



(21) 申请号 202080105873.2

(51) Int.Cl.

(22) 申请日 2020.12.01

G02B 6/13 (2006.01)

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2023.04.04

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/JP2020/044622 2020.12.01

(87) PCT国际申请的公布数据

W02022/118366 JA 2022.06.09

(71) 申请人 富士通株式会社

地址 日本神奈川县川崎市

(72) 发明人 宫武哲也

(74) 专利代理机构 北京三友知识产权代理有限公司

公司 11127

专利代理师 黄志坚

权利要求书2页 说明书9页 附图29页

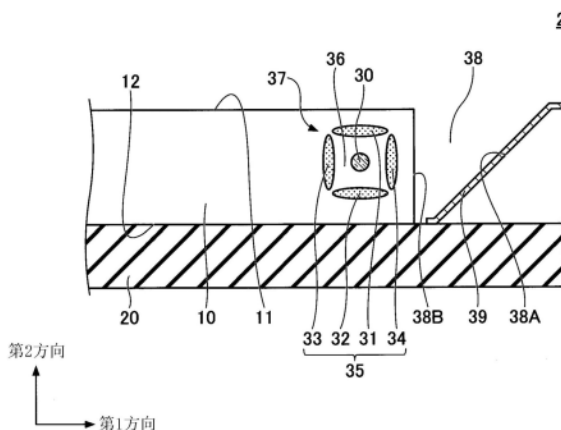
(54) 发明名称

量子电路、量子计算机和量子电路的制造方法

(57) 摘要

量子电路的制造方法具有形成光波导的工序,该光波导在具有第1主面和第2主面且包含色心的金刚石层中与所述色心光耦合,所述光波导具有:包含所述色心的芯区域;以及设置于所述芯区域的周围的光封闭区域,所述光封闭区域的折射率低于所述芯区域的折射率,所述形成光波导的工序具有以下工序:在所述金刚石层上形成具备与所述色心分开的倾斜面;在所述倾斜面上形成反射膜;对所述反射膜的一部分照射飞秒激光,使被所述反射膜反射的飞秒激光会聚于所述色心的所述第1主面侧而使所述金刚石层的一部分的折射率降低,由此在所述色心的所述第1主面侧形成第1区域;对所述反射膜的另一部分照射飞秒激光,使被所述反射膜反射的飞秒激光会聚于所述色心的所述第2主面侧而使所述金刚石层的另一部分的折射率降低,由此在所述色心的所述第2主面侧形成第2区域;对所述第1主面的

一部分照射飞秒激光,使飞秒激光在与所述第1主面平行的第1方向上会聚于所述芯区域的一侧而使所述金刚石层的另一部分的折射率降低,由此在所述芯区域的所述一侧形成第3区域;以及对所述第1主面的另一部分照射飞秒激光,使飞秒激光在所述第1方向上会聚于所述芯区域的另一侧而使所述金刚石层的另一部分的折射率降低,由此在所述芯区域的所述另一侧形成第4区域。



1. 一种量子电路的制造方法,其特征在于,

所述量子电路的制造方法具有形成光波导的工序,该光波导在具有第1主面和第2主面且包含色心的金刚石层中与所述色心光耦合,

所述光波导具有:

包含所述色心的芯区域;以及

设置于所述芯区域的周围的光封闭区域,

所述光封闭区域的折射率低于所述芯区域的折射率,

所述形成光波导的工序具有以下工序:

在所述金刚石层上形成槽,该槽具备与所述色心分开的倾斜面;

在所述倾斜面上形成反射膜;

对所述反射膜的一部分照射飞秒激光,使被所述反射膜反射的飞秒激光会聚于所述色心的所述第1主面侧而使所述金刚石层的一部分的折射率降低,由此在所述色心的所述第1主面侧形成第1区域;

对所述反射膜的另一部分照射飞秒激光,使被所述反射膜反射的飞秒激光会聚于所述色心的所述第2主面侧而使所述金刚石层的另一部分的折射率降低,由此在所述色心的所述第2主面侧形成第2区域;

对所述第1主面的一部分照射飞秒激光,使飞秒激光在与所述第1主面平行的第1方向上会聚于所述芯区域的一侧而使所述金刚石层的另一部分的折射率降低,由此在所述芯区域的所述一侧形成第3区域;以及

对所述第1主面的另一部分照射飞秒激光,使飞秒激光在所述第1方向上会聚于所述芯区域的另一侧而使所述金刚石层的另一部分的折射率降低,由此在所述芯区域的所述另一侧形成第4区域。

2. 根据权利要求1所述的量子电路的制造方法,其特征在于,

所述第1区域和所述第2区域在所述第1方向上的尺寸大于在与所述第1主面垂直的第2方向上的尺寸,

所述第3区域和所述第4区域在所述第2方向上的尺寸大于在所述第1方向上的尺寸。

3. 根据权利要求1或2所述的量子电路的制造方法,其特征在于,

所述色心由氮、硅、锗、锡、铅或硼以及空位构成。

4. 根据权利要求1至3中的任意一项所述的量子电路的制造方法,其特征在于,

所述金刚石层包含多个所述色心,

针对多个所述色心,使用共同的所述反射膜形成所述第1区域和所述第2区域。

5. 根据权利要求1至3中的任意一项所述的量子电路的制造方法,其特征在于,

所述金刚石层包含多个所述色心,

按照每个所述色心使用不同的所述反射膜来形成所述第1区域和所述第2区域。

6. 根据权利要求4或5所述的量子电路的制造方法,其特征在于,

多个所述色心各自距所述第1主面的距离不同。

7. 一种量子电路,其特征在于,

所述量子电路具有:

具有第1主面和第2主面的金刚石层中的色心;以及

- 光波导,其形成于所述金刚石层中,与所述色心光耦合,
所述光波导具有:
包含所述色心的芯区域;以及
设置于所述芯区域的周围的光封闭区域,
所述光封闭区域的折射率低于所述芯区域的折射率,
所述光封闭区域具有:
第1区域,其设置于所述芯区域的所述第1主面侧;
第2区域,其设置于所述芯区域的所述第2主面侧;
第3区域,其在与所述第1主面平行的第1方向上设置于所述芯区域的一侧;以及
第4区域,其在所述第1方向上设置于所述芯区域的另一侧,
所述第1区域和所述第2区域在所述第1方向上的尺寸大于在与所述第1主面垂直的第2方向上的尺寸,
所述第3区域和所述第4区域在所述第2方向上的尺寸大于在所述第1方向上的尺寸。
8. 根据权利要求7所述的量子电路,其特征在于,
所述色心由氮、硅、锗、锡、铅或硼以及空位构成。
9. 根据权利要求7或8所述的量子电路,其特征在于,
所述金刚石层包含多个所述色心。
10. 根据权利要求9所述的量子电路,其特征在于,
多个所述色心各自距所述第1主面的距离不同。
11. 一种量子计算机,其特征在于,
所述量子计算机包含权利要求7至10中的任意一项所述的量子电路。

量子电路、量子计算机和量子电路的制造方法

技术领域

[0001] 本发明涉及量子电路、量子计算机和量子电路的制造方法。

背景技术

[0002] 正在对使用金刚石层中的色心的量子电路进行研究。此外,也在研究为了色心中的发光的传播而在金刚石层中形成光波导的技术。

[0003] 现有技术文献

[0004] 专利文献

[0005] 专利文献1:美国专利第9157859号说明书

[0006] 专利文献2:美国专利第8837534号说明书

[0007] 专利文献3:日本特表2013-544441号公报

[0008] 非专利文献

[0009] 非专利文献1:Integrated waveguides and deterministically positioned nitrogen vacancy centers in diamond created by femtosecond laser writing, Optics Letters, 43(15), 3586-3589 (2018)

[0010] 非专利文献2:Diamond photonics platform enabled by femtosecond laser writing, Scientific Reports 6, 35566 (2016)

发明内容

[0011] 发明要解决的问题

[0012] 然而,在通过现有方法而形成的光波导中,光信号的损失大。

[0013] 本发明的目的在于,提供能够降低光信号的损失的量子电路、量子计算机和量子电路的制造方法。

[0014] 用于解决问题的手段

[0015] 根据本发明的一个方式,提供一种量子电路的制造方法,其具有形成光波导的工序,该光波导在具有第1主面和第2主面且包含色心的金刚石层中与所述色心光耦合,所述光波导具有:包含所述色心的芯区域;以及设置于所述芯区域的周围的光封闭区域,所述光封闭区域的折射率低于所述芯区域的折射率,所述形成光波导的工序具有以下工序:在所述金刚石层上形成具备与所述色心分开的倾斜面;在所述倾斜面上形成反射膜;对所述反射膜的一部分照射飞秒激光,使被所述反射膜反射的飞秒激光会聚于所述色心的所述第1主面侧而使所述金刚石层的一部分的折射率降低,由此在所述色心的所述第1主面侧形成第1区域;对所述反射膜的另一部分照射飞秒激光,使被所述反射膜反射的飞秒激光会聚于所述色心的所述第2主面侧而使所述金刚石层的另一部分的折射率降低,由此在所述色心的所述第2主面侧形成第2区域;对所述第1主面的一部分照射飞秒激光,使飞秒激光在与所述第1主面平行的第1方向上会聚于所述芯区域的一侧而使所述金刚石层的另一部分的折射率降低,由此在所述芯区域的所述一侧形成第3区域;以及对所述第1主面的另一部分照

射飞秒激光,使飞秒激光在所述第1方向上会聚于所述芯区域的另一侧而使所述金刚石层的另一部分的折射率降低,由此在所述芯区域的所述另一侧形成第4区域。

[0016] 发明的效果

[0017] 根据本发明,能够降低光信号的损失。

附图说明

- [0018] 图1是示出参考例的量子电路的制造方法的图(其1)。
- [0019] 图2是示出参考例的量子电路的制造方法的图(其2)。
- [0020] 图3是示出参考例的量子电路的制造方法的图(其3)。
- [0021] 图4是示出参考例的量子电路的制造方法的图(其4)。
- [0022] 图5是示出参考例的量子电路的制造方法的图(其5)。
- [0023] 图6是示出参考例的量子电路的制造方法的图(其6)。
- [0024] 图7是示出第1实施方式的量子电路的制造方法的图(其1)。
- [0025] 图8是示出第1实施方式的量子电路的制造方法的图(其2)。
- [0026] 图9是示出第1实施方式的量子电路的制造方法的图(其3)。
- [0027] 图10是示出第1实施方式的量子电路的制造方法的图(其4)。
- [0028] 图11是示出第1实施方式的量子电路的制造方法的图(其5)。
- [0029] 图12是示出第1实施方式的量子电路的制造方法的图(其6)。
- [0030] 图13是示出第1实施方式的量子电路的制造方法的图(其7)。
- [0031] 图14是示出第1实施方式的量子电路的制造方法的图(其8)。
- [0032] 图15是示出第1实施方式的量子电路的制造方法的图(其9)。
- [0033] 图16是示出第1实施方式的量子电路的制造方法的图(其10)。
- [0034] 图17是示出第1实施方式的量子电路的制造方法的图(其11)。
- [0035] 图18是示出第1实施方式的量子电路的制造方法的图(其12)。
- [0036] 图19是示出第1实施方式的量子电路的制造方法的图(其13)。
- [0037] 图20是示出形成色心的方法的图(其1)。
- [0038] 图21是示出形成色心的方法的图(其2)。
- [0039] 图22是示出第2实施方式的量子电路的制造方法的图(其1)。
- [0040] 图23是示出第2实施方式的量子电路的制造方法的图(其2)。
- [0041] 图24是示出第2实施方式的量子电路的制造方法的图(其3)。
- [0042] 图25是示出第3实施方式的量子电路的制造方法的图(其1)。
- [0043] 图26是示出第3实施方式的量子电路的制造方法的图(其2)。
- [0044] 图27是示出第3实施方式的量子电路的制造方法的图(其3)。
- [0045] 图28是示出第3实施方式的量子电路的制造方法的图(其4)。
- [0046] 图29是示出第3实施方式的量子电路的制造方法的图(其5)。
- [0047] 图30是示出第3实施方式的量子电路的制造方法的图(其6)。
- [0048] 图31是示出第4实施方式的量子电路的制造方法的图(其1)。
- [0049] 图32是示出第4实施方式的量子电路的制造方法的图(其2)。
- [0050] 图33是示出第4实施方式的量子电路的制造方法的图(其3)。

- [0051] 图34是示出第4实施方式的量子电路的制造方法的图(其4)。
[0052] 图35是示出第4实施方式的量子电路的制造方法的图(其5)。
[0053] 图36是示出第4实施方式的量子电路的制造方法的图(其6)。
[0054] 图37是示出第5实施方式的量子电路的制造方法的图(其1)。
[0055] 图38是示出第5实施方式的量子电路的制造方法的图(其2)。
[0056] 图39是示出第5实施方式的量子电路的制造方法的图(其3)。
[0057] 图40是示出第5实施方式的量子电路的制造方法的图(其4)。
[0058] 图41是示出量子计算机的图。

具体实施方式

[0059] 以下,参照附图对本发明的实施方式进行具体说明。另外,在本说明书和附图中,针对具有实质上相同的功能结构的结构要素,有时通过标注相同的附图标记而省略重复的说明。

[0060] (参考例)

[0061] 首先,对参考例进行说明。图1~图6是示出参考例的量子电路的制造方法的图。

[0062] 在参考例的量子电路的制造方法中,首先,如图1所示,准备形成于基材20上的金刚石层10。金刚石层10具有基材20侧的第2主面12、以及第2主面12的相反侧的第1主面11,并包含色心930。接着,对第1主面11的一部分照射飞秒激光L,在与第1主面11平行的第1方向上使飞秒激光L会聚于色心930的一侧。其结果是,金刚石层10的飞秒激光L所会聚的部分变质,形成变质区域933。伴随变质,变质区域933的折射率变得比周围的折射率低。

[0063] 然后,如图2所示,对第1主面11的另一部分照射飞秒激光L,在第1方向上使飞秒激光L会聚于色心930的另一侧。其结果是,金刚石层10的飞秒激光L所会聚的部分变质,形成变质区域934。伴随变质,变质区域934的折射率变得比周围的折射率低。

[0064] 另外,例如,一边呈线状扫描一边进行飞秒激光L的照射。因此,如图3所示,变质区域933和934例如以在之间夹着色心930的方式形成为线状。变质区域933和934之间的区域的折射率高于变质区域933和934的折射率。因此,变质区域933和934针对变质区域933和934之间的区域起到光封闭效果。即,形成具有变质区域933和934之间的芯区域936、以及光封闭区域935的光波导937,该光封闭区域935具备变质区域933和934。图2相当于沿着图3中的II-II线的剖视图。

[0065] 这样,能够制造具备与色心930光耦合的光波导937的量子电路。

[0066] 但是,在通过该参考例而形成的光波导937中,虽然能够在第1方向上将光封闭,但是,在与第1主面11垂直的第2方向上无法得到光封闭效果。

[0067] 为了在第2方向上也能够将光封闭,也考虑进行同样的飞秒激光L的照射,从而如图4和图5所示,在色心930的第1主面11侧形成变质区域931,并在色心930的第2主面12侧形成变质区域932。图4相当于沿着图5中的IV-IV线的剖视图。

[0068] 然而,在光波导937延伸的方向的剖视图中,变质区域931和932具有将照射方向即第2方向作为长度方向的形状,难以增大变质区域931和932的第1方向上的尺寸。因此,无法在第2方向上得到充分的光封闭效果。

[0069] 此外,如图6所示,也考虑对金刚石层的端面照射飞秒激光L。然而,能够通过端

面的照射而形成的变质区域938的位置存在极限,在色心930与端面之间的距离大的情况下,无法在所期望的位置形成变质区域。

[0070] 本申请发明者基于这样的参考例而进行了锐意研究,结果想到了下述的实施方式。

[0071] (第1实施方式)

[0072] 接着,对第1实施方式进行说明。第1实施方式涉及量子电路的制造方法。图7~图19是示出第1实施方式的量子电路的制造方法的图。图7、图9、图11、图13、图15、图17和图19是剖视图,图8、图10、图12、图14、图16和图18是俯视图。在第1实施方式中,在包含色心的金刚石层中形成与色心光耦合的光波导。

[0073] 在第1实施方式中,首先,如图7所示,准备形成于基材20上的金刚石层10。基材20例如由Si或SiO₂构成。金刚石层10例如由单结晶金刚石构成。金刚石层10具有基材20侧的第2主面12和第2主面12的相反侧的第1主面11,包含色心30。色心30例如是由氮和空位构成的氮-空位中心(NV中心)。色心30也可以是由硅和空位构成的硅-空位中心(SiV中心)、由锗和空位构成的锗-空位中心(GeV中心)、由锡和空位构成的锡-空位中心(SnV中心)、由铅和空位构成的铅-空位中心(PbV中心)、或者由硼和空位构成的硼-空位中心(BV中心)。

[0074] 接着,如图8和图9所示,在金刚石层10上形成与色心30分开的槽38。槽38沿着要形成的光波导而形成。槽38例如具有相对于第1主面11倾斜的侧面38A和与第1主面11垂直的侧面38B。使侧面38B位于色心30与侧面38A之间。侧面38A形成为能够从第1主面11侧进行视觉确认,例如相对于第1主面11倾斜40度~50度,优选倾斜45度。侧面38A是倾斜面的一例。图9相当于沿着图8中的IX-IX线的剖视图。

[0075] 然后,如图10和图11所示,在侧面38A上形成反射飞秒激光的反射膜39。这里,在侧面38A的一部分上形成反射膜39。反射膜39沿着要形成的光波导而形成。反射膜39例如是由Au、Al等金属构成的膜。反射膜39的厚度没有特别限定,但是,例如是0.1μm~1.0μm左右。反射膜39例如能够通过剥离法来形成。图11相当于沿着图10中的XI-XI线的剖视图。

[0076] 接着,如图12和图13所示,对反射膜39的一部分照射飞秒激光L,使被反射膜39反射的飞秒激光L会聚于色心30的第1主面11侧。其结果是,金刚石层10的飞秒激光L所会聚的部分变质,形成变质区域31。关于金刚石层10的变质,例如可以举出非晶化、碳化和烧蚀。伴随变质,变质区域31的折射率变得比周围的折射率低。沿着要形成的光波导扫描并进行飞秒激光L的照射,沿着要形成的光波导而形成变质区域31。在剖视图中,变质区域31具有将照射方向即第1方向作为长度方向的形状。变质区域31是第1区域的一例。图13相当于沿着图12中的XIII-XIII线的剖视图。

[0077] 接着,如图14和图15所示,对反射膜39的另一部分照射飞秒激光L,使被反射膜39反射的飞秒激光L会聚于色心30的第2主面12侧。其结果是,金刚石层10的飞秒激光L所会聚的部分变质,形成变质区域32。伴随变质,变质区域32的折射率变得比周围的折射率低。沿着要形成的光波导扫描并进行飞秒激光L的照射,沿着要形成的光波导而形成变质区域32。在剖视图中,变质区域32具有将照射方向即第1方向作为长度方向的形状。变质区域32是第2区域的一例。图15相当于沿着图14中的XV-XV线的剖视图。

[0078] 然后,如图16和图17所示,对第1主面11的一部分照射飞秒激光L,使飞秒激光L在第1方向上会聚于色心30的一侧。其结果是,金刚石层10的飞秒激光L所会聚的部分变质,形

成变质区域33。伴随变质,变质区域33的折射率变得比周围的折射率低。沿着要形成的光波导扫描并进行飞秒激光L的照射,沿着要形成的光波导而形成变质区域33。在剖视图中,变质区域33具有将照射方向即第2方向作为长度方向的形状。变质区域33是第3区域的一例。图17相当于沿着图16中的XVII-XVII线的剖视图。

[0079] 接着,如图18和图19所示,对第1主面11的另一部分照射飞秒激光L,使飞秒激光L在第1方向上会聚于色心30的另一侧。其结果是,金刚石层10的飞秒激光L所会聚的部分变质,形成变质区域34。伴随变质,变质区域34的折射率变得比周围的折射率低。沿着要形成的光波导扫描并进行飞秒激光L的照射,沿着要形成的光波导而形成变质区域34。在剖视图中,变质区域34具有将照射方向即第2方向作为长度方向的形状。变质区域34是第4区域的一例。图19相当于沿着图18中的XIX-XIX线的剖视图。

[0080] 形成变质区域31~34时的飞秒激光L的照射条件的一例如下。即,波长是800nm,脉冲宽度是50fs~100fs,脉冲能量是50nJ~1000nJ,重复频率是250kHz~500kHz。

[0081] 如上所述,扫描并进行飞秒激光L的照射。因此,如图19所示,变质区域31~34例如在剖视图中以包围色心30的方式形成为线状。被变质区域31~34包围的区域的折射率高于变质区域31~34的折射率高。因此,变质区域31~34针对被变质区域31~34包围的区域起到光封闭效果。即,形成光波导37,该光波导37具有:被变质区域31~34包围的芯区域36;以及具备变质区域31~34的光封闭区域35。

[0082] 这样,能够制造具备与色心30光耦合的光波导37的量子电路1。

[0083] 另外,变质区域31~34的形成顺序没有特别限定。例如,也可以在形成变质区域33和34后形成变质区域31和32。

[0084] 在量子电路1中,变质区域31和32在剖视图中具有将第1方向作为长度方向的形状,变质区域33和34在剖视图中具有将第2方向作为长度方向的形状。即,变质区域31和32的第1方向的尺寸大于第2方向的尺寸,变质区域33和34的第2方向的尺寸大于第1方向的尺寸。因此,能够通过变质区域31和32将芯区域36内的光在第2方向上封闭,并且能够通过变质区域33和34将芯区域36内的光在第1方向上封闭。因此,能够使来自色心30的发光高效地与光波导37耦合,降低通过光波导37传播的光信号的损失。

[0085] 此外,在制造量子电路1时,形成有具备侧面38A的槽38,并在侧面38A上形成有反射膜39,能够经由反射膜39使飞秒激光L从第1方向会聚于所期望的位置。

[0086] 也可以有意地形成色心30。图20~图21是示出形成色心30的方法的图。图20和图21是剖视图。如图20所示,通过在金刚石层10会聚单发的飞秒激光L,从而形成空位30X。接着,在氮氛围下进行退火,如图21所示,形成空位30X与氮原子成对的NV中心作为色心30。退火的条件的一例如下。即,温度是1000℃,时间是3小时。

[0087] (第2实施方式)

[0088] 接着,对第2实施方式进行说明。第2实施方式与第1实施方式的不同之处主要在于反射膜的配置。图22~图24是示出第2实施方式的量子电路的制造方法的图。图22是俯视图,图23和图24是剖视图。

[0089] 在第2实施方式中,首先,与第1实施方式同样,进行形成槽38为止的处理(参照图8和图9)。接着,如图22和图23所示,在侧面38A上、槽38的底部露出的基材20的表面上、以及与侧面38A连接的第1主面11上形成反射膜39。

[0090] 然后,如图24所示,与第1实施方式同样,形成变质区域31~34。

[0091] 这样,能够制造具备与色心30光耦合的光波导37的量子电路2。

[0092] 通过第2实施方式也能够得到与第1实施方式同样的效果。此外,由于还将反射膜39形成于在槽38的底部露出的基材20的表面上、与侧面38A连接的第1主面11上,因此,能够在金刚石层10的厚度方向上扩大可形成变质区域31和32的范围。

[0093] (第3实施方式)

[0094] 接着,对第3实施方式进行说明。第3实施方式与第1实施方式的不同之处主要在于色心和光波导的数量。图25~图30是示出第3实施方式的量子电路的制造方法的图。图25、图27、图29和图30是剖视图,图26和图28是俯视图。在第3实施方式中,在包含2个色心的金刚石层中,形成单独与色心光耦合的2个光波导。

[0095] 在第3实施方式中,首先,如图25所示,具备金刚石层10,该金刚石层10形成于基材20上,包含在第1方向上分开而形成的色心30和40。色心40与色心30同样,例如是NV中心、SiV中心、GeV中心、SnV中心、PbV中心或BV中心。

[0096] 接着,如图26和图27所示,在金刚石层10形成与色心30分开的槽38和与色心40分开的槽48。槽38和48沿着要形成的光波导而形成。例如,槽38和48在第1方向上形成于色心30与色心40之间,槽38形成于比槽48靠色心30侧的位置,槽48形成于比槽38靠色心40侧的位置。槽48例如具备相对于第1主面11倾斜的侧面48A、以及与第1主面11垂直的侧面48B。使侧面48B位于色心40与侧面48A之间。侧面48A形成为能够从第1主面11侧进行视觉确认,例如相对于第1主面11倾斜40度~50度,优选倾斜45度。侧面48A是倾斜面的一例。图27相当于沿着图26中的XXVII-XXVII线的剖视图。

[0097] 然后,如图28和图29所示,在侧面38A上、侧面48A上、与侧面38A和侧面48A连接的第1主面11上形成反射飞秒激光的反射膜49。反射膜49沿着要形成的光波导而形成。反射膜49例如是由Au、Al等金属构成的膜。反射膜49的厚度没有特别限定,但是,例如是0.1 μm ~1.0 μm 左右。反射膜49例如能够通过剥离法而形成。图29相当于沿着图28中的XXIX-XXIX线的剖视图。

[0098] 接着,如图30所示,与第1实施方式同样地形成变质区域31~34。此外,通过分别与变质区域31~34的形成同样的要领来形成变质区域41~44。变质区域41~44例如在剖视图以包围色心40的方式形成为线状。被变质区域41~44包围的区域的折射率高于变质区域41~44的折射率。因此,变质区域41~44相对于被变质区域41~44包围的区域起到光封闭效果。即,形成光波导47,该光波导47具有:被变质区域41~44包围的芯区域46;以及具备变质区域41~44的光封闭区域45。

[0099] 这样,能够制造量子电路3,该量子电路3具备:与色心30光耦合的光波导37;以及与色心40光耦合的光波导47。

[0100] 另外,变质区域31~34和41~44的形成顺序没有特别限定。

[0101] 通过第3实施方式也能够得到与第1实施方式同样的效果。此外,还能够降低通过光波导47传播的光信号的损失。进而,容易使量子电路3所包含的量子比特的数量增加。

[0102] 此外,在制造量子电路3时,能够同时形成槽38和槽48。此外,也可以将反射膜单独地形成于侧面38A、48A上,该情况下,能够同时在侧面38A上和侧面48A上形成反射膜。

[0103] (第4实施方式)

[0104] 接着,对第4实施方式进行说明。第4实施方式与第3实施方式的不同之处主要在于槽和反射膜的配置。图31~图36是示出第4实施方式的量子电路的制造方法的图。图31、图33、图35和图36是剖视图,图32和图34是俯视图。在第4实施方式中,与第3实施方式同样,在包含2个色心的金刚石层中,形成单独与色心光耦合的2个光波导。

[0105] 在第4实施方式中,首先,如图31所示,准备金刚石层10,该金刚石层10形成于基材20上,包含在第1方向上分开而形成的色心30和50。色心50与色心30同样,例如是NV中心、SiV中心、GeV中心、SnV中心、PbV中心或BV中心。

[0106] 接着,如图32和图33所示,在金刚石层10上形成与色心30分开的槽38以及与色心50分开的槽58。槽38和58沿着要形成的光波导而形成。例如,槽38在第1方向上形成于色心30与色心50之间,槽58形成于比色心50远离槽38。槽58例如具有相对于第1主面11倾斜的侧面58A以及与第1主面11垂直的侧面58B。使侧面58B位于色心50与侧面58A之间。侧面58A形成于能够从第1主面11侧进行视觉确认,例如相对于第1主面11倾斜40度~50度,优选倾斜45度。侧面58A是倾斜面的一例。图33相当于沿着图32中的XXXIII-XXXIII线的剖视图。

[0107] 然后,如图34和图35所示,在侧面38A上形成反射飞秒激光的反射膜39,在侧面58A上形成反射飞秒激光的反射膜59。这里,例如,在侧面38A的一部分上形成反射膜39,在侧面58A的一部分上形成反射膜59。反射膜39和59沿着要形成的光波导而形成。反射膜59例如是由Au、Al等金属构成的膜。反射膜59的厚度没有特别限定,例如是0.1 μm ~1.0 μm 左右。反射膜59例如能够通过剥离法而形成。反射膜39和59能够同时形成。图35相当于沿着图34中的XXXV-XXXV线的剖视图。

[0108] 接着,如图36所示,与第1实施方式同样地形成变质区域31~34。此外,通过分别与变质区域31~34的形成同样的要领来形成变质区域51~54。变质区域51~54例如在剖视图以包围色心50的方式形成成为线状。被变质区域51~54包围的区域的折射率高于变质区域51~54的折射率。因此,变质区域51~54相对于被变质区域51~54包围的区域起到光封闭效果。即,形成光波导57,该光波导57具有:被变质区域51~54包围的芯区域56;以及具备变质区域51~54的光封闭区域55。

[0109] 这样,能够制造量子电路4,该量子电路4具备:与色心30光耦合的光波导37;以及与色心50光耦合的光波导57。

[0110] 另外,变质区域31~34和51~54的形成顺序没有特别限定。

[0111] 通过第4实施方式也能够得到与第1实施方式同样的效果。此外,还能够降低通过光波导57传播的光信号的损失。进而,容易使量子电路4所包含的量子比特的数量增加。

[0112] 此外,在制造量子电路4时,能够同时形成槽38和槽58,能够同时形成反射膜39和反射膜59。

[0113] (第5实施方式)

[0114] 接着,对第5实施方式进行说明。第5实施方式与第1实施方式的不同之处主要在于色心和光波导的数量。图37~图40是示出第5实施方式的量子电路的制造方法的图。图37~图40是剖视图,是示出第5实施方式的量子电路的制造方法的图。在第5实施方式中,在包含4个色心的金刚石层中形成单独与色心光耦合的4个光波导。

[0115] 在第5实施方式中,首先,如图37所示,准备金刚石层10,该金刚石层10形成于基材20上,包含在第1方向上分开而形成的色心30、60、70和80。色心60、70和80与色心30同样,例

如是NV中心、SiV中心、GeV中心、SnV中心、PbV中心或BV中心。这里,假设在第1方向上,色心30与色心60彼此位于接近的位置,色心70与色心80彼此位于接近的位置。

[0116] 接着,如图38所示,在金刚石层10上形成与色心30和60分开的槽68以及与色心70和80分开的槽78。槽68和78沿着要形成的光波导而形成。例如,槽68在第1方向上形成于色心30和60与色心70和80之间,槽78形成于比色心70和80更远离槽68。槽68例如具有相对于第1主面11倾斜的侧面68A以及与第1主面11垂直的侧面68B。使侧面68B位于色心30和60与侧面68A之间。侧面68A形成于能够从第1主面11侧进行视觉确认,例如相对于第1主面11倾斜40度~50度,优选倾斜45度。槽78例如具有相对于第1主面11倾斜的侧面78A以及与第1主面11垂直的侧面78B。使侧面78B位于色心70和80与侧面78A之间。侧面78A形成于能够从第1主面11侧进行视觉确认,例如相对于第1主面11倾斜40度~50度,优选倾斜45度。侧面68A和78A是倾斜面的一例。

[0117] 然后,如图39所示,在侧面68A上形成反射飞秒激光的反射膜69,在侧面78A上形成反射飞秒激光的反射膜79。这里,例如,在侧面68A的一部分上形成反射膜69,在侧面78A的一部分上形成反射膜79。反射膜69和79沿着要形成的光波导而形成。反射膜69和79例如是由Au、Al等金属构成的膜。反射膜69和79的厚度没有特别限定,但是,例如是 $0.1\mu\text{m}\sim 1.0\mu\text{m}$ 左右。反射膜69和79例如能够通过剥离法来形成。反射膜69和79能够同时形成。

[0118] 接着,如图40所示,与第1实施方式同样地形成变质区域31~34。此外,通过分别与变质区域31~34的形成同样的要领来形成变质区域61~64、变质区域71~74、变质区域81~84。变质区域61~64例如在剖视图中以包围色心60的方式形成成为线状。变质区域71~74例如在剖视图中以包围色心70的方式形成成为线状。变质区域81~84例如在剖视图中以包围色心80的方式形成成为线状。

[0119] 被变质区域61~64包围的区域的折射率高于变质区域61~64的折射率。因此,变质区域61~64相对于被变质区域61~64包围的区域起到光封闭效果。即,形成光波导67,该光波导67具有:被变质区域61~64包围的芯区域66;以及具备变质区域61~64的光封闭区域65。

[0120] 被变质区域71~74包围的区域的折射率高于变质区域71~74的折射率。因此,变质区域71~74相对于被变质区域71~74包围的区域起到光封闭效果。即,形成光波导77,该光波导77具有:被变质区域71~74包围的芯区域76;以及具备变质区域71~74的光封闭区域75。

[0121] 被变质区域81~84包围的区域的折射率高于变质区域81~84的折射率。因此,变质区域81~84相对于被变质区域81~84包围的区域起到光封闭效果。即,形成光波导87,该光波导87具有:被变质区域81~84包围的芯区域86;以及具备变质区域81~84的光封闭区域85。

[0122] 这样,能够制造量子电路5,该量子电路5具备:与色心30光耦合的光波导37;与色心60光耦合的光波导67;与色心70光耦合的光波导77;以及与色心80光耦合的光波导87。

[0123] 另外,变质区域61~64,71~74和81~84的形成顺序没有特别限定。

[0124] 通过第5实施方式也能够得到与第1实施方式同样的效果。此外,还能够降低通过光波导67、77、87传播的光信号的损失。进而,容易使量子电路5所包含的量子比特的数量增加。

[0125] 在第3~第5实施方式中,也可以通过图20~图21所示的方法将色心40、50、60、70和80形成于所期望的位置。

[0126] 在各实施方式中,使用反射膜作为记号,进行与光波导耦合的光检测器的对位。特别是通过在光波导延伸的方向上使光波导的终端的位置与反射膜的终端的位置一致,从而容易使光检测器与光波导高效地耦合。

[0127] 不限定本发明的量子电路中包含的色心和光波导的数量。

[0128] 如图41所示,这些实施方式的量子电路1、2、3、4、5例如能够作为量子电路101而内置于量子计算机100来使用。

[0129] 以上对优选的实施方式等进行了详细说明,但是不被上述实施方式等限制,能够在不脱离权利要求所记载的范围的情况下对上述实施方式等施加各种变形和置换。

[0130] 附图标记说明

[0131] 1,2,3,4,5:量子电路

[0132] 10:金刚石层

[0133] 11:第1主面

[0134] 12:第2主面

[0135] 20:基材

[0136] 30,40,50,60,70,80:色心

[0137] 31~34,41~44,51~54,61~64,71~74,81~84:变质区域

[0138] 35,45,55,65,75,85:光封闭区域

[0139] 36,46,56,66,76,86:芯区域

[0140] 37,47,57,67,77,87:光波导

[0141] 38,48,58,68,78:槽

[0142] 38A,48A,58A,68A,78A:侧面

[0143] 39,49,59,69,79:反射膜

[0144] 100:量子计算机

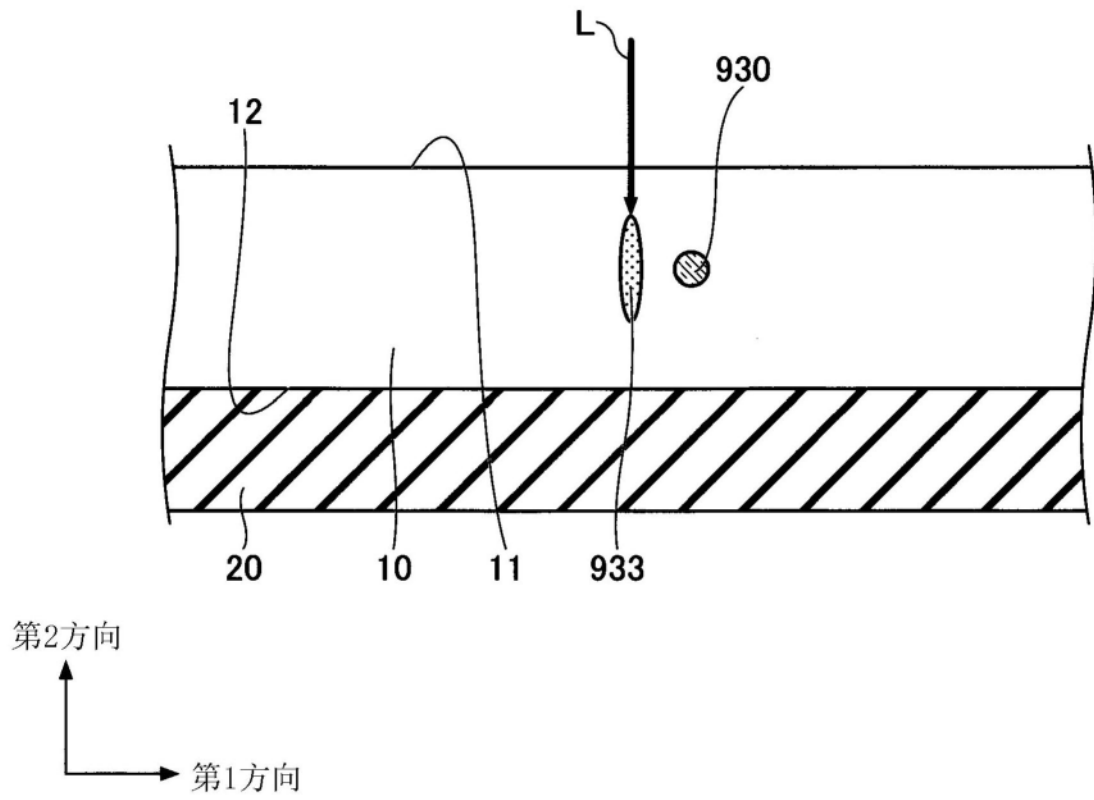


图1

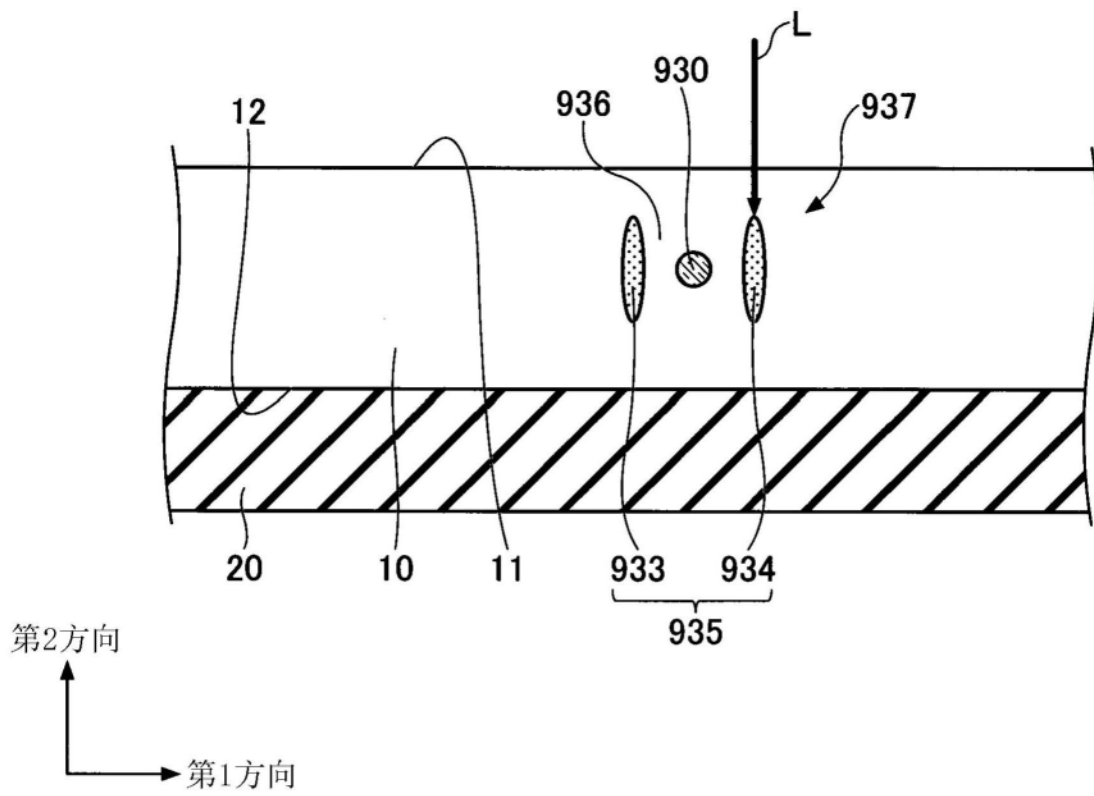


图2

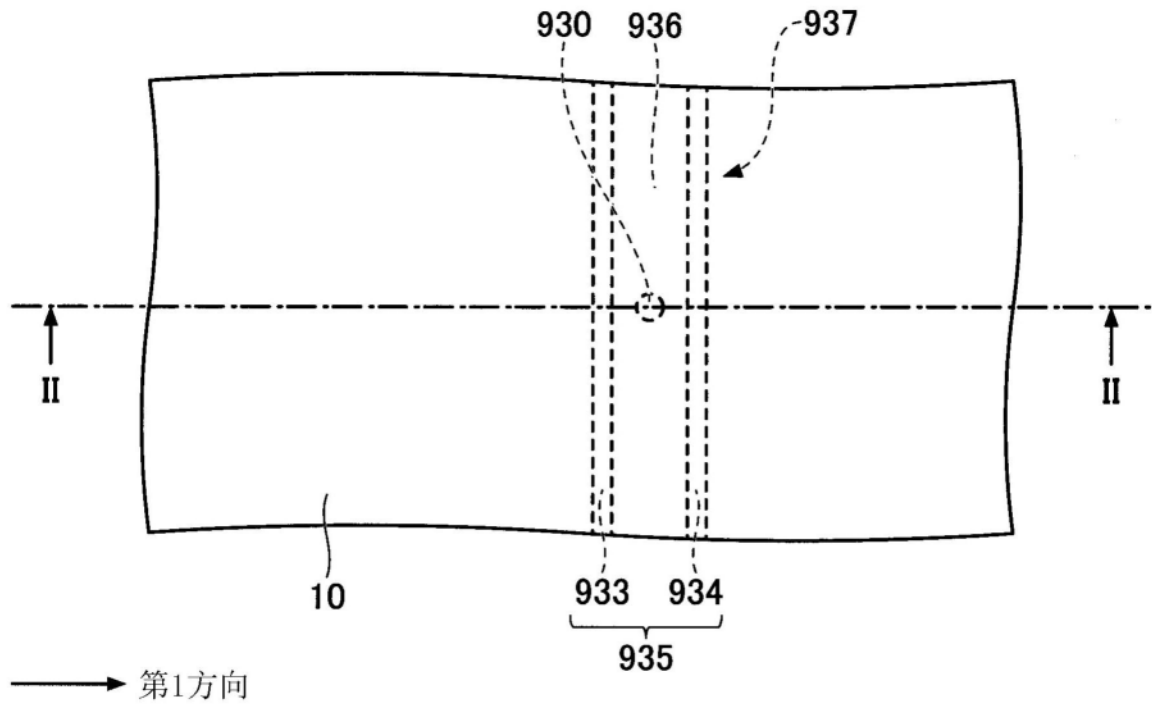


图3

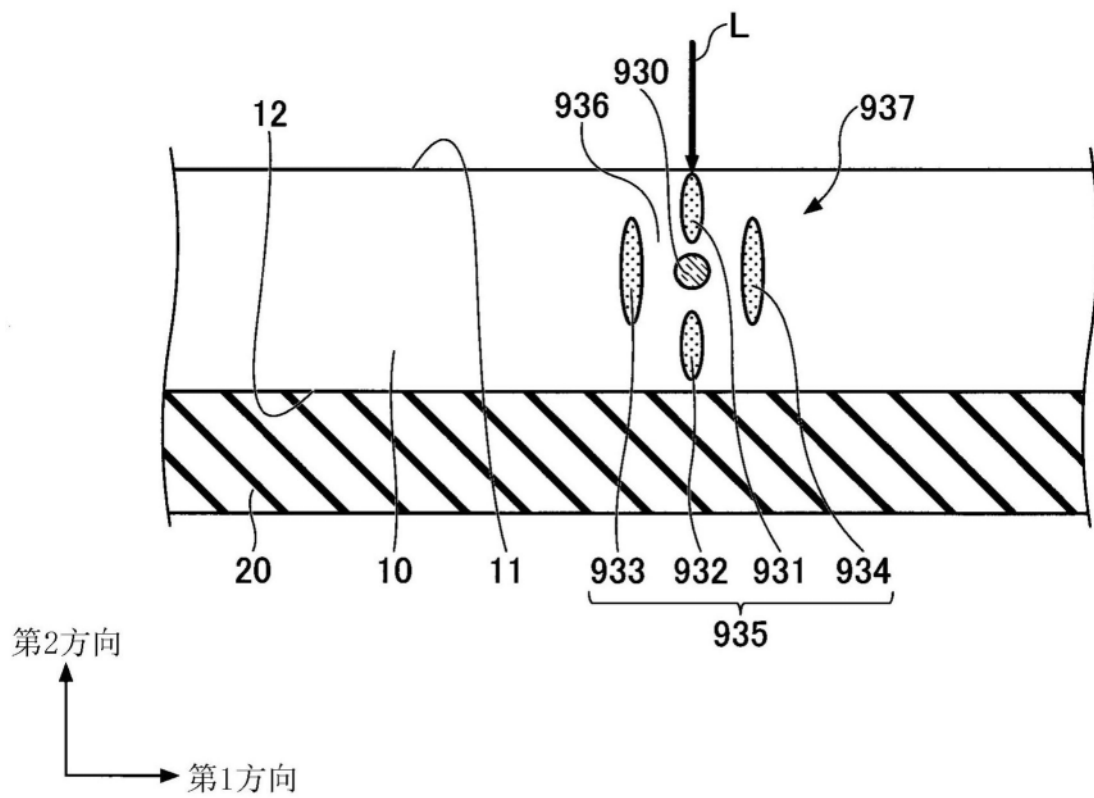


图4

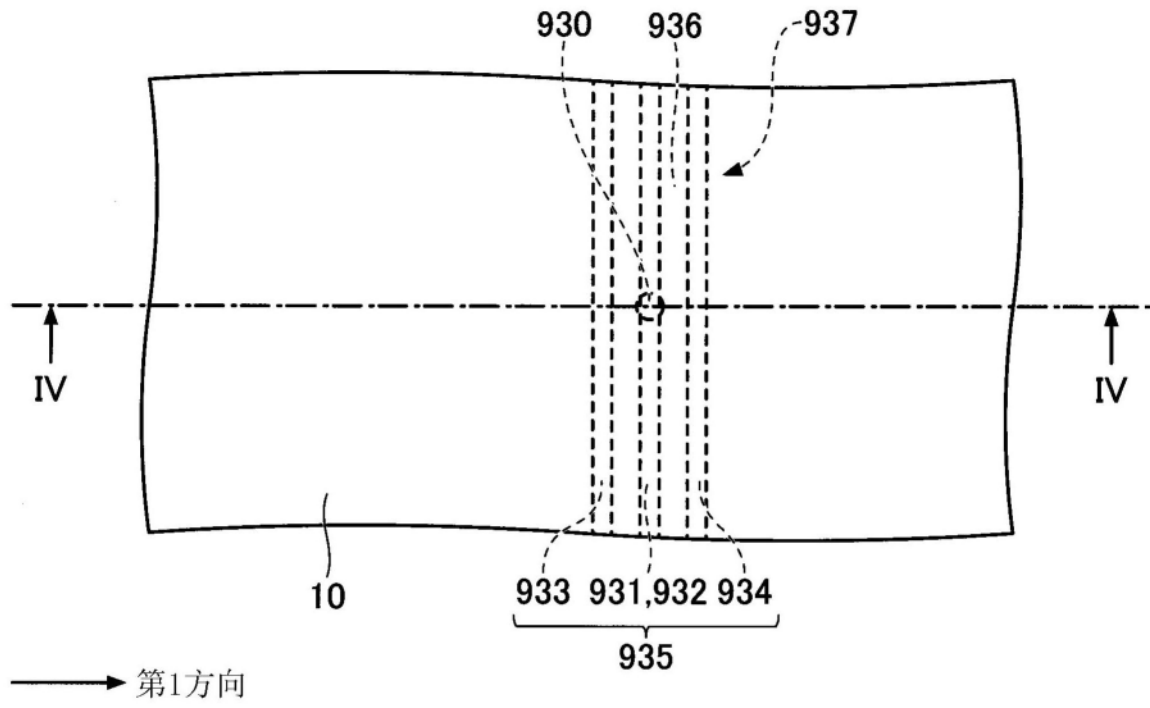


图5

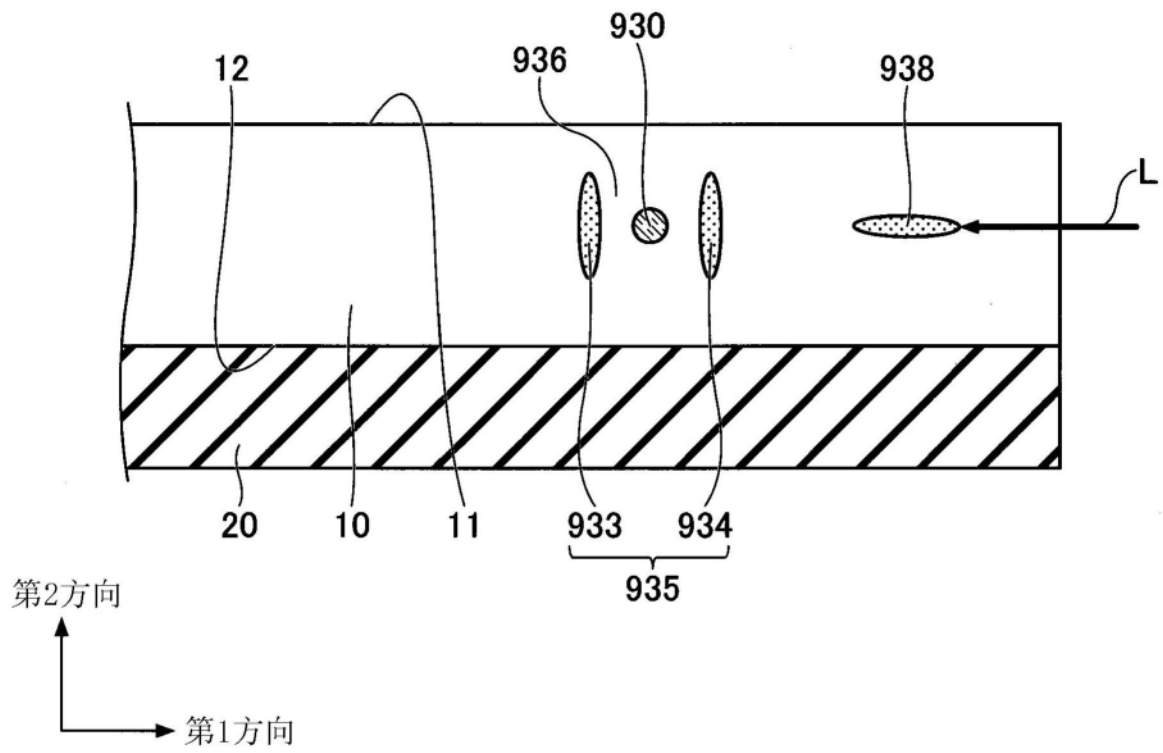


图6

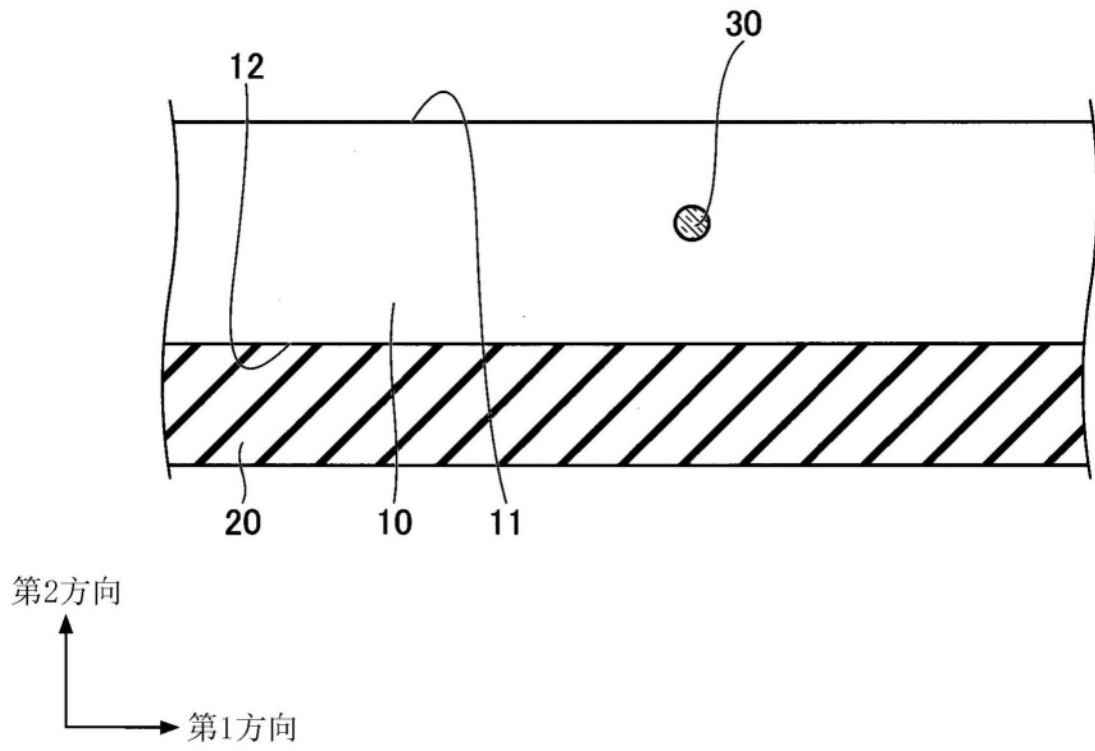


图7

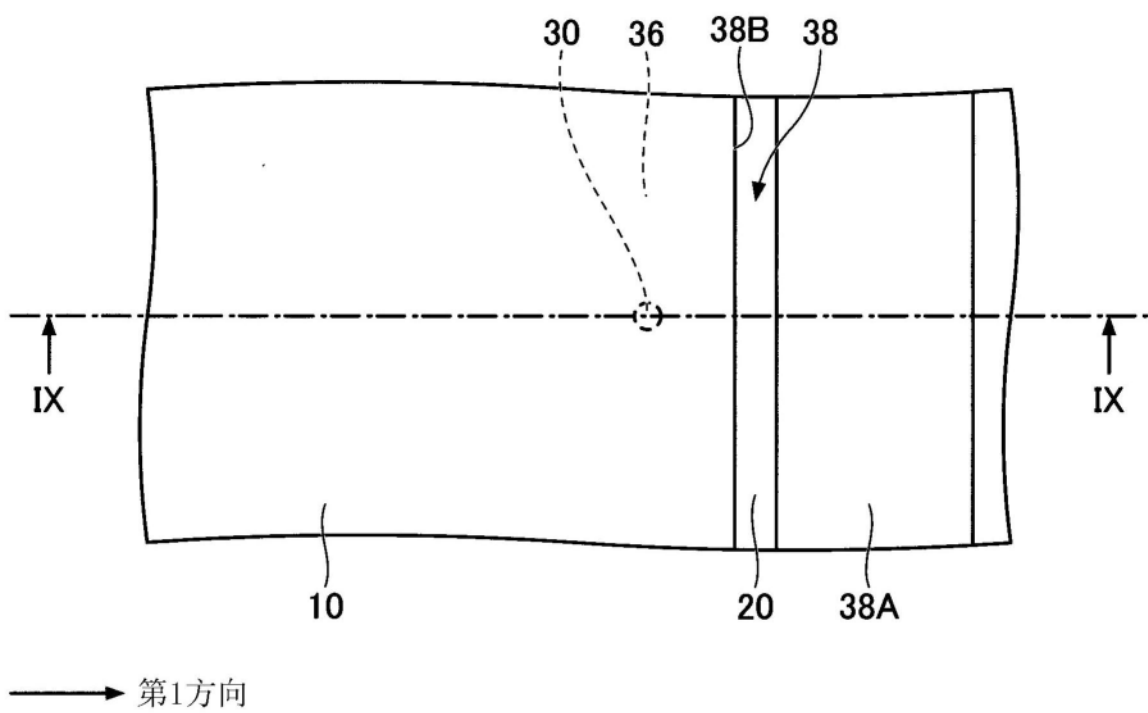


图8

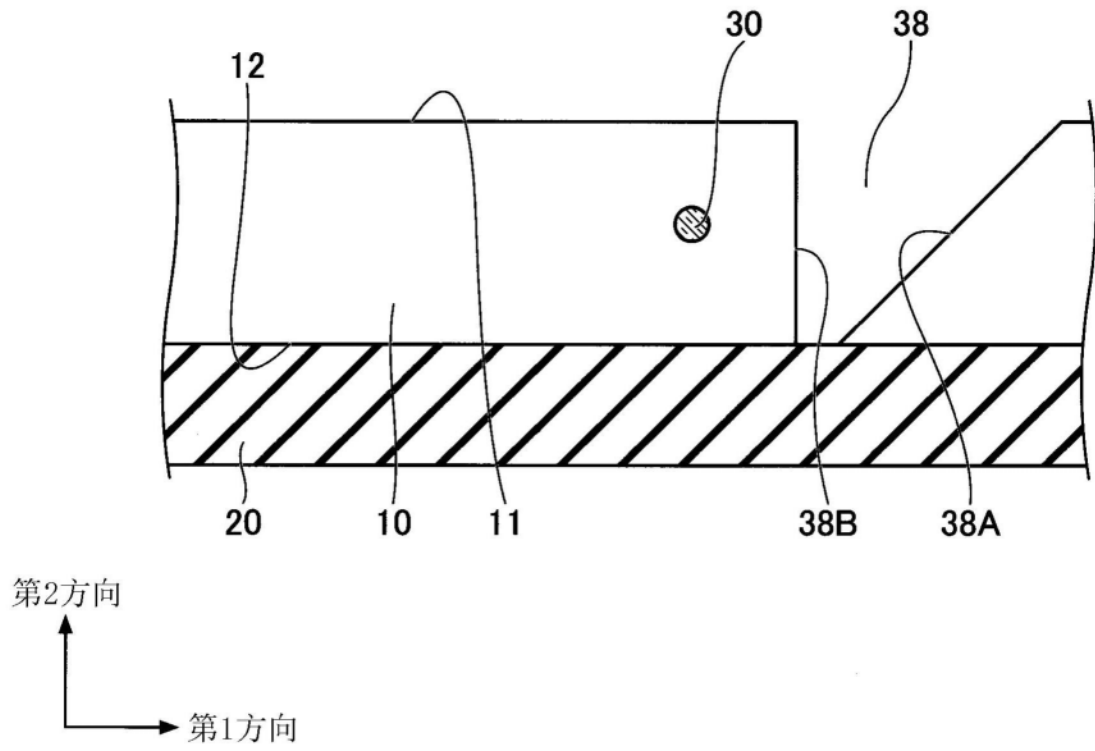


图9

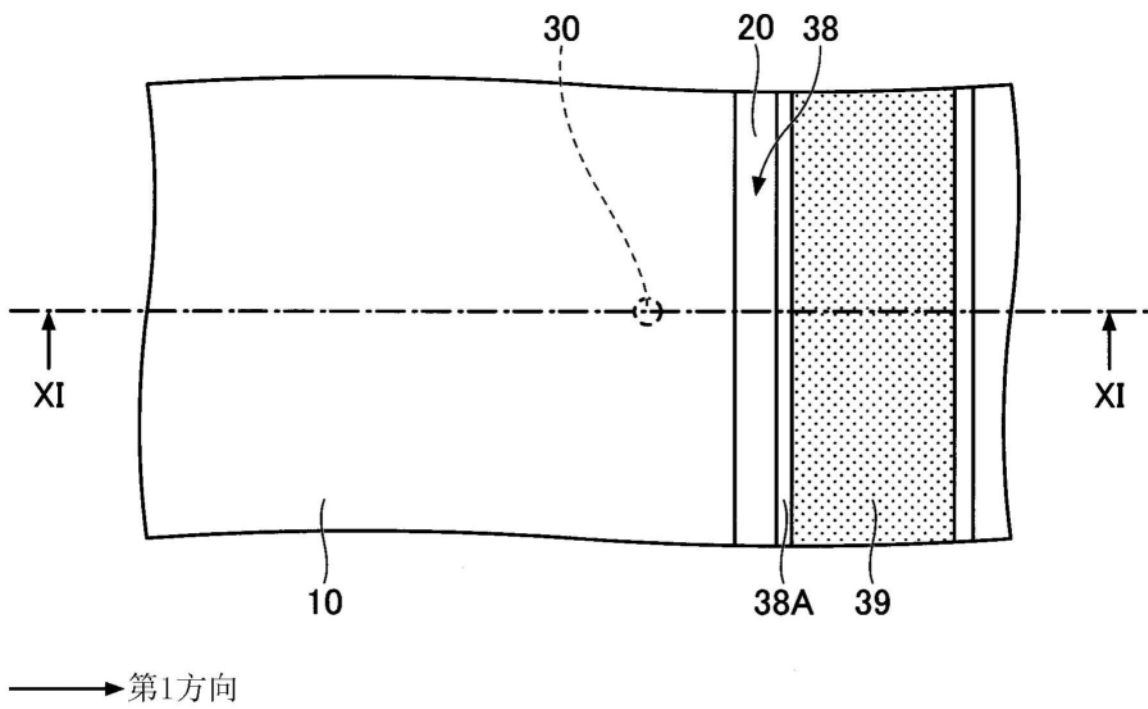


图10

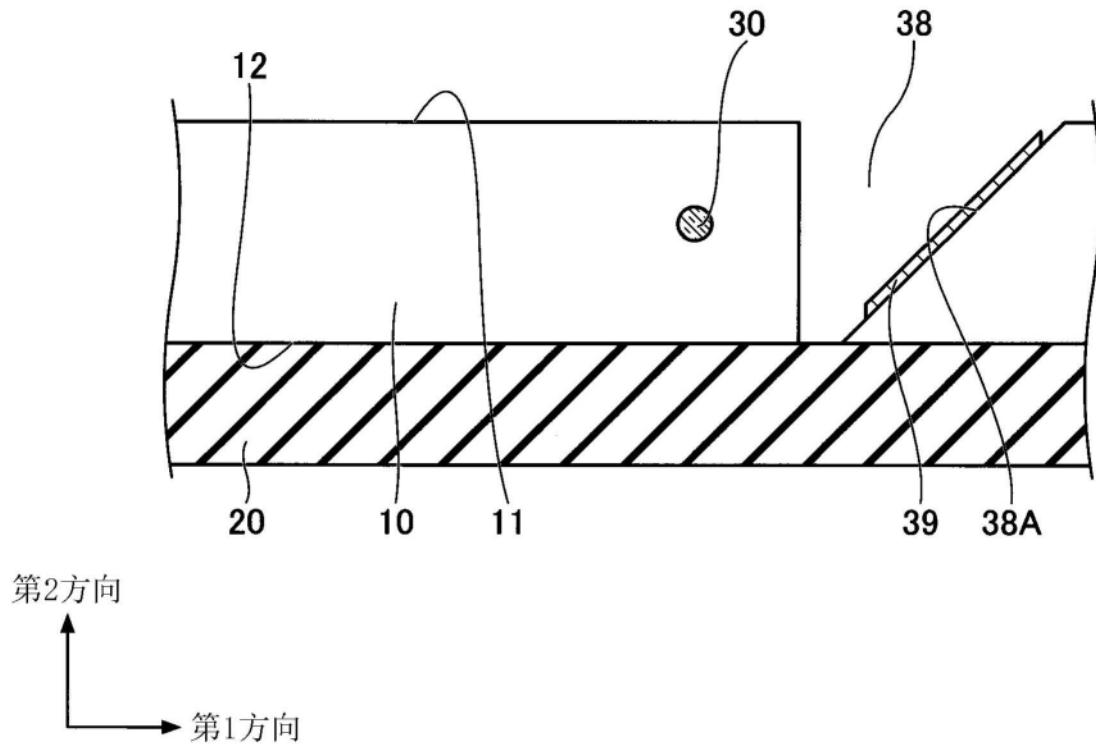


图11

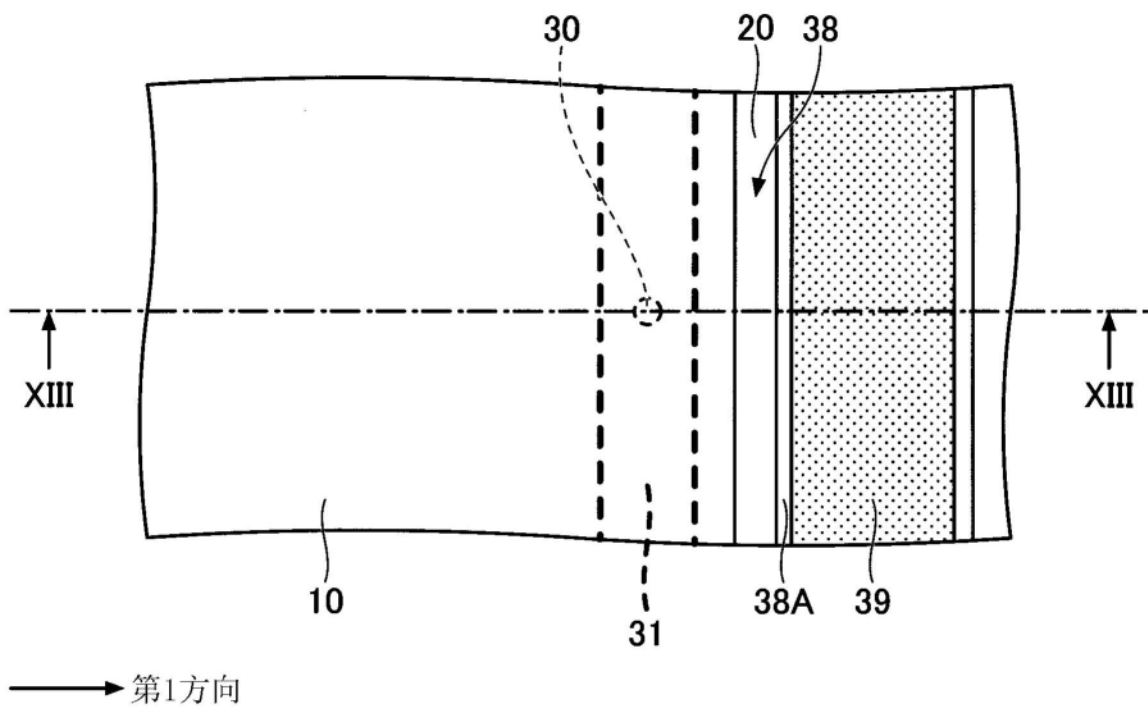


图12

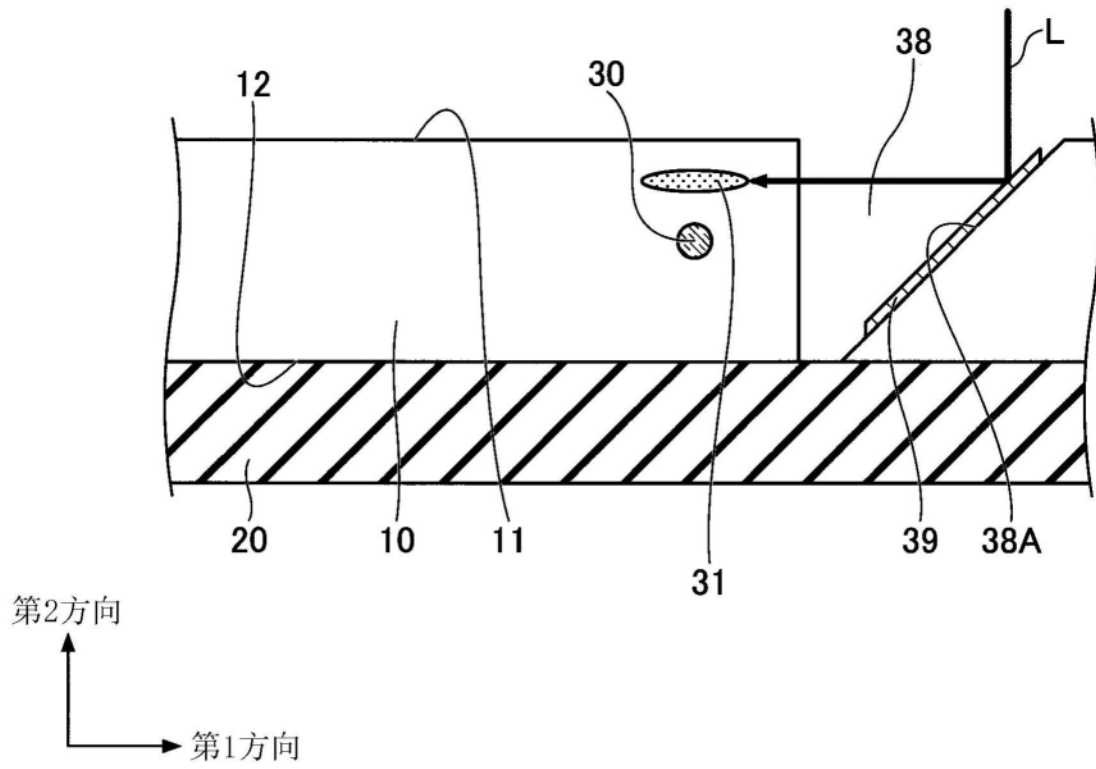


图13

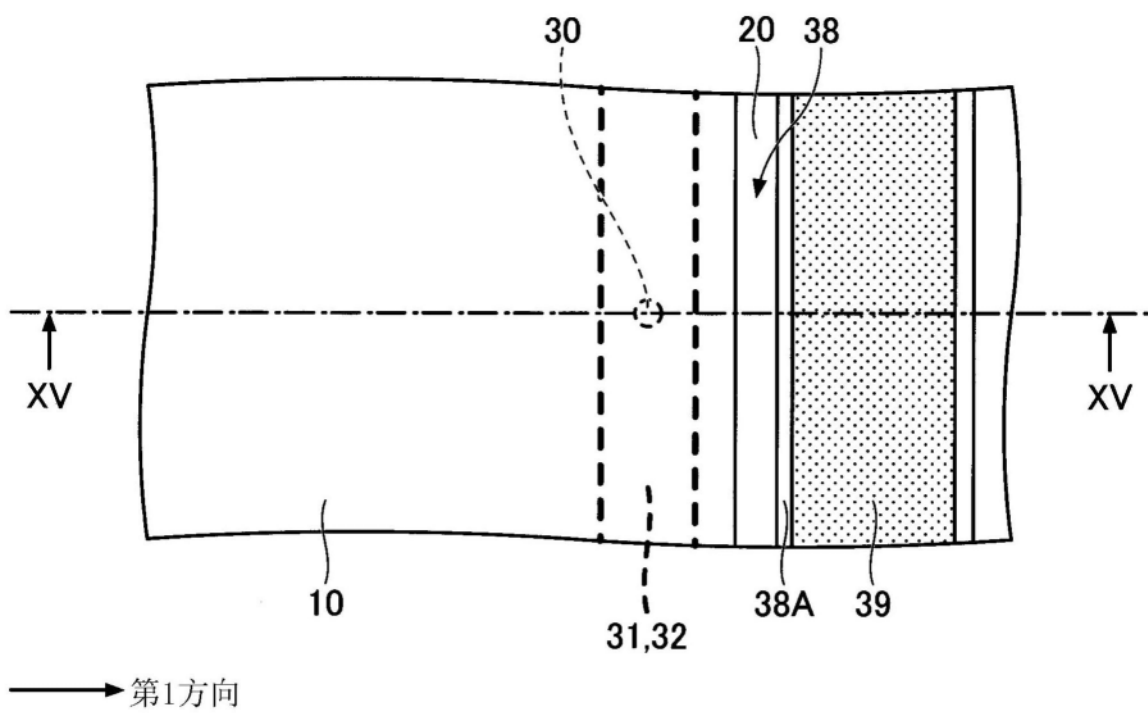


图14

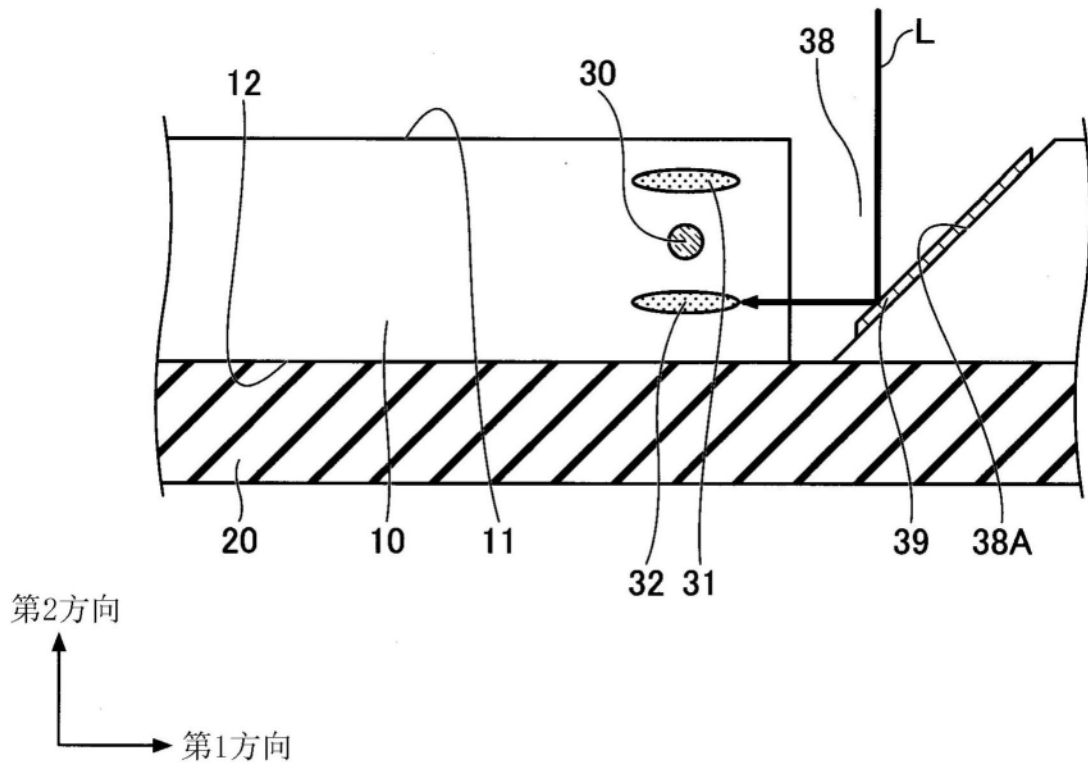


图15

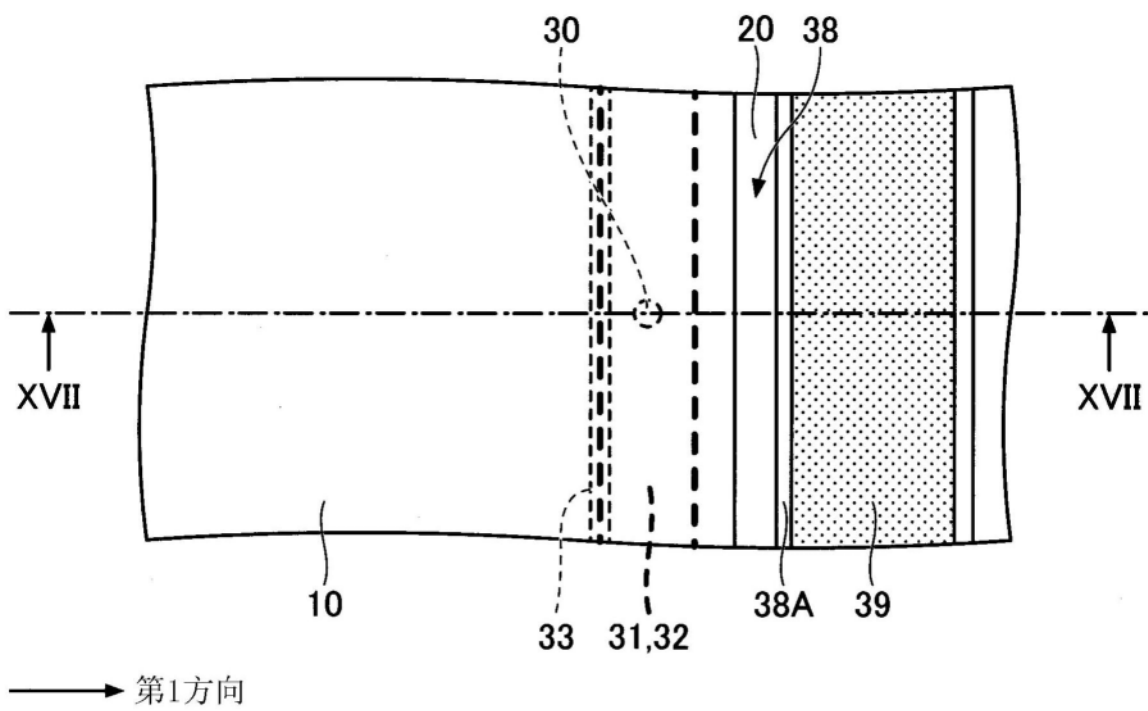


图16

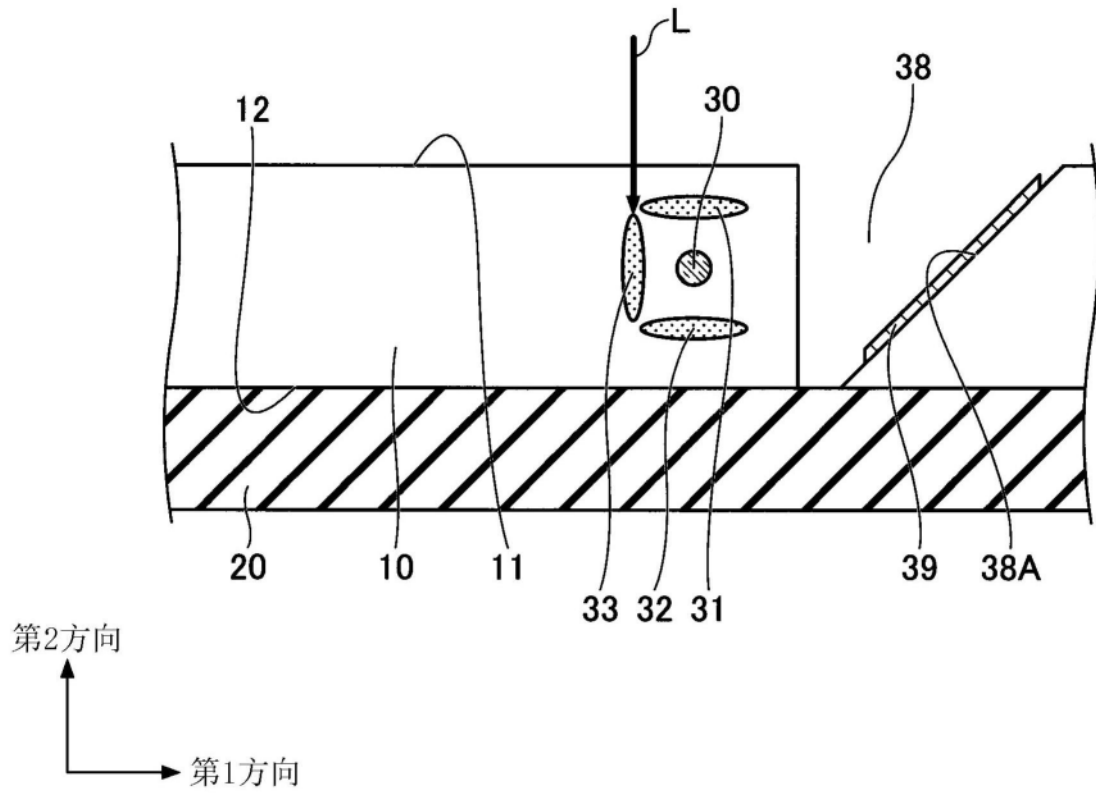


图17

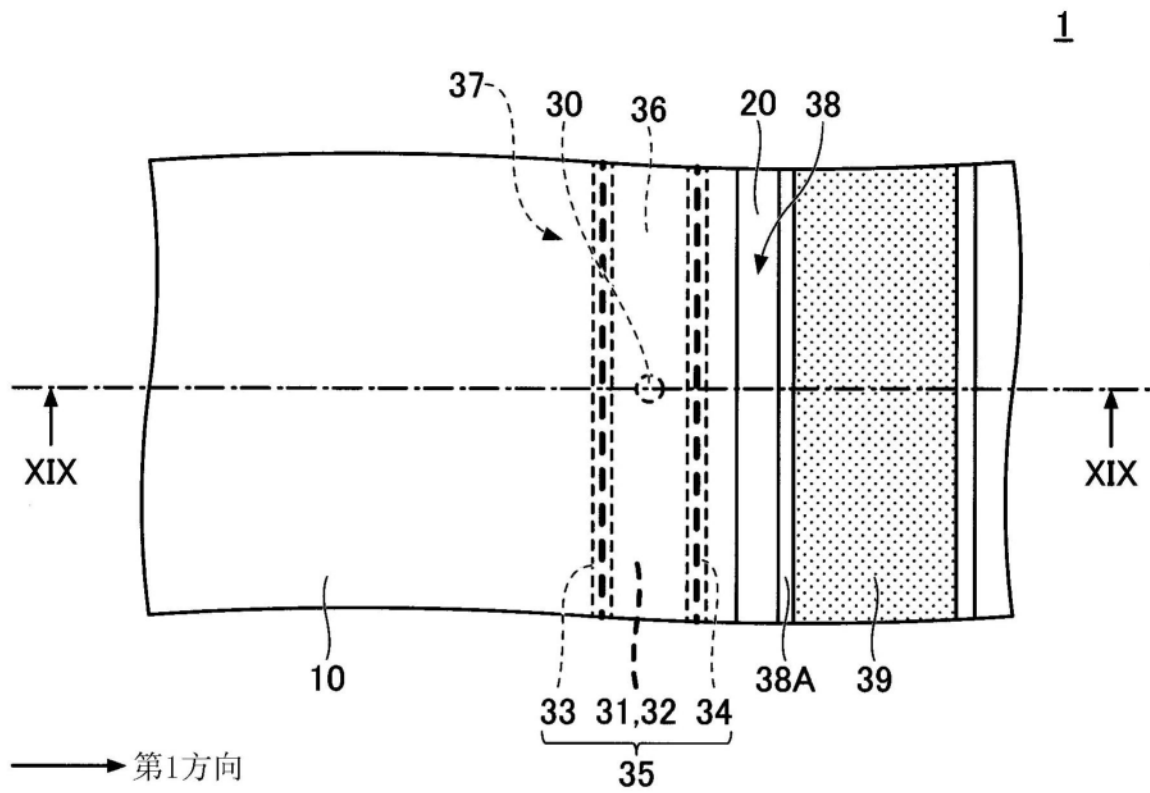


图18

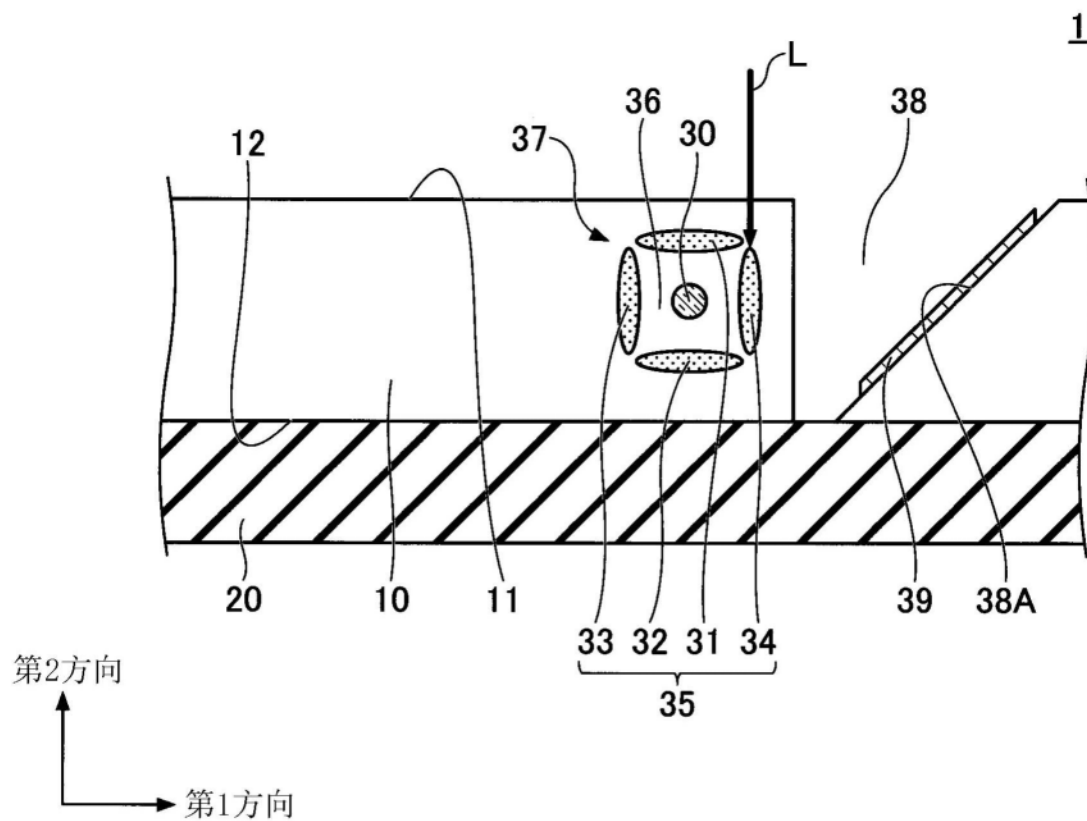


图19

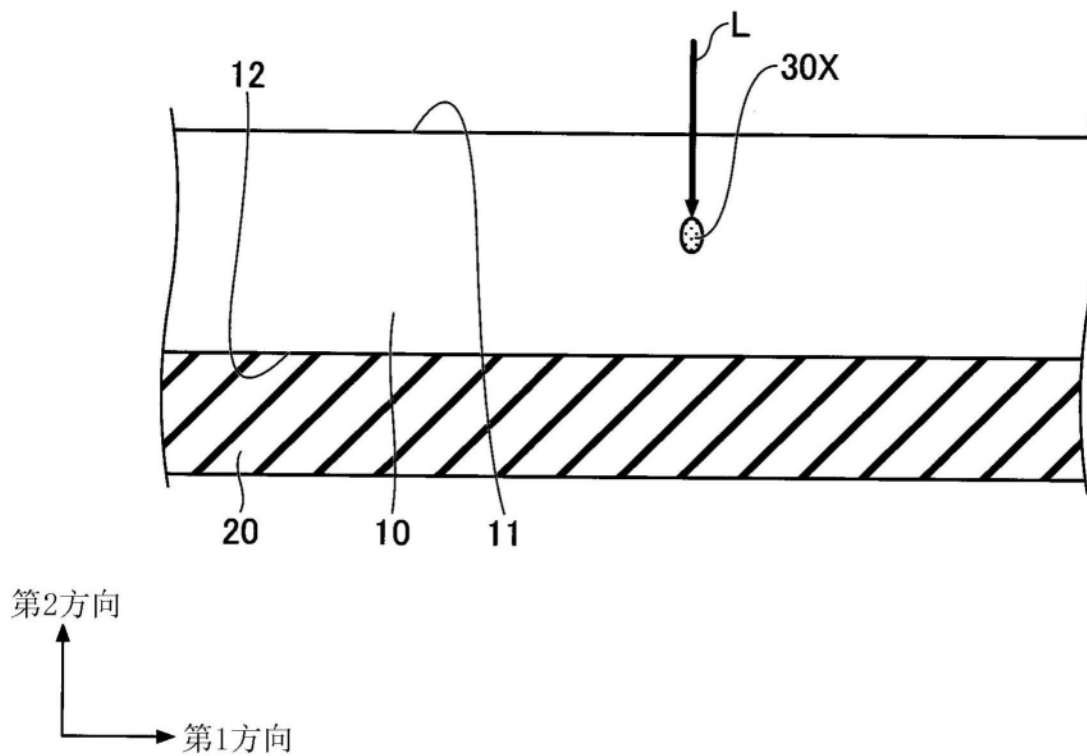


图20

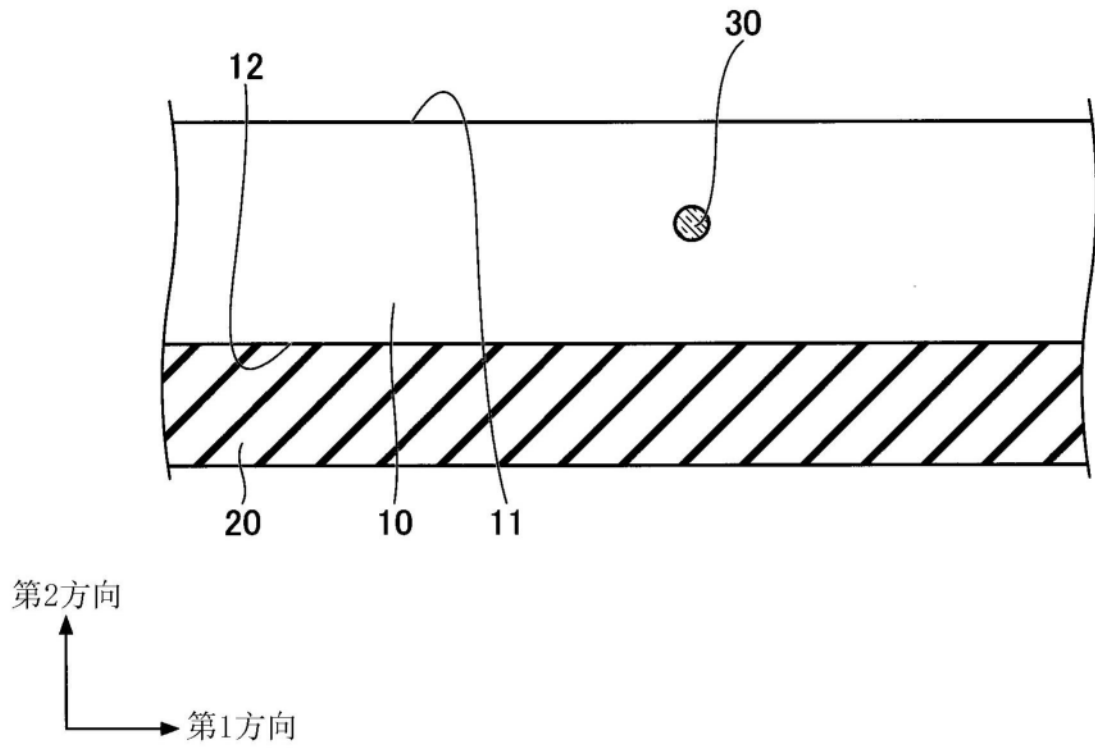


图21

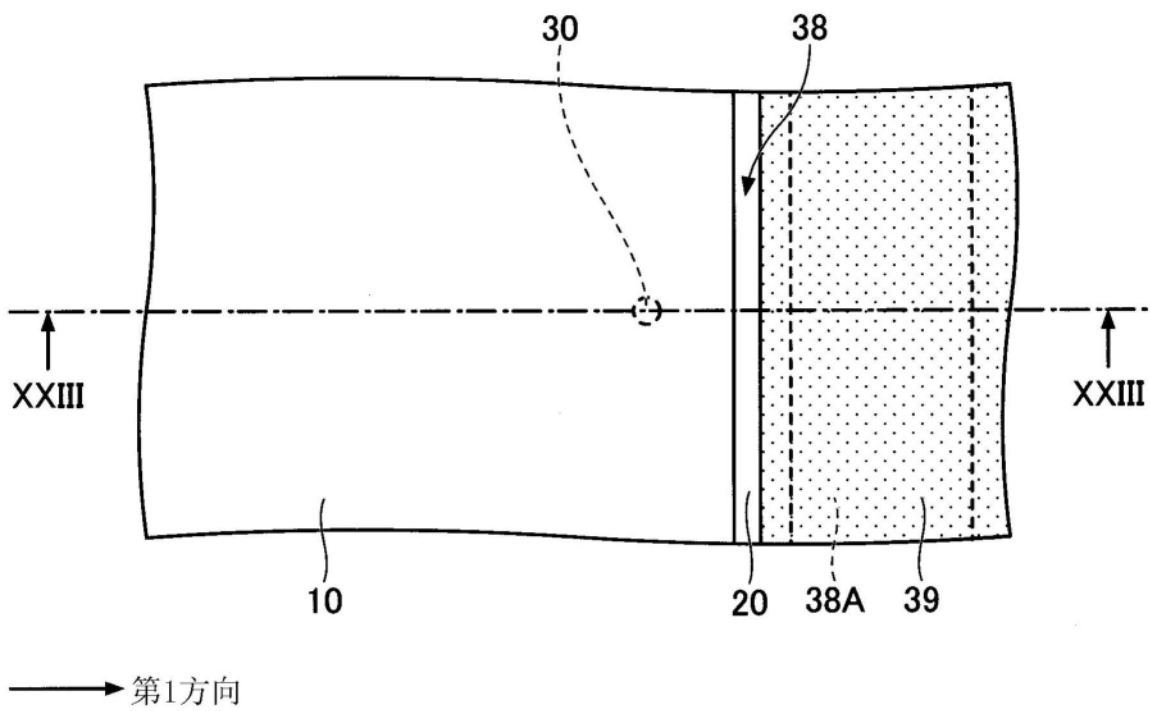


图22

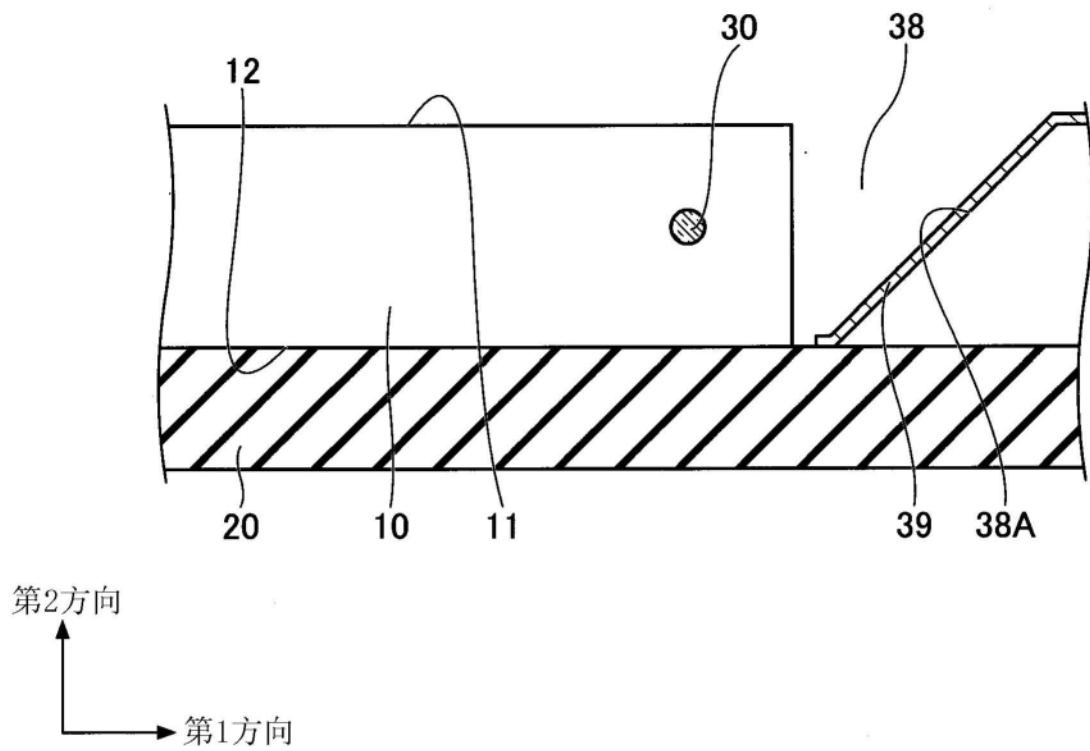


图23

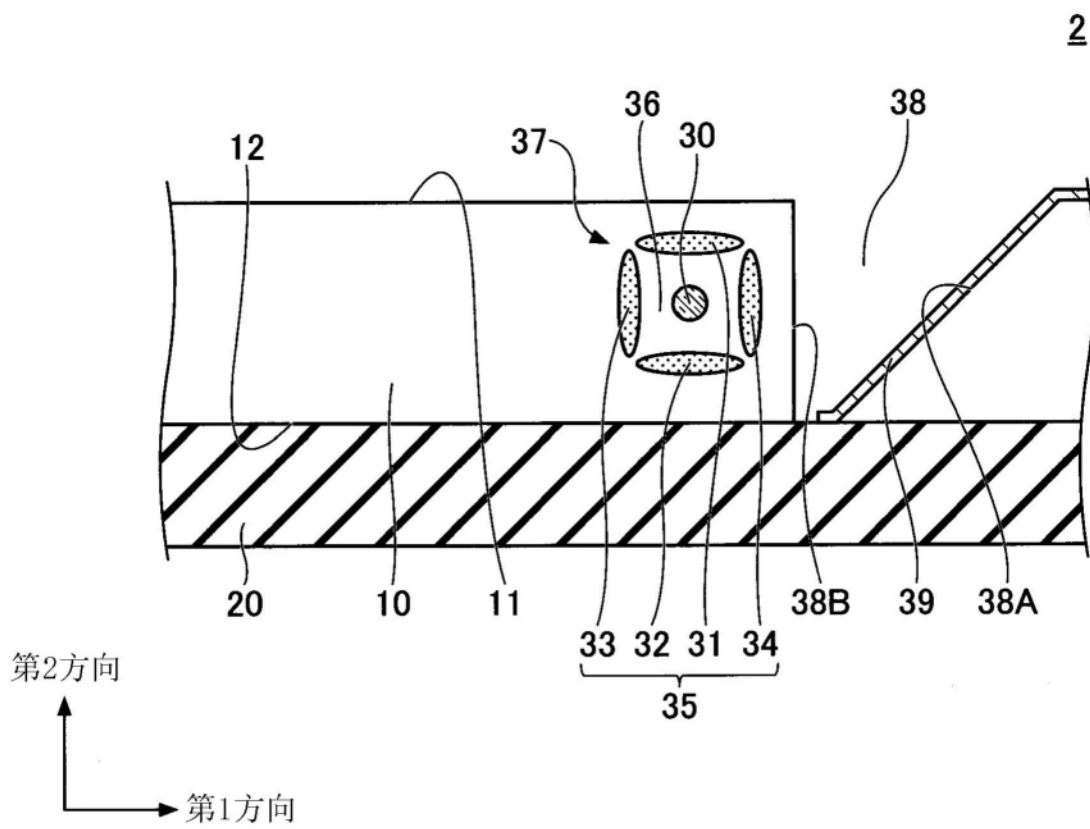


图24

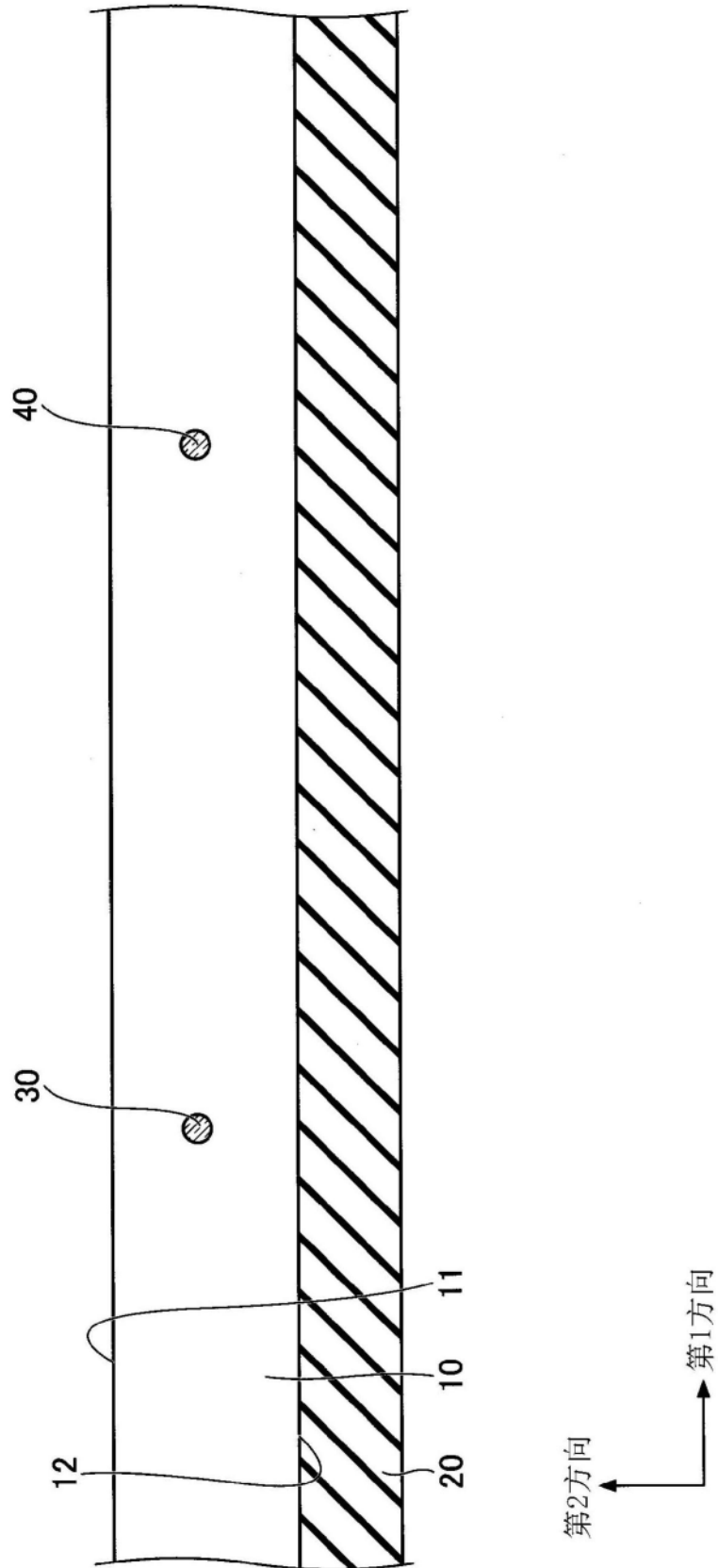


图25

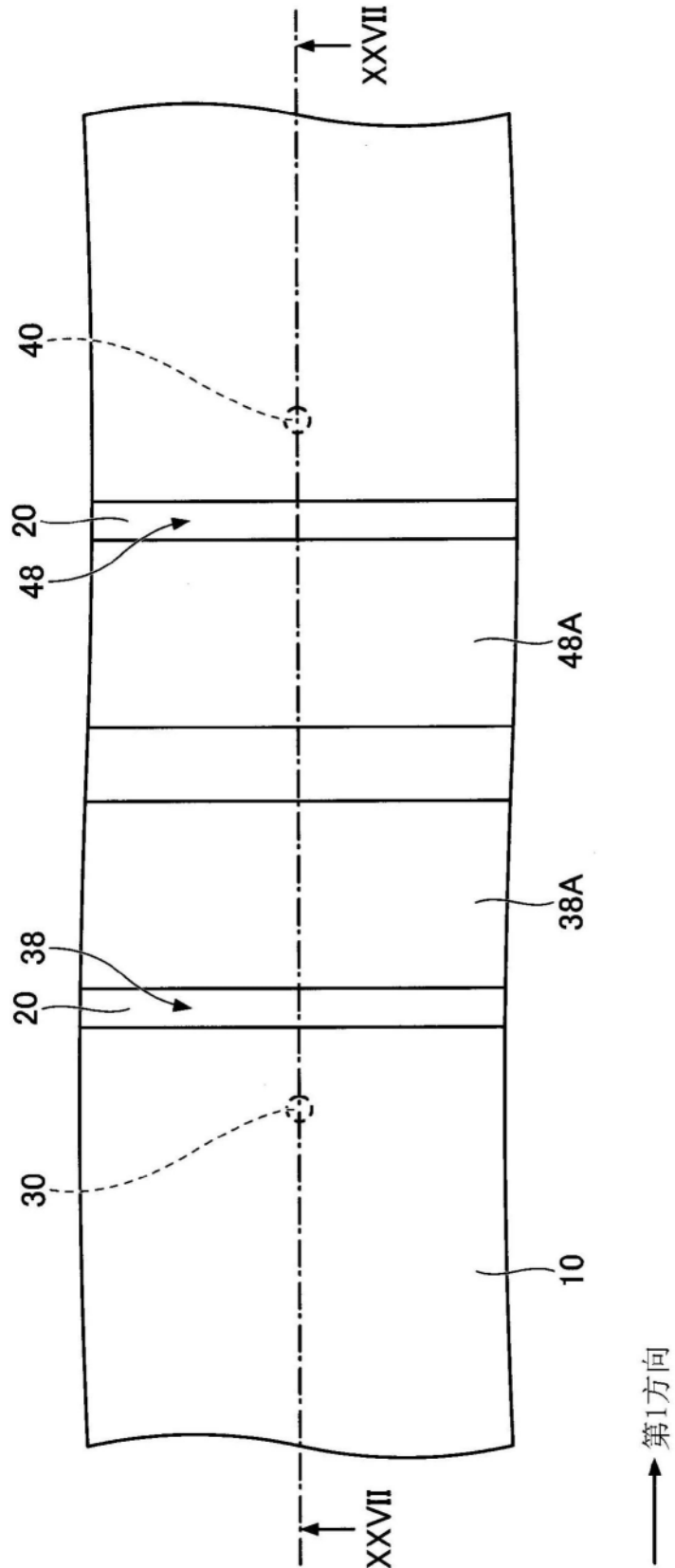


图26

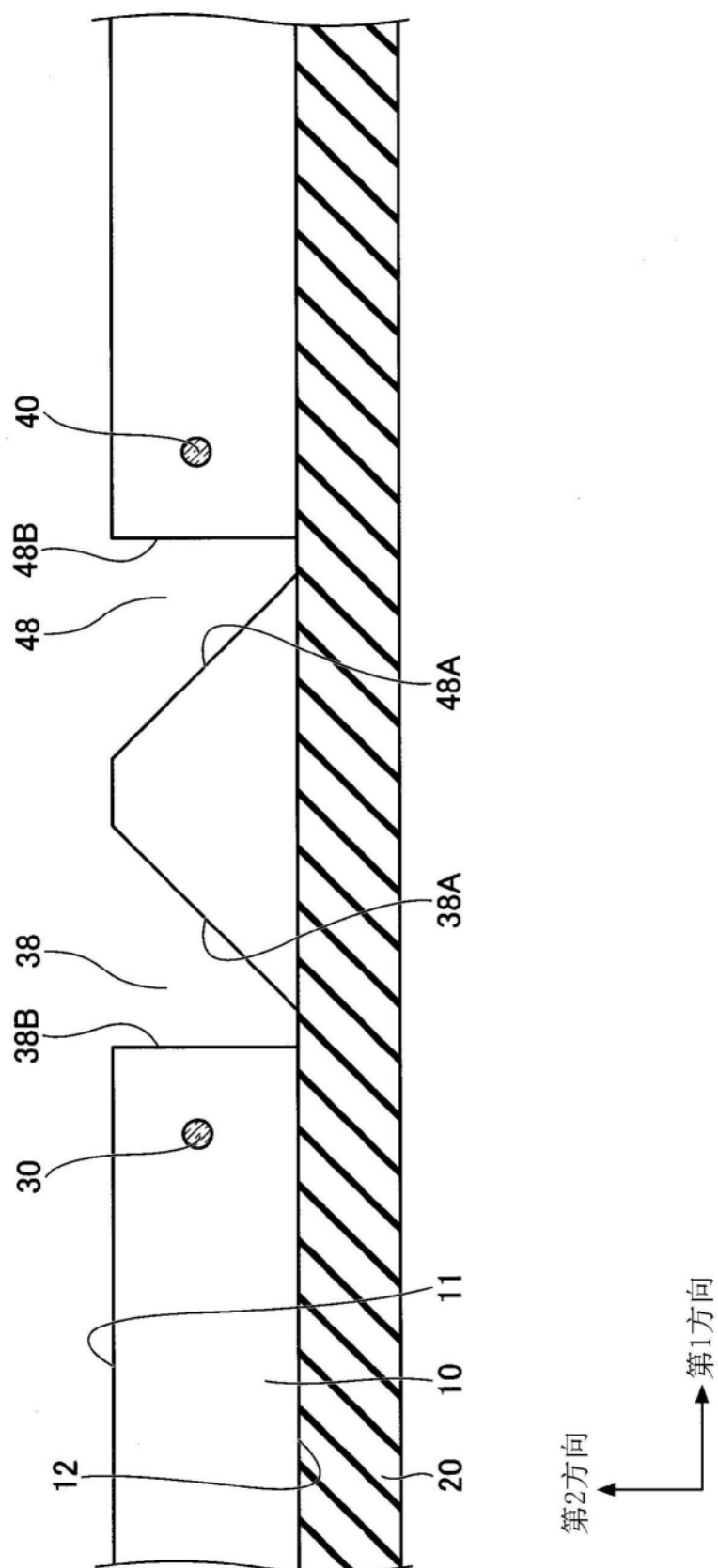


图27

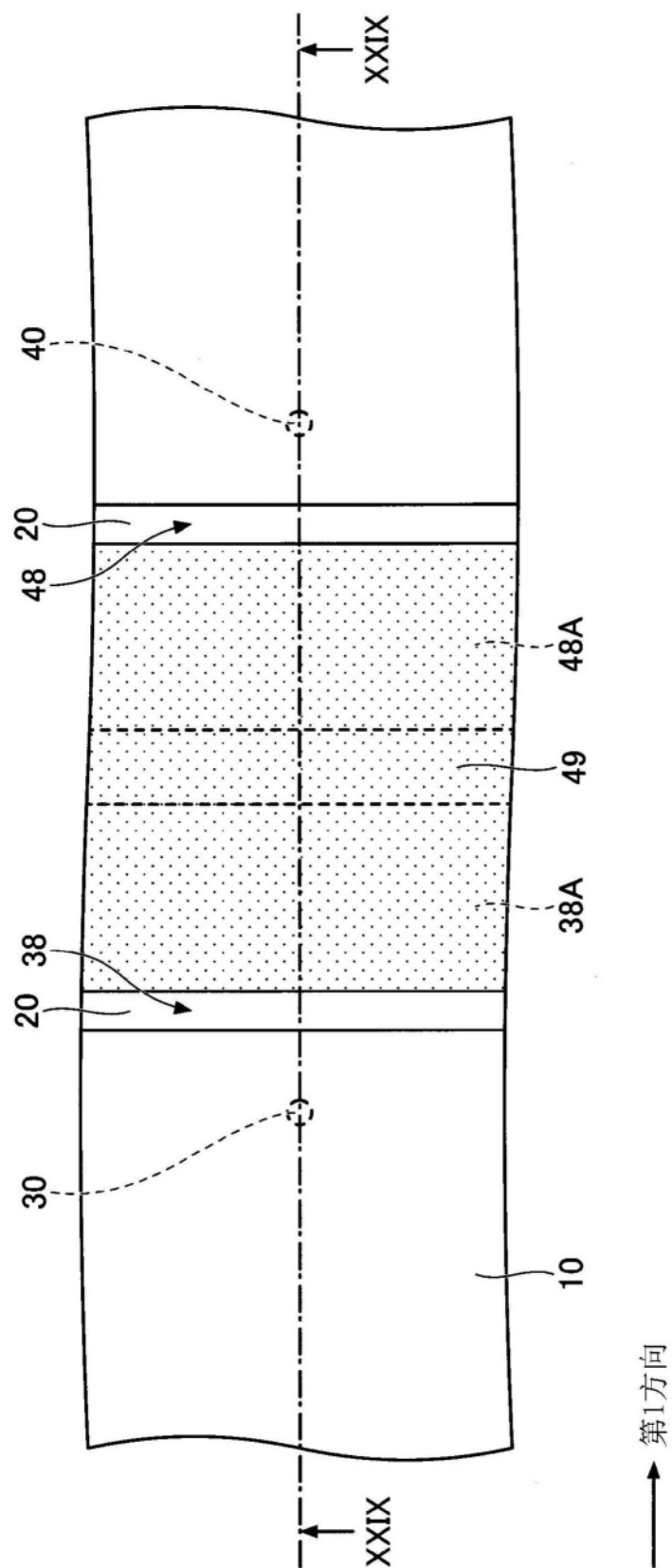


图28

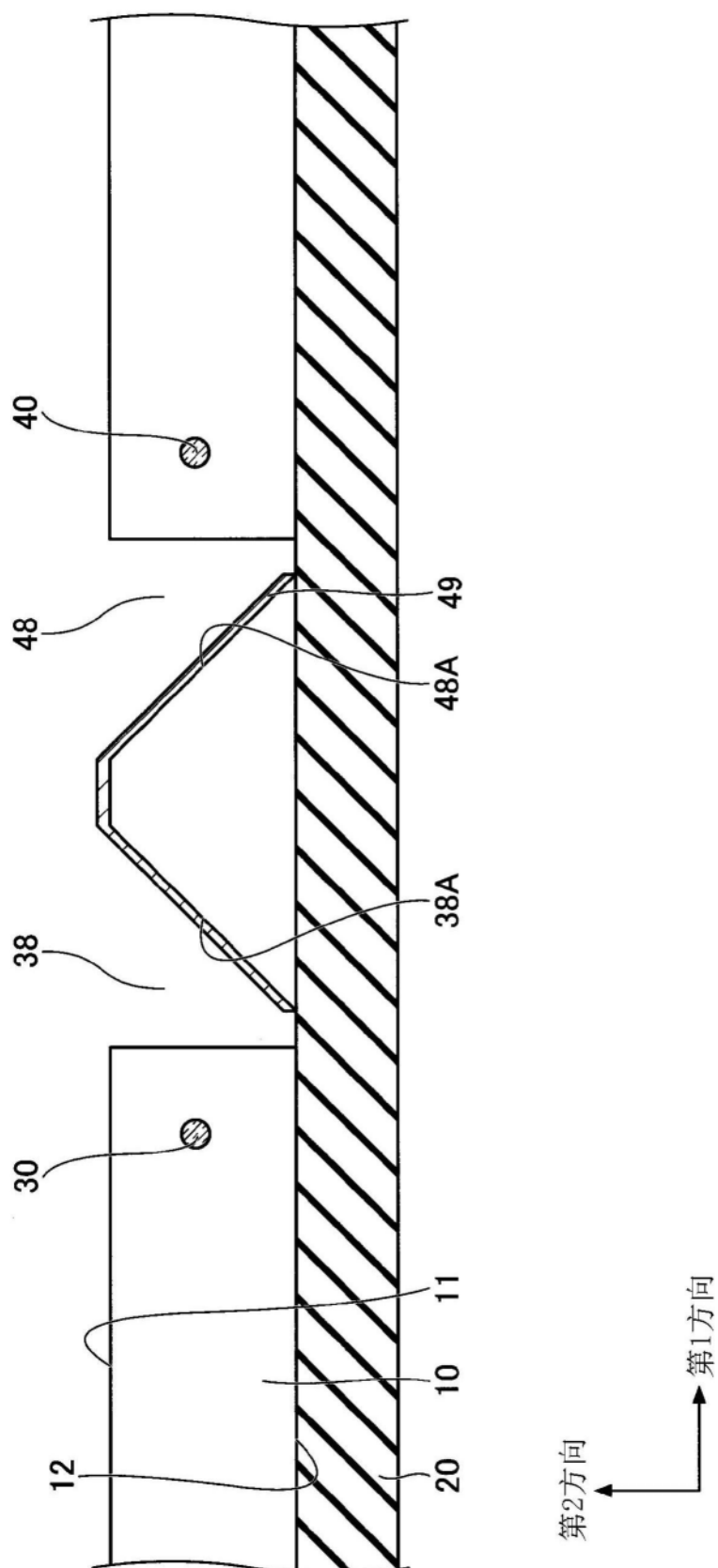


图29

3

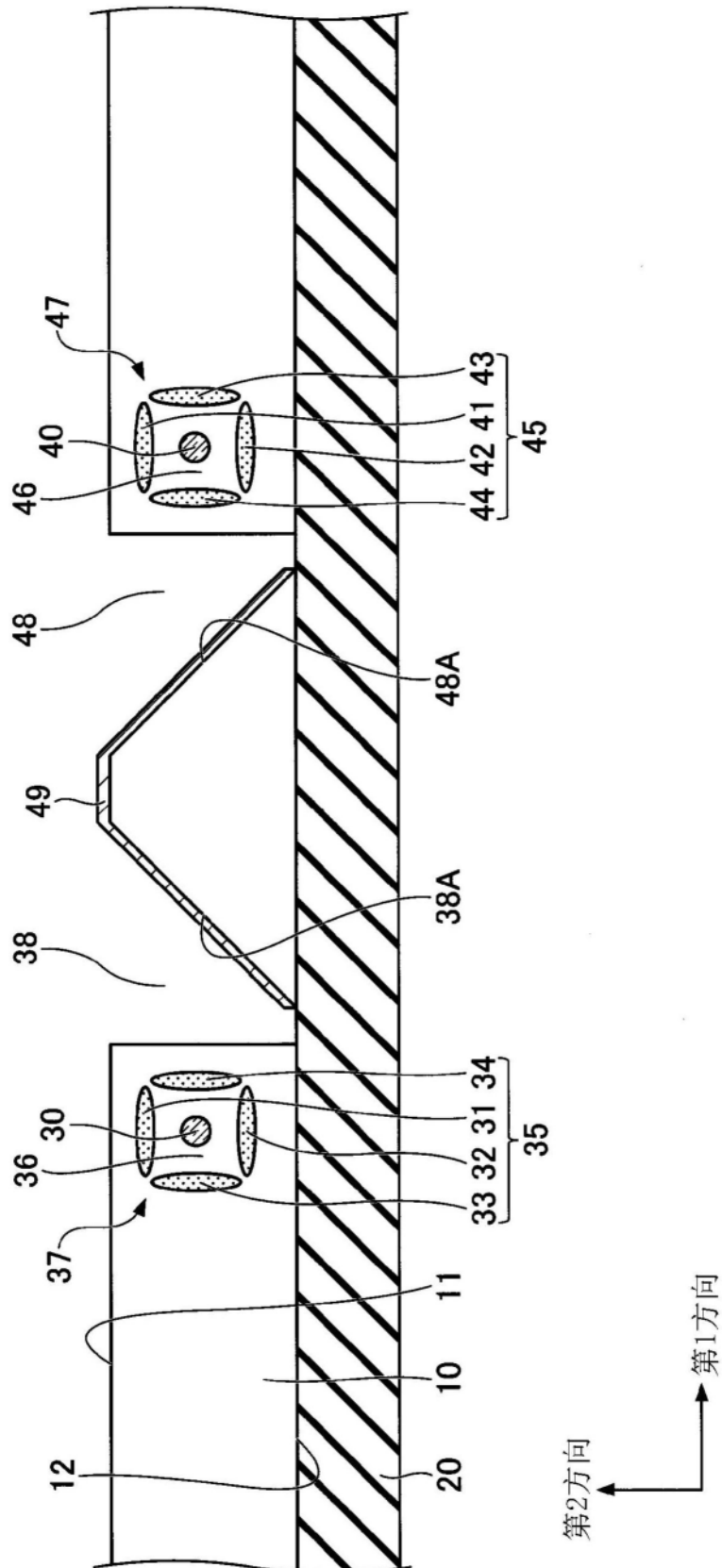


图30

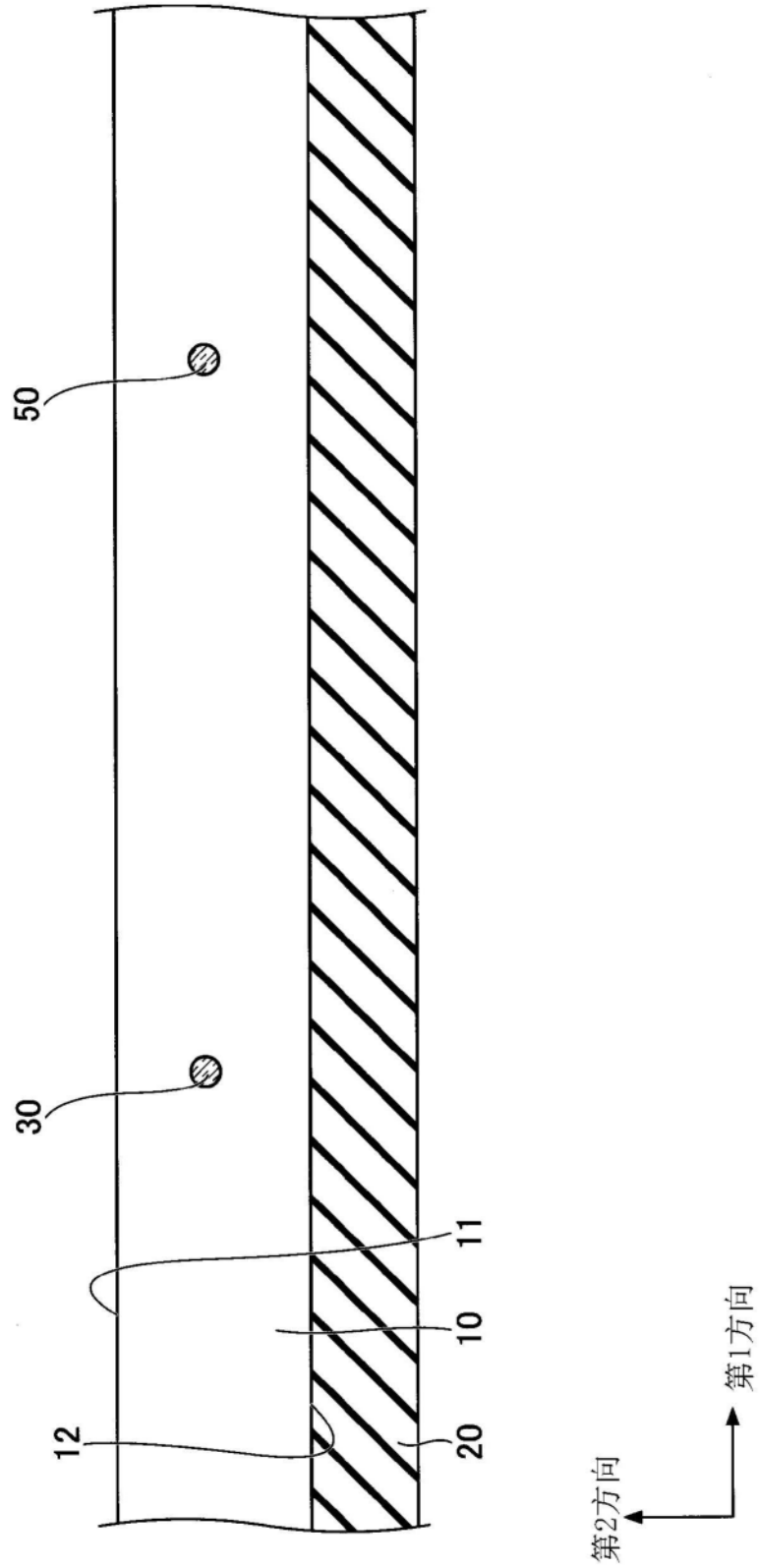


图31

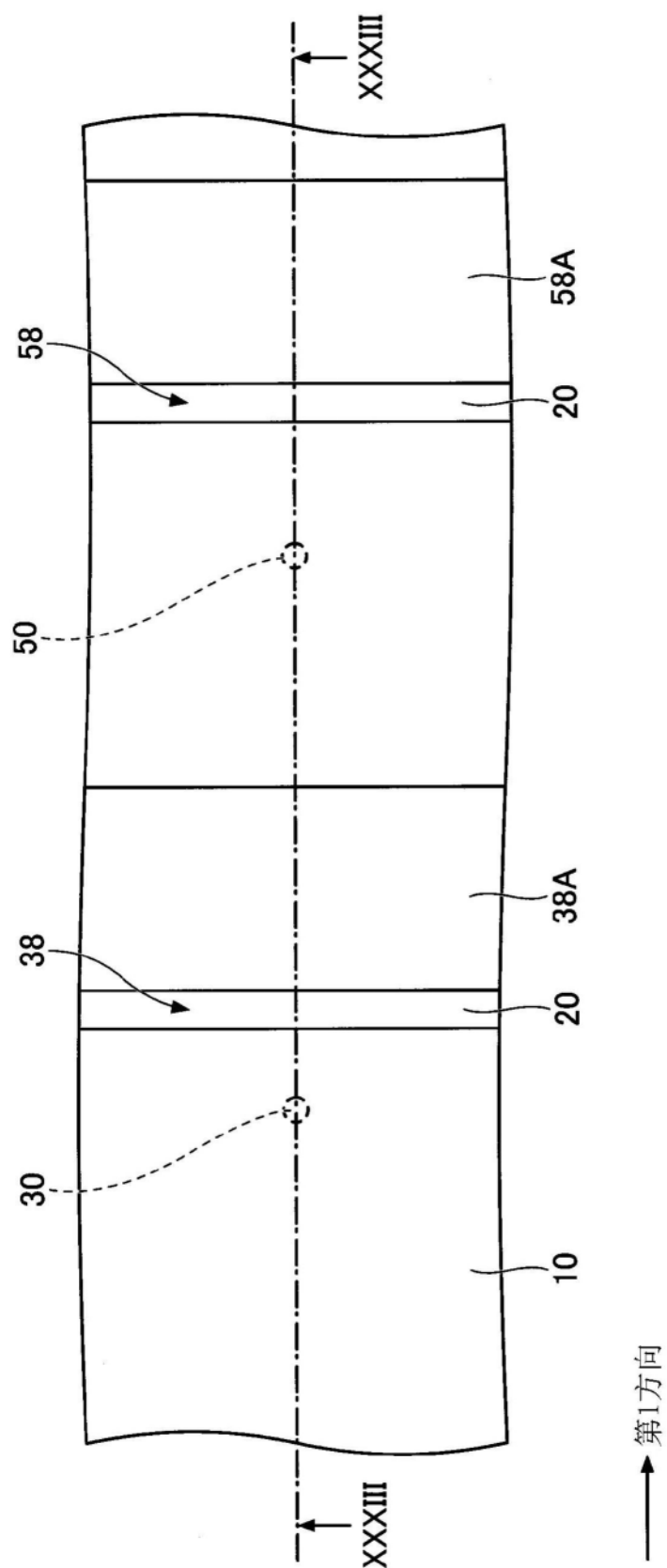


图32

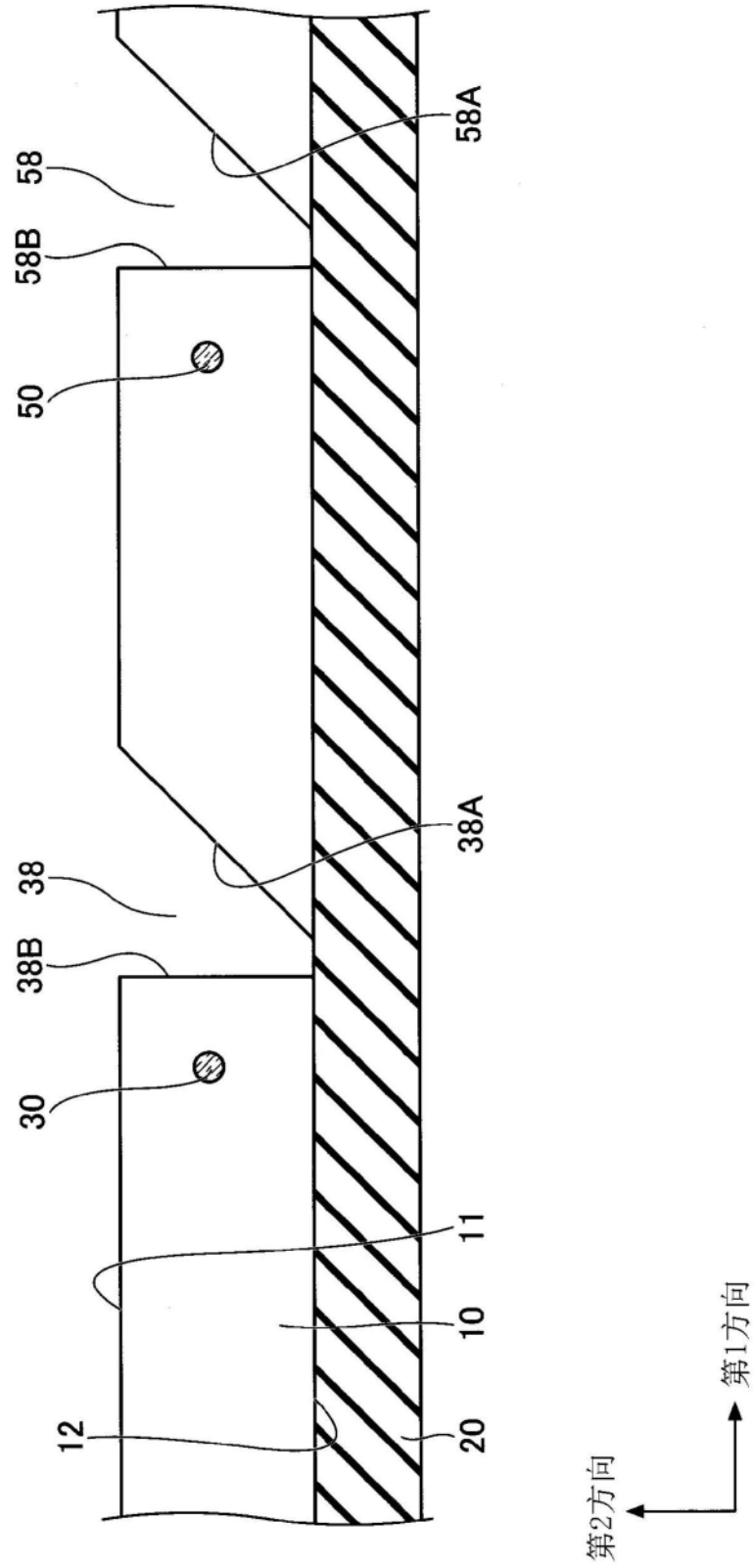


图33

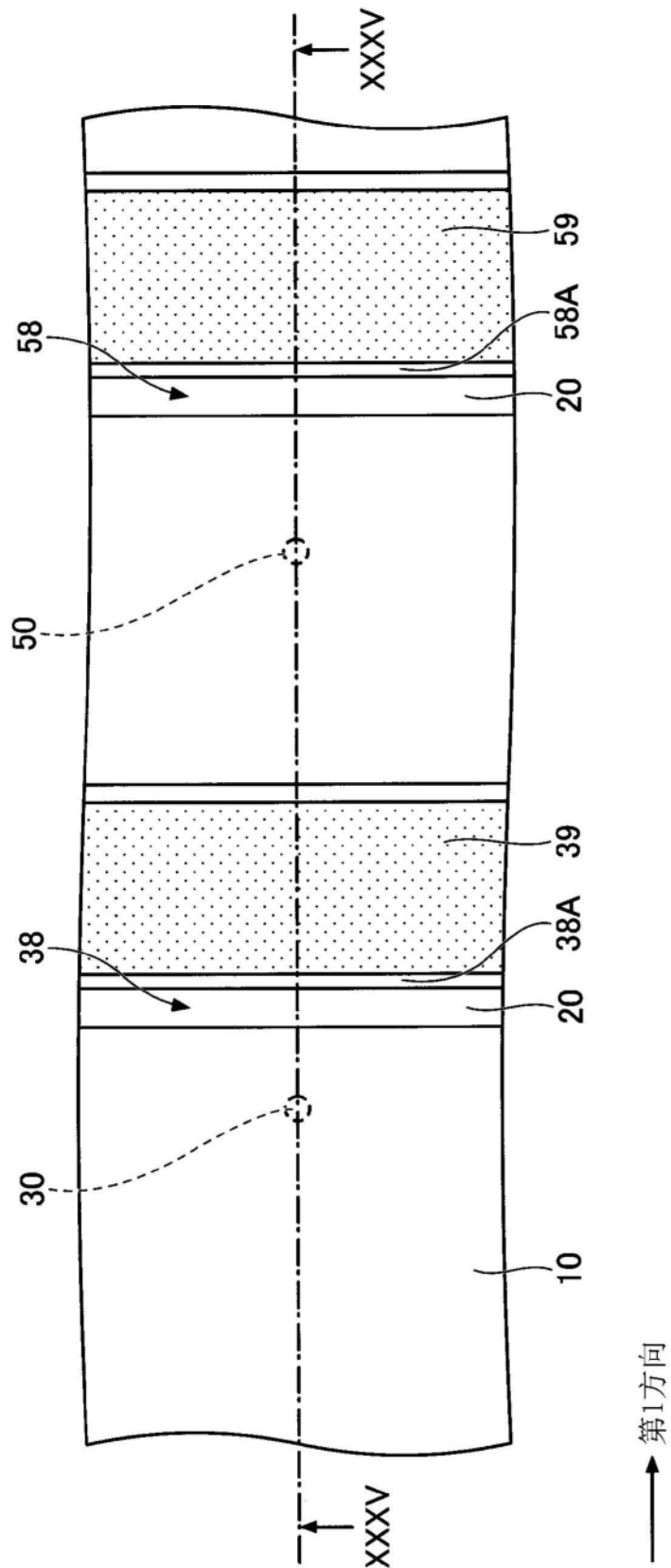


图34

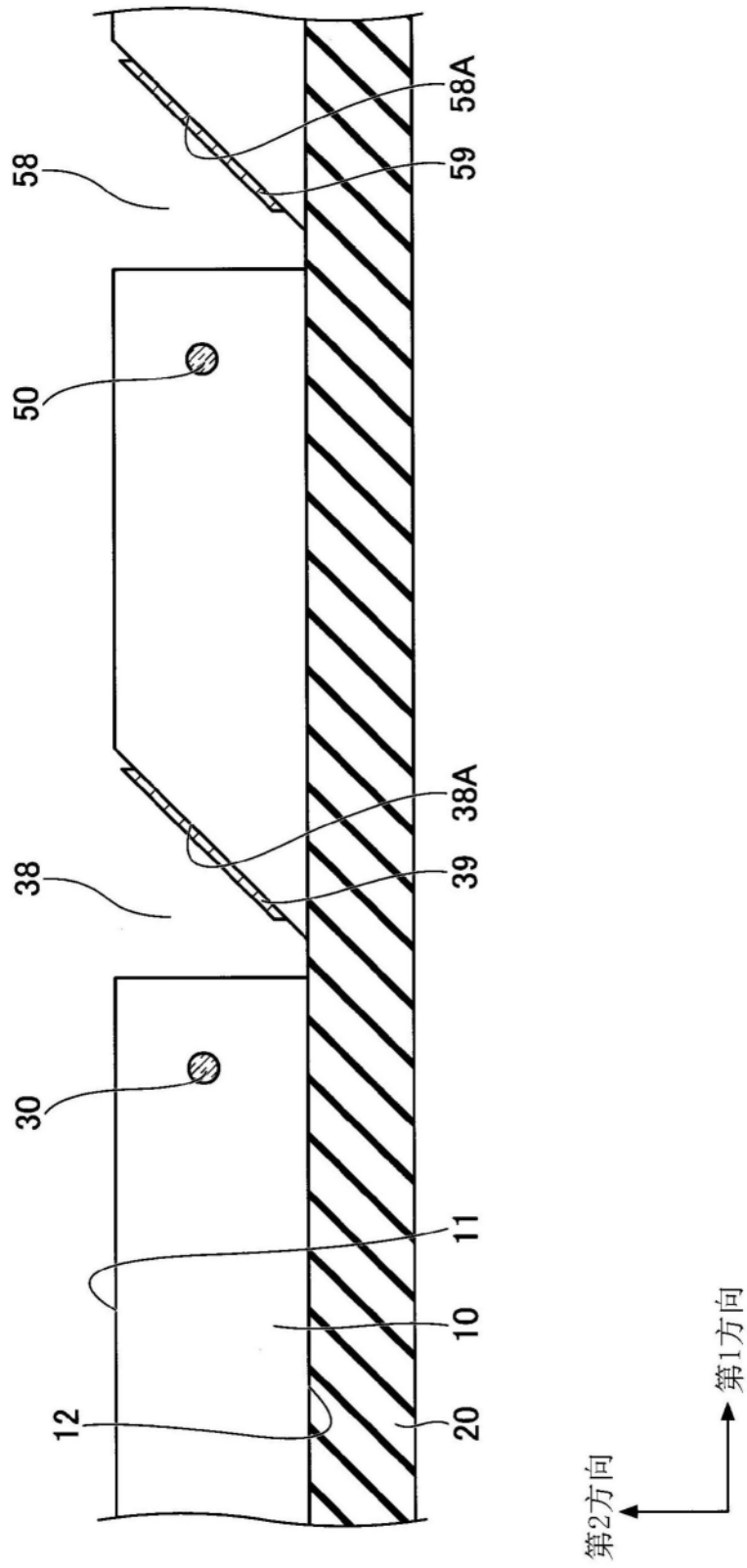


图35

4

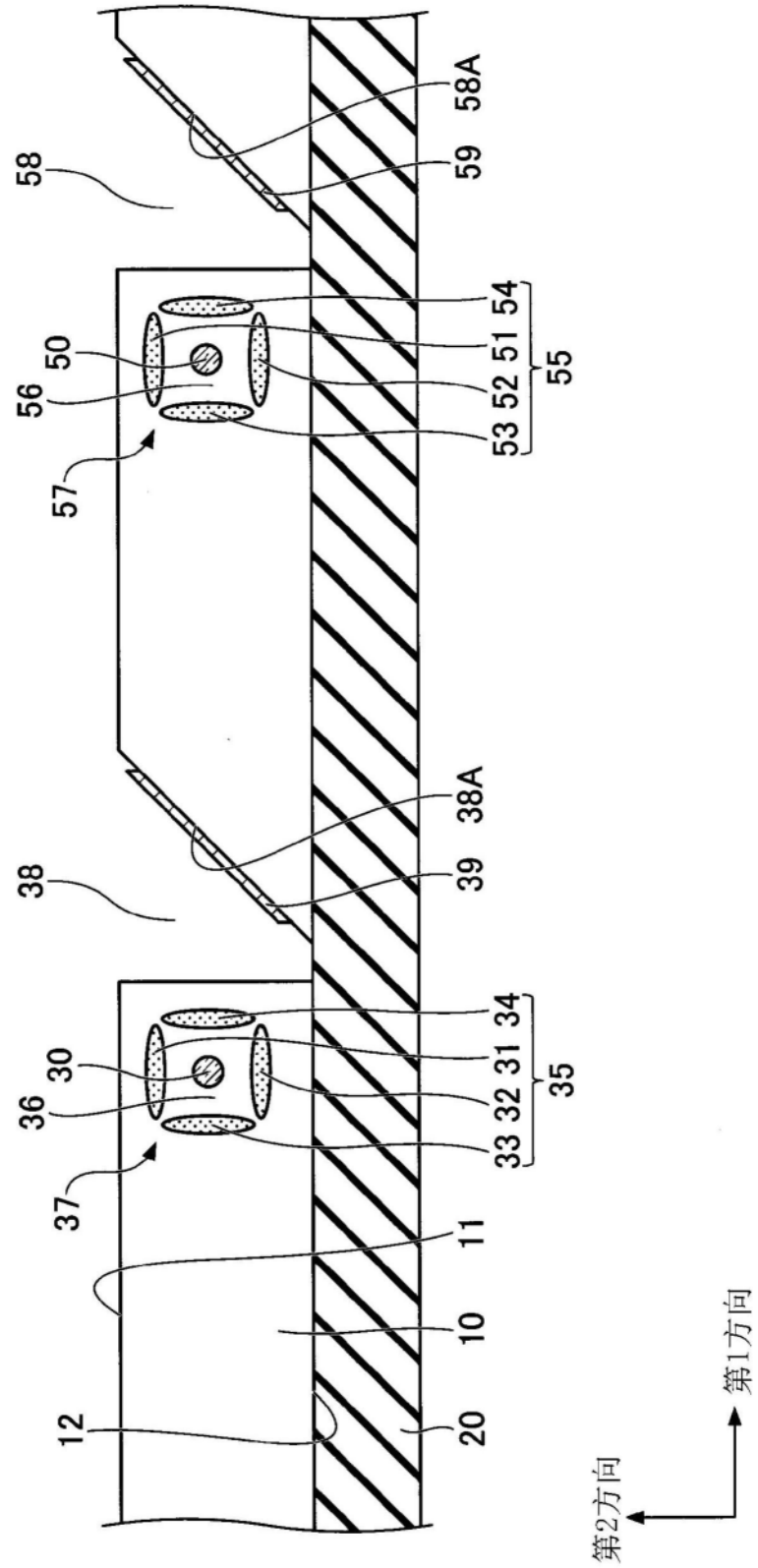


图36

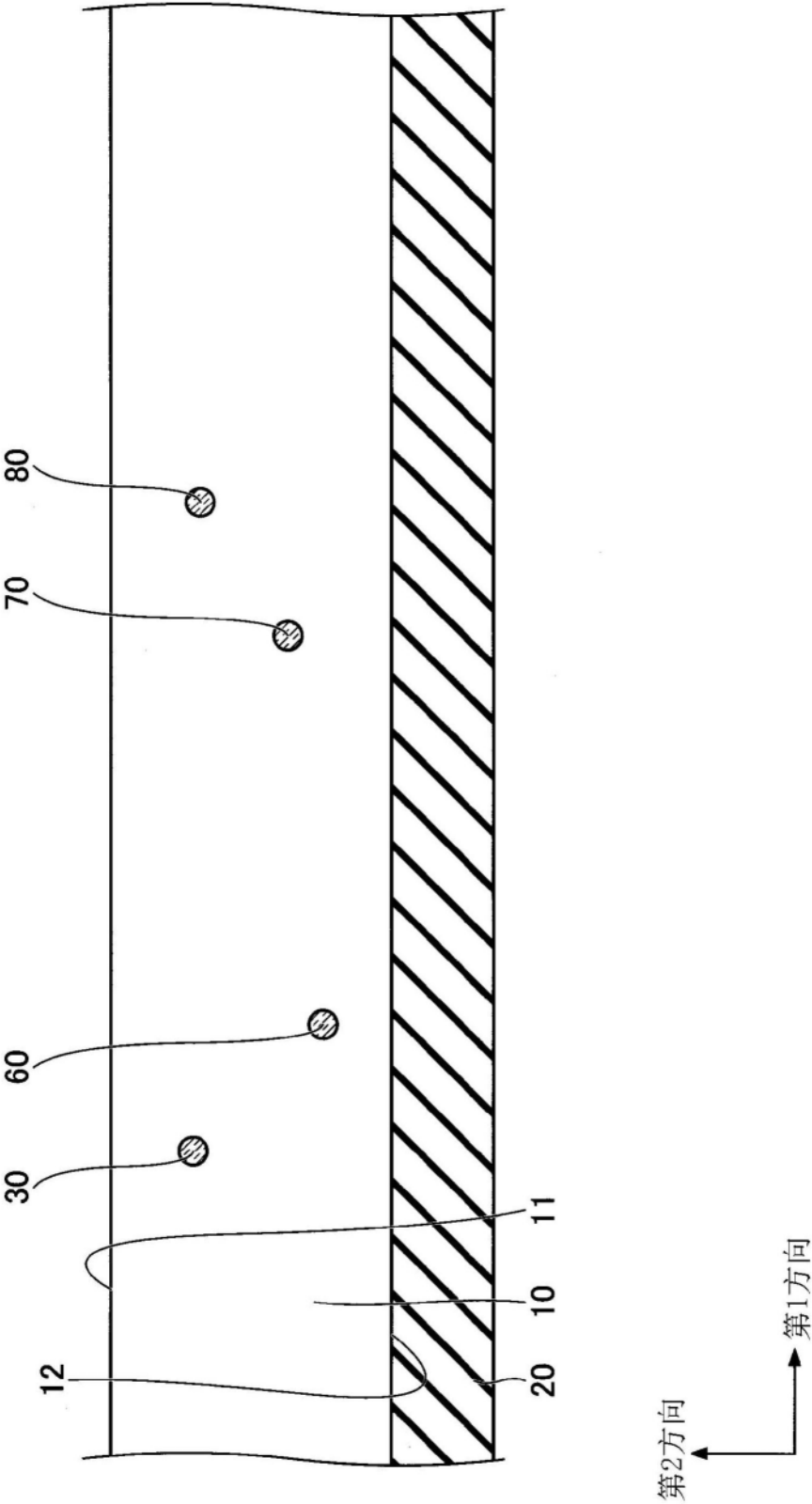


图37

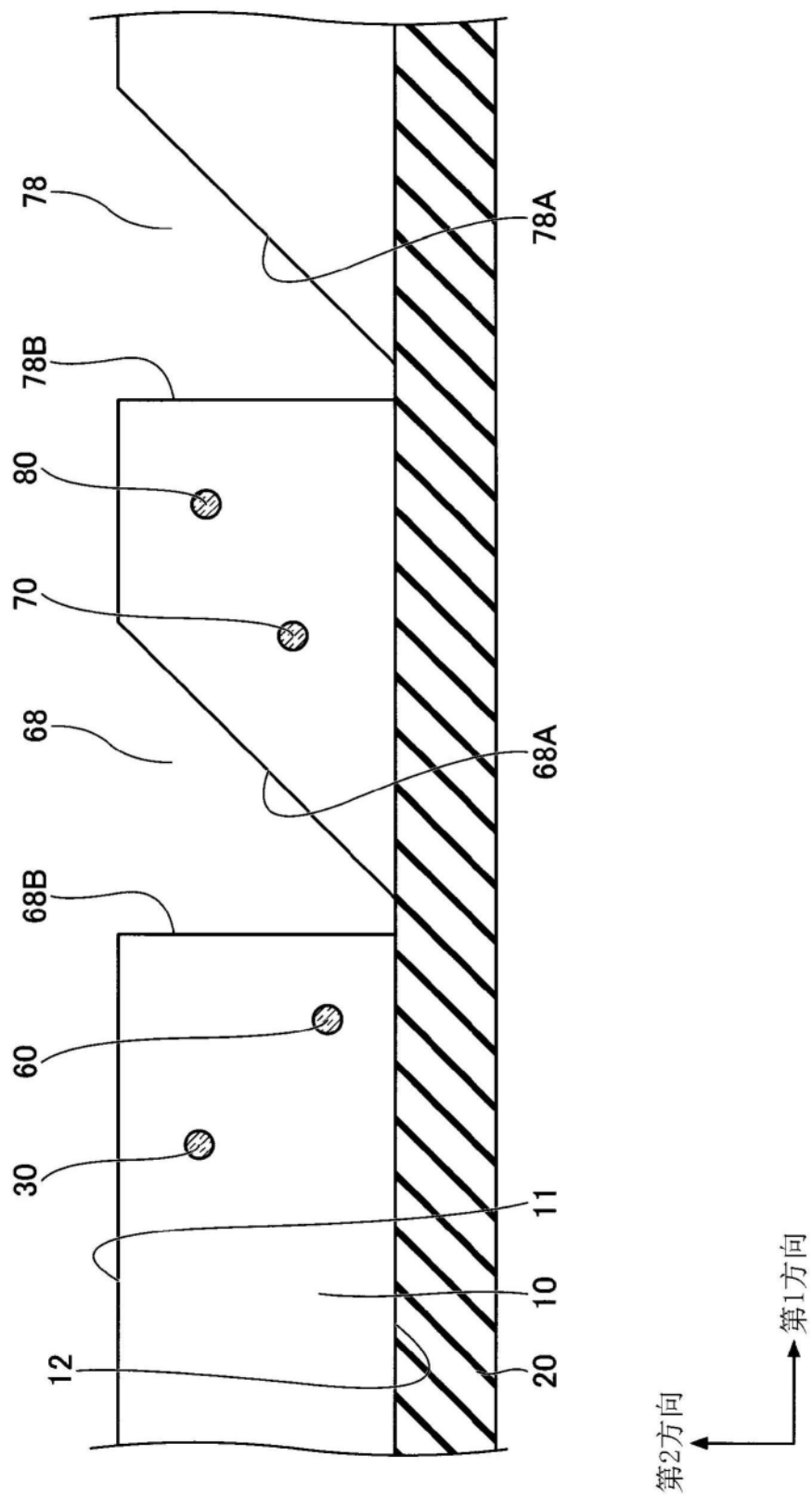


图38

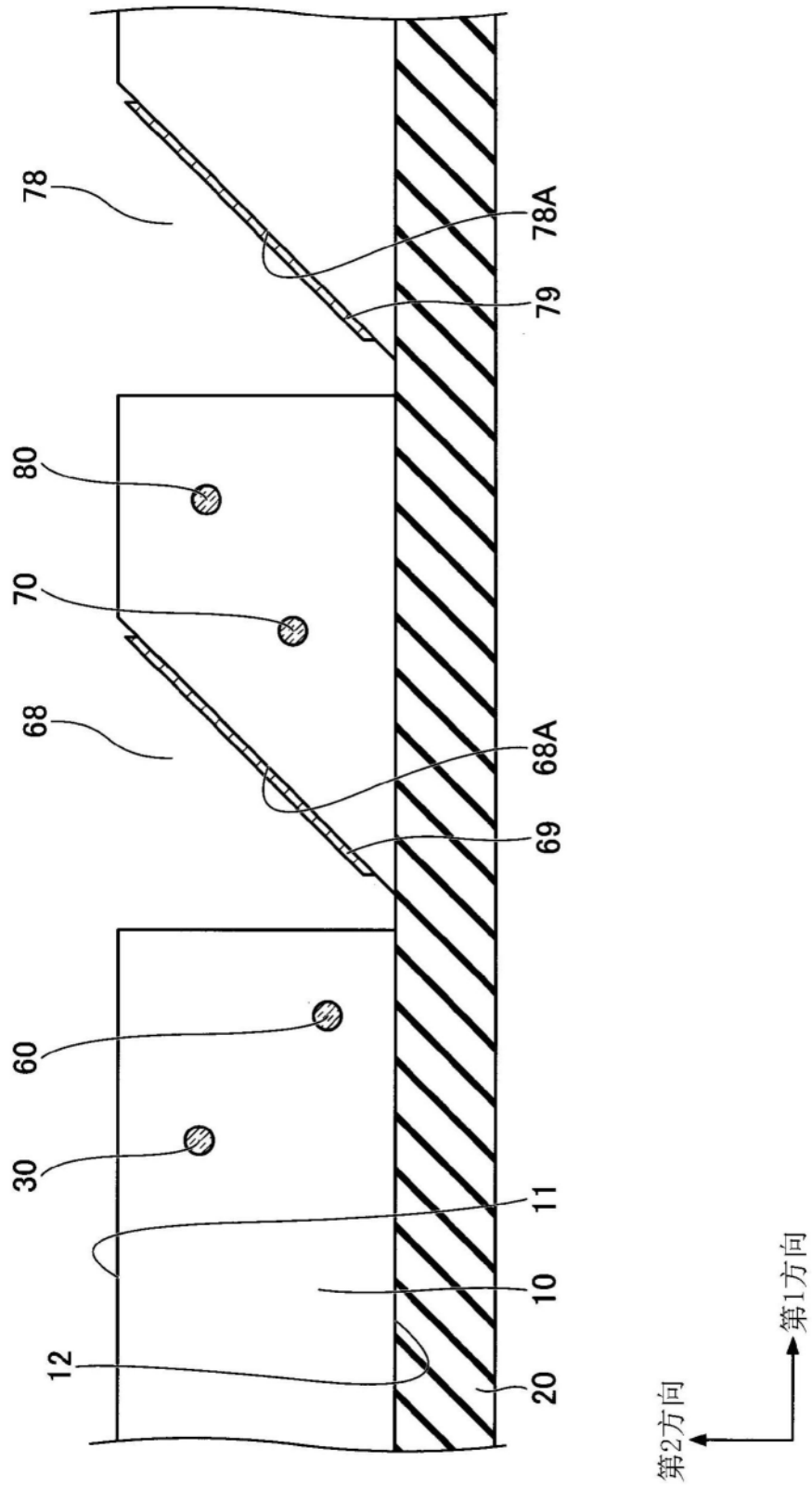


图39

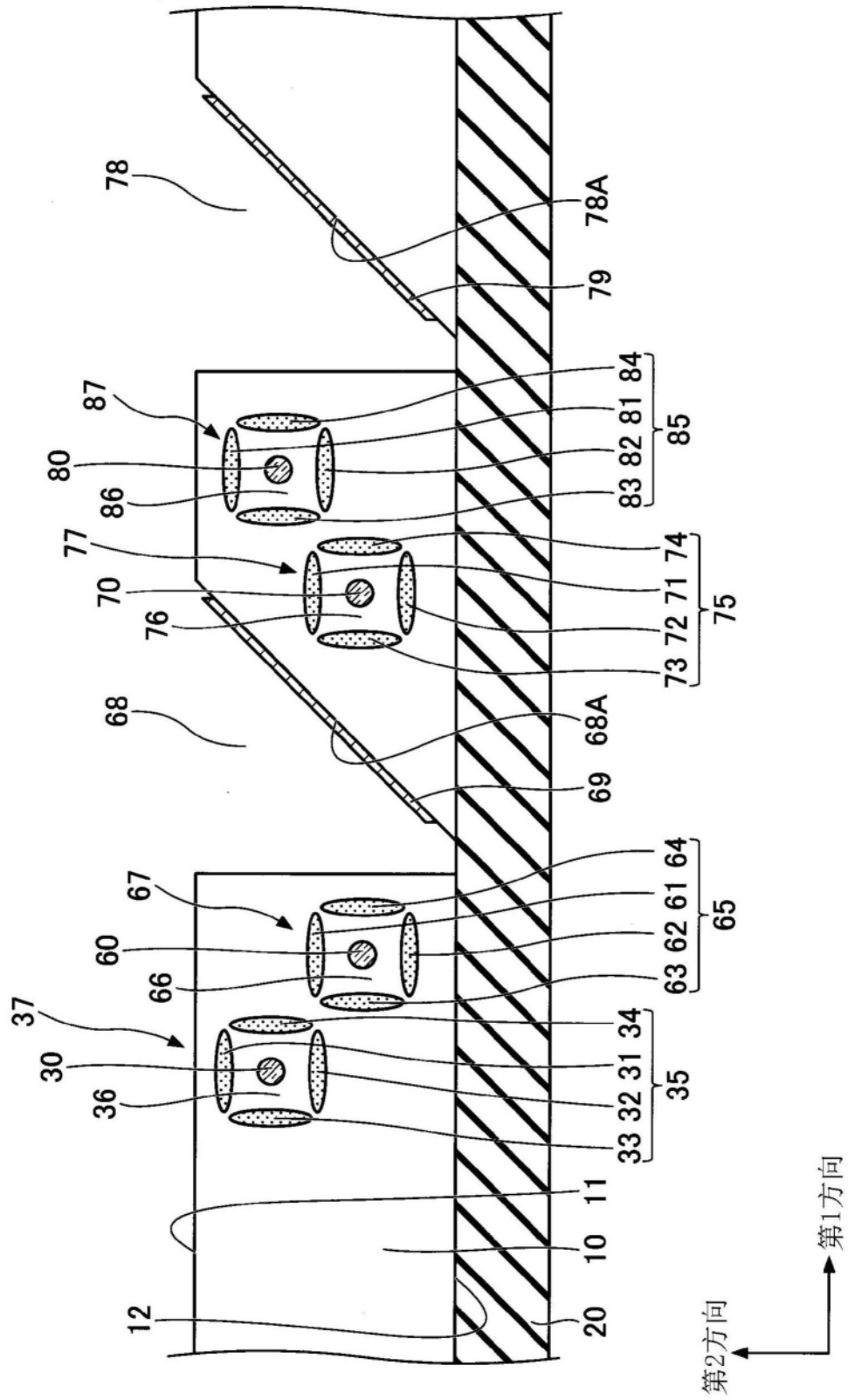


图40

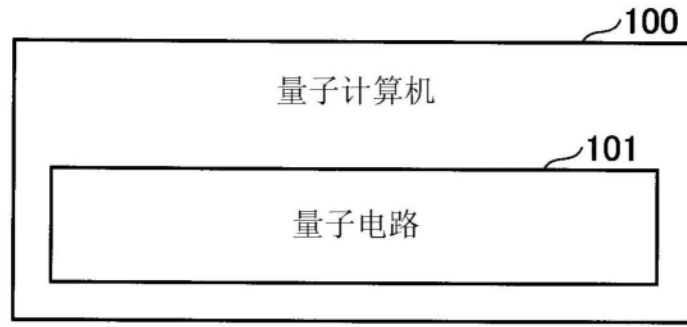


图41