



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110537143 B

(45) 授权公告日 2024. 10. 11

(21) 申请号 201980001640.5

(22) 申请日 2019.02.18

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110537143 A

(43) 申请公布日 2019.12.03

(30) 优先权数据
2018-060158 2018.03.27 JP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2019.09.11

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/JP2019/005861 2019.02.18

(87) PCT国际申请的公布数据
W02019/187777 JA 2019.10.03

(73) 专利权人 松下知识产权经营株式会社
地址 日本大阪府

(72) 发明人 中村和树 稻田安寿 平泽拓

(74) 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司
72002

专利代理师 安香子

(51) Int. Cl.
G02F 1/295 (2006.01)
G01S 7/481 (2006.01)
G02B 6/12 (2006.01)
G02B 26/08 (2006.01)
G02F 1/13 (2006.01)

(56) 对比文件
CN 108700790 A, 2018.10.23
CN 109416466 A, 2019.03.01
CN 110431481 A, 2019.11.08
CN 110476097 A, 2019.11.19
JP H06208142 A, 1994.07.26
JP W02018003852 A1, 2019.04.18
US 8995038 B1, 2015.03.31

审查员 王莹

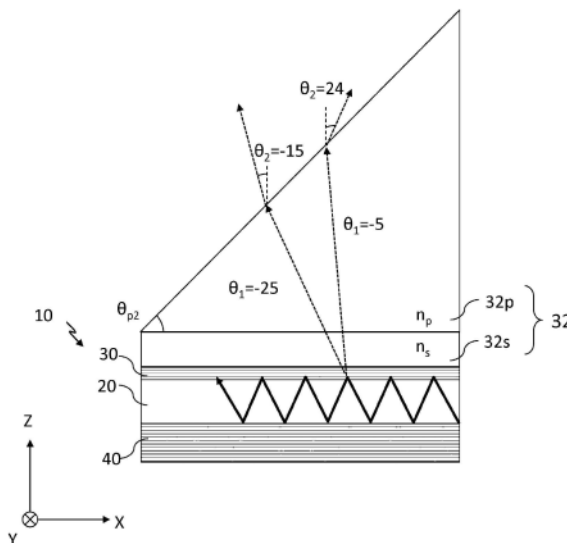
权利要求书4页 说明书61页 附图86页

(54) 发明名称

光设备及光检测系统

(57) 摘要

光设备具备:第1镜,具有沿第1方向以及与上述第1方向垂直的第2方向扩展的第1反射面;第2镜,具有与上述第1反射面对置的第2反射面;光波导层,位于上述第1镜与上述第2镜之间的区域的一部分,使光沿着上述第1方向传输;以及光学元件,位于上述第1镜的与上述第1反射面相反的一侧,通过折射及/或衍射使入射的光向与入射方向不同的方向射出。上述光学元件通过折射及/或衍射,(1)将从上述光波导层经由上述第1镜入射的光向与该入射方向相比上述第1方向的分量变小的方向射出,或者(2)将从该光设备的外部入射的光向与该入射方向相比上述第1方向的分量变大的方向射出。上述第1镜中的上述光的透射率比上述第2镜中的上述光的透射率高。



1. 一种光设备,其中,具备:
第1镜,具有沿第1方向以及与上述第1方向垂直的第2方向扩展的第1反射面;
第2镜,具有与上述第1反射面对置的第2反射面;
光波导层,位于上述第1镜与上述第2镜之间的区域的一部分,使光沿着上述第1方向传输;以及
光学元件,位于上述第1镜的与上述第1反射面相反的一侧,通过折射及/或衍射使入射的光向与入射方向不同的方向射出,
上述光学元件通过折射及/或衍射,将从上述光波导层经由上述第1镜入射的光向与该入射方向相比上述第1方向的分量变小的方向射出,
通过调整上述光波导层的折射率及/或厚度,从上述光波导层经由上述第1镜以及上述光学元件射出的光的方向变化。
2. 如权利要求1所述的光设备,其中,
上述光学元件扩大上述光波导层的折射率及/或厚度发生了变化时的、从上述光波导层射出的上述光的上述方向的变化、或取入到上述光波导层内的上述光的上述入射方向的变化。
3. 如权利要求1或2所述的光设备,其中,
上述光学元件包括棱镜。
4. 如权利要求3所述的光设备,其中,
上述棱镜具有与上述第1镜对置的第1面、以及位于与上述第1面相反的一侧的第2面,
上述第1面与上述第1反射面平行或交叉,
上述第2面与上述第1反射面交叉。
5. 如权利要求1或2所述的光设备,其中,
上述光学元件包括衍射光栅。
6. 如权利要求5所述的光设备,其中,
上述衍射光栅具有折射率沿着上述第1方向变化的多个凹部。
7. 如权利要求1或2所述的光设备,其中,
还具备波导,该波导连接于上述光波导层,并且使有效折射率为 n_{e1} 的波导模的光沿着上述第1方向传输,
上述波导的前端部处于上述光波导层的内部,
在从与上述第1反射面垂直的方向观察时在上述波导以及上述光波导层重叠的区域中,上述波导以及上述光波导层的至少一部分包括折射率沿着上述第1方向以周期 p 变化的至少一个光栅,
并且满足 $\lambda/n_{e1} < p < \lambda/(n_{e1} - 1)$ 。
8. 如权利要求1或2所述的光设备,其中,
具备多个波导单元,
上述多个波导单元各自包括上述第1镜及上述第2镜、上述光波导层以及上述光学元件,
上述多个波导单元在上述第2方向上排列。
9. 如权利要求8所述的光设备,其中,

还具备多个移相器,该多个移相器分别连接于上述多个波导单元,并且分别包括与上述多个波导单元中的对应的一个波导单元的上述光波导层直接相连或经由其他波导相连的波导,

通过使穿过上述多个移相器的光的相位之差分别变化,从上述第1镜射出的上述光的方向或经由上述第1镜取入到上述光波导层的上述光的入射方向变化。

10.如权利要求7所述的光设备,其中,

具备多个波导单元,

上述多个波导单元各自包括上述第1镜及上述第2镜、上述光波导层、上述光学元件以及上述波导,

上述多个波导单元在上述第2方向上排列。

11.如权利要求10所述的光设备,其中,

还具备多个移相器,该多个移相器分别连接于上述多个波导单元,并且分别包括与上述多个波导单元中的对应的一个波导单元的上述波导直接相连或经由其他波导相连的第2波导,

通过使穿过上述多个移相器的光的相位之差分别变化,从上述第1镜射出的上述光的方向或经由上述第1镜取入到上述光波导层的上述光的入射方向变化。

12.如权利要求8所述的光设备,其中,

具备共用的光学元件,

上述多个波导单元各自中的上述光学元件是上述共用的光学元件的一部分。

13.如权利要求12所述的光设备,其中,

具备多个波导阵列和基板,

上述多个波导阵列各自包括上述多个波导单元,

上述多个波导阵列设置在上述基板上。

14.如权利要求13所述的光设备,其中,

具备光学基板,

上述多个波导阵列各自中的上述共用的光学元件是上述光学基板的一部分。

15.如权利要求14所述的光设备,其中,

上述多个波导阵列中的上述共用的光学元件全部具备相同的构造。

16.如权利要求14所述的光设备,其中,

上述多个波导阵列中的上述共用的光学元件中的至少两个具备相互不同的构造。

17.如权利要求14所述的光设备,其中,

上述多个波导阵列中的上述共用的光学元件全部具备相互不同的构造。

18.如权利要求1或2所述的光设备,其中,

从上述光波导层射出的上述光的上述方向的变化范围或取入到上述光波导层内的上述光的上述入射方向的变化范围包含与上述第1反射面垂直的方向。

19.如权利要求1或2所述的光设备,其中,

上述第1镜中的上述光的透射率比上述第2镜中的上述光的透射率高,

上述光波导层具有能够调整折射率及/或厚度的构造,

通过调整上述光波导层的折射率及/或厚度,从上述光波导层经由上述第1镜以及上述

光学元件射出的光的方向或经由上述光学元件以及上述第1镜取入到上述光波导层内的光的入射方向变化。

20. 一种光设备, 其中, 具备:

第1镜, 具有沿第1方向以及与上述第1方向垂直的第2方向扩展的第1反射面;

第2镜, 具有与上述第1反射面对置的第2反射面;

光波导层, 位于上述第1镜与上述第2镜之间的区域的一部分, 使光沿着上述第1方向传输; 以及

光学元件, 位于上述第1镜的与上述第1反射面相反的一侧, 通过折射及/或衍射使入射的光向与入射方向不同的方向射出,

上述光学元件通过折射及/或衍射, 将从该光设备的外部入射的光向与该入射方向相比上述第1方向的分量变大的方向射出,

通过调整上述光波导层的折射率及/或厚度, 经由上述光学元件以及上述第1镜取入到上述光波导层内的光的入射方向变化,

上述光学元件在平面图中与上述光波导层的全部重叠。

21. 一种光设备, 其中, 具备:

第1镜, 具有沿第1方向以及与上述第1方向垂直的第2方向扩展的第1反射面;

第2镜, 具有与上述第1反射面对置的第2反射面;

光波导层, 位于上述第1镜与上述第2镜之间的区域的一部分, 使光沿着上述第1方向传输; 以及

光学元件, 位于上述第1镜的与上述第1反射面相反的一侧, 通过折射及/或衍射使入射的光向与入射方向不同的方向射出,

上述光学元件通过折射及/或衍射, (1) 将从上述光波导层经由上述第1镜入射的光向与该入射方向相比上述第1方向的分量变小的方向射出, 或者 (2) 将从该光设备的外部入射的光向与该入射方向相比上述第1方向的分量变大的方向射出,

通过调整上述光波导层的折射率/或厚度, 从上述光波导层经由上述第1镜以及上述光学元件射出的光的方向或经由上述光学元件以及上述第1镜取入到上述光波导层内的光的入射方向变化,

上述光学元件扩大上述光波导层的折射率及/或厚度发生了变化时的、从上述光波导层射出的上述光的上述方向的变化或取入到上述光波导层内的上述光的上述入射方向的变化。

22. 一种光设备, 其中, 具备:

第1镜, 具有沿第1方向以及与上述第1方向垂直的第2方向扩展的第1反射面;

第2镜, 具有与上述第1反射面对置的第2反射面;

光波导层, 位于上述第1镜与上述第2镜之间的区域的一部分, 使光沿着上述第1方向传输; 以及

光学元件, 位于上述第1镜的与上述第1反射面相反的一侧, 通过折射及/或衍射使入射的光向与入射方向不同的方向射出,

上述光学元件通过折射及/或衍射, (1) 将从上述光波导层经由上述第1镜入射的光向与该入射方向相比上述第1方向的分量变小的方向射出, 或者 (2) 将从该光设备的外部入射

的光向与该入射方向相比上述第1方向的分量变大的方向射出，

通过调整上述光波导层的折射率/或厚度，从上述光波导层经由上述第1镜以及上述光学元件射出的光的方向或经由上述光学元件以及上述第1镜取入到上述光波导层内的光的入射方向变化，

从上述光波导层射出的上述光的上述方向的变化范围或取入到上述光波导层内的上述光的上述入射方向的变化范围包含与上述第1反射面垂直的方向。

23. 一种光检测系统，其中，具备：

权利要求1~22中任一项所述的光设备；

光检测器，检测从上述光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。

光设备及光检测系统

技术领域

[0001] 本发明涉及光设备及光检测系统。

背景技术

[0002] 以往,提出了能够用光将空间进行扫描(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(即移相器)光学地耦合。在该光相控阵列中,相干光束被波导向各个天线元件引导,由移相器使光束相移。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,具有光在内部进行导波的光波导层和形成在光波导层的上表面及下表面的第1分布布拉格镜;光入射口,使光向波导内入射;以及光射出口,为了使从光入射口入射并在波导内进行导波的光射出而形成在波导的表面。

[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] 发明要解决的课题

[0012] 本发明提供一种比较简单的结构的新的光设备。

[0013] 解决课题所采用的手段

[0014] 有关本发明的一技术方案的光设备具备:第1镜,具有沿第1方向以及与上述第1方向垂直的第2方向扩展的第1反射面;第2镜,具有与上述第1反射面对置的第2反射面;光波导层,位于上述第1镜与上述第2镜之间的区域的一部分,使光沿着上述第1方向传输;以及光学元件,位于上述第1镜的与上述第1反射面相反的一侧,通过折射及/或衍射使入射的光向与入射方向不同的方向射出。上述光学元件通过折射及/或衍射,(1)将从上述光波导层经由上述第1镜入射的光向与该入射方向相比上述第1方向的分量变小的方向射出,或者(2)将从该光设备的外部入射的光向与该入射方向相比上述第1方向的分量变大的方向射出。上述第1镜中的上述光的透射率比上述第2镜中的上述光的透射率高。上述光波导层具有能够调整折射率及/或厚度的构造。通过调整上述光波导层的折射率及/或厚度,从上述光波导层经由上述第1镜以及上述光学元件射出的光的方向或经由上述光学元件以及上述第1镜取入到上述光波导层内的光的入射方向变化。

[0015] 本发明的总括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。

[0016] 发明效果

[0017] 根据本发明的一技术方案,能够实现比较简单的结构。

附图说明

[0018] 图1是示意地表示本发明的例示性的实施方式的光扫描设备的结构的立体图。

[0019] 图2是示意地表示一个波导元件的截面的构造及传输的光的例子的图。

[0020] 图3是示意地表示在模拟中使用的计算模型的图。

[0021] 图4A表示计算光波导层的一例的折射率与光的射出角度的关系的结果。

[0022] 图4B表示计算光波导层的另一例的折射率与光的射出角度的关系的结果。

[0023] 图5是示意地表示光扫描设备的例子的图。

[0024] 图6A是示意地表示比较例的结构剖视图。

[0025] 图6B是示意地表示其他比较例的结构剖视图。

[0026] 图7是表示使波导的折射率变化时的耦合效率的变化的例子的曲线图。

[0027] 图8A是表示全反射波导的概略结构的图。

[0028] 图8B是表示全反射波导的电场强度分布的图。

[0029] 图8C是表示慢光波导的概略结构的图。

[0030] 图8D是表示慢光波导的电场强度分布的图。

[0031] 图9是示意地表示多个第1波导与多个第2波导的连接例子的图。

[0032] 图10是示意地表示本发明的一实施方式的光设备的图。

[0033] 图11是表示从全反射波导向慢光波导的经由光栅的光传输的图。

[0034] 图12是表示不存在光栅的结构例子的图。

[0035] 图13A是表示全反射波导的波导模的电场强度分布的图。

[0036] 图13B是表示慢光波导的高次波导模的电场强度分布的图。

[0037] 图14是表示光栅的凹部的深度与耦合效率的关系例子的图。

[0038] 图15是表示在耦合效率低的条件下计算出的光传输的状况的图。

[0039] 图16是表示光栅的凹部的个数与耦合效率的关系例子的图。

[0040] 图17A是示意地表示光设备的第1变形例的剖视图。

[0041] 图17B是示意地表示光设备的第2变形例的剖视图。

[0042] 图17C是示意地表示光设备的第3变形例的剖视图。

[0043] 图18A是示意地表示光设备的第4变形例的剖视图。

[0044] 图18B是示意地表示光设备的第5变形例的剖视图。

[0045] 图19A是示意地表示全反射波导及慢光波导的连接的第1例的剖视图。

[0046] 图19B是示意地表示全反射波导及慢光波导的连接的第2例的剖视图。

[0047] 图19C是示意地表示全反射波导及慢光波导的连接的第3例的剖视图。

[0048] 图19D是示意地表示全反射波导及慢光波导的连接的第4例的剖视图。

[0049] 图20是示意地表示慢光波导的其他例的剖视图。

[0050] 图21是示意地表示全反射波导及慢光波导的连接的其他例的剖视图。

[0051] 图22是表示图17A所示的例子中的光波导层的厚度与波导光的耦合效率的关系的

图。

[0052] 图23A是示意地表示在图17A所示的例子中具有两个光栅的光设备的图。

[0053] 图23B是表示图23A所示的例子中的光波导层的厚度与波导光的耦合效率的关系的图。

[0054] 图23C是表示图23A所示的例子中的光波导层的厚度及区域101的折射率与波导光的耦合效率的关系的其他图。

[0055] 图23D是表示图23A所示的例子中的光波导层的厚度与波导光的耦合效率的关系的其他图。

[0056] 图24A是示意地表示图23A所示的例子中的变形例的剖视图。

[0057] 图24B是示意地表示图23A所示的例子中的变形例的剖视图。

[0058] 图24C是示意地表示图23A所示的例子中的变形例的剖视图。

[0059] 图24D是示意地表示图23A所示的例子中的变形例的剖视图。

[0060] 图25A示意地表示两个光栅在Y方向上排列的例子图。

[0061] 图25B是示意地表示光栅的周期随着Y方向上的位置的变化而从 p_2 向 p_1 连续地变化的例子图。

[0062] 图26示意地表示混合存在包含两个周期成分的光栅的例子图。

[0063] 图27A是示意地表示在光波导层的两旁配置有间隔物的结构例的图。

[0064] 图27B是示意地表示波导阵列的结构例的图。

[0065] 图28是示意地表示光波导层内的波导光的传输的图。

[0066] 图29A是表示光经由光栅被向第1波导导入的例子图。

[0067] 图29B是表示光被从第1波导1的端面输入的例子图。

[0068] 图29C是表示光被从激光源向第1波导输入的例子图。

[0069] 图30A是表示向垂直于波导阵列的射出面的方向射出光的波导阵列的截面的图。

[0070] 图30B是表示向与垂直于波导阵列的射出面的方向不同的方向射出光的波导阵列的截面的图。

[0071] 图31是示意地表示三维空间中的波导阵列的立体图。

[0072] 图32A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。

[0073] 图32B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。

[0074] 图32C是表示在 p 实质上等于 $\lambda/2$ 的情况下从波导阵列射出衍射光的状况的示意图。

[0075] 图33是表示移相器直接连接于波导元件的结构例的示意图。

[0076] 图34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。

[0077] 图35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例的图。

[0078] 图36是在表示在光分路器插入了以级联状排列的多个移相器的结构例的图。

[0079] 图37A是示意地表示第1调整元件的结构一例的立体图。

[0080] 图37B是示意地表示第1调整元件的其他结构例的立体图。

[0081] 图37C是示意地表示第1调整元件的又一结构例的立体图。

[0082] 图38是表示将包括加热器的调整元件与波导元件组合的结构例的图。

- [0083] 图39是表示由支承部件保持着镜的结构例的图。
- [0084] 图40是表示使镜移动的结构的一例的图。
- [0085] 图41是表示将电极配置在不妨碍光的传输的位置处的结构例的图。
- [0086] 图42是表示压电元件的例子图。
- [0087] 图43A是表示具有单压电片的构造的支承部件的结构例的图。
- [0088] 图43B是表示支承部件变形的状态的例子图。
- [0089] 图44A是表示具有双压电片的构造的支承部件的结构例的图。
- [0090] 图44B是表示支承部件变形的状态的例子图。
- [0091] 图45是表示致动器的例子图。
- [0092] 图46A是用来说明支承部件的前端的倾斜的图。
- [0093] 图46B是表示将伸缩的方向不同的两个单压电片型的支承部件串联地接合的例子图。
- [0094] 图47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例子图。
- [0095] 图48是表示多个波导元件的第1镜是一个板状的镜的结构例的图。
- [0096] 图49A是表示在光波导层中使用液晶材料的结构的第1例的图。
- [0097] 图49B是表示在光波导层中使用液晶材料的结构的第1例的图。
- [0098] 图50是表示具备光输入装置的光扫描设备的例子剖视图。
- [0099] 图51A是表示在光波导层中使用液晶材料的结构的第2例的图。
- [0100] 图51B是表示在光波导层中使用液晶材料的结构的第2例的图。
- [0101] 图52A是表示在光波导层中使用液晶材料的结构的第3例的图。
- [0102] 图52B是表示在光波导层中使用液晶材料的结构的第3例的图。
- [0103] 图53A是表示在光波导层中使用液晶材料的结构的第4例的图。
- [0104] 图53B是表示在光波导层中使用液晶材料的结构的第4例的图。
- [0105] 图54是表示在光波导层中使用液晶材料的结构中的光的射出角度的施加电压依赖性的曲线图。
- [0106] 图55是表示在本实验中使用的波导元件的结构剖视图。
- [0107] 图56是表示在光波导层中使用电光学材料的结构的第1例的图。
- [0108] 图57是表示在光波导层中使用电光学材料的结构的第1例的图。
- [0109] 图58A是表示一对电极仅配置在第2镜的附近的例子图。
- [0110] 图58B是表示一对电极仅配置在第1镜的附近的例子图。
- [0111] 图59是表示从各个波导元件的电极将布线共同地取出的结构例子图。
- [0112] 图60是表示使一部分电极及布线为共用的结构例子图。
- [0113] 图61是表示对于多个波导元件配置了共用的电极的结构例子图。
- [0114] 图62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例子图。
- [0115] 图63是表示两个移相器阵列分别配置在波导阵列的两侧的结构例的图。
- [0116] 图64A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。
- [0117] 图64B表示波导元件的排列间隔不为一定的波导阵列的结构例。

- [0118] 图65A是示意地表示本实施方式的光扫描设备的图。
- [0119] 图65B是图65A所示的光扫描设备的剖视图。
- [0120] 图65C是图65A所示的光扫描设备的其他的剖视图。
- [0121] 图66A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。
- [0122] 图66B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。
- [0123] 图67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。
- [0124] 图68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。
- [0125] 图69A是表示第2镜的厚度阶段性地变化的结构例的图。
- [0126] 图69B是示意地表示上部电极、第1镜及第2基板跨第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。
- [0127] 图69C是表示图69B的结构例的制造过程的一部分的图。
- [0128] 图70是表示多个第2波导的截面的图。
- [0129] 图71是表示第1波导1及第2波导是反射型波导的结构例的图。
- [0130] 图72是表示上部电极配置在第1镜之上、下部电极配置在第2镜之下的结构例的图。
- [0131] 图73是表示第1波导被分离为两个部分的例子的图。
- [0132] 图74是表示电极配置在各光波导层与相邻于各光波导层的光波导层之间的结构例的图。
- [0133] 图75是表示第1镜厚、第2镜0薄的结构例的图。
- [0134] 图76是一实施方式的光扫描设备的剖视图。
- [0135] 图77是表示光损失的比例与 y_1 的关系的图。
- [0136] 图78是示意地表示本实施方式的波导阵列的另一结构例的光扫描设备的剖视图。
- [0137] 图79A是表示图27B的结构例的电场强度分布的计算结果的图。
- [0138] 图79B是表示图78的结构例的电场强度分布的计算结果的图。
- [0139] 图80是示意地表示在一实施方式中存在具有不同的折射率的间隔物的结构例的光扫描设备的剖视图。
- [0140] 图81是示意地表示变形例的波导元件的结构例的光扫描设备的剖视图。
- [0141] 图82是表示光波导区域的宽度与电场的展览的关系的图。
- [0142] 图83是示意地表示本实施方式的光波导区域及非波导区域的结构例的光扫描设备的剖视图。
- [0143] 图84A是表示波导模的电场分布的计算结果的图。
- [0144] 图84B是表示波导模的电场分布的计算结果的图。
- [0145] 图85是表示部件的尺寸相对于镜间距离的比与电场的展览的关系的图。
- [0146] 图86是表示图85的例子中的部件的尺寸相对于镜间距离的比与波导模的衰减系数的关系的图。
- [0147] 图87是表示部件的尺寸相对于镜间距离的比与电场的展览的关系的图。
- [0148] 图88是示意地表示光波导区域及非波导区域的结构的光扫描设备的剖视图。
- [0149] 图89是表示部件的尺寸相对于镜间距离的比与电场的展览的关系的图。
- [0150] 图90A是表示在第2镜的反射面的一部分设置有从其他部分隆起的凸部的例子的

剖视图。

[0151] 图90B是示意地表示在第2镜的反射面的一部分设置有凸部的其他例的剖视图。

[0152] 图91是示意地表示在第1镜侧将两个部件分离地配置的结构例的光扫描设备的剖视图。

[0153] 图92是示意地表示在第1及第2镜的两侧分别将两个部件分离地配置的结构例的光扫描设备的剖视图。

[0154] 图93是示意地表示在第1镜侧将两个部件分离地配置、在第2镜侧配置有其他部件的结构例的光扫描设备的剖视图。

[0155] 图94是示意地表示在第2镜侧将两个部件分离地配置的结构例的光扫描设备的剖视图。

[0156] 图95是表示在第1及第2镜的两侧分别配置有部件的结构例的光扫描设备的剖视图。

[0157] 图96是示意地表示本发明的实施方式中的光设备的一例的图。

[0158] 图97是示意地表示计算所使用的光设备的一例的图。

[0159] 图98是表示图97所示的例子中的、没有光学元件的情况下的光的射出角度和具有光学元件的情况下的光的射出角度的关系的图。

[0160] 图99是示意地表示本实施方式中的光设备的一例的图。

[0161] 图100是示意地表示本实施方式中的光设备的一例的图。

[0162] 图101是表示图100所示的例子中的、没有光学元件的情况下的光的射出角度和具有光学元件的情况下的光的射出角度的关系的图。

[0163] 图102是示意地表示本实施方式中的光设备的一例的图。

[0164] 图103是示意地表示本实施方式中的光设备的一例的图。

[0165] 图104是示意地表示本实施方式中的光设备的一例的图。

[0166] 图105是示意地表示本实施方式中的光设备的一例的图。

[0167] 图106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。

[0168] 图107是表示从光扫描设备向远方照射激光等的光束而执行二维扫描的状况的示意图。

[0169] 图108是表示能够生成测距图像的LiDAR系统的结构例的框图。

[0170] 图109是示意地表示LiDAR系统的结构例的图。

[0171] 图110A是示意地表示光扫描设备和线性传感器阵列的焦点的位置关系的图。

[0172] 图110B是示意地表示物体、线性传感器阵列、以及线性传感器阵列的焦点的位置关系的图。

[0173] 图111是示意地表示光扫描的范围和线性传感器阵列中的各受光元件的视场的位置关系的图。

[0174] 图112是用于说明光的射出角度的范围的说明图。

具体实施方式

[0175] 在说明本发明的实施方式之前,说明作为本发明的基础的认识。

[0176] 本发明人们发现,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问题。

[0177] 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,有对于振动而言鲁棒性不强的问题。

[0178] 在专利文献2所记载的光相控阵列中,需要将光分支而导入到多个列波导及多个行波导,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,需要对二维地排列的多个天线元件分别连接移相器,并在移相器安装用于相位控制的布线。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。

[0179] 本发明人们着眼于以往技术中的上述问题,研究了用来解决这些问题的结构。本发明人们发现,能够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来解决上述的问题。波导元件中的一对镜的一方具有比另一方高的光透射率,使在光波导层中传输的光的一部分向外部射出。关于射出的光的方向(或射出角度),能够通过如后述那样调整光波导层的折射率或厚度、或向光波导层输入的光的波长,来使其变化。更具体地讲,通过使折射率、厚度或波长变化,能够使射出光的波数矢量(wave vector)的沿着光波导层的长度方向的方向的分量变化。由此,实现一维的扫描。

[0180] 进而,在使用多个波导元件的阵列的情况下,还能够实现二维的扫描。更具体地讲,通过对向多个波导元件供给的光赋予适当的相位差,并调整其相位差,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,射出光的波数矢量的与沿着光波导层的长度方向的方向交叉的方向的分量变化。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、厚度或光的波长变化不同的量。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、厚度及波长中的至少一个同步地变化同量,能够进行二维的扫描。这样,根据本发明的实施方式,能够以比较简单的结构实现光的二维扫描。

[0181] 在本说明书中,“折射率、厚度及波长中的至少1个”,是指从由光波导层的折射率、光波导层的厚度及向光波导层输入的波长构成的组中选择的至少1个。为了使光的射出方向变化,也可以单独地控制折射率、厚度及波长中的某一个。或者,也可以对它们3个中的任意两个或全部进行控制而使光的射出方向变化。在以下的说明中,主要说明对光波导层的折射率或厚度进行控制的形态。在以下的各实施方式中,也可以代替折射率或厚度的控制或者除此以外,对向光波导层输入的光的波长进行控制。

[0182] 以上的基本原理,不仅对射出光的用途,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、厚度及波长中的至少一个变化,能够使能够接收的光的方向一维地变化。进而,如果通过与在一方向上排列的多个波导元件分别连接的多个移相器使光的相位差变化,则能够使能够接收的光的方向二维地变化。

[0183] 本发明的实施方式的光扫描设备及光接收设备例如可以作为LiDAR(Light Detection and Ranging,光探测与测距)系统等光检测系统中的天线使用。LiDAR系统与使用毫米波等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),所以能够以高的分辨率检测物体的距离分布。这样的LiDAR系统例如可以搭载到汽车、UAV

(Unmanned Aerial Vehicle, 所谓无人机)、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。在本说明书中, 有将光扫描设备和光接收设备统称作“光设备”的情况。此外, 关于在光扫描设备或光接收设备中使用的设备也有称作“光设备”的情况。

[0184] <光扫描设备的结构例>

[0185] 以下, 作为一例, 说明进行二维扫描的光扫描设备的结构。但是, 有将所需以上详细的说明省略的情况。例如, 有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的情况。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, 发明人们为了使本领域技术人员充分地理解本发明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加相同的标号。

[0186] 在本发明中, “光”是指不仅包含可视光(波长是约400nm到约700nm)、还包含紫外线(波长是约10nm到约400nm)及红外线(波长是约700nm到约1mm)的电磁波。在本发明中, 有将紫外线称作“紫外光”、将红外线称作“红外光”的情况。

[0187] 在本发明中, 光的“扫描”是指使光的方向变化。“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。“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。

[0188] 在本说明书中, 两个方向“平行”, 不仅是严格地平行, 也包括两者所成的角度是15度以下的形态。在本说明书中, 两个方向“垂直”, 不意味着严格地垂直, 而包括两者所成的角度是75度以上且105度以下的形态。

[0189] 图1是示意地表示本发明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具备包括多个波导元件10的波导阵列。多个波导元件10分别具有沿第1方向(图1中的X方向)延伸的形状。多个波导元件10在与第1方向交叉的第2方向(图1中的Y方向)上规则性地排列。多个波导元件10一边使光向第1方向传输, 一边使光向与平行于第1及第2方向的假想的平面交叉的第3方向D3射出。在本实施方式中, 第1方向(X方向)与第2方向(Y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。

[0190] 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而设定, 本发明的实施方式完全不限现实实施时的朝向。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。

[0191] 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(以下, 有分别简单称作镜的情况)、和位于镜30及镜40之间的光波导层20。镜30及镜40分别在与光波导层20的界面处具有与第3方向D3交叉的反射面。镜30及镜40以及光波导层20具有沿第1方向(X方向)延伸的形状。

[0192] 另外, 如后述那样, 多个波导元件10的多个第1镜30也可以是一体地构成的第3镜的多个部分。此外, 多个波导元件10的多个第2镜40也可以是一体地构成的第4镜的多个部分。进而, 多个波导元件10的多个光波导层20也可以是一体地构成的光波导层的多个部分。至少可以通过(1)各第1镜30与其他的第1镜30分体地构成、或(2)各第2镜40与其他的第2镜40分体地构成、或(3)各光波导层20与其他的波导层20分体地构成, 来形成多个波导。“分

体地构成”,不仅是在物理上设置空间,还包括中间夹着折射率不同的材料而分离的情况。

[0193] 第1镜30的反射面与第2镜40的反射面大致平行地对置。镜30及镜40中的至少第1镜30具有使在光波导层20中传输的光的一部分透射的特性。换言之,第1镜30关于该光具有比第2镜40高的光透射率。因此,在光波导层20中传输的光的一部分从第1镜30向外部射出。这样的镜30及镜40例如可以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。

[0194] 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的折射率或厚度、或向光波导层20输入的光的波长同步地同时变化,能够实现光的二维扫描。

[0195] 本发明人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,成功实现了光的二维扫描。

[0196] 如图1所示,如果向各波导元件10输入光,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。其射出光的方向D3依赖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、厚度及波长中的至少一个同步地控制,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方向的分量变化。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。

[0197] 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。通过使其相位差变化,能够使射出光的波数矢量的Y方向的分量变化。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,能够使通过干涉而射出光相互加强的方向D3沿着图1所示的方向102变化。由此,能够实现光的二维扫描。

[0198] 以下,更详细地说明光扫描设备100的动作原理。

[0199] <波导元件的动作原理>

[0200] 图2是示意地表示一个波导元件10的截面的构造及传输的光的例子的图。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,一对镜30和镜40夹着光波导层20而配置。从光波导层20的X方向上的一端导入的光22一边被设置在光波导层20的上表面(图2中的上侧的表面)的第1镜30及设置在下表面(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内传输。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。

[0201] 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输。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及镜40反复反射一边传输。因此,在光的传输角度上没有制约。这里,光的传输角度,是指向镜30或镜40与光波导层20的界面的入射角度。对于镜30或镜40以更接近于垂直的角度入射的光也能够进行传输。即,以比全反射的临界角小的角度向界面入射的光也能够进行传输。因此,光的传输方向上的光的群速度与自由空间中的光速相比大幅下降。由此,波导元件10拥有光的传输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。

将这样的波导称作“反射型波导”或“慢光波导”。

[0202] 对波导元件10的光的传输更详细地说明。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或镜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 的光的传输角度 θ_w 满足以下的式(1)。

[0203] [数式1]

$$[0204] \quad 2dn_w \cos\theta_w = m\lambda \quad (1)$$

[0205] m 是模数。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 λ_g ，是 $\lambda/(n_w \cos\theta_w)$ 。当光波导层20的厚度 d 等于光波导层20的厚度方向上的波长 λ_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。

[0206] 在镜30及镜40是多层膜镜的情况下，在反射时光也侵入到镜内部。因此，严格地讲，需要将光侵入的量的光程对应的项附加到式(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。

[0207] 在光波导层20内传输的光穿过第1镜30被向外部(典型的是空气)射出时的射出角度 θ 可以按照斯涅尔定律，如以下的式(2)那样记述。

[0208] [数式2]

$$[0209] \quad \sin\theta = n_w \sin\theta_w \quad (2)$$

[0210] 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侧的光的传输方向的波长 $\lambda/(n_w \sin\theta_w)$ 相等的条件来得到。

[0211] 根据式(1)及式(2)，射出角度 θ 可以如以下的式(3)那样记述。

[0212] [数式3]

$$[0213] \quad \sin\theta = \sqrt{n_w^2 - \left(\frac{m\lambda}{2d}\right)^2} \quad (3)$$

[0214] 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 中的某一个，能够改变光的射出方向。

[0215] 例如，在 $n_w=2$ 、 $d=387\text{nm}$ 、 $\lambda=1550\text{nm}$ 、 $m=1$ 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 $d=420\text{nm}$ ，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 $\lambda=1500\text{nm}$ ，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 的某一个，能够大幅改变光的射出方向。

[0216] 所以，本发明的实施方式的光扫描设备100通过控制向光波导层20输入的光的波长 λ 、光波导层20的折射率 n_w 及光波导层20的厚度 d 中的至少一个，来控制光的射出方向。光的波长 λ 也可以在动作中不变化而维持为一定。在该情况下，能够以更简单的结构实现光的扫描。例如，波长 λ 可以包含于能由通常的通过用硅(Si)吸收光来检测光的光电检测器或图像传感器得到高的检测灵敏度的从 400nm 到 1100nm (从可视光到近红外光)的波段中。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从 1260nm 到 1625nm 的

近红外光的波段中。另外,这些波长范围是一例。使用的光的波段并不限定于可视光或红外光的波段,例如也可以是紫外光的波段。

[0217] 本发明人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否是可能的。光学解析是通过使用Cybernet公司的DiffractMOD的计算来进行。这是基于严格耦合波解析(RCWA:Rigorous Coupled-Wave Analysis)的模拟,能够正确地计算波动光学的效应。

[0218] 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具有将折射率相对低的低折射率层42及折射率相对高的高折射率层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(即,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。

[0219] 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中传输的光被向外部射出这样的逆过程。因此,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中传输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内发生由光的吸收及散射造成的损失。即,在发生大的损失的情况下,入射光与光波导层20较强地耦合。如果没有由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。但是,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。

[0220] 在本模拟中,假设基板50是Si,低折射率层42是SiO₂(厚度267nm),高折射率层44是Si(厚度108nm)。计算了将波长 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ 的光各种各样地改变角度而入射时的损失的大小。

[0221] 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 $\theta=0^\circ$ 。具有接近于 $n_w=2.2$ 的折射率的物质中,例如铈酸锂。

[0222] 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 $\theta=0^\circ$ 。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)。

[0223] 通过这样调整光波导层20的厚度d,能够设计为,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° 。

[0224] 如图4A及图4B所示,确认到射出角度 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,目前认为在这样的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 $\theta=0^\circ$ 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,即使是小的折射率变化,也能够大幅地调整射出角度。

[0225] 同样,由图4A及图4B的比较可知,确认到对应于光波导层20的厚度d的变化而射出

角度 θ 较大地变化。如后述那样,例如可以通过与两个镜的至少一方连接的致动器使厚度 d 变化。即使厚度 d 的变化小,也能够大幅地调整射出角度。

[0226] 这样,通过使光波导层20的折射率 n_w 及/或厚度 d 变化,能够改变从波导元件10射出的光的方向。同样,通过使向光波导层20输入的光的波长变化,也能够改变从波导元件10射出的光的方向。为了使射出光的方向变化,光扫描设备100可以具备使各波导元件10中的光波导层20的折射率、厚度及波长中的至少一个变化的第1调整元件。关于第1调整元件的结构例在后面叙述。

[0227] 如以上这样,如果使用波导元件10,则能够通过使光波导层20的折射率 n_w 、厚度 d 及波长 λ 中的至少一个变化,大幅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向沿着波导元件10的方向变化。通过使用一个以上的波导元件10,能够实现这样的一维的扫描。

[0228] 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方向上有扩展的射束光点 (beam spot)。通过使光波导层20的折射率、厚度、波长中的至少一个变化,能够使射束光点沿着X方向移动。由此,实现一维扫描。由于射束光点在Y方向上拥有扩展,所以即使是一轴方向的扫描,也能够将二维地扩展的比较大的区域扫描。在不需要二维扫描的用途中,也可以采用如图5所示的结构。

[0229] 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内传输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,则光的射出方向还向波导阵列的排列方向变化。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。

[0230] 如以上这样,通过使用一个以上的波导元件10使光波导层20的折射率、光波导层20的厚度及波长中的至少一个变化,能够使光的射出方向变化。本发明的实施方式的波导元件10与利用光的全反射的通常的全反射波导不同,具备光波导层被一对镜夹着的反射型波导的构造。关于这样的向反射型波导的光的耦合,到目前为止还没有充分地研究。本发明人们对于用来向光波导层20高效地导入光的构造也进行了研究。

[0231] 图6A是示意地表示经由空气及镜30间接地向光波导层20输入光的结构的例子的剖视图。在该例中,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间接地导入传输光。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 ,需要满足斯涅尔定律($n_{in} \sin \theta_{in} = n_w \sin \theta_w$)。这里, n_{in} 是外部介质的折射率, θ_{in} 是传输光的入射角, n_w 是光波导层20的折射率。通过考虑该条件来调整入射角 θ_{in} ,能够使光的耦合效率最大化。进而,在该例中,在第1镜30的一部分设有减少了多层反射膜的膜数的部分。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,需要根据起因于光波导层20的传输常数的变化的 θ_{wav} 的变化而使光向光波导层20的入射角 θ_{in} 变化。

[0232] 为了即使发生了光波导层20的传输常数的变化、也保持光总是能够与波导耦合的状态,有将有角度扩展的光束向减少了多层反射膜的膜数的部分入射的方法。图6B表示了这样的方法的一例。在该例中,从相对于镜30的法线方向以角度 θ_{in} 倾斜而配置的光纤7导入有角度扩展的光。对通过这样的结构从外部经由空气及镜30间接地将光入射到波导元件10的情况下的耦合效率进行了研究。

[0233] 为了简单,将光考虑为光线。通常的单模光纤的数值孔径 (NA) 是0.14左右。这如果

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程度。射出光的扩展角 θ_{div} 用以下的式(4)表示。

[0234] [数式4]

$$[0235] \quad \theta_{div} \approx \frac{\lambda}{L \cos \theta_{out}} \quad (4)$$

[0236] 这里,L是传输长度, λ 是光的波长, θ_{out} 是光的射出角。如果设L为 $10\mu\text{m}$ 以上,则 θ_{div} 即便大也是1度以下。因而,来自光纤7的光的耦合效率是 $1/16 \times 100\%$ (即,约6.3%)以下。进而,在图7中表示对将光的入射角 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进行计算的结果。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 $1.125\mu\text{m}$ 、将波长设为 $1.55\mu\text{m}$,计算耦合效率而得到。在该计算中,通过使折射率 n_w 在从1.44到1.78的范围中变化,使射出角 θ_{out} 在从 10° 到 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。

[0237] 这样,如果为了光扫描,通过使波导的折射率等变化而使传输常数变化,则耦合效率进一步下降。为了维持耦合效率,需要根据传输常数的变化而使光的入射角 θ_{in} 变化。但是,如果导入使光的入射角 θ_{in} 变化的机构,会导致装置结构的复杂化。

[0238] 本发明人们发现,通过在具有使折射率等变化的波导的区域的前级设置具有将折射率维持为一定的波导的区域,能够将光入射角固定。进而,本发明人们对将这2种波导连接而实现较高的光耦合效率的方法也进行了研究。

[0239] 在考虑不同的两个波导中的波导光的耦合时因素有2点。第一个是传输光的传输常数,第二个是模的电场强度分布。它们在两个波导中越接近,耦合效率越高。如果为了简单而以几何光学考虑,则波导中的传输光的传输常数 β 用 $\beta = k \cdot \sin \theta_w = (2\pi n_w \sin \theta_w) / \lambda$ 表示。设波数为k、波导角度为 θ_w 、光波导层的折射率为 n_w 。在全反射型的波导中,由于利用全反射将波导光封入在波导层中,所以满足作为全反射条件的 $n_w \sin \theta_w > 1$ 。另一方面,在慢光波导中,由存在于波导上下的多层反射膜将光封入在波导中,将波导光的一部分经过多层反射膜而射出,所以成为 $n_w \sin \theta_w < 1$ 。在全反射型波导和将波导光的一部分射出的慢光波导中,传输常数不能相等。如图8A所示的全反射波导的电场强度分布如图8B所示,在波导内拥有峰值,在波导外单调减小。另一方面,如图8C所示的慢光波导拥有如图8D所示的电场强度分布。在波导内具有峰值这一情况不变,但在图8C所示的慢光波导中,波导光在电介质多层膜内通过光的干涉而反射。因此,如图8D所示,电场强度较深地渗出到电介质多层膜中,并且振动性地变化。

[0240] 如以上这样,在全反射型波导和慢光波导中,波导光的传输常数、电场强度分布都较大地不同。因此,以往没有想到将全反射型波导直接与慢光波导相连。本发明人们发现,能够将全反射波导直接与具有可变的折射率及/或厚度的光波导层相连。

[0241] 进而,本发明人们发现,通过将这样的2种波导配置到共同的基板上,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。通常的波导可使用半导体工艺制作于基板上。例如,可以使用通过将利用蒸镀或溅镀等进行的成膜与利用光刻或蚀刻等进行的微细加工组合的制法。通过这样的制法,能够在基板之上制作波

导的构造。作为基板材料,可以举出Si、SiO₂、GaAs或GaN等。

[0242] 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,通过从夹着光波导层的一对镜中的一方的镜使光透射,使光射出。镜能够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、SiO₂、GaAs、GaN等的基板。

[0243] 通过在反射型波导上连接别的波导,能够将光导入到反射型波导。以下,说明这样的构造的例子。

[0244] 图9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的连接图。基板50A及基板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沿X方向延伸,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。通过将分别配置在不同的基板50A及基板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。

[0245] 为了从第1波导1向第2波导10高效地导入光,优选的是进行10nm量级的极高精度的对位。此外,即使进行了高精度的对位,在基板50A及基板50B的热膨胀系数不同的情况下,也有可能因温度变化而对位偏离。例如,Si、SiO₂、GaAs及GaN的热膨胀系数分别是约4、0.5、6及 $5(\times 10^{-6}/K)$,作为玻璃基材经常使用的BK7的热膨胀系数是 $9(\times 10^{-6}/K)$ 。不论作为各自的基材而组合哪种材料,都产生 $1 \times 10^{-6}/K$ 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)上的基板50A及基板50B的尺寸是1mm的情况下,通过1°C的温度变化,基板50A及基板50B的对位偏离1nm。进而,通过几十°C的温度变化,基板50A及基板50B的对位以从几十到百nm的量级较大地偏离。

[0246] 如果将第1波导及第2波导配置在相同的基板之上,则能够解决上述技术问题。通过将上述波导配置在共同的基板上,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波导的对位的偏离得到抑制。结果,能够从第1波导1向第2波导10更高效地导入光。

[0247] 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”。在本发明的一实施方式中,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,光向第1波导输入。第1波导使输入的光传输,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,例如也可以在端面之间有间隙。

[0248] 根据上述结构,通过将第1波导设置在第2波导(即波导元件)的前级,即使将向第1波导入射的光的入射角维持为一定,也能够抑制扫描的耦合效率的下降(即能量的损失)。

[0249] 将第1波导及第2波导配置在相同的基板之上的情况下,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波导的对位的偏离得到抑制。结果,能够从第1波导向第2波导高效地导入光。

[0250] <经由光栅的波导光耦合>

[0251] 本发明人们发现,通过将图9所示的结构改良,能够使光的耦合效率进一步提高。

[0252] 图10是示意地表示本发明的例示性的实施方式的光设备的剖视图。本实施方式及后述的本实施方式的变形例的全反射波导1及慢光波导10也可以适用于本发明的任何一个光设备。

[0253] 在本实施方式中,作为全反射波导的第1波导1的前端部处于作为慢光波导的第2波导10中的光波导层20的内部。以下,有将第1波导1称作“全反射波导1”、将第2波导10称作

“慢光波导10”的情况。当从Z方向观察时,在全反射波导1及慢光波导10重叠的区域101中,全反射波导1具备折射率沿着X方向以周期 p 变化的光栅15。图10所示的光栅15具有沿X方向排列的多个凹部。在图10中例示了4个凹部,但实际上可以设置更多个凹部。也可以代替多个凹部而设置多个凸部。光栅15中的沿X方向排列的凹部或凸部的个数例如优选的是4以上。此外,凹部或凸部的个数可以是4以上且64以下。在一例中,凹部或凸部的个数可以是8以上且32以下。在一例中,凹部或凸部的个数可以是8以上且16以下。凹部或凸部的个数可以根据各凹部或凸部的衍射效率来调整。各凹部或凸部的衍射效率依赖于其深度或高度、以及宽度等尺寸条件。因而,根据各凹部或凸部的尺寸来调整它们的个数,以使得作为光栅15整体能得到良好的特性。

[0254] 全反射波导1在区域101中,具有与镜30的反射面对置的第1表面 $1s_1$ 、以及与镜40的反射面对置的第2表面 $1s_2$ 。在图10所示的例子中,光栅15设置于全反射波导1的第1表面 $1s_1$ 。光栅15也可以设置于第2表面 $1s_2$ 。光栅15可以设置于全反射波导1的第1表面 $1s_1$ 及第2表面 $1s_2$ 中的至少一方。

[0255] 光栅15并不限于设置在全反射波导1与慢光波导10的界面,也可以设置在其他位置。此外,也可以设置多个光栅。在从与镜30的反射面垂直的方向观察时波导1及波导10重叠的区域101中,波导1及波导10的至少一部分可以包括一个以上的光栅。各光栅的折射率沿着波导1及波导10延伸的X方向而周期性地变化。

[0256] 全反射波导1中的位于光波导层20的外部的部分也可以被其他的电介质层支承,也可以被两个电介质层夹着。

[0257] 区域101的X方向上的尺寸例如可以是 $4\mu\text{m}$ 到 $50\mu\text{m}$ 左右。在这样的大小的区域101的内部,可以形成8周期到32周期左右的光栅15。慢光波导10中的区域101以外的区域102的X方向上的尺寸例如可以是 $100\mu\text{m}$ 到 5mm 左右。区域101的X方向上的尺寸例如是区域102的尺寸的几分之一到几分之一左右。但是,并不限于该尺寸,可根据需要的特性而决定各部件的尺寸。

[0258] 在区域101中,第1镜30也可以不具有比第2镜40高的透射率。在区域102中也是,在距区域101较近的区域中,第1镜30也可以不具有比第2镜40高的透射率。区域101是为了提高光的耦合效率而设置的。因此,在区域101的附近,慢光波导10并不一定需要射出光。

[0259] 设全反射波导1中的波导模的传输常数为 $\beta_1 = 2\pi n_{e1}/\lambda$,设慢光波导10中的波导模的传输常数为 $\beta_2 = 2\pi n_{e2}/\lambda$ 。 λ 是空气中的光的波长。 n_{e1} 及 n_{e2} 分别是全反射波导1及慢光波导10中的有效折射率(也称作等价折射率)。在全反射波导1内传输的光不与外部的空气耦合。这样的波导模的有效折射率是 $n_{e1} > 1$ 。另一方面,在慢光波导10中的光波导层20中传输的光的一部分被射出至外部的空气。这样的波导模的有效折射率是 $0 < n_{e2} < 1$ 。因而, β_1 和 β_2 较大地不同。因此,通常从全反射波导1向慢光波导10的波导光的耦合效率较低。

[0260] 在区域101中,在全反射波导1具备光栅15的情况下,发生起因于光栅15的衍射。在此情况下,全反射波导1中的波导模的传输常数 β_1 移位互易点阵 $2\pi/p$ 的整数倍。例如在通过-1次衍射而 β_1 移位到 $\beta_1 - (2\pi/p)$ 的情况下,只要适当地设定 p ,就能够使得 $\beta_1 - (2\pi/p) = \beta_2$ 成立。在此情况下,由于区域101中的两个传输常数一致,所以波导光从全反射波导1到慢光波导10以高的效率耦合。根据 $\beta_1 - (2\pi/p) = \beta_2$,周期 p 由以下的式(5)表示。

[0261] [数式5]

$$[0262] \quad p = \frac{\lambda}{n_{e1} - n_{e2}} \quad (5)$$

[0263] 由于是 $0 < n_{e2} < 1$, 所以周期 p 满足以下的式 (6)。

[0264] [数式6]

$$[0265] \quad \frac{\lambda}{n_{e1}} < p = \frac{\lambda}{n_{e1} - n_{e2}} < \frac{\lambda}{n_{e1} - 1} \quad (6)$$

[0266] 在慢光波导10中, 由于在区域101和其以外的区域102中是相同的波导模, 所以波导光以高的效率耦合。

[0267] 图11是表示使光经由光栅而从全反射波导向慢光波导传输时的电场分布的计算例的图。在计算中, 使用Synopsys公司的ModePROP。如图11所示, 在全反射波导1中传输的光经由光栅15向慢光波导10高效地传输。

[0268] 图11所示的例子中的计算条件如下。

[0269] 在全反射波导1中, 折射率是 $n_{w1} = 1.88$, Z方向的厚度是 $d_1 = 300\text{nm}$ 。在慢光波导10中, 折射率是 $n_{w2} = 1.6$, Z方向的厚度是 $d_2 = 2.1\mu\text{m}$ 。光栅中的凹部的数量是16。光栅的周期是 $p = 800\text{nm}$ 。各凹部的深度是200nm。在全反射波导1及慢光波导10中传输的光在空气中具有波长 $\lambda = 940\text{nm}$ 。全反射波导1中的传输模的光的有效折射率 n_{e1} 是1.69, 区域101中的慢光波导10中的传输模的光的有效折射率 n_{e2} 是0.528。

[0270] 在该例中, 从全反射波导1向慢光波导10的波导光的耦合效率是61.4%。确认到与不存在光栅15的结构、以及全反射波导1的端面和慢光波导10的端面直接连接的结构相比, 耦合效率大幅提高。

[0271] 为了比较, 如图12所示, 在不存在光栅的结构中也进行了同样的计算。除了不存在光栅以外, 计算条件与上述的条件相同。在此情况下, 耦合效率是1.8%。此外, 在全反射波导1的端面和慢光波导10的端面直接连接的结构中, 也确认了耦合效率停留在例如百分之几左右。

[0272] 接着, 说明全反射波导1及波导10中的波导模。

[0273] 图13A是表示全反射波导1中的波导模的电场强度分布的例子图。图13B是表示慢光波导10中的高次波导模的电场强度分布的例子图。在图13A及图13B所示的例子中, 表示了YZ平面中的电场强度分布。在图13B所示的例子中, 在第1镜30与第2镜40之间, 光波导层20处于两个非波导区域73之间。

[0274] 图13A所示的全反射波导1中的波导模是单模。图13B所示的慢光波导10中的波导模是式(3)中的 $m = 7$ 的高次模。全反射波导1中的有效折射率是 $n_{e1} = 1.69$, 慢光波导10中的有效折射率是 $n_{e2} = 0.528$ 。

[0275] 如图13A及图13B所示, 即使波导模的分布较大地不同, 通过夹着光栅15, 波导光的耦合效率也变高。

[0276] 慢光波导10中的高次模有以下的优点。在慢光波导10中, 光波导层20中的电场强度分布相对于整体的电场强度分布所占的比率在高次模下比低次模高。即, 在高次模中, 被封入在光波导层20中的光的量更多。因此, 相对于光波导层20的折射率的变化, 从慢光波导10射出的光的射出角度较大地变化。

[0277] 当然, 慢光波导10中的波导模并不限于式(3)中的 $m = 7$ 的高次模。通过调整式

(5)中的p,在慢光波导10中也能够激励出其他的波导模。

[0278] 在图10及图11所示的例子中,如果区域101中的全反射波导1与各镜的距离近,则可能发生以下的现象。在第1镜30及/或第2镜40具有比全反射波导1高的折射率的情况下,全反射波导1中的迅衰光有向第1镜30及/或第2镜40移动的趋势。结果,在全反射波导1中传输的光可能经由第1镜30及/或第2镜40向外部泄漏。因此,区域101中的全反射波导1与各镜的距离相离 $\lambda/4$ 以上。由此,能够抑制从全反射波导1向慢光波导10的波导光的耦合效率的下降。

[0279] 图14是表示光栅15中的各凹部的深度与波导光的耦合效率的关系的例子的图。在该例中,光的波长是940nm。全反射波导1的折射率 n_{w1} 是1.88。全反射波导1的厚度 d_1 是300nm。慢光波导10的折射率 n_{w2} 是1.68。慢光波导的厚度 d_2 是2.1 μm 。光栅15的周期p是800nm。光栅15中的凹部的数量是32。

[0280] 在图14所示的例子中,耦合效率在凹部的深度为0到0.13 μm 的范围中,随着该深度的增加而单调增加。在凹部的深度比0.13 μm 大的范围中,如果使凹部的深度增加,则耦合效率下降,然后振动。

[0281] 在图14所示的例子中,当凹部的深度为0.13 μm 时,耦合效率为约50%,成为最大。在该例中,在光栅15中的各凹部的深度是全反射波导1的厚度 d_1 的3分之1以上且15分之8以下的情况下,实现特别高的耦合效率。

[0282] 图14所示的结果可以如以下这样说明。全反射波导1的模与慢光波导10的模的耦合效率依赖于光栅15的构造。耦合效率与存在光栅15的区域中的全反射波导1的标准化电场分布和慢光波导10的标准化电场分布的重叠积分成比例。因此,如果光栅15中的凹部的深度增加,则通常光耦合效率变高。但是,如果耦合效率变得过高,则一度被变换为慢光模的波导光再次被变换为全反射波导的模。因此,光耦合效率下降。如果凹部进一步变深,则耦合效率再次增加,以后振动。

[0283] 图15是表示图14所示的例子中的凹部的深度是0.2 μm 的情况下的电场强度分布的图。如图示那样,在该条件下,被变换为慢光模的波导光的比例不高。

[0284] 图16是表示耦合效率对于光栅15中的凹部的个数的依赖性的例子的图。即使将凹部的深度设为与膜厚 d_1 相同程度,如果光栅构造的个数过少,则波导光的变换效率也变低。为了使耦合效率提高某种程度,凹部或凸部的个数例如可以设定为4个以上。

[0285] 在上述的例子中,将光栅中的每1周期的凹部的X方向的长度即占空比设为50%而进行了计算,但并不限定于50%。光栅的占空比也可以根据光栅的凹部的深度及数量而适当变更。波导光的耦合效率的最大值可以由光栅的凹部的深度、数量及占空比决定。

[0286] 接着,说明经由光栅15的全反射波导及慢光波导的连接的变化例。

[0287] 图17A至图17C是示意地表示图10所示的例子中的变形例的剖视图。在图17A至图17C所示的例子中,全反射波导1被电介质层51支承,电介质层51被第2镜40支承。在全反射波导1及慢光波导10中,共同地使用第2镜40。电介质层51例如由 SiO_2 形成。电介质层51的折射率 n_{sub} 比全反射波导1的折射率 n_{w1} 小。因而,在全反射波导1中传输的光不向电介质层51漏出。电介质层51也可以不被第2镜40支承。在区域101及区域102以外的区域中,也可以将第2镜40替换为与电介质层51相同材料的构造。

[0288] 在图17A所示的例子中,全反射波导1在第1表面 $1s_1$ 中具备光栅15。在图17B所示的

例子中,全反射波导1在第2表面 $1s_2$ 中具备光栅15。在图17C所示的例子中,全反射波导1在第1表面 $1s_1$ 及第2表面 $1s_2$ 双方中具备光栅15。

[0289] 这样,全反射波导1也可以在第1表面 $1s_1$ 及第2表面 $1s_2$ 中的至少一方中具备光栅15。

[0290] 图18A及图18B是示意地表示图10所示的例子的其他变形例的剖视图。在图18A及图18B所示的例子中,与图17A至图17C所示的例子同样,全反射波导1被电介质层51支承,电介质层51被第2镜40支承。

[0291] 在图18A及图18B的例子中,不是在全反射波导1,而是在第1镜30及/或第2镜40的反射面设置有光栅15。在图18A所示的例子中,慢光波导10在第1镜30的反射面中具备光栅15。在图18B所示的例子中,慢光波导10在第2镜40的反射面中具备光栅15。

[0292] 在图18A及图18B所示的例子中,全反射波导1与第1镜30及/或第2镜40的Z方向的距离比较近。由此,全反射波导1中的迅衰光被光栅15衍射。结果,与上述例子同样,能够提高从全反射波导1向慢光波导10的波导光的耦合效率。

[0293] 这样,慢光波导10也可以在第1镜30的反射面及第2镜40的反射面中的至少一方中具备光栅15。进而,也可以将图10及图17A至图17C所示的例子中的某一个与图18A或图18B所示的例子组合。即,也可以是,全反射波导1在第1表面 $1s_1$ 及第2表面 $1s_2$ 中的至少一方中具备光栅15,并且慢光波导10在第1镜30的反射面及第2镜40的反射面中的至少一方中具备光栅15。

[0294] 接着,说明慢光波导10的内部中的、全反射波导1的Y方向的宽度与光波导层20的Y方向的宽度的关系。

[0295] 图19A至图19D是示意地表示YZ平面中的全反射波导1及慢光波导10的配置关系的例子的剖视图。图19A至图19D表示从全反射波导1侧向X方向观察全反射波导1及慢光波导10时的构造。在图19A至图19D所示的例子中,两个非波导区域73被第1镜30和第2镜40夹着,光波导层20处于两个非波导区域73之间。光波导层20的平均折射率比各非波导区域73的平均折射率高。由此,光不漏出到非波导区域73而能够在光波导层20内传输。

[0296] 在图19A所示的例子中,全反射波导1没有被电介质层51支承。全反射波导1的Y方向的宽度比光波导层20的Y方向的宽度窄。

[0297] 在图19B所示的例子中,全反射波导1被电介质层51支承。全反射波导1的Y方向的宽度比光波导层20的Y方向的宽度窄。电介质层51的Y方向的宽度与全反射波导1的Y方向的宽度相同。

[0298] 在图19C所示的例子中,全反射波导1被电介质层51支承。全反射波导1的Y方向的宽度比光波导层20的Y方向的宽度窄。电介质层51的Y方向的宽度与光波导层20的Y方向的宽度相同。

[0299] 在图19D所示的例子中,全反射波导1被电介质层51支承。全反射波导1的Y方向的宽度与光波导层20的Y方向的宽度相同。电介质层51的Y方向的宽度与全反射波导1的Y方向的宽度相同。

[0300] 对波导光从全反射波导1向慢光波导10耦合时的光散射损失而言,图19C及图19D所示的例子中比图19A及图19B所示的例子中小。在图19A所示的例子中,光散射损失最大,在图19D所示的例子中,光散射损失最小。在图19D所示的例子中,全反射波导1的Y方向的宽

度与光波导层20的Y方向的宽度相同。由此,在慢光波导10的波导模中,区域101内的YZ平面中的电场强度分布与区域102内的YZ平面中的电场强度分布在大范围中重叠。因此,光散射损失最小。

[0301] 如图19C及图19D所示,如果电介质层51的Y方向的宽度与光波导层20的Y方向的宽度相同,则能够有效地降低光散射损失。

[0302] 图20是示意地表示慢光波导10的其他变形例的剖视图。在图20所示的例子中,表示了区域102的剖视图。如图20所示,各非波导区域73也可以包括两个以上的折射率不同的部件。在图20所示的例子中,光波导层20及两个非波导区域73包括由共同的材料45构成的区域。各非波导区域73包括部件46和共同的材料45。如果光波导层20的平均折射率比各非波导区域73的平均折射率高,则光不漏出到各非波导区域73而能够在光波导层20内传输。

[0303] 接着,说明全反射波导1中的位于光波导层20的外侧的部分的构造的例子。

[0304] 图21是示意地表示全反射波导及慢光波导的连接的例子图。

[0305] 在图21所示的例子中,在全反射波导1中的光波导层20的外侧,全反射波导1包括随着接近于慢光波导10而宽度即Y方向的尺寸单调增加的部分。即,全反射波导1的一部分具有锥形构造1t。距光波导层20远的部分处的全反射波导1的宽度 w_w 比作为耦合部的区域101中的全反射波导1的宽度 w_c 窄。 w_w 可以是 w_c 的例如100分之1到2分之1左右。在全反射波导1中的宽度较窄的波导部分1w与宽度较宽的波导部分1c之间存在锥形构造1t。如果采用这样的构造,则能够抑制在宽度较窄的波导部分1w中传输的光向宽度较宽的波导部分1c入射时的反射。

[0306] 光波导层20的至少一部分也可以具有能够调整折射率及/或厚度的构造。通过调整折射率及/或厚度,从第1镜30射出的光的方向中的X方向的分量变化。

[0307] 为了调整光波导层20的至少一部分的折射率,光波导层20也可以包含液晶材料或电光学材料。光波导层20可以被一对电极夹着。通过向一对电极施加电压,能够使光波导层20的折射率变化。

[0308] 也可以将光波导层20中的、区域101中的折射率和区域102中的折射率同时调整。但是,如果调整区域101中的折射率,则式(5)的条件可能变化。结果,从全反射波导1向慢光波导10的波导光的耦合效率可能下降。所以,也可以将区域101中的折射率维持为一定,仅能够调整区域102中的折射率。即使区域101及区域102中的折射率不同,在区域101与区域102的界面发生的波导光的反射的影响也较小。

[0309] 在此情况下,在上述的一对电极(称作“第1一对电极”)之间夹着光波导层20中的、与从垂直于第1镜的反射面的方向观察时重叠于第1波导的部分不同的部分。通过由未图所示的控制电路向一对电极施加电压,能够调整区域102中的上述至少一部分的折射率。

[0310] 只要如设计那样满足式(5)的条件就可以,但实际上,由于制造误差,有不满足式(5)的条件情况。为了这样的情况下的补偿,也可以对光设备赋予与区域102中的折射率的调整另行地调整区域101中的折射率的功能。

[0311] 在此情况下,除了上述第1一对电极以外,可以还设置第2一对电极。在第2一对电极之间夹着光波导层20中的、从垂直于第1镜的反射面的方向观察时重叠于第1波导的部分的至少一部分。控制电路通过向第1及第2一对电极独立地施加电压,能够独立地调整位于第1一对电极之间的光波导层的部分的折射率和位于第2一对电极之间的光波导层的部分

的折射率。

[0312] 为了调整光波导层20的厚度,例如也可以在第1镜30及第2镜40中的至少一方连接一个以上的致动器。控制电路通过控制一个以上的致动器而使第1镜30与第2镜40的距离变化,由此能够使光波导层20的厚度变化。如果光波导层20由液体形成,则光波导层20的厚度能够容易地变化。

[0313] 上述一个以上的致动器可以与区域102中的第1镜30及第2镜40的至少一方连接。通过致动器,能够使区域102中的光波导层102的厚度变化。此时,式(5)的条件不变化。

[0314] 上述一个以上的致动器也可以是两个致动器。一个致动器可以与区域101中的第1镜30及第2镜40中的至少一方连接。另一个致动器可以与区域102中的第1镜30及第2镜40中的至少一方连接。通过两个致动器,能够使区域101中的光波导层20的厚度和区域102中的光波导层20的厚度分别变化。由此,能够进行不像设计那样满足式(5)的条件的情况下的补偿。

[0315] 关于调整光波导层20的折射率及/或厚度的具体的结构的例子在后面叙述。

[0316] 由于制造误差,有光波导层20的厚度等尺寸从设计值偏离的情况。如果光波导层20的尺寸从设计值偏离,则式(5)中的有效折射率 n_{e2} 也发生误差。在此情况下,有波导光的耦合效率下降的问题。以下,说明波导光的耦合效率如何依赖于光波导层20的厚度。

[0317] 图22是表示图17A所示的例子中的光波导层的厚度与波导光的耦合效率的关系的图。横轴表示光波导层20的厚度 d_2 ,纵轴表示将波导光的耦合效率用最大值标准化的值。图22所示的例子中的计算条件如下。

[0318] 在全反射波导1中,折射率是 $n_{w1}=2.0$,Z方向的厚度是 $d_1=300\text{nm}$ 。在电介质层51中,折射率是 $n_{\text{sub}}=1.44$ 。在慢光波导10中,折射率是 $n_{w2}=1.61$ 。光栅中的凹部的数量是16。光栅的周期是 $p=795\text{nm}$ 。各凹部的深度是 85nm 。在全反射波导1及慢光波导10中传输的光在空气中具有波长 $\lambda=940\text{nm}$ 。

[0319] 如图22所示,耦合效率具有1个峰值。在上述的条件下,耦合效率在 $d_2=2.15\mu\text{m}$ 时成为最大。如果光波导层20的厚度从 $d_2=2.15\mu\text{m}$ 偏离,则耦合效率下降。

[0320] 为了抑制由制造误差引起的耦合效率的下降,在区域101中,也可以设置周期不同的多个光栅。通过设置这样的多个光栅,能够补偿光波导层20的厚度 d_2 的制造误差。

[0321] 在以下的实施方式中,多个光栅的折射率沿着X方向而周期性地变化。多个光栅中的至少两个光栅的周期相互不同。多个光栅各自的周期在式(6)的范围内。多个光栅分别可以具备与上述的任一个例子中的光栅相同的构造。本实施方式及后述的本实施方式的变形例的全反射波导1及慢光波导10也可以适用于本发明的任何光设备。

[0322] 图23A是示意地表示在图17A所示的例子中具有两个光栅的光设备的图。图23B是表示图23A所示的例子中的光波导层的厚度与波导光的耦合效率的关系的图。

[0323] 在图23A所示的例子中,光栅15a及光栅15b沿着X轴方向排列。图23B所示的例子中的计算条件如下。

[0324] 光栅15a及光栅15b中的凹部的数量都是16。光栅15a的周期是 $p_1=795\text{nm}$,光栅15b的周期是 $p_2=610\text{nm}$ 。各凹部的深度是 85nm 。其他的计算条件与图22所示的例子中的计算条件相同。

[0325] 如图23B所示,耦合效率在 $1.95\mu\text{m}<d_2<2.0\mu\text{m}$ 中具有宽度较窄的第1峰值,在 $2.1\mu\text{m}<$

$d_2 < 2.2\mu\text{m}$ 中具有平均下来宽度较宽的第2峰值。第1峰值的宽度较窄是因为因 d_2 的变化而 n_{e2} 较大地变化。第1及第2峰值分别起因于周期 $p_2 = 610\text{nm}$ 的光栅15b及周期 $p_1 = 795\text{nm}$ 的光栅15a。

[0326] 图23C是表示图23A所示的例子中的光波导层的厚度及区域101的折射率与波导光的耦合效率的关系的其他图。能够将多个周期与在上述的区域101中调整折射率的功能适当地组合。由此,如图23C所示,能够将波导光可耦合的 d_2 的范围不中断地扩大。

[0327] 在图23C所示的例子中,是周期 $p_2 = 610\text{nm}$ 及周期 $p_1 = 710\text{nm}$ 。如图23C所示,与周期 $p_2 = 610\text{nm}$ 对应的波导光可耦合的 d_2 的范围是 $1.92\mu\text{m} < d_2 < 2.03\mu\text{m}$,与周期 $p_1 = 710\text{nm}$ 对应的波导光可耦合的 d_2 的范围是 $2.01\mu\text{m} < d_2 < 2.12\mu\text{m}$ 。即,两个波导光可耦合的 d_2 的范围是 $1.92\mu\text{m} < d_2 < 2.12\mu\text{m}$,比各波导光可耦合的 d_2 的范围宽。在图23C所示的计算条件中,使区域101的折射率从1.52变化到1.68。其他的计算条件与图23B所示的例子中的计算条件相同。

[0328] 图23D是表示图23A所示的例子中的光波导层的厚度与波导光的耦合效率的关系的其他图。图23D所示的例子中的计算条件如下。

[0329] 黑圈是周期为610nm的仅一种的情况。其他的计算条件与图22所示的例子中的计算条件相同。白色的三角标记是光栅15a的周期 $p_1 = 630\text{nm}$ 、光栅15b的周期 $p_2 = 610\text{nm}$ 的情况。其他的计算条件与图23B所示的例子中的计算条件相同。

[0330] 在图23B所示的例子中,如果使 p_1 逐渐接近于 p_2 ,则第2峰值接近于第1峰值。由此,在将区域101中的折射率维持为一定的情况下,也如图23D所示的白色的三角标记那样混合存在两个峰值,能得到较宽的峰值。结果,波导光可耦合的 d_2 的范围变宽。

[0331] 如以上这样,如果在区域101中有多个光栅,则即使在光波导层20的厚度 d_2 中有制造误差,也能够抑制波导光的耦合效率的下降。

[0332] 在图23A中表示了周期相互不同的两个光栅15a及光栅15b,但也可以是周期相互不同的3个以上光栅。

[0333] 接着,说明具有周期不同的多个光栅的光设备的变形例。

[0334] 图24A至图24D是示意地表示图23A所示的例子中的变形例的剖视图。

[0335] 在图24A所示的例子中,全反射波导1在第2表面 $1s_2$ 中具备光栅15a及光栅15b。在图24B所示的例子中,全反射波导1在第1表面 $1s_1$ 及第2表面 $1s_2$ 双方中具备光栅15a及光栅15b。在图24C所示的例子中,慢光波导10在第1镜30的反射面中具备光栅15a及光栅15b。在图24D所示的例子中,慢光波导10在第2镜40的反射面中具备光栅15a及光栅15b。

[0336] 在本发明的实施方式中,全反射波导的第1表面 $1s_1$ 及第2表面 $1s_2$ 中的至少一方或第1镜30及第2镜40的反射面中的至少一方可以包括多个光栅。进而,也可以将图23A、图24A及图24B所示的例子中的某一个与图24C或图24D组合。即,在本发明的实施方式中,全反射波导的第1表面 $1s_1$ 及第2表面 $1s_2$ 中的至少一方以及第1镜30及第2镜40的反射面中的至少一方可以包括多个光栅。

[0337] 在上述的各例中,多个光栅包括沿X方向排列的两个以上的光栅。并不限于这样的形态,多个光栅也可以包括在Y方向上相邻的两个以上的光栅。这里,“相邻的两个以上的光栅”,既可以在Y方向上相接,也可以隔开间隔而相邻。

[0338] 图25A是示意地表示两个光栅沿Y方向排列的例子中的图。

[0339] 在图25A所示的例子中,光栅15a及光栅15b各自的Y方向的宽度是 $w_c/2$ 。也可以代

替Y方向的宽度较短,而在X方向上增加光栅15a及光栅15b各自的凹部的数量。由此,能够期待与图23A所示的例子同样的效果。在图23A所示的例子中,各自的Y方向的宽度是 w_c 的两个光栅15a及光栅15b沿着X方向排列。

[0340] “多个光栅在Y方向上相邻”的情况还包括沿着X方向的光栅的周期随着Y方向上的位置的变化而连续地变化的情况。

[0341] 图25B是示意地表示光栅的周期随着Y方向上的位置的变化而从 p_2 向 p_1 连续地变化的例子的图。这里, p_1 比 p_2 大。

[0342] 在图25B所示的例子中,全反射波导1中的波导模的传输常数 β_1 通过基于光栅15c的-1次衍射,从 $\beta_1 - (2\pi/p_2)$ 连续地移位到 $\beta_1 - (2\pi/p_1)$ 。因而,即使在光波导层20的厚度 d_2 中有制造误差,只要 $\beta_1 - (2\pi/p_2) \leq \beta_2 \leq \beta_1 - (2\pi/p_1)$,则波导光能够从全反射波导1向慢光波导10以高的效率耦合。

[0343] 多个光栅不需要在空间上分离。光栅也可以包含多个周期成分。在本说明书中,在这样的情况下,也解释为设置有“周期不同的多个光栅”。该光栅的折射率沿着X方向变化。多个周期成分的各周期满足式(6)。

[0344] 图26是示意地表示混合存在包含两个周期成分的光栅的例子的图。在图26所示的例子中,在光栅15m中两个不同的周期随机性地混合存在。

[0345] 可以通过对光栅15m的折射率的空间变化进行傅里叶变换来知道光栅15m包含多个周期成分。如果对折射率的空间变化 $n(x)$ 进行傅里叶变换,则能得到 $N(k) = \int n(x) \exp(-ikx) dx$ 的傅里叶成分。例如,在混合存在周期 p_1 及周期 p_2 这两个周期成分的情况下,傅里叶成分 $N(k)$ 在 $k = (2\pi/p_1)m_1$ 及 $k = (2\pi/p_2)m_2$ 具有峰值。 m_1 、 m_2 是整数。

[0346] 在区域101中有多个光栅的情况下也如上述那样,光波导层20的至少一部分也可以具有能够调整折射率及/或厚度的构造。此外,具有多个光栅的光设备也可以具备图19A至图21所示的各构造。

[0347] 通过构成具备多组全反射波导1及慢光波导10的组的光设备,还能够进行二维的光扫描。这样的光扫描设备具备沿Y方向排列的多个波导单元。各波导单元具备上述的全反射波导1及慢光波导10。在该光扫描设备中,多个移相器与多个波导单元分别连接。多个移相器分别包括与多个波导单元中的对应的1个波导单元的全反射波导1直接相连或经由其他波导相连的波导。通过使穿过多个移相器的光的相位之差分别变化,能够使从光扫描设备射出的光的方向中的Y方向的分量变化。也可以通过同样的构造来构成光接收设备。

[0348] 图27A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的两旁配置有非波导区域73(以下,也称作“间隔物(spacer)73”)的结构例的、YZ平面中的波导元件10的剖视图。间隔物73的折射率 n_{1ow} 比光波导层的折射率 n_w 低($n_{1ow} < n_w$)。间隔物73例如也可以是空气。间隔物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。

[0349] 图27B是示意地表示将图27A中的波导元件10沿Y方向排列的波导阵列10A的结构例的、YZ平面中的光扫描设备的剖视图。在图27B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。在第1镜30的宽度比光波导层20的宽度宽的情况下,能够减少波导光从不存在第1镜30的区域泄漏的情况。以往,包括多个反射型波导在内的将多个波导元件10阵列化时,并没有以下构思:通过使第1镜30及第2镜40中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。

[0350] 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。

[0351] 图28是示意地表示在光波导层20内、波导光在X方向上传输的图。由于 $n_w > n_{low}$,所以波导光一边在 $\pm Y$ 方向上通过全反射被关入,一边向X方向传输。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 $\pm Z$ 方向上被第1镜30及第2镜40反射,一边以比全反射角 θ_{in} 小的角度向X方向传输。此时,在不存在图27B所示的第1镜30的区域中,迅衰光不被反射而向外漏出。通过该没有想到的光损失,在光扫描中使用的光量可能下降。

[0352] 通过在多个波导元件10的排列方向上使第1镜30及第2镜40中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,能够减少上述没有想到的光损失。结果,在光扫描中使用的光量的下降得到抑制。

[0353] 图29A至图29C是表示在光向第1波导1输入的结构中、光向第1波导1的输入方法的例子。图29A表示光经由在第1波导1的表面设置的光栅5向第1波导1导入的例子。图29B表示光从第1波导1的端面输入的例子。图29C表示光从在第1波导1的表面设置的激光源6经由该表面输入的例子。图29C所示的结构例如在M.Lamponi et al.,“Low-Threshold Heterogeneously Integrated InP/SOI Lasers With a Double Adiabatic Taper Coupler”,IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS,VOL.24,NO.1,JANUARY 1,2012,pp 76-78.中公开。在本申请说明书中援用该文献的全部公开内容。根据以上的结构,能够高效地使光入射到第1波导1中。

[0354] 接着,说明使用多组本实施方式的第1波导1及第2波导10的组合(在本说明书中称作“波导单元”)实现二维的光的扫描的结构。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和控制各波导单元的调整元件(例如致动器及控制电路的组合)。调整元件使各波导单元中的第2波导10的光波导层20的折射率及厚度中的至少一方变化。由此,能够使从各第2波导10射出的光的方向变化。此外,通过向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说明那样,能够进行光的二维扫描。以下,更详细地说明用来实现二维扫描的实施方式。

[0355] <二维扫描的动作原理>

[0356] 在沿一方向排列有多个波导元件(即,第2波导)10的波导阵列中,通过从各个波导元件10射出的光的干涉,光的射出方向变化。通过调整向各波导元件10供给的光的相位,能够使光的射出方向变化。以下,说明其原理。

[0357] 图30A是表示向与波导阵列的射出面垂直的方向射出光的波导阵列的截面的图。在图30A中,还记载了在各波导元件10中传输的光的相移量。这里,相移量是以在左端的波导元件10中传输的光的相位为基准的值。本实施方式的波导阵列包括以等间隔排列的多个波导元件10。在图30A中,虚线的圆弧表示从各波导元件10射出的光的波面。直线表示通过光的干涉形成的波面。箭头表示从波导阵列射出的光的方向(即,波数矢量的方向)。在图30A的例子中,在各波导元件10的光波导层20中传输的光的相位都相同。在此情况下,光被向与波导元件10的排列方向(Y方向)及光波导层20延伸的方向(X方向)这两者垂直的方向(Z方向)射出。

[0358] 图30B是表示向与垂直于波导阵列的射出面的方向不同的方向射出光的波导阵列

的截面的图。在图30B的例子中,在多个波导元件10的光波导层20中传输的光的相位在排列方向上各相差一定量($\Delta \varphi$)。在此情况下,光被向与Z方向不同的方向射出。通过使该 $\Delta \varphi$ 变化,能够使光的波数矢量的Y方向的分量变化。

[0359] 从波导阵列向外部(这里假设为空气)射出的光的方向可以如以下这样定量地讨论。

[0360] 图31是示意地表示三维空间中的波导阵列的立体图。在由相互正交的X、Y及Z方向定义的三维空间中,设光被向空气射出的区域与波导阵列的边界面为 $Z=z_0$ 。该边界面包括多个波导元件10各自的射出面。在 $Z < z_0$ 中,在Y方向上以等间隔排列有多个波导元件10,多个波导元件10分别在X方向上延伸。在 $Z > z_0$ 时,被向空气射出的光的电场矢量 $E(x, y, z)$ 用以下的式(7)表示。

[0361] [数式7]

$$[0362] \quad E(x, y, z) = E_0 \exp[-j(k_x x + k_y y + k_z z)] \quad (7)$$

[0363] 其中, E_0 是电场的振幅矢量, k_x 、 k_y 及 k_z 分别是X、Y及Z方向上的波数(wave number), j 是虚数单位。在此情况下,被向空气射出的光的方向与在图31中用粗箭头表示的波数矢量(k_x, k_y, k_z)平行。波数矢量的大小用以下的式(8)表示。

[0364] [数式8]

$$[0365] \quad \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (8)$$

[0366] 根据 $Z=z_0$ 的电场的边界条件,与边界面平行的波数矢量分量 k_x 及 k_y 分别与波导阵列中的光的X方向及Y方向上的波数一致。这与式(2)的斯涅尔定律同样,相当于在边界面处、空气侧的光具有的面方向的波长与波导阵列侧的光具有的面方向的波长一致的条件。

[0367] k_x 等于在沿X方向延伸的波导元件10的光波导层20中传输的光的波数。在上述图2所示的波导元件10中,使用式(2)及式(3),用以下的式(9)表示 k_x 。

[0368] [数式9]

$$[0369] \quad k_x = \frac{2\pi}{\lambda} n_w \sin \theta_w = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{n_w^2 - \left(\frac{m\lambda}{2d}\right)^2} \quad (9)$$

[0370] k_y 根据相邻的两个波导元件10之间的光的相位差导出。设在Y方向上以等间隔排列的N根波导元件10的各自的Y方向的中心为 y_q ($q=0, 1, 2, \dots, N-1$),设相邻的两个波导元件10之间的距离(中心间距离)为 p 。此时,被向空气射出的光的电场矢量(式(7))在边界面内($Z=z_0$)的 y_q 及 y_{q+1} 中满足以下的式(10)的关系。

[0371] [数式10]

$$[0372] \quad E(x, y_{q+1}, z_0) = \exp[-jk_y(y_{q+1} - y_q)] E(x, y_q, z_0) = \exp[-jk_y p] E(x, y_q, z_0) \quad (10)$$

[0373] 在设定为使任意的相邻的两个波导元件10的相位差为 $\Delta \varphi = k_y p$ (一定)的情况下,则 k_y 满足以下的式(11)的关系。

[0374] [数式11]

$$[0375] \quad k_y = \frac{\Delta \varphi}{p} \quad (11)$$

[0376] 在此情况下, y_q 下的光的相位成为 $\varphi_q = \varphi_0 + q \Delta \varphi$ ($\varphi_{q+1} - \varphi_q = \Delta \varphi$)。即,相位 φ_q 沿着Y方向而一定($\Delta \varphi = 0$),或者成比例地增加($\Delta \varphi > 0$)或减少($\Delta \varphi < 0$)。在沿Y方向排

列的波导元件10不是等间隔的情况下,例如设定为使得相对于希望的 k_y, y_q 及 y_{q+1} 下的相位差为 $\Delta \varphi_q = \varphi_{q+1} - \varphi_q = k_y (y_{q+1} - y_q)$ 。在此情况下, y_q 下的光的相位成为 $\varphi_q = \varphi_0 + k_y (y_q - y_0)$ 。如果使用从式(10)及式(11)分别得到的 k_x 及 k_y ,则根据式(8)导出 k_z 。由此,能得到光的射出方向(即,波数矢量的方向)。

[0377] 例如,如图31所示,设射出光的波数矢量 (k_x, k_y, k_z) 与将该波数矢量射影到YZ平面上的矢量 $(0, k_y, k_z)$ 所成的角度为 θ 。 θ 是波数矢量与YZ平面所成的角度。使用式(8)及式(9),用以下的式(12)表示 θ 。

[0378] [数式12]

$$[0379] \quad \sin\theta = \frac{k_x}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}} = \frac{\lambda}{2\pi} k_x = \sqrt{n_w^2 - \left(\frac{m\lambda}{2d}\right)^2} \quad (12)$$

[0380] 式(12)与限于射出光与XZ平面平行的情况时的式(3)完全相同。根据式(12)可知,波数矢量的X分量依赖于光的波长、光波导层20的折射率及光波导层20的厚度而变化。

[0381] 同样,如图31所示,设射出光(0次光)的波数矢量 (k_x, k_y, k_z) 与将该波数矢量射影到XZ平面上的矢量 $(k_x, 0, k_z)$ 所成的角度为 α_0 。 α_0 是波数矢量与XZ平面所成的角度。使用式(8)及式(9),用以下的式(13)表示 α_0 。

[0382] [数式13]

$$[0383] \quad \sin\alpha_0 = \frac{k_y}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}} = \frac{\lambda}{2\pi} k_y = \frac{\Delta\phi\lambda}{2\pi p} \quad (13)$$

[0384] 根据式(13)可知,光的波数矢量的Y分量根据光的相位差 $\Delta\phi$ 而变化。

[0385] 这样,也可以代替波数矢量 (k_x, k_y, k_z) 而使用从式(12)及式(13)分别得到的 θ 及 α_0 来确定光的射出方向。在此情况下,表示光的射出方向的单位矢量可以表示为 $(\sin\theta, \sin\alpha_0, (1 - \sin^2\alpha_0 - \sin^2\theta)^{1/2})$ 。在光射出中,这些矢量分量必须都是实数,所以满足 $\sin^2\alpha_0 + \sin^2\theta \leq 1$ 。根据 $\sin^2\alpha_0 \leq 1 - \sin^2\theta = \cos^2\theta$ 可知,射出光在满足 $-\cos\theta \leq \sin\alpha_0 \leq \cos\theta$ 的角度范围中变化。由于 $-1 \leq \sin\alpha_0 \leq 1$,所以在 $\theta = 0^\circ$ 时,射出光在 $-90^\circ \leq \alpha_0 \leq 90^\circ$ 的角度范围中变化。但是,如果 θ 增加,则 $\cos\theta$ 变小,所以 α_0 的角度范围变窄。在 $\theta = 90^\circ$ ($\cos\theta = 0$)时,仅在 $\alpha_0 = 0^\circ$ 时光被射出。

[0386] 本实施方式的通过光的二维扫描只要至少有2根波导元件10就能够实现。但是,在波导元件10的根数少的情况下,上述 α_0 的扩展角度 $\Delta\alpha$ 变大。如果波导元件10的根数增加,则 $\Delta\alpha$ 变小。这可以如以下这样说明。为了简单,在图31中考虑 $\theta = 0^\circ$ 的情况。即,考虑光的射出方向与YZ平面平行的情况。

[0387] 假设从N根(N是2以上的整数)的波导元件10分别射出具有相同的射出强度及上述的相位 φ_q 的光。此时,从N根波导元件10射出的合计的光(电场)的振幅分布的绝对值在远场中与由以下的式(14)表示的F(u)成比例。

[0388] [数式14]

$$[0389] \quad F(u) = \left| \frac{\sin(Nu/2)}{\sin(u/2)} \right| \quad (14)$$

[0390] 其中,u由以下的式(15)表示。

[0391] [数式15]

$$[0392] \quad u = \frac{2\pi p}{\lambda} (\sin\alpha - \sin\alpha_0) \quad (15)$$

[0393] α 是在YZ平面中、将观测点及原点连结的直线与Z轴所成的角度。 α_0 满足式(13)。式(14)的 $F(u)$ 在 $u=0$ ($\alpha=\alpha_0$)时为 N (最大),在 $u=\pm 2\pi/N$ 时为0。如果将满足 $u=-2\pi/N$ 及 $2\pi/N$ 的角度分别设为 α_1 及 α_2 ($\alpha_1<\alpha_0<\alpha_2$),则 α_0 的扩展角度成为 $\Delta\alpha=\alpha_2-\alpha_1$ 。 $-2\pi/N<u<2\pi/N$ ($\alpha_1<\alpha<\alpha_2$)的范围的峰值通常被称作主瓣。在主瓣的两侧存在被称作旁瓣的多个小的峰值。如果将主瓣的宽度 $\Delta u=4\pi/N$ 与从式(15)得到的 $\Delta u=2\pi p \Delta(\sin\alpha)/\lambda$ 比较,则为 $\Delta(\sin\alpha)=2\lambda/(Np)$ 。如果 $\Delta\alpha$ 小,则为 $\Delta(\sin\alpha)=\sin\alpha_2-\sin\alpha_1=[(\sin\alpha_2-\sin\alpha_1)/(\alpha_2-\alpha_1)]\Delta\alpha\approx[d(\sin\alpha)/d\alpha]_{\alpha=\alpha_0}\Delta\alpha=\cos\alpha_0\Delta\alpha$ 。因此,扩展角度由以下的式(16)表示。

[0394] [数式16]

$$[0395] \quad \Delta\alpha = \frac{2\lambda}{Np\cos\alpha_0} \quad (16)$$

[0396] 因而,波导元件10的根数越多,越能够使扩展角度 $\Delta\alpha$ 变小,在远方也能够实现高精度的光扫描。同样的讨论在图31中对于 $\theta\neq 0^\circ$ 的情况也能够应用。

[0397] <从波导阵列射出的衍射光>

[0398] 从波导阵列,除了0次光以外还能够射出高次的衍射光。为了简单,考虑在图31中 $\theta=0^\circ$ 的情况。即,衍射光的射出方向与YZ平面平行。

[0399] 图32A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。在此情况下,如果没有相移($\alpha_0=0^\circ$),则向图32A所示的实线箭头的方向射出0次光及 ± 1 次光(根据 p 的大小,还能够射出更高次的衍射光)。如果从该状态赋予相移($\alpha_0\neq 0^\circ$),则如图32A所示的虚线箭头那样,0次光及 ± 1 次光的射出角度向相同的旋转方向变化。虽然也能够使用 ± 1 次光那样的高次光进行光束扫描,但在更简单地构成设备的情况下,仅使用0次光。为了避免0次光的增益减小,也可以通过使相邻的两个波导元件10之间的距离 p 比 λ 小,来抑制高次光的射出。即使是 $p>\lambda$,也可以通过将高次光在物理上阻断而仅使用0次光。

[0400] 图32B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。在此情况下,如果没有相移($\alpha_0=0^\circ$),则由于衍射角度超过90度,所以不存在高次的衍射光,仅0次光向前方射出。但是,在 p 是与 λ 接近的值的的情况下,如果赋予相移($\alpha_0\neq 0^\circ$),则有随着射出角度的变化而射出 ± 1 次光的情况。

[0401] 图32C是表示在 $p\approx\lambda/2$ 的情况下从波导阵列射出衍射光的状况的示意图。在此情况下,即使赋予相移($\alpha_0\neq 0^\circ$),也不射出 ± 1 次光,或者即使射出也以相当大的角度射出。在 $p<\lambda/2$ 的情况下,即使赋予相移,也不会射出高次的光。但是,也没有特别的因使 p 进一步变小带来的益处。因此, p 例如可以设定为 $\lambda/2$ 以上。

[0402] 图32A至图32C中的向空气射出的0次光及 ± 1 次光的关系可以如以下这样定量地说明。式(14)的 $F(u)$ 由于是 $F(u)=F(u+2\pi)$,所以是 2π 的周期函数。当 $u=\pm 2m\pi$ 时,为 $F(u)=N$ (最大)。此时,以满足 $u=\pm 2m\pi$ 的射出角度 α 射出 $\pm m$ 次光。将 $u=\pm 2m\pi$ ($m\neq 0$)附近的峰值(峰值宽度为 $\Delta u=4\pi/N$)称作光栅瓣。

[0403] 如果仅考虑高次光中的 ± 1 次光($u=\pm 2\pi$),则 ± 1 次光的射出角度 $\alpha\pm$ 满足以下的式(17)。

[0404] [数式17]

$$[0405] \quad \sin\alpha_{\pm} = \sin\alpha_0 \pm \frac{\lambda}{p} \quad (17)$$

[0406] 根据不射出+1次光的条件 $\sin\alpha_{+} > 1$,得到 $p < \lambda / (1 - \sin\alpha_0)$ 。同样,根据不射出-1次光的条件 $\sin\alpha_{-} < -1$,得到 $p < \lambda / (1 + \sin\alpha_0)$ 。

[0407] 对于射出角度 $\alpha_0 (> 0)$ 的0次光是否射出 ± 1 次光的条件如以下这样分类。在 $p \geq \lambda / (1 - \sin\alpha_0)$ 的情况下,射出 ± 1 次光双方。在 $\lambda / (1 + \sin\alpha_0) \leq p < \lambda / (1 - \sin\alpha_0)$ 的情况下,不射出+1次光但射出-1次光。在 $p < \lambda / (1 + \sin\alpha_0)$ 的情况下, ± 1 次光都不被射出。特别是,如果满足 $p < \lambda / (1 + \sin\alpha_0)$,则在图31中在 $\theta \neq 0^\circ$ 的情况下也不射出 ± 1 次光。例如,在不射出 ± 1 次光的情况下,为了达成单侧10度以上的扫描,设为 $\alpha_0 = 10^\circ$, p 满足 $p \leq \lambda / (1 + \sin 10^\circ) \approx 0.85\lambda$ 的关系。例如,如果将该式和关于与 p 相关的上述下限的条件组合,则 p 满足 $\lambda/2 \leq p \leq \lambda / (1 + \sin 10^\circ)$ 。

[0408] 但是,为了满足不射出 ± 1 次光的条件,需要使 p 非常小。这使波导阵列的制作变得困难。所以,考虑不论 ± 1 次光的有无,都将0次光在 $0^\circ < \alpha_0 < \alpha_{\max}$ 的角度范围中扫描。其中,假设 ± 1 次光在该角度范围中不存在。为了满足该条件,在 $\alpha_0 = 0^\circ$ 时,+1次光的射出角度必须是 $\alpha_{+} \geq \alpha_{\max}$ (即, $\sin\alpha_{+} = (\lambda/p) \geq \sin\alpha_{\max}$),在 $\alpha_0 = \alpha_{\max}$ 时,-1次光的射出角度必须是 $\alpha_{-} \leq 0$ (即, $\sin\alpha_{-} = \sin\alpha_{\max} - (\lambda/p) \leq 0$)。根据这些限制,得到 $p \leq \lambda / \sin\alpha_{\max}$ 。

[0409] 根据上述讨论,在扫描的角度范围中不存在 ± 1 次光的情况下的0次光的射出角度 α_0 的最大值 α_{\max} 满足以下的式(18)。

[0410] [数式18]

$$[0411] \quad \sin\alpha_{\max} = \frac{\lambda}{p} \quad (18)$$

[0412] 例如,在扫描的角度范围中不存在 ± 1 次光的情况下,为了达成单侧10度以上的扫描,设为 $\alpha_{\max} = 10^\circ$,满足 $p \leq \lambda / \sin 10^\circ \approx 5.76\lambda$ 。例如,如果将该式和关于与 p 有关的上述下限的条件组合,则 p 满足 $\lambda/2 \leq p \leq \lambda / \sin 10^\circ$ 。由于该 p 的上限($p \approx 5.76\lambda$)与不射出 ± 1 次光的情况下的上限($p \approx 0.85\lambda$)相比足够大,所以波导阵列的制作比较容易。这里,在使用的光不是单一波长的光的情况下,设使用的光的中心波长为 λ 。

[0413] 因为以上,为了对更大的角度范围进行扫描,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(16)中的射出光的扩展角度 $\Delta\alpha$ 变小,需要增加阵列中的波导的根数。关于阵列中的波导的根数,根据用途及被要求的性能而适当决定。阵列中的波导的根数例如也可以是16根以上,根据用途也可以是100根以上。

[0414] <向波导阵列导入的光的相位控制>

[0415] 为了控制从各个波导元件10射出的光的相位,例如在将光向波导元件10导入的前级,可以设置使光的相位变化的移相器。本实施方式的光扫描设备100具备分别与多个波导元件10连接的多个移相器、和调整在各移相器中传输的光的相位的第2调整元件。各移相器包括与多个波导元件10中的对应的一个的光波导层20直接相连或经由其他的波导相连的波导。第2调整元件通过使从多个移相器向多个波导元件10传输的光的相位的差分别变化,使从多个波导元件10射出的光的方向(即,第3方向D3)变化。在以下的说明中,与波导阵列同样,有将排列的多个移相器称作“移相器阵列”的情况。

[0416] 图33是表示移相器80直接连接于波导元件10的结构的例子的示意图。在图33中,

由虚线框包围的部分相当于移相器80。该移相器80包括上述的全反射波导1和配置在全反射波导1的附近的加热器68。加热器68通过来自外部的控制电路的控制而发热,使波导1内的折射率变化。由此,使在波导1内传输的光的相位变化。在该例中,移相器80包括上述的“第1波导”。这样,“第1波导”也可以作为移相器发挥功能。

[0417] 移相器80并不限于图33的结构。移相器80也可以包括与波导1连接的折射率可变的其他波导。在此情况下,通过将其他波导内的折射率调制,能够产生相移。该其他波导也可以是与波导元件10同样的慢光波导。能够通过和波导元件10同样的方法,产生折射率的调制。

[0418] 图34是将波导阵列10A及移相器阵列80A从光射出面的法线方向(Z方向)观察的示意图。在图34所示的例子中,全部的移相器80具有相同的传输特性,全部的波导元件10具有相同的传输特性。各个移相器80及各个波导元件10既可以是相同的长度,也可以长度不同。在各个移相器80的长度相等的情况下,例如能够通过驱动电压来调整各自的相移量。此外,也可以通过做成使各个移相器80的长度以等步长变化的构造,以相同的驱动电压带来等步长的相移。进而,该光扫描设备100还具备向多个移相器80将光分支而供给的光分路器90、驱动各波导元件10的第1驱动电路110、和驱动各移相器80的第2驱动电路210。图34中的直线的箭头表示光的输入。通过分别独立地控制分开设定的第1驱动电路110和第2驱动电路210,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。

[0419] 第1驱动电路110如后述那样,通过使各波导元件10的光波导层20的折射率及厚度中的至少一方变化,使从光波导层20射出的光的角度变化。第2驱动电路210如后述那样,通过使各移相器80的波导20a的折射率变化,使在波导20a的内部传输的光的相位变化。光分路器90既可以由通过全反射来传输光的波导构成,也可以由与波导元件10同样的反射型波导构成。

[0420] 另外,也可以在对由光分路器90分支后的各个光控制相位后,将各个光向移相器80导入。在该相位控制中,例如可以使用通过对到移相器80的波导的长度进行调整而实现的简单的相位控制构造。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控制的移相器。通过这样的方法,例如也可以在光被向移相器80导入之前调整相位,以向全部的移相器80供给等相位的光。通过这样的调整,能够使第2驱动电路210对各移相器80的控制变得简单。

[0421] 图35是示意地表示移相器80的波导与波导元件10的光波导层20经由其他波导85相连的结构的例子。其他波导85也可以是上述中的任一个第1波导1。各移相器80既可以具有与图33所示的移相器80相同的结构,也可以具有不同的结构。在图35中,将移相器80使用表示相移量的符号 φ_0 至 φ_5 简单地表现。在以后的图中也有使用同样的表现的情况。移相器80中,可以采用利用全反射使光传输的波导。

[0422] 图36是表示向光分路器90插入了以级联状排列的多个移相器80的结构例的图。在该例中,在光分路器90的路径的中途连接有多个移相器80。各移相器80对传输的光赋予一定的相移量 φ 。通过使各个移相器80对传输光赋予的相移量为一定,相邻的两个波导元件10之间的相位差成为相等。因而,第2调整元件能够向全部的移相器80发送共同的相位控制信号。因此,有结构变得简单的优点。

[0423] 为了使光在光分路器90、移相器80及波导元件10等之间有效地传输,可以利用波导。波导中,可以使用具有比周围的材料高的折射率且光的吸收少的光学材料。例如,可以使用Si、GaAs、GaN、SiO₂、TiO₂、Ta₂O₅、AlN、SiN等的材料。此外,为了使光从光分路器90向波导元件10传输,也可以使用上述中的任一个第1波导1。

[0424] 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。

[0425] <第1调整元件的例子>

[0426] 接着,说明对波导元件10中的光波导层20的折射率及厚度中的至少一方进行调整的第1调整元件的结构例。

[0427] 首先,说明调整折射率的情况下的结构例。

[0428] 图37A是示意性地表示第1调整元件60(以下,有简单称为调整元件的情况)的结构的一例的立体图。在图37A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中传输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。

[0429] 图37B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37A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,也能够改变射出光的方向。

[0430] 图37C是示意性地表示调整元件60的又一其它结构例的立体图。在该例中,一对电极62具有与镜30及镜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。

[0431] 在图37A至图37C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中传输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,来使光波导层20的折射率变化。关于电压的施加,能够由上述的第1驱动电路110(参照图34)来进行。

[0432] 在此,说明可以使用于各结构要素的材料的例。

[0433] 在镜30、镜40、镜30a及镜40a的材料中,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SiO₂、TiO₂、Ta₂O₅、Si、SiN等。各镜不限于多层膜镜,也可以由Ag、Al等金属形成。

[0434] 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。

[0435] 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(BaTi_3)、钽酸锂(LiTaO_3)、氧化锌(ZnO)、锆钛酸铅镧(PLZT)、钽酸铌酸钾(KTN)等。

[0436] 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。

[0437] 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材料的构造,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,使光波导层20的折射率变化。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“Free charge carrier induced refractive index modulation of crystalline Silicon”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37A至图37C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。

[0438] 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 $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ Crystal Waveguides”Jpn.J.Appl.Phys.,Vol.43,No.8B(2004),对于波长 $1.55\mu\text{m}$ 的光得到电光学常数 $g=4.8\times 10^{-15}\text{m}^2/\text{V}^2$ 。因此,当施加例如 $2\text{kV}/\text{mm}$ 的电场时,折射率变化0.1($=gn^3E^2/2$)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,使电光学材料的折射率变化。

[0439] 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,能够使液晶的折射率各向异性变化。由此,能够调制对于在光波导层20中传输的光的折射率。液晶一般具有0.1至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施加电压来使液晶材料的折射率各向异性变化,使光波导层20的折射率变化。

[0440] 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。

[0441] 图38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,来使光波导层20的折射率变化。

[0442] 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,由此使光波导层20的折射率变化。

[0443] 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的折射率的温度依赖性 dn/dT 是 $1.87 \times 10^{-4} (K^{-1})$ (参照“Temperature-dependent refractive index of silicon and germanium”, Proc. SPIE 6273, Optomechanical Technologies for Astronomy, 62732J)。因而,当使温度变化 $500^{\circ}C$ 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 $500^{\circ}C$ 这样的大的温度变化,也能够比较高速地进行。

[0444] 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至1GHz左右的响应速度。

[0445] 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。

[0446] 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。

[0447] 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,来使射出光的波数矢量的X分量变化。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射出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之间的距离来使光波导层20的厚度变化。下面,说明使光波导层20的厚度变化的结构的例。

[0448] 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的镜30和镜40中的至少一方移动,能够使光波导层20的厚度变化。此时,为了保持上下的镜30与镜40之间的平行度,可以采用使镜30或镜40的变形为最小限度的结构。

[0449] 图39是表示用由容易变形的材料构成的支承部件70保持了镜30的结构例的图。支承部件70可以包括与镜30相比相对地容易变形的厚度薄的部件或细的框架。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。

[0450] 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镜30及/或40移动。以下,说明这样的结构的一些例子。

[0451] 图40是表示通过在电极间发生的静电力使镜30及/或镜40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各自的一端被固定到镜30,另一端被固定到未图示的壳体。通过向一对电极62施加正负的电压而发生引力,镜30与镜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,镜30与镜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34)进行。

[0452] 图41是表示将产生引力的电极62配置在不妨碍光的传输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,被固定到镜30及镜40各自的电极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,能够进行计测镜30与镜40之间的距离、调整镜30与镜40的平行度等的反馈控制。

[0453] 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镜30及/或40。

[0454] 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。

[0455] 图42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42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。

[0456] 图43A是表示使用图42所示的压电元件72的具有单压电片的构造的支承部件74a的结构例的图。该支承部件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。通过将这种支承部件74a固定于镜30和镜40中的至少一方并使其变形,能够使镜30与镜40之间的距离变化。

[0457] 图43B是表示通过对压电元件72施加电压来支承部件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,因此支承部件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。

[0458] 图44A是表示使用图42所示的压电元件72的具有双压电片的构造的支承部件74b的结构例的图。该支承部件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。通过将这种支承部件74b固定于镜30和镜40中的至少一方并使其变形,能够使镜30与镜40之间的距离变化。

[0459] 图44B是表示通过对两侧的压电元件72施加电压来支承部件74a发生变形的状态的例的图。在双压电片中,在上下的压电材料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。

[0460] 图45是表示将图43A所示的支承部件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部件74a变形,能够改变镜30与镜40之间的距离。也可以代替图43A所示的支承部件74a而使用图44A所示的支承部件74b。

[0461] 此外,单压电片型的致动器以圆弧状发生变形,因此如图46A所示,在未固定的一侧的前端产生倾斜。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46B所示那样将伸缩的方向不同的两个单压电片型的支承部件74a串列地接在一起。在图46B的例中,在支承部件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前端产生倾斜。通过使用这种支承部件74a,能够抑制镜30和镜40倾斜。

[0462] 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。

[0463] 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,由此使镜30与镜40之间的距离变化。

[0464] 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一定。因此,一个致动器能够对全部波导元件10一并进行驱动。

[0465] 图47是表示用致动器将被支承部件(即,辅助基板)52保持的多个第1镜30一并进行驱动的结构例的图。在图47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。支承部件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。

[0466] 图48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47和图48的例那样,各波导元件10中的镜30和镜40中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镜30与镜40之间的距离。

[0467] <使用液晶材料的结构的具体例>

[0468] 接着,说明在光波导层20中使用液晶材料的结构的具体例。

[0469] 如上述那样,在利用了基于液晶的复折射效果的方法中,通过将包含液晶材料的光波导层20用电极62驱动,能够使液晶的折射率各向异性变化。由此,能够调制对于在光波导层20中传输的光的折射率。液晶通常具有0.1至0.2左右的复折射率差,所以通过用电场改变液晶的取向方向,能得到与复折射率差同等的折射率变化。这样,在利用液晶的复折射效果的结构中,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中的驱动电路通过对一对电极62施加电压,能够使液晶材料的折射率各向异性变化,使光波导层20的折射率变化。

[0470] 为了在电压施加时使折射率的变化变大,优选的是一对电极62的配置和液晶材料的取向方向即液晶分子的较长方向处于适当的关系。进而,优选的是作为向光波导层20输入的光而使用直线偏振光,将其偏振方向设定为适当的方向。

[0471] 液晶的复折射差起因于液晶分子的较长方向的介电常数与较短方向的介电常数不同。因此,通过根据入射光的偏振方向而适当地控制光波导层20内的液晶分子的取向方向,能够更有效地使折射率变化。

[0472] 图49A及图49B表示在光波导层20中使用液晶材料75的结构第1例。在图49A及图49B中,表示被一对电极62夹着的光波导层20和对一对电极62施加电压的驱动电路110。该例中的驱动电路110具备驱动电源111和开关元件112(以下,也称作开关112)。图49A表示开关112为OFF(断开)的状态,图49B表示开关112为ON(接通)的状态。

[0473] 一对电极62是透明电极。一对电极62虽然没有图示,但与第1及第2镜平行地配置。即,一对电极62配置为,当被施加电压时,在作为第1及第2镜的反射面的法线方向的Z方向上产生电场。如图49A所示,在没有对一对电极62施加电压的状态下,液晶分子76的较长方向与光波导层20延伸的方向(Y方向)平行。

[0474] 图49A及图49B中的实线箭头表示光的行进方向,虚线箭头表示偏振方向。在该例中,在光波导层20中被输入P偏振光。P偏振光是电场与光的入射面平行地振动的直线偏振光。光的入射面是由向各镜的反射面入射的光的方向和被反射的光的方向形成的面。在本实施方式中,光的入射面与YZ面大致平行。当设各镜的反射面中的光的入射角及反射角为 θ 时,P偏振的光的电场的振动方向是在YZ面内从Y方向倾斜了角度 θ 的方向。但是,在图49A、图49B及以后的图中,为了使与S偏振光的区别容易理解,设 θ 充分小,将表示P偏振光的偏振方向的虚线箭头与Y方向平行地表示。

[0475] 光波导层20的Z方向的尺寸(高度)例如可以设定为从 $0.1\mu\text{m}$ 至 $10\mu\text{m}$ 的范围内的值,更优选的是从 $0.2\mu\text{m}$ 至 $3\mu\text{m}$ 的范围内的值。光波导层20的X方向的尺寸(宽度)例如可以设定为从 $1\mu\text{m}$ 至 $100\mu\text{m}$ 的范围内的值,更优选的是从 $1\mu\text{m}$ 至 $30\mu\text{m}$ 的范围内的值。光波导层20的Y方向的尺寸(长度)例如可以设定为从 $100\mu\text{m}$ 至 100mm 的范围内的值,更优选的是从 1mm 至 30mm 的范围内的值。

[0476] 液晶材料例如可以是向列液晶。向列液晶的分子构造如下。

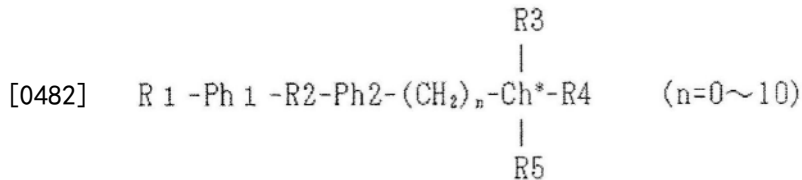
[0477] $R1-Ph1-R2-Ph2-R3$

[0478] 这里,这里,R1表示从由氨基、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。R3表示从由氨基、羰基、羧基、氰基、胺基、硝基、腈基及烷基链构成的组中选择的任一个。Ph1表示苯基或联苯基等芳香族基。Ph2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、重氮基及氧化偶氮基构成的组中选择的任一个。

[0479] 液晶不限于向列液晶。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)且是强介电性液晶的手征近晶相(SmC*相)。

[0480] SmC*相的分子结构如下表示。

[0481] [化学式1]



[0483] R1、R4是分别独立地从由氨基、羰基、羧基、氰基、胺基、硝基、腈基及烷基链构成的组中选择的任一个。Ph1是苯基或联苯基等芳香族基。Ph2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是从由氢、甲基、氨基、羰基、羧基、氰基、胺基、硝基、腈基及烷基链构成的组中选择的任一个。R5是从由氢、甲基、氨基、羰基、羧基、氰基、胺基、硝基、腈基及烷基链构成的组中选择的任一个。R3、R4及R5是互不相同的官能团。

[0484] 液晶材料也可以是成分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。

[0485] 通常,当向液晶单元内注入液晶材料时,在提高液晶单元的温度、增加液晶材料的流动性的状态下向液晶单元内注入液晶材料。因此,已知液晶分子在沿着注入时的流动的方向上取向的趋向较高。在向图49A所示的光波导层20注入液晶的情况下,如果从与光波导层20的XZ面平行的端面注入液晶材料,则液晶分子76与光波导层20的较长方向(Y方向)平行地取向。

[0486] 如图49A所示,在驱动电路110的开关元件112为OFF、即没有对光波导层20施加驱动电压的状态下,传输的光的偏振方向与液晶分子的较长方向接近于平行。严格地讲,偏振方向和液晶分子的较长方向如上述那样以角度 θ 交叉。在该状态下,光波导层20对于传输的光具有比较高的折射率。此时的液晶的折射率 $n_{//}$ 在使用通常的液晶材料的情况下大约是1.6至1.7左右。在该状态下,从光波导层20射出的光的射出角变得比较大。

[0487] 另一方面,如图49B所示,如果将驱动电路111的开关元件112设为ON、即向光波导层20施加驱动电压,则液晶分子76以相对于透明电极62垂直地竖起的方式取向。因此,传输的光的偏振方向与液晶分子的较长方向所成的角度接近于90度。严格地讲,偏振方向和液晶分子的较长方向以角度 $(90^\circ - \theta)$ 交叉。在该状态下,光波导层20对于传输的光具有比较低的折射率。此时的液晶的折射率 n_{\perp} 在使用通常的液晶材料的情况下大约是1.4至1.5左右。在该状态下,从光波导层20射出的光的射出角变得比较小。

[0488] 另外,图49B表示在图中的下侧的电极62与光波导层20之间有取向膜的例子。由于有取向膜,所以图中的下侧的液晶分子76不易竖起。这样的配光膜也可以设置于上侧的电极62。取向膜也可以不设置。

[0489] 这样,通过在光波导层20中使用液晶材料,能够通过施加电压的ON/OFF使折射率变化0.1至0.2左右。由此,能够使从光波导层20射出的光的射出角变化。

[0490] 另外,在该例中,驱动电路110具有驱动电源111和开关元件112,但并不限于这样的结构。例如,驱动电路110也可以代替开关元件112而使用电压放大器(voltage amplifier)那样的电压控制电路。通过使用这样的结构,能够使液晶分子76的取向连续地变化,能够控制为任意的射出角度。

[0491] 图50是示意地表示向光波导层20注入光的光输入装置113的结构例的剖视图。该例中的光输入装置113具有光源130、以及将从光源130射出的光传输并向光波导层20输入

的波导。该例中的波导1是与图33所示的结构同样的移相器80,但也可以是具有其他构造的波导。

[0492] 光源130射出具有在图50中的YZ面内振动的电场的直线偏振光。从光源130射出的直线偏振光经由移相器80向光波导层20入射,作为P偏振光传输。这样,光扫描设备也可以具备向光波导层20输入P偏振光的光输入装置113。可以如后述的例子那样构成为,在向光波导层20输入S偏振光、即具有在X方向上振动的电场的直线偏振光的情况下,光源130也射出S偏振光。

[0493] 图51A及图51B表示在光波导层20中使用液晶材料的结构的第2例。第2例与第1例不同的点是:入射光的偏振光是S偏振光,在没有向一对电极62施加电压的状态下,液晶分子76的取向方向是与光波导层20延伸的方向(X方向)以及各镜的法线方向(Z方向)双方垂直的方向(Y方向)。由于入射光是S偏振光,所以其电场的方向是与入射面垂直的Y方向。

[0494] 关于液晶分子76的取向方向,可以通过在插入液晶之前预先将作为液晶单元的上下电极62的表面研磨来控制取向方向。此外,通过在上下的电极62的表面上涂敷形成聚酰亚胺等的取向层(取向膜),能够控制取向方向。

[0495] 如图51A所示,在驱动电路110的开关元件112为OFF、即没有对光波导层20施加驱动电压的状态下,传输的光的偏振方向与液晶分子的较长方向大致平行。在该状态下,光波导层20对于传输的光具有比较高的折射率。此时的液晶的折射率 $n_{//}$ 在使用通常的液晶材料的情况下大约是1.6至1.7左右。在该状态下,从光波导层20射出的光的射出角变得比较大。

[0496] 另一方面,如图51B所示,如果将驱动电路111的开关元件112设为ON、即对光波导层20施加驱动电压,则液晶分子76以相对于透明电极62垂直地竖起的方式取向。因此,传输的光的偏振方向与液晶分子的较长方向所成的角度大致成为直角。在该状态下,光波导层20对于传输的光具有比较低的折射率。此时的液晶的折射率 n_{\perp} 在使用通常的液晶材料的情况下大约是1.4至1.5左右。在该状态下,从光波导层20射出的光的射出角变得比较小。

[0497] 在图51A及图51B所示的结构中,在没有被施加电压的状态下,偏振方向与液晶分子76的取向方向一致,在被施加高的电压的状态下,偏振方向与液晶分子76的取向方向正交。因此,与图49A及图49B所示的结构相比,对于相同电压的施加,能够使折射率更大地变化。因而,能够使光的射出角度更大地变化。另一方面,图49A及图49B所示的结构有容易制造的优点。

[0498] 图52A及图52B表示在光波导层20中使用液晶材料的结构的第3例。第3例与第1例不同的点是:入射光的偏振光是S偏振光,一对电极62在其之间夹着光波导层20而与XZ面平行地配置。该例中的一对电极62与第1镜30及第2镜40分别大致垂直地配置。一对电极62在被施加了电压时,在与光波导层20延伸的方向(X方向)及各镜的法线方向(Z方向)双方垂直的Y方向上产生电场。与第1例同样,在没有向一对电极施加电压的状态下,液晶材料的取向方向与光波导层20延伸的方向平行。

[0499] 如图52A所示,在驱动电路110的开关元件112是OFF、即没有对光波导层20施加驱动电压的状态下,传输的光的偏振方向与液晶分子的较长方向大致垂直。在该状态下,光波导层20对于传输的光具有比较低的折射率。此时的液晶的折射率 n_{\perp} 在使用通常的液晶材料的情况下大约是1.4至1.5左右。在该状态下,从光波导层20射出的光的射出角变得比较小。

[0500] 另一方面,如图52B所示,如果将驱动电路111的开关元件112设为ON、即向光波导

层20施加驱动电压,则液晶分子76的较长方向成为与光波导层20延伸的方向(X方向)以及镜30及镜40各自的法线方向(Z方向)双方垂直的方向(Y方向)。因此,传输的光的偏振方向与液晶分子的较长方向大致平行。在该状态下,光波导层20对于传输的光具有较高的折射率。此时的液晶的折射率 $n_{//}$ 在使用通常的液晶材料的情况下大约是1.6至1.7左右。在该状态下,从光波导层20射出的光的射出角变得比较大。

[0501] 图53A及图53B表示在光波导层20中使用液晶材料的结构的第4例。第4例与第3例不同的点是入射光的偏振光为P偏振光。

[0502] 如图53A所示,在驱动电路110的开关元件112为OFF、即没有向光波导层20施加驱动电压的状态下,传输的光的偏振方向与液晶分子的较长方向接近于平行。严格地讲,偏振方向与液晶分子的较长方向如上述那样以角度 θ 交叉。在该状态下,光波导层20对于传输的光具有较高的折射率。此时的液晶的折射率 $n_{//}$ 在使用通常的液晶材料的情况下大约是1.6至1.7左右。在该状态下,从光波导层20射出的光的射出角变得比较大。

[0503] 另一方面,如图53B所示,如果将驱动电路111的开关元件112设为ON、即向光波导层20施加驱动电压,则液晶分子76相对于透明电极62垂直地取向。因此,传输的光的偏振方向与液晶分子的较长方向大致垂直。在该状态下,光波导层20对于传输的光具有比较低的折射率。此时的液晶的折射率 n_{\perp} 在使用通常的液晶材料的情况下大约是1.4至1.5左右。在该状态下,从光波导层20射出的光的射出角变得比较小。

[0504] 如以上这样,在光波导层20中使用液晶材料的例子中,通过适当地设定光的偏振方向、液晶分子76的取向方向及一对电极62的配置,能够控制射出光的方向。不论入射光的偏振方向是P偏振还是S偏振,都能够使射出角度对应于驱动电压而变化,控制光线的方向。

[0505] 图54是表示在光波导层20中使用液晶材料的结构的、光的射出角度的施加电压依赖性的曲线图。该曲线图表示使用图49A及图49B所示的结构、一边使施加电压变化一边测量从光波导层20射出的光的射出角度的实验的结果。图55是表示在本实验中使用的波导元件的结构的剖视图。在该波导元件中,依次层叠有电极62b、作为多层反射膜的第2镜40、作为液晶层的光波导层20、作为多层反射膜的第1镜30及透明电极62a。在光波导层20的两侧形成有 SiO_2 的层。

[0506] 在本实验中,作为液晶材料而使用5CB(4-Cyano-4'-pentylbiphenyl)。0V时的液晶的取向方向是与光波导层20延伸的方向平行、即图55的纸面垂直方向。光波导层20的厚度是 $1\mu\text{m}$,光波导层20的宽度是 $20\mu\text{m}$ 。在测量中使用的光是具有 $1.47\mu\text{m}$ 的波长的TM偏振光(P偏振光)。电极62b成膜在第2镜40的多层反射膜与未图示的基板之间。在该实验中,由于2个多层反射膜配置在电极62a及电极62b之间,所以施加了比较高的电压。

[0507] 如图54所示,通过电压的施加,能够使射出角度变化约 15° 。在该实验中,使用图49A及49B所示的结构,但即使是其他的结构也能够得到同等以上的效果。

[0508] <使用电光学材料的结构的具体例>

[0509] 接着,说明在光波导层20中使用电光学材料的结构的具体例。

[0510] 在光波导层20包含电光学材料的光扫描设备中,光波导层20构成为,电光学材料的极化轴的方向与向一对电极62施加了电压时产生的电场的方向一致。通过这样构成,能够使通过向一对电极62施加电压而产生的电光学材料的折射率的变化变大。

[0511] 图56表示在光波导层20中使用电光学材料77的结构的具体例。在该例中,一对电极

62以在被施加了电压时在—对电极62间产生的电场的方向与光波导层20延伸的方向(X方向)及各镜的法线方向(Y方向)双方垂直的方向(Y方向)一致的形态配置。该例中的电光学材料的极化轴的方向是与光波导层20延伸的方向及各镜的法线方向双方垂直的Y方向。驱动电路110通过向—对电极62施加电压,使电光学材料对于在光波导层20中传输的光的折射率变化。

[0512] 电光学材料的极化轴的方向是指当施加了电场时折射率的变化为最大的方向。也有将极化轴称作光学轴的情况。在图56中,极化轴的方向由实线双箭头表示。沿着极化轴的方向上的折射率 n_e 对应于被施加的电压而变化。

[0513] 在本实施方式中可以使用的电光学材料例如可以是由 $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ 或 $\text{K}_{1-y}\text{A}_y\text{Ta}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ (A是碱金属,典型的是Li或Na)表示的化合物。 x 表示Nb的摩尔比, y 表示A的摩尔比。 x 及 y 分别独立,是大于0且小于1的实数。

[0514] 电光学材料也可以是以下的化合物的任一种。

[0515] • KDP(KH_2PO_4)型晶体:例如,KDP、ADP($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)、KDA(KH_2AsO_4)、RDA(RbH_2PO_4)或ADA($\text{NH}_4\text{H}_2\text{AsO}_4$)

[0516] • 立方晶系材料:例如,KTN、 BaTiO_3 、 SrTiO_3 、 $\text{Pb}_3\text{MgNb}_2\text{O}_9$ 、GaAs、CdTe或InAs

[0517] • 正方晶系材料:例如, LiNbO_3 或 LiTaO_3

[0518] • 闪锌矿型材料:例如, ZnS 、 ZnSe 、 ZnTe 、GaAs或CuCl

[0519] • 钨青铜型材料: KLiNbO_3 、 $\text{SrBaNb}_2\text{O}_6$ 、 KSrNbO 、 BaNaNbO 、 $\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ 如图56所示,使电光学材料的极化轴与垂直于—对电极62的方向对齐,由驱动电路110使向—对电极62施加的电压变化,由此能够使折射率变化。此时,通过使入射光为S偏振光,偏振光面与电光学材料的极化轴平行。因此,由电压带来的折射率变化最有效地反映到入射光中,能够使光的射出角度的变化变大。

[0520] 图57表示在光波导层20中使用电光学材料77的结构第2例。与图56的结构差异是—对电极62与未图示的第1镜及第2镜平行地配置。在该例中,在电压施加时在电极62间产生的电场的方向即各电极62的法线方向是Z方向,所以电光学材料的极化轴的方向也与该方向对齐。在该例中,通过使入射光为P偏振光,偏振光面与电光学材料的极化轴平行。因此,由电压带来的折射率变化被反映到入射光中,能够使光的射出角度的变化变大。

[0521] 这样,通过在光波导层20中使用电光学材料、使光的偏振方向及电光学材料的极化轴与电极62的垂直方向对齐、并控制所施加的驱动电压,能够使光的射出角度变化,控制光线的方向。

[0522] 图58A及图58B表示与镜30及镜40分别垂直的—对电极62的配置的其他例。在图58A的例子中,—对电极62仅配置在第2镜40的近旁。在图58B的例子中,—对电极62仅配置在第1镜30的近旁。如这些例子那样,—对电极62也可以仅设置在光波导层20的一部分的两侧。这些电极62也可以设置于支承第2镜40的基板或支承第1镜30的基板中的某一个。如图58A及图58B那样的结构还可以适用于光波导层20的材料是液晶材料及电光学材料中的任一种的情况。

[0523] 如以上这样,图49A至图58B所示的光扫描设备中的光波导层20包含液晶材料或电光学材料。液晶材料的取向方向或电光学材料的极化轴的方向在没有向—对电极62施加电压的状态下与光波导层20延伸的方向平行或垂直。驱动电路110通过向—对电极62施加电

压,使液晶材料或电光学材料对于在光波导层20中传输的光的折射率变化,由此使从光波导层20射出的光的方向变化。由此,通过适当地设定入射光的偏振方向,能够使光波导层20的折射率的变化变大,使光的射出角度的变化变大。

[0524] 另外,如上述那样,2个方向“平行”或“一致”,不仅包括严格地平行或一致的情况,还包括两者所成的角度是15度以下的情况。此外,2个方向“垂直”,并不意味着严格地垂直,而包括两者所成的角度是75度以上且105度以下的情况。

[0525] <用于相移的折射率调制>

[0526] 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37A至图38来说明的折射率调制的结构和方法。在与图37A至图38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。

[0527] 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传输的光的相位的差。

[0528] 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。

[0529] <用于同步驱动的结构>

[0530] 在本实施方式中,第1调整元件以使从多个波导元件10射出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射出的光的方向一致,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。

[0531] 图59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60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61是表示对多个波导元件10配置了共同的电极62的结构的例的图。在图59~图61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。

[0532] 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同化,则能够用一个驱动电路来使其进行动作。

[0533] 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36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。

[0534] <制造方法>

[0535] 波导阵列、移相器阵列80A以及将它们连接的波导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。通过这些工艺,能够在小的区域集成所需的要素。

[0536] 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、涂敷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。作为基板材料,例如能够使用Si、SiO₂、Al₂O₃、AlN、SiC、GaAs、GaN等。

[0537] <变形例>

[0538] 接着,说明本实施方式的变形例。

[0539] 图62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。

[0540] 图63是表示移相器阵列80Aa和移相器阵列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的两侧具有光分路器90a和光分路器90b以及移相器阵列80Aa和移相器阵列80Ab。在图63中用点线表示的直线的箭头表示在光分路器90a及光分路器90b和移相器80a及移相器80b中传输的光。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63中的左侧向波导阵列10A输入光的状态和从图63中的右侧向波导阵列10A输入光的状态。

[0541] 根据本变形例的结构,具有能够扩大从波导阵列10A射出的光在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63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63的结构中,能够在从正面观察时的图63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。

[0542] 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64A所示的结构。图64A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的光射出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射出方向d3二维地变化。

[0543] 图64B表示波导元件10的排列间隔并不一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64B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。

[0544] <在基板上配置有第1波导和第2波导的实施方式>

[0545] 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。

[0546] 本实施方式中的光扫描设备具备第1波导、与第1波导相连的第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波导相连,向与第1方向交叉的第2方向传输光。基板支承各波导单元中的第1波导和第2波导。

[0547] 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,传输被输入到所述第1波导且在第1波导中传输的光。第1镜具有比第2镜高的光透射率,将在光波导层内传输的光的一部分射出到光波导层的外部。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波导射出的光的方向。

[0548] 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波导的位置的偏离得以抑制。其结果,能够高效地从第1波导向第2波导入光。

[0549] 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输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波导射出的光的方向。

[0550] 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。

[0551] 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。

[0552] 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。

[0553] 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。

[0554] 图65A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。

[0555] 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、SiO₂、GaAs、GaN等材料来构成基板50。

[0556] 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。

[0557] 图65B是图65A中的用一个虚线表示的XZ平面上的光扫描设备的剖视图。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通常的波导。该波导例如包括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传输被输入到第1波导且在第1波导1中传输的光。

[0558] 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中传输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及电极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射出的光的方向。一对电极62a及电极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。

[0559] 在图65B的结构例中,在具有层叠的基板50和第2镜40的共同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。由于使用共同的支承体,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离得以抑制。支承体例如是支承基板。

[0560] 图65C是图65A中的用另一个虚线表示的YZ平面上的光扫描设备的剖视图。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。

[0561] 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方向传输光。上部电极62b和第1镜30也可以不分离。

[0562] 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。

[0563] 图66A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中的波导光被第2镜40吸收、散射或反射的间隔物的作用。第1波导1通过全反射来传输光。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SiO₂等电介质材料来形成调整层51。

[0564] 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。

[0565] 图66B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中的波导光的损失。下面,将第2电介质层61称为保护层61。

[0566] 图66B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。

[0567] 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中的波导光的损失。

[0568] 保护层61也可以由与调整层51相同的材料(例如SiO₂)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射出的光透射保护层61。因此,能够将光的损失抑制为较小。

[0569] 图67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中的波导光不受第2镜40的影响。

[0570] 图68是表示与图66B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中的波导光不易受到第2镜40的影响。在图68的例中,与图67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。

[0571] 第2镜40的厚度也可以沿着波导1变化。下面,说明这种例。

[0572] 图69A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。

[0573] 在图69A的例子中,在第1波导1的左部分之下不存在第2镜40。第1波导1的左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。

[0574] 在图69A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中的波导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中的波导光的损失得以抑制。

[0575] 图69B是表示上部电极62b、第1镜30以及第2基板50C跨第1波导1中的保护层61和第2波导10中的光波导层20之上而配置的结构例的图。图69C是表示图69B的结构例的制造过程的一部分的图。

[0576] 在图69B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。

[0577] 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。

[0578] 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69C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。

[0579] 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。

[0580] 图70是表示具有图69B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及第2镜40、以及电极62a及电极62b是由多个第2波导10共用的。在共同的电极62a及电极62b之间配置有多个光波导层20。多个光波导层20之间的区域是间隔物73。间隔物73例如是空气(或真空)、 SiO_2 、 TiO_2 、 Ta_2O_5 、 SiN 或 AlN 等透明材料。如果间隔物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。间隔物73也可以与相邻的光波导层20双方直接接触。

[0581] 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。

[0582] 图71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被对置的多层反射膜3及多层反射膜40夹着。第1波导1基于与第2波导10相同的原理传输光。如果多层反射膜3的厚度足够大,则不从第1波导1射出光。

[0583] 在图71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。

[0584] 接着,说明一对电极62a及电极62b的配置的变形例。在图65A至图71的例中,一对电极62a及电极62b与第2波导10中的光波导层20接触。在图65C和图70的例中,电极62a及电极62b中的一方或两方也可以由多个第2波导10共用。电极62a及电极62b的结构不限于于这种结构。

[0585] 图72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及电极62也可以隔着第1镜30及第2镜40间接地夹着光波导层20。

[0586] 在图72的例子中,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。

[0587] 在该例子中,一对电极62a及电极62不与光波导层20接触。光波导层20中的波导光不易受到因一对电极62a及电极62引起的吸收、散射或反射等影响。因此,光波导层20中的波导光的损失得以抑制。

[0588] 图73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相连。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也被分离为部分51a及部分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及电极62b的配置与图72中的配置同样。

[0589] 在图73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传输光。在该例中,与图69A的例不同地,不需要使第2镜40的厚度沿着第1波导的第1部分1a及第2部分1b变化。

[0590] 图74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74中的左右方向的电场。

[0591] 在图74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中的波导光的损失。

[0592] 在图65A至图74的结构例中,使用于扫描的光通过第1镜30被射出。使用于扫描的光也可以通过第2镜40被射出。

[0593] 图75是表示第1镜30厚、且第2镜40薄的结构的例的图。在图75的例中,光透射第2镜40而从基板50一侧射出。该例中的基板50由具有透光性的材料构成。通过将基板50射出的光使用于扫描,光扫描设备的设计自由度增加。

[0594] <与镜的宽度有关的研究>

[0595] 图76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76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是一个相连的镜的一部分。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。

[0596] 当波导光在光波导层20内沿X方向传输时,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。

[0597] [数式19]

$$[0598] \quad I = I_0 \exp\left(-\frac{y}{y_d}\right) \quad (19)$$

[0599] 其中,当设来自光波导层20的迅衰光的光强度为来自光波导层20的端面处的光波导层20的迅衰光的光强度的 $1/e$ 的位置的、与光波导层20的端面相距的Y方向上的距离为 y_d 时, y_d 满足以下的式子。

[0600] [数式20]

$$[0601] \quad y_d = \frac{\lambda}{4\pi \sqrt{n_w^2 \sin^2 \theta_{in} - n_{low}^2}} \quad (20)$$

[0602] I_0 是 $y=0$ 时的该迅衰光的光强度。在图28中表示了全反射角 θ_{in} 。在 $y=y_d$ 时,该迅衰光的光强度I为 I_0 的 $1/e$ 。 e 是自然对数的底。

[0603] 为了简单,如图28所示,将光波导层20内的波导光近似为光线。如图76的结构例所示,在第1镜30在 $y>y_1$ 时不存在的情况下, $y=0$ 时的波导光的1次的反射所带来的光的泄漏或光损失(L_{loss})用以下的式子表示。

[0604] [数式21]

$$[0605] \quad L_{loss} = \frac{\int_{y_1}^{\infty} I_0 \exp\left(-\frac{y}{y_d}\right) dy}{\int_0^{\infty} I_0 \exp\left(-\frac{y}{y_d}\right) dy} = \exp\left(-\frac{y_1}{y_d}\right) \quad (21)$$

[0606] 如式(4)所示,为了使来自波导元件10的射出光的扩展角 θ_{div} 成为 0.1° 以下,波导元件10的X方向上的传输长度L优选的是1mm以上。此时,如果设Y方向上的光波导层20的宽度为a,则在图28中, $\pm Y$ 方向上的全反射的次数是 $1000/(a \cdot \tan\theta_{in})$ 以上。在 $a=1\mu\text{m}$ 及 $\theta_{in}=45^\circ$ 时,全反射的次数是1000次以上。如果使用表示1次的反射中的光损失的式(21),则 β 次的反射中的光损失用以下的式子表示。

[0607] [数式22]

$$[0608] \quad L_{loss}^{(\beta)} = 1 - \left\{1 - \exp\left(-\frac{y_1}{y_d}\right)\right\}^\beta \quad (22)$$

[0609] 图77是表示 $\beta=1000$ 的情况下的光损失($L_{loss}^{(\beta)}$)的比例及 y_1 的关系的图。纵轴是光损失的比例,横轴是 y_1 。如图77所示,为了使光损失的比例成为50%以下,例如满足 $y_1 \geq 7y_d$ 。同样,为了使光损失的比例成为10%以下,例如满足 $y_1 \geq 9y_d$ 。为了使光损失的比例成为1%以下,例如满足 $y_1 \geq 11y_d$ 。

[0610] 如式(21)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。

[0611] 图78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剖视图。在图78的结构例中,第1镜30及第2镜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是一个相连的镜的一部分,各波导元件10的第2镜40是一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。

[0612] 接着,利用数值计算来比较图27B及图78的结构例中的来自光波导层20的迅衰光的漏出。

[0613] 图79A是表示图27B的结构例的电场强度分布的计算结果的图。图79B是表示图78的结构例的电场强度分布的计算结果的图。在数值计算中使用Synopsys公司的FemSim。在图79A及图79B中,Y方向上的光波导层20的宽度是 $1.5\mu\text{m}$,Z方向上的光波导层20的厚度是 $1\mu\text{m}$,光的波长是 $1.55\mu\text{m}$, $n_w=1.68$ 及 $n_{low}=1.44$ 。 n_w 及 n_{low} 的该组合例如相当于将光波导层20中含有的液晶材料通过 SiO_2 的间隔物73封入的情况。

[0614] 如图79A所示,可知在图27B的结构例中,迅衰光从不存在第1镜30的区域漏出。另一方面,如图79B所示,在图78的结构例中,可以忽视这样的迅衰光的漏出。在图79A及图79B中,当波导光沿X方向传输时,由于从第1镜30的光射出及迅衰光的漏出,波导光的光强度减少。如果计算该波导光的光强度成为 $1/e$ 的、X方向上的光的传输长度,则该光的传输长度在图79A及图79B中分别是 $7.8\mu\text{m}$ 及 $132\mu\text{m}$ 。

[0615] 在本实施方式中,间隔物73也可以由两个以上的不同的介质构成。

[0616] 图80是示意地表示在本实施方式中、间隔物73包括具有不同的折射率的间隔物73a、73b的结构例的、YZ平面中的光扫描设备的剖视图。在图80的结构例中,与光波导层20相邻的间隔物73a的折射率 n_{low1} 比不与光波导层20相邻的间隔物73b的折射率 n_{low2} 高($n_{low1} > n_{low2}$)。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,作为间隔物73a也可以使用 SiO_2 。间隔物73b也可以是空气。如果间隔物73b的折射率 n_{low2} 低,则能够抑制迅衰光从光波导层20渗出。

[0617] 图81是示意地表示本实施方式的变形例的波导元件10的结构例的、YZ平面中的光扫描设备的剖视图。在图81的结构例中,光波导层20在YZ平面中具有梯形的截面。第1镜30不仅配置在光波导层20的上边上,还配置在左右的边上。由此,能够抑制从光波导层20的左右的边的光的泄漏。

[0618] 接着,说明光波导层20及间隔物73的材料。

[0619] 在图76、图78及图80的结构例中,光波导层20的折射率 n_w 和间隔物73的折射率 n_{low} 满足 $n_w > n_{low}$ 的关系。即,间隔物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,间隔物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,间隔物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,能够使包含电光学材料或液晶材料的光波导层20的折射率变化。由此,能够使从第1镜30射出的光的射出角度变化。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是上述那样的。

[0620] 也可以通过将第1镜30与其以外的结构贴在一起形成图78和图80的结构例。由此,制造变得容易。另外,如果间隔物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。

[0621] 在图76、图78以及图80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及第2镜40中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的迅衰光的漏出。其结果,使用于光扫描的光量的降低得以抑制。

[0622] <关于光波导层及间隔物的讨论>

[0623] 接着,详细地说明第1镜30与第2镜40之间的光波导层20(以下也称作“光波导区域20”)及间隔物73(以下也称作“非波导区域73”)的结构对波导模带来的影响。在以下的说明中,“宽度”是指Y方向上的尺寸,“厚度”是指Z方向上的尺寸。

[0624] 将图78的结构例设为波导模的计算模型。在计算中使用的参数如下。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12对而成的多层反射膜,第2镜40是将相同的2种材料层叠17对而成的多层反射膜。光波导区域20的厚度是 $h=0.65\mu m$,光波导区域20的折射率是1.6。非波导区域73的厚度是 $h=0.65\mu m$,非波导区域73的折射率是1.45。光的波长是 $\lambda=940nm$ 。

[0625] 使非波导区域73的宽度比光波导区域20的宽度足够大,计算改变了光波导区域20的宽度时的波导模的电场分布。由此,得到在图79A及图79B的例子中所示的依赖于Y方向及Z方向的电场分布。通过将依赖于Y方向及Z方向的电场分布在Z方向上积分,得到Y方向上的电场分布。为了计算Y方向上的电场分布的方差 σ ,进行使用高斯函数的拟合。在高斯函数中,在 $-3\sigma \leq Y \leq 3\sigma$ 的范围中存在99.73%的分量。所以,设 6σ 相当于Y方向上的电场分布的展宽而进行分析。以下,“电场的展宽”是指Y方向上的 6σ 的电场的展宽。

[0626] 图82是表示光波导区域20的宽度与电场的展宽的关系的图。如图82的例所示,在光波导区域20的宽度为 $w=3\mu m$ 以上时,波导模的电场的展宽比光波导区域20的宽度小。在光波导区域20的宽度为 $w=3\mu m$ 以下时,波导模的电场的展宽比光波导区域20的宽度大,渗出到非波导区域73。

[0627] 接着,说明非波导区域73包括多个部件的结构例。

[0628] 图83是示意地表示本实施方式的光波导区域20及非波导区域73的结构例的光扫描设备的剖视图。

[0629] 本实施方式的光扫描设备具备第1镜30及第2镜40、两个非波导区域73和光波导区域20。

[0630] 第1镜30具有光透射性,第2镜40与第1镜30对置。

[0631] 两个非波导区域73在第1镜30及第2镜40之间在Y方向上隔开间隙而排列。Y方向与第1镜30及第2镜40中的至少一方的反射面平行。

[0632] 光波导区域20位于第1镜30与第2镜40之间且两个非波导区域73之间。光波导区域20具有比非波导区域73的平均折射率高的平均折射率。光波导区域20沿着X方向传输光。X方向与第1镜30及第2镜40中的至少一方的反射面平行、并且与Y方向垂直。

[0633] 光波导区域20及两个非波导区域73各自包括由共同的材料45构成的区域。光波导区域20或两个非波导区域73各自还包含具有与共同的材料45不同的折射率的一个以上的部件46。如图示那样,该一个以上的部件46也可以与第1镜30及第2镜40中的至少一方相接。

[0634] 第1镜30具有比第2镜40高的光透射率。第1镜30将在光波导区域20内传输的光的一部分从光波导区域20向与XY平面交叉的方向射出。XY平面是由X方向及Y方向形成的平面。外部的调整元件使光波导区域20的折射率及/或厚度变化。由此,从光波导区域20射出的光的方向变化。更具体地讲,通过调整元件,射出的光的波数矢量的X分量变化。

[0635] 在图83的例子中,光波导区域20及两个非波导区域73各自包含共同的材料45,两个非波导区域73各自包含部件46。部件46与第2镜40相接。当部件46的折射率 n_1 比共同的材料45的折射率 n_2 低时,光波导区域20的平均折射率比非波导区域73的平均折射率高。由此,光能够在光波导区域20中传输。共同的材料45及部件46分别例如可以是来自由SiO₂、TaO₂、TiO₂、Al₂O₃、SiN、AlN或ZnO构成的组中选择的一种材料。在Z方向上,当部件46的尺寸是第1镜30与第2镜40之间的距离(以下,称作“镜间距离”)的 r 倍($0 \leq r \leq 1$)时,非波导区域73的平均折射率是 $n_{ave} = n_1 \times r + n_2 \times (1 - r)$ 。以下,“部件的尺寸”是指Z方向上的部件的尺寸。

[0636] 在图83的例子中,更详细地分析了波导模。第1镜30及第2镜40的结构与在图82的计算中使用的结构相同。在计算中使用的折射率是 $n_1 = 1.45$ 及 $n_2 = 1.6$ 。光波导区域20的宽度是 $w = 6\mu\text{m}$ 。光波导区域20的宽度也是两个分离的非波导区域73的距离。光波导区域20的厚度是 $h = 0.65\mu\text{m}$ 或 $2.15\mu\text{m}$ 。 $0.65\mu\text{m}$ 及 $2.15\mu\text{m}$ 的厚度分别与式(9)中的2次($m = 2$)及7次($m = 7$)的模对应。非波导区域73的厚度与光波导区域20的厚度相同。以下表示调查根据部件46的尺寸相对于镜间距离的比 r ,波导模的电场的展宽如何变化。

[0637] 图84A是表示 $r = 0.1$ 及 $h = 2.15\mu\text{m}$ 下的波导模的电场分布的计算结果的图。图84B是表示 $r = 0.5$ 及 $h = 2.15\mu\text{m}$ 下的波导模的电场分布的计算结果的图。不管在哪种情况下,都能够确认到存在与图79B所示的波导模同样的波导模。可知在图84A所示的 $r = 0.1$ 时,与图84B所示的 $r = 0.5$ 时相比,电场分布在Y方向上扩展。

[0638] 图85是表示光波导区域20的宽度是 $w = 6.0\mu\text{m}$ 下的、部件46的尺寸相对于镜间距离的比 r 与电场的展宽的关系的图。光波导区域20的厚度是 $h = 0.65\mu\text{m}$ ($m = 2$,图中的实线)或 $h = 2.15\mu\text{m}$ ($m = 7$,图中的点线)。如图85所示,使 r 越小、即,使部件46的尺寸越小,电场的展宽越大。在2次及7次的波导模中,电场的展宽显示几乎相同的动态。特别是,在 $r \leq 0.2$ 时,可知电场的展宽急剧地变大,超过了光波导区域20的宽度($w = 6.0\mu\text{m}$)。

[0639] 图86是表示图85的例子的、部件46的尺寸相对于镜间距离的比 r 与波导模的衰减系数的关系的图。如图86所示,即使使 r 变化,衰减系数的数量级(10^{-5})也几乎相同。即,衰减系数几乎不依赖于 r 。但是,如果电场扩展到非波导区域73,则可能因各种各样的因素而散射或吸收增大。例如,在非波导区域73的端部不平滑时、在非波导区域73中存在微粒时、或在非波导区域73自身吸收光时,在光波导区域20中传输的光发生损失。因而,优选的是满足作为电场的展宽不渗出到非波导区域73中的条件的 $r \geq 0.2$ 。

[0640] 接着,分析光波导区域20的宽度、即两个分离的非波导区域73的距离是 $w = 3\mu\text{m}$ 的结构例。这如 $r = 1$ 的图82所示,是电场的展宽正好为与光波导区域20的宽度相同程度的条件。

[0641] 图87是表示光波导区域20的宽度是 $w = 3.0\mu\text{m}$ 时的、部件46的尺寸相对于镜间距离的比 r 与电场的展宽的关系的图。与图85所示的例子同样,可知在 $r \leq 0.2$ 时,电场的展宽急剧地变大。在 $r < 0.1$ 时,电场的展宽超过 $6\mu\text{m}$ 。

[0642] 即使波导模的电场过度扩展,在使用单体的光波导区域20构成光扫描设备时也没有问题。但是,在将光波导区域20阵列化的光扫描设备中,最好避免波导模的电场的过度扩展。在该光扫描设备中,在被两个光波导区域20夹着的非波导区域73的宽度是 $3\mu\text{m}$ 以下的情况下,光波导区域20的波导模的电场与旁边的光波导区域20的波导模的电场在非波导区域73中重合。结果,可能发生在光波导区域20中传输的光的至少一部分传输到旁边的光波导区域20中的串扰现象。串扰现象有可能对从多个光波导区域20射出的光的干涉效应带来影响。

[0643] 因为上述的理由,在本实施方式中,例如设定为 $r \geq 0.1$ 。进而,如果是 $r \geq 0.2$,则能够使得几乎全部的电场分布在光波导区域20的内部。即使是 $r < 0.1$,只要非波导区域73的宽度比光波导区域20的宽度大,则也能够避免串扰现象。即,在其他实施方式的光扫描设备中,也可以设为 $r < 0.1$ 。

[0644] 在本实施方式的光扫描设备中,通过对共同的材料45使用成本便宜的材料,能够降低制造成本。

[0645] <变形例>

[0646] 图88是示意地表示本实施方式的变形例的光波导区域20及非波导区域73的结构的光扫描设备的剖视图。在图88所示的例子中,光波导区域20及两个非波导区域73各自包含共同的材料45,光波导区域20包含部件46。部件46与第2镜40相接。在部件46的折射率 n_1 比共同的材料45的折射率 n_2 高时,光波导区域20的平均折射率比非波导区域73的平均折射率高。由此,能够在光波导区域20中传输光。在该结构中,共同的材料45及部件46分别可以是例如从由 SiO_2 、 TaO 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 SiN 、 AlN 或 ZnO 构成的群中选择的一种材料。此外,作为共同的材料45也可以使用空气等的气体或液体。在此情况下,能够容易地使厚度变化。即,图88所示的结构有利于调制厚度的方式。

[0647] 图89是表示图88的例子的、部件46的尺寸相对于镜间距离的比 r 与电场的展宽的关系的图。在计算中使用的折射率是 $n_1 = 1.6$ 及 $n_2 = 1.45$ 。光波导区域20的宽度是 $w = 3.0\mu\text{m}$,光波导区域20的厚度是 $h = 0.65\mu\text{m}$ ($m = 2$)。根据图89可知,在本变形例中,也与图85及图87所示的例子同样,在 $r \leq 0.2$ 时电场的展宽急剧地变大。

[0648] 通过对第1镜30及第2镜40中的至少一方的反射面设置高低差,也能够形成光波导

区域20或非波导区域73。通过设置该高低差而产生的凸部相当于具有与共同的材料45不同的折射率的部件46。

[0649] 图90A是表示在第2镜40的反射面的一部分设置有从其他部分隆起的凸部的例子的剖视图。在该例中,凸部相当于上述的例子中的部件46。因此,在以下的说明中,将凸部称作“部件46”。该例中的凸部即部件46由与第2镜40相同的材料形成。部件46也可以说是第2镜40的一部分。在图90A所示的例子中,共同的部件的折射率 n_2 比部件46的平均折射率低。在该例中,当从Z方向观察时,包含部件46的区域相当于光波导区域20,不包含部件46的区域相当于非波导区域73。

[0650] 图90B是示意地表示在第2镜40的反射面的一部分设置有凸部的其他例的剖视图。在图90B所示的例子中,共同的部件的折射率 n_2 比凸部46的平均折射率高。在该例中,当从Z方向观察时,不包含凸部即部件46的区域相当于光波导区域20,包含部件46的区域相当于非波导区域73。

[0651] 如图90A及图90B所示,由共同的材料45的折射率和部件46的折射率的大小关系决定光波导区域20及非波导区域73。

[0652] 图91是示意地表示在第1镜30与第2镜40之间、在第1镜30侧分离配置有两个部件46的结构例的剖视图。图92是示意地表示在第1镜30与第2镜40之间、在第1镜30及第2镜40的两侧分别分离设置有两个部件46的结构例的光扫描设备的剖视图。在图91所示的例子中,两个部件46与第1镜30相接,在图92所示的例子中,上方的两个部件46与第1镜30相接,下方的两个部件46与第2镜相接。部件46的折射率是 n_1 ,共同的材料45的折射率是 n_2 。在 $n_1 < n_2$ 时,当从Z方向观察时,不包含部件46的区域相当于光波导区域20,包含部件46的区域相当于非波导区域73。在 $n_1 > n_2$ 时,当从Z方向观察时,包含部件46的区域相当于光波导区域20,不包含部件46的区域相当于非波导区域73。

[0653] 图93是示意地表示在第1镜30与第2镜40之间、在第1镜30侧离配置有两个部件46、在第2镜40侧配置有其他部件47的结构例的剖视图。在图93所示的例子中,两个部件46与第1镜30相接,其他部件47与第2镜40相接。当从Z方向观察时,部件46与其他部件47不重合。共同的材料45的折射率是 n_2 ,部件46的折射率是 n_1 ,其他部件47的折射率是 n_3 。部件46和其他部件47中,折射率及尺寸中的至少一个也可以不同。

[0654] 当从Z方向观察时,在包含部件46的区域的平均折射率比包含其他部件47的区域的平均折射率大时,包含部件46的区域相当于光波导区域20,包含其他部件47的区域相当于非波导区域73。当从Z方向观察时,在包含部件46的区域的平均折射率比包含其他部件47的区域的平均折射率小时,包含其他部件47的区域相当于光波导区域20,包含部件46的区域相当于非波导区域73。

[0655] 例如,设想部件46的折射率 n_1 比共同的材料45的折射率 n_2 低、其他部件47的折射率 n_3 比共同的材料45的折射率 n_2 高的结构($n_1 < n_2 < n_3$)。在该结构中,当从Z方向观察时,包含其他部件47的区域相当于光波导区域20,包含部件46的区域相当于非波导区域73。通过使光波导区域20包含具有比共同的材料45的折射率 n_2 高的折射率 n_3 的一个以上的其他部件47,光波导区域20的平均折射率与非波导区域73的平均折射率的差变大。由此,能够抑制光波导区域20的波导模向非波导区域73的渗出。

[0656] 图94是示意地表示在第1镜30与第2镜40之间、在第2镜40侧分离配置有两个部件

46的例子光扫描设备的剖视图。在图94所示的例子中,光扫描设备还具备将第1镜30与第2镜40之间的距离固定的两个支承部件74。两个支承部件74位于两个非波导区域的外侧。

[0657] 图95是示意地表示在第1镜30与第2镜40之间、在第1镜30及第2镜40的两侧分别配置有部件46的结构例的剖视图。当从Z方向观察时,上下的两个部件46重合。如果共同的材料45是空气,则当从Z方向观察时,包含部件46的区域相当于光波导区域20,不包含部件46的区域相当于非波导区域73。

[0658] 在光扫描设备中,调整元件也可以具备与第1镜30及第2镜40中的至少一方连接的致动器78。致动器78通过使第1镜30与第2镜40之间的距离变化,能够使光波导区域20的厚度变化。

[0659] 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之间的距离变化。由此,能够使从光波导区域20射出的光的方向变化。压电部件的材料是参照图42至48说明那样的。

[0660] 此外,图83、图88、图90A、图90B及图91至图95所示的共同的材料45可以是液晶。在此情况下,调整元件可以具备中间夹着光波导区域20的一对电极。调整元件向该一对电极施加电压。由此,光波导区域20的折射率变化。结果,从光波导区域20射出的光的方向变化。

[0661] 也可以将上述的光波导区域20及两个非波导区域73阵列化而构成光扫描设备。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、和包括上述两个非波导区域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。

[0662] 该光扫描设备也可以还具备与多个光波导区域分别连接的多个移相器。多个移相器分别包括与多个光波导区域中的对应的一个光波导区域20直接相连或经由其他的波导相连的波导。

[0663] 各移相器的波导也可以包括折射率对应于电压的施加或温度变化而变化的材料。将上述调整元件设为第1调整元件。与第1调整元件不同的第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,波导内的折射率变化,从多个移相器向多个光波导区域传输的光的相位的差分别变化。结果,从多个光波导区域射出的光的方向变化。更具体地讲,通过第2调整元件,射出的光的波数矢量的Y分量变化。

[0664] <光学元件所进行的光扫描的范围的变更>

[0665] 如上述那样,在光扫描设备中,光扫描的范围由光波导层20的厚度及/或折射率等构造参数决定。因而,通常为了变更光扫描的范围而调整构造参数。但是,在构造参数的调整中,光扫描的范围没有那么大地变化。

[0666] 本发明人们研究了相对较容易变更光扫描的范围的光设备的结构。其结果,想到了以下的各实施方式的结构。

[0667] 第1项目的光设备具备:第1镜,具有沿第1方向以及与上述第1方向垂直的第2方向扩展的第1反射面;第2镜,具有与上述第1反射面对置的第2反射面;光波导层,位于上述第1镜与上述第2镜之间的区域的一部分,使光沿着上述第1方向传输;以及光学元件,位于上述第1镜的与上述第1反射面相反的一侧,通过折射及/或衍射使入射的光向与入射方向不同的方向射出。上述第1镜中的上述光的透射率比上述第2镜中的上述光的透射率高。上述光波导层具有能够调整折射率及/或厚度的构造。通过调整上述光波导层的折射率及/或厚

度,从上述光波导层经由上述第1镜以及上述光学元件射出的光的方向或经由上述光学元件以及上述第1镜取入到上述光波导层内的光的入射方向变化。

[0668] 在该光设备中,光学元件位于第1镜的与第1反射面相反的一侧。在有该光学元件的情况下和没有光学元件的情况下,从第1镜向外部射出的光的方向不同。因而,通过该光学元件,能够将射出光变更为希望的方向。光学元件通过折射及/或衍射,(1)可以将从光波导层经由第1镜入射的光向与该入射方向相比第1方向的分量变小的方向射出,或者(2)也可以将从该光设备的外部入射的光向与该入射方向相比第1方向的分量变大的方向射出。与入射方向相比第1方向的分量变小的方向可以是具有负的第1方向的分量的方向。另外,来自外部的光的入射方向也可以具有负的第1方向的分量。从光波导层射出的光的方向的变化范围、或者取入到光波导层内的光的入射方向的变化范围也可以包含与第1反射面垂直的方向。

[0669] 第2项目的光设备为,在第1项目的光设备中,上述光学元件扩大上述光波导层的折射率及/或厚度发生了变化时的、从上述光波导层射出的上述光的上述方向的变化、或者取入到上述光波导层内的上述光的上述入射方向的变化。

[0670] 在该光设备中,光波导层的折射率及/或厚度的变化中的光的射出角度或入射角度的变化在有光学元件的情况下比没有光学元件的情况更大地变化。

[0671] 第3项目的光设备为,在第1或第2项目的光设备中,上述光学元件包括棱镜。

[0672] 在该光设备中,通过包括棱镜的光学元件,能够实现第1或第2项目的光设备的效果。

[0673] 第4项目的光设备为,在第3项目的光设备中,上述棱镜具有与上述第1镜对置的第1面和位于与上述第1面相反的一侧的第2面。上述第1面与上述第1反射面平行或交叉。上述第2面与上述第1反射面交叉。

[0674] 在该光设备中,通过具有上述的具体构造的棱镜,能够实现第1或第2项目的光设备的效果。

[0675] 第5项目的光设备为,在第1至第4项目的任一光设备中,上述光学元件包括衍射光栅。

[0676] 在该光设备中,通过包括衍射光栅的光学元件,能够实现第1或第2项目的光设备的效果。

[0677] 第6项目的光设备为,在第5项目的光设备中,上述衍射光栅具有折射率沿着上述第1方向变化的多个凹部。

[0678] 在该光设备中,通过具有上述的具体构造的衍射光栅,能够实现第1或第2项目的光设备的效果。

[0679] 第7项目的光设备为,在第1至第6项目的任一光设备中,还具备波导,该波导连接于上述光波导层,使有效折射率为 n_{e1} 的波导模的光沿着上述第1方向传输。上述波导的前端部处于上述光波导层的内部。在从与上述第1反射面垂直的方向观察时,在上述波导以及上述光波导层重叠的区域中,上述波导以及上述光波导层的至少一部分包含折射率沿着上述第1方向以周期 p 变化的至少一个光栅。而且,满足 $\lambda/n_{e1} < p < \lambda/(n_{e1}-1)$ 。

[0680] 在该光设备中,在波导中传输的光能够经由光栅高效率地传输到作为慢光波导的光波导层。由此,能够实现波导光的高耦合效率。

[0681] 第8项目的光设备为,在第1至第6项目的任一光设备中,具备多个波导单元。各波导单元包括上述第1及第2镜、上述光波导层以及上述光学元件。上述多个波导单元在上述第2方向上排列。

[0682] 在该光设备中,第1项目的光设备被阵列化。即使在该被阵列化的光设备中,也能够获得第1项目的光设备的效果。

[0683] 第9项目的光设备为,在第8项目的任一光设备中,还具备多个移相器,该多个移相器分别连接于上述多个波导单元,并且分别包括与上述多个波导单元中的对应的一个波导单元的上述光波导层直接相连或经由其他波导相连的波导。通过使穿过上述多个移相器的光的相位之差分别变化,从上述第1镜射出的上述光的方向或经由上述第1镜取入到上述光波导层的上述光的入射方向变化。

[0684] 在该光设备中,能够通过移相器使光扫描以及光接收的方向变化。

[0685] 第10项目的光设备为,在第7项目的任一光设备中,具备多个波导单元。各波导单元包括上述第1及第2镜、上述光波导层、上述光学元件以及上述波导。上述多个波导单元在上述第2方向上排列。

[0686] 在该光设备中,还具备至少包括一个光栅的波导的第1项目的光设备被阵列化。在该被阵列化的光设备中,也能够获得第1项目的光设备的效果。

[0687] 第11项目的光设备为,在第10项目的任一光设备中,还具备多个移相器,该多个移相器分别连接于上述多个波导单元,并且分别包括与上述多个波导单元中的对应的一个波导单元的上述波导直接相连或经由其他波导相连的第2波导。通过使穿过上述多个移相器的光的相位之差分别变化,从上述第1镜射出的上述光的方向或经由上述第1镜取入到上述光波导层的上述光的入射方向变化。

[0688] 在该光设备中,能够通过移相器使光扫描以及光接收的方向变化。

[0689] 第12项目的光设备为,在第8至第11项目的任一光设备中,具备共用的光学元件。各波导单元中的上述光学元件是上述共用的光学元件的一部分。

[0690] 在该光设备中,多个波导单元被共用的光学元件覆盖。通过共用的光学元件,能够获得第1项目的光设备的效果。

[0691] 第13项目的光设备为,在第12项目的任一光设备中,具备多个波导阵列和基板。各波导阵列包括上述多个波导单元。上述多个波导阵列设置在上述基板上。

[0692] 在该光设备中,在同一基板上设有分别包含多个波导单元的多个波导阵列。通过共用的光学元件,从各波导阵列射出的光的方向变更。

[0693] 第14项目的光设备为,在第13项目的任一光设备中,具备光学基板。各波导阵列中的上述共用的光学元件是上述光学基板的一部分。

[0694] 在该光设备中,共用的光学元件是光学基板的一部分。通过该共用的光学元件,从各波导阵列射出的光的方向变更。

[0695] 第15项目的光设备为,在第14项目的任一光设备中,上述多个波导阵列中的上述共用的光学元件全部具备相同的构造。

[0696] 在该光设备中,从多个波导阵列射出的光的方向全部相同。

[0697] 第16项目的光设备为,在第14项目的任一光设备中,上述多个波导阵列中的上述共用的光学元件的至少两个具备不同的构造。

[0698] 在该光设备中,从多个波导阵列射出的光的方向中的至少两个相互不同。

[0699] 第17项目的光设备为,在第14项目的任一光设备中,上述多个波导阵列中的上述共用的光学元件全部具备不同的构造。

[0700] 在该光设备中,从多个波导阵列射出的光的方向全部相互不同。

[0701] 第18项目的光检测系统具备:第1至第17项目中的任一项所记载的光设备;光检测器,检测从上述光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。

[0702] 在该光检测系统中,通过计测从对象物反射的光返回来的时间,能够获得对象物的距离分布数据。

[0703] 以下,对棱镜所引起的光偏转的原理进行说明。

[0704] 图96是示意地表示本发明的实施方式中的光设备的一例的图。

[0705] 本实施方式中的光设备具备第1镜30及第2镜40、光波导层20、以及光学元件32。

[0706] 第1镜30及第2镜40、以及光波导层20的详细情况,如上所述。

[0707] 光学元件32位于第1镜30的与反射面相反的一侧。光学元件32通过折射及/或衍射使入射到光学元件32的光向与入射方向不同的方向射出。光学元件32也可以通过折射及/或衍射使入射的光向与入射方向相比第1方向的分量变小的方向射出。在图96所示的例子中,光学元件32包含介质32s以及棱镜32p。介质32s设置在第1镜30上。棱镜32p设置在介质32s上。光学元件32不需要包括棱镜32以及介质32双方,可以仅包括至少一方。

[0708] 棱镜32p具有与第1镜30对置的下表面32p1和位于与下表面32p1相反的一侧的上表面32pu。棱镜32p的下表面32p1与第1镜30的反射面平行或交叉。在棱镜32p的下表面32p1与第1镜30的反射面平行的情况下,棱镜32p的上表面32pu与第1镜30的反射面交叉。在棱镜32p的下表面32p1与第1镜30的反射面交叉的情况下,棱镜32p的上表面32pu与第1镜30的反射面平行者交叉。

[0709] 在光波导层20中传输的光的一部分经由第1镜30以及光学元件32向外部射出。通过调整折射率及/或厚度,向外部射出的光的方向变化。

[0710] 在图96所示的例子中,如以下那样设定了参数。将棱镜32p的折射率设为 n_p ,将介质32s的折射率设为 n_s 。将棱镜32p的下表面32p1与XY平面所成的角度设为 θ_{p1} ,将棱镜32p的上表面32pu与XY平面所成的角度设为 θ_{p2} 。将从第1镜30射出并在介质32s内传输的光的方向与Z方向所成的角度设为 θ_1 。将从棱镜32p向外部射出的光的方向与Z方向所成的角度设为 θ_2 。根据斯涅尔法则,由以下的式(23)表示 θ_2 。

[0711] 【数式23】

$$[0712] \quad \theta_2 = \sin^{-1} \left\{ n_p \sin \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_s}{n_p} \sin(\theta_1 - \theta_{p1}) \right) + \theta_{p1} - \theta_{p2} \right] \right\} + \theta_{p2} \quad (23)$$

[0713] 另外,根据介质32s与第1镜30的界面上的边界条件, $n_s \sin \theta_1$ 与式(3)中的右边的式子相等。通过调整光学元件32的设计参数 n_p 、 n_s 、 θ_{p1} 、 θ_{p2} ,能够根据 θ_1 的范围任意地选择 θ_2 。当使在光波导区域20中传输的光的方向为正时,从第1镜30射出的光的角度被限定为波数矢量的X分量为正的区域,但也能够通过上述设计参数 n_p 、 n_s 、 θ_{p1} 、 θ_{p2} 的调整,将射出光的波数矢量放大或变更到包含 0° 的负的区域。在图96所示的例子中,光的传输方向与XZ平面平行,但也可以不平行。也能够通过在棱镜32p的上表面32pu以及下表面32p1的至少一方设置

防反射膜来减少由光反射等引起的损失。

[0714] 接下来,对有光学元件32的情况下的射出角度的变化的计算例进行说明。

[0715] 图97是示意地表示计算所使用的光设备的一例的图。也可以在第1镜30与介质32s之间及/或介质32s与棱镜32p之间存在空间。

[0716] 图97所示的例子中的计算条件如下。为了计算简单, $\theta_{p1}=0^\circ$ 。棱镜32p以及介质32s具有相同的折射率 $n_p=n_s=1.451$ 。因而,棱镜32p以及介质32s内的光的传输方向相同。

[0717] 图98是表示图97所示的例子中的、没有光学元件的情况下的光的射出角度和有光学元件的情况下的光的射出角度的关系的图。圆圈标记表示 $\theta_{p2}=-10^\circ$ 的棱镜32p,方形标记表示 $\theta_{p2}=-45^\circ$ 的棱镜32p,三角标记表示 $\theta_{p2}=10^\circ$ 的棱镜32p。另外,在圆圈的例子中,光在光波导区域20中向正的X方向行进,在方形标记以及三角标记的例子中,光在光波导区域20中向负的X方向行进。在 θ_{p2} 为负值的情况下,如图112所示,棱镜32p的上表面32pu的法线矢量具有负的X分量。

[0718] 在没有光学元件32的情况下,光的射出角度的范围是 -25° 至 -5° 的负的范围和 5° 至 25° 的正的范围。根据本实施方式的结构,如图63所示,通过使光波导层20内的光的传输方向反转,无需复杂地变更构造,就能够使光的射出角度在正负范围内变化。

[0719] 在有光学元件32的情况下,在 $\theta_{p2}=-10^\circ$ 时,光的射出角度的范围从没有光学元件32的情况下的 5° 至 25° 的范围转换为 12° 至 45° 的范围。在该情况下,射出角度的变化量从没有光学元件32的情况下的 20° 增加到 33° 。

[0720] 同样,在 $\theta_{p2}=-45^\circ$ 时,光的射出角度的范围从没有光学元件32的情况下的 -25° 至 -5° 的范围转换为 -15° 至 24° 的范围(参照图112)。在该情况下,射出角度的变化量从没有光学元件32的情况下的 20° 增加到 39° 。即,不使光的传输方向反转,就能够使光的射出角度在正负范围内变化。

[0721] 同样,在 $\theta_{p2}=10^\circ$ 时,光的射出角度的范围从没有光学元件的情况下的 -25° 至 -5° 的范围转换为 -45° 至 -12° 的范围。在该情况下,射出角度的变化量从没有光学元件32的情况下的 20° 增加到 33° 。

[0722] 如图98所示,通过使光学元件32中的棱镜32p的角度 θ_{p2} 变化,能够增加光的射出角度的变化。换言之,通过光学元件32扩大从光波导层20射出的光的方向的变化。

[0723] 如果在设置在同一基板上的相同的三个慢光波导10上,分别设置包括 $\theta_{p2}=-10^\circ$ 、 -45° 、 10° 的棱镜32p的光学元件32,则如图98所示,能够对 -45° 至 45° 的范围进行光扫描。

[0724] 图99是示意地表示本实施方式中的光设备的一例的图。在图99所示的例子中,作为透明基板的光学元件32设置在第1镜30上。光学元件32包括具有通过切削透明基板的一部分而形成的斜面的棱镜32p。在图99所示的光设备中,也能够期待与图96以及图97所示的光设备相同的效果。

[0725] 接下来,对衍射光栅所引起的光偏转的原理进行说明。

[0726] 图100是示意地表示本实施方式中的光设备的一例的图。在图100所示的例子中,在第1镜30上设有包括衍射光栅32g的光学元件32。衍射光栅32g在光学元件32的上表面具有折射率沿着X方向变化的多个凹部。

[0727] 在图100所示的例子中,如以下那样设定参数。将从第1镜30射出并在光学元件32

内传输的光的方向和Z方向所成的角度设为 θ_1 。将从光学元件32射出的光的方向和Z方向所成的角度设为 θ_2 。将光学元件32的折射率设为 n_s 。假设衍射光栅32g具有周期p的凹部。将在光波导层20中传输的光在空气中的波长设为 λ 。

[0728] 在光学元件32与外部的界面,保存光的波数矢量的X分量。在光学元件32内传输的光的波数矢量的X分量为 $2\pi n_s \sin\theta_1/\lambda$ 。在衍射光栅32g的附近,光的波数矢量的X分量移位互易点阵($2\pi/p$)的整数倍。因而,衍射光栅32g的附近的光的波数矢量的X分量是 $2\pi n_s \sin\theta_1/\lambda - (2\pi/p)m$ 。m是衍射光的次数。另一方面,向外部射出的光的波数矢量的X分量为 $2\pi \sin\theta_2/\lambda$ 。根据 $2\pi n_s \sin\theta_1/\lambda - (2\pi/p)m = 2\pi \sin\theta_2/\lambda$ 可得到以下的式(24)。

[0729] [数式24]

$$p(n_s \sin\theta_1 - \sin\theta_2) = m\lambda \quad (24)$$

[0731] 另外,根据光学元件32与第1镜30的界面上的边界条件, $n_s \sin\theta_1$ 与式(3)中的右边的式子相等。在0次光中,根据 $m=0$ 以及式(24),斯涅尔法则 $n_s \sin\theta_1 = \sin\theta_2$ 成立。即, θ_2 与式(3)中的 θ 相同。 ± 1 次以上的高次光的射出角度 θ_2 根据周期p而变化。即,通过适当地调整周期p,能够任意地选择射出角度 θ_2 。

[0732] 图101是表示图100所示的例子中的、没有光学元件的情况下的光的射出角度和有光学元件的情况下的光的射出角度的关系的图。图101所示的例子中的计算条件为,波长 $\lambda = 940\text{nm}$,周期 $p = 3\mu\text{m}$ 。

[0733] 在没有光学元件32的情况下,光的射出角度在 5° 至 25° 的范围内变化。

[0734] 在有光学元件32的情况下,0次光的射出角度的范围如上述那样,与没有光学元件32的情况下的 5° 至 25° 的范围相同。

[0735] 在有光学元件32的情况下,-1次光的射出角度的范围是 -13° 至 6° 的范围。同样,1次光的射出角度的范围为 23° 至 47° 的范围。

[0736] 通过使用0次光以及 ± 1 次光,能够使光扫描的范围在 -13° 至 47° 中变化。

[0737] 衍射光栅32g并不限定于图100所示的例子。

[0738] 图102是示意地表示本实施方式中的光设备的一例的图。在图102所示的例子中,光学元件32包括透射式闪耀衍射光栅32g。闪耀衍射光栅32g是锯齿状的棱镜周期性地排列而得的构造。入射到闪耀衍射光栅32g并弯曲而射出的光在满足式(23)以及式(24)双方的偏转方向上被强烈地衍射。

[0739] 在图100以及图102所示的例子中,在第1镜30上设有包括衍射光栅32g的光学元件32,但不限于此。也可以在第1镜30直接形成衍射光栅32g。

[0740] 接下来,说明将图96、图97、图99、图100以及图102所示的光设备在Y方向上阵列化的例子。

[0741] 本实施方式中的光设备具备在Y方向上排列的多个波导单元。各波导单元包括第1镜30及第2镜40、光波导层20以及光学元件32。各波导单元也可以还包括具备上述至少一个光栅的波导。

[0742] 本实施方式中的光设备也可以具备共用的光学元件32。在该情况下,各波导单元中的光学元件是共用的光学元件32的一部分。换言之,共用的光学元件32覆盖多个波导单元。以下,有时将“共用的光学元件32”简称为“光学元件32”。

[0743] 本实施方式中的光设备还具备分别连接于多个波导单元的多个移相器。

[0744] 在各波导单元不包括具备上述至少一个光栅的波导的情况下,多个移相器分别包括与多个波导单元中的对应的一个波导单元的光波导层20直接相连或经由其他波导相连的波导。

[0745] 在各波导单元包括具备上述至少一个光栅的波导的情况下,多个移相器分别包括与多个波导单元中的对应的一个波导单元的具备上述至少一个光栅的波导直接相连或经由其他波导相连的第2波导。

[0746] 阵列化后的光设备能够进行二维方向的光扫描。

[0747] 接下来,说明将沿Y方向阵列化后的多个波导单元作为一个波导阵列、在同一基板上设置多个波导阵列的例子。

[0748] 图103是示意地表示本实施方式中的光设备的一例的图。如图103所示,各波导阵列10A能够使射出光沿着方向101以及方向102变化。

[0749] 本实施方式中的光设备具备多个波导阵列10A和基板50。多个波导阵列10A设置在同一基板50上。在多个波导阵列10A上分别设有多个光学元件32。各光学元件32包括棱镜32p。在图103所示的例子中,如果在三个波导阵列10A上分别设置 $\theta_{p2} = -10^\circ$ 、 -45° 、 10° 的图97所示的棱镜32p,则如图98所示,能够对 -45° 至 45° 的范围进行光扫描。

[0750] 图104是示意地表示本实施方式中的光设备的一例的图。

[0751] 本实施方式中的光设备具备透明的光学基板33。在图104所示的例子中,在多个波导阵列10A上设有光学基板33。光学基板33包括多个光学元件32。各光学元件32包括图99所示的棱镜32p。多个光学元件32分别位于多个波导阵列10A上。利用图104所示的光学基板33,容易在多个波导阵列10A上分别设置多个光学元件32。多个光学元件32也可以全部具备相同的构造。在该情况下,从多个波导阵列10A射出的光的方向全部相同。也可以是多个光学元件32的至少两个具备相互不同的构造。在该情况下,从多个波导阵列10A射出的光的方向的至少两个不同。也可以是多个光学元件32全部具备相互不同的构造。在该情况下,从多个波导阵列10A射出的光的方向全部相互不同。

[0752] 图105是示意地表示本实施方式中的光设备的一例的图。在图105所示的例子中,在多个波导阵列10A上设有光学元件32。光学元件32包括覆盖多个波导阵列10A的一个棱镜32p。由此,与图103以及104所示的例子相比,光设备的制作变得容易。

[0753] 在图103以及104所示的例子中,在同一基板50上设有多个相同的波导阵列10A。如果没有光学元件32,则从多个波导阵列10A射出的光的方向全部相同。通过在多个波导阵列10A上分别设置多个光学元件32,能够分别控制从多个波导阵列10A射出的光的方向。由此,能够相对较容易地扩大光扫描的范围。

[0754] 在图103至105所示的例子中,光学元件32也可以取代棱镜32p而包含衍射光栅32g。光学元件32也可以包含棱镜32p以及衍射光栅32g双方。

[0755] 本实施方式中的光设备也作为光接收设备发挥功能。在该情况下,来自外部的光经由光学元件32以及第1镜30被取入到光波导层20内。通过调整光波导层20的折射率及/或厚度,使得从外部取入的光的方向变化。

[0756] <应用例>

[0757] 图106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射出自由空间中的波长是 λ 的单一波长的光。光分路器90将来自光源130的光分支而向多个移相器的波导入。在图106的结构例中,在芯片上设有电极62a和多个电极62b。对于波导阵列10A,从电极62a供给控制信号。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及电极62b可以连接到生成上述控制信号的未图示的控制电路。控制电路也可以设置在图106所示的芯片上,也可以设置在光扫描设备100的其他的芯片上。

[0758] 如图106所示,通过将全部的组件集成到芯片上,能够用小型的设备实现大范围的光扫描。例如可以在 $2\text{mm} \times 1\text{mm}$ 左右的芯片上集成图106所示的全部的组件。

[0759] 图107是表示从光扫描设备100向远方照射激光等的光束而执行二维扫描的状况的示意图。二维扫描通过使射束光点310在水平及垂直方向上移动来执行。例如,通过与周知的TOF(Time Of Flight)法组合,能够取得二维的测距图像。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。

[0760] 图108是表示作为能够生成这样的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和控制电路500。光检测器400检测从光扫描设备100射出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射出的光的波长 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电检测器。光检测器400输出与接受的光的量对应的电信号。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是控制光扫描设备100、光检测器400及信号处理电路600的处理器。控制电路500控制来自光扫描设备100的光束的照射的定时及光检测器400的曝光及信号读出的定时,对信号处理电路600指示测距图像的生成。

[0761] 在二维扫描中,作为取得测距图像的帧速率,例如可以从通常在运动图像中经常使用的60fps、50fps、30fps、25fps、24fps等中选择。此外,如果考虑向车载系统的应用,则帧速率越大则取得测距图像的帧率越高,能够精度越好地检测障碍物。例如,在60km/h下的行驶时,在60fps的帧速率下,每当车移动约28cm则能够取得图像。在120fps的帧速率下,每当车移动约14cm则能够取得图像。在180fps的帧速率下,每当车移动约9.3cm则能够取得图像。

[0762] 为了取得一个测距图像所需要的时间依赖于束扫描的速度。例如,为了以60fps取得分辨点数为 100×100 的图像,需要每1点以 $1.67\mu\text{s}$ 以下进行束扫描。在此情况下,控制电路500以600kHz的动作速度控制由光扫描设备100进行的光束的射出、以及由光检测器400进行的信号储存及读出。

[0763] <线性传感器阵列所引起的视差的减少>

[0764] 在本发明的LiDAR系统300中,光扫描设备100和光检测器400不存在于同轴上。这与使用包括MEMS等的以往的光扫描设备的情况不同。因此,在利用光检测器400检测从光扫描设备100射出并被物体反射的光的情况下,通过校正视差来确定物体的位置。但是,如果使用线性传感器阵列作为光检测器400,则不需要视差的校正。在以下的说明中,将光检测器400设为线性传感器阵列。

[0765] 图109是示意地表示LiDAR系统的结构例的图。在图109所示的例子中,线性传感器

阵列400包含在X方向上排列的多个受光元件400a。线性传感器阵列400对于从光扫描设备100射出的光的波长 λ 具有灵敏度。也可以在各受光元件400a上设有未图示的光学系统或光学元件。作为光学系统或光学元件,例如能够使用变形透镜、微透镜阵列、或者全息衍射元件。由此,各受光元件400a具有在Y方向上较宽的视场400d。

[0766] 在LiDAR系统300中,光扫描设备100在Y方向上扫描沿X方向以直线状延伸的光310。光扫描设备100例如是沿Y方向延伸的一个慢光波导10。光310和各受光元件400a的视场400d重叠的区域是能够取得测距图像的范围。

[0767] 在LiDAR系统300中,根据从光扫描设备100射出的光的射出角度获得物体的Y方向的角度。根据线性传感器阵列400上的受光位置,计算物体的X方向的角度。通过TOF动作,计算从光扫描设备100射出、被物体反射且到达线性传感器阵列400的光的飞行距离。根据这样获得的X方向以及Y方向的角度和光的飞行距离,能够确定三维空间中的物体的位置。

[0768] 以下,对确定三维空间中的物体的位置的原理进行说明。

[0769] 图110A是示意地表示光扫描设备和线性传感器阵列的焦点的位置关系的图。图110B是示意地表示物体、线性传感器阵列、以及线性传感器阵列的焦点的位置关系的图。

[0770] 在图110A所示的例子中,光扫描设备100配置于在Y方向上与传感器阵列400的焦点400F相离距离 ΔY 的位置。光扫描设备100的中心的X坐标与线性传感器阵列400的中心的X坐标一致。

[0771] 如上述那样,在本结构例中,能够获得以下的参数。能够根据光扫描设备100,获得光的Y方向的射出角度 θ_Y 。能够根据线性传感器阵列400的受光位置,获得X方向的反射光的角度 θ_X 。通过TOF动作,能够获得从光扫描设备100射出、被物体反射且到达线性传感器阵列400的光的总距离 Z_a 。使用这些参数,从线性传感器阵列400观察的物体的Y方向的角度 θ'_Y 由以下的式(25)表示。

[0772] [数式25]

$$[0773] \quad \theta'_Y = \sin^{-1} \left(\frac{\Delta Y + Z_1 \sin \theta_Y}{Z_2} \right) \quad (25)$$

[0774] 光扫描设备100与物体350之间的距离 Z_1 、以及物体350和线性传感器阵列400的焦点400F之间的距离 Z_2 分别由以下的式(26)以及式(27)表示。

[0775] [数式26]

$$[0776] \quad Z_1 = \frac{Z_a^2 - \Delta y Y^2}{2Z_a + 2\Delta Y \sin \theta} \quad (26)$$

[0777] [数式27]

$$[0778] \quad Z_2 = \frac{Z_a^2 + 2Z_a Y \Delta Y \sin \theta + Y^2 \Delta Y}{2Z_a + 2\Delta Y \sin \theta} \quad (27)$$

[0779] 在本实施例中,在线性传感器阵列400中的各受光元件400a的视场400d和光扫描设备100的光310的光扫描区域重叠的范围中,能够取得没有视差影响的测距图像。能够取得测距图像的范围如上述那样,是从光扫描设备100射出并被物体350反射的光到达线性传感器阵列400的区域。

[0780] 图111是示意地表示光扫描的范围和线性传感器阵列中的各受光元件的视场的位置关系的图。如图111所示,光310的光扫描的范围和各受光元件400a的视场400d的偏差与

测距距离无关,与光扫描设备100与线性传感器阵列400的位置的偏差 ΔY 相同。

[0781] 在本结构的其他例中,作为光扫描设备100,能够使用以X方向为扫描的主轴的二维的光扫描设备。在该情况下,线性传感器阵列400的中心的X坐标能够被配置成与光扫描设备100的中心的X坐标一致。由此,能够取得没有视差影响的测距图像。

[0782] <向光接收设备的应用例>

[0783] 本发明的上述的各实施方式的光扫描设备能够以大致相同的结构还被用作光接收设备。光接收设备具备与光扫描设备相同的波导阵列10A、和调整可接收的光的方向的第1调整元件60。波导阵列10A的各第1镜30使从第3方向向第1反射面的相反侧入射的光透射。波导阵列10A的各光波导层20使在第2方向上透射了第1镜30的光传输。第1调整元件60通过使各波导元件10的上述光波导层20的折射率、厚度及光的波长中的至少一个变化,能够使可接收的光的方向变化。进而,在光接收设备具备与光扫描设备相同的多个移相器80、或移相器80a及移相器80b、和使从多个波导元件10经过多个移相器80、或移相器80a及移相器80b而输出的光的相位的差分别变化的第2调整元件的情况下,能够使可接收的光的方向二维地变化。

[0784] 例如能够构成将图106所示的光扫描设备100中的光源130替换为接收电路的光接收设备。如果波长 λ 的光入射到波导阵列10A,则该光经过移相器阵列80A被向光分路器90传送,最终被集中到一个部位,被传送至接收电路。被集中在该一个部位的光的强度可以表示光接收设备的灵敏度。光接收设备的灵敏度可以由分别组装到波导阵列及移相器阵列80A的调整元件来调整。在光接收设备中,例如在图31中,波数矢量(图中的粗箭头)的方向相反。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。X方向的光分量的灵敏度可以由组装到波导阵列10A的调整元件来调整。另一方面,波导元件10的排列方向的光分量的灵敏度可以由组装到移相器阵列80A的调整元件来调整。根据光接收设备的灵敏度成为最大时的光的相位差 $\Delta \varphi$ 、光波导层20的折射率 n_w 及厚度 d ,能知道 θ 及 α_0 (式(12)及式(13))。因此,能够确定光的入射方向。

[0785] 上述的实施方式及变形例可以适当组合。例如,参照图10至图26说明的光设备的结构也可以与其他任一实施方式的阵列构造组合。

[0786] 产业上的可利用性

[0787] 本发明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。

[0788] 标号说明

[0789] 1 第1波导

[0790] 2 光波导层,波导

[0791] 3 多层反射膜

[0792] 4 多层反射膜

[0793] 5 光栅

[0794] 6 激光源

[0795] 7 光纤

[0796] 10 波导元件(第2波导)

[0797] 15、15a、15b、15c、15m 光栅

- [0798] 20 光波导层
- [0799] 30 第1镜
- [0800] 32 光学元件
- [0801] 32p 棱镜
- [0802] 32g 衍射光栅
- [0803] 40 第2镜
- [0804] 42 低折射率层
- [0805] 44 高折射率层
- [0806] 50、50A、50B、50C 基板
- [0807] 51 第1电介质层(调整层)
- [0808] 52 支承部件(辅助基板)
- [0809] 60 调整元件
- [0810] 61 第2电介质层(保护层)
- [0811] 62 电极
- [0812] 64 布线
- [0813] 66 电源
- [0814] 68 加热器
- [0815] 70 支承部件
- [0816] 71 非压电元件
- [0817] 72 压电元件
- [0818] 73、73a、73b 间隔物
- [0819] 74 支承部件
- [0820] 75 液晶材料
- [0821] 76 液晶分子
- [0822] 80、80a、80b 移相器
- [0823] 90、90a、90b 光分路器
- [0824] 92 光开关
- [0825] 100 光扫描设备
- [0826] 101、102 区域
- [0827] 110 波导阵列的驱动电路
- [0828] 111 驱动电源
- [0829] 112 开关
- [0830] 130 光源
- [0831] 210 移相器阵列的驱动电路
- [0832] 310 射束光点
- [0833] 400 光检测器
- [0834] 500 控制电路
- [0835] 600 信号处理电路

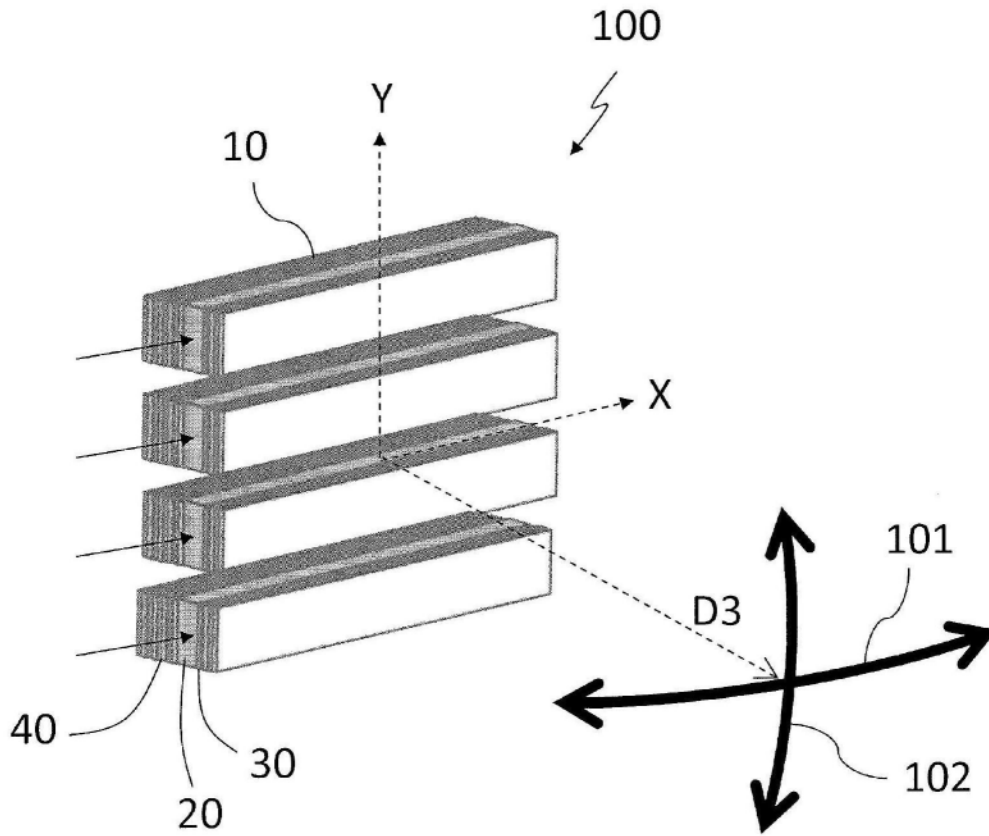


图1

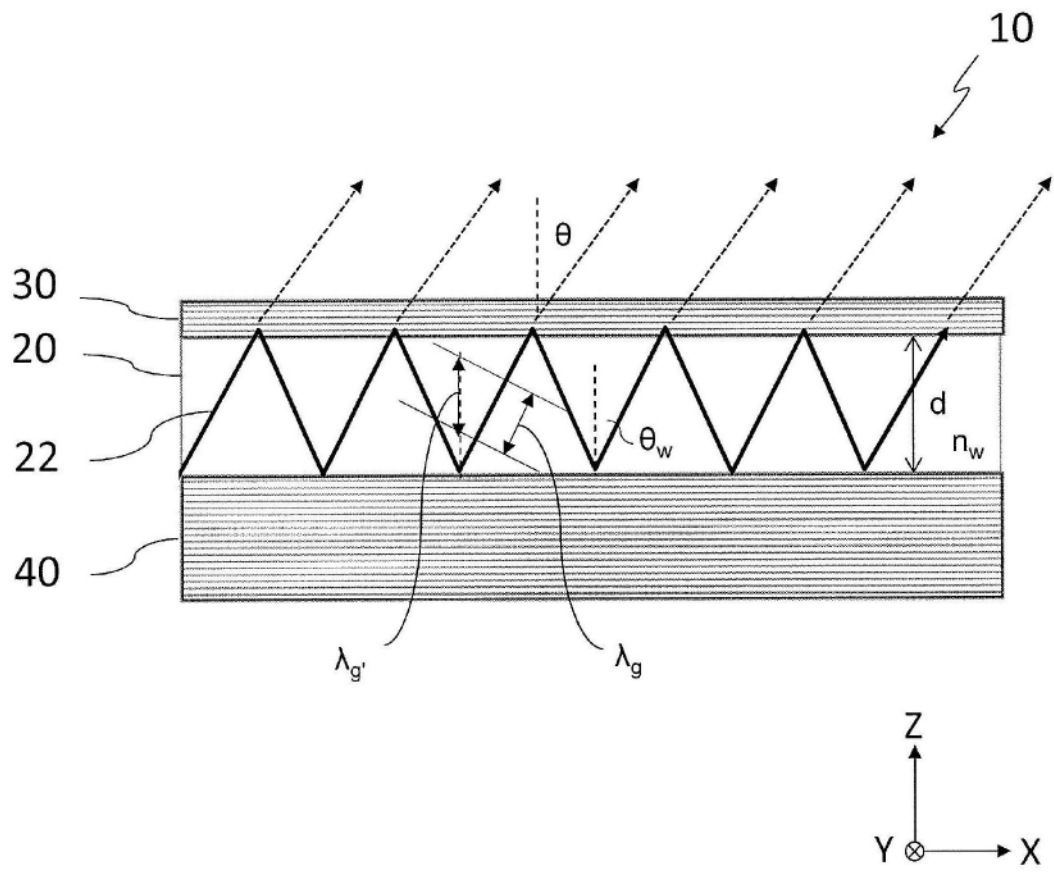


图2

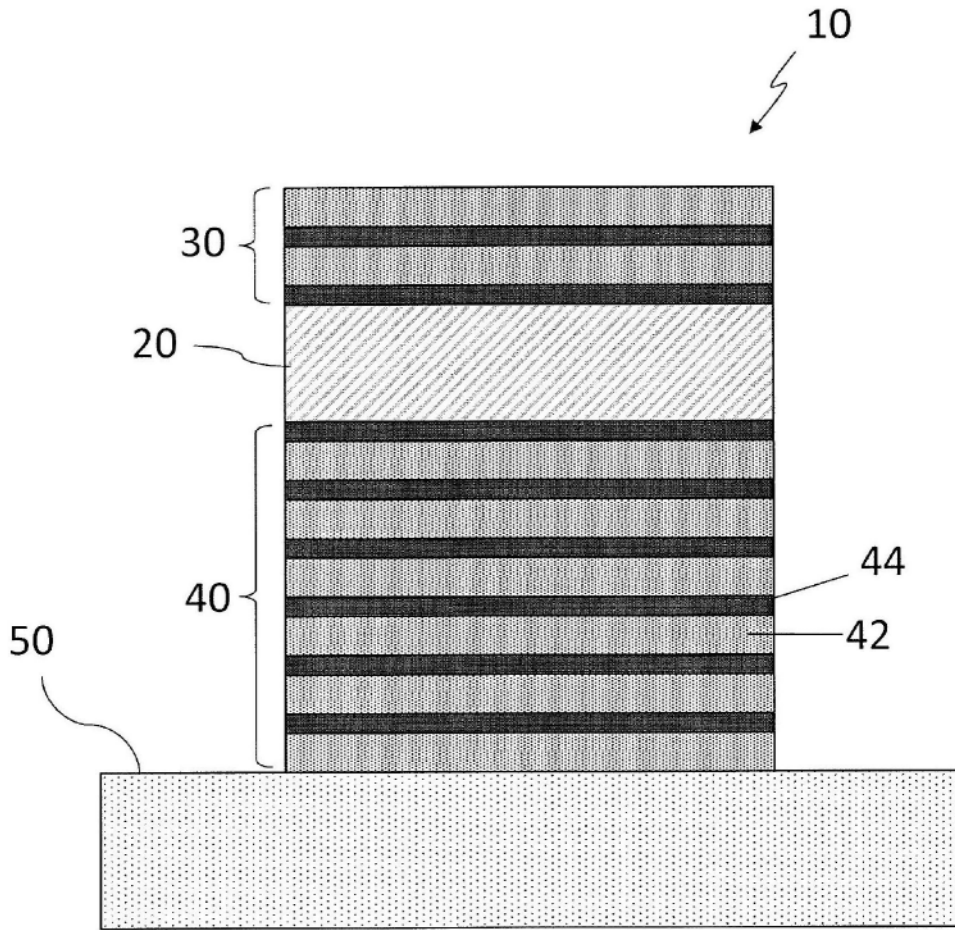


图3

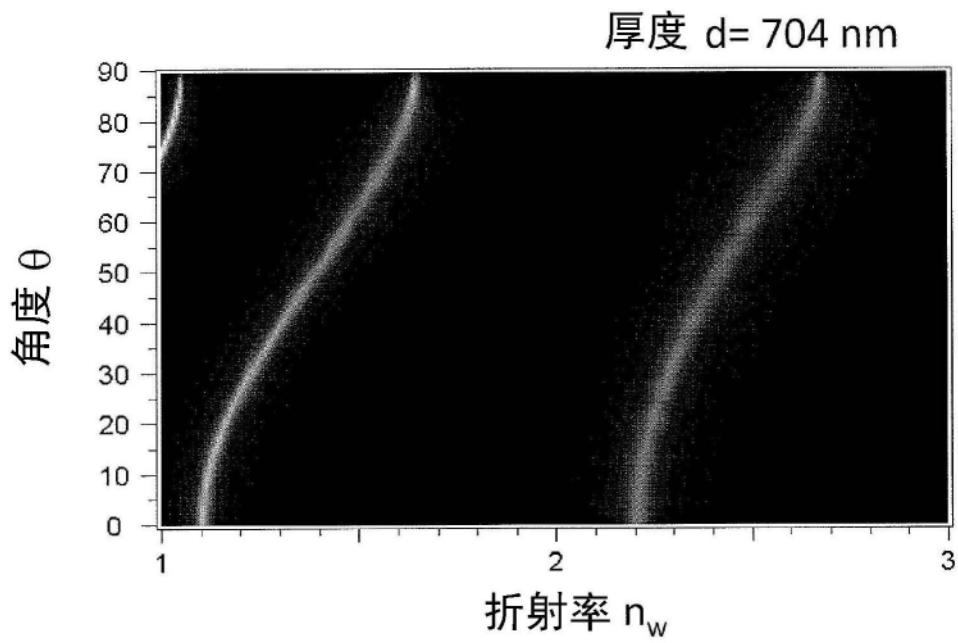


图4A

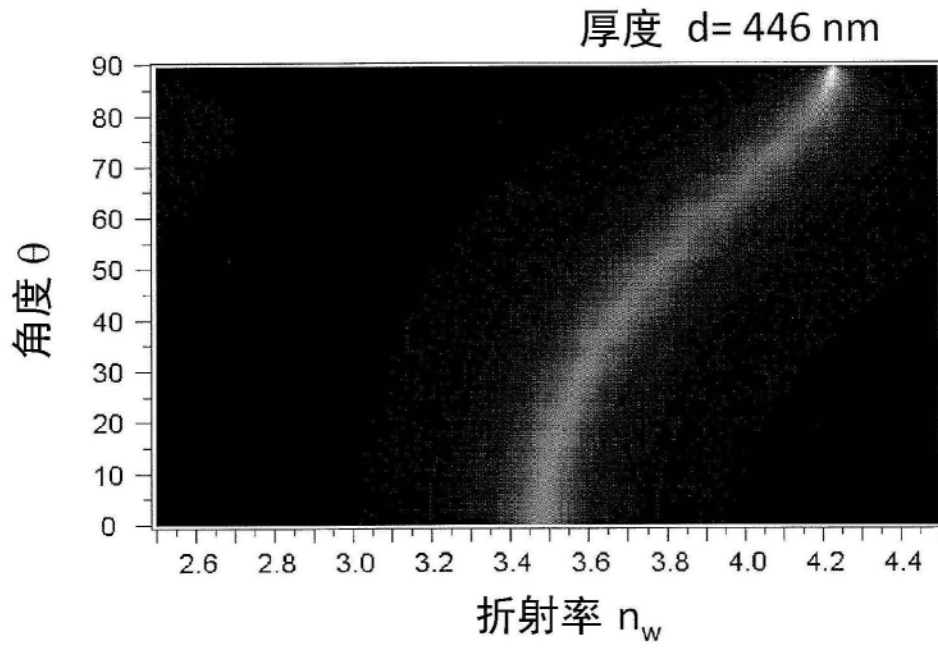


图4B

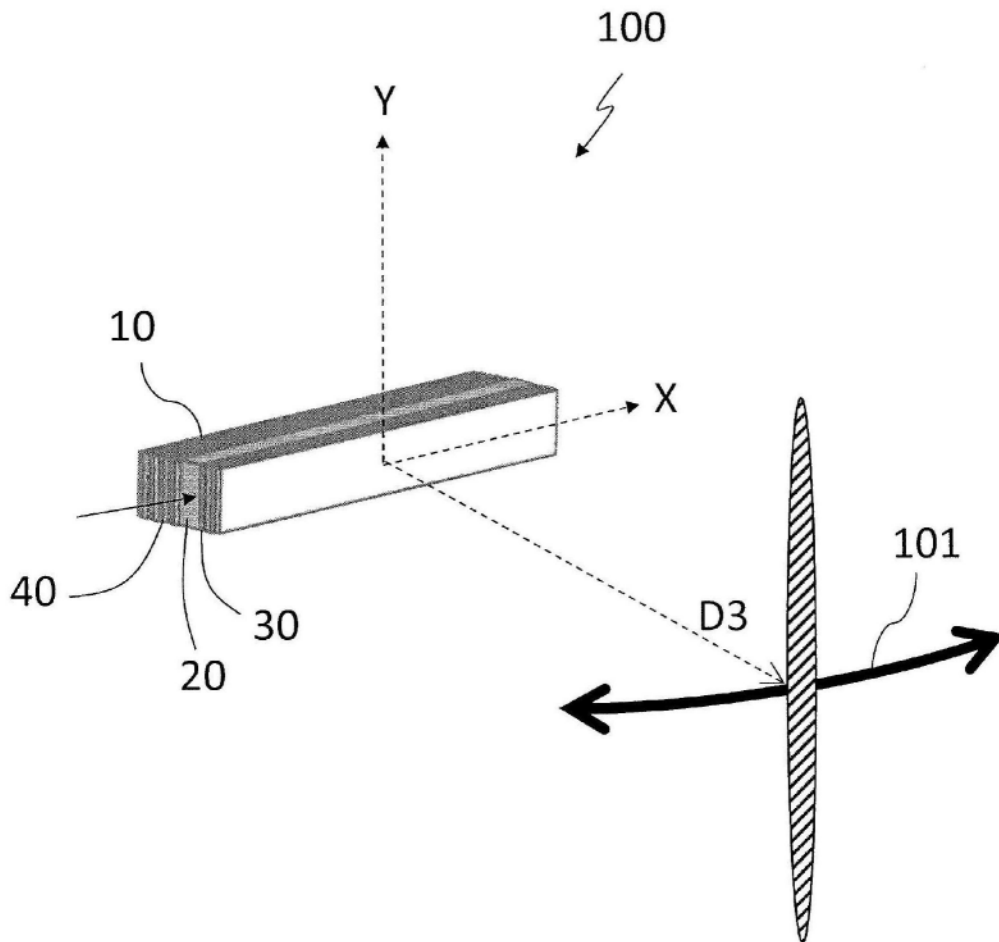


图5

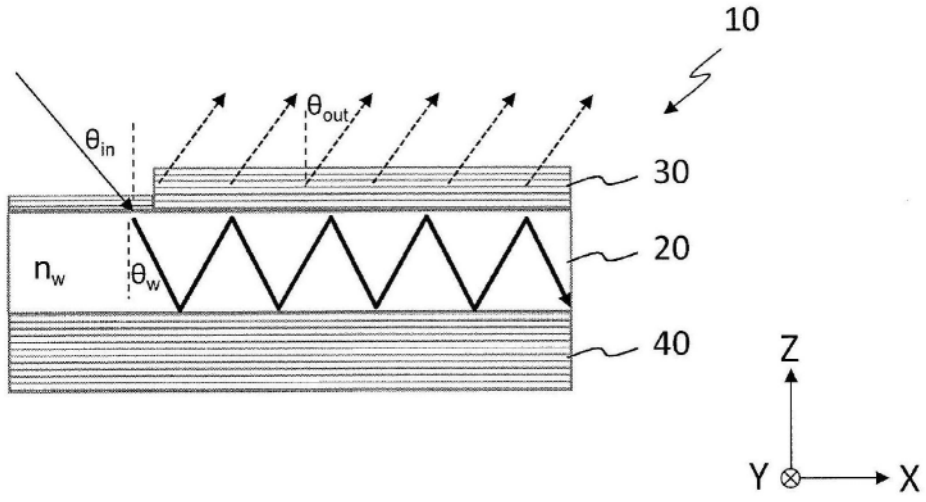


图6A

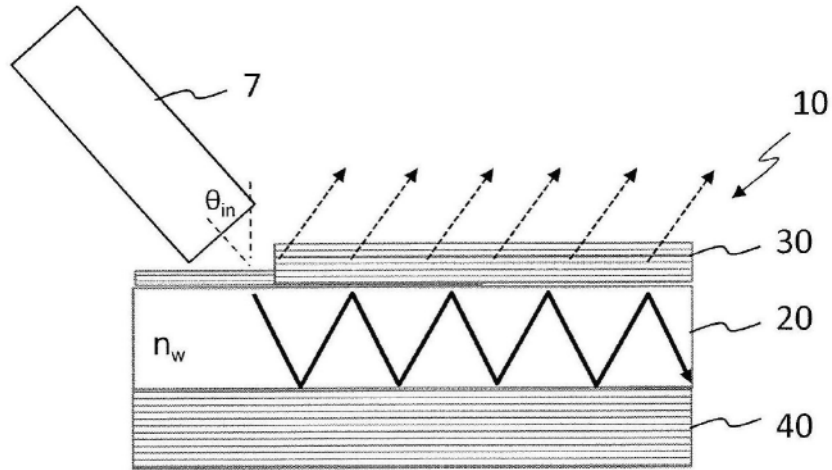


图6B

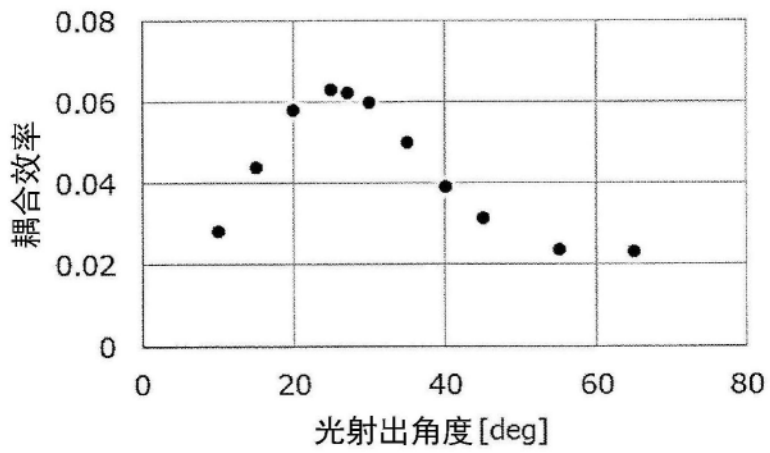


图7

空气 $n=1$

波导

空气 $n=1$

图8A

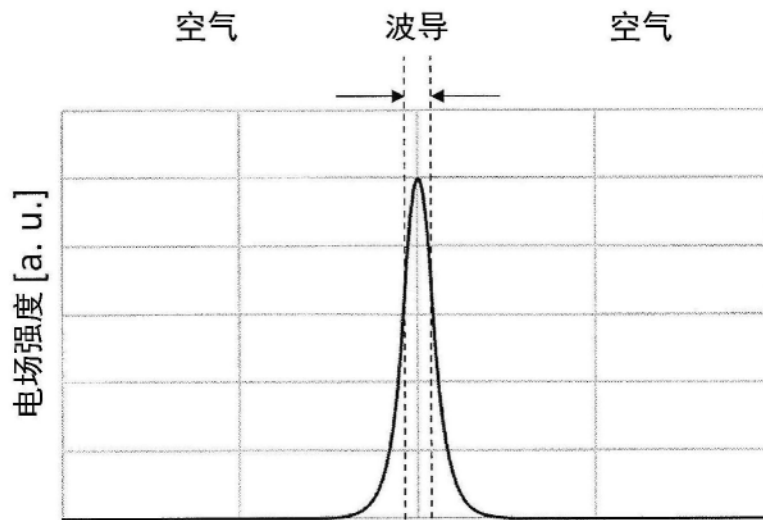


图8B



图8C

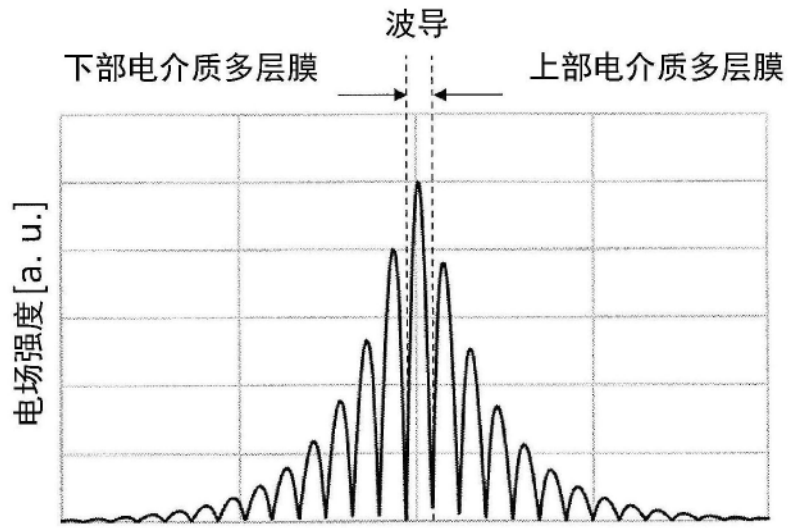


图8D

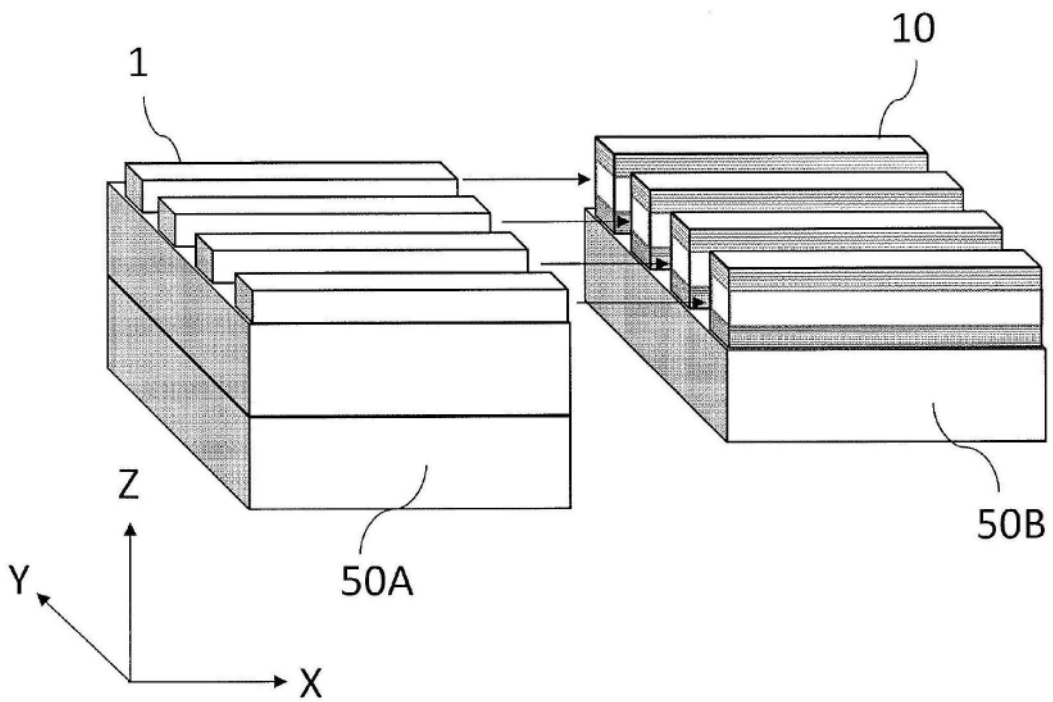


图9

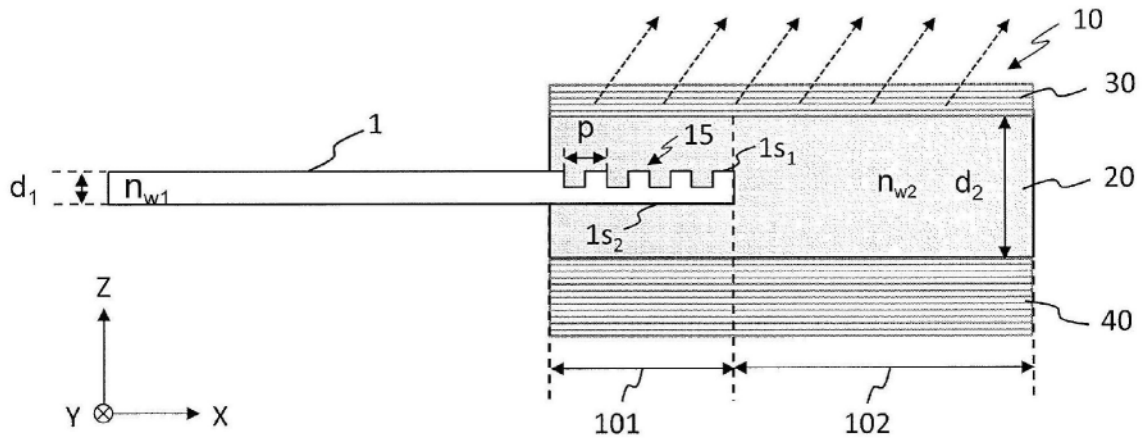


图10

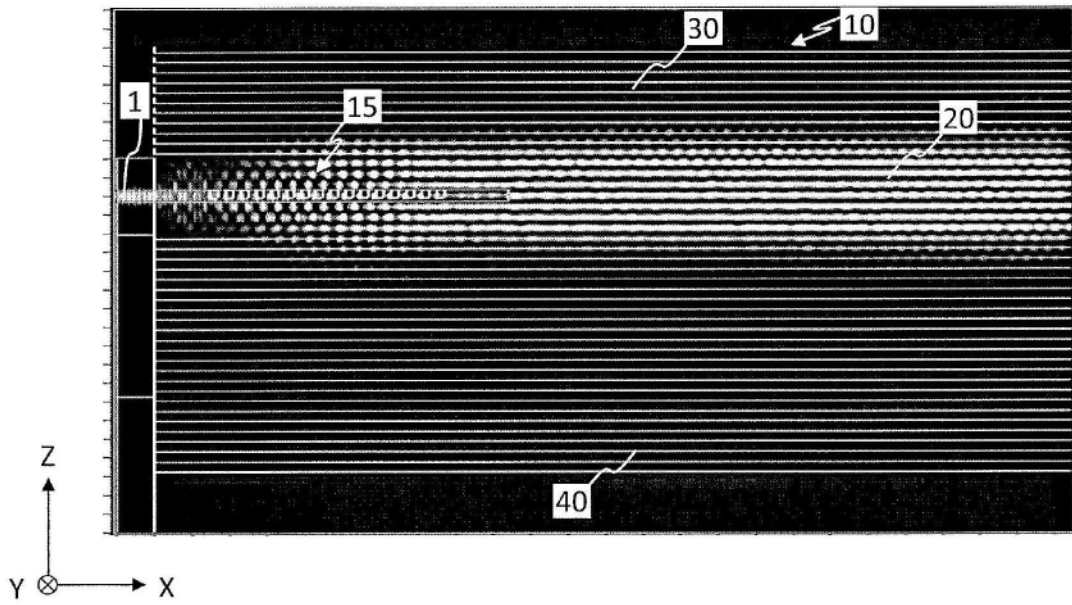


图11

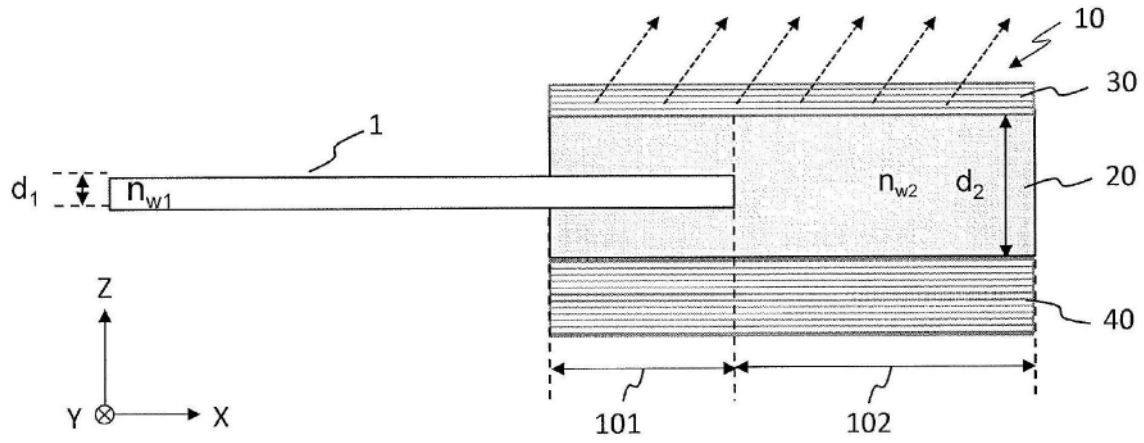


图12

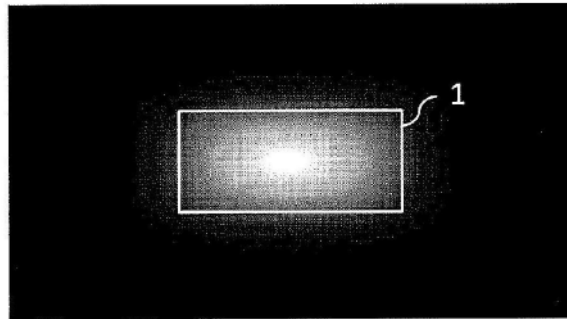


图13A

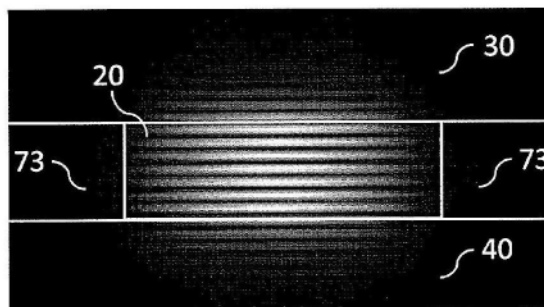


图13B

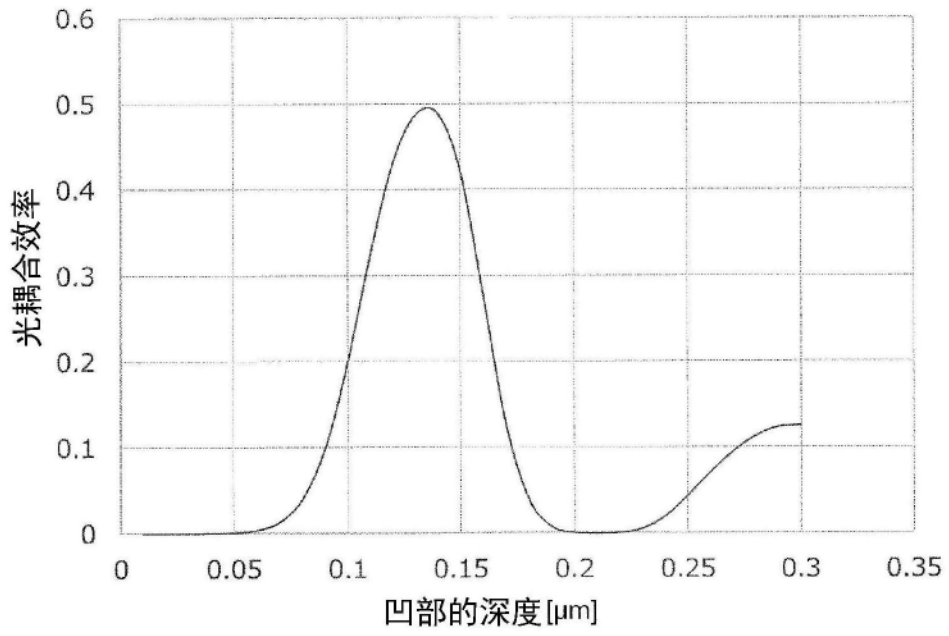


图14

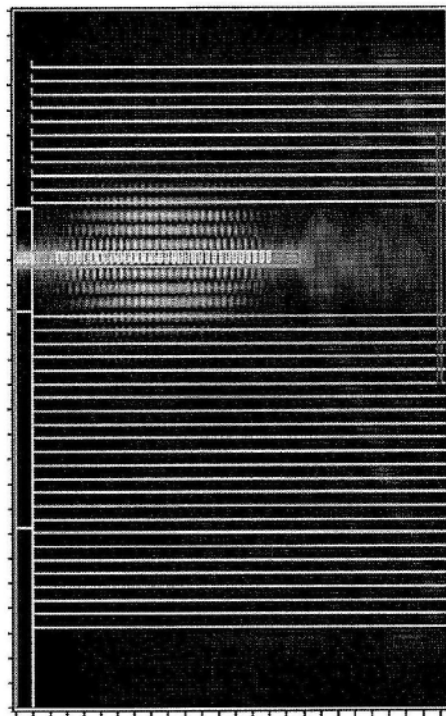


图15

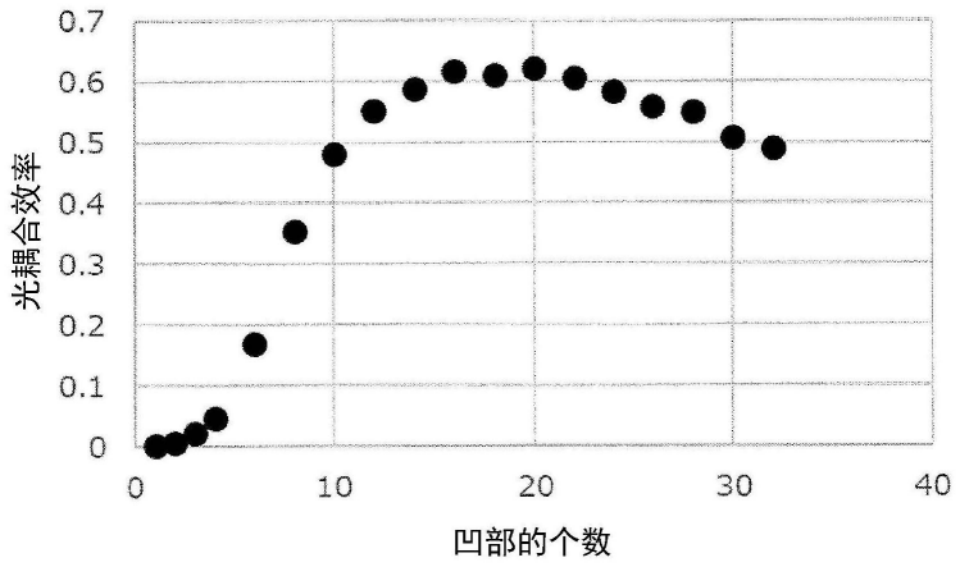


图16

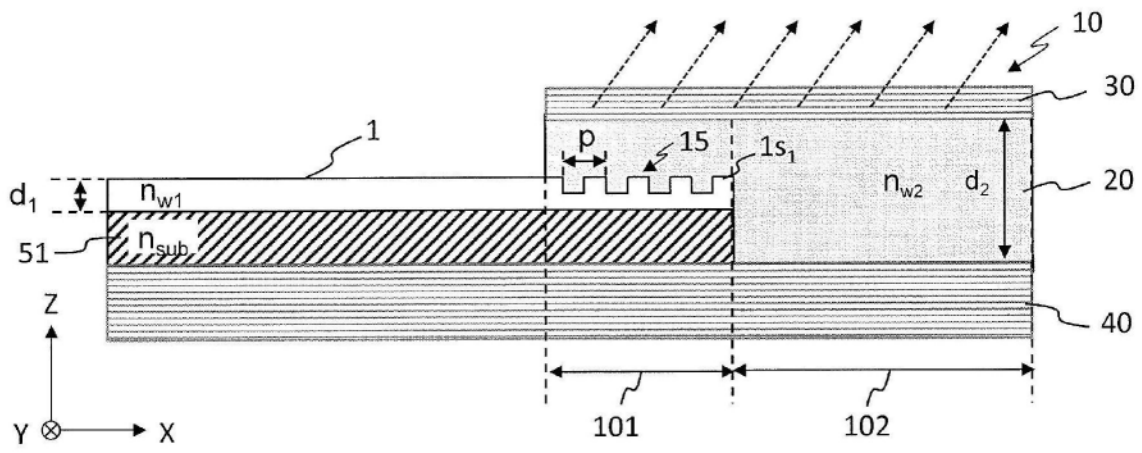


图17A

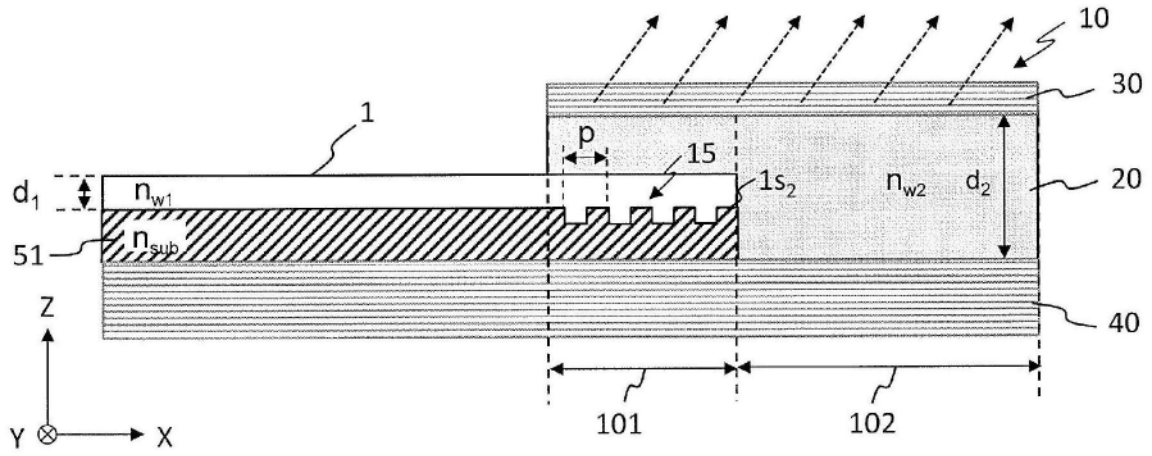


图17B

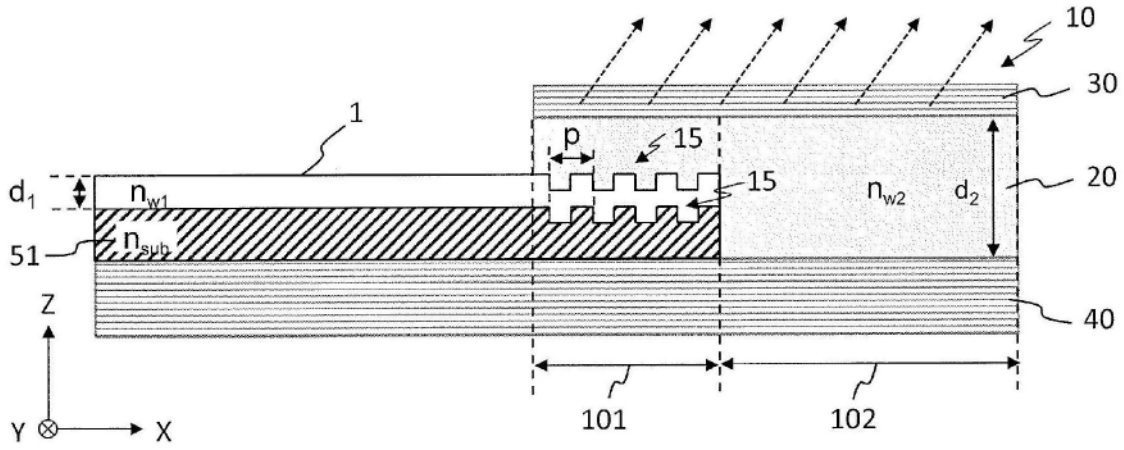


图17C

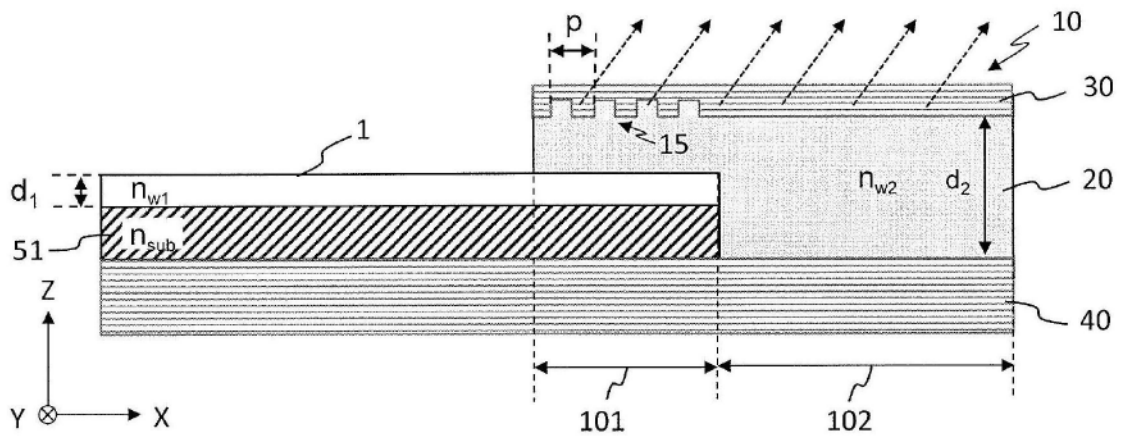


图18A

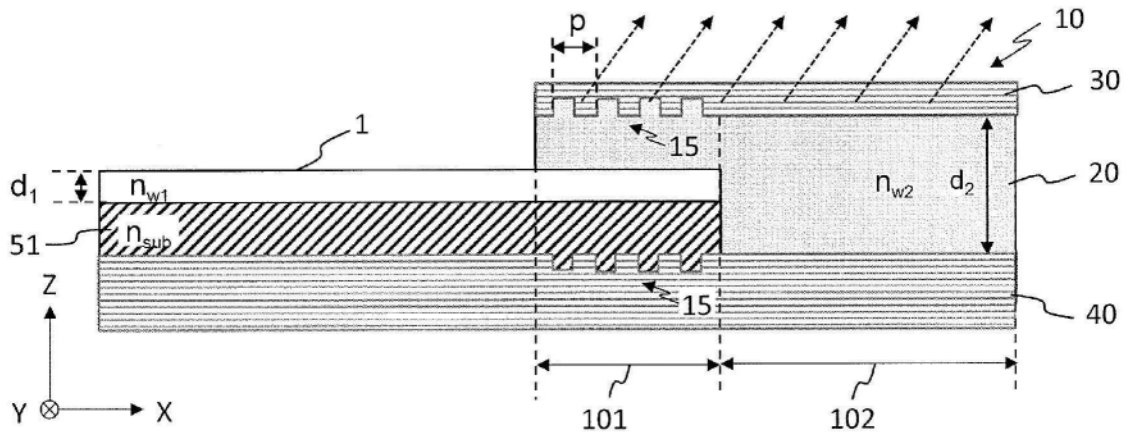


图18B

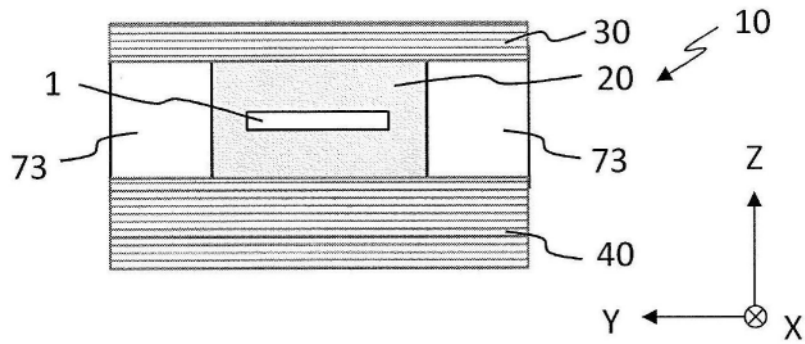


图19A

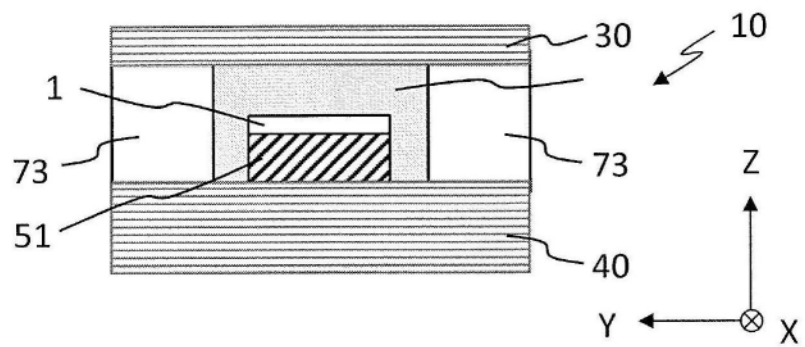


图19B

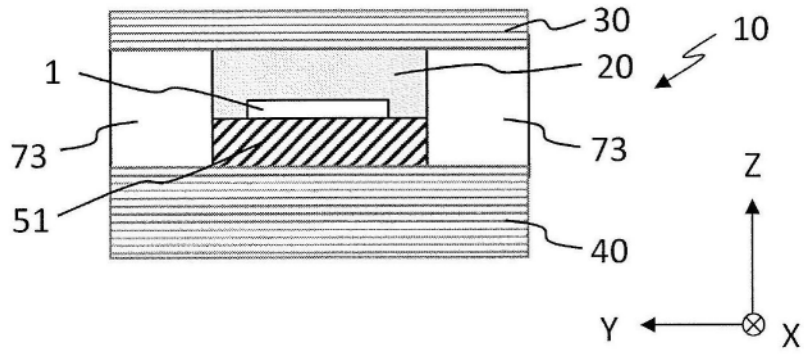


图19C

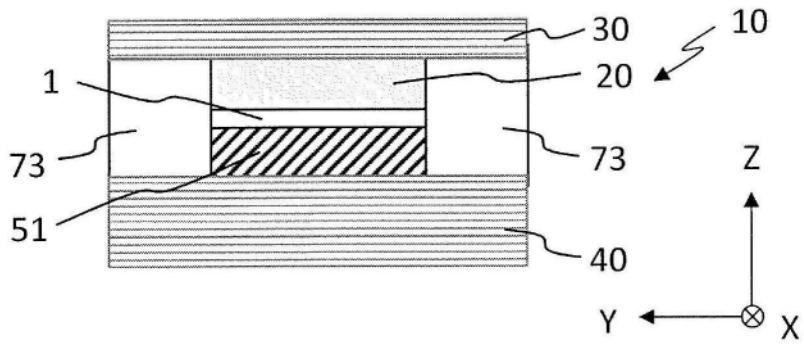


图19D

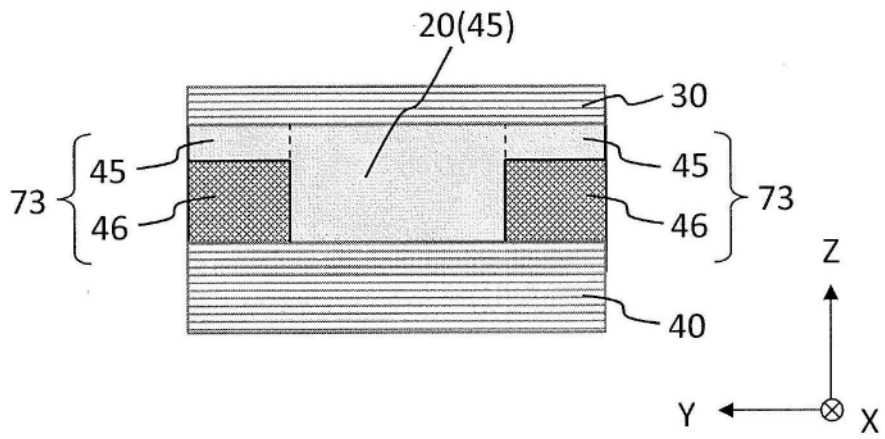


图20

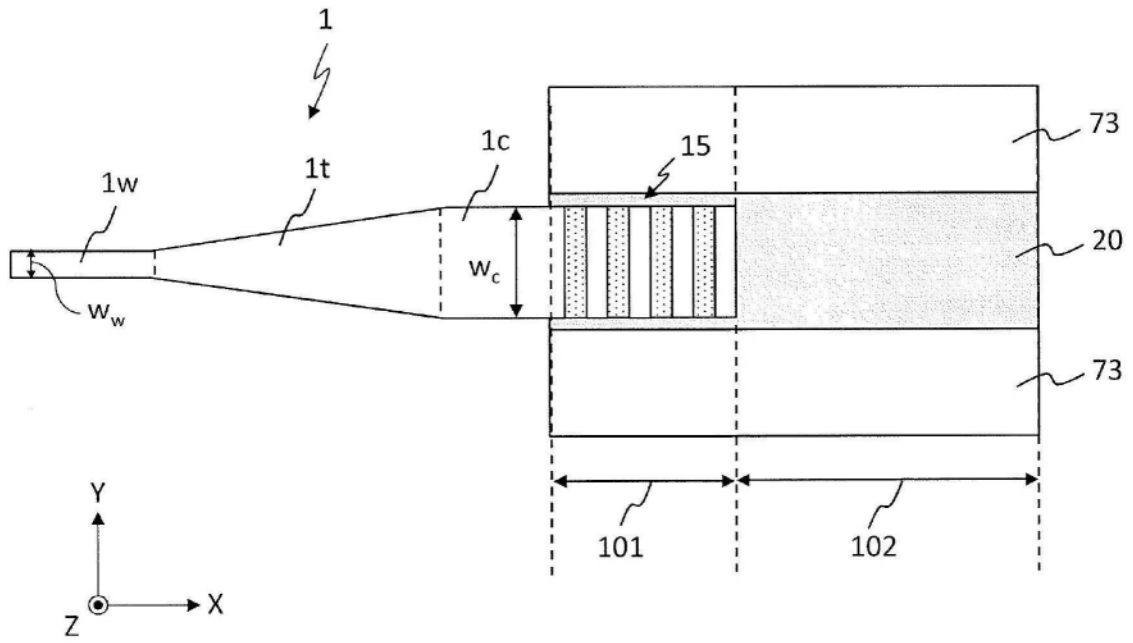


图21

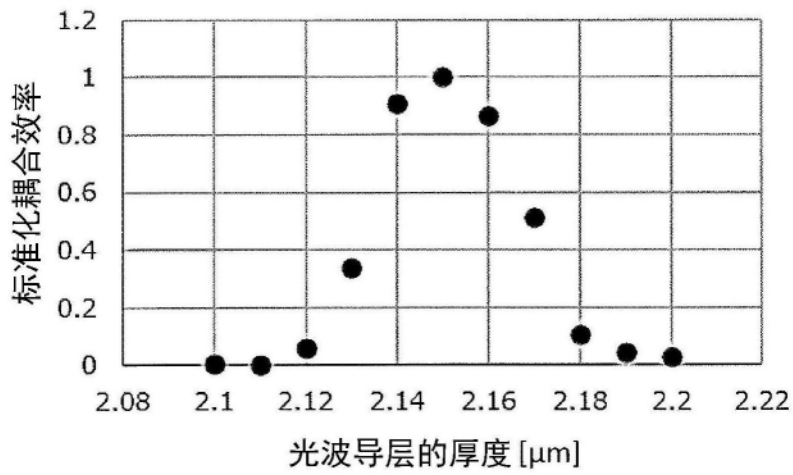


图22

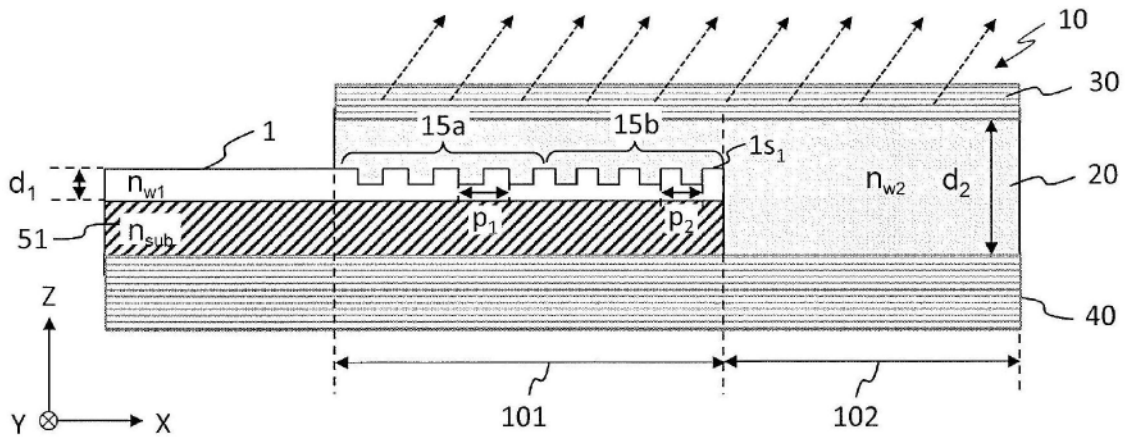


图23A

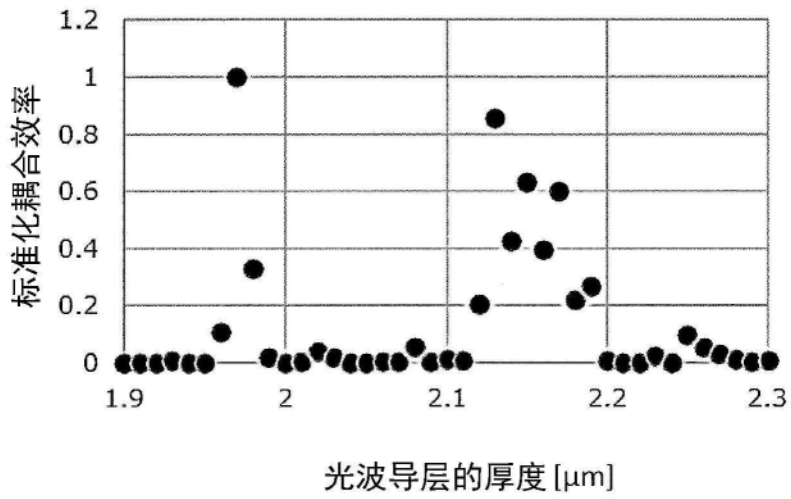


图23B

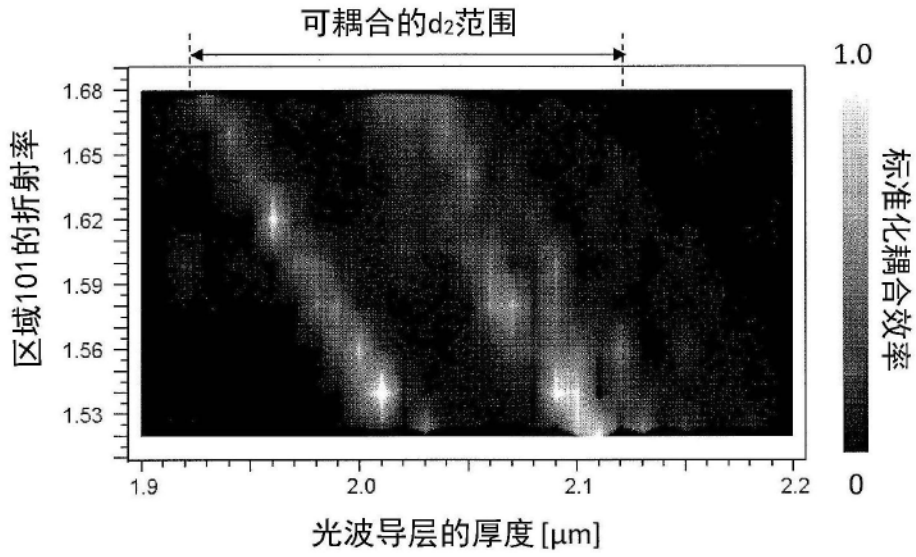


图23C

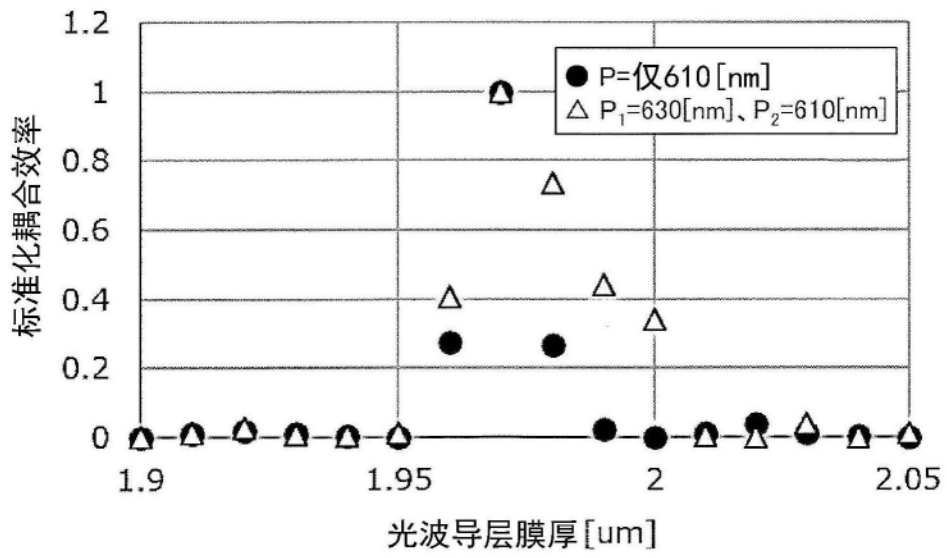


图23D

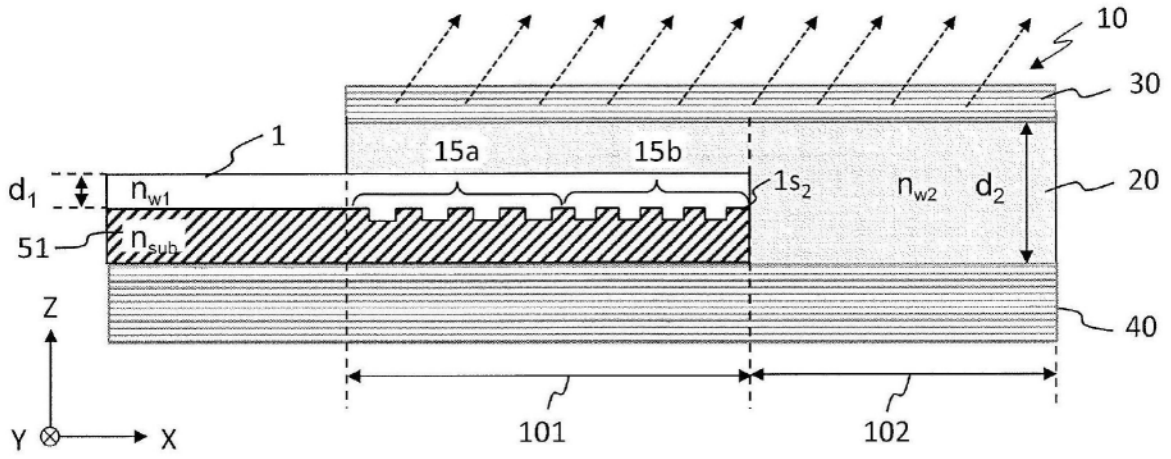


图24A

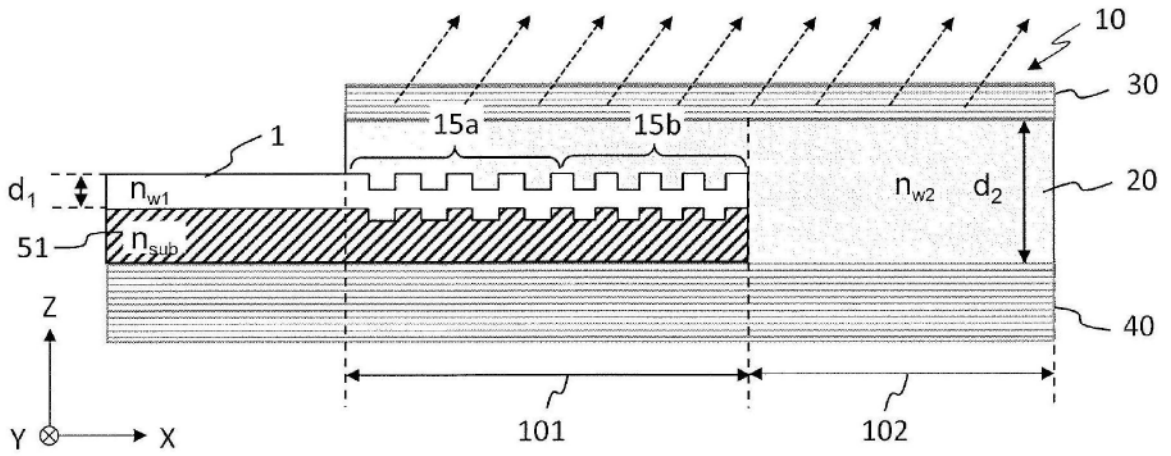


图24B

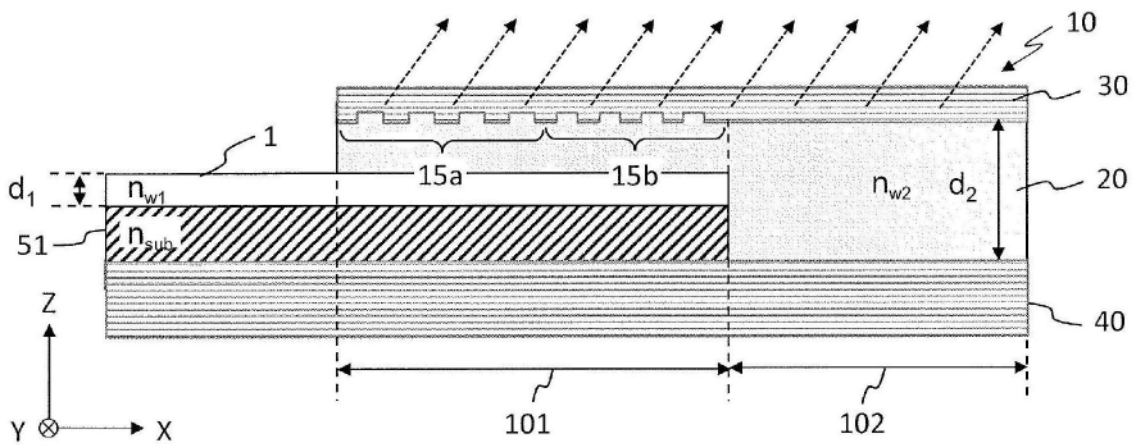


图24C

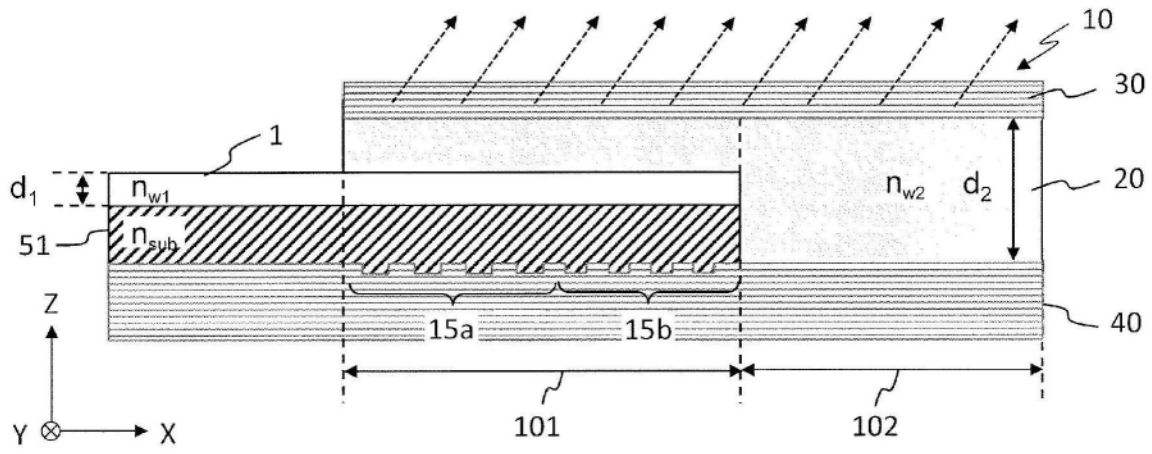


图24D

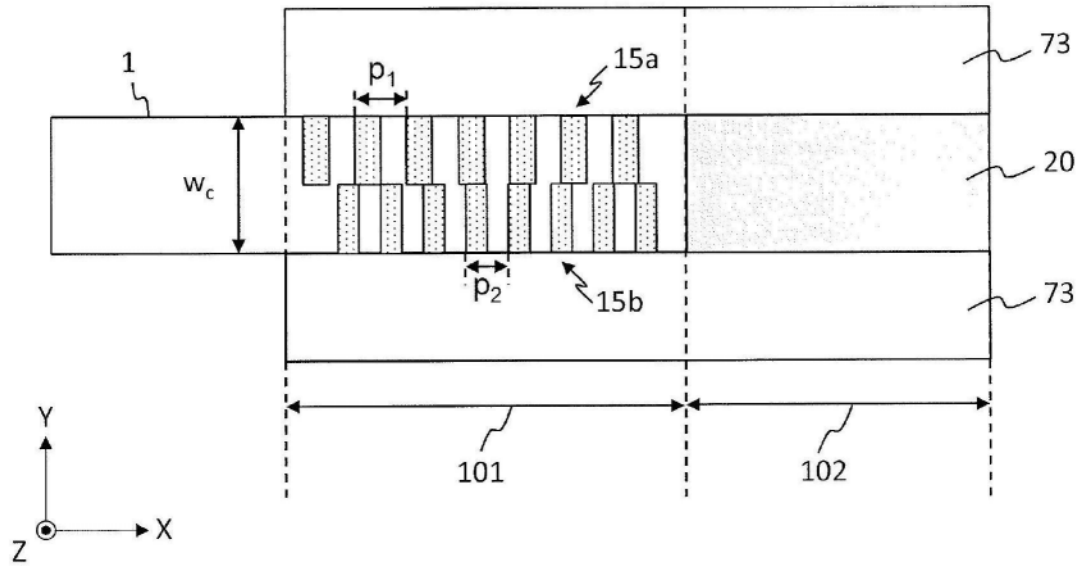


图25A

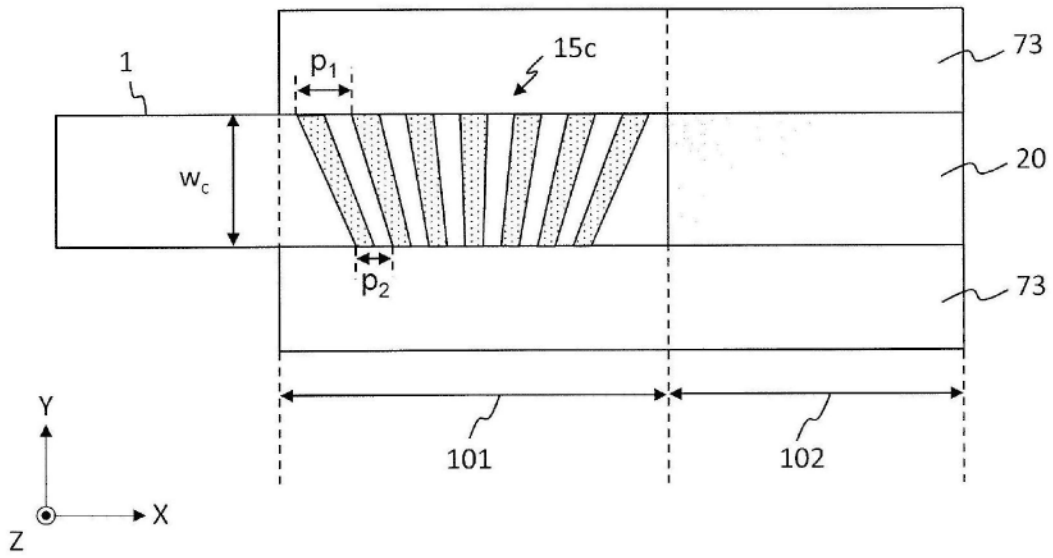


图25B

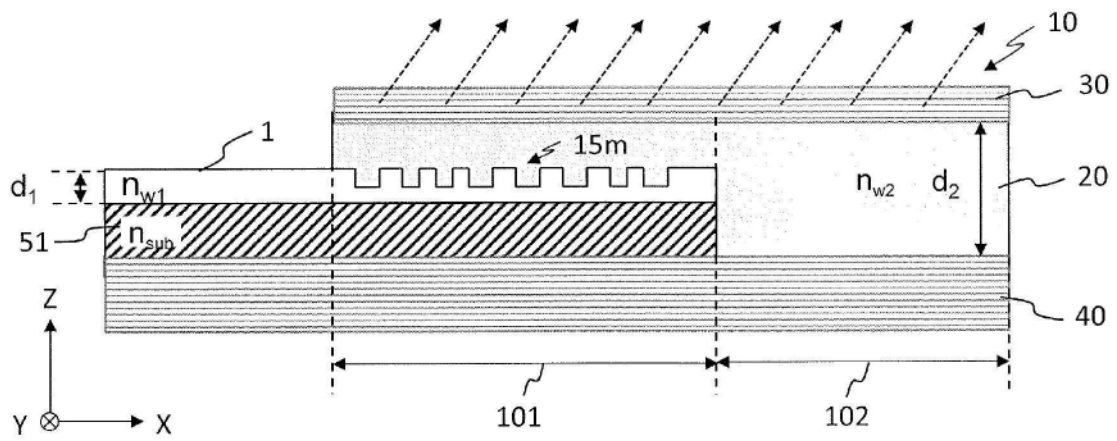


图26

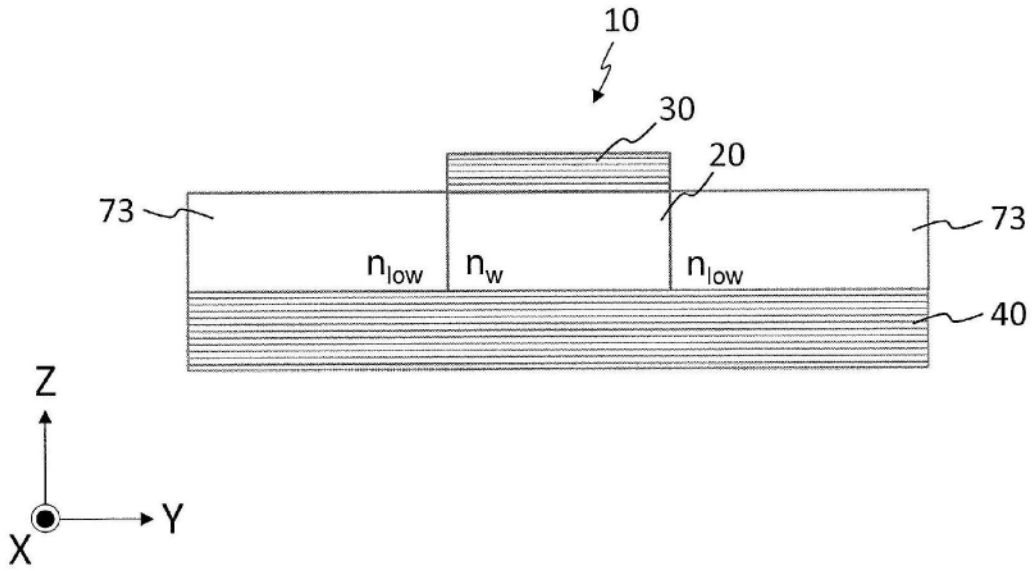


图27A

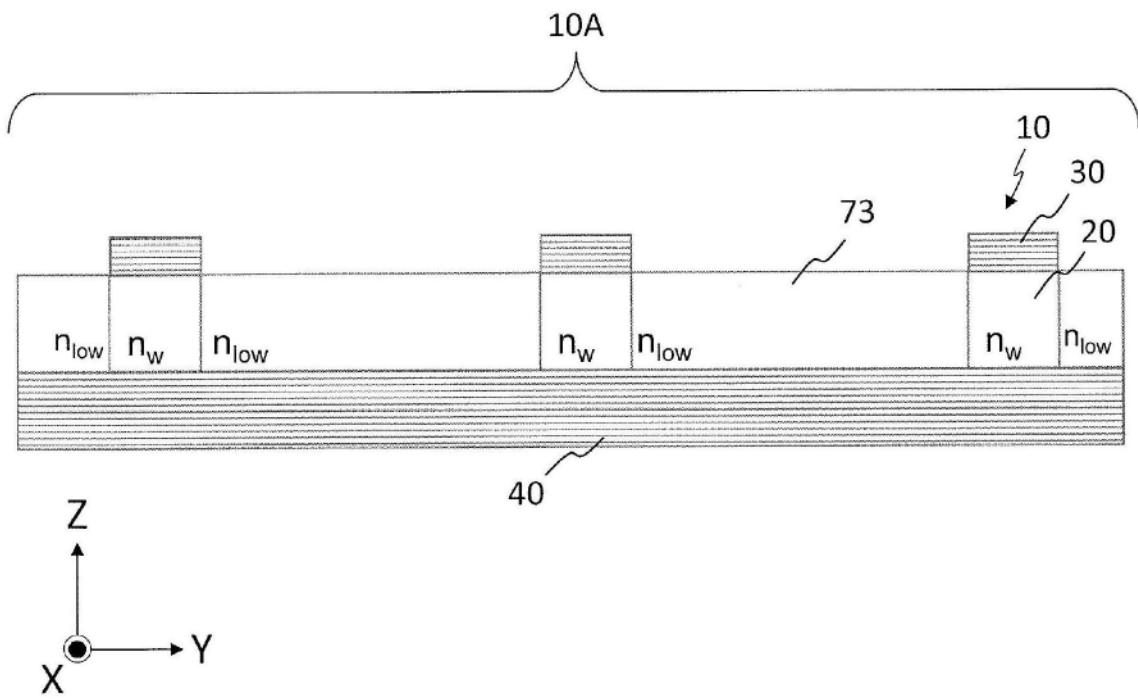


图27B

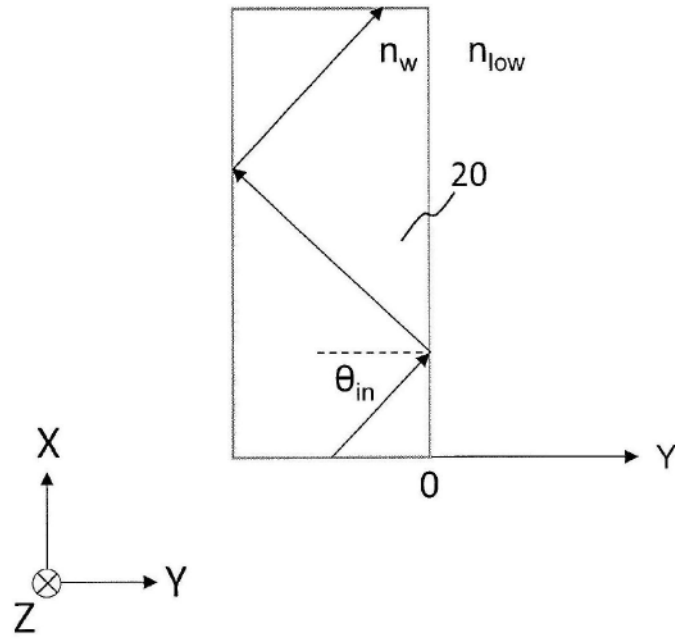


图28

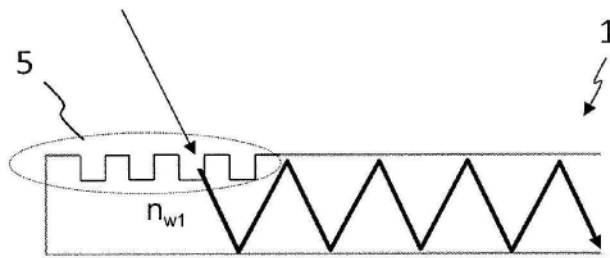


图29A

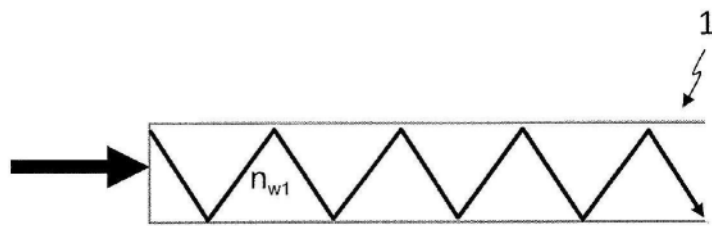


图29B

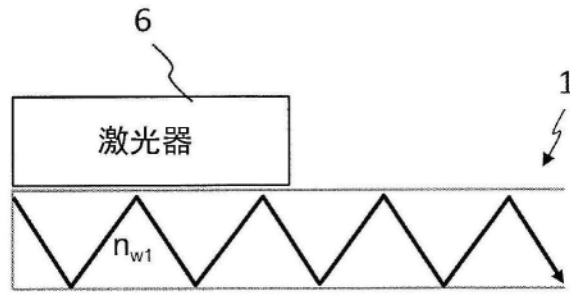


图29C

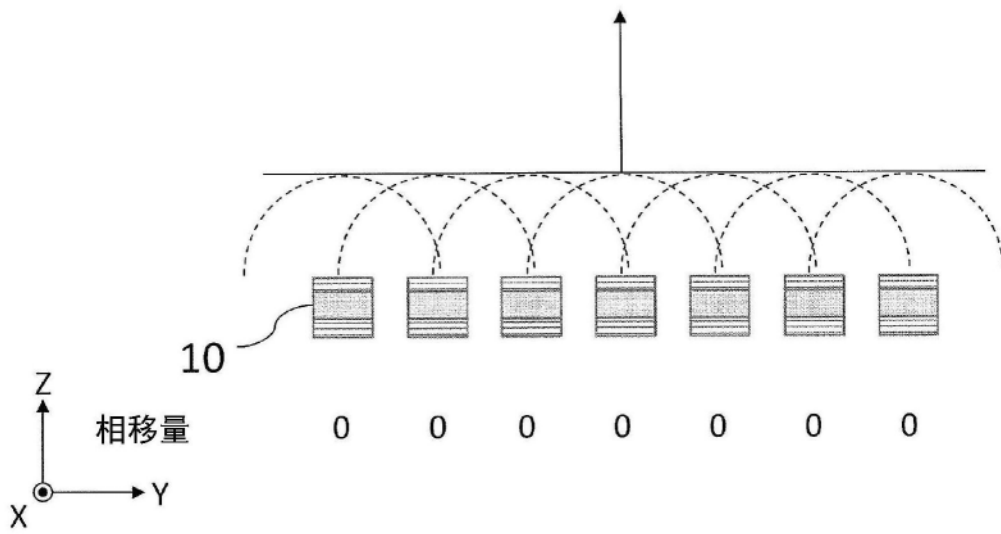


图30A

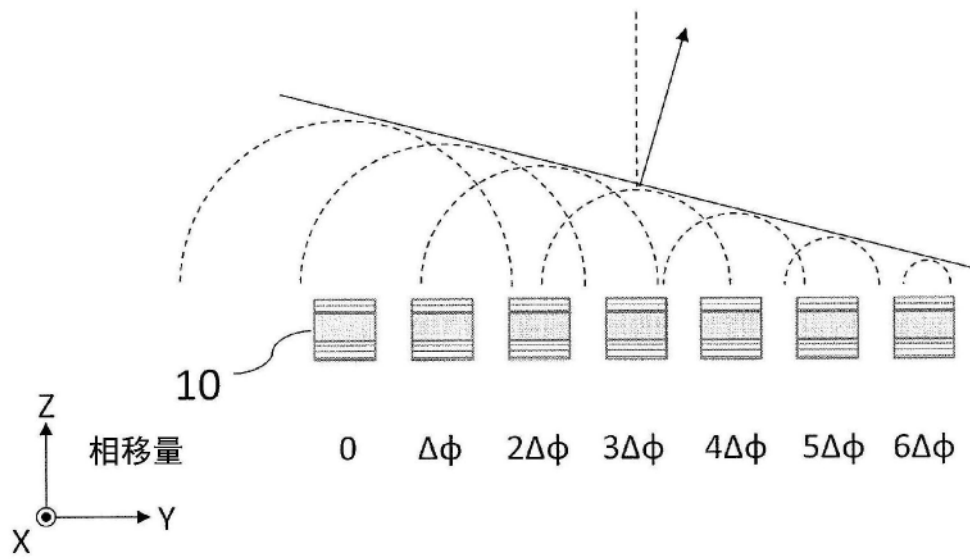


图30B

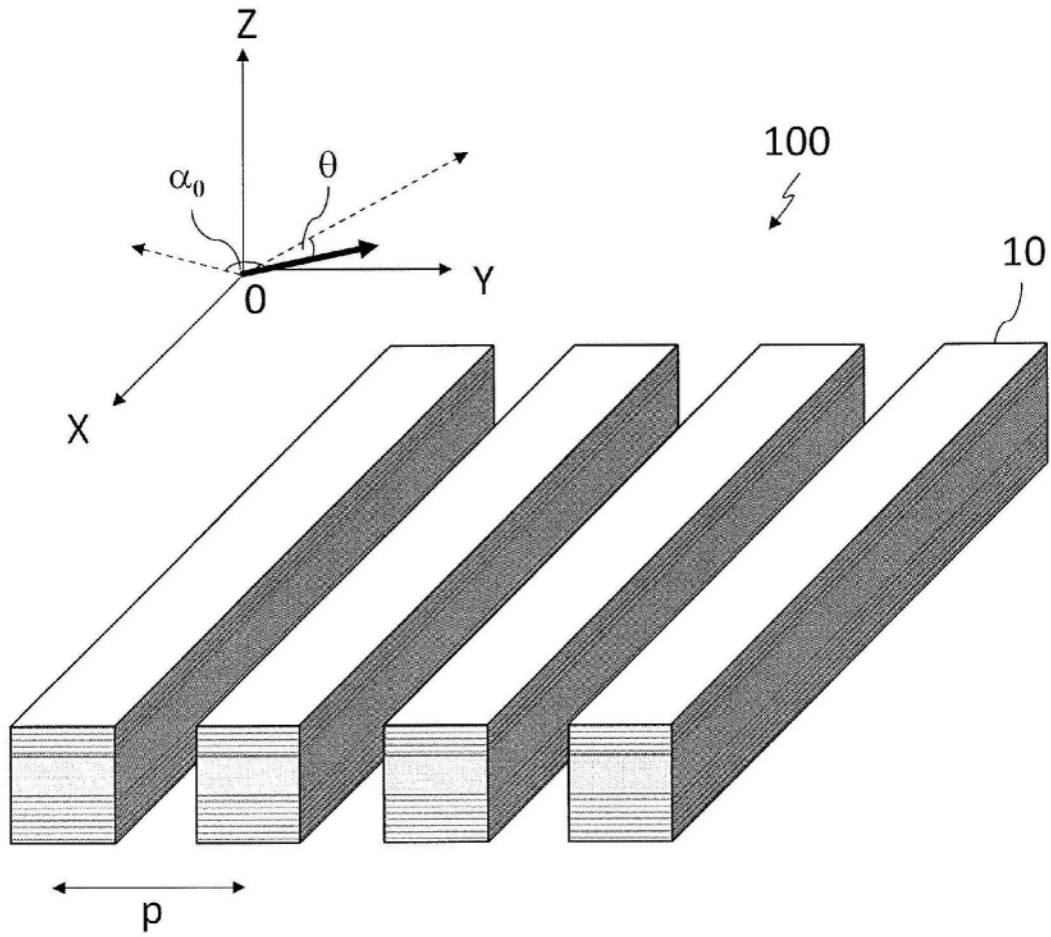


图31

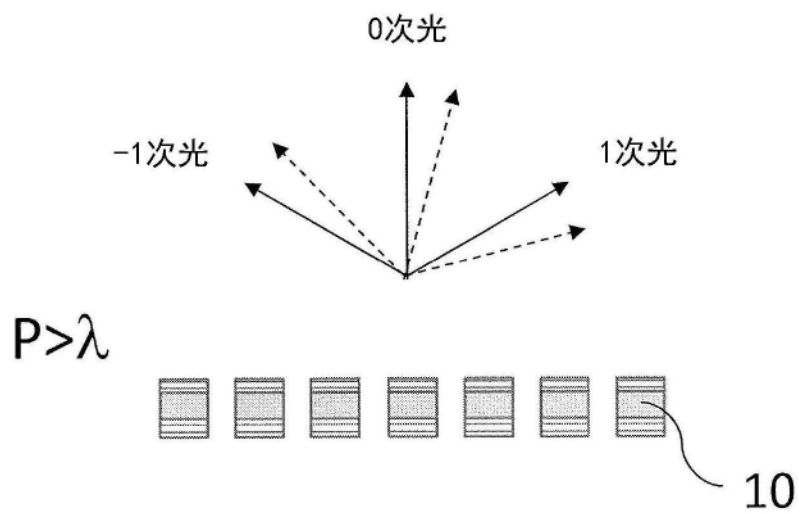


图32A

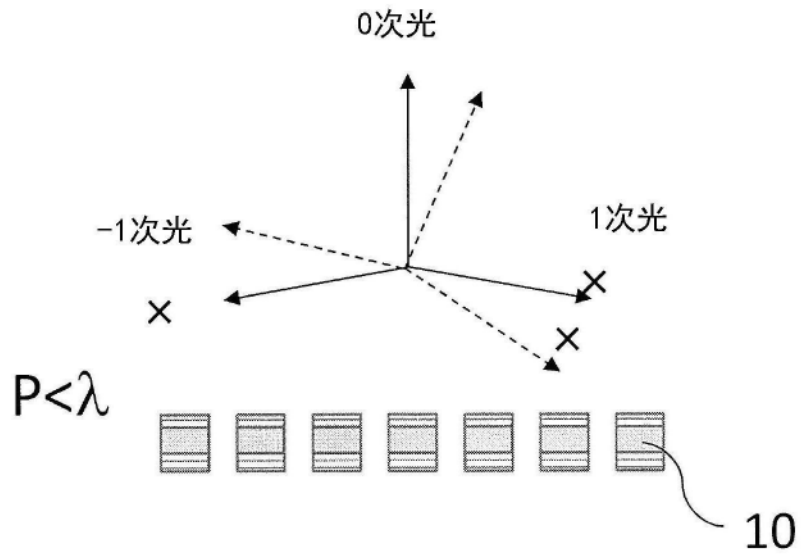


图32B

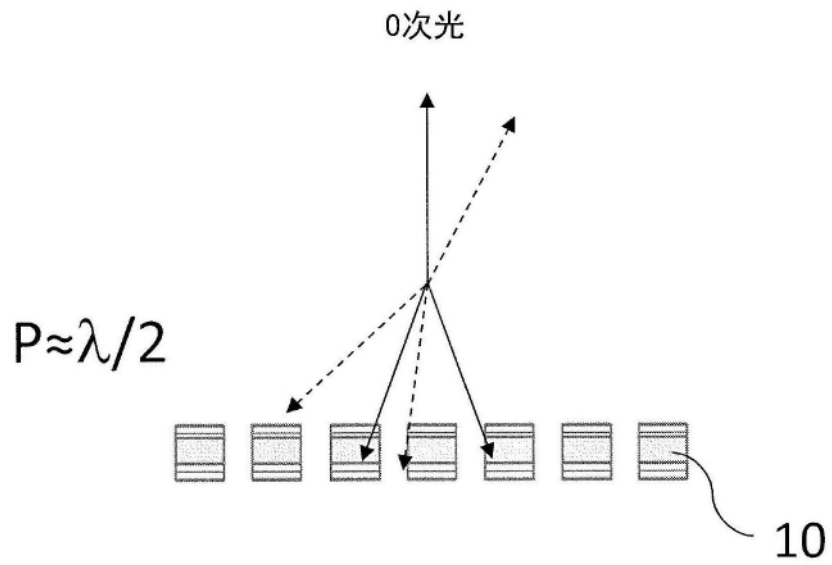


图32C

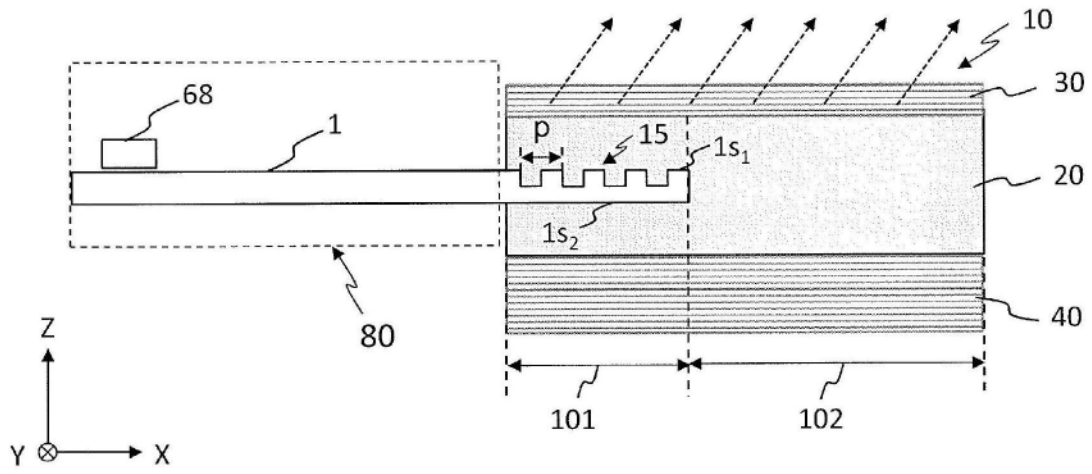


图33

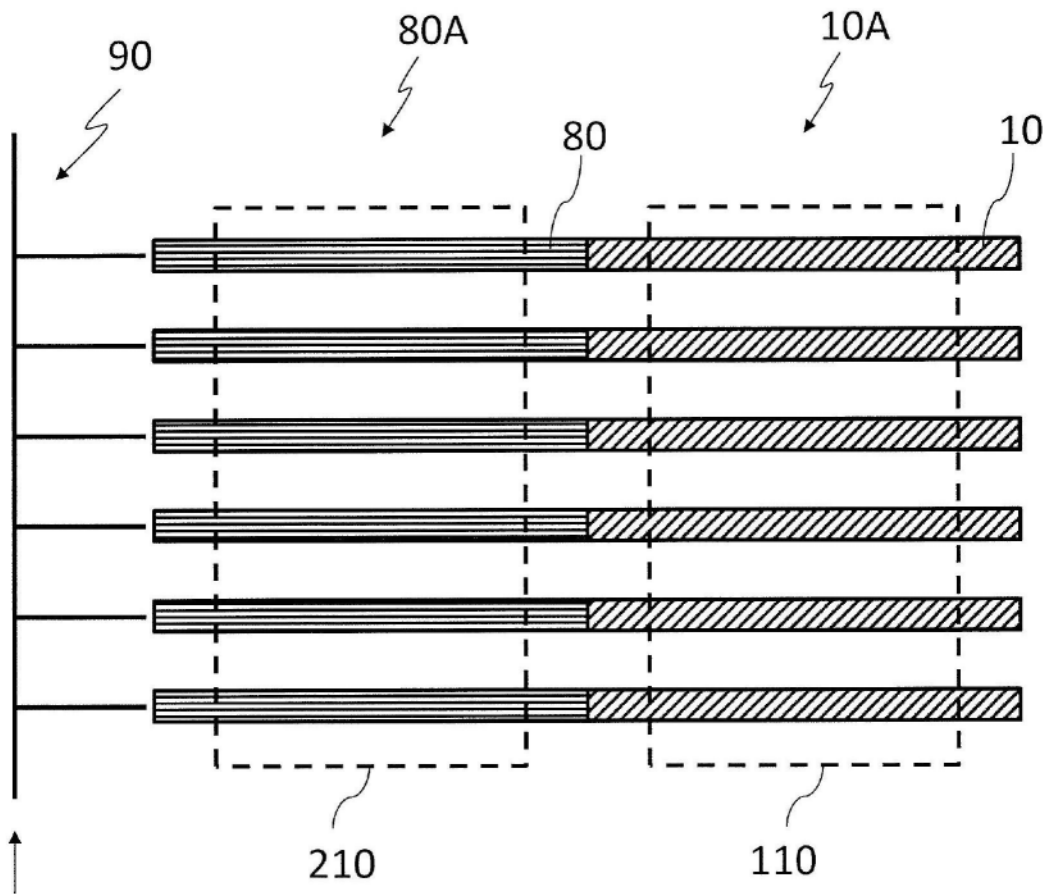


图34

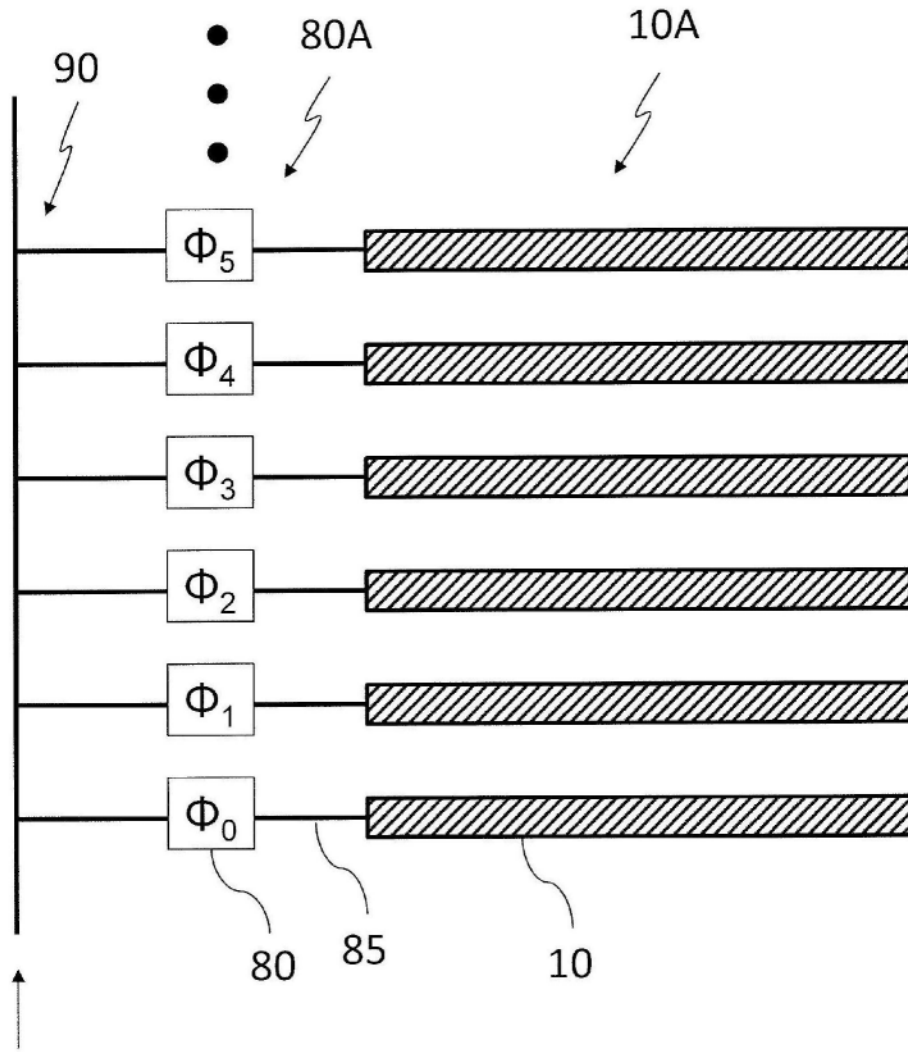


图35

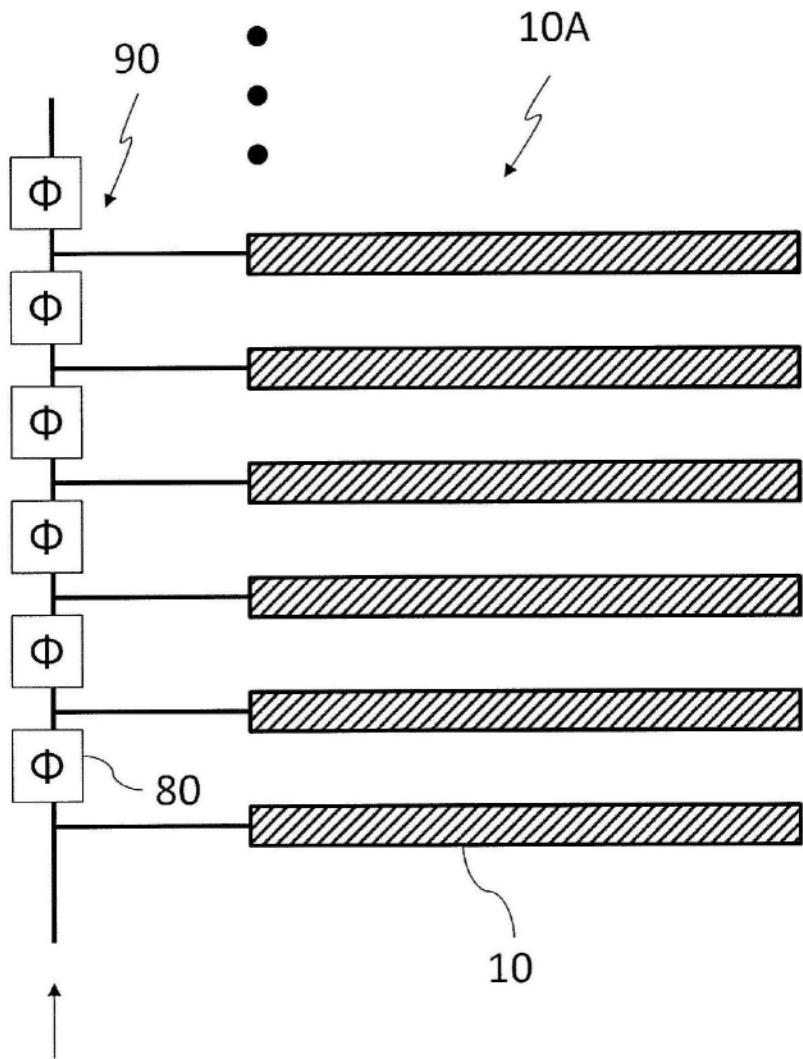


图36

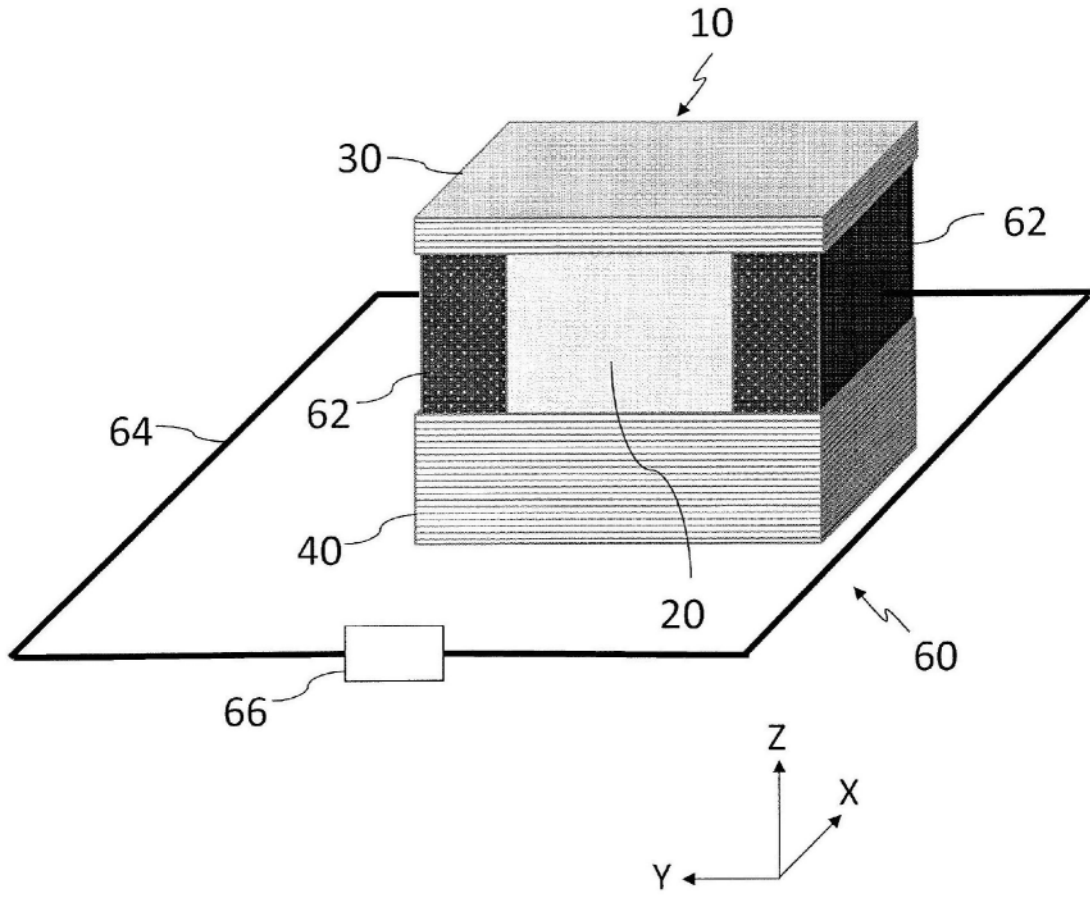


图37A

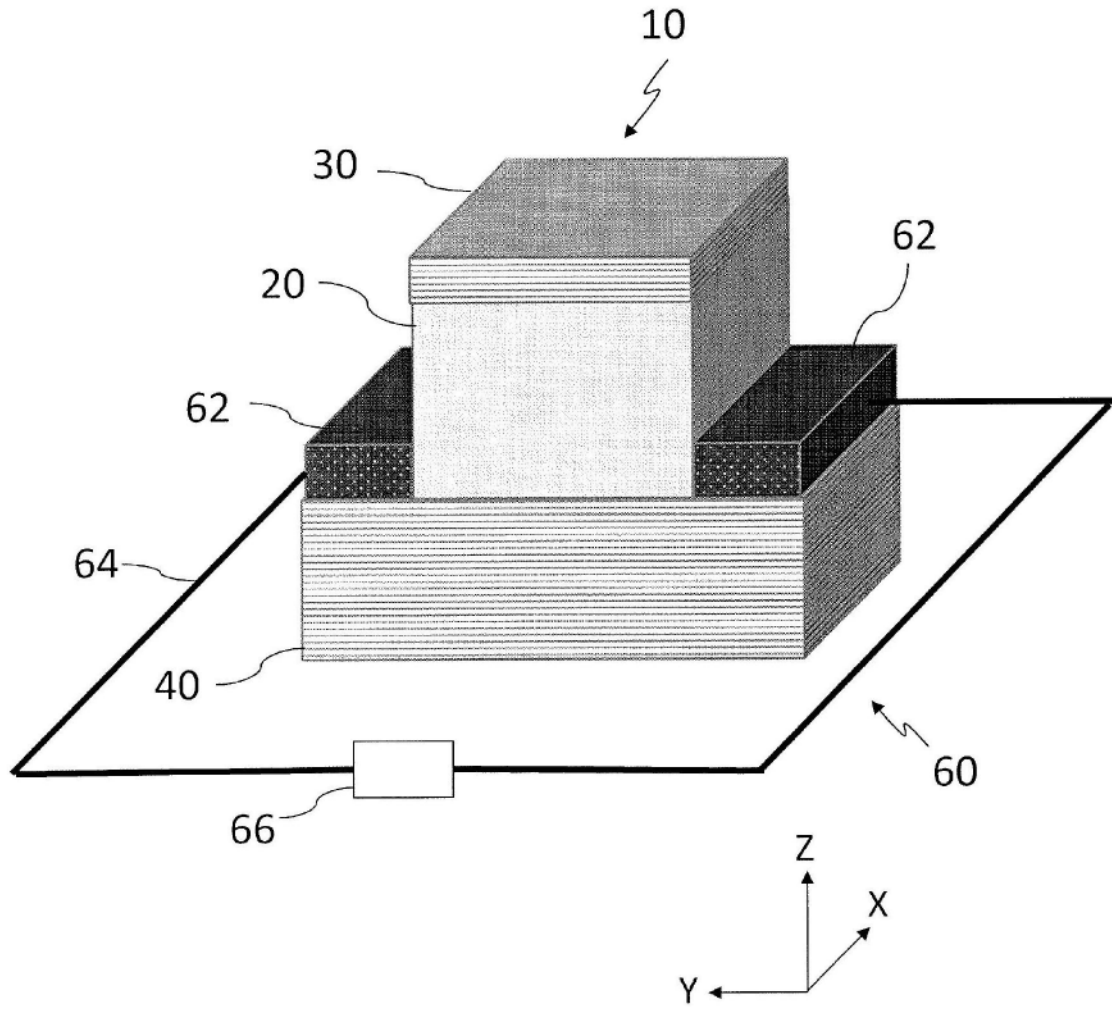


图37B

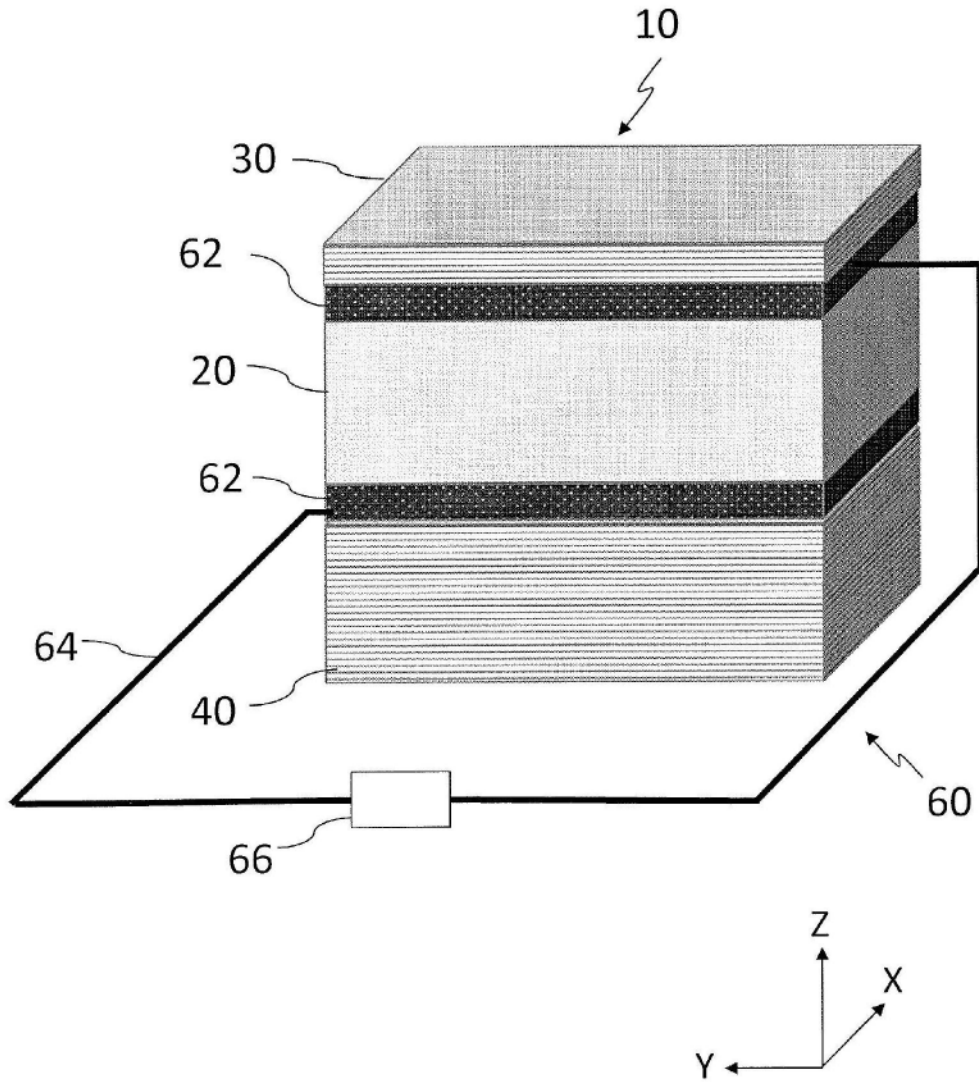


图37C

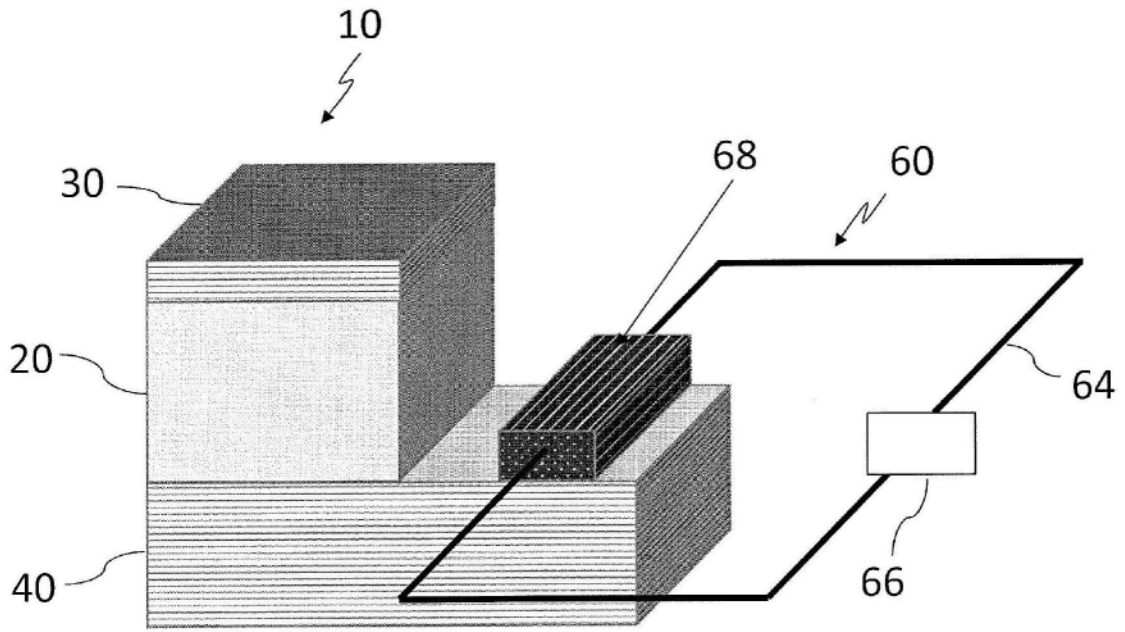


图38

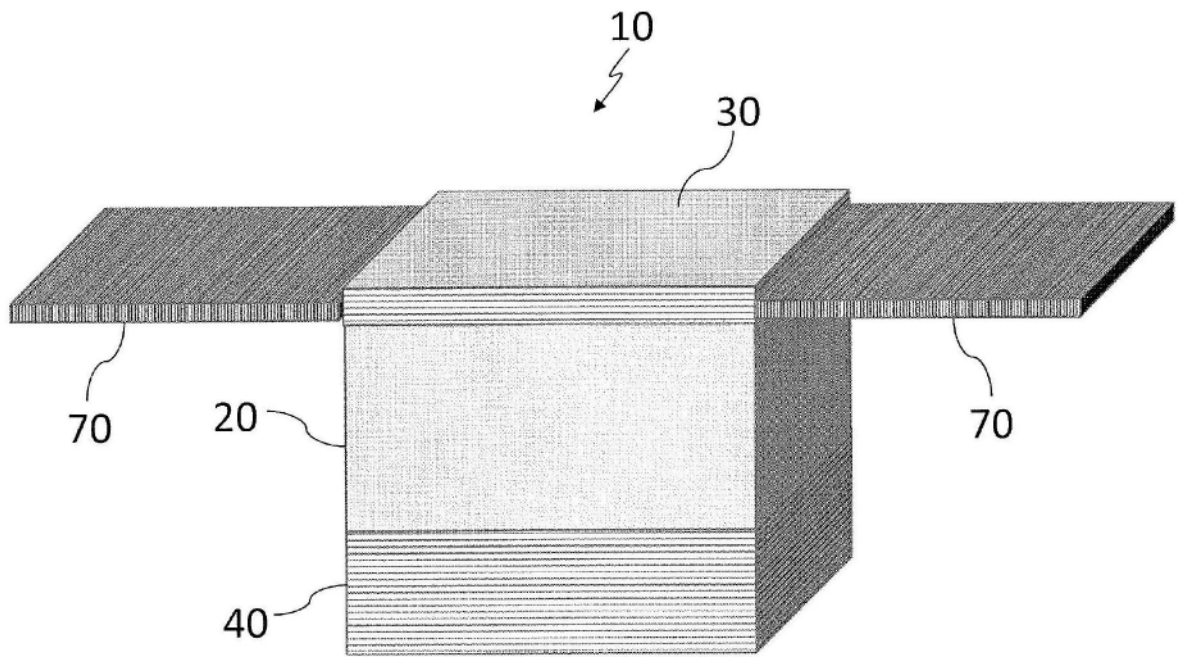


图39

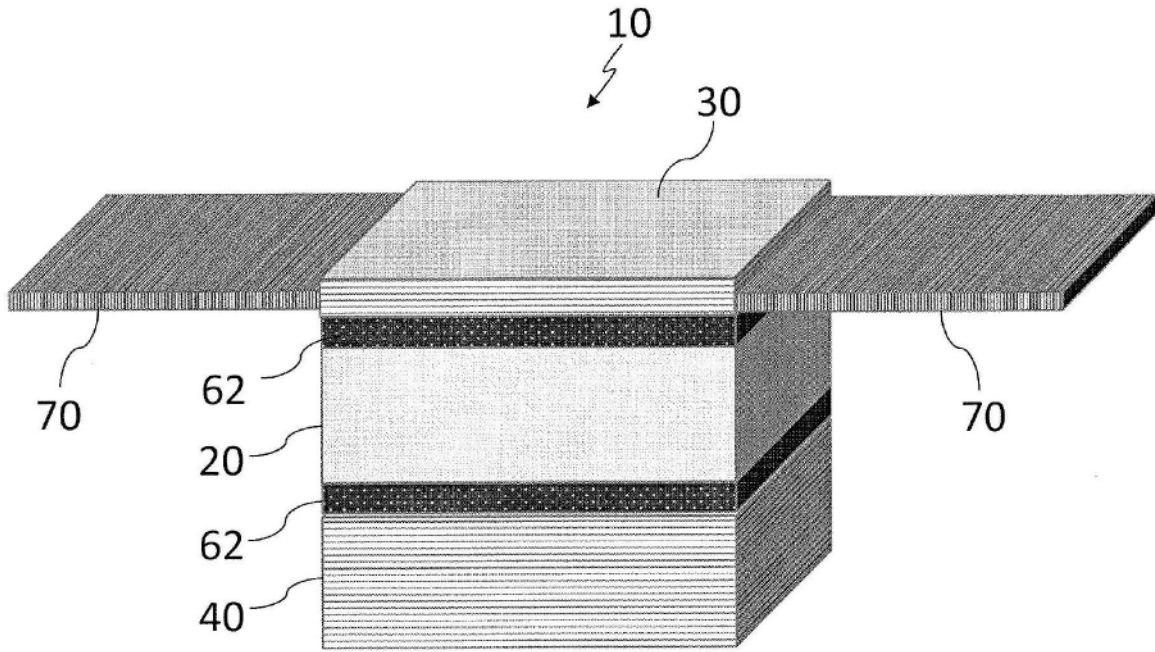


图40

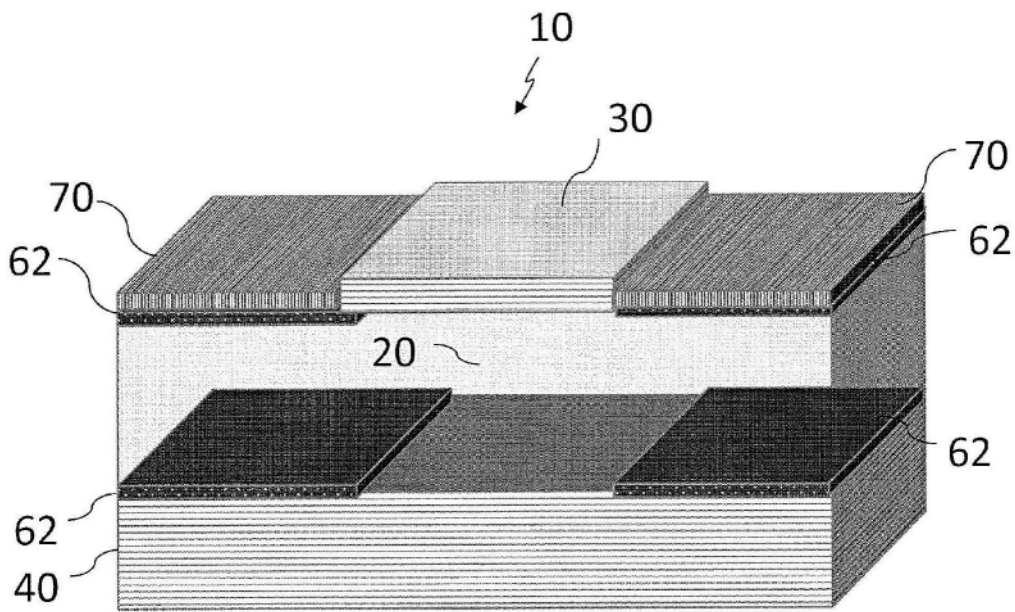


图41

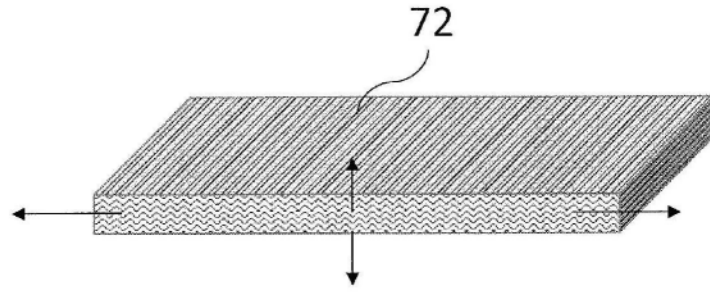


图42

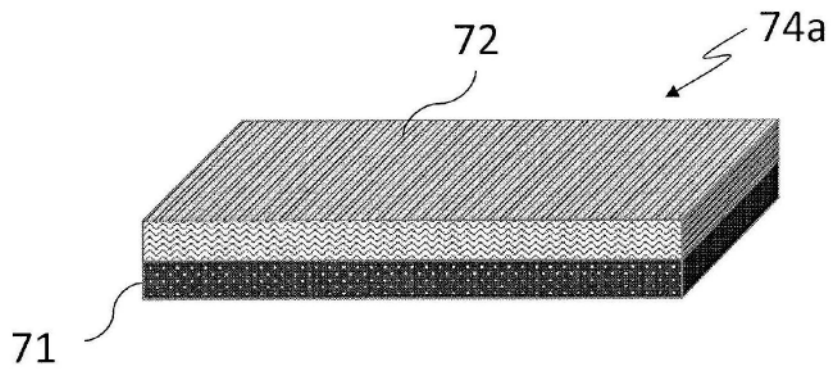


图43A

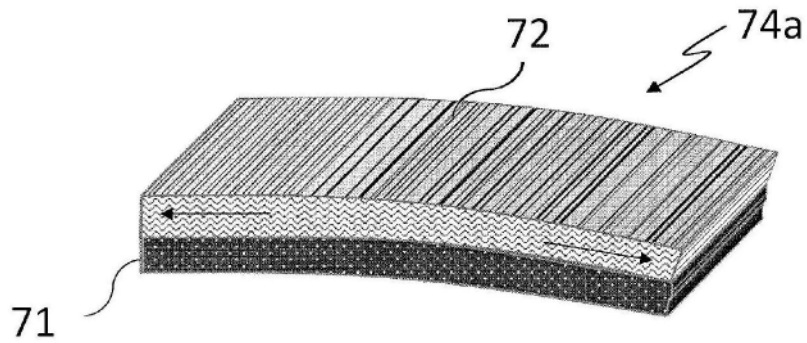


图43B

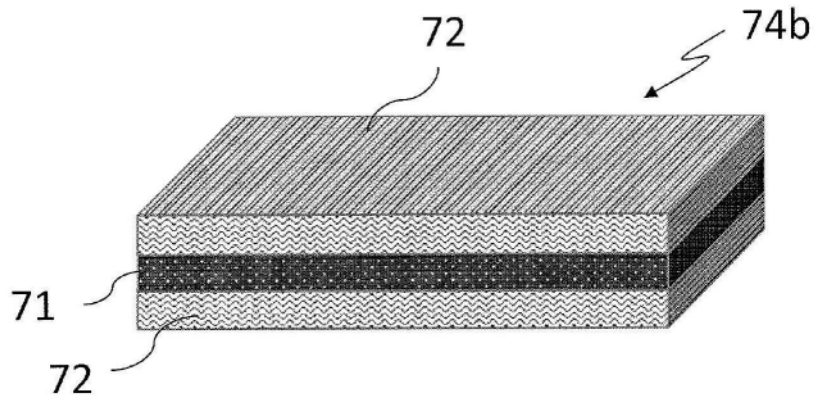


图44A

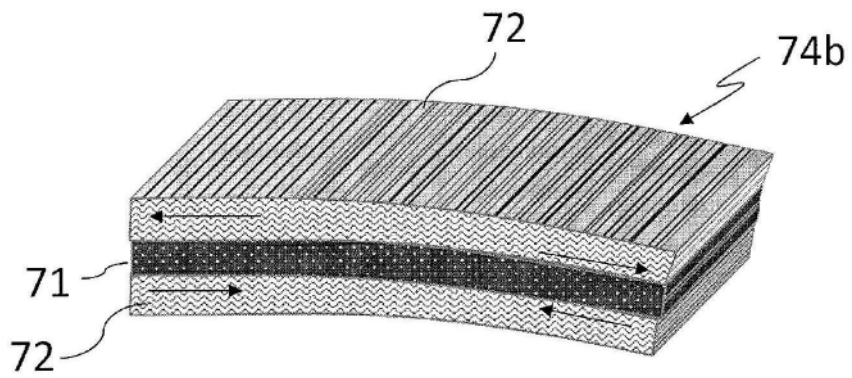


图44B

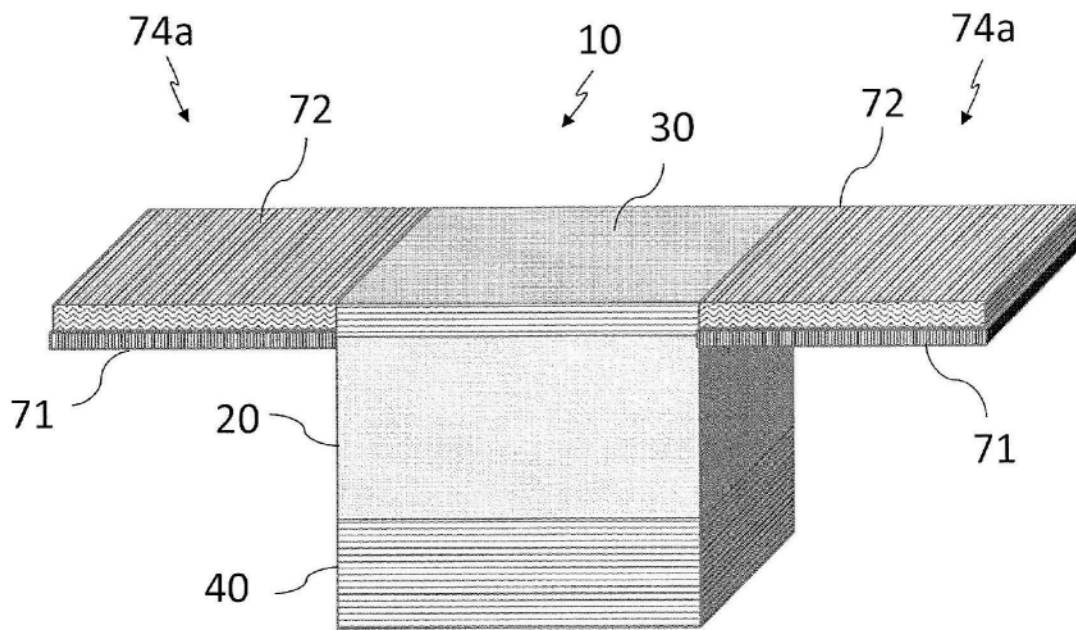


图45

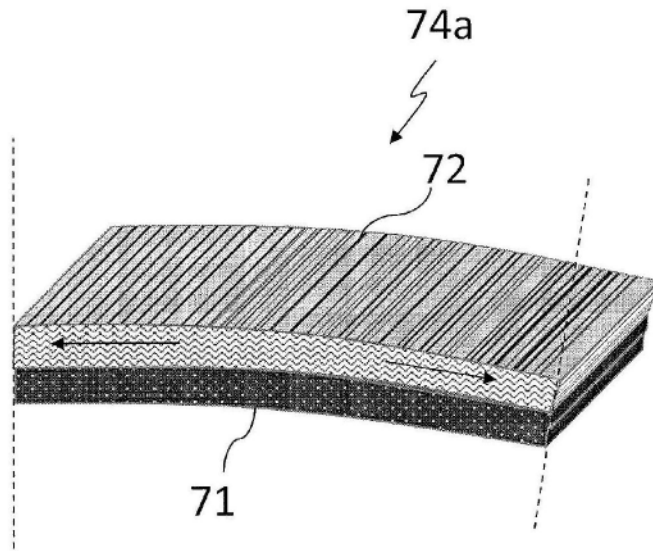


图46A

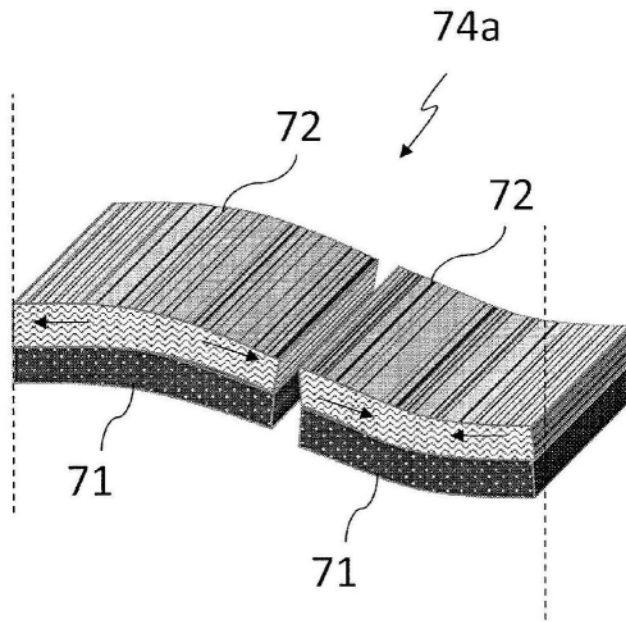


图46B

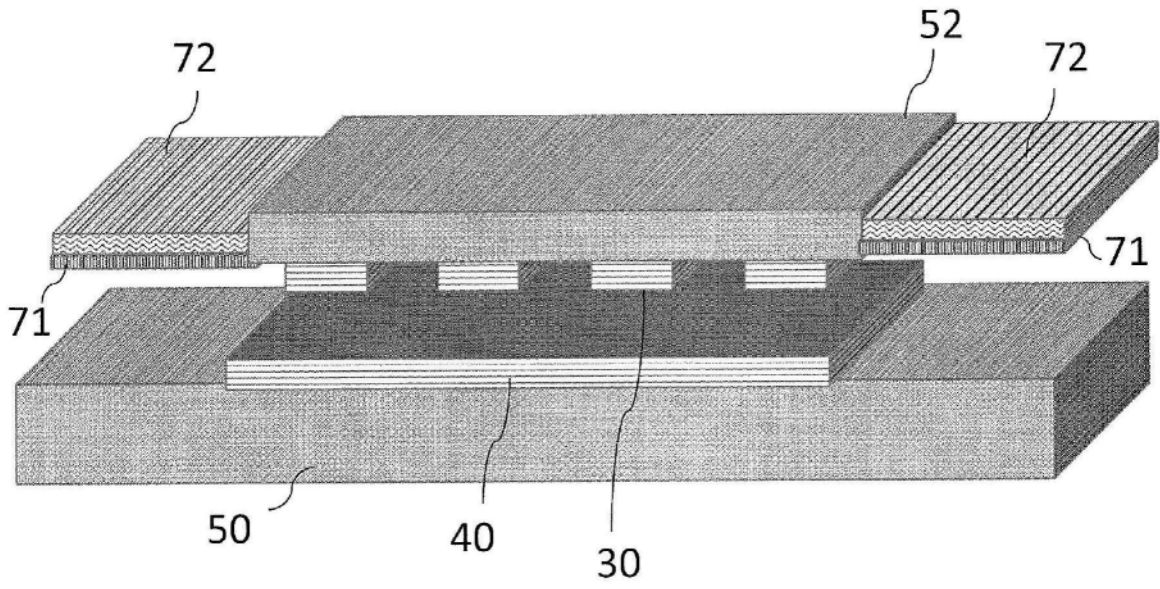


图47

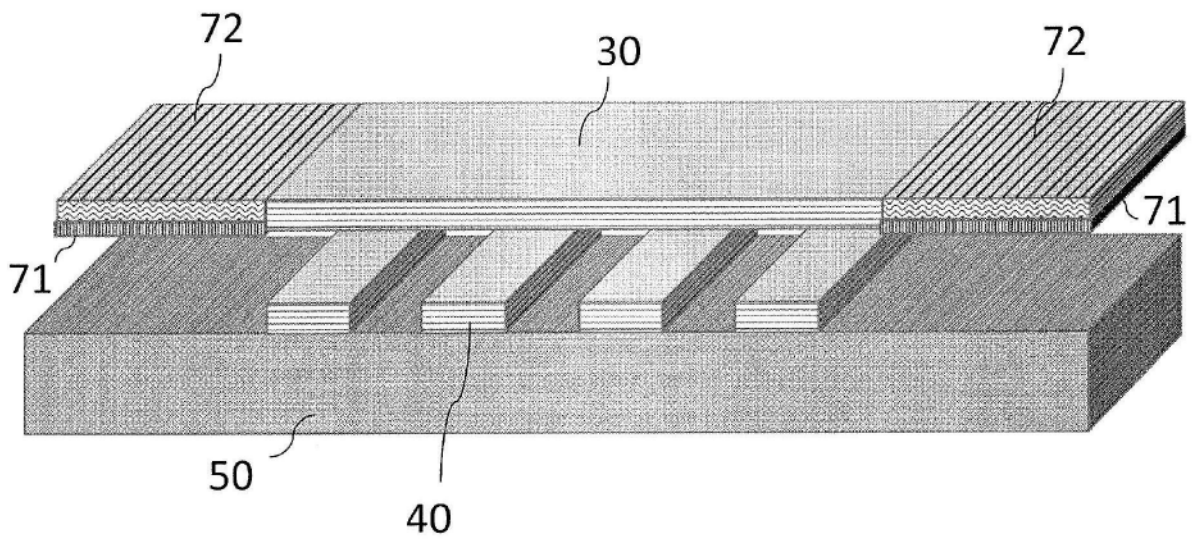


图48

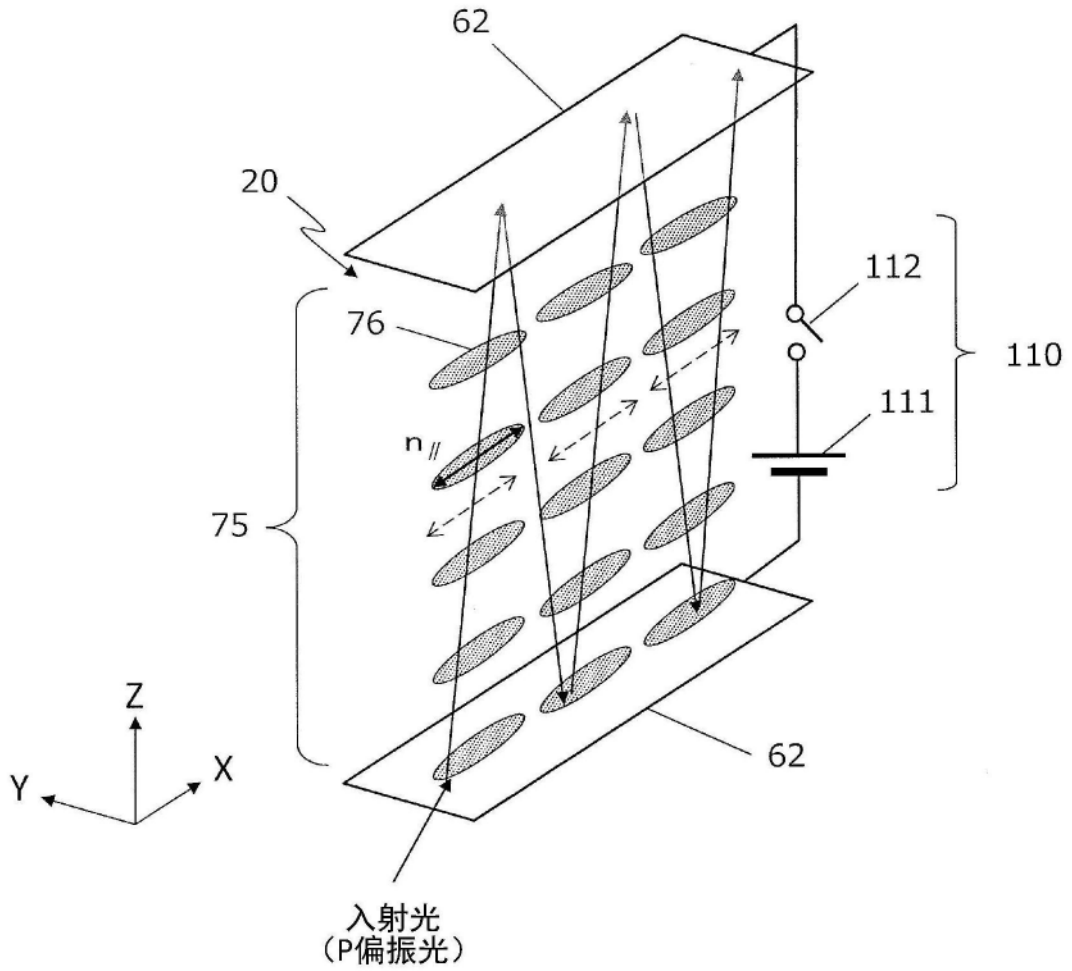


图49A

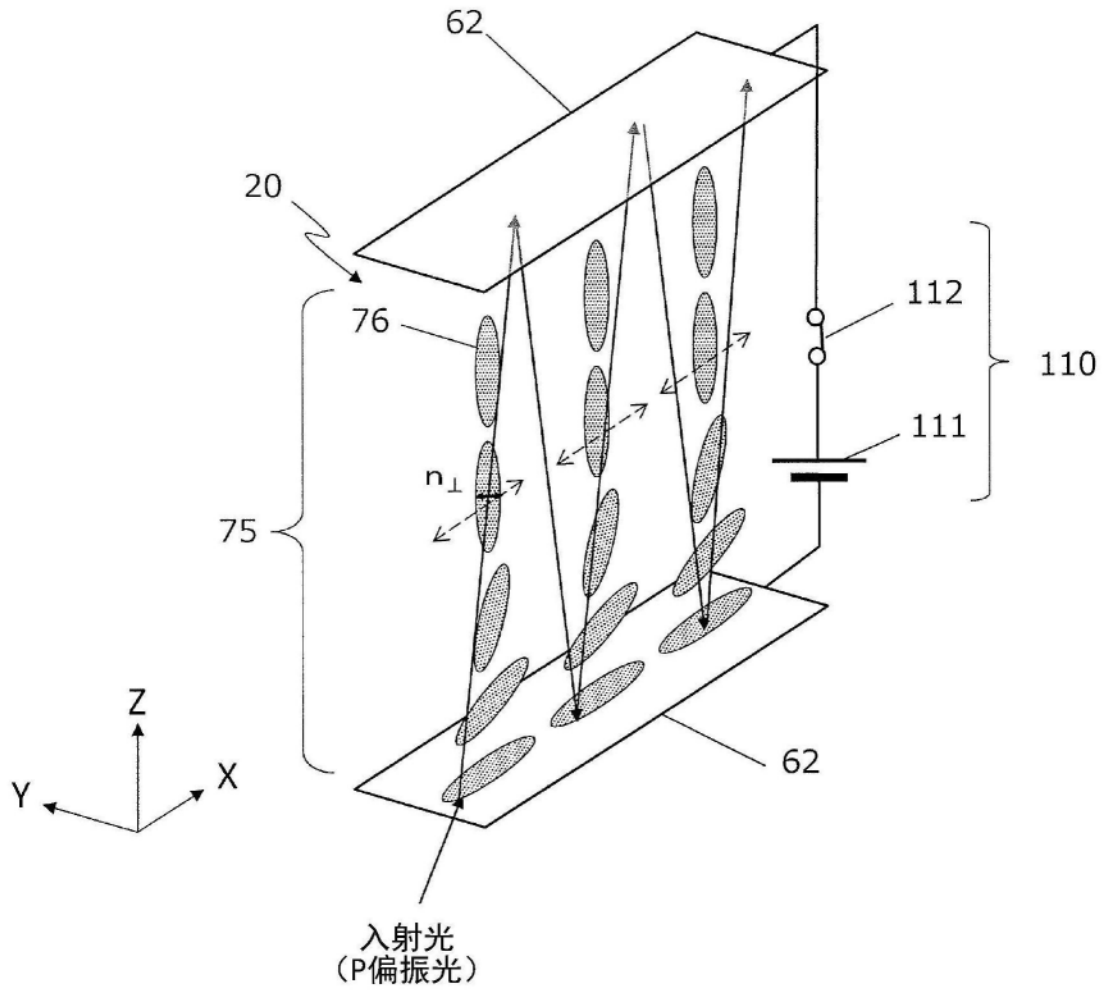


图49B

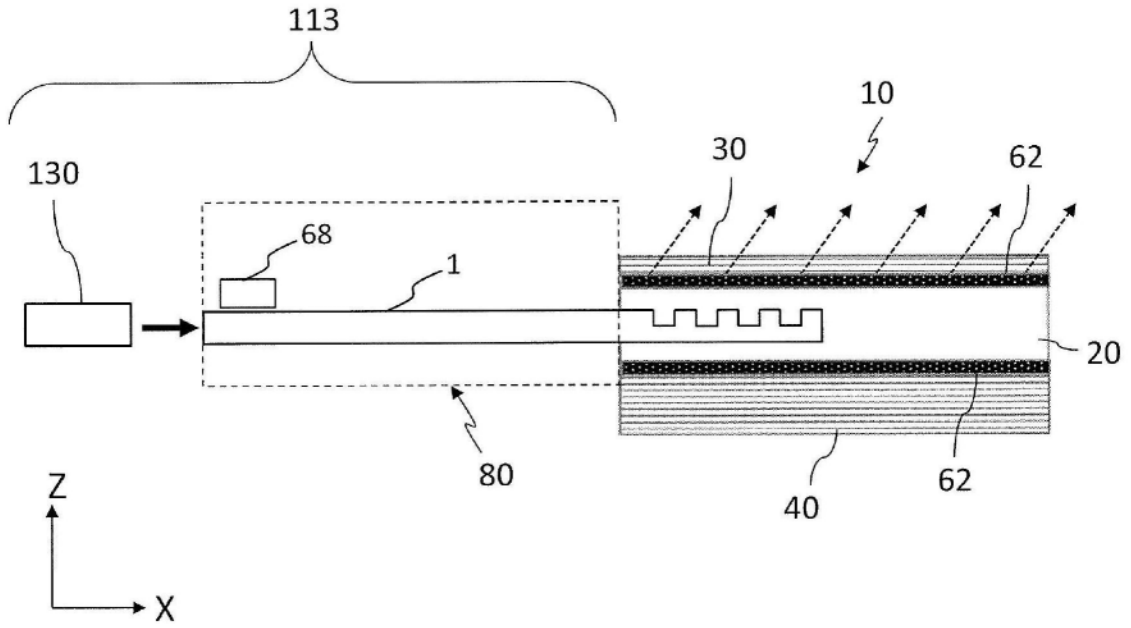


图50

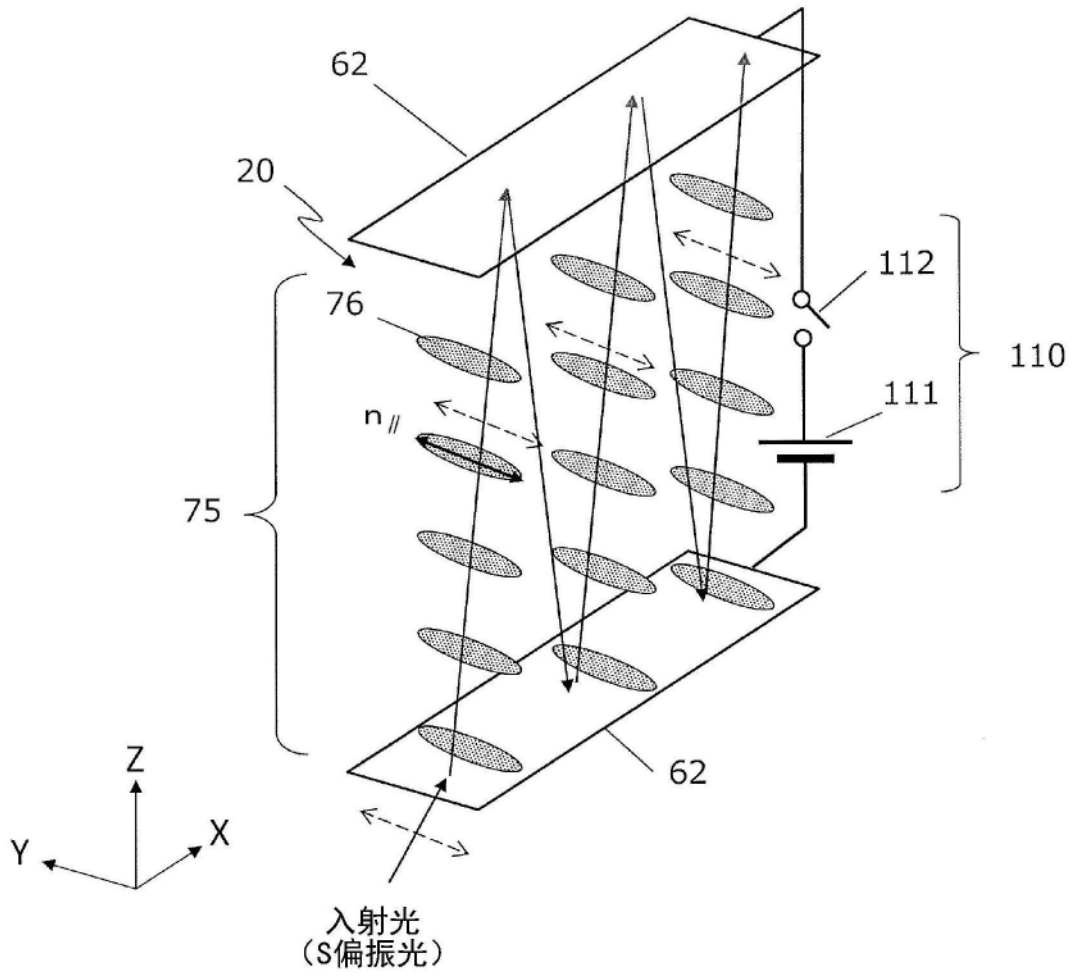


图51A

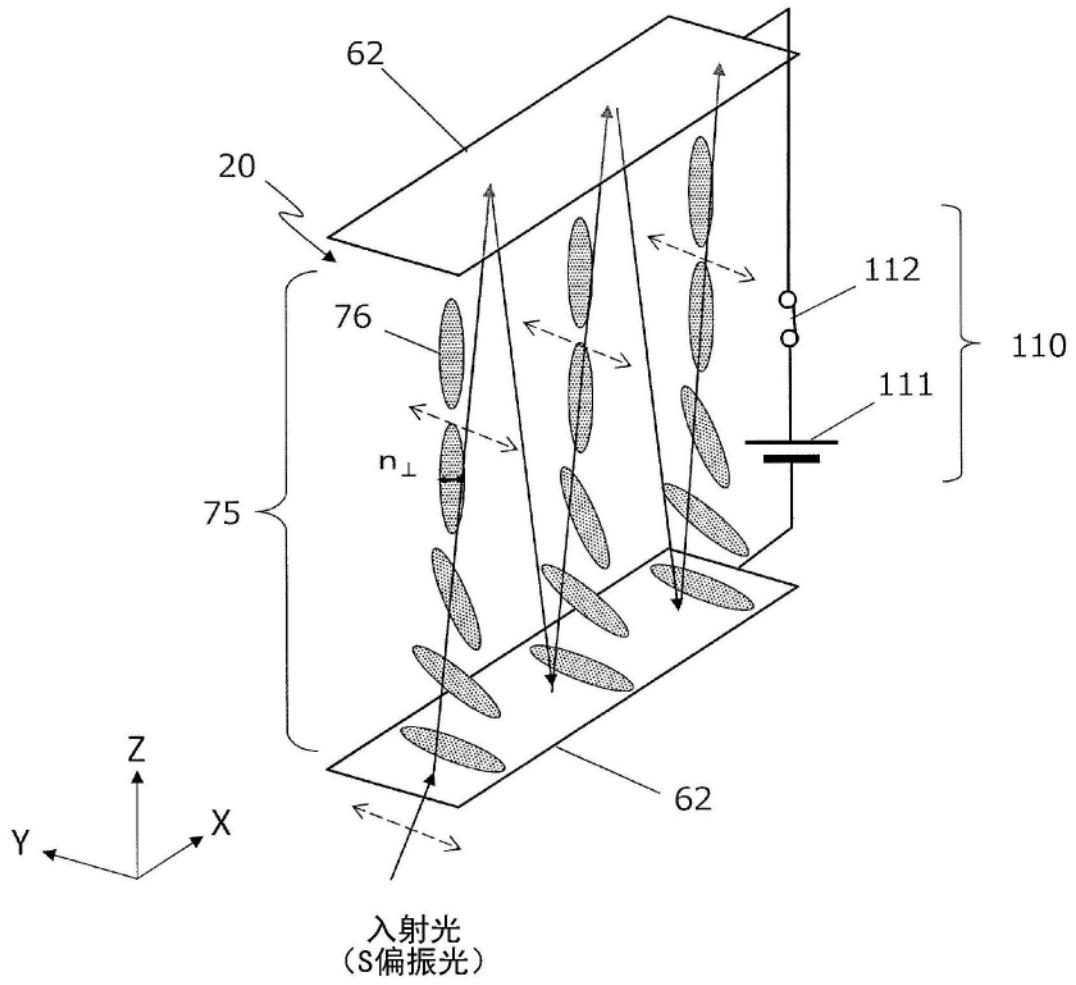
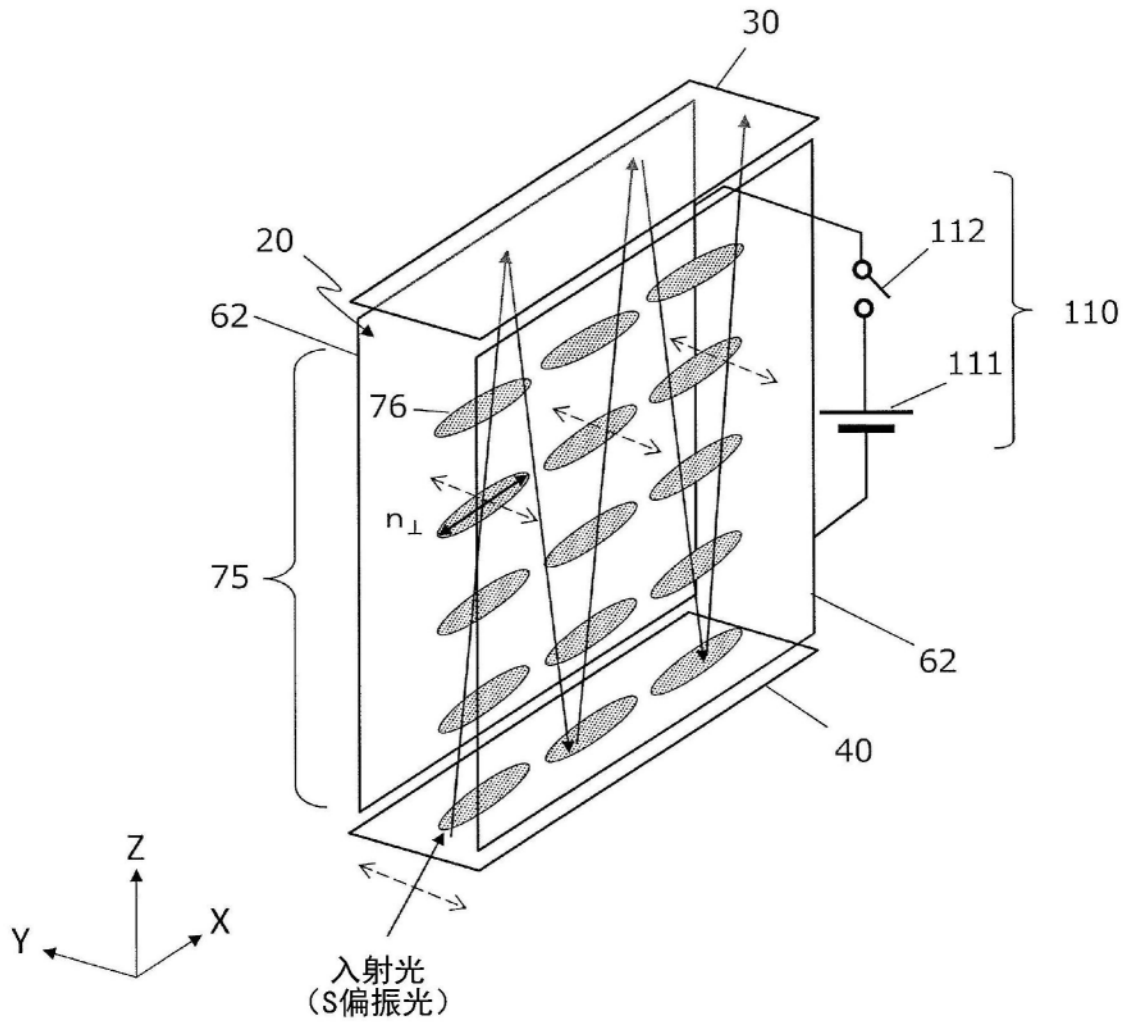


图51B



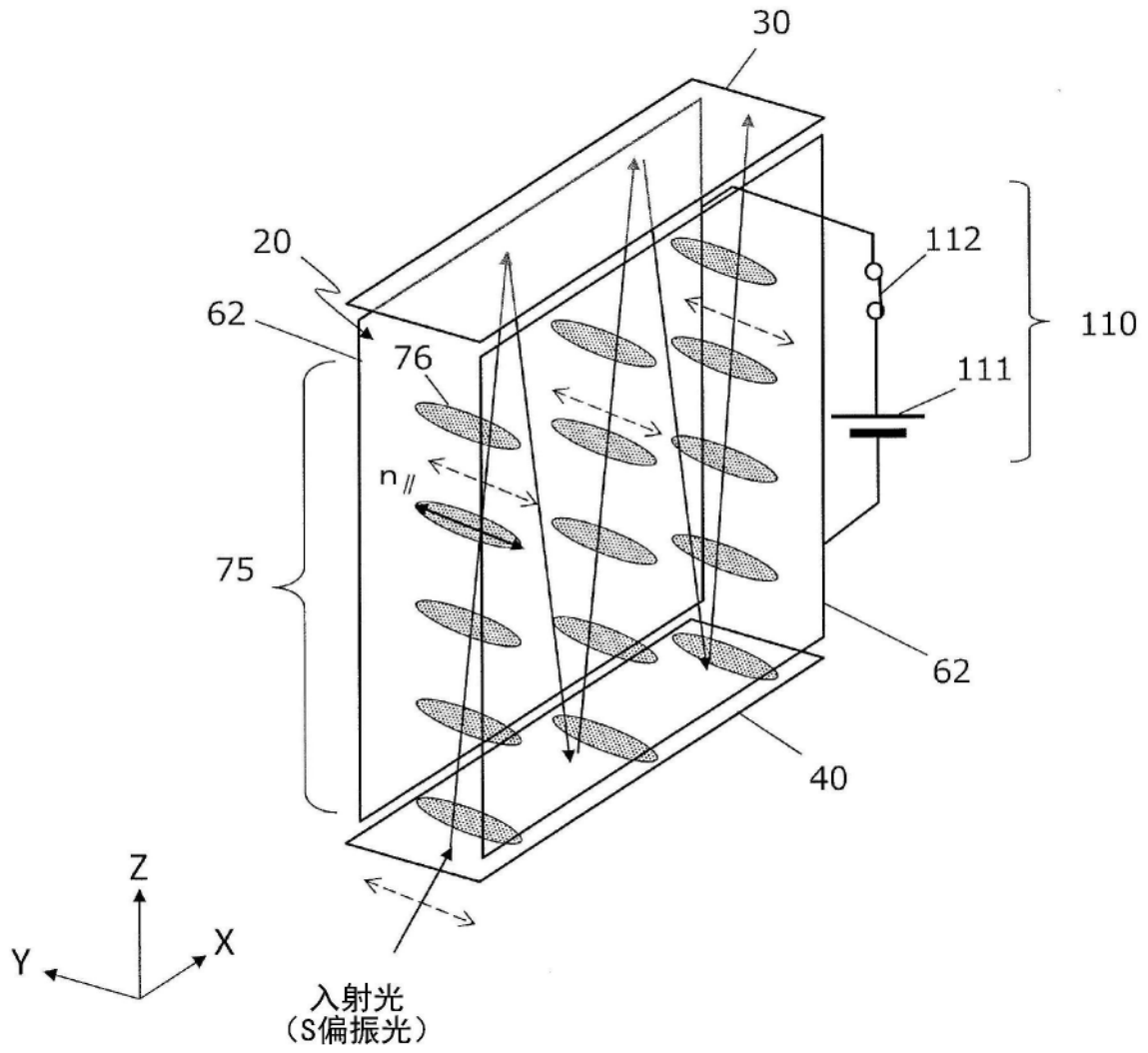
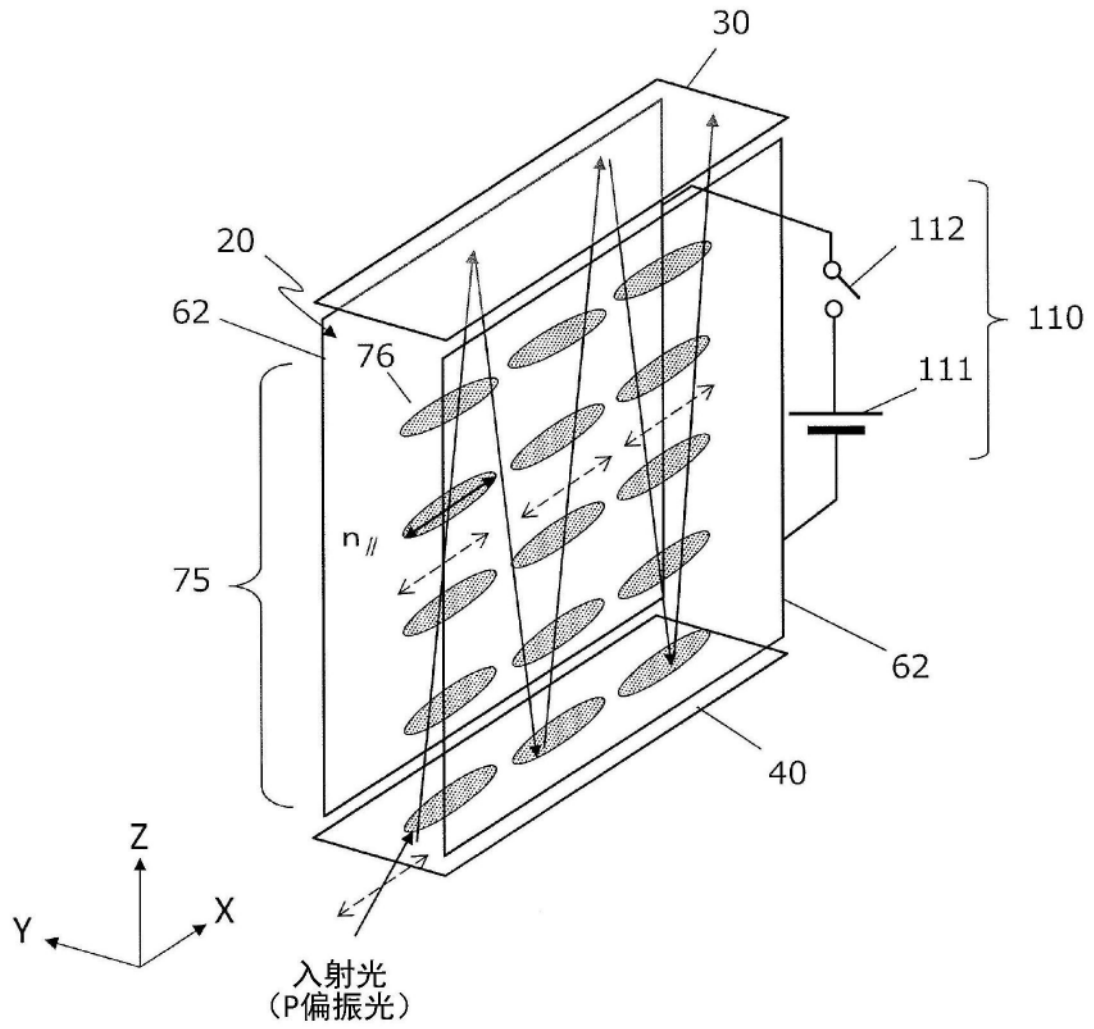


图52B



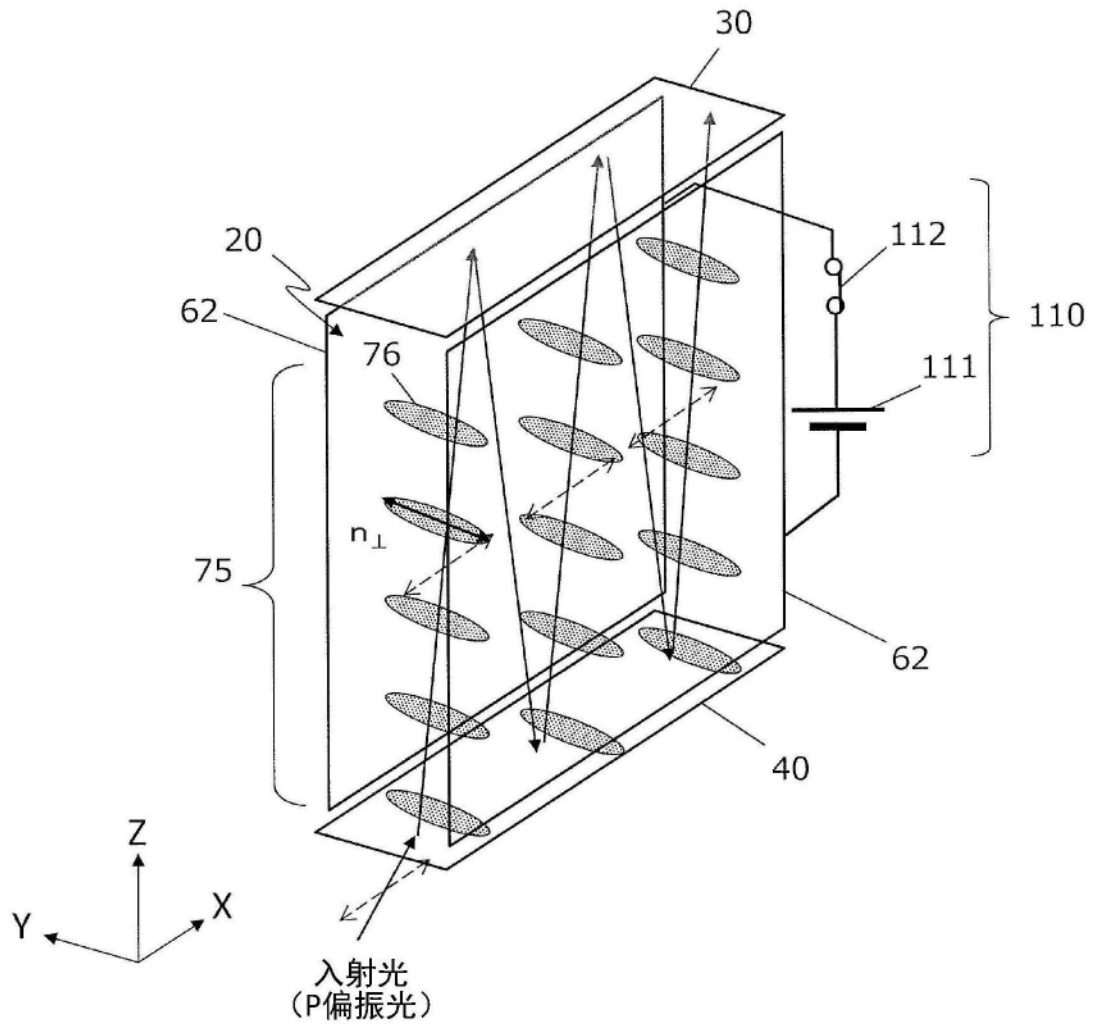


图53B

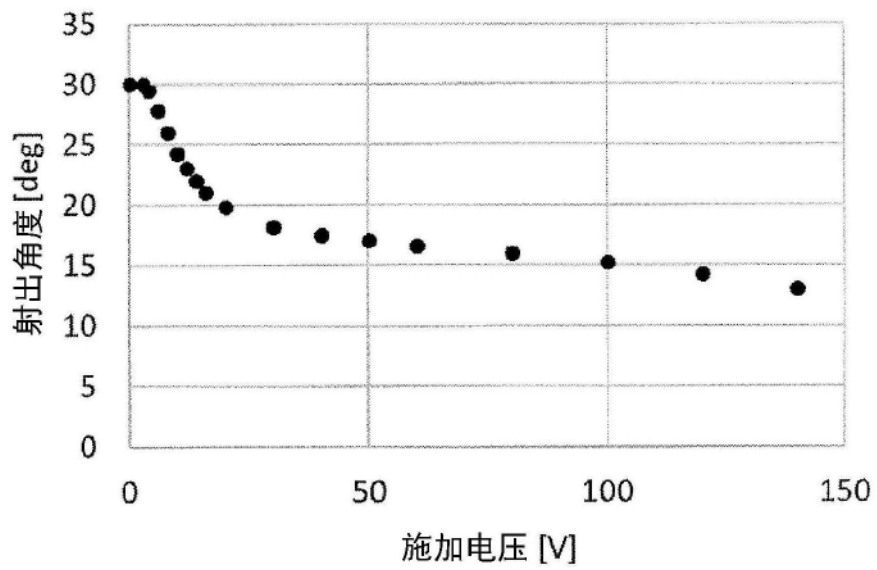


图54

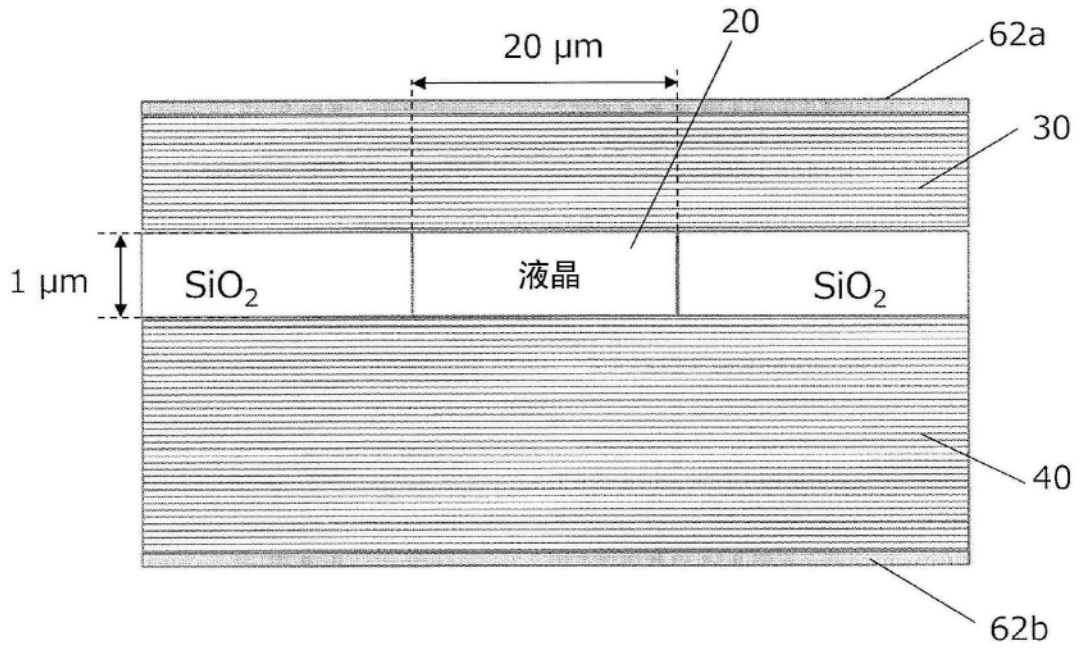


图55

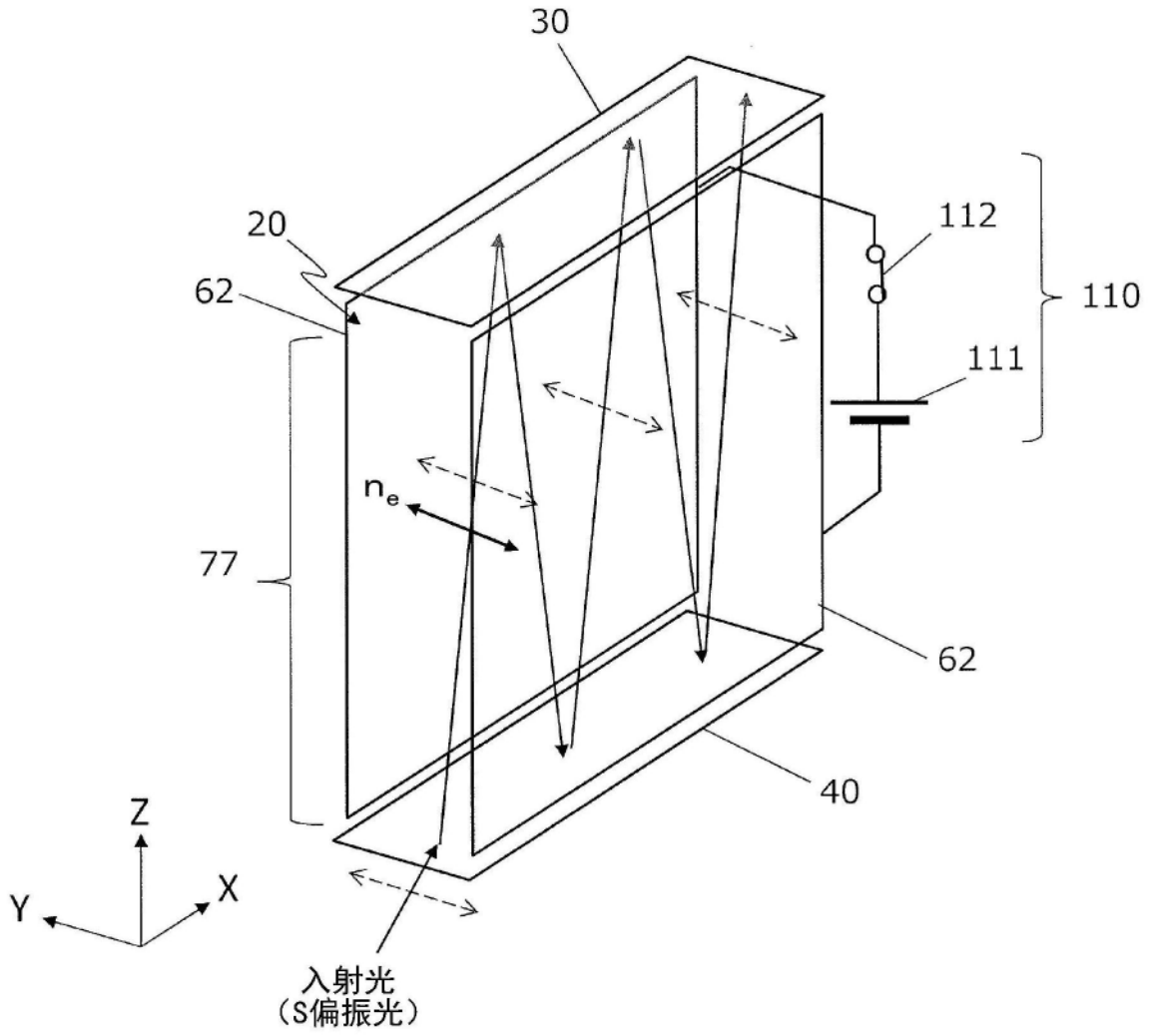


图56

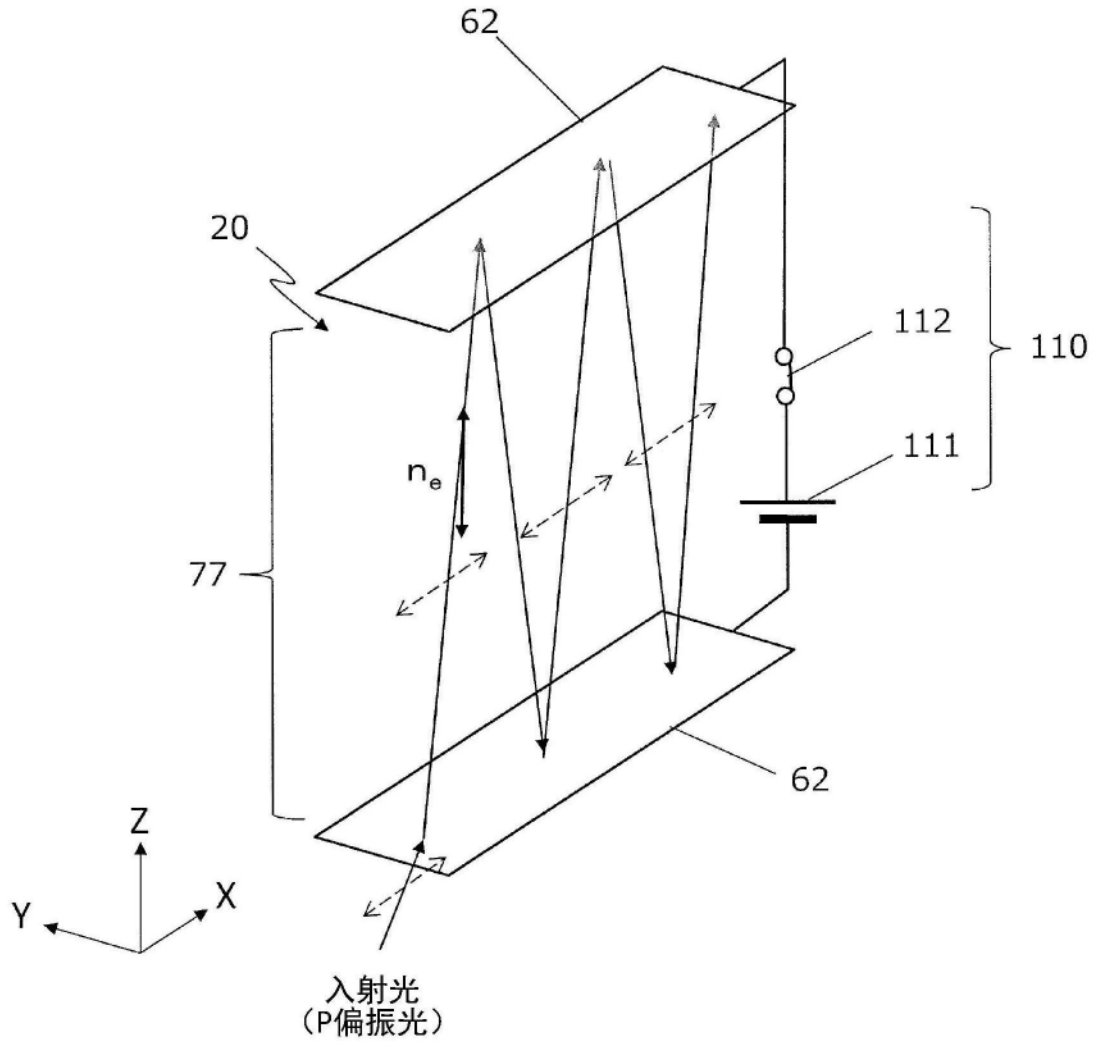


图57

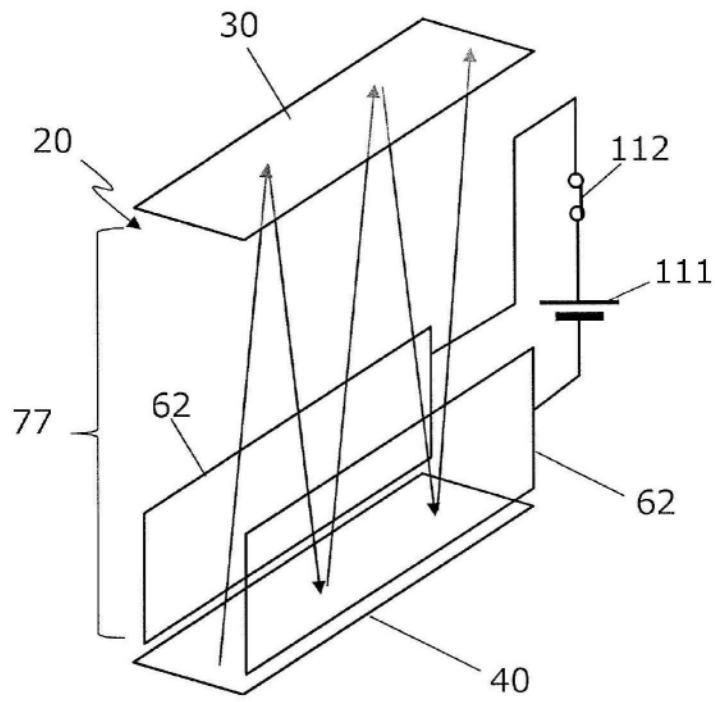


图58A

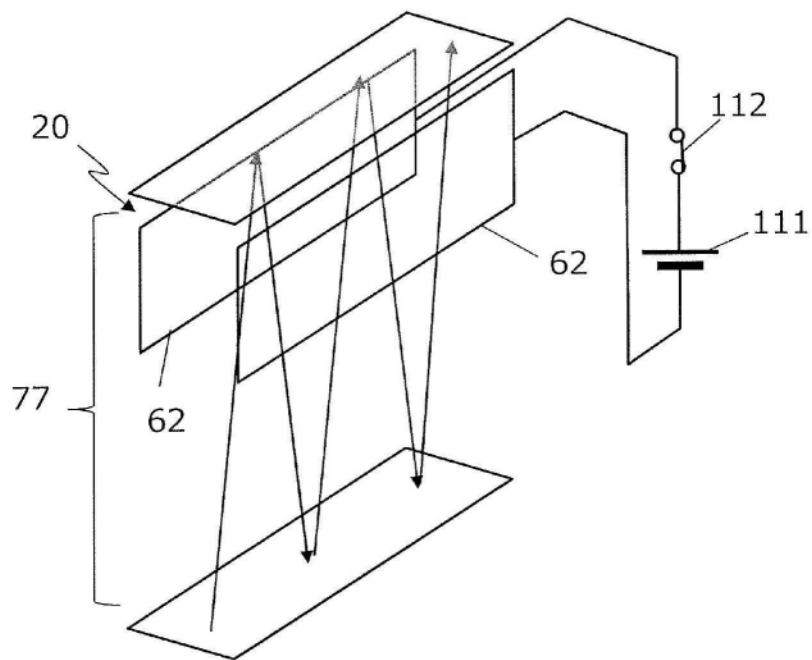


图58B

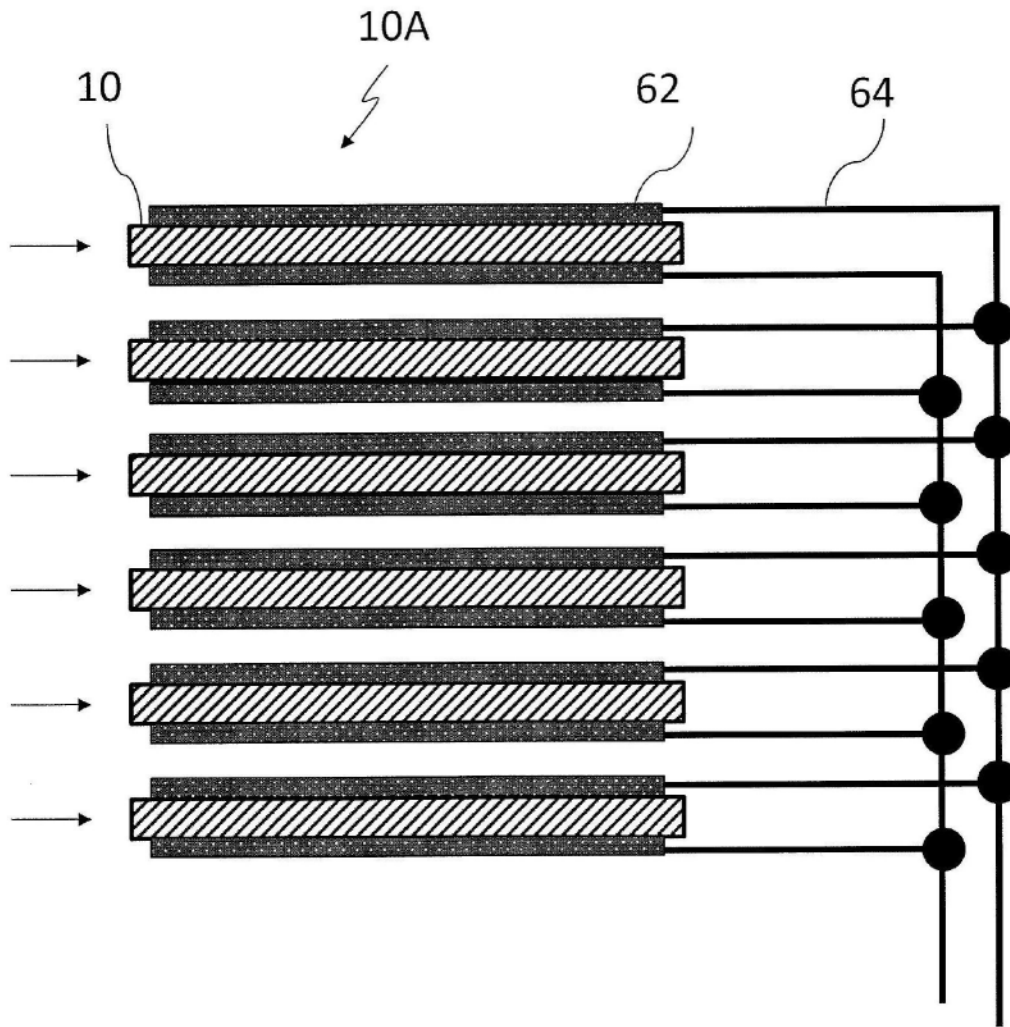


图59

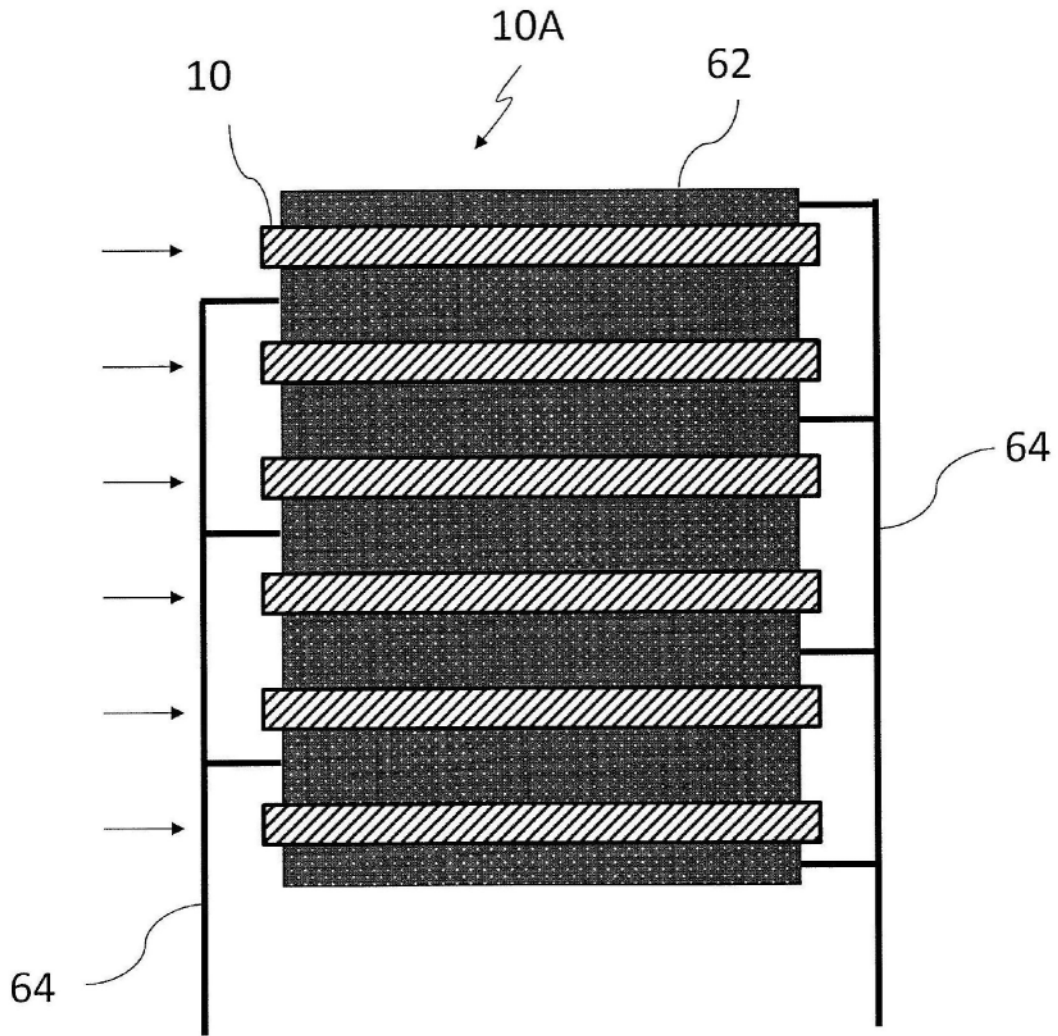


图60

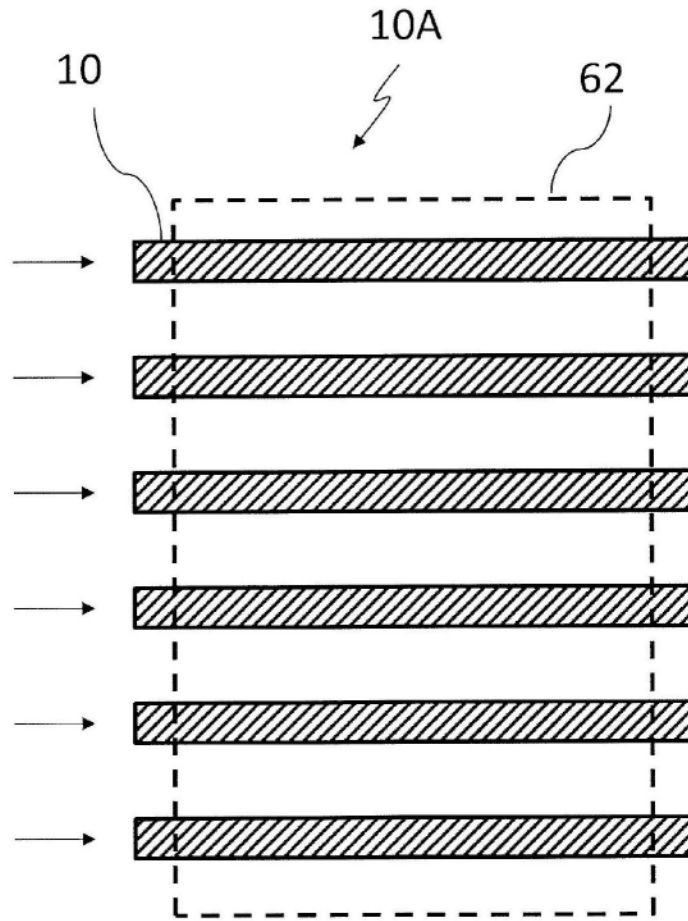


图61

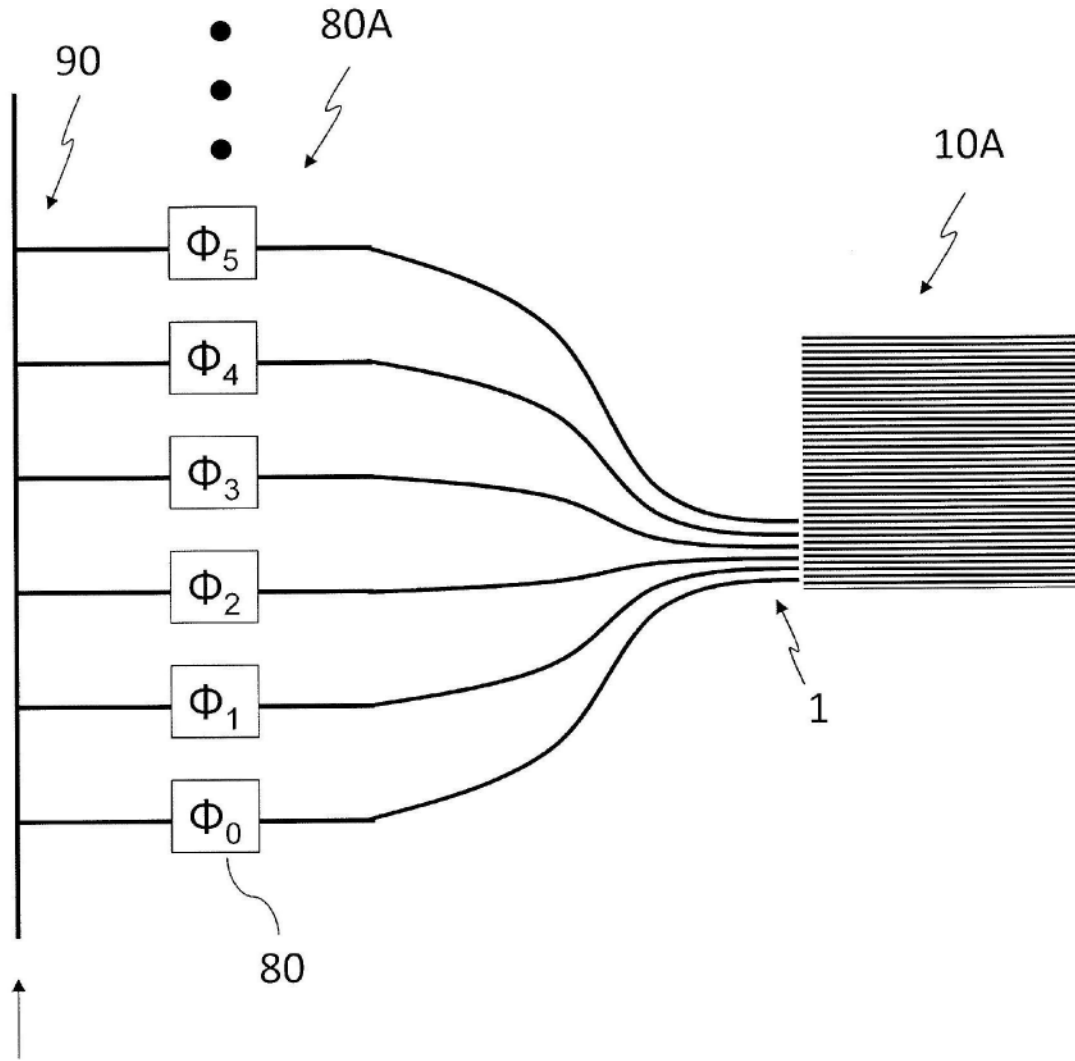


图62

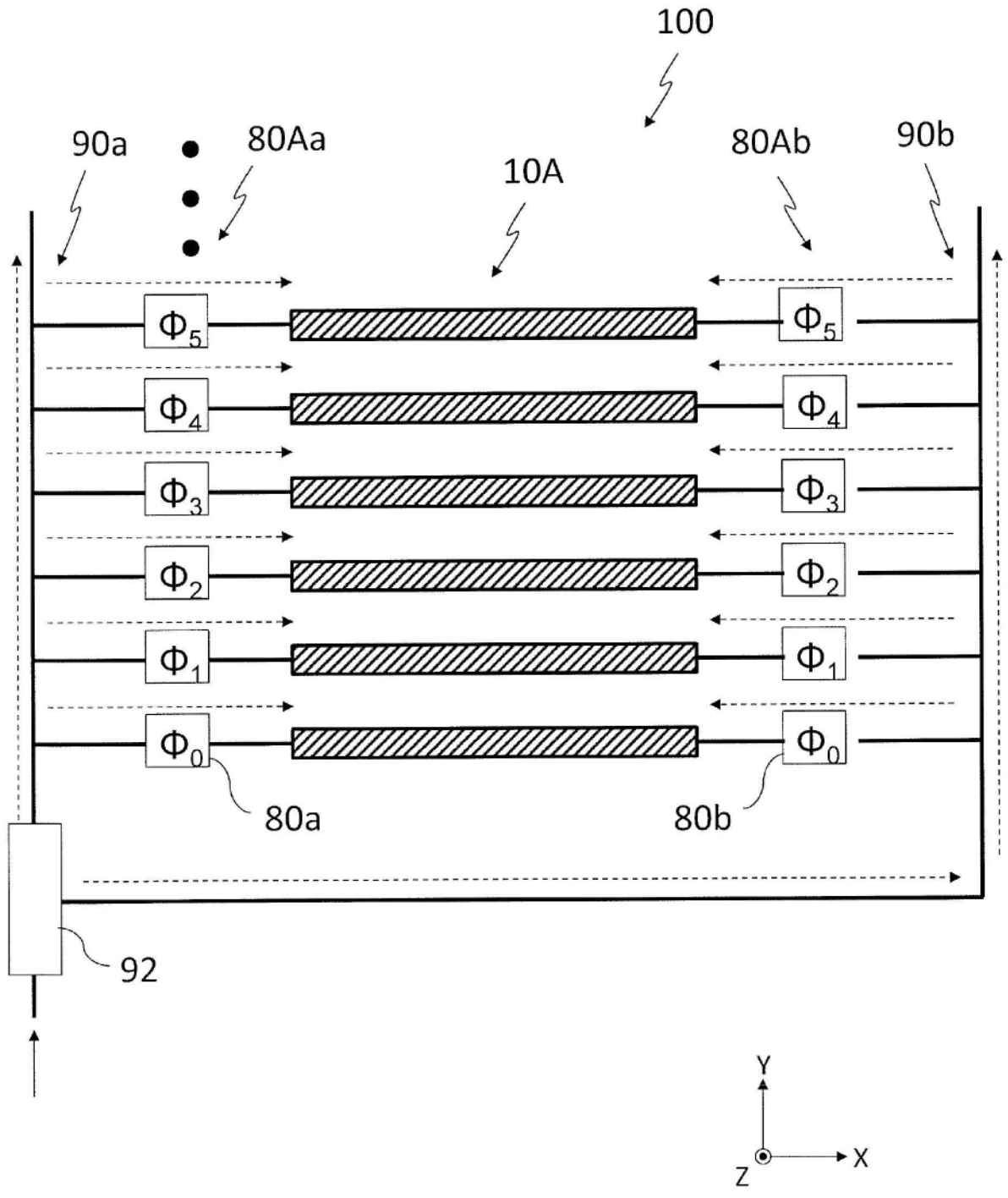


图63

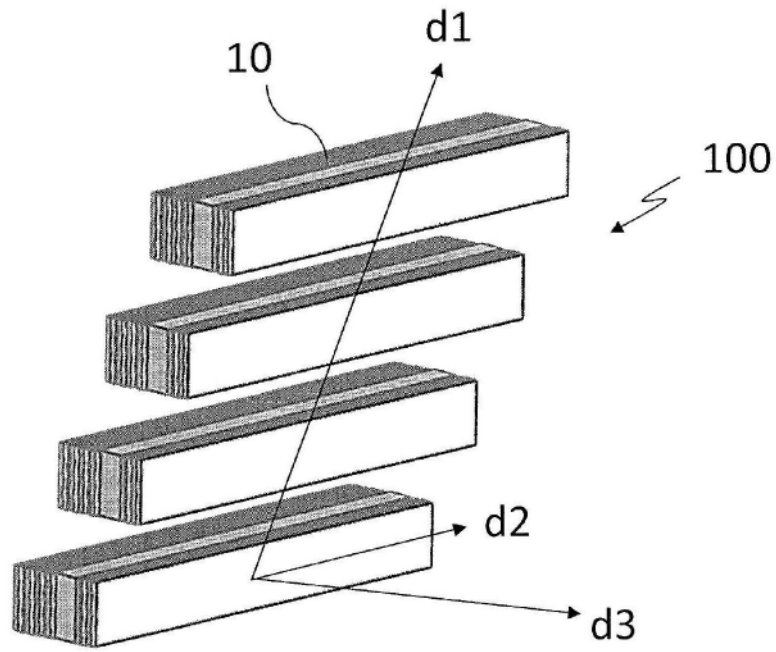


图64A

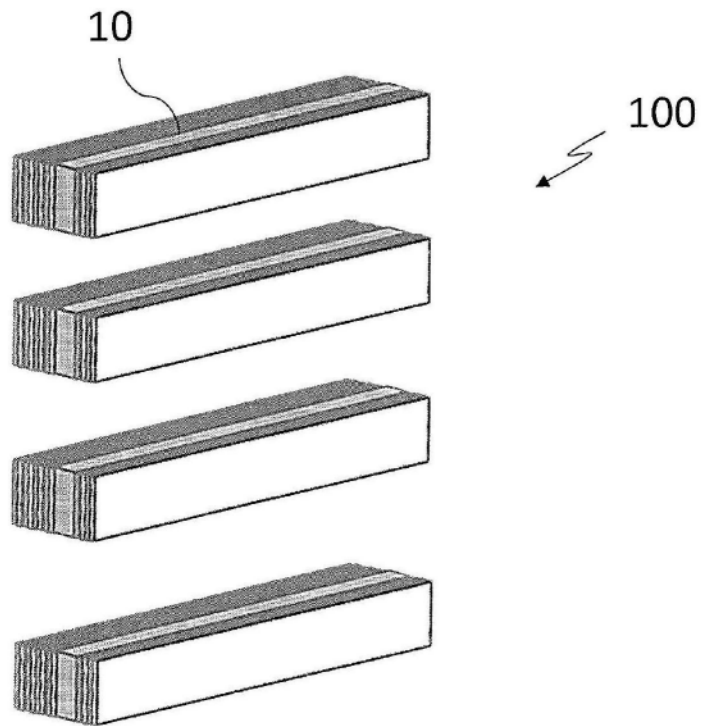


图64B

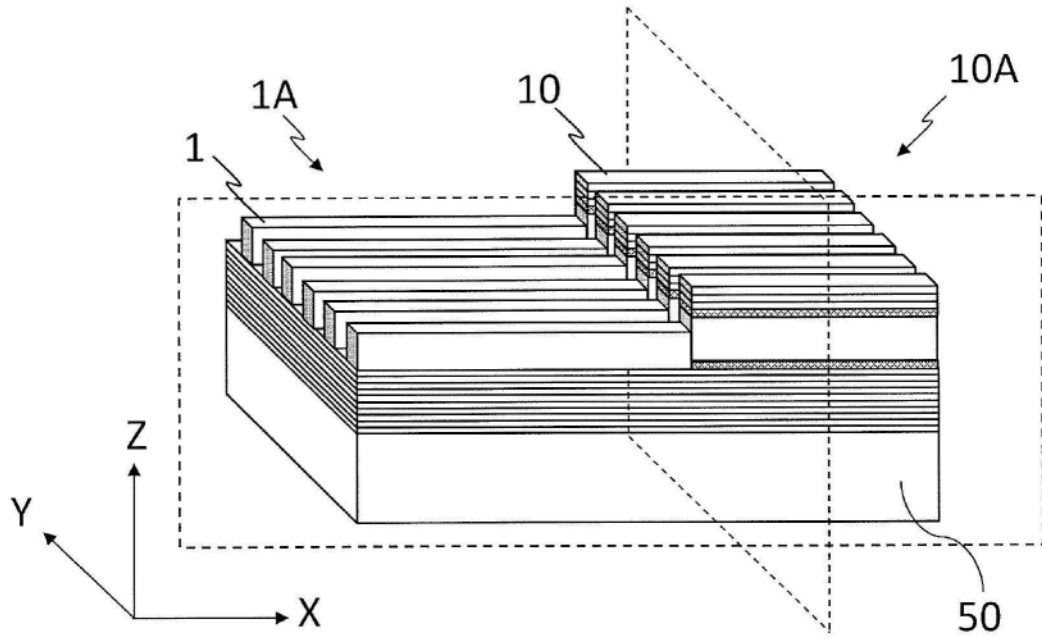


图65A

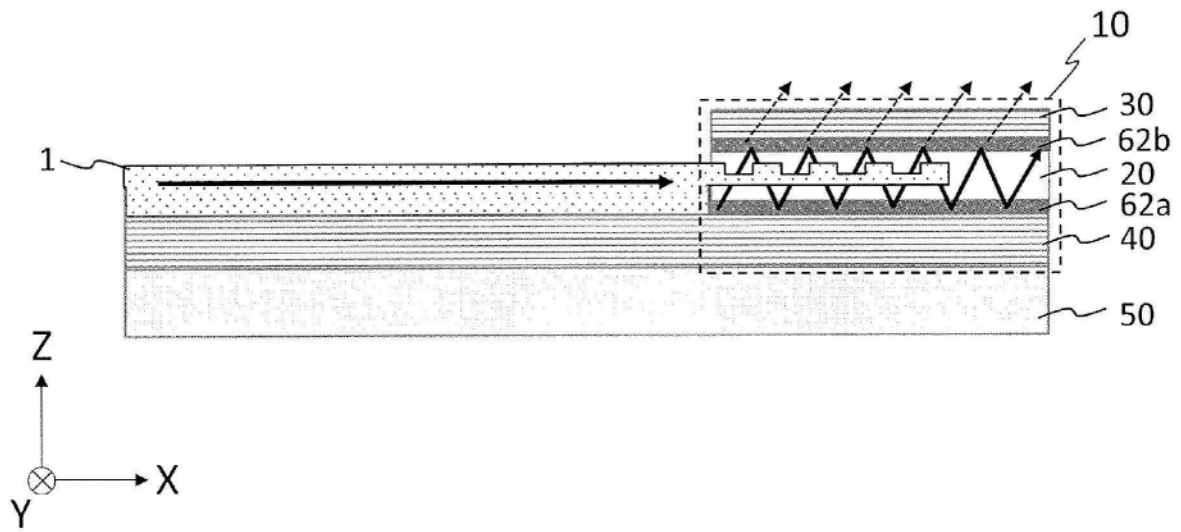


图65B

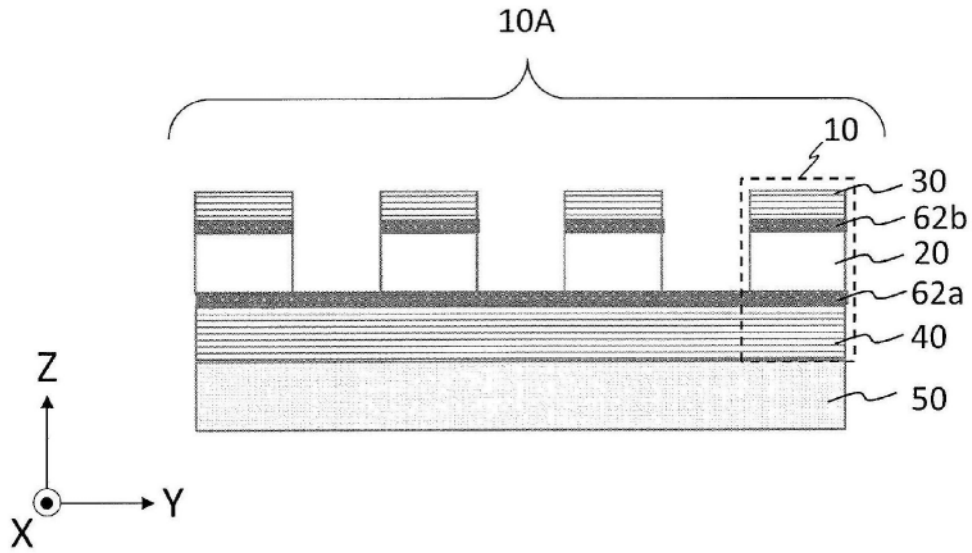


图65C

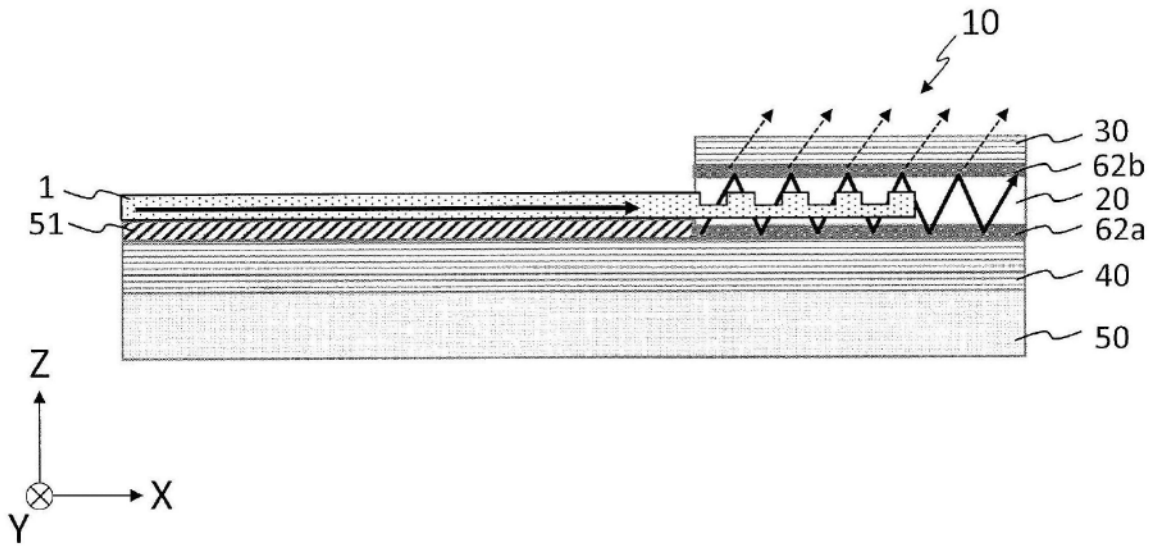


图66A

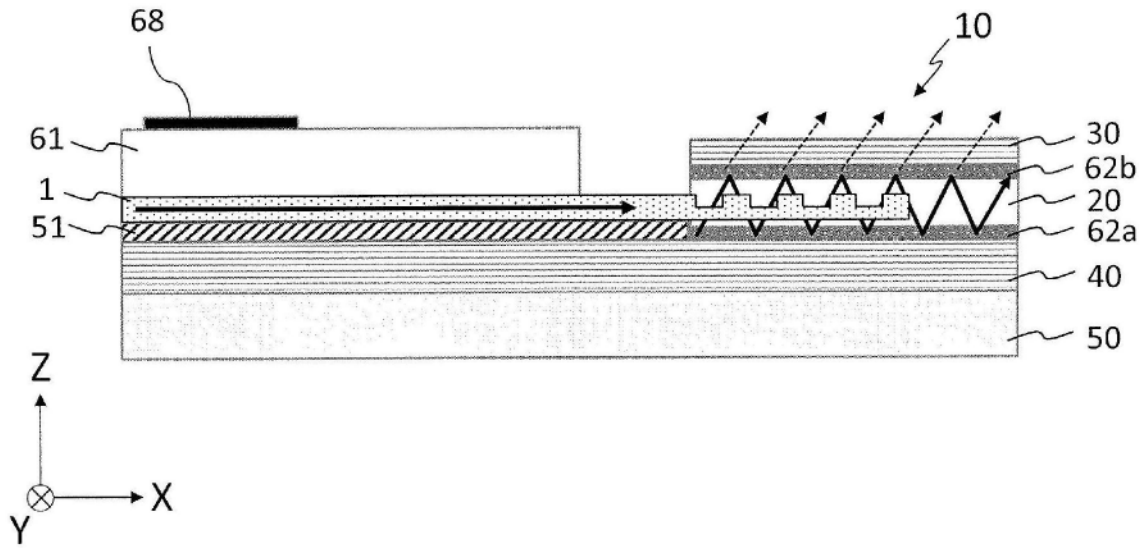


图66B

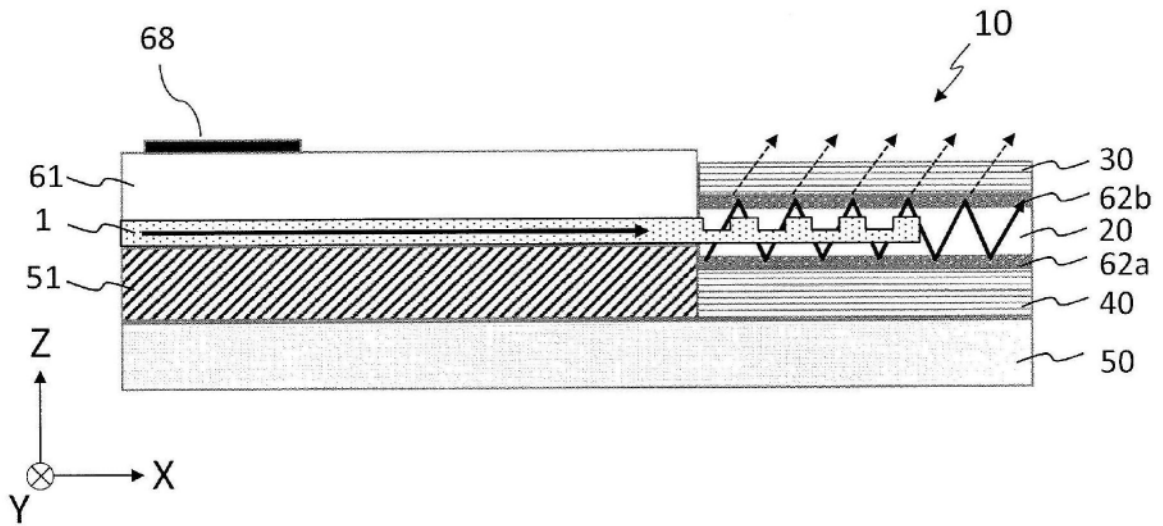


图67

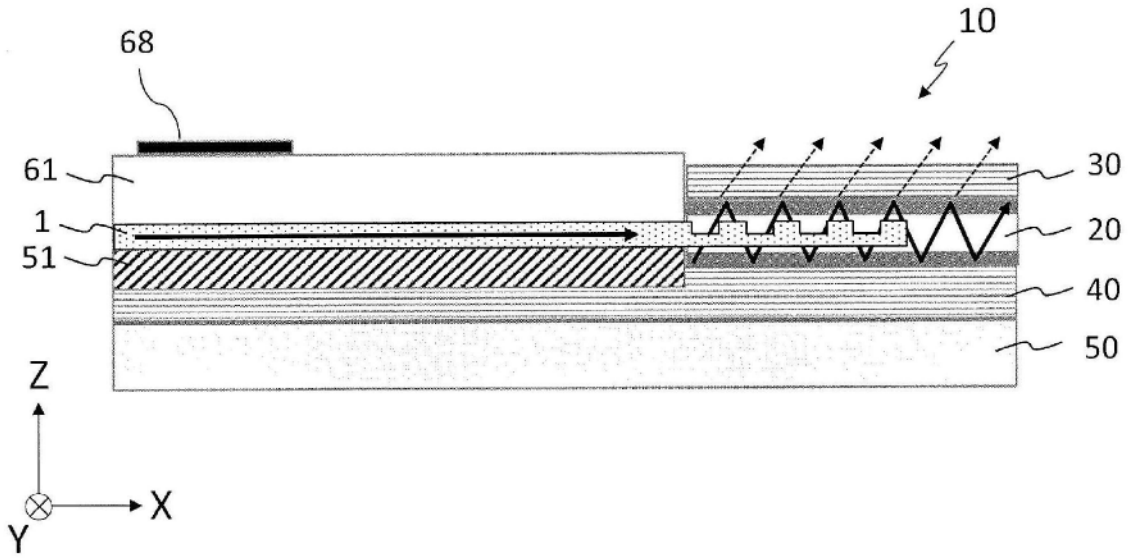


图68

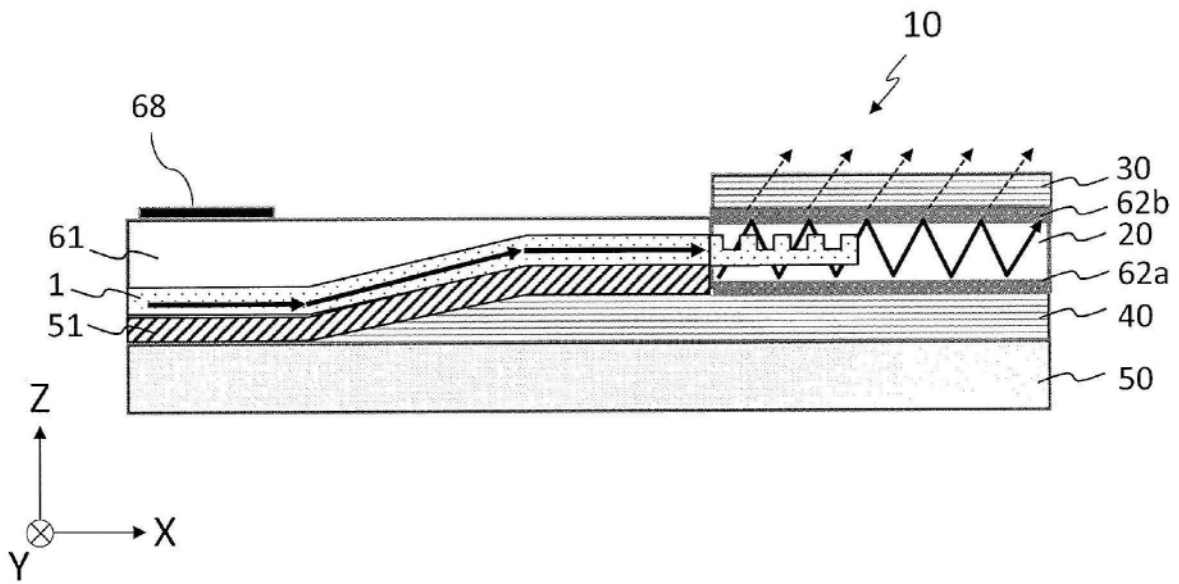


图69A

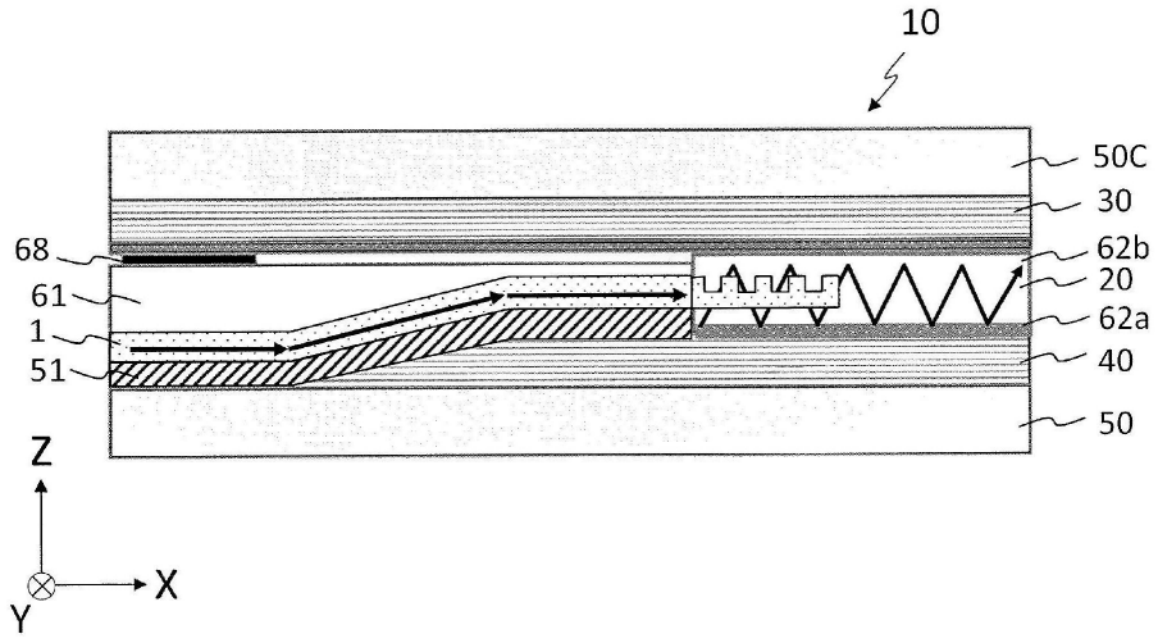


图69B

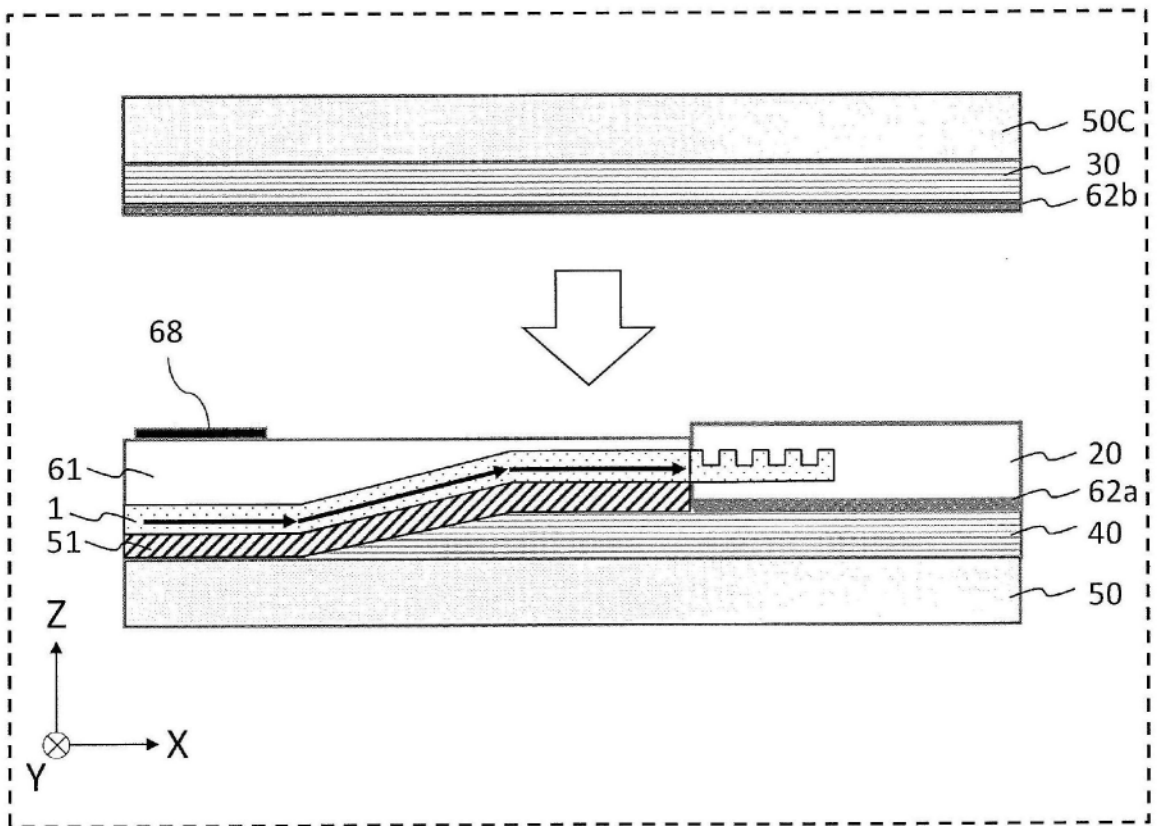


图69C

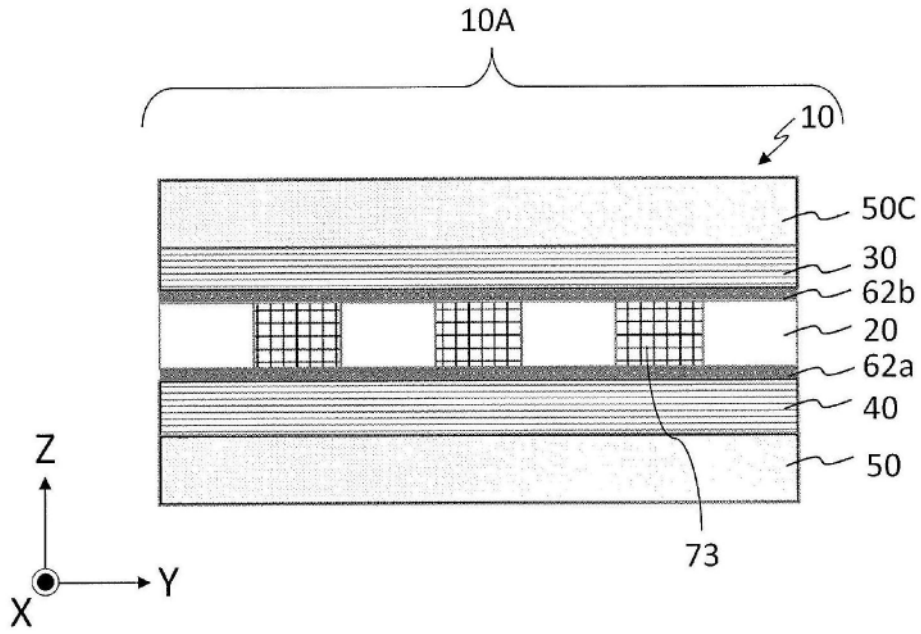


图70

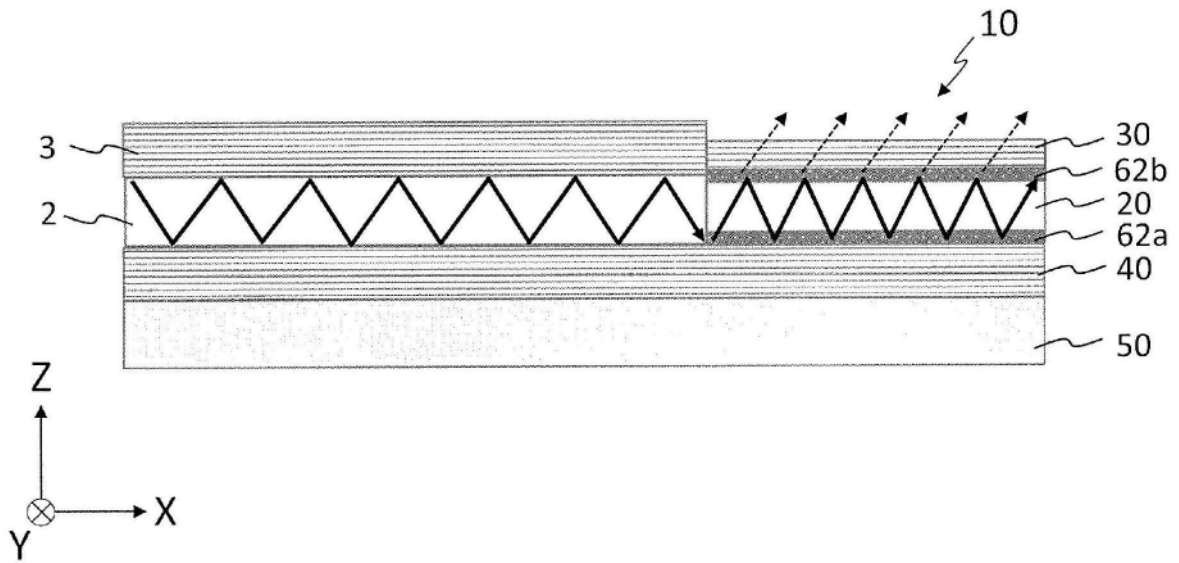


图71

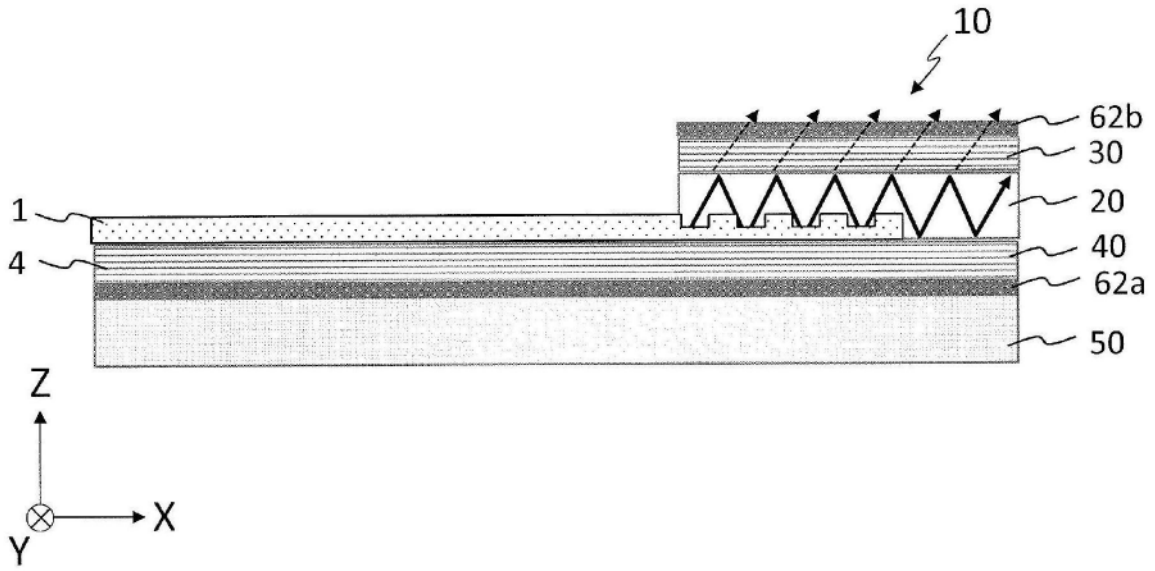


图72

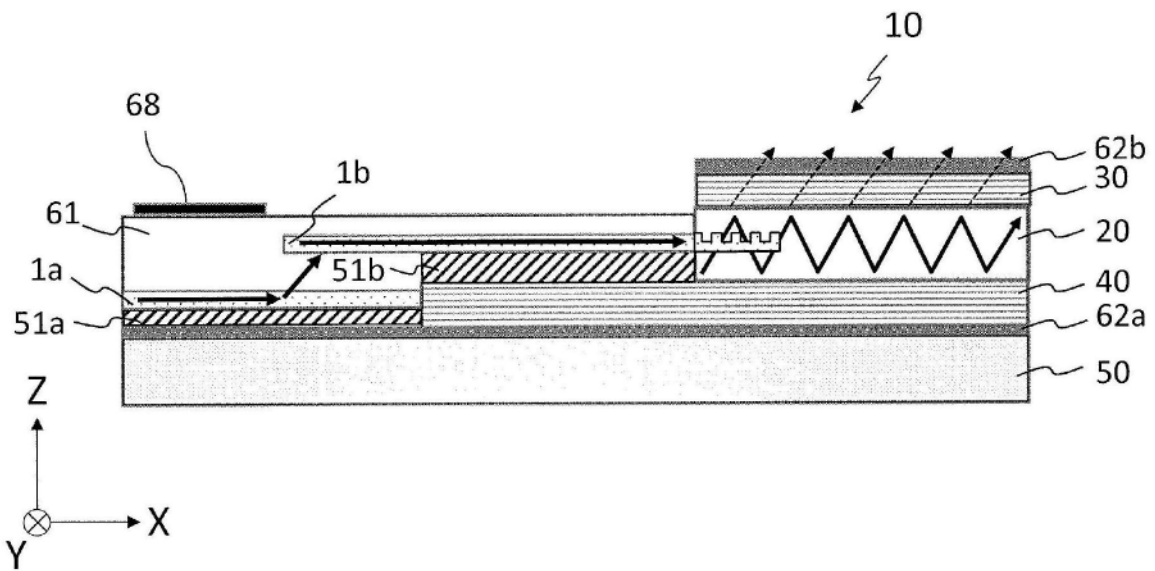


图73

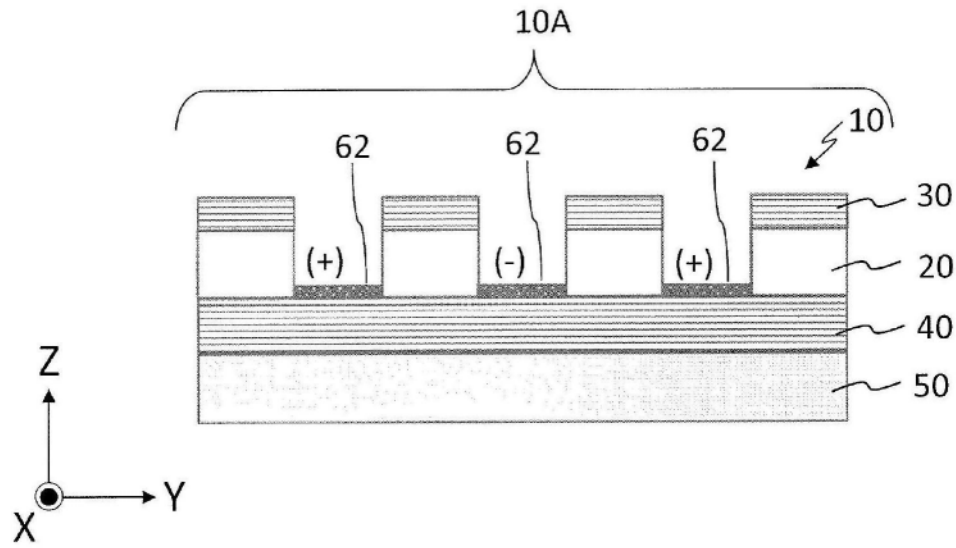


图74

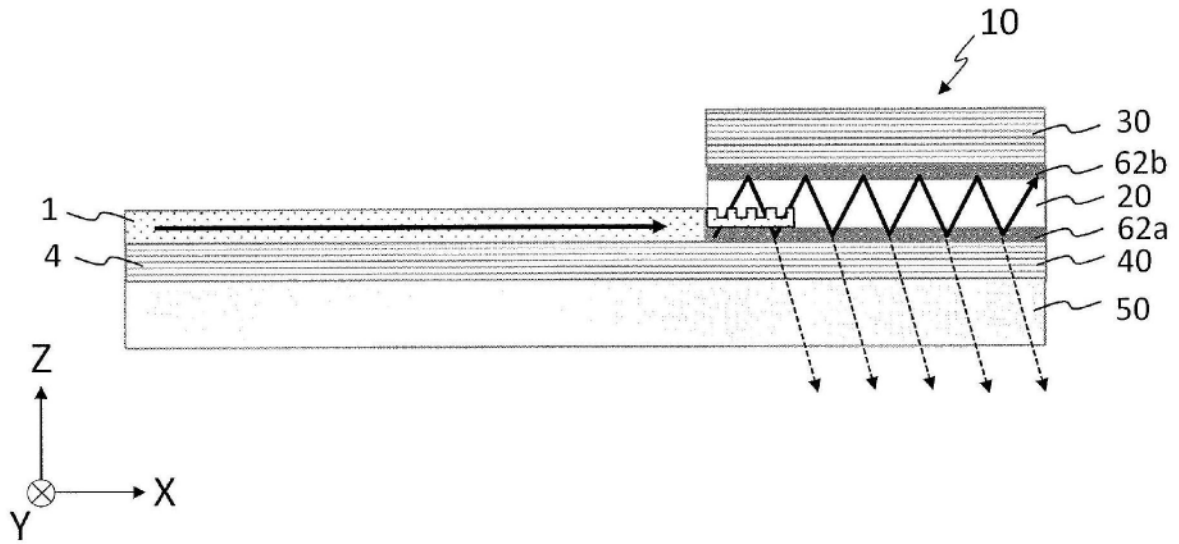


图75

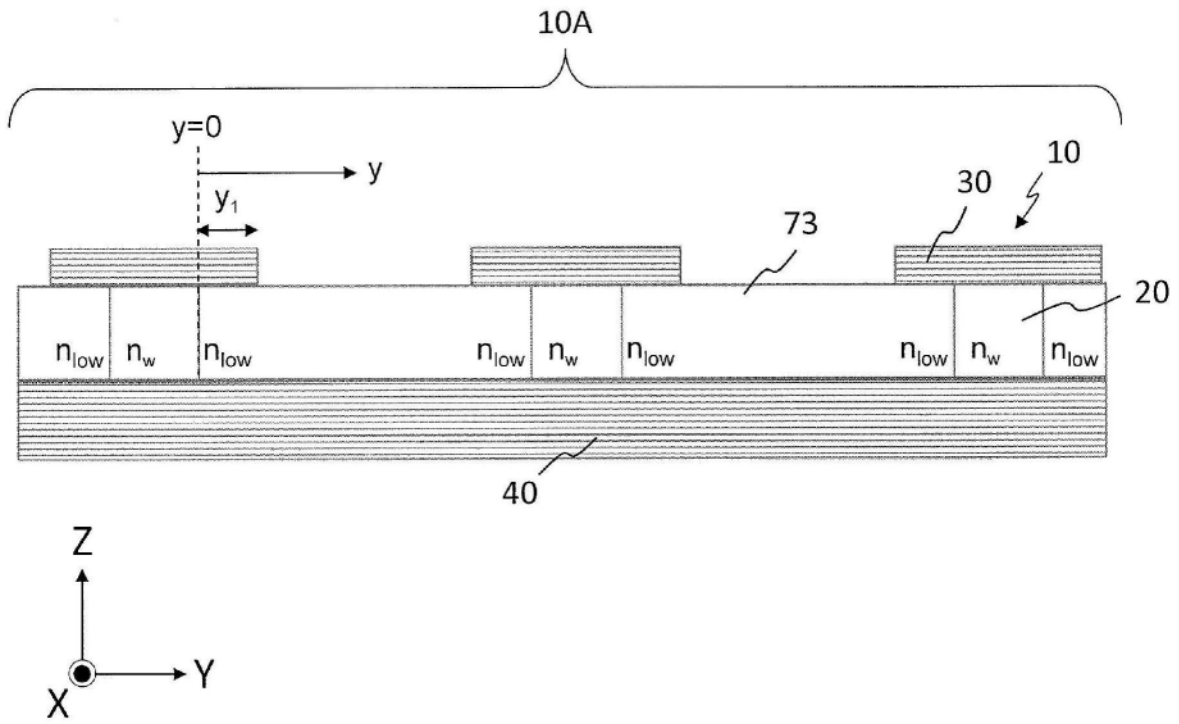


图76

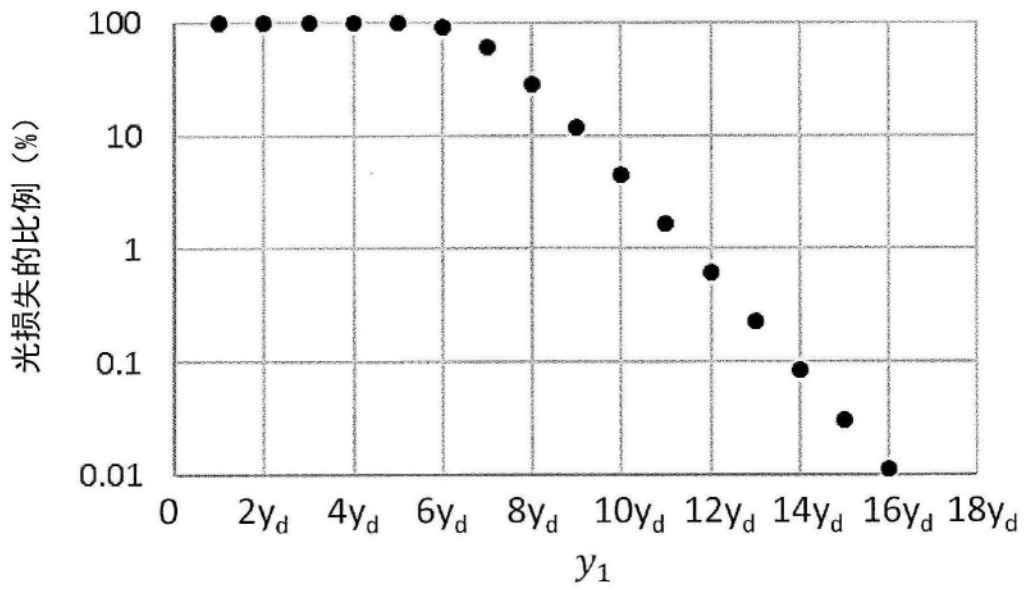


图77

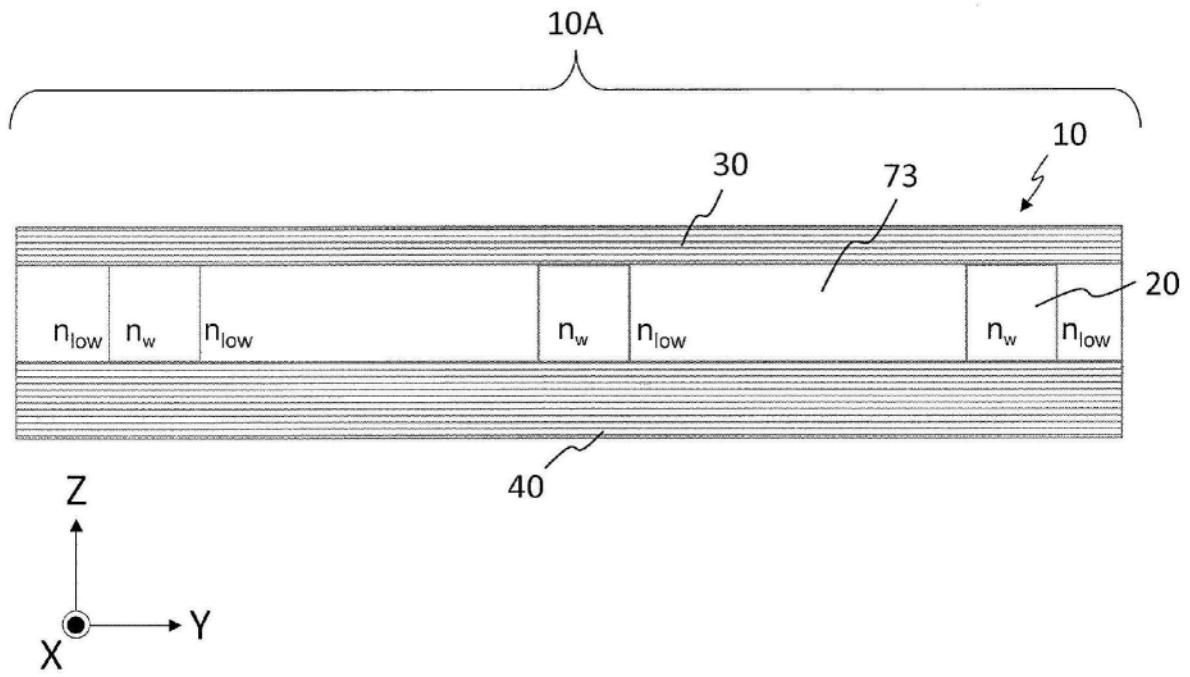


图78

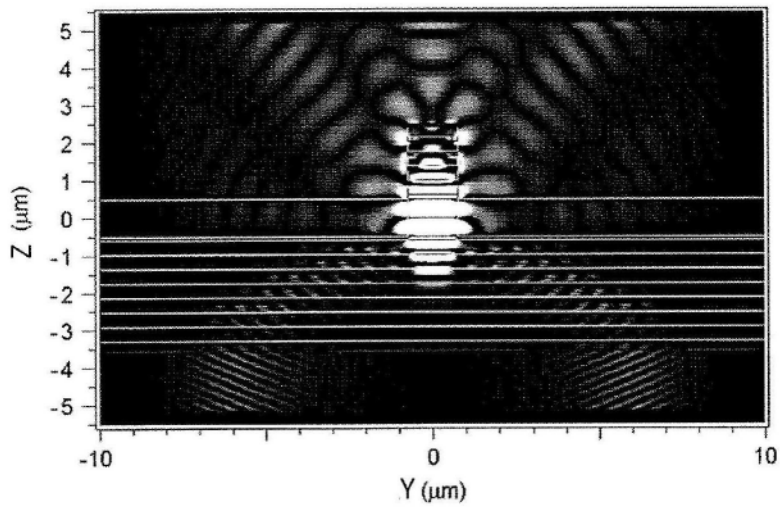


图79A

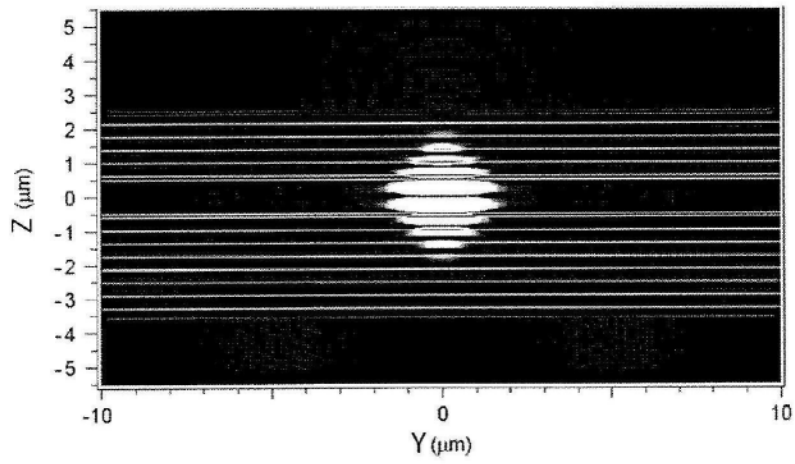


图79B

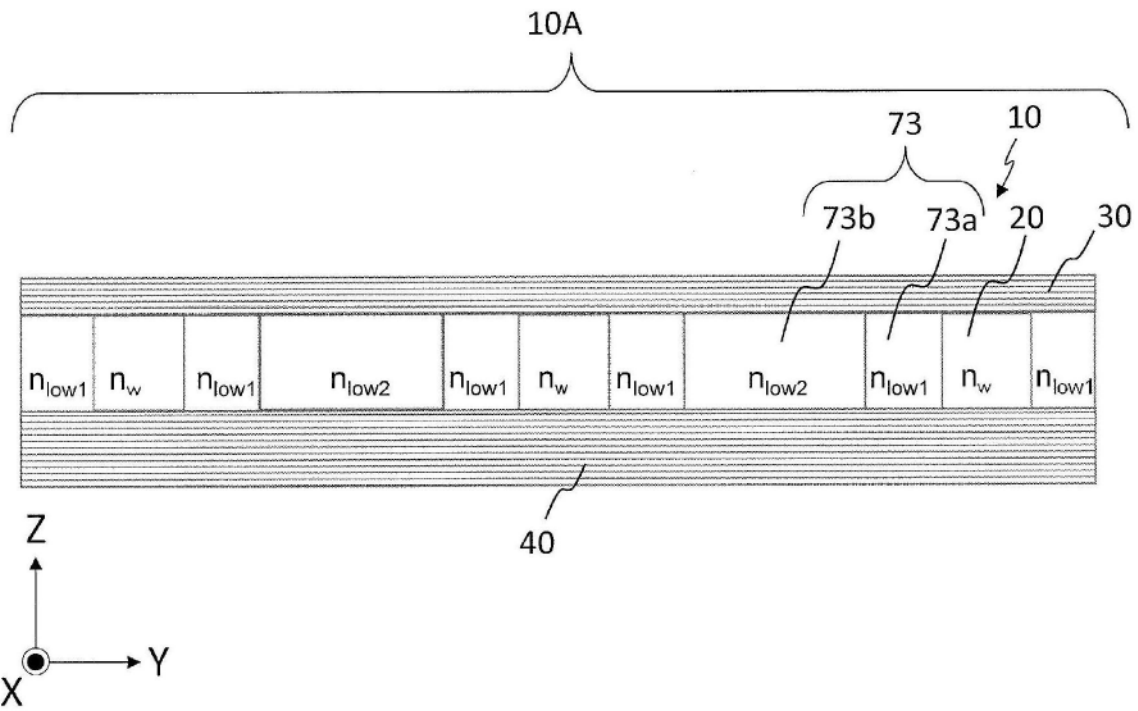


图80

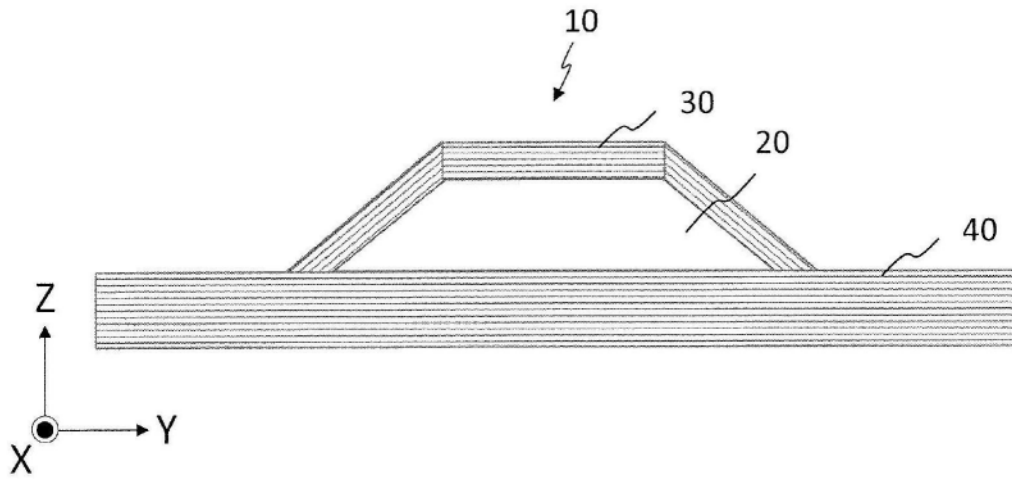


图81

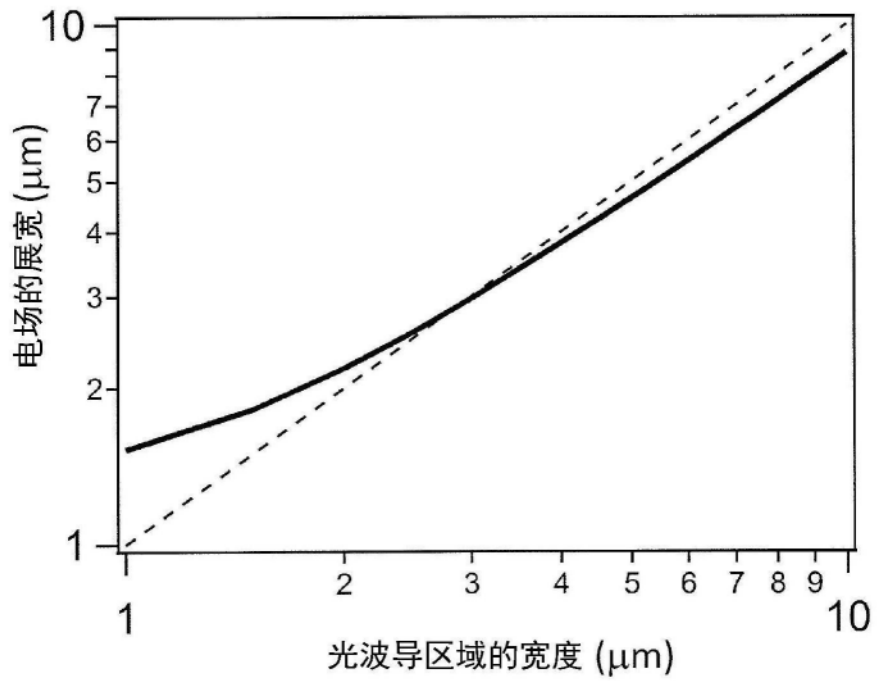


图82

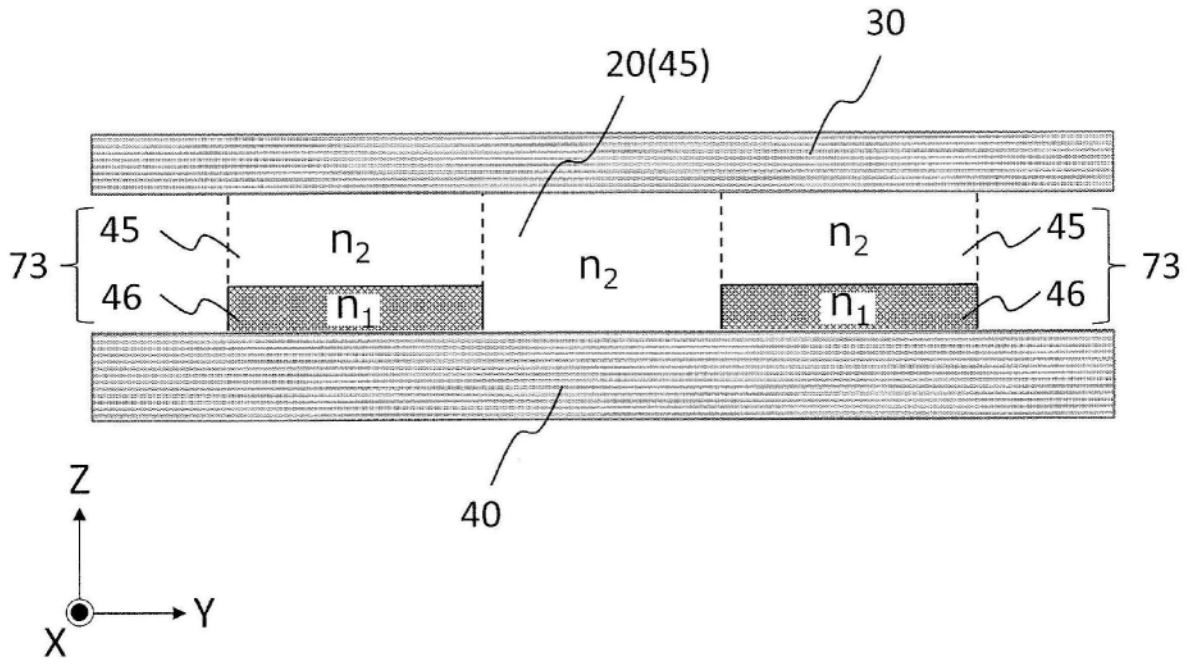


图83

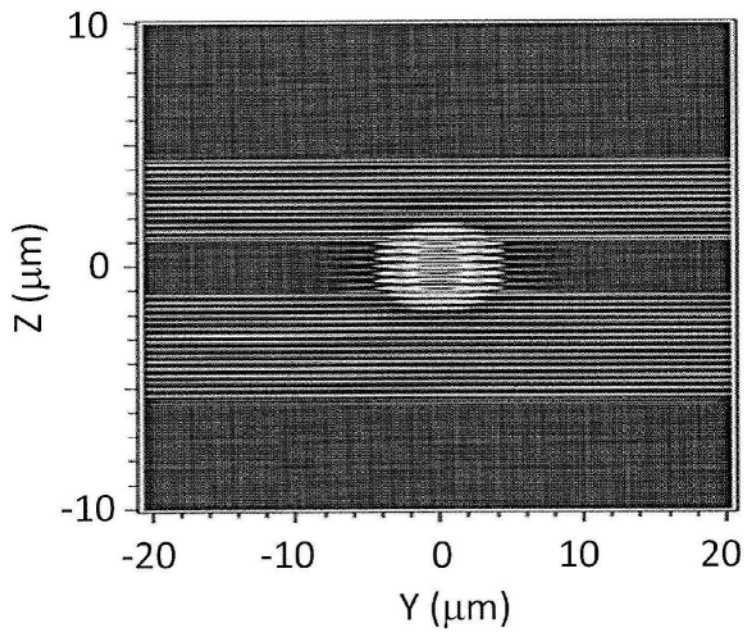


图84A

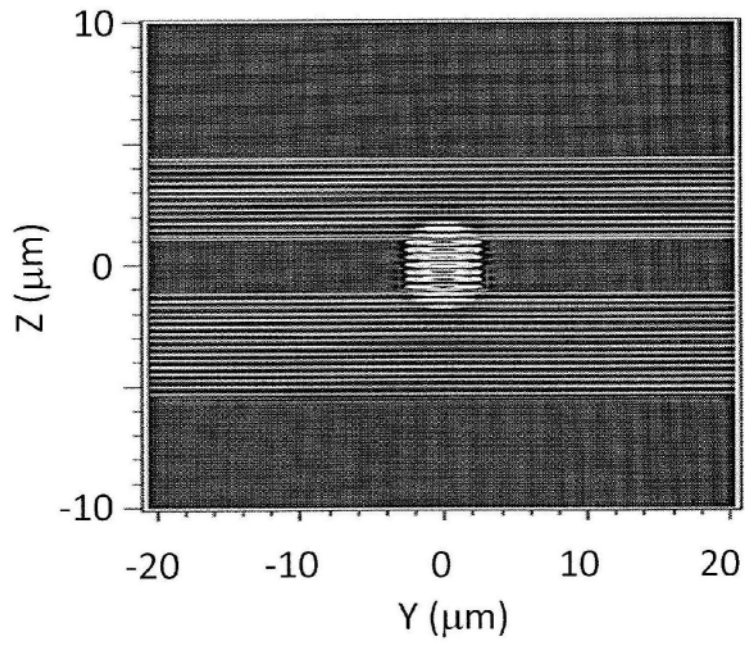


图84B

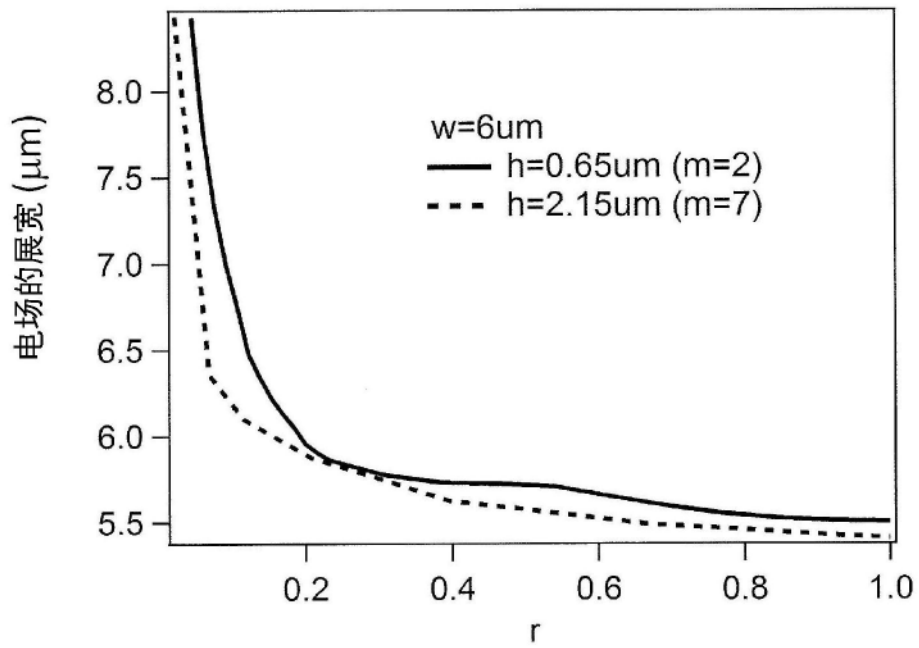


图85

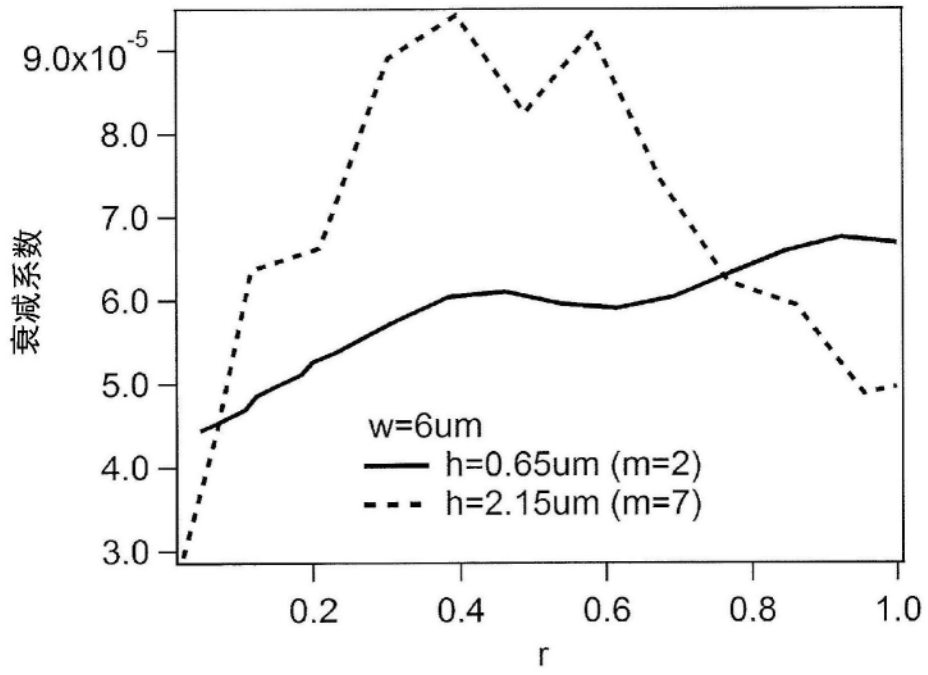


图86

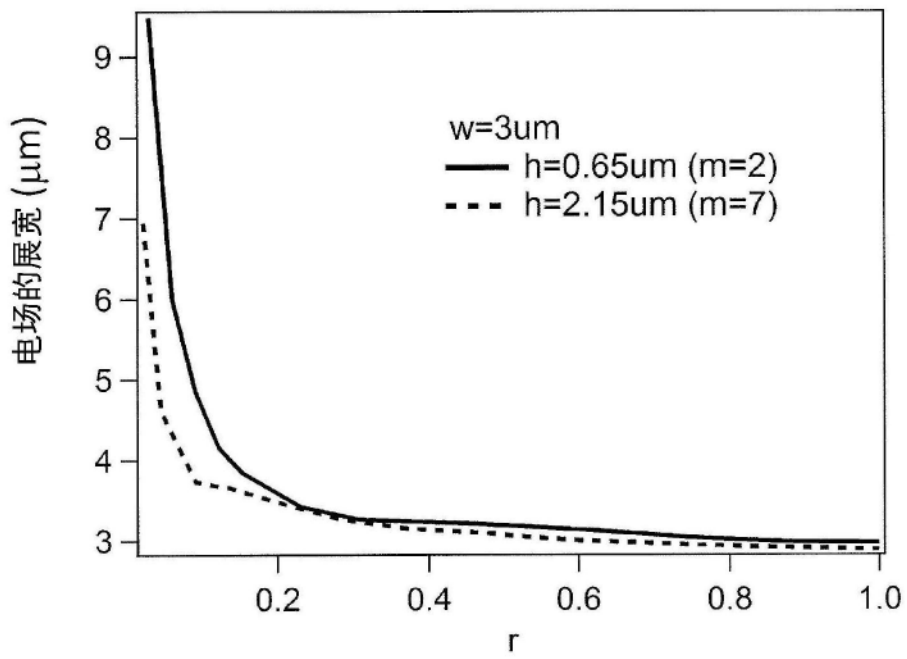


图87

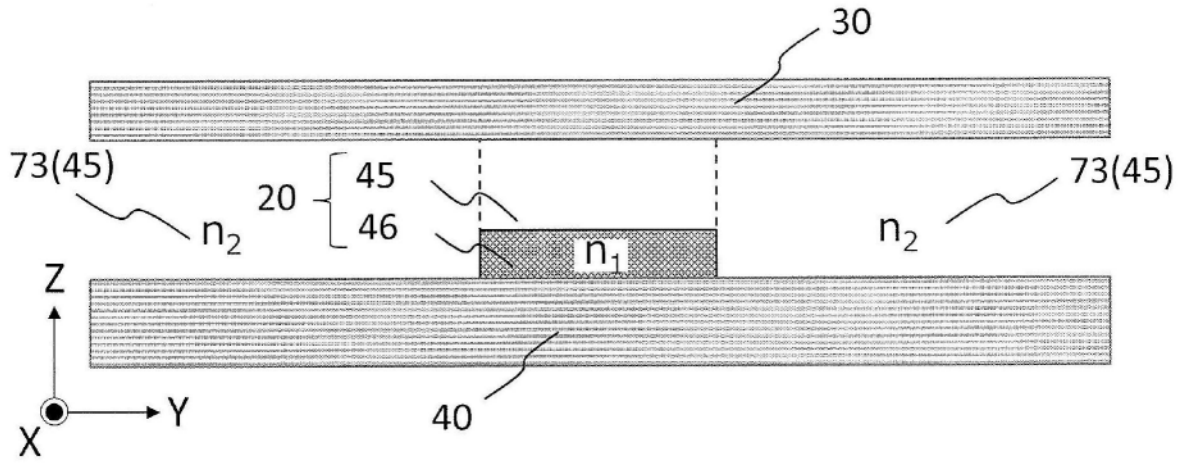


图88

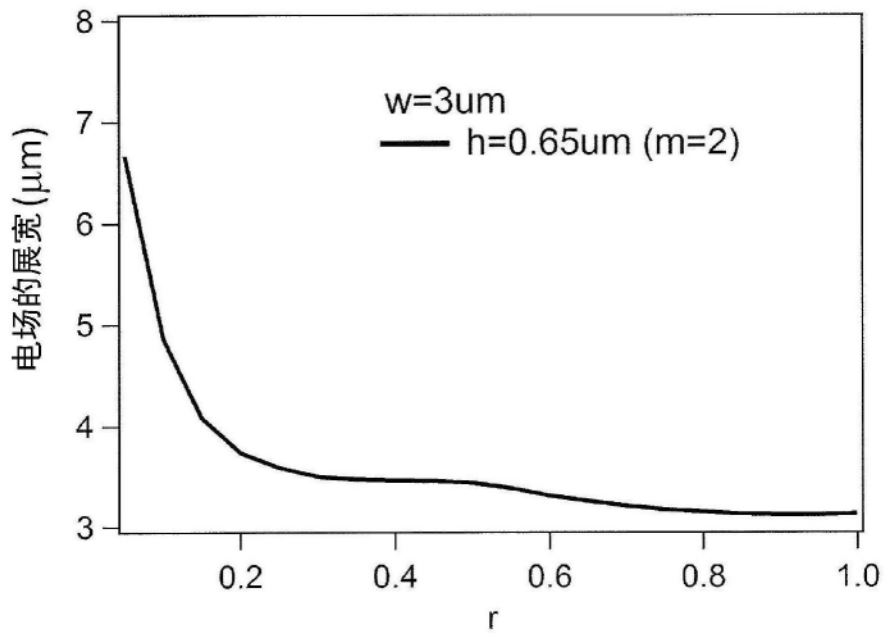


图89

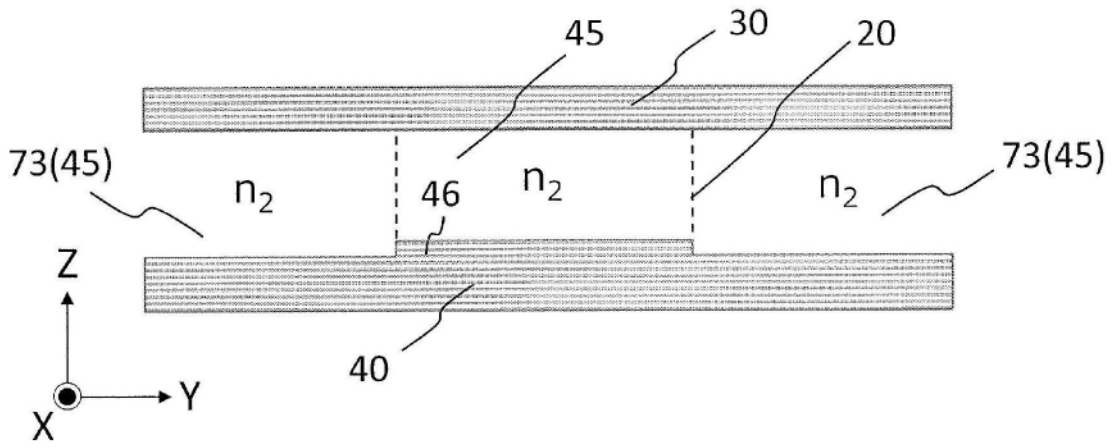


图90A

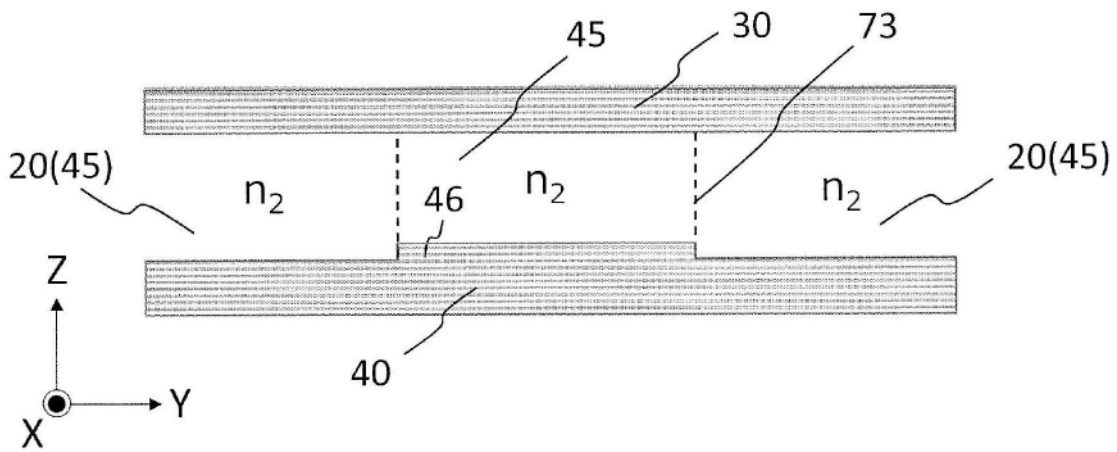


图90B

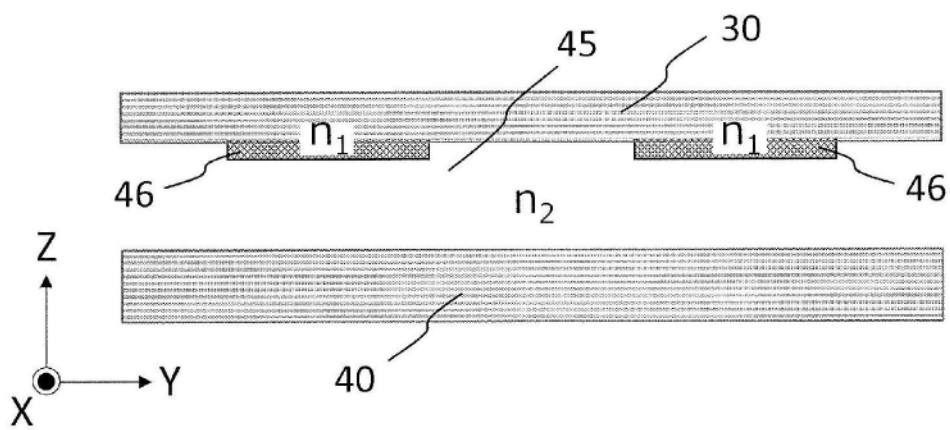


图91

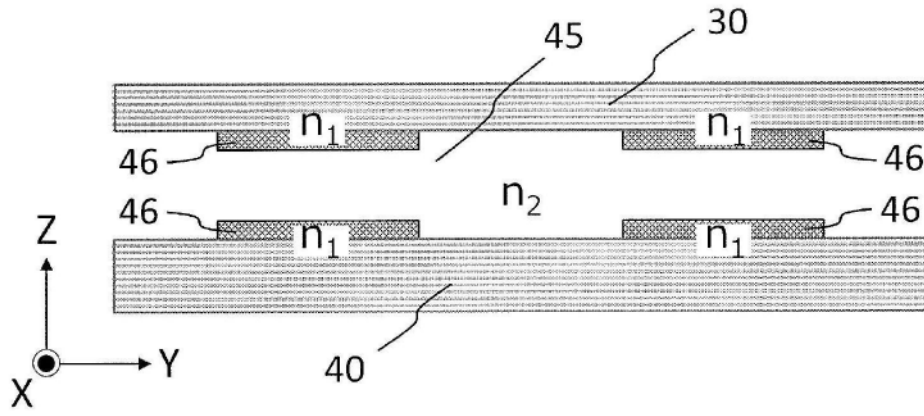


图92

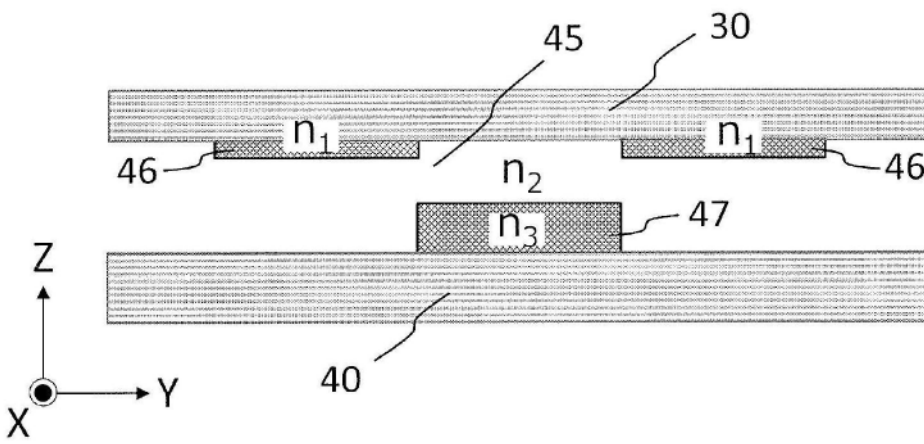


图93

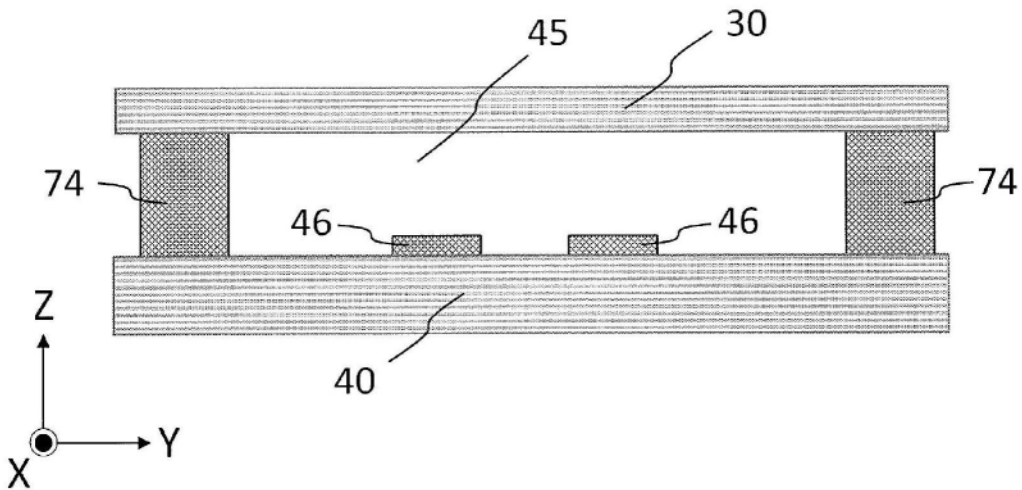


图94

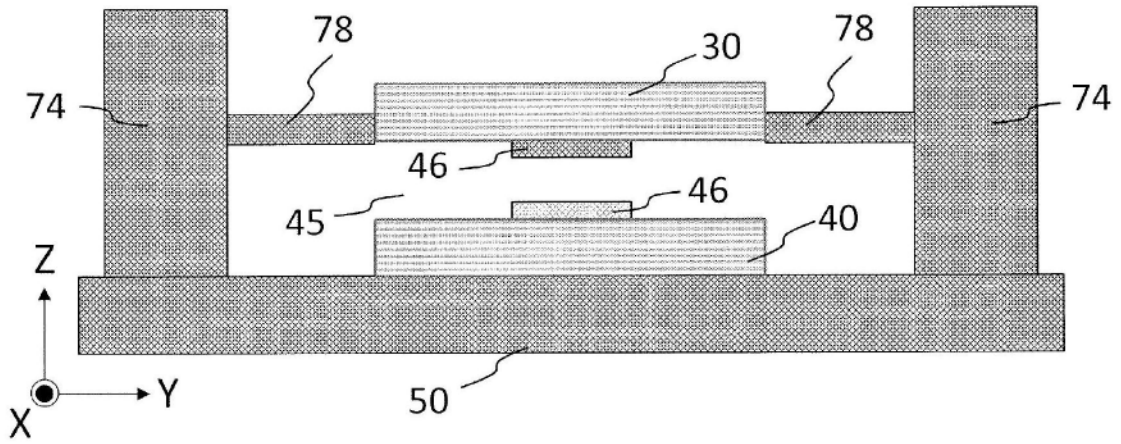


图95

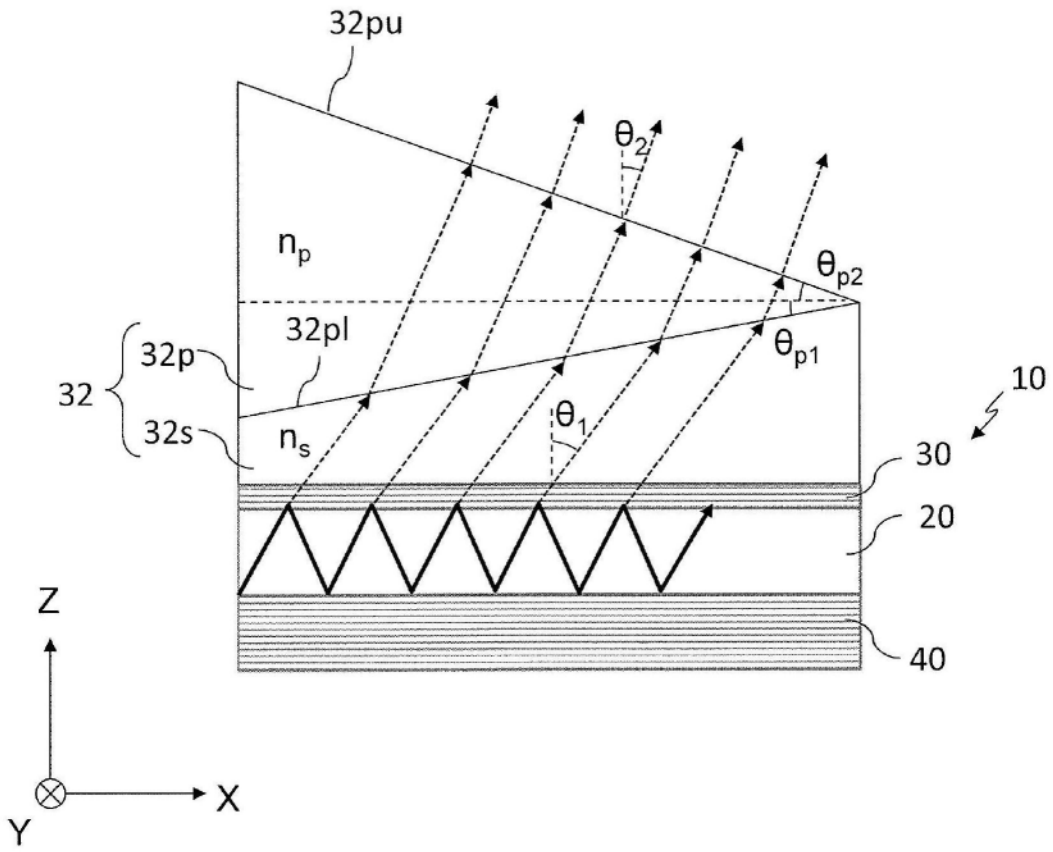


图96

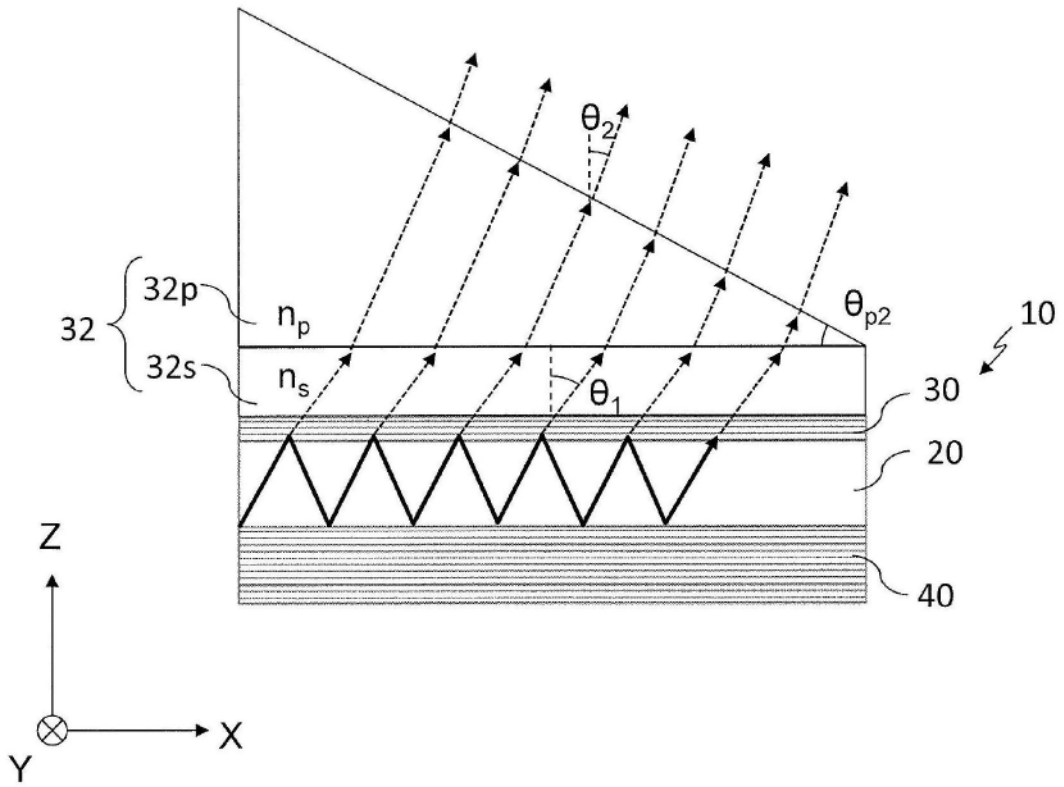


图97

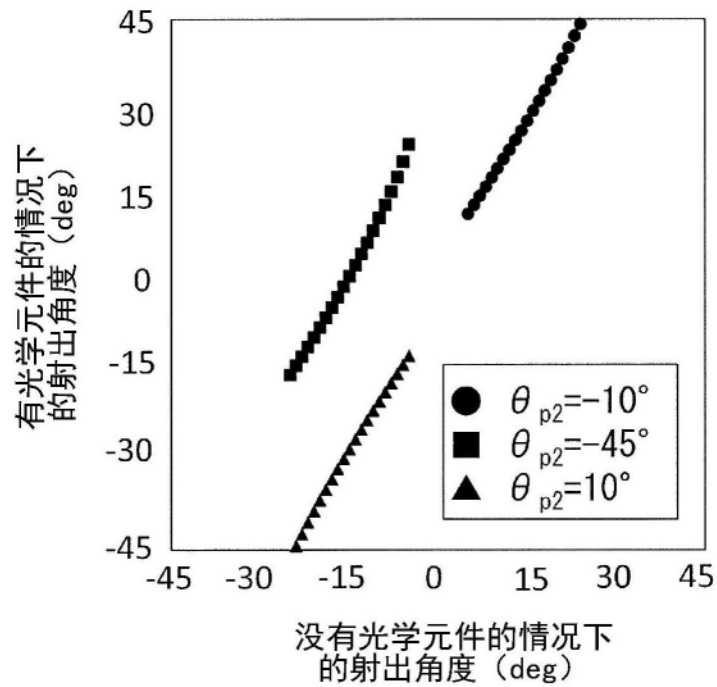


图98

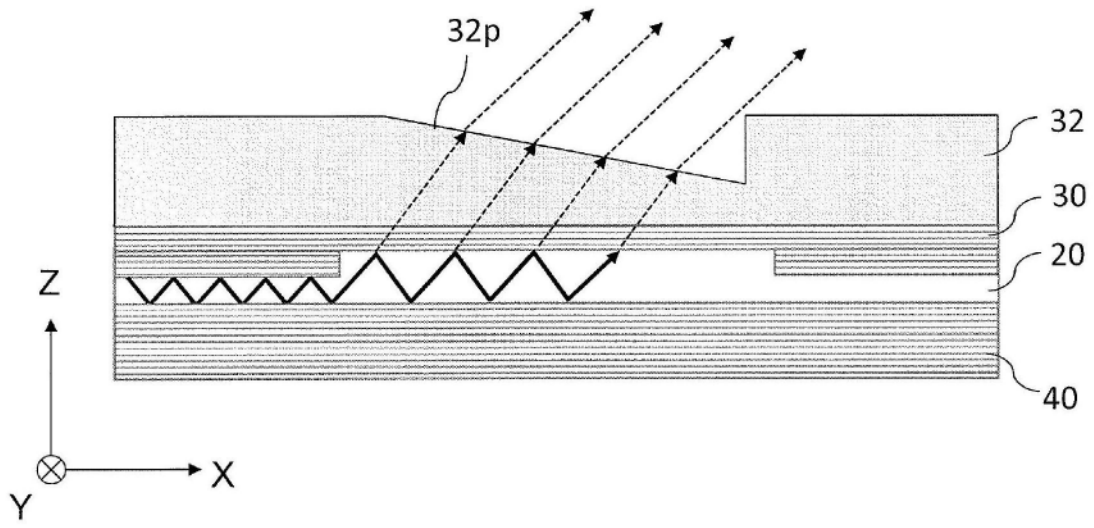


图99

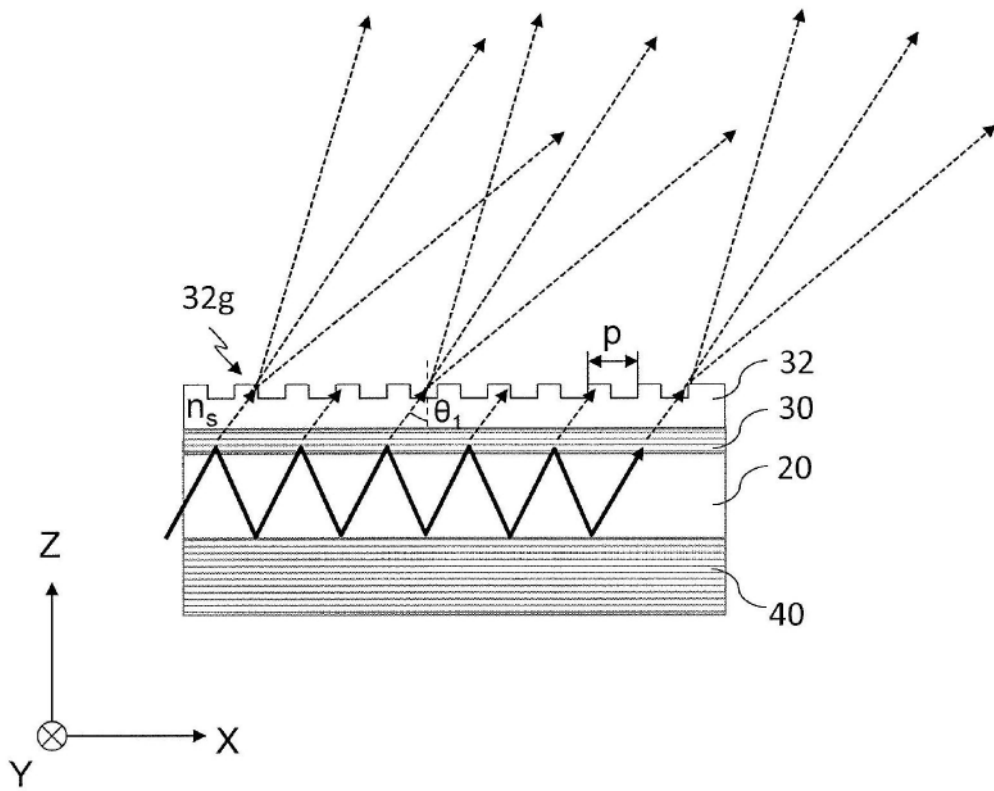


图100

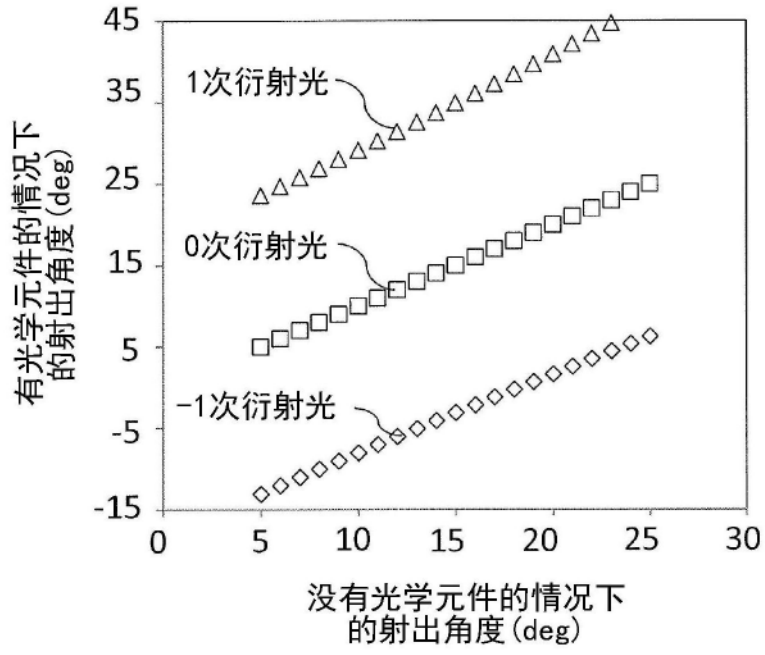


图101

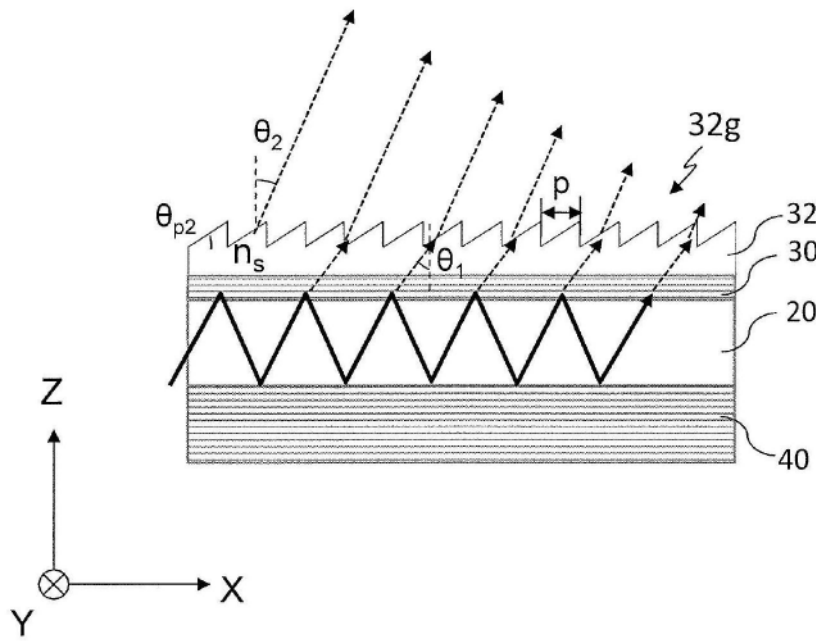


图102

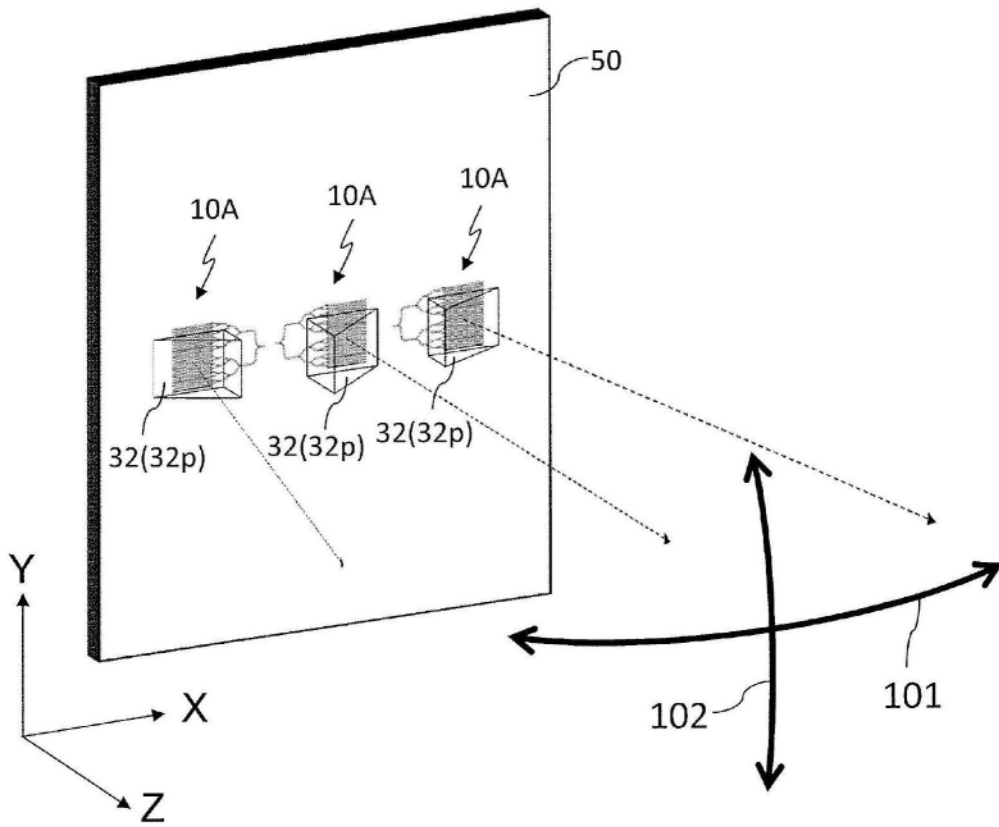


图103

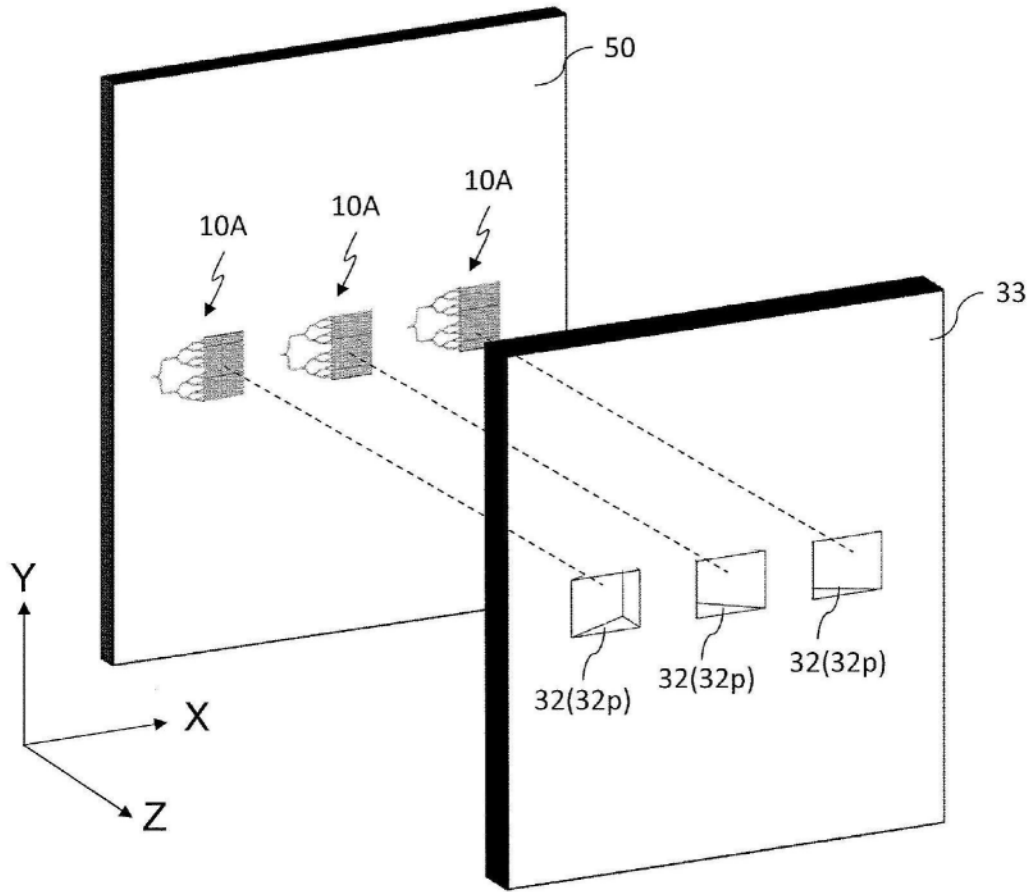


图104

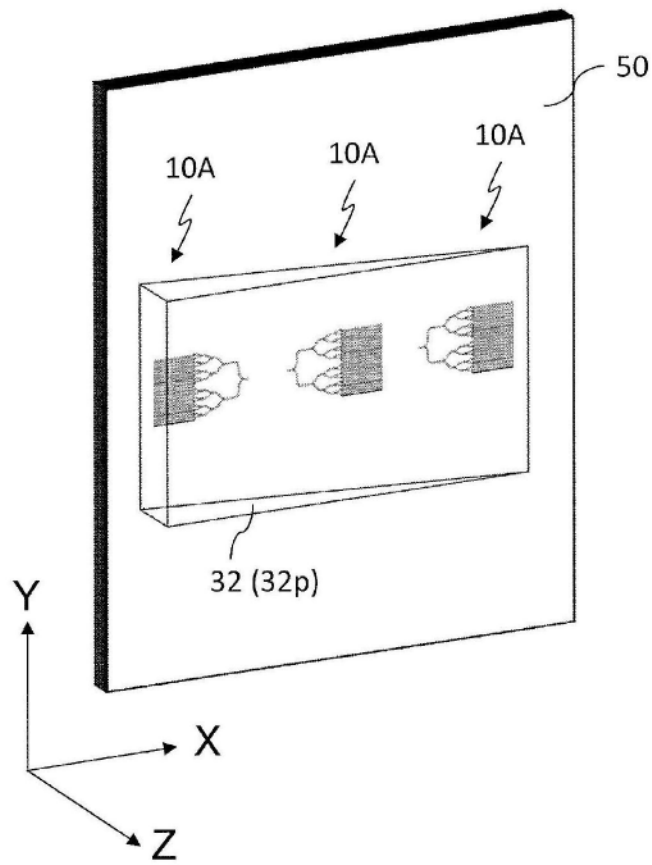


图105

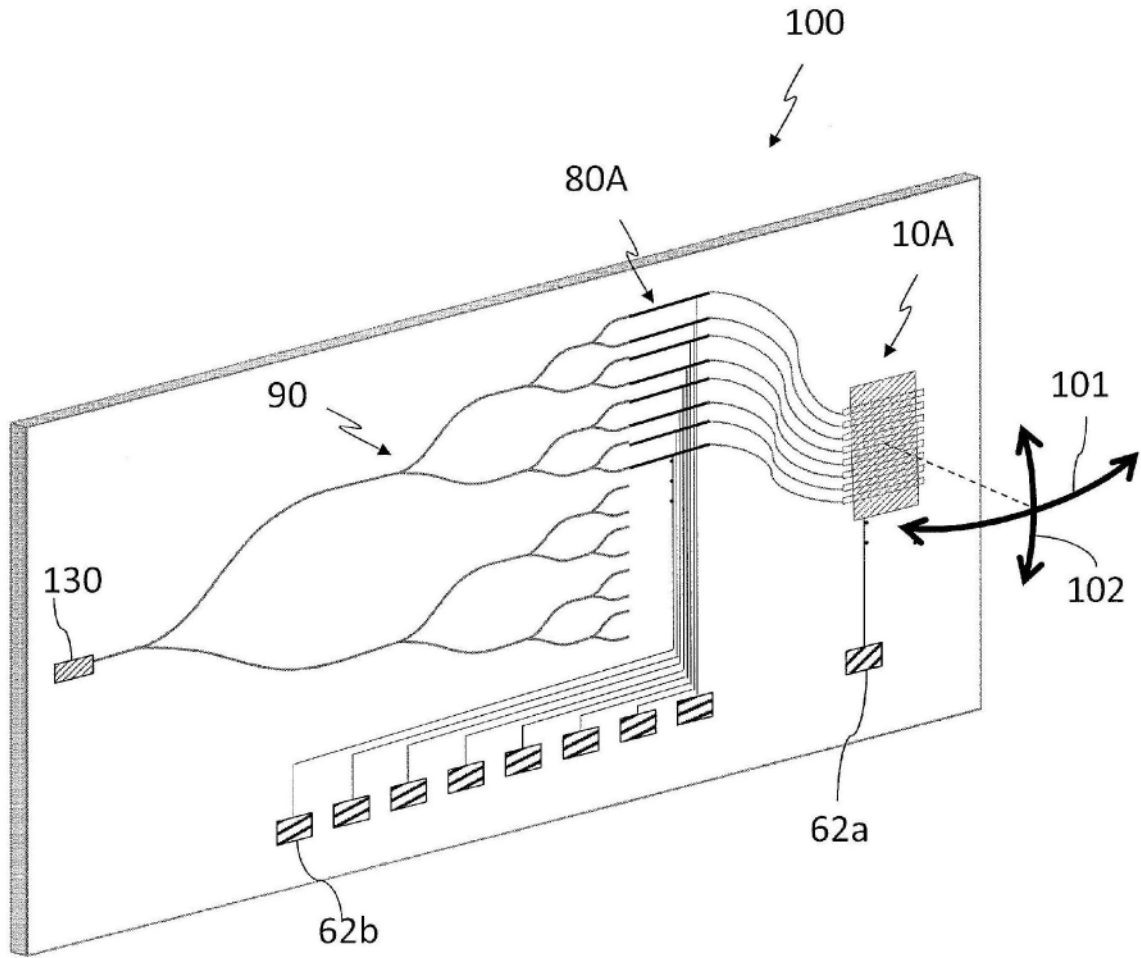


图106

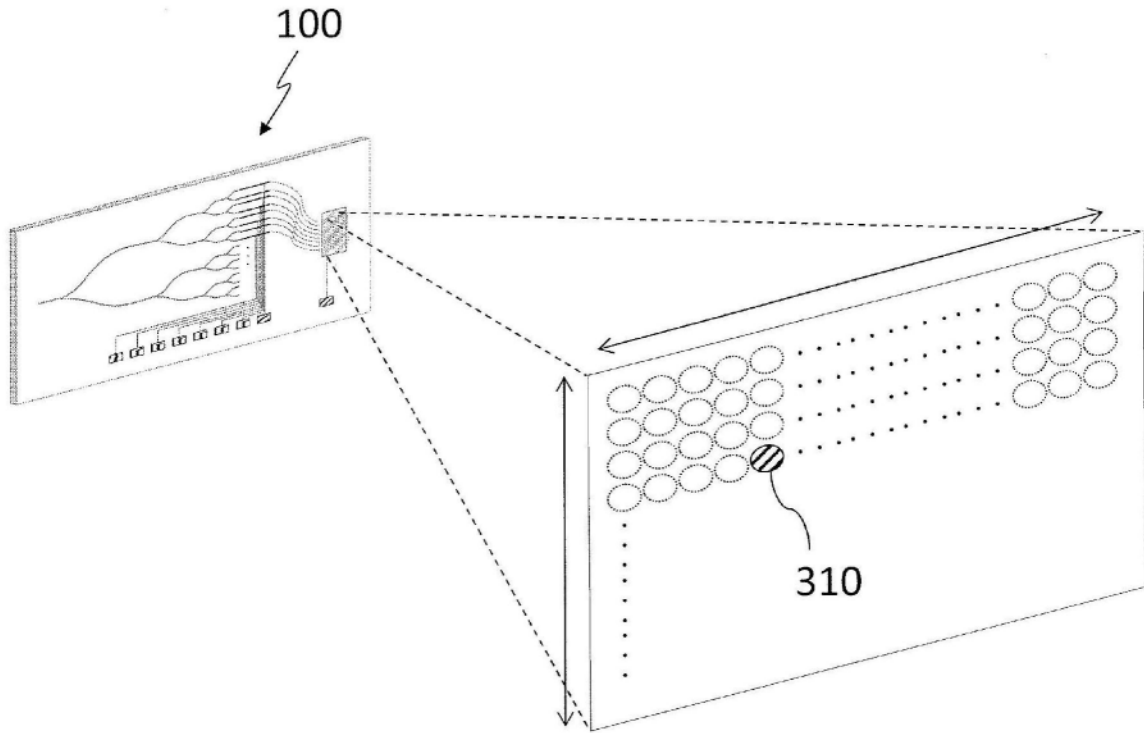


图107

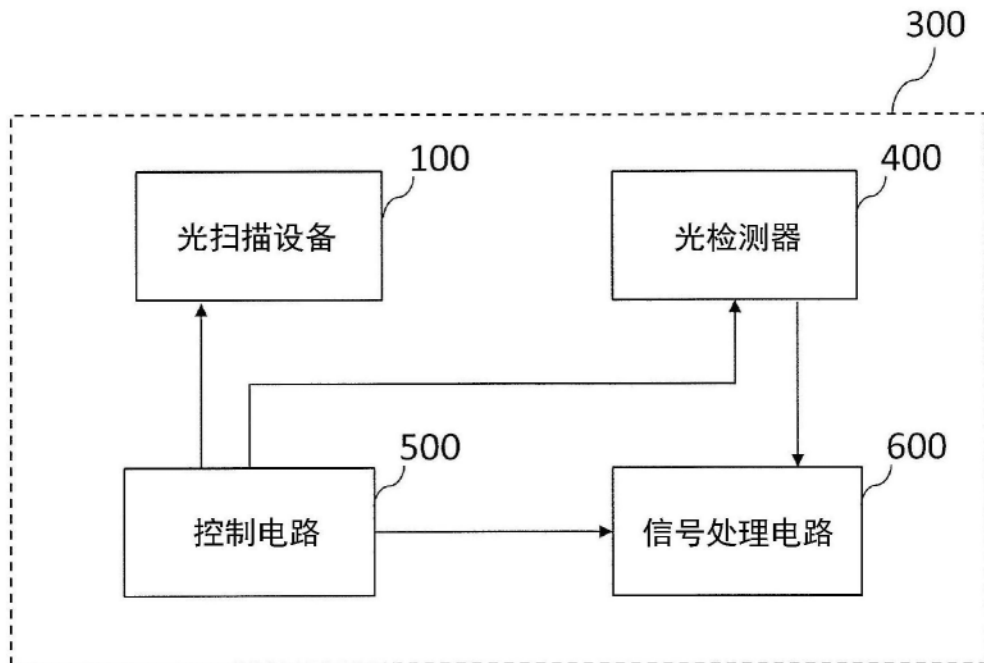


图108

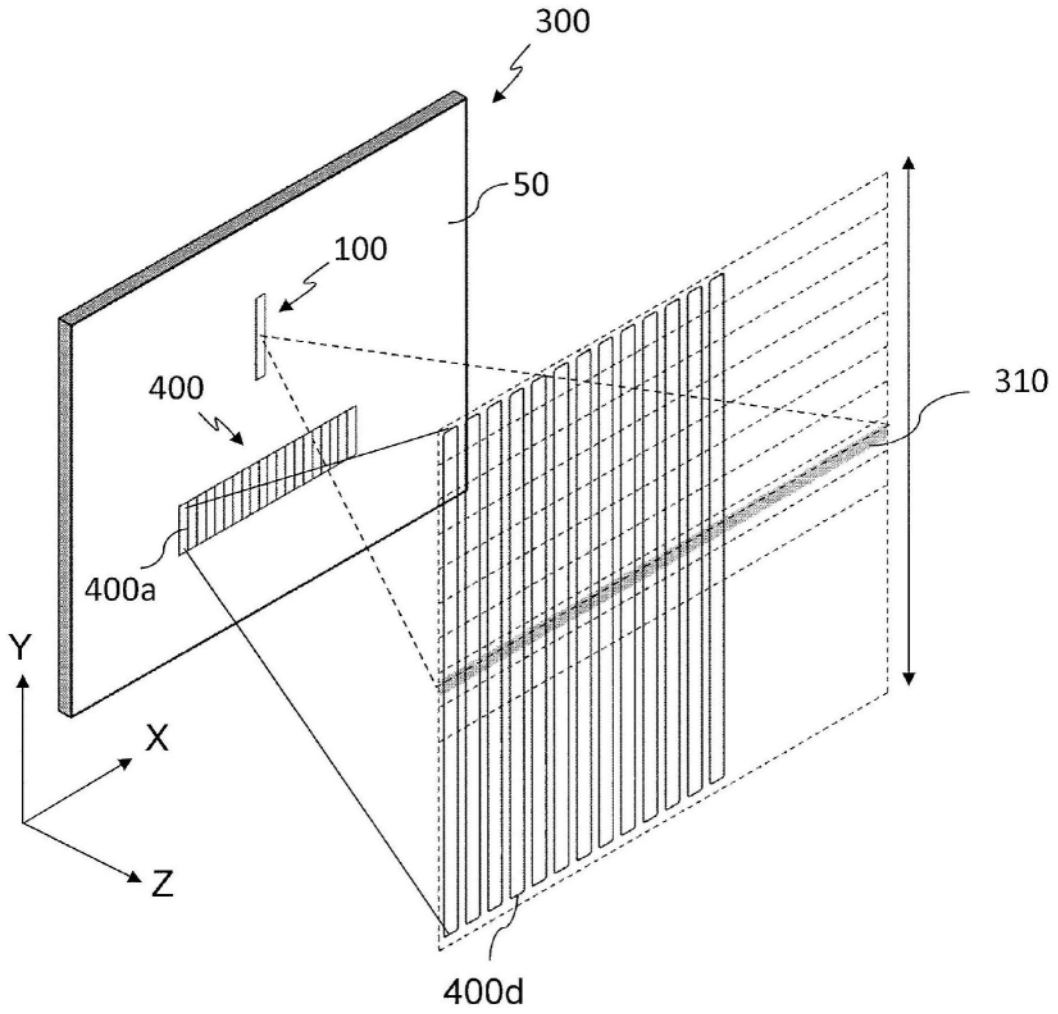


图109

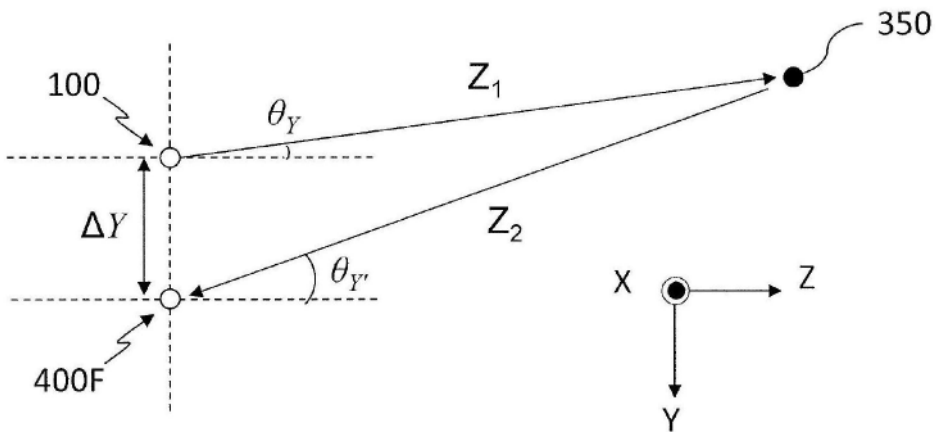


图110A

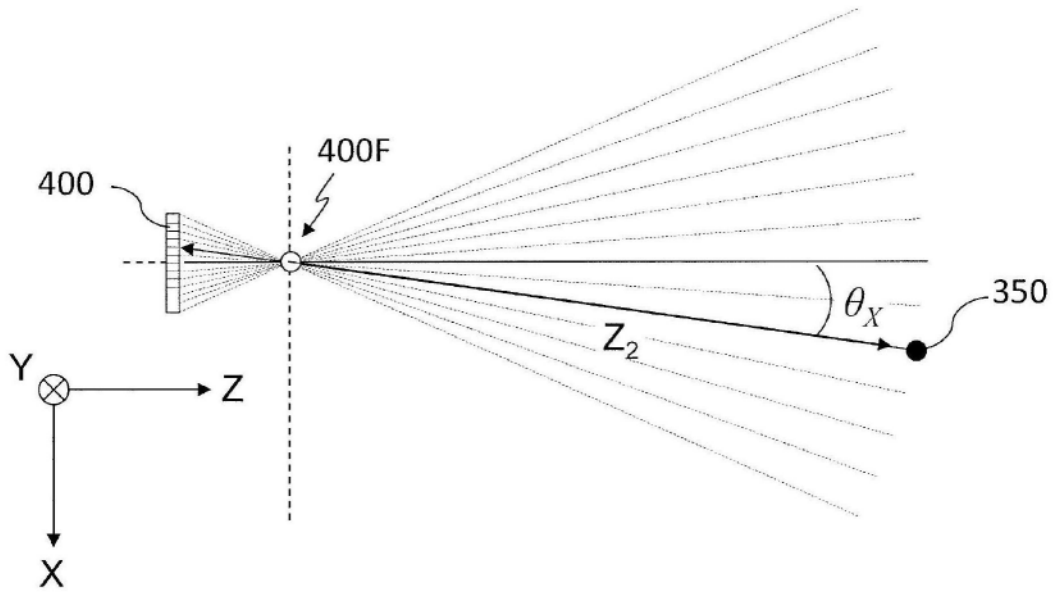


图110B

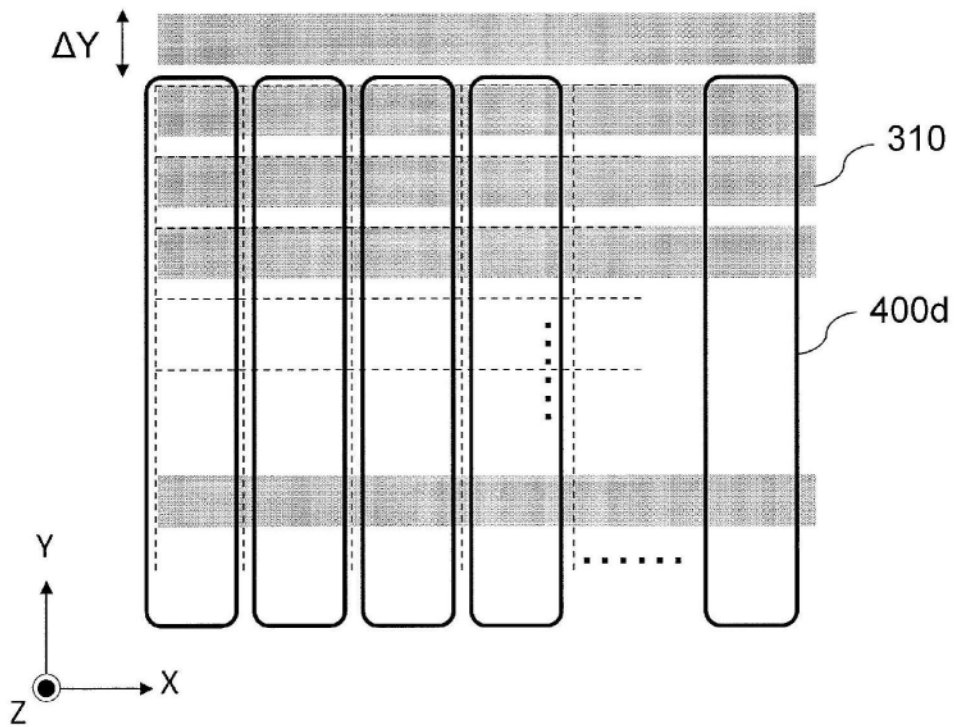


图111

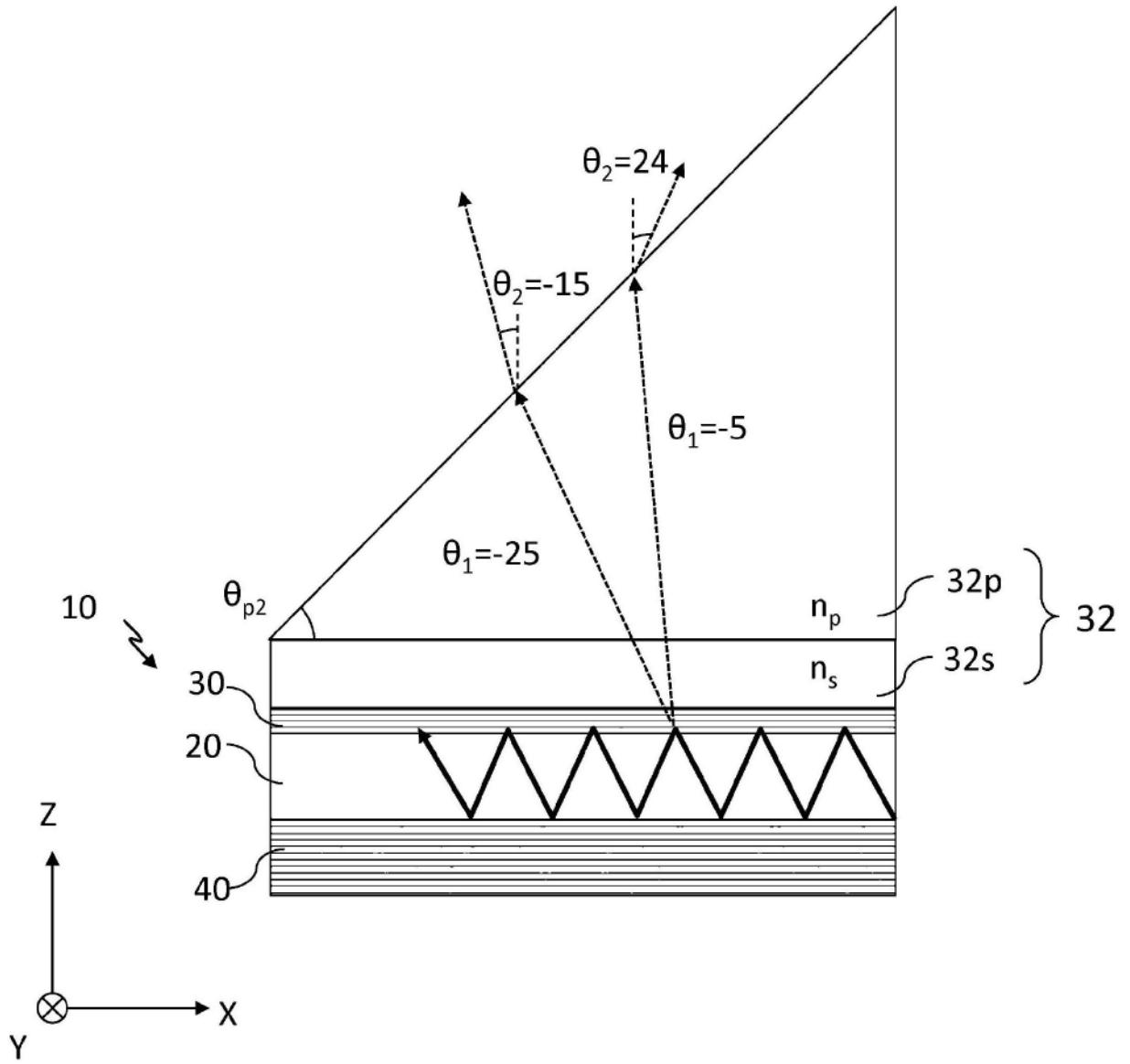


图112