

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号  
特許第7540506号  
(P7540506)

(45)発行日 令和6年8月27日(2024.8.27)

(24)登録日 令和6年8月19日(2024.8.19)

|                        |               |       |
|------------------------|---------------|-------|
| (51)国際特許分類             | F I           |       |
| G 0 2 B 6/13 (2006.01) | G 0 2 B 6/13  |       |
| G 0 2 B 6/12 (2006.01) | G 0 2 B 6/12  | 3 7 1 |
| G 0 2 B 6/122(2006.01) | G 0 2 B 6/122 |       |
| G 0 2 F 3/00 (2006.01) | G 0 2 F 3/00  |       |

請求項の数 6 (全24頁)

|             |                             |          |                                               |
|-------------|-----------------------------|----------|-----------------------------------------------|
| (21)出願番号    | 特願2022-566521(P2022-566521) | (73)特許権者 | 000005223<br>富士通株式会社<br>神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 |
| (86)(22)出願日 | 令和2年12月1日(2020.12.1)        | (74)代理人  | 100107766<br>弁理士 伊東 忠重                        |
| (86)国際出願番号  | PCT/JP2020/044622           | (74)代理人  | 100070150<br>弁理士 伊東 忠彦                        |
| (87)国際公開番号  | WO2022/118366               | (72)発明者  | 宮武 哲也<br>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       |
| (87)国際公開日   | 令和4年6月9日(2022.6.9)          | 審査官      | 野口 晃一                                         |
| 審査請求日       | 令和5年5月25日(2023.5.25)        |          |                                               |

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 量子回路の製造方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

第1主面及び第2主面を有し、カラーセンターを含むダイヤモンド層中に、前記カラーセンターに光結合される光導波路を形成する工程を有し、

前記光導波路は、  
前記カラーセンターを含むコア領域と、  
前記コア領域の周囲に設けられた光閉じ込め領域と、  
を有し、  
前記光閉じ込め領域の屈折率は、前記コア領域の屈折率よりも低く、  
前記光導波路を形成する工程は、  
前記ダイヤモンド層に、前記カラーセンターから離れた傾斜面を備えた溝を形成する工程と、

前記傾斜面の上に反射膜を形成する工程と、  
前記反射膜の一部にフェムト秒レーザ光を照射し、前記反射膜により反射されたフェムト秒レーザ光を前記カラーセンターの前記第1主面側に集光させて前記ダイヤモンド層の一部の屈折率を低下させることで、前記カラーセンターの前記第1主面側に第1領域を形成する工程と、

前記反射膜の他の一部にフェムト秒レーザ光を照射し、前記反射膜により反射されたフェムト秒レーザ光を前記カラーセンターの前記第2主面側に集光させて前記ダイヤモンド層の他の一部の屈折率を低下させることで、前記カラーセンターの前記第2主面側に第2

領域を形成する工程と、

前記第 1 主面の一部にフェムト秒レーザ光を照射し、前記第 1 主面に平行な第 1 方向で前記コア領域の一方側にフェムト秒レーザ光を集光させて前記ダイヤモンド層の他の一部の屈折率を低下させることで、前記コア領域の前記一方側に第 3 領域を形成する工程と、

前記第 1 主面の他の一部にフェムト秒レーザ光を照射し、前記第 1 方向で前記コア領域の他方側にフェムト秒レーザ光を集光させて前記ダイヤモンド層の他の一部の屈折率を低下させることで、前記コア領域の前記他方側に第 4 領域を形成する工程と、

を有することを特徴とする量子回路の製造方法。

【請求項 2】

前記第 1 領域及び前記第 2 領域の前記第 1 方向の寸法は、前記第 1 主面に垂直な第 2 方向の寸法よりも大きく、

10

前記第 3 領域及び前記第 4 領域の前記第 2 方向の寸法は、前記第 1 方向の寸法よりも大きいことを特徴とする請求項 1 に記載の量子回路の製造方法。

【請求項 3】

前記カラーセンターは、窒素、ケイ素、ゲルマニウム、スズ、鉛又はホウ素と、空孔とから構成されることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の量子回路の製造方法。

【請求項 4】

前記ダイヤモンド層は、前記カラーセンターを複数含み、

複数の前記カラーセンターに対して、共通の前記反射膜を用いて前記第 1 領域及び前記第 2 領域を形成することを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載の量子回路の製造方法。

20

【請求項 5】

前記ダイヤモンド層は、前記カラーセンターを複数含み、

前記カラーセンター毎に異なる前記反射膜を用いて前記第 1 領域及び前記第 2 領域を形成することを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載の量子回路の製造方法。

【請求項 6】

複数の前記カラーセンターの間で、前記第 1 主面からの距離が相違していることを特徴とする請求項 4 又は 5 に記載の量子回路の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

30

【0001】

本開示は、量子回路の製造方法に関する。

【背景技術】

【0002】

ダイヤモンド層中のカラーセンターを用いた量子回路について検討が行われている。また、カラーセンターにおける発光の伝搬のためにダイヤモンド層中に光導波路を形成する技術についても検討が行われている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

40

【文献】米国特許第 9 1 5 7 8 5 9 号明細書

【文献】米国特許第 8 8 3 7 5 3 4 号明細書

【文献】特表 2 0 1 3 - 5 4 4 4 4 1 号公報

【非特許文献】

【0004】

【文献】Integrated waveguides and deterministically positioned nitrogen vacancy centers in diamond created by femtosecond laser writing, Optics Letters, 43(15), 3586-3589 (2018)

【文献】Diamond photonics platform enabled by femtosecond laser writing, Scientific Reports 6, 35566 (2016)

50

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0005】

しかしながら、従来の方法で形成された光導波路では、光信号の損失が大きくなってしまふ。

## 【0006】

本開示の目的は、光信号の損失を低減することができる量子回路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、第1主面及び第2主面を有し、カラーセンターを含むダイヤモンド層中に、前記カラーセンターに光結合される光導波路を形成する工程を有し、前記光導波路は、前記カラーセンターを含むコア領域と、前記コア領域の周囲に設けられた光閉じ込め領域と、を有し、前記光閉じ込め領域の屈折率は、前記コア領域の屈折率よりも低く、前記光導波路を形成する工程は、前記ダイヤモンド層に、前記カラーセンターから離れた傾斜面を形成する工程と、前記傾斜面の上に反射膜を形成する工程と、前記反射膜の一部にフェムト秒レーザ光を照射し、前記反射膜により反射されたフェムト秒レーザ光を前記カラーセンターの前記第1主面側に集光させて前記ダイヤモンド層の一部の屈折率を低下させることで、前記カラーセンターの前記第1主面側に第1領域を形成する工程と、前記反射膜の他の一部にフェムト秒レーザ光を照射し、前記反射膜により反射されたフェムト秒レーザ光を前記カラーセンターの前記第2主面側に集光させて前記ダイヤモンド層の他の一部の屈折率を低下させることで、前記カラーセンターの前記第2主面側に第2領域を形成する工程と、前記第1主面の一部にフェムト秒レーザ光を照射し、前記第1主面に平行な第1方向で前記コア領域の一方側にフェムト秒レーザ光を集光させて前記ダイヤモンド層の他の一部の屈折率を低下させることで、前記コア領域の前記一方側に第3領域を形成する工程と、前記第1主面の他の一部にフェムト秒レーザ光を照射し、前記第1方向で前記コア領域の他方側にフェムト秒レーザ光を集光させて前記ダイヤモンド層の他の一部の屈折率を低下させることで、前記コア領域の前記他方側に第4領域を形成する工程と、を有す量子回路の製造方法が提供される。

## 【発明の効果】

## 【0008】

本開示によれば、光信号の損失を低減することができる。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0009】

【図1】図1は、参考例に係る量子回路の製造方法を示す図（その1）である。

【図2】図2は、参考例に係る量子回路の製造方法を示す図（その2）である。

【図3】図3は、参考例に係る量子回路の製造方法を示す図（その3）である。

【図4】図4は、参考例に係る量子回路の製造方法を示す図（その4）である。

【図5】図5は、参考例に係る量子回路の製造方法を示す図（その5）である。

【図6】図6は、参考例に係る量子回路の製造方法を示す図（その6）である。

【図7】図7は、第1実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その1）である。

【図8】図8は、第1実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その2）である。

【図9】図9は、第1実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その3）である。

【図10】図10は、第1実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その4）である。

【図11】図11は、第1実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その5）である。

【図12】図12は、第1実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その6）である。

【図13】図13は、第1実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その7）である。

【図14】図14は、第1実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その8）である。

【図15】図15は、第1実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その9）である。

【図16】図16は、第1実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その10）であ

10

20

30

40

50

る。

【図 17】図 17 は、第 1 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その 11）である。

【図 18】図 18 は、第 1 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その 12）である。

【図 19】図 19 は、第 1 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その 13）である。

【図 20】図 20 は、カラーセンターを形成する方法を示す図（その 1）である。

【図 21】図 21 は、カラーセンターを形成する方法を示す図（その 2）である。

【図 22】図 22 は、第 2 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その 1）である。

10

【図 23】図 23 は、第 2 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その 2）である。

【図 24】図 24 は、第 2 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その 3）である。

【図 25】図 25 は、第 3 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その 1）である。

【図 26】図 26 は、第 3 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その 2）である。

【図 27】図 27 は、第 3 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その 3）である。

【図 28】図 28 は、第 3 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その 4）である。

【図 29】図 29 は、第 3 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その 5）である。

【図 30】図 30 は、第 3 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その 6）である。

【図 31】図 31 は、第 4 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その 1）である。

【図 32】図 32 は、第 4 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その 2）である。

20

【図 33】図 33 は、第 4 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その 3）である。

【図 34】図 34 は、第 4 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その 4）である。

【図 35】図 35 は、第 4 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その 5）である。

【図 36】図 36 は、第 4 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その 6）である。

【図 37】図 37 は、第 5 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その 1）である。

【図 38】図 38 は、第 5 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その 2）である。

【図 39】図 39 は、第 5 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その 3）である。

【図 40】図 40 は、第 5 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図（その 4）である。

【図 41】図 41 は、量子コンピュータを示す図である。

【発明を実施するための形態】

30

【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。

【0011】

（参考例）

まず、参考例について説明する。図 1～図 6 は、参考例に係る量子回路の製造方法を示す図である。

【0012】

参考例に係る量子回路の製造方法では、まず、図 1 に示すように、基材 20 の上に形成されたダイヤモンド層 10 を準備する。ダイヤモンド層 10 は、基材 20 側の第 2 主面 12 と、第 2 主面 12 とは反対側の第 1 主面 11 とを有し、カラーセンター 930 を含む。次いで、第 1 主面 11 の一部にフェムト秒レーザ光 L を照射し、第 1 主面 11 に平行な第 1 方向でカラーセンター 930 の一方側にフェムト秒レーザ光 L を集光させる。この結果、ダイヤモンド層 10 のフェムト秒レーザ光 L が集光した部分が変質し、変質領域 933 が形成される。変質に伴い、変質領域 933 の屈折率は周囲の屈折率よりも低くなる。

40

【0013】

その後、図 2 に示すように、第 1 主面 11 の他の一部にフェムト秒レーザ光 L を照射し、第 1 方向でカラーセンター 930 の他方側にフェムト秒レーザ光 L を集光させる。この結果、ダイヤモンド層 10 のフェムト秒レーザ光 L が集光した部分が変質し、変質領域 9

50

34が形成される。変質に伴い、変質領域934の屈折率は周囲の屈折率よりも低くなる。  
【0014】

なお、フェムト秒レーザー光Lの照射は、例えば、ライン状に走査しながら行われる。このため、図3に示すように、変質領域933及び934は、例えば、間にカラーセンター930を挟むようにしてライン状に形成される。変質領域933及び934の間の領域の屈折率は、変質領域933及び934の屈折率よりも高い。従って、変質領域933及び934は、変質領域933及び934の間の領域に対して光閉じ込め効果を奏する。つまり、変質領域933及び934の間のコア領域936と、変質領域933及び934を備えた光閉じ込め領域935とを有する光導波路937が形成される。図2は、図3中のII-II線に沿った断面図に相当する。

10

【0015】

このようにして、カラーセンター930に光結合される光導波路937を備えた量子回路を製造することができる。

【0016】

ただし、この参考例により形成された光導波路937では、第1方向で光を閉じ込めることは可能であるが、第1主面11に垂直な第2方向では光閉じ込め効果が得られない。

【0017】

第2方向でも光を閉じ込めるために、同様のフェムト秒レーザー光Lの照射を行うことで、図4及び図5に示すように、カラーセンター930の第1主面11側に変質領域931を形成し、カラーセンター930の第2主面12側に変質領域932を形成することも考えられる。図4は、図5中のIV-IV線に沿った断面図に相当する。

20

【0018】

しかしながら、変質領域931及び932は、光導波路937が延びる方向からの断面視で、照射方向である第2方向を長手方向とする形状を有し、変質領域931及び932の第1方向の寸法を大きくすることは困難である。このため、第2方向で十分な光閉じ込め効果を得ることができない。

【0019】

また、図6に示すように、ダイヤモンド層の端面にフェムト秒レーザー光Lを照射することも考えられる。しかしながら、端面への照射により形成できる変質領域938の位置には限界があり、カラーセンター930と端面との間の距離が大きい場合、所望の位置に変質領域を形成することができない。

30

【0020】

本願発明者は、このような参考例を踏まえながら鋭意検討を行った結果、下記の実施形態に想到した。

【0021】

(第1実施形態)

次に、第1実施形態について説明する。第1実施形態は、量子回路の製造方法に関する。図7～図19は、第1実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図である。図7、図9、図11、図13、図15、図17及び図19は断面図であり、図8、図10、図12、図14、図16及び図18は上面図である。第1実施形態では、カラーセンターを含むダイヤモンド層中に、カラーセンターに光結合される光導波路を形成する。

40

【0022】

第1実施形態では、まず、図7に示すように、基材20の上に形成されたダイヤモンド層10を準備する。基材20は、例えばSi又はSiO<sub>2</sub>から構成される。ダイヤモンド層10は、例えば単結晶ダイヤモンドから構成される。ダイヤモンド層10は、基材20側の第2主面12と、第2主面12とは反対側の第1主面11とを有し、カラーセンター30を含む。カラーセンター30は、例えば窒素と空孔とから構成された窒素-空孔センター(NVセンター)である。カラーセンター30が、ケイ素と空孔とから構成されたケイ素-空孔センター(SiVセンター)、ゲルマニウムと空孔とから構成されたゲルマニウム-空孔センター(GeVセンター)、スズと空孔とから構成されたスズ-空孔センタ

50

ー（SnVセンター）、鉛と空孔とから構成された鉛－空孔センター（PbVセンター）、又はホウ素と空孔とから構成されたホウ素－空孔センター（BVセンター）であってもよい。

#### 【0023】

次いで、図8及び図9に示すように、ダイヤモンド層10に、カラーセンター30から離れた溝38を形成する。溝38は、形成しようとする光導波路に沿って形成する。溝38は、例えば、第1主面11に対して傾斜した側面38Aと、第1主面11に垂直な側面38Bとを有する。側面38Bをカラーセンター30と側面38Aとの間に位置させる。側面38Aは、第1主面11側から視認でき、例えば第1主面11に対して40度～50度、好ましくは45度傾斜するように形成する。側面38Aは傾斜面の一例である。図9は、図8中のIX-IX線に沿った断面図に相当する。

10

#### 【0024】

その後、図10及び図11に示すように、側面38Aの上にフェムト秒レーザ光を反射する反射膜39を形成する。ここでは、側面38Aの一部の上に反射膜39を形成する。反射膜39は、形成しようとする光導波路に沿って形成する。反射膜39は、例えばAu、Al等の金属からなる膜である。反射膜39の厚さは特に限定されないが、例えば0.1μm～1.0μm程度である。反射膜39は、例えばリフトオフ法により形成することができる。図11は、図10中のXI-XI線に沿った断面図に相当する。

#### 【0025】

続いて、図12及び図13に示すように、反射膜39の一部にフェムト秒レーザ光Lを照射し、反射膜39により反射されたフェムト秒レーザ光Lをカラーセンター30の第1主面11側に集光させる。この結果、ダイヤモンド層10のフェムト秒レーザ光Lが集光した部分が変質し、変質領域31が形成される。ダイヤモンド層10の変質としては、例えばアモルファス化、カーボン化及びアブレーションが挙げられる。変質に伴い、変質領域31の屈折率は周囲の屈折率よりも低くなる。フェムト秒レーザ光Lの照射は、形成しようとする光導波路に沿って走査しながら行われ、変質領域31は、形成しようとする光導波路に沿って形成される。変質領域31は、断面視で、照射方向である第1方向を長手方向とする形状を有する。変質領域31は第1領域の一例である。図13は、図12中のXIII-XIII線に沿った断面図に相当する。

20

#### 【0026】

次いで、図14及び図15に示すように、反射膜39の他の一部にフェムト秒レーザ光Lを照射し、反射膜39により反射されたフェムト秒レーザ光Lをカラーセンター30の第2主面12側に集光させる。この結果、ダイヤモンド層10のフェムト秒レーザ光Lが集光した部分が変質し、変質領域32が形成される。変質に伴い、変質領域32の屈折率は周囲の屈折率よりも低くなる。フェムト秒レーザ光Lの照射は、形成しようとする光導波路に沿って走査しながら行われ、変質領域32は、形成しようとする光導波路に沿って形成される。変質領域32は、断面視で、照射方向である第1方向を長手方向とする形状を有する。変質領域32は第2領域の一例である。図15は、図14中のXV-XV線に沿った断面図に相当する。

30

#### 【0027】

その後、図16及び図17に示すように、第1主面11の一部にフェムト秒レーザ光Lを照射し、第1方向でカラーセンター30の一方側にフェムト秒レーザ光Lを集光させる。この結果、ダイヤモンド層10のフェムト秒レーザ光Lが集光した部分が変質し、変質領域33が形成される。変質に伴い、変質領域33の屈折率は周囲の屈折率よりも低くなる。フェムト秒レーザ光Lの照射は、形成しようとする光導波路に沿って走査しながら行われ、変質領域33は、形成しようとする光導波路に沿って形成される。変質領域33は、断面視で、照射方向である第2方向を長手方向とする形状を有する。変質領域33は第3領域の一例である。図17は、図16中のXVII-XVII線に沿った断面図に相当する。

40

#### 【0028】

続いて、図18及び図19に示すように、第1主面11の他の一部にフェムト秒レーザ

50

光Lを照射し、第1方向でカラーセンター30の他方側にフェムト秒レーザ光Lを集光させる。この結果、ダイヤモンド層10のフェムト秒レーザ光Lが集光した部分に変質し、変質領域34が形成される。変質に伴い、変質領域34の屈折率は周囲の屈折率よりも低くなる。フェムト秒レーザ光Lの照射は、形成しようとする光導波路に沿って走査しながら行われ、変質領域34は、形成しようとする光導波路に沿って形成される。変質領域34は、断面視で、照射方向である第2方向を長手方向とする形状を有する。変質領域34は第4領域の一例である。図19は、図18中のXIX-XIX線に沿った断面図に相当する。

【0029】

変質領域31～34を形成する際のフェムト秒レーザ光Lの照射条件の一例は次の通りである。すなわち、波長は800nmであり、パルス幅は50fs～100fsであり、パルスエネルギーは50nJ～1000nJであり、繰り返し周波数は250kHz～500kHzである。

【0030】

上述のように、フェムト秒レーザ光Lの照射は、走査しながら行われる。このため、図19に示すように、変質領域31～34は、例えば、断面視でカラーセンター30を囲むようにしてライン状に形成される。変質領域31～34に囲まれた領域の屈折率は、変質領域31～34の屈折率よりも高い。従って、変質領域31～34は、変質領域31～34に囲まれた領域に対して光閉じ込め効果を奏する。つまり、変質領域31～34に囲まれたコア領域36と、変質領域31～34を備えた光閉じ込め領域35とを有する光導波路37が形成される。

【0031】

このようにして、カラーセンター30に光結合される光導波路37を備えた量子回路1を製造することができる。

【0032】

なお、変質領域31～34の形成順序は特に限定されない。例えば、変質領域33及び34を形成した後に、変質領域31及び32を形成してもよい。

【0033】

量子回路1においては、変質領域31及び32が断面視で第1方向を長手方向とする形状を有し、変質領域33及び34が断面視で第2方向を長手方向とする形状を有する。つまり、変質領域31及び32の第1方向の寸法は第2方向の寸法よりも大きく、変質領域33及び34の第2方向の寸法は第1方向の寸法よりも大きい。従って、変質領域31及び32によってコア領域36内の光を第2方向に閉じ込めることができ、変質領域33及び34によってコア領域36内の光を第1方向に閉じ込めることができる。このため、カラーセンター30からの発光を高効率に光導波路37に結合させ、光導波路37を通じて伝搬する光信号の損失を低減することができる。

【0034】

また、量子回路1の製造にあたっては、側面38Aを備えた溝38を形成し、側面38Aの上に反射膜39を形成しているため、反射膜39を介して所望の位置に第1方向からフェムト秒レーザ光Lを集光させることができる。

【0035】

カラーセンター30は、意図的に形成してもよい。図20～図21は、カラーセンター30を形成する方法を示す図である。図20及び図21は断面図である。図20に示すように、ダイヤモンド層10に単発のフェムト秒レーザ光Lを集光することにより、空孔30Xを形成する。次いで、窒素雰囲気中でアニールを行い、図21に示すように、空孔30Xと窒素原子とが対になったNVセンターをカラーセンター30として形成する。アニールの条件の一例は次の通りである。すなわち、温度は1000℃であり、時間は3時間である。

【0036】

(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、主に反射膜の配置の点で第1

10

20

30

40

50

実施形態と相違する。図 22～図 24 は、第 2 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図である。図 22 は上面図であり、図 23 及び図 24 は断面図である。

【0037】

第 2 実施形態では、まず、第 1 実施形態と同様にして、溝 38 の形成までの処理を行う（図 8 及び図 9 参照）。次いで、図 22 及び図 23 に示すように、側面 38A の上と、溝 38 の底に露出する基材 20 の表面の上と、側面 38A に繋がる第 1 主面 11 の上とに反射膜 39 を形成する。

【0038】

その後、図 24 に示すように、第 1 実施形態と同様にして、変質領域 31～34 を形成する。

【0039】

このようにして、カラーセンター 30 に光結合される光導波路 37 を備えた量子回路 2 を製造することができる。

【0040】

第 2 実施形態によっても第 1 実施形態と同様の効果を得ることができる。また、反射膜 39 を溝 38 の底に露出する基材 20 の表面の上と、側面 38A に繋がる第 1 主面 11 の上とにも形成しているため、ダイヤモンド層 10 の厚さ方向で変質領域 31 及び 32 を形成することができる範囲を拡大することができる。

【0041】

（第 3 実施形態）

次に、第 3 実施形態について説明する。第 3 実施形態は、主にカラーセンター及び光導波路の数の点で第 1 実施形態と相違する。図 25～図 30 は、第 3 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図である。図 25、図 27、図 29 及び図 30 は断面図であり、図 26 及び図 28 は上面図である。第 3 実施形態では、2 つのカラーセンターを含むダイヤモンド層中に、カラーセンターに個別に光結合される 2 つの光導波路を形成する。

【0042】

第 3 実施形態では、まず、図 25 に示すように、基材 20 の上に形成され、第 1 方向で離れて形成されたカラーセンター 30 及び 40 を含むダイヤモンド層 10 を準備する。カラーセンター 40 は、カラーセンター 30 と同様に、例えば、NV センター、SiV センター、GeV センター、SnV センター、PbV センター又は BV センターである。

【0043】

次いで、図 26 及び図 27 に示すように、ダイヤモンド層 10 に、カラーセンター 30 から離れた溝 38 及びカラーセンター 40 から離れた溝 48 を形成する。溝 38 及び 48 は、形成しようとする光導波路に沿って形成する。例えば、溝 38 及び 48 は、第 1 方向でカラーセンター 30 とカラーセンター 40 との間に形成し、溝 38 は溝 48 よりもカラーセンター 30 側に形成し、溝 48 は溝 38 よりもカラーセンター 40 側に形成する。溝 48 は、例えば、第 1 主面 11 に対して傾斜した側面 48A と、第 1 主面 11 に垂直な側面 48B とを有する。側面 48B をカラーセンター 40 と側面 48A との間に位置させる。側面 48A は、第 1 主面 11 側から視認でき、例えば第 1 主面 11 に対して 40 度～50 度、好ましくは 45 度傾斜するように形成する。側面 48A は傾斜面の一例である。図 27 は、図 26 中の XXVII-XXVII 線に沿った断面図に相当する。

【0044】

その後、図 28 及び図 29 に示すように、側面 38A の上と、側面 48A の上と、側面 38A 及び側面 48A に繋がる第 1 主面 11 の上とにフェムト秒レーザー光を反射する反射膜 49 を形成する。反射膜 49 は、形成しようとする光導波路に沿って形成する。反射膜 49 は、例えば Au、Al 等の金属からなる膜である。反射膜 49 の厚さは特に限定されないが、例えば 0.1  $\mu\text{m}$ ～1.0  $\mu\text{m}$  程度である。反射膜 49 は、例えばリフトオフ法により形成することができる。図 29 は、図 28 中の XXIX-XXIX 線に沿った断面図に相当する。

【0045】

10

20

30

40

50



続いて、図 30 に示すように、第 1 実施形態と同様にして、変質領域 31～34 を形成する。また、それぞれ変質領域 31～34 の形成と同様の要領により、変質領域 41～44 を形成する。変質領域 41～44 は、例えば、断面視でカラーセンター 40 を囲むようにしてライン状に形成される。変質領域 41～44 に囲まれた領域の屈折率は、変質領域 41～44 の屈折率よりも高い。従って、変質領域 41～44 は、変質領域 41～44 に囲まれた領域に対して光閉じ込め効果を奏する。つまり、変質領域 41～44 に囲まれたコア領域 46 と、変質領域 41～44 を備えた光閉じ込め領域 45 とを有する光導波路 47 が形成される。

【0046】

このようにして、カラーセンター 30 に光結合される光導波路 37 と、カラーセンター 40 に光結合される光導波路 47 とを備えた量子回路 3 を製造することができる。

10

【0047】

なお、変質領域 31～34 及び 41～44 の形成順序は特に限定されない。

【0048】

第 3 実施形態によっても第 1 実施形態と同様の効果を得ることができる。また、光導波路 47 を通じて伝搬する光信号の損失も低減することができる。更に、量子回路 3 に含まれる量子ビットの数を増加させやすい。

【0049】

また、量子回路 3 の製造にあたっては、溝 38 と溝 48 とを同時に形成することができる。また、反射膜を側面 38A、48A の上に個別に形成してもよく、この場合でも、側面 38A の上と、側面 48A の上とに同時に反射膜を形成することができる。

20

【0050】

(第 4 実施形態)

次に、第 4 実施形態について説明する。第 4 実施形態は、主に溝及び反射膜の配置の点で第 3 実施形態と相違する。図 31～図 36 は、第 4 実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図である。図 31、図 33、図 35 及び図 36 は断面図であり、図 32 及び図 34 は上面図である。第 4 実施形態では、第 3 実施形態と同様に、2 つのカラーセンターを含むダイヤモンド層中に、カラーセンターに個別に光結合される 2 つの光導波路を形成する。

【0051】

第 4 実施形態では、まず、図 31 に示すように、基材 20 の上に形成され、第 1 方向で離れて形成されたカラーセンター 30 及び 50 を含むダイヤモンド層 10 を準備する。カラーセンター 50 は、カラーセンター 30 と同様に、例えば、NV センター、SiV センター、GeV センター、SnV センター、PbV センター又は BV センターである。

30

【0052】

次いで、図 32 及び図 33 に示すように、ダイヤモンド層 10 に、カラーセンター 30 から離れた溝 38 と、カラーセンター 50 から離れた溝 58 とを形成する。溝 38 及び 58 は、形成しようとする光導波路に沿って形成する。例えば、溝 38 は、第 1 方向でカラーセンター 30 とカラーセンター 50 との間に形成し、溝 58 は、カラーセンター 50 よりも溝 38 から離れるように形成する。溝 58 は、例えば、第 1 主面 11 に対して傾斜した側面 58A と、第 1 主面 11 に垂直な側面 58B とを有する。側面 58B をカラーセンター 50 と側面 58A との間に位置させる。側面 58A は、第 1 主面 11 側から視認でき、例えば第 1 主面 11 に対して 40 度～50 度、好ましくは 45 度傾斜するように形成する。側面 58A は傾斜面の一例である。図 33 は、図 32 中の XXXIII-XXXIII 線に沿った断面図に相当する。

40

【0053】

その後、図 34 及び図 35 に示すように、側面 38A の上にフェムト秒レーザー光を反射する反射膜 39 を形成し、側面 58A の上にフェムト秒レーザー光を反射する反射膜 59 を形成する。ここでは、例えば、側面 38A の一部の上に反射膜 39 を形成し、側面 58A の一部の上に反射膜 59 を形成する。反射膜 39 及び 59 は、形成しようとする光導波路に沿って形成する。反射膜 59 は、例えば Au、Al 等の金属からなる膜である。反射膜

50

59の厚さは特に限定されないが、例えば $0.1\mu\text{m}\sim 1.0\mu\text{m}$ 程度である。反射膜59は、例えばリフトオフ法により形成することができる。反射膜39及び59は同時に形成することができる。図35は、図34中のXXXV-XXXV線に沿った断面図に相当する。

【0054】

続いて、図36に示すように、第1実施形態と同様にして、変質領域31～34を形成する。また、それぞれ変質領域31～34の形成と同様の要領により、変質領域51～54を形成する。変質領域51～54は、例えば、断面視でカラーセンター50を囲むようにしてライン状に形成される。変質領域51～54に囲まれた領域の屈折率は、変質領域51～54の屈折率よりも高い。従って、変質領域51～54は、変質領域51～54に囲まれた領域に対して光閉じ込め効果を奏する。つまり、変質領域51～54に囲まれたコア領域56と、変質領域51～54を備えた光閉じ込め領域55とを有する光導波路57が形成される。

10

【0055】

このようにして、カラーセンター30に光結合される光導波路37と、カラーセンター50に光結合される光導波路57とを備えた量子回路4を製造することができる。

【0056】

なお、変質領域31～34及び51～54の形成順序は特に限定されない。

【0057】

第4実施形態によっても第1実施形態と同様の効果を得ることができる。また、光導波路57を通じて伝搬する光信号の損失も低減することができる。更に、量子回路4に含まれる量子ビットの数を増加させやすい。

20

【0058】

また、量子回路4の製造にあたっては、溝38と溝58とを同時に形成することができ、反射膜39と反射膜59とを同時に形成することができる。

【0059】

(第5実施形態)

次に、第5実施形態について説明する。第5実施形態は、主にカラーセンター及び光導波路の数の点で第1実施形態と相違する。図37～図40は、第5実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図である。図37～図40は断面図である。第5実施形態に係る量子回路の製造方法を示す図である。第5実施形態では、4つのカラーセンターを含むダイヤモンド層中に、カラーセンターに個別に光結合される4つの光導波路を形成する。

30

【0060】

第5実施形態では、まず、図37に示すように、基材20の上に形成され、第1方向で離れて形成されたカラーセンター30、60、70及び80を含むダイヤモンド層10を準備する。カラーセンター60、70及び80は、カラーセンター30と同様に、例えば、NVセンター、SiVセンター、GeVセンター、SnVセンター、PbVセンター又はBVセンターである。ここでは、第1方向で、カラーセンター30とカラーセンター60とが互いに近く位置し、カラーセンター70とカラーセンター80とが互いに近く位置することとする。

【0061】

次いで、図38に示すように、ダイヤモンド層10に、カラーセンター30及び60から離れた溝68と、カラーセンター70及び80から離れた溝78とを形成する。溝68及び78は、形成しようとする光導波路に沿って形成する。例えば、溝68は、第1方向でカラーセンター30及び60とカラーセンター70及び80との間に形成し、溝78は、カラーセンター70及び80よりも溝68から離れるように形成する。溝68は、例えば、第1主面11に対して傾斜した側面68Aと、第1主面11に垂直な側面68Bとを有する。側面68Bをカラーセンター30及び60と側面68Aとの間に位置させる。側面68Aは、第1主面11側から視認でき、例えば第1主面11に対して40度～50度、好ましくは45度傾斜するように形成する。溝78は、例えば、第1主面11に対して傾斜した側面78Aと、第1主面11に垂直な側面78Bとを有する。側面78Bをカラ

40

50

ーセンター 70 及び 80 と側面 78A との間に位置させる。側面 78A は、第 1 主面 11 側から視認でき、例えば第 1 主面 11 に対して 40 度～50 度、好ましくは 45 度傾斜するように形成する。側面 68A 及び 78A は傾斜面の一例である。

#### 【0062】

その後、図 39 に示すように、側面 68A の上にフェムト秒レーザ光を反射する反射膜 69 を形成し、側面 78A の上にフェムト秒レーザ光を反射する反射膜 79 を形成する。ここでは、例えば、側面 68A の一部の上に反射膜 69 を形成し、側面 78A の一部の上に反射膜 79 を形成する。反射膜 69 及び 79 は、形成しようとする光導波路に沿って形成する。反射膜 69 及び 79 は、例えば Au、Al 等の金属からなる膜である。反射膜 69 及び 79 の厚さは特に限定されないが、例えば 0.1  $\mu\text{m}$ ～1.0  $\mu\text{m}$  程度である。反射膜 69 及び 79 は、例えばリフトオフ法により形成することができる。反射膜 69 及び 79 は同時に形成することができる。

10

#### 【0063】

続いて、図 40 に示すように、第 1 実施形態と同様にして、変質領域 31～34 を形成する。また、それぞれ変質領域 31～34 の形成と同様の要領により、変質領域 61～64 と、変質領域 71～74 と、変質領域 81～84 とを形成する。変質領域 61～64 は、例えば、断面視でカラーセンター 60 を囲むようにしてライン状に形成される。変質領域 71～74 は、例えば、断面視でカラーセンター 70 を囲むようにしてライン状に形成される。変質領域 81～84 は、例えば、断面視でカラーセンター 80 を囲むようにしてライン状に形成される。

20

#### 【0064】

変質領域 61～64 に囲まれた領域の屈折率は、変質領域 61～64 の屈折率よりも高い。従って、変質領域 61～64 は、変質領域 61～64 に囲まれた領域に対して光閉じ込め効果を奏する。つまり、変質領域 61～64 に囲まれたコア領域 66 と、変質領域 61～64 を備えた光閉じ込め領域 65 とを有する光導波路 67 が形成される。

#### 【0065】

変質領域 71～74 に囲まれた領域の屈折率は、変質領域 71～74 の屈折率よりも高い。従って、変質領域 71～74 は、変質領域 71～74 に囲まれた領域に対して光閉じ込め効果を奏する。つまり、変質領域 71～74 に囲まれたコア領域 76 と、変質領域 71～74 を備えた光閉じ込め領域 75 とを有する光導波路 77 が形成される。

30

#### 【0066】

変質領域 81～84 に囲まれた領域の屈折率は、変質領域 81～84 の屈折率よりも高い。従って、変質領域 81～84 は、変質領域 81～84 に囲まれた領域に対して光閉じ込め効果を奏する。つまり、変質領域 81～84 に囲まれたコア領域 86 と、変質領域 81～84 を備えた光閉じ込め領域 85 とを有する光導波路 87 が形成される。

#### 【0067】

このようにして、カラーセンター 30 に光結合される光導波路 37 と、カラーセンター 60 に光結合される光導波路 67 と、カラーセンター 70 に光結合される光導波路 77 と、カラーセンター 80 に光結合される光導波路 87 と、を備えた量子回路 5 を製造することができる。

40

#### 【0068】

なお、変質領域 61～64、71～74 及び 81～84 の形成順序は特に限定されない。

#### 【0069】

第 5 実施形態によっても第 1 実施形態と同様の効果を得ることができる。また、光導波路 67、77、87 を通じて伝搬する光信号の損失も低減することができる。更に、量子回路 5 に含まれる量子ビットの数を増加させやすい。

#### 【0070】

第 3～第 5 実施形態において、カラーセンター 40、50、60、70 及び 80 を、図 20～図 21 に示す方法で所望の位置に形成してもよい。

#### 【0071】

50

各実施形態において、反射膜を目印として用いて、光導波路に結合する光検出器の位置合わせを行うことができる。特に、光導波路が延びる方向において、光導波路の終端の位置と反射膜の終端の位置とを一致させておくことで、光検出器を光導波路に高効率で結合させやすい。

【0072】

本開示の量子回路に含まれるカラーセンター及び光導波路の数は限定されない。

【0073】

図41に示すように、これら実施形態に係る量子回路1、2、3、4、5は、例えば、量子回路101として、量子コンピュータ100に内蔵させて用いることができる。

【0074】

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】

【0075】

1、2、3、4、5：量子回路

10：ダイヤモンド層

11：第1主面

12：第2主面

20：基材

30、40、50、60、70、80：カラーセンター

31～34、41～44、51～54、61～64、71～74、81～84：変質領域

35、45、55、65、75、85：光閉じ込め領域

36、46、56、66、76、86：コア領域

37、47、57、67、77、87：光導波路

38、48、58、68、78：溝

38A、48A、58A、68A、78A：側面

39、49、59、69、79：反射膜

100：量子コンピュータ

10

20

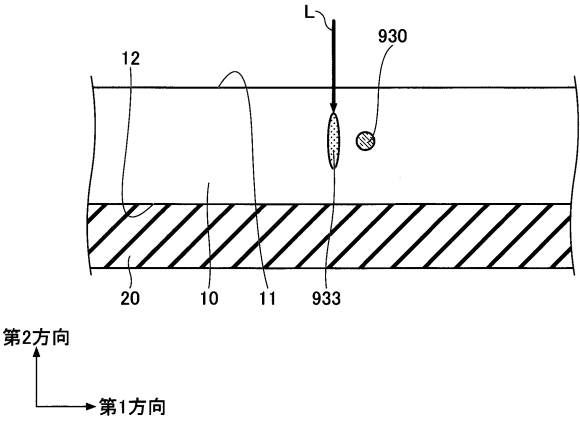
30

40

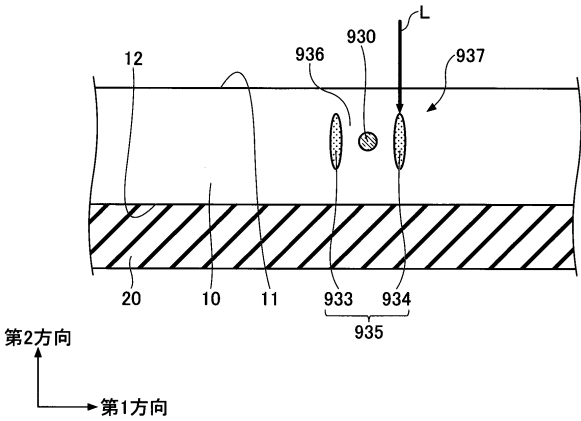
50

【図面】

【図 1】

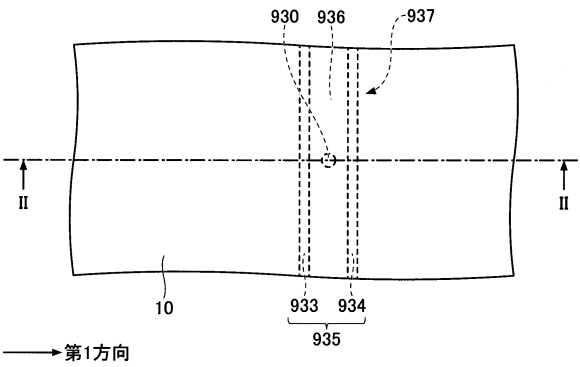


【図 2】

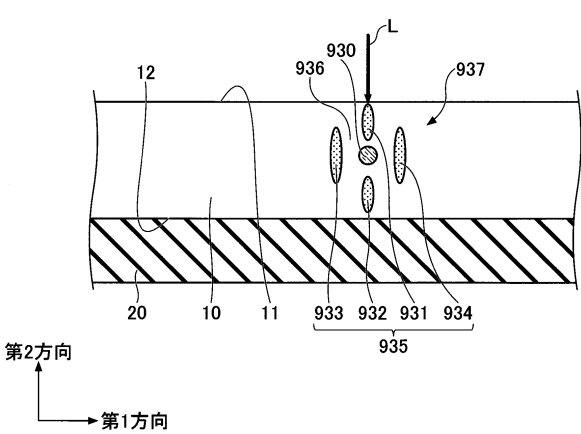


10

【図 3】



【図 4】



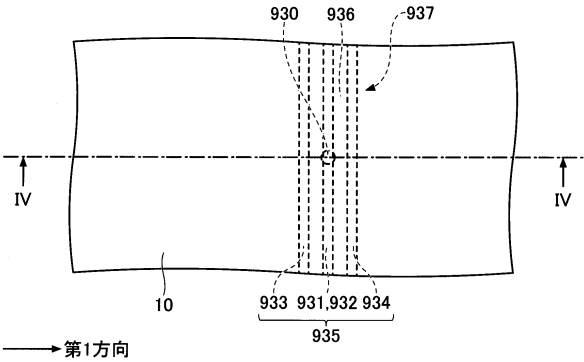
20

30

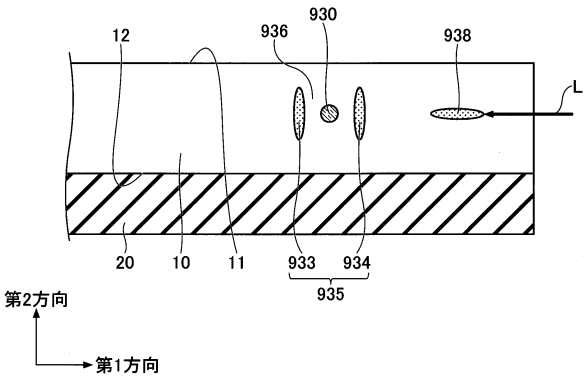
40

50

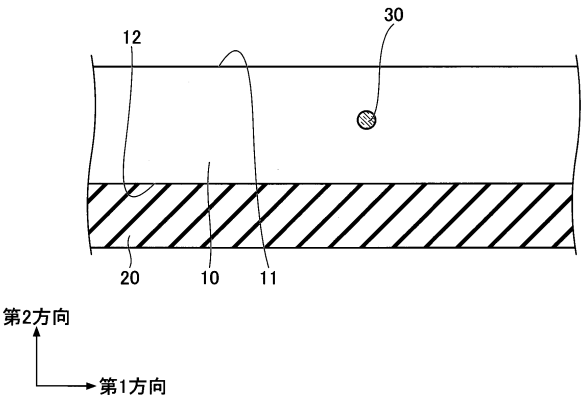
【図 5】



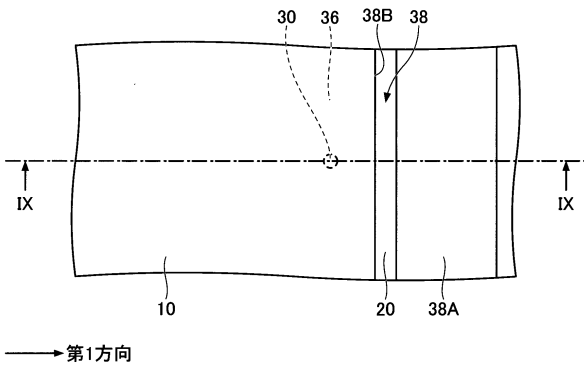
【図 6】



【図 7】



【図 8】



10

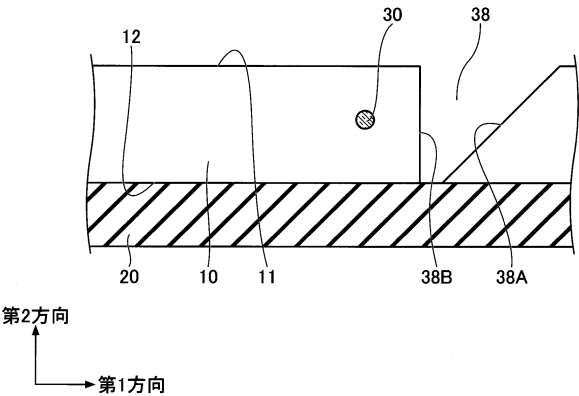
20

30

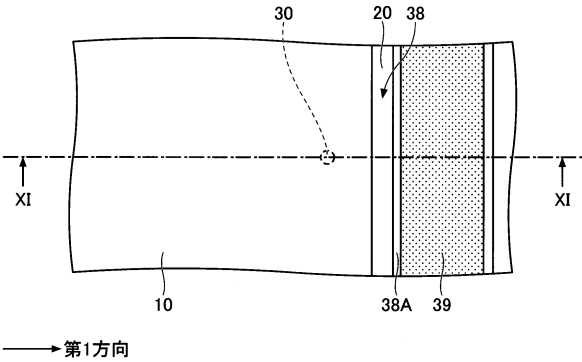
40

50

【図 9】

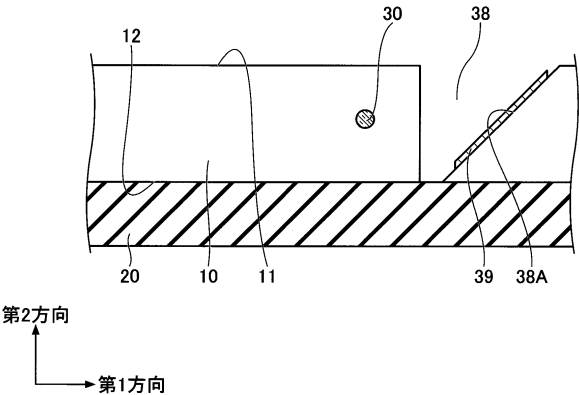


【図 1 0】

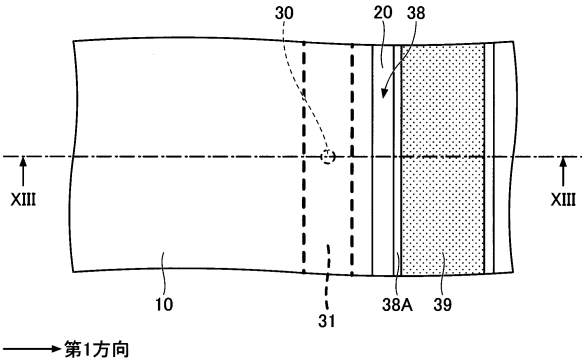


10

【図 1 1】



【図 1 2】



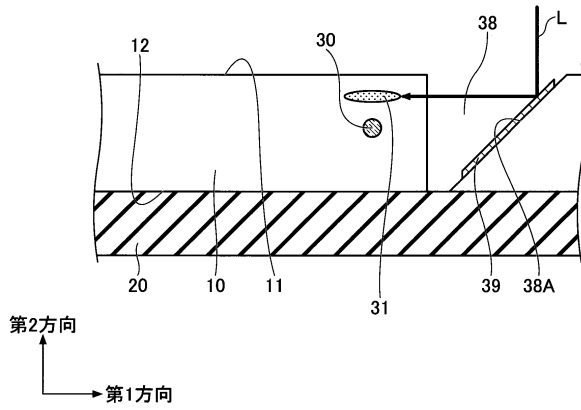
20

30

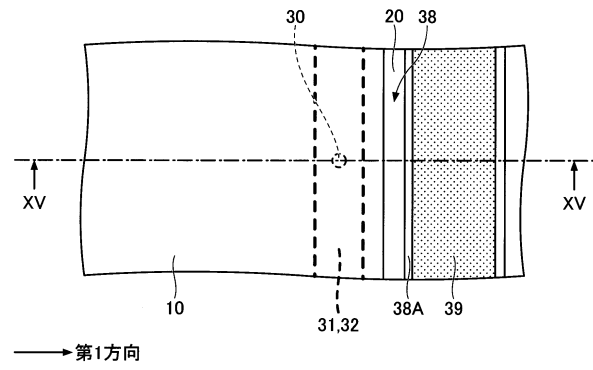
40

50

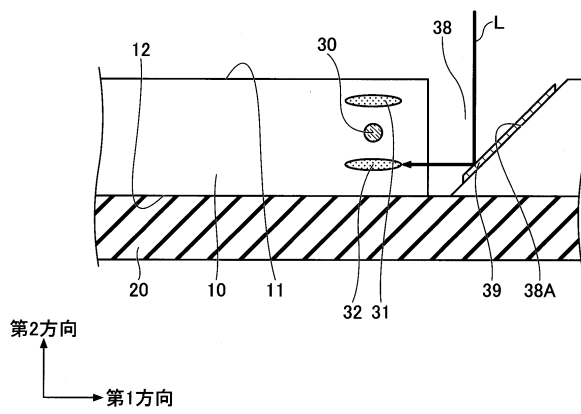
【図 13】



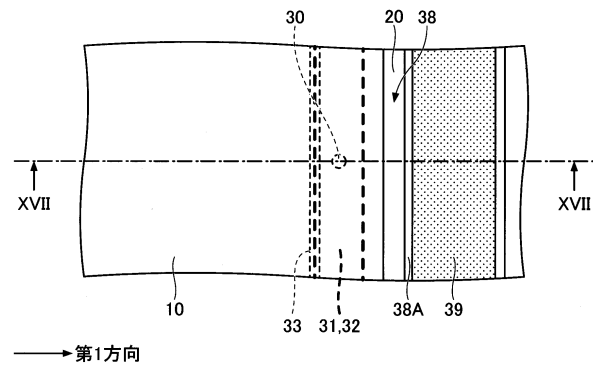
【図 14】



【図 15】

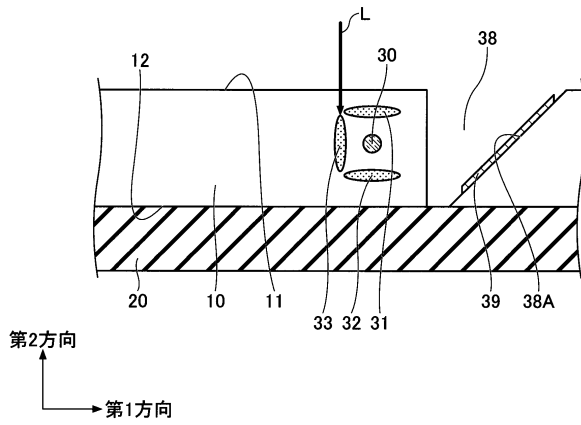


【図 16】

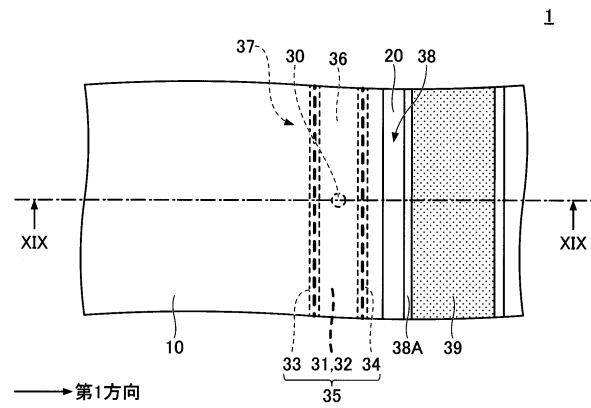




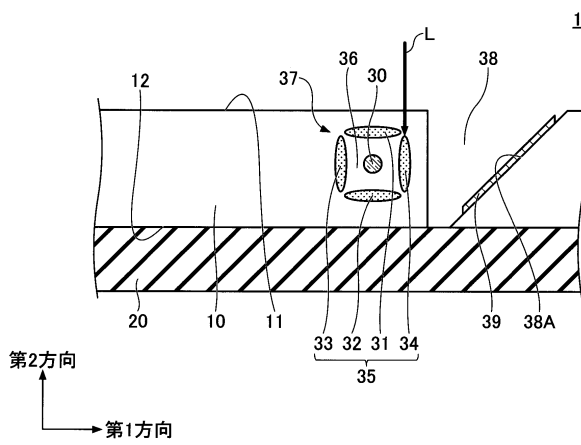
【図 17】



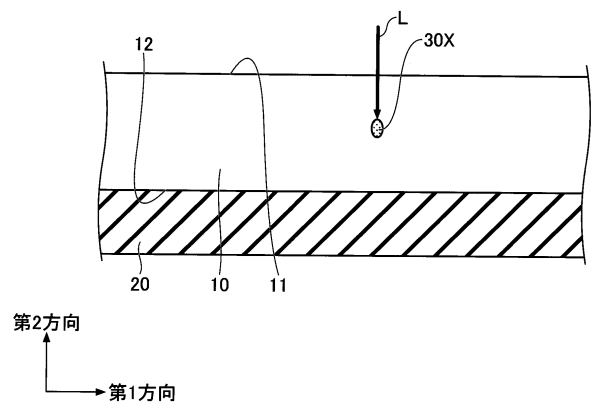
【図 18】



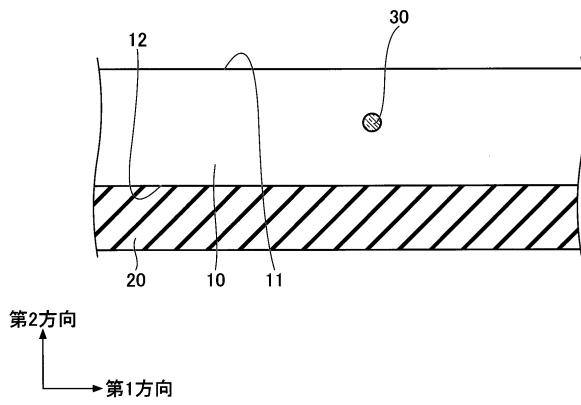
【図 19】



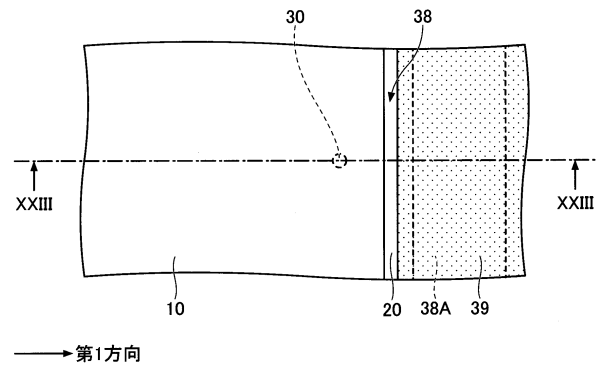
【図 20】



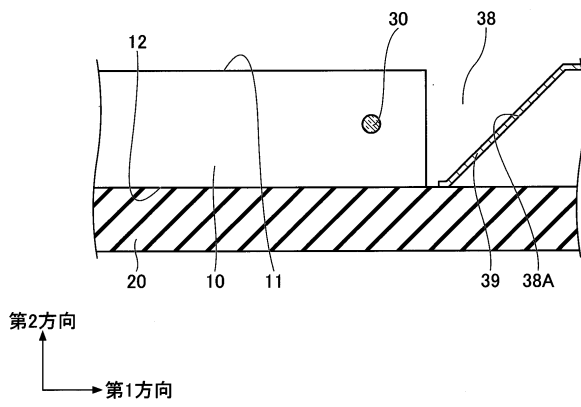
【図 2 1】



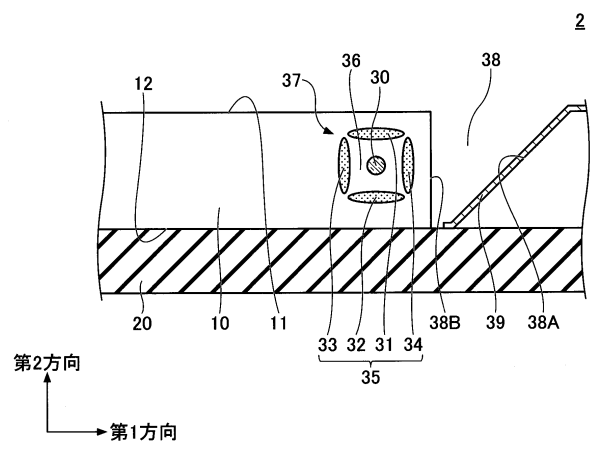
【図 22】



【圖 23】

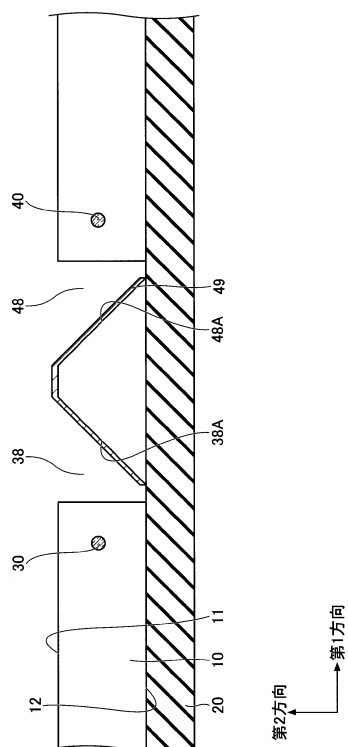


【図 24】

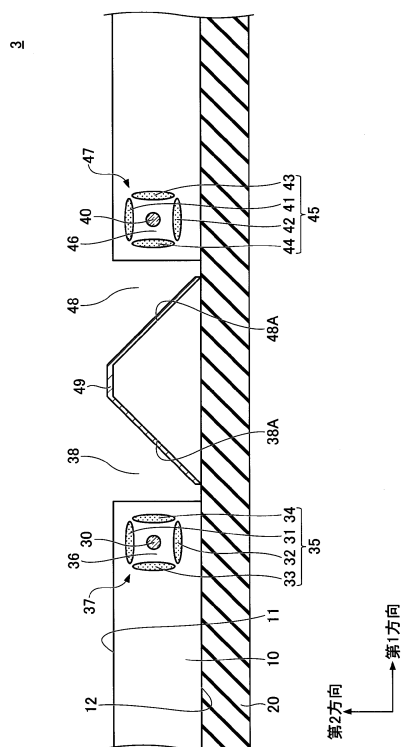




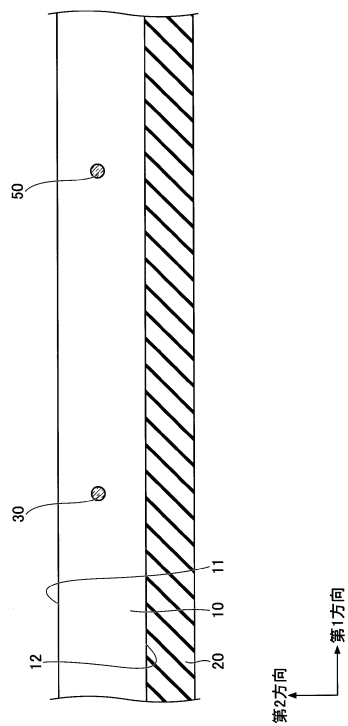
【図 29】



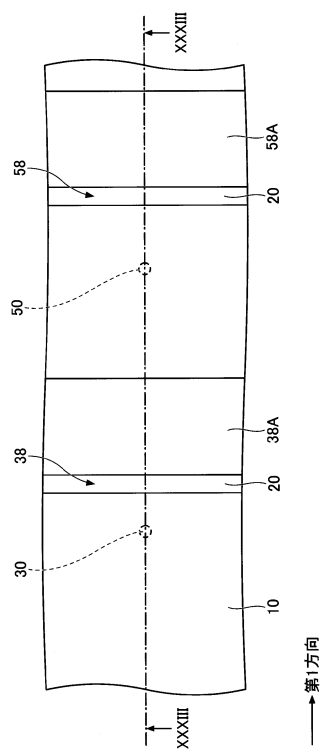
【図 30】



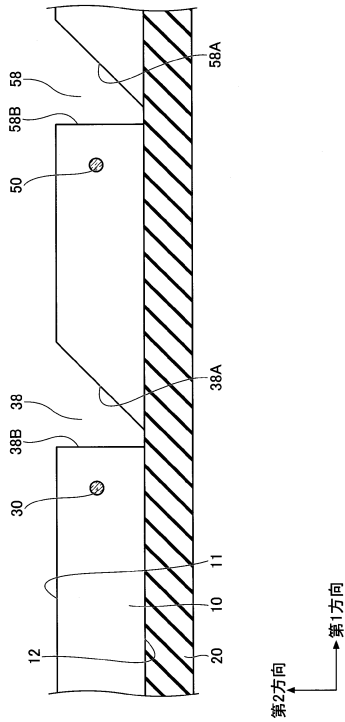
【図 3 1】



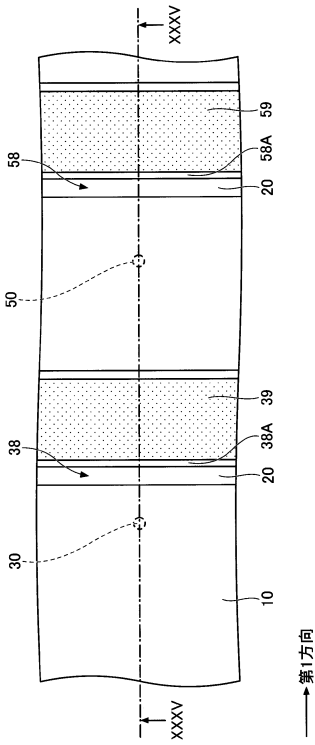
【図 3 2】



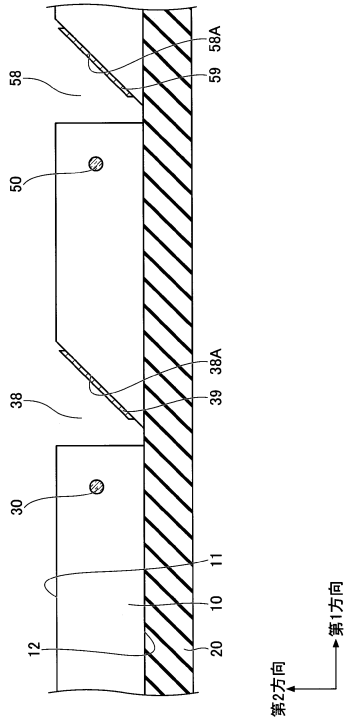
【図 3 3】



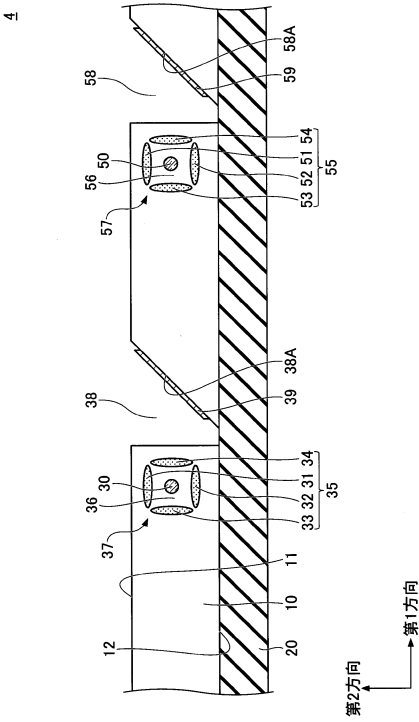
【図 3 4】



【図 3 5】



【図 3 6】



10

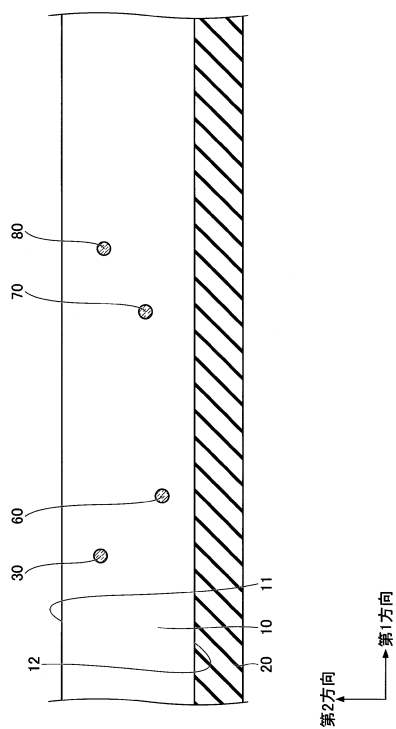
20

30

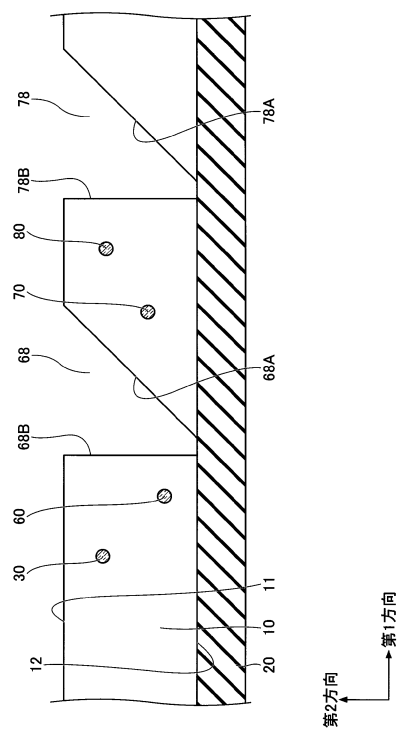
40

50

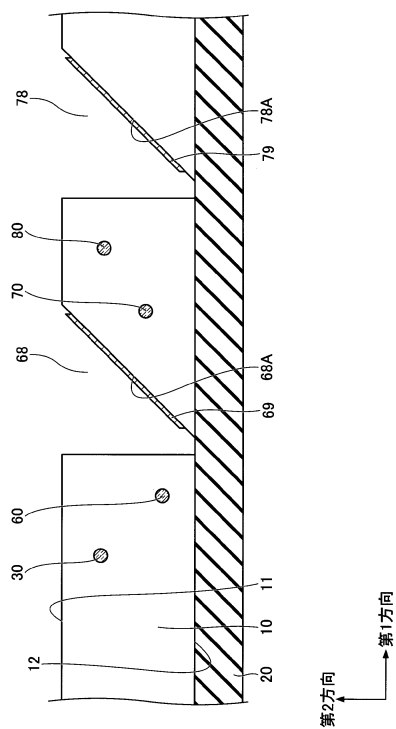
【図 3 7】



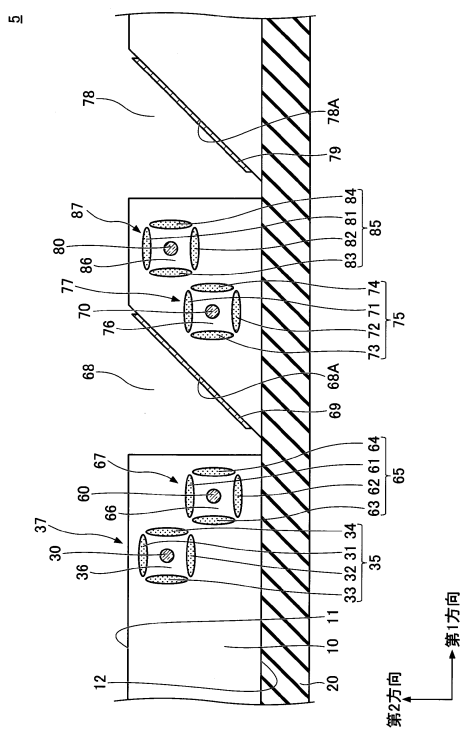
【図 3 8】



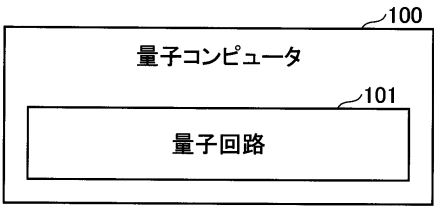
【図 3 9】



【図 40】



【図 4 1】



10

20

30

40

50

## フロントページの続き

- (56)参考文献 特表 2 0 0 5 - 5 3 8 3 9 2 ( J P , A )  
特表 2 0 0 3 - 5 0 6 7 3 1 ( J P , A )  
SOTILLO et al., Diamond photonics platform enabled by femtosecond laser writing, Scientific Reports, Springer Nature, 2016年10月17日, Vol. 6, Article No.: 35566, pp. 1-9, DOI:10.1038/srep35566  
HANAFI et al., Polycrystalline diamond photonic waveguides realized by femtosecond laser lithography, Optical Materials Express, 米国, OSA Publishing, 2019年06月24日, Vol. 9, No. 7, pp. 3109-3114, DOI:10.1364/OME.9.003109  
BOOTH, M. and SALTER P., Dynamic optical laser fabrication for engineering of quantum photonic devices, Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XVI, SPIE, 2019年02月01日, Vol. 10926, pp. 10926Y-1-pp. 10926Y-6, DOI:10.1117/12.2509144  
HADDEN et al., Integrated waveguides and deterministically positioned nitrogen vacancy centers in diamond created by femtosecond laser writing, Optics Letters, 米国, OSA Publishing, 2018年08月01日, Vol. 43, No. 15, pp. 3586-3589
- (58)調査した分野 (Int.Cl., D B 名)  
G 0 2 B 6 / 1 2 - 6 / 1 4  
G 0 2 F 1 / 0 0 - 1 / 1 2 5  
1 / 2 1 - 7 / 0 0  
I E E E X p l o r e  
S c o p u s