、c軸方向と直交する方向をa軸方向及びb軸方向とする。c軸方向は、例えばz方向と一致し、a軸方向は、例えばx方向と一致し、b軸方向は、例えばy方向と一致していてもよい。その他、a軸方向は、例えば $(x, y, z) = (1, 1, -2)$ 方向と一致し、b軸方向は、例えば $(x, y, z) = (-1, 1, 0)$ 方向と一致し、c軸方向は、例えば $(x, y, z) = (1, 1, 1)$ と一致していてもよい。
- [0018] 図1は、第1実施形態に係る光スイッチ装置100の斜視図である。光スイッチ装置100は、光スイッチ素子10と光源20と制御素子30と偏光板40とを有する。光スイッチ装置100は、制御素子30から光スイッチ素子10に照射した制御光C1で、光源20から出射した信号光L1の偏光方向を回転させ、偏光板40を通過する光の強度を変化させる。
- [0019] 光源20は、光スイッチ素子10に信号光L1を照射する光源である。制御素子30は、光スイッチ素子10に制御光C1を照射する光源である。光源20及び制御素子30は、公知のものを用いることができる。光源20及び制御素子30は、例えば、レーザー光源である。信号光L1は、例えば、直線偏光である。制御光C1は、円偏光である。制御光C1のヘリシティは問わない。
- [0020] 偏光板40は、例えば、光スイッチ素子10を透過した光の進行方向上に

ある。偏光板 40 は、例えば直線偏光板であり、公知のものを用いることができる。

[0021] 光スイッチ素子 10 は、制御光 C1 が照射された際に、信号光 L1 を偏光回転させる。光スイッチ素子 10 は、信号光 L1 を透過できる。信号光 L1 の波長は、好ましくは $1\ \mu\text{m}$ 以上であり、より好ましくは $1.2\ \mu\text{m}$ 以上である。

[0022] 図 2 は、第 1 実施形態に係る光スイッチ素子を構成する物質 M1 の結晶構造の一例である。図 2 は、物質 M1 の一例として $\alpha\text{-RuCl}_3$ の結晶構造である。光スイッチ素子 10 は、複数の遷移金属元素 1 と複数の陰イオン 2 とを有する物質 M1 を含む。

[0023] 遷移金属元素 1 は、d 軌道に電子を有するものであればよい。遷移金属元素 1 は、例えば、4 d 軌道に電子を有するものであり、例えば、Y、Zr、Nb、Mo、Tc、Ru、Rh、Pd、Ag、Cd である。図 2 における遷移金属元素 1 は、Ru である。複数の遷移金属元素 1 は、格子状に配列している。複数の遷移金属元素 1 の配列は、例えば、二次元格子状に配列している。複数の遷移金属元素 1 の配列は、具体的には、例えば、ハニカム格子状、三角格子状、カゴメ格子状のいずれかであってもよい。また二次元格子の単位格子の形状は、三角形、四角形（正方形、長方形、平行四辺形、ひし形）、六角形等でもよい。複数の遷移金属元素 1 の配列はハニカム状であることが特に好ましい。図 2 における遷移金属元素 1 は、ハニカム格子状に繋がっている。

[0024] 複数の陰イオン 2 は、それぞれの遷移金属元素 1 の周囲を囲む。複数の陰イオン 2 は、格子状に配列し、格子の中心位置に遷移金属元素 1 を含む。陰イオン 2 の配列は、例えば、ハニカム格子状、三角格子状、カゴメ格子状であり、ハニカム格子状であることが好ましい。陰イオン 2 は、例えば、塩化物イオン (Cl^-)、酸化物イオン (O^{2-}) である。図 2 における陰イオン 2 は、 Cl^- である。

[0025] 光スイッチ素子 10 に用いられる物質 M1 は、例えば、 $\alpha\text{-RuCl}_3$ 、N

a_2IrO_3 、 Li_2IrO_3 、 $\text{Bi}_3\text{Mn}_4\text{O}_{12}(\text{NO}_3)$ 、 $\text{ZnCu}_3(\text{OH}_6\text{Cl}_2)$ 、遷移金属カルコゲナイドである。

[0026] 図3は、物質中の一つの遷移金属元素1と周囲の陰イオン2との位置関係の一例を示す。図3は、結晶場分裂を説明するための模式図である。陰イオン2は、遷移金属元素1を中心とする八面体の頂点位置にある。遷移金属元素1を内包する八面体の頂点位置に陰イオン2が存在する場合、d軌道の結晶場分裂が生じる。5重に縮退していた遷移金属元素1のd軌道は、陰イオン2のp軌道が作る八面体の結晶場により2重に縮退した e_g 軌道と3重に縮退した t_{2g} 軌道とに分裂する。 t_{2g} 軌道は、 d_{xy} 、 d_{yz} 、 d_{zx} の3つの軌道自由度を有する。ここでは、陰イオン2が遷移金属元素1を内包する八面体の頂点位置に存在する場合を例示したが、四面体の頂点位置に存在する場合もd軌道は、結晶場分裂により e_g 軌道と t_{2g} 軌道とに分かれる。

[0027] 図4は、遷移金属元素1のd軌道が分裂した t_{2g} 軌道の分布を示す。図4では、遷移金属元素1のみを図示し、陰イオン2を省略している。遷移金属元素1のd軌道が分裂した t_{2g} 軌道は、遷移金属元素1の配置に沿って格子状に繋がっている。 t_{2g} 軌道は、例えば、ハニカム格子状、三角格子状、カゴメ格子状に繋がっており、 t_{2g} 軌道は、例えば、ハニカム格子状に繋がっていることが好ましい。格子状に繋がる t_{2g} 軌道は、環状に繋がる複数の t_{2g} 軌道の単位構造からなる。 t_{2g} 軌道がハニカム格子状に繋がる場合は、環状に繋がる t_{2g} 軌道の単位構造は六角形である。 t_{2g} 軌道がハニカム格子状の場合は、円偏光の制御光C1により励起された電子が環状に伝搬しやすい。そのため、電子の伝搬がスムーズになり、後述する磁化の発生効率が高まる。

[0028] ここで「 t_{2g} 軌道が繋がる」とは、ある遷移金属元素1の t_{2g} 軌道の電子が他の遷移金属元素1の t_{2g} 軌道に伝搬できればよく、それぞれのd軌道の電子雲が完全に繋がっている場合に限られるものではない。例えば、ある遷移金属元素1の t_{2g} 軌道の電子が他の遷移金属元素1の t_{2g} 軌道にホッピング伝搬する場合を含む。

- [0029] 物質M1に円偏光の制御光C1が照射されると、電子が励起される。励起された電子は、それぞれのサイト（遷移金属元素1）における t_{2g} 軌道間をホッピングしながら伝搬する。 t_{2g} 軌道は、それぞれのサイトで、軌道自由度（ d_{xy} 、 d_{yz} 、 d_{zx} ）を持つ。励起された電子は、例えば、 d_{xy} 、 d_{yz} 、 d_{zx} 、 d_{xy} の順に、異なる自由度の軌道を環状にねじれながら遷移する。電子が t_{2g} 軌道間を環状に伝搬すると、軌道角運動量が生じ、c軸方向に磁化が生じる。信号光L1の偏光は、この磁化によって回転させられる。
- [0030] 物質M1は、例えば、ネール温度 T_N 以上の温度域でスピンの長距離秩序（長距離の磁気秩序）を持たない。物質M1は、例えば、スピンの長距離秩序を持たないが短距離秩序を持つ量子スピン液体でもよく、スピンの長距離秩序も短距離秩序も持たないものでもよい。図5は、 $\alpha\text{-RuCl}_3$ のネール温度 T_N 未満の温度域におけるスピンの状態を示す。 $\alpha\text{-RuCl}_3$ は、ネール温度 T_N （ $T_N = 7\text{ K}$ ）未満の温度域では、第1方向に配向した第1スピン s_{p1} と、第1方向と異なる方向の第2方向に配向した第2スピン s_{p2} と、がそれぞれジグザグ状に配列した反強磁性秩序（長距離秩序）を示すが、ネール温度 T_N 以上の温度域では、磁気秩序（長距離秩序）を持たない。
- [0031] 次いで、光スイッチ装置100の動作について説明する。まず光スイッチ素子10には、信号光L1が照射されている。信号光L1は、光スイッチ素子10を透過し、偏光板40へ至る。光スイッチ素子10に制御光C1が照射されていない状態では、信号光L1の偏光状態は変化しない。
- [0032] 次いで、光スイッチ素子10に円偏光の制御光C1を照射する。制御光C1の波長は、例えば、 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以上であることが好ましく、 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ 以上であることがより好ましい。制御光C1の波長が赤外光の場合は、制御光C1の波長が可視光の場合より偏光方向を回転させる効率が高い。
- [0033] 制御光C1が光スイッチ素子10に照射されると、物質M1内で電子が励起される。励起された電子は、例えば、 d_{xy} 、 d_{yz} 、 d_{zx} 、 d_{xy} の順に、異なる自由度の軌道を環状にねじれながら遷移する。電子が t_{2g} 軌道間を環状に伝搬すると、軌道角運動量が生じ、c軸方向に磁化が生じる。物質M1に

磁化が生じると、信号光L 1は光スイッチ素子10を通過することで信号光L 2となる。信号光L 2は、信号光L 1に対して偏光方向が回転している。信号光L 2と信号光L 1との間の角度を回転角度 θ と称する。偏光回転の方向は、円偏光のヘリシティ（右回り σ^+ 、左回り σ^- ）に依存して変化する。円偏光のヘリシティが右回り σ^+ の場合は反時計回りに回転し、円偏光のヘリシティが左回り σ^- の場合は時計回りに回転する。また回転角度 θ は、光スイッチング素子10のz方向の厚み、制御光C 1の強度に応じて変化する。光スイッチング素子10のz方向の厚みが厚いと、回転角度 θ は大きくなる。制御光C 1の強度が強いと、光スイッチング素子10の回転角度 θ は大きくなる。

[0034] 偏光板40が通過できる偏光方向を信号光L 2と一致させておいた場合は、制御光C 1を照射した際に、偏光板40を透過する光の透過量が多くなる。偏光板40が通過できる偏光方向を信号光L 1と一致させておいた場合、制御光C 1を照射した際に、偏光板40を透過する光の透過量が少なくなる。光スイッチ装置100は、例えば、光の透過量が閾値以上の場合を「ON」、閾値以下の場合を「OFF」とするスイッチング動作を行う。

[0035] 第1実施形態にかかる光スイッチ装置100は、励起された電子が異なる自由度の軌道間を環状にねじれるように遷移することで、軌道角運動量を生じ、信号光L 1の偏光方向を回転させる。当該原理は、従来の逆ファラデー効果を利用した光磁気効果と異なり、長距離の磁気秩序を持たない状態（相）でも発現する。すなわち、第1実施形態にかかる光スイッチ装置100は、ネール温度 T_N によらず制御光C 1により光スイッチ動作を行うことができる。逆ファラデー効果を利用した光磁気スイッチは、原理上、ネール温度 T_N 未満でしか動作しないため、ネール温度 T_N 以上で動作する第1実施形態にかかる光スイッチ装置100は新たな原理によって動作していると言える。

[0036] 第1実施形態にかかる光スイッチ装置100は、光通信システム、光コンピュータ等に用いることができる。

[0037] 図6は、第1実施形態にかかる光通信システム200のブロック図である

。光通信システム 200 は、複数の送受信装置 110 を有する。送受信装置 110 のそれぞれは、送信装置 101 と受信装置 102 とを有する。送信装置 101 は、信号発生部 50 と光スイッチ装置 100 とを有する。受信装置 102 は、光電変換素子 60 と信号処理素子 70 とを有する。

[0038] 信号発生部 50 は、デジタルの信号を発生する。制御素子 30 は、信号発生部 50 から入力された信号に基づいて制御光 C1 を光スイッチ素子 10 に照射する。光スイッチ素子 10 は、光源 20 から照射された信号光 L1 の偏光方向を制御光 C1 に応じて回転させる。光スイッチ装置 100 は、偏光板 40 が通過できる偏光方向と信号光の偏光方向との一致度に応じて、異なる強度の光を出射する。すなわち、送信装置 101 は、信号発生部 50 で生じたデジタル信号（例えば、“1” “0” “1” “0”）を光信号（例えば、“ON” “OFF” “ON” “OFF”）に置き換える。

[0039] 受信装置 102 は、送信装置 101 から出射された光信号を受信する。光信号は、光電変換素子 60 で電気信号に置換され、信号処理素子 70 で処理される。

[0040] 図 7 は、第 1 実施形態にかかる光コンピュータ 300 のブロック図である。光コンピュータ 300 は、例えば、光スイッチ装置 100 と集積回路 120 とを有する。集積回路 120 は、記憶部 80 と信号処理部 90 を有する。記憶部 80 に記録された情報は、制御素子 30 へ送られる。制御素子 30 は、記憶部 80 に記憶された情報に基づいて、制御光 C1 を照射する。信号処理部 90 は、光スイッチ装置 100 から出射された光信号に基づいて処理を行う。

[0041] ここまで光スイッチ装置 100 の一実施形態を例示した。しかしながら、本発明は、当該実施形態に限られるものではない。例えば、図 8 に示すように、光スイッチ素子 10 で反射した反射光を偏光板 40 に入射させてもよい。図 8 は、第 1 変形例にかかる光スイッチ装置 100A の斜視図である。

実施例

[0042] （実施例 1）

光スイッチ素子10として、 $\alpha\text{-RuCl}_3$ を用いて、光の偏光回転を検証した。光スイッチング素子10のz方向の厚みは、 $50\text{ }\mu\text{m}$ とした。実施例1では、光スイッチ素子10に円偏光光を照射し、光スイッチ素子10を透過して出射する光を測定した。そして、光スイッチ素子10への入射光の偏光方向と出射光の偏光方向との回転角度 θ を求めた。

[0043] 光スイッチ素子10に入射する制御光C1は、強度が $4.0\text{ mJ}/\text{cm}^2$ で、パルス幅 200 fs の円偏光パルスを用いた。円偏光パルスの光子エネルギーは、 0.89 eV （波長 $1.4\text{ }\mu\text{m}$ ）とした。円偏光のヘリシティは、右回り σ^+ と左回り σ^- とのそれぞれで行った。また光スイッチ素子10に照射する信号光L1は、直線偏光のプローブ光とした。信号光L1の光子エネルギーは、 0.62 eV （波長 $2.0\text{ }\mu\text{m}$ ）とした。測定温度は、 16 K とした。

[0044] 図9は、実施例1の光スイッチ素子における円偏光励起による偏光回転の時間変化を示す。図9に示すように、制御光C1が照射されると、 $\alpha\text{-RuCl}_3$ による偏光回転が生じた。偏光回転の回転角度 θ は、4度以上であった。偏光回転の回転方向は、円偏光のヘリシティに依存していた。測定温度の 16 K は、 $\alpha\text{-RuCl}_3$ のネール温度（ $T_N=7\text{ K}$ ）よりも高温であり、スピンの長距離秩序を持たない量子スピン液体状態において、光スイッチ動作が生じていることが確認できた。すなわち、光スイッチ素子10は、信号光L1を偏光回転させることができ、光スイッチ装置100は、光スイッチ素子10からの出射光の光路上に偏光板を挿入することで機能する。また光スイッチ素子10がフェムト秒単位のパルス幅で動作していることから、光スイッチ装置100は、高速通信にも対応することができる。

[0045] （実施例2）

実施例2は、測定温度を 295 K とした点が実施例1と異なる。その他の条件は、実施例1と同様の検討を行った。図10は、実施例2の光スイッチ素子における円偏光励起による偏光回転の時間変化を示す。実施例2においても実施例1と同様の結果が示された。実施例2に示すように、光スイッチ

素子は室温でも動作することが確認された。

[0046] (実施例3)

実施例3では、測定温度を変えて、円偏光励起による偏光回転の回転角度 θ の最大値の温度依存性を測定した点が、実施例1と異なる。その他の条件は、実施例1と同様の検討を行った。図11は、実施例3の測定結果を示す。

[0047] 図11に示すように、いずれの温度でも $\alpha\text{-RuCl}_3$ による偏光回転が生じた。一方で、 $\alpha\text{-RuCl}_3$ はネール温度 T_N 以上で、偏光回転の回転角度 θ が大きくなった。すなわち、図5に示すような面内方向の長距離の磁気秩序が偏光回転を阻害していると言える。従来の逆ファラデー効果を利用した光磁気スイッチの場合は、ネール温度 T_N 未満で偏光回転が生じ、ネール温度 T_N 以上では偏光回転が生じない。したがって図11に示す現象は、従来の逆ファラデー効果を利用した光磁気スイッチとは逆の挙動であり、異なる原理により偏光回転が生じていると言える。

[0048] (実施例4)

実施例4では、量子多体効果を考慮した理論解析によって、 $\alpha\text{-RuCl}_3$ における光誘起磁化の発生機構を検討した。具体的には、図4に示すようなハニカム格子の t_{2g} 軌道(d_{yz} 、 d_{xz} 、 d_{xy} 軌道)間にオンサイトの電子間相互作用とスピン軌道相互作用があり、トランスファー積分が最近接サイトのみの場合を扱った。3回対称性を有する6サイトの周期系に対して、厳密対角化法による数値計算を行った。数値計算は、厳密対角化法によって得た電子状態に対する光照射効果を時間依存シュレーディンガー方程式によって行った。光励起は、パイエルス位相として導入し、励起エネルギーは実施例1と同等のモットギャップ以下とした。

[0049] 図12は、実施例4の理論計算によって求められた円偏光励起によって $\alpha\text{-RuCl}_3$ に生じる磁化の面直成分の時間変化を示す。図12に示すように、理論的にも円偏光のヘリシティに応じて、面直逆向きの磁化が生じることが確認された。そして、理論計算の結果。この面直成分の磁化は、ハニカム

格子の各サイト間で、励起された電子が異なる自由度の軌道を環状にねじれながらホッピング遷移する（例えば、 $d_{xy} \rightarrow d_{yz} \rightarrow d_{zx} \rightarrow d_{xy}$ ）ことで生じることが分かった。

[0050] （実施例 5）

実施例 5 は、信号光 L 1 及び制御光 C 1 の波長を変えて、円偏光励起による偏光回転の挙動を測定した点が、実施例 1 と異なる。

[0051] 図 13 は、実施例 5 の測定結果を示す。図 13 の（a）は、 $\alpha\text{-RuCl}_3$ （光スイッチング素子 10）の吸収波長を示す。図 13 の（a）は、L. J. Sandilands et al., Phys. Rev. B 93, 075144 (2016). の図 1（a）及び図 4（a）に基づく。図 13 の（a）に示す実線のグラフ及び点線のグラフは、いずれも $\alpha\text{-RuCl}_3$ の吸収を示す。点線のグラフは、光子エネルギーが 1.0 eV 以下（波長 1.24 μm 以上）の領域の実線のグラフを 25 倍に拡大した図である。

[0052] 図 13 の（b）～（d）は、異なる光子エネルギー（ E_{pu} ）の制御光 C 1 を光スイッチング素子 10 に照射した際の回転角度 θ の変化を示す。図 13（b）は、制御光 C 1 の光子エネルギーを 0.3 eV（波長 3.8 μm ）としたときの結果である。図 13（c）は、制御光 C 1 の光子エネルギーを 0.62 eV（波長 2.0 μm ）としたときの結果である。図 13（d）は、制御光 C 1 の光子エネルギーを 0.89 eV（波長 1.4 μm ）としたときの結果である。図 13 の（b）～（d）の横軸は、信号光 L 1 の光子エネルギーで、縦軸は回転角度 θ である。制御光 C 1 は、強度が 1.0 mJ/cm² で、パルス幅 200 fs の円偏光パルスを用いた。

[0053] 図 13（b）～（d）に示すように、信号光 L 1 及び制御光 C 1 の波長を変えた場合でも、光スイッチ動作が生じていることが確認できた。

[0054] また図 14 は、制御光 C 1 の光子エネルギーを 1.55 eV（波長 800 nm）に変更した際に、偏光方向の回転角度 θ の時間変化を示す。 $\alpha\text{-RuCl}_3$ は、光子エネルギーが 1.55 eV の領域において、光子エネルギーが 1.0 eV 以下の領域と比較して、光を大きく吸収する（図 13 の（a）参

照)。

[0055] 図14の(a)は信号光L1の光子エネルギーを0.54 eV (波長2.3 μm)とした結果であり、(b)は信号光L1の光子エネルギーを1.03 eV (波長1.2 μm)とした結果である。図14の横軸は、制御光C1を照射後の経過時間であり、縦軸は回転角度 θ である。制御光C1は、強度が1.0 mJ/cm²で、パルス幅200 fsの円偏光パルスを用いた。

[0056] 図14に示すように、制御光C1を照射することで、回転角度 θ は変化した。一方で、光子エネルギーが1.0 eV以下の領域における実験結果(図13(b)～(d))と比較して、その回転角度は小さかった。

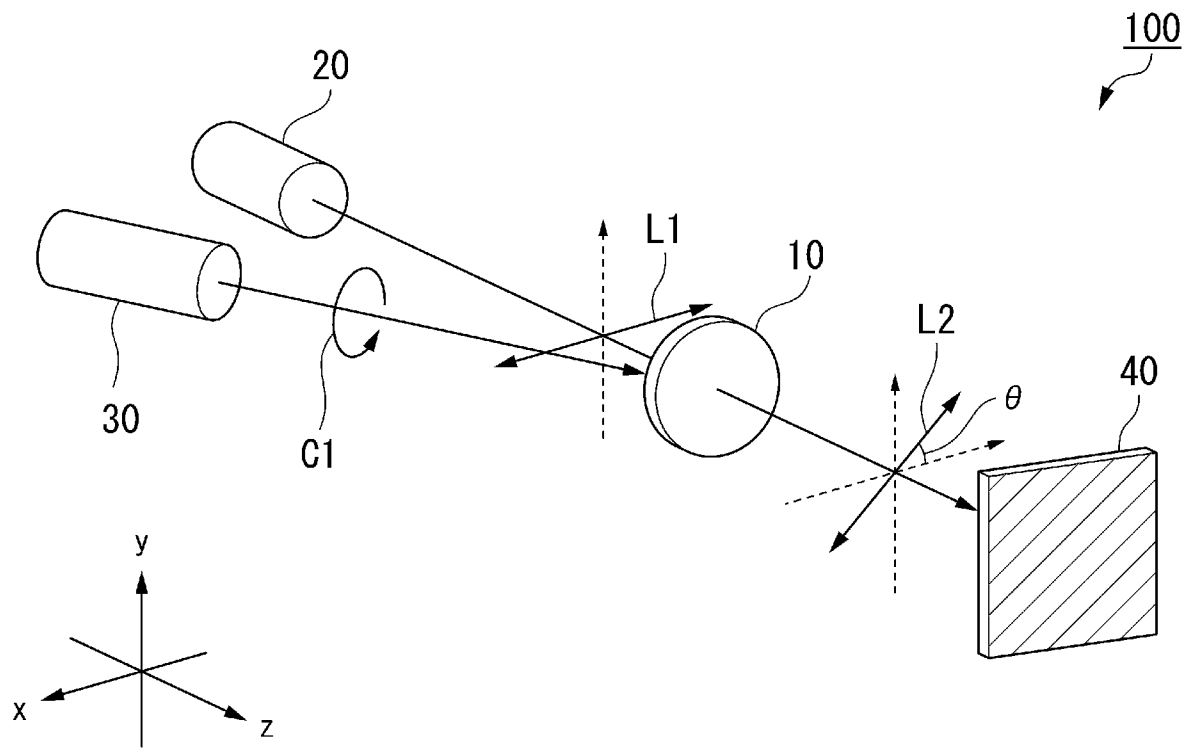
符号の説明

[0057] 1…遷移金属元素、2…陰イオン、10…光スイッチ素子、20…光源、30…制御素子、40…偏光板、50…信号発生部、60…光電変換素子、70…信号処理素子、80…記憶部、90…信号処理部、100, 100A…光スイッチ装置、101…送信装置、102…受信装置、110…送受信装置、120…集積回路、200…光通信システム、300…光コンピュータ、C1…制御光、L1, L2…信号光、sp1…第1スピン、sp2…第2スピン、 θ …回転角度

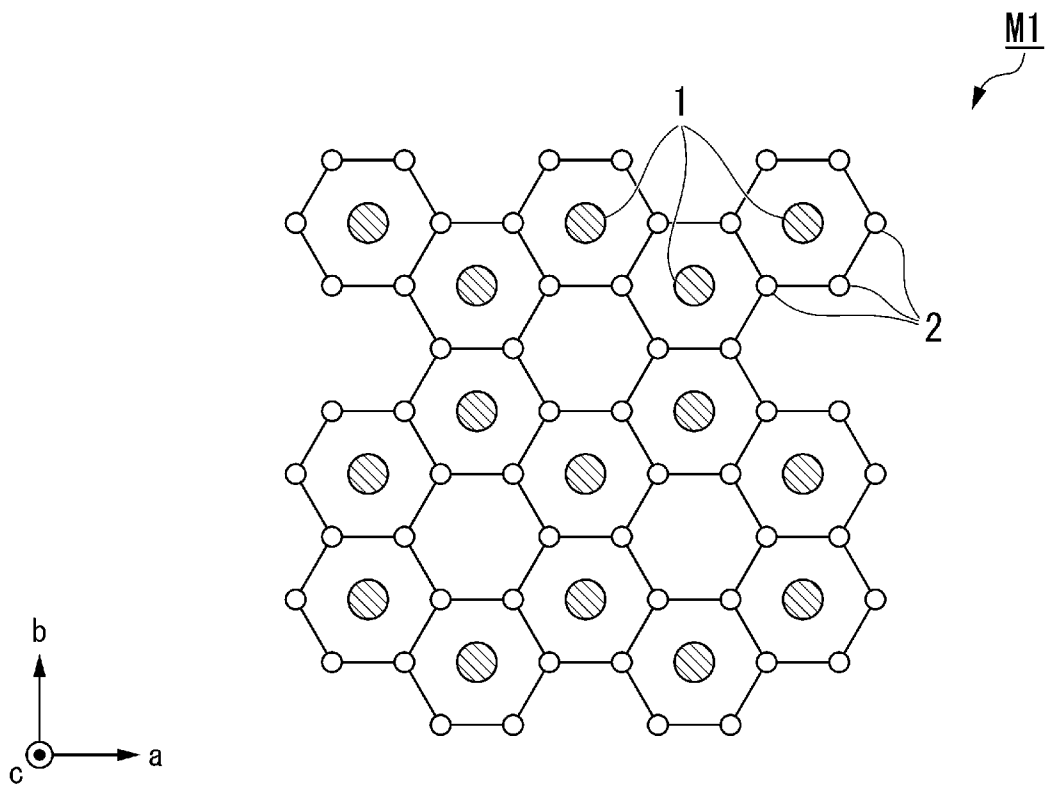
請求の範囲

- [請求項1] d軌道に電子を有する複数の遷移金属元素と、前記複数の遷移金属元素のそれぞれの周囲に配置された複数の陰イオンと、を有する物質を含み、
- 前記複数の遷移金属元素は格子状に配列し、前記複数の遷移金属元素のそれぞれのd軌道が分裂した t_{2g} 軌道は環状に繋がり、
- 前記物質が長距離の磁気秩序を持たない状態で、制御光が照射された際に信号光を偏光回転させる、光スイッチ素子。
- [請求項2] 前記複数の遷移金属元素の配列がハニカム格子状、三角格子状、カゴメ格子状のいずれかである、請求項1に記載の光スイッチ素子。
- [請求項3] 前記物質が $\alpha\text{-RuCl}_3$ である、請求項1又は2に記載の光スイッチ素子。
- [請求項4] 前記制御光の波長が $1\text{ }\mu\text{m}$ 以上である、請求項1～3のいずれか一項に記載の光スイッチ素子。
- [請求項5] 請求項1～4のいずれか一項に記載の光スイッチ素子と、
- 前記光スイッチ素子に前記信号光を照射する光源と、
- 前記光スイッチ素子に前記制御光を照射する制御素子と、
- 前記光スイッチ素子を透過又は反射した光を偏光する偏光板と、を有する、光スイッチ装置。
- [請求項6] 請求項5に記載の光スイッチ装置を備える、光通信システム。
- [請求項7] 請求項5に記載の光スイッチ装置を備える、光コンピュータ。

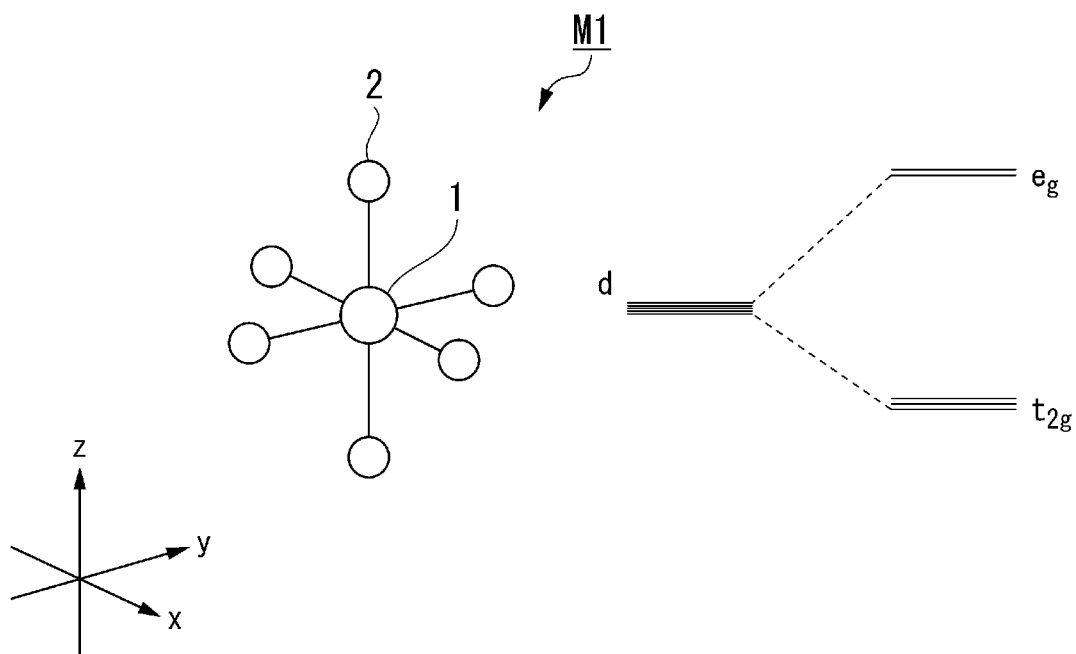
[図1]



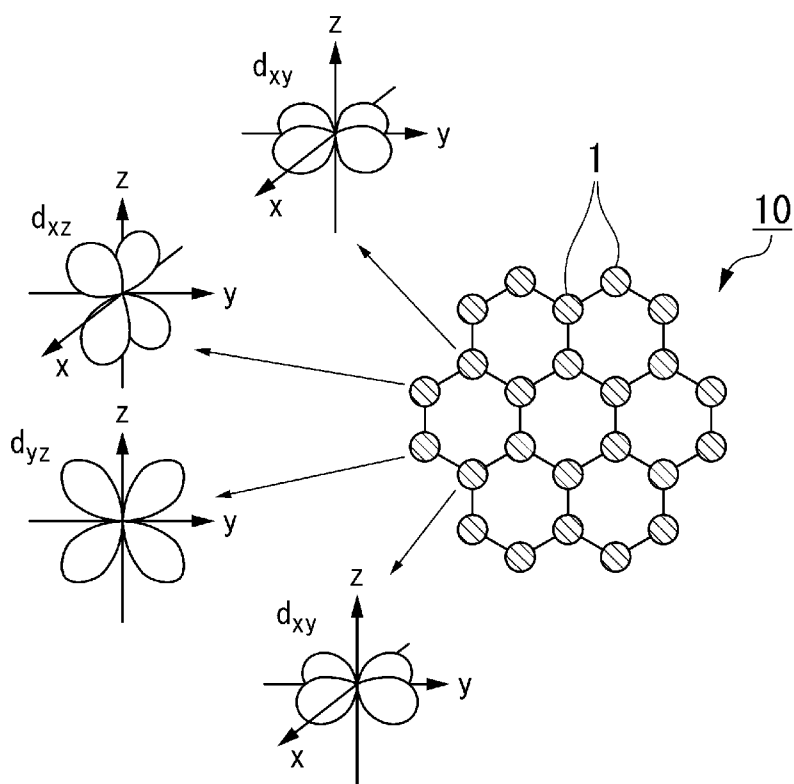
[図2]



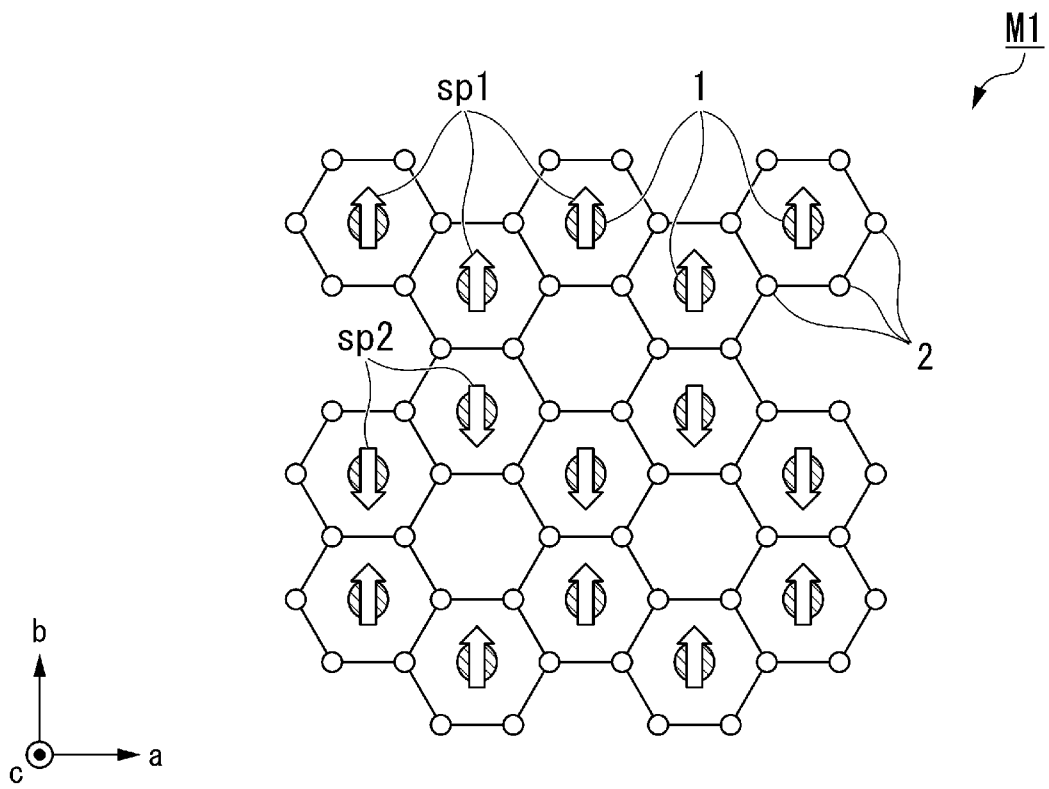
[図3]



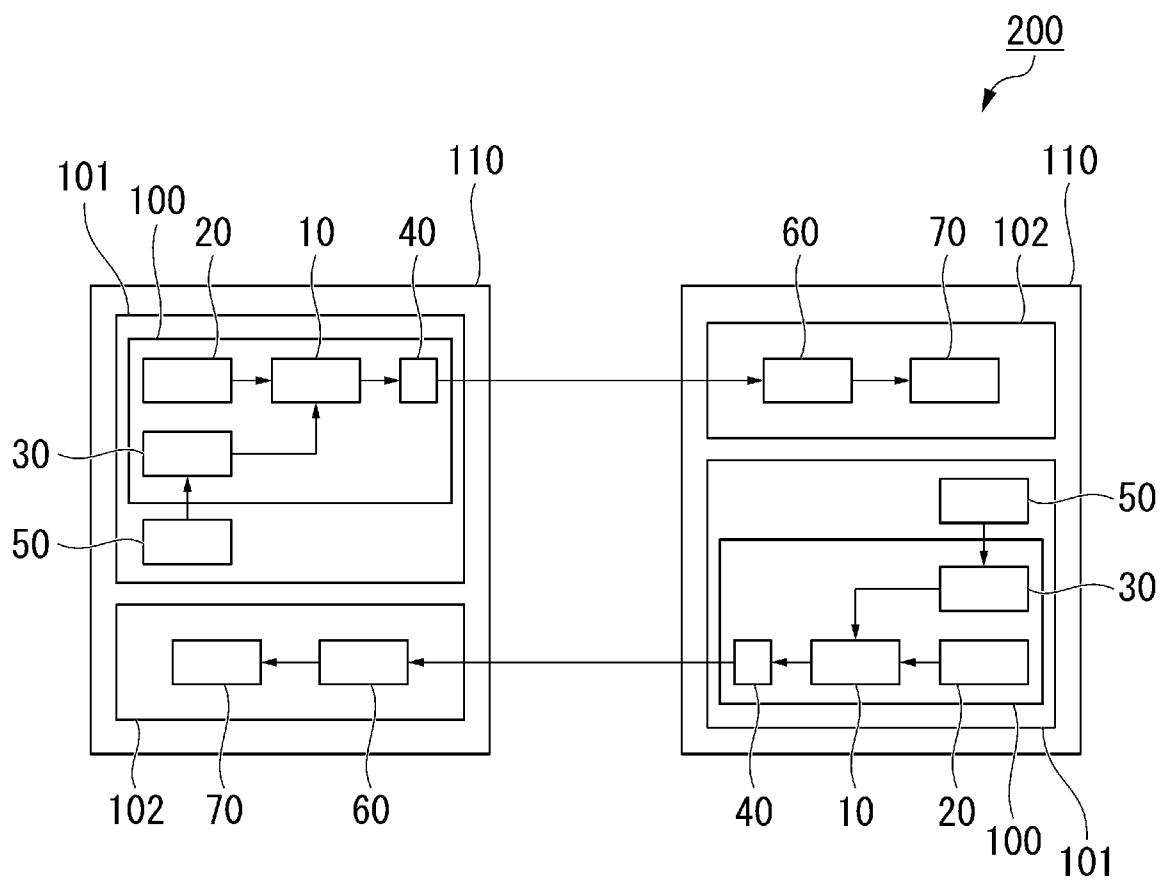
[図4]



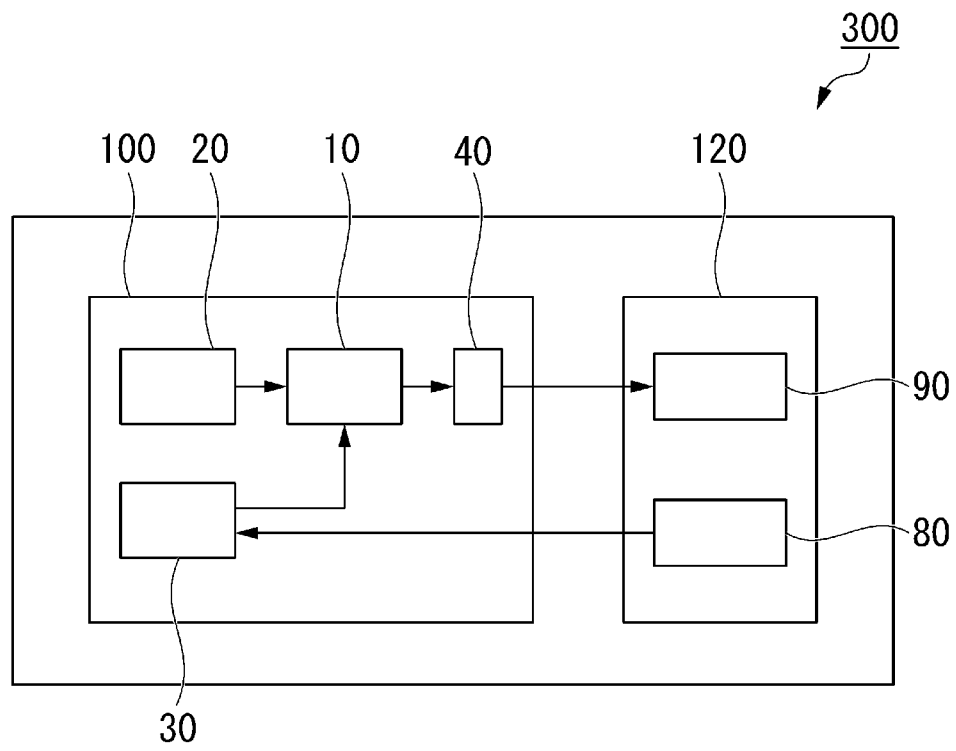
[図5]



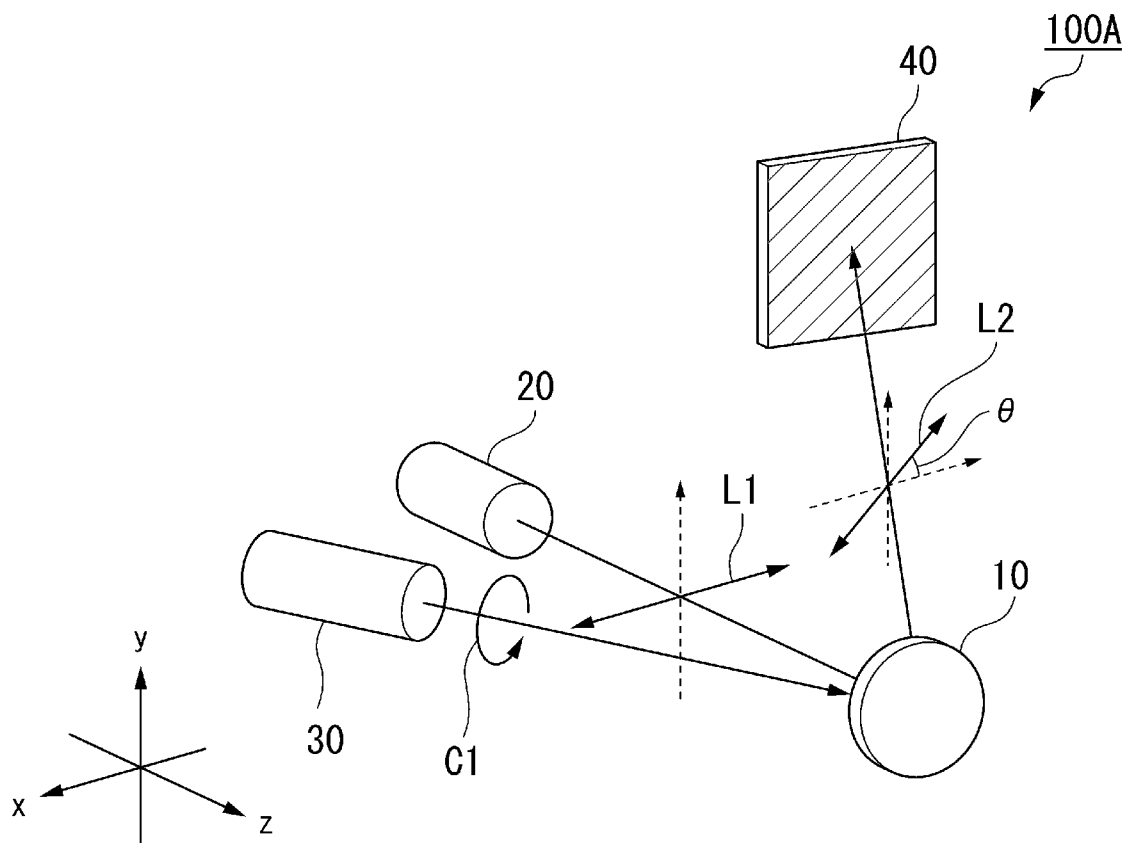
[図6]



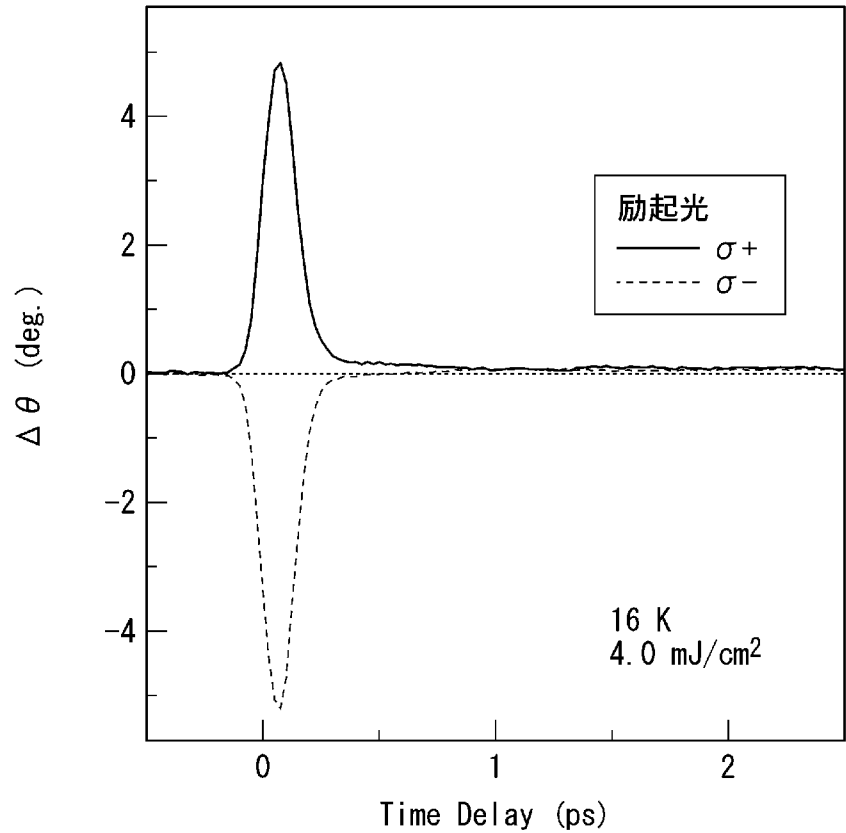
[図7]



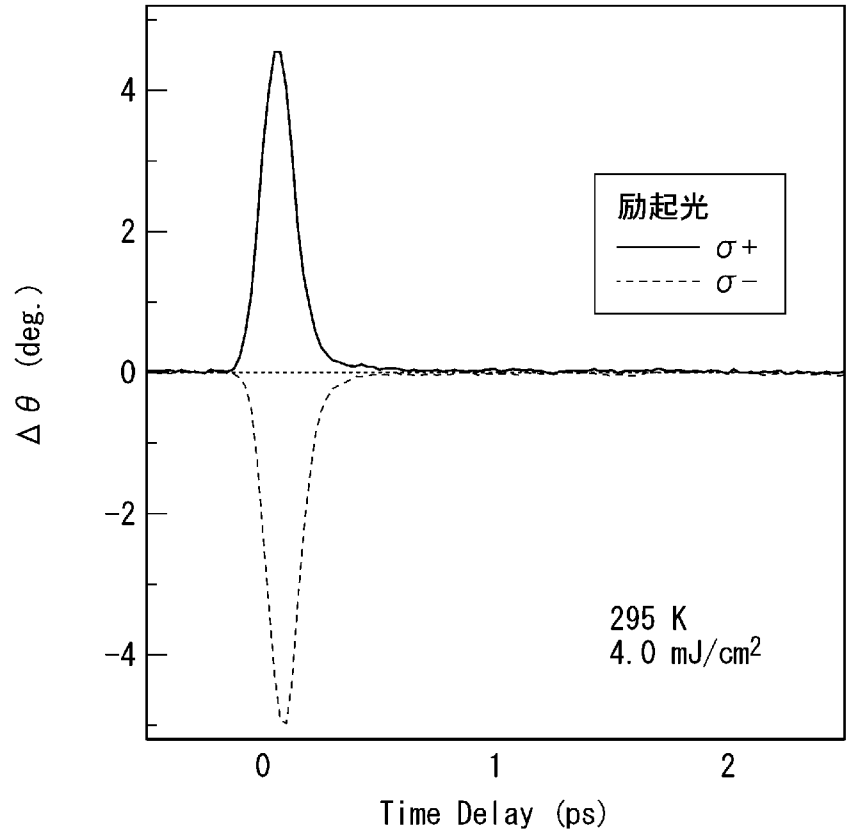
[図8]



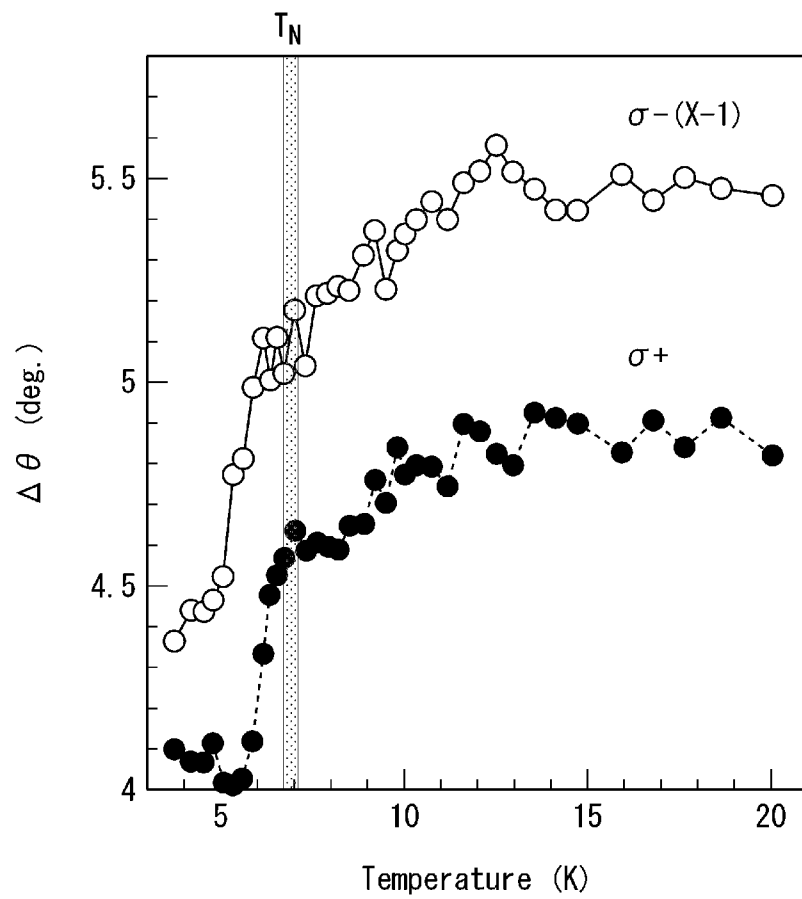
[図9]



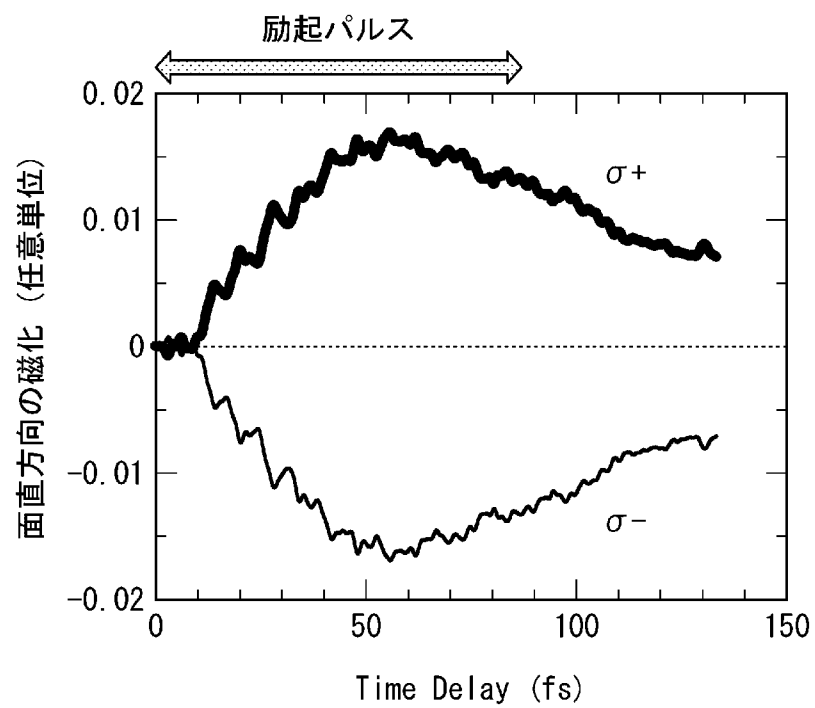
[図10]



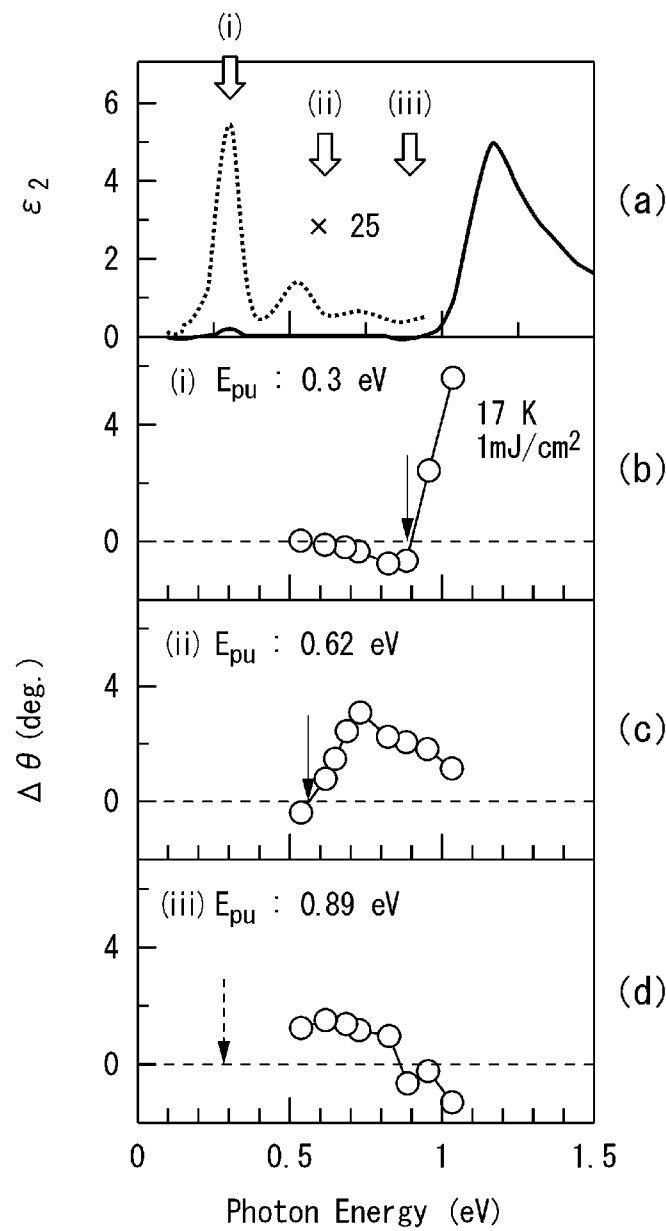
[図11]



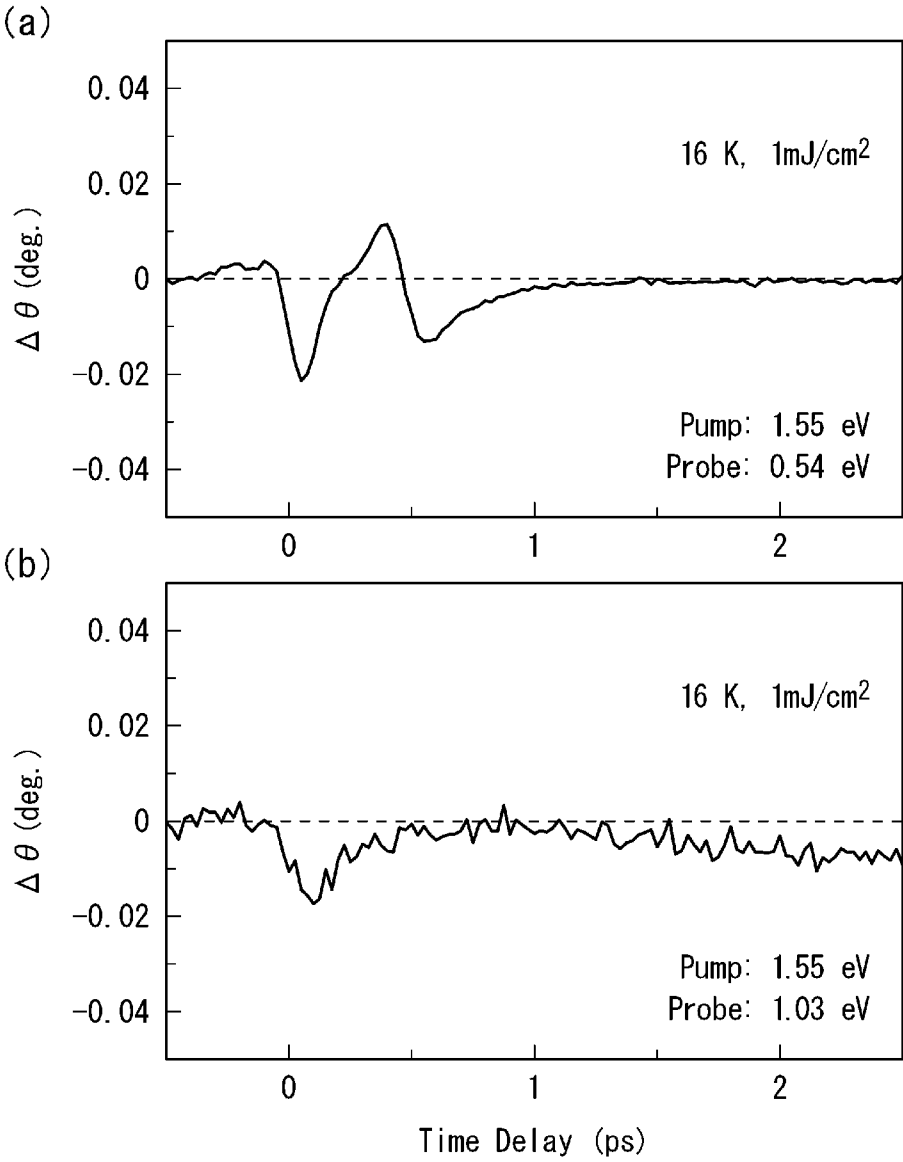
[図12]



[図13]



[図14]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2021/044368

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**G02F 1/09**(2006.01)i

FI: G02F1/09 505; G02F1/09 501

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)

G02F1/00-1/125 ; G02F1/21-7/00

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 1971-2022

Registered utility model specifications of Japan 1996-2022

Published registered utility model applications of Japan 1994-2022

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

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamIII); Scopus

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	天野辰哉, キタエフスピン液体候補物質 α -RuCl ₃ における超高速スピンドイナミクスII, 日本物理学会講演概要集, 23 March 2020, vol. 75, no. 1, 18pE25-4 entire text, all drawings, (AMANO, Tatsuya. Ultrafast spin dynamics of Kitaev spin liquid candidate α -RuCl ₃ : II. Meeting Abstracts of the Physical Society of Japan.)	1-7
A	HIROBE, Daichi. Magnetic thermal conductivity far above the Neel temperature in the Kitaev-magnet candidate α -RuCl ₃ . PHYSICAL REVIEW B. 22 June 2017, vol. 95, 241112(1-6) entire text, all drawings	1-7
A	JP 9-146058 A (FUJI ELECTRIC CO LTD) 06 June 1997 (1997-06-06) entire text, all drawings	1-7
A	JP 2008-135480 A (OSAKA UNIV) 12 June 2008 (2008-06-12) entire text, all drawings	1-7

☐ 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

09 February 2022

Date of mailing of the international search report

22 February 2022

Name and mailing address of the ISA/JP

Japan Patent Office (ISA/JP)
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/JP2021/044368

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
JP	9-146058	A	06 June 1997	(Family: none)	
JP	2008-135480	A	12 June 2008	(Family: none)	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） G02F 1/09(2006.01)i FI: G02F1/09 505; G02F1/09 501										
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）） G02F1/00-1/125 ; G02F1/21-7/00 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 <table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922-1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971-2022年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996-2022年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994-2022年</td> </tr> </table> 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） JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamII); Scopus			日本国実用新案公報	1922-1996年	日本国公開実用新案公報	1971-2022年	日本国実用新案登録公報	1996-2022年	日本国登録実用新案公報	1994-2022年
日本国実用新案公報	1922-1996年									
日本国公開実用新案公報	1971-2022年									
日本国実用新案登録公報	1996-2022年									
日本国登録実用新案公報	1994-2022年									
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								
A	天野辰哉, キタエフスピン液体候補物質 α -RuCl ₃ における超高速スピンダイナミクスII, 日本物理学会講演概要集, 2020.03.23, 第75巻第1号, 18pE25-4 全文, 全図	1-7								
A	HIROBE, Daichi, Magnetic thermal conductivity far above the Neel temperature in the Kitaev-magnet candidate α -RuCl ₃ , PHYSICAL REVIEW B, 2017.06.22, Vol.95, 241112(1-6) 全文, 全図	1-7								
A	JP 9-146058 A (富士電機株式会社) 06.06.1997 (1997-06-06) 全文, 全図	1-7								
A	JP 2008-135480 A (国立大学法人大阪大学) 12.06.2008 (2008-06-12) 全文, 全図	1-7								
☐ 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 09.02.2022		国際調査報告の発送日 22.02.2022								
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） 堀部 修平 2L 9215 電話番号 03-3581-1101 内線 3295								

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2021/044368

引用文献			公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP	9-146058	A	06.06.1997	(ファミリーなし)	
JP	2008-135480	A	12.06.2008	(ファミリーなし)	