(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109387820 A
(43)申请公布日 2019.02.26

(21)申请号 201810505285.2

(22)申请日 2018.05.24

(30)优先权数据
2017-153125 2017.08.08 JP

(71)申请人 松下知识产权经营株式会社
地址 日本大阪府

(72)发明人 平泽拓 荒濑秀和 稻田安寿

(74)专利代理机构 永新专利商标代理有限公司 72002
代理人 徐殿军

(51)Int.Cl.
G01S 7/481(2006.01)
G01S 17/08(2006.01)

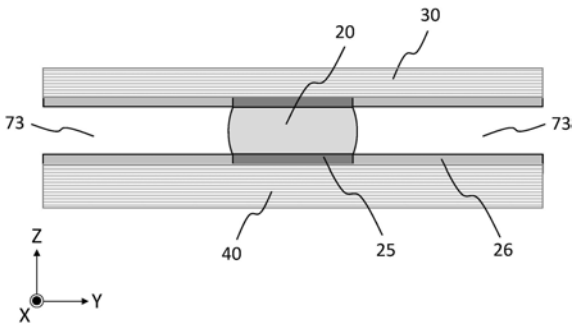
权利要求书4页 说明书47页 附图62页

(54)发明名称

光扫描设备、光接收设备及激光雷达系统

(57)摘要

提供一种能够进行光的扫描或接收的新的设备。光扫描设备具备:第1镜;第2镜,与上述第1镜对置;2个非波导区域,位于上述第1镜与第2镜之间;光波导区域,位于上述第1镜与第2镜之间且上述2个非波导区域之间,使光传播;第1调整元件。上述第1镜及第2镜分别包括与上述2个非波导区域相接的第1部分和与上述光波导区域相接的第2部分。上述第1镜及第2镜的各自的上述第1部分的表面能量比上述液体的表面能量小,并且比上述第1镜及第2镜的至少一方的上述第2部分的表面能量小。



CN 109387820 A

1.一种光扫描设备,其特征在于,

具备:

第1镜;

第2镜,与上述第1镜对置;

2个非波导区域,在上述第1镜与上述第2镜之间,在与上述第1镜及上述第2镜的至少一方的反射面平行的第1方向上隔开间隙排列;

光波导区域,位于上述第1镜与上述第2镜之间且上述2个非波导区域之间,具有比上述2个非波导区域各自的平均折射率高的平均折射率,使光沿着与上述第1镜及上述第2镜的上述至少一方的反射面平行且与上述第1方向垂直的第2方向传播;以及

第1调整元件,使上述光波导区域的折射率及厚度的至少一方变化;

上述光波导区域包含液体;

上述第1镜及上述第2镜分别包括与上述2个非波导区域相接的第1部分和与上述光波导区域相接的第2部分;

上述第1镜及上述第2镜各自的上述第1部分的表面能量比上述液体的表面能量小,并且比上述第1镜及上述第2镜的至少一方的上述第2部分的表面能量小;

上述第1镜具有比上述第2镜高的光透射率,使在上述光波导区域内传播的上述光的一部分从上述光波导区域向外部透射,作为射出光向与平行于上述第1方向及上述第2方向的虚拟平面交叉的第3方向射出;

上述第1调整元件通过使上述光波导区域的折射率及厚度的至少一方变化,从而使作为上述射出光的射出方向的上述第3方向变化。

2.如权利要求1所述的光扫描设备,其特征在于,

上述第1镜及上述第2镜各自的上述第1部分的上述表面能量比上述第1镜及上述第2镜各自的上述第2部分的上述表面能量小。

3.如权利要求1或2所述的光扫描设备,其特征在于,

上述第1镜及上述第2镜各自的上述第1部分的上述表面能量为5mJ/m^2以上40mJ/m^2以下。

4.如权利要求1～3中任一项所述的光扫描设备,其特征在于,

上述2个非波导区域分别是空气。

5.如权利要求1～4中任一项所述的光扫描设备,其特征在于,

上述第1调整元件具备连接至上述第1镜及上述第2镜的至少一方的致动器;

上述致动器通过使上述第1镜与上述第2镜的距离变化,从而使上述光波导区域的厚度变化。

6.如权利要求5所述的光扫描设备,其特征在于,

上述致动器包括压电部件,通过使上述压电部件变形,从而使上述第1镜与上述第2镜的距离变化。

7.如权利要求1～4中任一项所述的光扫描设备,其特征在于,

上述光波导区域包含液晶作为上述液体;

上述第1调整元件具备中间夹着上述光波导区域的一对电极,通过对上述一对电极施加电压,从而使上述光波导区域的折射率变化。

8.如权利要求1～7中任一项所述的光扫描设备，其特征在于，

上述第1镜及上述第2镜的至少一方包括多层反射膜。

9.如权利要求1～8中任一项所述的光扫描设备，其特征在于，

当设上述射出光的波数矢量的上述第2方向的成分为X成分时，

上述第1调整元件通过使上述光波导区域的上述折射率及上述厚度的至少一方变化，从而使上述波数矢量的X成分变化。

10.如权利要求1～9中任一项所述的光扫描设备，其特征在于，

具备：

多个光波导区域，包括上述光波导区域；以及

多个非波导区域，包括上述2个非波导区域；

上述多个光波导区域各自的平均折射率比上述多个非波导区域各自的平均折射率高；

上述多个光波导区域及上述多个非波导区域在上述第1镜与上述第2镜之间在上述第1方向上交替地排列。

11.如权利要求10所述的光扫描设备，其特征在于，

还具备：

多个移相器，分别连接到上述多个光波导区域，并且分别包括与上述多个光波导区域中的对应的1个直接相连或经由其他波导相连的波导；以及

第2调整元件，通过使从上述多个移相器向上述多个光波导区域传播的光的相位的差分别变化，从而使从上述多个光波导区域向外部射出的光的方向变化。

12.如权利要求11所述的光扫描设备，其特征在于，

各移相器的上述波导包含折射率对应于电压的施加或温度的变化而变化的材料；

上述第2调整元件通过对各移相器的上述波导施加电压、或使上述波导的温度变化，从而使上述波导内的折射率变化，并且使从上述多个移相器向上述多个光波导区域传播的光的相位的差分别变化。

13.如权利要求11或12所述的光扫描设备，其特征在于，

当设从上述多个光波导区域向外部射出的上述光的波数矢量的上述第1方向的成分为Y成分时，上述第2调整元件通过对各移相器的上述波导施加电压、或使上述波导的温度变化，从而使上述波数矢量的Y成分变化。

14.一种光扫描设备，其特征在于，

具备：

第1镜；

第2镜，与上述第1镜对置；

光波导区域，位于上述第1镜与上述第2镜之间，使光沿着与上述第1镜及上述第2镜的至少一方的反射面平行的方向传播；以及

第1调整元件，使上述光波导区域的折射率及厚度的至少一方变化；

上述光波导区域包含液体；

上述液体的表面能量比上述第1镜及上述第2镜的至少一方的与上述光波导区域相接的部分的表面能量小；

上述第1镜具有比上述第2镜高的光透射率，使在上述光波导区域内传播的上述光的一

部分从上述光波导区域向外部透射，作为射出光向与上述第1镜的反射面交叉的方向射出；

上述第1调整元件通过使上述光波导区域的折射率及厚度的至少一方变化，从而使上述射出光的射出方向变化。

15.一种光接收设备，其特征在于，

具备：

第1镜；

第2镜，与上述第1镜对置；

2个非波导区域，在上述第1镜与上述第2镜之间，在与上述第1镜及上述第2镜的至少一方的反射面平行的第1方向上隔开间隙排列；

光波导区域，位于上述第1镜与上述第2镜之间且上述2个非波导区域之间，具有比上述2个非波导区域各自的平均折射率高的平均折射率，使输入光沿着与上述第1镜及上述第2镜的上述至少一方的反射面平行且与上述第1方向垂直的第2方向传播；以及

第1调整元件，使上述光波导区域的折射率及厚度的至少一方变化；

上述光波导区域包含液体；

上述第1镜及上述第2镜分别包括与上述2个非波导区域相接的第1部分和与上述光波导区域相接的第2部分；

上述第1镜及上述第2镜各自的上述第1部分的表面能量比上述液体的表面能量小，并且比上述第1镜及上述第2镜的至少一方的上述第2部分的表面能量小；

上述第1镜具有比上述第2镜高的光透射率，使来自与平行于上述第1方向及上述第2方向的虚拟平面交叉的第3方向的入射光透射，并作为上述输入光向上述光波导区域输入；

上述第1调整元件通过使上述光波导区域的折射率及厚度的至少一方变化，从而使作为可接收的上述入射光的方向的上述第3方向变化。

16.如权利要求15所述的光接收设备，其特征在于，

具备：

多个光波导区域，包括上述光波导区域；以及

多个非波导区域，包括上述2个非波导区域；

上述多个光波导区域各自的平均折射率比上述多个非波导区域各自的平均折射率高；

上述多个光波导区域及上述多个非波导区域在上述第1镜与上述第2镜之间在上述第1方向上交替地排列。

17.如权利要求16所述的光接收设备，其特征在于，

还具备：

多个移相器，分别连接到上述多个光波导区域，并且分别包括与上述多个光波导区域中的对应的1个直接相连或经由其他波导相连的波导；以及

第2调整元件，通过使从上述多个光波导区域穿过上述多个移相器而输出的光的相位的差分别变化，从而使在上述多个光波导区域中可接收的光的方向变化。

18.一种激光雷达即LiDAR系统，其特征在于，

具备：

权利要求1～14中任一项所述的光扫描设备；

光检测器，检测从上述光扫描设备射出并从对象物反射的光；以及

信号处理电路,基于上述光检测器的输出,生成距离分布数据。

光扫描设备、光接收设备及激光雷达系统

技术领域

[0001] 本公开涉及光扫描设备、光接收设备及激光雷达系统。

背景技术

[0002] 以往提出了能够用光对空间进行扫描(scan)的各种各样的设备。

[0003] 专利文献1公开了一种能够使用使镜旋转的驱动装置进行光的扫描的结构。

[0004] 专利文献2公开了一种具有二维地排列的多个纳米光学天线元件的光相控阵列。公开了以下技术:各个天线元件与可变光延迟线(移相器)光学地耦合。在该光相控阵列中,将相干光束用波导向各个天线元件引导,由移相器改变光束的相位。由此,能够使远场辐射图(far field radiation pattern)的振幅分布变化。

[0005] 专利文献3公开了一种光偏转元件,具备:波导,具备光在内部中导波的光波导层、以及在光波导层的上表面及下表面形成的第1分布布拉格镜;光入射口,用来使光向波导内入射;光射出口,为了使从光入射口入射并在波导内导波的光射出而形成在波导的表面上。

[0006] 现有技术文献

[0007] 专利文献

[0008] 专利文献1:国际公开第2013/168266号

[0009] 专利文献2:日本特表2016－508235号公报

[0010] 专利文献3:日本特开2013－16591号公报

发明内容

[0011] 本公开的目的是提供一种进行光的扫描的新的光扫描设备。

[0012] 有关本公开的一技术方案的光扫描设备具备:第1镜;第2镜,与上述第1镜对置;2个非波导区域,在上述第1镜与上述第2镜之间,在与上述第1镜及上述第2镜的至少一方的反射面平行的第1方向上隔开间隙排列;光波导区域,位于上述第1镜与上述第2镜之间且上述2个非波导区域之间,具有比上述2个非波导区域各自的平均折射率高的平均折射率,使光沿着与上述第1镜及上述第2镜的上述至少一方的反射面平行且与上述第1方向垂直的第2方向传播;第1调整元件,使上述光波导区域的折射率及厚度的至少一方变化。上述光波导区域包含液体。上述第1镜及上述第2镜分别包括与上述2个非波导区域接触的第1部分和与上述光波导区域接触的第2部分。上述第1镜及上述第2镜各自的上述第1部分的表面能量比上述液体的表面能量小,并且比上述第1镜及上述第2镜的至少一方的上述第2部分的表面能量小。上述第1镜具有比上述第2镜高的光透射率,使在上述光波导区域内传播的上述光的一部分从上述光波导区域向外部透射,作为射出光向与平行于上述第1方向及上述第2方向的虚拟平面交叉的第3方向射出。上述第1调整元件通过使上述光波导区域的折射率及厚度的至少一方变化,使作为上述射出光的射出方向的上述第3方向变化。

[0013] 本公开的包含性或具体的技术方案也可以通过设备、系统、方法或它们的任意的组合来实现。

[0014] 根据本公开的一技术方案,能够实现光的扫描。

附图说明

[0015] 图1是示意地表示本公开的例示性的实施方式的光扫描设备的结构的立体图。

[0016] 图2是示意地表示1个波导元件的截面的构造及传播的光的例子的图。

[0017] 图3是示意地表示在模拟中使用的计算模型的图。

[0018] 图4A表示光波导层的一例的计算折射率与光的射出角度的关系的结果。

[0019] 图4B表示计算了光波导层的其他的例子中的折射率与光的射出角度的关系的结果。

[0020] 图5是示意地表示光扫描设备的例子的图。

[0021] 图6A是示意地表示光被输入到波导元件中的结构的例子的截面图。

[0022] 图6B是示意地表示光通过光纤7向波导元件入射的结构的例子的截面图。

[0023] 图7是表示使波导的折射率变化时的耦合效率的变化的曲线图。

[0024] 图8是示意地表示多个第1波导与多个第2波导的连接的图。

[0025] 图9是示意地表示在光波导层的两旁配置有隔离物的结构例的波导元件的截面图。

[0026] 图10是示意地表示波导阵列的结构例的光扫描设备的截面图。

[0027] 图11是示意地表示光波导层内的波导光的传播的图。

[0028] 图12是示意地表示本公开的例示性的实施方式的光扫描设备的构造的一部分的截面图。

[0029] 图13示意地表示光扫描设备的构造的另一例的截面图。

[0030] 图14是示意地表示光扫描设备的构造的再另一例的截面图。

[0031] 图15表示向由2个多层反射膜夹着的光波导层2的光的入射的一例。

[0032] 图16A表示经由光栅向第1波导导入光的例子。

[0033] 图16B表示从第1波导的端面输入光的例子。

[0034] 图16C表示从激光源向第1波导输入光的例子。

[0035] 图17表示从第1波导向第2波导的波导光的耦合效率的d_2依存性。

[0036] 图18表示其他例子中的耦合效率的d_2依存性。

[0037] 图19是将耦合效率为0.5以上的情况和耦合效率不到0.5的情况分类的图。

[0038] 图20是表示第1波导的光波导层的厚度方向的中心和第2波导的光波导层的厚度方向的中心错开的结构的图。

[0039] 图21是表示从第1波导向第2波导的光的耦合效率的Δz依存性的图。

[0040] 图22A表示又一例子中的耦合效率的d_2依存性。

[0041] 图22B表示又一例子中的耦合效率的d_2依存性。

[0042] 图23A是表示计算模型的图。

[0043] 图23B是表示光的传播的计算结果的图。

[0044] 图24A是表示其他的实施方式的光扫描设备的截面图。

[0045] 图24B是表示耦合效率的间隙宽度依存性的计算结果的图。

[0046] 图25A是表示将光沿垂直于波导阵列的射出面的方向射出的波导阵列的截面的

图。

[0047] 图25B是表示将光沿与垂直于波导阵列的射出面的方向不同的方向射出的波导阵列的截面的图。

[0048] 图26是示意地表示三维空间中的波导阵列的立体图。

[0049] 图27A是表示在p比λ大的情况下、从波导阵列射出衍射光的状况的示意图。

[0050] 图27B是表示在p比λ小的情况下、从波导阵列射出衍射光的状况的示意图。

[0051] 图27C是表示在p≒λ/2的情况下、从波导阵列射出衍射光的状况的示意图。

[0052] 图28是表示移相器被直接连接在波导元件上的结构的例子的示意图。

[0053] 图29是将波导阵列及移相器阵列从光射出面的法线方向观察的示意图。

[0054] 图30是示意地表示移相器的波导与波导元件的光波导层经由其他的波导相连的结构的例子的图。

[0055] 图31是在表示光分路器中插入了以级联状排列的多个移相器的结构例的图。

[0056] 图32A是示意地表示第1调整元件的结构的一例的立体图。

[0057] 图32B是示意地表示第1调整元件的其他的结构例的立体图。

[0058] 图32C是示意地表示第1调整元件的又一结构例的立体图。

[0059] 图33是表示将包括加热器的调整元件与波导元件组合的结构的例子的图。

[0060] 图34是表示由支承部件保持着镜的结构例的图。

[0061] 图35是表示使镜移动的结构的一例的图。

[0062] 图36是表示将电极配置在不妨碍光的传播的位置处的结构例的图。

[0063] 图37是表示压电元件的例子的图。

[0064] 图38A是表示具有单压电片的构造的支承部件的结构例的图。

[0065] 图38B是表示支承部件变形的状态的例子的图。

[0066] 图39A是表示具有双压电片的构造的支承部件的结构例的图。

[0067] 图39B是表示支承部件变形的状态的例子的图。

[0068] 图40是表示致动器的例子的图。

[0069] 图41A是用来说明支承部件的前端的倾斜的图。

[0070] 图41B是表示将伸缩的方向不同的2个单压电片型的支承部件串联地接合的例子的图。

[0071] 图42是表示将保持多个第1镜的支承部件用致动器一齐驱动的结构的例子的图。

[0072] 图43是表示多个波导元件的第1镜是1个板状的镜的结构例的图。

[0073] 图44是表示从各个波导元件的电极将布线共同地取出的结构的例子的图。

[0074] 图45是表示使一部分的电极及布线为共用的结构的例子的图。

[0075] 图46是表示对于多个波导元件配置了共用的电极的结构的例子的图。

[0076] 图47是示意地表示将配置移相器阵列的区域确保得较大、将波导阵列集成得较小的结构的例子的图。

[0077] 图48是表示2个移相器阵列分别被配置在波导阵列的两侧的结构例的图。

[0078] 图49A表示波导元件的排列方向及波导元件延伸的方向不正交的波导阵列的结构例。

[0079] 图49B表示波导元件的排列间隔不为一定的波导阵列的结构例。

[0080] 图50A是示意地表示实施方式的光扫描设备的图。

[0081] 图50B是图50A所示的光扫描设备的截面图。

[0082] 图50C是图50A所示的光扫描设备的其他的截面图。

[0083] 图51A是表示在第2镜与波导之间配置有电介质层的结构例的图。

[0084] 图51B是表示在第1波导之上还配置有第2电介质层的结构例的图。

[0085] 图52是表示第2镜没有配置在第1波导与基板之间的区域中的结构例的图。

[0086] 图53是表示第2镜在第1波导1与基板之间变薄的结构例的图。

[0087] 图54A是表示第2镜的厚度阶段式地变化的结构例的图。

[0088] 图54B是示意地表示上部电极、第1镜及第2基板跨越第1波导的保护层及第2波导的光波导层的上方而配置的结构例的图。

[0089] 图54C是表示图54B的结构例的制造过程的一部分的图。

[0090] 图55是表示多个第2波导的截面的图。

[0091] 图56是表示第1波导及第2波导是反射型波导的结构例的图。

[0092] 图57是表示上部电极被配置在第1镜的上方、下部电极被配置在第2镜的下方的结构例的图。

[0093] 图58是表示第1波导被分离为2个部分的例子的图。

[0094] 图59是表示电极被配置在各光波导层与邻接于各光波导层的光波导层之间的结构例的图。

[0095] 图60是表示第1镜较厚、第2镜较薄的结构例的图。

[0096] 图61是实施方式的光扫描设备的截面图。

[0097] 图62是表示光损失的比例与y_1的关系的图。

[0098] 图63是示意地表示实施方式的波导阵列的另一结构例的光扫描设备的截面图。

[0099] 图64A是表示图10的结构例的电场强度分布的计算结果的图。

[0100] 图64B是表示图63的结构例的电场强度分布的计算结果的图。

[0101] 图65是示意地表示在实施方式中存在具有不同的折射率的隔离物的结构例的光扫描设备的截面图。

[0102] 图66是示意地表示实施方式的变形例的波导元件的结构例的光扫描设备的截面图。

[0103] 图67是示意地表示实施方式的一结构例的光扫描设备的截面图。

[0104] 图68A是表示电场强度分布的计算结果的图。

[0105] 图68B是表示其他的电场强度分布的计算结果的图。

[0106] 图68C是表示又一电场强度分布的计算结果的图。

[0107] 图69是表示第1镜与第2镜之间的距离和射出角度的关系的图。

[0108] 图70是示意地表示其他的结构例的光扫描设备的截面图。

[0109] 图71是示意地表示又一结构例的光扫描设备的截面图。

[0110] 图72是示意地表示又一结构例的光扫描设备的截面图。

[0111] 图73A是示意地表示又一结构例的光扫描设备的截面图。

[0112] 图73B是示意地表示又一结构例的光扫描设备的截面图。

[0113] 图73C是示意地表示又一结构例的光扫描设备的截面图。

[0114] 图74是示意地表示第1镜经由致动器被支承部件支承的结构例的光扫描设备的截面图。

[0115] 图75是示意地表示其他的结构例的光扫描设备的截面图。

[0116] 图76是示意地表示图67的例子中的光波导区域及将2个非波导区域阵列化的结构例的光扫描设备的截面图。

[0117] 图77A示意地表示在第2镜的表面上形成亲水性区域及疏水性区域的工序。

[0118] 图77B示意地表示在第2镜的表面上形成亲水性区域及疏水性区域的工序。

[0119] 图77C示意地表示在第2镜的表面上形成亲水性区域及疏水性区域的工序。

[0120] 图77D示意地表示在第2镜的表面上形成亲水性区域及疏水性区域的工序。

[0121] 图77E示意地表示在第2镜的表面上形成亲水性区域及疏水性区域的工序。

[0122] 图78是表示在电路基板上集成了光分路器、波导阵列、移相器阵列及光源等的元件的光扫描设备的结构例的图。

[0123] 图79是表示从光扫描设备向远方照射激光器等的光束而执行二维扫描的状况的示意图。

[0124] 图80是表示能够生成测距图像的激光雷达(LiDAR)系统的结构例的块图。

具体实施方式

[0125] 在说明本公开的实施方式之前，说明作为本公开的基础的认识。

[0126] 本申请发明者们发现，在以往的光扫描设备中，有在不使装置的结构变复杂的情况下难以用光对空间进行扫描的技术问题。

[0127] 例如，在专利文献1所公开的技术中，需要使镜旋转的驱动装置。因此，装置的结构变得复杂，有对于振动鲁棒性不强的技术问题。

[0128] 在专利文献2所记载的光相控阵列中，需要将光分支导入到多个列波导及多个行波导中，将光向二维地排列的多个天线元件引导。因此，用来引导光的波导的布线变得非常复杂。此外，不能使二维扫描的范围变大。进而，为了使远场中的射出光的振幅分布二维地变化，需要在二维地排列的多个天线元件的各自上连接移相器，在移相器上安装相位控制用的布线。由此，使向二维地排列的多个天线元件入射的光的相位分别变化不同的量。因此，元件的结构变得非常复杂。

[0129] 根据专利文献3的结构，通过使向光偏转元件入射的光的波长变化，能够由射出光一维地进行较大的扫描。但是，需要使向光偏振元件入射的光的波长变化的机构。如果将这样的机构装入到激光器等的光源中，则有光源的构造变得复杂的技术问题。

[0130] 本申请发明者们着眼于以往技术中的上述技术问题，研究了用来解决这些技术问题的结构。本申请发明者们发现，通过使用具有对置的一对镜和被这些镜夹着的光波导层的波导元件，能够以比较简单的结构实现光的一维扫描或二维扫描。波导元件的一对镜的一方与另一方相比具有较高的光透射率，使在光波导层中传播的光的一部分向外部射出。可以如后述那样通过调整光波导层的折射率及厚度的至少一方来使射出的光的方向(或射出角度)变化。更具体地讲，通过使折射率及/或厚度变化，能够使射出光的波矢量(wave vector)的沿着光波导层的较长方向的方向的成分变化。由此，实现一维的扫描。

[0131] 进而，在使用多个波导元件的阵列的情况下，也能够实现二维的扫描。更具体地

讲，对向多个波导元件供给的光赋予适当的相位差，通过调整该相位差，能够使从多个波导元件射出的光相互加强的方向变化。通过相位差的变化，射出光的波矢量的、与沿着光波导层的较长方向的方向交叉的方向的成分变化。由此，能够实现二维的扫描。另外，在进行二维的扫描的情况下，也不需要使多个光波导层的折射率及厚度的至少一方变化不同的量。即，通过对向多个光波导层供给的光赋予适当的相位差，并使多个光波导层的折射率及厚度的至少一方同步地同量变化，能够进行二维的扫描。这样，根据本公开的实施方式，能够以比较简单的结构实现光的二维扫描。

[0132] 以上的基本原理不仅是射出光的用途、对于接收光信号的用途也同样能够应用。通过使光波导层的折射率及厚度的至少一方变化，能使能够接收的光的方向一维地变化。进而，如果通过分别连接于在一方向上排列的多个波导元件上的多个移相器使光的相位差变化，则能使能够接收的光的方向二维地变化。

[0133] 本公开的实施方式的光扫描设备及光接收设备例如可以被作为LiDAR(Light Detection and Ranging:光雷达)系统中的天线使用。LiDAR系统与使用微波等的电波的雷达系统相比，由于使用短波长的电磁波(可视光、红外线或紫外线)，所以能够以较高的分辨率检测物体的距离分布。这样的LiDAR系统可以被搭载到例如汽车、UAV(Unmanned Aerial Vehicle，所谓无人驾驶车辆)、AGV(Automated Guided Vehicle:自动导引车)等的移动体中，作为碰撞避免技术之一使用。

[0134] <光扫描设备的结构例>

[0135] 以下，作为一例，说明进行二维扫描的光扫描设备的结构。

[0136] 图1是示意地表示本公开的例示性的实施方式的光扫描设备100的结构的立体图。光扫描设备100具备包括在第1方向(图1中的Y方向)上规则地排列的多个波导元件10的波导阵列。多个波导元件10分别具有在与第1方向交叉的第2方向(图1中的X方向)延伸的形状。多个波导元件10一边使光在第2方向上传播，一边使光向与由第1及第2方向形成的平面交叉的第3方向D3射出。在本实施方式中，第1方向(Y方向)与第2方向(X方向)正交，但两者也可以不正交。在本实施方式中，多个波导元件10在Y方向上以等间隔排列，但并不需要一定以等间隔排列。

[0137] 另外，本申请的附图中表示的构造物的朝向考虑说明的容易理解度而设定，本公开的实施方式完全不限制现实实施时的朝向。此外，附图中表示的构造物的整体或一部分的形状及大小也不限制现实的形状及大小。

[0138] 多个波导元件10分别具有相互对置的第1镜30及第2镜40、和位于第1镜30与第2镜40之间的光波导层20。镜30及40分别在与光波导层20的界面上具有与第3方向D3交叉的反射面。第1镜30的反射面与第2镜40的反射面大致平行地对置。2个镜30及40中的至少第1镜30具有使在光波导层20中传播的光的一部分透射的特性。换言之，第1镜30相对于该光具有比第2镜40高的光透射率。因此，在光波导层20中传播的光的一部分被从第1镜30向外部射出。这样的镜30及40分别可以是例如通过由电介质构成的多层膜(也有称作“多层反射膜”的情况)形成的多层膜镜。

[0139] 通过控制向各个波导元件10输入的光的相位，进而使这些波导元件10的光波导层20的折射率及厚度的至少一方同步地(例如同时地)变化，能够实现通过光的二维扫描。

[0140] 本申请的发明者们为了实现这样的二维扫描，关于波导元件10的动作原理详细地

进行了分析。通过基于其结果将多个波导元件10同步地驱动，成功实现了通过光的二维扫描。

[0141] 如图1所示，如果将光输入到各波导元件10中，则光从各波导元件10的射出面射出。射出面位于第1镜30的反射面的相反侧。该射出光的方向D3依存于光波导层的折射率、厚度及光的波长。在本实施方式中，将各光波导层的折射率及厚度的至少一方同步地控制，以使从各波导元件10射出的光大致成为相同的方向。由此，能够使从多个波导元件10射出的光的波数矢量的X方向的成分变化。换言之，能够使射出光的方向D3沿着图1所示的方向101变化。

[0142] 进而，由于从多个波导元件10射出的光朝向相同的方向，所以射出光相互干涉。通过控制从各个波导元件10射出的光的相位，能够使通过干涉而光相互加强的方向变化。例如，在相同尺寸的多个波导元件10在Y方向上以等间隔排列的情况下，相位各相差一定量的光被输入到多个波导元件10中。通过使其相位差变化，能够使射出光的波数矢量的Y方向的成分变化。换言之，通过使向多个波导元件10导入的光的相位差分别变化，能够使光通过干涉而相互加强的方向D3沿着图1所示的方向102变化。由此，能够实现通过光的二维扫描。

[0143] 以下，更详细地说明光扫描设备100的动作原理。

[0144] <波导元件的动作原理>

[0145] 图2是示意地表示1个波导元件10的截面的构造及传播的光的例子的图。在图2中，将与图1所示的X方向及Y方向垂直的方向设为Z方向，示意地表示与波导元件10的XZ面平行的截面。在波导元件10中，夹着光波导层20而配置有一对镜30及40。从光波导层20的X方向上的一端导入的光22一边被设在光波导层20的上表面(图2中的上侧的表面)的第1镜30及设在下表面(图2中的下侧的表面)的第2镜40反复反射，一边在光波导层20内传播。第1镜30的光透射率比第2镜40的光透射率高。因此，能够主要从第1镜30输出光的一部分。

[0146] 在通常的光纤等的波导中，光一边反复全反射一边沿着波导传播。相对于此，在本实施方式的波导元件10中，光一边被配置在光波导层20的上下的镜30及40反复反射一边传播。因此，能够不受光的传播角度(即，向镜30或40与光波导层20之间的界面的入射角度)制约，而也向镜30或40传播以更接近于垂直的角度入射的光。即，能够传播以比全反射的临界角小的角度(即，更接近于垂直的角度)向界面入射的光。因此，光的传播方向上的光的群速度与自由空间中的光速相比较大地下降。由此，波导元件10具有光的传播条件相对于光的波长、光波导层20的厚度及光波导层20的折射率的变化较大地变化的性质。

[0147] 对波导元件10的光的传播更详细地说明。将光波导层20的折射率设为n_w，将光波导层20的厚度设为d。这里，光波导层20的厚度d是镜30或40的反射面的法线方向上的光波导层20的尺寸。如果考虑光的干涉条件，则波长λ的光的传播角度θ_w满足以下的式(1)。

[0148] [数式1]

[0149] $$2dn_w\cos\theta_w = m\lambda \quad (1)$$

[0150] M是模数(mode number)。式(1)相当于光波导层20内的光在厚度方向上形成驻波的条件。当光波导层20内的波长λ_g为λ/n_w时，可以考虑光波导层20的厚度方向上的波长$\lambda_{g'}$是$\lambda/(n_w\cos\theta_w)$。当光波导层20的厚度d与光波导层20的厚度方向上的波长$\lambda_{g'}$的一半$\lambda/(2n_w\cos\theta_w)$的整数倍时，形成驻波。根据该条件得到式(1)。另外，式(1)中的m表示驻波的腹点(anti－node)的数量。

[0151] 在第1镜及第2镜30及40是多层膜镜的情况下，在反射时光也侵入到镜内部中。因此，严格地讲，需要将与光侵入的光路长对应的项附加到式(1)的左边。但是，由于光波导层20的折射率n_w及厚度d的影响远大于向镜内部的光的侵入的影响，所以可以由式(1)说明基本的动作。

[0152] 在光波导层20内传播的光穿过第1镜30被向外部(典型的是空气)射出时的射出角度θ可以按照斯涅尔的法则，如以下的式(2)那样记述。

[0153] [数式2]

[0154] $\sin\theta = n_w \sin\theta_w$ (2)

[0155] 式(2)可根据在光的射出面中、空气侧的光的面方向上的波长$\lambda/\sin\theta$与波导元件10侧的光的传播方向的波长$\lambda/(n_w\sin\theta_w)$相等的条件来得到。

[0156] 由式(1)及式(2)，射出角度θ可以如以下的式(3)那样记述。

[0157] [数式3]

[0158] $$\sin\theta = \sqrt{n_w^2 - \left(\frac{m\lambda}{2d}\right)^2} \qquad (3)$$

[0159] 根据式(3)可知，通过改变光的波长λ、光波导层20的折射率n_w及光波导层20的厚度d的某个，能够改变光的射出方向。

[0160] 例如，在$n_w=2$、$d=387nm$、$\lambda=1550nm$、$m=1$的情况下，射出角度是0°。如果从该状态使折射率变化为$n_w=2.2$，则射出角度变化为约66°。另一方面，如果不改变折射率而使厚度变化为$d=420nm$，则射出角度变化为约51°。如果使折射率及厚度都不变化而使波长变化为$\lambda=1500nm$，则射出角度变化为约30°。这样，通过改变光的波长λ、光波导层20的折射率n_w及光波导层20的厚度d的某个，能够较大地改变光的射出方向。

[0161] 利用该原理，可以想到通过设置使在光波导层20内传播的光的波长变化的波长改变机构来控制光的射出方向。但是，如果将波长改变机构装入到激光器等的光源中，则光源的结构变得复杂。

[0162] 所以，本实施方式的光扫描设备100通过控制光波导层20的折射率n_w及厚度d的一方或两者，来控制光的射出方向。在本实施方式中，光的波长λ在动作中不变化而被维持为一定。波长λ没有被特别限定。例如，波长λ可以包含在通常的由通过用硅(Si)将光吸收来检测光的光检测器或图像传感器能得到较高的检测灵敏度的400nm～1100nm(从可视光到近红外光)的波长域中。在其他的例子中，波长λ可以包含于在光纤或Si波导中传送损失比较小的1260nm～1625nm的近红外光的波长域中。另外，这些波长范围是一例。使用的光的波长域并不限定于可视光或红外光的波长域，例如也可以是紫外光的波长域。在本实施方式中不进行波长的控制，但也可以除了折射率及/或厚度的控制以外，还进行使波长变化的控制。

[0163] 本申请的发明者们通过光学解析验证了上述那样的向特定方向的光的射出实际上是可能的。光学解析通过使用サイバネット公司的DiffractMOD的计算来进行。这是基于严格耦合波理论(RCWA:Rigorous Coupled－Wave Analysis)的模拟，能够正确地计算波动光学的效应。

[0164] 图3是示意地表示在本模拟中使用的计算模型的图。在该计算模型中，在基板50上依次层叠有第2镜40、光波导层20和第1镜30。第1镜30及第2镜40都是包含电介质多层膜的

多层膜镜。第2镜40具有将折射率相对较低的低折射率层42及折射率相对较高的高折射率层44交替地各层叠6层(共计12层)的构造。第1镜30具有将低折射率层42及高折射率层44交替地各层叠2层(共计4层)的构造。在镜30与镜40之间配置有光波导层20。波导元件10及基板50以外的介质是空气。

[0165] 使用该模型,一边使光的入射角度变化,一边调查对于入射光的光学响应。这对应于调查来自空气的入射光和光波导层20以何种程度耦合。在入射光与光波导层20耦合的条件下,也发生在光波导层20中传播的光向外部射出这样的逆过程。由此,求出入射光与光波导层20耦合的情况下的入射角度,相当于求出在光波导层20中传播的光向外部射出时的射出角度。如果入射光与光波导层20耦合,则在光波导层20内发生因光的吸收及散射造成的损失。即,在发生较大的损失的条件下,入射光与光波导层20较强地耦合。如果没有因吸收等造成的光的损失,则光的透射率及反射率的合计为1,而如果有损失,则透射率及反射率的合计变得比1小。在本计算中,为了取入光的吸收的影响,向光波导层20的折射率导入虚部,计算从1减去透射率及反射率的合计后的值,作为损失的大小。

[0166] 在本模拟中,假设基板50是Si,低折射率层42是SiO_2(厚度267nm),高折射率层44是Si(厚度108nm)。计算了将波长λ=1.55μm的光的角度进行各种各样的改变而入射时的损失的大小。

[0167] 图4A表示计算光波导层20的厚度d为704nm的情况下的光波导层20的折射率n_w与模数m=1的光的射出角度θ的关系的结果。白线表示损失较大。如图4A所示,在n_w=2.2附近,模数m=1的光的射出角度为θ=0°。在具有接近于n_w=2.2的折射率的物质中,例如有铌酸锂。

[0168] 图4B表示计算光波导层20的厚度d为446nm的情况下的光波导层20的折射率n_w与模数m=1的光的射出角度θ的关系的结果。如图4B所示,在n_w=3.45附近,模数m=1的光的射出角度为θ=0°。在具有接近于n_w=3.45的折射率的物质中,例如可以举出硅(Si)。

[0169] 通过这样调整光波导层20的厚度d,能够进行设计,以使得对于特定的光波导层20的折射率n_w,特定的模数(例如m=1)的光的射出角度θ成为0°。

[0170] 如图4A及图4B所示,能够确认射出角度θ对应于折射率的变化而较大地变化。如后述那样,例如可以通过载流子注入、电光学效应及热光学效应等的各种各样的方法使折射率变化。由这样的方法带来的折射率的变化为0.1左右,不怎么大。因此,到此为止,考虑了在这样的较小的折射率的变化下,射出角度不那么大地变化。但是,如图4A及图4B所示,可知在射出角度为θ=0°的折射率附近,如果折射率增加0.1则射出角度θ从0°变化到约30°。这样,在本实施方式的波导元件10中,即使是较小的折射率变化,也能够较大地调整射出角度。

[0171] 同样,由图4A及图4B的比较可知,可以确认对应于光波导层20的厚度d的变化而射出角度θ较大地变化。如后述那样,例如可以通过连接在2个镜的至少一方上的致动器使厚度d变化。即使厚度d的变化较小,也能够较大地调整射出角度。

[0172] 这样,为了改变从波导元件10射出的光的方向,只要使光波导层20的折射率n_w及/或厚度d变化就可以。为了实现这一点,本实施方式的光扫描设备100具备使各波导元件10中的光波导层20的折射率及厚度的至少一方变化的第1调整元件。关于第1调整元件的结构例在后面叙述。

[0173] 如以上这样，如果使用波导元件10，则通过使光波导层20的折射率n_w及厚度d的至少一方变化，能够较大地改变光的射出方向。由此，能够使从镜30射出的光的射出角度在沿着波导元件10的方向上变化。为了实现这样的一维的扫描，不需要使用波导元件10的阵列，只要使用至少1个波导元件10就可以。

[0174] 图5是示意地表示由单一的波导元件10实现一维扫描的光扫描设备100的例子的图。在该例中，形成在Y方向上有扩展的束斑。通过使光波导层20的折射率变化，能够使束斑沿着X方向移动。由此，实现一维扫描。由于束斑在Y方向上具有扩展，所以即使是一轴方向的扫描，也能够对二维地扩展的比较大的区域进行扫描。在不需要二维扫描的用途中，也可以采用图5所示那样的结构。

[0175] 在实现二维扫描的情况下，如图1所示，使用排列有多个波导元件10的波导阵列。当在多个波导元件10内传播的光的相位满足特定的条件时，光向特定的方向射出。如果该相位的条件变化，则光的射出方向在波导阵列的排列方向上也变化。即，通过使用波导阵列，能够实现二维扫描。关于用来实现二维扫描的更具体的结构的例子在后面叙述。

[0176] 如以上这样，通过使用至少1个波导元件10使波导元件10中的光波导层20的折射率及厚度的至少一方变化，能够使光的射出方向变化。但是，关于向波导元件10有效率地导入光的结构还有改善的余地。本公开的实施方式的波导元件10与利用光的全反射的通常的波导(以下有时称作“全反射波导”)不同，具备光波导层被一对镜(例如多层反射膜)夹着的波导构造(以下有时称作“反射型波导”)。关于光向这样的反射型波导的耦合，到目前为止还没有被充分地研究。本申请发明者们想到了用来向光波导层20有效率地导入光的新的构造。

[0177] 图6A是示意地表示光经由空气及镜30间接地向光波导层20输入的结构的例子(比较例)的截面图。在本比较例中，对于作为反射型波导的波导元件10的光波导层20，从外部经由空气及镜30间接地导入传播光。为了向光波导层20导入光，对于光波导层20的内部的波导光的反射角θ_w，需要满足斯涅尔的法则($n_{in}\sin\theta_{in}=n_w\sin\theta_w$)。这里，$n_{in}$是外部介质的折射率，$\theta_{in}$是传播光的入射角，$n_w$是光波导层20的折射率。通过考虑该条件调整入射角$\theta_{in}$，能够使光的耦合效率最大化。进而，在该例中，在第1镜30的一部分上设有减少了多层反射膜的膜的数量的部分。通过从该部分输入光，能够提高耦合效率。但是，在这样的结构中，需要根据光波导层20的传播常数的变化(θ_{wav}的变化)而使光向光波导层20的入射角θ_{in}变化。

[0178] 即使发生了光波导层20的传播常数的变化，为了保持光总是能够与波导耦合的状态，也有将有角度扩展的束向减少了多层反射膜的膜数量的部分入射的方法。作为这样的方法的一例，如图6B所示，研究了通过相对于镜30的法线方向以角度θ_{in}倾斜而配置的光纤7、从外部经由空气及镜30间接地将光入射到波导元件10中的情况下的耦合效率。为了简单，将光考虑为光线。通常的单模光纤的开口数(NA)是0.14左右。如果换算为角度，则是约±8度。与波导耦合的光的入射角度的范围是与从波导射出的光的扩展角相同的程度。射出光的扩展角θ_{div}用以下的式(4)表示。

[0179] [数式4]

[0180] $$\theta_{div} \approx \frac{\lambda}{L\cos\theta_{out}} \qquad (4)$$

[0181] 这里，L是传播长，λ是光的波长，θ_{out}是光的射出角。如果设L为10μm以上，则θ_{div}即使较大也是1度以下。因而，来自光纤7的光的耦合效率是1/16×100≒6.3％以下。进而，在图7中表示计算将光的入射角θ_{in}固定、通过使波导的折射率n_w变化而使光的射出角θ_{out}变化时的耦合效率的变化的结果。耦合效率表示波导光的能量相对于入射光的能量的比。图7所示的结果通过将入射角θ_{in}设为30°、将波导膜厚设为1.125μm、将波长设为1.55μm，计算耦合效率而得到。在该计算中，通过使折射率n_w在1.44～1.78的范围中变化，使射出角θ_{out}在10°～65°的范围中变化。如图7所示，在这样的结构中，耦合效率最大也不到7％。此外，如果使射出角θ_{out}从耦合效率为峰值的射出角变化20°以上，则耦合效率进一步下降到一半以下。

[0182] 这样，如果为了光扫描通过使波导的折射率等变化而使传播常数变化，则耦合效率进一步下降。为了维持耦合效率，需要根据传播常数的变化而使光的入射角θ_{in}变化。但是，导入使光的入射角θ_{in}变化的机构会导致装置结构的复杂化，并不优选。

[0183] 本申请发明者们想到，通过在具有使折射率或厚度变化的波导的区域的前级设置具有折射率及厚度被维持为一定的波导的区域，能够将光入射角固定。进而，本申请的发明者们发现，通过将这样的2种波导配置到共用的基板上，能够容易地进行光扫描设备的制作。即，也可以在一体地形成的一个基板上配置2种波导。

[0184] 通常的波导使用半导体工艺制作于基板上。例如，通常通过将由蒸镀或溅镀等进行的成膜与由光刻或蚀刻等进行的微细加工组合，在基板之上制作波导的构造。作为基板的材料，可以举出Si、SiO_2、GaAs、GaN等。

[0185] 反射型波导也可以使用同样的半导体工艺来制作。在反射型波导中，通过使光从夹着光波导层的一对镜中的一方的镜透射，使光射出。在几乎所有的情况下，都将镜制作于能够以低成本获得的玻璃基板之上。也可以代替玻璃基板而使用Si、SiO_2、GaAs、GaN等的基板。

[0186] 通过在反射型波导上连接别的波导，能够将光向反射型波导导入。

[0187] 图8是示意地表示在基板50A之上制作的多个第1波导1与在别的基板50B之上制作的多个第2波导10的连接的图。2个基板50A、50B平行于XY平面而配置。多个第1波导1及多个第2波导10在X方向上延伸，在Y方向上排列。第1波导1例如是利用光的全反射的通常的波导。第2波导10是反射型波导。通过将分别被配置在不同的基板50A、50B之上的第1波导1及第2波导10对位并连接，能够将光从第1波导1向第2波导10导入。

[0188] 为了从第1波导1向第2波导10效率良好地导入光，优选的是进行10nm量级的极高精度的对位。此外，即使能够进行高精度的对位，在2个基板50A、50B的热膨胀系数不同的情况下，也有可能因温度变化而发生对位偏差。例如，Si、SiO_2、GaAs及GaN的热膨胀系数分别是约4、0.5、6及5(×10^{-6}/K)，作为玻璃基材经常使用的BK7的热膨胀系数是9(×10^{-6}/K)。不论作为各自的基材而将哪种材料组合，都发生1×10^{-6}/K以上的热膨胀系数的差异。例如，在多个第1波导1及多个第2波导10的排列方向(图中是Y方向)上的2个基板50A、50B的尺寸是1mm的情况下，通过1℃的温度变化，2个基板50A、50B的对位偏差1nm。进而，通过几十℃的温度变化，2个基板50A、50B的对位以几十～百nm的量级较大地偏差。结果，不能从第1波导1向第2波导10效率良好地导入光。

[0189] 本申请的发明者们想到，通过将第1波导及第2波导配置在相同的基板之上，能够解决上述技术问题。通过将这些波导配置在共用的基板上，第1波导及第2波导的对位变得

容易。进而，因热膨胀带来的第1波导及第2波导的对位的偏差被抑制。结果，能够从第1波导1向第2波导10效率良好地导入光。

[0190] 本公开的一技术方案的光扫描设备具备第1波导、与上述第1波导相连的第2波导、和支承上述第1及第2波导的基板。上述第2波导具有：第1镜，具有多层反射膜；第2镜，具有与上述第1镜的上述多层反射膜对置的多层反射膜；光波导层，位于上述第1镜及上述第2镜之间，使被输入到上述第1波导中、在上述第1波导中传播的光传播。上述第1镜具有比上述第2镜高的光透射率，将在上述光波导层内传播的光的一部分向上述光波导层的外部射出。光扫描设备还具备通过使上述光波导层的折射率及厚度的至少一方变化而使射出光的方向变化的调整元件。

[0191] 上述技术方案的“第2波导”相当于上述实施方式的“波导元件”。在本公开的实施方式中，在第2波导的前级，设有折射率及厚度都被维持为一定的第1波导，光被向第1波导输入。第1波导使输入的光传播，从第2波导的端面输入。第1波导和第2波导既可以端面彼此被直接连接，例如也可以在端面间有间隙。在本说明书中，所谓“第1波导与第2波导连接(相连)”，是指两者以在第1波导与第2波导之间能够进行光的交接的方式取位。“第1波导与第2波导相连”的形态，不仅包括第1波导与第2波导直接连接(即接触)的形态，也包括两者夹着与传播的光的波长相比足够短的间隙而配置的形态。此外，在本公开中，所谓A与B“直接地相连”，是指A的某个部分与B的某个部分没有间隙地接触以便能够在A与B之间进行光的交接。

[0192] 根据上述结构，通过将第1波导设置在第2波导(波导元件)的前级，即使将向第1波导入射的光的入射角维持为一定，也能够抑制因扫描造成的耦合效率的下降(即能量的损失)。

[0193] 根据上述结构，通过在相同的基板之上配置第1波导及第2波导，第1波导及第2波导的对位变得容易。进而，由热膨胀造成的第1及第2波导的对位的偏差被抑制。结果，能够从第1波导向第2波导效率良好地导入光。

[0194] 进而，也可以在第1波导的前级设置第3波导。这样的第3波导与第1波导相连，将在第3波导中传播的光向第1波导输入。在一实施方式中，可以第3波导是全反射波导，第2波导是反射型波导。支承第1及第2波导的基板也可以还支承第3波导。

[0195] 图9是示意地表示在位于第1镜30与第2镜40之间的光波导层20的两旁配置有隔离物(spacer)73的结构例的YZ平面中的波导元件10的截面图。隔离物73的折射率n_{low}比光波导层的折射率n_w低($n_{low}<n_w$)。隔离物73例如也可以是空气。隔离物73只要具有比光波导层低的折射率，例如也可以是TiO_2、Ta_2O_5、SiN、AlN、SiO_2等。

[0196] 图10是示意地表示将图9中的波导元件10在Y方向上排列的波导阵列10A的结构例的YZ平面中的光扫描设备的截面图。在图10的结构例中，在Y方向上，第1镜30的宽度与光波导层20的宽度相同。因此，有波导光从不存在第1镜30的区域泄漏的技术问题。以往，在也包括多个反射型波导而将多个波导元件10阵列化时，没有通过使第1镜及第2镜30及40的至少一方的宽度比光波导层20的宽度长来防止波导光的泄漏的设想。

[0197] 为了使光扫描的性能提高，优选的是将波导阵列10A中的各波导元件10细线化。在此情况下，波导光泄漏的技术问题变得更显著。

[0198] 说明波导光泄漏的理由。

[0199] 图11是示意地表示在光波导层20内波导光在X方向上传播的图。由于$n_w>n_{low}$，所以波导光一边在±Y方向上通过全反射被关入，一边在X方向上传播。但是，实际上存在从光波导层20的Y方向上的端面向外侧渗出的迅衰光。此外，如图2所示，波导光一边在±Z方向上被第1镜及第2镜30及40反射，一边以比全反射角θ_{in}小的角度在X方向上传播。此时，在不存在图10所示的第1镜30的区域中，迅衰光不被反射而向外漏出。通过该不希望的光损失，在光扫描中使用的光量可能下降。

[0200] 本申请的发明者们想到，通过在多个波导元件10的排列方向上使第1镜及第2镜30及40的至少一方的宽度比光波导层20的宽度长，能够解决上述技术问题。由此，能够减少上述不希望的光损失。结果，在光扫描中使用的光量的下降被抑制。

[0201] 此外，作为光扫描设备，也可以使用在第1镜及第2镜30及40的各自的与隔离物73接触的部分上形成疏水性区域、在第1镜及第2镜30及40的至少一方的与光波导层20接触的部分上形成亲水性区域的结构。本申请的发明者们发现，在该结构中，可以作为构成光波导层20的材料而使用液体，作为隔离物73的材料而使用空气。这样的结构在例如通过使光波导层20的厚度变化而使光的射出方向变化的形态中是有效的。通过光波导层20包含液体，能够容易地使第1镜30与第2镜40的距离变化。结果，能够使光的射出方向较大地变化。此外，通过光波导层20与隔离物73的较大的折射率差，能够得到向光波导层20的较高的光封入效应。

[0202] 光波导层20中的液体也可以是液晶。在此情况下，也可以通过使对包含液晶的光波导层20施加的电压变化而使光的射出方向变化。进而，也可以通过使光波导层20的折射率及厚度的两者变化而使光的射出方向变化。

[0203] 本公开包含以下的项目中记载的设备。

[0204] [项目1]

[0205] 一种光扫描设备，具备：第1镜；第2镜，与上述第1镜对置；2个非波导区域，在上述第1镜与上述第2镜之间，在与上述第1镜及上述第2镜的至少一方的反射面平行的第1方向上隔开间隙排列；光波导区域，位于上述第1镜与上述第2镜之间且上述2个非波导区域之间，具有比上述2个非波导区域各自的平均折射率高的平均折射率，使光沿着与上述第1镜及上述第2镜的上述至少一方的反射面平行且与上述第1方向垂直的第2方向传播；以及第1调整元件，使上述光波导区域的折射率及厚度的至少一方变化；上述光波导区域包含液体；上述第1镜及上述第2镜分别包括与上述2个非波导区域相接的第1部分和与上述光波导区域相接的第2部分；上述第1镜及上述第2镜各自的上述第1部分的表面能量比上述液体的表面能量小，并且比上述第1镜及上述第2镜的至少一方的上述第2部分的表面能量小；上述第1镜具有比上述第2镜高的光透射率，使在上述光波导区域内传播的上述光的一部分从上述光波导区域向外部透射，作为射出光向与平行于上述第1方向及上述第2方向的虚拟平面交叉的第3方向射出；上述第1调整元件通过使上述光波导区域的折射率及厚度的至少一方变化，从而使作为上述射出光的射出方向的上述第3方向变化。

[0206] [项目2]

[0207] 如项目1所述的光扫描设备，上述第1镜及上述第2镜各自的上述第1部分的上述表面能量比上述第1镜及上述第2镜各自的上述第2部分的上述表面能量小。

[0208] [项目3]

[0209] 如项目1或2所述的光扫描设备，上述第1镜及上述第2镜各自的上述第1部分的上述表面能量为5mJ/m^{2}以上40mJ/m^{2}以下。

[0210] [项目4]

[0211] 如项目1～3中任一项所述的光扫描设备，上述2个非波导区域分别是空气。

[0212] [项目5]

[0213] 如项目1～4中任一项所述的光扫描设备，上述第1调整元件具备连接至上述第1镜及上述第2镜的至少一方的致动器；上述致动器通过使上述第1镜与上述第2镜的距离变化，从而使上述光波导区域的厚度变化。

[0214] [项目6]

[0215] 如项目5所述的光扫描设备，上述致动器包括压电部件，通过使上述压电部件变形，从而使上述第1镜与上述第2镜的距离变化。

[0216] [项目7]

[0217] 如项目1～4中任一项所述的光扫描设备，上述光波导区域包含液晶作为上述液体；上述第1调整元件具备中间夹着上述光波导区域的一对电极，通过对上述一对电极施加电压，从而使上述光波导区域的折射率变化。

[0218] [项目8]

[0219] 如项目1～7中任一项所述的光扫描设备，上述第1镜及上述第2镜的至少一方包括多层反射膜。

[0220] [项目9]

[0221] 如项目1～8中任一项所述的光扫描设备，当设上述射出光的波数矢量的上述第2方向的成分为X成分时，上述第1调整元件通过使上述光波导区域的上述折射率及上述厚度的至少一方变化，从而使上述波数矢量的X成分变化。

[0222] [项目10]

[0223] 如项目1～9中任一项所述的光扫描设备，具备：多个光波导区域，包括上述光波导区域；以及多个非波导区域，包括上述2个非波导区域；上述多个光波导区域各自的平均折射率比上述多个非波导区域各自的平均折射率高；上述多个光波导区域及上述多个非波导区域在上述第1镜与上述第2镜之间在上述第1方向上交替地排列。

[0224] [项目11]

[0225] 如项目10所述的光扫描设备，还具备：多个移相器，分别连接到上述多个光波导区域，并且分别包括与上述多个光波导区域中的对应的1个直接相连或经由其他波导相连的波导；以及第2调整元件，通过使从上述多个移相器向上述多个光波导区域传播的光的相位的差分别变化，从而使从上述多个光波导区域向外部射出的光的方向变化。

[0226] [项目12]

[0227] 如项目11所述的光扫描设备，各移相器的上述波导包含折射率对应于电压的施加或温度的变化而变化的材料；上述第2调整元件通过对各移相器的上述波导施加电压、或使上述波导的温度变化，从而使上述波导内的折射率变化，并且使从上述多个移相器向上述多个光波导区域传播的光的相位的差分别变化。

[0228] [项目13]

[0229] 如项目11或12所述的光扫描设备，当设从上述多个光波导区域向外部射出的上述

光的波数矢量的上述第1方向的成分为Y成分时，上述第2调整元件通过对各移相器的上述波导施加电压、或使上述波导的温度变化，从而使上述波数矢量的Y成分变化。

[0230] [项目14]

[0231] 一种光扫描设备，具备：第1镜；第2镜，与上述第1镜对置；光波导区域，位于上述第1镜与上述第2镜之间，使光沿着与上述第1镜及上述第2镜的至少一方的反射面平行的方向传播；以及第1调整元件，使上述光波导区域的折射率及厚度的至少一方变化；上述光波导区域包含液体；上述液体的表面能量比上述第1镜及上述第2镜的至少一方的与上述光波导区域相接的部分的表面能量小；上述第1镜具有比上述第2镜高的光透射率，使在上述光波导区域内传播的上述光的一部分从上述光波导区域向外部透射，作为射出光向与上述第1镜的反射面交叉的方向射出；上述第1调整元件通过使上述光波导区域的折射率及厚度的至少一方变化，从而使上述射出光的射出方向变化。

[0232] [项目15]

[0233] 一种光接收设备，具备：第1镜；第2镜，与上述第1镜对置；2个非波导区域，在上述第1镜与上述第2镜之间，在与上述第1镜及上述第2镜的至少一方的反射面平行的第1方向上隔开间隙排列；光波导区域，位于上述第1镜与上述第2镜之间且上述2个非波导区域之间，具有比上述2个非波导区域各自的平均折射率高的平均折射率，使输入光沿着与上述第1镜及上述第2镜的上述至少一方的反射面平行且与上述第1方向垂直的第2方向传播；以及第1调整元件，使上述光波导区域的折射率及厚度的至少一方变化；上述光波导区域包含液体；上述第1镜及上述第2镜分别包括与上述2个非波导区域相接的第1部分和与上述光波导区域相接的第2部分；上述第1镜及上述第2镜各自的上述第1部分的表面能量比上述液体的表面能量小，并且比上述第1镜及上述第2镜的至少一方的上述第2部分的表面能量小；上述第1镜具有比上述第2镜高的光透射率，使来自与平行于上述第1方向及上述第2方向的虚拟平面交叉的第3方向的入射光透射，并作为上述输入光向上述光波导区域输入；上述第1调整元件通过使上述光波导区域的折射率及厚度的至少一方变化，从而使作为可接收的上述入射光的方向的上述第3方向变化。

[0234] [项目16]

[0235] 如项目15所述的光接收设备，具备：多个光波导区域，包括上述光波导区域；以及多个非波导区域，包括上述2个非波导区域；上述多个光波导区域各自的平均折射率比上述多个非波导区域各自的平均折射率高；上述多个光波导区域及上述多个非波导区域在上述第1镜与上述第2镜之间在上述第1方向上交替地排列。

[0236] [项目17]

[0237] 如项目16所述的光接收设备，还具备：多个移相器，分别连接到上述多个光波导区域，并且分别包括与上述多个光波导区域中的对应的1个直接相连或经由其他波导相连的波导；以及第2调整元件，通过使从上述多个光波导区域穿过上述多个移相器而输出的光的相位的差分别变化，从而使在上述多个光波导区域中可接收的光的方向变化。

[0238] [项目18]

[0239] 一种激光雷达(LiDAR)系统，具备：项目1～14中任一项所述的光扫描设备；光检测器，检测从上述光扫描设备射出并从对象物反射的光；以及信号处理电路，基于上述光检测器的输出，生成距离分布数据。

[0240] 在本公开中，所谓“光”，是指不仅包含可视光(波长是约400nm～约700nm)、还包含紫外线(波长是约10nm～约400nm)及红外线(波长是约700nm～约1mm)的电磁波。在本公开中，有时将紫外线称作“紫外光”、将红外线称作“红外光”。

[0241] 在本公开中，所谓光的“扫描”，是指使光的方向变化。所谓“一维扫描”，是指使光的方向沿着与该方向交叉的方向直线地变化。所谓“二维扫描”，是指使光的方向沿着与该方向交叉的平面二维地变化。

[0242] 以下，更具体地说明本公开的实施方式。但是，有时将所需以上详细的说明省略。例如，有时将周知的事项的详细说明及对于实质上相同的结构的重复的说明省略。这是为了避免以下的说明不必要地变得冗长，使本领域技术人员的理解变容易。另外，发明者们为了本领域技术人员充分地理解本公开而提供附图及以下的说明，并不是要由它们限定权利要求书所记载的主题。在以下的说明中，对于相同或类似的构成要素附图相同的标号。

[0243] (实施方式)

[0244] 图12是示意性地表示本公开的例示性的实施方式中的光扫描设备的构造的一部分的截面图。该光扫描设备具备第1波导1以及与第1波导连接的第2波导(波导元件)10。第2波导10具有：第1镜30，具有多层反射膜；第2镜40，具有与第1镜30的多层反射膜对置的多层反射膜；以及光波导层20，位于第1镜30与第2镜40之间。光波导层20传播被输入到第1波导1且在第1波导1中传播的光。光波导层20向与第1波导1的导波方向相同的方向传播光。第1镜30具有比第2镜40高的光透过率，将在光波导层20内传播的光的一部分出射到光波导层20的外部。虽然未在图12中示出，但是光扫描设备100还具备调整元件，该调整元件改变光波导层20的折射率和厚度的至少一方。光波导层20包含例如在被施加电压的情况下对于在光波导层20中传播的光的折射率发生变化的材料。调整元件通过对光波导层20施加电压来改变光波导层20的折射率，从而改变从第2波导10出射的光的方向。

[0245] 第1波导1具有对置的两个多层反射膜3、4以及被两个多层反射膜3、4夹着的光波导层2。为了将导波光无损耗地传播，期望的是，第1波导1中的多层反射膜3、4具有比第2波导10中的光出射侧的多层反射膜(即，第1镜30)高的反射率(即，低的透过率)。因此，期望的是，多层反射膜3、4的膜厚大于第1镜30的膜厚。第1波导1的折射率、即第1波导1中的光波导层2的折射率不变化，或者变化与光波导层20的折射率不同的量。另外，光波导层2的厚度不变化，或者变化与光波导层20的厚度不同的量。第1波导1与第2波导10中的光波导层20直接连接。例如，第1波导1中的光波导层2的端面与第2波导10中的光波导层20的端面连接。该例中的多层反射膜3具有膜厚比相邻的部位薄的(即反射率低的)部位3a。从该部位3a(还称为“光输入部3a”)输入光。通过这样从反射率低的区域输入光，能够高效地向光波导层2导入光。光波导层2传播被入射到光输入部3a的光，并输入到第2波导10中的光波导层20的端面。由此，能够从光波导层2向光波导层20传播光并从镜30出射。

[0246] 在第2波导10中，由于需要出射光，因此第1镜30的多层反射膜的反射率比第2镜40的多层反射膜的反射率低。在第1波导1中，为了不使光出射，将多层反射膜3、4的反射率设计成与第2镜40的反射率相同程度的大小。

[0247] 通过这种构造，光扫描设备如后所述那样能够高效地从第2波导10出射光。

[0248] 图13是示意性地表示光扫描设备的构造的其它例的截面图。在该例中，第1波导1不具有多层反射膜3、4。第1波导1通过全反射来传播光。第1波导1在表面的局部具有光栅5。

经由光栅5输入光。在该例中，设置有光栅5的部位作为光输入部发挥功能。通过设置光栅5，容易将光导入到波导1内。在如该例那样不存在多层反射膜3、4的情况下，设计成导波角度θ_{w1}满足全反射条件。在该情况下也是，第1波导1的折射率不变化，或者变化与光波导层20不同的量。另外，第1波导1的厚度、即光波导层2的厚度不变化，或者变化与光波导层20的厚度不同的量。另外，第1波导1与第2波导10中的光波导层20直接连接。另外，光波导层20向与第1波导1的导波方向相同的方向传播光。

[0249] 图14是示意性地表示光扫描设备的构造的又一其它例的截面图。该例中的光扫描设备还具备与第1波导1连接的第3波导1'。第1波导1是反射型波导，具有对置的两个多层反射膜3、4以及其间的光波导层2。另一方面，第3波导1'是通过全反射来传播光的全反射波导。第3波导1'的折射率不变化，或者变化与光波导层20不同的量。另外，第3波导1'的厚度、即光波导层2'的厚度不变化，或者变化与光波导层20的厚度不同的量。另外，第3波导1'与第1波导1中的光波导层2直接连接。另外，光波导层20向与第3波导1'的导波方向相同的方向传播光。第3波导1'与图13的例中的第1波导1同样地在表面的局部具有光栅5'。来自光源的光经由光栅5'输入到第3波导1'内。在该例中，设置有光栅5'的部位作为光输入部发挥功能。对于第2波导10中的光波导层20，利用未图示的调整元件(例如调制元件)来调制折射率或厚度。另一方面，对于第1波导1，不具有这种调制功能。为了抑制从第1波导1出射光，第1波导1的镜(即，多层反射膜3、4)的反射率被设定为比第2波导10的第1镜30的反射率高。第2波导10中的第1镜30的反射率被设定为比第2镜40的反射率低。通过这种结构，输入到第3波导1'的光在第3波导1'和第1波导1中传播并输入到第2波导10。该光进一步在第2波导10的光波导层20中传播，并且经由第1镜30出射到外部。

[0250] 图15和图16A至图16C是表示在光输入到第1波导1的结构中向第1波导1输入光的方法的例的图。图15表示如图12所示的例那样向被两个多层反射膜夹着的光波导层2入射光的一例。如图示的那样，通过对多层反射膜的膜厚薄的部位(即，反射率低的部位)3a入射光，能够高效地将光导入到光波导层2。图16A表示如图13所示的例那样经由设置于第1波导1的表面的光栅5向第1波导1导入光的例。图16B表示从第1波导1的端面输入光的例。图16C表示从设置于第1波导1的表面的激光光源6经由该表面输入光的例。如图16C那样的结构例如公开在M.Lamponi et al.,“Low-Threshold Heterogeneously Integrated InP/SOI Lasers With a Double Adiabatic Taper Coupler,”IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTER S,VOL.24,NO.1,JANUARY 1,2012,pp76-78.。将该文献的公开内容整体引用到本申请说明书。根据以上的结构，能够高效地使光入射到波导1。

[0251] 图15至图16C所示的光的输入方法均还能够应用于图14所示的使用第3波导1'的结构。在图14所示的例中，在第3波导1'的表面的局部设置有光栅5'，但是也可以不设置光栅5'。例如能够将图16B或图16C所示的光的输入方法应用于第3波导1'。在将图16B所示的光的输入方法应用于第3波导1'的情况下，第3波导1'传播从第3波导1'的端面入射的光并输入到第1波导1的端面。在将图16C所示的光的输入方法应用于第3波导1'的情况下，从设置于第3波导1'的表面的激光光源经由该表面输入光。第3波导1'传播被输入的光并输入到第1波导1的端面。另外，第3波导1'不需要是全反射波导，也可以是如图15所示那样的反射型波导。

[0252] 如图12和图13所示，将第1波导1的光波导层2的折射率设为n_{w1}，将第2波导10的光

波导层20的折射率设为n_{w2}，将来自第2波导10的光的出射角设为θ，将第1波导1中的导波光的反射角设为θ_{w1}，将第2波导10中的导波光的反射角设为θ_{w2}。另外，如图14所示，将第3波导1'中的光波导层2'的折射率设为n_{w3}，将第3波导1'中的导波光的反射角设为θ_{w3}。在本实施方式中，为了从第2波导10将光取出到外部(例如，折射率为1的空气层)，满足$n_{w2}\sin\theta_{w2}=\sin\theta<1$。

[0253] <导波光耦合的原理>

[0254] 下面，参照图12和图13来说明波导1、10间的导波光的耦合的原理。为了简单，将在波导1、10内传播的光近似地认为是光线。假定在波导10的上下的多层反射膜与光波导层20的界面以及波导1的上下的多层反射膜与光波导层2的界面(或者，光波导层2与外部介质的界面)，光完全被反射。将第1波导1中的光波导层2的厚度设为d_1，将第2波导10中的光波导层20的厚度设为d_2。在波导1、10各自中，存在传播光的条件用以下的式(5)、(6)表示。

[0255] $$2d_1n_{w1}\cos\theta_{w1}=m\lambda \quad (5)$$

[0256] $$2d_2n_{w2}\cos\theta_{w2}=m\lambda \quad (6)$$

[0257] 在此，λ是光的波长，m是1以上的整数。

[0258] 当针对波导1、10的界面考虑斯涅耳定律时，式(7)成立。

[0259] $$n_{w1}\sin(90^\circ-\theta_{w1})=n_{w2}\sin(90^\circ-\theta_{w2}) \quad (7)$$

[0260] 当使式(7)变形时，得到下式(8)。

[0261] $$n_{w1}\cos\theta_{w1}=n_{w2}\cos\theta_{w2} \quad (8)$$

[0262] 在式(5)和(8)成立时，在d_1与d_2相等的情况下，即使在n_{w2}发生变化的情况下式(6)也成立。也就是说，即使在光波导层20的折射率发生变化的情况下，也高效地从光波导层2向光波导层20传播光。

[0263] 在上式的导出时为了简单而将光认为是光线，但是实际上厚度d_1、d_2是与波长λ相同的程度(最长也是波长的10倍以下)，因此导波光具有波动性。因而，严格地说，作为上述的折射率n_{w1}、n_{w2}，需要考虑有效折射率，而不是光波导层2、20的材料的折射率。另外，即使在光波导层2的厚度d_1与光波导层20的厚度d_2不相同的情况下、或者不是严格地满足式(8)的情况下，光也能从光波导层2导波到光波导层20。这是因为，从光波导层2向光波导层20的光的传递是通过近场来进行。即，如果存在光波导层2的电场分布与光波导层20中的电场分布的重叠，则从光波导层2向光波导层20传递光。

[0264] 以上的讨论对于图14所示的例中的第3波导1'与第1波导1之间的导波光也同样成立。

[0265] <计算结果>

[0266] 为了确认本实施方式的效果，本申请的发明人们将条件各种各样地变化来计算出光的耦合效率。计算中使用Photon Design公司的FIMMWAVE。

[0267] 首先，针对如图12所示那样波导1、10均被多层反射膜夹着的结构计算出耦合效率。在以下的计算中，从波导1向波导10传播的光的模数是m=2，但是，只要波导1与波导10的光的模数相同，就基于同样的原理来光进行耦合。因此，光的模数不限于m=2。

[0268] 图17表示在将n_{w1}设为1.45、将d_1设为1.27μm、将波长λ设为1.55μm的情况下的从波导1向波导10的导波光的耦合效率的d_2依存性。横轴是将d_2除以将导波光假定为光线的情况下的截止膜厚d_{cutoff}(=$m\lambda/(2n_{w2})$)而得到的值。纵轴是将峰值标准化为1时的耦合效率。计

算是从满足导波光无法存在的截止条件的下限值进行到光被射出到外部的上限值为止。另外，针对n_{w2}为1.3、1.6、1.9、2.2、2.5的各个情况进行了计算。设第1波导1的厚度方向的中心与第2波导10的厚度方向的中心相同。从图17所示的结果可知，d_2/d_{cutoff}越大则耦合效率越高。随着d_2/d_{cutoff}变小，模变得无法存在，耦合效率降低。

[0269] 图18表示将n_{w1}变更为3.48、将d_1变更为0.5μm并利用同样的方法进行的计算的结果。在该情况下，从波导1向波导10传播的光的模数也是m＝2，但是如前述那样光的模数不限于m＝2。从图18可知，d_2/d_{cutoff}越大则耦合效率越高，随着d_2/d_{cutoff}变小，模变得无法存在，耦合效率降低。

[0270] 在图17和图18中，在d_2/d_{cutoff}为比1低的值时也存在模(即导波光进行耦合)是因为，起因于通过多层反射膜反射时的光的渗出，光波导层2的有效厚度变得比d_2厚。d_2的上限是光不出射到外部的值。该值是在将导波光认为是光线、且假定各波导的上下的多层反射膜使光在与波导的界面完全反射时导波光的反射角相对于大气成为全反射角度时的d_2。此时，满足下式(9)。

[0271] $$n_{w2}\sin\theta_{w2}=1 \quad (9)$$

[0272] 根据式(6)、式(9)以及$d_{cutoff}=m\lambda/(2n_{w2})$，下式(10)成立。

[0273] $$d_2/d_{cutoff}=n_{w2}/\sqrt{(n_{w2}^2-1)} \quad (10)$$

[0274] 起因于在多层反射膜反射时的光的渗出，导波光的有效折射率变得低于n_{w2}。因此，与式(6)相比，d_2的上限值变大。

[0275] 在本实施方式的结构中，期望的是，耦合效率高于图6B所示的结构。例如，根据图17和图18的结果满足以下的式，由此满足耦合效率为比图7所示的峰值高的7％以上这样的条件。

[0276] $$0.95\times d_{cutoff}<d_2<1.5\times d_{cutoff}$$

[0277] $$(0.95\times m\lambda/(2n_{w2})<d_2<1.5\times m\lambda/(2n_{w2}))$$

[0278] 图19是将横轴设为d_2/d_{cutoff}、将纵轴设为折射率比($|n_{w1}-n_{w2}|/n_{w1}$)来对耦合效率为0.5以上的情况和耦合效率小于0.5的情况进行了分类的图。例如，通过折射率比小于0.4、且满足$0.95\times d_{cutoff}<d_2<1.5\times d_{cutoff}$，满足耦合效率为0.5(50％)以上这样的条件。

[0279] 在本实施方式中，第1波导1的折射率n_{w1}大于第2波导10的折射率n_{w2}($n_{w1}>n_{w2}$)。但是，本公开不限定于这种结构，也可以是$n_{w1}\leqslant n_{w2}$。

[0280] 图20是表示第1波导1中的光波导层2的厚度方向的中心与第2波导10中的光波导层20的厚度方向的中心偏移了Δz的结构的图。关于Δz的正负，如图20所示，将第2波导10的光波导层20的厚度方向的中心线比第1波导1的光波导层2的厚度方向的中心线靠光放射侧(即，第1镜30的一侧)时设为正。将第1波导1的光波导层2的厚度d_1与第2波导10的光波导层20的厚度d_2之差的绝对值设为Δd。在Δz＝Δd/2时，波导1的光波导层2的下部(即，与光放射侧相反的一侧)与波导10的光波导层20的下部的Z方向的位置一致。

[0281] 图21是表示从第1波导1向第2波导10的光的耦合效率的Δz依存性的图。图21的结果是通过将n_{w1}设为2.2、将波长λ设为1.55μm、将n_{w2}设为2.2、将Δd设为0.12μm并改变Δz来计算耦合效率而得到的。图21所示的耦合效率是用Δz＝0的情况下的值进行了标准化的。在光波导层2、20的厚度方向的中心线向Z方向偏移的情况下，耦合效率相比于Δz为零(0)的情况变低。但是，在$-\Delta d/2<\Delta z<\Delta d/2$的情况下，成为在Δz为0的情况下的耦合效率的

90％以上，能够维持比较高的耦合效率。

[0282] 关于如图13所示的例那样第1波导1通过全反射来对光进行导波的结构，基本原理也相同，在波导1、10中传播的导波光能够相互耦合。针对图13所示的结构，也通过计算来求出从第1波导1向第2波导10的导波光的耦合效率的d_2依存性。图22A表示在将n_{w1}设为2.2、将d_1设为0.7μm、将波长λ设为1.55μm的情况下的耦合效率的d_2依存性。图22B表示将n_{w1}设为3.48、将d_1设为0.46μm、将波长λ设为1.55μm的情况下的耦合效率的d_2依存性。例如，通过满足以下的式子，满足耦合效率成为7％以上的条件。

[0283] $0.95\times d_{cutoff}<d2<1.5\times d_{cutoff}$

[0284] (即，$0.95\times m\lambda/(2n_{w2})<d2<1.5\times m\lambda/(2n_{w2})$)

[0285] 此外，例如通过满足以下的式子，满足耦合效率是50％以上的条件。

[0286] $1.2\times d_{cutoff}<d2<1.5\times d_{cutoff}$

[0287] (即、$1.2\times m\lambda/(2n_{w2})<d2<1.5\times m\lambda/(2n_{w2})$)

[0288] 在图13的结构中，既可以是$n_{w1}>n_{w2}$，也可以是$n_{w1}\leqslant n_{w2}$。

[0289] 如上述那样，从第1波导1向第2波导10传播的光的模数并不限定于m＝2。例如，如果在n_{w1}＝1.883、d_1＝0.3μm、n_{w2}＝1.6、d_2＝0.55μm的条件下使用图23A那样的模型计算，则如图23B所示，可知光与波导耦合。

[0290] 接着，研究在第1波导1与第2波导10之间有间隙的情况。

[0291] 图24A是表示本实施方式的变形例的截面图。在该例中，第2波导10中的光波导层20经由间隙(例如空隙)与第1波导1连接。即使在这样第1波导1与第2波导10之间存在间隙的情况下，由于经由波导模的近场来光进行耦合，因此，只要间隙宽度(X方向的宽度)相比于波长λ足够小，则导波光也在波导1、10之间耦合。这与如图6A或图6B那样从自由空间中的传播光向波导模耦合的方法不同。

[0292] 图24B是表示耦合效率的间隙宽度依存性的计算结果的图。图24B中的耦合效率是以间隙为0μm时的值为1来进行了标准化的值。在计算中，将n_{w1}设为3.48，将n_{w2}设为1.5，将d_1设为0.9μm，将d_2设为1.1μm，将间隙的折射率设为1，将波长λ设为1.55μm。根据图24B，标准化的耦合效率为50％以上的情况是间隙为0.24μm以下的情况。当考虑间隙为空气以外的介质的情况以及波长λ不同于1.55μm的情况时，如果间隙的光学长度(即，间隙的折射率与间隙宽度之积)为λ/6.5以下，则标准化的耦合效率为50％以上。该间隙的光学长度不依赖于波导1、10的参数。

[0293] 在如图14所示的例那样从第3波导1’对第1波导1输入光的方式中也同样地，也可以在第3波导1’的端面与第1波导1的端面之间存在间隙。如前所述，间隙的光学长度(间隙的折射率与间隙宽度之积)例如被设定为λ/6.5以下。

[0294] 接着，说明将本实施方式中的第1波导1与第2波导10的组合(在本说明书中称为“波导单元”)使用多组来实施二维的光扫描的结构。能够执行二维扫描的光扫描设备具备在第1方向上排列的多个波导单元以及对各波导单元进行控制的调整元件(例如致动器与控制电路的组合)。调整元件改变各波导单元中的第2波导10中的光波导层20的折射率和厚度的至少一方。由此，能够改变从各第2波导10出射的光的方向。另外，通过对多个波导单元中的第2波导10输入适当地调整了相位差的光，如参照图1说明的那样，能够进行光的二维扫描。下面，更详细地说明用于实现二维扫描的实施方式。

[0295] <二维扫描的动作原理>

[0296] 在多个波导元件(即,第2波导)10在一个方向上排列而成的波导阵列中,由于从各个波导元件10出射的光的干涉,光的出射方向发生变化。通过调整向各波导元件10供给的光的相位,能够改变光的出射方向。下面,说明其原理。

[0297] 图25A是表示向与波导阵列的出射面垂直的方向出射光的波导阵列的截面的图。在图25A中还记载了在各波导元件10中传播的光的相移量。在此,相移量是以在左端的波导元件10中传播的光的相位为基准的值。本实施方式中的波导阵列包括等间隔地排列的多个波导元件10。在图25A中,虚线的圆弧表示从各波导元件10出射的光的波面。直线表示由于光的干涉而形成的波面。箭头表示从波导阵列出射的光的方向(即,波矢量的方向)。在图25A的例中,在各波导元件10中的光波导层20中传播的光的相位均相同。在该情况下,光向与波导元件10的排列方向(Y方向)及光波导层20延伸的方向(X方向)这两方垂直的方向(Z方向)出射。

[0298] 图25B是表示向与垂直于波导阵列的出射面的方向不同的方向出射光的波导阵列的截面的图。在图25B的例中,在多个波导元件10中的光波导层20中传播的光的相位在排列方向上各相差固定量(Δφ)。在该情况下,光向与Z方向不同的方向出射。通过改变该Δφ,能够改变光的波矢量的Y方向的分量。

[0299] 对于从波导阵列向外部(在此设为空气)出射的光的方向,能够如下那样定量地讨论。

[0300] 图26是示意性地表示三维空间中的波导阵列的立体图。在用相互正交的X、Y以及Z方向定义的三维空间中,将光被出射到空气的区域与波导阵列的边界面设为$Z=z_0$。该边界面包括多个波导元件10各自的出射面。在$Z<z_0$时,在Y方向上多个波导元件10等间隔地排列,多个波导元件10各自沿X方向延伸。在$Z>z_0$时,向空气出射的光的电场矢量E(x、y、z)用以下的式(11)表示。

[0301] [数式5]

[0302] $$E(x,y,z)=E_0\exp[-j(k_xx+k_yy+k_zz)] \quad (11)$$

[0303] 其中,E_0是电场的振幅矢量,k_x、k_y以及k_z分别是X、Y以及Z方向上的波数(wave number),j是虚数单位。在该情况下,向空气出射的光的方向与在图26中用粗箭头表示的波矢量(k_x、k_y、k_z)平行。波矢量的大小用以下的式(12)表示。

[0304] [数式6]

[0305] $$\sqrt{k_x^2+k_y^2+k_z^2}=\frac{2\pi}{\lambda} \quad (12)$$

[0306] 根据$Z=z_0$时的电场的边界条件,与边界面平行的波矢量分量k_x和k_y分别与波导阵列中的光的X方向和Y方向上的波数一致。这相当于与式(2)的斯涅耳定律同样地,在边界面,空气侧的光所具有的面方向的波长与波导阵列侧的光所具有的面方向的波长一致的条件。

[0307] k_x等于在沿X方向延伸的波导元件10的光波导层20中传播的光的波数。在上述的图2所示的波导元件10中,使用式(2)和式(3)来用以下的式(13)表示k_x。

[0308] [数式7]

[0309] $$k_x = \frac{2\pi}{\lambda} n_w sin\theta_w = \frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{n_w^2 - \left(\frac{m\lambda}{2d}\right)^2} \quad (13)$$

[0310] k_y是根据相邻的两个波导元件10之间的光的相位差导出的。将在Y方向上等间隔地排列的N根波导元件10各自的Y方向的中心设为y_q(q＝0、1、2、・・・、N-1)，将相邻的两个波导元件10之间的距离(中心间距离)设为p。此时，向空气出射的光的电场矢量(式(11))在边界面内(Z＝z_0)的y_q和y_q+1时满足以下的式(14)的关系。

[0311] [数式8]

[0312] $$E(x,y_{q+1},z0) = \exp[-jk_y(y_{q+1}-y_q)]E(x,y_q,z_0) = \exp[-jk_y p]E(x,y_q,z_0) \quad (14)$$

[0313] 如果设定成任意的相邻的两个波导元件10的相位差成为Δ Φ＝k_yp(固定)，则k_y满足以下的式(15)的关系。

[0314] [数式9]

[0315] $$k_y = \frac{\Delta\phi}{p} \quad (15)$$

[0316] 在该情况下，y_q时的光的相位成为Φ_q＝Φ_0+qΔ Φ(Φ_{q+1}-Φ_q＝Δ Φ)。也就是说，相位Φ_q沿着Y方向固定(Δ Φ＝0)、或成比例地增加(Δ Φ>0)或减少(Δ Φ<0)。在Y方向上排列的波导元件10不是等间隔的情况下，例如设定成：相对于期望的k_y，y_q和y_{q+1}时的相位差成为Δ Φ_q＝Φ_{q+1}-Φ_q＝k_y(y_{q+1}-y_q)。在该情况下，y_q时的光的相位成为Φ_q＝Φ_0+k_y(y_q-y_0)。如果使用从式(14)和式(15)分别得到的k_x和k_y，则从式(12)导出k_z。由此，得到光的出射方向(即，波矢量的方向)。

[0317] 例如，如图26所示，将出射光的波矢量(k_x、k_y、k_z)与将该波矢量投影到YZ平面所得到的矢量(0、k_y、k_z)所成的角度设为θ。θ是波矢量与YZ平面所成的角度。使用式(12)和式(13)来用以下的式(16)表示θ。

[0318] [数式10]

[0319] $$\sin\theta = \frac{k_x}{\sqrt{k_x^2+k_y^2+k_z^2}} = \frac{\lambda}{2\pi}k_x = \sqrt{n_w^2 - \left(\frac{m\lambda}{2d}\right)^2} \quad (16)$$

[0320] 式(16)与限定为出射光与XZ平面平行的情况时的式(3)完全相同。从式(16)可知，波矢量的X分量依赖于光的波长、光波导层20的折射率以及光波导层20的厚度发生变化。

[0321] 同样地，如图26所示，将出射光(0次光)的波矢量(k_x、k_y、k_z)与将该波矢量投影到XZ平面所得到的矢量(k_x、0、k_z)所成的角度设为α_0。α_0是波矢量与XZ平面所成的角度。使用式(12)和式(13)来用以下的式(17)表示α_0。

[0322] [数式11]

[0323] $$\sin\alpha_0 = \frac{k_y}{\sqrt{k_x^2+k_y^2+k_z^2}} = \frac{\lambda}{2\pi}k_y = \frac{\Delta\phi\lambda}{2\pi p} \quad (17)$$

[0324] 从式(17)可知，光的波矢量的Y分量根据光的相位差Δ Φ而变化。

[0325] 这样，还能够代替波矢量(k_x、k_y、k_z)而使用从式(16)和式(17)分别得到的θ和α_0来确定光的出射方向。在该情况下，表示光的出射方向的单位矢量能够表示为(sinθ、sinα_0、

$(1-\sin^2\alpha_0-\sin^2\theta)^{1/2}$)。在光出射中这些矢量分量全部必须是实数，因此满足$\sin^2\alpha_0+\sin^2\theta\leqslant 1$。从$\sin^2\alpha_0\leqslant 1-\sin^2\theta=\cos^2\theta$可知，出射光在满足$-\cos\theta\leqslant\sin\alpha_0\leqslant\cos\theta$的角度范围内变化。由于$-1\leqslant\sin\alpha_0\leqslant 1$，因此在$\theta=0°$时，出射光在$-90°\leqslant\alpha_0\leqslant 90°$的角度范围内变化。但是，当$\theta$增加时$\cos\theta$变小，因此$\alpha_0$的角度范围变窄。在$\theta=90°$($\cos\theta=0$)时，仅在$\alpha_0=0°$时光才出射。

[0326] 只要至少2根波导元件10就能够实现本实施方式中的利用光的二维扫描。但是，在波导元件10的根数少的情况下，上述的α_0的扩展角度$\Delta\alpha$变大。当波导元件10的根数增加时$\Delta\alpha$变小。对此，能够如下进行说明。为了简单，在图26中考虑$\theta=0°$的情况。也就是说，考虑光的出射方向与YZ平面平行的情况。

[0327] 设从N根(N是2以上的整数)波导元件10分别出射具有相同的出射强度和上述的相位Φ_q的光。此时，从N根波导元件10出射的合计的光(电场)的振幅分布的绝对值在远场中与用以下的式(18)表示的F(u)成比例。

[0328] [数式12]

[0329] $$F(u)=\left|\frac{\sin(Nu/2)}{\sin(u/2)}\right| \qquad (18)$$

[0330] 其中，用以下的式(19)表示u。

[0331] [数式13]

[0332] $$u=\frac{2\pi p}{\lambda}(\sin\alpha-\sin\alpha_0) \qquad (19)$$

[0333] α是在YZ平面上将观测点与原点连接的直线与Z轴所成的角度。α_0满足式(17)。式(18)的F(u)在$u=0$($\alpha=\alpha_0$)时成为N(最大)，在$u=\pm 2\pi/N$时成为0。当将满足$u=-2\pi/N$和$2\pi/N$的角度分别设为α_1和α_2($\alpha_1<\alpha_0<\alpha_2$)时，$\alpha_0$的扩展角度为$\Delta\alpha=\alpha_2-\alpha_1$。$-2\pi/N<u<2\pi/N$($\alpha_1<\alpha<\alpha_2$)的范围的峰值一般被称为主瓣。在主瓣的两侧存在被称为旁瓣的多个小的峰值。当将主瓣的宽度$\Delta u=4\pi/N$与从式(19)得到的$\Delta u=2\pi p\Delta(\sin\alpha)/\lambda$进行比较时，成为$\Delta(\sin\alpha)=2\lambda/(Np)$。如果$\Delta\alpha$小，则$\Delta(\sin\alpha)=\sin\alpha_2-\sin\alpha_1=[(\sin\alpha_2-\sin\alpha_1)/(\alpha_2-\alpha_1)]\Delta\alpha\fallingdotseq[d(\sin\alpha)/d\alpha]_{\alpha=\alpha_0}\Delta\alpha=\cos\alpha_0\Delta\alpha$。因此，用以下的式(20)表示扩展角度。

[0334] [数式14]

[0335] $$\Delta\alpha=\frac{2\lambda}{Np\cos\alpha_0} \qquad (20)$$

[0336] 因而，波导元件10的根数越多，则能够使扩展角度$\Delta\alpha$越小，在远方也能够实现高精细的光扫描。同样的讨论还能够应用于在图26中$\theta\neq 0°$的情况。

[0337] <从波导阵列出射的衍射光>

[0338] 从波导阵列除了出射0次光以外，还有可能出射高次的衍射光。为了简单，考虑在图26中$\theta=0°$的情况。也就是说，衍射光的出射方向与YZ平面平行。

[0339] 图27A是表示在p大于λ的情况下从波导阵列出射衍射光的情形的示意图。在该情况下，如果没有相移($\alpha_0=0°$)，则向图27A所示的实线箭头的方向出射0次光和± 1次光(根据p的大小，还有可能出射高次的衍射光)。当从该状态起赋予相移时($\alpha_0\neq 0°$)，如图27A所示的虚线箭头那样，0次光和± 1次光的出射角度向相同的旋转方向发生变化。还能够使用如± 1次光那样的高次光来进行光束扫描，但是在更简单地构成设备的情况下，仅使用0次光。为了避免0次光的增益降低，也可以通过使相邻的两个波导元件10之间的距离p小于λ来

抑制高次光的出射。即使在p>λ时，也能够通过物理性地遮断高次光来仅使用0次光。

[0340] 图27B是表示在p小于λ的情况下从波导阵列出射衍射光的情形的示意图。在该情况下，如果没有相移($\alpha_0=0°$)，则高次的衍射光由于衍射角度超过90度而不存在，向前方仅出射0次光。但是，在p为接近λ的值的情况下，如果赋予相移($\alpha_0\neq0°$)，则随着出射角度的变化而有时出射±1次光。图27C是表示在$p\fallingdotseq\lambda/2$的情况下从波导阵列出射衍射光的情形的示意图。在该情况下，即使赋予相移($\alpha_0\neq0°$)，也不出射±1次光，或者即使出射了，也是以非常大的角度来出射。在$p<\lambda/2$的情况下，即使赋予相移，也不会出射高次的光。但是，也没有使p进一步变小而获得的特别的优点。因此，p能够设定为例如λ/2以上。

[0341] 对于图27A至图27C中的向空气出射的0次光与±1次光的关系，能够如下那样定量地进行说明。式(18)的F(u)由于是$F(u)=F(u+2\pi)$，因此是2π的周期函数。在$u=\pm2m\pi$时，F(u)＝N(最大)。此时，以满足$u=\pm2m\pi$的出射角度α来出射±m次光。将$u=\pm2m\pi$($m\neq0$)附近的峰值(峰值宽度为$\Delta u=4\pi/N$)称为光栅瓣。

[0342] 当仅考虑高次光中的±1次光时($u=\pm2\pi$)，±1次光的出射角度α±满足以下的式(21)。

[0343] [数式15]

[0344] $$sin\alpha_{\pm}=sin\alpha_0\pm\frac{\lambda}{p}\qquad(21)$$

[0345] 根据不出射+1次光的条件$\sin\alpha_+>1$，得到$p<\lambda/(1-\sin\alpha_0)$。同样地，根据不出射-1次光的条件$\sin\alpha_-<-1$，得到$p<\lambda/(1+\sin\alpha_0)$。

[0346] 关于对于出射角度α_0(>0)的0次光是否出射±1次光的条件，如下那样进行分类。在$p\geq\lambda/(1-\sin\alpha_0)$的情况下，出射±1次光这两方。在$\lambda/(1+\sin\alpha_0)\leq p<\lambda/(1-\sin\alpha_0)$的情况下，不出射+1次光而出射-1次光。在$p<\lambda/(1+\sin\alpha_0)$的情况下，±1次光均不出射。特别是，如果满足$p<\lambda/(1+\sin\alpha_0)$，则在图26中$\theta\neq0°$的情况下也不出射±1次光。例如在不出射±1次光的情况下为了达成单侧10度以上的扫描，设为$\alpha_0=10°$，p满足$p\leq\lambda/(1+\sin10°)\fallingdotseq0.85\lambda$的关系。例如，如果将该式与针对关于p的前述的下限的条件进行组合，则p满足$\lambda/2\leq p\leq\lambda/(1+\sin10°)$。

[0347] 但是，为了满足不出射±1次光的条件，需要使p非常小。这使得波导阵列的制作困难。因此，考虑与±1次光的有无无关地将0次光在$0°<\alpha_0<\alpha_{max}$的角度范围内进行扫描。其中，设±1次光在该角度范围内不存在。为了满足该条件，在$\alpha_0=0°$时，+1次光的出射角度必须是$\alpha_+\geq\alpha_{max}$(即，$\sin\alpha_+=(\lambda/p)\geq\sin\alpha_{max}$)，在$\alpha_0=\alpha_{max}$时，-1次光的出射角度必须是$\alpha_-\leq0$(即，$\sin\alpha_-=\sin\alpha_{max}-(\lambda/p)\leq0$)。根据这些限制，得到$p\leq\lambda/\sin\alpha_{max}$。

[0348] 根据上述的讨论，±1次光在扫描的角度范围内不存在的情况下的0次光的出射角度α_0的最大值α_{max}满足以下的式(22)。

[0349] [数式16]

[0350] $$\sin\alpha_{max}=\frac{\lambda}{p}\qquad(22)$$

[0351] 例如，为了在±1次光在扫描的角度范围内不存在的情况下达成单侧10度以上的扫描，设为$\alpha_{max}=10°$，满足$p\leq\lambda/\sin10°\fallingdotseq5.76\lambda$。例如，如果将该式与针对关于p的前述的下限的条件进行组合，则p满足$\lambda/2\leq p\leq\lambda/\sin10°$。该p的上限($p\fallingdotseq5.76\lambda$)相比于不出射±1次

光的情况下的上限(p≒0.85λ)足够大,因此波导阵列的制作比较容易。在此,在所使用的光不是单一波长的光的情况下,将所使用的光的中心波长设为λ。

[0352] 根据以上内容,为了扫描更广的角度范围,需要使波导间的距离p变小。另一方面,为了在p小的情况下使式(20)中的出射光的扩展角度Δα变小,需要增加波导阵列的根数。波导阵列的根数是根据用途和所要求的性能适当决定的。波导阵列的根数例如是16根以上,根据用途可以是100根以上。

[0353] <导入到波导阵列的光的相位控制>

[0354] 为了控制从各个波导元件10出射的光的相位,例如在向波导元件10导入光的前级设置改变光的相位的移相器。本实施方式中的光扫描设备100具备与多个波导元件10分别连接的多个移相器以及对在各移相器中传播的光的相位进行调整的第2调整元件。各移相器包括与多个波导元件10的对应的一个波导元件10中的光波导层20直接或经由其它波导连接的波导。第2调整元件通过分别改变从多个移相器向多个波导元件10传播的光的相位的差来改变从多个波导元件10出射的光的方向(即,第3方向D3)。在以下的说明中,与波导阵列同样地,有时将排列的多个移相器称为“移相器阵列”。

[0355] 图28是表示移相器80与波导元件10直接连接的结构的例的示意图。在图28中,用虚线框包围的部分相当于移相器80。该移相器80具有对置的一对镜(第5镜30a和第6镜40a,以下有时仅称为镜)以及设置于镜30a与镜40a之间的波导20a。该例中的波导20a是由与波导元件10中的光波导层20共用的构件构成,与光波导层20直接连接。同样地,镜40a也由与波导元件10中的镜40共用的构件构成,与镜40连接。镜30a具有比波导元件10中的镜30低的透过率(高的反射率)。镜30a与镜30连接。在移相器80中,为了不放射光,镜30a的透过率被设计成与镜40、40a同样的低值。即,第5镜30a和第6镜40a的光透过率比第1镜30的光透过率低。在该例中,移相器80相当于本公开中的“第1波导”。这样,“第1波导”也可以作为移相器发挥功能。

[0356] 图29是从光出射面的法线方向(Z方向)观察波导阵列10A和移相器阵列80A的示意图。在图29所示的例中,全部移相器80均具有相同的传播特性,全部波导元件10均具有相同的传播特性。各个移相器80和各个波导元件10既可以是相同的长度,也可以是长度不同。在各个移相器80的长度相等的情况下,例如利用驱动电压来调整各自的相移量。另外,通过设为使各个移相器80的长度等步进地变化的构造,还能够用相同的驱动电压来赋予等步进的相移。并且,该光扫描设备100还具备:光分路器90,将光分路后供给至多个移相器80;第1驱动电路110,对各波导元件10进行驱动;以及第2驱动电路210,对各移相器80进行驱动。图29中的直线的箭头表示光的输入。通过对分开设置的第1驱动电路110和第2驱动电路210分别独立地进行控制,能够实现二维扫描。在该例中,第1驱动电路110作为第1调整元件的一个要素发挥功能,第2驱动电路210作为第2调整元件的一个要素发挥功能。

[0357] 第1驱动电路110如后所述那样通过改变(调制)各波导元件10中的光波导层20的折射率或厚度,来改变从光波导层20出射的光的角度。第2驱动电路210如后所述那样通过改变各移相器80中的波导20a的折射率,来改变在波导20a的内部传播的光的相位。光分路器90既可以由通过全反射来传播光的波导构成,也可以由与波导元件10同样的反射型波导构成。

[0358] 此外,也可以在针对在光分路器90中分路后的各个光控制相位之后,将各个光导

入到移相器80。在该相位控制中，例如能够使用通过调整到移相器80为止的波导的长度来进行的被动的相位控制构造。或者，也可以使用具有与移相器80同样的功能的能够用电信号进行控制的移相器。也可以通过这种方法，例如在向移相器80导入之前调整相位，使得向全部移相器80供给等相位的光。通过这种调整，能够使第2驱动电路210对各移相器80的控制简单。

[0359] 图30是示意性地表示移相器80中的波导经由其它波导85与波导元件10中的光波导层20连接的结构的例的图。其它波导85也可以是上述的任意的第1波导1。另外，其它波导85也可以是图14所示的波导1和1'。各移相器80既可以具有与图28所示的移相器80相同的结构，也可以具有不同的结构。在图30中，使用表示相移量的符号Φ_0～Φ_5来简易地表现了移相器80。在以后的图中也有时使用同样的表现。在移相器80中能够使用利用全反射来传播光的波导。在该情况下，不需要如图28所示的镜30a和40a。

[0360] 图31是表示在光分路器90中插入了排列成级联状的多个移相器80的结构例的图。在该例中，在光分路器90的路径中途连接有多个移相器80。各移相器80对所传播的光赋予固定的相移量Φ。通过使各个移相器80对传播光赋予的相移量固定，相邻的两个波导元件10之间的相位差变得相等。因而，第2调整元件能够向全部移相器80发送共用的相位控制信号。因此，具有结构变得容易的优点。

[0361] 为了在光分路器90、移相器80以及波导元件10等之间高效地传播光，可以利用波导。对波导可以使用具有比周围的材料高的折射率的、光的吸收少的光学材料。例如，可以使用Si、GaAs、GaN、SiO_2、TiO_2、Ta_2O_5、AlN、SiN等材料。另外，为了从光分路器90向波导元件10传播光，也可以使用上述的任意的第1波导1。另外，为了从光分路器90向波导元件10传播光，也可以使用图14所示的波导1和1'。

[0362] 在移相器80中，为了对光赋予相位差而需要改变光程的机构。为了改变光程，在本实施方式中，对移相器80中的波导的折射率进行调制。由此，能够调整从相邻的两个移相器80向波导元件10供给的光的相位差。更具体地说，通过进行移相器80所具有的波导内的相移材料的折射率调制，能够赋予相移。关于进行折射率调制的结构的具体例，稍后进行说明。

[0363] <第1调整元件的例>

[0364] 接着，说明对波导元件10中的光波导层20的折射率或厚度进行调整的第1调整元件的结构例。首先，说明调整折射率的情况下的结构例。

[0365] 图32A是示意性地表示第1调整元件60(以下，有时仅称为调整元件)的结构的一例的立体图。在图32A所示的例中，具有一对电极62的调整元件60被组合在波导元件10。光波导层20被一对电极62夹着。光波导层20和一对电极62设置于第1镜30与第2镜40之间。光波导层20的侧面(与XZ面平行的表面)的整体与电极62接触。光波导层20包括在被施加电压的情况下对于在光波导层20中传播的光的折射率发生变化的折射率调制材料。调整元件60还具有从一对电极62引出的布线64以及与布线64连接的电源66。通过接通电源66来通过布线64对一对电极62施加电压，由此能够对光波导层20的折射率进行调制。因此，还能够将调整元件60称为折射率调制元件。

[0366] 图32B是示意性地表示第1调整元件60的其它结构例的立体图。在该例中，只有光波导层20的侧面的一部分与电极62接触。除此以外的方面与图32A所示的结构相同。这样，

即使是局部地改变光波导层20的折射率的结构，也能够改变出射光的方向。

[0367] 图32C是示意性地表示第1调整元件60的又一其它结构例的立体图。在该例中，一对电极62具有与第1镜30或第2镜40的反射面大致平行的层状的形状。一个电极62被夹在第1镜30与光波导层20之间。另一个电极62被夹在第2镜40与光波导层20之间。在采用这种结构的情况下，能够对电极62使用透明电极。根据这种结构，具有制造比较容易的优点。

[0368] 在图32A至图32C所示的例中，各波导元件10中的光波导层20包括在被施加电压的情况下对于在光波导层20中传播的光的折射率发生变化的材料。第1调整元件60具有夹着光波导层20的一对电极62，通过对一对电极62施加电压，来改变光波导层20的折射率。关于电压的施加，能够由前述的第1驱动电路110来进行。

[0369] 在此，说明可以使用于各结构要素的材料的例。

[0370] 作为镜30、40、30a以及40a的材料，能够使用例如由电介质形成的多层膜。关于使用多层膜的镜，例如能够通过将各自具有1/4波长的光学厚度的、折射率不同的多个膜周期性地形成来制作。根据这种多层膜镜，能够得到高的反射率。作为膜的材料，例如能够使用SiO_2、TiO_2、Ta_2O_5、Si、SiN等。各镜不限于多层膜镜，也可以由Ag、Al等金属形成。

[0371] 对于电极62和布线64，能够利用具有导电性的各种材料。例如能够使用Ag、Cu、Au、Al、Pt、Ta、W、Ti、Rh、Ru、Ni、Mo、Cr、Pd等金属材料、或ITO、氧化锡、氧化锌、IZO(注册商标)、SRO等无机化合物、或PEDOT、聚苯胺等导电性高分子等导电性材料。

[0372] 在光波导层20的材料中，可以利用电介质、半导体、电光学材料、液晶分子等的各种各样的透光性的材料。作为电介质，例如可以举出SiO_2、TiO_2、Ta_2O_5、SiN、AlN。作为半导体材料，例如可以举出Si类、GaAs类、GaN类的材料。作为电光学材料，例如可以举出铌酸锂($LiNbO_3$)、钛酸钡($BaTiO_3$)、钽酸锂($LiTaO_3$)、氧化锌(ZnO)、锆钛酸铅镧(PLZT)、钽酸铌酸钾(KTN)等。

[0373] 作为对光波导层20的折射率进行调制的方法，例如存在利用载流子注入效应、电光学效应、双折射效应或热光学效应的方法。下面，说明各方法的例。

[0374] 关于利用载流子注入效应的方法，可以通过利用半导体的pin结的结构来实现。在该方法中，使用用p型半导体和n型半导体夹着掺杂浓度低的半导体的构造，通过对半导体注入载流子来对折射率进行调制。在该结构中，各波导元件10中的光波导层20包含半导体材料。一对电极62中的一个电极62可以包括p型半导体，另一个电极62可以包括n型半导体。第1调整元件60通过对一对电极62施加电压来对半导体材料注入载流子，改变光波导层20的折射率。只要用无掺杂或低掺杂浓度的半导体制作光波导层20，并以与其相接的方式设置p型半导体和n型半导体即可。也可以设为如下的复合结构：以p型半导体及n型半导体与低掺杂浓度的半导体相接的方式配置，并且导电性材料与p型半导体及n型半导体相接。例如，当对Si注入$10^{20}cm^{-3}$左右的载流子时，Si的折射率变化0.1左右(例如参照“F ree charge carrier induced refractive index modulation of crystalline Silico n”7th IEEE International Conference on Group IV Photonics,P102-104,1-3Sept.2010)。在采用该方法的情况下，作为图32A至图32C中的一对电极62的材料，可以使用p型半导体和n型半导体。或者，也可以由金属构成一对电极62，使电极62与光波导层20之间的层、或光波导层20本身包含p型或n型半导体。

[0375] 关于利用电光学效应的方法，可以通过对包含电光学材料的光波导层20施加电场

来实现。特别是，如果将KTN用作电光学材料，则能够获得大的电光学效应。KTN在比从立方晶向四方晶的相变温度稍高的温度下相对介电常数显著上升，因此能够利用该效应。例如根据“Low-Driving-Voltage Electro-Optic Modulator With Novel KTa1-xNbx03Crystal Waveguides”Jp n.J.Appl.Phys.,Vol.43,No.8B(2004)，对于波长1.55μm的光得到电光学常数$g=4.8\times10^{-15}m^2/V^2$。因此，当施加例如2kV/mm的电场时，折射率变化0.1(=$gn^3E^3/2$)左右。这样，在利用电光学效应的结构中，各波导元件10中的光波导层20包含KTN等电光学材料。第1调整元件60通过对一对电极62施加电压来改变电光学材料的折射率。

[0376] 在利用基于液晶的双折射效应的方法中，通过用电极62来驱动包含液晶材料的光波导层20，能够改变液晶的折射率各向异性。由此，能够调制对于在光波导层20中传播的光的折射率。液晶一般具有0.1～0.2左右的双折射率差，因此通过用电场来改变液晶的取向方向，得到与双折射率差同等的折射率变化。这样，在利用液晶的双折射效应的结构中，各波导元件10中的光波导层20包含液晶材料。第1调整元件60通过对一对电极62施加电压来改变液晶材料的折射率各向异性，改变光波导层20的折射率。

[0377] 热光学效应是随着材料的温度变化而折射率发生变化的效应。为了进行基于热光学效应的驱动，也可以通过对包含热光学材料的光波导层20进行加热来调制折射率。

[0378] 图33是表示将包括由具有高的电阻的材料构成的加热器68的调整元件60与波导元件10相组合的结构的例的图。加热器68可以配置于光波导层20的附近。通过接通电源66来通过包含导电性材料的布线64对加热器68施加电压，由此能够加热。也可以使加热器68与光波导层20接触。在本结构例中，各波导元件10中的光波导层20包含随着温度变化而折射率发生变化的热光学材料。第1调整元件60具有与光波导层20接触或配置于光波导层20的附近的加热器68。第1调整元件60通过利用加热器68对热光学材料进行加热，来改变光波导层20的折射率。

[0379] 也可以用高电阻材料制作光波导层20本身，直接用一对电极62夹着光波导层20并施加电压，由此进行加热。在该情况下，第1调整元件60具有夹着光波导层20的一对电极62。第1调整元件60通过对一对电极62施加电压来对光波导层20中的热光学材料(例如高电阻材料)进行加热，由此改变光波导层20的折射率。

[0380] 作为使用于加热器68或光波导层20的高电阻材料，能够使用半导体或电阻率大的金属材料。作为半导体，例如能够使用Si、GaAs或GaN等。另外，作为电阻率高的金属，可以使用铁、镍、铜、锰、铬、铝、银、金、铂或将这些多个材料相组合的合金等。例如，对于波长1500nm的光的、Si的折射率的温度依存性dn/dT是$1.87\times10^{-4}(K^{-1})$(参照“Temperature-dependent refractive index of silicon and germanium,”Proc.SPIE 6273,Optomechani cal Technologies for Astronomy,62732J)。因而，当使温度变化500℃时，能够使折射率变化0.1左右。如果在光波导层20的附近设置加热器68并局部地进行加热，则即使是500℃这样的大的温度变化，也能够比较高速地进行。

[0381] 基于载流子注入的折射率变化的响应速度是由载流子的寿命来决定的。一般来说，载流子寿命是纳秒(ns)级，因此得到100MHz～1GHz左右的响应速度。

[0382] 在使用电光学材料的情况下，通过施加电场来诱发电子的极化，从而产生折射率变化。诱发极化的速度一般来说极为高速，在$LiNbO_3$、$LiTaO_3$等材料中，响应时间是飞秒(fs)

级，因此能够实现超过1GHz的高速驱动。

[0383] 在使用热光学材料的情况下，由温度升降的速度决定折射率变化的响应速度。通过局部地仅加热波导附近，得到急剧的温度上升。另外，当在局部地温度上升的状态下切断加热器时，通过向周边散热来能够急剧地降低温度。快时能够得到100KHz左右的响应速度。

[0384] 在以上的例中，第1调整元件60通过使各光波导层20的折射率同时变化固定的值，来改变出射光的波矢量的X分量。在折射率调制中，其调制量依赖于材料的特性，为了得到大的调制量，需要施加高的电场或者使液晶取向。另一方面，从波导元件10出射的光的方向还依赖于镜30与镜40之间的距离。因而，也可以通过改变镜30与镜40之间的距离来改变光波导层20的厚度。下面，说明改变光波导层20的厚度的结构的例。

[0385] 为了改变光波导层20的厚度，光波导层20可以由例如气体或液体等容易变形的材料构成。通过使夹着光波导层20的第1镜及第2镜30和40的至少一方移动，能够改变光波导层20的厚度。此时，为了保持上下的第1镜30与第2镜40之间的平行度，可以采用使镜30或40的变形为最小限度的结构。

[0386] 图34是表示用由容易变形的材料构成的支承构件70保持了镜30的结构例的图。支承构件70可以包括与镜30相比相对地容易变形的厚度薄的构件或细的框架。在该例中，第1调整元件具有与各波导元件10中的第1镜30连接的致动器。致动器通过改变第1镜30与第2镜40之间的距离，来改变光波导层20的厚度。此外，致动器可以与第1镜30和第2镜40的至少一方连接。作为对镜30进行驱动的致动器，例如能够使用利用静电力、电磁感应、压电材料、形状记忆合金或热的各种致动器。

[0387] 在利用静电力的结构中，第1调整元件中的致动器利用由静电力产生的电极间的引力或斥力使第1镜及第2镜30及40的至少一方移动。以下，说明这样的结构的一些例子。

[0388] 图35是表示通过在电极间发生的静电力使第1镜及第2镜30及40的至少一方移动的结构的一例的图。在该例中，在镜30与光波导层20之间及镜40与光波导层20之间，设有具有透光性的电极62(例如透明电极)。配置在镜30的两侧的支承部件70分别一端被固定到镜30上，另一端被固定到未图示的壳体上。通过向一对电极62施加正负的电压而发生引力，第1镜30与第2镜40之间的距离缩小。如果停止电压的施加，则发生保持镜的支承部件70的复原力，第1镜30与第2镜40之间的距离恢复为原来的长度。产生这样的引力的电极62不需要设在镜的整面上。该例中的致动器具有一对电极62，一对电极62的一方被固定到第1镜30，一对电极62的另一方被固定到第2镜40。致动器通过向一对电极62施加电压，使电极间产生静电力，使第1镜30与第2镜40的距离变化。另外，向电极62的电压的施加由上述第1驱动电路110(例如图29)进行。

[0389] 图36是表示将产生引力的电极62配置在不妨碍光的传播的位置处的结构例的图。在该例中，不需要使电极62成为透明。如图示那样，被固定在第1镜及第2镜30及40的各自上的电极62不需要是单一的，也可以被分割。通过计测分割的电极的一部分的静电电容，能够进行计测第1镜30与第2镜40之间的距离、调整第1镜30与第2镜40的平行度等的反馈控制。

[0390] 也可以代替利用电极间的静电力，而利用使线圈内的磁性体产生引力或斥力的电磁感应来驱动第1镜及第2镜30及40的至少一方。

[0391] 在利用压电材料、形状记忆合金或基于热的变形的致动器中，利用由于从外部施加的能量而材料发生变形的现象。例如，作为代表性的压电材料的锆钛酸铅(PZT)通过向极

化方向施加电场来伸缩。能够利用该压电材料来直接改变镜30与镜40之间的距离。但是，PZT的压电常数是100pm/V左右，因此即使施加例如1V/μm的电场，位移量也是微小到0.01％左右。因此，在使用这种压电材料的情况下，无法得到镜的足够的移动距离。因此，能够使用被称为单压电片或双压电片的结构来增加变化量。

[0392] 图37是表示包含压电材料的压电元件72的例的图。箭头表示压电元件72的位移方向，该箭头的大小表示位移量。如图37所示，压电元件72的位移量依赖于材料的长度，因此面方向的位移量大于厚度方向的位移量。

[0393] 图38A是表示使用图37所示的压电元件72的具有单压电片的构造的支承构件74a的结构例的图。该支承构件74a具有1层的压电元件72与1层的非压电元件71层叠而成的构造。通过将这种支承构件74a固定于第1镜及第2镜30和40的至少一方并使其变形，能够改变第1镜30与第2镜40之间的距离。

[0394] 图38B是表示通过对压电元件72施加电压来支承构件74a发生变形的状态的例的图。当对压电元件72施加电压时，只有压电元件72沿面方向伸长，因此支承构件74a整体弯曲。因此，与不存在非压电元件71的情况相比，能够增加位移量。

[0395] 图39A是表示使用图37所示的压电元件72的具有双压电片的构造的支承构件74b的结构例的图。该支承构件74b具有2层的压电元件72与其间的1层的非压电元件71层叠而成的构造。通过将这种支承构件74b固定于第1镜30和第2镜40的至少一方并使其变形，能够改变第1镜30与第2镜40之间的距离。

[0396] 图39B是表示通过对两侧的压电元件72施加电压来支承构件74a发生变形的状态的例的图。在双压电片中，在上下的压电元件72中位移方向相反。因此，在使用双压电片的结构的情况下，与单压电片的结构相比，能够进一步增加位移量。

[0397] 图40是表示将图38A所示的支承构件74a配置于镜30的两侧的致动器的例的图。通过这种压电致动器来以使梁弯曲的方式使支承构件74a变形，能够改变镜30与镜40之间的距离。也可以代替图38A所示的支承构件74a而使用图39A所示的支承构件74b。

[0398] 此外，单压电片型的致动器以圆弧状发生变形，因此如图41A所示，在未固定的一侧的顶端产生倾斜。因此，如果镜30的刚性低，则难以将镜30与镜40保持为平行。因此，也可以如图41B所示那样将伸缩的方向不同的两个单压电片型的支承构件74a串列地接在一起。在图41B的例中，在支承构件74a中，在伸缩的区域和伸展的区域中弯曲的方向相反。其结果，能够避免在未固定的一侧的顶端产生倾斜。通过使用这种支承构件74a，能够抑制第1镜30和第2镜40倾斜。

[0399] 与上述同样地，还能够通过将热膨胀系数不同的材料贴在一起来实现弯曲变形的梁构造。并且，还能够用形状记忆合金实现梁构造。这些均可以利用于镜30与镜40之间的距离的调整。

[0400] 另外，还能够将光波导层20设为密闭空间，用小型泵等来将内部的空气或液体取出或放入来改变光波导层20的体积，由此改变镜30与镜40之间的距离。

[0401] 如上，第1调整元件中的致动器能够通过多种多样的构造来改变光波导层20的厚度。这种厚度的变化既可以针对多个波导元件10中的各个波导元件10个别地进行，也可以针对全部波导元件10一律地进行。特别是在多个波导元件10的构造全部相同的情况下，各波导元件10中的镜30与镜40之间的距离被控制为固定。因此，一个致动器能够对全部波导

元件10一并进行驱动。

[0402] 图42是表示用致动器对保持多个第1镜30的支承构件(即,辅助基板)52一并进行驱动的结构的例的图。在图42中,第2镜40是一个板状的镜。镜40如前述的实施方式那样也可以被分割为多个镜。支承构件52由具有透光性的材料构成,在两侧设置有单压电片型的压电致动器。

[0403] 图43是表示多个波导元件10中的第1镜30是一个板状的镜的结构例的图。在该例中,第2镜40是按每个波导元件10被分割的。如图42和图43的例那样,各波导元件10中的第1镜及第2镜30和40的至少一方也可以是一个板状的镜的部分。致动器也可以通过使该板状的镜移动来改变第1镜30与第2镜40之间的距离。

[0404] <用于相移的折射率调制>

[0405] 接着,说明用于利用第2调整元件进行多个移相器80中的相位的调整的结构。关于多个移相器80中的相位的调整,可以通过改变移相器80中的波导20a的折射率来实现。关于该折射率的调整,能够利用与已经说明的对各波导元件10中的光波导层20的折射率进行调整的方法完全相同的方法来实现。例如,能够直接应用参照图32A至图33来说明的折射率调制的结构和方法。在与图32A至图33有关的说明中,将波导元件10改称为移相器80,将第1调整元件60改称为第2调整元件,将光波导层20改称为波导20a,将第1驱动电路110改称为第2驱动电路210。因此,省略关于移相器80中的折射率调制的详细的说明。

[0406] 各移相器80中的波导20a包含根据电压的施加或温度变化而折射率发生变化的材料。第2调整元件通过对各移相器80中的波导20a施加电压、或者改变波导20a的温度,来改变波导20a内的折射率。由此,第2调整元件能够分别改变从多个移相器80向多个波导元件10传播的光的相位的差。

[0407] 各移相器80可以构成为在直到光经过为止的期间能够进行至少2π的相移。在移相器80中的波导20a的每单位长度的折射率的变化量小的情况下,也可以使波导20a的长度大。例如,移相器80的大小可以是几百微米(μm)至几毫米(mm),根据情况也可以是其以上。与此相对,各波导元件10的长度可以是例如几十μm至几十mm左右的值。

[0408] <用于同步驱动的结构>

[0409] 在本实施方式中,第1调整元件以使从多个波导元件10出射的光的方向一致的方式对各波导元件10进行驱动。为了使从多个波导元件10出射的光的方向一致,例如对各波导元件10个别地设置驱动部,对这些驱动部进行同步驱动。

[0410] 图44是表示从各个波导元件10的电极62共同地取出布线64的结构的例的图。图45是表示使一部分电极62和布线64共同化的结构的例的图。图46是表示对多个波导元件10配置了共用的电极62的结构的例的图。在图44～图46中,直线的箭头表示光的输入。通过设为如这些图所示的结构,能够使用于对波导阵列10A进行驱动的布线简单。

[0411] 根据本实施方式的结构,能够以简单的设备结构来二维地扫描光。例如在对由N根波导元件10构成的波导阵列进行同步驱动的情况下,如果设置各自独立的驱动电路,则需要N个驱动电路。但是,如果能够设法如上所述那样将电极或布线共用,则能够用一个驱动电路来使其进行动作。

[0412] 在波导阵列10A的前级设置了移相器阵列80A的情况下,为了使各个移相器80独立地动作,进一步需要N个驱动电路。但是,通过如图31的例那样将移相器80配置为级联状,用

一个驱动电路也能够使其进行动作。即，在本公开的结构中，能够用2个至2N个驱动电路来实现二维地扫描光的动作。另外，也可以使波导阵列10A和移相器阵列80A分别独立地动作，因此能够使彼此的布线不相互干扰而容易地引出。

[0413] 〈制造方法〉

[0414] 能够通过半导体工艺、3D打印机、自组织、纳米压印等能够进行高精度的微细加工的工艺，来制造波导阵列、移相器阵列80A以及将它们连接的波导。通过这些工艺，能够在小的区域集成所需的要素。

[0415] 特别是，如果利用半导体工艺，则具有加工精度极高且量产性也高的优点。在利用半导体工艺的情况下，能够在基板上通过蒸镀、溅射、CVD、涂布等来使各种材料成膜。并且，通过光刻和蚀刻工艺，能够进行微细加工。作为基板的材料，例如能够使用Si、SiO_2、Al_2O_3、AlN、SiC、GaAs、GaN等。

[0416] 〈变形例〉

[0417] 接着，说明本实施方式的变形例。

[0418] 图47是示意性地表示将配置移相器阵列80A的区域较大地确保且将波导阵列较小地集成的结构的例的图。根据这种结构，即使在构成移相器80的波导的材料中只发生小的折射率变化的情况下，也能够确保足够的相移量。另外，在用热来驱动移相器80的情况下，能够将间隔取得大，能够减小对相邻的移相器80带来的影响。

[0419] 图48是表示两个移相器阵列80Aa和80Ab分别配置于波导阵列10A的两侧的结构例的图。在该例中，光扫描设备100在波导阵列10A的两侧具有两个光分路器90a和90b以及两个移相器阵列80Aa和80Ab。在图48中用点线表示的直线的箭头表示在光分路器90a及90b和移相器80a及80b中传播的光。移相器阵列80Aa和光分路器90a连接于波导阵列10A的一侧，移相器阵列80Ab和光分路器90b设置于波导阵列10A的另一侧。光扫描设备100还具备光开关92，该光开关92切换向光分路器90a的光的供给和向光分路器90b的光的供给。通过对光开关92进行切换，能够切换从图48中的左侧向波导阵列10A输入光的状态和从图48中的右侧向波导阵列10A输入光的状态。

[0420] 根据本变形例的结构，具有能够扩大从波导阵列10A出射的光在X方向上的扫描范围的优点。在从单侧向波导阵列10A输入光的结构中，通过各波导元件10的驱动，能够使光的方向从正面方向(即，+Z方向)沿着+X方向和-X方向中的某个方向进行扫描。与此相对，在本变形例中，在从图48中的左侧的光分路器90a输入了光的情况下，能够从正面方向沿着+X方向扫描光。另一方面，在从右侧的光分路器90b输入了光的情况下，能够从正面方向向-X方向扫描光。也就是说，在图48的结构中，能够在从正面观察时的图48中的左右两个方向上扫描光。因此，与从单侧输入光的结构相比，能够使扫描的角度范围大。对于光开关92，从未图示的控制电路(例如微计算机单元)用电信号进行控制。根据本结构例，能够利用电信号来控制全部元件的驱动。

[0421] 在以上的说明中，仅使用了波导元件10的排列方向与波导元件10延伸的方向正交的波导阵列。但是，这些方向不需要正交。例如，也可以使用如图49A所示的结构。图49A表示波导元件10的排列方向d1与波导元件10延伸的方向d2不正交的波导阵列的结构例。在该例中，各波导元件10的光出射面也可以不在同一平面内。通过这种结构，也能够通过适当地控制各波导元件10和各移相器来使光的出射方向d3二维地变化。

[0422] 图49B表示波导元件10的排列间隔不固定的波导阵列的结构例。在采用这种结构的情况下，也能够通过适当地设定各移相器的相移量来进行二维扫描。在图49B的结构中也是，波导阵列的排列方向d1与各波导元件10延伸的方向d2也可以不正交。

[0423] 〈在基板上配置有第1波导和第2波导的实施方式〉

[0424] 接着，说明在基板上配置有第1波导和第2波导的光扫描设备的实施方式。

[0425] 本实施方式中的光扫描设备具备第1波导、与第1波导连接的第2波导以及支承第1波导和第2波导的基板。更具体地说，光扫描设备具备在第1方向上排列的多个波导单元和支承这些多个波导单元的基板。多个波导单元各自具备第1波导和第2波导。第2波导与第1波导连接，向与第1方向交叉的第2方向传播光。基板支承各波导单元中的第1波导和第2波导。

[0426] 第2波导相当于前述的实施方式中的反射型波导。即，第2波导具有：第1镜，具有多层反射膜；第2镜，具有与第1镜的所述多层反射膜对置的多层反射膜；以及光波导层，位于第1镜与第2镜之间，传播被输入到所述第1波导且在第1波导中传播的光。第1镜具有比第2镜高的光透过率，将在光波导层内传播的光的一部分出射到光波导层的外部。光扫描设备还具备调整元件，该调整元件通过改变第2波导中的光波导层的折射率和厚度的至少一方来改变从第2波导出射的光的方向。

[0427] 根据本实施方式，通过在一个基板上配置第1波导和第2波导，第1波导1与第2波导10的对位变得容易。并且，因热膨胀引起的第1波导与第2波导的位置的偏移得以抑制。其结果，能够高效地从第1波导向第2波导导入光。

[0428] 光波导层可以包含例如在被施加电压的情况下对于在光波导层中传播的光的折射率发生变化的材料。在该情况下，调整元件通过对光波导层施加电压来改变光波导层的折射率。由此，调整元件改变从第2波导出射的光的方向。

[0429] 第1波导的至少一部分也可以具有作为前述的移相器的功能。在该情况下，在第1波导中例如组装对折射率进行调制的机构。光扫描设备也可以具备对第1波导的至少一部分区域的折射率进行调制的第2调整元件。第2调整元件例如可以是配置于第1波导的附近的加热器。能够利用从加热器发出的热来改变第1波导的至少一部分区域的折射率。由此，调整从第1波导向第2波导输入的光的相位。用于调整从第1波导向第2波导输入的光的相位的结构如前所述那样多种多样。可以采用它们中的任意的结构。

[0430] 移相器也可以设置于第1波导的外部。在该情况下，第1波导位于外部的移相器与波导元件(第2波导)之间。移相器与第1波导之间也可以不存在明确的边界。例如，移相器与第1波导也可以共用波导和基板等结构要素。

[0431] 第1波导既可以是利用光的全反射的一般的波导，也可以是反射型波导。相位被调制的光经过第1波导被导入到第2波导。

[0432] 下面，更详细地说明在基板上配置有第1波导和第2波导的光扫描设备的实施方式。在以下的说明中，设光扫描设备具备多个波导单元。光扫描设备也可以具备单个波导单元。即，将第1波导与第2波导的组合仅具备1个的光扫描设备也包括在本公开的范围中。

[0433] 图50A是示意性地表示本实施方式中的光扫描设备的图。该光扫描设备具备在Y方向上排列的多个波导单元和支承多个波导单元的基板50。各波导单元具备第1波导1和第2波导10。基板50支承各波导单元中的第1波导1和第2波导10。

[0434] 基板50沿着XY平面扩展。基板50的上表面和下表面配置成与XY平面大致平行。例如可以使用玻璃、Si、SiO_2、GaAs、GaN等材料来构成基板50。

[0435] 第1波导阵列1A包括在Y方向上排列的多个第1波导1。第1波导1各自具有沿X方向延伸的构造。第2波导阵列10A包括在Y方向上排列的多个第2波导10。第2波导10各自具有沿X方向延伸的构造。

[0436] 图50B是图50A中的用一个虚线表示的XZ平面上的光扫描设备的截面图。在基板50上配置有第1波导1和第2波导10。第2镜40在光波导层20与基板50之间以及第1波导1与基板50之间的区域扩展。第1波导1例如是利用光的全反射的一般的波导。该一般的波导例如包括Si或GaAs等半导体的波导。第2波导10具有光波导层20、第1镜30以及第2镜40。光波导层20位于对置的第1镜30与第2镜40之间。光波导层20传播被输入到第1波导且在第1波导1中传播的光。

[0437] 本实施方式中的光波导层20包含在被施加电压的情况下对于在光波导层20中传播的光的折射率发生变化的材料。调整元件具有一对电极。一对电极包括下部电极62a和上部电极62b。下部电极62a配置于光波导层20与第2镜40之间。上部电极62b配置于光波导层20与第1镜30之间。本实施方式中的调整元件通过对一对电极62a、62b施加电压来改变光波导层20的折射率。由此，调整元件改变从第2波导10出射的光的方向。一对电极62a、62b各自既可以如图示那样与光波导层20接触，也可以不接触。

[0438] 在图50B的结构例中，在具有层叠的基板50和第2镜40的共用的支承体上配置其它构造物。即，在成一体地形成的一个支承体上，制作第1波导1、第1电极62a、光波导层20、第2电极62b以及第1镜30的层叠体。由于使用共用的支承体，因此第1波导1和光波导层20的制作时的对位变得容易。并且，因热膨胀引起的第1波导1与光波导层20的连接部分的位置的偏移得以抑制。支承体例如是支承基板。

[0439] 图50C是图50A中的用另一个虚线表示的YZ平面上的光扫描设备的截面图。在该例中，第2镜40是由多个第2波导10共用的。即，多个第2波导10中的第2镜40没有被相互分离。同样地，下部电极62a也是由多个第2波导10共用的。由此，制造工艺被简化。

[0440] 另一方面，多个第2波导10中的光波导层20、上部电极62b以及第1镜30被相互分离地配置。由此，各光波导层20能够向X方向传播光。上部电极62b和第1镜30也可以不分离。

[0441] 下面，说明本实施方式中的光扫描设备的变形例。在以下的变形例中，省略了重复的结构要素的说明。

[0442] 图51A是表示在第2镜40与波导1之间配置有电介质层51的结构例的图。该例中的光扫描设备还具备在第2镜40与第1波导1之间扩展的电介质层51。该电介质层51作为使第1波导1与光波导层20的高度的水平一致的调整层发挥功能。下面，将电介质层51称为调整层51。通过调整Z方向上的调整层51的厚度，能够提高从第1波导1向光波导层20的光的耦合效率。并且，调整层51起到防止第1波导1中的导波光被第2镜40吸收、散射或反射的隔离物的作用。第1波导1通过全反射来传播光。因此，调整层51由具有比第1波导1的折射率低的折射率的透明材料构成。例如，可以利用SiO_2等电介质材料来形成调整层51。

[0443] 也可以在第1波导1上还配置其它电介质层来作为保护层。

[0444] 图51B是表示在第1波导1上还配置有第2电介质层61的结构例的图。这样，光扫描设备也可以还具备覆盖第1波导1的至少一部分的第2电介质层61。第2电介质层61与第1波

导1相接，由具有比第1波导1的折射率低的折射率的透明材料构成。第2电介质层61作为防止微颗粒或灰尘附着于第1波导1上的保护层发挥功能。由此，能够抑制第1波导1中的导波光的损耗。下面，将第2电介质层61称为保护层61。

[0445] 图51B所示的第1波导1作为移相器发挥功能。光扫描设备还具备第2调整元件，该第2调整元件通过对第1波导1的折射率进行调制来改变被导入到光波导层20的光的相位。在第1波导1包含热光学材料的情况下，第2调整元件包括加热器68。第2调整元件利用从加热器68发出的热来对第1波导1的折射率进行调制。

[0446] 加热器68所包含的金属等布线材料可能对光进行吸收、散射或反射。保护层61通过使第1波导1与加热器68远离，来抑制第1波导1中的导波光的损耗。

[0447] 保护层61也可以由与调整层51相同的材料(例如SiO_2)形成。保护层61也可以不仅覆盖第1波导1，还覆盖第2波导10的至少一部分。在该情况下，第1镜30的至少一部分被保护层61所覆盖。保护层61也可以仅覆盖第2波导10。如果保护层61是透明材料，则从第2波导10出射的光透过保护层61。因此，能够将光的损失抑制为较小。

[0448] 图52是表示第2镜40未配置于第1波导1与基板50之间的区域的结构例的图。该例中的调整层51在第1波导1与基板50之间扩展。调整层51与第1波导1及基板50相接。由于第2镜40不处于第1波导1之下，因此第1波导1中的导波光不受第2镜40的影响。

[0449] 图53是表示与图51B的结构例相比第2镜40在第1波导1与基板50之间变薄的结构例的图。如该例那样，第2镜40也可以在第1波导1与基板50之间具有比第2波导10与基板50之间的第2镜40的厚度薄的部位。在第1波导1与第2镜40之间配置有调整层51。通过这种构造，第1波导1中的导波光不易受到第2镜40的影响。在图53的例中，与图52的例相比，在第1波导1与光波导层20的连接部位由于第2镜40而产生的高低差小。因而，加工更容易。

[0450] 第2镜40的厚度也可以沿着波导1变化。下面，说明这种例。

[0451] 图54A是表示第2镜40的厚度阶段式地变化的结构例的图。在第1波导1与基板50之间，第2镜40的厚度沿着第1波导1变化。

[0452] 在图54A的例中，在第1波导1的左的部分之下不存在第2镜40。第1波导1的左的部分处于比光波导层20低的位置。另一方面，在第1波导1的右的部分、即与光波导层20连接的部分之下存在第2镜40。第1波导1的右的部分位于与光波导层20相同程度的高度。通过调整保护层61的厚度，能够使保护层61的上表面平坦。

[0453] 在图54A的结构例中，配置于保护层61上的加热器68充分远离第1波导1。因而，第1波导1中的导波光不易受到因加热器68的布线引起的影响。因此，第1波导1中的导波光的损耗得以抑制。

[0454] 图54B是表示上部电极62b、第1镜30以及第2基板50C遍及第1波导1中的保护层61和第2波导10中的光波导层20上地配置的结构例的图。图54C是表示图54B的结构例的制造过程的一部分的图。

[0455] 在图54B的例中，包括上部电极62b、第1镜30以及第2基板50C的构造体(以下称为“上部构造体”)与比上部电极62b靠下的构造体(以下称为“下部构造体”)是分开制造的。

[0456] 关于下部构造体的制造，首先，在第1基板50上形成具有倾斜的第2镜40。在第2镜40中的包括倾斜的部分按顺序形成调整层51、波导1的层以及保护层61。在第2镜40中的平坦的部分形成下部电极62a和光波导层20。

[0457] 上部构造体是在第2基板50C上将第1镜30和上部电极62b按该顺序层叠来制作的。使上部构造体如图54C所示那样上下翻转并粘贴到下部构造体之上。根据以上的制造方法，无需第1波导1与第2波导10的精密的对位。

[0458] 保护层61的上表面、即与第1波导1相接的表面的相反侧的表面比第2波导10中的光波导层20的上表面低。第1波导1中的加热器68的上表面与第2波导10中的光波导层20的上表面是大致相同的高度。在该情况下，能够使上部构造体与下部构造体无高低差地贴在一起。也可以利用蒸镀或溅射等方法来形成上部构造体。

[0459] 图55是表示具有图54B所示的构造的光扫描设备中的多个第2波导10的YZ面截面的图。在该例中，第1镜30、第2镜40以及电极62a、62b是由多个第2波导10共用的。在共用的电极62a、62b之间配置有多个光波导层20。多个光波导层20之间的区域是隔离物73。隔离物73例如是空气(或真空)、SiO_2、TiO_2、Ta_2O_5、SiN或AlN等透明材料。如果隔离物73是固体材料，则能够利用蒸镀或溅射等方法来形成上部构造体。隔离物73也可以与相邻的光波导层20的两方直接接触。

[0460] 第1波导1不需要是利用光的全反射的一般的波导。例如，第1波导1也可以是与第2波导10同样的反射型波导。

[0461] 图56是表示第1波导1和第2波导10是反射型波导的结构例的图。第1波导1被对置的两个多层反射膜3、40夹着。第1波导1基于与第2波导10相同的原理传播光。如果多层反射膜3的厚度足够大，则不从第1波导1出射光。

[0462] 在图56的结构例中，如参照图20和图21等说明的那样，通过使两个反射型波导的连接条件最优化，能够提高光的耦合效率。通过这种最优化，能够高效地从第1波导1向第2波导10导入光。

[0463] 接着，说明一对电极62a、62b的配置的变形例。在图50A～图56的例中，一对电极62a、62b与第2波导10中的光波导层20接触。在图50C和图55的例中，电极62a、62b的一方或两方也可以由多个第2波导10共用。电极62a、62b的结构不限定于这种结构。

[0464] 图57是表示上部电极62b配置于第1镜30上、且下部电极62a配置于第2镜40下的结构例的图。第1镜30配置于上部电极62b与光波导层20之间。第2镜40配置于下部电极62a与光波导层20之间。如该例那样，一对电极62a、62b也可以隔着第1镜30和第2镜40间接地夹着光波导层20。

[0465] 在图57的例中，下部电极62a延伸到第1波导1的一侧。为了从下部电极62a取出布线，能够使用第1波导10之下的空间。因此，布线的设计自由度增加。

[0466] 在该例中，一对电极62a、62b不与光波导层20接触。光波导层20中的导波光不易受到因一对电极62a、62b引起的吸收、散射或反射等影响。因此，光波导层20中的导波光的损耗得以抑制。

[0467] 图58是表示又一其它变形例的截面图。在该例中，第1波导1被分离为第1部分1a和第2部分1b。第1部分1a处于相对低的位置，与第2波导10分离。第2部分1b处于相对高的位置，与第2波导10的光波导层20连接。在从+Z方向观察时，第1部分1a和第2部分1b具有重叠的部分。第1部分1a及第2部分1b与X方向大致平行地延伸。在该例中，调整层51也被分离为两个部分51a、51b。调整层的第1部分51a配置于第1波导的第1部分1a与下部电极62a之间。调整层的第2部分51b配置于第1波导的第2部分1b与第2镜40之间。保护层61配置于第1波导

的第1部分1a和第2部分1b上。第1波导的第1部分1a的一部分与第1波导的第2部分1b的一部分隔着保护层61对置。电极62a、62b的配置与图57中的配置同样。

[0468] 在图58所示的结构中，第1波导的第1部分1a与第2部分1b的间隔、即Z方向上的距离为波导内的光的波长以下。在该情况下，通过迅衰波耦合，能够从第1部分1a向第2部分1b传播光。在该例中，与图54A的例不同地，不需要使第2镜40的厚度沿着第1波导1a、1b变化。

[0469] 图59是表示电极62配置于相邻的两个光波导层20之间的结构例的图。该例中的调整元件具有多个电极62，对这些电极62交替地施加正负(在图中用+和-显示)的电压。由此，能够在各光波导层20的内部产生图59中的左右方向的电场。

[0470] 在图59的例中，在Y方向上相邻的两个电极62与其间的光波导层20的至少一部分接触。光波导层20与电极62的接触区域的面积小。因而，即使电极62是对光进行吸收、散射或反射的材料，也能够抑制光波导层20中的导波光的损耗。

[0471] 在图50A～图59的结构例中，使用于扫描的光通过第1镜30被出射。使用于扫描的光也可以通过第2镜40被出射。

[0472] 图60是表示第1镜30厚、且第2镜40薄的结构的例的图。在图60的例中，光透过第2镜40而从基板50一侧出射。该例中的基板50由具有透光性的材料构成。通过将从基板50出射的光使用于扫描，光扫描设备的设计自由度增加。

[0473] <与镜的宽度有关的研究>

[0474] 图61是示意性地表示本实施方式中的将多个波导元件10在Y方向上排列而成的波导阵列10A的结构例的、YZ平面上的光扫描设备的截面图。在图61的结构例中，在Y方向上，第1镜30的宽度比光波导层20的宽度长。第2镜40是由多个波导元件10共用的。换言之，各波导元件10中的第2镜40是一个连续的镜的一部分。第1镜30具有从光波导层20的端面向Y方向突出的部分。将在Y方向上的该突出的部分的尺寸设为y_1。将Y方向上的、与光波导层20的端面相距的距离设为y。y＝0相当于光波导层20的端面。

[0475] 当导波光在光波导层20内沿X方向传播时，在Y方向上，从光波导层20渗出迅衰光。Y方向上的该迅衰光的光强度I用以下的式表示。

[0476] [数式17]

[0477] $$I = I_0 \exp\left(-\frac{y}{y_d}\right) \qquad (23)$$

[0478] 其中，y_d满足以下的式。

[0479] [数式18]

[0480] $$y_d = \frac{\lambda}{4\pi\sqrt{n_w^2 sin^2\theta_{in} - n_{low}^2}} \qquad (24)$$

[0481] I_0是y＝0时的、该迅衰光的光强度。全反射角θ_{in}如图11所示。在y＝y_d时，该迅衰光的光强度I成为I_0的1/e。e是自然对数的底。

[0482] 为了简单，如图11所示，将光波导层20内的导波光近似为光线。如图61的结构例所示，在第1镜30在y>y_1处不存在的情况下，y＝0时的导波光的因1次反射引起的光的泄漏或光损耗(L_{loss})用以下的式表示。

[0483] [数式19]

[0484] $$L_{loss}=\frac{\int_{y_1}^{\infty} I_0\exp\left(-\frac{y}{y_d}\right)dy}{\int_{0}^{\infty} I_0\exp\left(-\frac{y}{y_d}\right)dy}=\exp\left(-\frac{y_1}{y_d}\right) \qquad (25)$$

[0485] 如式(4)所示，为了使来自波导元件10的出射光的扩展角θ_{div}成为0.1°以下，期望的是波导元件10的X方向上的传播长度L为1mm以上。此时，当将Y方向上的光波导层20的宽度设为a时，在图11中，±Y方向上的全反射的次数为1000/(a·tanθ_{in})以上。在a＝1μm和θ_{in}＝45°时，全反射的次数为1000次以上。当使用表示1次反射中的光损耗的式(25)时，β次的反射中的光损耗用以下的式表示。

[0486] [数式20]

[0487] $$L_{loss}^{(\beta)}=1-\left\{1-\exp\left(-\frac{y_1}{y_d}\right)\right\}^{\beta} \qquad (26)$$

[0488] 图62是表示在β＝1000的情况下的、光损耗($L^{(\beta)}{}_{loss}$)的比例与y_1的关系的图。纵轴是光损耗的比例，横轴是y_1。如图62所示，通过满足$y_1\geq 7y_d$，光损耗的比例成为50％以下。另外，通过满足$y_1\geq 9y_d$，光损耗的比例成为10％以下。通过满足$y_1\geq 11y_d$，光损耗的比例成为1％以下。

[0489] 如式(25)所示，在原理上，通过使y_1变大，能够减小光损失。但是，光损失不是零。

[0490] 图63是示意地表示本实施方式的、将波导元件10在Y方向上排列的波导阵列10A的其他结构例的YZ平面中的光扫描设备的截面图。在图63的结构例中，第1镜及第2镜30及40由多个波导元件10共用。换言之，各波导元件10的第1镜30是1个相连的镜的一部分，各波导元件10的第2镜40是1个相连的其他镜的一部分。由此，在原理上能够使光损失最小化。

[0491] 接着，使用数值计算对图10与图63的结构例中的来自光波导层20的迅衰光的泄漏进行比较。

[0492] 图64A是表示图10的结构例中的、电场强度分布的计算结果的图。图64B是表示图63的结构例中的、电场强度分布的计算结果的图。数值计算中使用Synopsys公司的FemSim。在图64A和图64B中，Y方向上的光波导层20的宽度是1.5μm，Z方向上的光波导层20的厚度是1μm，光的波长是1.55μm，n_w＝1.68，n_{low}＝1.44。n_w和n_{low}的该组合例如相当于将光波导层20中包含的液晶材料通过SiO_2的隔离物73封入的情况。

[0493] 如图64A所示，可知在图10的结构例中从不存在第1镜30的区域泄漏迅衰光。另一方面，如图64B所示，在图63的结构例中，可以忽视这种迅衰光的泄漏。在图64A和图64B中，在导波光沿X方向传播时，由于从第1镜30的光出射和迅衰光的泄漏，导波光的光强度减少。当计算该导波光的光强度成为1/e的、X方向上的光的传播长度时，该光的传播长度在图64A和图64B中分别是7.8μm和132μm。

[0494] 在本实施方式中，隔离物73也可以由2个以上的不同的介质构成。

[0495] 图65是示意性地表示在本实施方式中隔离物73包括具有不同的折射率的隔离物73a、73b的结构例的、YZ平面上的光扫描设备的截面图。在图65的结构例中，与光波导层20相邻的隔离物73a的折射率n_{low1}高于不与光波导层20不相邻的隔离物73b的折射率n_{low2}($n_{low1}>n_{low2}$)。例如在光波导层20包含液晶材料的情况下，为了封入液晶材料，也可以将SiO_2用作隔离物73a。隔离物73b也可以是空气。如果隔离物73b的折射率n_{low2}低，则能够抑制从

光波导层20的迅衰光的渗出。

[0496] 图66是示意性地表示本实施方式的变形例中的波导元件10的结构例的、YZ平面上的光扫描设备的截面图。在图66的结构例中，光波导层20在YZ平面上具有梯形的截面。第1镜30不仅配置于光波导层20的上边上，还配置于左右的边上。由此，能够抑制从光波导层20的左右的边的光的泄漏。

[0497] 接着，说明光波导层20和隔离物73的材料。

[0498] 在图61、图63以及图65的结构例中，光波导层20的折射率n_w与隔离物73的折射率n_{low}满足$n_w>n_{low}$的关系。即，隔离物73包含折射率比光波导层20低的材料。例如在光波导层20包含电光学材料的情况下，隔离物73也可以包含SiO_2、TiO_2、Ta_2O_5、SiN、AlN或空气等透明材料。在光波导层20包含液晶材料的情况下，隔离物73也可以包含SiO_2或空气等。通过用一对电极夹着光波导层20并施加电压，能够改变包含电光学材料或液晶材料的光波导层20的折射率。由此，能够改变从第1镜30出射的光的出射角度。在光波导层20包含液晶材料或电光学材料的情况下的光扫描设备的详细的驱动方法等如前所述。

[0499] 电光学材料也可以包含以下的任意的化合物。

[0500] •KDP(KH_2PO_4)型晶体•••例如KDP、ADP($NH_4H_2PO_4$)、KDA(KH_2AsO_4)、RDA(RbH_2PO_4)或ADA($NH_4H_2AsO_4$)•

[0501] •四方晶系材料•••例如KTN、$BaTiO_3$、$SrTiO_3Pb_3MgNb_2O_9$、GaAs、CdTe或InAs

[0502] •立方晶系材料•••例如$LiNbO_3$或$LiTaO_3$

[0503] •闪锌矿型材料•••例如ZnS、ZnSe、ZnTe、GaAs或CuCl

[0504] •钨青铜型材料•••$KLiNbO_3$、$SrBaNb_2O_6$、KSrNbO、BaNaNbO、$Ca_2Nb_2O_7$

[0505] 液晶材料例如可以是向列液晶。向列液晶的分子结构如下。

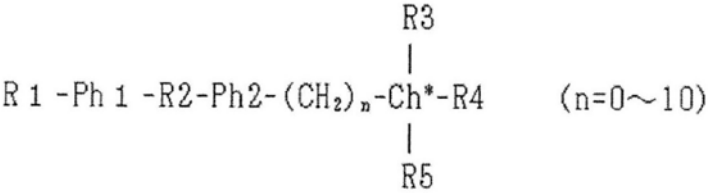
[0506] R1-Ph1-R2-Ph2-R3

[0507] 在此，R1及R3分别表示独立地从由氨基、羰基、羧基、氰基、胺基、硝基、腈基以及烷基链构成的组中选择的任一个。Ph1及Ph2分别独立地表示苯基或联苯基等芳香族基。R2表示从由乙烯基、羰基、羧基、重氮基以及氧化偶氮基构成的组中的选择的任一个。

[0508] 液晶不限定于向列液晶。例如也可以使用近晶液晶。液晶也可以是近晶液晶中的例如近晶C相(SmC相)。近晶液晶也可以是近晶C相(SmC相)中的例如在液晶分子内具有手性中心(例如不对称碳)且是铁电性液晶的手征近晶相(SmC*相)。

[0509] SmC*相的分子结构如下表示。

[0510] [化1]

[0511] 

[0512] R1及R4分别是独立地从由氨基、羰基、羧基、氰基、胺基、硝基、腈基以及烷基链构成的组中选择的任一个。Ph1及Ph2分别独立地是苯基或联苯基等芳香族基。R2是从由乙烯基、羰基、羧基、重氮基以及氧化偶氮基构成的组中选择的任一个。Ch*表示手性中心。手性中心典型的是碳(C*)。R3及R5分别是独立地从由氢、甲基、氨基、羰基、羧基、氰基、胺基、硝基、腈基以及烷基链构成的组中选择的任一个。R3、R4以及R5是互不相同的官能团。

[0513] 液晶材料也可以是组成不同的多个液晶分子的混合物。例如，也可以将向列液晶分子与近晶液晶分子的混合物用作光波导层20的材料。

[0514] 也可以通过将第1镜30与其以外的结构贴在一起来形成图63和图65的结构例。由此，制造变得容易。另外，如果隔离物73是固体材料，则也可以利用蒸镀或溅射等方法形成第1镜30。

[0515] 在图61、图63以及图65的结构例中，以由多个波导元件10共用第2镜40为前提说明了第1镜30的结构。当然，上述的讨论也能够应用于第2镜40。即，在Y方向上，如果第1镜30和第2镜40的至少一方的宽度比光波导层20的宽度长，则能够抑制从光波导层20的迅衰光的泄漏。其结果，使用于光扫描的光量的降低得以抑制。

[0516] <作为光波导层而使用液体的光扫描设备>

[0517] 接着，说明作为光波导层20而使用液体、作为隔离物73而使用空气的结构。在上述实施方式及变形例的任一个中，也可以作为光波导层20而使用液体、作为隔离物73而使用空气。在以下的说明中，有时将光波导层20称作“光波导区域20”、将隔离物73称作“非波导区域73”。此外，所谓“宽度”，是指Y方向上的宽度，所谓“厚度”，是指Z方向上的厚度。

[0518] 图67是示意地表示本实施方式的光扫描设备的结构例的截面图。在该光扫描设备中，作为光波导区域20而使用液体，作为非波导区域73而使用空气。

[0519] 本实施方式的光扫描设备具备第1镜30、第2镜40、2个非波导区域73、光波导区域20和未图示的第1调整元件。作为第1调整元件，也可以使用上述实施方式及变形例的某个的第1调整元件。

[0520] 第1镜30具有光透射性。第2镜40对置于第1镜30。2个非波导区域73在第1镜30与第2镜40之间在Y方向上隔开间隙而排列。Y方向是与第1镜及第2镜30及40的至少一方的反射面平行的方向。光波导区域20位于第1镜30与第2镜40之间且2个非波导区域73之间。光波导区域20具有比2个非波导区域73的各自的平均折射率高的平均折射率，使光沿着X方向传播。X方向是与第1镜及第2镜30及40的至少一方的反射面平行、且与Y方向垂直的方向。第1调整元件使光波导区域20的折射率及厚度的至少一方变化。

[0521] 光波导区域20包含液体。第1镜及第2镜30及40的各自的与非波导区域73接触的部分的表面能量比液体的表面能量小，并且比第1镜及第2镜30及40的至少一方的与光波导区域20接触的部分的表面能量小。第1镜30具有比第2镜40高的光透射率，使在光波导区域20内传播的光的一部分从光波导区域20向外部透射，在与XY平面交叉的方向上射出。XY平面是与X方向及Y方向平行的虚拟平面。第1调整元件通过使光波导区域20的折射率及厚度的至少一方变化，使从光波导区域20射出的光的方向变化。更具体地讲，第1调整元件使射出的光的波数矢量的X成分变化。

[0522] 在图67的例子中，在第1镜及第2镜30及40的各自的表面上形成亲水性区域25及疏水性区域26。如果将表面能量比疏水性区域26大的液体(例如水)导入到第1镜30与第2镜40之间，则该液体有选择地停留在亲水性区域25中。即，亲水性区域25成为与光波导区域20接触的部分(第2部分的一例)，疏水性区域26成为与非波导区域73接触的部分(第1部分的一例)。亲水性区域25的表面能量只要比疏水性区域26的表面能量大就可以，并不一定需要比液体的表面能量大。

[0523] 液体的折射率比空气的折射率大。由此，能得到向光波导区域20的较高的光封入

效应。此外，能够容易地使液体变形。由此，能够容易地改变第1镜30与第2镜40之间的距离。进而，液体通过表面张力保持光波导区域20的左右的两端的形状。该两端比通过半导体工艺形成光波导区域20的情况平滑。由此，能够减少波导光的散射。

[0524] 在作为光波导区域20而使用液体的情况下，该光波导区域20的截面形状的两端对应于表面能量而朝向内侧或外侧描绘圆弧。所以，通过光学解析计算出该截面形状的影响。在计算中使用的条件是以下这样的。亲水性区域25的宽度是w＝6μm。第1镜30是将折射率为2.1的材料和折射率为1.45的材料交替地层叠了9对的多层反射膜，第2镜40是将相同的2个材料层叠了12对的多层反射膜。

[0525] 图68A是表示光波导区域20的厚度为h＝0.63μm的情况下的电场强度分布的计算结果的图。图68B是表示光波导区域20的厚度为h＝0.68μm的情况下的电场强度分布的计算结果的图。图68C是表示光波导区域20的厚度为h＝0.72μm的情况下的电场强度分布的计算结果的图。在图68A的例子中，光波导区域20的截面形状的两端向外侧描绘圆弧，在图68B的例子中，该两端描绘直线，在图68C的例子中，该两端向内侧描绘圆弧。在图68A至图68C的例子中，光波导区域20的截面形状的面积相同。但是，为了简单，将圆弧计算为折线。在图68A至图68C的例子中，光波导区域20的中心部分的电场分布都不极端地变化。因而，即使光波导区域20的截面形状的两端是圆弧状也没有问题。

[0526] 图69是表示第1镜30与第2镜40之间的距离(以下称作“镜间距离”)和射出角度的关系的图。如图69的例子所示，通过使镜间距离变化，射出角度较大地变化。对应于镜间距离的变化，一边在光波导区域20中在±Z方向上反射，在X方向上传播的光的光学距离一边变化。在图69的例子中，对应于光学距离的变化，光波导区域20的截面形状的两端向内侧或外侧描绘圆弧。该计算结果与光波导区域20的截面形状是长方形的情况下的计算结果几乎相同。该长方形具有w＝6μm的一定的宽度和镜间距离的厚度。

[0527] 〈变形例〉

[0528] 在图67的例子中，在第1镜及第2镜30及40的两者的表面上形成有亲水性区域25。但是，也可以不在第1镜及第2镜30及40的两者上形成亲水性区域25。

[0529] 图70是示意地表示在第1镜30的表面上没有形成亲水性区域25、在第2镜40的表面上形成了亲水性区域25的结构例的光扫描设备的截面图。在第1镜及第2镜30及40的至少一方的表面上形成亲水性区域25。即，亲水性区域25及疏水性区域26的一部分成为与光波导区域20接触的部分(第2部分的一例)，疏水性区域26的其他的部分成为与非波导区域73接触的部分(第1部分的一例)。在该结构中，也能够作为光波导区域20而保持液体。

[0530] 接着，说明在第1镜及第2镜30及40的两者的表面上有亲水性区域25的情况下的2个亲水性区域25的配置关系的例子。

[0531] 图71是示意地表示第1镜30的表面上的亲水性区域25的宽度比第2镜40的表面上的亲水性区域25的宽度长的结构例的光扫描设备的截面图。当从Z方向观察时，第1镜30的亲水性区域25的一部分与第2镜40的亲水性区域25的全部重叠。

[0532] 图72是示意地表示第1镜30的表面上的亲水性区域25和第2镜40的表面上的亲水性区域25在Y方向上错开的结构例的光扫描设备的截面图。当从Z方向观察时，第1镜30的亲水性区域25的一部分与第2镜40的亲水性区域25的一部分重叠。

[0533] 在图71及72的例子中，光都能够在光波导区域20内传播。

[0534] 第1镜及第2镜30及40的至少一方也可以不是平坦而形成图案。更具体地讲，第1镜及第2镜30及40的至少一方的宽度也可以与光波导区域20的上边及下边的至少一方的宽度相同。

[0535] 图73A是示意地表示第2镜40的宽度与光波导区域20的上边及下边的宽度相同的结构例的截面图。第1镜及第2镜30及40分别被形成在基板50上。在第1镜及第2镜30及40的各自的表面上形成有亲水性区域25。

[0536] 图73B是示意地表示第1镜及第2镜30及40各自的宽度与光波导区域20的上边及下边的宽度相同的结构例的光扫描设备的截面图。在图73B的例子中，不需要形成疏水性区域26。

[0537] 图73C是示意地表示在图73A的例子中在第2镜40的表面上代替亲水性区域25而形成有疏水性区域26的结构例的光扫描设备的截面图。与图70的例子同样，在第1镜及第2镜30及40的至少一方的表面上形成亲水性区域25。

[0538] 在图73A～图73C的例子中，光扫描设备具备第1镜30、第2镜40、光波导区域20和未图示的第1调整元件。

[0539] 第1镜30具有光透射性，第2镜40对置于第1镜30。光波导区域20位于第1镜30与第2镜40之间，使光沿着与第1镜及第2镜30及40的至少一方的反射面平行的X方向传播。第1调整元件使光波导区域20的折射率及厚度的至少一方变化。

[0540] 光波导区域20包含液体。液体的表面能量比第1镜及第2镜30及40的至少一方的与光波导区域20接触的部分的表面能量小。第1镜30具有比第2镜40高的光透射率，使在光波导区域20内传播的光的一部分从光波导区域20向外部透射，向与第1镜30的反射面交叉的方向射出。第1调整元件通过使光波导区域20的折射率及厚度的至少一方变化，使从光波导区域20射出的光的方向变化。

[0541] 在图73A～图73C的例子中，也能够作为光波导区域20而保持液体。

[0542] 第1镜及第2镜30及40的镜间距离也可以由致动器调整。

[0543] 图74是示意地表示第1镜30经由致动器78被支承部件76支承的结构例的光扫描设备的截面图。

[0544] 在光扫描设备中，第1调整元件也可以具有连接在第1镜及第2镜30及40的至少一方上的致动器78。致动器78通过使第1镜30与第2镜40的距离变化，能够使光波导区域20的厚度变化。

[0545] 致动器78也可以包含压电部件，通过使压电部件变形，使第1镜30与第2镜40的距离变化。由此，能够使从光波导区域20射出的光的方向变化。压电部件的材料如在图37～图43的例子中说明的那样。

[0546] 此外，作为液体也可以代替水而使用液晶。

[0547] 图75是示意地表示第1镜及第2镜30及40的镜间距离通过支承部件76而被固定的情况下的、作为光波导区域20而使用液晶的结构例的光扫描设备的截面图。在图75的例子中，光波导区域20经由第1镜及第2镜30及40被夹在一对电极62之间。第1调整元件也可以具有中间夹着光波导区域20的一对电极62，通过对该一对电极施加电压，使光波导区域20的折射率变化。由此，能够使从光波导区域20射出的光的方向变化。

[0548] 此外，在图75的例子中，如果在光波导区域20中传播的光向非波导区域73的渗出

较大，则光有可能经由左右的支承部件76向外部漏出。如果作为非波导区域73不是使用SiO_2而是使用空气，则通过光波导区域20与非波导区域73的较大的折射率差，能得到向光波导区域20的较高的光封入效应。由此，在光波导区域20中传播的光向外部的漏出被抑制。

[0549] 本实施方式的光扫描设备并不限定于1个光波导区域20。

[0550] 图76是示意地表示将图67的例子中的光波导区域20及2个非波导区域73阵列化的光扫描设备的结构例的截面图。

[0551] 该光扫描设备具备包括上述光波导区域20的多个光波导区域、和包括上述2个非波导区域73的多个非波导区域。多个光波导区域各自的平均折射率比多个非波导区域各自的平均折射率高。多个光波导区域及多个非波导区域在第1镜30与第2镜40之间在Y方向上交替地排列。

[0552] 该光扫描设备也可以还具备分别连接在多个光波导区域上的多个移相器、和使从多个光波导区域射出的光的方向变化的第2调整元件。多个移相器分别包括与多个光波导区域的对应的1个的光波导区域20直接相连或经由其他的波导相连的波导。

[0553] 各移相器的波导也可以包含折射率对应于电压的施加或温度变化而变化的材料。第2调整元件对各移相器的波导施加电压，或使波导的温度变化。由此，能够使波导内的折射率变化，使从多个移相器向多个光波导区域传播的光的相位的差分别变化。结果，能够使从多个光波导区域射出的光的方向变化。更具体地讲，第2调整元件能够使射出的光的波数矢量的Y成分变化。

[0554] 另外，在上述说明中，使用与光传播的X方向垂直的YZ平面的截面。该截面的形状不需要在X方向上是一样的。作为光扫描设备，也可以使用将上述图中的各种各样的截面组合的结构。

[0555] 此外，在上述实施例中，使用液体与空气的组合，形成了光波导区域20和非波导区域73。作为其他的例子，也可以将水及油等的难以混合的多个材料组合。

[0556] <制作方法>

[0557] 接着，说明上述的在光波导区域20中包含液体的构造的制作方法的一例。

[0558] 图77A～图77E是示意地表示在第2镜40的表面上形成亲水性区域25及疏水性区域26的工序的图。

[0559] 在图77A的工序中，使用CVD法，在形成在基板50之上的第2镜40的表面上，作为亲水性区域25而形成例如厚度100nm的氮化硅(Si_3N_4)膜。以下，关于氮化硅膜也赋予标号“25”而表述。氮化硅膜25的厚度可以考虑在光波导区域20中传播的光的波长及折射率而选择。氮化硅膜25构成为多层反射膜的一部分，不会对在光波导区域20中传播的光带来影响。

[0560] 在图77B的工序中，将氮化硅膜25的表面在氧存在的气体环境中通过等离子处理(朝下的箭头)而氧化。由此，该表面具有亲水性。

[0561] 在图77C的工序中，使用光刻法，在氮化硅的表面上形成规定的宽度(例如1μm至8μm左右)的正型抗蚀剂膜27。

[0562] 在图77D的工序中，将图77C的例子中表示的基板50在干燥气体环境中浸渍到含有1vol％的浓度的$CF_3(CF_2)_7C_2H_4SiCl_3$(以下简称作“FAS”)的全氟辛烷(Perfluorooctane)溶液中20分钟。由此，作为疏水性区域26而在氮化硅膜25的表面上形成由FAS构成的膜(以下称作“FAS膜”)。以下，对于FAS膜也赋予标号“26”而表述。FAS膜26具有疏水性。然后，通过将

该基板50在纯的全氟辛烷中清洗，将溶剂除去。

[0563] 在图77E的工序中，将抗蚀剂膜27用丙酮除去。

[0564] 通过图77A～图77E的一系列的工序，形成在第2镜40的表面上露出的宽度1μm至8μm左右的亲水性区域25、和当从Z方向观察时夹着亲水性区域25的疏水性区域(FAS膜)26。另外，在图77A～图77E的工序中，将FAS膜26较厚地表示以便容易理解，但实际上，FAS膜26的厚度是几nm。在图中，如图67等的例子所示，假设亲水性区域25及疏水性区域26无阶差而排列形成在相同的层中。在第1镜30的表面上也能够形成同样的亲水性区域25及疏水性区域26。

[0565] 第1镜及第2镜30及40可以被支承部件76保持一定的距离而支承(参照图74及图75)。由此，第1镜30的表面上的亲水性区域25及疏水性区域26与第2镜40的表面上的亲水性区域25及疏水性区域26不接触。在被支承部件76支承的第1镜30与第2镜40之间，导入表面能量较大的液体。由此，形成与X方向平行的例如宽度2μm的直线状的光波导区域20。亲水性区域25的形状并不限于具有一定的宽度的直线。在图77C的中，通过将抗蚀剂膜27布图为希望的形状，能够得到具有希望的形状的亲水性区域25。此外，向内部导入的液体并不限于水，也可以是离子性液体等的蒸气压较小、挥发性较低的液体。

[0566] 接着，说明疏水性区域26。以下，说明在某个基板的表面上形成疏水性区域26的情况下的例子。

[0567] 固体表面相对于水的浸润性不仅是与固体的表面能量有关，与水的表面张力也有关系。因而，表示疏水性的固体的表面能量的值没有被特别限定。例如，表示疏水性的固体的表面能量例如是5mJ/m^2以上40mJ/m^2以下，优选的是5J/m^2以上25mJ/m^2以下。

[0568] 作为形成疏水性区域26的方法的一例，可以举出在基板上形成对于水的浸润性比亲水性区域25低的有机膜的方法。作为这样的有机膜，例如可以使用具有氟代烷基链的高分子膜、由具有氟代烷基链的硅烷耦联剂及硫醇分子形成的膜、以及用溶胶－凝胶法形成的包含氟代烷基链的有机－无机混合膜等。

[0569] 作为具有氟代烷基链的高分子膜，可以举出聚四氟乙烯、聚二氟乙烯及它们的衍生物。在使用硅烷耦联剂的情况下，例如可以通过将基板浸渍到以几vol％的浓度溶解了具有氟代烷基链的硅烷耦联剂的氯仿、链烷、醇或硅油中一定时间来形成疏水膜。在此情况下，通过在浸渍后将基板用溶剂清洗，能够形成单分子膜。作为具有氟烷基的硅烷耦联剂，可以举出$CF_3(CF_2)_7C_2H_4SiCl_3$、$CF_3C_2H_4SiCl_3$等。作为能够形成这些疏水膜的基板，可以使用在表面上存在活性氢的基板。作为这样的基板的例子，可以举出氧化硅、氮化硅、不锈钢、铜、镍及将表面活性化的树脂等。

[0570] 为了形成疏水性区域26，也可以设置仅在基板的规定的部分特异性地附着疏水膜的表面。例如，通过仅在基板的规定的部分上形成与硫醇化合物反应的金属图案(例如金)，将该基板浸渍到溶解有硫醇的有机溶剂中，能够仅使金属区域成为疏水性。在使用硫醇分子的情况下，例如将基板浸渍到以几vol％的浓度溶解有具有氟代烷基链的硫醇分子的乙醇或丙醇溶液中一定时间，然后用醇将基板清洗。由此，形成疏水性的单分子膜。作为能够形成这些单分子膜的基板，可以举出由金、银或铜等的金属构成的基板。

[0571] 在使用溶胶－凝胶法的情况下，例如通过将作为氧化硅的前体的四乙氧基硅烷、具有氟代烷基链的烷氧基硅烷、酸催化剂或溶解有水的醇溶液用旋涂法或浸渍(Dipping)

法涂敷到基板上，在100℃以上进行热处理，能够形成疏水膜。该疏水膜能够形成在几乎全部的基板上。

[0572] 可以通过喷墨法、丝网印刷法、凸版印刷法、凹版印刷法或微接触印刷法等直接在规定的区域上形成疏水膜。

[0573] <应用例>

[0574] 图78是表示在电路基板(例如芯片)上集成了光分路器90、波导阵列10A、移相器阵列80A以及光源130等元件的光扫描设备100的结构例的图。光源130例如可以是半导体激光器等发光元件。该例中的光源130出射自由空间中的波长为λ的单一波长的光。光分路器90将来自光源130的光分路后导入到多个移相器中的波导。在图78的结构例中，在芯片上设置有电极62a和多个电极62b。对波导阵列10A，从电极62a提供控制信号。对于移相器阵列80A中的多个移相器80，从多个电极62b分别发送控制信号。电极62a、62b可以与生成上述的控制信号的未图示的控制电路连接。控制电路既可以设置于图78所示的芯片上，也可以设置于光扫描设备100中的其它芯片。

[0575] 如图78所示，通过将全部组件集成在芯片上，能够用小型的设备实现广范围的光扫描。例如能够将图78所示的全部组件集成在2mm×1mm左右的芯片。

[0576] 图79是表示从光扫描设备100向远方照射激光等光束来执行二维扫描的情形的示意图。二维扫描是通过使束斑310在水平和垂直方向上移动来执行的。例如，通过与公知的TOF(Time Of Flight：飞行时间)法进行组合，能够获取二维的测距图像。TOF法是通过照射激光并观测来自对象物的反射光来计算光的飞行时间并求出距离的方法。

[0577] 图80是表示作为能够生成这种测距图像的光检测系统的一例的LiDAR系统300的结构例的框图。LiDAR系统300具备光扫描设备100、光检测器400、信号处理电路600以及控制电路500。光检测器400检测从光扫描设备100出射并从对象物反射的光。光检测器400例如可以是对从光扫描设备100出射的光的波长λ具有灵敏度的图像传感器、或包括光电二极管等受光元件的光检测仪。光检测器400输出与接收到的光的量相应的电信号。信号处理电路600基于从光检测器400输出的电信号计算到对象物为止的距离，生成距离分布数据。距离分布数据是表示距离的二维分布的数据(即，测距图像)。控制电路500是对光扫描设备100、光检测器400以及信号处理电路600进行控制的处理器。控制电路500对来自光扫描设备100的光束的照射的时机和光检测器400的曝光和信号读出的时机进行控制，对信号处理电路600指示测距图像的生成。

[0578] 在二维扫描中，作为获取测距图像的帧频，例如能够从一般在视频中常用的60fps、50fps、30fps、25fps、24fps等中进行选择。另外，当考虑对车载系统的应用时，帧频越大则获取测距图像的频度越高，能够高精度地探测障碍物。例如在60km/h下行驶时，在60fps的帧频下每当车移动约28cm就能够获取一次图像。在120fps的帧频下，每当车移动约14cm就能够获取一次图像。在180fps的帧频下，每当车移动约9.3cm就能够获取一次图像。

[0579] 为了获取一个测距图像所需的时间依赖于光束扫描的速度。例如，为了以60fps获取析像点数为100×100的图像，需要针对1点以1.67μs以下进行光束扫描。在该情况下，控制电路500以600kHz的动作速度进行利用光扫描设备100的光束的出射以及利用光检测器400的信号蓄积/读出。

[0580] <对光接收设备的应用例>

[0581] 本公开中的光扫描设备能够以大致相同的结构来还用作光接收设备。光接收设备具备与光扫描设备相同的波导阵列10A以及对能够接收的光的方向进行调整的第1调整元件60。波导阵列10A通过多个波导元件10来接收从第3方向入射的光。更具体地说，波导阵列10A的各第1镜30使从第3方向入射到第1反射面的相反侧的光向波导阵列10A的各光波导层20透过。波导阵列10A的各光波导层20传播所接收到的光、即向第2方向透过了第1镜30的光。通过由第1调整元件60改变各波导元件10中的所述光波导层20的折射率和厚度的至少一方，能够改变作为能够接收的光的方向的第3方向。并且，在光接收设备具备与光扫描设备相同的多个移相器80、或80a和80b以及分别改变从多个波导元件10穿过多个移相器80、或80a和80b来输出的光的相位的差的第2调整元件的情况下，能够使能够接收的光的方向二维地变化。

[0582] 例如能够构成将图78所示的光扫描设备100中的光源130置换为接收电路的光接收设备。当波长λ的光入射到波导阵列10A时，该光通过移相器阵列80A被送到光分路器90，最终集中在一个部位后被送到接收电路。可以说，集中在该一个部位的光的强度表示光接收设备的灵敏度。对于光接收设备的灵敏度，能够利用分别组装在波导阵列和移相器阵列80A中的调整元件来进行调整。在光接收设备中，例如在图26中的波矢量(图中的粗箭头)的方向变得相反。入射光具有波导元件10延伸的方向(图中的X方向)的光分量和波导元件10的排列方向(图中的Y方向)的光分量。对于X方向的光分量的灵敏度，能够利用组装在波导阵列10A中的调整元件来进行调整。另一方面，对于波导元件10的排列方向的光分量的灵敏度，能够利用组装在移相器阵列80A中调整元件来进行调整。根据光接收设备的灵敏度最大时的光的相位差Δφ、光波导层20的折射率n_w和厚度d，可知θ和α_0(式(16)和式(17))。因此，能够确定光的入射方向。

[0583] 也可以使用图67及图70～图76的例子中的光波导区域20及2个非波导区域73构成光接收设备。在该光接收设备中，光波导区域20使从与XY平面交叉的方向经由第1镜30入射到光波导区域20中的光在X方向上传播。第1调整元件通过使光波导区域20的折射率及厚度的至少一方变化，使可接收的光的方向变化。

[0584] 也可以使用与将光波导区域20及2个非波导区域73阵列化的上述光扫描设备同样的结构作为光接收设备。在该光接收设备中，第2调整元件通过使从多个光波导区域经过多个移相器输出的光的相位的差分别变化，使可接收的光的方向变化。

[0585] 上述实施方式及变形例中表示的技术特征为了解决上述技术问题的一部分或全部，或者为了达到上述效果的一部分或全部，可以适当进行替换或组合。此外，在本公开中没有作为必须的部分说明的技术特征可以适当删除。

[0586] 产业上的可利用性

[0587] 本公开的实施方式的光扫描设备及光接收设备例如能够用于搭载在汽车、UAV、AGV等的车辆中的激光雷达系统等的用途。

[0588] 标号说明

[0589] 1 第1波导

[0590] 2 光波导层、波导

[0591] 3 多层反射膜

[0592] 4 多层反射膜

[0593] 5 光栅

[0594] 6 激光源

[0595] 7 光纤

[0596] 10 波导元件(第2波导)

[0597] 20 光波导层

[0598] 25 亲水性区域

[0599] 26 疏水性区域

[0600] 27 抗蚀剂膜

[0601] 30 第1镜

[0602] 40 第2镜

[0603] 42 低折射率层

[0604] 44高折射率层

[0605] 50、50A、50B、50C 基板

[0606] 51 第1电介质层(调整层)

[0607] 52 支承部件(辅助基板)

[0608] 60 调整元件

[0609] 61 第2电介质层(保护层)

[0610] 62 电极

[0611] 64 布线

[0612] 66 电源

[0613] 68 加热器

[0614] 70 支承部件

[0615] 71 非压电元件

[0616] 72 压电元件

[0617] 73、73a、73b 隔离物

[0618] 74a、74b、76 支承部件

[0619] 78 致动器

[0620] 80、80a、80b 移相器

[0621] 90、90a、90b 光分路器

[0622] 92 光开关

[0623] 100 光扫描设备

[0624] 110 波导阵列的驱动电路

[0625] 130 光源

[0626] 210 移相器阵列的驱动电路

[0627] 310 束斑

[0628] 400 光检测器

[0629] 500 控制电路

[0630] 600 信号处理电路

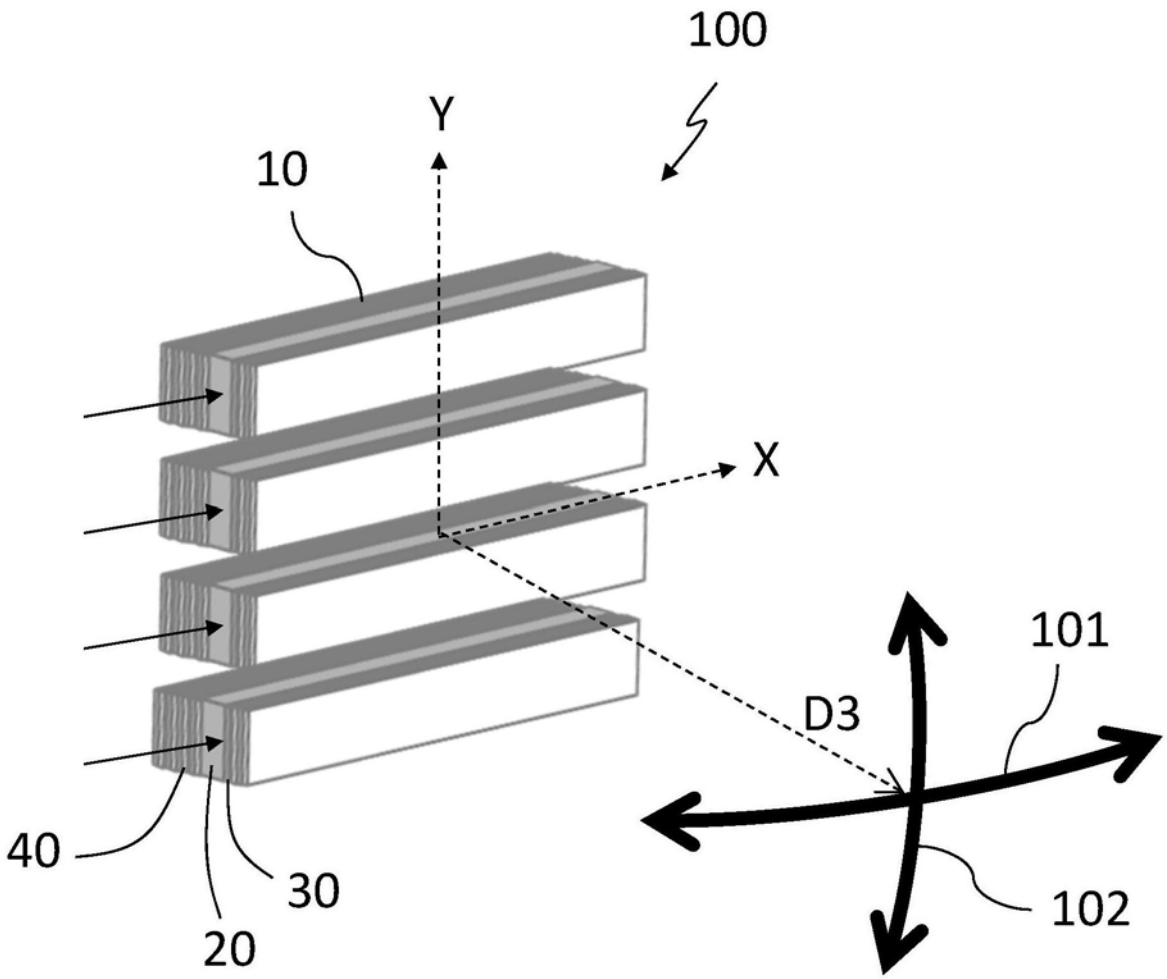


图1

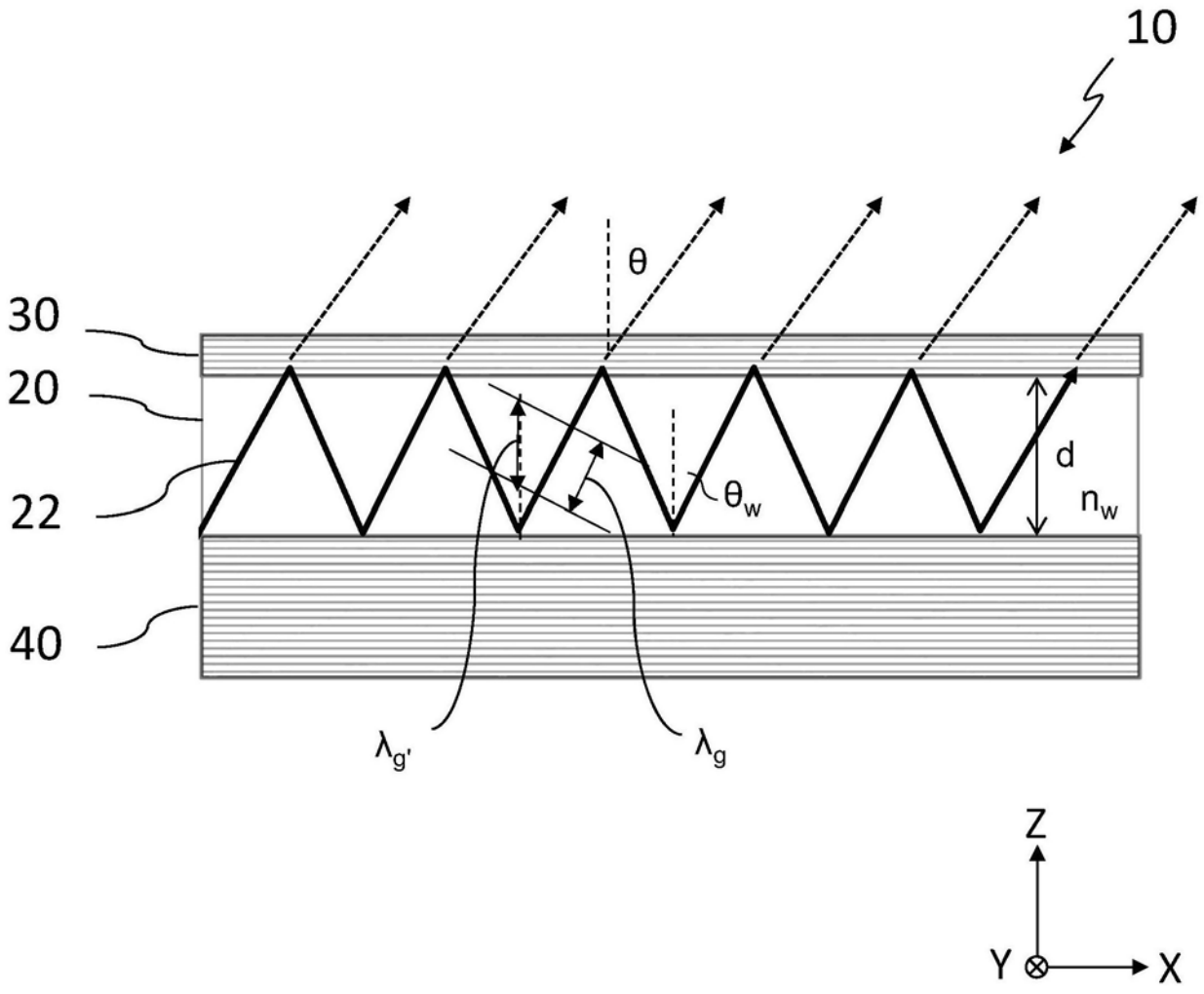


图2

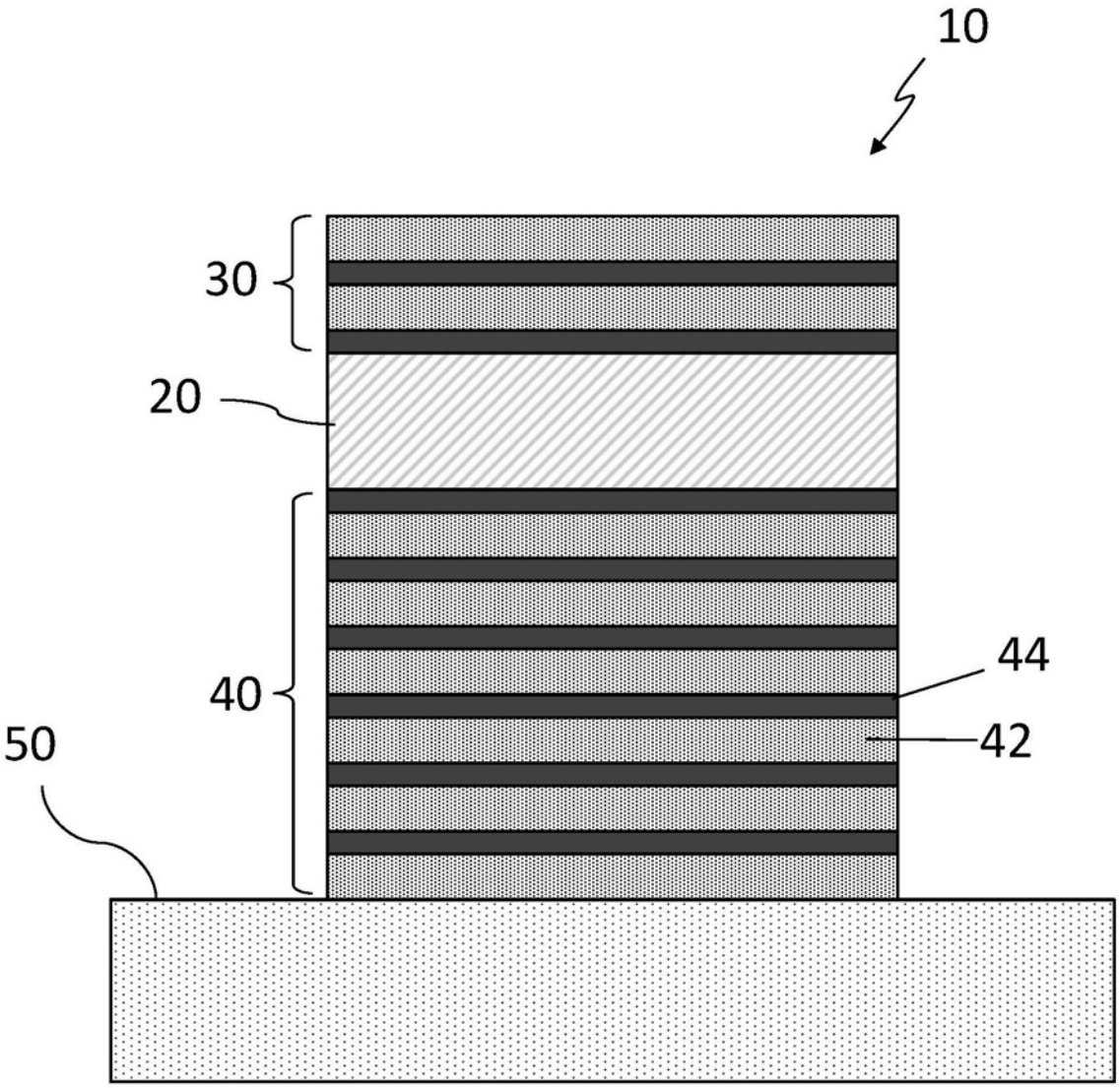


图3

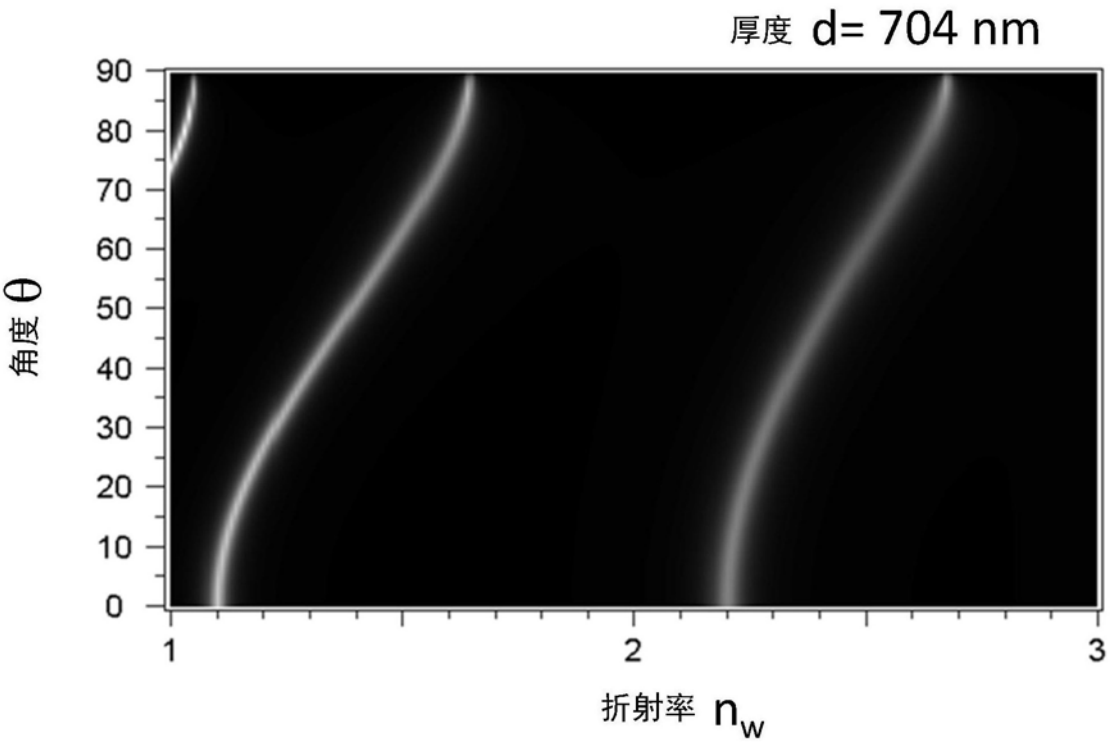

厚度 d= 704 nm
角度 θ
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
1
2
3
折射率 n_w

图4A

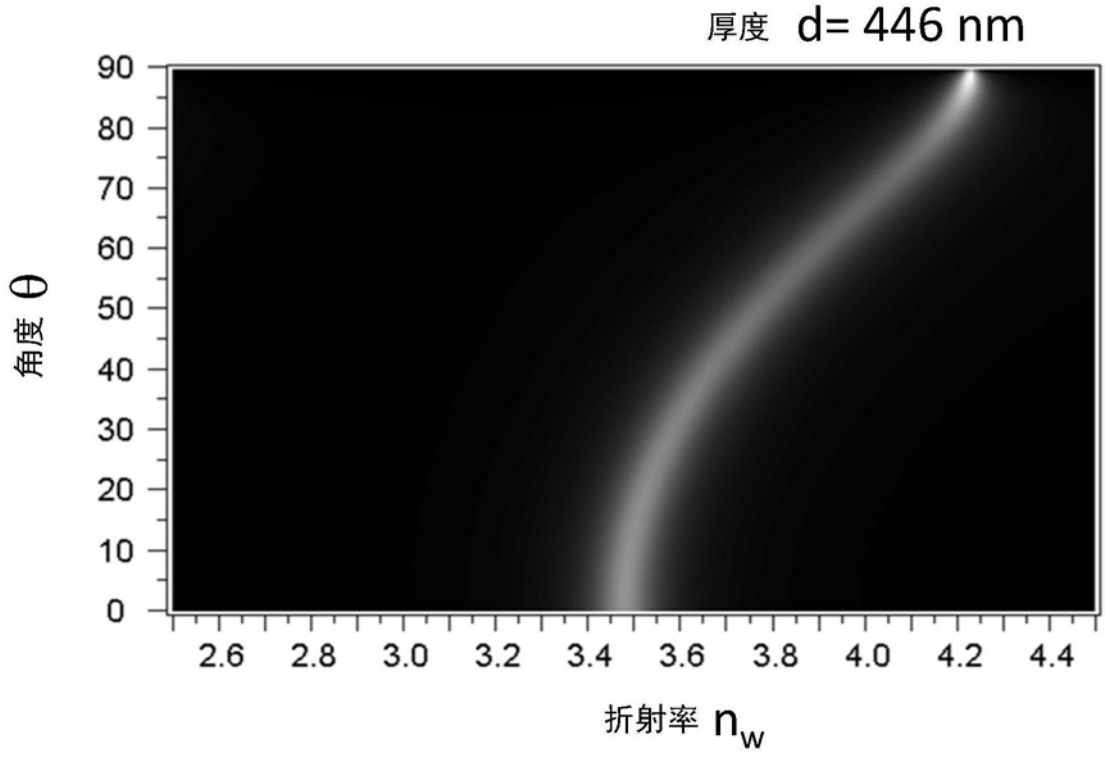

厚度 d= 446 nm
角度 θ
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
2.6
2.8
3.0
3.2
3.4
3.6
3.8
4.0
4.2
4.4
折射率 n_w

图4B

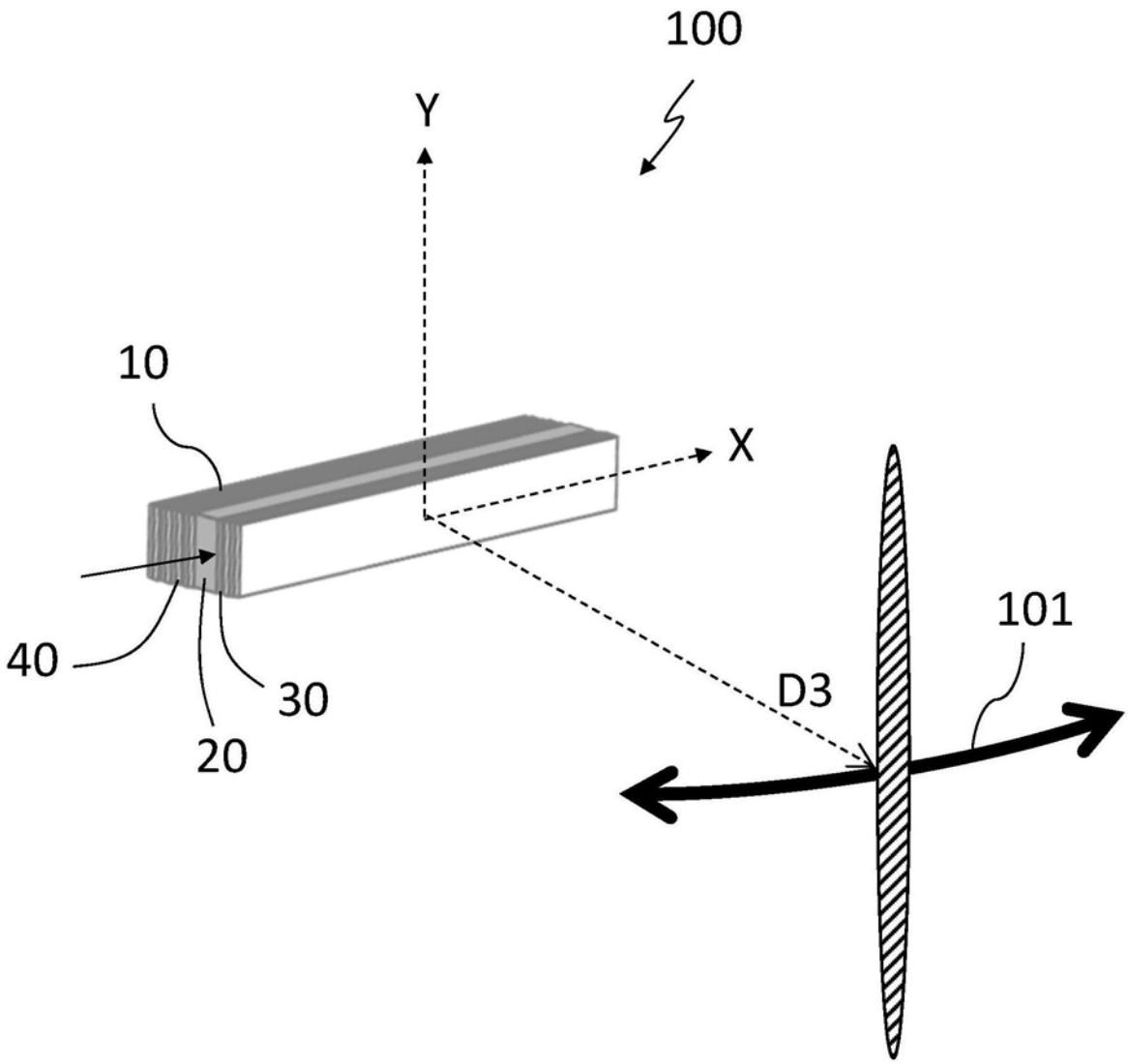


图5

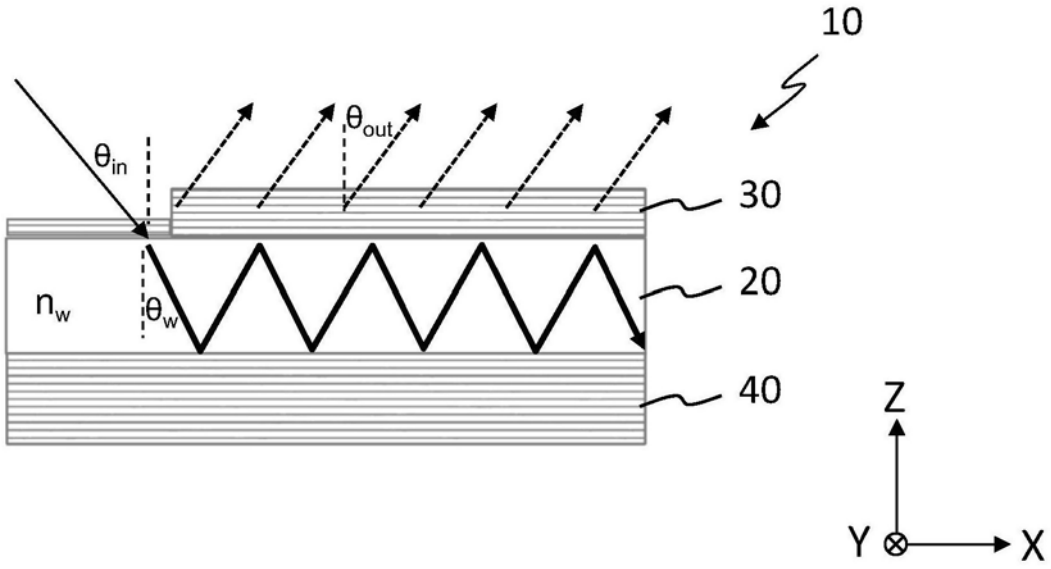


图6A

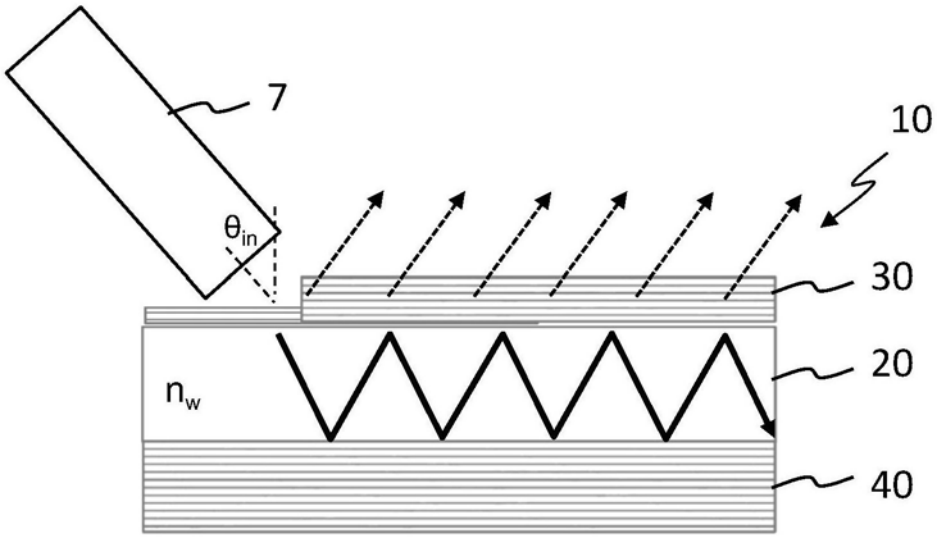


图6B

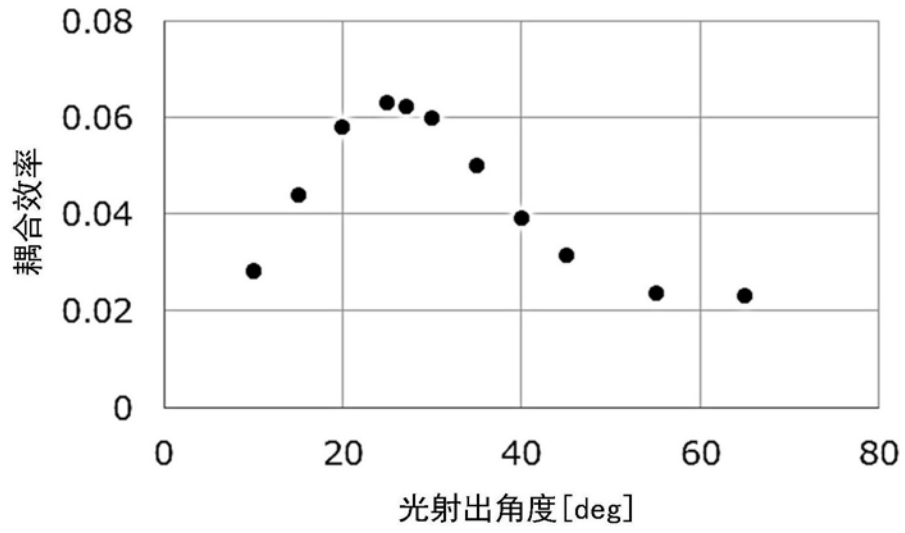


图7

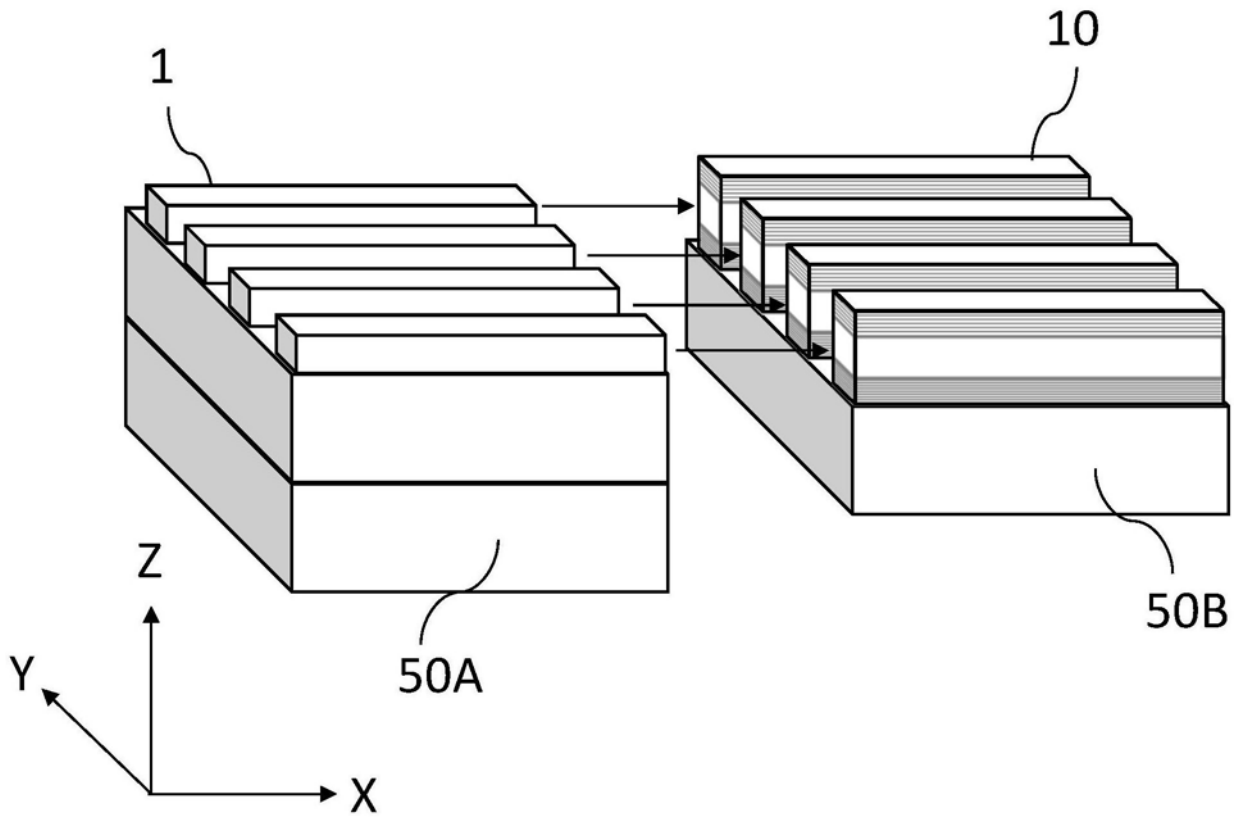


图8

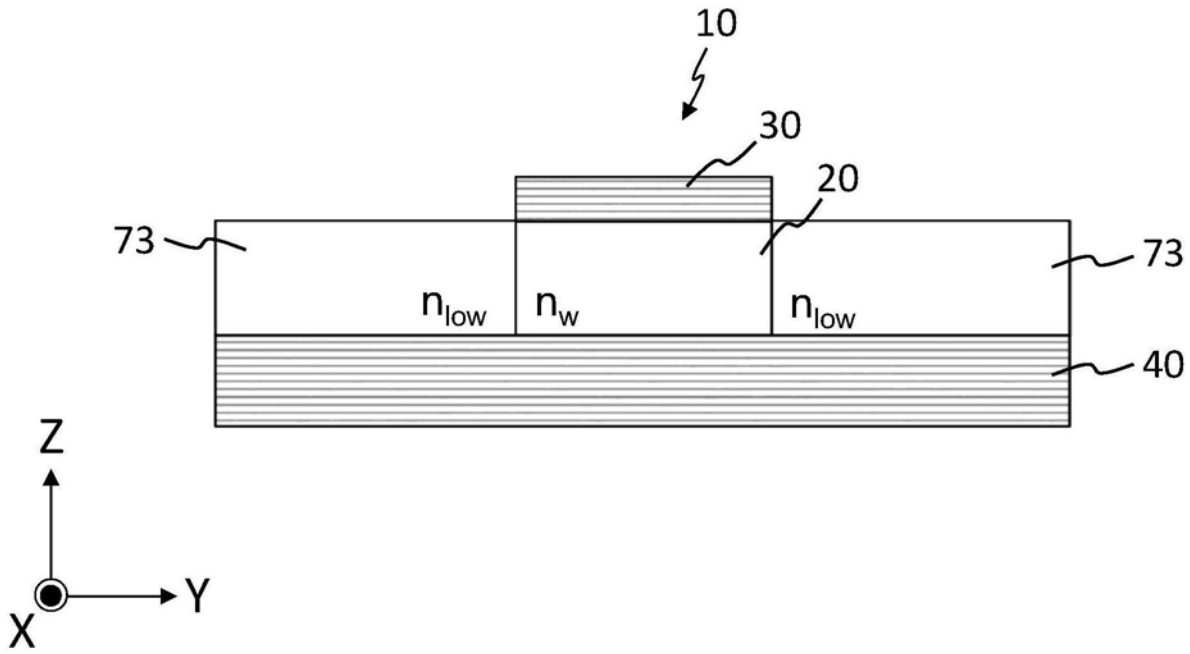

10
30
20
73
73
n_{low}
n_w
n_{low}
40
Z
Y
X

图9

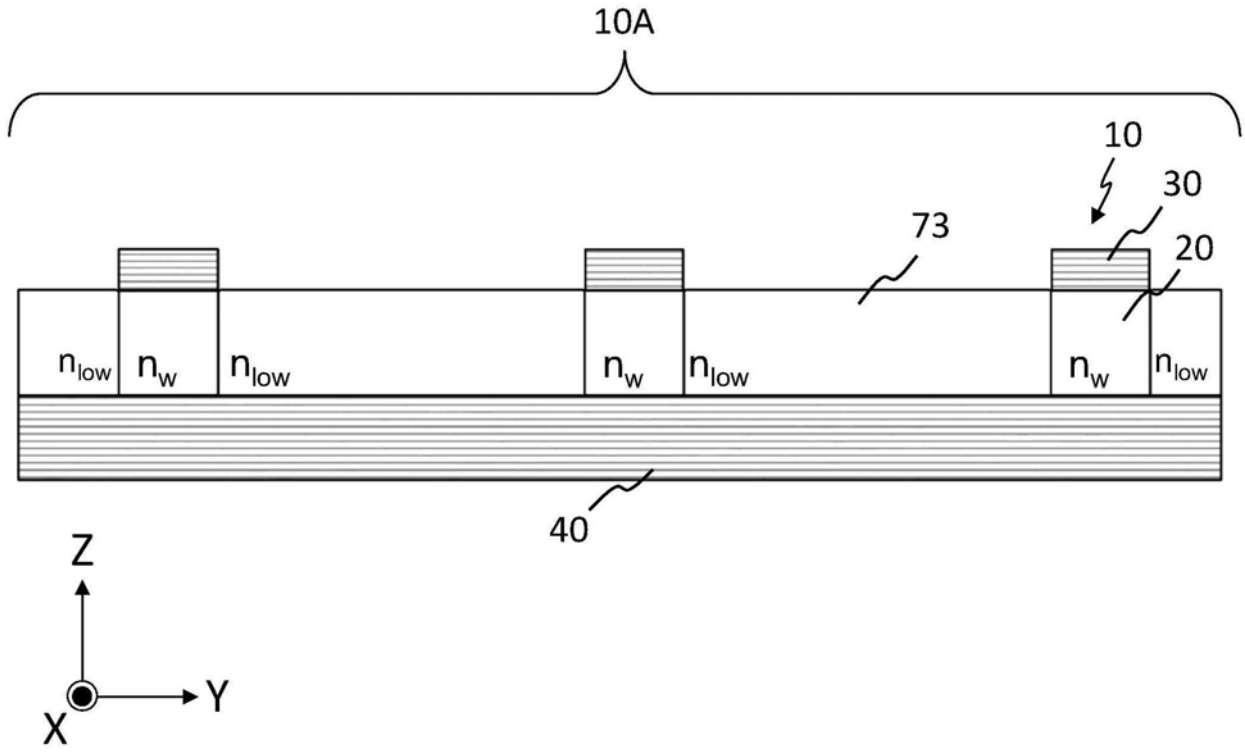

10A
10
30
73
20
n_{low}
n_w
n_{low}
n_w
n_{low}
n_w
n_{low}
40
Z
Y
X

图10

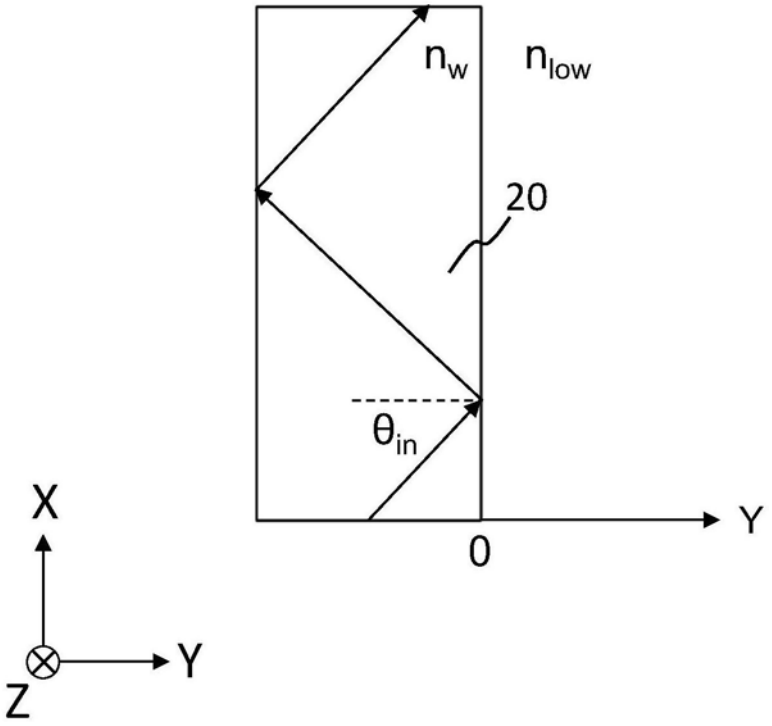

n_w
n_{low}
20
θ_{in}
X
Y
0
Y
Z

图11

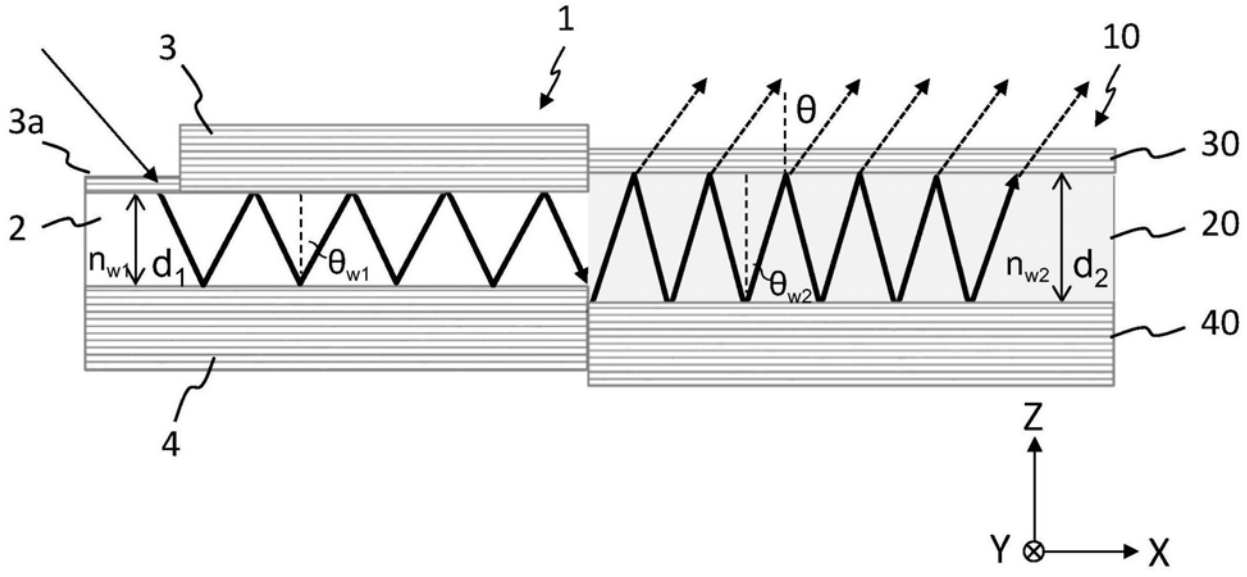

1
3
3a
2
n_{w1}
d_1
θ_{w1}
4
10
θ
30
20
θ_{w2}
n_{w2}
d_2
40
Z
Y
X

图12

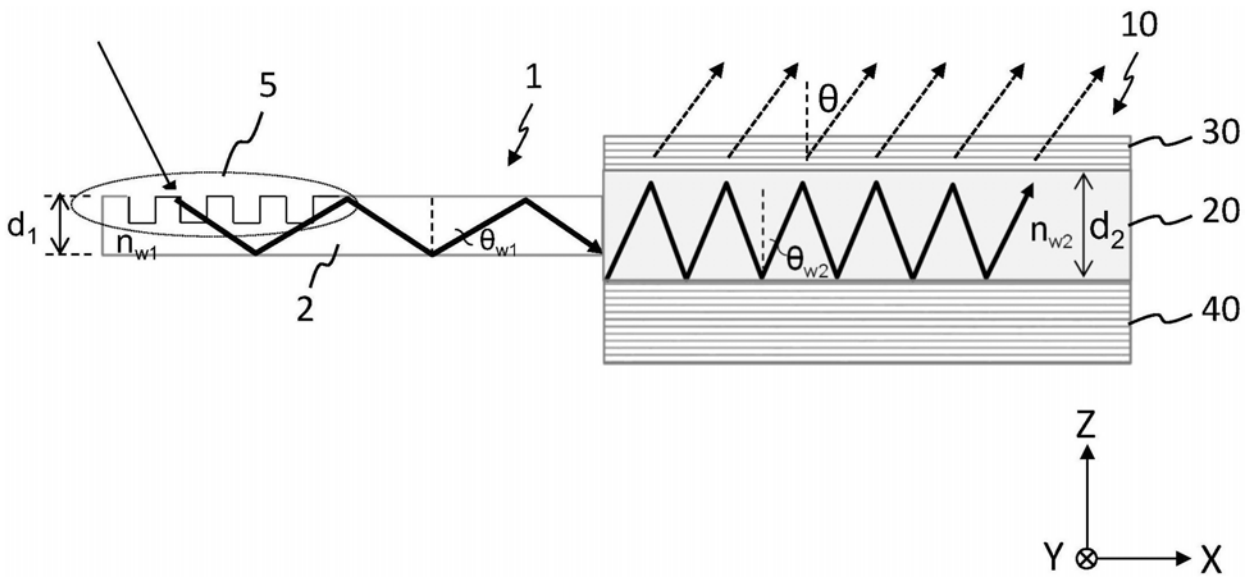

10
5
1
θ
30
d1
nw1
θw1
nw2
d2
20
θw2
2
40
Z
Y
X

图13

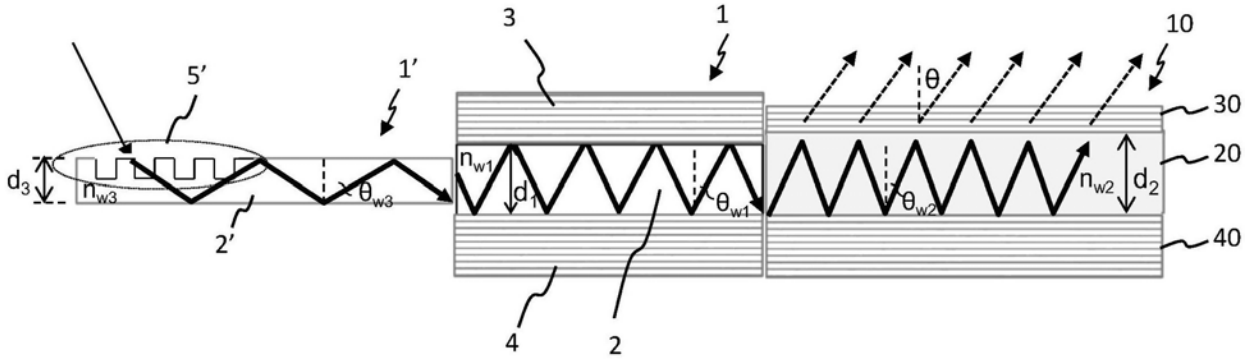

3
1
10
5'
1'
θ
30
nw1
d3
nw3
θw3
d1
θw1
θw2
nw2
d2
20
2'
40
4
2

图14

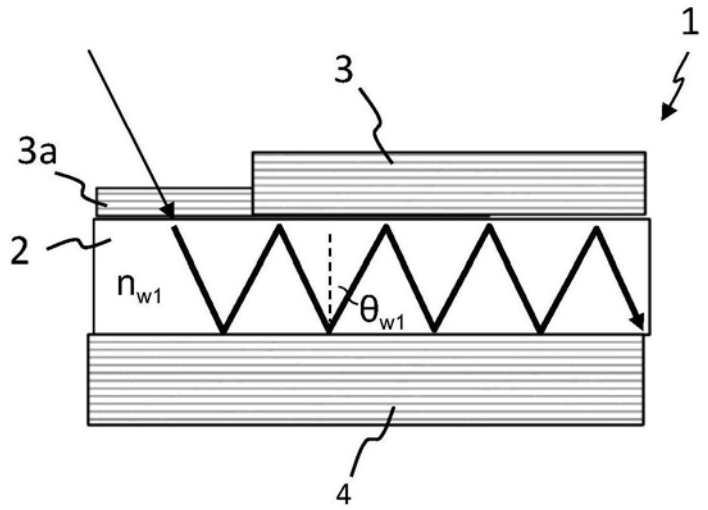

1
3
3a
2
nw1
θw1
4

图15

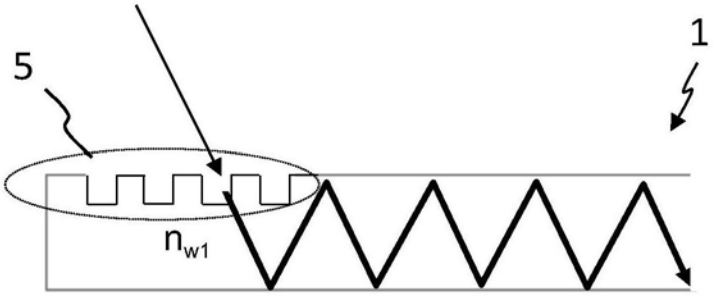


图16A

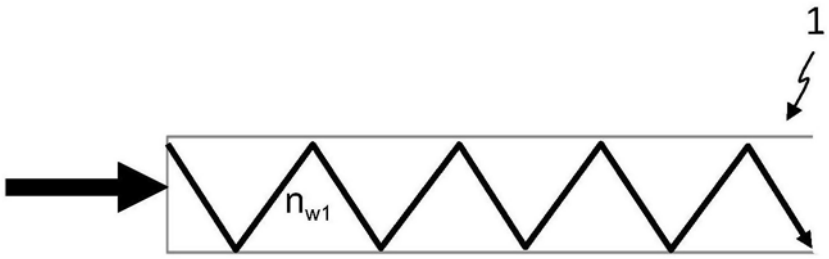


图16B

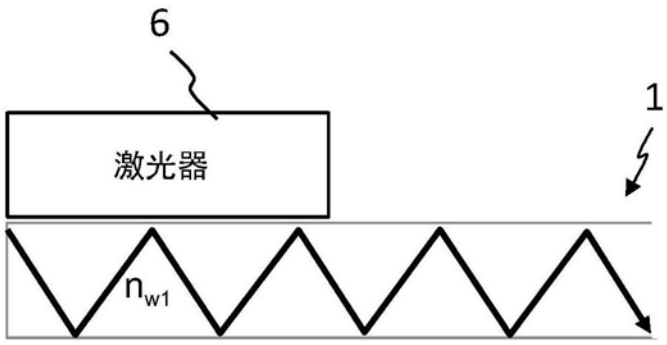


图16C

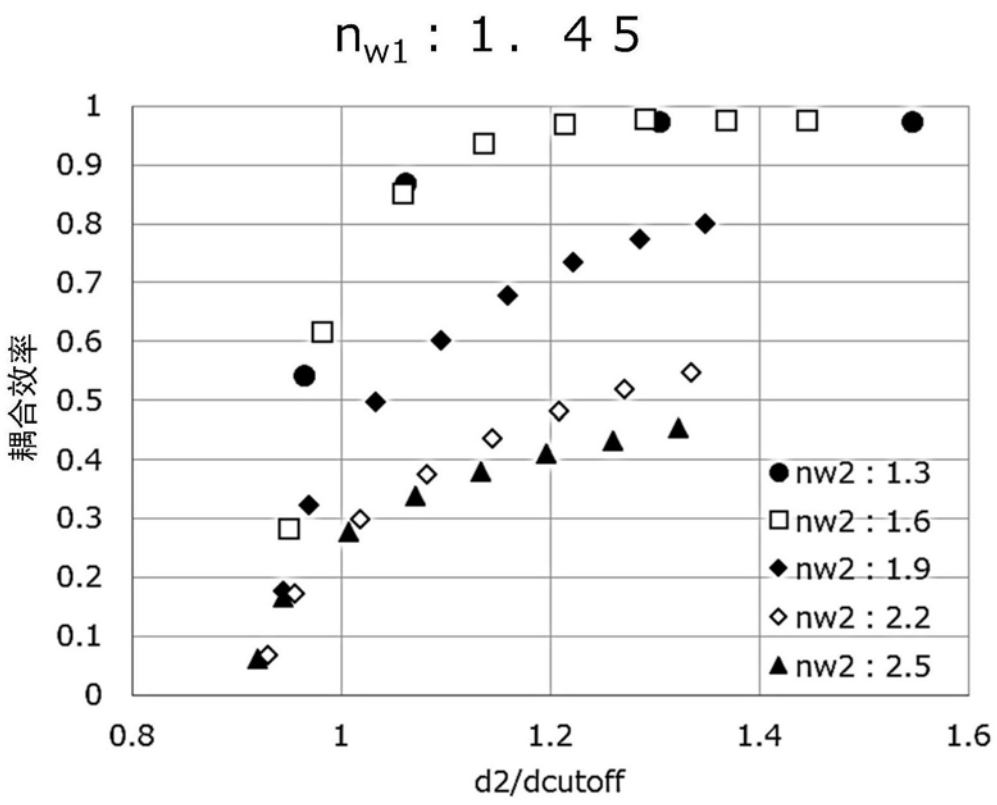

n_{w1} : 1. 45
耦合效率
d2/dcutoff
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
0.8
1
1.2
1.4
1.6
nw2 : 1.3
nw2 : 1.6
nw2 : 1.9
nw2 : 2.2
nw2 : 2.5

图17

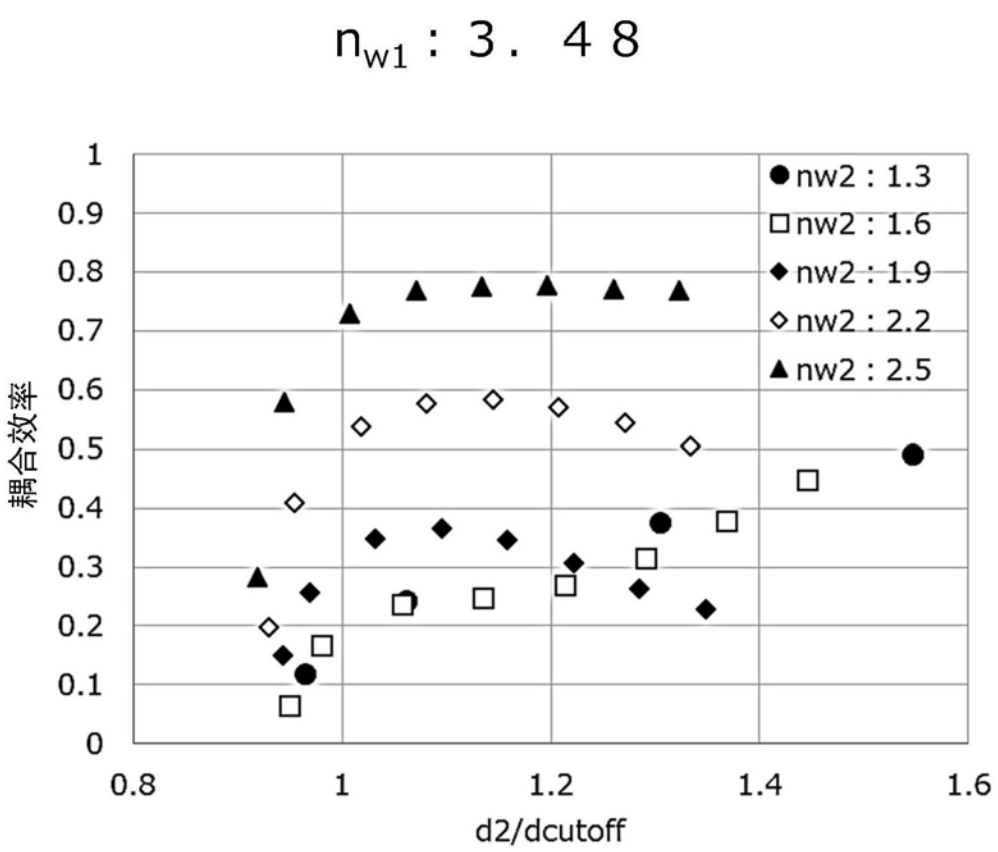

n_{w1}：3．48
耦合效率
d2/dcutoff
nw2：1.3
nw2：1.6
nw2：1.9
nw2：2.2
nw2：2.5
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
0.8
1
1.2
1.4
1.6

图18

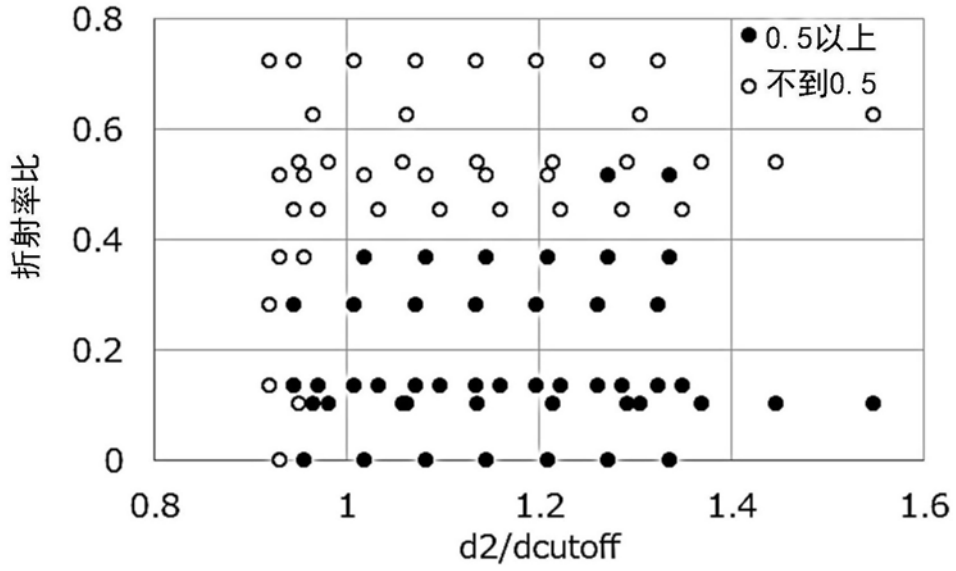

折射率比
d2/dcutoff
0.5以上
不到0.5
0
0.2
0.4
0.6
0.8
0.8
1
1.2
1.4
1.6

图19

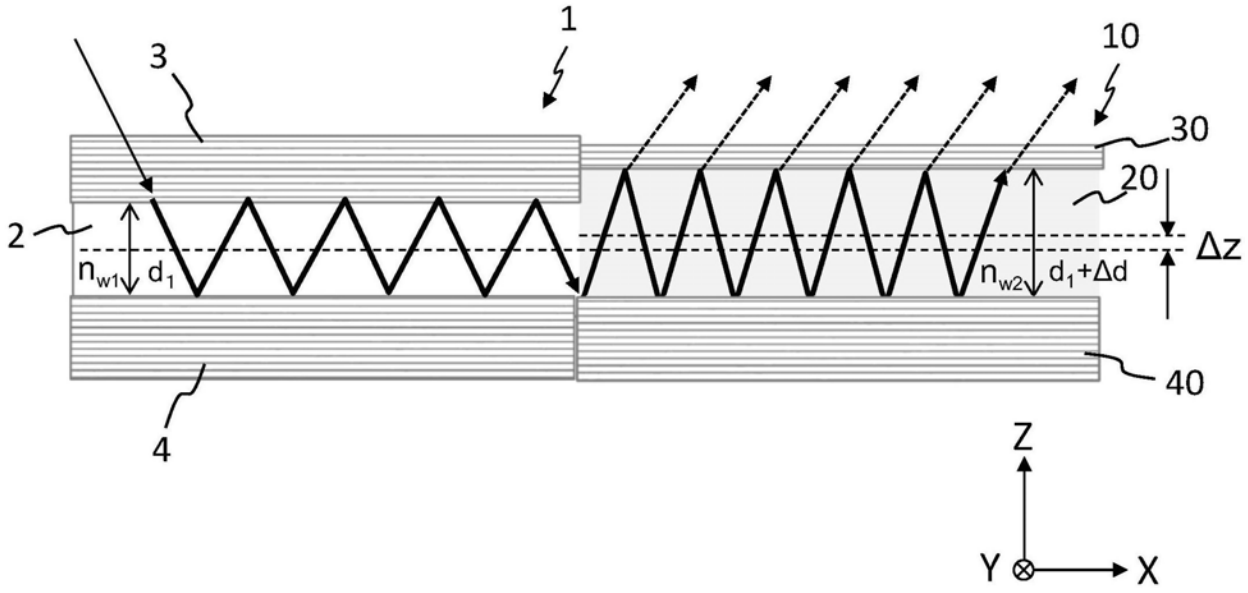

1
3
10
30
20
2
Δz
n_{w1}
d_1
n_{w2}
$d_1+\Delta d$
40
4
Z
Y
X

图20

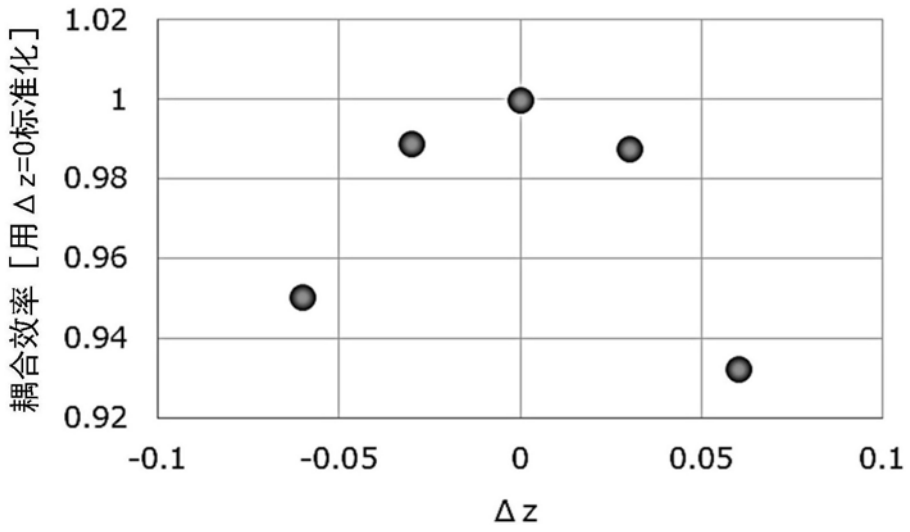

耦合效率［用Δz=0标准化］
1.02
1
0.98
0.96
0.94
0.92
-0.1
-0.05
0
0.05
0.1
Δz

图21

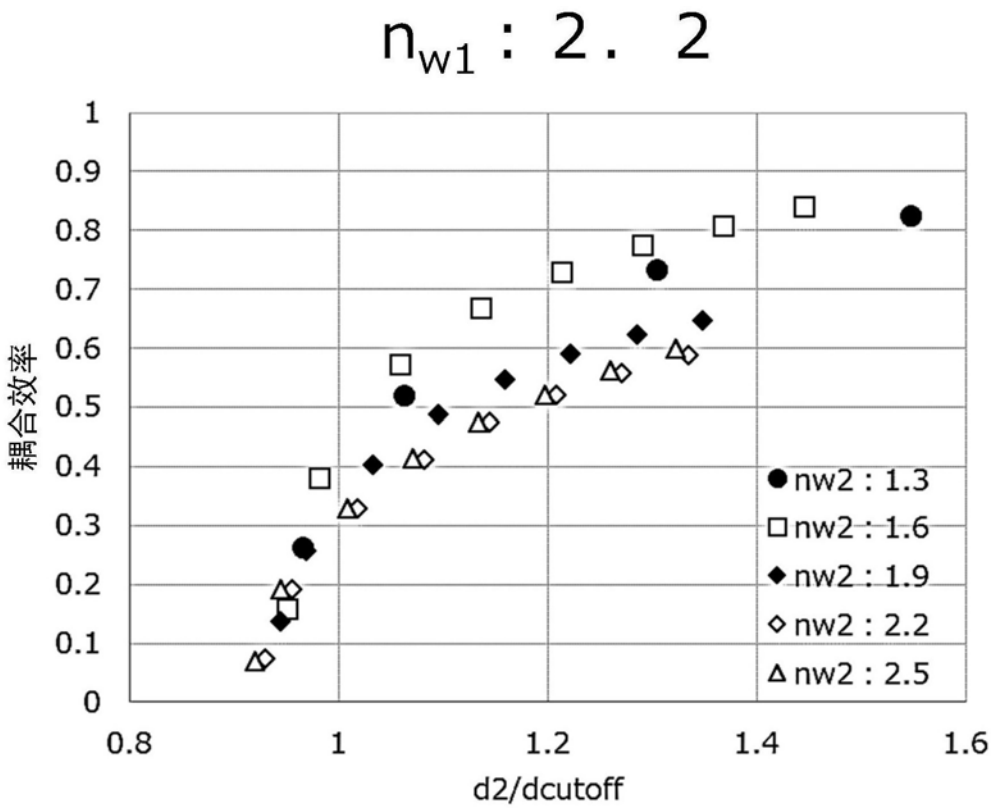

n_{w1} : 2. 2
耦合效率
d2/dcutoff
nw2 : 1.3
nw2 : 1.6
nw2 : 1.9
nw2 : 2.2
nw2 : 2.5

图22A

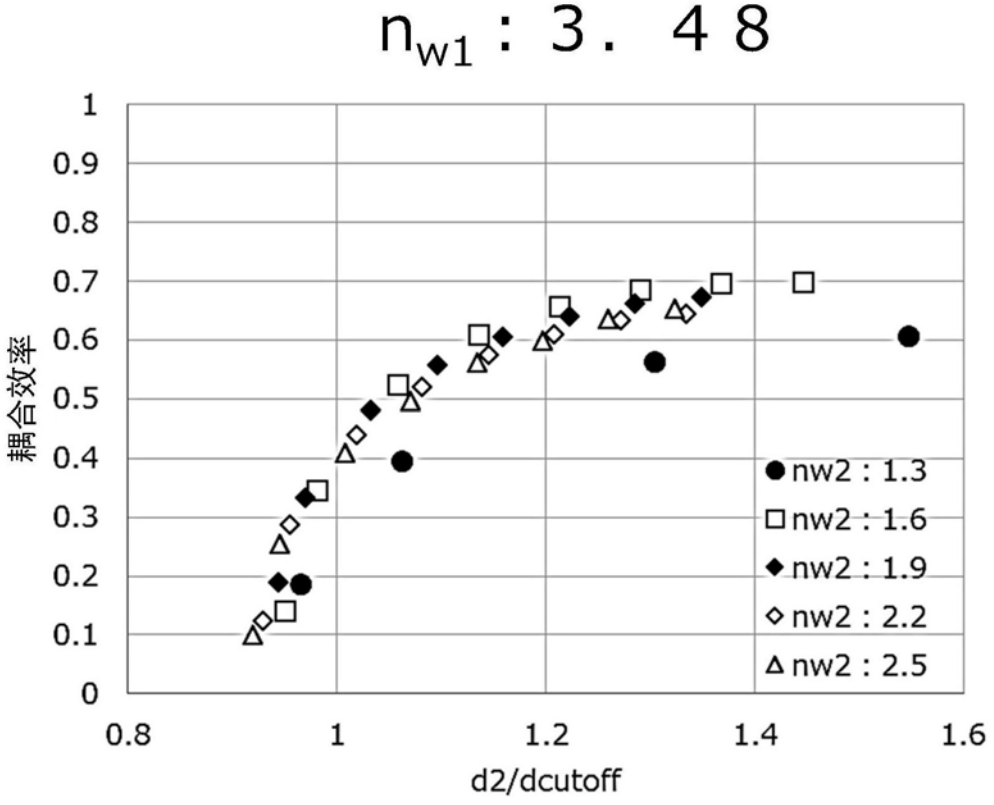

n_{w1} : 3. 48
耦合效率
d2/dcutoff
nw2 : 1.3
nw2 : 1.6
nw2 : 1.9
nw2 : 2.2
nw2 : 2.5

图22B

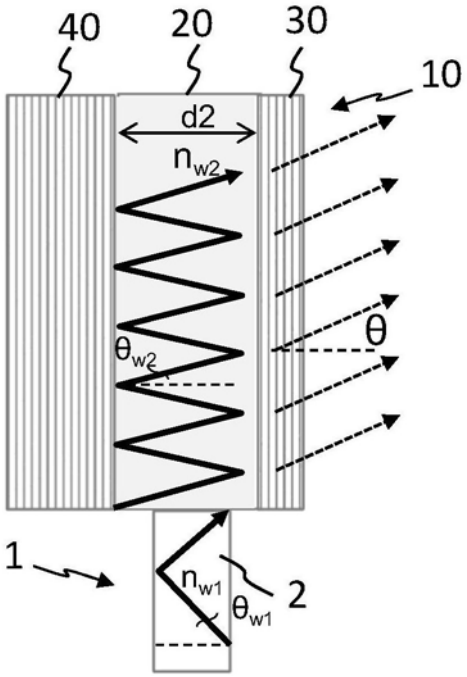

40
20
30
10
d2
n_{w2}
θ_{w2}
θ
1
n_{w1}
θ_{w1}
2

图23A

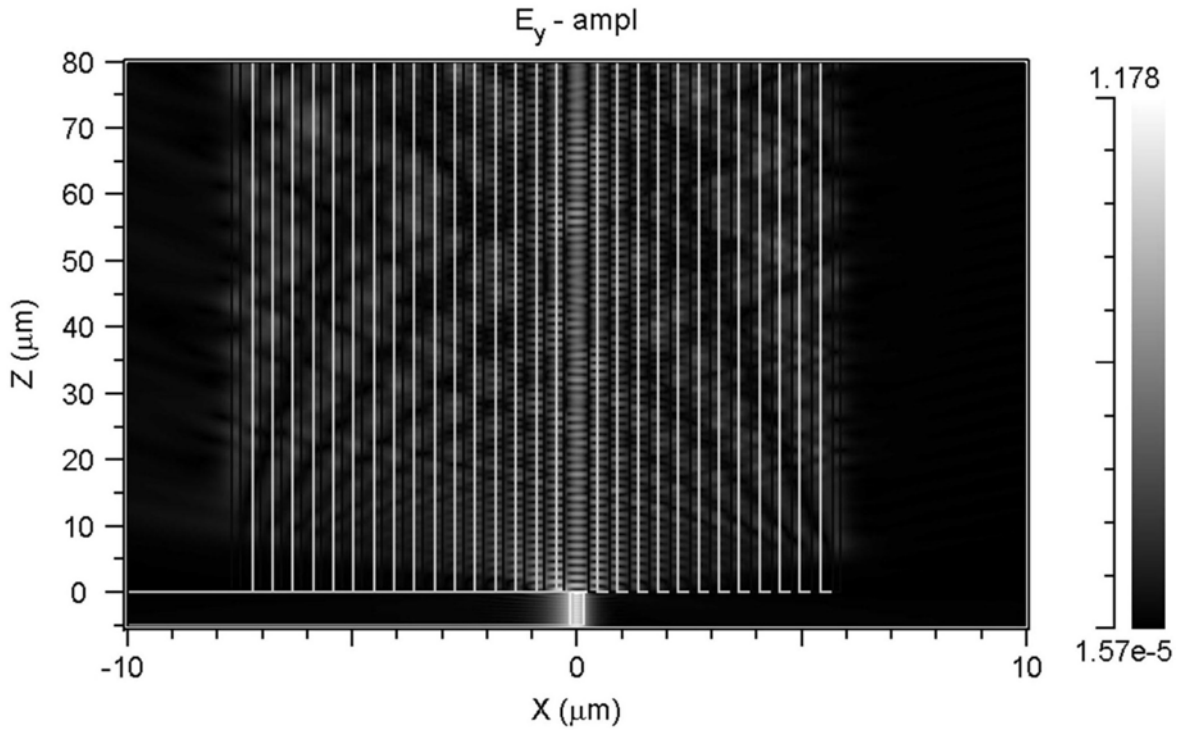

E_y - ampl
80
70
60
50
40
30
20
10
0
Z (μm)
-10
0
10
X (μm)
1.178
1.57e-5

图23B

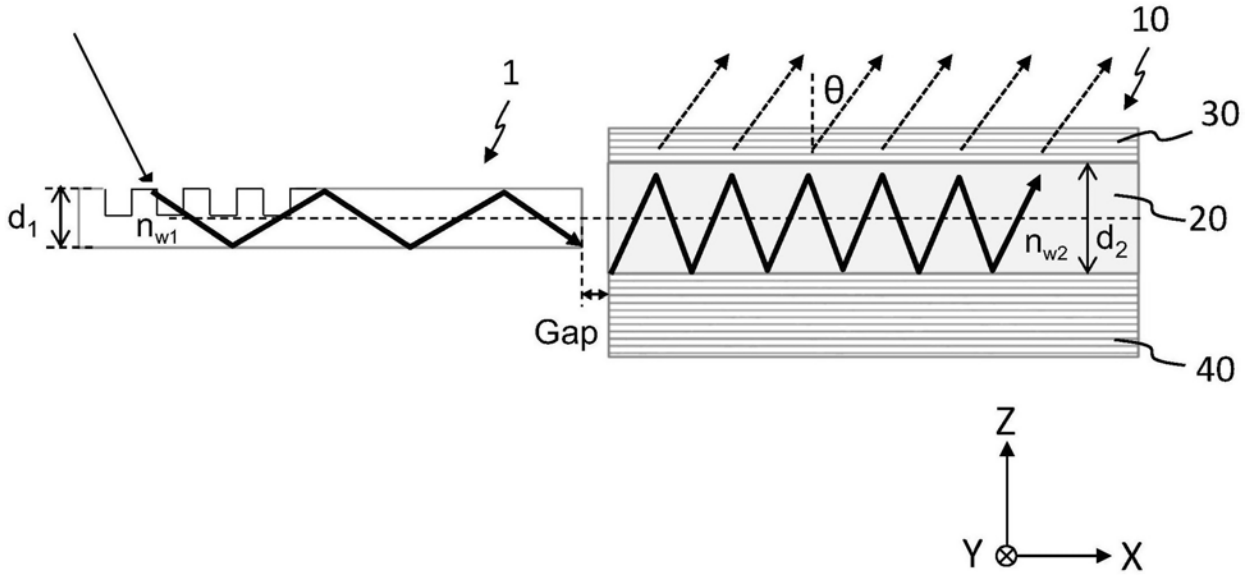

10
1
θ
30
d1
nw1
20
nw2
d2
Gap
40
Z
Y
X

图24A

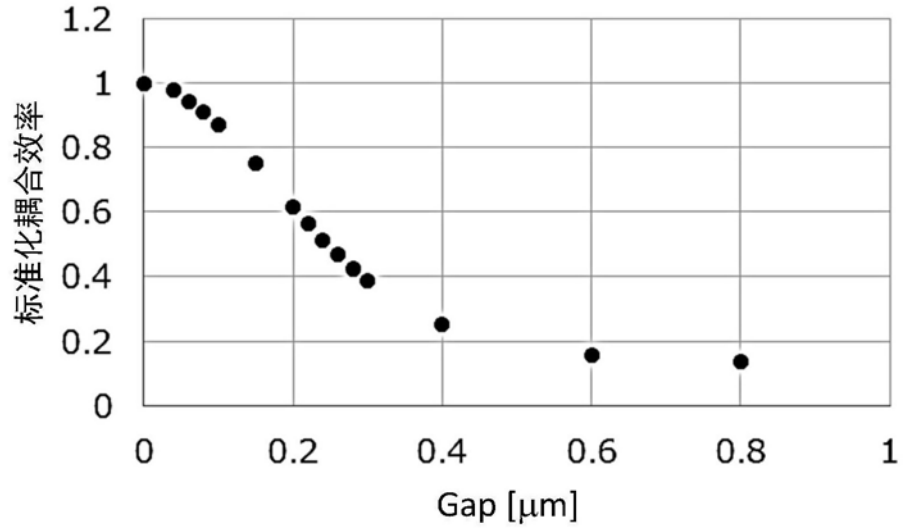

1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
标准化耦合效率
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
Gap [μm]

图24B

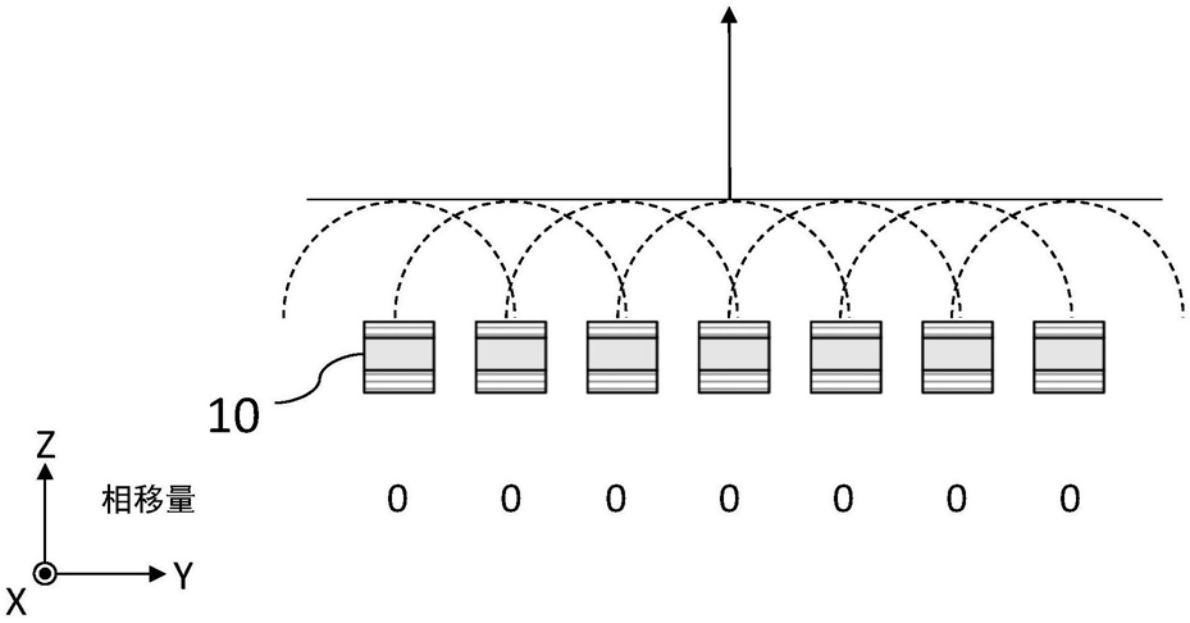


图25A

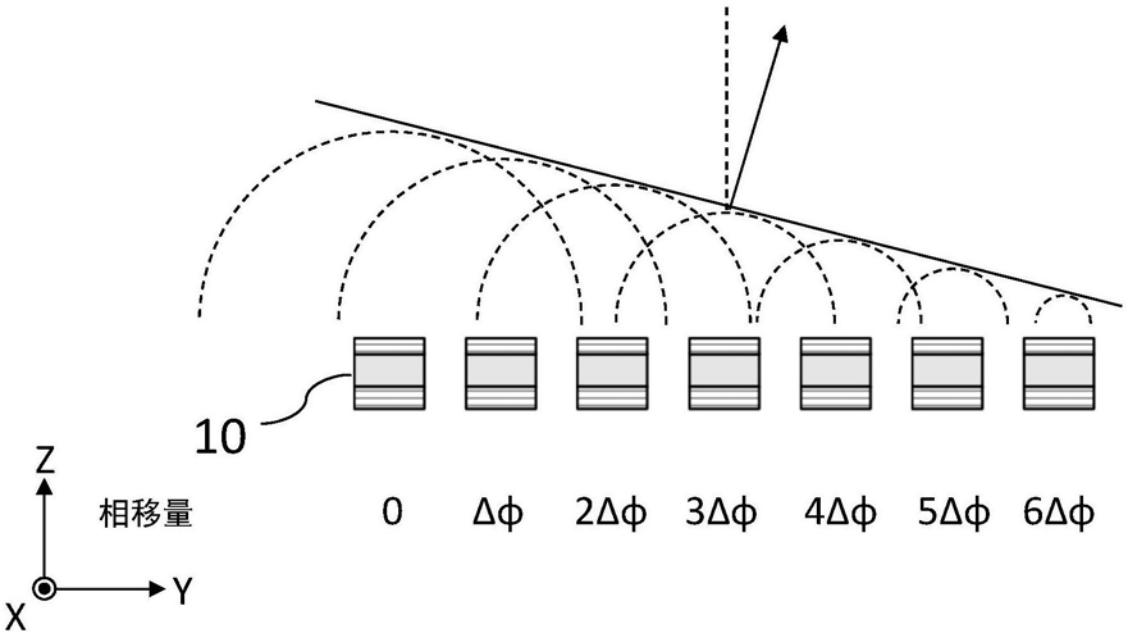


图25B

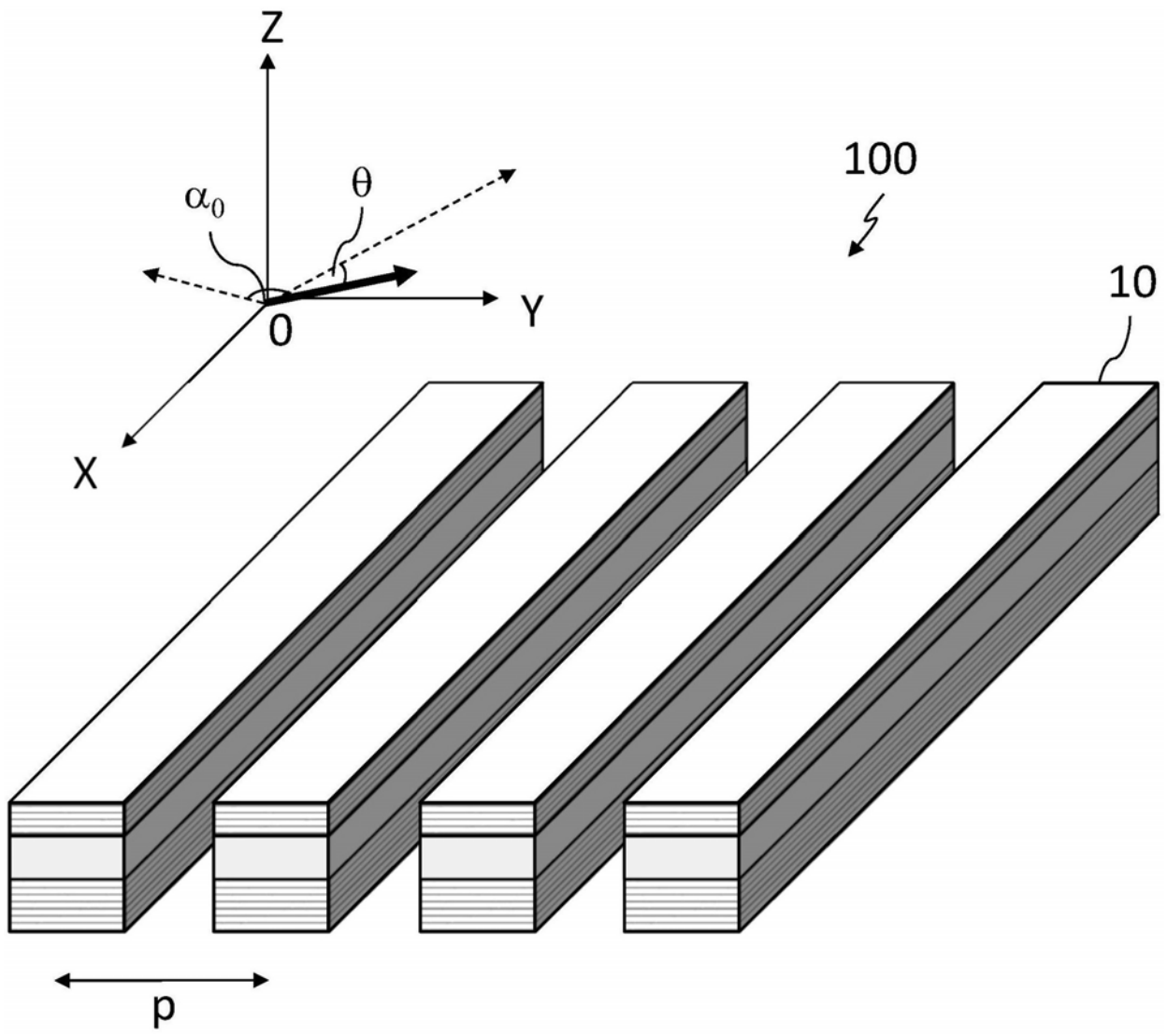


图26

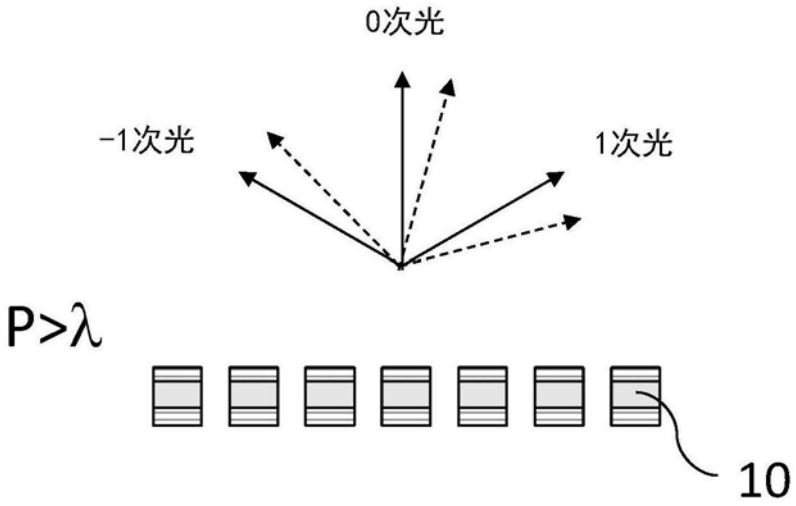


图27A

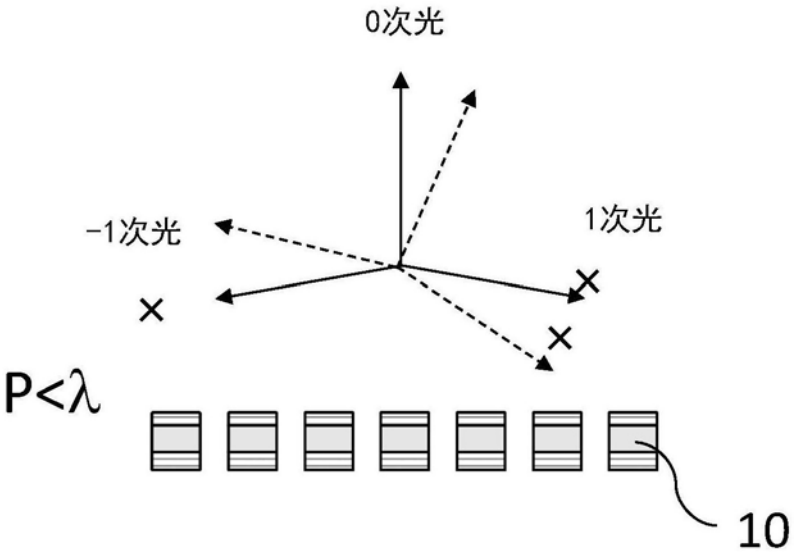


图27B

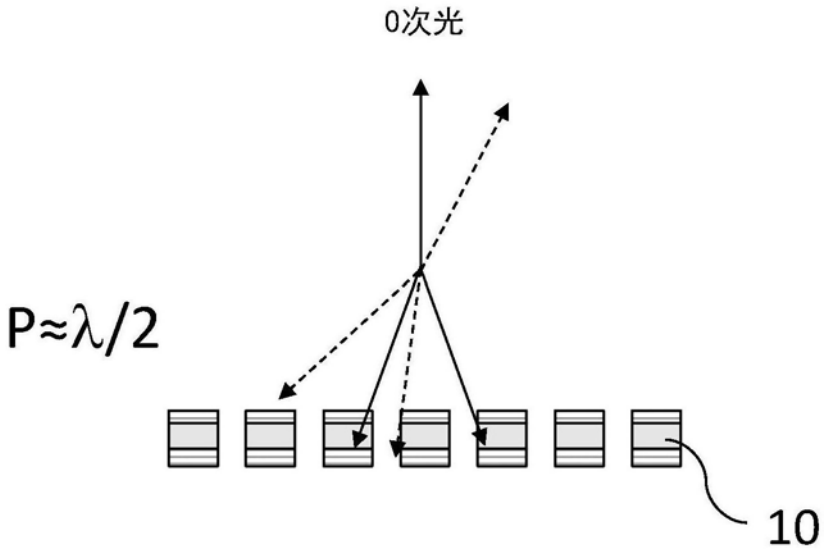


图27C

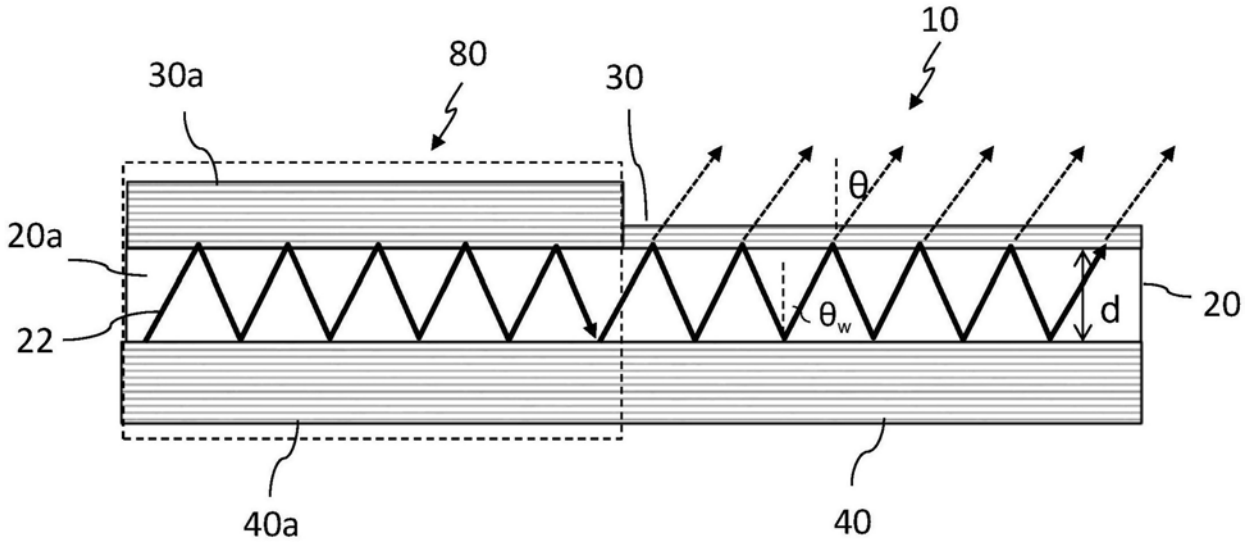


图28

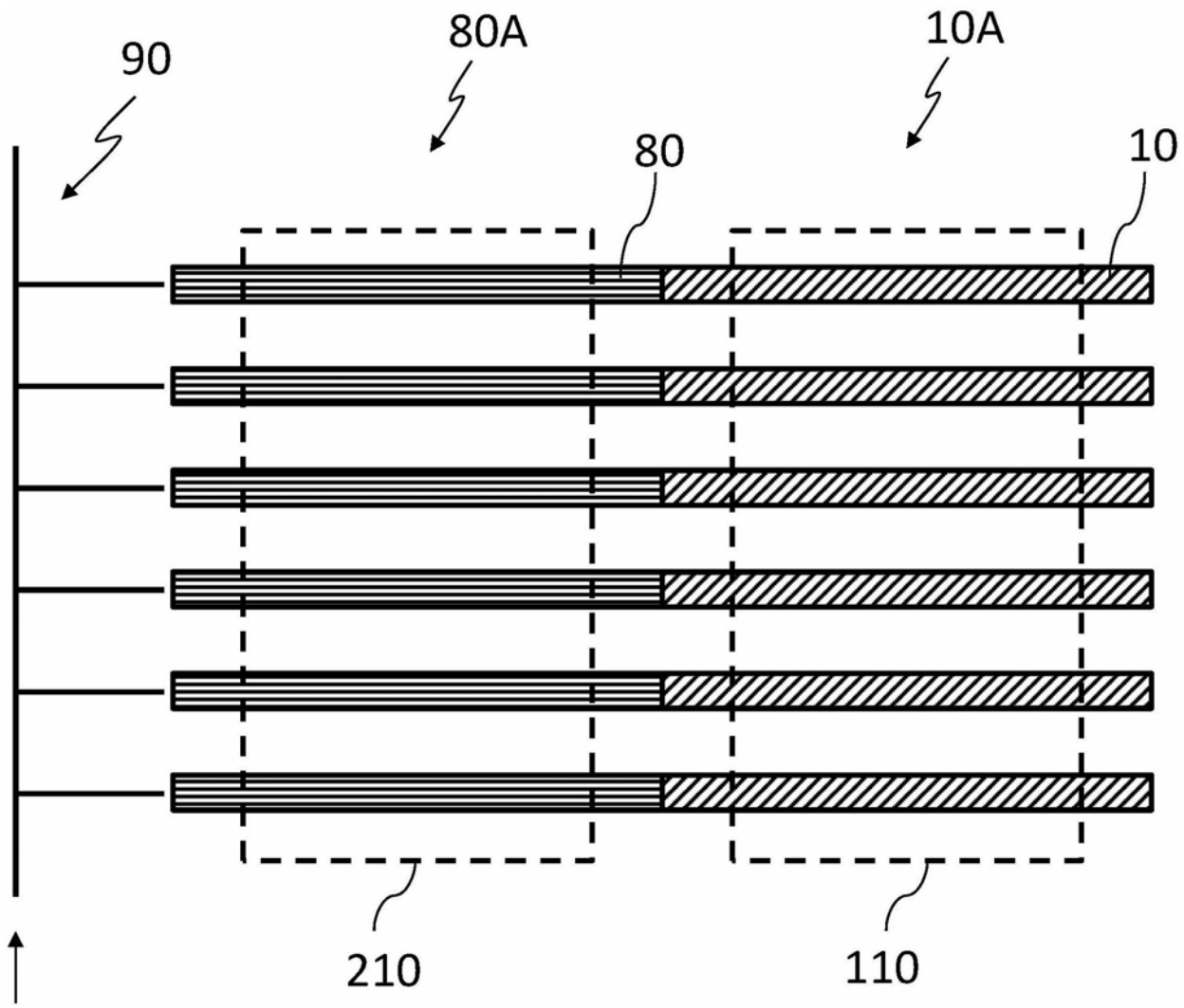


图29

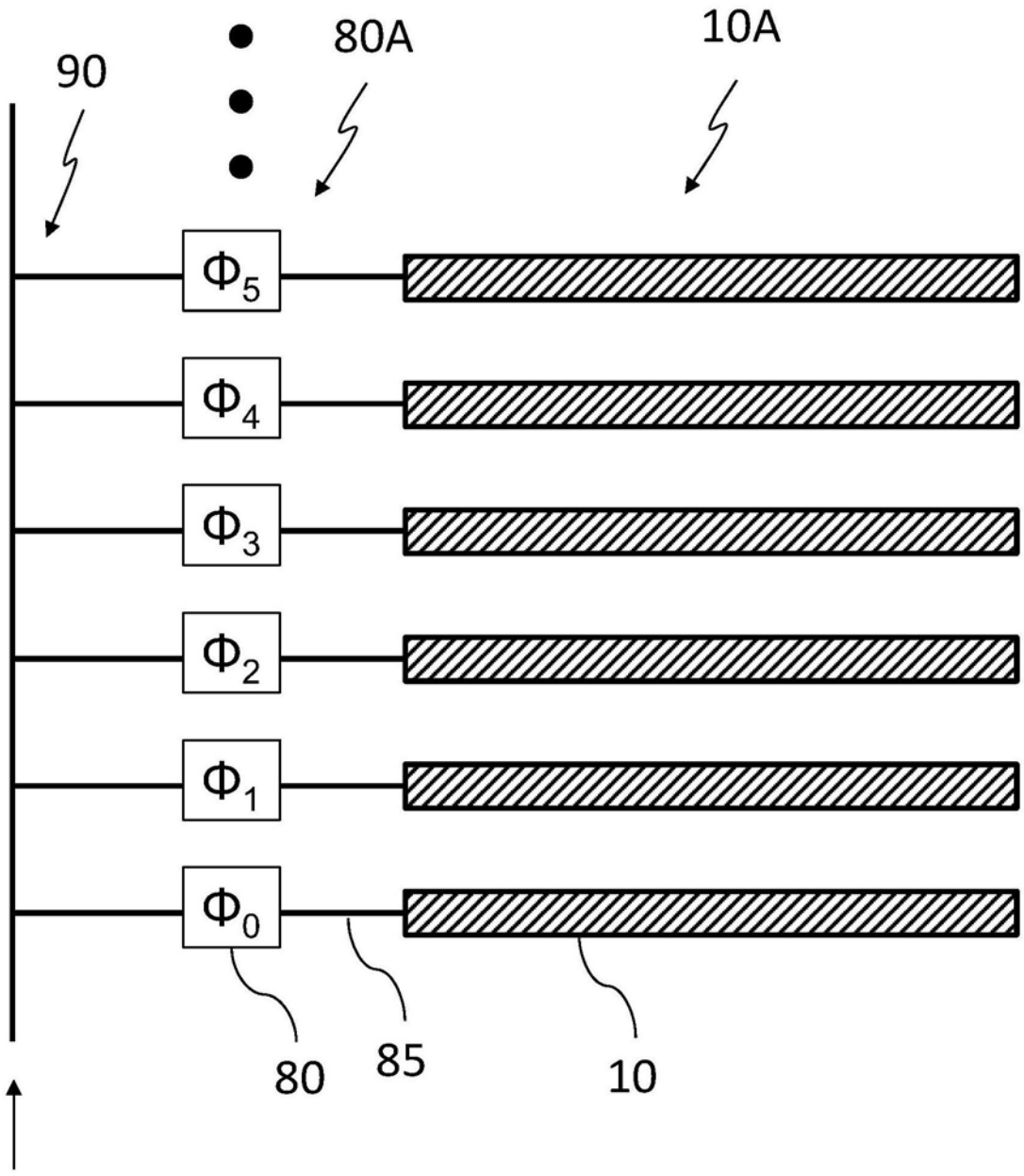


图30

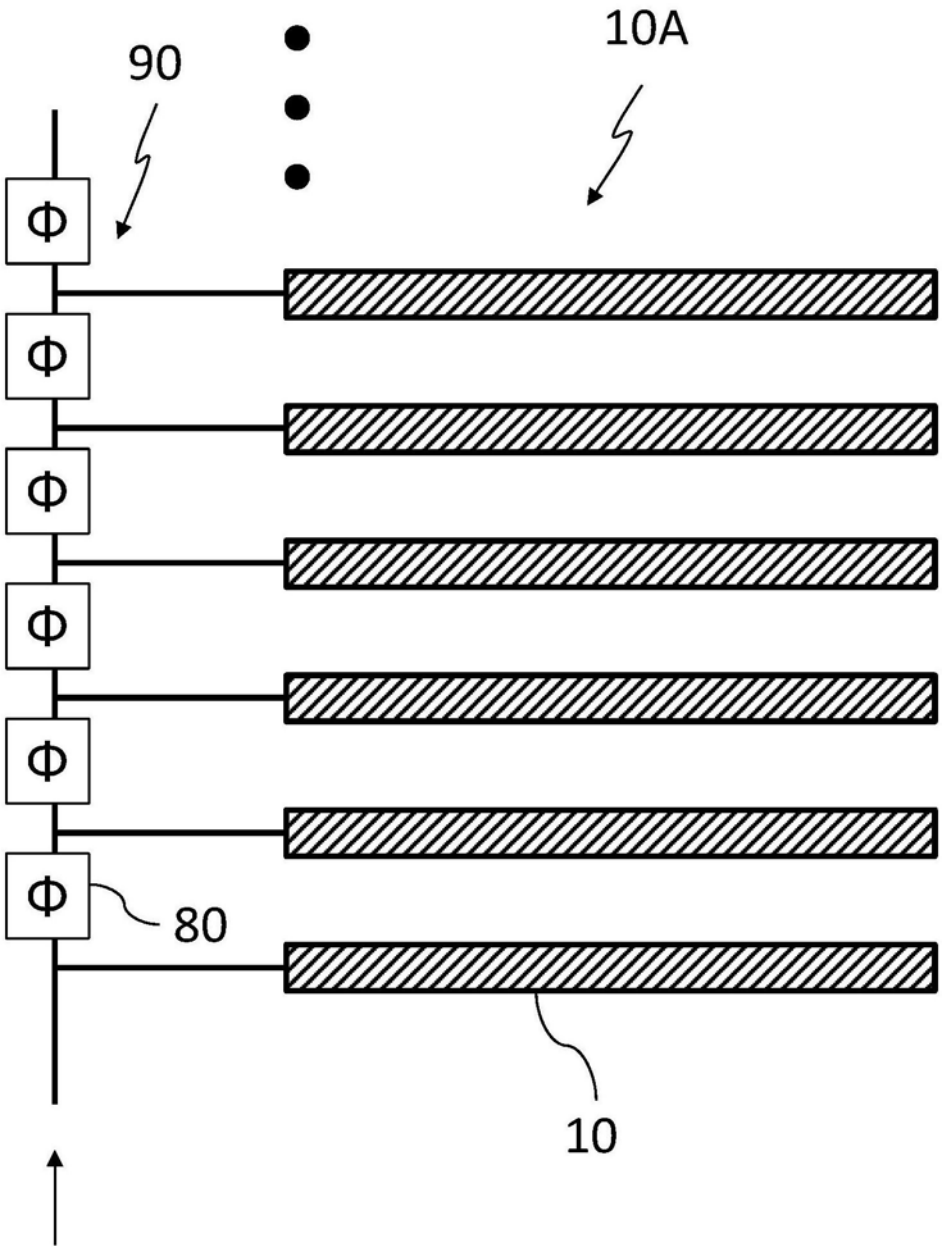


图31

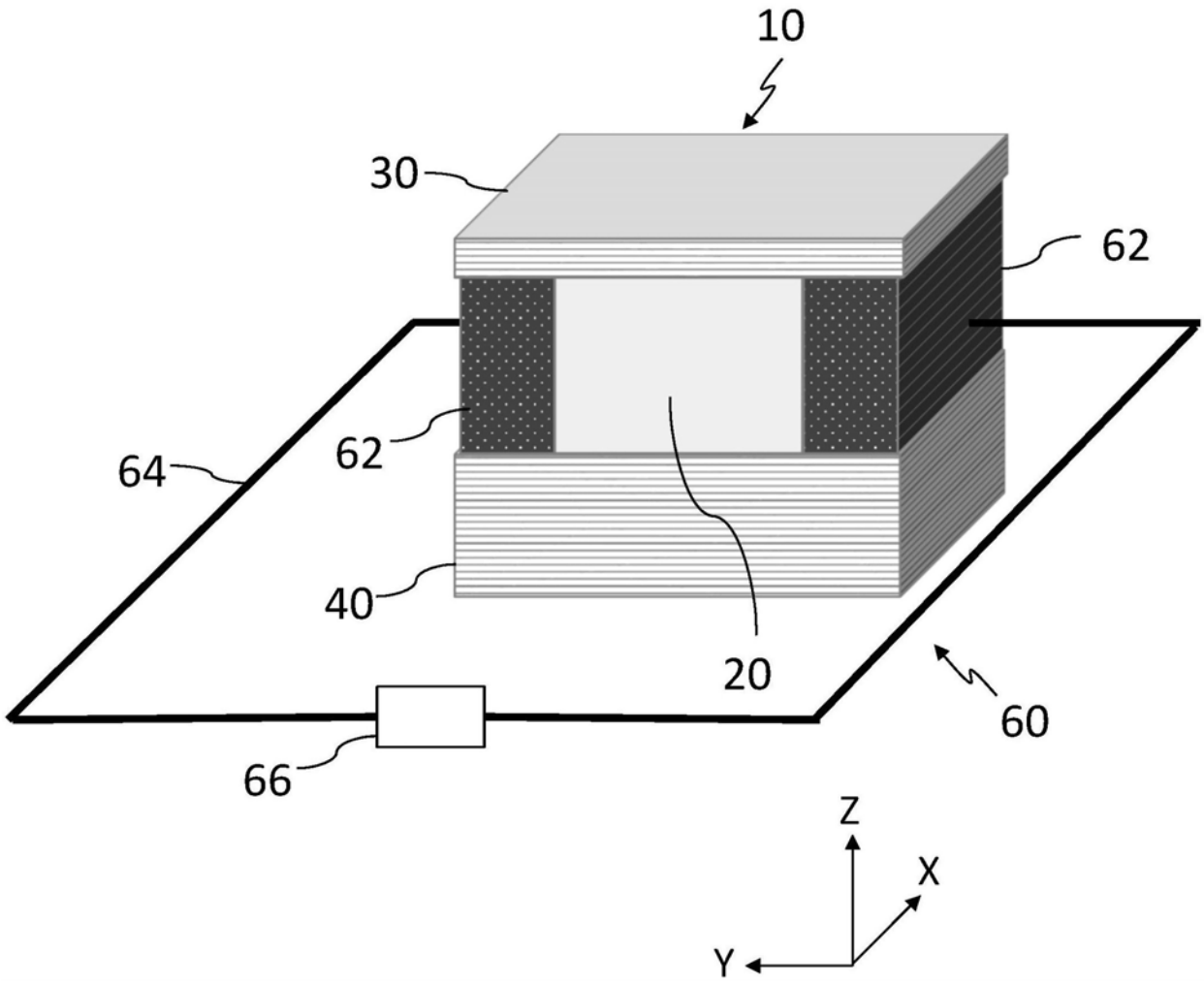


图32A

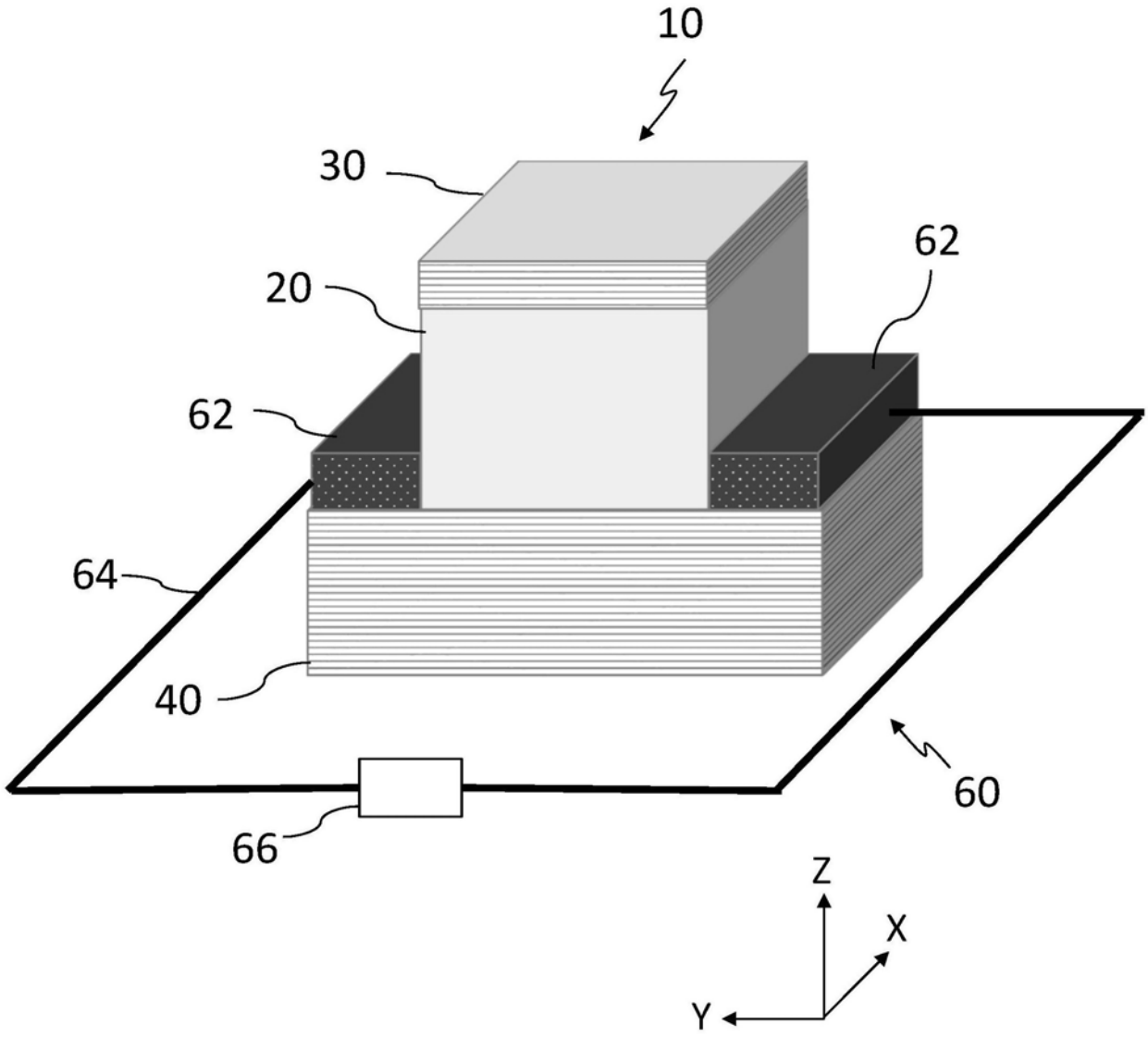


图32B

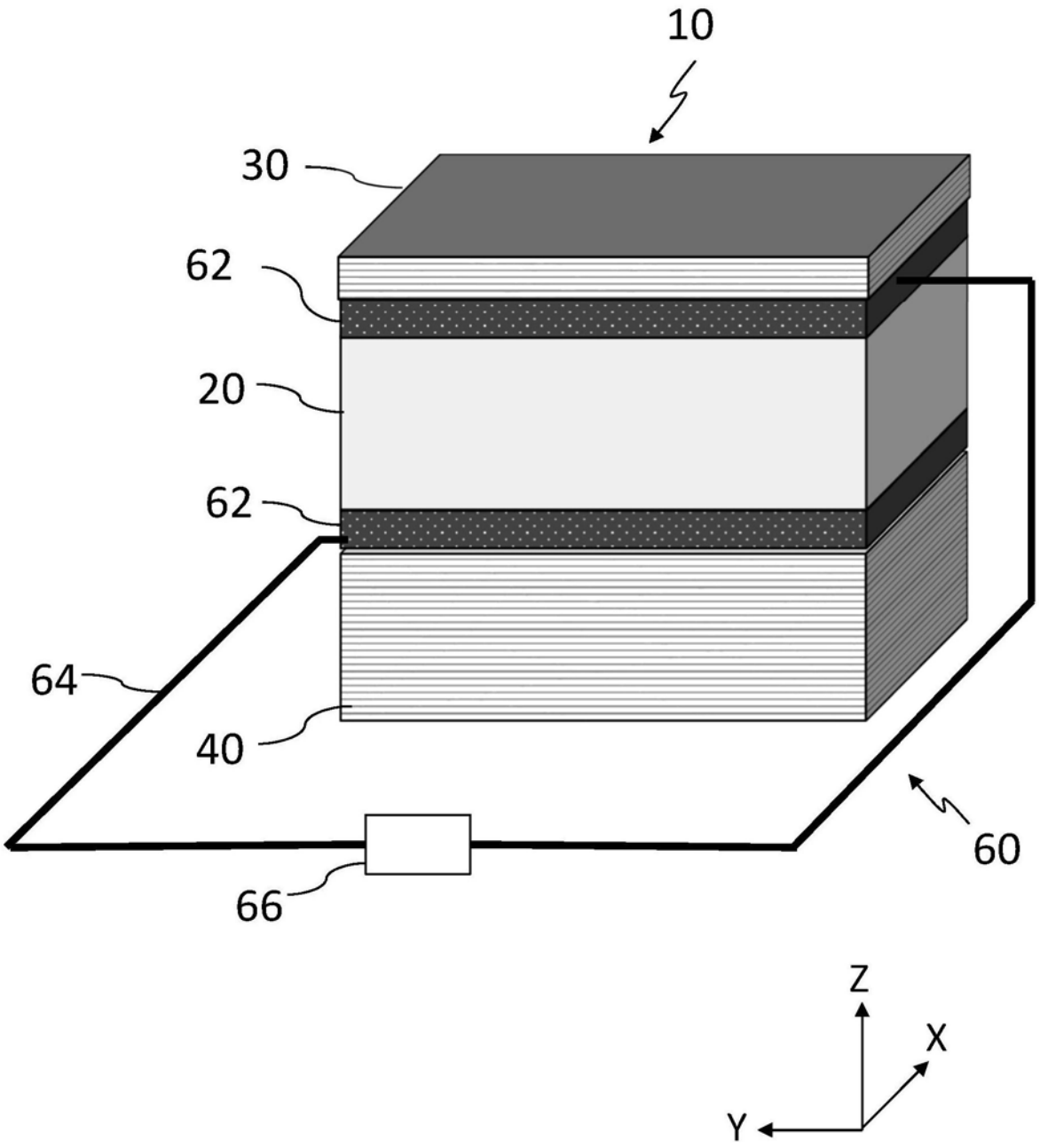


图32C

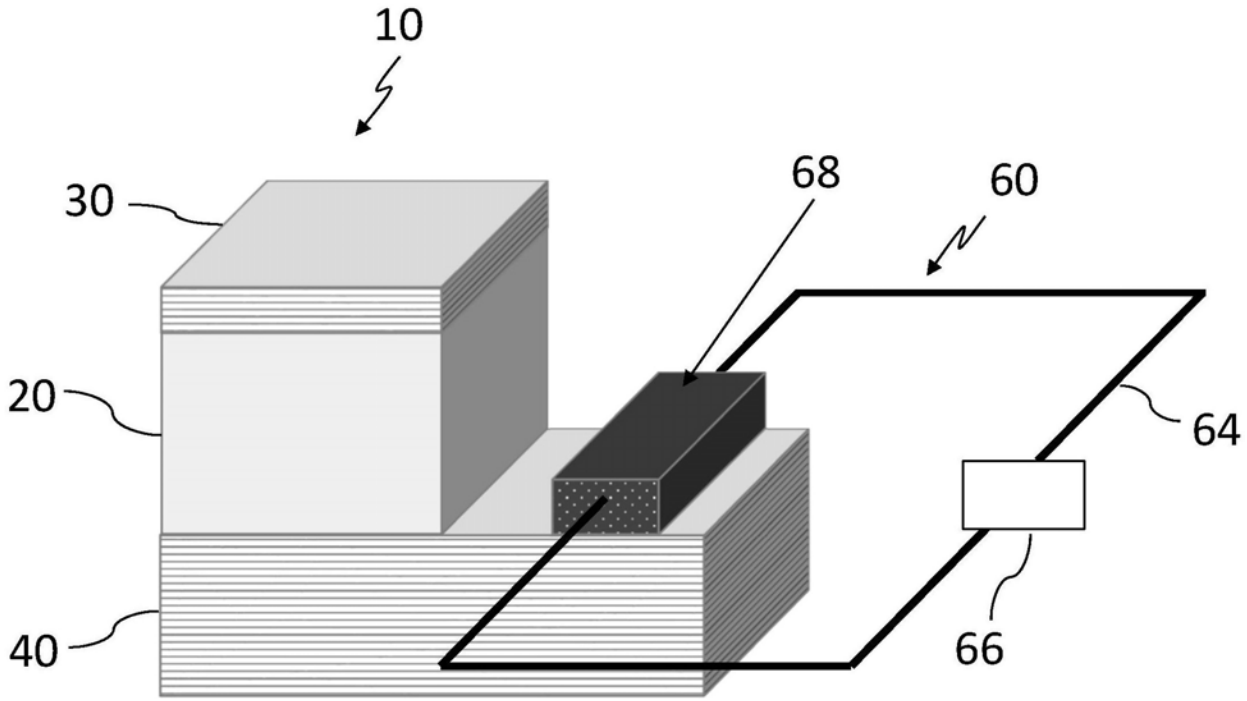


图33

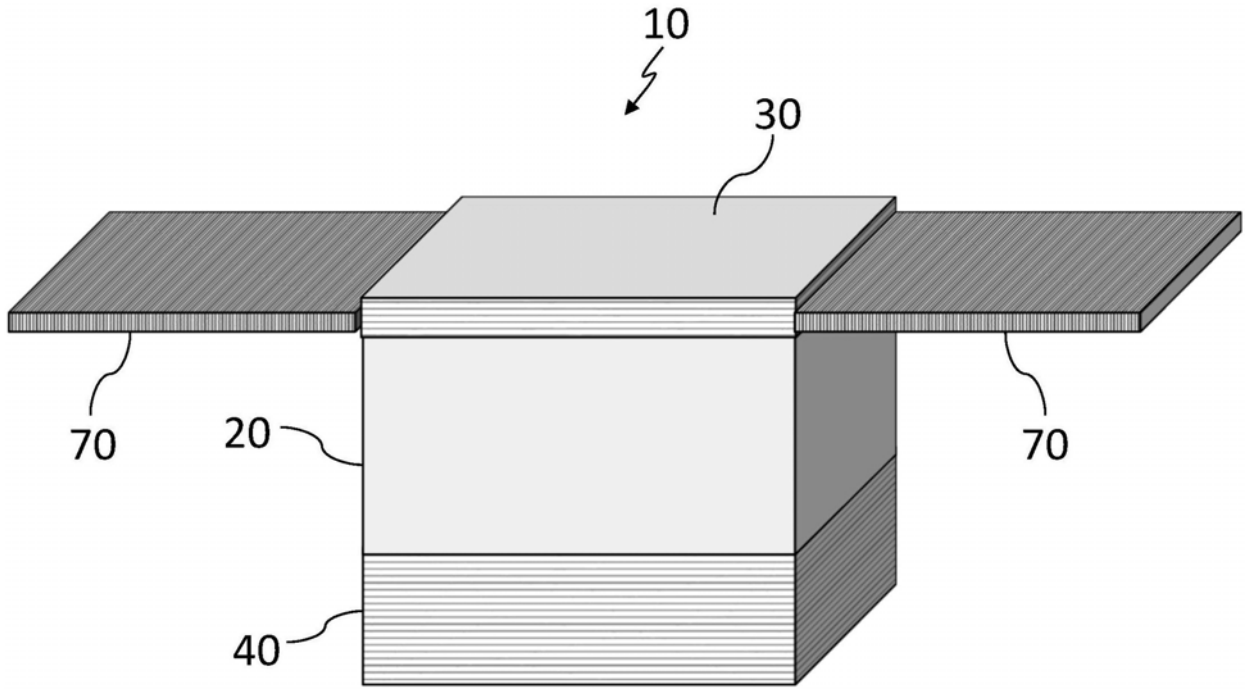


图34

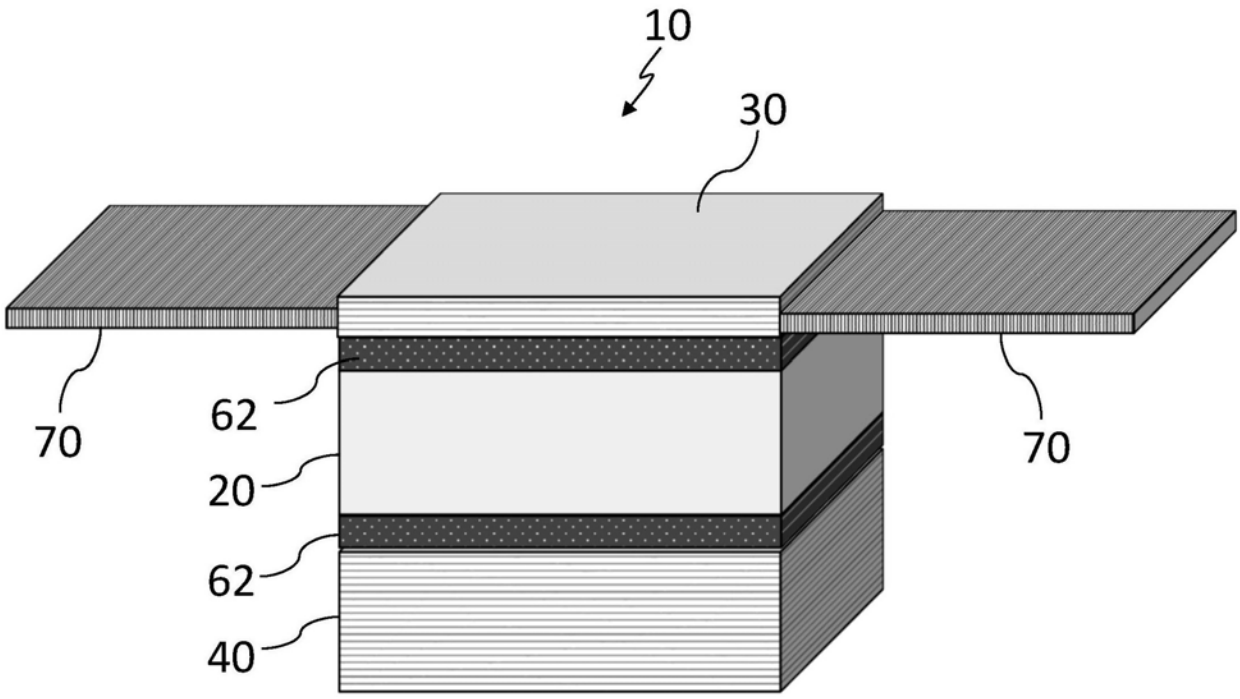


图35

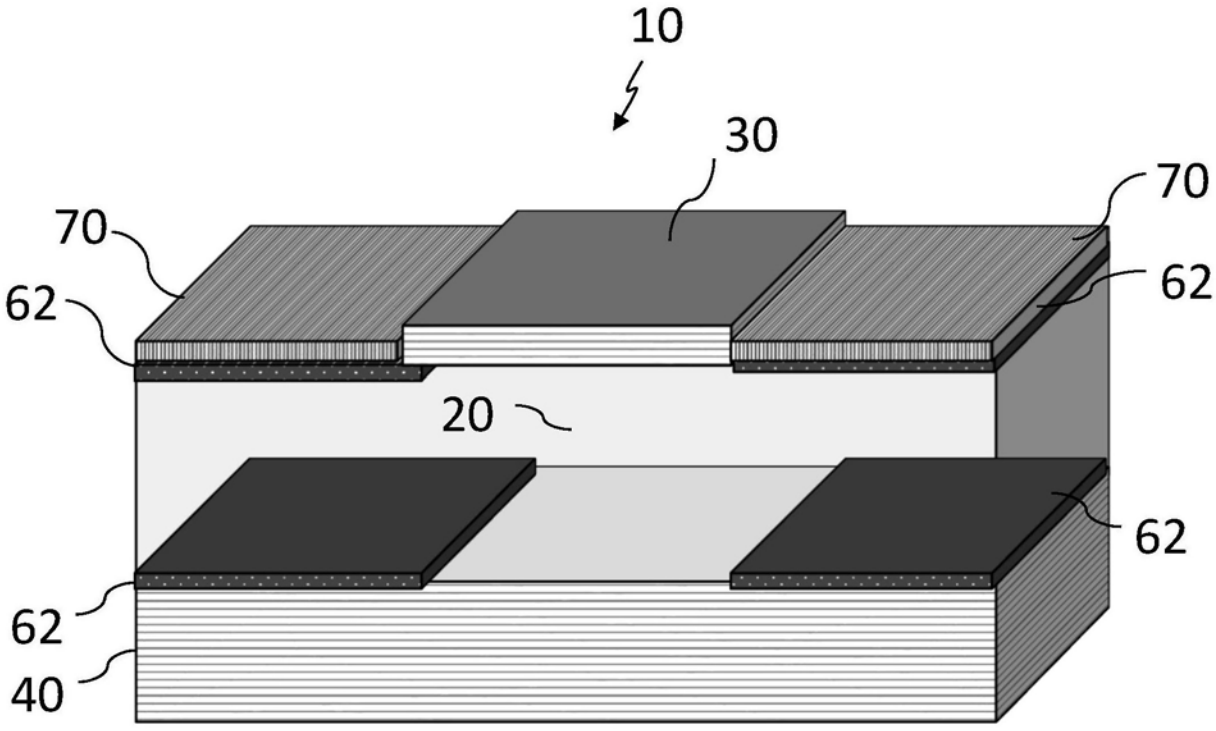


图36

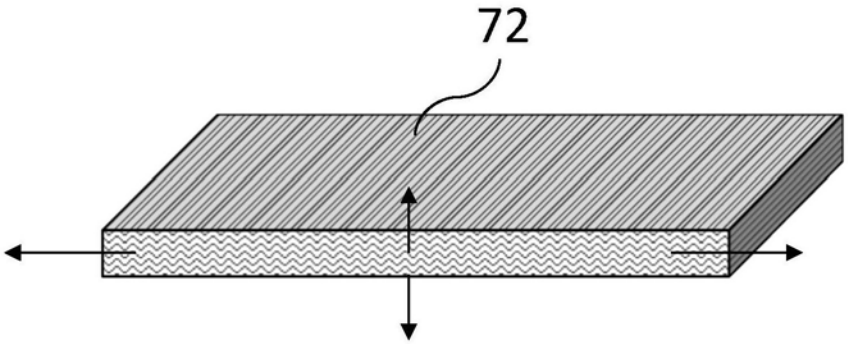


图37

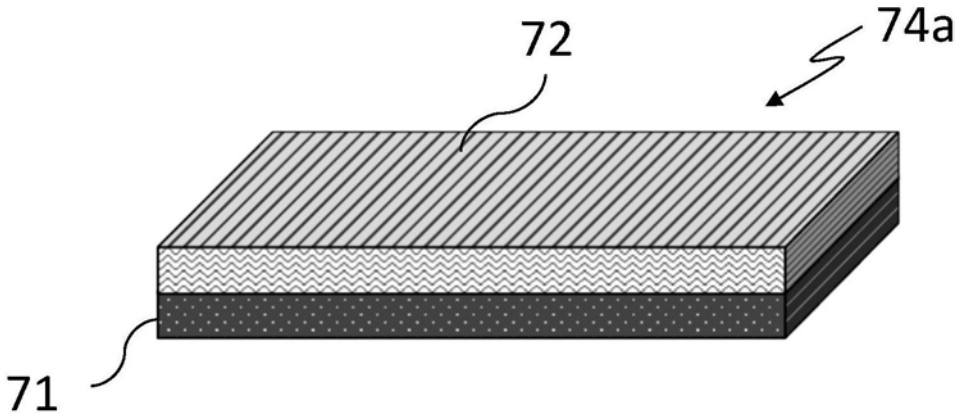


图38A

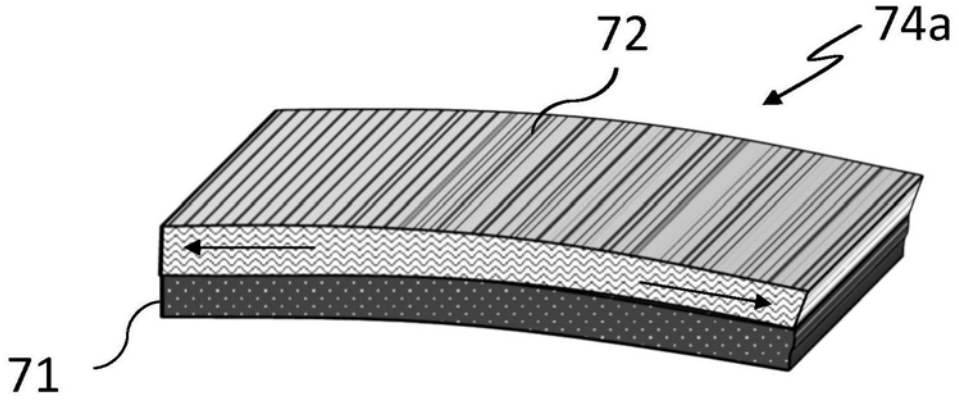


图38B

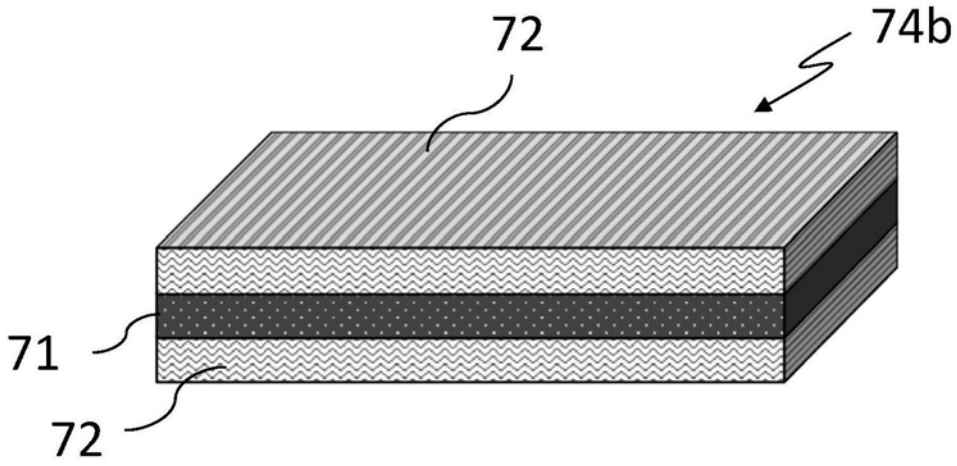


图39A

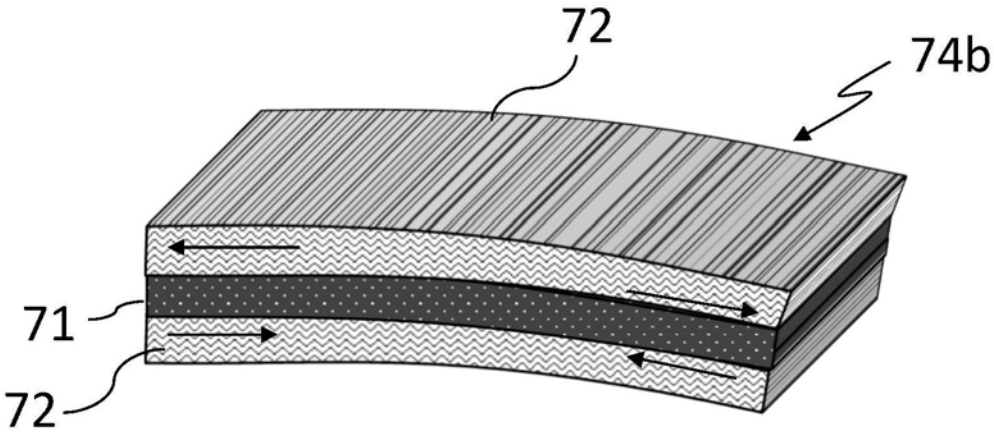


图39B

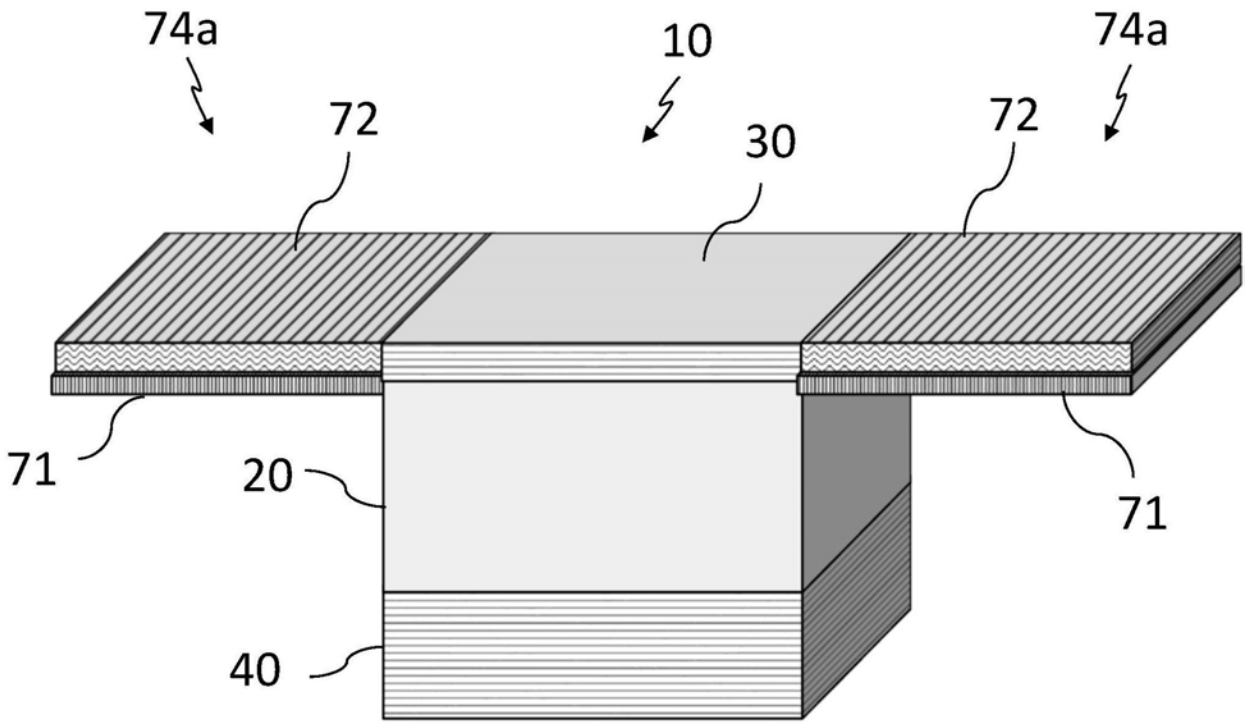


图40

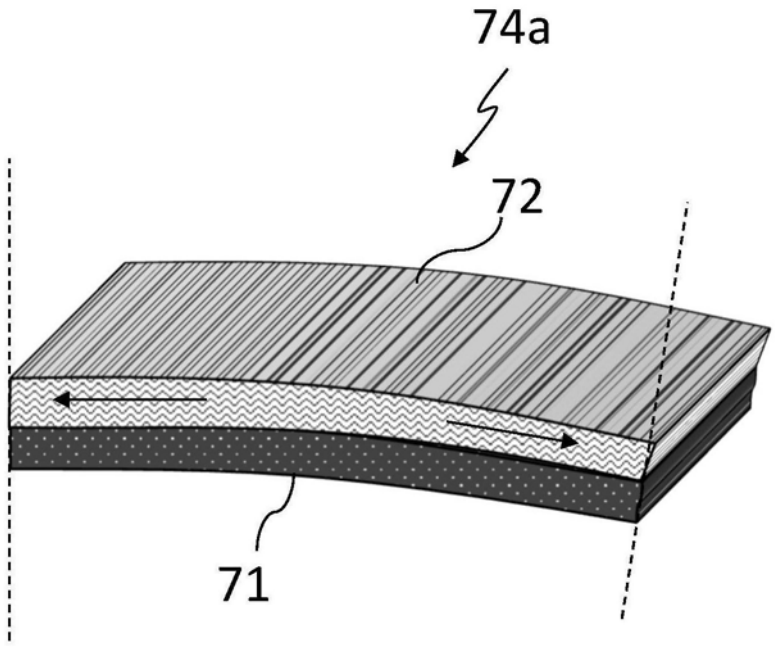


图41A

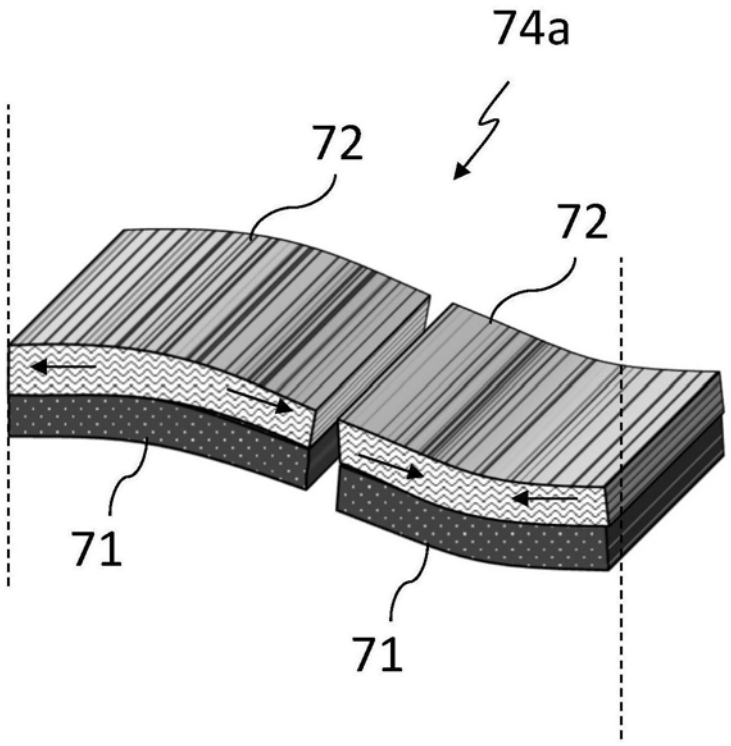


图41B

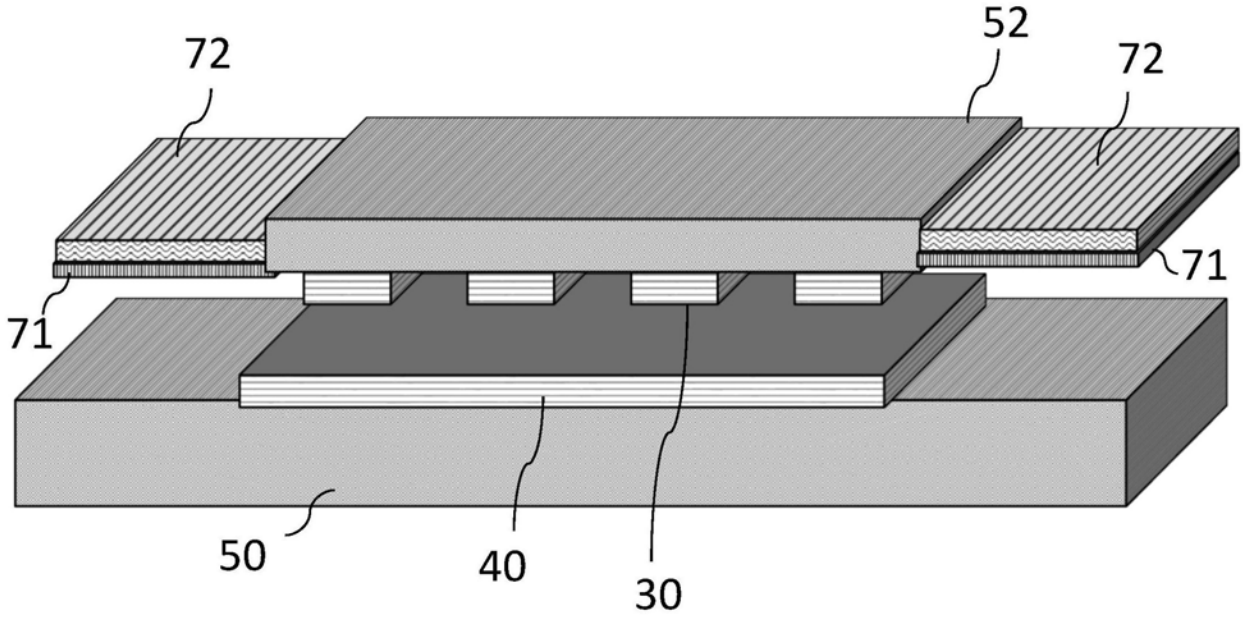


图42

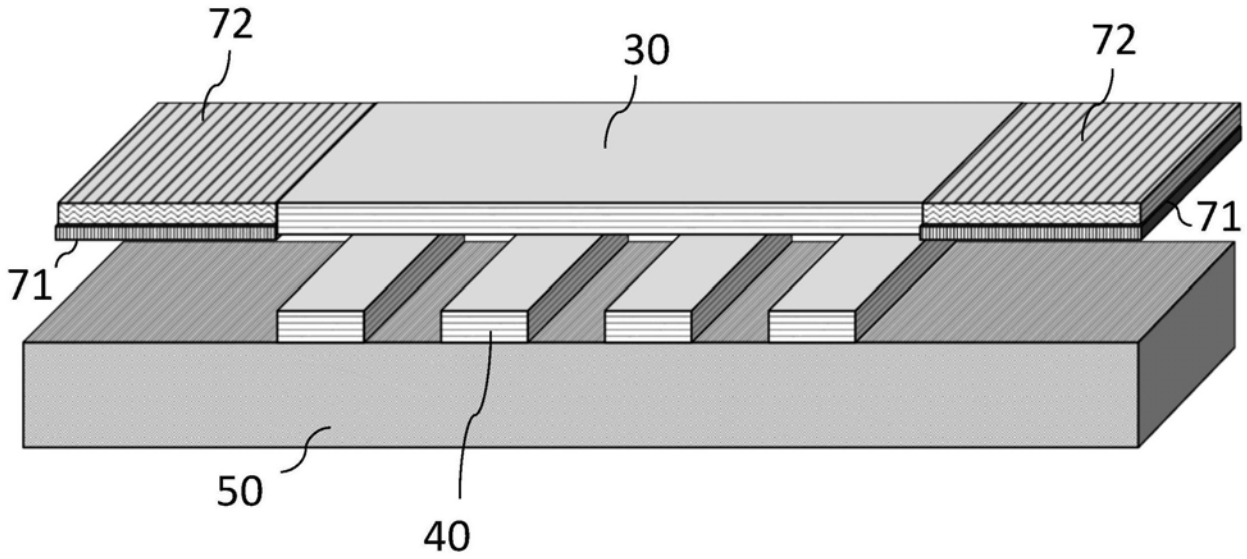


图43

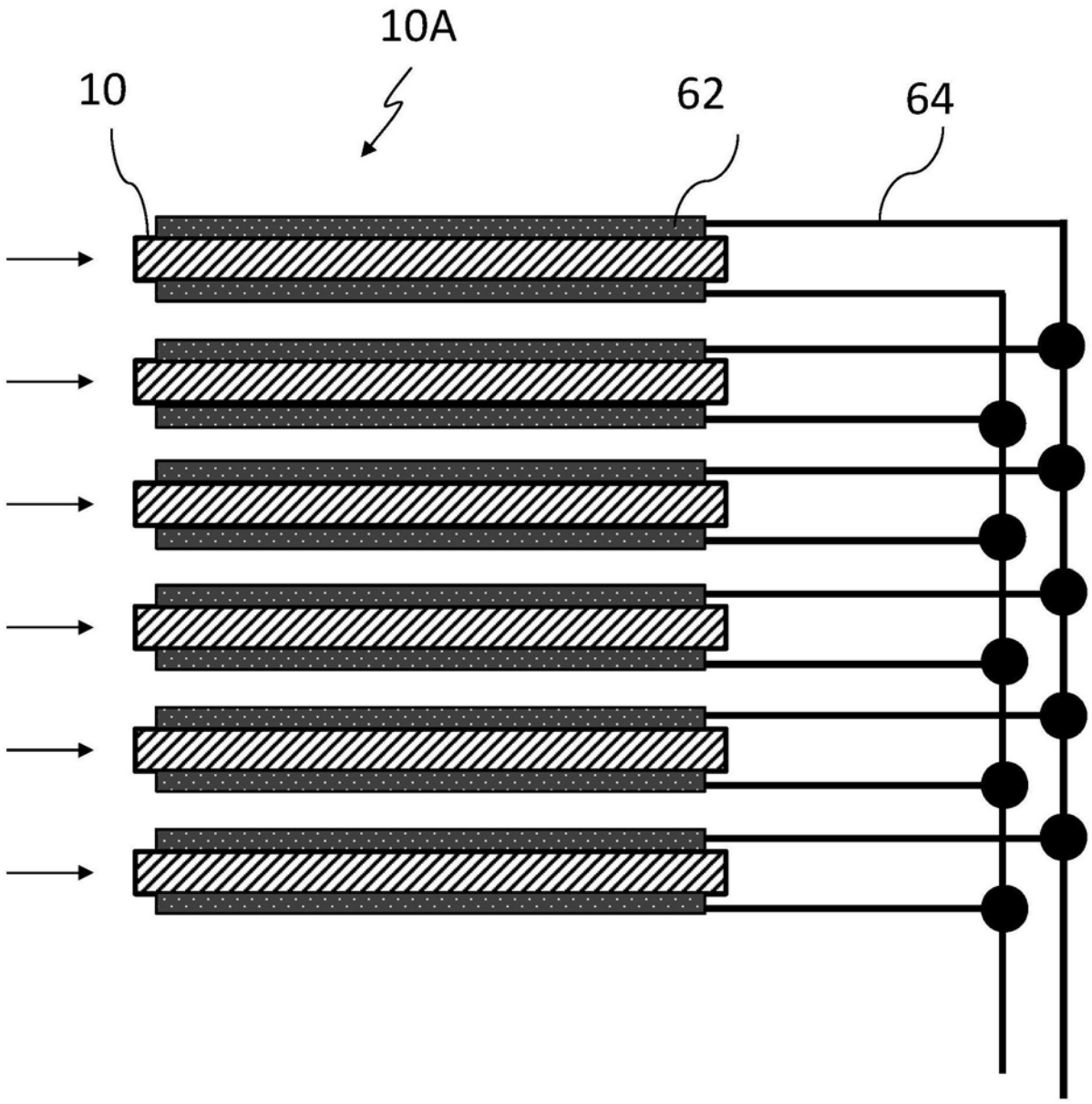


图44

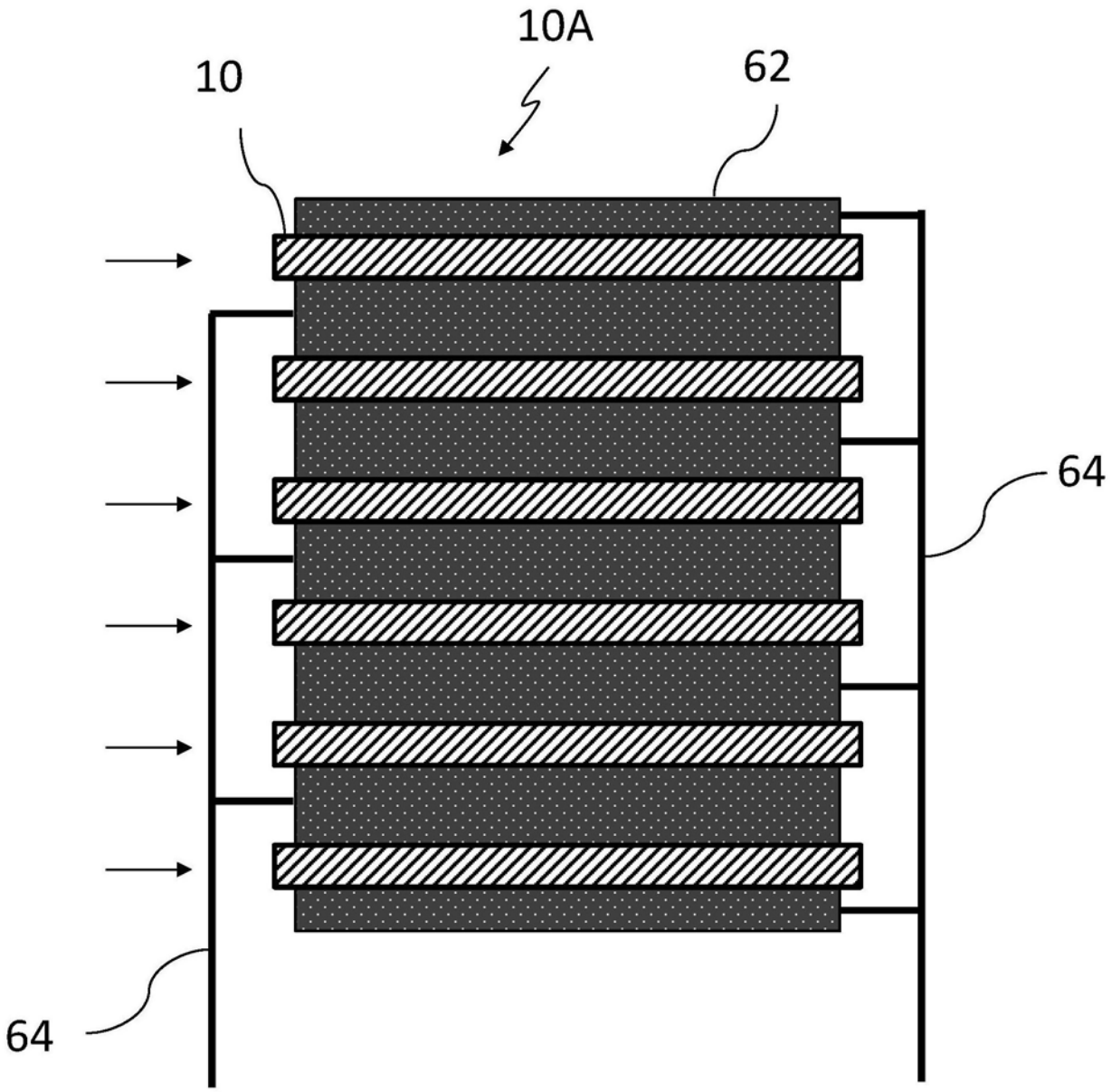


图45

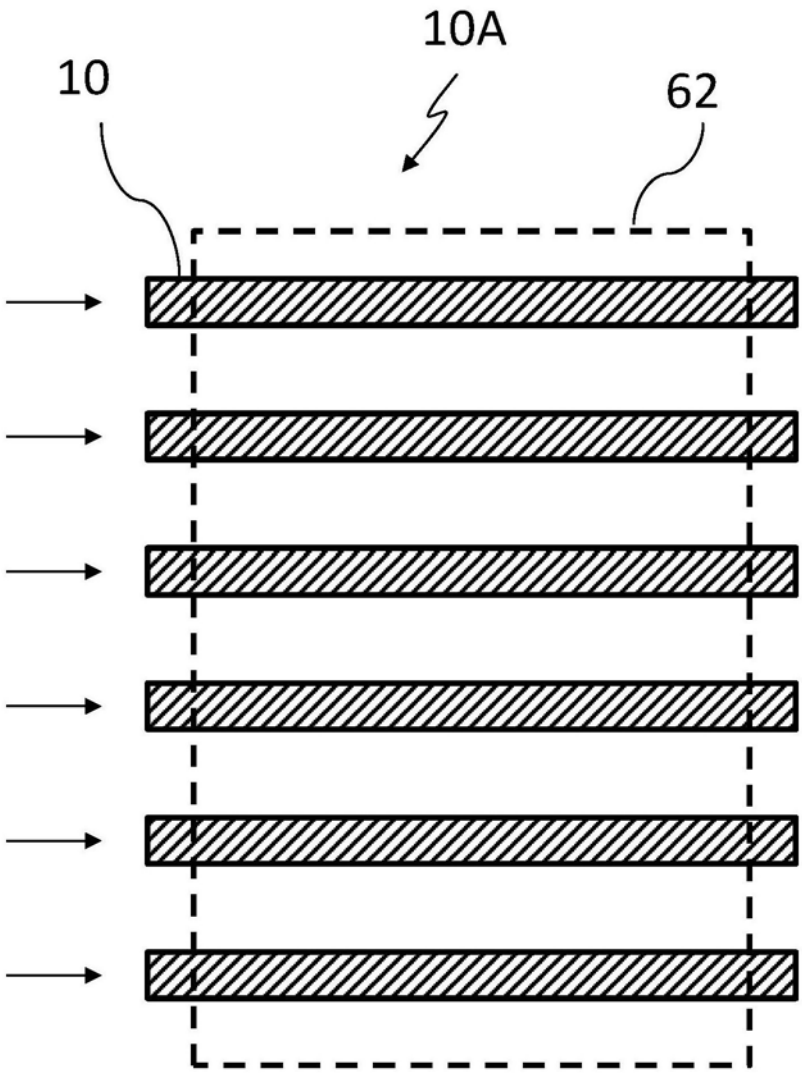


图46

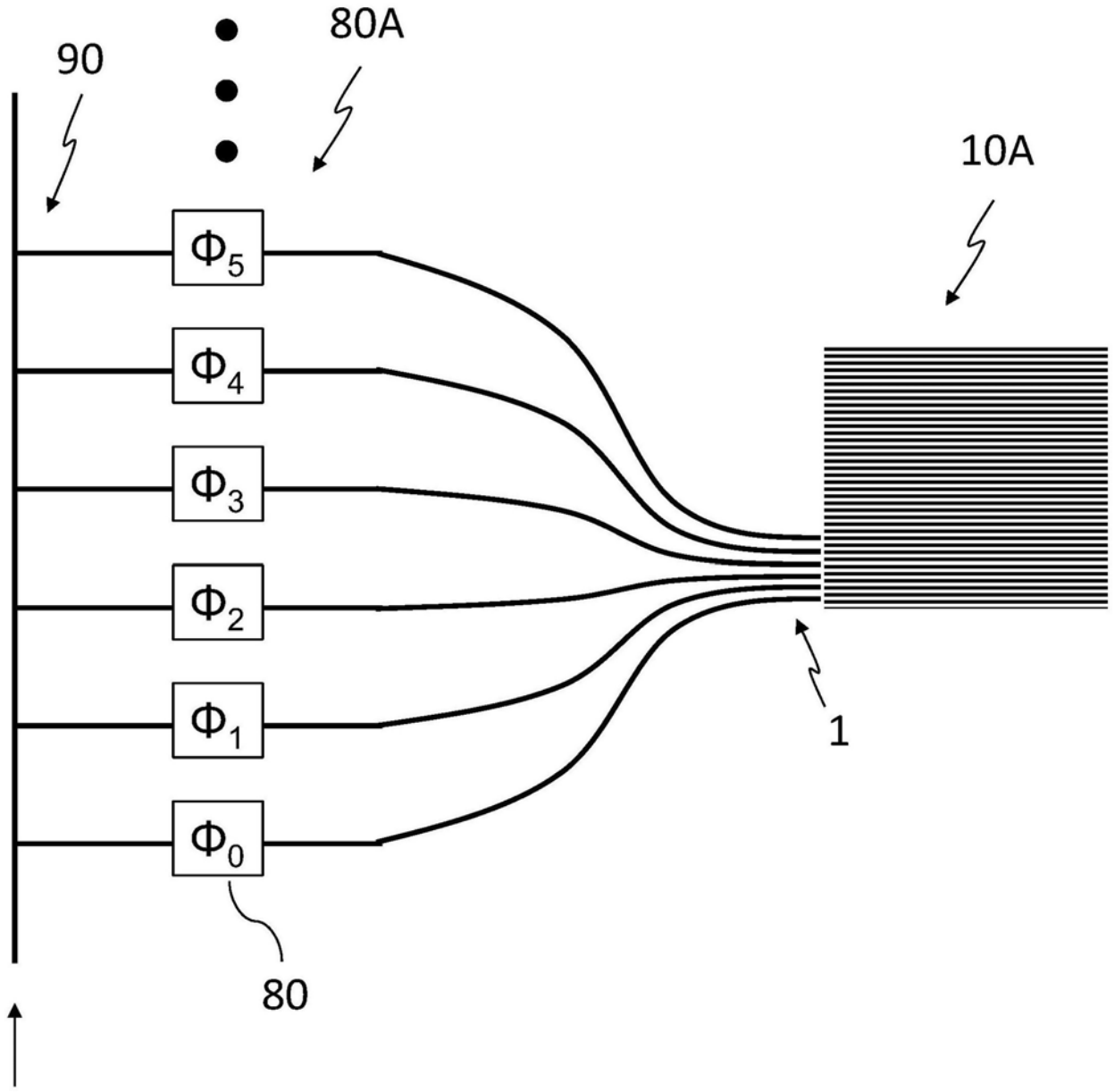


图47

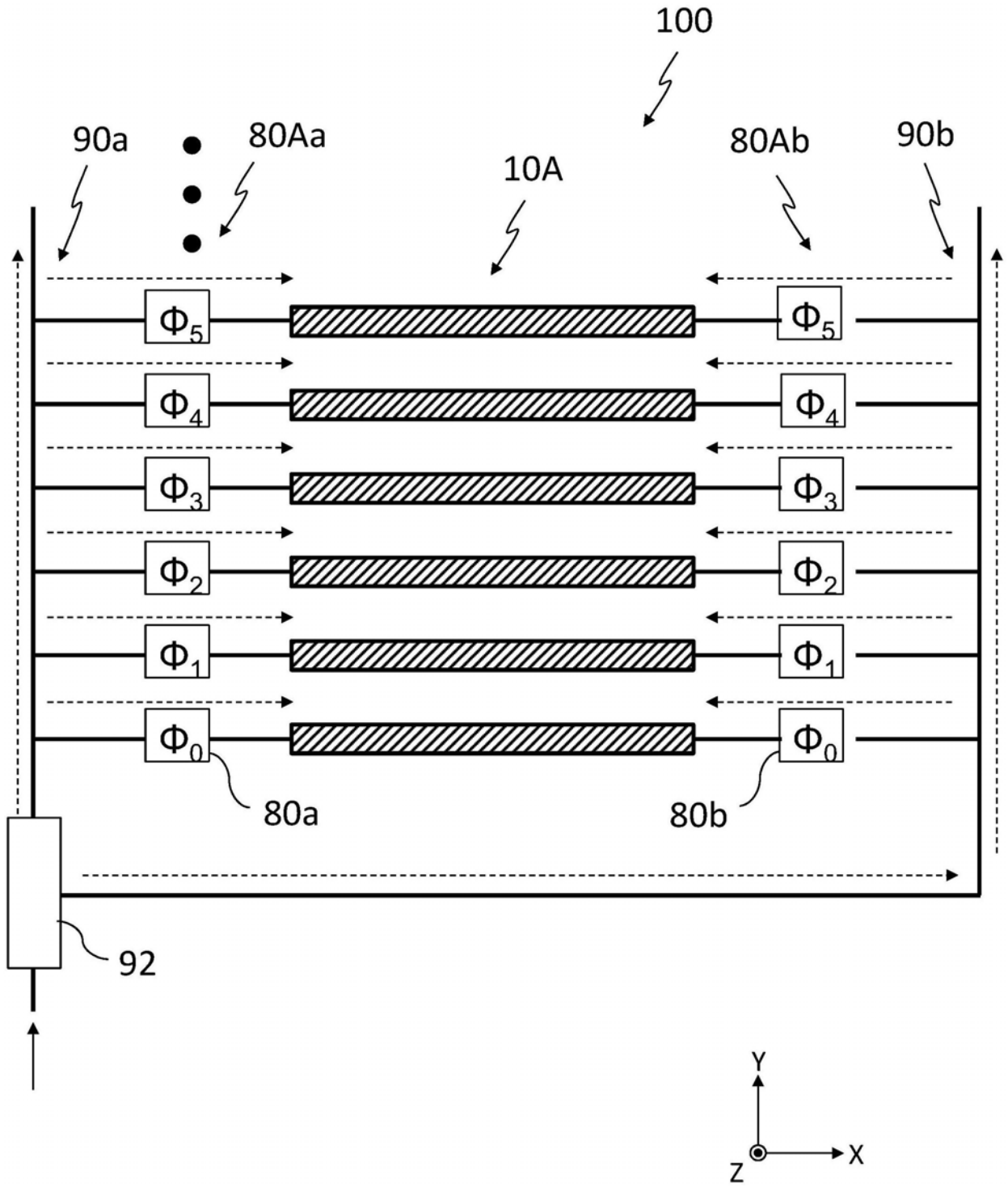


图48

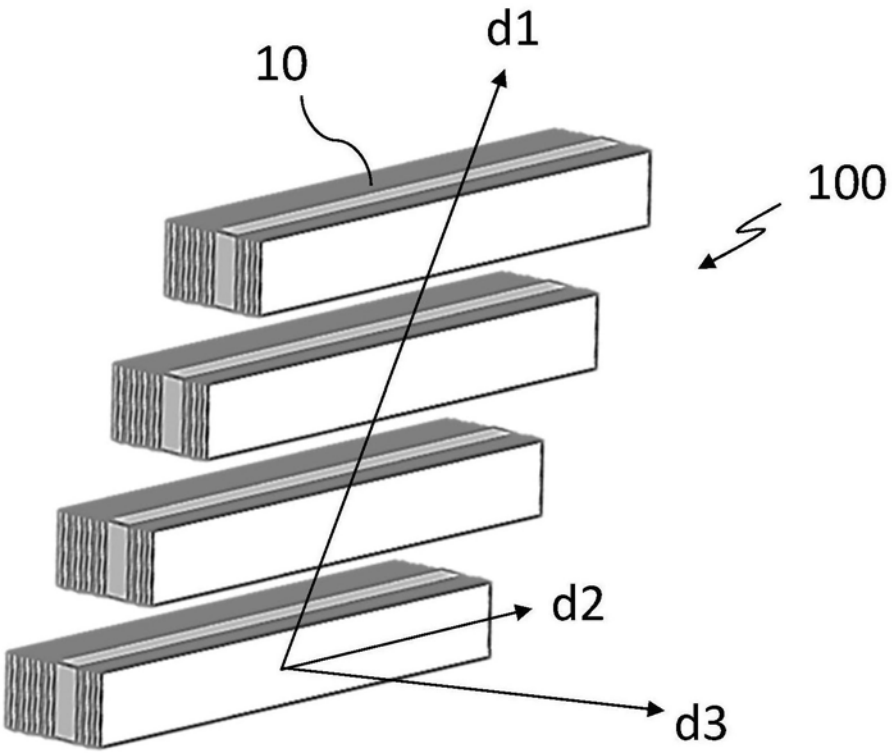


图49A

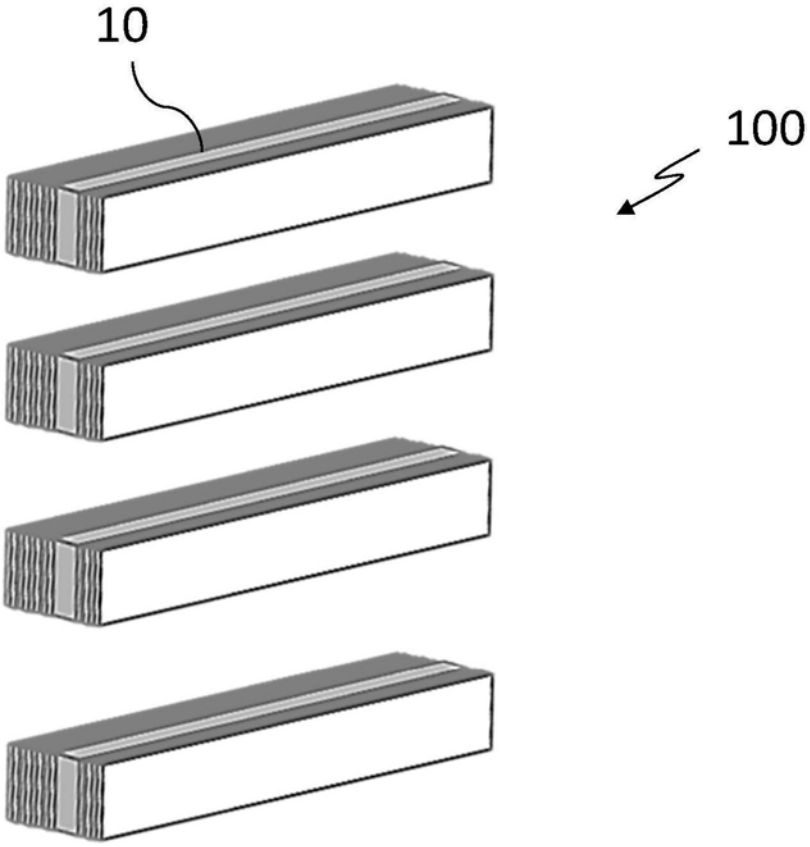


图49B

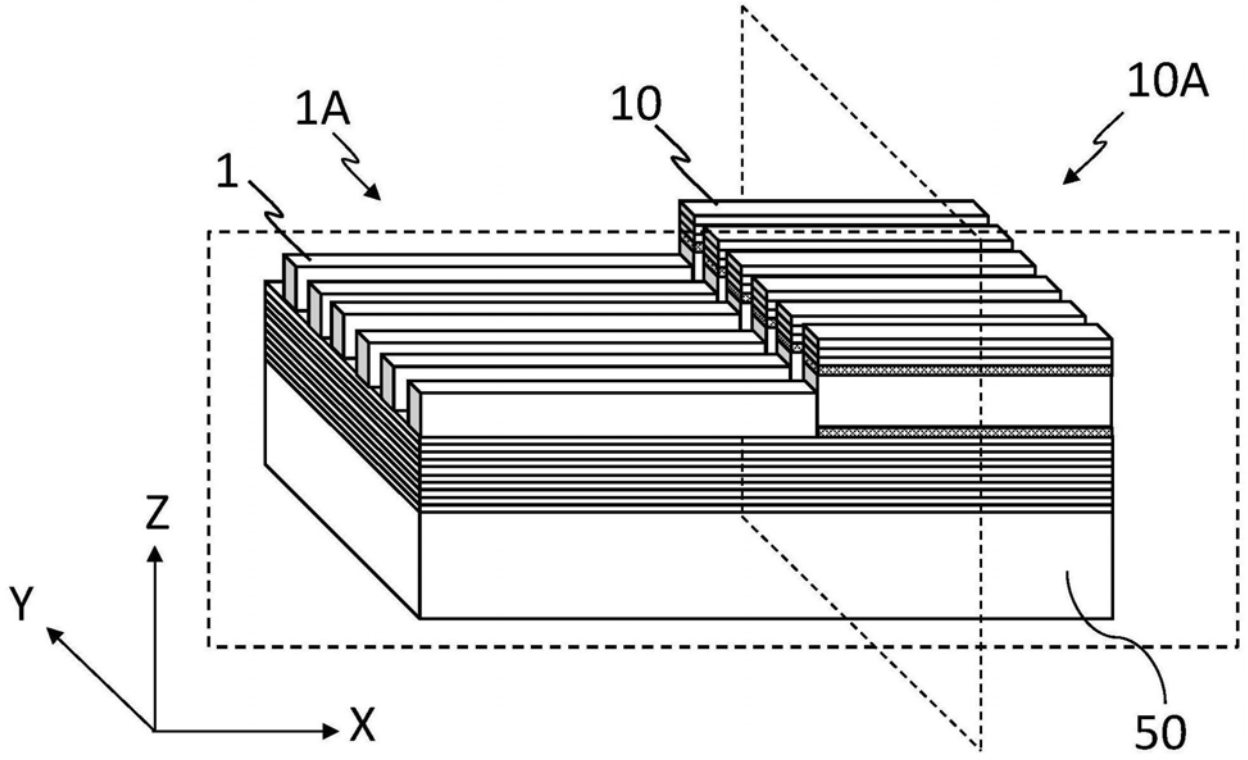


图50A

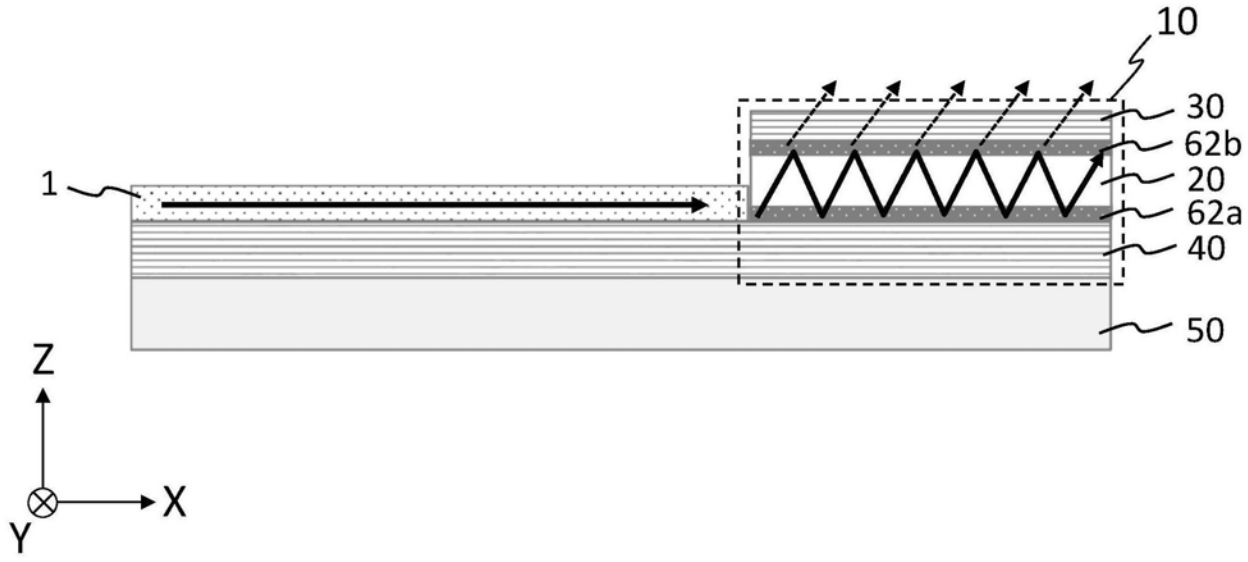


图50B

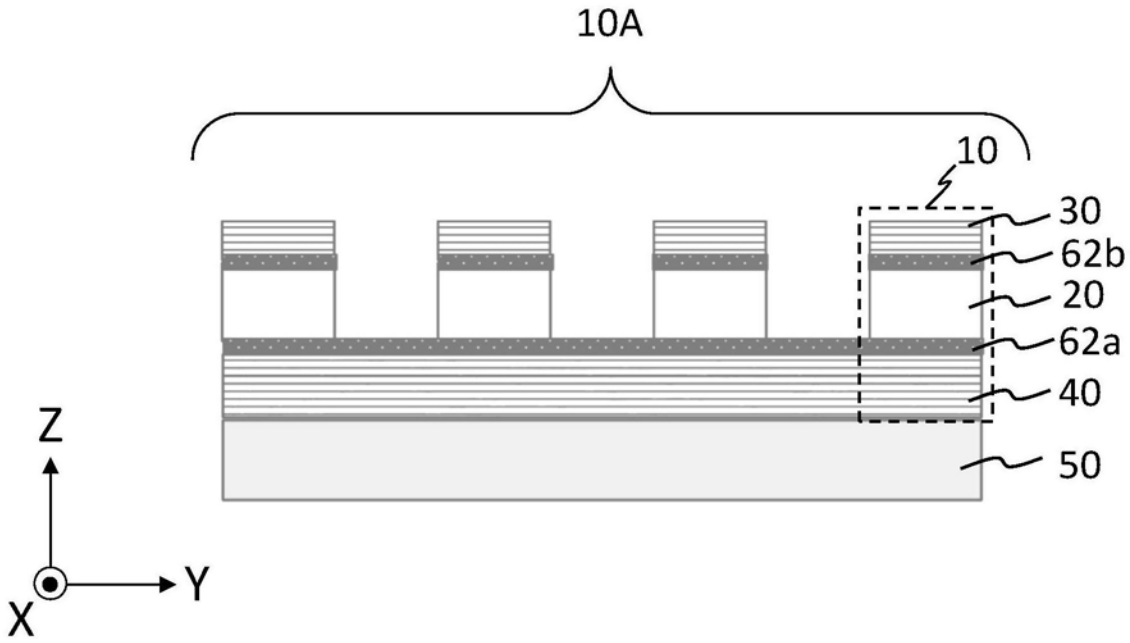


图50C

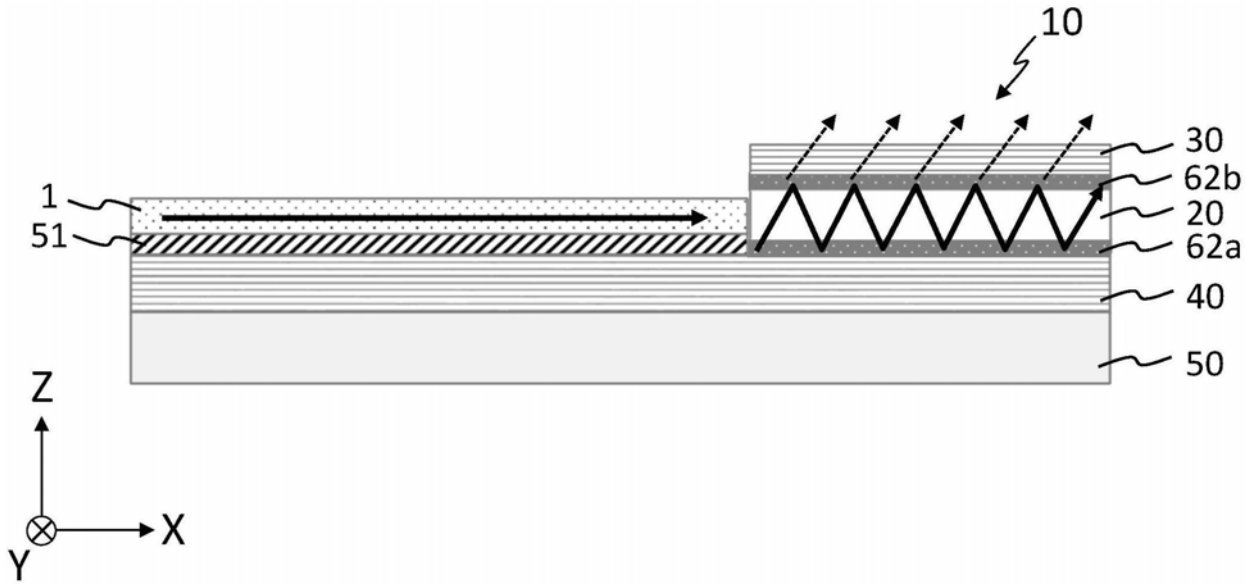


图51A

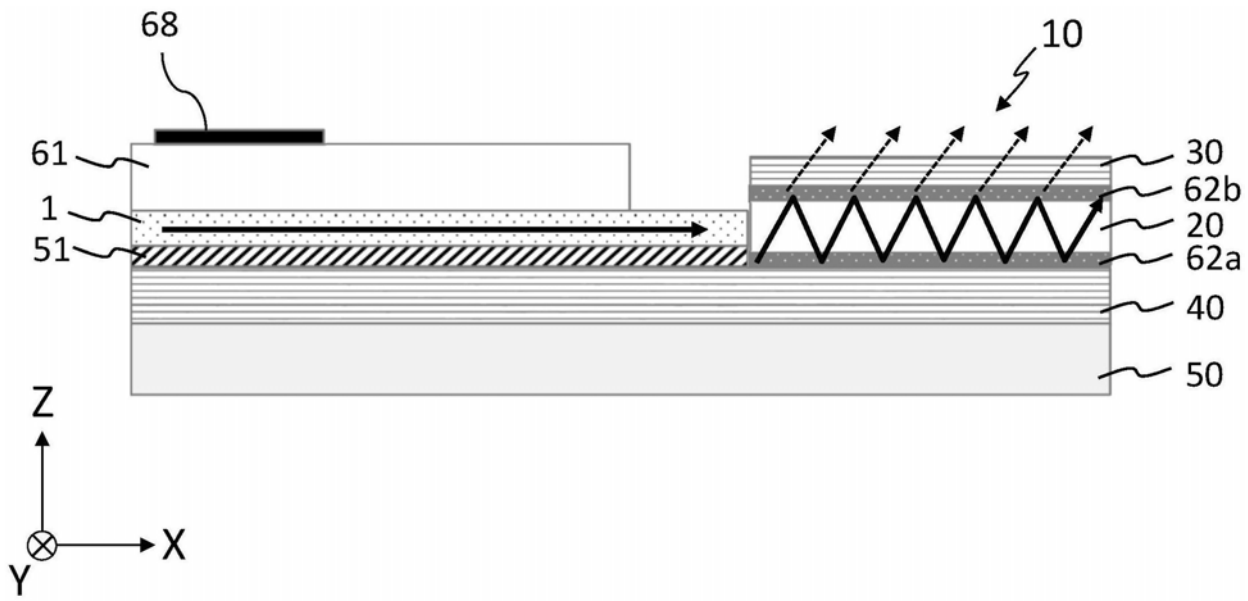

68
10
61
1
51
30
62b
20
62a
40
50
Z
X
Y

图51B

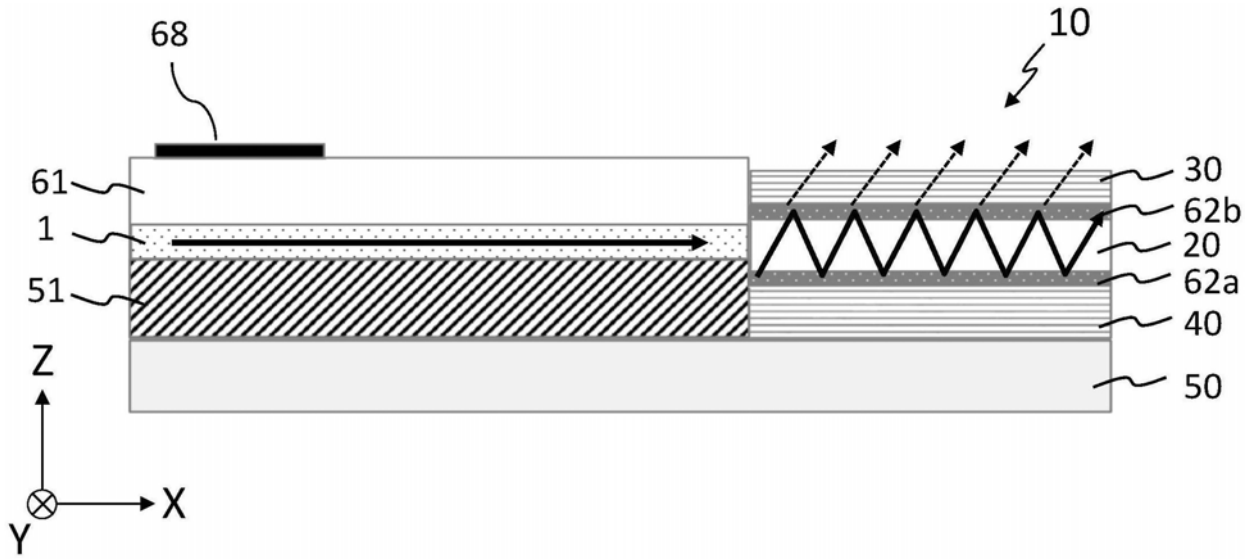

68
10
61
1
51
30
62b
20
62a
40
50
Z
X
Y

图52

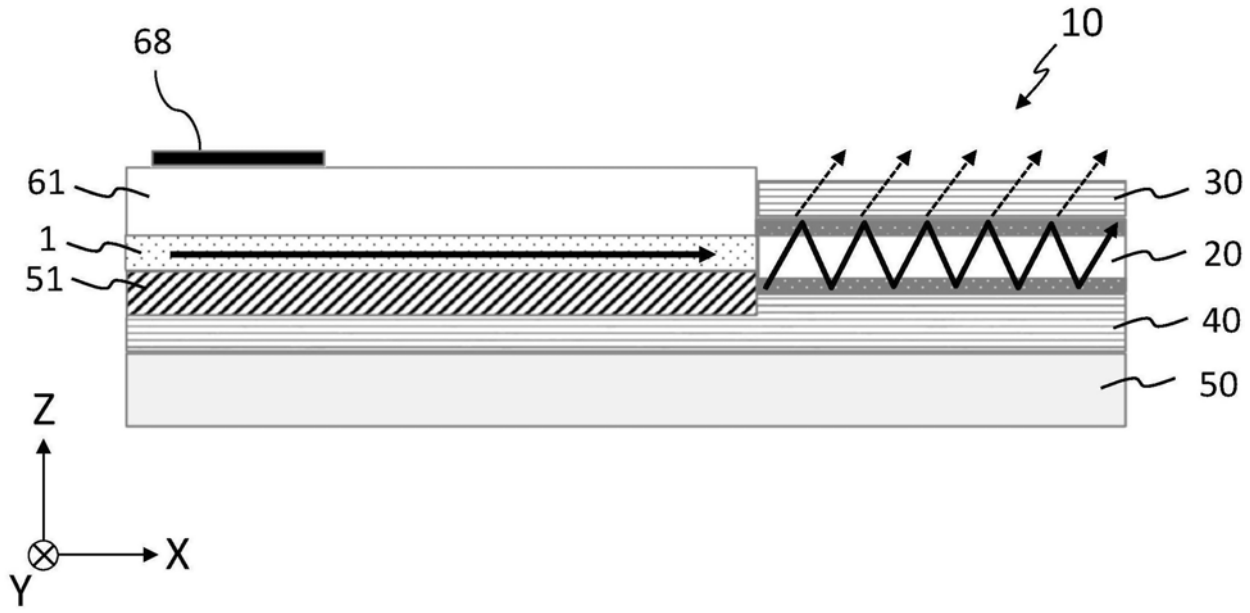


图53

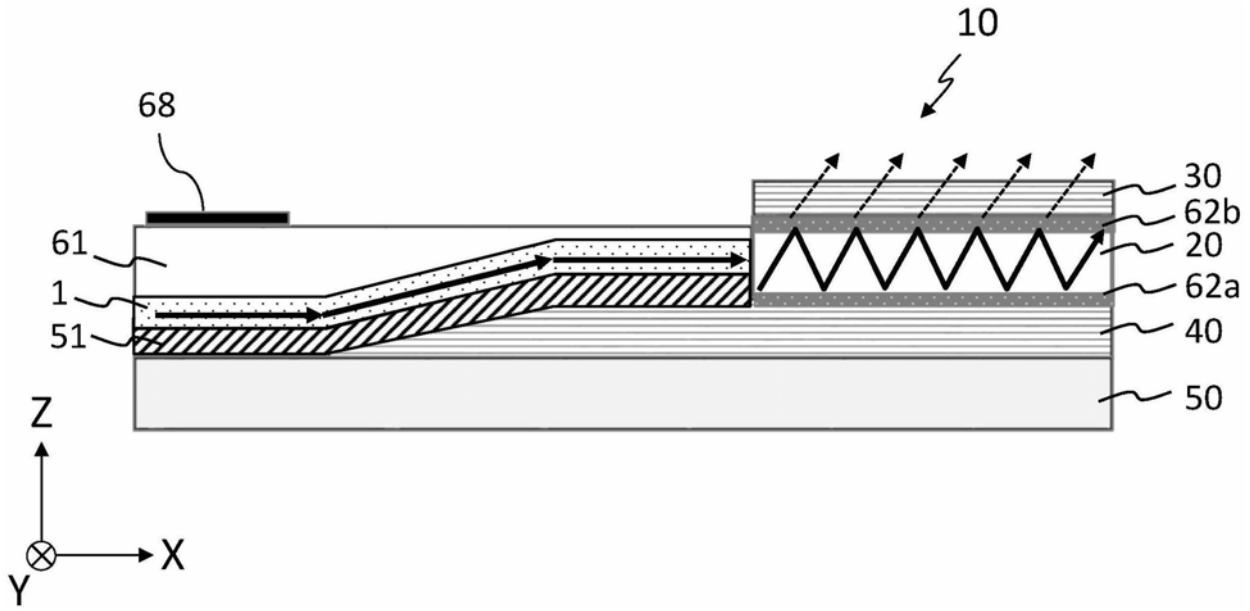


图54A

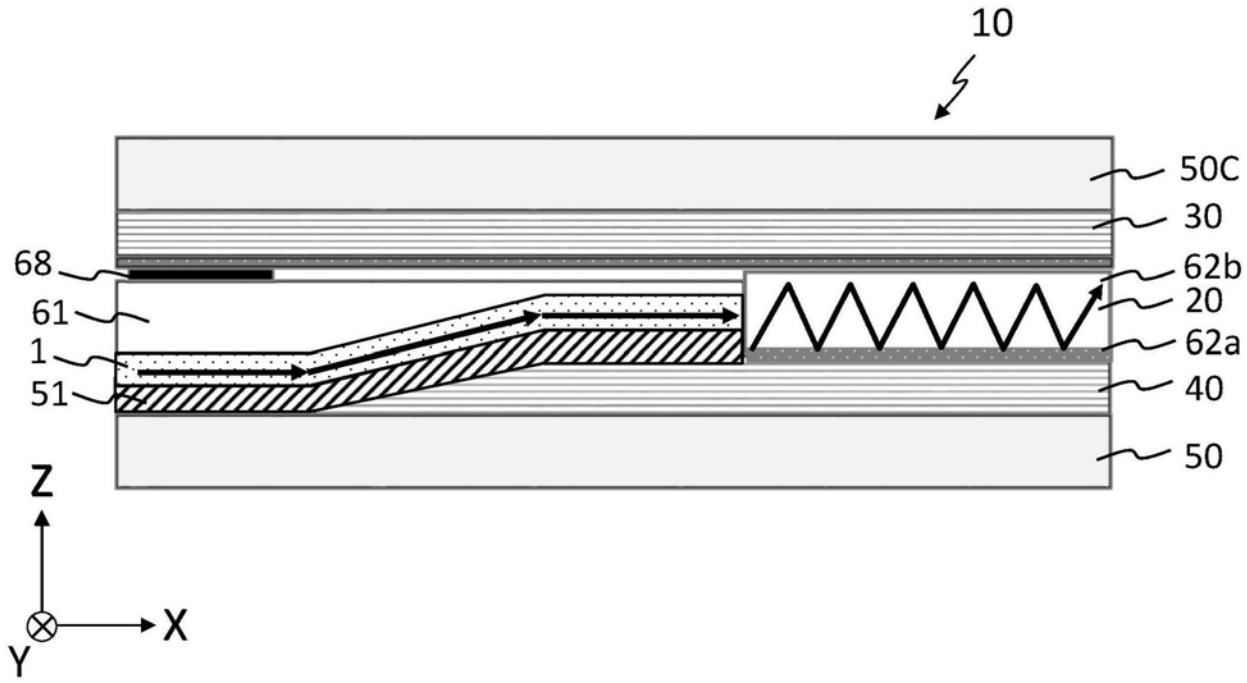

10
50C
30
68
62b
61
20
1
62a
51
40
50
Z
X
Y

图54B

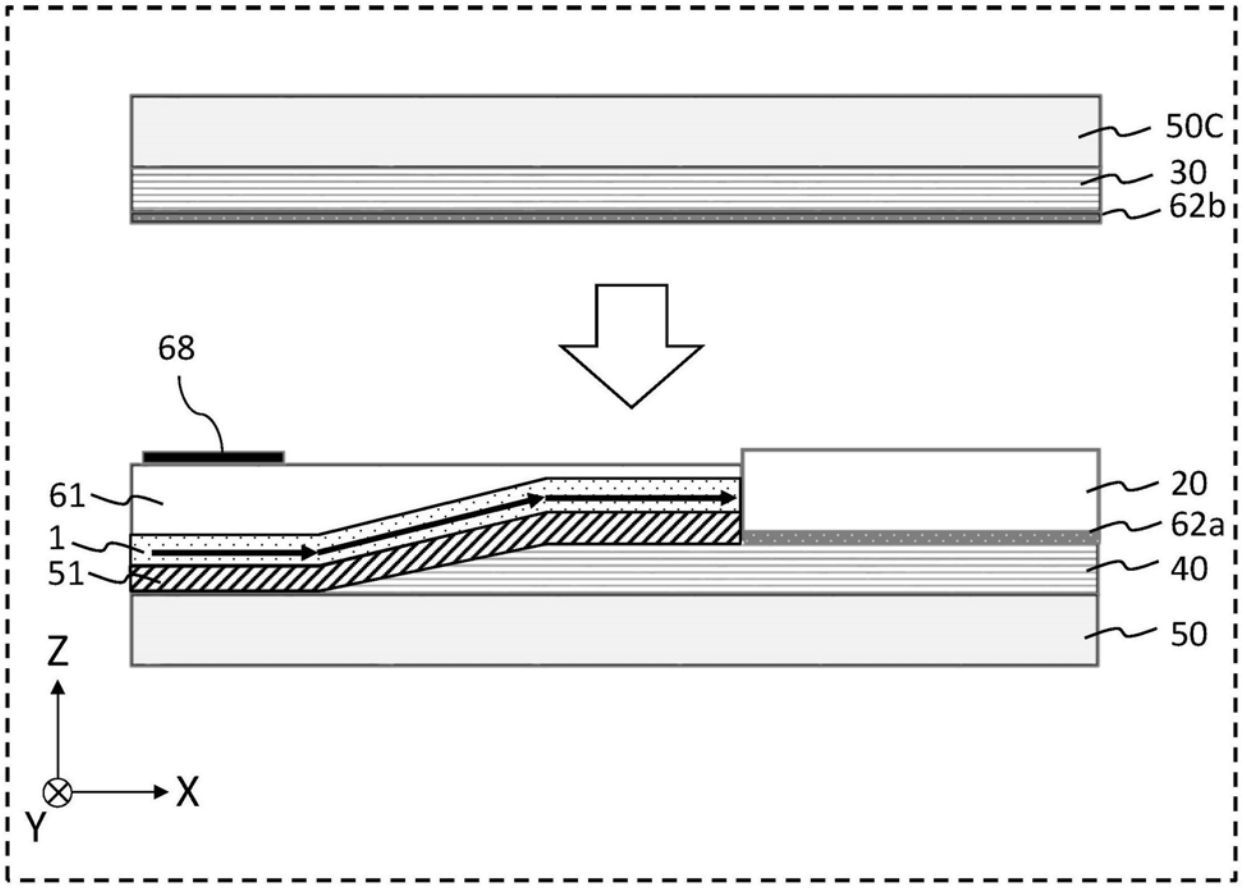

50C
30
62b
68
61
20
1
62a
51
40
50
Z
X
Y

图54C

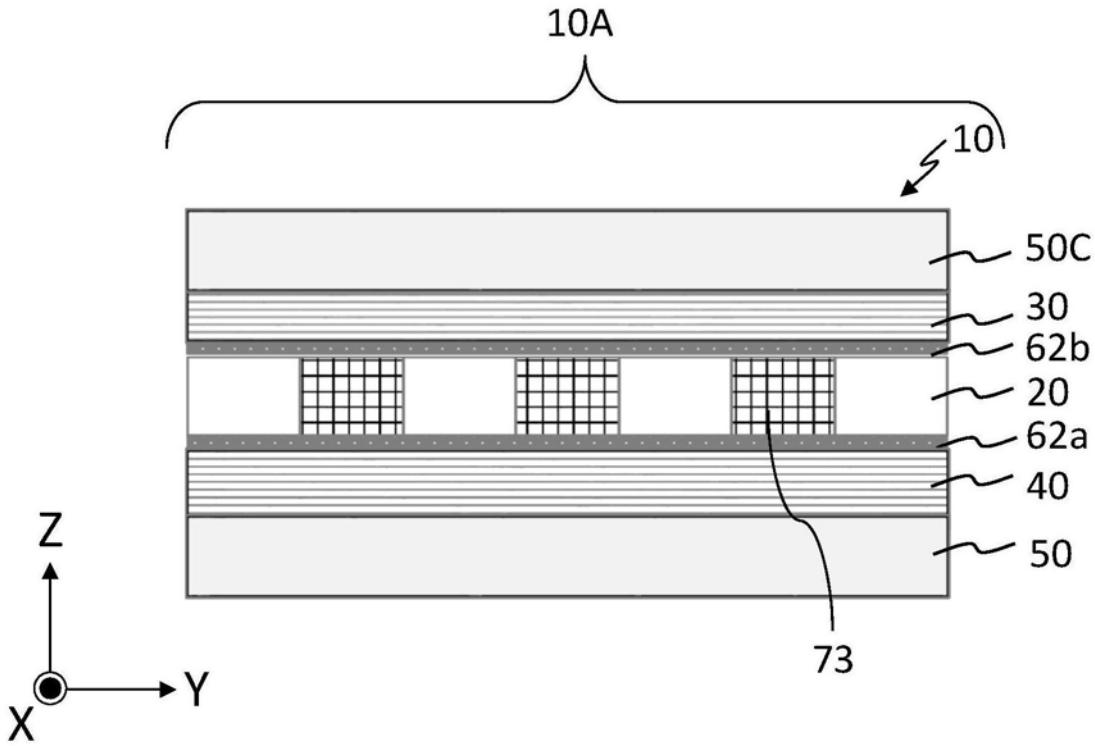


图55

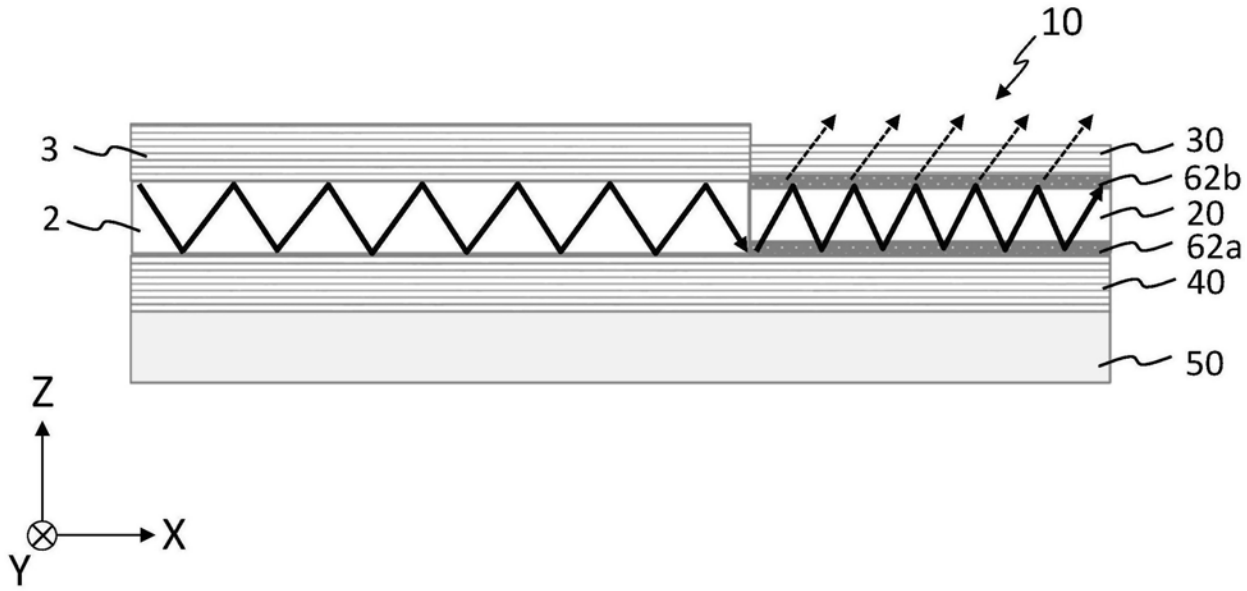


图56

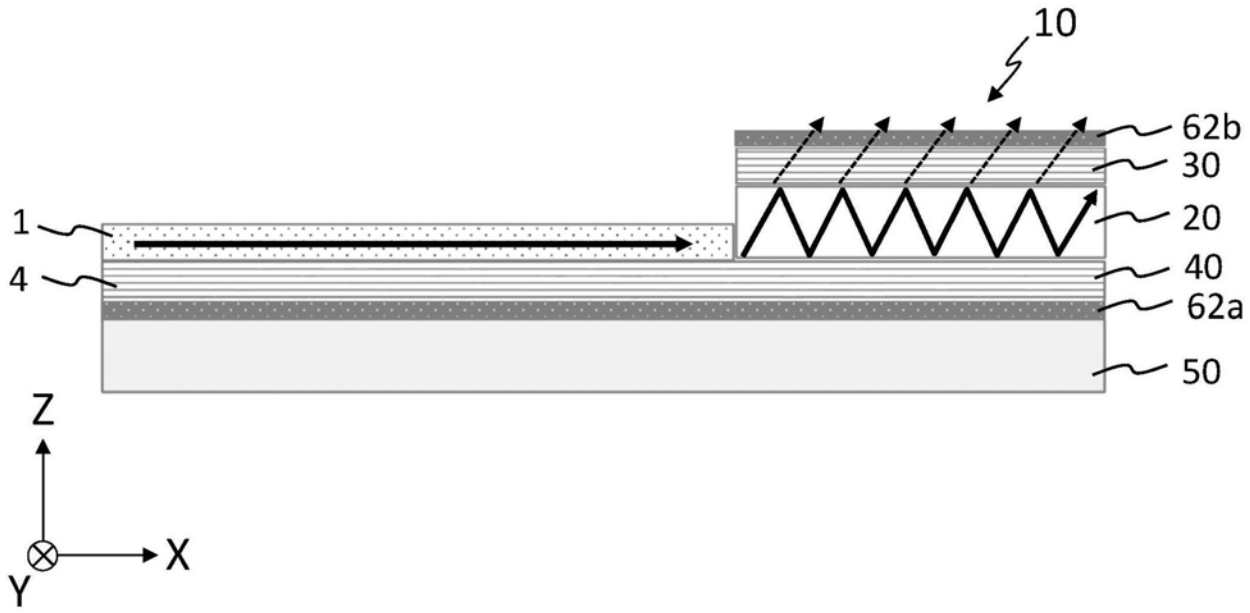

10
62b
30
20
40
62a
50
1
4
Z
X
Y

图57

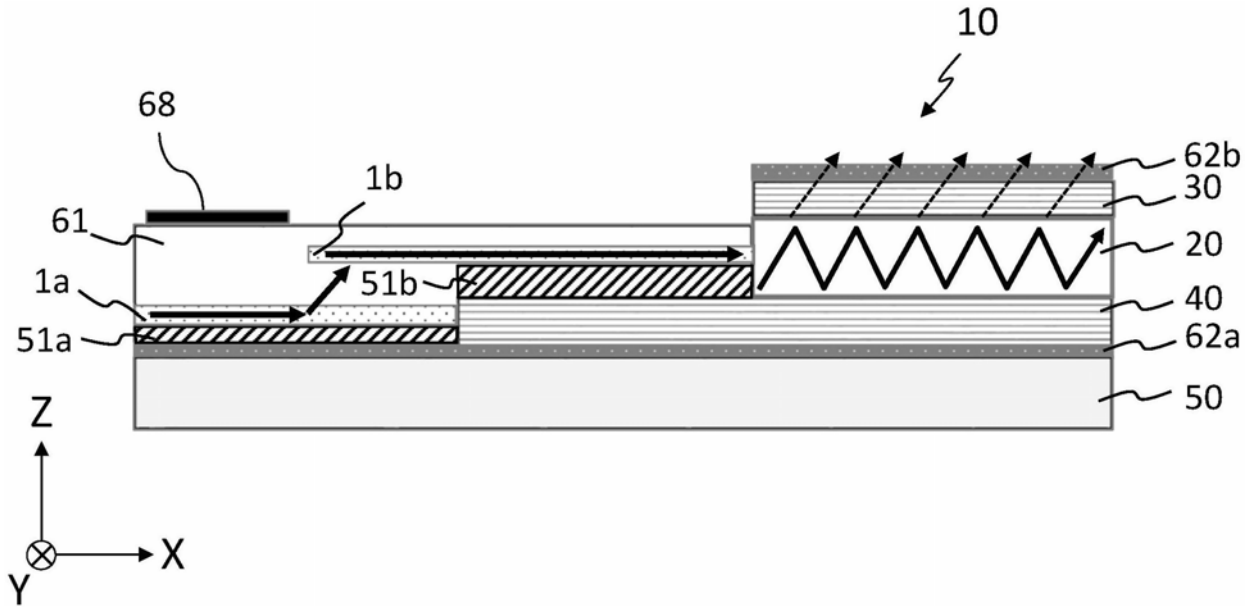

10
68
1b
61
1a
51b
51a
62b
30
20
40
62a
50
Z
X
Y

图58

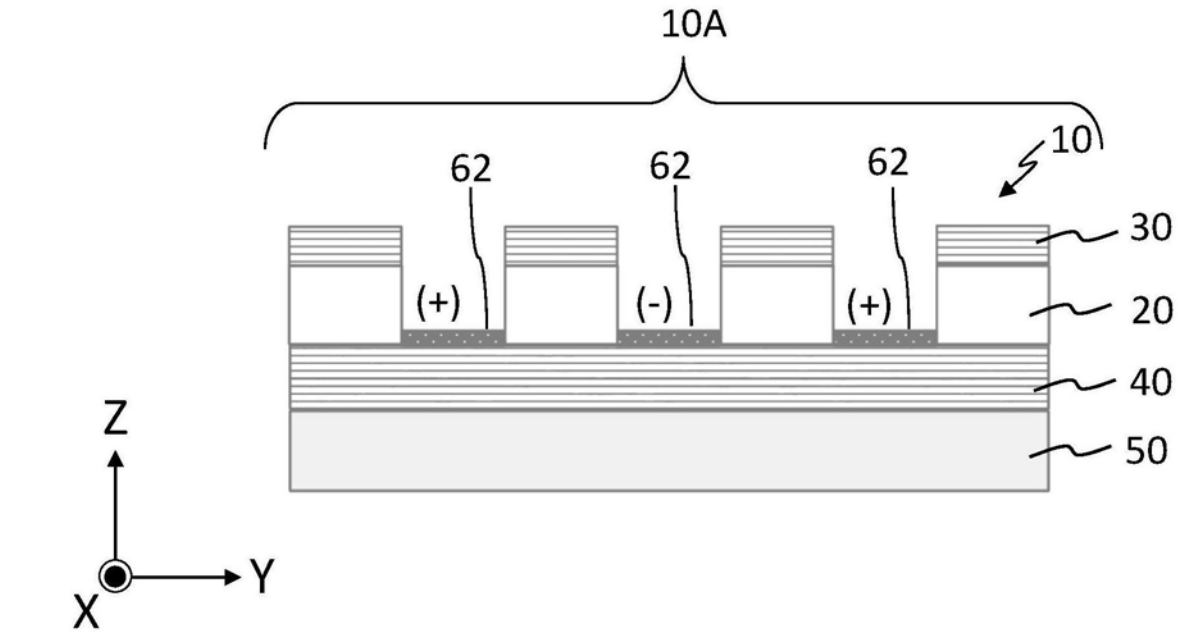


图59

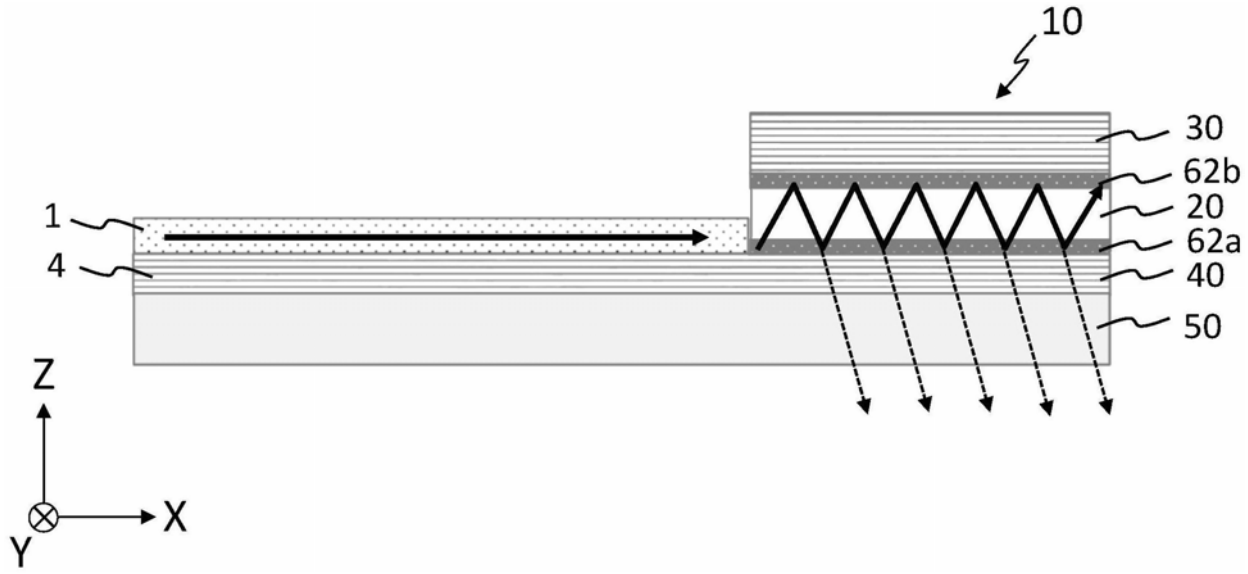


图60

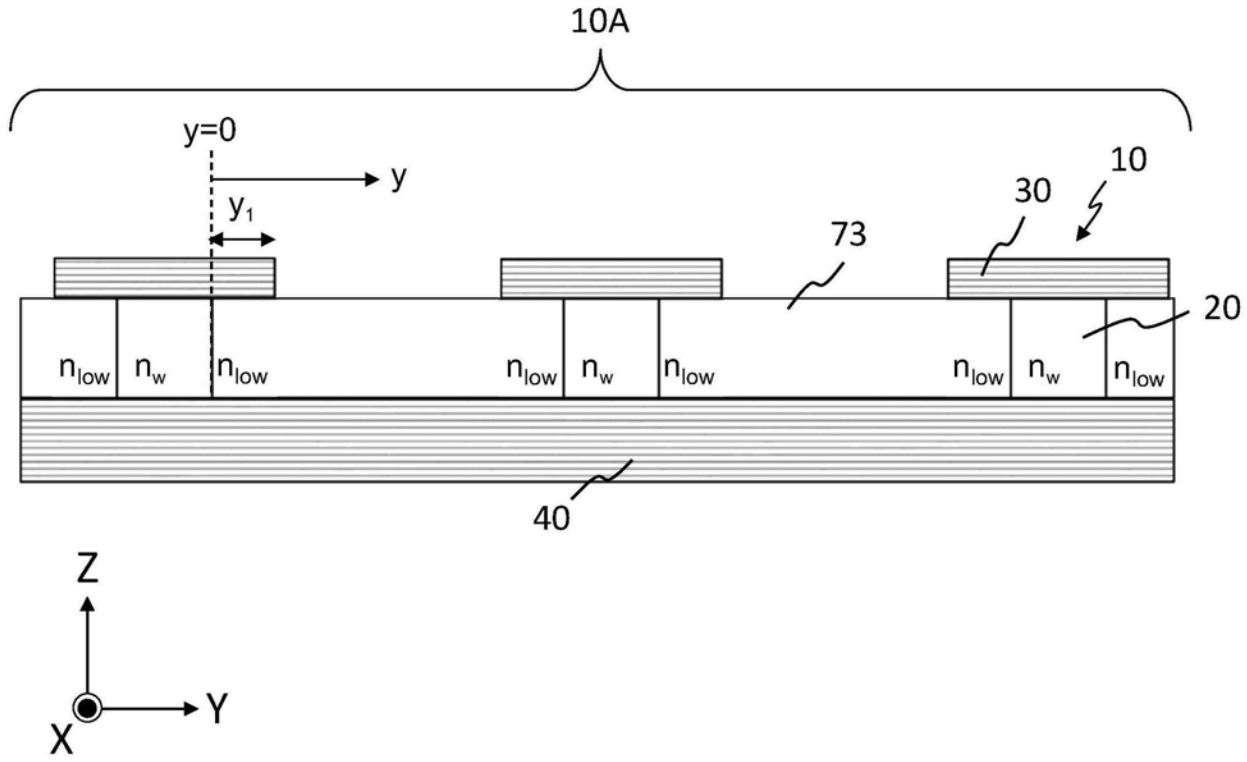

10A
y=0
y
y_1
30
10
73
20
n_{low}
n_w
n_{low}
n_{low}
n_w
n_{low}
n_{low}
n_w
n_{low}
40
Z
Y
X

图61

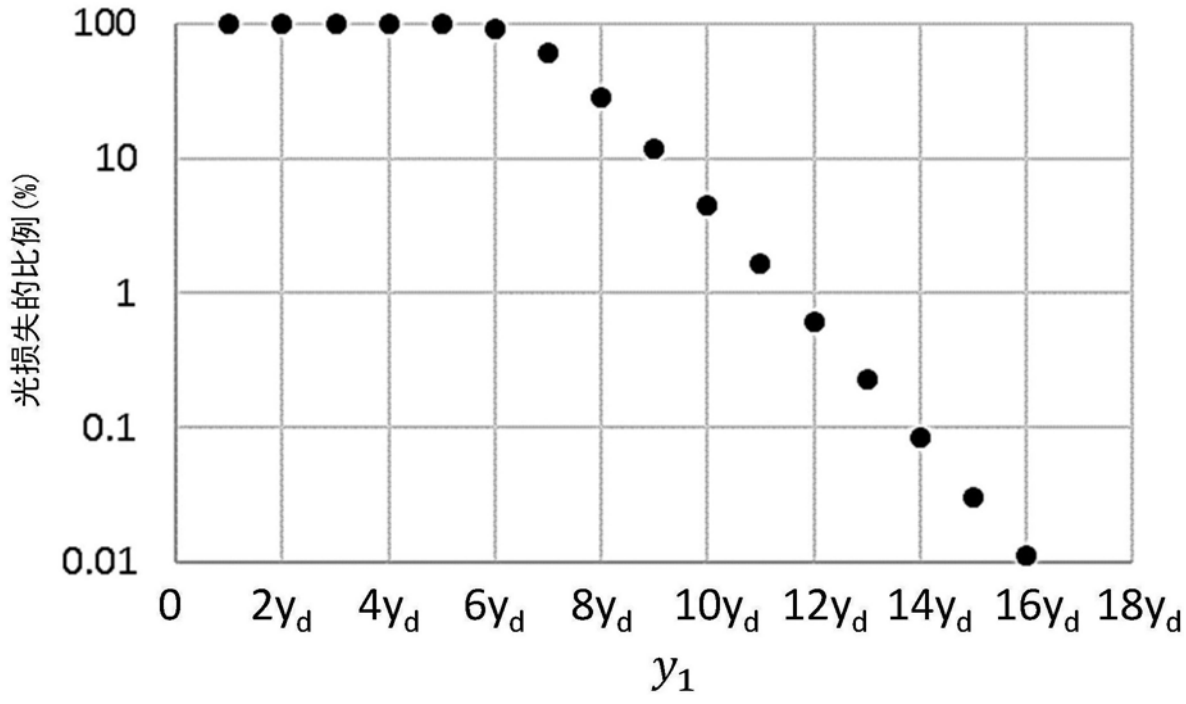

100
10
1
0.1
0.01
光损失的比例(%)
0
$2y_d$
$4y_d$
$6y_d$
$8y_d$
$10y_d$
$12y_d$
$14y_d$
$16y_d$
$18y_d$
y_1

图62

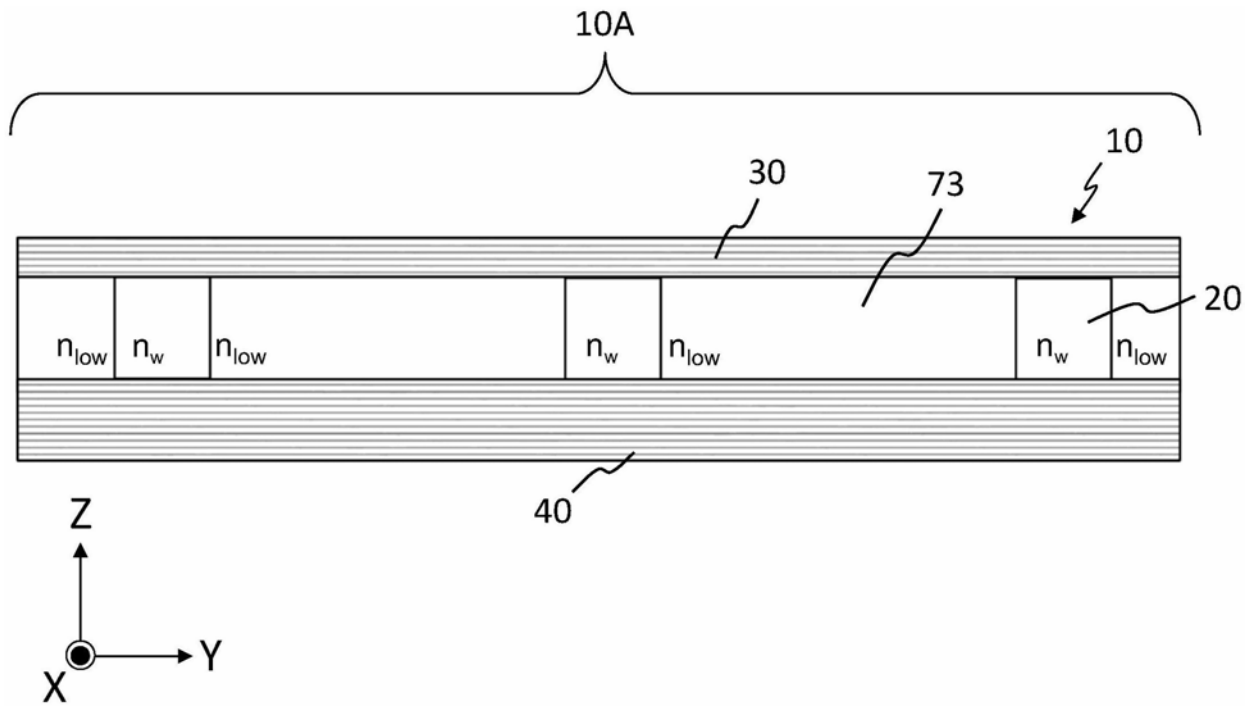

10A
10
30
73
20
n_{low}
n_w
n_{low}
n_w
n_{low}
n_w
n_{low}
40
Z
Y
X

图63

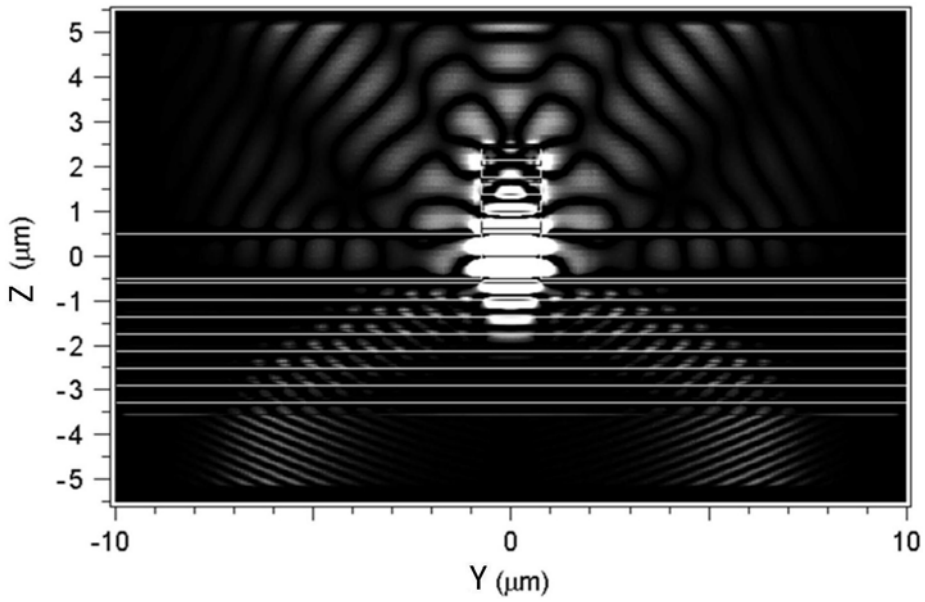

5
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
-5
Z (μm)
-10
0
10
Y (μm)

图64A

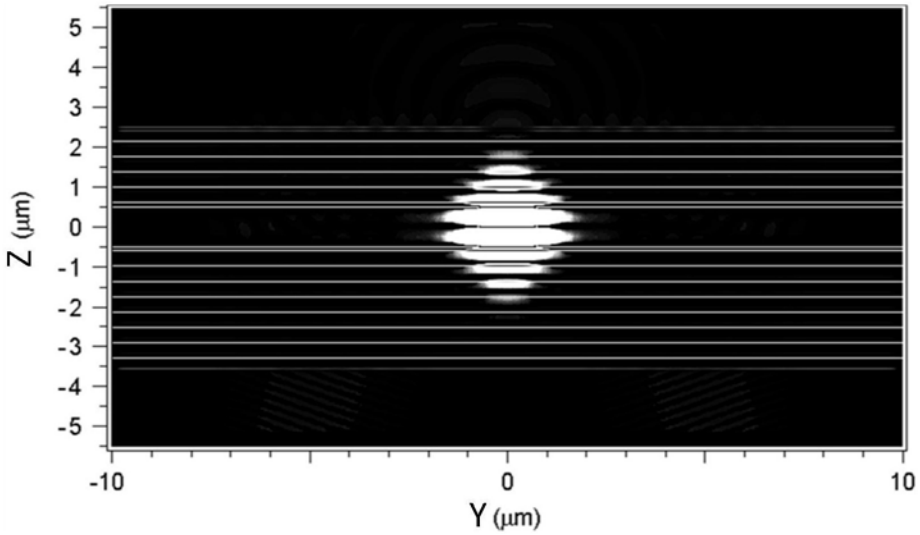

5
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
-5
Z (μm)
-10
0
10
Y (μm)

图64B

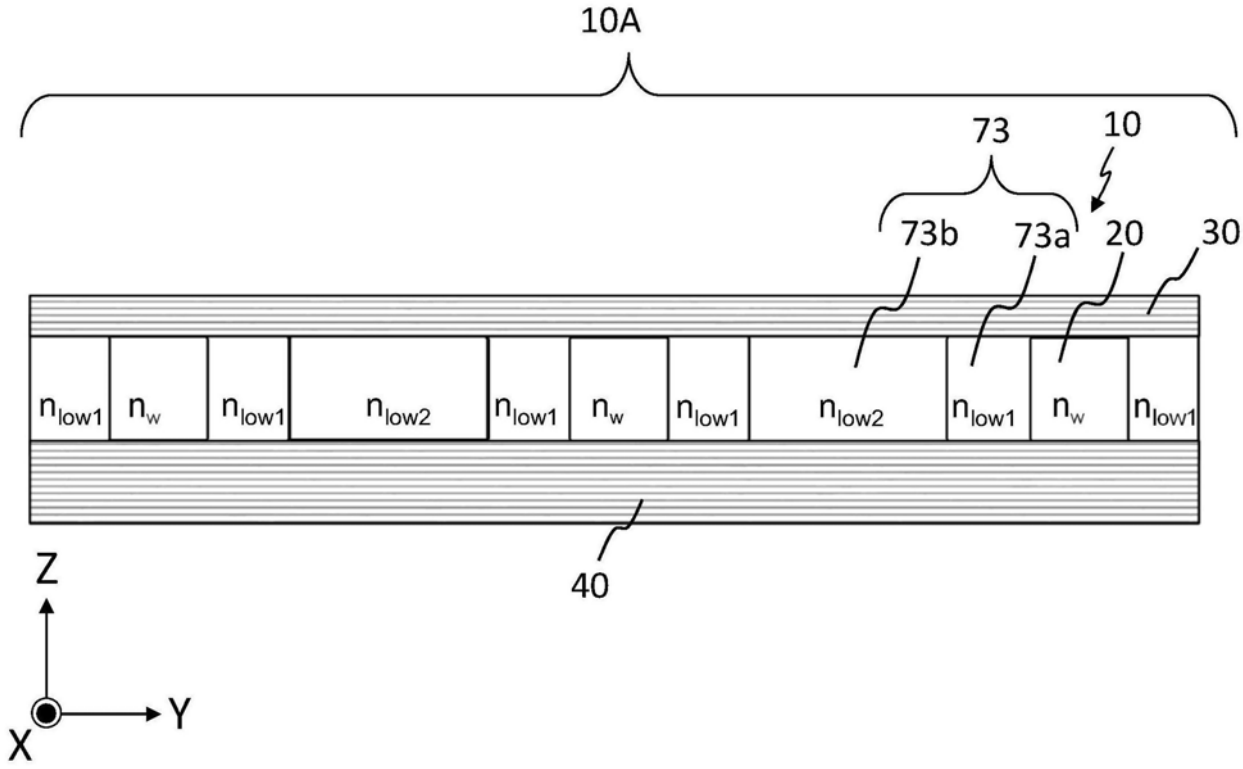

10A
73
10
73b
73a
20
30
n_{low1}
n_w
n_{low1}
n_{low2}
n_{low1}
n_w
n_{low1}
n_{low2}
n_{low1}
n_w
n_{low1}
40
Z
Y
X

图65

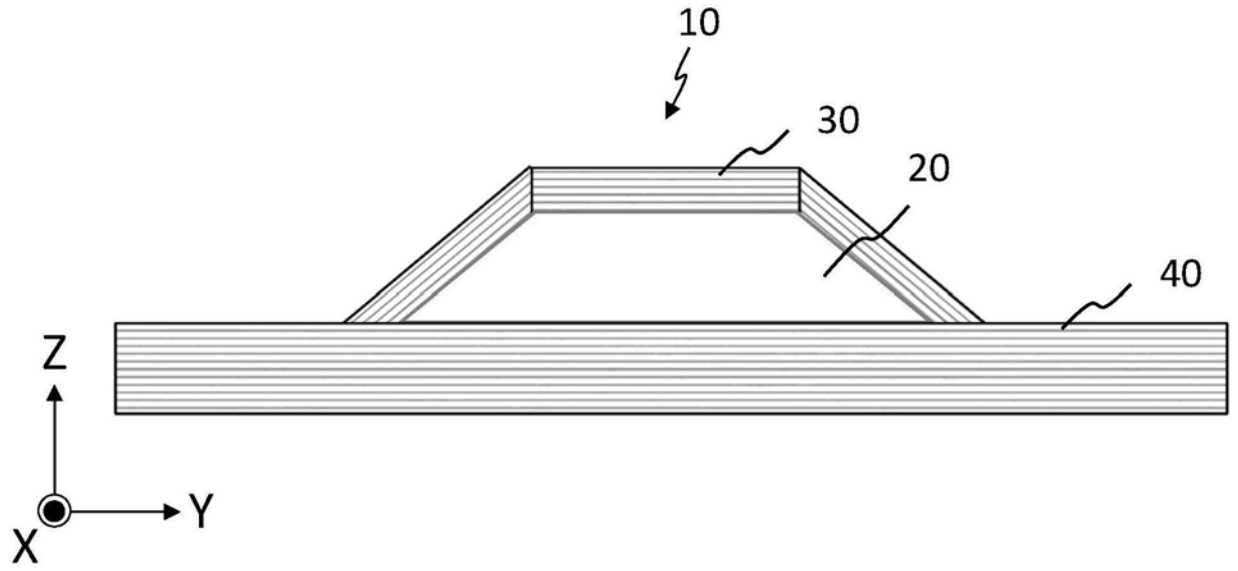


图66

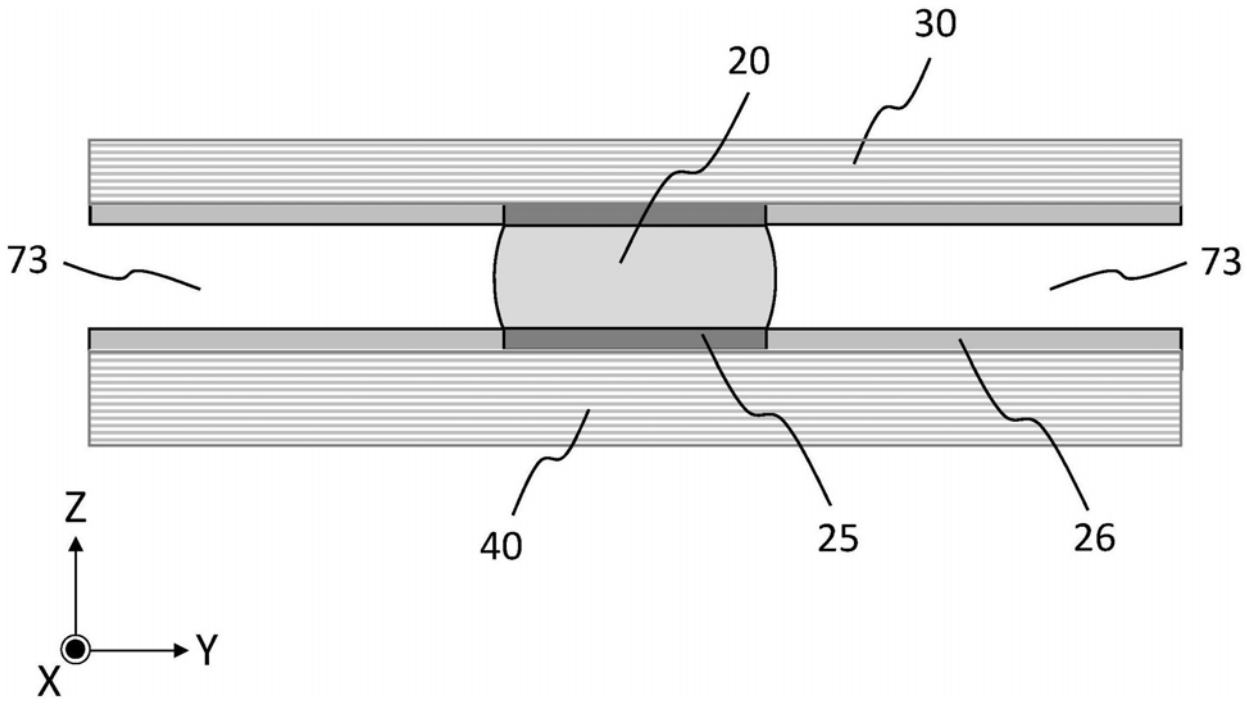


图67

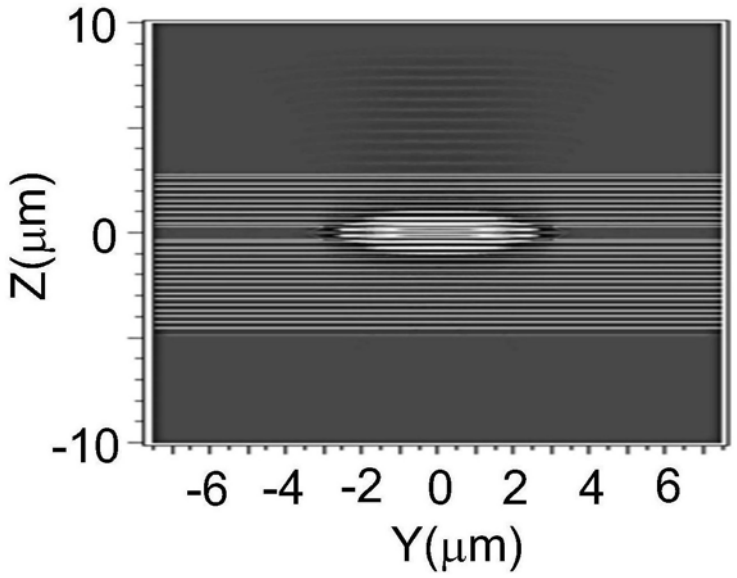


图68A

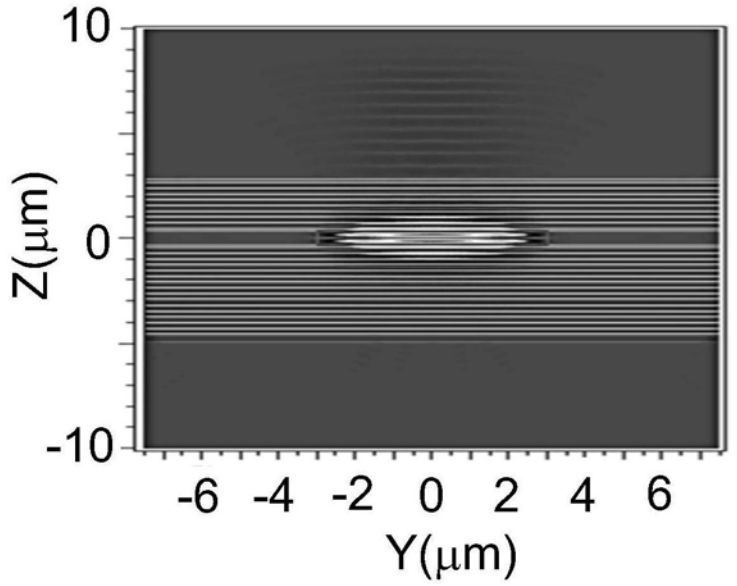


图68B

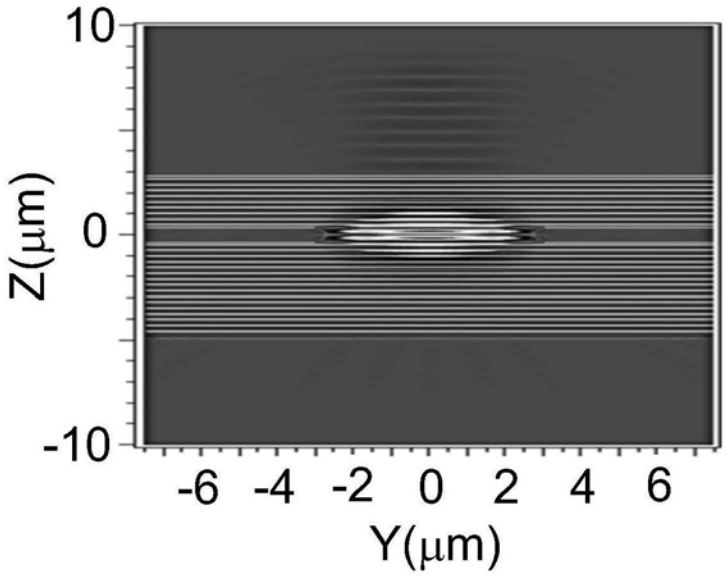

10
0
-10
Z(μm)
-6 -4 -2 0 2 4 6
Y(μm)

图68C

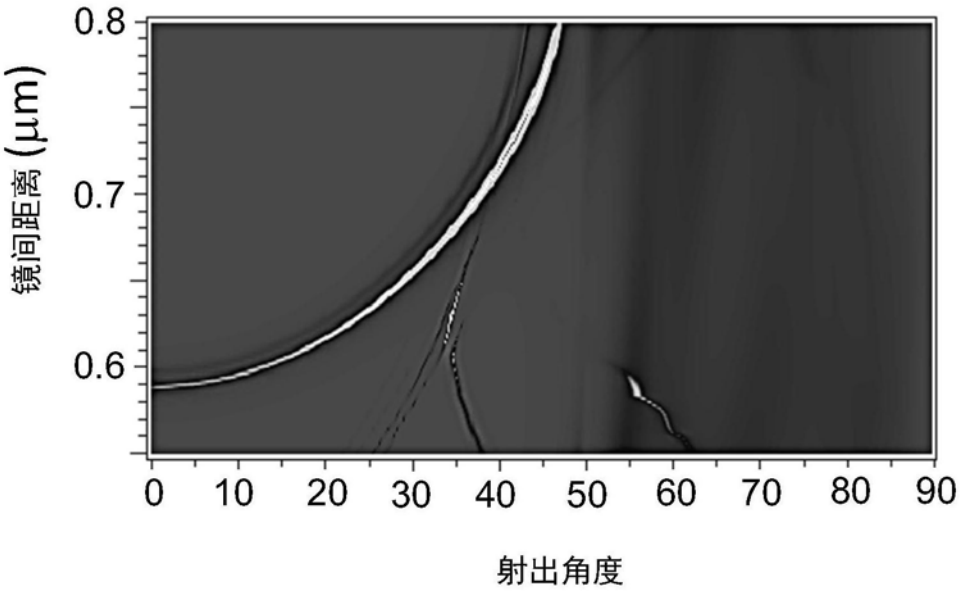

0.8
0.7
0.6
镜间距离 (μm)
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90
射出角度

图69

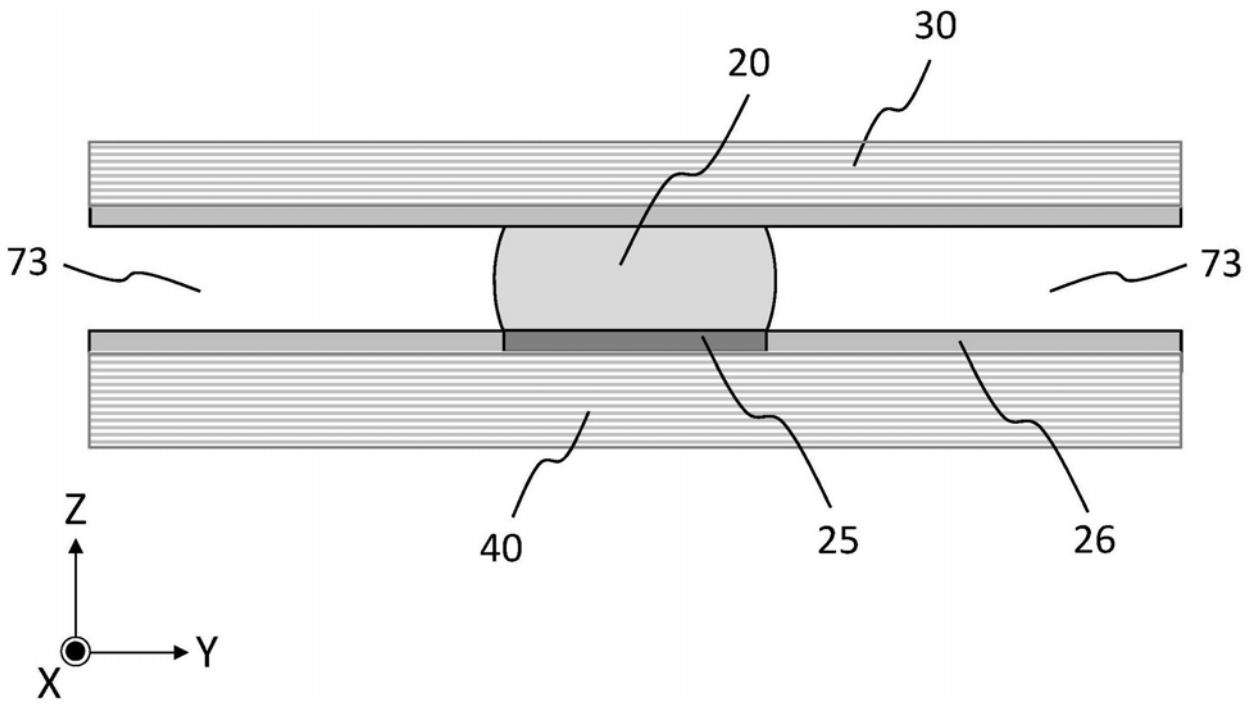


图70

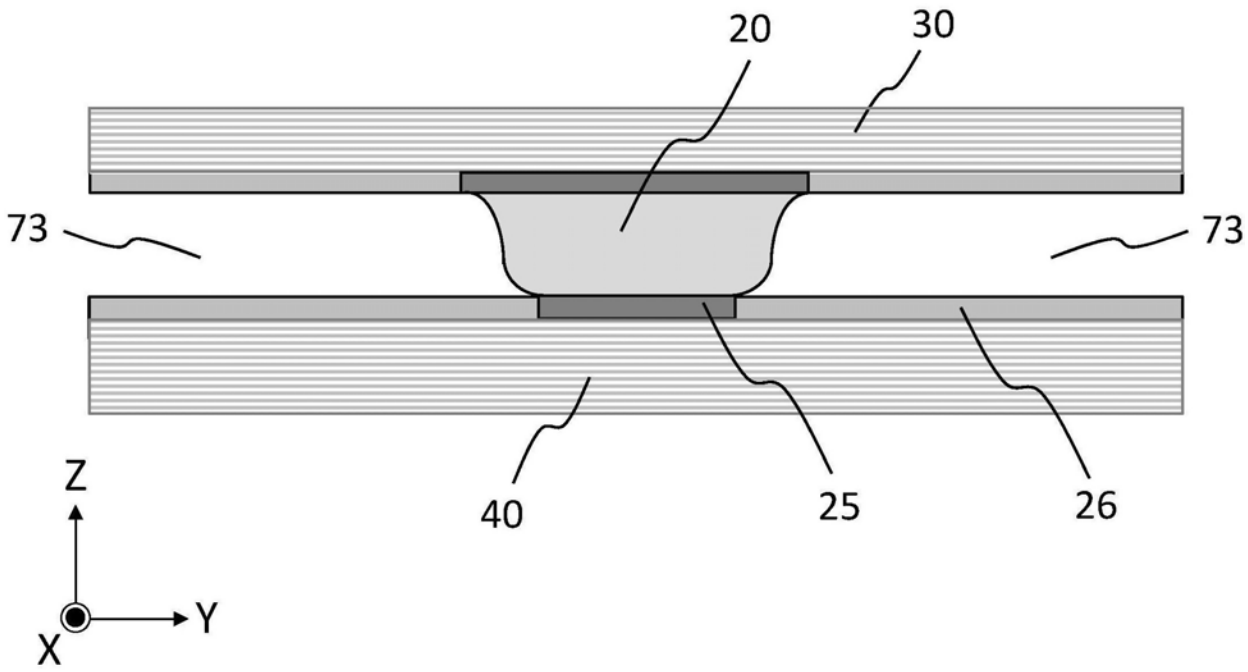


图71

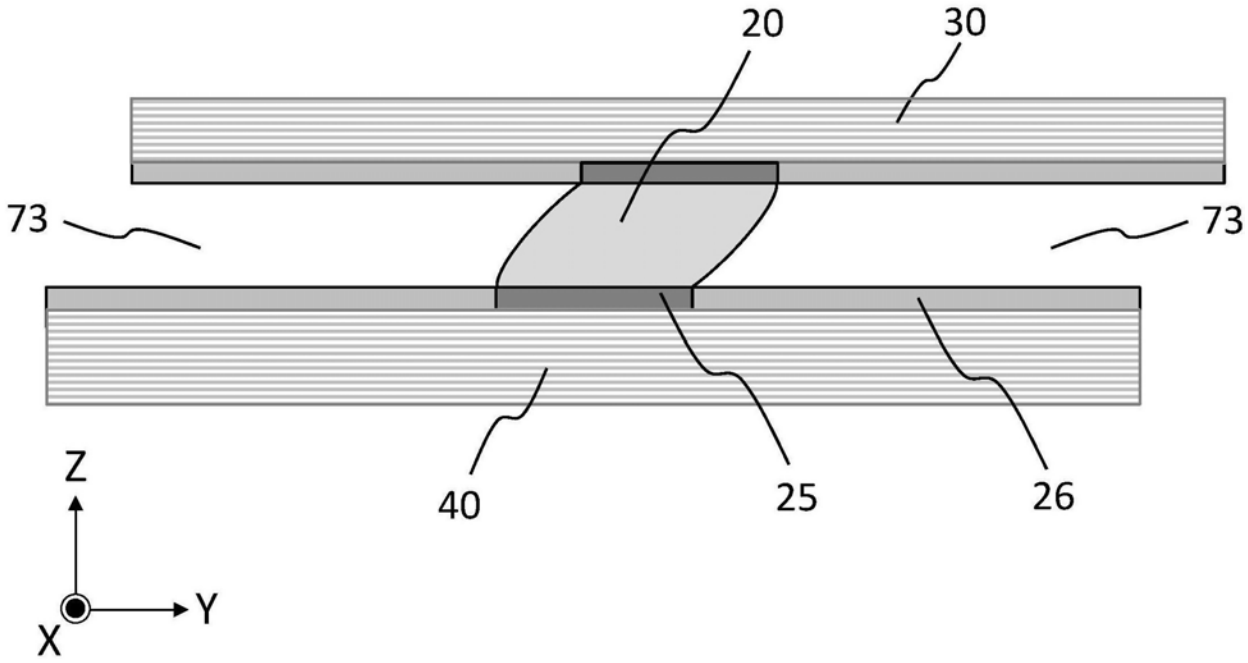


图72

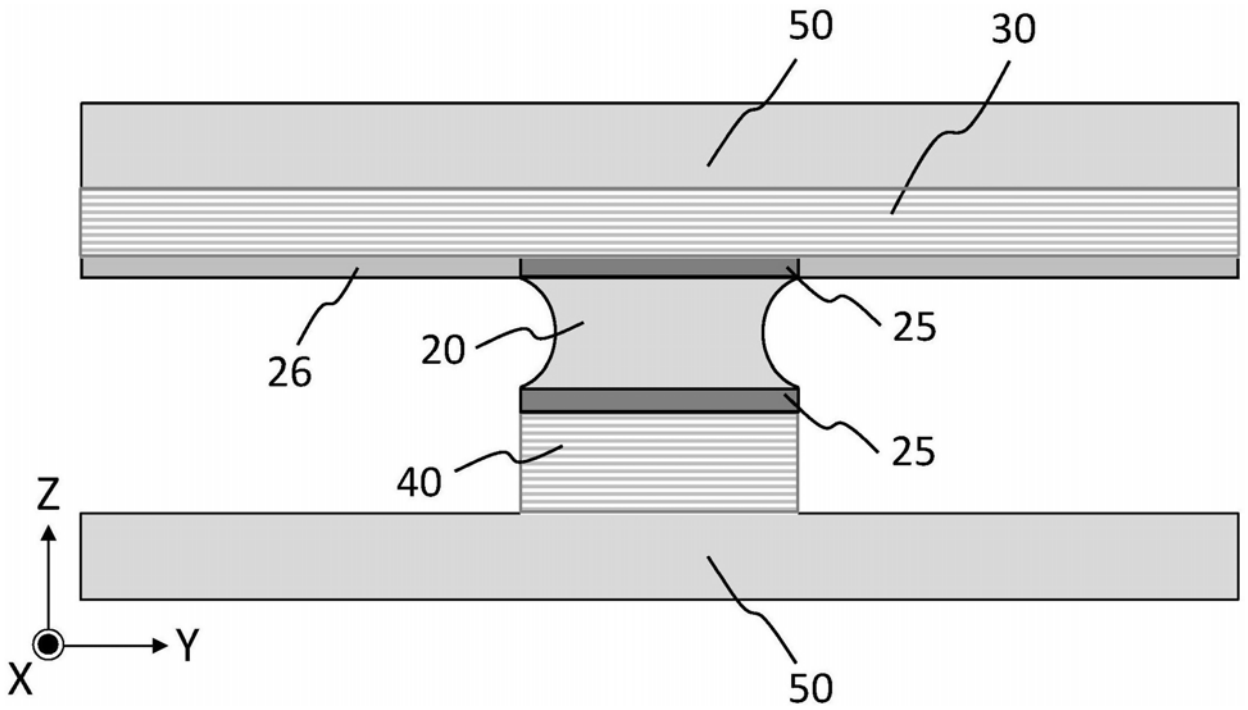


图73A

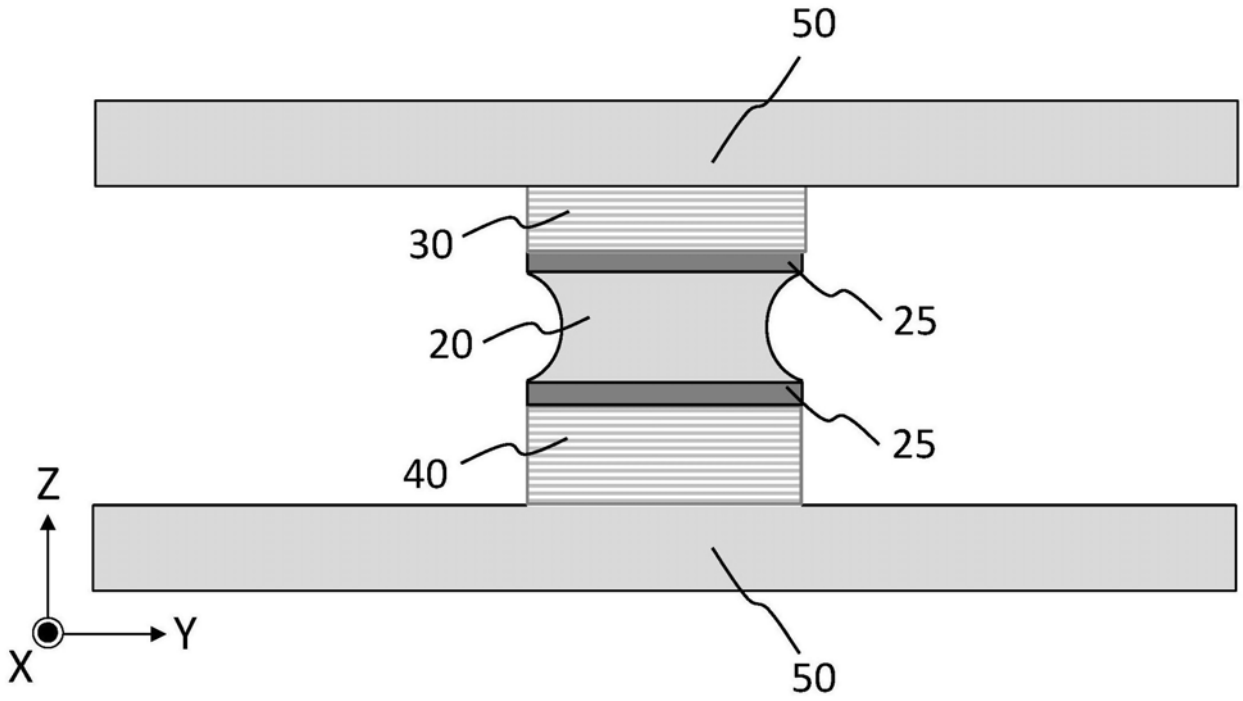


图73B

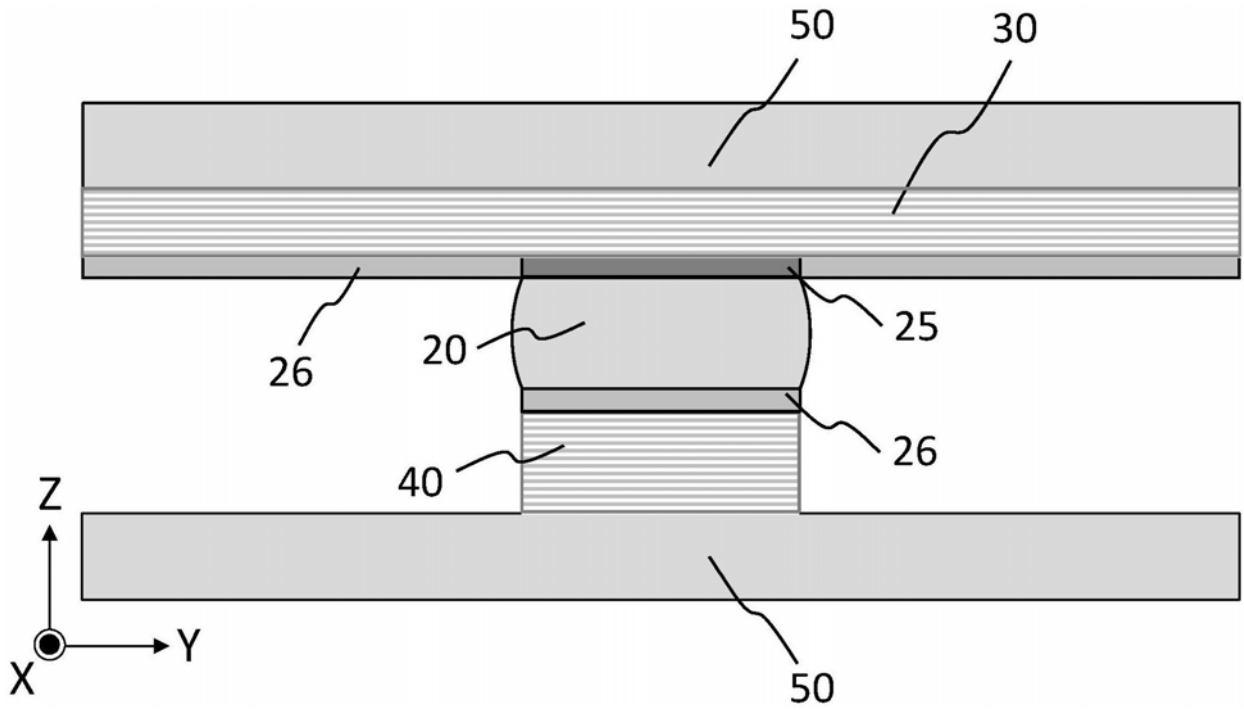


图73C

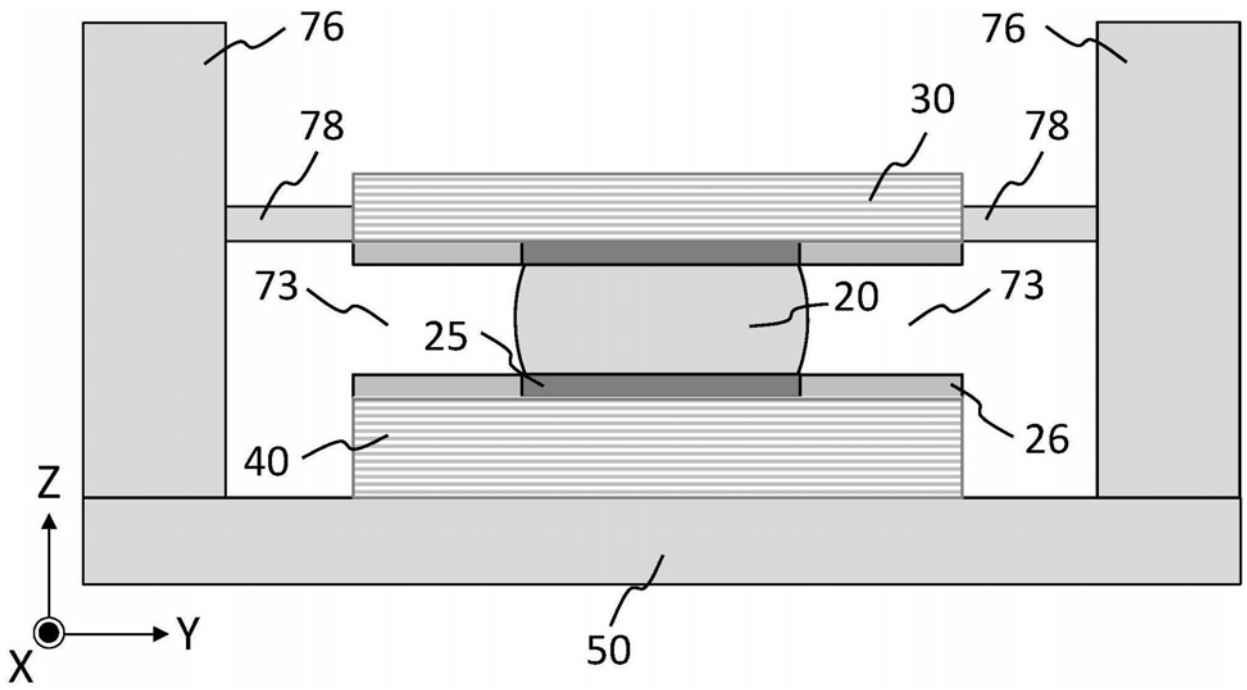

76
76
78
30
78
73
20
73
25
26
40
Z
Y
X
50

图74

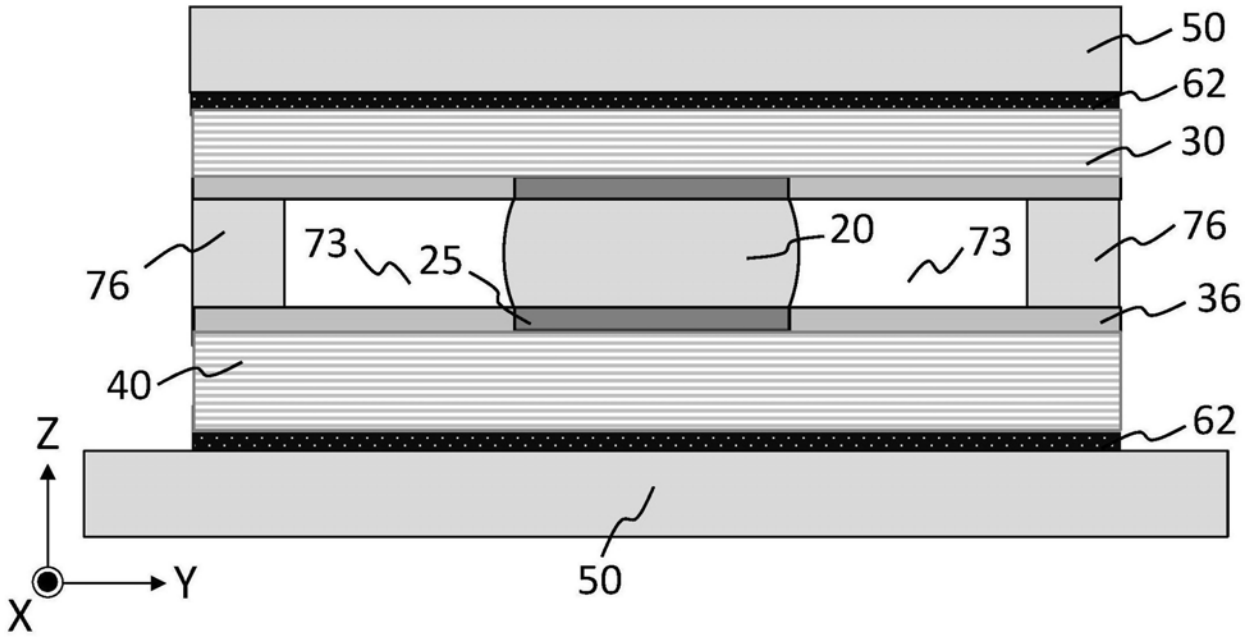

50
62
30
76
73
25
20
73
76
36
40
62
Z
Y
X
50

图75

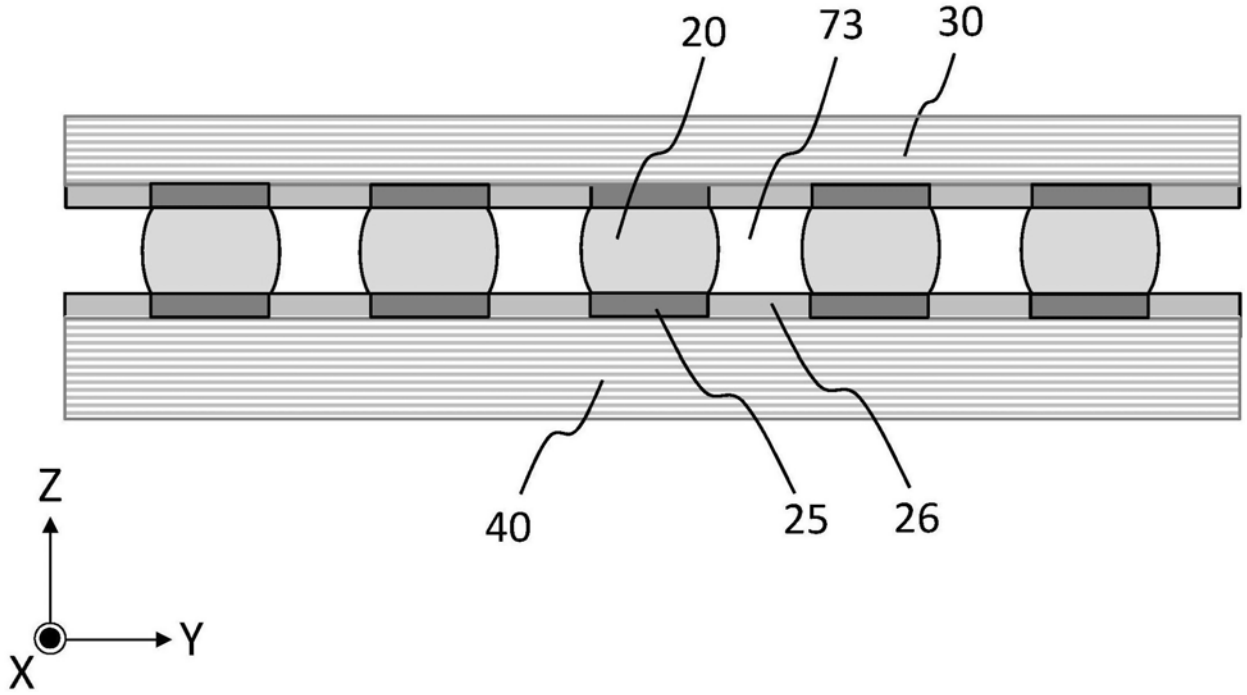


图76

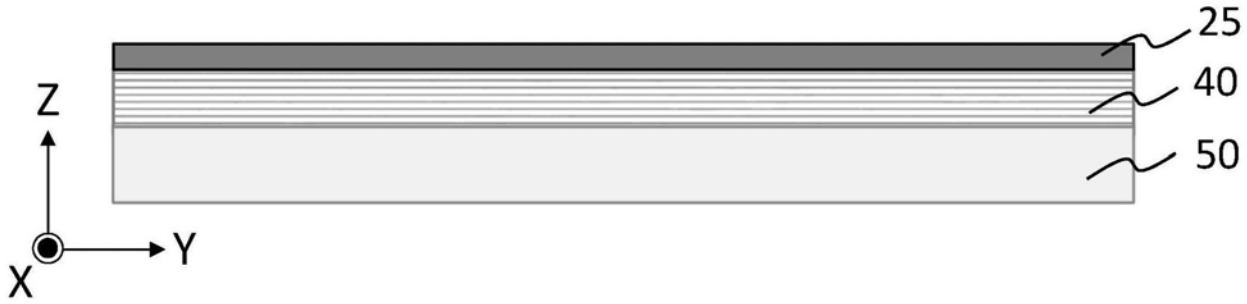


图77A

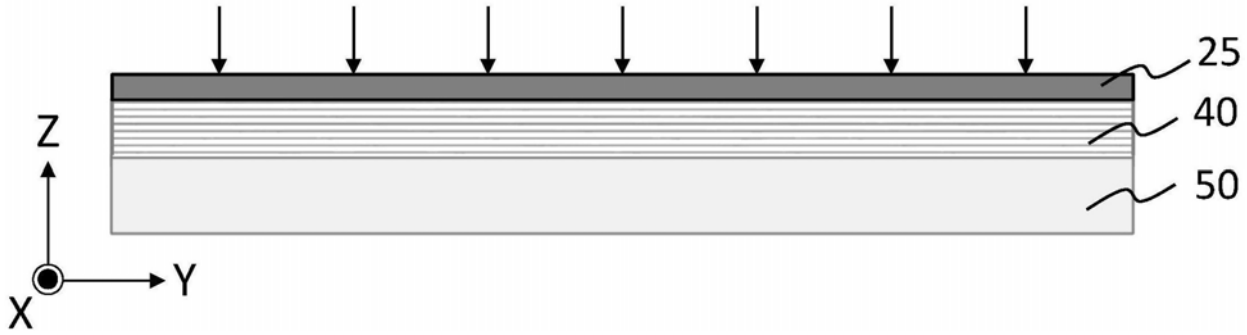


图77B

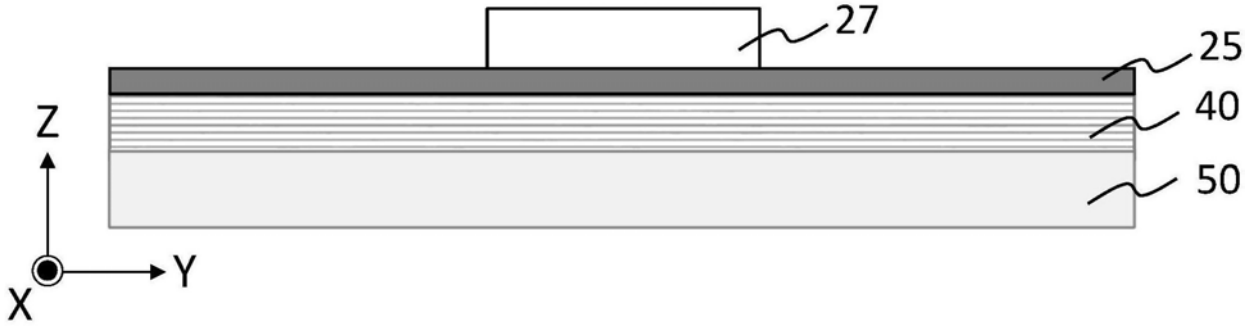


图77C

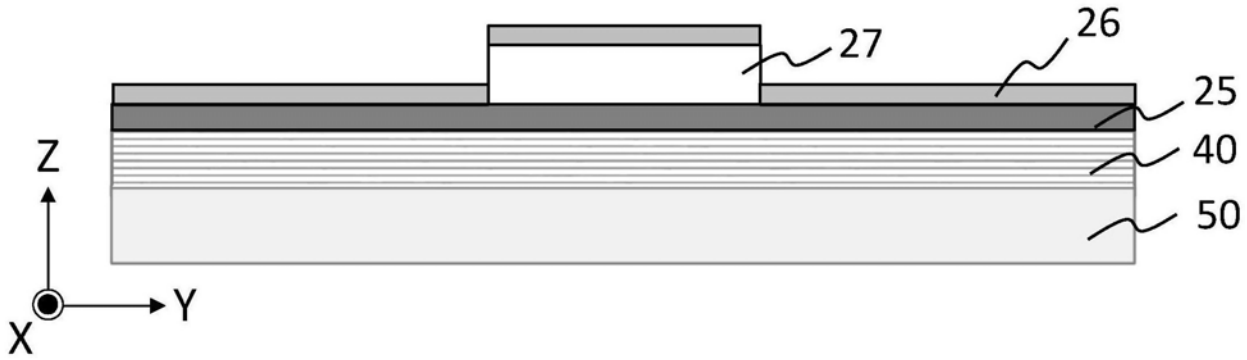


图77D

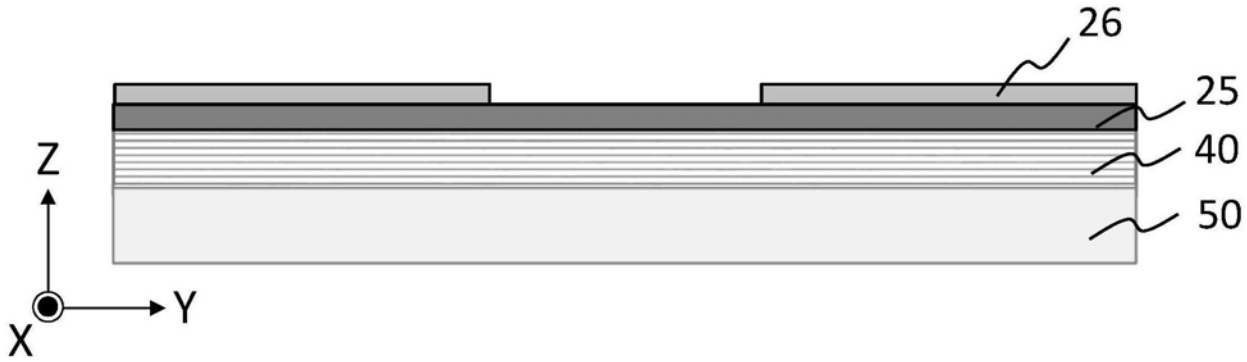


图77E

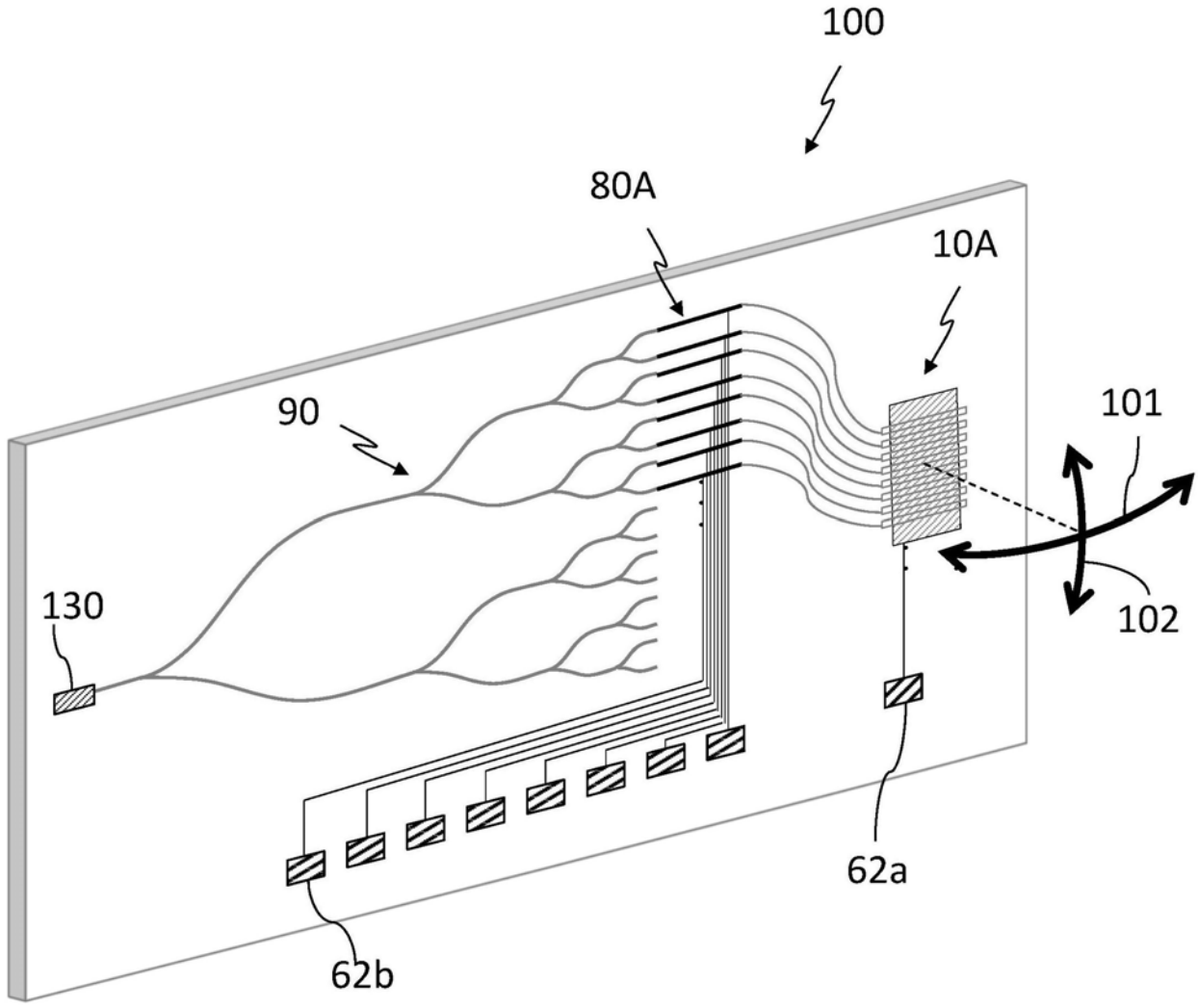


图78

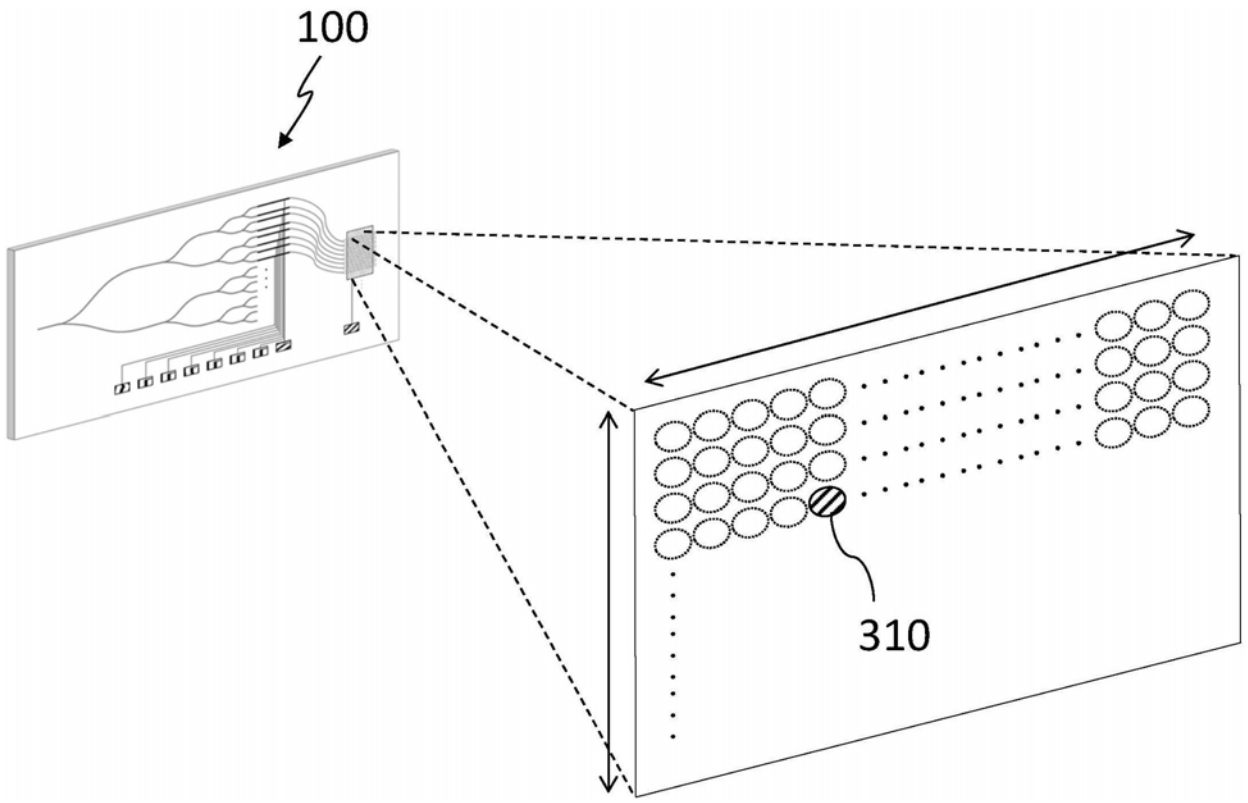


图79

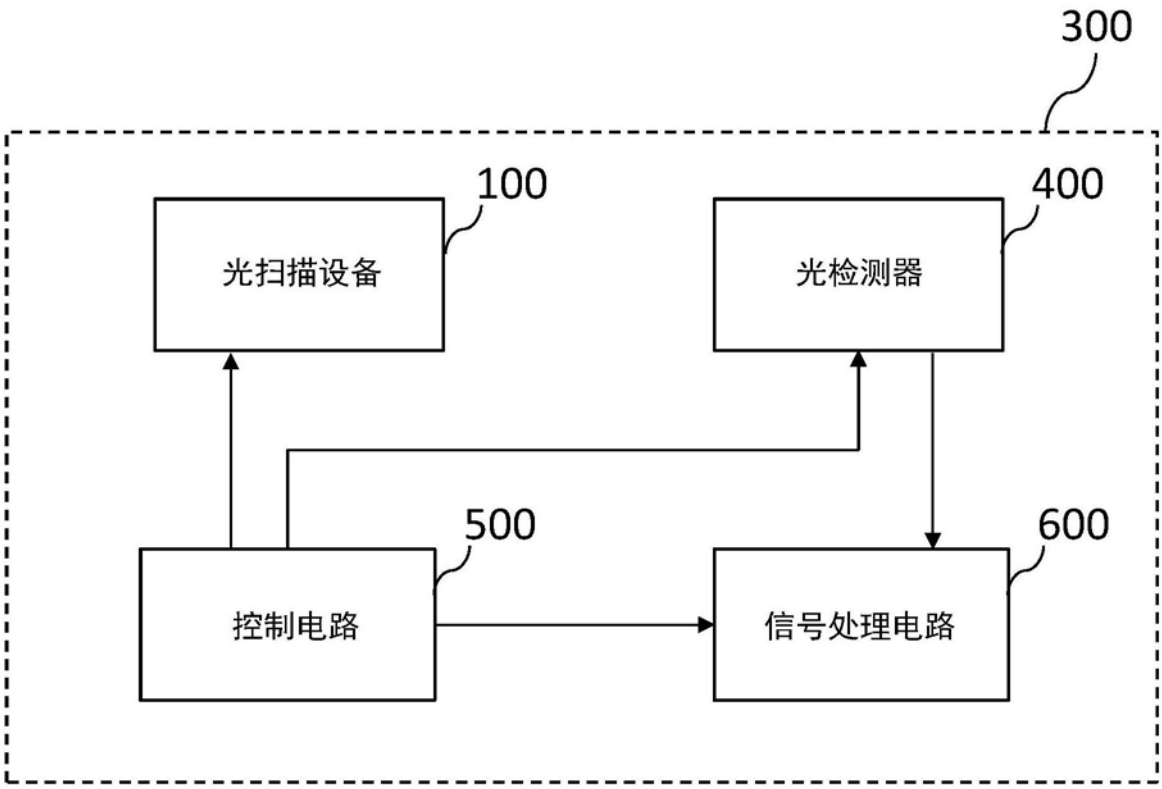


图80