(19)国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 110021532 B
(45)授权公告日 2024.08.02

(21)申请号 201811622842.5
(22)申请日 2018.12.28
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110021532 A
(43)申请公布日 2019.07.16
(30)优先权数据
17211169.2 2017.12.29 EP
18162310.9 2018.03.16 EP
(73)专利权人 IHP有限责任公司/莱布尼茨创新微电子研究所
地址 德国法兰克福
专利权人 维尔道技术大学
(72)发明人 P.斯特格利希 A.梅 C.梅 S.施拉德
(74)专利代理机构 北京市柳沈律师事务所 11105
专利代理师 邱军
(51)Int.Cl.
*H01L 21/56*(2006.01)
*H01L 23/31*(2006.01)
*H01L 23/482*(2006.01)
*H01L 25/16*(2023.01)
*G02F 1/015*(2006.01)
*G02F 1/35*(2006.01)
(56)对比文件
CN 107430297 A,2017.12.01
EP 2463695 A1,2012.06.13
审查员 熊敏

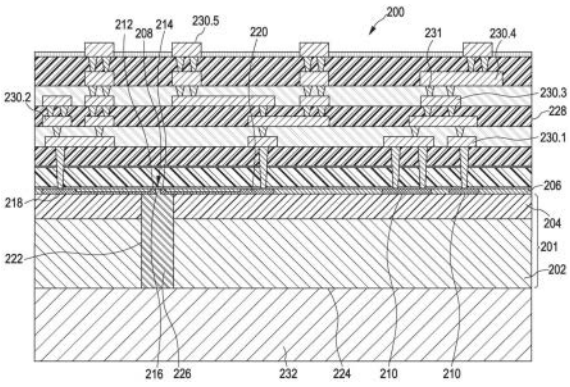
权利要求书2页 说明书13页 附图11页

(54)发明名称

电光器件

(57)摘要

本发明涉及电光器件,包括-具有正面和背面的半导体衬底;-布置在半导体衬底的正面上的至少一个光子组件,该光子组件包括由非线性光学材料构成的有源层;其中-至少一个腔,延伸穿过半导体衬底,并且将半导体衬底的正面上的有源层与半导体衬底的背面连接。




CN 110021532 B

1.一种电光器件(10),包括:

-具有正面(14)和背面(16)的半导体衬底(12);

-布置在所述半导体衬底(12)的正面(14)上的至少一个光子组件(18),所述光子组件(18)包括由非线性光学材料构成的有源层(20);其中

-至少一个腔(22)延伸穿过所述半导体衬底(12),并且将所述半导体衬底(12)的正面(14)上的所述有源层(20)与所述半导体衬底(12)的背面(16)连接,

其中,形成所述有源层的所述非线性光学材料是从所述半导体衬底的背面穿过腔可插入的,以形成所述有源层。

2.根据权利要求1所述的电光器件,包括

-距所述半导体衬底的正面第一距离处的光子器件平面上的所述光子组件,以及

-互连堆叠体,所述互连堆叠体布置在所述半导体衬底的正面上并且包括所述互连堆叠体内相应级别处的至少两个金属平面上的导体道,所述互连堆叠体距所述半导体衬底的正面的距离比所述第一距离更大,其中

-所述金属平面中的不同平面上的所述导体道由相应的介电材料层彼此分离开,并且其中

-一个或多个导电通孔连接布置在所述金属平面中的不同平面上的所述导体道中的至少两个。

3.根据权利要求2所述的电光器件,其中所述光子器件平面上的所述光子组件的有源层被介电材料覆盖,所述介电材料与所述非线性光学材料不同并且布置在距半导体表面比所述互连堆叠体的金属平面的最底层距所述半导体表面更小的距离处,并且由所述导电通孔中的至少一个横穿。

4.根据权利要求1至3中任一项所述的电光器件,还包括在所述半导体衬底的背面上用于将所述至少一个腔从环境氛围密封的背面封装。

5.根据权利要求4所述的电光器件,其中所述背面封装是接合到所述半导体衬底的封装晶片。

6.根据权利要求1至3中任一项所述的电光器件,其中所述非线性光学材料是有机材料或无机材料,其展示了二阶或三阶的非线性光学效应。

7.根据权利要求2所述的电光器件,其中所述光子组件是电光调制器,其中

-所述有源层的非线性光学材料展示了对施加到所述非线性光学材料的电场的非线性光学响应,并且将所述电光调制器光学地连接以接收光载波信号,并且其中

-所述电光调制器包括经由所述互连堆叠体电连接的场电极,以接收时间相关的电调制输入信号并且布置为取决于所述电调制输入信号在所述有源层中产生电场,并且其中

-所述有源层,根据其非线性光学响应,配置为取决于所施加的电调制输入信号来调制所述光载波信号,以便于产生展示输出信号调制的光输出信号。

8.根据权利要求7所述的电光器件,还包括用于接收DC偏置电压的调制控制输入以及求和组件,所述求和组件配置为接收所述DC偏置电压和电输入信号并且配置为提供所述电调制输入信号作为所述DC偏置电压和所述电输入信号的总和。

9.根据权利要求7或8所述的电光器件,其中

-所述非线性光学材料布置在场电极的相应的内侧面之间,所述场电极的相应的内侧

面由30nm和300nm之间的距离分离。

10.根据权利要求7或8所述的电光器件,还包括

-检测器组件,所述检测器组件布置在所述光子器件平面上,并且配置为从所述电光调制器接收所述光输出信号并且配置为于此响应下提供电检测器输出信号,其中

-所述互连堆叠体包括电子组件,所述电子组件布置在所述金属平面中的一个上并且与所述检测器组件电连接。

11.一种电光相移模块,包括

-配置为接收所述光载波信号的光输入;

-根据权利要求7至9中任一项所述的电光器件,所述电光器件配置为根据施加的时间相关的电调制输入信号通过在所述光载波信号中引入相移来产生展示输出信号调制的所述光输出信号;

-配置为提供所述光输出信号的光输出。

12.一种光学布置,所述光学布置包括在马赫-曾德尔干涉仪、法布里-珀罗谐振器或环形谐振器的束路径中的根据权利要求11所述的电光相移模块。

13.一种制造电光器件的方法,包括:

-提供具有正面和背面的半导体衬底;

-在所述半导体衬底的正面上制造包括由非线性光学材料构成的有源层的至少一个光子组件;

其中制造所述至少一个光子组件包括

-始于所述半导体衬底的背面制造腔,并且将所述腔至少延伸到所述半导体衬底的正面并且直至所述光子组件;并且

-通过从所述半导体衬底的背面穿过所述腔插入所述非线性光学材料来形成所述光子组件的有源层。

14.根据权利要求13所述的方法,还包括,在制造所述腔之前,

-在所述半导体衬底的正面上制造互连堆叠体,所述互连堆叠体包括所述互连堆叠体内相应级别处的至少两个金属平面上的导体道,所述互连堆叠体距所述半导体衬底的正面的距离比所述光子组件布置在的、距所述半导体衬底的正面的第一距离更大。

15.根据权利要求13或14所述的方法,还包括,在将所述非线性光学材料插入穿过所述腔之后,

-通过在所述半导体衬底的背面制造所述腔的背面封装,将所述腔从环境氛围密封。

# 电光器件

## 技术领域

[0001] 本发明涉及电光器件以及制造电光器件的方法。

## 背景技术

[0002] 一般而言,本说明书的意义中的电光器件是包括集成在半导体衬底上的电学组件和光子组件的器件。

[0003] US 8081851 B2描述了包括与电子组件一起集成在常用硅衬底上的电光调制器的电光器件。高折射率对比的波导组件是基于通过施加电压或者通过压印电流快速改变光波导的传输性质。在US 8081851 B2中所公开的波导由用低折射率的围绕材料包围的高折射率的波导芯构成,该波导至少按区域具有电光性质。通过将电压施加到完整或部分光学透明的电极,产生具有以与其相互作用的光学模式强烈重叠的电场,因此改变了波导的传输性质。这样,应当实现具有小开关电压的快速电光调制器。

[0004] 诸如在US 8081851 B2中公开的电光调制器使用从标准CMOS制造已知的微电子的制造方法来典型地集成。然而,由于微电子的制造技术中许多非线性光学材料对于工艺条件的灵敏度,将这样的敏感材料集成在电光器件仍是挑战。这阻碍了在电光器件中使用受欢迎的非线性光学材料的道路,例如该电光器件允许特别地实现调制速率并且由此在传输数据时的高比特率。

## 发明内容

[0005] 本发明的目的是提供改进的电光器件。

[0006] 根据本发明的第一方面,提供电光器件。根据本发明的第一方面,电光器件包括

[0007] -具有正面和背面的半导体衬底;

[0008] -布置在半导体衬底的正面上的至少一个光子组件,该光子组件包括由非线性光学材料构成的有源层;其中

[0009] -至少一个腔延伸穿过半导体衬底,并且将半导体衬底的正面上的有源层与半导体衬底的背面连接。

[0010] 根据本发明的第一方面的电光器件包括延伸穿过半导体衬底的腔。腔将布置在半导体衬底的正面上的至少有源层与半导体衬底的背面连接。

[0011] 本发明的器件构思是基于已知的非线性光学材料对于微电子的制造技术中的典型的处理条件敏感的认知,该典型的处理条件包括侵略性气体氛围和高处理温度。特别地,这严重限制了在非线性光学材料的顶部上逐层制造微电子器件结构的可能性。

[0012] 本发明的器件构思允许通过提供所描述的腔体,在任何期望的时间制造由非线性光学材料构成的有源层,与半导体衬底的正面上的器件结构制造的约束无关。特别地,考虑到电光器件的所提出的结构,非线性光学材料可以是在微电子正面器件结构的制造之后(例如通过使用CMOS处理)从背面引入,这因此避免了将非线性光学材料暴露于侵略性的处理条件。事实上,在器件制造的工艺期间,可以在所选择的时间进行将非线性光学材料插入

到腔中并且因此制造具有非线性光学材料的光子组件的有源层。因此,特别地,非线性光学材料是适合地从半导体衬底的背面穿过腔可插入的材料,以形成有源层。

[0013] 这样,本发明的电光器件中,电子组件还可以布置在光子组件上方的正面上,如下面将通过若干实施例示出。

[0014] 最终,因此所提出的器件构思允许使用现有技术不允许在半导体光子学的已知器件构思中集成的非线性光学材料,该半导体光子学的已知器件构思在不同级别上包含例如具有集成光子、电光、光电和电子组件的复杂器件结构。

[0015] 在下文中,将描述本发明的第一方面的电光器件的实施例。

[0016] 如提到的,光子组件包括由非线性光学材料构成的有源层。在优选的实施例中,非线性光学材料是有机材料。有些有机材料还展示出允许彼此独立地操纵相位和振幅的电光性质。与基于硅的光学调制器相比,有机材料展示出更高的调制速率和更小的电带宽,并且由此允许在传输数据时实现特别高的比特率。通过使用有机材料实现特别高的稳健性,归因于施加电场足以改变折射率而不会引入电荷载流子传输的事实。因此,形式为热能的电能的耗散不会发生,这是目前数据传输系统的高能消耗的主要原因。

[0017] 然而,在本发明的器件构思的框架内,使用无机材料(除了硅)作为非线性光学材料也是可能的。

[0018] 材料选择相对于制造问题仅受限制于以下需求:制造期间将非线性光学材料插入到腔中的工艺步骤必须不会需要可能负面影响了已经出现在这个处理步骤处的器件结构的处理条件。这将在下面本发明的工艺方面的上下文中进一步更详细讨论。

[0019] 关于器件应用,优选的是,非线性光学材料具有用于展示出强空间电子限制的光子组件的有源层的电子系统,该强空间电子限制是有利于大的光学非线性的性质。

[0020] 特别优选的电光器件中,非线性光学材料展示出电光效应。简而言之,电光效应可以描述为响应于非线性光学材料中的出现的施加电场的材料的光学性质的变化。然而,其它实施例的非线性光学材料不能用于提供电光效应。由诸如波混频、二次或三次谐波生成的非线性光学材料提供的其它效应还可以用于电光器件中。可以采用甚至更高阶的(即四阶或更高的)非线性光学效应。本文中所用的术语电光器件因此不会隐含:必须在器件的操作中使用电光效应。它仅指代将电子组件和光学组件集成在半导体衬底上的集成器件。

[0021] 可以形成有源层的合适的非线性光学材料是,例如优选为晶体形式的聚二乙炔,并且优选地沿着行进光波的电场矢量的极化方向与其聚合物链的一维共轭电子系统的轴线对准。

[0022] 可以使用的其它非线性光学材料是共轭偶氮苯聚合物。原则上,还可以使用另外短的共轭低聚物和相应的发色团,例如贝塔胡萝卜素、低聚亚烷基亚乙烯基、低聚氰化物、以及如低聚烯烃或梯型聚对苯撑的更稳定的梯型聚合物。

[0023] 在优先的实施例中,非线性光学材料是有机材料或无机材料,其展示了二阶或三阶的非线性光学效应。例如,非线性光学材料是聚合物或无定形碳/金刚石碳。另外可以施加聚合物和由例如碳片构成的无定形碳的混合物。

[0024] 另一种选择是使用复合材料,该复合材料由用合适的浓度的一维导电的或半导的纳米域填充的透明介电基质构成,该一维导电的或半导的纳米域在一些变型中还有利地展示出有源层中电子系统的空间限制。一些这类的非线性光学材料形成包含隔离的量子点的

复合物。用于导电的或半导的纳米域中的合适材料的其它示例是金、银、钨、铝、金属或半导的纳米线，也由彼此直接接触的对准的纳米点形成。

[0025] 基质材料可以是介电聚合物、例如二氧化硅的玻璃或各种介电氧化物、或者例如铪氧化物的其它合适的氧化物。

[0026] 非线性光学材料还可以由无机材料构成。合适的示例是类似硫化物、磷酸盐或硝酸盐的盐。在使用无机材料的情况下，具有最高线性和超极化率的晶轴应该在充足的程度上与用于通过电光调制器调制光载波信号的电场的极化方向对准。

[0027] 非线性光学材料的其它示例是有机-无机混合材料(诸如由包含共轭和/或芳香族和/或杂环部分的有机双磷酸形成的双磷酸多层，其用期望的宏观性质组合在与像是氯化氧锆或氯氧化钛稳定的多层结构的合适的反应物反应之后形成。

[0028] 应该注意的是，在本发明的第一方面的电光器件的上下文中不需要必须将腔用非线性光学材料完整填充。当在一些实施例中，腔当然用非线性光学材料完整地填充，具有腔的其它实施例仅用非线性光学材料部分地填充。在实施例的后者组中，由非线性光学材料的部分填充的程度可以考虑到特别应用情况的需求进行选择并且例如可以经受制造工艺的边界条件。其中实现足够精确的工艺控制，非线性材料可以受限于光子组件的有源层，并且完全不会延伸到腔中。本发明的优点是，在提供非线性光学材料中这样的精确的制造控制不是对光子组件的制造的需求。万一将比实际上用于提供有源层所需更多的材料插入到腔中，不需要其它处理来移除这样的附加材料，只要腔的体积足够容纳这样的附加材料。

[0029] 优选地，半导体衬底由硅构成。这开启了使用确立的工业微电子处理技术制造电光器件的可能性。

[0030] 在根据第一方面的电光器件的优选实施例中，电光器件包括

[0031] -光子组件，其如所提及地布置在半导体衬底的正面上、在距半导体衬底的正面第一距离处的光子器件平面上，以及

[0032] -互连堆叠体，其布置在半导体衬底的正面并且包括互连堆叠体内相应级别处的至少两个金属平面上的导体道，该互连堆叠体距半导体衬底的正面的距离比第一距离更大。

[0033] 换言之，将互连堆叠体施加在半导体衬底的正面并且在包括光子组件的光子器件平面的顶部上。

[0034] 在具有这样的互连堆叠体的电光器件的典型实施例中，互连堆叠体的金属平面的不同平面上的导体道由相应的介电材料层彼此分离开，并且一个或多个导电通孔连接布置在金属平面中的不同平面上的导体道中的至少两个。然而，互连堆叠体的内部结构可以根据给定的应用情况来设计。特别地，可以从2和给定处理技术下的许可的最大数目(诸如5或7)之间随时选择金属平面的数目。另外，互连堆叠体中的通孔当然也不是在所有应用情况中都需要，并且可能的话可以因此被省略。

[0035] 本发明的电光器件的这些实施例明显示出了在许多器件应用的半导体衬底中包含腔的器件构思的优点。尽管已知的电光器件在允许光子平面的顶部上具有多于一个金属平面的结构中受限制，但是本实施例表示具有微电子产业中通常完全发展的互连堆叠体(即具有至少两个金属平面)的芯片设计。特别地，由电光器件的本发明实施例公开的芯片设计允许电学组件布置在光子组件的上方，其使用现有技术解决方案不能实现。

[0036] 如所提及的,这些实施例中一个或多个光子组件可以布置在光子器件平面上。光子器件平面位于距半导体衬底的正面第一距离处。在一些实施例中,其它器件平面或材料层位于半导体衬底和光子器件平面之间。这样的平面或材料层位于距半导体衬底的正面的一距离处,该距离小于光子器件平面位于的第一距离。在这些实施例中,延伸穿过半导体衬底的腔还穿透这些附加平面或材料层,以便于延伸直至相应的光子组件的有源层。

[0037] 在这些实施例的另一个组合中,其中光子平面上的光子组件的有源层被介电材料覆盖,该介电材料与非线性光学材料不同并且布置在距半导体表面比互连堆叠体的金属平面的最底层距半导体表面更小的距离处,并且由所述导电通孔中的至少一个横穿。这允许通过导体通孔中的至少一个将光子组件连接到互连堆叠体的相应的金属平面上的导体道。从而,可以将电压供应到光子组件,例如实现释放电光组件。注意到,该特征可以被使用无论互连结构的结构的细节。例如,为了实现该特征,使用具有至少两个金属平面的互连堆叠体是不必要的。一个金属平面也会有用,即使目前那不是应用的优选。本发明的器件构思的特别的强度是可以将器件构思施加到存在的芯片设计而不是修改这样的芯片设计。这是由于以下事实:芯片设计自身总体上不受延伸穿过半导体衬底的局部化的腔影响。因此,期望本发明的器件构思适用于包括光子组件的存在的芯片设计的过剩。

[0038] 为了制造期间和之后另外保护非线性光学材料,电光器件的特别优选的实施例包括半导体衬底的背面上将至少一个腔从环境氛围密封的背面封装。通过将至少一个腔从环境氛围密封,可以增加非线性光学材料的长期稳定性。事实上,例如电光调制器中的有源层的性能受到诸如湿度、氧气的存在、UV光并且受到环境氛围强烈地影响。背面封装保护非线性光学材料免受这些影响。在优选的变型中,背面封装形成腔的气密性密封。

[0039] 通过用合适的覆盖层(例如半导体覆盖层)密封腔可以实现例如背面封装。覆盖层可以仅仅局部地施加在腔的横向位置处。优选地,然而覆盖层在半导体衬底的全部背面之上延伸。在这类的不同变型中,覆盖层由例如由晶片结合工艺施加的其它半导体晶片形成。该过程特别适用于硅技术,其中将硅晶片接合到也由硅制成的半导体衬底。对于本发明的上下文中的应用,必须选择合适的硅结合工艺,以铭记将非线性光学材料插入到腔中的处理需求,例如关于温度稳定性。然而,还可以用其它材料施加形式为半导体衬底的背面的涂层的覆盖层。

[0040] 在使用针对氧化稳定的非线性光学材料的实施例中,不是必须将封装施加到半导体衬底的背面。

[0041] 在优选的实施例中,光子组件是电光调制器。优选地,因此,该实施例的有源层的非线性光学材料对施加到非线性光学材料的电场展示出非线性光学响应。在该实施例的优选变型中,将电光调制器光学连接以接收光载波信号,例如经由布置在光子器件平面上的波导。电光调制器优选地包括适当地经由互连堆叠体来电连接的场电极,以从外部或内部调制信号源接收时间相关的电调制输入信号并且布置为取决于电调制输入信号在有源层中产生电场。

[0042] 这样的电光调制器实施例中的有源层,根据它的非线性光学响应,配置为取决于施加的电调制输入信号来调制光载波信号,以便于产生展示输出信号调制的光输出信号。

[0043] 在优选的实施例中,非线性光学材料展示出二次电光效应(QEOE)。二次电光效应(QEOE),也叫做DC克尔效应,描述了暴露于电场的材料的折射率的变化,其中折射率的变化

与施加的电场的变化平方是成比例的。折射率与电场E并且由此与施加电压U和电极之间的距离s的二次相关性可以写为

[0044] $$n(E) \propto E^2 = \frac{U^2}{s^2}$$

[0045] 因此,QEOE的有效使用(即至少$10^{-5}$的折射率的变化),仅有电极之间的距离小(例如50nm和200nm之间)才可能达到5V的电压。

[0046] 在其它替代的实施例中,非线性光学材料仅展示出线性电光效应(LEOE)。LEOE,也叫做普克尔效应,是暴露于电场的材料的折射率的变化,其中折射率的变化与施加的电场的变化平方是线性相关的。展示出LEOE的材料缺少反转对称性。然而,关于器件应用,与LEOE相比QEOE示出了一些优点。例如,LEOE需要活性分子的非中心对称取向,该活性分子常包含将材料加热直到玻璃化转变温度。随后,仍然在高温度时,施加近似100V/μm的高电场以对准活性分子并且以确立它们的非中心对称取向。

[0047] 该极化工艺对QEOE不是必须的,因为不需要非中心对称取向。另外QEOE在宽温度范围之上(例如在0℃和150℃之间)是可逆并且稳定的。相比之下,LEOE随增加的温度变得更弱,因为分子失去它们在极化工艺期间所确立的非中心对称取向。从而,QEOE的长期稳定性超过了LEOE的长期稳定性。

[0048] 尽管QEOE比LEOE典型地小一个数量级的事实,但是QEOE与目前所用的硅光子应用中的折射率变化的数量级相比仍然典型地大了一个数量级。

[0049] 在许多实施例中,非线性光学材料展示出线性电光效应(LEOE)以及附加地二次电光效应(QEOE)。

[0050] 其它实施例使用展示出二次电光效应(QEOE)和线性电光效应(LEOE)二者的非线性光学材料。展示出两者效应的示例材料是无定形碳(还已知为类金刚石碳,DLC)。

[0051] 在使用展示出QEOE的非线性光学材料的优选实施例中,电光器件包括用于接收DC偏置电压的调制控制输入以及求和组件,该求和组件配置为接收DC偏置电压和电输入信号并且配置为提供所述电调制输入信号作为所述DC偏置电压和所述电输入信号的总和。QEOE总体上以时间相关的电调制输入信号两倍的频率来产生光输出信号。

[0052] 然而,光输出信号的调制频率对施加的时间相关的电调制输入信号的相关性可以线性化,如果时间相关的电调制输入信号除了由电输出信号形成的AC分量之外包括作为DC分量的适当的DC偏置电压。在此线性化意味着调制的光输出信号具有与施加的时间相关的电调制输入信号相同的调制频率。

[0053] 在一个实施例中,这通过求和组件实现,该求和组件接收作为DC分量的DC偏置电压和作为AC分量的电输入信号并且提供电调制输入信号作为DC偏置电压和电输入信号的总和。考虑到展示出非线性光学材料的折射率对施加的电场的抛物线相关性的非线性光学材料的特性,DC偏置电压将器件的操作点移位到特性的近似线性区域。

[0054] 线性化可以用于允许电光调制器调谐光载波信号的振幅,即它的最大光强度。DC偏置电压的幅度越高,则调制的光载波信号的振幅越高。从而,可以提供具有用于调谐光载波信号的振幅的容量的电光调制器。

[0055] 在一个特别有利的变型中电光调制器实现为槽波导,包括用非线性光学材料填充的两个轨道之间的槽中的有源层。例如硅轨道的轨道形成场电极,使得电场出现在轨道之

间的有源层中。接收的光载波信号行进穿过用非线性光学材料填充的槽中。通过改变诸如控制电场的振幅的电压的控制参数,非线性光学材料的折射率改变使得光载波信号以期望的方式受非线性光学材料的变化折射率影响。由此,调制光载波信号。如本身已知的,电光调制器允许调制载波光信号的相位、频率、振幅或极化中的至少一个。在优选的实施例中,非线性光学材料布置在场电极的相应的内侧面之间,其由在30nm和300nm之间、更特别地在50nm和200nm之间、以及甚至更优选地在50nm和150nm之间的距离分离开。

[0056] 通过布置非线性光学材料在场电极的相应内部侧面之间,实现槽波导。

[0057] 适当地,施加的电调制输入信号的电压量小于5V。

[0058] 在优选的实施例中,电光器件包括检测器组件,该检测器组件布置在光子器件平面上,并且配置为从电光调制器接收光输出信号并且配置为于此响应下提供电检测器输出信号。

[0059] 优选地,在该实施例中,互连堆叠体包括电子组件,该电子组件布置在金属平面中的一个上并且与检测器组件电连接。使用检测器,将光输出信号转换为还可以馈送并且还由电子组件处理的电信号,该电子组件在一些实施例中还包括在电光器件中,但是在另一些实施例中是外部组件。

[0060] 根据先前实施例的电光调制器可以用在形成其它实施例的各种器件应用中。

[0061] 在一个这样的实施例中,电光相移模块包括

[0062] -配置为接收光载波信号的光输入;

[0063] -电光器件,其包括根据形成如上文所描述的电光调制器的它的实施例中的一个中的本发明的第一方面的电光器件,该电光器件配置为根据施加的时间相关的电调制输入信号通过在光载波信号中引入相移来产生展示输出信号调制的光输出信号;

[0064] -配置为提供光输出信号的光输出。

[0065] 因此,当光载波信号进入电光调制器时,根据施加的时间相关的电调制输入信号在光载波信号中引入相移。从而,产生的光输出信号是以相位调制的光信号。

[0066] 其它优选的应用情况由包括先前实施例的电光相移模块光学布置形成。例如,电光相移模块可以提供在马赫-曾德尔干涉仪、法布里-珀罗谐振器或环形谐振器的束路径中。

[0067] 根据本发明的第二方面,提供制造电光器件的方法。该方法包括:

[0068] -提供具有正面和背面的半导体衬底;

[0069] -在半导体衬底的正面上制造包括由非线性光学材料构成的有源层的至少一个光子组件;

[0070] 其中制造至少一个光子组件包括

[0071] -始于半导体衬底的背面来制造腔,并且从腔至少延伸到半导体衬底的正面并且直至光子组件;并且

[0072] -通过从半导体衬底的背面穿过腔体插入非线性光学材料来形成光子组件的有源层。

[0073] 第二方面的制造方法的优点对应于在第一方面的电光器件的上下文中所描述的优点。

[0074] 该方法是基于已知的非线性光学材料对于微电子的制造技术中的典型的处理条

件敏感的认知,该典型的处理条件包括侵略性气体氛围和高处理温度。特别地,这严重限制了在非线性光学材料的顶部上逐层制造微电子器件结构的可能性。

[0075] 特别地,本发明的方法允许通过制造所描述的腔体,在任何期望的时间制造由非线性光学材料构成的有源层,与半导体衬底的正面上的器件结构制造的约束无关。

[0076] 因此,该方法使非线性光学材料的使用成为可能,现有技术处理将不会允许在半导体光子学已知的处理技术中集成。

[0077] 使用本发明的方法,还可以在光子组件上方的正面上制造电子组件,如下面将通过若干实施例示出。

[0078] 方法因此形成关键技术,用于打开了通往制造具有布置在相应的互连堆叠体的金属平面的不同级别上集成的光子、电光、光电和电子组件的复杂器件结构的路径。

[0079] 在下文中,将描述第二方面的方法的实施例。

[0080] 在特殊的实施例中,在制造微电子正面器件结构之后从背面引入非线性光学材料,微电子正面器件结构涉及例如通过CMOS处理的制造。这些实施例因此避免了将非线性光学材料暴露于典型的用于CMOS处理技术的相对侵略性的处理条件。

[0081] 优选的是,在制造光子组件的上下文中,经由背面图案化或背面释放来制造腔。特别地,可以施加的工艺技术是例如背面对正面(back-to-front side)的光刻对准、深Si蚀刻或$SiO_2$去除,例如使用各向异性的湿法蚀刻或HF蒸汽蚀刻。

[0082] 通过从半导体衬底的背面穿过腔插入非线性光学材料来形成光子组件的有源层包括了在一些实施例中由以下技术将非线性光学材料插入:液相沉积技术、类似旋涂、浸涂、自组装、朗缪尔-布洛杰特(Langmuir-Blodgett)技术、喷射、电喷射、喷墨印刷、或者用于插入可溶解在液体中的有机材料本领域已知的替代技术。也可以使用上述技术插入无机材料。在该上下文中,自组装理解为预先存在的组件的无序系统允许在合适的处理条件下形成有机的结构或图案。有机的结构或图案的形成是预先存在的组件之间局部相互作用的结果。关于光子组件的有源层的形成,自组装材料有利地展示出预先取向,通过施加外部电场使极化过程不必要。

[0083] 可以用于插入有机材料或无机材料的其它技术是物理气相沉积或化学气相沉积。

[0084] 可以施加的其它技术是真空沉积聚合作用,其中在真空条件下沉积工艺期间形成聚合物。

[0085] 因为非线性光学材料可以因此是聚合物,第二方面的方法提供了用于将硅-有机的混合(SOH)光子集成到良好建立的基于硅的芯片技术中的路线。SOH光子研究了硅光子和有机材料的结合。硅光子包含光子系统的应用,其使用硅作为光学介质并且因此受益于用于CMOS技术中的高度先进的处理技术。与包括电光效应的有机材料的结合中,光子系统的功能性可以被定制并且相对于诸如硅-有机的混合调制器指定的应用来优化。

[0086] 可以实现制造电光器件的方法所提及的实施例的优点,该电光器件将SOH调制器完全集成到电光器件中。特别地,可以制造包括SOH调制器和电学组件的电光器件,该电学组件还可以布置在光子组件上方。特别地,可以制造具有至少一个光子器件平面的电光器件,该至少一个光子器件平面包括至少一个光子组件和任何适当数量的金属平面。在方法的优选实施例中,因此,它还包括在制造腔之前,在半导体衬底的正面上制造互连堆叠体,该互连堆叠体包括互连堆叠体内相应级别处的至少两个金属平面上的导体道,该互连堆叠

体距半导体衬底的正面的距离比距半导体衬底的正面的第一距离更大,该光子组件布置在该半导体衬底的正面的第一距离处。

[0087] 优选的变型包括在前段制程(FEOL)制造的图案化步骤之后,进行后段制程(BEOL)准备的步骤。这包含在半导体衬底的正面制造互连堆叠体。在互连堆叠体下方,布置光子组件。在BEOL准备之后,光子组件的背面通过制造腔来释放。优选的变型包括在BEOL准备之后和在制造腔之后,进行聚合物插入的步骤。

[0088] 优选的实施例中方法还包括在将非线性光学材料插入穿过腔之后,通过半导体衬底的背面制造腔的背面封装,将至少一个腔从环境氛围密封。该实施例下的优选的变型包括了在将非线性光学材料插入穿过具有非线性光学材料的腔之后,通过制造在半导体衬底的背面至少覆盖腔的背面封装来密封非线性光学材料。背面封装可以例如是接合到半导体衬底的背面的晶片。

[0089] 优选地,施加了通常用于临时晶片接合技术的基于聚合物的接合技术。可选地,还可以使用共熔接合技术。在高真空和高达400℃的温度下的晶片接合足以达到非线性光学材料的气密性密封。类似硅的半导体可以用作气密性密封的第二材料。在替代的晶片接合工艺中,第二材料是反应性聚合物或低熔点磷酸盐玻璃,其可以用于获得足够的气密性密封。

[0090] 作为晶片接合的替代例,半导体衬底的背面可以使用诸如物理气相沉积(PVD)、化学气相沉积(CVD)或等离子体增强CVD(PECVD)的涂覆技术由封装层来涂覆。优选的是,封装层的形状不会干扰电光器件的光学性能和电子性能。优选地,选择封装层的材料以提供抵抗环境影响(诸如暴露于UV光、化学物、氧气、湿度等)的抵抗力。用于封装层的合适材料的示例是类金刚石碳(DLC)。

[0091] 在下文中,将参考附图描述其它实施例。

## 附图说明

[0092] 附图中:

[0093] 图1示出了根据现有技术的电光器件的示意性横截面;

[0094] 图2示出了根据本发明的第一方面的电光器件的示意性横截面;

[0095] 图3示出了根据本发明的优选实施例的电光器件的示意性横截面;

[0096] 图4a至4f示出了制造根据本发明的电光器件的方法的处理顺序;

[0097] 图5示出了用于调制光载波信号的电光器件的框图;

[0098] 图6a)和6b)用于说明使用具有输入频率的电输入调制信号调制光载波信号的工作原理的示意图,用于使用展示二次电光效应(QEOE)的非线性光学材料来产生相对于输入频率二倍频的已调制的光输出信号;

[0099] 图6c)和6d)用于说明使用具有输入频率的电输入调制信号调制光载波信号的工作原理的示意图,用于在DC偏置电压下使用展示二次电光效应的非线性光学材料来产生相对于输入频率线性调制的已调制的光输出信号。

## 具体实施方式

[0100] 图1示出了根据现有技术的电光器件100的示意性横截面,该电光器件100还可以

被称为硅-有机的混合(SOH)组件。在包括硅衬底102和掩埋氧化物层(BOX)106的绝缘体上硅(SOI)衬底101上,使用有机材料的光子器件108布置在光子器件平面104中。光子器件平面104还可以包括诸如检测器(未示出)的光电组件。将光子器件108由垂直方向上延伸穿过介电层111和113的通孔110连接到金属电极126,即垂直于光子器件平面104朝向电光器件的正面112。

[0101] 电光器件100还包括由两个轨道116、118构成的两个槽波导114,该轨道116、118因此限定横向方向上在它们之间延伸的槽120。经由连接到通孔110的条状负载122、124,将轨道116、118中的每一个连接到金属电极126。

[0102] 腔128从电光器件100的正面112朝向槽波导114垂直延伸。腔128用形式为聚合物130的有机材料填充,使得用聚合物130涂覆两个轨道116、118和槽120。聚合物130还覆盖电光器件100的完整的正面112。

[0103] 在如图1作为示例所示的现有技术的解决方案中,用于集成最常用的有机材料的典型的温度限制位于大约200℃。一些杂环的材料可以抵挡高达300℃或400℃的处理温度达几秒直至几分钟的范围的短时间段,这取决于处理步骤期间氧气的存在或不存在。因此,当前的解决方案中,有机材料的集成不兼容用于芯片制造的处理技术,其中典型地使用更高的温度。根据现有技术,通过仅将电光器件处理至第一金属平面来规避高的处理温度的问题。

[0104] 在通过用从电光器件的正面朝向衬底的蚀刻方向施加蚀刻工艺的处理期间,将位于第一金属平面下方的光子组件典型地暴露。重要地,在这个处理技术中电学组件不可以位于光子组件上方,因为这样的电子组件在蚀刻工艺期间将会损坏或毁坏。从而,现有技术电光器件的主要缺点是器件中电子组件的数目受限制。因此,当前的解决方案中,不存在将硅-有机的混合(SOH)光子学集成到确立的基于半导体的芯片技术中的兼容性。

[0105] 这就是为什么目前芯片设计中使用用于实现由Si构成的光波导的微电子的方法将电光调制器集成在芯片中。该解决方案的缺点是受限的调制速度和源自Si中电荷载流子运输的相对高的光学损耗。

[0106] 图2示出了根据本发明的第一方面的电光器件10的实施例的示意性横截面。电光器件10包括具有正面14和背面16的半导体衬底12。至少一个光子组件18布置在半导体衬底12的正面14上。光子组件18包括由非线性光学材料构成的有源层20。腔22延伸穿过半导体衬底12,并且将半导体衬底12的正面14上的有源层20与半导体衬底12的背面16连接。

[0107] 通过提供腔22,可以在已经制造腔之后,以任何适当的处理步骤制造由非线性光学材料构成的有源层20,以独立于半导体衬底12的正面14上的器件结构制造的约束。例如,在制造微电子正面器件结构之后可以从背面16穿过腔22引入非线性光学材料,因此避免将非线性光学材料暴露于侵略性的处理条件。特别地,因此,非线性光学材料合适地是从半导体衬底的背面穿过腔可插入的材料,以形成有源层。可以选择材料来符合以下插入技术中的一个:气相沉积技术、液相沉积技术、旋涂、浸涂、物理气相沉积(PVD)、等离子体增强的CVD(PECVD)、化学气相沉积(CVD)、原子层沉积(ALD)、金属有机化学气相沉积(MOCVD)、自组装,朗缪尔-布洛杰特(Langmuir-Blodgett)技术、喷射,电喷射、喷墨印刷、或者本领域已知的替代技术,特别地用于采用可溶的有机或无机非线性光学材料。选择制造有源层20的合适的处理阶段的可能性允许使用在暴露于标准微电子处理的典型处理条件时将遭受损坏

的非线性光学材料,该处理条件包括侵略性的气体氛围和高的处理温度。这样,电光器件10可以实现优秀的非线性光学性质。

[0108] 图3示出了根据优选的实施例的电光器件200。在包括硅衬底202和掩埋氧化物层(BOX)204的绝缘体上硅(SOI)衬底201上,并且在光子器件平面206中布置槽波导208和其它电子或光子组件210。槽波导208包括在它们之间形成槽216的两个轨道212和214。将轨道212、214中的每一个连接到条状负载218、220。

[0109] 与图1的现有技术解决方案相比,腔222形成在SOI-衬底201中并且从SOI-衬底201的背面224延伸到槽波导208的背面,使得腔222延伸到轨道212、214的背面并且延伸到槽216中。腔222和槽216用本实施例中为有机材料的非线性光学材料226填充。因此,有源层填充由两个轨道212、214之间的横向延伸的空间所形成的槽216。

[0110] 在所示的实施例中,互连堆叠体228包括五个金属平面上的导体道。每个金属平面上的示例性导体道用标记230.1至230.5示出,因此表示不同的金属平面。导体道由用于传输电信号的多个通孔连接。示例性通孔用附图标记231示出并且将第三和第四金属平面上的导体道230.3和230.4彼此连接。

[0111] 此外,电极218和220布置在光子器件平面206上并且被连接到通孔,该通孔在操作电光器件中将时间相关的电调制输入信号经由比电极略小的厚度的条状负载提供到槽波导208的轨道212、214。这样,在有源层中产生与电调制输入信号的电场对应的时间相关的电场。

[0112] 半导体衬底202的背面224由封装层232密封。在所示的实施例中,背面封装232是通过晶片接合工艺被接合到半导体衬底202的背面224的硅晶片。因为背面封装,将腔222密封,并且因此保护腔222中的非线性光学材料226免受环境氛围影响。这增加了电光器件200的长期稳定性并且因此导致改进的性能。

[0113] 图4a至4f示出了制造根据本发明的电光器件的方法的处理顺序。

[0114] 图4a显示绝缘体上硅衬底300,其是半导体衬底的优选设计。绝缘体上硅衬底300包括硅层302和布置在硅302顶部的绝缘层304。绝缘层304可以例如由$SiO_2$构成。用附图标记306标记SOI衬底的正面,并且背面用附图标记334标记。在绝缘层304的顶部即在SOI衬底300的正面306上,存在顶硅层308。

[0115] 在稍后的处理步骤(其结果在图4b中示出)中,特别地通过图案化顶硅层308,通过使用同样地在本领域已知的光刻技术,进行电光器件310的前段制程(FEOL)准备。在该处理步骤中,因此制造电子和光子组件。特别地,制造由硅构成的槽波导312。槽波导312具有在图案化过程期间所限定的横向距离分离的两个硅轨道314和316,因此在它们之间形成槽318。轨道314、316的每一个连续到用于电接触硅轨道314和316的条状负载320、322中。除了硅槽波导312,其它组件还布置在光子器件平面306上,作为示例由图4b中仅示意性表示的电子组件324所示出。

[0116] 在稍后的处理步骤(其结果在图4c中示出)中,电光器件310已经经受后段制程(BEOL)的处理顺序。后段制程(BEOL)处理包括制造多个金属平面,每一个包括由多个通孔连接的导体道326.1至326.5,在此示出的所有通孔用相同的附图标记328用于传输电信号。将导体道326.1至326.5由相应的通孔328还连接到组件324。将金属平面嵌入介电基质330材料中,使得形成互连堆叠体。介电基质330还覆盖槽波导312和其它组件324。

[0117] 在制造互连堆叠体之后,图4d中所示出的连续处理包括制造腔332。腔332从SOI衬底300的背面334延伸直至槽波导312的背面,也就是说槽波导312的该侧面面向SOI衬底300的正面308。这意味着腔332延伸穿过硅层302和绝缘层304。此外,在更早的处理步骤中用介电基质材料330填充的槽318现在也被暴露并且形成了已制造的腔332的一部分。

[0118] 可以例如经由背面图案化或背面释放制造腔332。可以施加的处理技术是例如背面对正面(back-to-front side)的光刻对准、深Si蚀刻或$SiO_2$去除,例如使用各向异性的湿法蚀刻或HF蒸汽蚀刻。

[0119] 在图4e中示出在将非线性光学材料336插入穿过腔332之后的电光器件310。通过将非线性光学材料336插入穿过腔332,槽波导312用非线性光学材料336填充使得有源层形成在槽波导312的两个硅轨道314、316之间。非线性光学材料336是有机材料。因此,通过将非线性光学材料336插入穿过腔332,形成硅-有机的混合(SOH)调制器。本实施例中所用的非线性光学材料是聚合物或无定形碳/金刚石碳。另外可以施加聚合物和由例如碳片构成的无定形碳的混合物。可选地,可以施加聚合物和卤化物钙钛矿、无功能性的富勒烯或功能性的富勒烯的纳米晶体的混合物。

[0120] 这样,将硅-有机的混合(SOH)调制器集成到完整的芯片设计中,这在目前器件制造解决方案中是几乎不可能的。

[0121] 由以下技术将非线性光学材料336插入:例如气相沉积技术、液相沉积技术、旋涂、浸涂、物理气相沉积(PVD)、等离子体增强的CVD(PECVD)、化学气相沉积(CVD)、原子层沉积(ALD)、金属有机化学气相沉积(MOCVD)、自组装,朗缪尔-布洛杰特(Langmuir-Blodgett)技术、喷射,电喷射、喷墨印刷、或者本领域已知的替代技术,特别地用于采用可溶的有机材料。作为替代例,也可以使用上述技术插入无机材料。可以用于插入有机材料或无机材料的其它技术是物理气相沉积或化学气相沉积。可以施加的其它技术是真空沉积聚合作用,其中在真空条件下沉积工艺期间形成聚合物。

[0122] 其它实施例中可以形成有源层的合适的非线性光学材料是,例如优选为晶体形式的聚二乙炔,并且优选地沿着行进光波的电场矢量的极化方向与其聚合物链的一维共轭电子系统的轴线对准。可以使用的其它非线性光学材料是共轭偶氮苯聚合物。原则上,也可以使用短的共轭低聚物和相应的发色团,例如贝塔胡萝卜素、低聚亚烷基亚乙烯基、低聚氰化物、以及如低聚烯烃或梯型聚对苯撑的更稳定的梯型聚合物。另一种选择是使用复合材料,该复合材料由用合适的浓度的一维导电的或半导的纳米域填充的透明介电基质构成,该一维导电的或半导的纳米域在一些变型中还有利地展示出有源层中电子系统的空间限制。用于导电的或半导的纳米域中的合适材料的其它示例是金、银、钨、铝、金属或半导的纳米线,也由彼此直接接触的对准的纳米点形成。基质材料可以是介电聚合物、例如二氧化硅的玻璃或各种介电氧化物、或者例如铪氧化物的其它合适的氧化物。

[0123] 在其它替代的实施例中,非线性光学材料由无机材料构成。合适的示例是类似硫化物、双磷酸盐或硝酸盐的盐。

[0124] 图4f示出了在绝缘体上硅衬底300的背面334上制造用于将腔332从环境氛围密封的背面封装338之后的电光器件310。通过将腔332从环境氛围密封,增加了非线性光学材料336的长期稳定性。事实上,槽波导312中的有源层的性能典型地受到诸如湿度、氧气的存在、UV光并且受到环境氛围强烈地影响。背面封装338保护非线性光学材料336免受这些影

响。背面封装338还可以提供腔332的气密性密封。

[0125] 通过将具有合适的覆盖层的腔332密封来制成背面封装338,该合适的覆盖层在本实施例中是半导体覆盖层。特别地,背面封装338在SOI衬底300的全部背面334之上延伸。背面封装338是接合到硅层302的背面334的晶片。

[0126] 作为替代例(未示出),通过将材料施加到硅层302的背面334(例如经由化学气相沉积),可以制造背面封装338。

[0127] 图5示出了显示用于调制进入的光载波信号的电光器件400的主要功能块的框图,该进入的光载波信号如虚线箭头401表示。电光器件400包括接收时间相关电调制输入信号的电光调制器402,该电调制输入信号由实线箭头403从射频(RF)驱动器404表示。电光调制器402是例如图3和4中所示的槽波导类型。经由该电光调制器402的有源层,根据其非线性光学响应,可以调制行进穿过电光调制器402的槽的进入的光载波信号401。根据所施加的电调制输入信号403来进行调制,使得由展示输出信号调制的虚线箭头405所表示的光输出信号产生。

[0128] 在一个变型中,图5的电光器件400附加地从可选的DC驱动器406接收DC偏置电压407。在图5所示的这样的实施例中,求和组件408接收DC偏置电压和电输入信号,并且提供电调制输入信号作为DC偏置电压和电输入信号的总和。因此,将时间相关的电调制输入信号由DC偏置电压移位到与施加DC偏置电压之前的电压的平均值不同的电压平均值。这允许如下面将关于图6讨论的线性化光载波信号。

[0129] 在调制光载波信号之后,包括输出信号调制的光输出信号产生并且被递送到将光输出信号405转换为电信号411的光电二极管410,该电信号411根据光输出信号405的调制被调制。跨阻抗放大器412用于将调制的电信号411放大并且输出放大的调制输出信号413。

[0130] 在其它实施例中不出现DC驱动器。

[0131] 在另外的其它实施例中,偏置电压是时间相关。使用时间相关的偏置电压增加了带宽并且允许引入光信号的数据加密。在该类型的一些实施例中,偏置电压包括DC偏置电压组件和叠加的AC偏置电压组件。

[0132] 图6用于说明调制。

[0133] 在图6a)和6b)示出了用于说明使用具有输入频率的电输入调制信号调制光载波信号的工作原理的示意图,用于使用展示二次电光效应(QEOE)的非线性光学材料来产生相对于输入频率二倍频的已调制的光输出信号。

[0134] 特别地,图6a)示出了用包括二次电光效应(QEOE)的电光调制器来调制时间相关的电调制输入信号的构思。

[0135] 时间相关的电调制输入信号取决于电调制输入信号在电光调制器的有源层中产生电场。如果有源层展示了QEOE,则有源层的折射率的变化展示出对于$U_{in}$的电场强度的时间相关变化的二次相关性。如图6a)中所示,$U_{in}$在零电场强度处的平均值附近以正弦函数振荡。调制导致电输出信号$U_{out}$以正弦平方的函数振荡,或者换言之以具有时间相关的电调制输入信号的$U_{in}$的两倍频率的余弦函数振荡。

[0136] 在图6b)中示出了该二倍频的实验证据。底部曲线出现时间相关的电调制输入信号的电场强度$U_{in}$。上面所示的曲线显示了经由展示QEOE的电光调制器的调制之后电场输出信号的电场强度$U_{out}$。

[0137] 图6c)和6d)示出了用于说明使用具有输入频率的电输入调制信号调制光载波信号的工作原理的示意图,用于在DC偏置电压下使用展示二次电光效应的非线性光学材料来产生相对于输入频率线性调制的已调制的光输出信号。

[0138] 在图6c)中,示出的是,通过将DC偏置电压增加到时间相关的电调制输入信号可以线性化电输出信号$U_{out}$。通过增加DC偏置电压,将电场强度$U_{in}$的平均值移位到折射率对电场强度的的抛物线依赖性的近似线性分支。因此,折射率对改变电场强度的依赖性是近似线性的。这导致电输出信号$U_{out}$的线性化,该电输出信号$U_{out}$在等于时间相关的电调制输入信号的$U_{in}$的电场强度的频率相等的频率处振荡。

[0139] 在图6d)中示出了电输出信号的电场强度$U_{out}$的线性化的实验证据。因为将DC偏置电压增加到时间相关的电调制输入信号,电输出信号的电场强度$U_{out}$被线性化并且具有与时间相关的电调制输入信号的电场强度$U_{in}$近似相同的频率。电输出信号的电场强度$U_{out}$线性化的工艺提供调谐电输出信号的强度的方式。所施加的DC偏置电压越大,则电输出信号的强度越大。

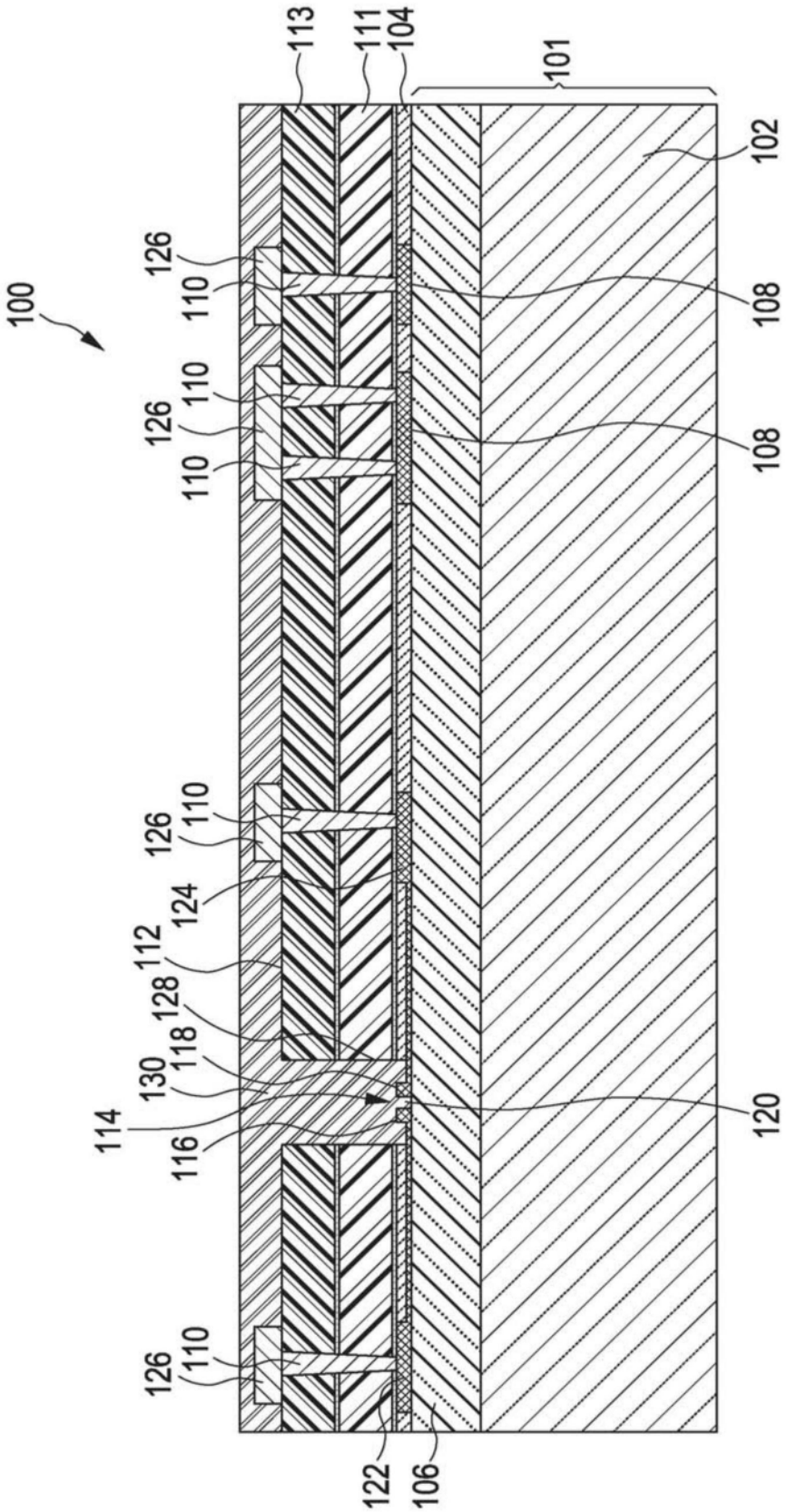

113
111
104
101
102
100
126
110
108
110
126
108
110
126
110
124
112
128
118
130
114
116
120
126
110
122
106

图1

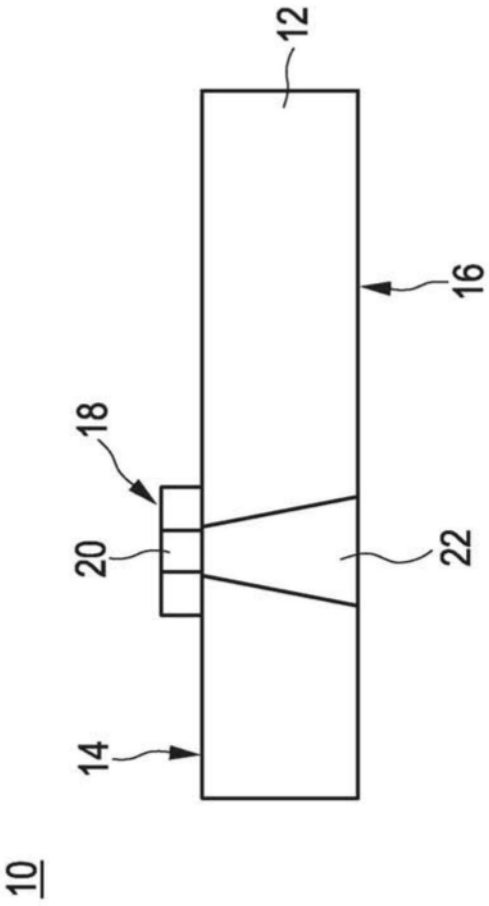



图2

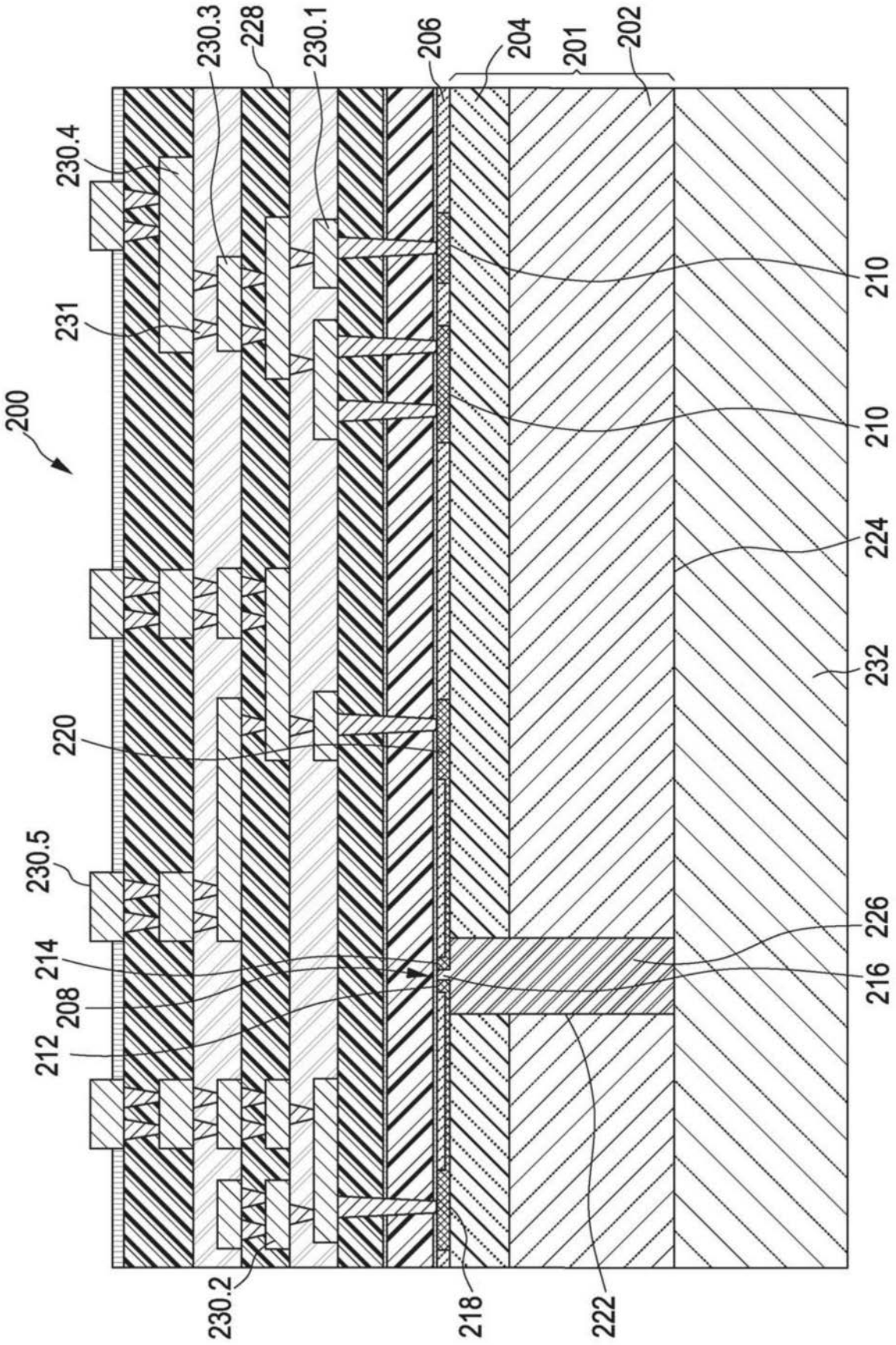

230.3
228
230.1
206
204
201
202
230.4
210
231
200
210
224
232
220
230.5
226
214
216
208
212
230.2
218
222

图3

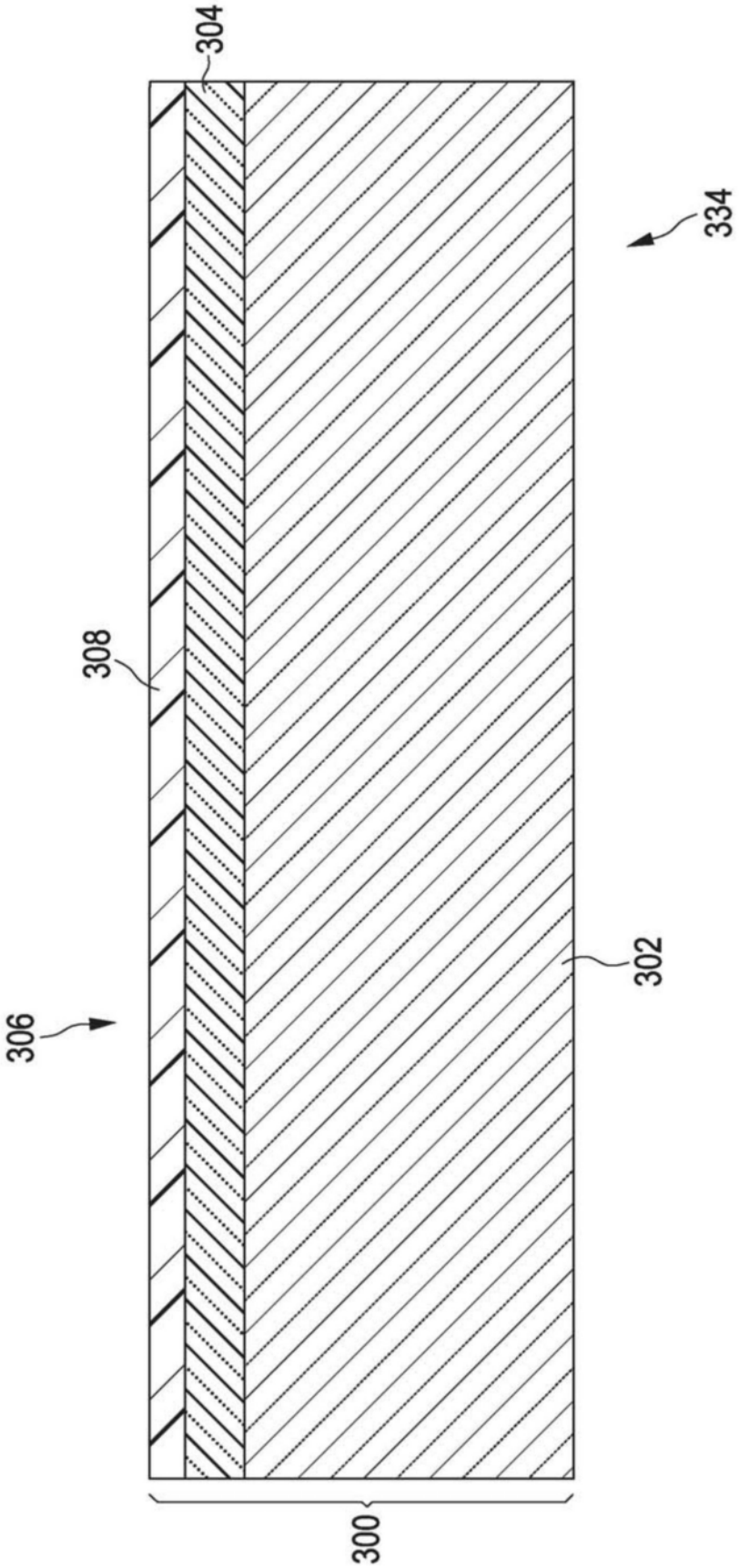



图4a

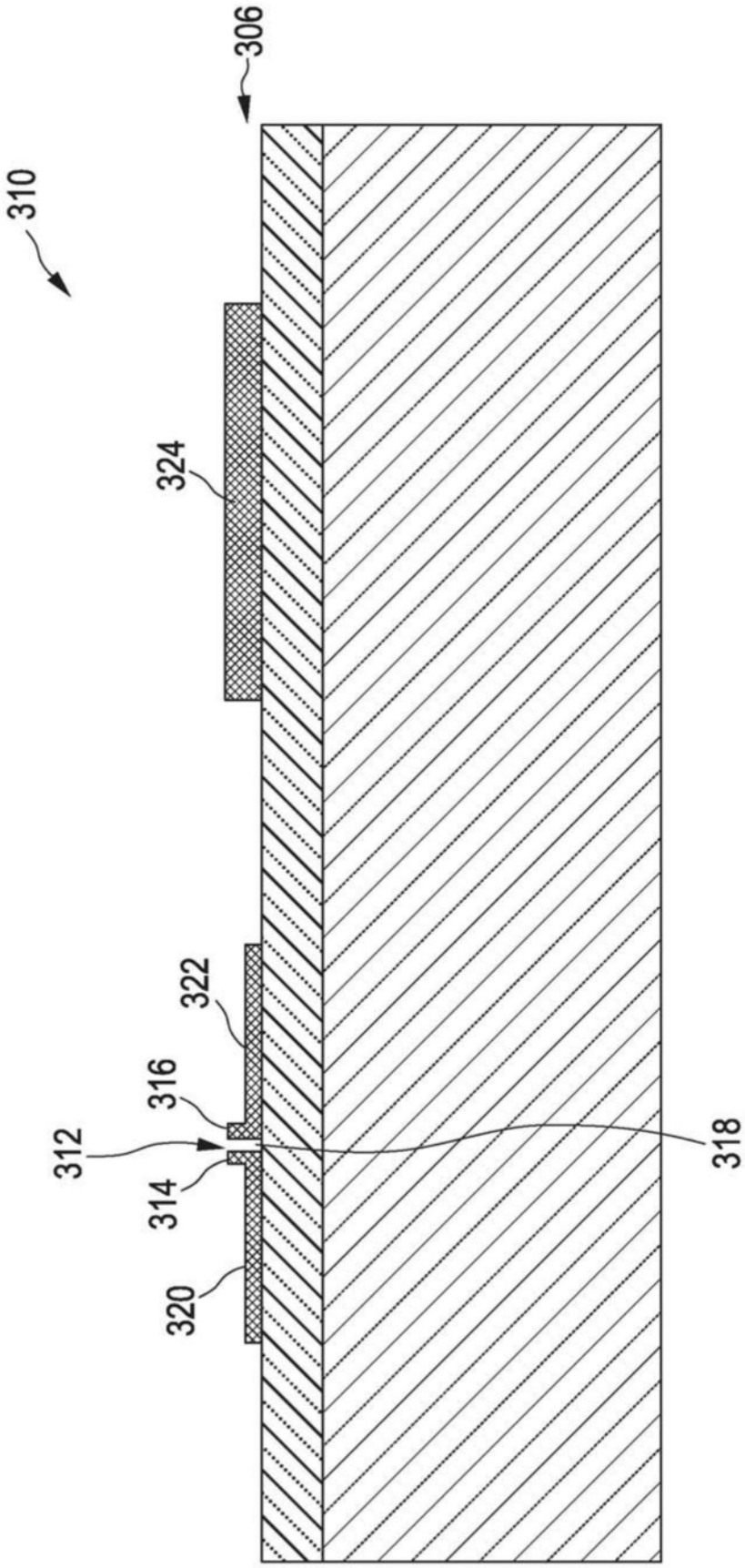



图4b

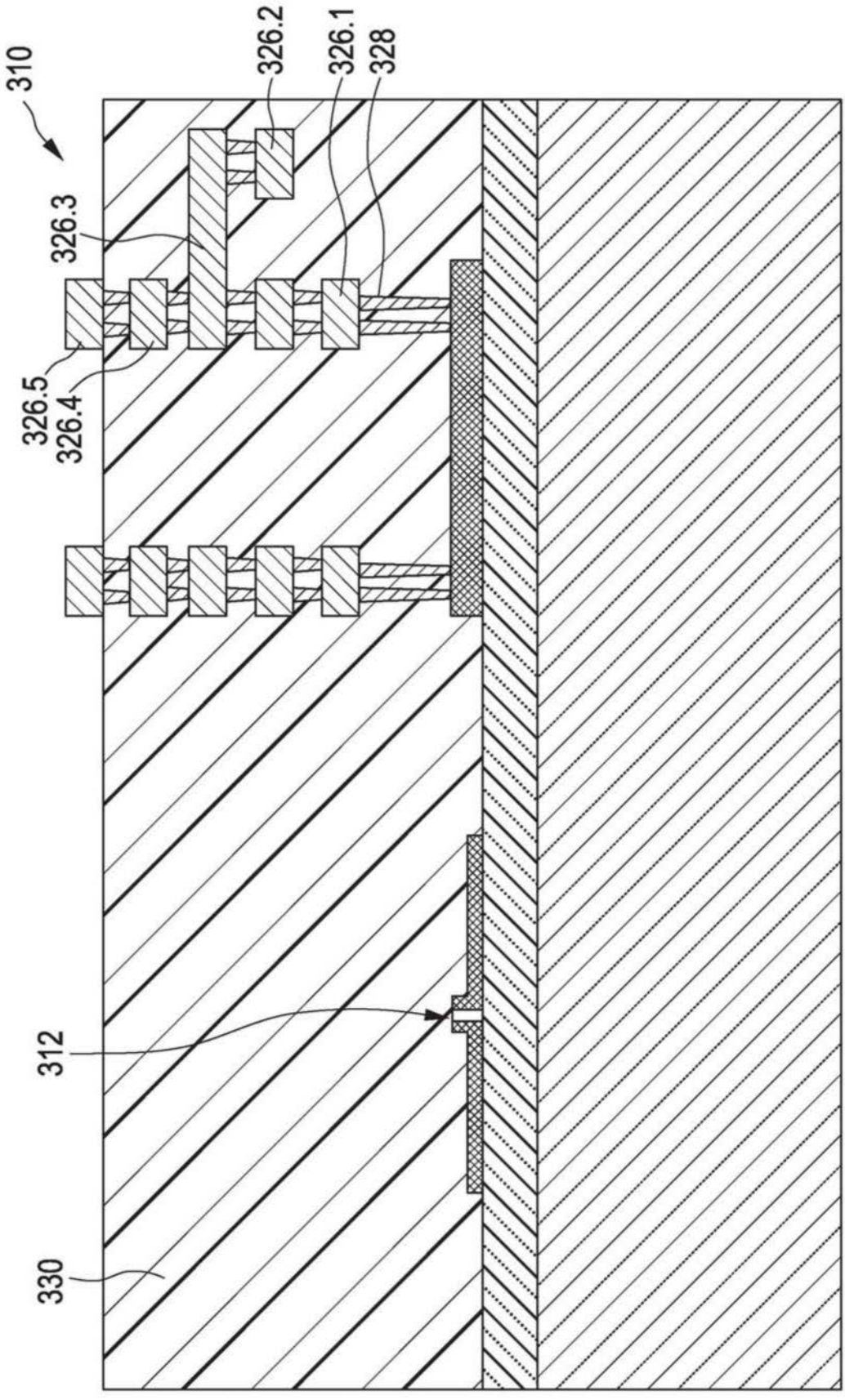



图4c

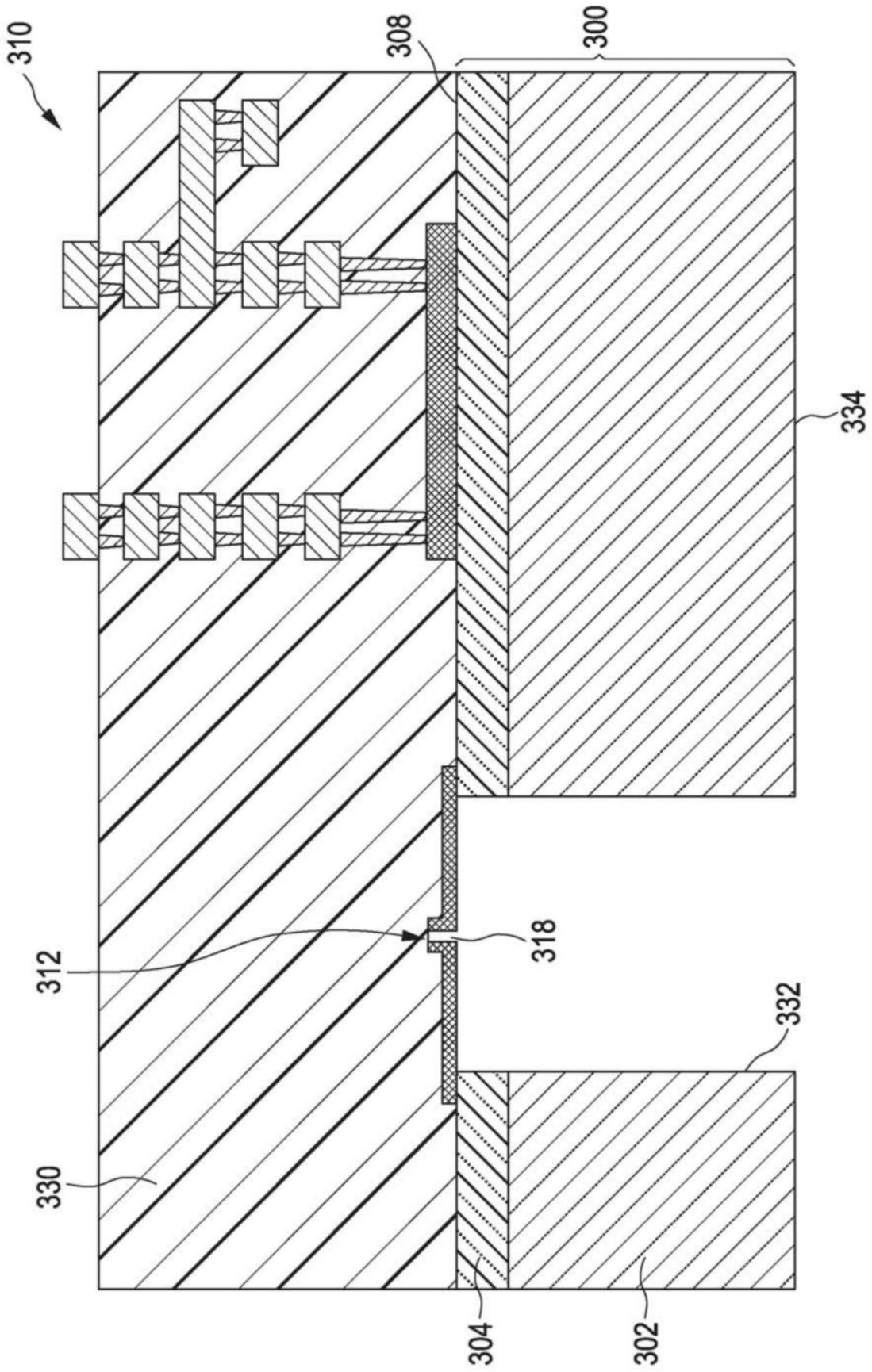



图4d

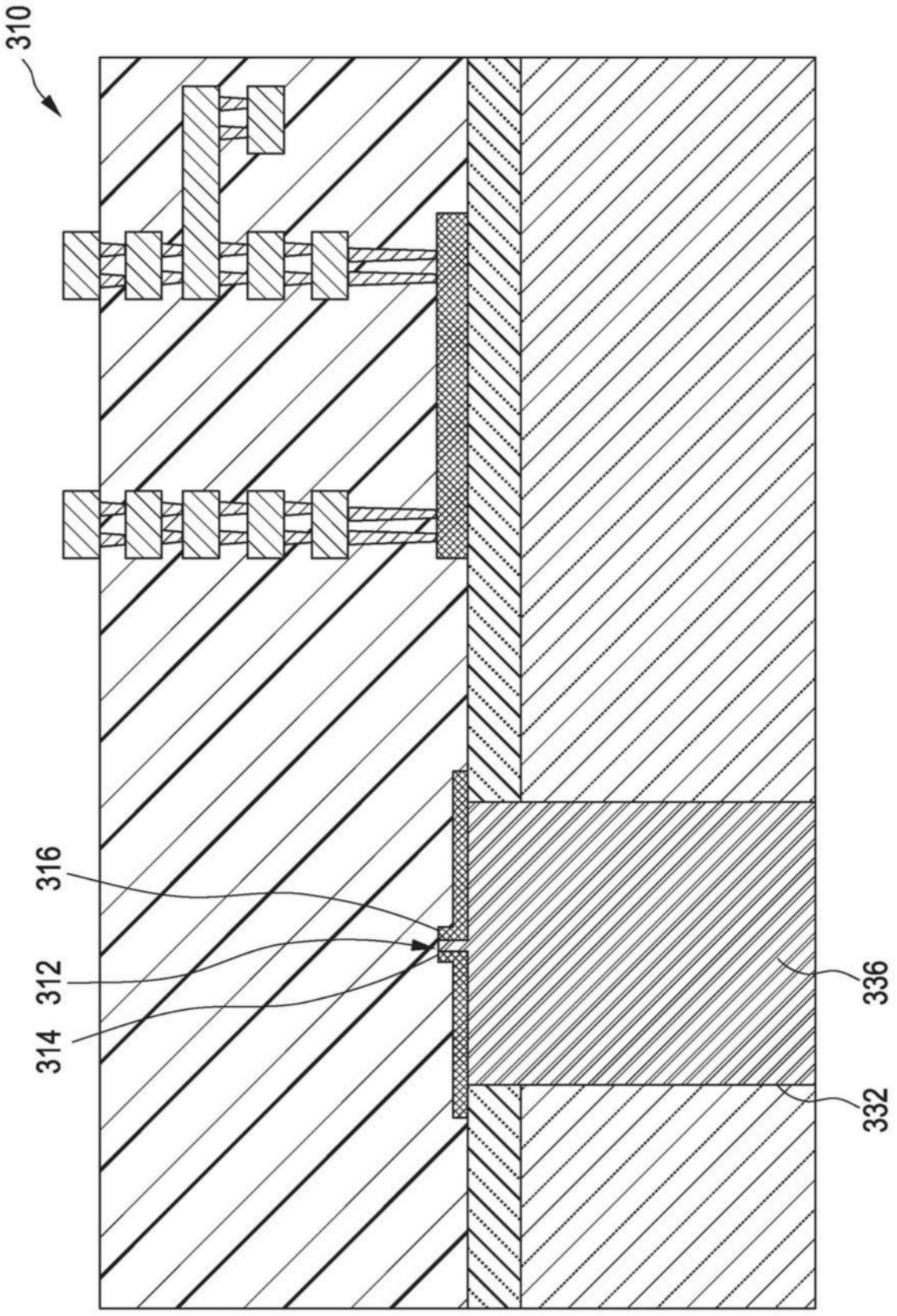



图4e

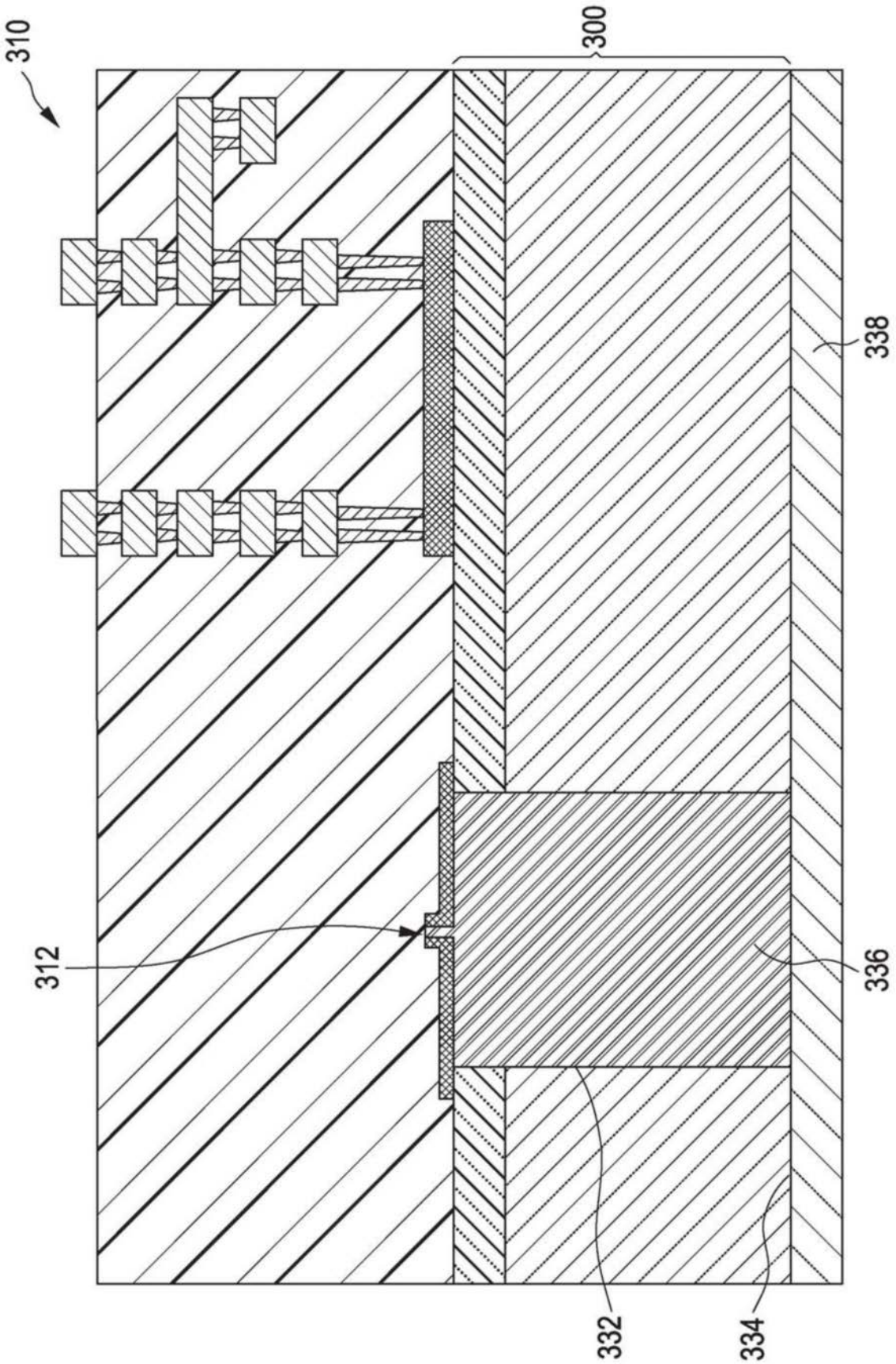



图4f

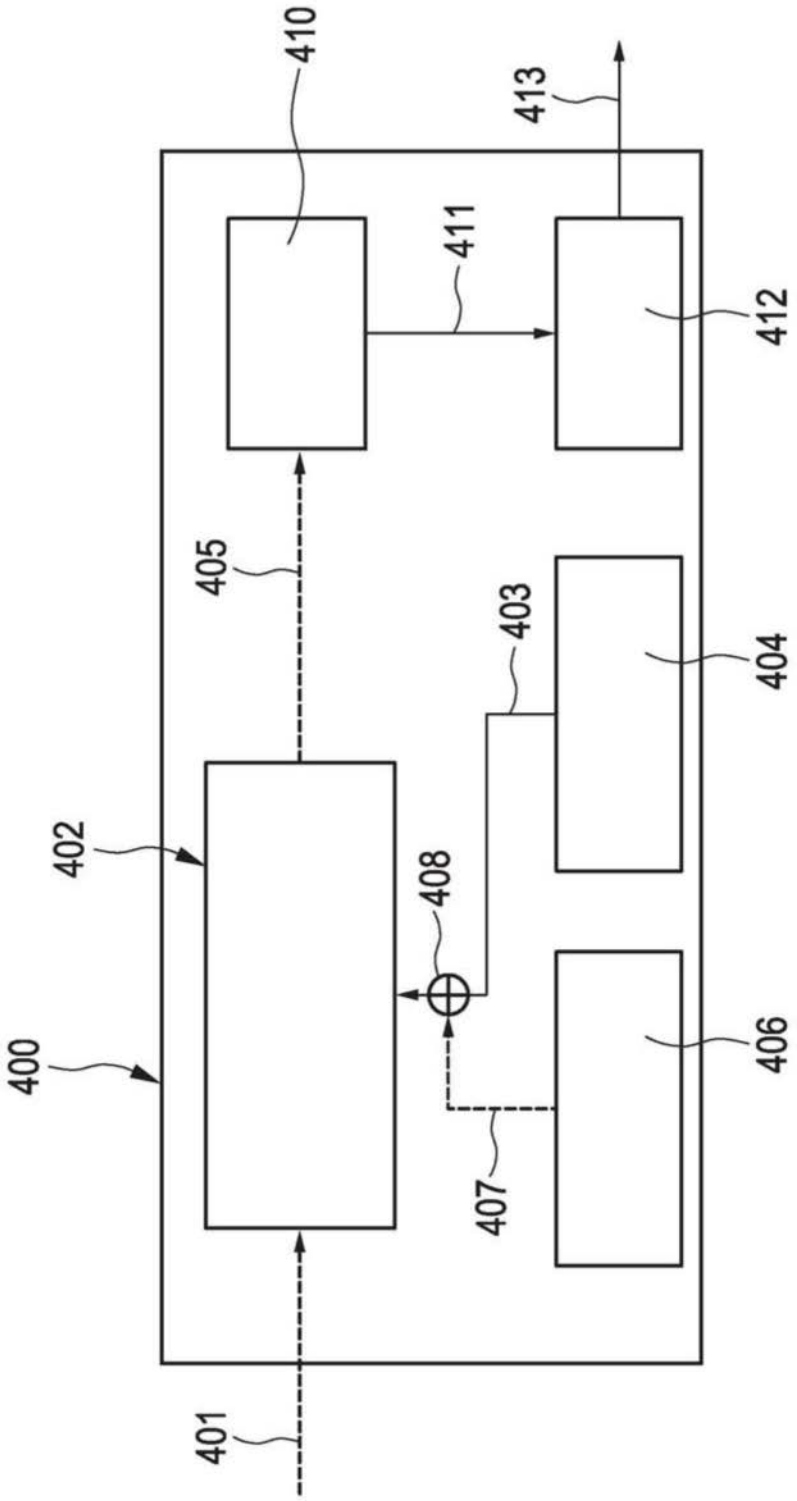



图5

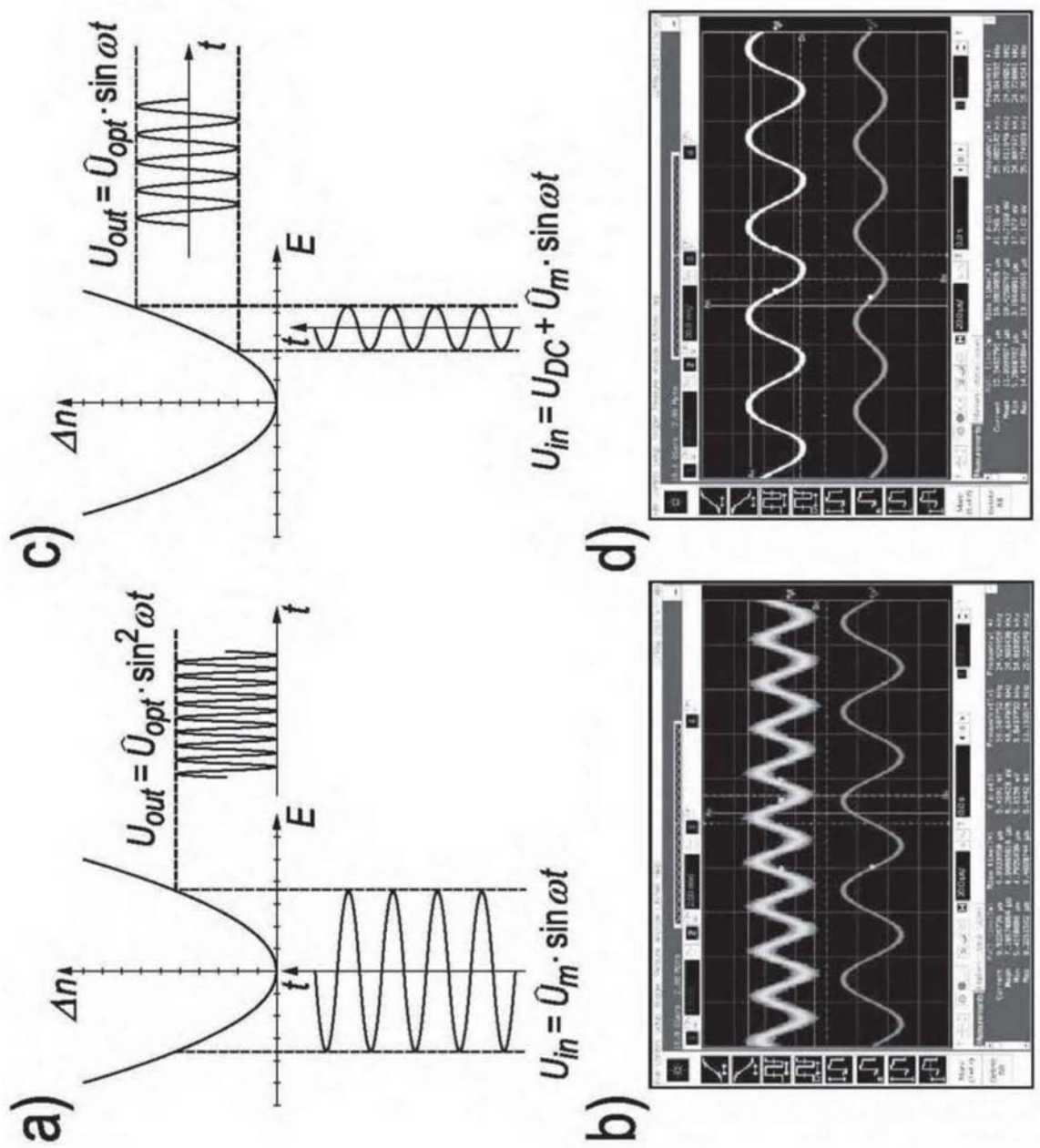

a)
b)
c)
d)
Δn
E
t
$U_{out} = \hat{U}_{opt} \cdot \sin^2 \omega t$
$U_{in} = \hat{U}_m \cdot \sin \omega t$
$U_{out} = \hat{U}_{opt} \cdot \sin \omega t$
$U_{in} = U_{DC} + \hat{U}_m \cdot \sin \omega t$

图6