

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



# [12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200310101343.9

[51] Int. Cl.

G02B 5/30 (2006.01)

G02B 27/18 (2006.01)

G02B 27/28 (2006.01)

G03B 21/14 (2006.01)

[45] 授权公告日 2008 年 4 月 23 日

[11] 授权公告号 CN 100383568C

[22] 申请日 2003.10.15

[21] 申请号 200310101343.9

[30] 优先权

[32] 2002.10.15 [33] US [31] 10/271197

[73] 专利权人 莫克斯特克公司

地址 美国犹他州

[72] 发明人 A·F·库尔茨 S·拉马努詹

米向东

[56] 参考文献

CN1363048A 2002.8.7

EP1239308A2 2002.9.11

US5383053 1995.1.17

审查员 张春伟

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

代理人 吴立明 王忠忠

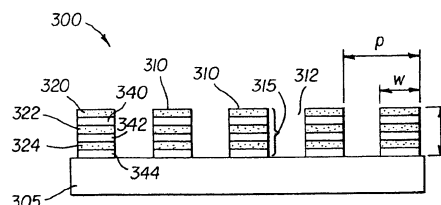
权利要求书 2 页 说明书 21 页 附图 15 页

[54] 发明名称

线栅偏振器

[57] 摘要

一种用于对入射光束(130)起偏的线栅偏振器(300)包括一个具有第一表面的衬底。在第一表面(307)上设置一个平行延伸的组合栅线(310)的线栅或阵列,相邻栅线间隔分开的线栅周期小于入射光的波长。每条栅线包括一种细长金属线(330a-i)和细长电介质(350a-i)层交替分布的线内子结构(315)。



1. 一种用于对入射光束起偏的浸没式线栅偏振器，包括：  
具有一表面的衬底；  
设置在所述表面上的一具有插入凹槽的平行、细长的组合栅线阵列，其中所述组合栅线中的每一个以小于所述入射光的波长的线栅周期隔开；  
其中所述凹槽中的每一个用一种介电光学材料填充；  
其中所述组合栅线中的每一个包括细长金属线和细长介电层交替的线内子结构；并且  
其中细长金属线和细长介电层交替的所述线内子结构包括至少两条所述细长金属线。
2. 如权利要求1所述的浸没式线栅偏振器，其中所述线栅偏振器以相对于所述入射光束一角度的方向取向，使得所述线栅偏振器起偏振分束器的作用，并将透射偏振光束和反射偏振光束与所述入射光束的所述角度分开。
3. 如权利要求1所述的浸没式线栅偏振器，其中细长金属线和细长介电层交替的所述线内子结构支持通过所述细长金属线的谐振增强隧道效应，由此提高偏振态正交于所述组合栅线阵列的光的透射。
4. 如权利要求1所述的浸没式线栅偏振器，其中细长金属线和细长介电层交替的所述线内子结构包括至少一个所述介电层。
5. 如权利要求1所述的浸没式线栅偏振器，其中所述入射光处于电磁波谱中约  $0.4\text{--}1.6\mu\text{m}$  的范围内。
6. 如权利要求1所述的浸没式线栅偏振器，其中该衬底还包括：  
具有一表面的第一介电衬底；  
具有一表面的第二介电衬底；和  
其中所述平行、细长的组合栅线阵列包括位于所述第一介电衬底的所述表面和所述第二介电衬底的所述表面之间的偏振层。
7. 如权利要求6所述的浸没式线栅偏振器，其中所述第一介电衬底和所述第二介电衬底被制成为形成作为板偏振器或者立体棱镜偏振器的集成偏振器件。
8. 如权利要求1所述的浸没式线栅偏振器，其中所述线栅偏振器是偏振分束器，其透射光束的第一偏振状态和反射所述光束的与所述

**第一偏振状态正交的第二偏振状态。**

**9. 如权利要求 1 所述的浸没式线栅偏振器，其中所述介电光学材料具有与所述细长介电层的折射率相同的折射率。**

## 线栅偏振器

## 技术领域

本发明总的涉及线栅偏振器，并尤其涉及用于可见光谱的多层线栅偏振器和分束器。

## 背景技术

利用平行导线阵列起偏无线电波可以追溯到 110 多年前。线栅，通常为由透明衬底支承的细平行导体阵列的形式，已被用作电磁波谱红外部分的偏振器。

决定线栅偏振器性能的关键因素是平行栅格元件的中心-中心的间隔，有时也称作周期或间距，与入射光的波长之间的关系。根据已知的原理，如果线栅间距或周期比波长长，则线栅用作衍射光栅而非偏振器，并且对两种偏振方向衍射，不一定是相同的效率。但是，当线栅间距（ $p$ ）远小于波长时，线栅起到偏振器的作用，反射偏振方向平行于线栅元件的电磁辐射（“s”偏振），并透射垂直于偏振方向的辐射（“p”偏振）。

线栅周期处于大约半个波长到两倍波长范围内的过渡区域，其特点在于光栅的透射和反射特性的突变。特别是，在给定的任意角度处在一个或多个特定波长处时，对于偏振方向与线栅元件垂直的光，反射率突增，相当于透射率的减小。Wood 在 1902 年首先报告了这种效应，也被称作“Wood's Anomalies”。后来，在 1907 年，瑞利分析了 Wood 的数据，发现在发生更高级衍射的波长与角度相结合时，就发生了这种异常。Rayleigh 推导出预测异常位置的公式，也通常称作“瑞利谐振”：

$$\lambda = \varepsilon (n + / - \sin\theta) / k \quad (1)$$

其中  $\varepsilon$  为光栅周期；

$n$  为光栅周围介质的折射率； $k$  为整数，对应于所发生的衍射项的级次；并且  $\lambda$  和  $\theta$  为发生谐振处的波长和入射角（均在空气中测得）。

对于形成在介电衬底一侧上的光栅，上面公式中的  $n$  可以等于 1 或等于衬底材料的折射率。注意下面的公式给出了发生谐振的最长的波长：

$$\lambda = \varepsilon (n + \sin\theta) \quad (2)$$

其中  $n$  设定为衬底的折射率。

角度依赖性的影响在于随着角度的增加，透射区域向更长波长偏移。当想要把偏振器用作偏振分束器或偏振旋转反射镜时，这一点是很重要的。

通常线栅偏振器将反射其电场矢平行（“s”偏振）于栅线的光，透射其电场矢量与栅线垂直（“p”偏振）的光，但正如此处所讨论的，入射平面可以与栅线垂直或不垂直。理论上，线栅偏振器对于一个偏振态的光如 S 偏振光来说起理想反射镜的作用，并对另一偏振态如 P 偏振光将完全透明。但实际上即使使用反射镜最大的金属作为反射镜，也会吸收部分入射光，仅反射 90% 至 95% 的入射光，由于表面反射，普通无色玻璃不能 100% 的透过入射光。线栅偏振器以及其它的偏振器件的性能中主要的特点在于在感兴趣的入射角和波长范围上测得的反差比、或消光比。对于线栅偏振器或偏振分束器，透射光束和反射光束的反差比 ( $T_p/T_s$ ) 和 ( $R_s/R_p$ ) 都可能是感兴趣的。

历史上开发的线栅偏振器用于红外但不可用于可见波段。这主要是因为加工技术不能够制造在可见光谱中有效工作的足够小的分波长结构。即，栅线间隔或间距 ( $p$ ) 应该小于  $\sim \lambda/5$  以用于有效操作（对于可见波长为  $p \sim 0.10-0.13\mu\text{m}$ ），而甚至更小的间距结构（例如  $p \sim \lambda/10$ ）可以提供对器件反差比进一步的改进。但是，随着加工技术的提高，包括  $0.13\mu\text{m}$  远 UV 光刻和干扰光刻法，可见光波线栅结构变得可行。虽然现有技术中有几个已知的可见光线栅偏振器的例子，但这些器件不能在应用所需的宽带可见光谱范围上提供非常高的消光比 ( $>1,000:1$ )，如在数字相机投影仪中的应用。

在 Garvin 等人的美国专利 US4,289,381 中描述了一种令人感兴趣的线栅偏振器，其中处于单个衬底上的两个或多个线栅由一个介电中间层分开。单独沉积每个线栅，并且栅线足够厚 ( $100-1000\text{nm}$ ) 到对入射光不透明。线栅有效的增大，使得虽然单个线栅只能提供  $500:1$  的偏振反差，但一对线栅的结合就可以提供  $250,000:1$  的偏振反差。虽然据推测原理上可以扩展到可见波长，但只对器件在红外光谱 ( $2-100\mu\text{m}$ ) 的应用进行了描述。但是，因为此器件采用串联两个或多个线栅，所以对于减小的透射率和接收角交换额外的反差比。另外，该器

件不是为反射光束的高质量消光所设计的，这对其作为偏振分束器设置了一些限制。

Hegg 等人的美国专利 US5,383,053 中描述了一种用于可见光范围的线栅偏振分束器，其中金属线（间距  $p \ll \lambda$  且  $\sim 150\text{nm}$  的特征）沉积在金属栅行的上部，每一个沉积在玻璃或塑料衬底上。虽然此器件设计成覆盖较多的可见光谱（ $0.45\text{--}0.65\mu\text{m}$ ），但期望的偏振性能比较适中，只输出 6.3:1 的总反差比。

Tamada 等人的美国专利 US5,748,368 描述了一种用于近红外光谱（ $0.8\text{--}0.95\mu\text{m}$ ）的线栅偏振器，其中对线栅的结构改变形状以提高性能。在此情况下，通过利用在线栅偏振器和衍射光栅之间过渡区中的谐振之一，利用一种线栅结构实现在近红外光谱中的操作，其中该线栅结构具有一个长的栅线间距（ $\lambda/2 < p < \lambda$ ）而非额定小线栅间距（ $p \sim \lambda/5$ ）。在带有楔形板的组件中的一个玻璃衬底上沉积厚分别为  $\sim 140\text{nm}$  的线条。特别是，该器件采用梯形线条整形、衬底和楔形板之间的折射率匹配以及入射角调节的组来调谐器件的操作以达到谐振波段。虽然该器件提供  $\sim 35:1$  的合理消光，这对于很多方面的应用将是有利的，但此反差不适于这些应用，如要求更高性能的数字相机。另外，该器件只在很窄的波段（ $\sim 25\text{nm}$ ）内正确工作，并且对角度相当灵敏（入射角  $2^\circ$  的位移时移动谐振波段  $\sim 30\text{nm}$ ）。这些需要考虑的事项使得该器件不适于线栅器件必需工作在“快速”光学系统（如 F/2）的宽带波长应用。

最近，都转让给 Moxtek Inc. of Orem, UT 的美国专利 US6,108,131（Hansen 等人）的 US6,122,103（Perkins 等人）描述了一种为可见光谱设计的栅线偏振装置。US6,108,131 描述了一种设计成工作在可见光谱区域的直通式线栅偏振器。该线栅偏振器额定地由一系列直接制作在衬底上的方格坐标间距（ $p \sim \lambda/5$ ）为  $\sim 0.13\mu\text{m}$  的线条组成，线条的额定宽度为  $0.052\text{--}0.078\mu\text{m}$ ，线条厚度（ $t$ ）大于  $0.02\mu\text{m}$ 。通过利用格栅间隔或间距为  $\sim 0.13\mu\text{m}$  的线条，该装置具有所需的亚可件波长结构，允许其一般地工作在长波谐振带和线栅区域中。US6,122,103 提出了对基本线栅结构的多种改进，旨在加宽波谱并提高使用波谱上的效率和反差，无需更细的间距结构（如  $\sim \lambda/10$ ）。基本上采用了各种技术来减小线栅周围介质中的有效折射率，以便将最长波长的谐振

带移向更短波长（见方程（1）和（2））。这通过在玻璃衬底上涂覆一层电介质并再在此中间电介质层上制作线栅而简单地实现，其中电介质层起着抗反射（AR）涂层的作用。中间电介质层有效地减小光在线栅中的折射率，由此将最长波长的谐振移向短波。US6,122,103 还描述了另一种设计，即通过在线条之间的间隔中形成凹槽来减小有效折射率，使得凹槽延伸到衬底本身中和/或沉积在衬底上的中间电介质层中。作为这些设计改进的结果，下波长带边缘向下移动  $\sim 50\text{--}75\text{nm}$ ，使得覆盖整个可见光谱。另外，在可见光谱中比现有的基本线栅偏振器平均效率提高  $\sim 5\%$ 。

虽然 US6,108,131 和 US6,122,103 中描述的装置明确了对现有技术的改进，但仍然有机会对线栅偏振器和偏振分束器进行性能的改进。特别是，对于采用非偏振光源的光学系统，系统的光效率必须被最大化，提供反射光和透射光均为高消光的偏振分束器是很有用的。因为 Moxtek 公司生产的市场上可得到的线栅偏振器对于反射的频道只提供  $\sim 20:1$  的反差而非  $100:1$ ，而更理想的是  $2000:1$ ，所以它的用途受到限制。另外，这些器件的性能在可见光谱范围内变化相当大，偏振分束器在蓝光到红光的范围内对透射光束提供的反差比从  $\sim 300:1$  到  $\sim 1200:1$ ，对反射光束的反差比为  $10:1$  至  $30:1$ 。因此，在可见光谱的蓝光部分有机会提供偏振反差性能以及在整个可见光谱上更均匀的消光。最后，还有机会提高对透射的 P 偏振光的偏振反差，超过现有线栅器件提供的水平。这些改进对于包括用于数字相机的电子成像系统、如电子投影系统的设计将是特别有利的。

因此，存在对改进的线栅偏振器的需求，尤其是用在需要宽波长带宽和高反差（目标值是  $1000:1$  或更大）的可见光系统的线栅偏振器。另外，还存在对这种用于大约  $45^\circ$  入射角的改进的线栅偏振器的需求。

#### 发明内容

简言之，根据本发明的一个方面，用于对入射光束起偏的线栅偏振器包括一具有第一表面的衬底。在第一表面上设置一个平行细长的导电栅线的线栅或阵列，相邻栅线中的每个间隔分开的线栅周期小于入射光的波长。每条栅线包括一种细长的金属线和细长的电介质层交替分布的线内（intra-wire）子结构。栅线可以埋入或置入线栅偏振器的整个结构中以便于有用的光学器件。还描述了实现这些线栅偏振

器器件的设计和制作方法。

另外，作为本发明的另一方面，在各种构造中描述了改进的调制光学系统，包括基于偏振的反射式空间光调制器，其通常是液晶显示器（LCD）、本发明的改进的线栅偏振分束器和其它偏振光学器件。

#### 附图说明

图 1 是现有线栅偏振器的透视图；

图 2a 和 2b 是设计成在可见光谱范围内工作的现有线栅偏振器和偏振分束器的相对性能曲线；

图 3a 和 3b 是现有技术中描述的一类线栅偏振分束器在可见光谱中透射、反射以及总偏振反差比与波长的关系曲线；

图 4 是现有技术中描述的一类线栅偏振分束器总反差与 500nm 光的入射角之间的关系曲线；

图 5a - 5f 是根据本发明的线栅偏振器的各种结构截面图；

图 6a 和 6b 是本发明的线栅偏振器的反射及透射偏振反差比与波长、总反差比与波长的关系曲线，其中器件具有六层结构；

图 7a-7d 是本发明的线栅偏振器的反射及透射偏振反差比与波长、总反差比与波长的关系曲线，其中器件具有十八层结构；

图 8a 和 8b 是本发明的线栅偏振器的反射及透射偏振反差比与波长、总反差比与波长的关系曲线，其中器件具有交替的十八层结构；

图 9a 和 9b 是本发明的线栅偏振器的反射及透射偏振反差比与波长、总反差比与波长的关系曲线，其中器件具有五层结构；

图 10a 和 10b 是本发明的线栅偏振器的反射及透射偏振反差比与波长、总反差比与波长的关系曲线，其中器件具有交替的五层结构；

图 11a - 11c 是可以采用本发明线栅偏振器的调制光学系统的各种结构截面图；

图 12a-12c 是根据本顺序说明根据本发明的线栅偏振器的制作的截面图。

#### 具体实施方式

下面将参考附图进行描述，其中对本发明的各个元件给予标号，对本发明的讨论将使得本领域的技术人员能够实施和利用本发明。

图 1 表示一种基本的现有线栅偏振器，并且定义了将用于现有技术和本发明的一系列说明例中的术语。线栅偏振器 100 由大量的被介



电衬底 120 支撑的平行导电电极 (栅线) 110 组成。该器件的特点在于导体的光栅间隔或间距或周期表示为  $p$ ; 单个导体的宽度表示为  $w$ ; 导体的厚度表示为  $t$ 。线栅偏振器额定地采用亚波长结构, 使得间距 ( $p$ )、导体或栅线宽度 ( $w$ )、和导体或栅线的厚度 ( $t$ ) 均小于入射光的波长 ( $\lambda$ )。光源 132 产生的光束 130 以相对于法线  $\theta$  角入射到偏振器上, 入射平面垂直于导电元件, 线栅偏振器 100 将此光束分成一镜面反射的光束 140 和一非衍射的透射光束 150。如果入射光束 130 包含一种波长的光, 该波长的光将栅线 110 或凹槽 115 的线栅结构作为衍射光栅而非亚波长结构, 则还可以存在高阶衍射光束 160。采用对 S 和 P 偏振的标准定义, 使得带有 S 偏振的光具有正交于入射面的偏振矢量, 并且因而平行于导电元件。相反, 带有 P 偏振的光具有平行于入射面的偏振矢量并因而正交于导电元件。

参见图 2a, 图中示出了 Oren, Utah 的 Moxtek 公司市售的线栅偏振分束器对于可见光谱范围内的波长的透射效率曲线 200 和透射的

“p”偏振反差比曲线 205。该器件类似于美国专利 US6,108,131 中所描述的基本线栅偏振分束器, 它具有由沉积在介电衬底 120 上的 40-60% 占空比 (52-78nm 栅线宽度 ( $w$ )) 制作的  $\sim 130\text{nm}$  间距 ( $p \sim \lambda/5$ ) 的栅线 (平行导电电极 110)。实金属线定义为  $>20\text{nm}$  厚, 这样确保超过可见光波长的趋肤深度 ( $\delta$ ) 足够的金属厚度。此数据代表此器件合适的 NA (数值孔径) 光束, 即以  $45^\circ$  入射角 ( $\theta$ ) 入射到线栅偏振器 100 上的光束。因为此器件将入射光束 130 分成两束出射的偏振光束 (140 和 150), 分开的光束从与入射光路可以空间区分的路径传播, 所以此器件被认作是偏振分束器。透射反差比曲线 205 测得的是透射的 “p” 偏振光相对于透射的 “s” 偏振光的平均反差 ( $T_p/T_s$ ), 其中 “s” 偏振光是不理想的泄漏。同样, 反射反差比曲线 210 测得的是反射的 “s” 偏振光相对于 “p” 偏振光的平均反差 ( $R_s/R_p$ )。参见图 2b, 图中示出了 Moxtek 公司的市售线栅偏振器 100 在可见光谱范围内对于正入射 ( $\theta=0^\circ$ ) 的适中 NA 的光束 130 的平均性能。特别是, 给出了 (对于 “p” 偏振光) 透射效率曲线 220 和透射反差比曲线 225。这些一般提供 “p” 透射光束反差  $>300:1$  的器件的性能非常好, 满足多种应用的需求。

虽然图 2a 和 2b 中所示的性能相对于先有的线栅器件以及先有的偏振器很好, 但还是有改进的空间。特别是, 对于线栅偏振分束器,

由反射反差比曲线 210 测得的反射的“s”偏振光的反差比较低。在蓝光光谱(450nm)处的偏振反差仅为 $\sim 10:1$ ,并且甚至在红光(650nm)处也只升到 $\sim 40:1$ 。在需要反射和透射光束均有良好偏振反差的应用中此性能显得不够。例如,在基于LCD的电子投影系统中,投影光透过并从偏振分束器反射,此处光束为快速光(F/4或更小),较差的反射性能将要求该系统增加额外的组件。另外,虽然此现有的线栅偏振分束器对红光提供 $\sim 1200:1$ 的反差,但偏振作用随波长有很大的改变,在蓝光处降至 $\sim 400:1$ (仍见图2a所示的透射反差比曲线205)。

基本线栅偏振器的性能水平可以通过改变栅线的宽度、栅线的厚度、栅线的间距或是这三种指标的任意组合来提高。但是,这些设计上的变化不一定提供反射光束或整个所需波长带上的所需反差比。而且美国专利US6,122,103中所述的线栅设计性能的改进,即通过调整入射光与介电衬底120的作用扩大了波长通带并增大了透射效率,也不一定提供对宽带可见高反差应用足够的反差比。美国专利US6,108,131和US6,122,103中的线栅偏振器以及其它引用的现有技术线栅器件专利只利用了细长的栅线平面(图1中的X:Y平面)内的谐振效果,包括线栅偏振器和偏振分束器。当入射光同时与栅线和介电衬底120作用时,界面处结构上的细节也影响性能(如美国专利US6,122,103中所述)。因此,应认为栅线平面包括栅线本身以及介电衬底120的中间表面和次表面。

为了给本发明改进的器件提供一个基准,更详细地分析了一些现有器件。图3a表示对于一个类似于美国专利US6,108,131所述的现有线栅偏振分束器的器件,算出的作为波长函数的反射和透射偏振反差比。利用Gsolver光栅分析软件工具模型此分析,使得能够利用精确的耦合波分析(RCWA)完整地模型亚波长结构。Gsolver是Grating Solver Development Company, P.O. BOX 353, Allen, Texa上市的一种产品。该线栅器件模制成一系列直接形成在透明玻璃衬底上的平行的细长的栅线。分析假设是一种间距 $p=0.13\mu\text{m}$ 的铝线栅,导体宽度 $w=0.052\mu\text{m}$ (40%的占空比),导体厚度 $t=0.182\mu\text{m}$ ,衬底折射率 $n=1.525$ 。为简单起见,该分析只考虑以 $\theta=45^\circ$ 角入射到线栅偏振分束器的准直光束。图3a提供了准直透射光束的反差250( $T_p/T_s$ )和准直反射光束反差255( $R_s/R_p$ )。算出的透射光束反差250在整个可见

光谱上的范围是  $10^4$ - $10^5$ : 1, 远大于实际器件所报道的  $\sim 1000$ : 1 的水平, 如图 2a 所示。但是, 图 2a 的曲线 250 表示实际器件的角平均性能, 而图 3a 的曲线 250 代表一种理想器件的准直光束的理论性能。图 3a 还表示对于现有类型的线栅器件模型的理论反射光束的反差 255。算出的理论反射光束在可见光谱上的反差范围为  $\sim 10$ : 1 至  $\sim 100$ : 1, 对于实际器件只有边缘好于图 2a 给出的反射光束反差 255。图 3b 表示一条理论上的总反差 275 的曲线, 总反差 C 计算如下:

$$C=1/((1/C_t)+(1/C_r)) \quad (3)$$

总反差、即透射光束 150 (“p” 偏振光) 的反差与反射光束 140 (“s” 偏振光) 的反差的总合, 可以看成主要由最低的反差比决定, 是反射光束的反差。因此, 美国专利 US6, 108, 131 中现有类型的器件的总反差受 “s” 偏振反射光束限制, 在可见光谱内只有  $\sim 10$ : 1 至  $\sim 100$ : 1, 对于蓝光波长具有最差的性能。

图 4 表示对于同样的现有类型的器件在 500nm 处作为廓线的总反差比 C 与角度的模型化的变化 (0, 0 坐标对应于  $45^\circ$ )。这表明总反差比 275 从  $45^\circ$  入射角时的  $\sim 23$ : 1 显著变化为在  $\sim 55^\circ$  入射角 (极角  $+10^\circ$ ) 时的  $\sim 14$ : 1, 在  $35^\circ$  角 (极角  $+10^\circ$ , 方位角  $180^\circ$ ) 时的  $\sim 30$ : 1。因而, 图 4 有效地表示了总反差比如何通过具有大 NA 的入射光束来降低平均值。当然, 总反差 C 受反射反差 ( $R_s/R_p$ ) 限制。对透射光束反差 ( $T_p/T_s$ ) 与角度曲线的分析表明反差廓线遵从 “Maltese Cross” 图案, 只在非常窄的角度范围内有极高的反差值 ( $>10^4$ : 1), 而在一个相当宽的角度范围 ( $>12^\circ$  极角,  $25^\circ$  方位角) 内可以发现  $\sim 800$ : 1 的平均反差值。还用 Gsolver 模型了光效率, 基本上证实了图 2a 中的透射效率曲线 200。“p” 偏振光的透射效率在大部分可见光谱范围上相当均匀, 约为 87%, 而反射的 “s” 光效率在可见光谱范围上非常均匀, 约为 92%。

本发明如剖面图 5a 所示的线栅偏振器 300 采用了一种结构, 每个细长的组合栅线 310 (或平行的导电电极) 具有一种分层的内部结构, 由沉积在透明介电衬底 305 上的一系列多个细长的金属线 (320、322、324) 和交替细长的介电带 (介电层 340、342、344) 组成。通过正确地构造线栅偏振器的组合栅线 310, 并且适当地限定金属栅线和介电层的各自厚度, 可以利用光子隧道效应与栅内谐振效应的结合来增强偏

振器的性能。与现有线栅偏振器相反，本发明的线栅偏振器不仅采用细长栅线的平面（X:Y平面）内的谐振效应，而且还采用沿Z轴的多个平行的线内平面之间的谐振效应来限定和提高性能。还应理解，图5a-5d中所示的线栅偏振器310不是按比例示出，夸大了组合栅线310以展示与介电层交错的细长金属线的线内子结构。如前所述，对于现有的线栅器件，间距（p）和栅线宽度（W）为亚波长尺寸（ $\sim \lambda/5$ 或更小）。虽然不是必须，栅线宽度（t）也是额定的亚波长，如后所述。

特别是，本发明的线栅偏振器的设计是基于一些已知的物理现象、谐振增强隧道效应的利用，其中正确构成的金属层可以对入射光部分地透明。在OE Reports, Dec. 1999, pg. 3的综述文章“Photonic Band Gap Structure Makes Metals Transparent”中描述了在构成一种能够谐振增强隧道效应的光子带隙结构时发生的现象。在J. App. Phys. 83(5), pp. 2377-2383, 1 March 1998, M. Scalora 等的论文“Transparent, Metallo-Dielectric, One-Dimensional, Photonic Band-Gap Structures”中也描述了这一概念。

传统上认为入射光在发生反射之前只传播通过短距离的、即趋肤深度（ $\delta$ ）的金属膜。趋肤深度可以通过方程（4）算出：

$$\delta = \lambda / 4\pi n_i \quad (4)$$

此处，算出的深度对应于光强降至其在入射面处值的 $\sim 1/e^2$ 时的距离，其中 $n_i$ 是折射系数的虚部）。传统上认为当薄金属层的厚度超过典型的趋肤深度值 $\delta$ 时对透射的可见光不透明，其中铝和银等金属的 $\delta$ 值仅为10-15nm。但是，如这些论文所述，金属-介电光子带隙结构可以由薄金属片和薄介电片的交替层构成，使得入射光可以有效地透过比趋肤深度 $\delta$ 厚的各个金属层。（据定义，光子带隙结构是一种交替材料层的纳米层级（nanoscopic）结构，或者相似厚度的区段具有不同的折射率的纳米层级结构，这些材料层或区段在衬底或其它结构上周期性地或准周期性地隔开，使得一定范围内的光波被该结构透射（或阻挡））。最简单地，这些结构可以通过考虑图5a所示的单个组合栅线310成像，并且金属线（320、322、324）和介电层（340、342、344）交替的结构被拉伸成片以覆盖介电衬底305二维表面的大部分。例如，这些论文描述的一种三周期结构具有三个被三个厚度为140 nm的氟化镁（ $MgF_2$ ）层分开的30nm厚的铝（Al）层，在绿光波段提供15-50%

的可变透射率。实际上，入射光隧穿第一薄金属层并短暂遇到后面的介电层。透过第一金属层进入到后面的介电层的光遇到第二金属层。然后建立适当的边界条件，使得整体结构的作用更象一个法布里-珀罗谐振腔（或标准具），并且在介电层中的谐振增强了光在金属层中的透射率。然后，此谐振增强的隧道效应被具有金属层和介电层交替分布的该结构的重复设计所增强。的确，这些论文表明增加更多的周期（并因而增加金属总厚度）对于具有较少周期的结构可以提高总光透射，并减少带通区域的振荡。另外，还表明介电层厚度的调节可以依据所作的改变向长波或短波移动带通结构的边缘。典型地情况是，这些结构中的薄介电层显著地厚于薄金属层（ $\sim 3-10\times$ 或更大），而薄金属层可以只是趋肤深度的厚度，但也可以比理论上的趋肤深度（ $\delta$ ）厚几倍。

这种可以利用金属-介电光子带隙的谐振增强隧道效应现象还没有广泛地用于实践。在引用的参考文献中，此效应被认为是对于光屏蔽装置有用的，它透射一个波段的光（例如可见光）而阻挡邻近的波段（UV 和 IR）。的确，这种光子带隙结构可以提供附近波段的抑制，它比简单金属膜结构改善几个数量级。另外，美国专利 US5,751,466 (Dowling 等人) 和 US5,907,427 (Scalora 等人) 描述了这种效应对设计用于光通讯的可变光子信号延迟装置的作用。但是，现有技术没有预见对偏振器件的一般设计、或尤其对线栅偏振器和偏振分束器使用金属-介电光子带隙结构的谐振增强隧道效应的益处。而且不必清楚谐振增强隧道效应通过提高整个可见光谱或甚至任何单色波段的偏振反差或透射率而改善线栅偏振器的性能。

因此，本发明的线栅偏振器 300，如图 5a-5d 所述，采用了多个制作一致的细长的组合栅线 310，分别具有包括交替的金属线（320, 322, 324）和介电层（340, 342, 344）的线内子结构。与现有的线栅偏振器一样，平行于栅线的偏振光被该器件反射，正交于栅线的偏振光被透射。但是，现有线栅偏振器使用较厚的栅线，为 100-150nm 厚典型的单片沉积金属，而本发明的线栅偏振器将栅线构造成一系列交替的薄金属层和介电层。结果，正交于栅线偏振的入射光通过光子隧道效应和增强的谐振效应部分地透过金属层本身，并且因而透射的偏振光与反射的偏振光的总反差比提高。与只依赖于栅线平面（图 1

中的 X:Y 平面)内谐振效应的现有线栅偏振器相比,本发明的线栅偏振器还利用正交方向(图 1 的 Z 方向)上的谐振效应来确定性能。

本发明的线栅偏振器 300 的第一实例示于图 5a,其中每条细长的组合栅线 310 具有六层周期性的分层线内结构 315,包括交替的金属层(金属线 320, 322, 324)和介电层(介电层 340, 342, 344)。与现有器件一样,线栅偏振器 300 模制成栅线位于 130nm 的间距( $p \sim \lambda/5$ )、40% 的占空比的结构,使得栅线的宽度( $w$ )为 52nm。因而,组合栅线 310 之间的凹槽 312 为 78nm 宽。凹槽 312 额定地用空气而非其它介质填充,如光学液体或凝胶。同样与现有器件类似,该器件模制成一个偏振分束器,准直光束以 $\theta=45^\circ$ 角入射。另外,组合栅线 310 用包括三个 MgF<sub>2</sub> 薄介电层(介电层 340, 342, 344),每个 33nm 厚,和交替的三个薄铝金属层(金属线 320, 322, 324),每个 61nm 厚,的线内结构 315 模制。

根据有效介质理论,入射光与每层的有效折射率相互作用,其中有效折射率依赖于组合栅线 310 的几何形状、层本身的几何形状、层(金属或电介质)的复合折射率、栅线之间的材料(空气)的折射率以及相邻层建立的边界条件。如图 5a 所示,以线栅偏振器 300 为例,设计线内结构使得第三介电层 344 位于第三金属线 324 和透明介电衬底 305 的表面 307 之间。组合栅线 310 的总栅线厚度( $t$ )、即三条金属线栅 320、322、324 和三个介电层 340、342、344 的厚度之和为 282nm 或( $\sim \lambda/2$ )。图 6a 和 6b 所示的该器件的模制的偏振性能是对模制结果如图 3a 和 3b 所示的基本线栅偏振器反射和透射二者的改进。通过使用 8 级衍射的 Gsolver 模型的性能以确保精确性。如图 6a 所示,在可见光谱上对“p”光的理论透射光束的反差 250 的变化为  $10^3$ - $10^6$ :1,而在可见光谱上对“s”光的反射光束的反差 255 平均相当地均匀,约为 100:1。因而,如图 6b 所示,在整个可见光谱上总的反差比 275 也平均为约 100:1。牺牲效率也没有获得改善的偏振性能,因为“s”光反射效率为 $\sim 91\%$ ,而“p”光透射效率为 $\sim 83\%$ ,在整个可见光谱上变化很小。借助这种对于反射的“s”偏振光有较高的并且均匀的偏振反差,该器件可以提供偏振分束器在“p”和“s”均被采用的应用中改善的性能。值得注意的是,该器件还表现出比 US6,108,131 的器件在“p”偏振光反差(也认作偏振消光比)上 $\sim 10x$ 的改进以及增强的

蓝光性能，在大部分蓝光光谱上具有反射光束反差 255 和平均为 ~250:1 的总反差比 275。这种性能在很多应用中包括投影系统中都是很有用的。

另外，与图 3a 和 3b 所示的现有类型的器件相比，图 6a、b 第一实例的线栅偏振分束器在总反差 275 和透射光束反差 250 上的改进不会以降低的角度性能为代价。对总反差 C 的廓线分析表明，500nm 处在一个宽的角度带 ( $\pm 12^\circ$  极角和  $\pm 30^\circ$  方位角) 内获得 ~500:1 的平均反差值。还对于准直光束在正入射 ( $\theta=0^\circ$ ) 模型了此第一实例的器件。因为在正入射 ( $\theta=0^\circ$ ) 时整个可见光谱范围的透射光束反差  $>10^5:1$ ，所以证明第一实例的线栅偏振器可以很好地用作偏振检偏器或起偏器，但恰好不是线栅偏振分束器。

虽然本发明的线栅偏振器和 US4,289,381 中 Garvin 等人的线栅偏振器均有在 Z 轴方向延伸的多个图案化栅线平面，但这些线栅偏振器却显然不同。特别是，US4,289,381 中多个线栅偏振平面的每个中的栅线都是厚的实金属线 (100 - 1000 $\mu\text{m}$ )，但缺乏线内子结构，并且对于整个栅线有用的易失透射率来说也太厚。另外，US4,289,381 中两栅情形的多线平面优选具有半间距偏差 ( $p/2$ ) 而不是重叠排列。最后，US4,289,381 的线栅偏振器设计优选与相邻的线栅以栅间间隔 (1) 和间距偏差 ( $p/2$ ) 定位，从而避免栅间谐振或 Etalon 效应的发生。相反，本发明的线栅偏振器 300 特别采用在分层的线内子结构中的 Etalon 型谐振效应以提高性能。

本发明线栅偏振器 300 的第二实例示于图 5b，其中每个组合栅线 310 具有十八层的周期性的分层线内结构 315，包括交替的金属层 (金属线 330a-i) 和介电层 (介电层 350a-i)。与第一实例的器件一样，第二实例的线栅偏振器 300 模型成组合线 310 处于 130nm 的间距 ( $p \sim \lambda/5$ )、40% 的占空比、线宽 (w) 52nm 的结构。同样与前述类似，该器件模制成一个偏振分束器，准直光束以  $\theta=45^\circ$  角入射。如前所述，最后的介电层 (330i) 邻近介电衬底 305。但另外，组合栅线 310 用包括九个 MgF<sub>2</sub> 薄介电层 (介电层 330a-i，每个 39nm 厚) 和九个薄铝金属层 (金属线 350a-i，每个 17nm 厚) 交替的线内结构 315 模型。组合栅线 310 的总栅线厚度 (t)、即九条金属线栅 330a-i 和九个介电层 350a-i 的厚度之和为 504nm、即  $\sim 1\lambda$ 。图 7a 和 7b 所示的该器件的

模型的偏振性能是对模型结果如图 3a 和 3b 所示的基本线栅偏振器反射和透射的改进。如图 7a 所示,在可见光谱上对“p”光的理论透射光束的反差 250 的变化为  $10^7$ - $10^8$ :1,而在可见光谱上对“s”光的反射光束的反差 255 平均约为 100:1。因而,如图 7b 所示,在整个可见光谱上总的反差比 275 也平均约为 100:1。虽然此器件比第一实例的器件显著地更为复杂,但对于“p”偏振光的理论透射光束反差 250 比第一实例的器件好  $\sim 100x$ , 并比现有技术中的器件(见图 3a)好  $\sim 1000x$ 。

本发明线栅偏振器 300 的第三实例示于图 5b,具有与第二实例相似的十八层结构,其中每个组合栅线 310 具有十八层周期性的分层线内结构 315,包括交替的金属层(金属线 330a-i)和介电层(介电层 350a-i),除介电层和金属层的厚度有所改变。在此情形下,组合栅线 310 用包括九个 MgF2 厚介电层(介电层 330a-i,每个 283nm 厚)和交替的九个薄铝金属层(金属线 350a-i,每个 17nm 厚)的线内结构 315 模型。组合栅线 310 的总栅线厚度( $t$ )为 2700nm、即  $\sim 5\lambda$ 。如图 7c 和 7d 所示,与图 7a 和 7b 相比,第三器件具有显著不同于第二器件的偏振性能,虽然只在介电层 350a-i 的厚度有变化。从图 7d 显见,总反差比 275 在蓝光光谱上具有平均反差比  $\sim 150$ :1,而在绿光和红光光谱上性能下降。总反差比 275 的曲线其在蓝光波段的迅速振荡也是值得注意的,其在峰-谷之间摆动,即  $\sim 50$ :1- $\sim 500$ :1 的反差之间摆动。采用厚介电层的此例提出了设计波段调谐线栅偏振分束器的可能,该分束器不仅对于“p”透射光具有良好的性能,而且对于“s”反射光也有非常好的性能(250:1 或更好)。但不幸的是,虽然 Gsolver 是一种优越的分析软件程序,但没有写入编码以进行偏振反差的优化,因此不能够获得具有进一步改进的性能的实例结果。但是,此设计的优化允许金属层和介电层的厚度变化,建立非周期性或双倍周期的结构,可以提高在蓝光的性能,提供理想的结果。

应该注意,可以利用具有厚介电层但非十八层总层数的类似的线内结构 315 获得类似于栅线偏振器 300 第三实例的结果。未示出的第四实例的线栅偏振器用一种包括八层的结构模型,其中四层 MgF2,每层 525nm 厚,与四层铝层交替,铝层每层厚为 45nm。因此组合栅线 310 的总厚度( $t$ )为  $2.28\mu\text{m}$ 、即  $\sim 4\lambda$ 。该模型器件相对于栅线间距( $p$ )、



线宽 ( $w$ ) 和入射角方面与前面实例的器件相同。所得的该第四实例器件在蓝光光谱上的偏振性能, 如图 8a 和 8b 所示, 非常类似于第三实例器件 (图 7c 和 7d) 的性能。有趣的是, 图 8a 提出了在蓝光和红光光谱上对于透射光束和反射光束具有高反差但在绿光光谱对于两种光束有低反差的结构的可能。

相对于只根据介电层的厚度 (39nm 对 283nm) 而变化十八层线栅偏振器的第二和第三实例, 可以通过利用中间介电层厚度模型类似的器件来获得其它感兴趣的结果。例如, 具有 56nm 介电层厚度的模型器件在整个可见光谱上提供最小  $\sim 100:1$  的总反差比, 但在  $\sim 450\text{nm}$  和  $\sim 610\text{nm}$  上提供两个局部化的峰值, 总偏振反差为  $\sim 1000:1$  或更大。

本发明第五实例的线栅偏振器 300 示于图 5c, 其中每个组合栅线 310 具有五层周期性的分层线内结构 315, 包括交替的金属层 (金属线 320, 322 和 324) 和介电层 (介电层 340 和 342)。与其它实例的器件一样, 第五实例的线栅偏振器 300 模型成组合栅线 310 处于  $130\text{nm}$  的间距 ( $p \sim \lambda/5$ )、40% 的占空比、线宽 ( $w$ )  $52\text{nm}$  的结构。同样与前述类似, 该器件模型成一个偏振分束器, 准直光束以  $\theta=45^\circ$  角入射。但是, 该器件具有线内结构 315, 采用一种金属层 (金属线 324) 与介电衬底 30 邻近 5 而非前述实例中的介电层邻近的设计。组合栅线 310 用包括两个  $\text{MgF}_2$  薄介电层 (介电层 340 和 342, 每个  $55\text{nm}$  厚) 和与三个薄铝金属层 (金属线 320, 322 和 324, 每个  $61\text{nm}$  厚) 的线内结构 315 模型。组合栅线 310 的总厚度 ( $t$ ) 为  $293\text{nm}$ 、即  $\lambda/2$ 。虽然图 9a 和 9b 所示的该器件的模型的偏振性能是对图 3a 和 3b 所示的基本线栅偏振器反射和透射的改进, 但此五层器件不能象第一实例的六层器件一样好地工作。如图 7a 所示, 在可见光谱上对 “p” 光的理论透射光束的反差 250 变化为  $10^5$ – $10^6:1$ , 而在可见光谱上对 “s” 光的反射光束的反差 255 均匀仅为  $\sim 40:1$ 。因而, 如图 7b 所示, 在整个可见光谱上总的反差比 275 也平均为  $\sim 40:1$ 。另外, 与第一实例的器件相比, 在其波段上蓝光性能较不均匀。不过, 具有金属层 (线 324) 与介电衬底 305 接触结构的此器件仍然是有用的。

本发明第六实例的线栅偏振器 300 是第五实例的一种改型, 示于图 5d, 在每个组合栅线 310 中只具有五层, 第六实例的器件具有一种非周期性的分层线内结构 315。因而, 组合栅线 310 由包括三个薄铝金

属层（金属线 320, 322 和 324, 每个 61nm 厚）和两个 MgF<sub>2</sub> 薄介电层（介电层 340 为 27.5nm 厚, 介电层 342 为 82.5nm 厚）交替的线内结构 315 模型。如前所述, 第三金属层 324 与介电衬底 305 接触。如同第五实例的器件, 该器件的总栅线厚度 ( $t$ ) 为 293nm。该器件的模型性能, 如图 10a 和 10b 所示, 类似于第五实例器件的性能（见图 9a 和 9b）, 除了从总反差 275 测得的蓝光光谱的性能平均值较高。第五和第六实例的器件也提示了波段调谐线栅偏振器的可能。

因为数据变化很小, 所以没有提供各个实例（一至六）的“s”偏振反射效率和“p”偏振透射效率所测得的光效率曲线。一般地, 在可见光谱上“s”偏振光的反射效率是均匀的, 处于 80~90% 的效率水平。

“p”偏振透射效率的均匀性较低, 如同一些实例的器件表现的在光谱的低蓝色区域效率有所下降。另外, 总的“p”偏振透射效率低于“s”光效率, 总的处于较低至中等的 80% 的效率水平。

应该理解, 每个细长的组合栅线 310 具有一般大于可见光波长的长度。因此, 组合栅线 310 具有至少约 0.7 $\mu$ m 的长度。但是, 在大部分实际器件中, 组合栅线 310 将是几毫米或甚至是几厘米的长度, 这将根据应用所需的大小。虽然与线栅间距或周期 ( $p$ ) 相比用相对于组合栅线 310 的宽度 ( $w$ ) 40% 的占空比模型应用的各种实例的线栅偏振器, 但应该理解, 也可以使用其它的占空比。一般地, 40-60% 范围内的占空比将提供相对于透射和反差比最佳的总体性能。值得注意的是, 如实例的器件所示, 组合栅线 310 的总厚度 ( $t$ ) 可以大致从半波长变到五个波长, 同时仍对透射的“p”偏振光提供异常的透射和对“s”偏振光提供阻碍。另一方面, 当前的器件制造方法可以限制组合栅线 310 的可以实现纵横比（厚度 ( $t$ ) 比宽度 ( $w$ )）。结果, 可见光谱上的实际器件可以限制到总厚度 ( $t$ ) 仅为 ~100-300nm 的范围（~ $\lambda/6$ ~ $\lambda/2$ ）。因此, 总栅线厚度的限度可以根据具有金属线和介电层交替的分层线内结构 315 制约分辨率空间和可能的设计自由度, 但不用说, 甚至在有限的分辨空间内, 也可以发现有利的设计。通过比较, 现有线栅器件很大地依赖于金属栅线的厚度, 金属栅线的厚度厚于几个趋肤深度 ( $\delta$ ) 以确保对“s”偏振光良好的阻碍。另外, 值得注意的是, 本申请中实例的器件可以有细长金属线（例如 330）的厚度, 只有几个（约 1-4）趋肤深度厚并仍提供对透射的“p”偏振光异常透射

和对“s”偏振光的阻碍。例如，第五实例器件采用多层金属，每层厚度为 61nm，约等于四个趋肤深度。最后，介电衬底 120 的第二或相对表面可以有一个抗反射 (AR) 涂层以提高总透射。

应该理解，这里的对具有包括金属和介电层多重交替的分层的线内栅结构 315 的线栅偏振器 300 的各种实例并不包括所有可能的设计。原因之一，不允许偏振反差优化的 Gsolver 软件的局限将现有的结果限制到低于它们的潜能。此外，材料的其它组合可以用于设计，包括用金或银取代铝，或用 SiO<sub>2</sub> 或 TiO<sub>2</sub> 取代介电材料 MgF<sub>2</sub>。实际材料的选取将依据于理想的设计性能以及方法限制。还应该理解，虽然用包括一部分组合栅线 310 的线内结构 315 的一部分的最外层（最远离介电衬底 305）作为金属层来设计所有的实例器件，交替地介电层也可以用作最外层。

另外，还可以设计这样的器件，用光学清洁的液体、黏合剂或凝胶而非空气填充凹槽 312。此结构示于图 5e，其中折射率为  $n_i$  的光学材料是一种形成在凹槽 312 中的介电填充物 360。例如，介电填充物 360 可以是与用于形成介电层 340、342、344 相同的材料，其部分地包括组合栅线 310。所得的线栅偏振器 300 被介电填充物 360 有效地浸没，具有组合栅线 310 得到保护（免受氧化）的益处。

图 5f 中示出了一种完全嵌入式线栅偏振器，其中组合栅线 310 不仅制作在介电衬底 305 上，而且还与第二介电衬底 355 重叠并接触（或几乎重叠或接触），从而形成一个包含内偏振层的集成器件。在此情况下，该集成器件是一个板偏振器。两个介电衬底可以有或没有相同的光学特性。优选设置一种折射率为  $n_i$  的光学插入材料（介电填充物 360），它可以包括光学清洁的黏合剂（或环氧树脂或凝胶），填充凹槽 312 并接触第二介电衬底 355，以助于确保其不受组合栅线 310 结构的影响。或者，介电填充物 360 可以由与用于形成介电层 340、342 和 344 相同的介电材料组成，而分离光学材料如环氧树脂用于确保第二介电衬底 355 不受组合栅线 310 的结构的影响。为了避免内反射的问题，用于图 5e 和 5f 中线栅偏振器中介电填充物 360 的插入光学材料既可以是折射率与介电衬底匹配 ( $n_i = n_d$ )，也可以是具有较低的折射率 ( $n_i < n_d$ )。这种插入光学材料也可以用一薄层覆盖组合栅线 310 而不是栅线直接接触第二衬底。不幸的是，用折射率为  $n_i$  的介电材料

而非空气填充凹槽将由于降低反差且向上移动波长带的下边缘而减弱栅线器件的设计性能。这些变化可以通过组合栅线 310 的另一种设计而得到补偿,该设计可以改变线栅间距 ( $p$ ) 和线内子结构 315。

注意到,图 5f 所示的嵌入式线栅偏振器的介电衬底每个都可以是直角棱镜,其中偏振层制作在斜边上。然后可以组装该棱镜以形成一个集成偏振棱镜。在此情况下,偏振层沿内对角线设置,由此提供一种 MacNeille 型棱镜的等同物,但推测具有增进的性能。

另一点应该注意,实例器件只表征了一种具有非周期性结构的器件结构。虽然该器件(第六实例)较简单,但也可以是更复杂的器件,这要依据优化设计和制作器件的能力。包括分层的线内子结构 315 的金属层和介电层的厚度可以依结构而变化。例如,可以设计准周期线内结构如线性调频结构。作为另一实例,除了调节最外层和/或最内层(最接近介电衬底 305)的厚度之外,可以将线内结构 315 设计成周期性交替的金属和介电层,从而提高界面到线栅外部区域的性能。同样,介电衬底 305 可以用一个中间层涂覆,组合栅线 310 线内结构的最内层与中间层而非介电衬底 305 直接接触。当然,器件的优化不仅依赖于线内结构 315 的细节,而且还依赖于栅线间距 ( $p$ ) 和栅线宽度 ( $w$ )。实际上,由具有分层的线内结构 315 的组合栅线 310 组成的线栅偏振器 300 的设计原理允许线栅器件获得否则将由较小间距结构提供的性能水平。

另外,线栅偏振器 300 可以用具有分层的线内结构 315 的组合栅线 310 设计制作,其中分层的线内结构 315 在器件的表面上有所变化。因而,将可以建立一种用于偏振分束或偏振检偏的空间变型器件。

设计一种具有包括多层金属和交替的介电层的分层线内子结构 315 的线栅偏振器 300(或偏振分束器)的实际过程(如图 5a-5f 所示)起始于器件参数指标的定义。主要的指标是光谱带宽、光入射角、入射光的角宽度(数值孔径)、透射效率(“p”偏振, $> \sim 80\%$ ),透射反差(例如 $>1000:1$ ),反射效率(“s”偏振, $> \sim 80\%$ ),反射反差(例如 $>200:1$ )。确定标准的线栅特征、栅线间距 ( $p$ ) 和栅线宽度 ( $w$ ),由制作过程的极限分辨率设定最小值。还定义组合栅线 310 的额定分层线内结构 315,包括金属层的数量和厚度以及介电层的数量和厚度。还定义其它参数,如金属和电介质的材料选取、凹槽 312 中任何材料

的材料选取以及线内结构 315 的周期性或非周期性。有一些参数如栅线间距 ( $p$ )、栅线宽度 ( $w$ )、总栅线厚度和层数可以有上下限条件,在限度之内可以发生迭代变化以驱动优化。然后可以进行设计过程,评估性能靶值和工艺性问题的结果。

虽然由具有分层的线内结构 315 的分层的栅线 310 组成的线栅偏振器 300 可以有相当复杂的设计,但复杂性不一定等于困难的制作过程。一般地,用于制作各层、无论金属层还是介电层的容限都比较宽松。期望典型的层厚容限是几纳米,这些器件具有 10nm 以上的层容限,而其它的器件依据设计具有 1nm 或更小的容限。

形成所述的线栅结构的过程可以以几种方式完成。在用空气填充栅线之间凹槽 312 的组合栅线 310 的情形中,构建以介电衬底 305 开始。在后面的实例中,使用金属如铝沉积第一金属层。沉积方法可以是包括热蒸发或溅射在内的几种标准方法之一。接下来,利用随后接着是金属蚀刻(可以是干金属蚀刻,如  $CCl_4$ 、 $BCl_3$ )的标准光刻对金属形成图案,从而形成金属线 330c 的第一层。图 12a 中示出这种情形。接下来,沉积第一介电层 350c。假设电介质包括但不限于  $SiO_2$  和  $MgF_2$ 。依据使用的设备和期望的层数,可能需要在介电层沉积之后进行平面化。如前所述,设置并图案化另一金属层(330b),之后再对介电层(350b)进行这种操作,并且可能再进行平化,从而形成金属/介电叠层。重复此过程直到实现金属/介电叠层具有所需的层数以形成组合栅线 310。每个层可以有不同于前面层的设计和控制。图 12b 表示交替的金属线 330 和介电层 350 的完整叠层。注意,在对组合栅线 310 图案化的过程中介电填充物 360 被收集在凹槽 312 中。在最后一层是金属的情况下,最后的金属层被图案化之后,用介电蚀刻从组合栅线 310 之间的凹槽 312 中去除介电填充物 360。(氧化物和氮化物可能的干蚀刻可以包括  $CF_4$  和  $SF_6$ )。在最后的层是介电层的情况下,在最后的介电层上图案化掩模层,去除线间介电填充材料 360,并再去掉掩模层。最后的器件示于图 12c。如果沉积在介电衬底 305 上的第一层是一个介电层,则可以首先沉积,再开始金属图案化。

具有用电介质填充线间区域(凹槽 312)的另一种结构遵从一种更简单的制作过程。除了不从线内区域中去除电介质以外,该方法与前述相同。此方法的优点在于不存在在去除介电填充物 360 的介电蚀刻

过程中损坏组合栅线 310 的可能性。

还可以采用另一种方法，该方法包括重复蚀刻电介质或离子束蚀刻法。同样可以考虑移去 (lift off) 法。如果考虑湿蚀刻，尤其是如果在沉积每一层后进行蚀刻，则蚀刻化合物的可能选择包括用于 SiO<sub>2</sub> 蚀刻的 HF，用于铝蚀刻的 PAN。应该理解，还有很多方法制作该器件。方法的选择依据于使用的材料和具体的层叠结构。

如前所述，本申请的线栅偏振器 300，具有多层金属和介电层交替的分层的线内栅结构，可以给正入射偏振器和偏轴入射偏振分束器提供改进的性能。这种结构作为偏振分束器的设计和利用具有相当的吸引力，因为它有可能显著地提高反射反差 ( $R_s/R_p$ )。因此，图 11a 表示一种调制光学系统 400，包括一个线栅偏振分束器 410 和反射空间光调制器 445，其中入射光束 130 分成反射光束 140 和透射光束 150，后者照明调制器。作为包括安装、制冷的调制器组件和电子元件界面（均未示出）的一部分的空间光调制器 445 名义上是一种 LCD（液晶显示器），它调制光 150 的入射透射光束的偏振状态。载象光束 490 由从 LCD 445 调制并反射并且随后从线栅偏振分束器 410 反射的过程建立。反射光束 140 中的光可以导入到光阱（未示出）中。成象光束所经的有效光路包围入射光束 130、透射光束 150 和载象光束 490。

根据本发明，线栅偏振分束器 410 包括一种分层的子波长栅线 430 和凹槽 435 的结构，组合栅线具有多层金属和介电层交替的结构，形成在介电衬底 425 的第二表面 420。如图 11a 所示，线栅偏振分束器 410 最好以最接近 LCD 445 的分层子波长栅线 430 取向，而第一表面 415（名义上被 AR 涂覆）面对入射光束 130。通过将承载分层子波长栅线 430 的第二表面 420 放置成最接近 LCD 445，线栅偏振分束器 410 中由于热感应应力双折射（来自吸收光）致使反差损失的可能性降低。

图 11a 所示的调制光学系统 400 还表示了包括一个预起偏器 470、一个偏振检偏器 475 和两个偏振补偿器 450 和 460。预起偏器 470 和偏振检偏器 475 可以是线栅偏振器，自然包括根据本发明的具有分层子波长栅线的线栅偏振器。这些元件可被包括或不包括，主要依据设计的靶值和限制。其它元件如投影透镜（未示出）可以配合该系统。

在图 11b 中示出了一个第二示例调制光学系统 400，其中反射光束 140 对反射式空间光调制器（LCD）445 照明。然后反射式空间光调制

器 445 根据所施加的控制信号转动入射光的偏振状态，将图像数据赋予光束。当光透过线栅偏振分束器 410 时形成载象光束 490。成象光束所经的有效光路包围入射光束 130、反射光束 140 和载象光束 490。因为图 11b 所示的线栅偏振分束器 410 部分包括倾斜板，所以由投影透镜（未示出）成象的 LCD 445 的图像将具有象差（彗差和象散），此象差由透过倾斜的平行板电介质时成象所引致的。这些象差可以通过各种方式得到光学校正。或者，可以调整线栅偏振分束器 410 以包括一个嵌入式线栅偏振分束器，起偏的界面包含在立体棱镜中。前述描述过了这样的棱镜。

在图 11c 中示出了一个第三示例调制光学系统 400。在此系统中，两个调制器-LCD446a 和 446b 分别由反射光束 140 和透射光束 150 照明。利用透过线栅偏振分束器 410 的 LCD 446a 调制光（偏振态被转动）和从线栅偏振分束器 410 反射的 LCD 446b 调制光（偏振态被转动）的结合形成载象光束 490。拥有两种偏振（“p”和“s”）的光的所得载象光束通过投影透镜 495 成象到靶平面（如屏幕）（未示出）。通过给图 11c 所示的调制光学系统 400 配置两个 LCD 445（每个偏振一个），可以提高整个光学系统的光效率。例如，可以开发一种全色系统，该系统把光分成三色通道（红、绿和兰），每个颜色通道由图 11c 所示一个调制光学系统 400 组成，有效地提供六 LCD 系统。因为本发明的线栅分束器 410，可以考虑这种选择，其分层栅线包括多层与介电层交替的金属线，同时该选择可以提供透射及反射高反差。如前所述，具有嵌入式形成立体棱镜结构的另一种线栅偏振分束器 410 可以用于避免倾斜板象差，并且对两个成象光束提供相同的光路。

可以利用本申请的线栅偏振器 300 构成其它实例的调制光学系统，组合栅线形成为具有多个金属层与介电层交替的分层线内栅结构。例如，可以构成另一种调制光学系统，该系统利用透射式偏振转动空间光调制器，其中调制器位于两偏振器（预起偏器和检偏器）之间的光路上，至少一个偏振器是本发明的线栅偏振器。这些线栅偏振器可以和与改变空间光调制器的不同类型的偏振器结合使用，空间光调制器不必正好是液晶显示器（LCD）。例如，可以与 PLZT 调制器结合使用。应该理解，任何一种所述的调制光学系统 400 都可以用作某些更大的系统如图像打印机或投影显示器的子组件。

最后, 应该注意, 虽然在此关于在电子投影的应用中在可见光谱上的操作讨论了由具有分层的线内结构 315 的组合栅线 310 组成的改进的线栅偏振器 300 的原理, 但本原理完全可以扩展到其它的应用及其它的波段。虽然很多实例集中在增大整个可见光谱或蓝光光谱上的反射反差, 但自然也可以增大在其它色段(绿色和红色)的反射反差。事实上, 在绿色和红色光谱上性能的提高可以比在蓝色光谱上更显著。或者, 这种器件可以设计并制作成在近红外波长用于光通信系统( $\sim 1.0\text{--}1.5\mu\text{m}$ )或是在远红外(如  $20\mu\text{m}$ )或是在电磁波谱。本原理还有可能用于制作窄波长偏振器件, 其中“p”透射反差为  $>10^3:1$ , “s”的反射反差为  $>10^4:1$ 。同样, 可以在可见或红外谱段设计窄波长陷波偏振分束器, 其中“p”和“s”偏振鉴别被同时优化, 产生具有优良的总反差的偏振分束器。另外, 第三实例的器件提出了一种具有可以给大的波段提供高偏振反差的结构的偏振滤波器, 围绕一个提供最小偏振反差的中间波段(见图 8a)。例如, 当与适当结构的照明装置组合时此器件可以用于一个进行质量和缺陷检测的生产组装线中。



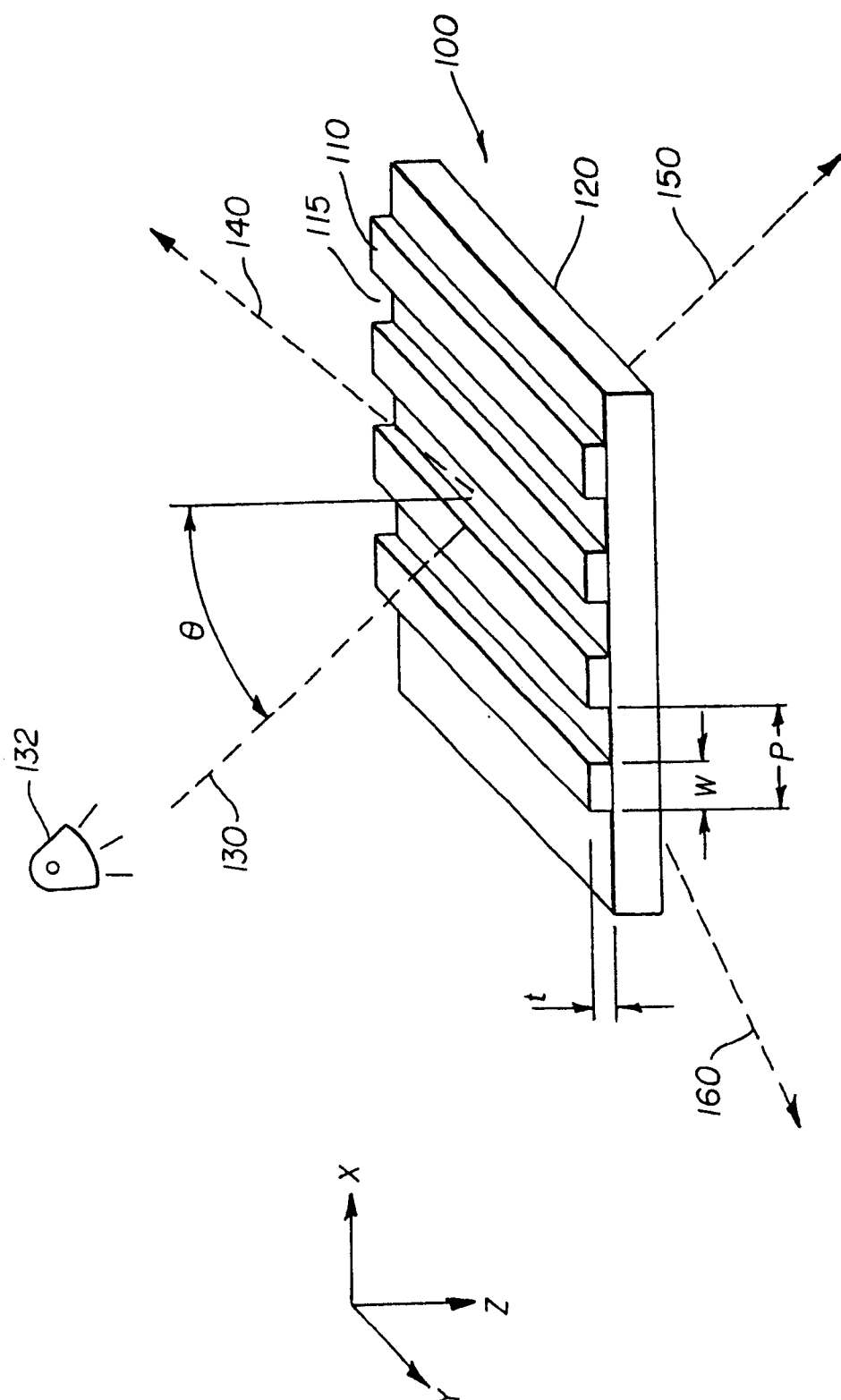


图 1  
(现有技术)

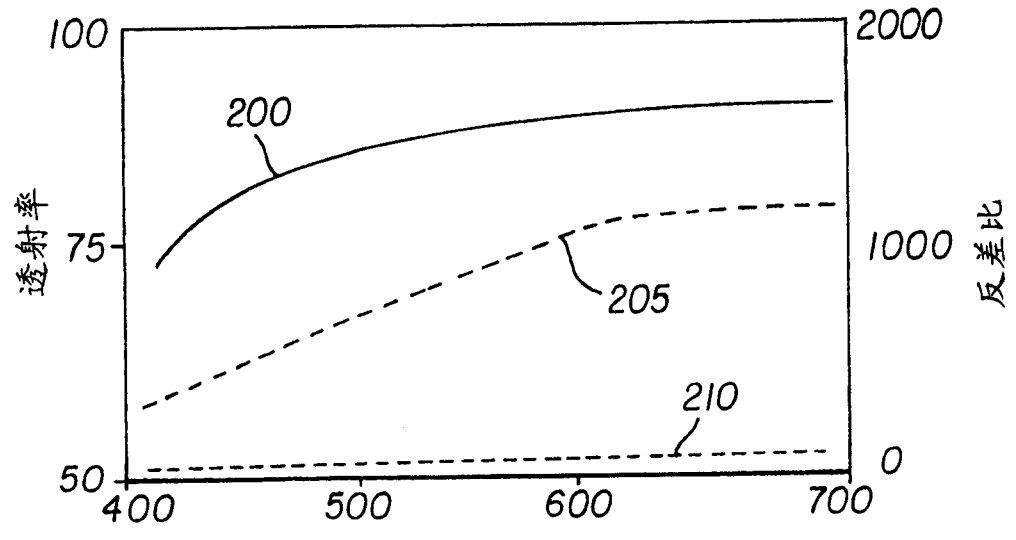


图 2a  
(现有技术)

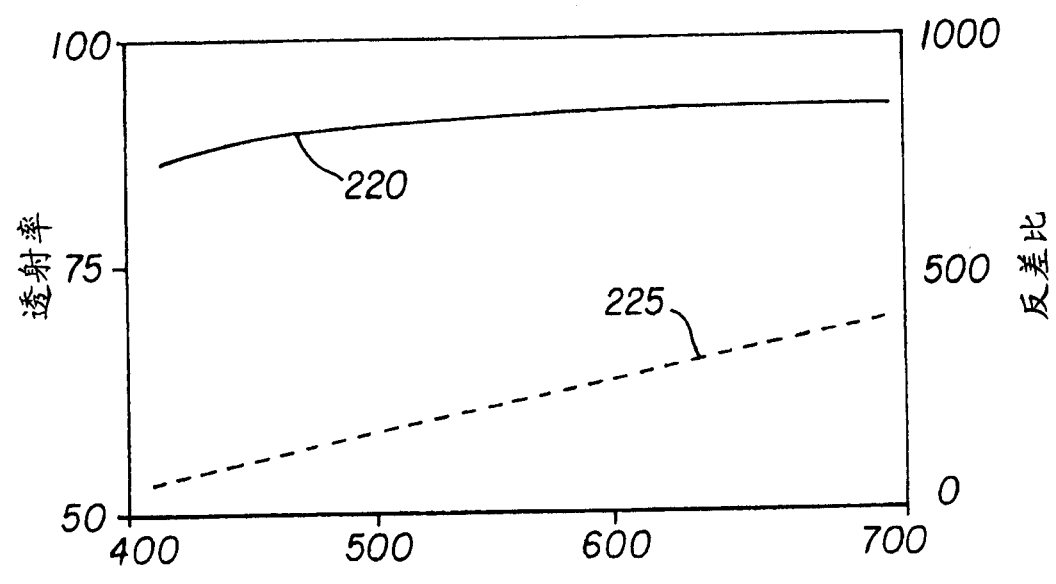


图 2b  
(现有技术)

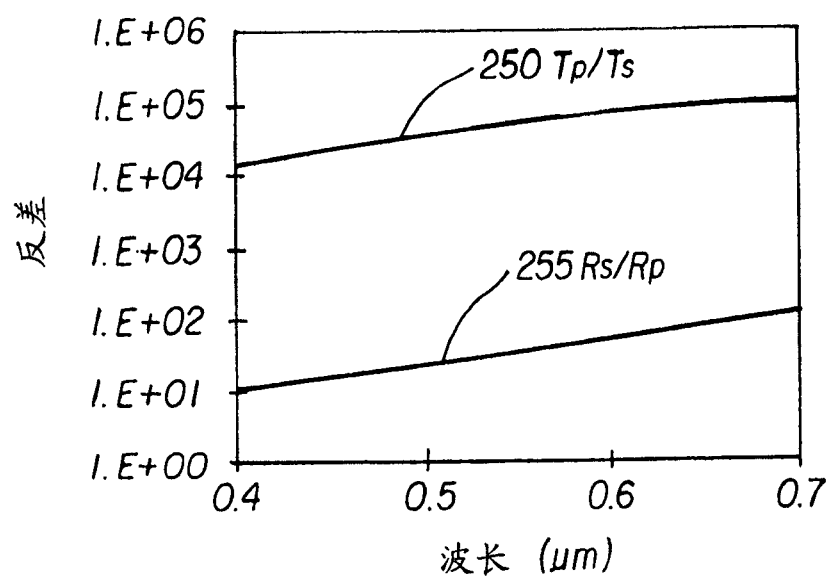


图 3a

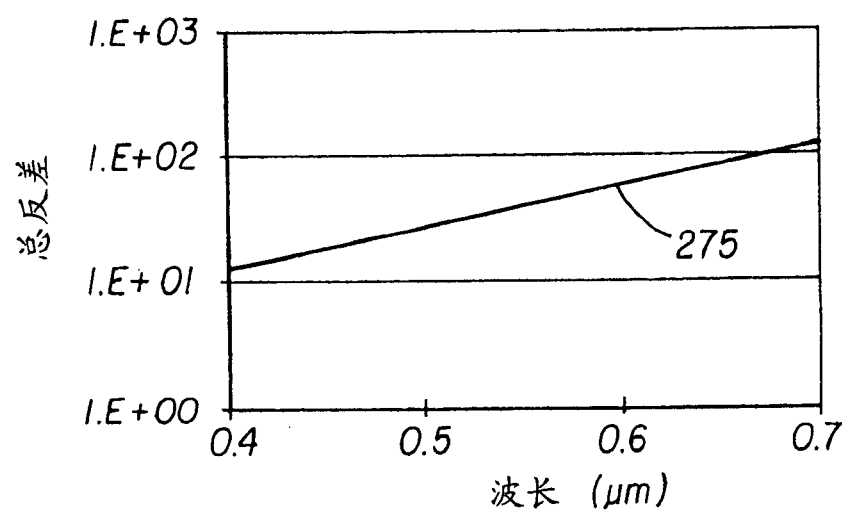


图 3b

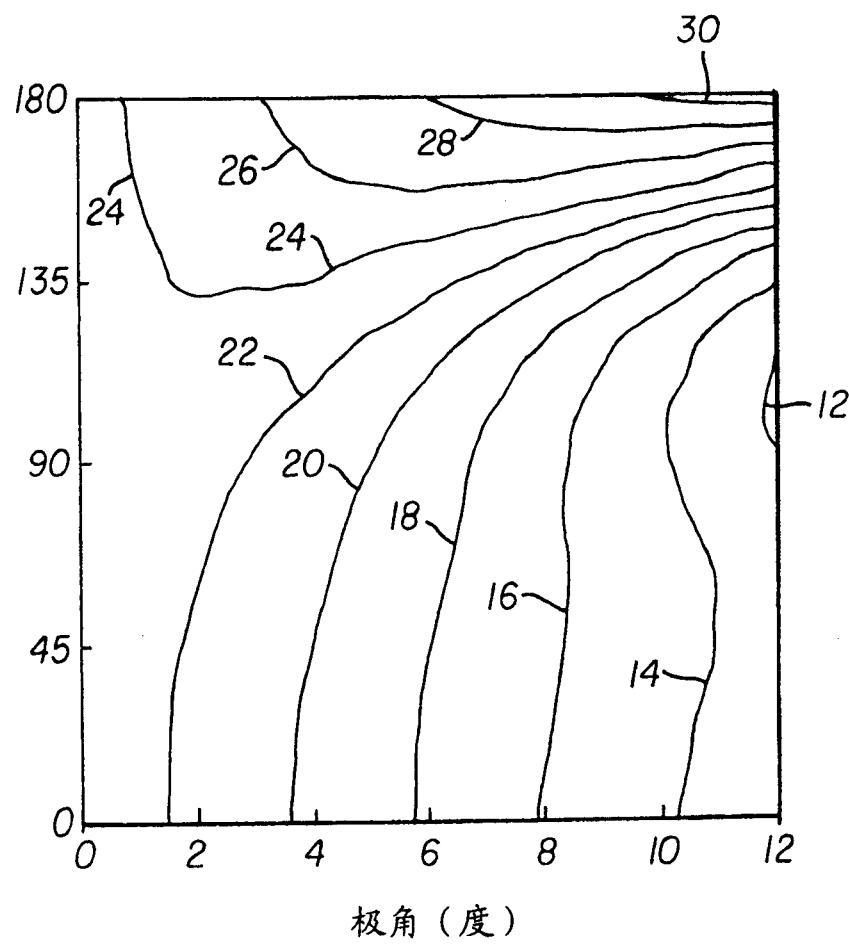


图 4

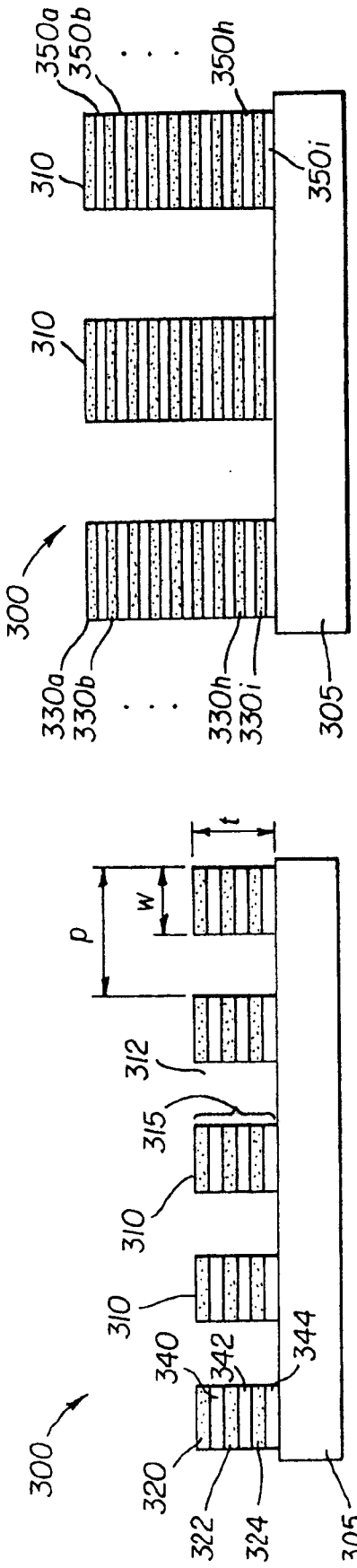


图 5a

图 5b

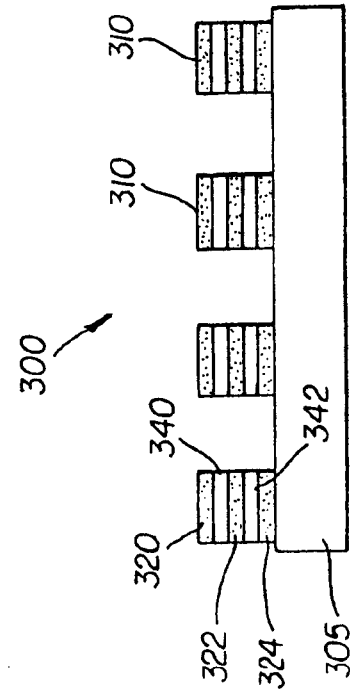


图 5c

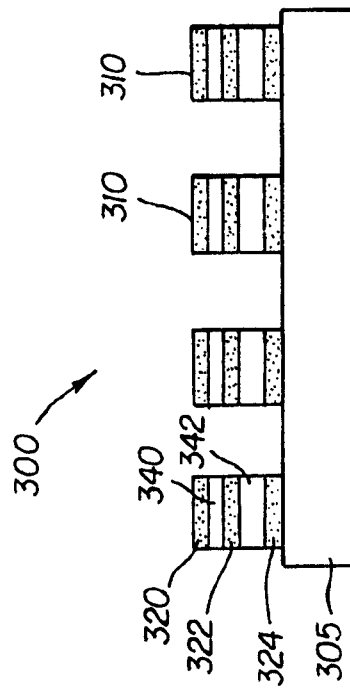


图 5d

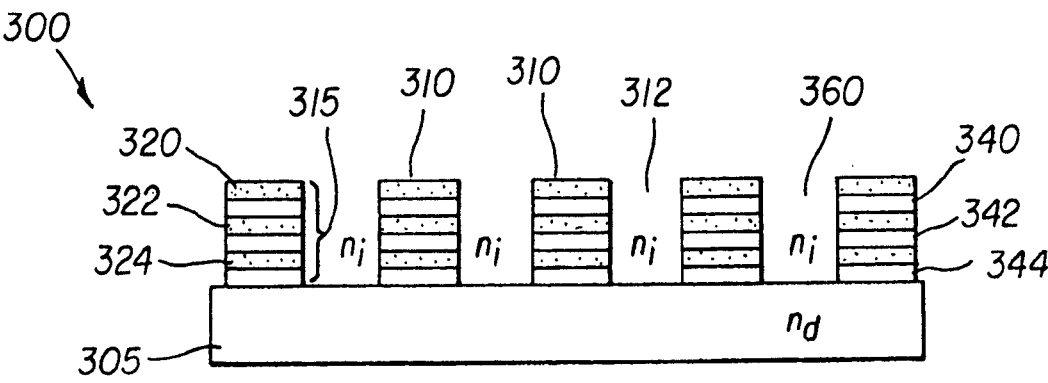


图 5e

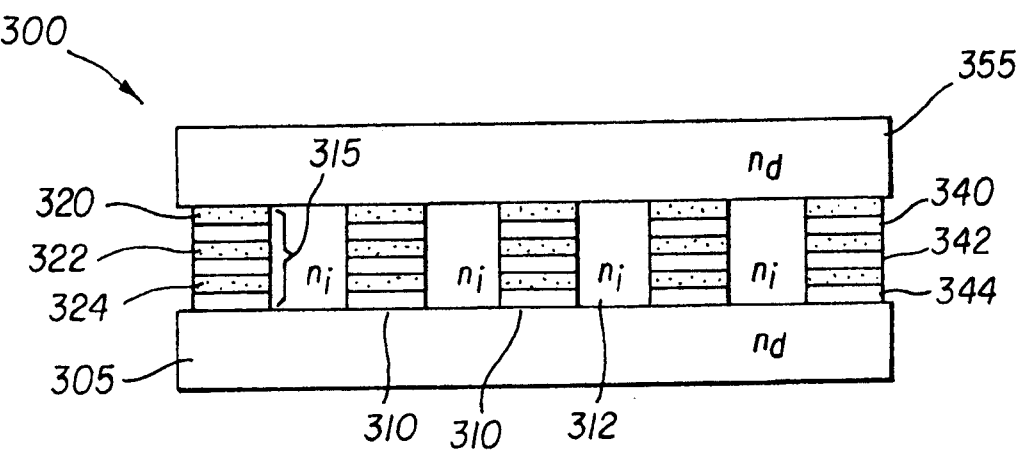


图 5f

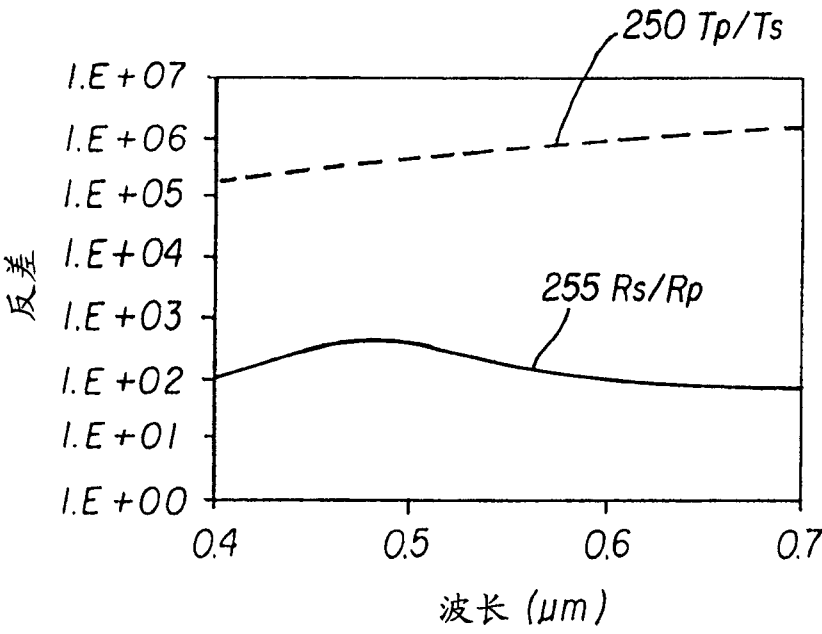


图 6a

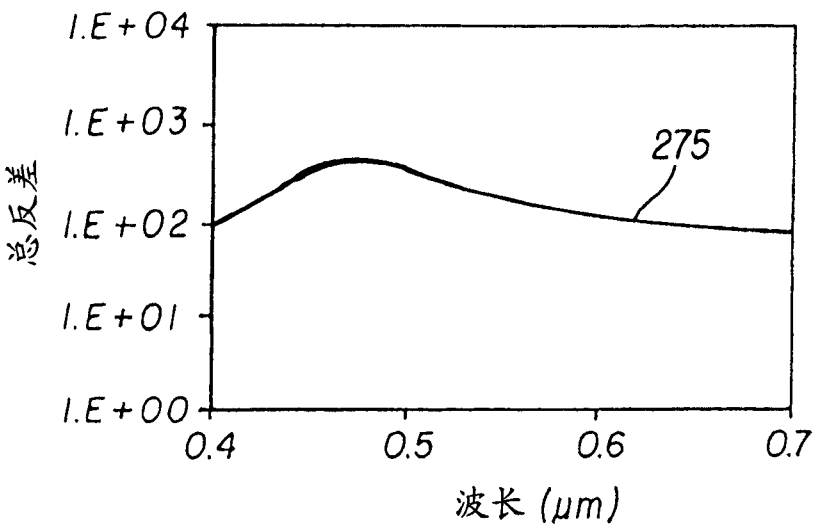


图 6b

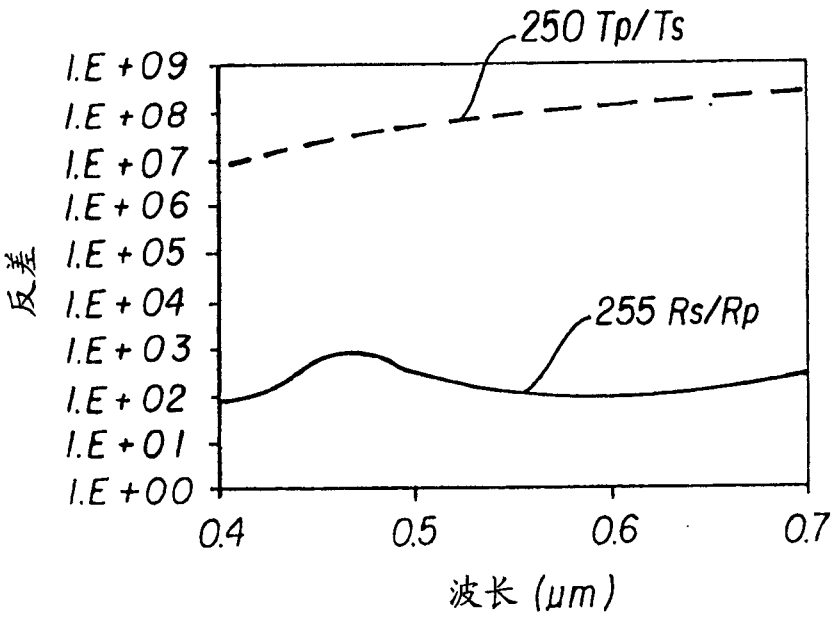


图 7a

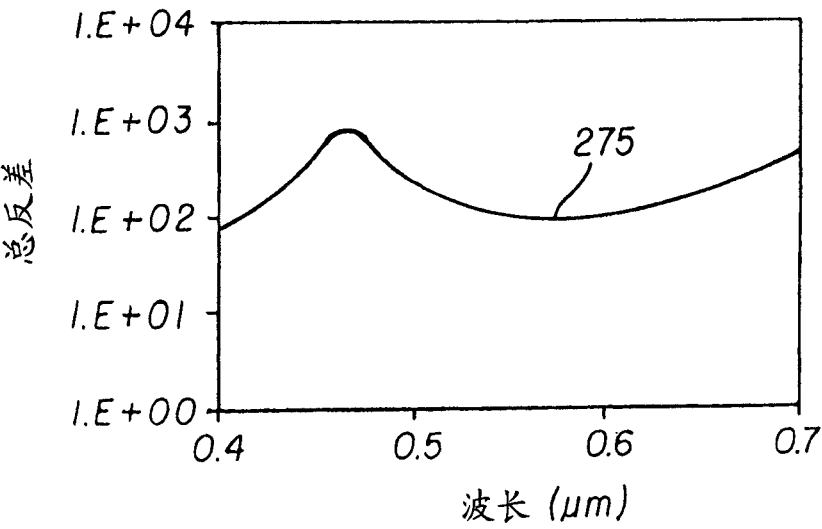


图 7b



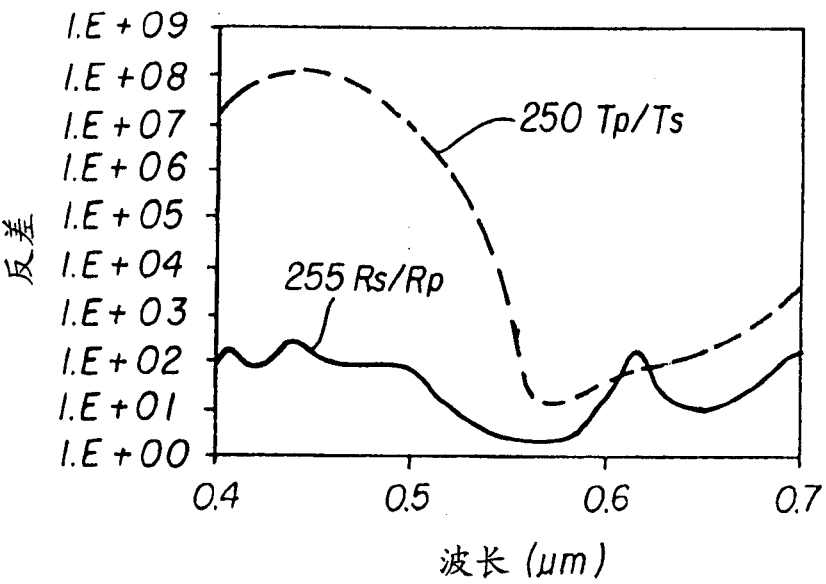


图 7c

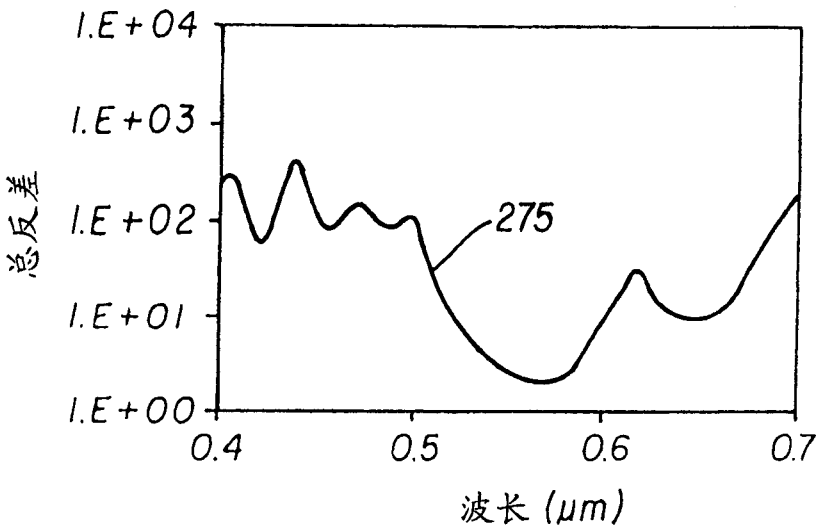


图 7d

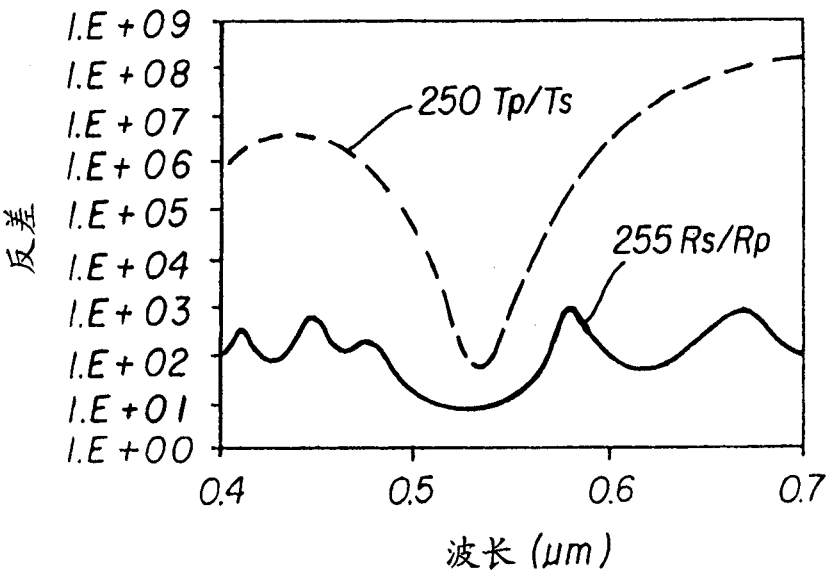


图 8a

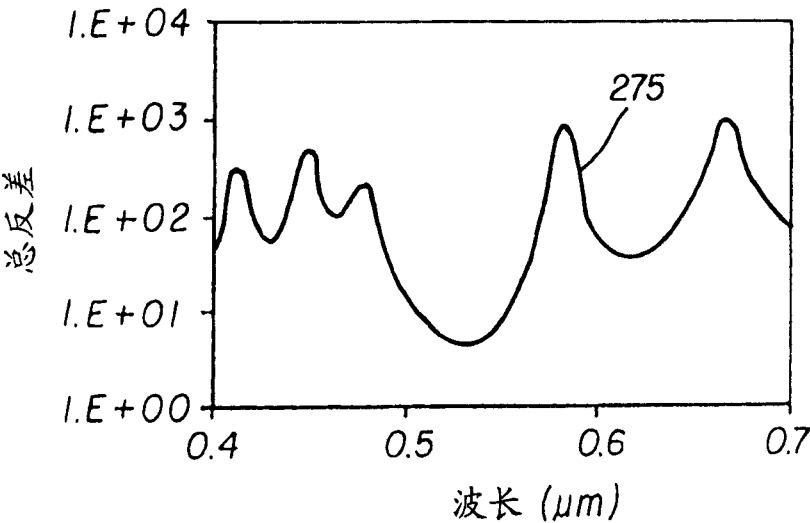


图 8b

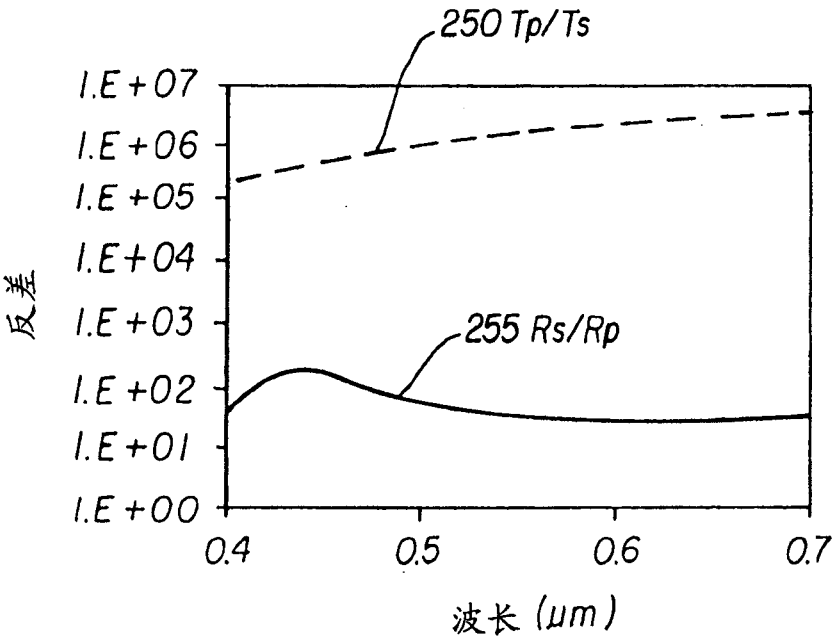


图 9a

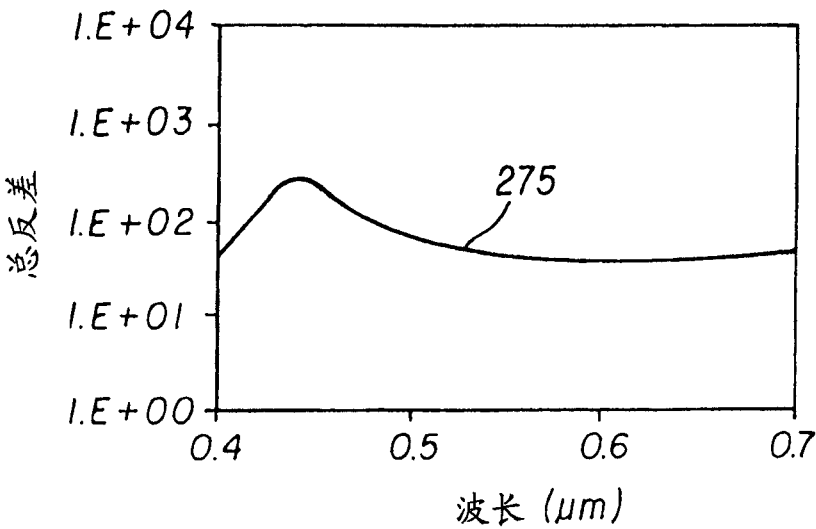


图 9b

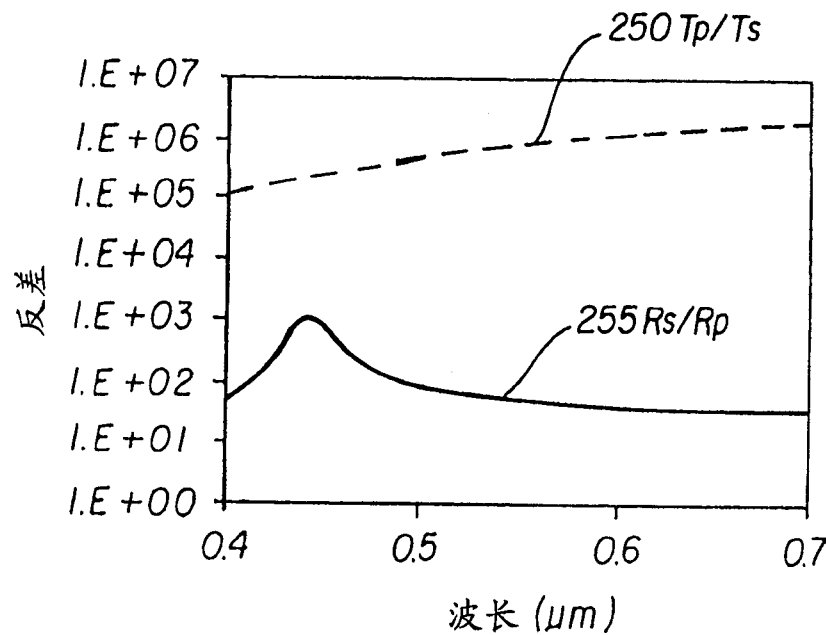


图 10a

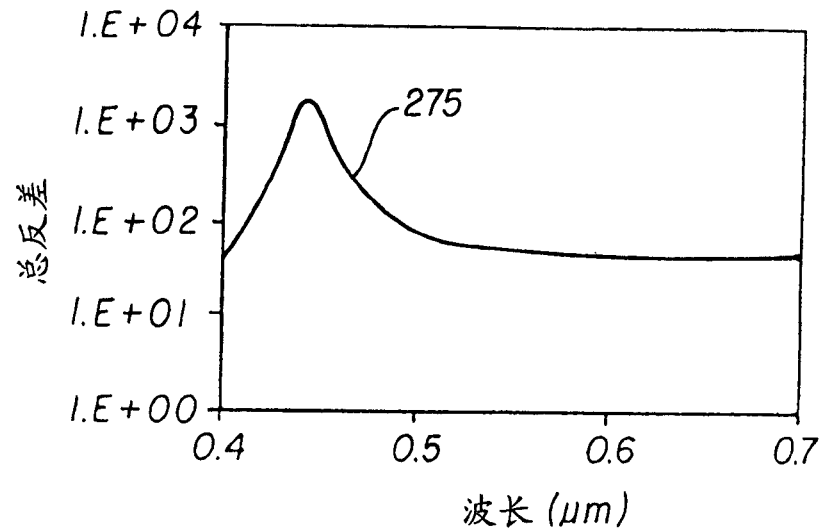


图 10b

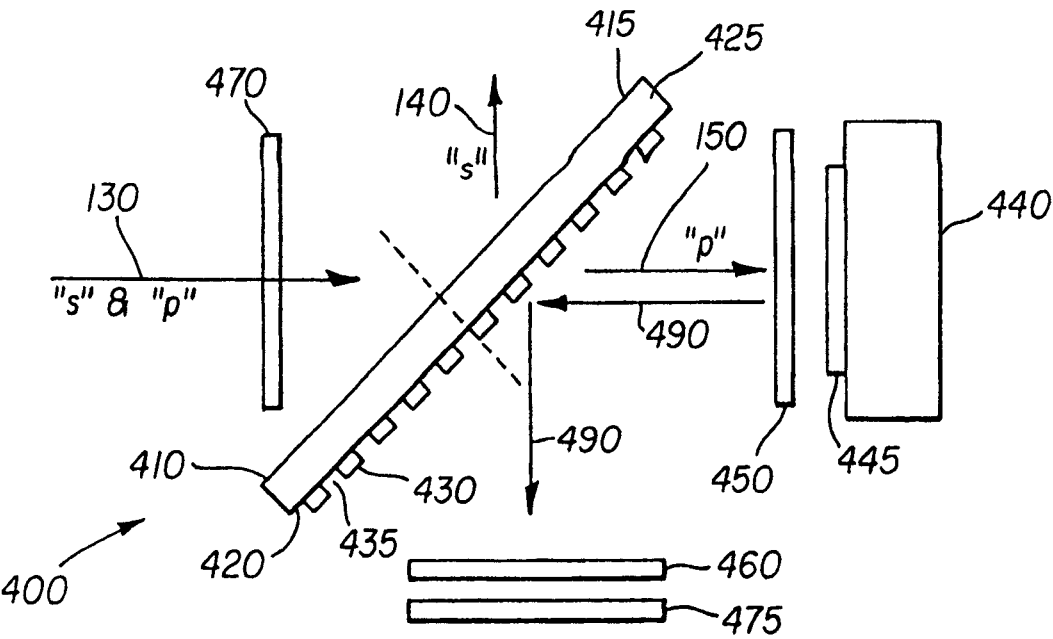


图 11a

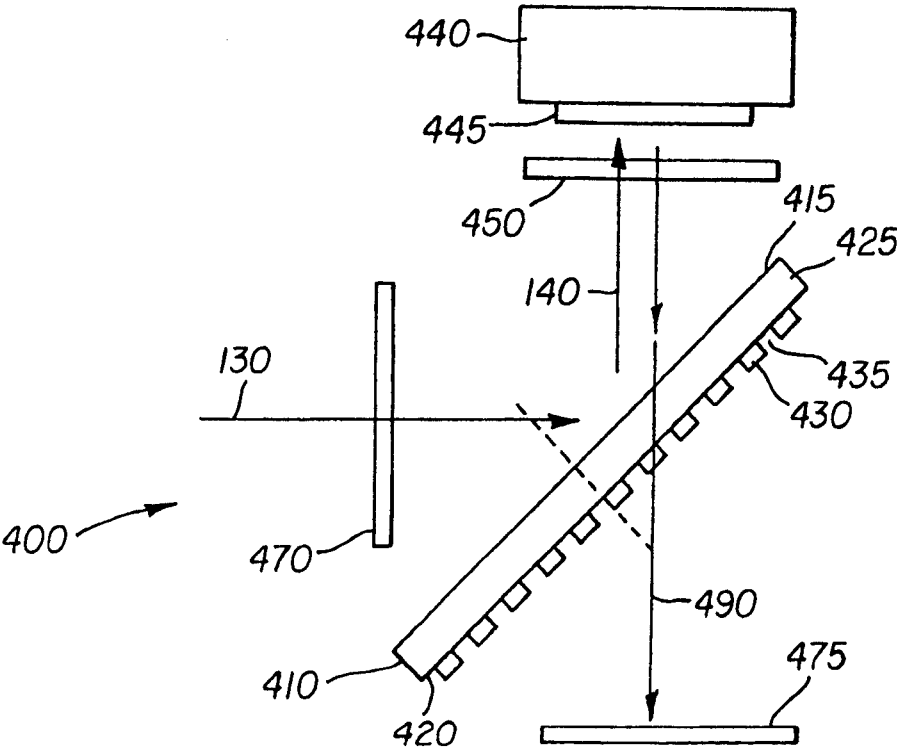


图 11b

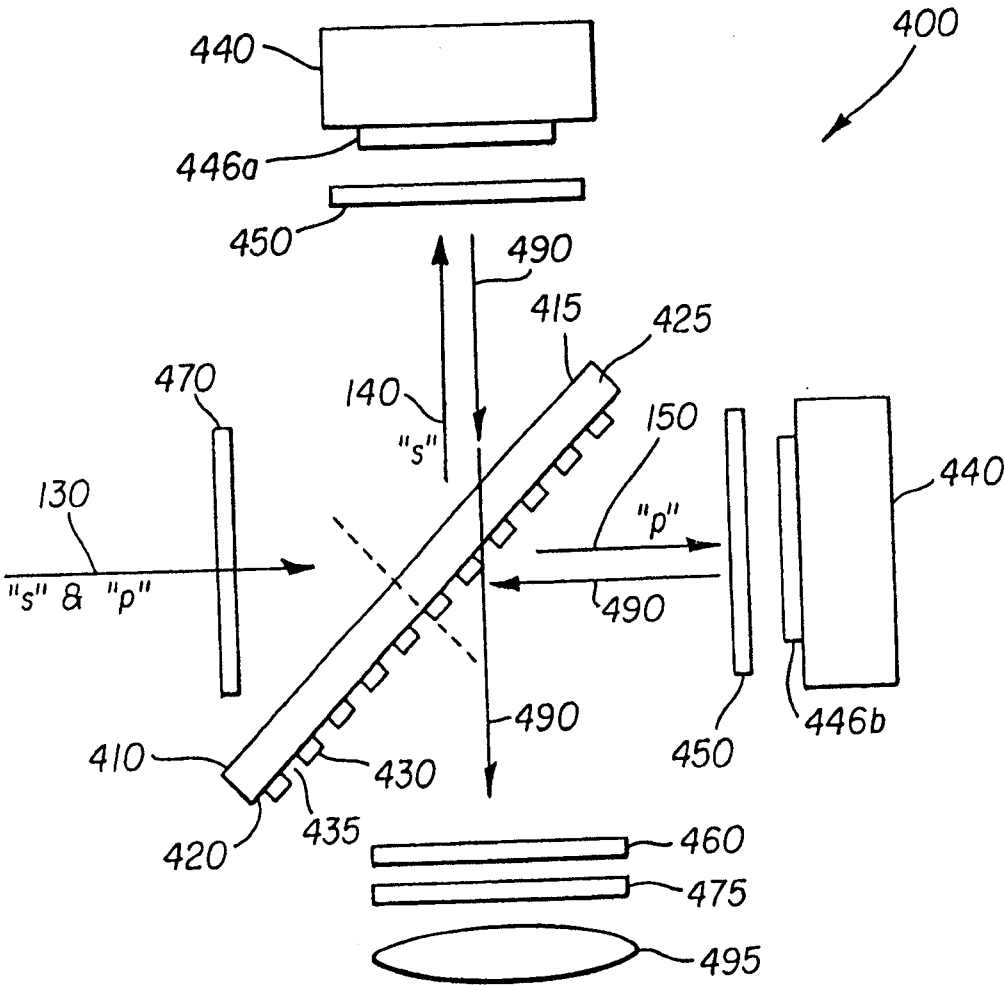


图 11c

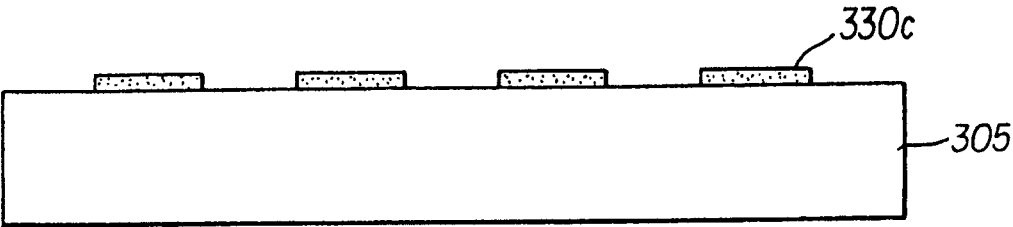


图 12a

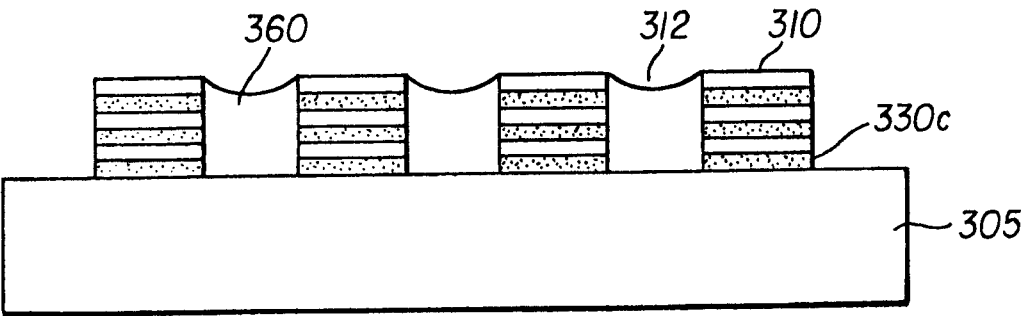


图 12b

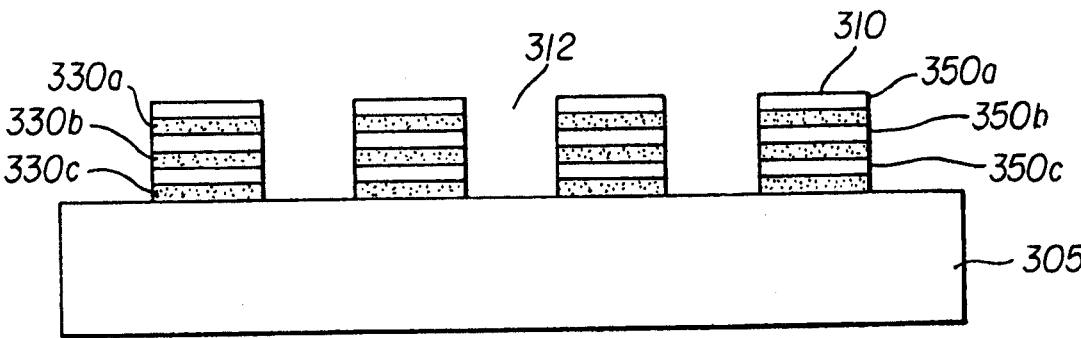


图 12c