

(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  
2023年3月30日(30.03.2023)



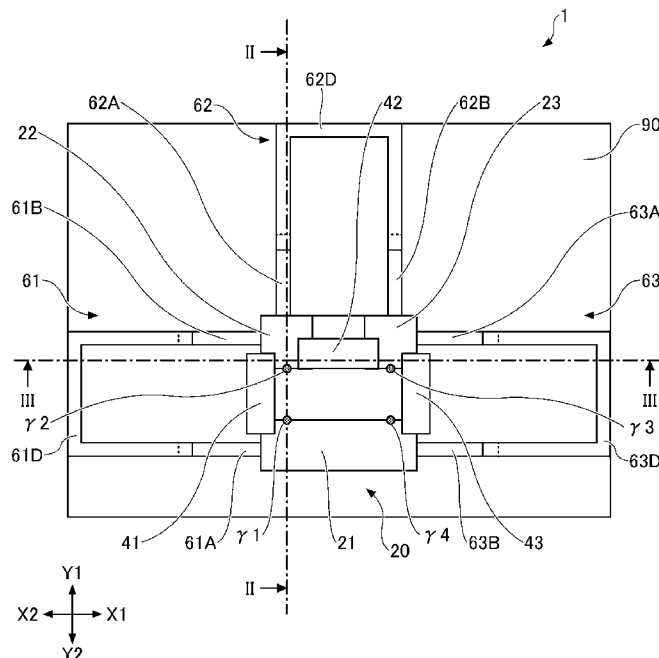
(10) 国際公開番号  
**WO 2023/047461 A1**

- (51) 国際特許分類:  
*H01L 39/22* (2006.01) *H01L 39/24* (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2021/034578
- (22) 国際出願日: 2021年9月21日(21.09.2021)
- (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: 富士通株式会社 (**FUJITSU LIMITED**)  
[JP/JP]; 〒2118588 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 Kanagawa (JP).
- (72) 発明者: 山口 淳一 (**YAMAGUCHI, Junichi**);  
〒2118588 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内 Kanagawa (JP).
- (74) 代理人: 伊東 忠重, 外 (**ITOH, Tadashige et al.**);  
〒1000005 東京都千代田区丸の内二丁目1番1号 丸の内 M Y P L A Z A (明治安田生命ビル) 16階 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,

(54) Title: QUANTUM BIT, QUANTUM COMPUTING DEVICE, AND METHOD FOR MANUFACTURING QUANTUM BIT

(54) 発明の名称: 量子ビット、量子演算装置及び量子ビットの製造方法

[図1]



(57) Abstract: This quantum bit has: an s-wave superconductor layer; a higher-order topological insulator layer provided on the s-wave superconductor layer; a first ferromagnetic insulator layer provided on the higher-order topological insulator layer; and, a first gate electrode provided on the first ferromagnetic insulator layer. The higher-order topological insulator layer has: a first region provided with a first hinge helical channel; and, a second region provided with a second hinge helical channel that is separated from the first hinge helical channel. The first ferromagnetic insulator layer covers the first



WO 2023/047461 A1

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))

---

hinge helical channel and the second hinge helical channel.

(57) 要約 : 量子ビットは、s波超伝導体層と、前記s波超伝導体層上に設けられた高次トポロジカル絶縁体層と、前記高次トポロジカル絶縁体層上に設けられた第1強磁性絶縁体層と、前記第1強磁性絶縁体層上に設けられた第1ゲート電極と、を有し、前記高次トポロジカル絶縁体層は、第1ヒンジヘリカルチャネルを備えた第1領域と、前記第1ヒンジヘリカルチャネルから離れた第2ヒンジヘリカルチャネルを備えた第2領域と、を有し、前記第1強磁性絶縁体層は、前記第1ヒンジヘリカルチャネル及び前記第2ヒンジヘリカルチャネルを覆う。

## 明 細 書

発明の名称：

量子ビット、量子演算装置及び量子ビットの製造方法

技術分野

[0001] 本開示は、量子ビット、量子演算装置及び量子ビットの製造方法に関する。

背景技術

[0002] マヨラナ粒子を用いた量子演算装置についての研究が行われている。マヨラナ粒子を発生させる構造として、二次元トポロジカル絶縁体とs波超伝導体とを組み合わせた構造が提案されている。二次元トポロジカル絶縁体としては、遷移金属ダイカルコゲナイドの層状物質である $WT e_2$ の単層膜が用いられている。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特開2020-96107号公報  
特許文献2：米国特許出願公開第2013/0299783号明細書  
特許文献3：米国特許出願公開第2016/0035674号明細書  
特許文献4：特開2013-247267号公報

非特許文献

[0004] 非特許文献1：N. Read and D. Green, Phys. Rev. B 61, 10267 (2000)  
非特許文献2：V. Mourik et al., Science 336, 25 (2012)  
非特許文献3：J. Alicea, Rep. Prog. Phys. 75, 076501 (2012)  
非特許文献4：S. Wu et al., Science 359, 76 (2018)  
非特許文献5：Y.-B. Choi et al., Nat. Mater 19, 974 (2020)

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] これまで理論に基づく提案はされているものの、 $WTe_2$ の単層膜を安定して得ることは容易ではない。従って、従来の技術では、マヨラナ粒子を安定して発現させることができない。

[0006] 本開示の目的は、マヨラナ粒子を安定して発現させることができる量子ビット、量子演算装置及び量子ビットの製造方法を提供することにある。

### 課題を解決するための手段

[0007] 本開示の一形態によれば、s波超伝導体層と、前記s波超伝導体層上に設けられた高次トポロジカル絶縁体層と、前記高次トポロジカル絶縁体層上に設けられた第1強磁性絶縁体層と、前記第1強磁性絶縁体層上に設けられた第1ゲート電極と、を有し、前記高次トポロジカル絶縁体層は、第1ヒンジヘリカルチャネルを備えた第1領域と、前記第1ヒンジヘリカルチャネルから離れた第2ヒンジヘリカルチャネルを備えた第2領域と、を有し、前記第1強磁性絶縁体層は、前記第1ヒンジヘリカルチャネル及び前記第2ヒンジヘリカルチャネルを覆う量子ビットが提供される。

### 発明の効果

[0008] 本開示によれば、マヨラナ粒子を安定して発現させることができる。

### 図面の簡単な説明

[0009] [図1]図1は、第1実施形態に係る量子ビットを示す上面図である。

[図2]図2は、第1実施形態に係る量子ビットを示す断面図（その1）である。

[図3]図3は、第1実施形態に係る量子ビットを示す断面図（その2）である。

[図4]図4は、高次トポロジカル絶縁体層を示す斜視図である。

[図5]図5は、第1実施形態に係る量子ビットの製造方法を示す上面図（その1）である。

[図6]図6は、第1実施形態に係る量子ビットの製造方法を示す上面図（その2）である。

[図7]図7は、第1実施形態に係る量子ビットの製造方法を示す上面図（その

3) である。

[図8]図8は、第1実施形態に係る量子ビットの製造方法を示す上面図（その4）である。

[図9]図9は、第1実施形態に係る量子ビットの製造方法を示す上面図（その5）である。

[図10]図10は、第1実施形態に係る量子ビットの製造方法を示す上面図（その6）である。

[図11]図11は、第1実施形態に係る量子ビットの製造方法を示す断面図（その1）である。

[図12]図12は、第1実施形態に係る量子ビットの製造方法を示す断面図（その2）である。

[図13]図13は、第1実施形態に係る量子ビットの製造方法を示す断面図（その3）である。

[図14]図14は、第1実施形態に係る量子ビットの製造方法を示す断面図（その4）である。

[図15]図15は、第1実施形態に係る量子ビットの製造方法を示す断面図（その5）である。

[図16]図16は、第1実施形態に係る量子ビットの製造方法を示す断面図（その6）である。

[図17]図17は、第2実施形態に係る量子演算装置を示す図である。

### 発明を実施するための形態

[0010] 以下、本開示の実施形態について添付の図面を参照しながら具体的に説明する。なお、本明細書及び図面において、実質的に同一の機能構成を有する構成要素については、同一の符号を付することにより重複した説明を省くことがある。本開示においては、 $X_1 - X_2$ 方向、 $Y_1 - Y_2$ 方向、 $Z_1 - Z_2$ 方向を相互に直交する方向とする。 $X_1 - X_2$ 方向及び $Y_1 - Y_2$ 方向を含む面をXY面と記載し、 $Y_1 - Y_2$ 方向及び $Z_1 - Z_2$ 方向を含む面をYZ面と記載し、 $Z_1 - Z_2$ 方向及び $X_1 - X_2$ 方向を含む面をZX面と記載

する。なお、便宜上、 $Z_1 - Z_2$ 方向を上下方向とし、 $Z_1$ 側を上側、 $Z_2$ 側を下側とする。また、平面視とは、 $Z_1$ 側から対象物を視ることをいい、平面形状とは、対象物を $Z_1$ 側から視た形状のことをいう。

[0011] (第1実施形態)

まず、第1実施形態について説明する。第1実施形態は量子ビットに関する。第1実施形態に係る量子ビットは、例えば量子コンピュータ等の量子演算装置に用いられる。図1は、第1実施形態に係る量子ビットを示す上面図である。図2及び図3は、第1実施形態に係る量子ビットを示す断面図である。図2は、図1中のII-II線に沿った断面図に相当する。図3は、図1中のIII-III線に沿った断面図に相当する。

[0012] 第1実施形態に係る量子ビット1は、基板90と、s波超伝導体層10と、高次トポロジカル絶縁体層20と、第1強磁性絶縁体層31と、第2強磁性絶縁体層32と、第3強磁性絶縁体層33とを有する。量子ビット1は、更に、第1ゲート電極41と、第2ゲート電極42と、第3ゲート電極43と、第1超伝導量子干渉計 (superconducting quantum interference device : SQUID) 61と、第2SQUID62と、第3SQUID63とを有する。

[0013] 基板90は、例えば表面のミラー指数が(100)の単結晶基板である。基板90の材料としてはMgO、マイカ、サファイア及びSiCが挙げられる。

[0014] s波超伝導体層10は基板90の表面の一部に設けられている。s波超伝導体層10は、例えば表面のミラー指数は(110)のNb層である。s波超伝導体層10の厚さは、例えば100nm~200nm程度である。s波超伝導体層10の平面形状は、 $X_1 - X_2$ 方向に平行な2辺と、 $Y_1 - Y_2$ 方向に平行な2辺を備えた矩形である。

[0015] 高次トポロジカル絶縁体層20はs波超伝導体層10上に設けられている。高次トポロジカル絶縁体層20は、例えば多層 $WTe_2$ である。例えば、多層 $WTe_2$ は、2次元材料である $WTe_2$ を5層~100層、好ましくは10

層～50層有する。単層の $WT e_2$ の厚さが0.7nmであるため、高次トポロジカル絶縁体層20が14層の $WT e_2$ を含む場合、高次トポロジカル絶縁体層20の厚さは約10nmである。

[0016] 図4は、高次トポロジカル絶縁体層20を示す斜視図である。高次トポロジカル絶縁体層20の形状は略直方体である。高次トポロジカル絶縁体層20のa軸方向は $Y_1 - Y_2$ 方向に平行であり、b軸方向は $X_1 - X_2$ 方向に平行であり、c軸方向は $Z_1 - Z_2$ 方向に平行である。高次トポロジカル絶縁体層20の上面のミラー指数は(001)であり、 $Y_2$ 側の側面のミラー指数は(100)であり、 $X_2$ 側の側面のミラー指数は(010)である。

[0017] 高次トポロジカル絶縁体層20の表面に、平面視でT字型の溝50が形成されている。溝50は、第1溝51と、第2溝52と、第3溝53とを有する。例えば、第1溝51、第2溝52及び第3溝53の幅は20nmであり、深さは5nmである。第1溝51及び第3溝53は $X_1 - X_2$ 方向に平行に延び、第2溝52は $Y_1 - Y_2$ 方向に平行に延びる。第1溝51は、高次トポロジカル絶縁体層20の $Y_1 - Y_2$ 方向の中心近傍に設けられ、高次トポロジカル絶縁体層20の $X_2$ 側の端から $X_1 - X_2$ 方向の中心まで延びる。第3溝53は、高次トポロジカル絶縁体層20の $Y_1 - Y_2$ 方向の中心近傍に設けられ、高次トポロジカル絶縁体層20の $X_1$ 側の端から $X_1 - X_2$ 方向の中心まで延びる。従って、第1溝51及び第3溝53が一直線状に形成されている。第2溝52は、高次トポロジカル絶縁体層20の $X_1 - X_2$ 方向の中心近傍に設けられ、高次トポロジカル絶縁体層20の $Y_1$ 側の端から $Y_1 - Y_2$ 方向の中心まで延びる。従って、第2溝52は第1溝51及び第3溝53に直交する。

[0018] 高次トポロジカル絶縁体層20は、第1溝51及び第3溝53より $Y_2$ 側に第1領域21を有する。高次トポロジカル絶縁体層20は、第1溝51より $Y_1$ 側かつ第2溝52より $X_2$ 側に第2領域22を有する。高次トポロジカル絶縁体層20は、第3溝53より $Y_1$ 側かつ第2溝52より $X_1$ 側に第3領域23を有する。

[0019] 第1領域21、第2領域22及び第3領域23は、それぞれ、a軸方向に垂直な面とc軸方向に垂直な面との2つの交線の一方にヒンジヘリカルチャネルを備える。ヒンジヘリカルチャネルはb軸方向に平行である。具体的には、第1領域21は、上面とY1側の側面との交線（稜線）に第1ヒンジヘリカルチャネル11を備える。第2領域22は、Y2側の側面と第1溝51の底面との交線に第2ヒンジヘリカルチャネル12を備える。第3領域23は、Y2側の側面と第3溝53の底面との交線に第3ヒンジヘリカルチャネル13を備える。第1ヒンジヘリカルチャネル11が第1領域21のY1側の側面と溝50の底面との交線にあり、かつ、第2ヒンジヘリカルチャネル12が第2領域22の上面とY2側の側面との交線にあり、かつ第3ヒンジヘリカルチャネル13が第3領域23の上面とY2側の側面との交線にあってもよい。

[0020] 第1強磁性絶縁体層31は、第1領域21、第2領域22及び溝50の一部の上に設けられており、第1ヒンジヘリカルチャネル11及び第2ヒンジヘリカルチャネル12の一部を覆う。第2強磁性絶縁体層32は、第2領域22、第3領域23及び溝50の一部の上に設けられており、第2ヒンジヘリカルチャネル12及び第3ヒンジヘリカルチャネル13の一部を覆う。第3強磁性絶縁体層33は、第3領域23、第1領域21及び溝50の一部の上に設けられており、第3ヒンジヘリカルチャネル13及び第1ヒンジヘリカルチャネル11の一部を覆う。第1強磁性絶縁体層31、第2強磁性絶縁体層32及び第3強磁性絶縁体層33の材料としては、 $\text{Cr}_2\text{Ga}_2\text{Te}_6$ が挙げられる。第1強磁性絶縁体層31、第2強磁性絶縁体層32及び第3強磁性絶縁体層33の材料が他の希釈磁性半導体であってもよい。第1強磁性絶縁体層31、第2強磁性絶縁体層32及び第3強磁性絶縁体層33の厚さは、例えば30nm程度である。

[0021] 第2強磁性絶縁体層32は、X1-X2方向において、第2ヒンジヘリカルチャネル12上で第1強磁性絶縁体層31からX1側に離れている。第3強磁性絶縁体層33は、X1-X2方向において、第3ヒンジヘリカルチャ

ネル13上で第2強磁性絶縁体層32からX1側に離れている。第3強磁性絶縁体層33は、X1-X2方向において、第1ヒンジヘリカルチャネル11上で第1強磁性絶縁体層31からX1側に離れている。

[0022] 第1ゲート電極41は第1強磁性絶縁体層31上に設けられている。第2ゲート電極42は第2強磁性絶縁体層32上に設けられている。第3ゲート電極43は第3強磁性絶縁体層33上に設けられている。第1ゲート電極41、第2ゲート電極42及び第3ゲート電極43の材料としては、Auが挙げられる。第1ゲート電極41、第2ゲート電極42及び第3ゲート電極43の厚さは、例えば100nm程度である。

[0023] 第1SQUID61は、下部超伝導体層61Aと、下部超伝導体層61Bと、トンネルバリア層61Cと、上部超伝導体層61Dとを有する。

[0024] 下部超伝導体層61A及び下部超伝導体層61Bは、s波超伝導体層10のX2側の側面からX2側に突出する。下部超伝導体層61Aは下部超伝導体層61BよりY2側にある。平面視で、下部超伝導体層61Aは第1領域21からX2側に突出し、下部超伝導体層61Bは第2領域22からX2側に突出する。下部超伝導体層61A及び下部超伝導体層61Bは、s波超伝導体層10と同じ材料からs波超伝導体層10と一体に形成されている。下部超伝導体層61A及び下部超伝導体層61Bはs波超伝導体層10につながっている。下部超伝導体層61A及び下部超伝導体層61Bは、例えば厚さが100nm~200nm程度のNb層である。

[0025] トンネルバリア層61C及び上部超伝導体層61DはU字型の平面形状を有している。トンネルバリア層61Cの材料としては、NbO<sub>x</sub>が挙げられ、上部超伝導体層61Dの材料としては、Nbが挙げられる。トンネルバリア層61Cの厚さは、例えば1nm~5nm程度であり、上部超伝導体層61Dの厚さは、例えば100nm~200nm程度である。トンネルバリア層61Cの一方の端部が下部超伝導体層61Aに接触し、他方の端部が下部超伝導体層61Bに接触する。上部超伝導体層61Dはトンネルバリア層61Cの上に設けられている。

- [0026] 下部超伝導体層61Aと上部超伝導体層61Dとの間と、下部超伝導体層61Bと上部超伝導体層61Dとの間とにトンネルバリア層61Cが挟まれている。第1SQUID61はこのようなジョセフソン接合により構成されている。第1SQUID61は第1ヒンジヘリカルチャネル11と第2ヒンジヘリカルチャネル12との間の磁束の変化を検出する。
- [0027] 第2SQUID62は、下部超伝導体層62Aと、下部超伝導体層62Bと、トンネルバリア層62Cと、上部超伝導体層62Dとを有する。
- [0028] 下部超伝導体層62A及び下部超伝導体層62Bは、s波超伝導体層10のY1側の側面からY1側に突出する。下部超伝導体層62Aは下部超伝導体層62BよりX2側にある。平面視で、下部超伝導体層62Aは第2領域22からY1側に突出し、下部超伝導体層62Bは第3領域23からY1側に突出する。下部超伝導体層62A及び下部超伝導体層62Bは、s波超伝導体層10と同じ材料からs波超伝導体層10と一体に形成されている。下部超伝導体層62A及び下部超伝導体層62Bはs波超伝導体層10につながっている。下部超伝導体層62A及び下部超伝導体層62Bは、例えば厚さが100nm~200nm程度のNb層である。
- [0029] トンネルバリア層62C及び上部超伝導体層62DはU字型の平面形状を有している。トンネルバリア層62Cの材料としては、NbO<sub>x</sub>が挙げられ、上部超伝導体層62Dの材料としては、Nbが挙げられる。トンネルバリア層62Cの厚さは、例えば1nm~5nm程度であり、上部超伝導体層62Dの厚さは、例えば100nm~200nm程度である。トンネルバリア層62Cの一方の端部が下部超伝導体層62Aに接触し、他方の端部が下部超伝導体層62Bに接触する。上部超伝導体層62Dはトンネルバリア層62Cの上に設けられている。
- [0030] 下部超伝導体層62Aと上部超伝導体層62Dとの間と、下部超伝導体層62Bと上部超伝導体層62Dとの間とにトンネルバリア層62Cが挟まれている。第2SQUID62はこのようなジョセフソン接合により構成されている。第2SQUID62は第2ヒンジヘリカルチャネル12と第3ヒン

ジヘリカルチャネル13との間の磁束の変化を検出する。

[0031] 第3SQUID63は、下部超伝導体層63Aと、下部超伝導体層63Bと、トンネルバリア層63Cと、上部超伝導体層63Dとを有する。

[0032] 下部超伝導体層63A及び下部超伝導体層63Bは、s波超伝導体層10のX1側の側面からX1側に突出する。下部超伝導体層63Aは下部超伝導体層63BよりY1側にある。平面視で、下部超伝導体層63Aは第3領域23からX1側に突出し、下部超伝導体層63Bは第1領域21からX1側に突出する。下部超伝導体層63A及び下部超伝導体層63Bは、s波超伝導体層10と同じ材料からs波超伝導体層10と一体に形成されている。下部超伝導体層63A及び下部超伝導体層63Bはs波超伝導体層10につながっている。下部超伝導体層63A及び下部超伝導体層63Bは、例えば厚さが100nm~200nm程度のNb層である。

[0033] トンネルバリア層63C及び上部超伝導体層63DはU字型の平面形状を有している。トンネルバリア層63Cの材料としては、NbO<sub>x</sub>が挙げられ、上部超伝導体層63Dの材料としては、Nbが挙げられる。トンネルバリア層63Cの厚さは、例えば1nm~5nm程度であり、上部超伝導体層63Dの厚さは、例えば100nm~200nm程度である。トンネルバリア層63Cの一方の端部が下部超伝導体層63Aに接触し、他方の端部が下部超伝導体層63Bに接触する。上部超伝導体層63Dはトンネルバリア層63Cの上に設けられている。

[0034] 下部超伝導体層63Aと上部超伝導体層63Dとの間と、下部超伝導体層63Bと上部超伝導体層63Dとの間とにトンネルバリア層63Cが挟まれている。第3SQUID63はこのようなジョセフソン接合により構成されている。第3SQUID63は第3ヒンジヘリカルチャネル13と第1ヒンジヘリカルチャネル11との間の磁束の変化を検出する。

[0035] このように構成された量子ビット1では、4つのマヨラナ粒子 $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\gamma_3$ 及び $\gamma_4$ が発現する。例えば、マヨラナ粒子 $\gamma_1$ は、第1ヒンジヘリカルチャネル11の第1ゲート電極41の近傍に安定して発現し、マヨラナ

粒子 $\gamma 4$ は、第1ヒンジヘリカルチャネル11の第3ゲート電極43の近傍に安定して発現する。また、例えば、マヨラナ粒子 $\gamma 2$ は、第2ヒンジヘリカルチャネル12の第1ゲート電極41と第2ゲート電極42との間に安定して発現し、マヨラナ粒子 $\gamma 3$ は、第3ヒンジヘリカルチャネル13の第2ゲート電極42と第3ゲート電極43との間に安定して発現する。そして、マヨラナ粒子 $\gamma 1 \sim \gamma 4$ の交換は、第1ゲート電極41、第2ゲート電極42、第3ゲート電極43へのゲート電圧の印加に伴う静電ポテンシャルの変化により実施される。

[0036] 例えば、マヨラナ粒子 $\gamma 1$ とマヨラナ粒子 $\gamma 2$ との交換では、第1ゲート電極41から電界が印加され、マヨラナ粒子 $\gamma 1$ 及び $\gamma 2$ の交換時の微小な磁束の変化が微小な電圧信号の変化として第1SQUID61により検出される。マヨラナ粒子 $\gamma 2$ とマヨラナ粒子 $\gamma 3$ との交換では、第2ゲート電極42から電界が印加され、マヨラナ粒子 $\gamma 2$ 及び $\gamma 3$ の交換時の微小な磁束の変化が微小な電圧信号の変化として第2SQUID62により検出される。また、マヨラナ粒子 $\gamma 3$ とマヨラナ粒子 $\gamma 4$ との交換では、第3ゲート電極43から電界が印加され、マヨラナ粒子 $\gamma 3$ 及び $\gamma 4$ の交換時の微小な磁束の変化が微小な電圧信号の変化として第3SQUID63により検出される。

[0037] 遷移金属ダイカルコゲナイドの層状物質である $WTe_2$ の単層膜は酸化されやすく、大気に晒すと性質が変化してしまう。 $WTe_2$ の単層膜を六方晶窒化ホウ素(h-BN)、グラフェン等の化学的に安定な物質で挟むことで酸化を抑制することは可能であるが、その場合には、量子ビットの製造プロセスが複雑化してしまう。また、 $WTe_2$ の単層膜のサイズの調整も困難である。これに対し、本実施形態では、多層 $WTe_2$ 等の高次トポロジカル絶縁体層20が用いられるため、酸化を抑制するための構成は必要とされない。また、高次トポロジカル絶縁体層20のサイズの調整は、 $WTe_2$ の単層膜のサイズの調整と比較して容易である。

[0038] また、基板90の上に複数の量子ビット1を設けて多量子ビット化したり

、基板90の上に半導体集積回路を実装したりすることも可能である。このため、本実施形態によれば、実用的なエラー耐性量子コンピュータの実現に向けた研究開発を加速させることができる。

[0039] 次に、第1実施形態に係る量子ビット1の製造方法について説明する。図5～図10は、第1実施形態に係る量子ビット1の製造方法を示す上面図である。図11～図16は、第1実施形態に係る量子ビット1の製造方法を示す断面図である。

[0040] まず、図5及び図11に示すように、基板90を準備し、大気圧の酸素雰囲気下で、約1200℃で3時間～4時間の基板90のアニール処理を行う。次いで、基板90をメタノールに20分間浸漬し、超純水でリンス処理を行う。これらの処理により、基板90の表面の平坦性を向上することができる。図11は、図5中のXI-XI線に沿った断面図に相当する。

[0041] その後、基板90上にs波超伝導体層19を形成し、s波超伝導体層19上に高次トポロジカル絶縁体層29を形成する。以下、s波超伝導体層19としてNb層を形成し、高次トポロジカル絶縁体層29として多層WTe<sub>2</sub>を形成することとして説明する。s波超伝導体層19及び高次トポロジカル絶縁体層29は、例えばパルスレーザー堆積(pulse laser deposition: PLD)法により、同一の真空槽内で、in situでエピタキシャル成長させることができる。s波超伝導体層19及び高次トポロジカル絶縁体層29の形成時の基本真空度は、例えば $5 \times 10^{-6}$  Pa以下とする。PLD法により、s波超伝導体層19及び高次トポロジカル絶縁体層29を形成する際には、レーザー光源としてKrFエキシマレーザー( $\lambda = 248$  nm)光源を用いることができる。なお、s波超伝導体層19及び高次トポロジカル絶縁体層29を、例えば、分子線エピタキシー法、スパッタ法、共蒸着法等により形成してもよい。

[0042] s波超伝導体層19としてNb層をPLD法により形成する場合、例えば、ターゲットにはNb純金属ターゲットを用いることができる。s波超伝導体層19を形成する際には、例えば、基板90の温度を約400℃に保持し

、レーザエネルギー密度を $2.0 \text{ J/cm}^2 \sim 5.0 \text{ J/cm}^2$ 、照射周波数を $10 \text{ Hz}$ 、基板90とターゲットとの間の距離を約 $5 \text{ cm}$ 、成膜レートを $0.5 \text{ nm/分} \sim 1.0 \text{ nm/分}$ とする。約 $400^\circ\text{C}$ に保持された基板90上においてNb層は $[110]$ 方向に配向しながらエピタキシャル成長する。

[0043] 高次トポロジカル絶縁体層29として多層 $\text{WTe}_2$ をPLD法により形成する場合、例えば、ターゲットには $\text{WTe}_2$ 焼結体ターゲットを用いることができる。高次トポロジカル絶縁体層29を形成する際には、例えば、基板90の温度を $250^\circ\text{C} \sim 350^\circ\text{C}$ に保持し、レーザエネルギー密度 $1.0 \text{ J/cm}^2 \sim 2.0 \text{ J/cm}^2$ 、照射周波数を $1 \text{ Hz}$ 、基板90とターゲットとの間の距離を約 $5 \text{ cm}$ 、成膜レートを $0.1 \text{ nm/分} \sim 0.5 \text{ nm/分}$ とする。高次トポロジカル絶縁体層29（多層 $\text{WTe}_2$ ）はs波超伝導体層19（Nb層）上でc軸方向に配向し、高次トポロジカル絶縁体層29の結晶構造は $T_d$ 構造（空間群： $Pmm2_1$ ）を示す。

[0044] なお、多層 $\text{WTe}_2$ を成膜の後に、約 $300^\circ\text{C}$ で30分間～1時間ポストアニールを行うことが好ましい。多層 $\text{WTe}_2$ の結晶性が向上するためである。

[0045] 高次トポロジカル絶縁体層29の形成後、図6及び図12に示すように、s波超伝導体層19及び高次トポロジカル絶縁体層29を加工して、s波超伝導体層19から、s波超伝導体層10、下部超伝導体層61A、下部超伝導体層61B、下部超伝導体層62A、下部超伝導体層62B、下部超伝導体層63A及び下部超伝導体層63Bを形成する。図12は、図6中のXII-XII線に沿った断面図に相当する。

[0046] s波超伝導体層19及び高次トポロジカル絶縁体層29の加工の際には、まず、高次トポロジカル絶縁体層29の上に第1電子線レジストをスピコートする。次いで、電子線リソグラフィにより、第1電子線レジストから第1マスクパターンを形成する。第1マスクパターンは、s波超伝導体層19の、s波超伝導体層10、下部超伝導体層61A、下部超伝導体層61B、下部超伝導体層62A、下部超伝導体層62B、下部超伝導体層63A及び

下部超伝導体層63Bを形成する予定の部分を高次トポロジカル絶縁体層29の上から覆い、他の部分を露出する。第1電子線レジストとしては、例えば、ZEP 520A（日本ゼオン株式会社製）をZEP-A（日本ゼオン株式会社製）で1：1に希釈したレジストを用いることができる。第1マスクパターンの形成後、A rイオンミリングによりs波超伝導体層19及び高次トポロジカル絶縁体層29を加工する。A rイオンミリングでは、例えば、ビーム加速電圧を280V、ビーム電流を150mAとする。

[0047] s波超伝導体層19及び高次トポロジカル絶縁体層29の加工後、第1マスクパターンを除去し、図7及び図13に示すように、高次トポロジカル絶縁体層29を加工して、高次トポロジカル絶縁体層29から、平面形状が矩形で上面が平坦な高次トポロジカル絶縁体層29Aを形成する。図13は、図7中のXIII-XIII線に沿った断面図に相当する。

[0048] 高次トポロジカル絶縁体層29の加工の際には、まず、高次トポロジカル絶縁体層29及び基板90の上に第2電子線レジストをスピコートする。次いで、電子線リソグラフィにより、第2電子線レジストから第2マスクパターンを形成する。第2マスクパターンは、高次トポロジカル絶縁体層29の、s波超伝導体層10上の部分を覆い下部超伝導体層61A、下部超伝導体層61B、下部超伝導体層62A、下部超伝導体層62B、下部超伝導体層63A及び下部超伝導体層63B上の部分を露出する。第2電子線レジストとしては、例えば、ZEP 520A（日本ゼオン株式会社製）をZEP-A（日本ゼオン株式会社製）で1：1に希釈したレジストを用いることができる。第2マスクパターンの形成後、A rイオンミリングにより高次トポロジカル絶縁体層29を加工する。この結果、高次トポロジカル絶縁体層29Aが形成され、下部超伝導体層61A、下部超伝導体層61B、下部超伝導体層62A、下部超伝導体層62B、下部超伝導体層63A及び下部超伝導体層63Bが高次トポロジカル絶縁体層29Aから露出する。A rイオンミリングでは、例えば、ビーム加速電圧を280V、ビーム電流を150mAとする。

[0049] 高次トポロジカル絶縁体層 29 A の形成後、第 2 マスクパターンを除去し、図 8 及び図 14 に示すように、高次トポロジカル絶縁体層 29 A を加工して、高次トポロジカル絶縁体層 29 A から、第 1 領域 21、第 2 領域 22 及び第 3 領域 23 を備えた高次トポロジカル絶縁体層 20 を形成する。図 14 は、図 8 中の XIV-XIV 線に沿った断面図に相当する。

[0050] 高次トポロジカル絶縁体層 29 A の加工の際には、まず、高次トポロジカル絶縁体層 29 A、基板 90、下部超伝導体層 61 A、下部超伝導体層 61 B、下部超伝導体層 62 A、下部超伝導体層 62 B、下部超伝導体層 63 A 及び下部超伝導体層 63 B の上に第 3 電子線レジストをスピンコートする。次いで、電子線リソグラフィにより、第 3 電子線レジストから第 3 マスクパターンを形成する。第 3 マスクパターンは、高次トポロジカル絶縁体層 29 A の、溝 50 を形成する予定の部分を露出し、他の部分を覆う。第 3 電子線レジストとしては、例えば、ZEP 520 A（日本ゼオン株式会社製）を ZEP-A（日本ゼオン株式会社製）で 1 : 1 に希釈したレジストを用いることができる。第 3 マスクパターンの形成後、A r イオンミリングにより高次トポロジカル絶縁体層 29 A を加工する。この結果、第 1 溝 51、第 2 溝 52 及び第 3 溝 53 を備えた溝 50 が形成され、第 1 領域 21、第 2 領域 22 及び第 3 領域 23 を備えた高次トポロジカル絶縁体層 20 が得られる。第 1 領域 21 は第 1 ヒンジヘリカルチャネル 11 を備え、第 2 領域 22 は第 2 ヒンジヘリカルチャネル 12 を備え、第 3 領域 23 は第 3 ヒンジヘリカルチャネル 13 を備える（図 4 参照）。A r イオンミリングでは、例えば、ビーム加速電圧を 280 V、ビーム電流を 150 mA とする。

[0051] 高次トポロジカル絶縁体層 20 の形成後、第 3 マスクパターンを除去し、図 9 及び図 15 に示すように、第 1 強磁性絶縁体層 31、第 2 強磁性絶縁体層 32、第 3 強磁性絶縁体層 33、第 1 ゲート電極 41、第 2 ゲート電極 42 及び第 3 ゲート電極 43 を形成する。図 15 は、図 9 中の XV-XV 線に沿った断面図に相当する。

[0052] 第 1 強磁性絶縁体層 31、第 2 強磁性絶縁体層 32、第 3 強磁性絶縁体層

33、第1ゲート電極41、第2ゲート電極42及び第3ゲート電極43の形成の際には、まず、高次トポロジカル絶縁体層20、基板90、下部超伝導体層61A、下部超伝導体層61B、下部超伝導体層62A、下部超伝導体層62B、下部超伝導体層63A及び下部超伝導体層63Bの上に第4電子線レジストをスピコートする。次いで、電子線リソグラフィにより、第4電子線レジストから第4マスクパターンを形成する。第4マスクパターンは、第1強磁性絶縁体層31、第2強磁性絶縁体層32、第3強磁性絶縁体層33、第1ゲート電極41、第2ゲート電極42及び第3ゲート電極43を形成する予定の部分を露出し、他の部分を覆う。第4電子線レジストとしては、例えば、ZEP 520A（日本ゼオン株式会社製）をZEP-A（日本ゼオン株式会社製）で1：1に希釈したレジストを用いることができる。第4マスクパターンの形成後、PLD法により $\text{Cr}_2\text{Ga}_2\text{Te}_6$ 層及びAu層を形成する。

[0053]  $\text{Cr}_2\text{Ga}_2\text{Te}_6$ 層をPLD法により形成する際には、例えば、基板90の温度を $150^\circ\text{C}\sim 250^\circ\text{C}$ に保持し、レーザエネルギー密度を $1.0\text{ J}/\text{cm}^2\sim 2.0\text{ J}/\text{cm}^2$ 、照射周波数を $1\text{ Hz}$ 、基板90とターゲットとの間の距離を約 $5\text{ cm}$ 、成膜レートを $1.0\text{ nm}/\text{分}\sim 2.0\text{ nm}/\text{分}$ とする。

[0054] Au層をPLD法により形成する際には、例えば、基板90の温度を室温に保持し、レーザエネルギー密度を $1.0\text{ J}/\text{cm}^2\sim 2.0\text{ J}/\text{cm}^2$ 、照射周波数を $5\text{ Hz}$ 、基板90とターゲットとの間の距離を約 $5\text{ cm}$ 、成膜レートを $5.0\text{ nm}/\text{分}\sim 10.0\text{ nm}/\text{分}$ とする。

[0055]  $\text{Cr}_2\text{Ga}_2\text{Te}_6$ 層及びAu層の形成後に、第4マスクパターンを、その上に堆積した $\text{Cr}_2\text{Ga}_2\text{Te}_6$ 層及びAu層と共に除去する。つまり、リフトオフを行う。この結果、第1強磁性絶縁体層31、第2強磁性絶縁体層32、第3強磁性絶縁体層33、第1ゲート電極41、第2ゲート電極42及び第3ゲート電極43が得られる。また、4つのマヨラナ粒子 $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\gamma_3$ 及び $\gamma_4$ が発現する。

[0056] 次いで、図10及び図16に示すように、トンネルバリア層61C～63

C及び上部超伝導体層61D～63Dを形成する。図16は、図10中のXVI-XVI線に沿った断面図に相当する。

[0057] トンネルバリア層61C～63C及び上部超伝導体層61D～63Dの形成の際には、まず、高次トポロジカル絶縁体層20、基板90、下部超伝導体層61A、下部超伝導体層61B、下部超伝導体層62A、下部超伝導体層62B、下部超伝導体層63A、下部超伝導体層63B、第1ゲート電極41、第2ゲート電極42及び第3ゲート電極43の上に第5電子線レジストをスピコートする。次いで、電子線リソグラフィにより、第5電子線レジストから第5マスクパターンを形成する。第5マスクパターンは、トンネルバリア層61C～63C及び上部超伝導体層61D～63Dを形成する予定の部分を露出し、他の部分を覆う。第5電子線レジストとしては、例えば、ZEP 520A（日本ゼオン株式会社製）をZEP-A（日本ゼオン株式会社製）で1：1に希釈したレジストを用いることができる。第5マスクパターンの形成後、PLD法によりNbO<sub>x</sub>層及びNb層を形成する。

[0058] NbO<sub>x</sub>層をPLD法により形成する際には、例えば、Nb金属のターゲットを用い、基板90の温度を室温に保持し、真空槽の酸素分圧を50Pa～55Pa程度に調整する。Nb層は、s波超伝導体層19と同様の条件で形成することができる。

[0059] NbO<sub>x</sub>層及びNb層の形成後に、第5マスクパターンを、その上に堆積したNbO<sub>x</sub>層及びNb層と共に除去する。つまり、リフトオフを行う。この結果、トンネルバリア層61C～63C及び上部超伝導体層61D～63Dが得られ、第1SQUID61、第2SQUID62及び第3SQUID63が形成される。

[0060] このようにして、第1実施形態に係る量子ビット1を製造することができる。

[0061] 高次トポロジカル絶縁体層20の材料は多層WTe<sub>2</sub>に限定されず、例えば多層Bi<sub>4</sub>Br<sub>4</sub>であってもよい。また、s波超伝導体層10の材料はNbに限定されず、例えばAl又はPdであってもよい。

[0062] (第2実施形態)

次に、第2実施形態について説明する。第2実施形態は、第1実施形態に係る量子ビット1を含む量子演算装置に関する。図17は、第2実施形態に係る量子演算装置を示す図である。

[0063] 第2実施形態に係る量子演算装置2は、図17に示すように、量子ビットチップ81と、信号発生器82と、信号復調器83と、極低温希釈冷凍機84とを有する。量子ビットチップ81は、複数の第1実施形態に係る量子ビット1を含む。量子ビットチップ81は極低温希釈冷凍機84に収容され、10mK以下の温度に冷却される。信号発生器82がマイクロ波パルス信号を発生し、量子ビットチップ81にマイクロ波パルス信号が入力される。量子ビットチップ81はマイクロ波パルス信号に応じた信号を出力し、信号復調器83が量子ビットチップ81から出力された信号を復調する。信号発生器82及び信号復調器83は、例えば室温程度の温度で使用される。

[0064] 第2実施形態に係る量子演算装置2が第1実施形態に係る量子ビット1を含むため、マヨラナ粒子を安定して発現させることができ、安定した演算を行うことができる。

[0065] 以上、好ましい実施の形態等について詳説したが、上述した実施の形態等に制限されることはなく、請求の範囲に記載された範囲を逸脱することなく、上述した実施の形態等に種々の変形及び置換を加えることができる。

## 符号の説明

- [0066] 1 : 量子ビット  
2 : 量子演算装置  
10 : s波超伝導体層  
11 : 第1ヒンジヘリカルチャネル  
12 : 第2ヒンジヘリカルチャネル  
13 : 第3ヒンジヘリカルチャネル  
20 : 高次トポロジカル絶縁体層  
21 : 第1領域

- 2 2 : 第2領域
- 2 3 : 第3領域
- 3 1 : 第1強磁性絶縁体層
- 3 2 : 第2強磁性絶縁体層
- 3 3 : 第3強磁性絶縁体層
- 4 1 : 第1ゲート電極
- 4 2 : 第2ゲート電極
- 4 3 : 第3ゲート電極
- 5 0 : 溝
- 5 1 : 第1溝
- 5 2 : 第2溝
- 5 3 : 第3溝
- 6 1 : 第1 S Q U I D
- 6 2 : 第2 S Q U I D
- 6 3 : 第3 S Q U I D

## 請求の範囲

- [請求項1] s波超伝導体層と、  
前記s波超伝導体層上に設けられた高次トポロジカル絶縁体層と、  
前記高次トポロジカル絶縁体層上に設けられた第1強磁性絶縁体層と、  
前記第1強磁性絶縁体層上に設けられた第1ゲート電極と、  
を有し、  
前記高次トポロジカル絶縁体層は、  
第1ヒンジヘリカルチャネルを備えた第1領域と、  
前記第1ヒンジヘリカルチャネルから離れた第2ヒンジヘリカルチャネルを備えた第2領域と、  
を有し、  
前記第1強磁性絶縁体層は、前記第1ヒンジヘリカルチャネル及び前記第2ヒンジヘリカルチャネルを覆うことを特徴とする量子ビット。
- [請求項2] 前記第1ヒンジヘリカルチャネルと前記第2ヒンジヘリカルチャネルとの間の磁束の変化を検出する第1超伝導量子干渉計を有することを特徴とする請求項1に記載の量子ビット。
- [請求項3] 前記高次トポロジカル絶縁体層は、前記第1ヒンジヘリカルチャネル及び前記第2ヒンジヘリカルチャネルから離れた第3ヒンジヘリカルチャネルを備えた第3領域を有し、  
前記第2ヒンジヘリカルチャネル及び前記第3ヒンジヘリカルチャネルを覆う第2強磁性絶縁体層と、  
前記第2強磁性絶縁体層上に設けられた第2ゲート電極と、  
前記第3ヒンジヘリカルチャネル及び前記第1ヒンジヘリカルチャネルを覆う第3強磁性絶縁体層と、  
前記第3強磁性絶縁体層上に設けられた第3ゲート電極と、  
を有することを特徴とする請求項1又は2に記載の量子ビット。

- [請求項4] 第2超伝導量子干渉計と、  
第3超伝導量子干渉計と、  
を有し、  
第2超伝導量子干渉計は、前記第2ヒンジヘリカルチャネルと前記第3ヒンジヘリカルチャネルとの間の磁束の変化を検出し、  
第3超伝導量子干渉計は、前記第3ヒンジヘリカルチャネルと前記第1ヒンジヘリカルチャネルとの間の磁束の変化を検出することを特徴とする請求項3に記載の量子ビット。
- [請求項5] 前記高次トポロジカル絶縁体層に、  
前記第1領域と前記第2領域とを画定する第1溝と、  
前記第2領域と前記第3領域とを画定する第2溝と、  
前記第3領域と前記第1領域とを画定する第3溝と、  
が形成されていることを特徴とする請求項3又は4に記載の量子ビット。
- [請求項6] 前記第1溝及び前記第3溝は、共通の第1方向に延び、  
前記第2溝は、前記第1方向に垂直な第2方向に延び、  
前記第1溝、前記第2溝及び前記第3溝が繋がっていることを特徴とする請求項5に記載の量子ビット。
- [請求項7] 前記第1溝、前記第2溝及び前記第3溝は、平面視でT字型の溝を構成することを特徴とする請求項6に記載の量子ビット。
- [請求項8] 高次トポロジカル絶縁体層は、多層 $WTe_2$ 又は多層 $Bi_4Br_4$ を含むことを特徴とする請求項1乃至7のいずれか1項に記載の量子ビット。
- [請求項9] 前記s波超伝導体層は、Nb、Al又はPdを含むことを特徴とする請求項1乃至8のいずれか1項に記載の量子ビット。
- [請求項10] 請求項1乃至9のいずれか1項に記載の量子ビットを含むことを特徴とする量子演算装置。
- [請求項11] s波超伝導体層上に高次トポロジカル絶縁体層を形成する工程と、

前記高次トポロジカル絶縁体層上に第1強磁性絶縁体層を形成する工程と、

前記第1強磁性絶縁体層上に第1ゲート電極を形成する工程と、  
を有し、

前記高次トポロジカル絶縁体層は、

第1ヒンジヘリカルチャネルを備えた第1領域と、

前記第1ヒンジヘリカルチャネルから離れた第2ヒンジヘリカルチャネルを備えた第2領域と、

を有し、

前記第1強磁性絶縁体層は、前記第1ヒンジヘリカルチャネル及び前記第2ヒンジヘリカルチャネルを覆うことを特徴とする量子ビットの製造方法。

[請求項12]

前記高次トポロジカル絶縁体層は、前記第1ヒンジヘリカルチャネル及び前記第2ヒンジヘリカルチャネルから離れた第3ヒンジヘリカルチャネルを備えた第3領域を有し、

前記第2ヒンジヘリカルチャネル及び前記第3ヒンジヘリカルチャネルを覆う第2強磁性絶縁体層を形成する工程と、

前記第3ヒンジヘリカルチャネル及び前記第1ヒンジヘリカルチャネルを覆う第3強磁性絶縁体層を形成する工程と、

前記第2強磁性絶縁体層上に第2ゲート電極を形成する工程と、

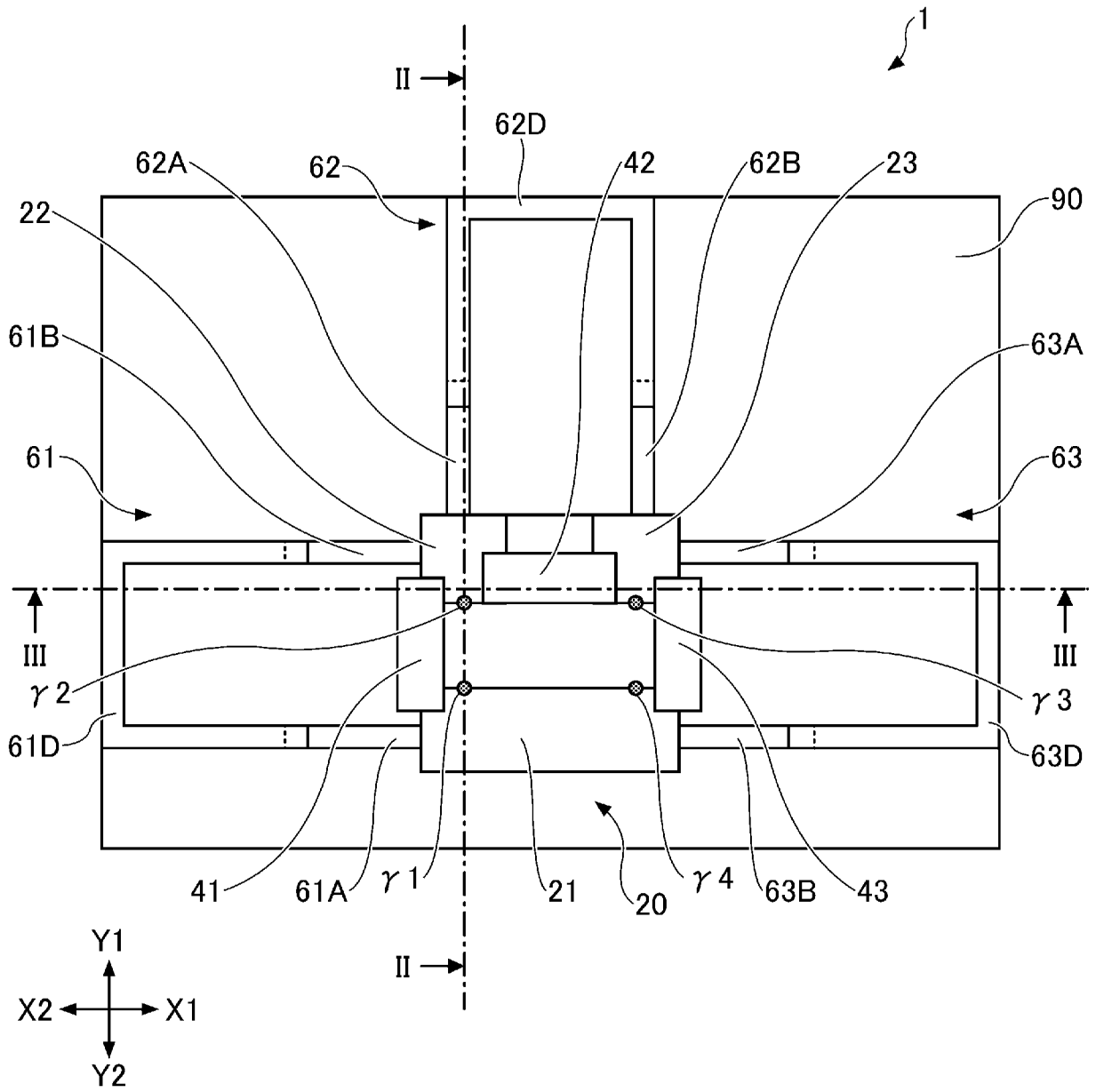
前記第3強磁性絶縁体層上に第3ゲート電極を形成する工程と、

を有することを特徴とする請求項11に記載の量子ビットの製造方法。

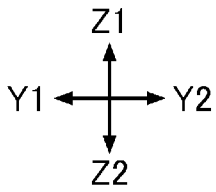
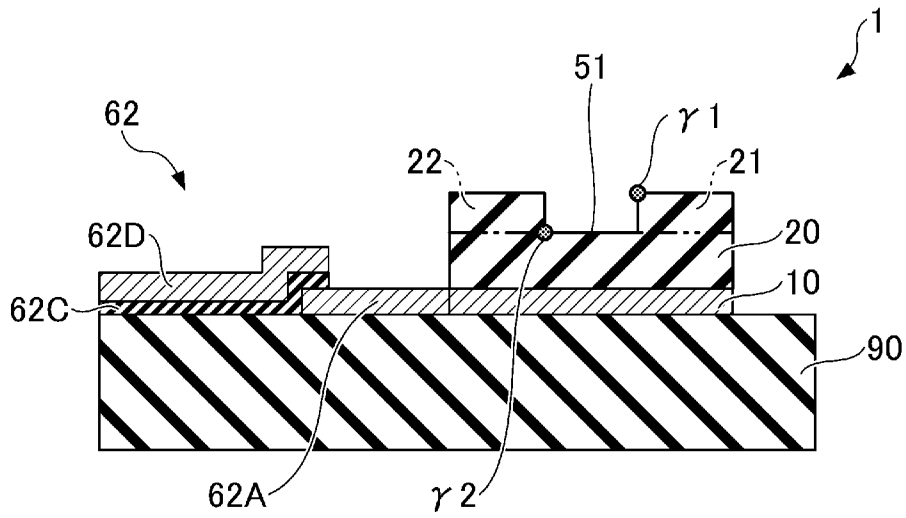
[請求項13]

前記高次トポロジカル絶縁体層に、前記第1領域と前記第2領域とを画定する第1溝と、前記第2領域と前記第3領域とを画定する第2溝と、前記第3領域と前記第1領域とを画定する第3溝と、を形成する工程を有することを特徴とする請求項12に記載の量子ビットの製造方法。

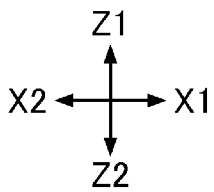
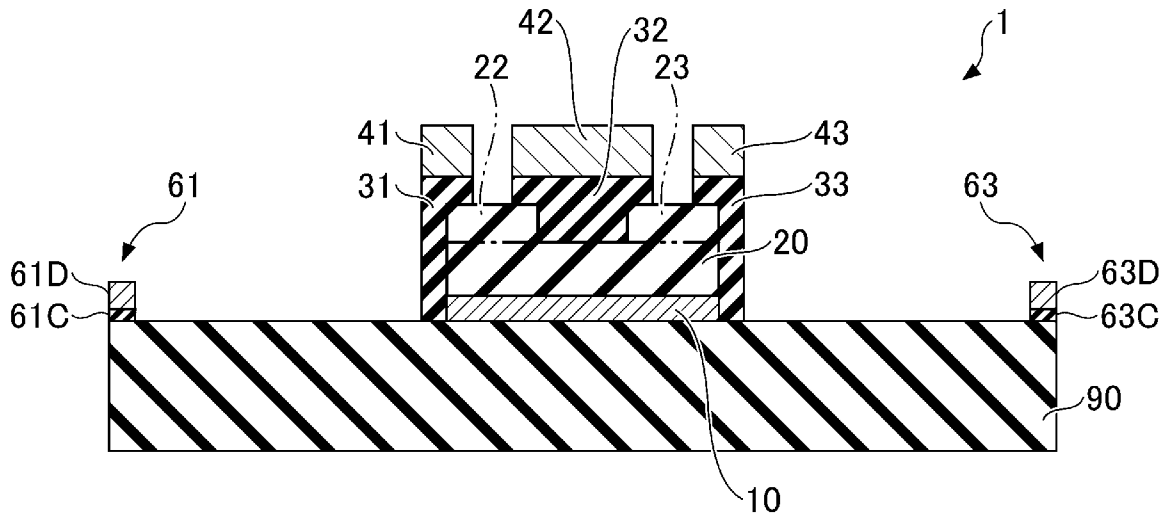
[図1]



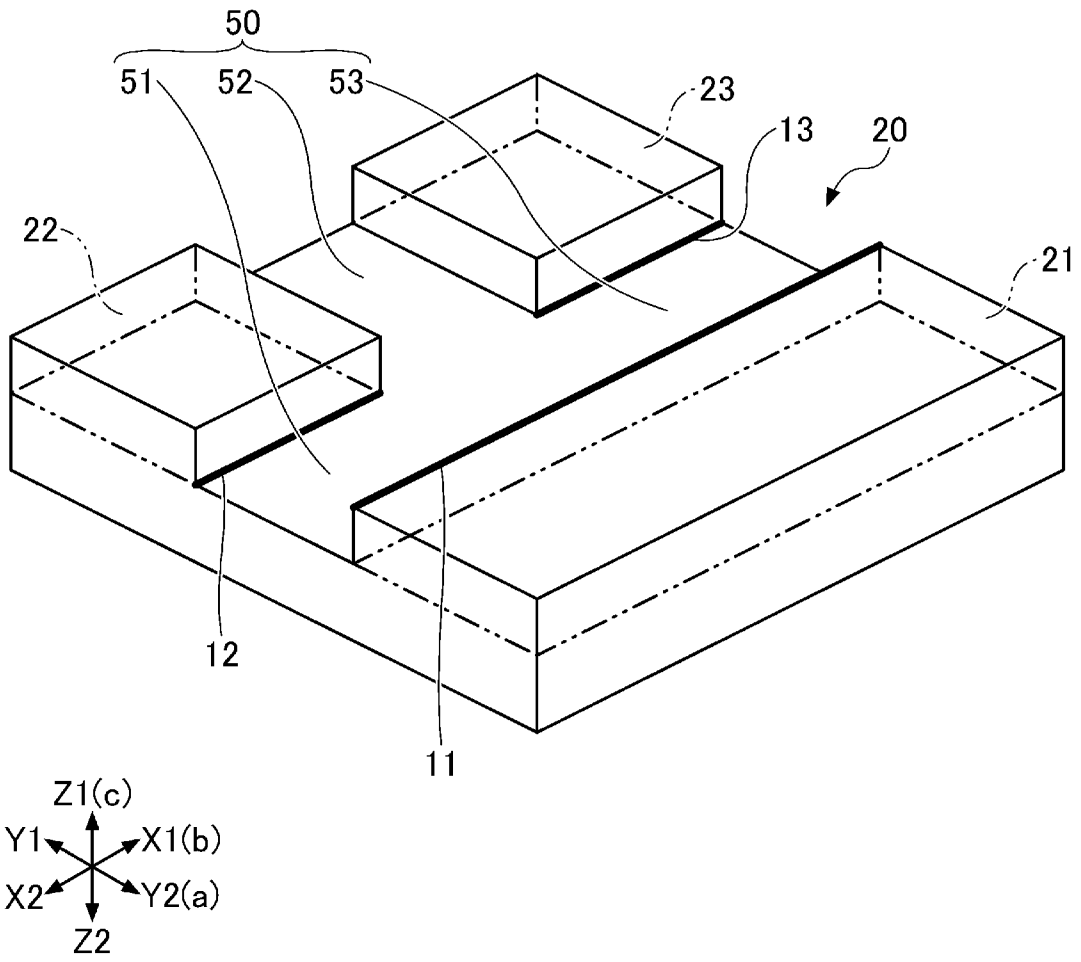
[図2]



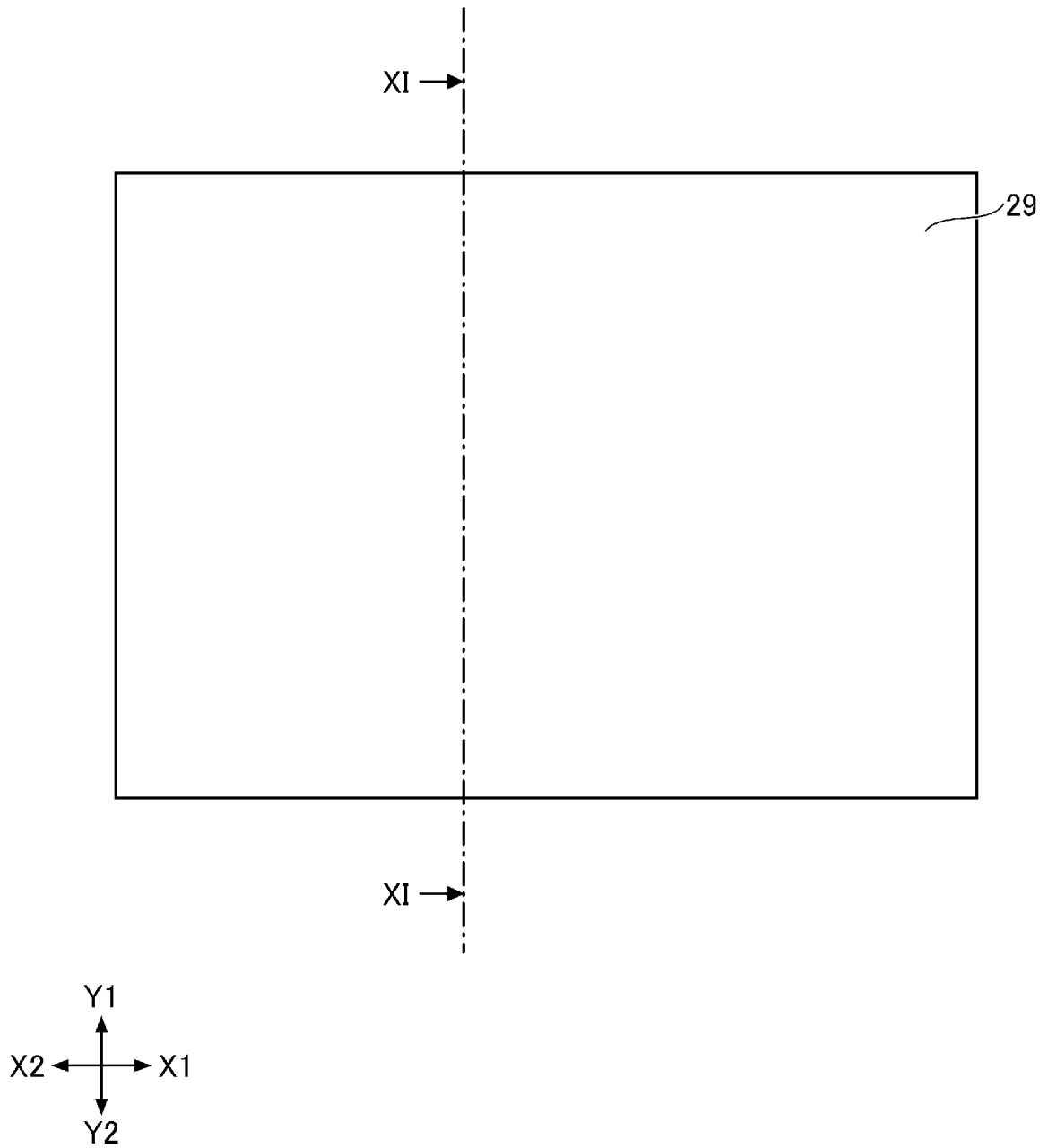
[図3]



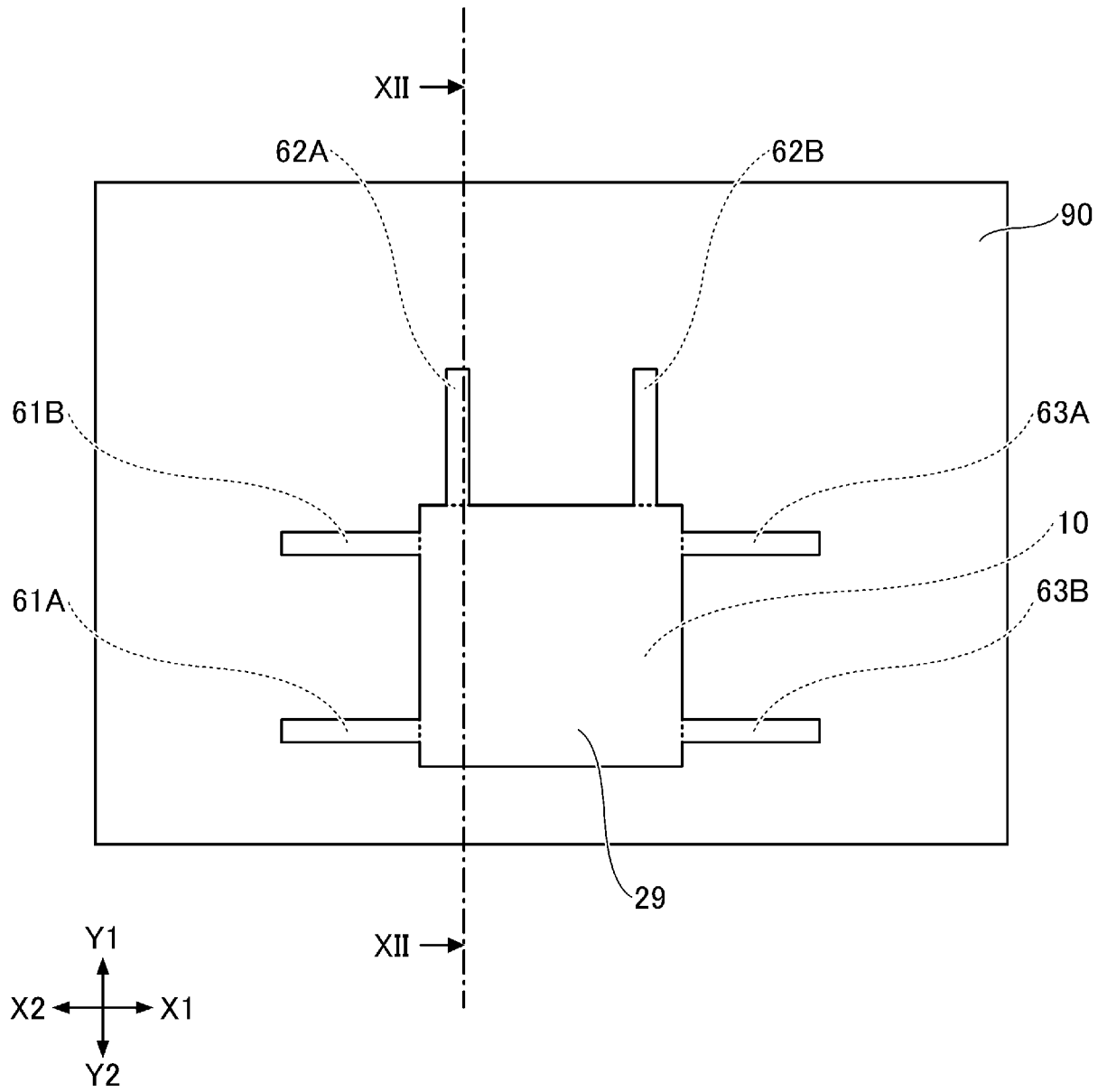
[図4]



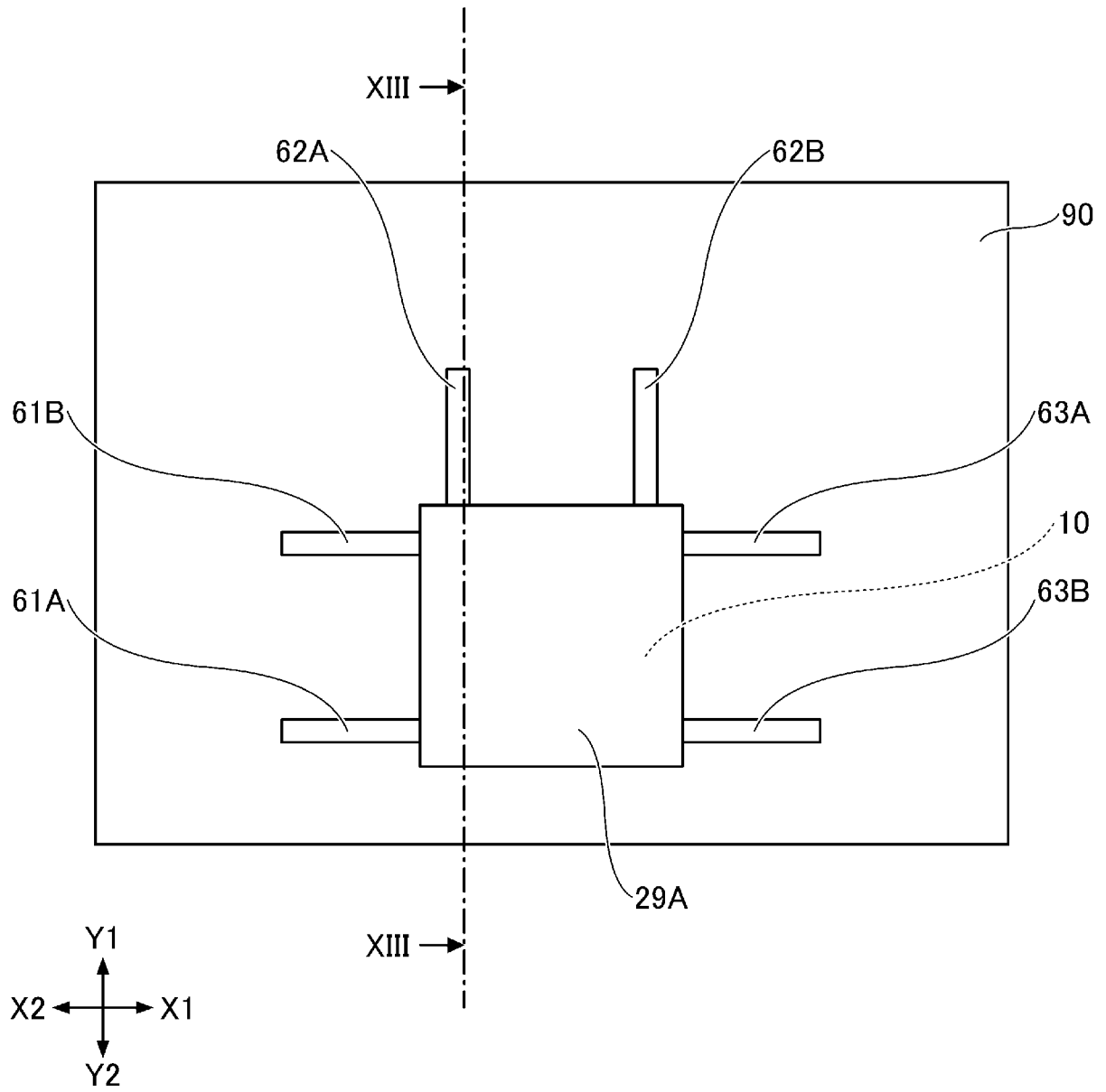
[図5]



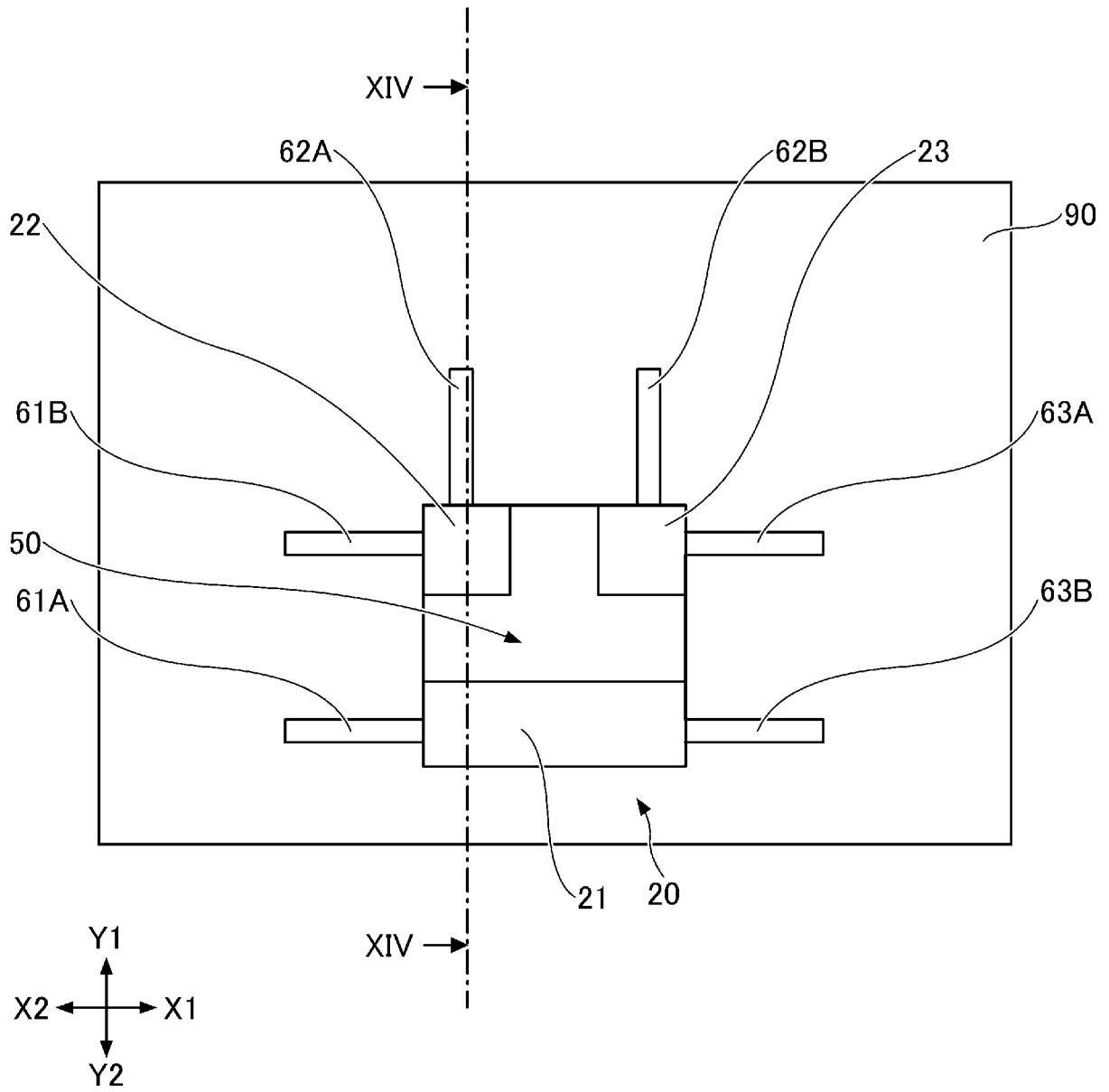
[図6]



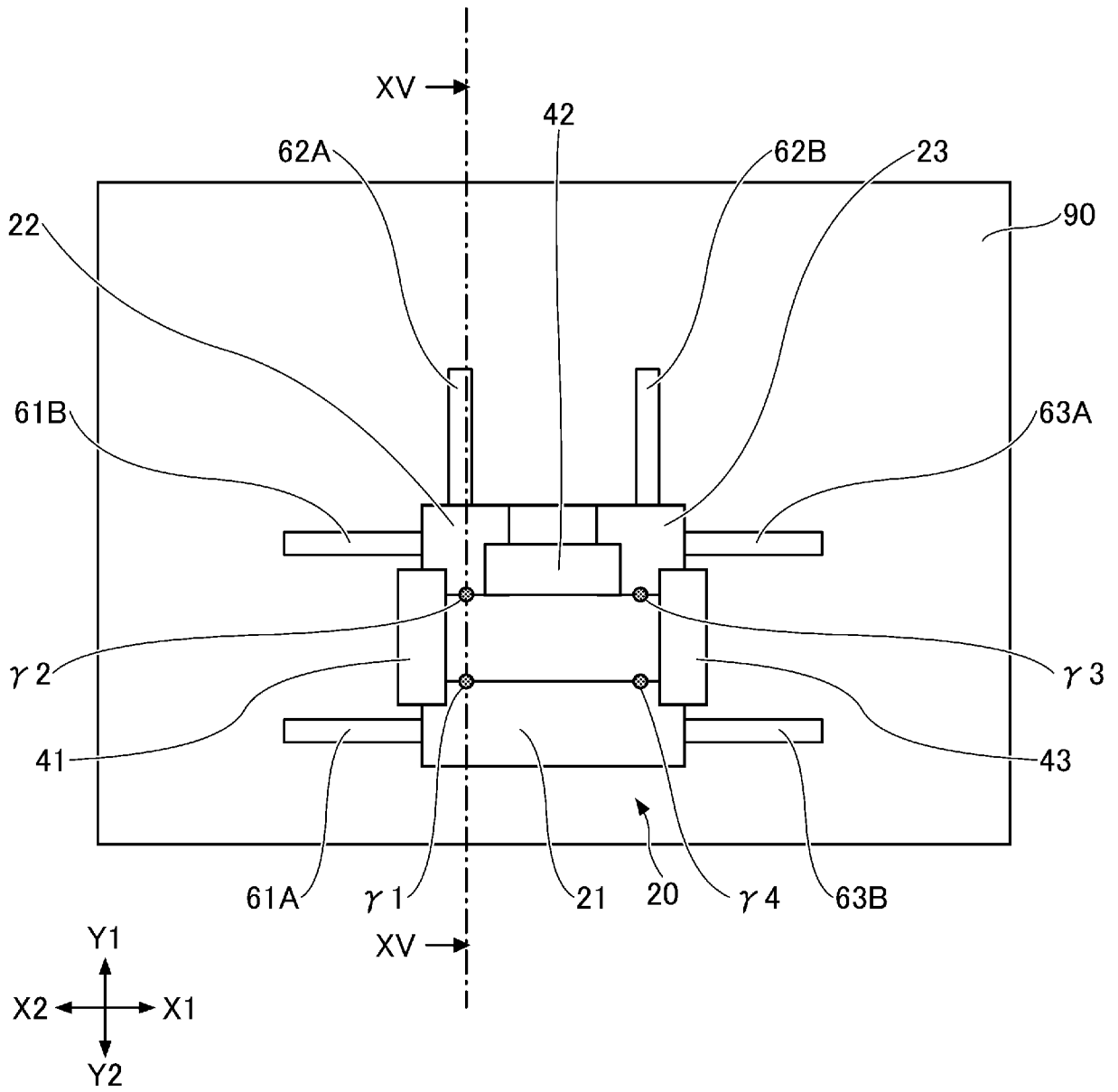
[図7]



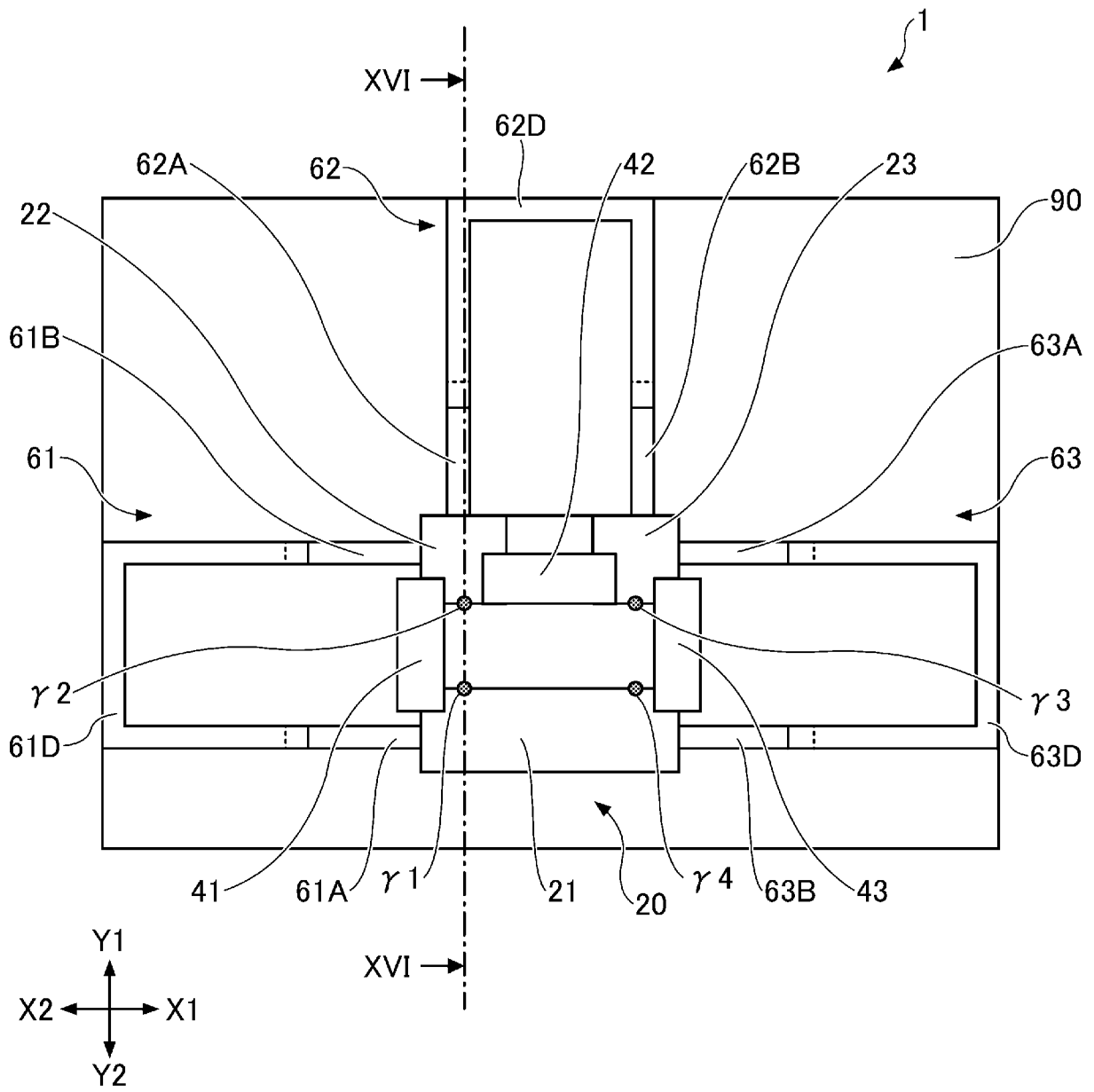
[図8]



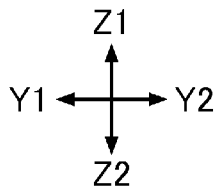
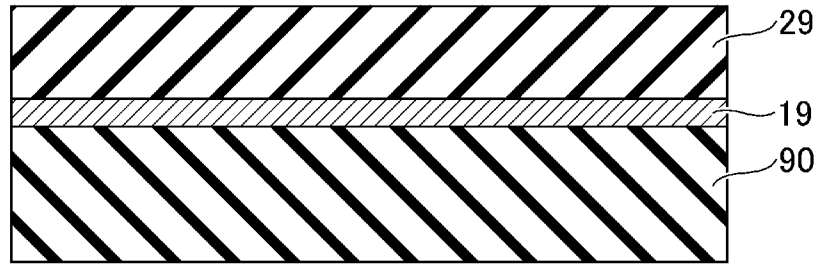
[図9]



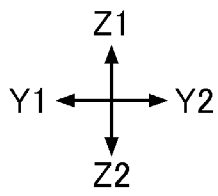
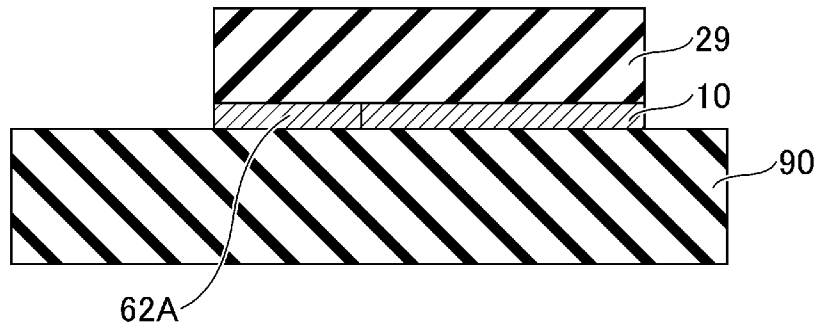
[図10]



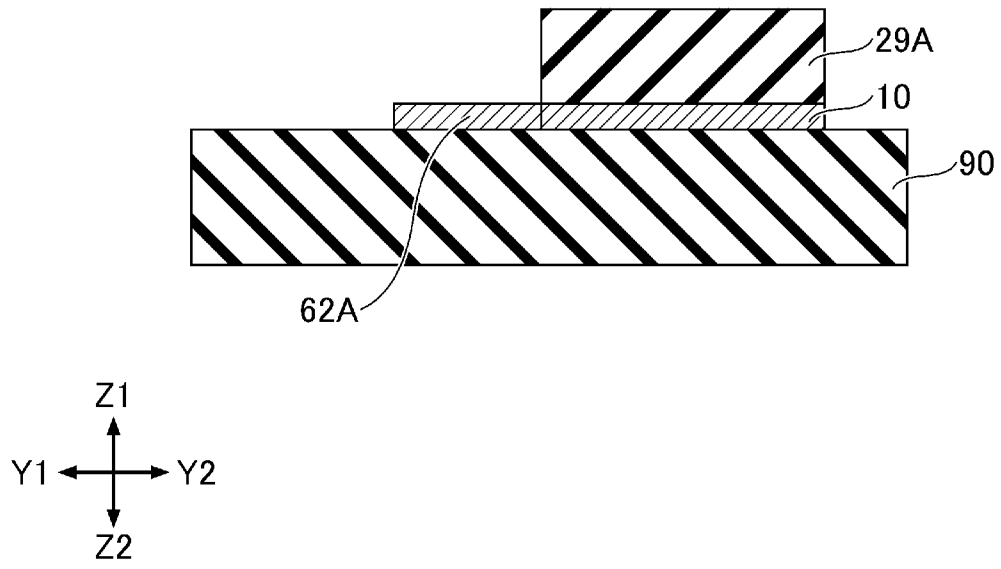
[図11]



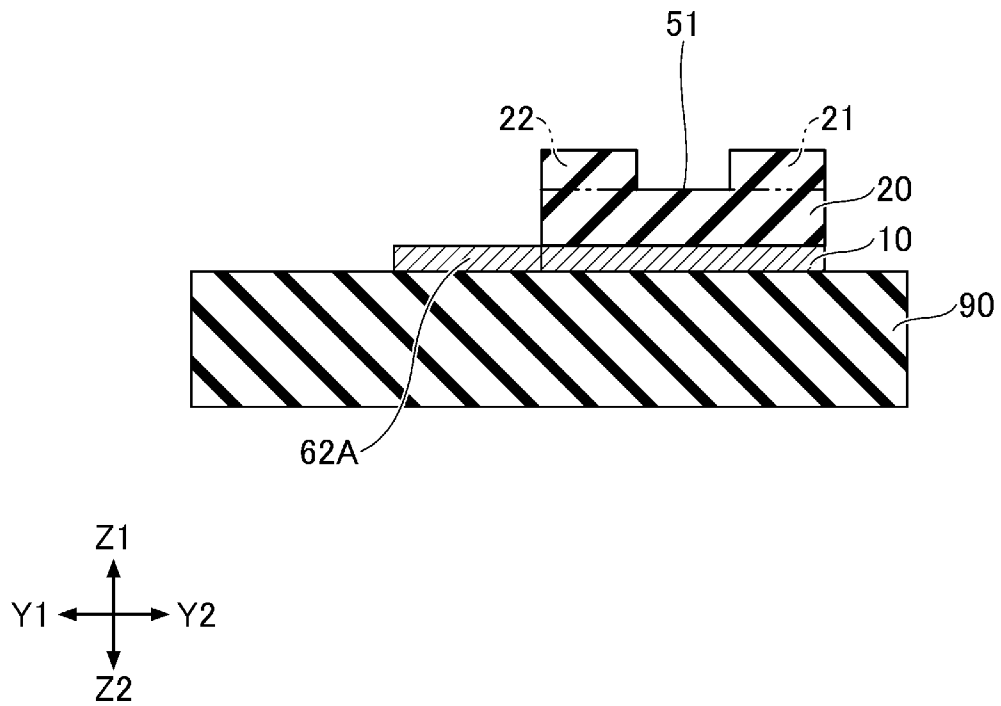
[図12]



[図13]

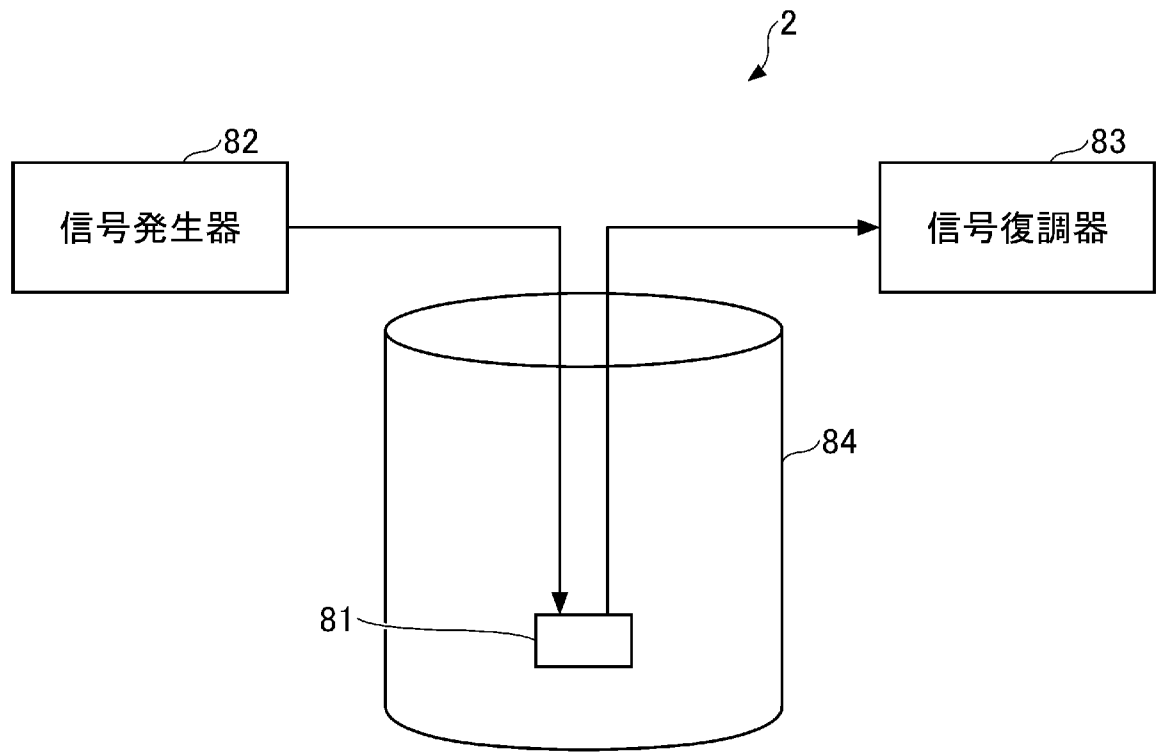


[図14]





[図17]



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2021/034578

<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b>		
<i>H01L 39/22</i> (2006.01)i; <i>H01L 39/24</i> (2006.01)i FI: H01L39/22 A; H01L39/24 J		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b>		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) H01L39/22; H01L39/24		
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 1971-2021 Registered utility model specifications of Japan 1996-2021 Published registered utility model applications of Japan 1994-2021		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2020-096107 A (HITACHI, LTD.) 18 June 2020 (2020-06-18) paragraphs [0017]-[0029], fig. 1-2	1-13
A	FEI et al. Edge conduction in monolayer WTe <sub>2</sub> . Nature Physics. 10 April 2017, vol. 13, pages 677-682, doi:10.1038/s41567-020-0816-x page 677, left column, line 37 to page 681, right column, line 4, fig. 1-4	1-13
A	JP 2020-511780 A (FORSCHUNGSZENTRUM JULICH GMBH) 16 April 2020 (2020-04-16) paragraphs [0119]-[0142], fig. 1-8	1-13
A	HSE et al. Majorana Kramers Pairs in Higher-Order Topological Insulators. Physical Review Letters. 06 November 2018, vol. 121, 196801-1 to 196801-8, DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.196801 page 1, left column, line 25 to page 4, right column, line 38, fig. 1-4	1-13
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> 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 <b>03 December 2021</b>		Date of mailing of the international search report <b>14 December 2021</b>
Name and mailing address of the ISA/JP <b>Japan Patent Office (ISA/JP) 3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915 Japan</b>		Authorized officer  Telephone No.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
**Information on patent family members**

International application No. <b>PCT/JP2021/034578</b>
---

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
JP 2020-096107 A	18 June 2020	(Family: none)	
JP 2020-511780 A	16 April 2020	US 2020/0044137 A1 paragraphs [0133]-[0162], fig. 1-8 EP 3602643 A1 DE 102017002616 A1 CN 110291649 A	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） H01L 39/22(2006.01)i; H01L 39/24(2006.01)i FI: H01L39/22 A; H01L39/24 J		
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）） H01L39/22; H01L39/24 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 1971-2021年 日本国実用新案登録公報 1996-2021年 日本国登録実用新案公報 1994-2021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
A	JP 2020-096107 A (株式会社日立製作所) 18.06.2020 (2020-06-18) 段落[0017]-[0029], 図1-2	1-13
A	FEI et.al., Edge conduction in monolayer WTe <sub>2</sub> , Nature Physics, 2017.04.10, Volume 13, pp.677-682, doi:10.1038/s41567-020-0816-x 第677頁左欄第37行-第681頁右欄第4行, 第1図-第4図	1-13
A	JP 2020-511780 A (フォルシュングスツェントルム・ユーリッヒ・ゲゼルシャフト・ ミット・ベシュレンクテル・ハフツング) 16.04.2020 (2020-04-16) 段落[0119]-[0142], 図1-8	1-13
A	HSE et.al., Majorana Kramers Pairs in Higher-Order Topological Insulators, PHYSICAL REVIEW LETTERS, 2018.11.06, Volume 121, 196801-1-196801-8, DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.196801 第1頁左欄第25行-第4頁右欄第38行, 第1図-第4図	1-13
<input type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input checked="" type="checkbox"/> 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 03.12.2021	国際調査報告の発送日 14.12.2021	
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） 杉山 芳弘 5F 6311 電話番号 03-3581-1101 内線 3516	

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/JP2021/034578

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP 2020-096107 A	18.06.2020	(ファミリーなし)	
JP 2020-511780 A	16.04.2020	US 2020/0044137 A1 段落[0133]-[0162], 図1-8 EP 3602643 A1 DE 102017002616 A1 CN 110291649 A	