

(19)日本国特許庁(JP)

## (12)特許公報(B2)

(11)特許番号  
特許第7666617号  
(P7666617)

(45)発行日 令和7年4月22日(2025.4.22)

(24)登録日 令和7年4月14日(2025.4.14)

(51)国際特許分類

F I

H 1 0 N 60/12 (2023.01)

H 1 0 N 60/12

A Z A A

H 1 0 N 60/01 (2023.01)

H 1 0 N 60/01

J

請求項の数 11 (全18頁)

(21)出願番号 特願2023-549195(P2023-549195)  
 (86)(22)出願日 令和3年9月21日(2021.9.21)  
 (86)国際出願番号 PCT/JP2021/034578  
 (87)国際公開番号 WO2023/047461  
 (87)国際公開日 令和5年3月30日(2023.3.30)  
 審査請求日 令和6年3月4日(2024.3.4)

(73)特許権者 000005223  
 富士通株式会社  
 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1  
 番1号  
 (74)代理人 100107766  
 弁理士 伊東 忠重  
 (74)代理人 100070150  
 弁理士 伊東 忠彦  
 (72)発明者 山口 淳一  
 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  
 審査官 杉山 芳弘

最終頁に続く

(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

## (57)【特許請求の範囲】

## 【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。

10

## 【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

20

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】

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6のいずれか1項に記載の量子ビット。

【請求項8】

請求項1乃至7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9】

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10】

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、

10

20

30

40

50

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 9 に記載の量子ビットの製造方法。

【請求項 11】

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 10 に記載の量子ビットの製造方法。

10

【発明の詳細な説明】

【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  $WTe_2$  の単層膜が用いられている。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【文献】特開 2020 - 96107 号公報

【文献】米国特許出願公開第 2013 / 0299783 号明細書

【文献】米国特許出願公開第 2016 / 0035674 号明細書

【文献】特開 2013 - 247267 号公報

【非特許文献】

【0004】

【文献】N. Read and D. Green, Phys. Rev. B 61, 10267 (2000)

30

【文献】V. Mourik et al., Science 336, 25 (2012)

【文献】J. Alicea, Rep. Prog. Phys. 75, 076501 (2012)

【文献】S. Wu et al., Science 359, 76 (2018)

【文献】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。

40

【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

50

、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。

10

【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。

20

【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。

30

【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。

40

【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

50

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。

【 0 0 1 2 】

第 1 実施形態に係る量子ビット 1 は、基板 9 0 と、s 波超伝導体層 1 0 と、高次トポロジカル絶縁体層 2 0 と、第 1 強磁性絶縁体層 3 1 と、第 2 強磁性絶縁体層 3 2 と、第 3 強磁性絶縁体層 3 3 とを有する。量子ビット 1 は、更に、第 1 ゲート電極 4 1 と、第 2 ゲート電極 4 2 と、第 3 ゲート電極 4 3 と、第 1 超伝導量子干渉計 (superconducting quantum interference device : S Q U I D ) 6 1 と、第 2 S Q U I D 6 2 と、第 3 S Q U I D 6 3 とを有する。

10

【 0 0 1 3 】

基板 9 0 は、例えば表面のミラー指数が ( 1 0 0 ) の単結晶基板である。基板 9 0 の材料としては M g O 、マイカ、サファイア及び S i C が挙げられる。

【 0 0 1 4 】

s 波超伝導体層 1 0 は基板 9 0 の表面の一部に設けられている。s 波超伝導体層 1 0 は、例えば表面のミラー指数は ( 1 1 0 ) の N b 層である。s 波超伝導体層 1 0 の厚さは、例えば 1 0 0 n m ~ 2 0 0 n m 程度である。s 波超伝導体層 1 0 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。

【 0 0 1 5 】

高次トポロジカル絶縁体層 2 0 は s 波超伝導体層 1 0 上に設けられている。高次トポロジカル絶縁体層 2 0 は、例えば多層 W T e 2 である。例えば、多層 W T e 2 は、2 次元材料である W T e 2 を 5 層 ~ 1 0 0 層、好ましくは 1 0 層 ~ 5 0 層有する。単層の W T e 2 の厚さが 0 . 7 n m であるため、高次トポロジカル絶縁体層 2 0 が 1 4 層の W T e 2 を含む場合、高次トポロジカル絶縁体層 2 0 の厚さは約 1 0 n m である。

20

【 0 0 1 6 】

図 4 は、高次トポロジカル絶縁体層 2 0 を示す斜視図である。高次トポロジカル絶縁体層 2 0 の形状は略直方体である。高次トポロジカル絶縁体層 2 0 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 2 0 の上面のミラー指数は ( 0 0 1 ) であり、Y 2 側の側面のミラー指数は ( 1 0 0 ) であり、X 2 側の側面のミラー指数は ( 0 1 0 ) である。

30

【 0 0 1 7 】

高次トポロジカル絶縁体層 2 0 の表面に、平面視で T 字型の溝 5 0 が形成されている。溝 5 0 は、第 1 溝 5 1 と、第 2 溝 5 2 と、第 3 溝 5 3 とを有する。例えば、第 1 溝 5 1 、第 2 溝 5 2 及び第 3 溝 5 3 の幅は 2 0 n m であり、深さは 5 n m である。第 1 溝 5 1 及び第 3 溝 5 3 は X 1 - X 2 方向に平行に延び、第 2 溝 5 2 は Y 1 - Y 2 方向に平行に延びる。第 1 溝 5 1 は、高次トポロジカル絶縁体層 2 0 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 2 0 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 5 3 は、高次トポロジカル絶縁体層 2 0 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 2 0 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 5 1 及び第 3 溝 5 3 が一直線状に形成されている。第 2 溝 5 2 は、高次トポロジカル絶縁体層 2 0 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 2 0 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 5 2 は第 1 溝 5 1 及び第 3 溝 5 3 に直交する。

40

【 0 0 1 8 】

高次トポロジカル絶縁体層 2 0 は、第 1 溝 5 1 及び第 3 溝 5 3 より Y 2 側に第 1 領域 2 1 を有する。高次トポロジカル絶縁体層 2 0 は、第 1 溝 5 1 より Y 1 側かつ第 2 溝 5 2 より X 2 側に第 2 領域 2 2 を有する。高次トポロジカル絶縁体層 2 0 は、第 3 溝 5 3 より Y 1 側かつ第 2 溝 5 2 より X 1 側に第 3 領域 2 3 を有する。

50

## 【 0 0 1 9 】

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。

10

## 【 0 0 2 0 】

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。

20

## 【 0 0 2 1 】

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。

## 【 0 0 2 2 】

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。

30

## 【 0 0 2 3 】

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。

## 【 0 0 2 4 】

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。

40

## 【 0 0 2 5 】

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、 $\text{NbO}_x$ が挙げられ、上部超伝導体層61Dの

50

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。

10

【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。

20

【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。

30

【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。

40

【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】

50

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、 $NbO_x$  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 1 nm ~ 5 nm 程度であり、上部超伝導体層 63D の厚さは、例えば 100 nm ~ 200 nm 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 3 S Q U I D 6 3 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 3 S Q U I D 6 3 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。

10

#### 【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 1、2、3 及び 4 が発現する。例えば、マヨラナ粒子 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 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 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 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 1 ~ 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。

20

#### 【0036】

例えば、マヨラナ粒子 1 とマヨラナ粒子 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 1 及び 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 1 S Q U I D 6 1 により検出される。マヨラナ粒子 2 とマヨラナ粒子 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 2 及び 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 2 S Q U I D 6 2 により検出される。また、マヨラナ粒子 3 とマヨラナ粒子 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 3 及び 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 3 S Q U I D 6 3 により検出される。

30

#### 【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。

40

#### 【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。

50

## 【 0 0 4 0 】

まず、図 5 及び図 1 1 に示すように、基板 9 0 を準備し、大気圧の酸素雰囲気下で、約 1 2 0 0 °C で 3 時間 ~ 4 時間の基板 9 0 のアニール処理を行う。次いで、基板 9 0 をメタノールに 2 0 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 9 0 の表面の平坦性を向上することができる。図 1 1 は、図 5 中の XI-XI 線に沿った断面図に相当する。

## 【 0 0 4 1 】

その後、基板 9 0 上に s 波超伝導体層 1 9 を形成し、s 波超伝導体層 1 9 上に高次トポロジカル絶縁体層 2 9 を形成する。以下、s 波超伝導体層 1 9 として Nb 層を形成し、高次トポロジカル絶縁体層 2 9 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 1 9 及び高次トポロジカル絶縁体層 2 9 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 1 9 及び高次トポロジカル絶縁体層 2 9 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 1 9 及び高次トポロジカル絶縁体層 2 9 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 (波長 = 248 nm) 光源を用いることができる。なお、s 波超伝導体層 1 9 及び高次トポロジカル絶縁体層 2 9 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。

## 【 0 0 4 2 】

s 波超伝導体層 1 9 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 1 9 を形成する際には、例えば、基板 9 0 の温度を約 400 °C に保持し、レーザーエネルギー密度を  $2.0 \text{ J/cm}^2 \sim 5.0 \text{ J/cm}^2$ 、照射周波数を 10 Hz、基板 9 0 とターゲットとの間の距離を約 5 cm、成膜レートを  $0.5 \text{ nm/分} \sim 1.0 \text{ nm/分}$  とする。約 400 °C に保持された基板 9 0 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。

## 【 0 0 4 3 】

高次トポロジカル絶縁体層 2 9 として多層 WTe<sub>2</sub> を PLD 法により形成する場合、例えば、ターゲットには WTe<sub>2</sub> 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 2 9 を形成する際には、例えば、基板 9 0 の温度を 250 °C ~ 350 °C に保持し、レーザーエネルギー密度  $1.0 \text{ J/cm}^2 \sim 2.0 \text{ J/cm}^2$ 、照射周波数を 1 Hz、基板 9 0 とターゲットとの間の距離を約 5 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 2 9 (多層 WTe<sub>2</sub>) は s 波超伝導体層 1 9 (Nb 層) 上で c 軸方向に配向し、高次トポロジカル絶縁体層 2 9 の結晶構造は T<sub>d</sub> 構造 (空間群: Pmm2<sub>1</sub>) を示す。

## 【 0 0 4 4 】

なお、多層 WTe<sub>2</sub> を成膜の後に、約 300 °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 WTe<sub>2</sub> の結晶性が向上するためである。

## 【 0 0 4 5 】

高次トポロジカル絶縁体層 2 9 の形成後、図 6 及び図 1 2 に示すように、s 波超伝導体層 1 9 及び高次トポロジカル絶縁体層 2 9 を加工して、s 波超伝導体層 1 9 から、s 波超伝導体層 1 0、下部超伝導体層 6 1 A、下部超伝導体層 6 1 B、下部超伝導体層 6 2 A、下部超伝導体層 6 2 B、下部超伝導体層 6 3 A 及び下部超伝導体層 6 3 B を形成する。図 1 2 は、図 6 中の XII-XII 線に沿った断面図に相当する。

## 【 0 0 4 6 】

s 波超伝導体層 1 9 及び高次トポロジカル絶縁体層 2 9 の加工の際には、まず、高次トポロジカル絶縁体層 2 9 の上に第 1 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 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 1 9 の、s 波超伝導体層 1 0、下部超伝導体層 6 1 A、下部超伝導体層 6 1 B、下部超伝導体層 6 2 A、下部超伝導体層 6 2 B、下部超伝導体層 6 3 A 及び下部超伝導体層 6 3 B を形成する予定の部分を高次トポロジカル絶縁体層 2 9 の

10

20

30

40

50

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、Ar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。Ar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。

10

【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、Ar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。Ar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。

20

【0049】

高次トポロジカル絶縁体層29A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29Aを加工して、高次トポロジカル絶縁体層29A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】

30

高次トポロジカル絶縁体層29Aの加工の際には、まず、高次トポロジカル絶縁体層29A、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3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29A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 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3マスクパターンの形成後、Arイオンミリングにより高次トポロジカル絶縁体層29A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）。Ar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。

40

【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。

50

## 【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ンコートする。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Cr<sub>2</sub>Ga<sub>2</sub>Te<sub>6</sub>層及びAu層を形成する。

10

## 【0053】

Cr<sub>2</sub>Ga<sub>2</sub>Te<sub>6</sub>層をPLD法により形成する際には、例えば、基板90の温度を150～250に保持し、レーザエネルギー密度を1.0J/cm<sup>2</sup>～2.0J/cm<sup>2</sup>、照射周波数を1Hz、基板90とターゲットとの間の距離を約5cm、成膜レートを1.0nm/分～2.0nm/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1.0J/cm<sup>2</sup>～2.0J/cm<sup>2</sup>、照射周波数を5Hz、基板90とターゲットとの間の距離を約5cm、成膜レートを5.0nm/分～10.0nm/分とする。

20

## 【0055】

Cr<sub>2</sub>Ga<sub>2</sub>Te<sub>6</sub>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Cr<sub>2</sub>Ga<sub>2</sub>Te<sub>6</sub>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1、2、3及び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～63C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。

30

## 【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ンコートする。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。

40

## 【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】

50

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に收容され、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

22：第2領域

23：第3領域

31：第1強磁性絶縁体層

32：第2強磁性絶縁体層

33：第3強磁性絶縁体層

41：第1ゲート電極

42：第2ゲート電極

43：第3ゲート電極

50：溝

10

20

30

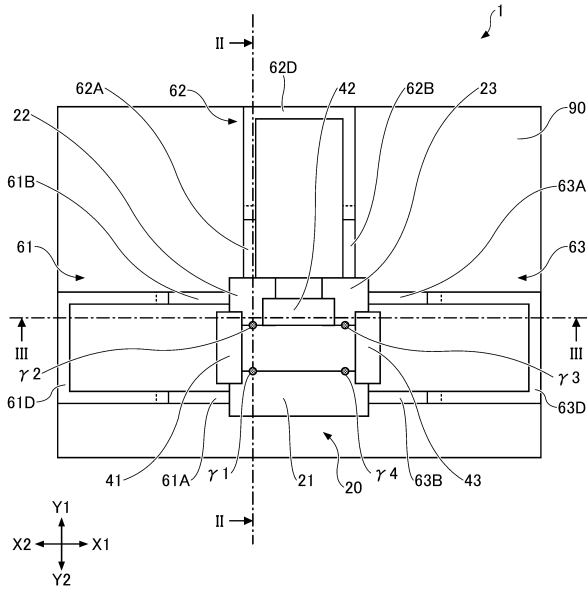
40

50

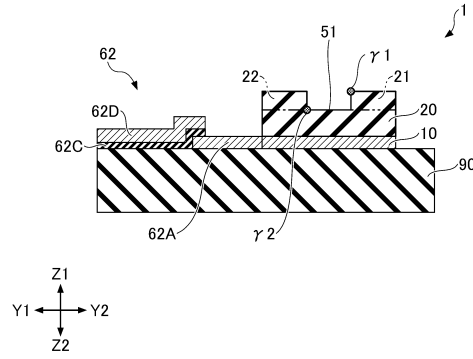
- 5 1 : 第 1 溝
- 5 2 : 第 2 溝
- 5 3 : 第 3 溝
- 6 1 : 第 1 S Q U I D
- 6 2 : 第 2 S Q U I D
- 6 3 : 第 3 S Q U I D

【 図 面 】

【 図 1 】



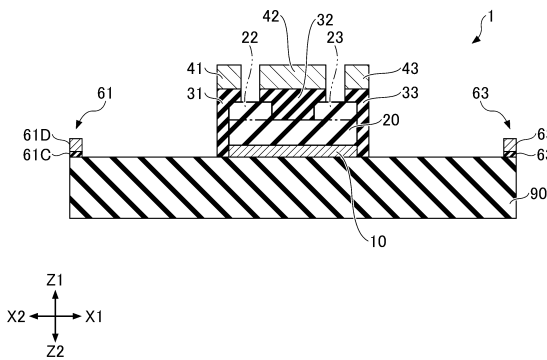
【 図 2 】



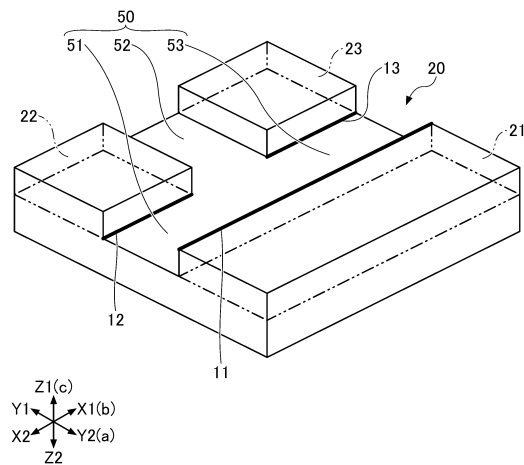
10

20

【 図 3 】



【 図 4 】

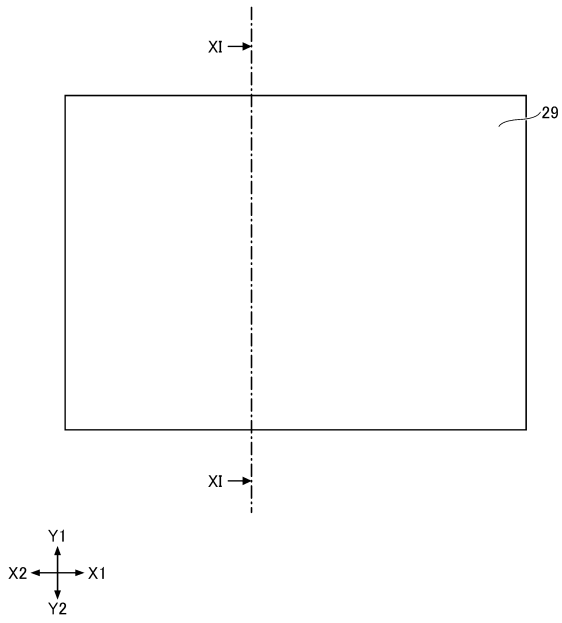


30

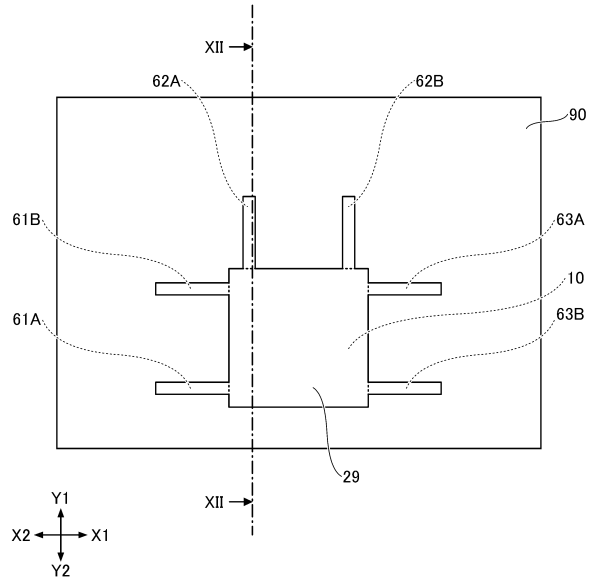
40

50

【 図 5 】



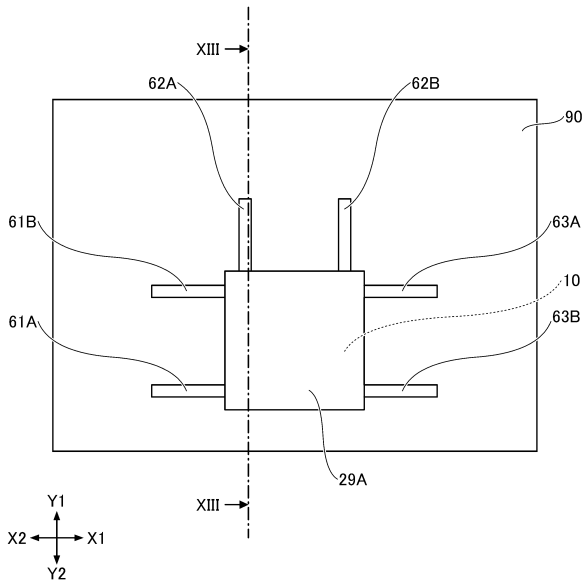
【 図 6 】



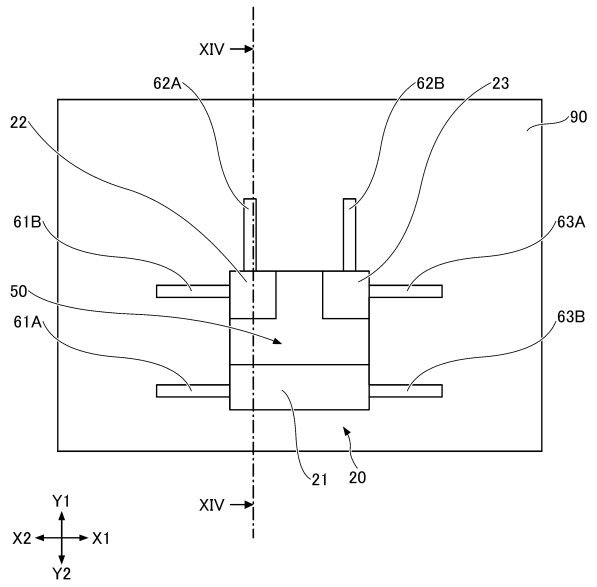
10

20

【 図 7 】



【 図 8 】



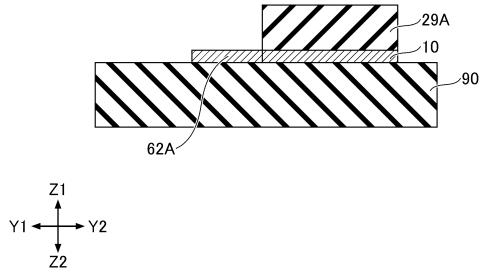
30

40

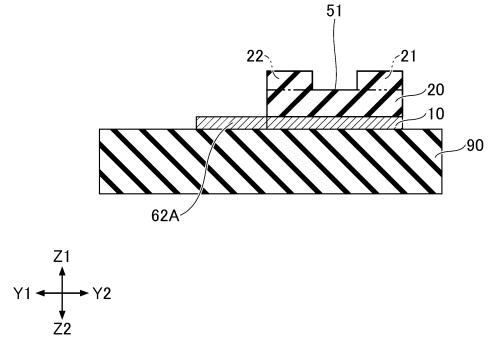
50



【図 13】

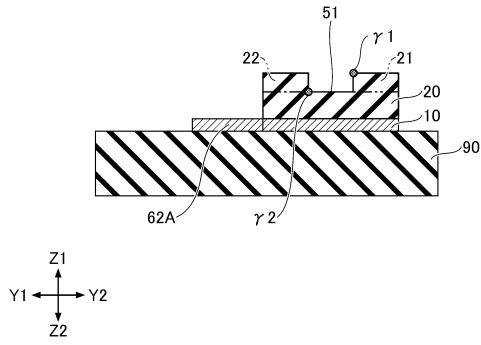


【図 14】

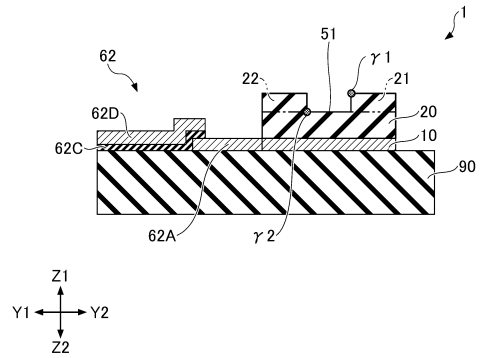


10

【図 15】



【図 16】



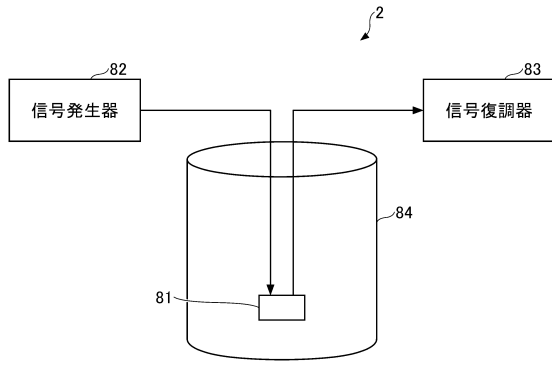
20

30

40

50

【図 17】



10

20

30

40

50

---

フロントページの続き

- (56)参考文献 特開 2 0 2 0 - 0 9 6 1 0 7 ( J P , A )  
特表 2 0 2 0 - 5 1 1 7 8 0 ( J P , A )  
FEI et.al. , Edge conduction in monolayer WTe<sub>2</sub> , Nature Physics , 英国 , Nature Publishing Group , 2017年04月10日 , Volume 13 , pp.677-682 , doi:10.1038/s41567-020-0816 \ x  
HSU et.al. , Majorana Kramers Pairs in Higher-Order Topological Insulators , PHYSICAL REVIEW LETTERS , 米国 , American Physical Society , 2018年11月06日 , Volume 121 , 196801-1 ~ 196801-8 , DOI:10.1103/PhysRevLett.121.196801
- (58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)  
H 1 0 N 6 0 / 1 2  
H 1 0 N 6 0 / 0 1