



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102741671 B

(45) 授权公告日 2016.07.06

(21) 申请号 201080054366.7

G01J 3/12(2006.01)

(22) 申请日 2010.11.30

(56) 对比文件

(30) 优先权数据

61/265,231 2009.11.30 US

WO 2008/104928 A1, 2008.09.04,

EP 1967890 A2, 2008.09.10,

EP 1967890 A2, 2008.09.10,

US 5379065 A, 1995.01.03,

WO 2004106874 A1, 2004.12.09,

US 6016199 A, 2000.01.18,

CN 101476936 A, 2009.07.08,

CN 101535786 A, 2009.09.16,

CN 1442677 A, 2003.09.17,

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2012.05.30

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/EP2010/068575 2010.11.30

(87) PCT国际申请的公布数据

WO2011/064403 EN 2011.06.03

(73) 专利权人 IMEC 公司

地址 比利时勒芬

Rienstra J, Ballard M. Multispectral focal plane assembly for satellite remote sensing. 《Aerospace Conference, IEEE》. 1998, 第5卷第233-241页.

审查员 张婷

(72) 发明人 K·塔克 A·兰布雷切茨

L·哈斯佩思拉夫

(74) 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公

司 31100

代理人 姬利永

(51) Int. Cl.

G01J 3/26(2006.01)

G01J 3/28(2006.01)

权利要求书1页 说明书23页 附图37页

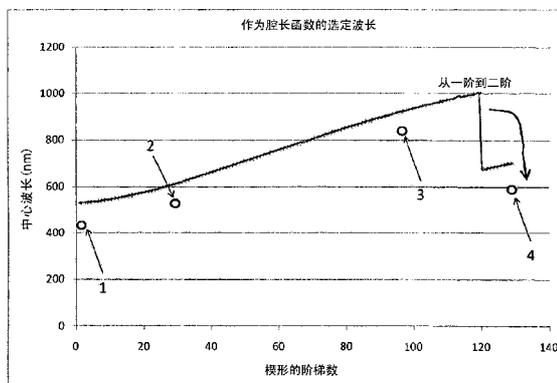
(54) 发明名称

用于光谱成像系统的集成电路

(57) 摘要

一种用于成像系统的集成电路,具有光学传感器阵列(40)和光学滤波器阵列(10),每个光学滤波器被配置为使一波长带传递至一个或多个传感器,光学滤波器阵列与传感器阵列集成,并且该集成电路还具有从传感器阵列读出像素值以表示图像的读出电路(30),不同的光学滤波器被配置为具有不同的厚度,以借助干涉传递不同的波长带,并允许波长光谱的检测。读出电路可以使得位于一个光学滤波器下的多个像素以并行读出。厚度可以跨阵列非单调变化。读出或后面的图像处理可包括波长之间的选择或内插,以实施光谱采样或移动,以补偿厚度误差。

CN 102741671 B



1. 一种用于成像系统的集成电路,所述集成电路具有光学传感器阵列和光学滤波器阵列,每个光学滤波器被配置为将一波长带传递到光学传感器的一个或多个上,所述光学滤波器阵列与所述光学传感器阵列集成,并且所述集成电路还具有从所述光学传感器阵列读出像素值以表示图像的读出电路,

光学滤波器阵列中的不同光学滤波器被配置为具有不同的厚度,以借助干涉传递不同的波长带,并允许波长光谱的检测,光学传感器阵列中的至少一些光学传感器在光学滤波器阵列中的同一个光学滤波器的下方安排成组,并且

用于所述组的读出电路包括两个或更多输出电路,其中每个输出电路耦合到所述组中的不同光学传感器,以使得所述组的多个像素能够在所述输出电路上并行读出,

所述读出电路具有波长选择器,所述波长选择器用于在不同光学滤波器的相应像素的读出信号之间选择或对其进行组合,以将输出调谐成对应于特定波长。

2. 如权利要求1所述的集成电路,每一个光学滤波器都具有作为跨所述集成电路的带的布局,与光学滤波器阵列中的相应一个光学滤波器相对应的光学传感器组具有延伸为相应带的布局。

3. 如权利要求2所述的集成电路,光学传感器组具有被配置成与带布局对应的两行或多行光学传感器的布局,每行光学传感器耦合到不同的输出电路。

4. 一种成像系统,具有如权利要求1或2所述的集成电路,以及外部图像处理部,其被耦合以接收表示图像的像素值并输出所接收图像的图像处理版本。

5. 如权利要求4所述的成像系统,被配置成通过所述集成电路和成像对象的相对移动,产生并存储对象的图像立方体,所述图像立方体具有x和y空间维度,以及光谱维度。

6. 如权利要求5所述的成像系统,被配置成采用 $\lambda$ 选择或 $\lambda$ 组合图像处理功能,以在光谱维度上二次采样所述图像立方体。

7. 如权利要求5所述的成像系统,被配置成采用 $\lambda$ 选择或 $\lambda$ 组合图像处理功能,以在光谱维度上移动所述图像立方体。

8. 如权利要求7所述的成像系统,被配置成根据所述光学滤波器阵列上的位置改变光谱移动量。

9. 如权利要求8所述的成像系统,根据所述光学滤波器阵列上的位置改变光谱移动量适于补偿下面中的任一个或多个:不同位置处光学滤波器厚度的制造变化、由于通过光学滤波器的光路的入射角的变化引起的失真、高阶去除以及来自其他光学组件的失真。

10. 如权利要求4所述的成像系统,还具有如下的任一个或多个:位于所述光学滤波器阵列之前的光路上的物镜、狭缝以及准直器。

11. 如权利要求4所述的成像系统,所述光学滤波器阵列被单片集成到所述光学传感器阵列上。

12. 一种操作如权利要求4所述的成像系统以产生输出图像的方法。

## 用于光谱成像系统的集成电路

### 发明领域

[0001] 本发明涉及一种用于成像系统的集成电路,该集成电路具有光学传感器阵列和光学滤波器阵列,还涉及相应的系统、方法以及计算机程序,特别是涉及一种高光谱成像(HyperSpectral Imaging,HIS)系统,包括应用驱动系统设计和集成以及制造工艺技术的多个方面。

### 背景技术

[0002] 现有高光谱成像系统的操作:

[0003] 高光谱成像涉及跨电磁波谱收集和处理信息的成像技术。人眼只能看到可见光,但是高光谱成像系统不仅能看到可见光,而且能看见紫外至红外。因此,高光谱传感器利用电磁波谱的较大部分观测对象,如以下网页所描述的:

[0004] [http://en.wikipedia.org/wiki/Hyperspectral\\_imaging](http://en.wikipedia.org/wiki/Hyperspectral_imaging)

[0005] 特定的对象会在该部分电磁波谱上留下独特的“指纹”。这些“指纹”称为光谱标记,并能够识别构成扫描对象的材料。这种成像系统的高光谱能力能够辨识不同类型的对象,这些对象在人眼看来可能是表现出相同的颜色。

[0006] 多光谱成像处理在分离且相对窄谱带处的若干图像,而高光谱成像处理在连续光谱范围内对窄光谱带成像。它可以对场景内的所有像素产生光谱。当具有覆盖VIS,NIR,SWIR,NWIR和LWIR的20个分离谱带的传感器被视为多光谱时,当另外一个也具有20个谱带的传感器覆盖从500nm到700nm并具有20个10nm宽的谱带时,它被视为高光谱。高光谱传感器收集信息作为一组“图像”。每个图像表示一电磁波谱范围并已知为光谱带。这些图像中每个都具有两个空间维度,如果一系列不同光谱带的图像有效地叠加从而形成立方体,那么第三个维度可以是光谱维度。这种三维高光谱立方体对于图像的进一步处理和分析是有用的表示。这些传感器的精度通常都是以光谱分辨率测量,该分辨率为被捕捉的光谱的每个谱带的宽度。如果扫描器拾取了大量相对窄的频带,那么即使仅在少数像素内捕捉到对象,也有可能标识所述对象。但是,除了光谱分辨率外,空间分辨率也是一个因素。如果像素过大,那么多个对象在同一个像素内被捕捉,变得难以标识。如果像素过小,那么每个传感器单元捕捉的能量较低,信噪比的降低使被测量特征的可靠性降低。

[0007] 目前的高光谱相机产生高光谱数据立方体或图像立方体,其由在场景的x-y平面内的2D图像层叠构成,其中层叠的每个图像包括不同频带或光谱带的信息。捕捉的光谱范围不限于可见光,可横跨红外(IR)和/或紫外(UV)。利用本质上为2D传感器的传感器,由高光谱成像器捕捉3D图像立方体。因此,需要使用一些形式的扫描,如图1所示,其示出了光谱维度在垂直方向延伸的立方体的透视呈现,立方体切片的4个视图a)到d)如下:

[0008] 顶视图(a)示出了需要捕捉的场景。左视图(b)示出了立方体的垂直切片,表示由线扫描器得到的图像:对场景的一个空间线捕捉所有的光谱带,从而产生1D视图。线扫描器或推扫(pushbroom)系统以并行的方式在所有光谱带内捕捉2D场景的单个线。为了覆盖所有场景的所有空间像素,这种类型的系统随后在时间上扫描不同的线,例如通过扫描器和

场景的相对移动。

[0009] 右视图(c)示出了水平切片,其示出了由凝视者获得的图像:在一个光谱带内捕捉完整的2D场景。凝视者或凝视系统(staring system)通过2D传感器阵列每次在单个光谱带内捕捉完整的场景,并且扫描不同的光谱带以产生3D高光谱图像立方体。

[0010] 底视图(d)示出了穿过立方体的倾斜切片或对角线切片,表示由混合线扫描器/凝视者得到的图像:完整的2D场景被捕捉,但是每个空间线处于立方体的不同高度,所以是不同的光谱带。在该情况下,获得了完整的空间图像,但是每条线位于不同的光谱带。在单个帧内,不同的光谱带被捕捉用于不同的空间线。为了利用对于所有空间线的所有光谱带捕捉完整的3D图像立方体,还需要组合的空间/光谱扫描,例如通过场景和2D传感器阵列之间的相对运动。

[0011] 已知高光谱成像系统的构造:

[0012] 高光谱成像系统或相机可由不同的分离组件构成,例如:用于接收入射电磁波谱的光学子系统,用于在接收的光谱内创建不同谱带的光谱单元,以及用于检测不同谱带的图像传感器阵列。光学子系统可由单个或不同透镜、孔径和/或狭缝的组合构成。光谱单元可由一个或多个棱镜,光栅,光学滤波器,声光可调滤波器,液晶可调滤波器等,或它们的组合构成。

[0013] 高光谱成像的主要优点在于,由于整个光谱是在每个点处获得的,操作者无需预知样品,并且后续处理允许数据集中的所有可用信息被开发。主要缺点是成本和复杂度。快速处理的计算机,灵敏的检测器,以及大数据存储能力都是分析高光谱数据所需要的。巨大的数据存储能力是必须的,因为高光谱立方体是大的多维数据集,可能会超过数百兆字节。所有这些因素极大地增加了获得和处理高光谱数据的成本。

[0014] 因此,目前的高光谱成像器或者作为研究仪器,因为它们太慢并且非常贵,或者被设计为特定的工业应用,由此缺乏灵活性。

## 发明内容

[0015] 本发明的目标是提供一种改进的设备或方法。

[0016] 第一方面提供一种根据权利要求1所述的用于成像系统的集成电路。

[0017] 这些特征的效果是从光学传感器阵列的读出可被加速,或者对于给定的读出速度可以使用更大的阵列。这种更快的读出可降低由传感器阵列和被成像对象之间的相对运动所造成的模糊,或者可以增加图像的分辨率或质量。传感器组可通过多种方式安排,例如间隔布置,或线性连接。如果需要,由传感器组的布置模式所产生的图像伪像可通过后续的图像处理来补偿。

[0018] 第二方面提供了一种根据权利要求5所述的用于成像系统的集成电路。

[0019] 光学滤波器的厚度沿着线进行改变,以在某些点增加而在其他点降低,这样的效果是使得相邻的光学滤波器都更厚,或者都更薄,以产生脊或谷,或者使得光学滤波器簇覆盖重叠的光谱带。

[0020] 第三方面提供了一种根据权利要求13所述的用于成像系统的集成电路。

[0021] 沿着条带进行厚度改变的效果是改进感测中的光谱精度或提高产出,或降低图像处理的需求,或者在给定的产出或精度下实现更大的阵列。

[0022] 第四方面提供了一种根据独立权利要求14所述的用于成像系统的集成电路。

[0023] 具有波长选择器的读出电路的效果在于它使得例如在光谱二次采样或光谱移动中对于各种可能的失真进行补偿成为可能,所述的波长选择器是用于在不同光学滤波器的相应像素的读出信号之间选择或内插。这又可以使得晶片的产出增加和/或成本降低,这是由于对于通过且因此被检测的波长的给定精度可以容许更多的厚度改变。另外一个方面提供了具有这种集成电路的成像系统。其他方面提供使用该系统的相应成像方法,以及用于光谱立方体图像处理的相应计算机程序。

[0024] 任意的附加特征可与上述方面中的任一个进行组合或结合。其他的优点对于本领域技术人员来说也是显而易见的,特别是相对于现有技术而言。在不脱离本发明要求保护的范围内可进行多种变形和改变。因此,应该清楚地理解出,本发明的形式只是说明性的,并不旨在对本发明范围的限制。

### 附图说明

[0025] 现在将要在参考附图的基础上以实例的形式来描述本发明如何实现其效果,其中:

[0026] 图1示出了高光谱图像立方体的获取。

[0027] 图2示出了使用法布里-珀罗波长选择的光学滤波器,(a)法布里-珀罗工作原理,多个光线被反射,在半反射镜之间的距离 $l$ 处以及入射角度 $\theta$ 下,基于光的波长会导致相长和相消的干涉。(b)高阶同样被选择,这导致阶选择问题。

[0028] 图3示出了滤波器光学参数的定义。

[0029] 图4示出了入射到楔形的入射角度对出射光瞳的尺寸的依赖关系。

[0030] 图5示出了法布里-珀罗干涉仪形式的光学滤波器对入射角度的敏感性。

[0031] 图6a-b示出了集成成像系统(a)截面(b)顶视图

[0032] 图7示出了法布里-珀罗干涉仪的光谱范围。

[0033] 图8示出了阶梯形结构的二进制或对数图案化原理。

[0034] 图9-a到e示出了制造法布里-珀罗干涉仪的示意性流程。

[0035] 图10-a到e示出了制造法布里-珀罗干涉仪的替换示意性流程。

[0036] 图11示出了滤波器特性处理容限的影响。

[0037] 图12示出了一种集成成像系统形式的集成电路,被设计用于容忍处理技术的容限。

[0038] 图13示出了具有几个带重叠的集成成像系统,其考虑了蚀刻容限。

[0039] 图14示出了一种集成成像系统,其中滤波器被重新排序。

[0040] 图15a-c示出了图像传感器对于滤波器性能的影响。

[0041] 图16示出了集成成像系统的读取。

[0042] 图17示出了在光学滤波器下具有多个传感器线的集成成像系统的读出。

[0043] 图18示出了与物镜组合为系统的集成成像系统。

[0044] 图19示出了与准直器进行组合的集成成像系统。

[0045] 图20示出了准直对光谱分辨率的影响。

[0046] 图21示出了集成成像系统中狭缝尺寸与光谱分辨率之间的关系。

- [0047] 图22a-b示出了孔径尺寸对于集成成像系统的光谱分辨率的影响。
- [0048] 图23, 24, 27和28示出了根据本发明实施例的集成电路的示意图。
- [0049] 图25和26示出了光学滤波器厚度的可选择轮廓, 其中具有增加或减少的厚度。
- [0050] 图29示出了根据实施例的成像系统的示意图,
- [0051] 图30示出了包括带楔形滤波器阵列的准直系统的成像系统的光学部件的侧视图, 以及
- [0052] 图31示出了具有带楔形滤波器阵列的集成电路的未准直系统的视图。

### 具体实施方式

[0053] 本发明将在参考特定附图的基础上以特定的实施例进行描述, 但是本发明并不限于这些, 而仅由权利要求所限定。所描述的附图仅仅是示意性, 而非限制性。在附图中, 某些元件的尺寸为了描述目的可能被放大, 并不是按照比例进行绘制的。

[0054] 其中在说明和权利要求中使用的词术语“包括”并不排除其他的元素或步骤。当涉及到单数名词所使用的“一”或“一个”等定冠词和不定冠词, 可包括多数个, 除非另外进行了特定的说明。

[0055] 权利要求中使用的术语“包括”不应该被理解为是对所列装置的限制; 它并不排除其他的元素或步骤。

[0056] 所描述接收器的元件或部件可包括编码在介质内的用于运行任意类型信息处理的逻辑。逻辑可包括编码在盘片或者其他计算机可读介质内的软件和/或编码在专用集成电路(ASIC), 现场可编程门阵列(FPGA), 或其他处理器或硬件内的指令。

[0057] 对软件的引用可包括由处理器直接或间接执行的任意语言的任意类型程序。

[0058] 对逻辑, 硬件, 处理器或电路的引用可包括任意类型的逻辑或模拟电路, 可为任意集成度, 并不限于通用处理器, 数字信号处理器, ASIC, FPGA, 离散的组件或晶体管逻辑门等等。

[0059] 对光学的引用旨在包含至少人类可见波长范围, 红外波长, 以及更短的延伸到紫外波带的波长, 其中对于光学滤波器厚度制造变化的灵敏度被着重说明。在一些实施例中, 光学滤波器和光学传感器可限于这些波长任意子集的范围, 这些子集例如仅可见波长, 或可见和更短波长。

[0060] 对光学滤波器阵列或光学传感器阵列的引用旨在包括1维线性阵列, 2维阵列, 例如矩形或非矩形阵列, 规则间距阵列, 以及非平面阵列。

[0061] 对集成电路的引用旨在包括至少管芯或封装的管芯(例如具有单片集成到传感器阵列上的光学滤波器阵列)或器件, 在该器件中, 光学滤波器阵列被分开制造并随后被增加到管芯或相同集成电路封装上。

[0062] 对波长光谱的引用旨在涵盖例如连续光谱或一系列几乎相邻的离散谱带。

[0063] 对并行读出的像素的引用旨在包含其中所有像素具有用于读出的分离线的实例, 以及其中给定部分平行安排, 两个或多个像素共享线并在不同时间启用输出的实例。

[0064] 另外, 说明书和权利要求中的术语第一, 第二, 第三等等只是用于区分相似的元素, 并非意欲表示顺序或时间次序。可以理解, 这些术语在合适的环境下是可互换的, 并且本文所描述的本发明实施例能够以本文描述或说明之外的其他顺序操作。

[0065] 另外,在说明书和权利要求中的顶,底,在……之上,在……之下以及类似的术语是用于说明的目的,并非意欲描述相对位置关系。可以理解,这些术语在合适的环境下是可互换的,并且本文所描述的本发明实施例能够以本文描述或说明之外的其他取向操作。

[0066] 说明书中提到的“一个实施例”或“一实施例”的表示与该实施例相关地描述的特定特征,结构或特性至少包含在本发明的一个实施例中。因此,说明书中各处出现的语句“在一个实施例中”或“在实施例中”并非意欲指向同一实施例,但是也可能指的是同一实施例。另外,特定的特征,结构或特性可以任意合适的形式在一个或多个实施例中进行组合,这对本领域普通技术人员就本公开来看是显而易见的。

[0067] 相似的,可以理解,在本发明示例性实施例的描述中,为了实现使公开简单明了以及便于理解各种发明方面的中一个或多个,本发明的各种特征有时是在单个实施例或其附图、描述中组合在一起。然而,本公开的方法不解释为反映要求保护的发明要求比准确陈述在每个权利要求中的特征更多的特征的发明。相反,如下面的权利要求所反映的那样,发明方面在于少于单个前述公开实施例的所有特征。因此,详细说明之后的权利要求应当认为是包括在该详细说明中,每个权利要求就其本身而言可作为本发明单独实施例。

[0068] 另外,虽然本文描述的一些实施例包括了一些特征,但是并未包括其他实施例中的另外一些特征,但是对于不同实施例中特征的组合落在本发明范围内并形成不同的实施例,这对于本领域技术人员来说是可以理解的。例如,在下面的权利要求中,所要求保护的实施例中的任何一个都能够被用于任意的组合中。

[0069] 本文所提供的说明中,阐述了很多具体的细节。但是,可以理解,本发明的实施例可在没有这些具体细节的情况下实现。在其他实例中,已知的方法、结构和技术并未详细示出,这是为了便于说明书的理解。

[0070] 现在,将通过本发明几个实施例的详细描述对本发明进行描述。可以理解,在不脱离本发明技术教导的前提下,根据本领域技术人员知识可构造本发明的其他实施例,本发明的范围仅仅是由附加的权利要求所限定的。

[0071] 对由实施例解决的一些问题的介绍。

[0072] 期望一种具有图像传感器阵列的组合光谱单元。这种集成组件需要与光学子系统进行组合以形成完整的高光谱相机系统。这样的高光谱成像系统应该是紧凑的,能够以低成本制造并且是可重新配置的。在某些方面,工艺技术方面与系统集成和图像处理技术组合以减轻集成电路制造工艺的要求。

[0073] 在一些实施例中,公开了一种包括具有光谱单元的集成电路的高光谱成像系统,其中光谱单元与形成图像传感器阵列的光学传感器阵列单片集成在一起。

[0074] 在优选的实施例中,使用半导体处理工艺将光谱单元与图像传感器阵列进行集成,即:使用半导体处理工艺和处理步骤将光谱单元在包括图像传感器阵列的衬底上进行后续加工。这样半导体工艺的例子是互补金属氧化物半导体(CMOS)处理,借此图像传感器阵列是CMOS传感器,电荷耦合器件(CCD)处理,借此传感器阵列是CCD传感器。这些制造技术是理想地适合于生产集成电路。这样的单片集成使得制造成本低廉并且提供更高的性能,这是由于不需要界面层来将光谱单元附连到衬底上。因此,显著降低杂散光影响。

[0075] 对于大规模的技术时代,可以选择以更低成本的技术来生产具有例如130nm大临界尺寸(CD)的imec传感器,导致图像传感器阵列的更大像素以及更小空间分辨率。

[0076] 可替换地,选择以更高成本技术来制造图像传感器阵列,其具有例如45nm的较小临界尺寸(CD),导致图像传感器阵列的较小像素和较高空间分辨率。

[0077] 图像传感器阵列可以是前照射传感器,借此在包括传感器的衬底的顶部对光谱单元进行后续处理。可选的,该衬底可在之后进行减薄,以减小衬底的体积,从而留下包含单片集成有图像传感器阵列和光谱单元的薄片。可替换地,图像传感器阵列可以是后照射传感器,借此包括传感器的衬底首先从背侧向前进行减薄。在经减薄衬底的背侧,光谱单元被后续处理。

[0078] 优选的,光谱单元是法布里-珀罗滤波器的顺序1维或2维阵列。该阵列可以是单调变化的,借此法布里-珀罗滤波器的厚度从阵列的一侧到另一侧单调减少。可替换地,该阵列也可以是非单调的,其中法布里-珀罗滤波器的厚度从阵列的一侧到另一侧是非单调变化的。公开一种制造这种法布里-珀罗滤波器的方法。

[0079] 虽然可以制造任意阶数的法布里-珀罗滤波器,但是优选在图像传感器阵列上形成仅第1阶法布里-珀罗滤波器,这样可以降低移除和/或阻挡高阶组分的复杂性。因此,高光谱系统的操作复杂性降低了。由于光谱单元在包括传感器的衬底上被直接后续处理,所以光谱单元可被制造的很薄,并能够制造第1阶法布里-珀罗滤波器。将高光谱成像与第1阶法布里-珀罗滤波器单片集成作为光谱单元通常不需要光学子系统内的聚焦透镜。

[0080] 公开包括光学子系统和单片集成的光谱单元和图像传感器阵列的完整高光谱成像系统的实例。这些完整的成像系统利用单片集成的优点,允许光学子系统的设计自由度。

[0081] 另外,还公开根据第一方面实施例的高光谱成像系统的设计和操作方法。这些设计和操作方法利用单片集成成像系统的制造特点,从而能够容忍更大的制造窗口。

[0082] 在一些实施例中,使用光谱过采样来校正制造技术中的工艺容限和缺陷。高光谱成像系统被设计为比目标应用的要求具有更高的光谱分辨率和更多的谱带。这样设计的成像系统的法布里-珀罗滤波器对于引入的工序容限具有降低的灵敏度,特别是对于由一阶法布里-珀罗滤波器的严格规范引入的容限。另外,这样的设计使得可以通过在运行时间调节光学系统来以可配置的方式降低光谱分辨率以增加速度。因此不再需要准直器和狭缝,得到成本更低的高光谱成像系统。

[0083] 在一些实施例中,范围延伸被用于校正制造技术中的过程容限和缺陷。顺序的一维或二维法布里-珀罗滤波器阵列是以特定的非单调次序,范围扩展以及有意的步骤重叠/再现进行设计。这样设计的成像系统的法布里-珀罗滤波器对于引入的过程容限具有降低的灵敏度,特别是对于由一阶法布里-珀罗滤波器的严格规范所引入的容限。此外,滤波器的设计(例如限定滤波器腔长的厚度)也可考虑特定滤波器在芯片上的位置,以降低对于入射电磁波谱入射角度变化的依赖性。

[0084] 单片集成:

[0085] 滤波器在图像传感器阵列的顶部被后续处理并且每一阶都与图像传感器阵列的一个或多个行或列对准。楔形的每一阶过滤掉不同的光谱带。结果,传感器和楔形滤波器的组合可被用于推扫、线扫描器类型或线扫描器/凝视器混合类型的高光谱成像器。高光谱相机系统可包括在前述定义的图像传感器阵列上后续处理的光学滤波器,该系统还可以包括物镜和/或狭缝和/或准直器。

[0086] 集成光谱模块是形成该相机子系统的集成电路,并且由集成在图像传感器顶部的

不同光学线滤波器构建。现有的楔形滤波器是分离的组件,其在制造后组装到图像传感器上。作为本公开一个方面的一部分的单片集成的结果,其中滤波器在成像器的顶部被直接后续处理,在滤波器和图像传感器之间的杂散光量可以显著降低。结果,相对于离散集成的滤波器,光谱分辨率得到了改进。优选使用例如CMOS成像器或CCD成像器之类的半导体成像器来单片集成法布里-珀罗滤波器。

[0087] 所提出的高光谱模块是可单片集成的,意味着滤波器结构可在图像传感器的顶部直接后续处理。这样,与单独制造然后再与成像器组装的滤波器结构相比,这种集成具有非常重要的优点和结果。单片集成的优点包括:通过标准的CMOS生产步骤降低成本,降低了杂散光,允许一阶设计并且无需聚焦透镜。与其中滤波器结构被单独制造然后与图像传感器组装进高光谱模块的混合集成相比,该提出的方法具有一些非常明显的优点。

[0088] 首先,与滤波器结构被单独制造然后与图像传感器被组装进模块的混合集成相比,将两个生产序列组合为一个组合流程使得生产总体上简化并降低了成本。特别是对于这种滤波器的情况,因为滤波器结构的生产后只要求CMOS兼容的制造步骤,像沉积,图案化以及刻蚀。通过将步骤增加到图像传感器的正常生产流程中,避免昂贵的,易于产生错误的以及劳动力密集的组装步骤。例如,对于在布拉格层叠中具有具有氧化物和非晶硅的3层和在腔内具有127阶的滤波器,大约需要50次循环(lot-turn),这相对于标准的CMOS成像器增加约20%的成本。如果可以在同一工具中一层接一层地沉积不同的层,那么对于顶部和底部反射镜层的沉积的循环数量可以进一步减少。

[0089] 第二,通过将滤波器结构直接制造在成像器像素的顶部,光子可直接穿过滤波器进入下面的像素。对于前照射传感器来说,光子会首先穿过金属化层和一些介电层。如果滤波器结构被单独制造并层叠到图像传感器的顶部,那么在这两个结构之间总会存在非功能层或间隙。

[0090] 甚至当滤波器和衬底的组合被翻转而滤波器位于支撑衬底和图像传感器之间时,在入射到图像传感器光电二极管之前,光首先会穿过衬底,然后穿过滤波器并最终穿过薄的空气或胶间隙层。当滤波器结构与图像传感器进行组合时,它们彼此层叠在顶部并在不同层之间具有空气或胶,这种介于滤波器结构和下面像素行之间的额外衬底总是会产生一定的性能降级,这是因为:

[0091] 1. 串扰

[0092] 从某个像素上方的滤波器出射的光子可穿过间隙并落入相邻的像素内。当通过将滤波器直接后续处理到像素上而降低或完全移除间隙时,上述的效应将被极大地降低。但是由于进入到一个像素上方的滤波器内的光子还会继续传播穿过滤波器并落入相邻的像素内,所以滤波器本身的厚度会引起一些串扰。通过设计更薄的滤波器以及控制入射角度可降低这种效应。

[0093] 2. 杂散光

[0094] 如果折射率不匹配(参见下面的方程8),额外的非功能层会导致其界面处的额外反射并因此会增加上述讨论的串扰顶部的额外杂散光。对于不同的入射角度,通过减少滤波器与图像传感器的像素阵列之间的有效距离 $S$ ,可以降低杂散光。对于较小的距离 $S$ 来说,例如1nm,杂散光( $D$ )传播的距离正好处于普通的像素尺寸(也即1到15 $\mu\text{m}$ )内。对于较宏观的集成距离来说情况则并非如此,例如1mm的衬底,在这种情况下,传播光距离 $D$ 横跨几十到几

百个像素,这导致了空间和光谱分辨率的严重恶化。在一些情况中,距离 $D$ 可变的很大,此时就需要附加的聚焦透镜来将光聚焦回像素内。

[0095] 3. 由于杂散光顶部的寄生法布里-珀罗:

[0096] 另外,正如现有技术所显示出的,光电二极管顶部的介电堆叠以及金属反射部分光。连同由异质集成和腔底部镜导致的间隙一起,这形成了与实际法布里-珀罗干涉的寄生法布里-珀罗。这可以通过单片集成来优化,因为成像器内的介电层变成了底部布拉格层叠的一部分,其由相似材料(例如氧化物)制造并且对于这些层的宽度不非常敏感。

[0097] 这种问题在生产后组装到图像传感器上的混合过滤器结构上表现的很严重的一个重要原因在于这样一个事实,其中非常薄的滤波器结构单独地需要额外插入(透明的)支撑结构以机械支撑滤波器并能够进行堆叠。当这个层被置于滤波器和图像传感器之间时,该层以及位于支撑层和图像传感器之间的附加空气或胶间隙就组成了非功能间隙。当将支撑结构置于顶部时,它还会产生额外的反射并需要独立进行优化(例如通过增加抗反射涂层),但是在滤波器和图像传感器之间还是会存在空气或胶层。通过在图像传感器的顶部直接后处理滤波器结构,所有这些都是多余的,正如上面所讨论的。

[0098] 第三,与非常精确的CMOS制造技术组合的单片集成使得滤波器结构的构造具有小得多的厚度。正如后面将要讨论的,法布里-珀罗滤波器结构被设计为通过调谐腔长来选择特定的波长。滤波器越薄,对入射角越不敏感,因为对非垂直的入射,滤波器的内反射覆盖较短距离。较厚的滤波器会经历传播光束的更大位移 $D$ ,范围超过10mm。这会导致空间和光谱分辨率的严重降低,因为穿过滤波器的光会落入其他行或列的像素上。因此,这种宏观滤波器需要聚焦透镜。而薄的滤波器对此的灵敏度要小得多,并且位移 $D$ 在大多数情况下都小于像素尺寸,例如,对于除了最大的入射角度和最小像素尺寸之外的所有情况来说,优选在1-10nm范围。与滤波器结构和图像传感器的混合集成进行组合,传统的生产技术不能达到制造一阶法布里-珀罗滤波器所要求的精度。因此,只能使用高阶的法布里-珀罗结构。在这种情况下,必须向模块中增加二向色或其他滤波器以只选择需要的阶。这产生了额外的能量损失,额外的成本并因此降低了整个系统的优化性。最后,当法布里-珀罗滤波器被置于距图像传感器一定距离时,滤波器的输出会显示出相差,当使用透镜进行聚焦时相差会以同心圆的形式呈现出来。同心圆是不同干涉波的结果,其中在不同的位置会呈现相长或相消干涉。对于宏观滤波器,因为滤波器内的反射覆盖的是大距离,因此需要聚焦透镜,以便将所有这些反射聚焦回一个像素。在此公开的集成成像模块中,滤波器结构和图像传感器之间的距离非常小并且由于滤波器被设计为一阶,所以不再需要聚焦透镜。薄的滤波器不需要聚焦透镜,因为内反射覆盖了小得多的距离,对于该滤波器来说,所有的光会落入一个像素内(在大量的内反射后,光线中超出单个像素尺寸剩余的能量可以忽略不计)。由相位差造成的同心圆是还会存在,但是全部会被聚焦在同一像素内部,并且它们的效果都会全部的集中到那个像素的输出中。

[0099] 在有源IC(在该情况下是图像传感器)的顶部的滤波器结构直接后续处理应当与该IC的污染、机械、温度限制以及其他的限制相兼容。这意味着例如制造滤波器使用的所有步骤不能使用会对下面的图像传感器造成损伤的材料或处理步骤。

[0100] 正如将在下面将要讨论的,考虑到CMOS的生产环境,最重要的限制之一是对可用材料的约束。在提出的滤波器中,材料选择被执行成使用标准材料,该材料与标准的制造过

程是完全兼容的。但是有些材料则是不能使用的,例如金或银,因为它们易于扩散进入不同的层中以及进入到工具当中,并因此对于当前、甚至后面的处理步骤产生负面影响。在一些情况中,当沉积是在正常的生产线之外进行的并且当所述工具只用于该目的时,则这样的层只能作为最后步骤(顶层)。这仅能作为最后一步执行,因为在该操作之后晶片不能进入正常流程内。与材料选择相关的另一限制是可用于加工的温度预算或温度窗口。需要在不损伤图像传感器的情况下实现后续处理。为了防止损伤,处理步骤的最大温度不应超过特定最大值,例如400摄氏度。这同样限制了材料的选择以及可用于该设计的结晶度。相对于混合方法,其中图像传感器和单独制造的滤波器结构后续被组装到模块内,此处的自由度更少。在单片集成的情况下,在贯穿整个设计当中都需要考虑这些限制。如果在图像传感器本身的设计当中可极性特定的设计选择,为例缓解滤波器处理上的限制(例如可提高后续处理的允许温度),则可以将这些考虑在内。此时,这导致模块级的优化问题,而非分别针对图像传感器和滤波器结构。总是对滤波器结构施加约束,因为它后续图像传感器的顶部被处理。

[0101] 光学滤波器

[0102] 图像传感器的每个像素可具有其自己的、对一个特定波长敏感的光学滤波器。传感器上不同光学滤波器的组织依赖于它们的用途。线扫描器要求同一直线上的每个像素具有相同的波长选择性,在这种情况下,它被称为线滤波器。存在不同类型的滤波器。本公开中使用的类型为法布里-珀罗干涉仪。

[0103] 法布里-珀罗滤波器:

[0104] 图2示出了法布里-珀罗波长选择。(a)法布里-珀罗工作原理,多个光线被反射,基于光波长、半反射镜之间的距离 $l$ 以及入射角 $\theta$ ,会产生相长或相消干涉。(b)更高的阶数也被选择,这导致阶选择问题。滤波器的操作是基于已知的法布里-珀罗原理,其中每一阶的高度被调谐到被过滤的光谱带。每一阶形成共振腔,其共振频率由阶的高度确定。在腔的顶部和底部,设置有半透明的反射镜以部分地反射光线。由于反射,引入了光程差,这会导致相长或相消的干涉(依赖于入射波长),如图2a所示。

[0105] 法布里-珀罗滤波器由透明层(被称为腔)构成,在该透明层的每一侧具有两个反射面设置。反射面的透明度和反射率必须关于法布里-珀罗滤波器的目标波长范围来考量。作为波长的函数,光的透射在相应于腔共振的中心波长周围显示出窄峰。如图2a所示,腔内的光被多次反射,对于穿过滤波器的光,产生光程差和相移,输出端的多个光线导致依赖于腔内引入的相移的干涉。很多的干涉光线导致强选择性的光学滤波器,其透射函数由方程1给出。

$$[0106] \quad T_e = \frac{T^2}{1 + R^2 - 2R \cos \delta} \quad (1)$$

[0107] 引入的相移 $\delta$ (对于入射角 $\theta$ )等于:

$$[0108] \quad \delta = 4 \frac{\pi}{\lambda} \cos \theta \quad (2)$$

[0109] 当相移等于0或2的倍数时就会发生相长干涉。在这种情况下,方程1的分子等于分母,透射率为100%。方程3描述了法布里-珀罗滤波器的透射率与腔长、入射角以及腔折射率的函数关系。从这个方程中,法布里-珀罗滤波器可通过改变腔长而被设计为用于特定的

波长。在相长干涉中,方程1中的分子等于分母,透射率为100%。方程3给出了透射率为100%的波长与腔长、入射角以及腔折射率之间的函数关系。在这个方程中,通过改变腔长 $l$ ,法布里-珀罗滤波器可被设计用于特定的波长。

$$[0110] \quad m\lambda = 2nl\cos\theta \quad (3)$$

[0111] 法布里-珀罗滤波器的中心波长是唯一重要的光学参数。由于当相移等于2的倍数时,都会发生相长干涉,多个波长(也称为高阶)将会通过滤波器。如图3所示,滤波器的两个透射峰之间的波长间隔称为自由光谱范围。这个参数越大,与高阶波长相关的问题发生得越少。被设计为用于一阶波长的法布里-珀罗干涉仪能够提供最大的自由光谱范围。的确,对于700nm的一阶中心波长,自由光谱范围为350nm,其二阶在350nm处。如果一阶中心波长为1400nm,在二阶选择700nm,三阶为466nm,对于700nm来说,这将自由光谱范围减少至233nm。第二个参数是滤波器质量,它被定义为相对中心波长的滤波器带宽。该带宽由滤波器的FWHM或半高宽表示,它被定义为二分之一最大透射率处的通过带带宽,如图3所示。同样用于表示滤波器质量的第三个参数是法布里-珀罗干涉仪的精细度 $F$ ,它由方程4中的自由光谱范围 $\Delta\lambda$ 与FWHM $\delta\lambda$ 之间关系定义。对于固定的自由光谱范围,更高的精细度将自动导致较低的FWHM或更好的光谱分辨率(看下文)。如方程5所示,精细度只依赖于反射表明反射率。对于相同的自由光谱范围,反射率越高,光学滤波器的精细度越高、带宽或FWHM越窄。

$$[0112] \quad F = \frac{\Delta\lambda}{\delta\lambda} \quad (4)$$

$$[0113] \quad F \approx \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad (5)$$

[0114] 图4示出具有相等的腔长但是不同的反射面的两个法布里-珀罗干涉仪。入射角度为 $0^\circ$ 并且腔内填充有折射率为1的空气。这会产生两个不同的滤波器,它们对相同的自由光谱范围具有不同的半高宽。两个滤波器的腔都是450nm,产生的中心波长为900nm,二阶波长为450nm。这两种不同的实施方式对于相同的自由光谱范围来说分别具有低(2)和高(1)的精细度,并分别造成低(2)和高(1)的FWHM。

[0115] 法布里-珀罗滤波器的第四个参数是光谱分辨率,即能够分辨的相邻两个光谱带的中心波长的最小差。这个参数依赖于中心波长的位置和滤波器的带宽。如果它们透射特性中的峰值在半最大值(也即3dB点处)处或之下相交,即位于FWHM被计算的位置处或之下,则两个相邻的光谱过滤带被认为是可区分的。当单个滤波器的位置与完整波长范围的采样相关时,假设腔长在处理过程中可被精确控制并且能够定位下一个光谱带以使其3dB点与另一3dB点实际相交。如果感兴趣的光谱范围是以线滤波器的范围进行采样的,线滤波器中的每个都被定位为它们的透射谱带相交在3dB点,那么在假设两个相邻滤波器的FWHM相同的情况下,高光谱模块的光谱分辨率就等于光学滤波器的FWHM。

[0116] 如方程3和图5所示,干涉仪的中心波长依赖于光的入射角。对于法布里-珀罗滤波器,这种依赖是余弦关系,其在 $0^\circ$ 角附近不是非常敏感,即光垂直于光学滤波器表面的情况。这与光栅不同,光栅的波长选择依赖是正弦关系,其对 $0^\circ$ 角附近的变化非常敏感。法布里-珀罗干涉仪能够容忍入射角的微小变化。该特征可以在系统级别上用于提高速度,灵敏度等等。

[0117] 光学滤波器的设计

[0118] 反射面:

[0119] 腔两侧反射面的性能和设计对于法布里-珀罗光学滤波器的性能来说是至关重要的。只有使用高反射镜才能得到具有高精度度并因此获得良好光谱分辨率的法布里-珀罗光学滤波器。反射镜的第二个重要参数是它们的吸收率,因为这决定着滤波器的效率。如果法布里-珀罗光学滤波器的整个范围已经被构建在特定的波长范围上,那么这两个参数(反射率和吸收率)在该光谱范围上尽可能保持不变是非常有益的。在这种情况下,通过仅仅改变法布里-珀罗滤波器的腔长而镜层和材料保持不变,就可以覆盖/采样该波长范围。所选择的波长范围必须与所选择的图像传感器的灵敏度相匹配,图像传感器是该模块的第二组件。

[0120] 提出单片集成的现有解决方式使用特定的非标准传感器设计,这增加了成本或降低了速度。切换至CMOS传感器上的CMOS兼容处理步骤会产生集成问题,因为由于污染以及温度预算,这导致例如材料选择的结果。类似银之类的金属不能用于底部镜。现有技术中的法布里-珀罗滤波器需要使用Al,这会导致滤波器质量或光学吞吐量(速度)的严重降低。介电层叠是优选的,但是污染水平和温度预算限制了材料选择。适于工艺的材料需要具有正确n/k组合以在选定频率范围内获得所需要的光谱范围。具有低n材料的介电材料的例子是SiO<sub>2</sub>,其还可进行调谐以进一步将n降低。高n材料的例子为非晶硅,由于工艺参数的调节,例如温度和氢组分,可具有降低的吸收系数。硬氧化物具有更好的容限,但是不能使用,因为需要的温度比标准的CMOS处理所允许的温度更高。

[0121] 替换性镜系统的例子是(分布式)布拉格层叠,其是通过将两种不同类型的介电材料组合到两种或更多种材料的交替层叠中形成的:一个具有低折射率而另一个具有高折射率。布拉格层叠的第一特性就是其带宽,如方程6所给出,即在光谱范围 $\Delta\lambda_0$ 上,反射率基本上保持不变。

$$[0122] \quad \Delta\lambda_0 = \frac{4\lambda_0}{\pi} \arcsin\left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}\right) \quad (6)$$

[0123] 从这个方程可以看出,带宽 $\Delta\lambda_0$ 既依赖于中心波长 $\lambda$ 也依赖于所选择材料的折射率 $n_1$ 和 $n_2$ 。为了能够在特定中心波长附近覆盖宽光谱范围(例如700nm附近的600nm光谱范围),需要 $n_1$ 和 $n_2$ 之间大的差。在标准的半导体制造工艺中使用的材料列表中,SiO<sub>2</sub>是最低折射率(1:46)和很低吸收系数的材料之一。这两个参数在非常大的光谱范围上都是稳定的。对于中心波长700nm附近的600nm光谱范围(VNIR范围),这意味着布拉格层叠中的第二材料的折射率理想地等于6:4,而吸收系数尽可能接近0。在标准的IC制造材料中没有这样的理想材料,能够与工艺流程相适应,因此需要调节现有材料以获得更好的折射率以及更低的吸收率。通过多孔化(与折射率为1的空气进行混合)可将SiO<sub>2</sub>的折射率降低。对于相同的光谱范围和中心波长,这就需要等于5的更好的可制造折射率。材料工程的另一例子是通过改变像温度、氢浓度之类的工艺(沉积)参数来降低非晶硅的吸收系数。

$$[0124] \quad R = \left[ \frac{n_0(n_2)^{2N} - n_s(n_1)^{2N}}{n_0(n_2)^{2N} + n_s(n_1)^{2N}} \right]^2 \quad (7)$$

[0125] 如方程7所示,这种布拉格镜的反射率R可易于通过介电层对的数量进行控制。层

数越多,那么具有该特定镜的法布里-珀罗滤波器的反射率和精细度越高。在方程7中, $n_0$ 是周围介质的折射率, $n_s$ 是衬底的折射率, $n_1$ 是第一材料的折射率, $n_2$ 是第二材料的折射率, $N$ 是布拉格层叠中对的数量。

[0126] 分布式布拉格层叠的一个实例是 $\text{SiO}_2$ 和工程化的非晶硅的组合,其中心波长在700nm附近,范围从540nm到1000nm。第二个实例是 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{SiGe}$ 的组合,其中心波长为1500nm,带宽为1000nm,例如从1000nm到2000nm。使用布拉格层叠作为镜层的结果是在光反射期间的附加相移。这个相移使得中心波长从方程3给出的中心波长偏移,但是可使用例如仿真工具来简单地确定这个偏移。

[0127] 楔形滤波器

[0128] 图6a-b示出的楔形滤波器是由阶梯形结构构成的光学滤波器。这些阶梯以高度增加的方式进行排序,在这种情况下,它们形成了单调楔形结构。但是,这种排序并不是必须的,即非单调的结构也是可以的。滤波器在图像传感器的顶部被后续处理,即单片集成,并且每个阶梯与图像传感器多行或多列中的单个行或列相对准。楔形滤波器的每一阶梯过滤不同的光谱带。结果,传感器和楔形滤波器的组合可被用于推扫、线扫描器类型或线扫描器/凝视器混合型的高光谱成像器。

[0129] 现有的楔形滤波器是倾斜结构而非阶梯形结构。由于其较低的制造复杂性,直到现在还在使用倾斜结构。但是,它们仅仅是期望滤波器的近似,期望的滤波器应该对旨在感测相同光谱带的每个传感器像素组具有恒定的高度。该组可被设置为行或列或任意其他的顺序。在本说明书的其他部分中,假设感测相同光谱带的像素被设置为行或列。因此,楔形滤波器的优选结构为阶梯结构,其中每一行或每一列(或组)的像素被不同高度的法布里-珀罗滤波器所覆盖。这种台阶形结构对于每一(每组)行/列产生不同的滤波器特性以及不同的选定波长,从而以这种方式产生高光谱成像器。

[0130] 上述的滤波器的每一阶梯可排序为高度逐渐增加从而形成一个楔形。该滤波器每一阶梯的高度被调谐为经过滤的光谱带。

[0131] 法布里-珀罗光学滤波器的中心波长可以通过使用方程3来确定,并且通过改变腔长 $L$ 和/或光的入射角 $\theta$ 和/或腔内材料的折射率 $n$ 来进行调谐。

[0132] 通过在一个方向( $x$ 或 $y$ )上改变传感器上的腔长 $L$ 同时保持第二维度不变,这种可变腔允许建立用于不同波长的线滤波器。通过改变腔长,有可能保持腔材料(和其折射率)不变。传感器上的不同线对于不同的波长敏感。使用方程3,对于给定的光谱分辨率,可以计算相邻线之间的高度 $H$ 差。图6给出了一种实现方式,其中在不同的阶梯之间阶梯高度相同的情况下,在传感器上线性改变腔长(需要说明的是,为了说明的目的,阶梯之间的高度差被放大)。不同阶梯的宽度 $W$ 依赖于光谱带的数量/光谱分辨率以及传感器的宽度。

[0133] 这个实施例可简单的通过二元掩模来实现,这在后面将进行说明。图7示出了一种实现方式,其说明了选定波长在整个传感器上的变化。在图7的左侧,滤波器的特性对具有中心波长的线滤波器示出,其具有非常低的透射率,因为所使用的镜层的反射率还未在这个波长范围内进行优化。中心波长逐渐增加以增加波长,在阶梯20处(约600nm)透射率会有大的增加,因为布拉格层叠的反射率达到了目标性能。中心波长进一步增加到阶梯120附近的1000nm,则在阶梯95处会出现第二阶。出现第二阶是由于被设计为用于波长 $\lambda_j$ 的法布里-珀罗滤波器同样会透射 $\lambda_j$ 倍数的入射波长(被称为高阶)。但是,只考虑落在法布里-珀罗滤

波器和下面图像传感器都具有合理效率的波长范围内的高阶波长。

[0134] 用于改变腔长的优选方法会产生与在处理过程中引入结构变化相关的问题。再次参考图7,在VNIR范围,受影响的波长范围大约从800nm向前。由于典型的CMOS传感器对大于1000nm的波长不敏感,图7示出在1000nm以上透射率有下落,只有第二阶能够透射,图7示出回落到700nm的选定波长。这个波长选择的第一和最后一个区域看上去只捕获了不感兴趣的信息,因为该滤波器在这些波长区域中的透射太低或只记录第二阶信息。但是,当在处理过程中引入容限时,这些区域能够使得有效光谱范围向左或右移动,从而产生经过滤波长范围在任一方向的整体移动或在不同管芯之间产生变化。

[0135] 制造

[0136] 一维或二维法布里-珀罗滤波器的制造方法可包括二元或对数的台阶构造。楼梯结构的一种简单实现方式是使用连续的图案化和刻蚀步骤,这要求大量的处理步骤以产生k阶的台阶,k一般大于50。通过使用所谓的二元或对数图案化方式,所需要的阶梯数可减少为 $\log_2 k$ ,如图5示出。

[0137] 做为二元制图案化的结果,仅仅使用10个图案化阶梯,可构建1024阶梯。

[0138] 为了控制加工成本,特别是为了控制产生具有不同厚度的不同线滤波器所需要的刻蚀步骤,可使用如图9a-e或图10a-e所示的诸如二元或对数掩模之类的技术。为了说明如何通过反转制造的掩模光学滤波器产生不同的形貌,在10e中相同的工艺步骤给出相同的参考标记。为了在不增加模块成本的情况下重新排序线滤波器,仍然应该满足对数掩模要求。但是,通过反转一些正常二元掩模,有可能实现这种重新排序或非常接近同时仍然能够实现目标,并且仅使用一维重新排序,这对于本领域技术人员来说是显而易见的。但是,这种简单的步骤重新排序只会在垂直于线滤波器的方向上影响入射角。实际上,这会在波长范围的两侧产生更加平衡和更高的灵敏度,但是仅仅是在传感器的中部。这对很多应用仍是非常有用的,特别是当最感兴趣的区域位于被扫描图像的中心时。

[0139] 为了对第二维进行补偿,即沿着线滤波器的长度,需要额外的工艺步骤,这会引入成本折衷。如果能够刺激额外的成本,通过在第二维上增加额外的变化可补偿平均角度依赖。通过在线滤波器的方向上改变腔长,平均入射角变化的影响可以最小化。对于这种技术,需要额外的刻蚀步骤,并且最终的腔在平行于线滤波器长度的方向上会具有改变的厚度。

[0140] 在本应用中,可使用非单调上升(或下降)的楔形以消除刻蚀中的错误,。非单调的特征来自于刻蚀楔形的一个阶梯比所需时间短,这就会导致该阶梯变高。除了一些地方,该结构是连续下降的。参见在下面描述的图24、25或26中的例子。

[0141] 同样有用的是还可以配置掩模的图案以达到有益效果。参看例如平移和/或反转,通过它们可以得到其他类型的楔形。参看图25中示出的“山”形例子。这种结构对于补偿传感器的光下降(fall off)是有用的。在传感器的边缘,有时可能会发现渐晕,这意味着更低的光强。这些位置位于传感器上具有最小的灵敏度的楔形区域,也即400nm和1000nm。使用“山”可对此进行补偿。可以将传感器的灵敏度与位于它之前的光学组件的灵敏度相匹配。在本说明书的下文描述包括单片集成的子系统的完整HSI相机的特定例子。设计一阶法布里-珀罗对几个层的厚度(在nm范围)施加严格容限,这些容限难以通过低成本处理流程来实现(硬度,氧化物等等)。现有技术中的楔形(LVF和台阶)在一个方向上具有增加的、或者

甚至是单调增加的厚度。需要额外的阶梯以使得该设计能够更加容忍工艺变化：

[0142] 处理变化和容限的制造

[0143] 由于楔形滤波器尺寸上的处理技术要求非常严格，可以期望阶梯高度，宽度，位置，角锐度以及取向的变化。设计如下：标称设计目标是比目标应用所需更大的波长范围，这相应于在如图12所示的楔形滤波器中插入额外的阶梯。结果，所产生的高度相对于标称设计的偏离会导致有效滤波范围向传感器的一侧发生移动。通过在每一侧插入额外的阶梯，通过读取不同的像素列（在生产后的校准步骤）仍然能够恢复所要求的波长范围。

[0144] 高光谱成像滤波器组的设计已经考虑到了各种加工步骤总是会具有如图11所示的容限。这些容限会发生在所有的常规制造步骤中，并且对它们的控制通常是成本的折衷。每个处理步骤都可控制到一定程度，并且这可以通过在一定程度上投入额外的工艺过程发展和提炼来改进。结果，对于很多步骤来说，量化这些变化的精确限制是非常困难的。目前设计的背后理念的是，如果能够通过对设计的软件校正或修改来克服变化的影响，则通过考虑这些变化，尽可能地防止昂贵和耗时的优化步骤。通过在设计中采用这种方法，有可能将要求传导至处理步骤：将由容限设计产生的松弛考虑在内，在处理步骤中发生的变化应当保持在预定的阈值之下。该阈值在设计时基于各种处理步骤中的预期变化性来设定。阈值之上的变化不能够补偿并导致模块不能达到规范。下面的部分将简要介绍一些工艺步骤，作为那些步骤容限的结果，它们如何引入特定量的变化以及对滤波器结构的影响。

[0145] 存在不同类型的容限和变化。跨晶片的变化（也即管芯间）比管芯内的变化对于最终的器件会有不同的作用。在下面的内容中，两者统称为容限或变化，除非另外具体说明。

[0146] 系统设计背后的基本原理是高光谱成像模块的不同滤波器线会以特定的采样间隔采样光谱中的不同点。第一种选择是以最大光谱分辨率采样光谱。这种速率源自瑞利标准，其指出如果两个滤波器在它们的3dB点相交，则认为它们在光谱上可分辨。第二种选择是以降低的速率采样光谱，例如香农（Shannon）速率，以覆盖信号中的所有频率。在后一种情形中，有效滤波器位置的小变化不会对使用模块采样光谱曲线产生重要影响。只有那些目标于检测在特定的明确波长处非常窄的光谱峰的应用才会受到变化的影响。这部分讨论这些变化的几个原因以及对付它们的技术。

[0147] 图像传感器的平面性

[0148] 为了以良好可控的状态开始，在滤波器结构建立之前对图像传感器进行平面化是重要的。这可以在使用沉积步骤以及之后的CMP（化学机械抛光）以移除所有形貌来实现。如此，剩余的处理不再依赖于精确的BEOL安排。在滤波器结构的设计期间，可在一定程度上考虑这种平面化层的厚度和材料。但是，这个层并非有源滤波器结构的一部分并且对于滤波器本身没有大的影响，只要正确地考虑了正确材料过渡（对于折射率是重要的）。由于法布里-珀罗滤波器会沉积在平面化层的顶部，因此只要跨晶片的变化足够慢（例如非尖锐边缘），这个层内的变化不会向上传递。由于CMP能够跨晶片产生纳米尺度的平坦的表面，变化在，所以这种要求能够得到满足。

[0149] 沉积容限

[0150] 法布里-珀罗滤波器的组件中沉积厚度的变化，例如布拉格层叠层和腔的厚度，会导致设计的滤波器与生产出的滤波器之间的不匹配。腔厚度的变化的影响是：所有滤波器的厚度会或多或少地发生等量变化，这会使得光谱范围移动至理论设计的右或左。这种相

对于设计滤波器位置的向上或向下的选定波长整体移动可通过延伸范围进行补偿。通过增加覆盖期望光谱范围任一侧的安全区的附加滤波器结构,腔的沉积容限可被覆盖。例如,如果腔沉积高度的全部可变性最大为20nm,这可能与必须增加的附加阶梯的数量有关。例如,对于光谱间的5nm差异,对于最小的腔长和最大的腔长度,腔可比设计高或低10nm,导致包括2个附加阶梯的修改范围设计。通过组合所需的光谱带数量,一个谱带内的空间线数量以及传感器的尺寸,这会与实际的设计发生联系。这确定传感器上用作输入以计算额外谱带量的自由区域,并因此确定沉积上的最大容许变化。

[0151] 图12示意性的示出高光谱成像模块,其线滤波器被排序为从 $\lambda_j$ 到 $\lambda_{j+k}$ ,例如从蓝色到红色,并且在两侧都增加了额外的线滤波器。当在腔的沉积中没有显著变化的情况下产生该设计时,这些滤波器不会用于标称点。但是,当偏离了起初的腔沉积时,额外线滤波器的任意一侧会落入预期的范围内并发挥作用,而在另一侧的更多的滤波器则会失效。通过使用已知波长照射整个滤波器结构并将具有最高响应的线滤波器位置存储在存储器中,这种范围移动可简单地在制造后进行校准。

[0152] 除了晶片范围的沉积容限之外,设计延伸的范围并配合校准,同样可以覆盖预期的管芯间变化。需要时,可增加一些附加阶梯来覆盖这类变化、或传统的装仓、或选择用于特定波长范围的特定器件。通过增加更多的阶梯不能解决管芯内变化,因此管芯内变化应当被限制并且应当小于两个阶梯之间的差(例如3nm)。如果管芯内变化超过该差,那么不能限定具有最小标称波长差的两个线滤波器之间的差。管芯内变化要小于管芯间变化(跨晶片)。跨晶片的变化使得光谱在一个方向上移动。延伸的范围被预期为可以解决这种移动。

[0153] 刻蚀容限

[0154] 在用于法布里-珀罗滤波器的腔材料的起始沉积之后,通过刻蚀该腔材料可制造不同的滤波器实例,例如不同的线滤波器。所产生的法布里-珀罗滤波器由它们各自不同的腔高度限定。每个独立线滤波器的准确波长响应会依赖于目标高度和各种刻蚀步骤的工艺容限,通过刻蚀步骤,限定了阶梯的最终高度。为了减少所需刻蚀步骤总数量,可使用类似二元掩模或对数掩模之类的技术,通过它们,只需要n刻蚀步骤即可制造出2n个不同的腔高度。正如上面所讨论的,为限定特定的目标腔长所需的不同刻蚀步骤的累积变化应当被限制并且小于两个阶梯之间的差(例如3nm)。但是,可使用一些设计技巧来放松这种要求。如果现在制造的滤波器是通过引入重叠来完全覆盖这种容限,即掩模的若干部分包含相同的波长,如图13所示,正确的波长可使用校准和软件处理进行分配。

[0155] 在所使用的刻蚀过程是非定向的过程,那么在一个线滤波器和下一个之间形成的过渡的尖锐边缘可表现出圆滑。在所示实施例中,每个线滤波器的宽度可覆盖多列像素。在由于角圆滑而使得滤波器生产后特征显示出明显失真的情况下,受影响的列可能变得失效或在软件后续处理中移除。这形成冗余,它是工艺优化成本与所生产器件性能之间折衷的一部分,在这种情况下,减少了使用的像素列的数量。正如上面指出的,滤波器可被设计用于最小数量的光谱带,以使得香农采样定律不被破坏。这同样用于例如减少分布式布拉格层叠内的层数以降低精细度并因此增加法布里-珀罗滤波器的FWHM。但是,刻蚀上的小变化会导致滤波器向左或向右移动少许。在两种情况中,光谱中的信息都会丢失。光谱过采样是一种在其最大FWHM处使用法布里-珀罗光学滤波器以最大化其光谱分辨率的技术。可以使用系统技术增加这些滤波器的FWHM。由光谱过采样引入的额外光谱带会与原来的那些部分

重叠,但是它们会保证能够获得所有的相关信息。

[0156] 对于大多数的关键刻蚀步骤,非单调增加的滤波器在被选择成给出冗余信息的相同楔形中提供了光谱重叠。光谱过采样处理在一个管芯内的移动波长:FWHM被设计成小于光谱分辨率所需。使用给定的FWHM计算谱带的数量以覆盖全部的光谱范围。系统多方面(例如具有更小的 $f_0$ )导致FWHM增加,从而相邻滤波器发生重叠并对1个光谱分辨率形成一个滤波器。由于过采样,所有的光谱信息都会被感测,并且使用校准以及标准的图像处理来提取。

[0157] 对准容限

[0158] 当使用标准的IC处理技术时,在像素行/列顶部的滤波器结构以每像素几微米的尺度对准正好是现有技术能够达到的。因此,在顶部水平处的对准并非是关键,正如前面段落所讨论的,当发生了未对准时,由于单个线滤波器能够覆盖多个列像素,引起问题的列可被禁用。再次的,这也是相同折衷的一部分。

[0159] 对于光学下降和模块灵敏度的设计

[0160] 当设计由图像传感器和滤波器结构构成的高光谱模块时,可进行交叉组件优化。由于提出的高光谱模块目标是低成本和/或紧凑的系统,低质量的光学元件是可以预期的。该上下文中需要解决的一个影响是渐晕。渐晕是图像的外围相对于图像中心的图像亮度或饱和度的降低。当这种效应被耦合到法布里-珀罗滤波器和图像传感器的波长依赖效率上,两种效应可被共同优化以平坦化波长依赖行为,而非加强它。

[0161] 由于渐晕导致光强从图像中心向图像边侧降低,对于扫描应用,该效应可被分为两部分。垂直于扫描方向的强度降低的效应可通过照射(通过使用所谓的照射轮廓)进行补偿,这对于本领技术人员是已知的。在扫描方向上,第二个机会存在,通过使用以灵敏度/强度差平稳而非加强的方式来重新排列线滤波器的可能性。图像传感器被设计为用于特定的波长范围。例如,CMOS成像器在大多数情况下被用于400nm到1000nm范围内。但是,传感器的效率在整个范围内并不相同。

[0162] 两种效应,渐晕和传感器灵敏度,会影响特定排列的线滤波器的模块效率。当以直接排列线滤波器时,选择单调增加的目标波长,例如以10nm的增量从400nm到1000nm,传感器上受渐晕影响最大的区域(在扫描方向上)是顶部和底部的大部分滤波器线。对于直接排列,存在用于传感器最不敏感的波长的滤波器线。这样,两种效应叠加,并且高光谱模块在目标波长范围的两次具有次优化的信噪比。为了平坦化灵敏度并克服两种效应的这种叠加行为,可在考虑两种效应的基础上进行重新排序。图15示意性示出线滤波器不再单调增加的高光谱成像模块,但是滤波器被重新排序。选择传感器最不敏感的波长的滤波器被设置在了传感器的中间。该处不会(或最少)发生渐晕。因此,两种效应起到相反的作用,跨整个光谱范围的效率被平坦化了。如果需要并且当应用允许时,这可以与照射轮廓进行组合使用。

[0163] 正如前面段落已经讨论过的,该高光谱成像模块设计的一部分是不同线滤波器在整个图像传感器上的分布或重新排序。总体来说,该设计可分为下面的几个部分:

[0164] 1. 选择目标波长范围

[0165] 2. 选择用于该范围的图像传感器

[0166] 3. 选择目标光谱采样(和光谱分辨率)

[0167] 4. 设计不同的法布里-珀罗线滤波器

[0168] 5. 在图像传感器上排序这些法布里-珀罗滤波器

[0169] 原则上来说,排序滤波器是无关紧要的,这是由于不同的过滤波长可在扫描后在软件中被重新分组到高光谱图像中,无论顺序如何。通过使用上述定义的滤波器,应用了一种容许工艺技术变化的方法,通过读取被相同高度的滤波器覆盖的不同像素行或列,在生产后的校准步骤后可恢复波长范围。但是,当考虑到系统的其他方面,像生产成本、灵敏度等等,不同类型的排序还是有意义的。

[0170] 首先和最直接的排列被称为楔形排列,这是由于以抽象角度来看,其形状类似楔形或更准确的说类似楼梯。在这种排序中,所有的线滤波器根据单调增加的过滤波长进行排序。该楔形排序的图像化表示在图12中示出。如前面已经讨论过的,一个延伸覆盖了楼梯结构中特定线滤波器的重复,以覆盖处理中的容限。如果某些关键刻蚀步骤出现过刻蚀,高光谱成像中的一些采样点就会消失。为了防止这种情况,进行有意的设计修改,即故意产生非单调增加的楼梯结构。在一些关键点上,该设计能够预见一些线滤波器的重复,这些线滤波器的重复在后面处理中可去除,但是即使当处理容限趋于过刻蚀时,也没有丢失采样点。图13和14示出这种概念的图形化表示,其中清楚示出重叠范围为图像传感器的中间。由于排序不再是单调增加,技术上这不再被认为是楔形。

[0171] 系统方面以最大化光学吞吐量,从而产生增加的速度:

[0172] 避免使用额外的滤波器用于顺序移除,使用图像处理用于顺序移除;

[0173] 狭缝和准直器的取消增加了该系统中的光学吞吐量,但是FWGM增加而光谱分辨率降低:光谱过采样允许如此;以及

[0174] 光谱过采样对于增加光学吞吐量来说实现更加开放的孔径(替代狭缝)。

[0175] 正如上面讨论的,法布里-珀罗滤波器对入射到滤波器上光的入射角是敏感的:中心波长以及FWHM都依赖于该入射角。特定的光学配置可用来最小化这种依赖性对总体性能的影响,例如将多个滤波器组合为滤波器模块时。这部分将讨论这种光学系统以及影响滤波器的光学吞吐量,光谱分辨率,全半高宽(FWHM)等等的折衷。在下面讨论的第一种系统达到最好的光谱分辨率和FWHM,但是最低的光学吞吐量。通过使用可变孔径替代狭缝,打开光阑可改善光学吞吐量,但是这会恶化FWHM和光谱分辨率。讨论这种折衷。

[0176] 集成的楔形滤波器可用于不同系统设置中。依赖于系统集成、楔形滤波器的最终性能,对于速度和对于光谱分辨率来说都是不同的。该光学系统的一个重要方面是出射光瞳的尺寸,图18示出了这样的例子。

[0177] 出射光瞳的尺寸对于入射到由楔形的每一阶梯形成的法布里-珀罗滤波器上光的入射角的变化大小有直接影响。对于像素p来说,其位于距离光轴为x处在集成楔形滤波器给定阶梯之下,平行于光轴的入射光线与出射光瞳的顶部和底部之间的角度分别被称为 $\alpha$ 和 $\beta$ 。

[0178] 从图4中可见, $\alpha$ 和 $\beta$ 的大小依赖于出射光瞳的尺寸。由于法布里-珀罗滤波器的选定波长依赖于入射角,这导致不同波长被集成楔形滤波器的每一阶梯选择。这种关系由下面的三个方程来描述。

$$[0179] \quad \alpha = a \tan\left(\frac{D_i/2 - x}{i}\right) \text{ 并且 } \beta = a \tan\left(\frac{D_i/2 + x}{i}\right) \theta_1 = a \sin\left(\frac{\sin(\alpha)}{n_{腔}}\right) \text{ 并且 } \theta_2 = a \sin\left(\frac{\sin(\beta)}{n_{腔}}\right)$$

[0180]  $\lambda_{\alpha} = \lambda \cdot \cos(\theta_1)$  并且  $\lambda_{\beta} = \lambda \cdot \cos(\theta_2)$  方程(8)

[0181] 在系统级别,通过使用准直器和/或远心透镜可控制入射光的方向。下面的段落将描述不同的系统集成,它们都具有或不具有准直器。依赖于应用,它们相对于现有技术的方案均有不同的改进。

[0182] 准直(可用于比基于光栅的系统更高的光谱分辨率)

[0183] 该子部分描述了使用所提出的滤波器模块作为纯线扫描高光谱相机的可能光学系统设置。在这种设置中,单一线的所有波长被同时收集。如图1所示,高光谱图像立方体被构造为扫描每线的场景线。可使用用于图像形成的物镜和用于从该图像选择单个线的狭缝。准直器被用于控制(最小化)光线在光学滤波器或成像器上的入射角。在准直器的输出处,光线几乎为平行。由于狭缝的位置选择在光轴上并且狭缝的尺寸很小,这些光线都平行于光轴。准直器是平-凸透镜且并非是不旋转对称透镜。它的准直功能限制在示出截面方向。在垂直的方向上,狭缝的方向上,没有准直效应。结果,由狭缝选择的图像线在整个传感器上都是以垂直于光学滤波器的角度复制的。结果,该线上的光能量也扩展到整个传感器上。起始于光轴之上或之下的图像线的光线(例如通过加宽狭缝)在准直之后也是平行的,但是不会与光轴平行。因此,使用准直器的系统的光谱分辨率不依赖于物镜的  $f/\#$ , 但是会依赖于狭缝尺寸。

[0184] 如图19和图30示出的第一种设置是线扫描器,其由物镜82,狭缝83,准直器85和集成电路5构成,其中楔形滤波器位于标准图像传感器的顶部。由于使用了准直器,楔形滤波器顶部的光入射角被良好控制,由此产生良好的光谱分辨率。但是,由于使用了狭缝,进入系统的光量(以及因此能量)严重降低。这导致传感器更大的积分时间以及降低的总速度。图19详细描述了准直系统。在距离0处的场景被物镜成像在距离  $d_{\text{狭缝}}$  处的狭缝上。物镜的焦点由两个点  $f$  示出。数值孔径  $NA$  与透过物镜的光量有关。穿过狭缝的光落在距离  $f_{\text{co1}}$  处的准直器上。然后,被准直的光被投射到距离  $d_{\text{楔形}}$  处的滤波器和传感器上。图20示出了狭缝和准直对于光谱分辨率的影响,其中角度  $\theta$  与狭缝的高度  $Y_{\text{狭缝}}$  成比例并且表示对于  $\alpha$  和  $\beta$ , 所选择波长相对于标称波长的偏离。

[0185] 从图21中可以看出,相对于标称波长的偏移的  $\lambda_{\alpha}$  和  $\lambda_{\beta}$  产生与狭缝尺寸和物距相关的相对偏移。对于  $80\mu\text{m}$  的狭缝尺寸,焦距超过  $10\text{mm}$  的准直器的相对偏移仍然小于千分之一 (one pro mille)。狭缝的尺寸越小并且物距越大,这个偏移就越小。结果,这种系统可以实现非常好的光谱分辨率。

[0186] 这个系统可实现的光谱分辨率比基于光栅的系统更好,这是由于基于光栅的系统中的限制因素依赖于每像素的色散以及(相对于法布里-珀罗方程(方程9))光栅方程(方程10)对入射角的变化更高敏感度。对于感兴趣的入射角 ( $\theta=0$ ), 光栅方程的灵敏度最大,而法布里-珀罗方程的灵敏度最小。

$$[0187] \begin{cases} m\lambda = 2nl \cos \theta \\ \frac{d\lambda}{d\theta} = 2nl \sin \theta \\ \theta = 0 \Rightarrow \frac{d\lambda}{d\theta} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$[0188] \quad \left\{ \begin{array}{l} m\lambda = p \cdot (\sin \theta + \sin \beta) \\ \frac{d\lambda}{d\theta} = -p \cdot \cos \theta \\ \theta = 0 \Rightarrow \frac{d\lambda}{d\theta} = -p \end{array} \right. \quad (10)$$

[0189] 另外,基于光栅的系统的带宽也依赖于每mm的色散,该每mm的色散依赖于节距p。由于这种连续的色散,在单个像素上投射完整的光谱带。像素的区域越大,传感器越快,但是光谱带的宽度也会越大。所提出的楔形滤波器的光谱带的宽度不依赖于这些像素的尺寸而只依赖于材料参数。

[0190] 然而,由于使用了狭缝,进入系统的光量大大降低。这由光学吞吐量表达,其是允许多少光进入光学系统的几何度量。由于狭缝具有显著降低的面积,这些系统的光学吞吐量同样急剧降低,从而限制能够进入相机的光量并因此限制相机的速度。

[0191] 未准直的(可用于比基于光栅的系统更快的系统)

[0192] 可替换的系统设置不具有狭缝而是将完整的图像帧投射到传感器上。如图31示出的,具有物镜82和集成电路5。被感测的图像因此会表示对象上的所有空间信息,但是由于传感器上不同的线对不同的光谱带敏感,图像上不同的线也会包括来自不同光谱带的信息。通过扫描传感器上的线,并且然后将与来自不同帧的相同空间线对应的所有光谱信息组合到一个高光谱图像立方体中,对线进行所有光谱带的采集。例如,假设对象的第一条线投射到传感器的第一条线上,其对特定的光谱带b1敏感。第一图像线因此只包含带b1的信息。接着,对象的该线移动到传感器上的第二条线,该第二条线对另一光谱带b2敏感。当对对象的下一条线采集第一带时,同时采集对于该线的第二带。然后重复这个过程直到在全部的波长带上扫描整个对象。

[0193] 第二个系统的集成选择没有使用狭缝或准直器,并且与传感器集成的楔形滤波器与物镜组合到系统中。通过取消狭缝和准直器,系统总成本被降低,并且进入系统的光量增加,从而得到了更快的相机。但是,在集成楔形滤波器的不同过滤阶梯上的光入射角的控制减少,如果透镜系统未被认真设计,这会造成光谱分辨率降低。正如图4示出的,入射角严重依赖于物镜的出射光瞳并因此依赖于孔径。图22示出物镜孔径对于最坏情况的波长范围的影响,该最坏情况的波长范围是由楔形滤波器的阶梯选择的(其中 $\lambda_1 = \alpha$ 并且 $\lambda_2 = \beta$ )。在图22a中,相应于快速系统的大孔径(f1.65)产生的光谱分辨率在400nm到800nm范围内不优于60nm,甚至在800nm到1000nm之间更小。但是,通过减小孔径(f22),如图22b示出的,可增加光谱分辨率,在大部分感兴趣的范围内光谱分辨率可达到约15nm。但是,这再次导致光损失并因此使得系统变慢。

[0194] 因此,需要仔细的透镜设计以最大化数值孔径(光学吞吐量)并优化光谱分辨率。这种透镜的一个例子(但不限于)是远心透镜,其是一种主光线与光轴平行的透镜。这些透镜大大限制了光的入射角并且是作为这些相机物镜的完美候选。

[0195] 图23,根据具有并行读出的实施例的集成电路。

[0196] 图23示出具有位于组20内的光学传感器40的集成电路,组20位于厚度不同的光学滤波器10之下。读出电路30具有用于每个组的输出电路A和B,(虽然由于简化的原因只对一个组示出输出电路)以使得具有不同光谱带的图像能够被输出(多 $\lambda$ 图像)。对于每个组,一

些光学传感器被耦合到输出电路A,另外一些则耦合到输出电路B。当然,还能够有更多。在一些情况中,可以是每传感器一个输出电路,以提供更完整的读出并行性。这使得一个组的光学传感器能够被并行读出并因此更快地读出,或在给定的时间内读出更大的组。所述组可以是线,或其他任意形状。并行输出能够以并行方式输出,或者也可以是在离开集成电路之前被复用。每个输出电路的光学传感器例如可与其他输出电路交织,或者作为线的串连部分。

[0197] 图24-26,具有非单调厚度的实施例

[0198] 图24示出了具有位于组20内的光学传感器40的集成电路,组20位于厚度不同的光学滤波器10之下。提供有读出电路30以使得具有不同光谱带的图像能够被输出(多 $\lambda$ 图像)。在这种情况下,厚度改变以跨阵列增加或减少,而非单调地变化。

[0199] 图25和26示出跨光学滤波器阵列的其他厚度轮廓的例子。图9示出阵列中间附件的峰。图10示出锯齿形的排列(在这个视图中,阶梯太小而不能分辨),其中光学滤波器簇具有重叠的光谱带。这给出一些冗余,可在后续图像处理中利用这些冗余以实现光学滤波器制造中更大的不精确度容限。

[0200] 图27-29,具有 $\lambda$ 选择的实施例

[0201] 图27示出根据另一实施例的集成电路,它具有位于组20内的光学传感器40,组20位于厚度不同的光学滤波器10之下。读出电路30具有用于不同光学滤波器的输出电路C和D(在两个或多个这样的滤波器组成的簇中),以及被安排为用于选择输出电路之一或在它们之间进行内插的 $\lambda$ 选择器50,以使得具有不同光谱带的图像能够被输出(多 $\lambda$ 图像)。这能够实现光谱采样或光谱内插,其能够实现光学滤波器厚度的更大误差容限。如果簇是有效地相互重叠以使得一些光学滤波器属于两个簇,那么可在不进行必要的二次采样的情况下控制波长选择器以有效地移动波长。

[0202] 图28与图27类似,但是多个输出电路用于每个组,它们可例如被安排成并行读出和并行馈送,或者复用到 $\lambda$ 选择器以改善读出速度。

[0203] 图29与图27或28类似,但是现在在芯片外实现 $\lambda$ 选择器,作为图像处理器53的功能。这使得集成电路更加简单,并且可以获得芯片外的更高传输速率。

[0204] 例如,集成电路可为接近1cm的正方形。它可以具有在一个表面上的标准的光学传感器阵列(FSI),在平面化和/或抗反射涂层施加之后,所述表面形成Al底部半透明镜。楔形中的透明层可由SiO<sub>2</sub>形成。正如上面讨论的,楔形不需要具有跨阵列的单调厚度改变。顶部半透明镜可由Al层形成。每一个制造步骤可使用各种已知的技术来实现。

[0205] 一些附加特征的概述:

[0206] 集成电路可使每个光学滤波器具有作为跨集成电路的带的布局,使用于相应光学滤波器的传感器组具有延伸为相应带的布局。传感器组可以具有被配置成相应于带布局的两行或多行传感器的布局,每行传感器与不同的输出电路耦合。

[0207] 读出电路可具有波长选择器,用于在不同光学滤波器的相应像素的读出信号之间选择或对其进行组合(例如通过在其之间进行内插,或者其他组合),以调谐输出对应于特定波长。光学滤波器的位置可被安排成使得用于光学传感器较不敏感的波长的光学滤波器设置在入射照射强度比较低的位置。通常,这会位于传感器阵列的中心附近,远离传感器阵列的边缘。位置可被安排为提供具有不同厚度的相邻光学滤波器的簇以能够检测第一

光谱带,以及提供具有不同厚度的相邻簇以能够检测第二光谱带,使得第一和第二光谱带重叠的相邻簇。

[0208] 至少一些传感器可被安排为组,其中每一个从光学滤波器的相应一个接收光,读出电路可包括与相应一个组中的传感器耦合的至少一个输出电路,其中波长选择器用于在相应于不同光学滤波器的不同组的读取信号之间选择或内插,以对这些组提供调谐到对应于特定光学波长的输出。

[0209] 这些位置可被安排成提供具有都比较厚或都比较薄的相邻带的给定光学滤波器,以分别提供谷或脊结构。(谷/脊可以是局部的,或者跨阵列的部分或全部。非单调也可以是随机排序的,以使得谷/脊太短而不再显现)。光学滤波器的厚度可被配置为用于补偿光学滤波器阵列上不同位置处光入射角的不同。在纵向带滤波器的例子中,入射角在末端附近比较大,因此厚度应当较小,以使得路径长度保持不变。

[0210] 位置可被安排为提供厚度不同的相邻光学滤波器的簇,以及具有波长选择器的读出电路,波长选择器用于在簇中不同光学滤波器的相应像素的读出信号之间选择或内插以将输出调谐到对应于特定波长。

[0211] 波长选择器可被安排为:输出表示比设置在光学滤波器阵列上的不同光学滤波器数量成比例减少的波长的信号,以提供成比例的光谱二次采样。

[0212] 波长选择器可被安排为输出表示与设置在光学滤波器阵列上不同光学滤波器的数量类似的波长数的信号,以提供光谱移动。

[0213] 光谱移动量可根据光学滤波器阵列中的位置变化,以补偿不同位置处光学滤波器厚度的制造变化。

[0214] 成像系统可具有集成电路和外部图像处理部,该外部图像处理部被耦合以接收表示图像的像素值并输出所接收图像的图像处理版本。成像系统可被安排成,通过集成电路和被成像对象之间的相对移动,产生并存储对象的图像立方体,该图像立方体具有x和y空间维度,以及光谱维度。成像系统可被安排成采用 $\lambda$ 选择或内插图像处理功能,在光谱维度对图像立方体二次采样或移动图像立方体。根据位置的变化可适于补偿以下中的任一个或多个:不同位置处光学滤波器厚度的制造变化,由于穿过光学滤波器的光路入射角的变化带来的失真,高阶移除以及来自其他光学组件的失真。

[0215] 成像系统可具有下列中的任一或多个:位于光学滤波器阵列之前的光路上的物镜、狭缝以及准直器。至少一些光学滤波器可以具有适于区分高阶干涉的厚度,并且图像处理器可被安排为根据由这些光学滤波器区分的高阶干涉量补偿在图像表示的其余部分中的高阶干涉效应。

[0216] 一些实施例中,光学滤波器阵列具有在图像传感器阵列顶部后处理的阶梯形结构,滤波器被定位为与图像传感器阵列直接接触。在一些情况中,滤波器阵列中滤波器的每一阶梯都与图像传感器阵列的单个像素行或列对准。在一些情况中,每个像素行或列被不同高度的法布里-珀罗滤波器覆盖。在一些情况中,厚度的变化是单调的,并且在另外一些情况中,它们是非单调的,以跨阵列产生脊或谷。在另外一些情况中,每一阶梯的厚度被调谐到经过滤的光谱带。

[0217] 在滤波器阵列的厚度中制造单调或非单调变化的方法可以包括二元或对数图案化技术。

[0218] 完整HSI系统的例子可包括光学传感器阵列之后的图像处理器,以及它之前的光学部件。

[0219] 高光谱相机系统可由如上述定义的在图像传感器阵列上后续处理的光学滤波器阵列构成,系统还可包括物镜和/或狭缝和/或准直器。

[0220] 厚度非单调变化的效果是重新组织频率与图像传感器阵列多个部分的不同敏感度之间的关系(在传感器中间而非边缘设置高或低的频率)。它还可以降低滤波器对处理变化的灵敏度并因此增加产出。它可以使得关于一个波长成簇的若干不同波长可被不同传感器接收,然后选择或后续处理最合适的波长。非单调变化允许簇(范围)中的一些光谱带的分组并将它们任意定位在传感器阵列上。这使得很多事情成为可能,例如对容限重新排序,对于下降的补偿等等。单调楔形可以处理其中一些,但是不能解决刻蚀造成的容限,不管它们大于或小于沉积容限,都不能解决。非单调变化能够使得簇内变化大于簇间变化。在另外一个例子中,增加1个阶梯或更多阶梯的宽度可用于特定应用中最重要谱带。另外一种选择是调整不同阶梯的排序以将光学部件灵敏度最大的区域与传感器的较不灵敏区域相匹配。所以可通过例如使得滤波器阵列在中部具有合适的厚度,可将传感器阵列的中部用于应用中最重要谱带。

[0221] 根据校准输入的进行选择的效果是校准输入可补偿工艺变化,无论是管芯内或是跨很多管芯的晶片的管芯间变化,甚至是晶片间变化,只要有足够的传感器和光学滤波器来有效地过采样光谱,或具有延伸的范围以使得选择器选择与预期波长值集最匹配的最合适滤波器。

[0222] 典型系统的折衷:

[0223] 对于线扫描成像器,好的光谱分辨率通常都是通过组合使用狭缝和准直透镜获得的。取消这些部件会引起光谱分辨率下降。实际上,狭缝和准直透镜控制光在传感器上的入射角,这在许多波长选择器上都是重要的参数。已知的,光谱分辨率是传感器上入射角的函数。但是,狭缝的取消增加了光学吞吐量并因此提高了系统的速度。

[0224] \*成像器顶部的波长选择组件的集成不仅降低了杂散光量(提高了速度),并且还降低了系统的成本;以及

[0225] \*波长选择组件与低级的图像处理的共同设计可实现波长选择器的更大容限。

[0226] 另外,通过提供依赖应用的图像处理,可克服现有高光谱成像的缺点,现有高光谱成像器通常都是研究仪器,图像处理是由通常只有对于高性能基础结构有经验或经过培训的人才能使用的研究仪器封装传递的。实时的高光谱图像处理可允许将这样的高光谱技术用于例如工业机器视觉以及医学成像。

[0227] 处理硬件:

[0228] 上述讨论用于图像处理的一些方法步骤例如可通过硬件形式的逻辑来实现,或者使用例如微处理器或可编程逻辑器件(PLD)之类的处理引擎的软件来实现,可编程逻辑器件(PLD)例如PLA(可编程逻辑阵列),PAL(可编程阵列逻辑),FPGA(现场可编程门阵列)。

[0229] 具有嵌入处理器的电路的例子可被构造为嵌入微处理器周围的VLSI芯片,其可与其他组件合成为单个芯片。可替换地,也可使用其他合适的处理器,并且这些不需要嵌入,例如由美国英特尔公司提供的奔腾处理器。例如,零等待状态的SRAM存储器以及高速缓冲存储器可提供在芯片上。典型的I/O(输入/输出)接口可用于(例如经由数据网络)访问外部

存储器。FIFO缓存器可用于从通过这些接口的数据传输中退耦处理器。接口能提供网络连接,即合适的端口和网络地址,例如接口可以采用网卡形式。

[0230] 软件:

[0231] 软件程序可存储在内部ROM(只读存储器)和/或任意其他非易失性存储器中,例如,它们可存储在外存储器中。对于外部存储器的访问可由传统的硬件来提供,如果需要,该硬件可包括具有地址、数据和控制总线的外部总线接口。本发明方法和设备的特征可实现为处理器中运行的软件。根据本发明的特定图像处理可由合适的处理器程序来实现。上述描述的方法和程序可以以例如C语言之类的合适计算机语言写成计算机程序,然后针对嵌入式设计中的特定处理器进行编译。例如,软件可用C语言写成,然后使用已知的编译器和已知的汇编器进行编译。软件具有编码,当在处理引擎上执行时,它能提供本发明上述方法以及图像处理器。软件程序可存储在任意合适的机器可读介质中,例如磁盘、软磁盘、固态存储器、磁带存储器、例如CD-ROM或DVD-ROM的光盘等等。其他的变形都视为落在权利要求内。

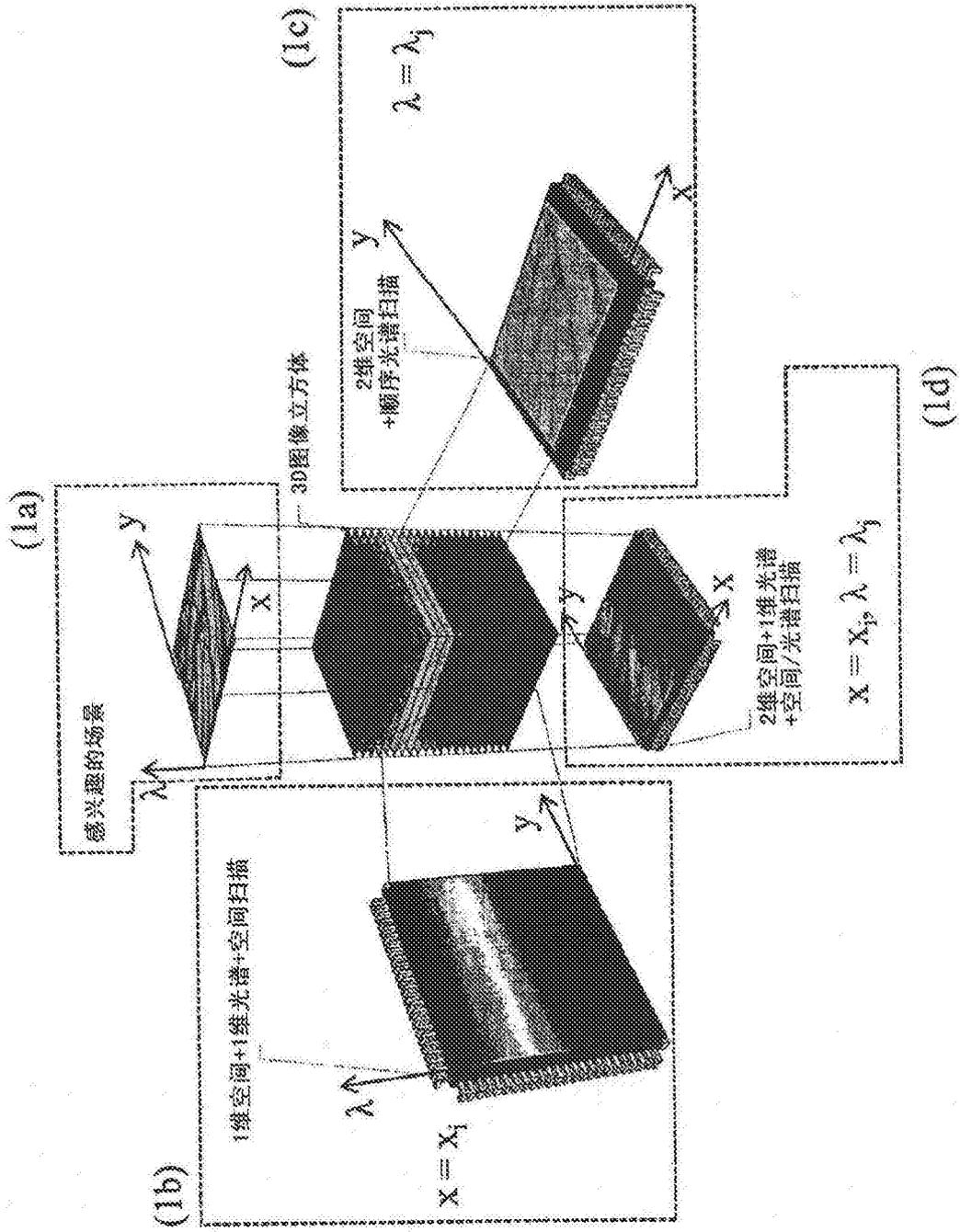


图1

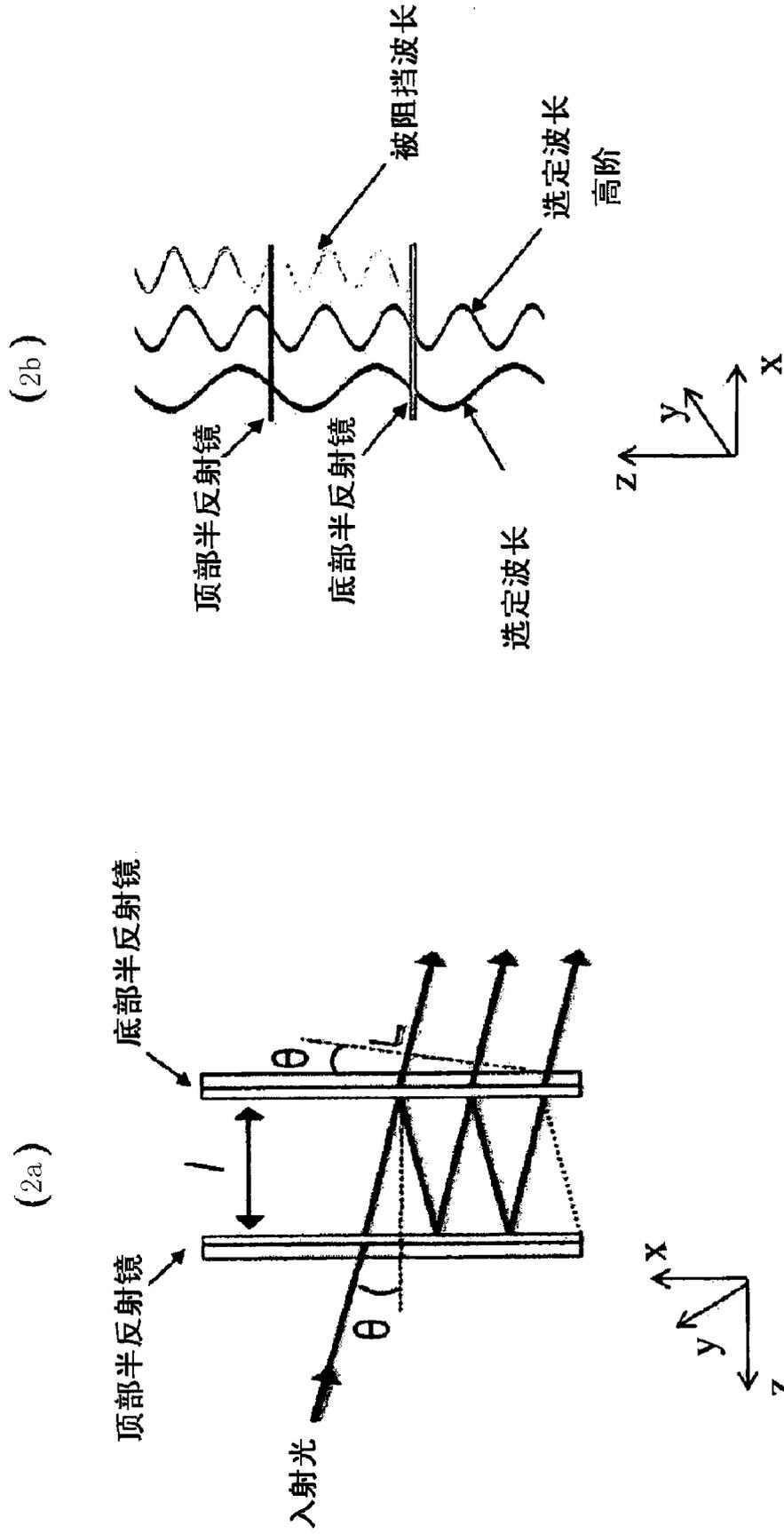


图2

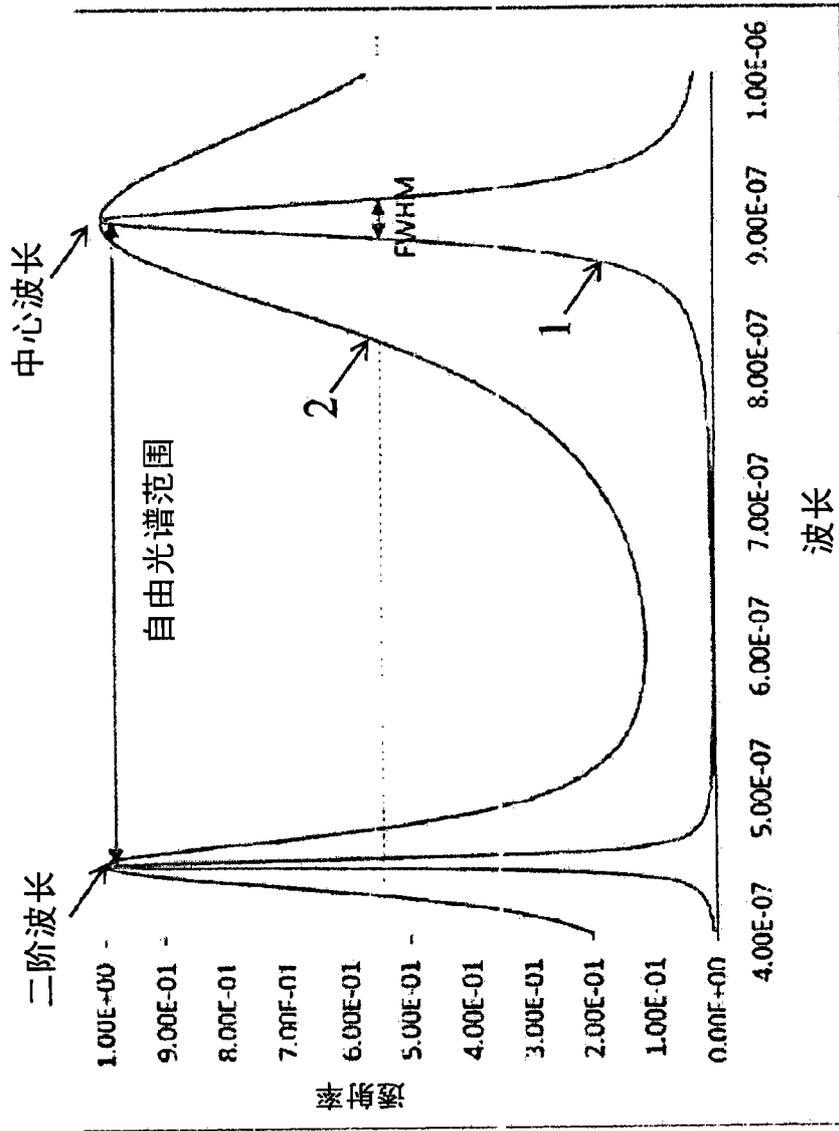


图3

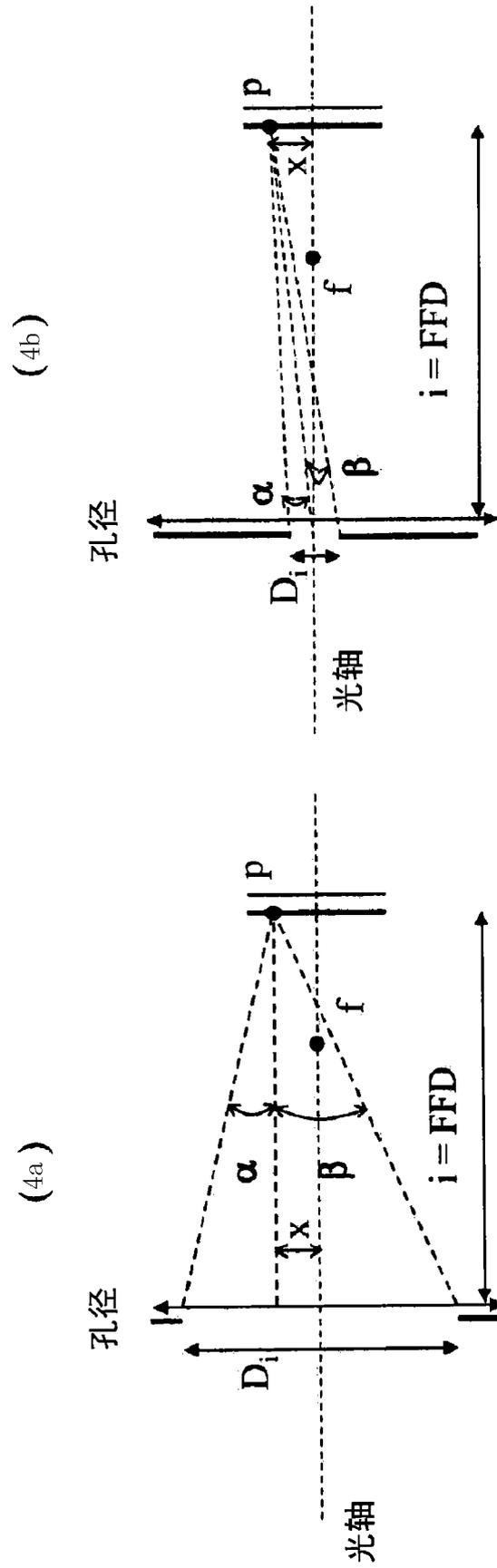


图4

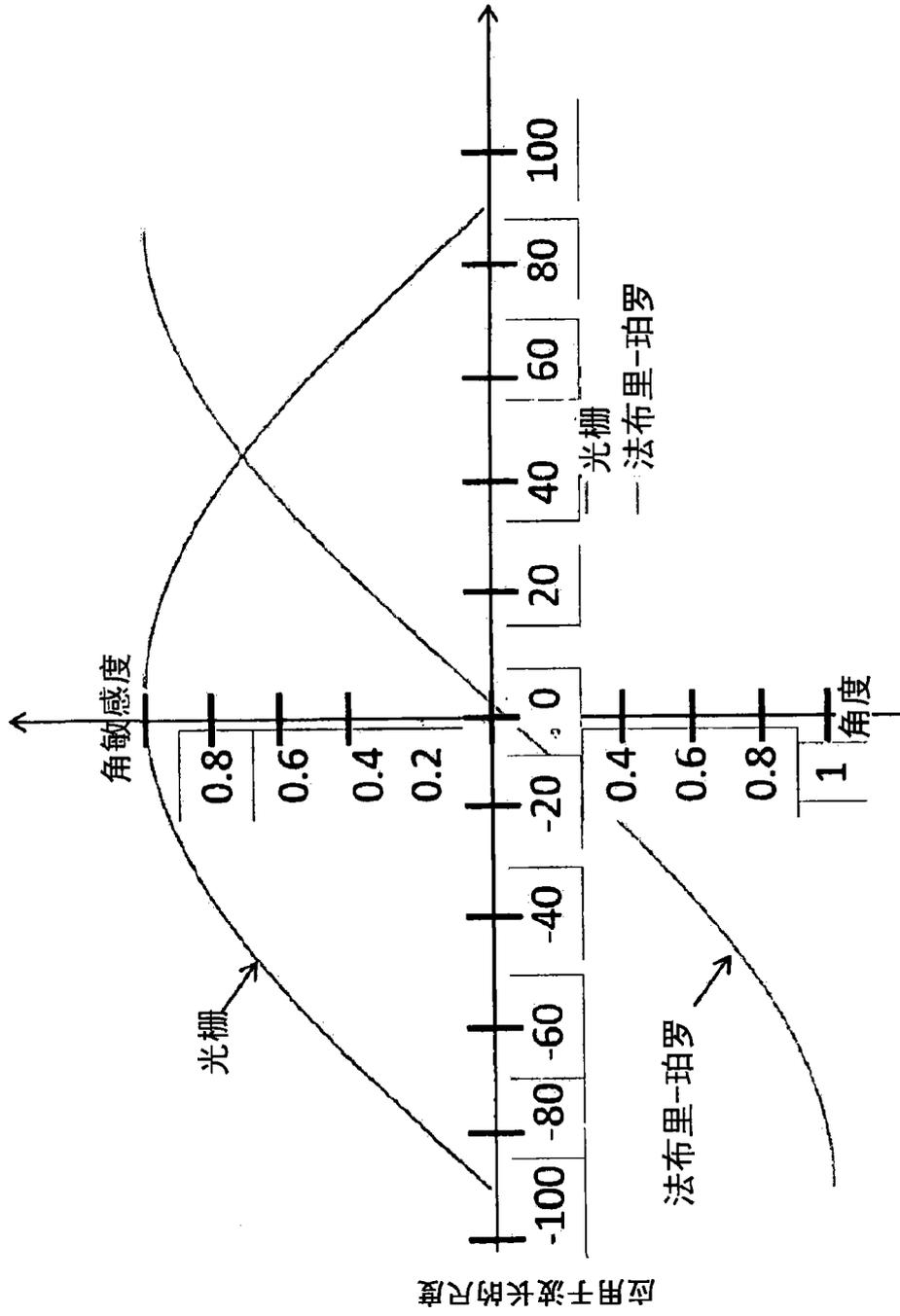


图5

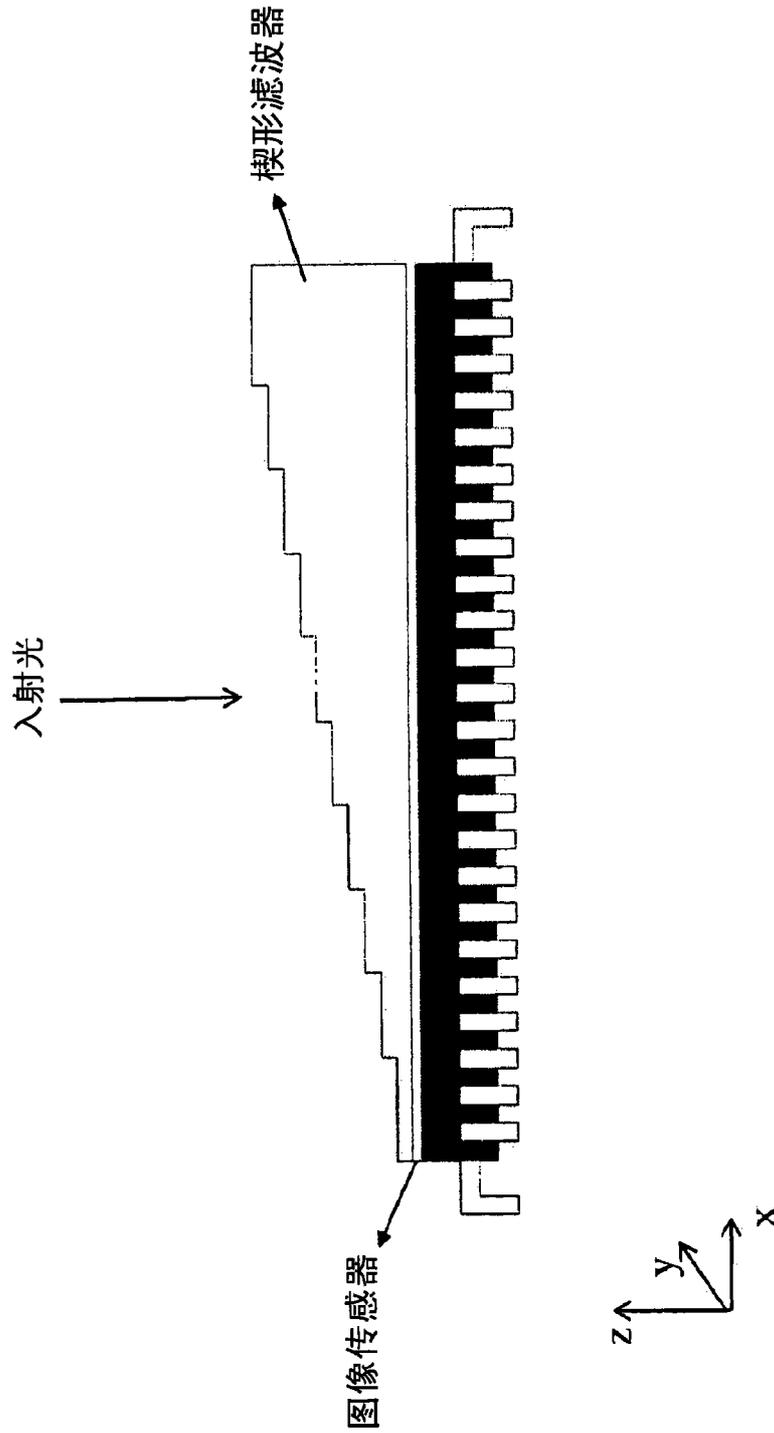


图6a

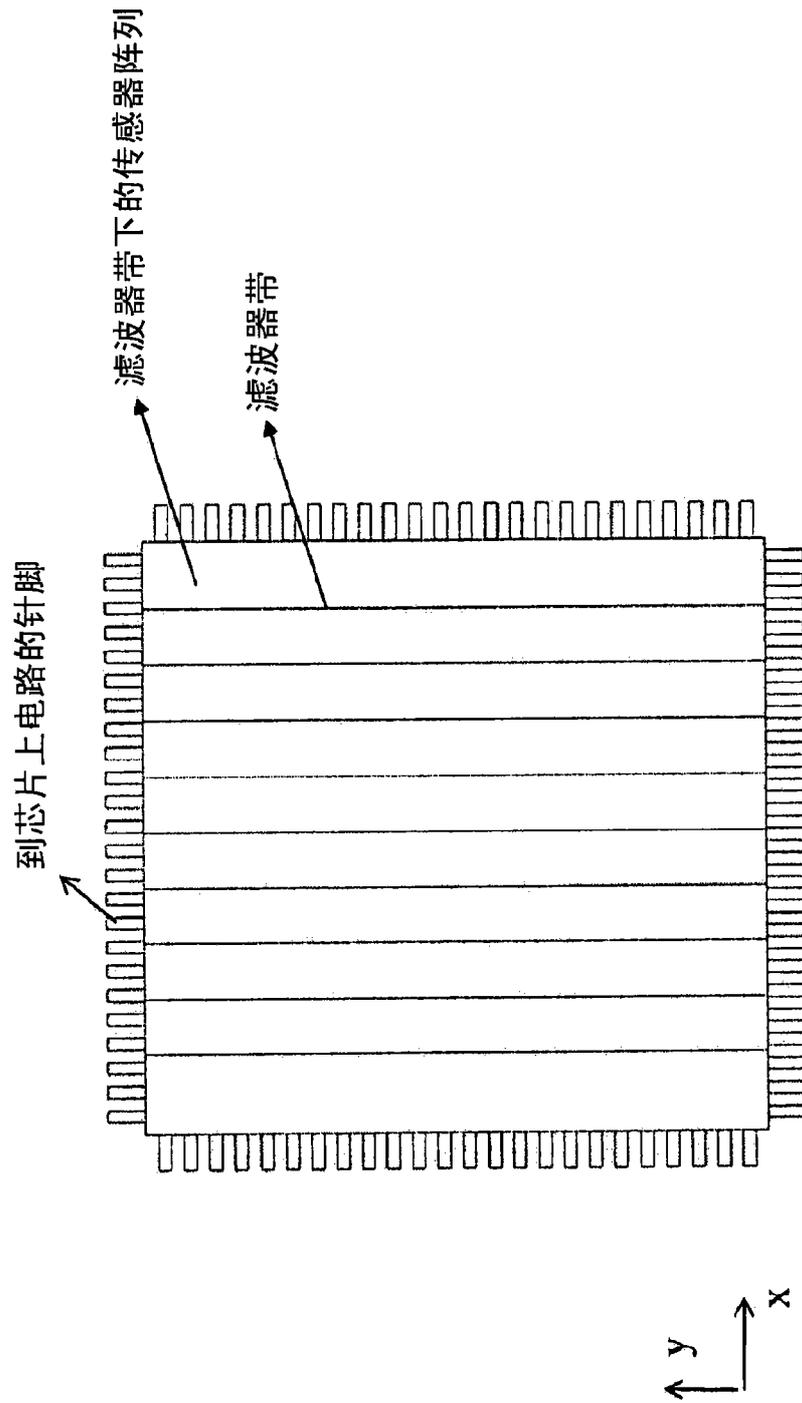


图6b

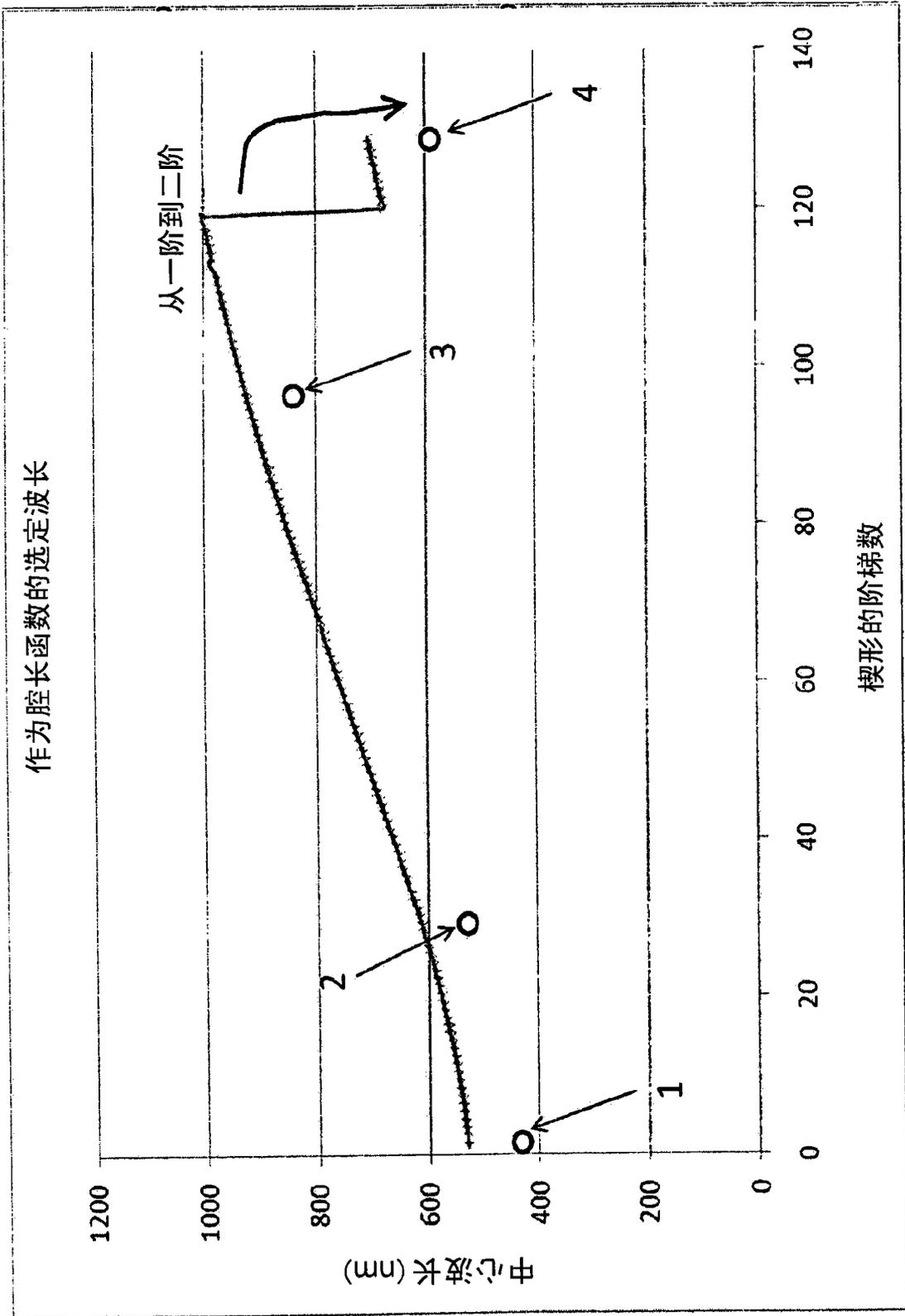


图7a

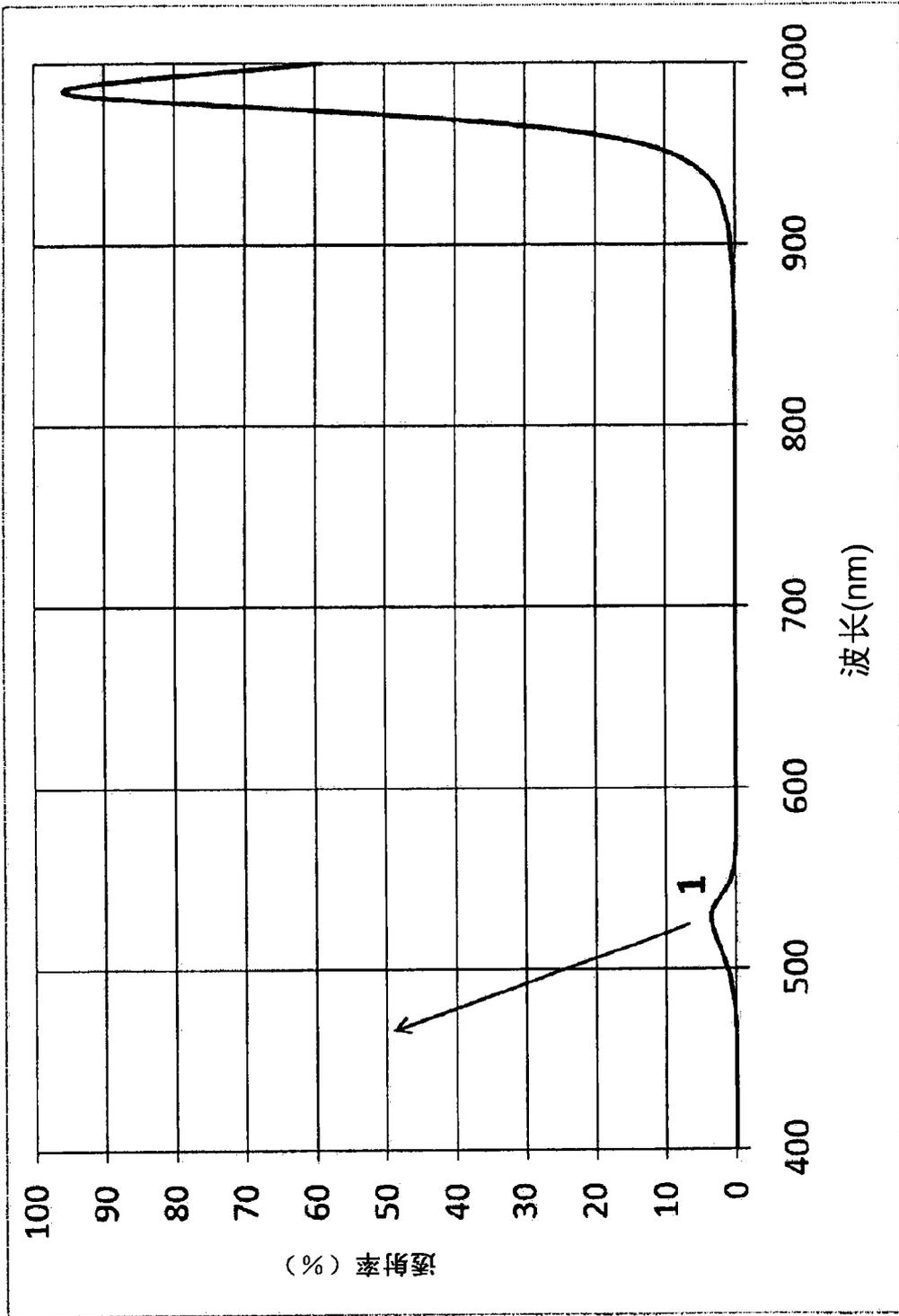


图7b

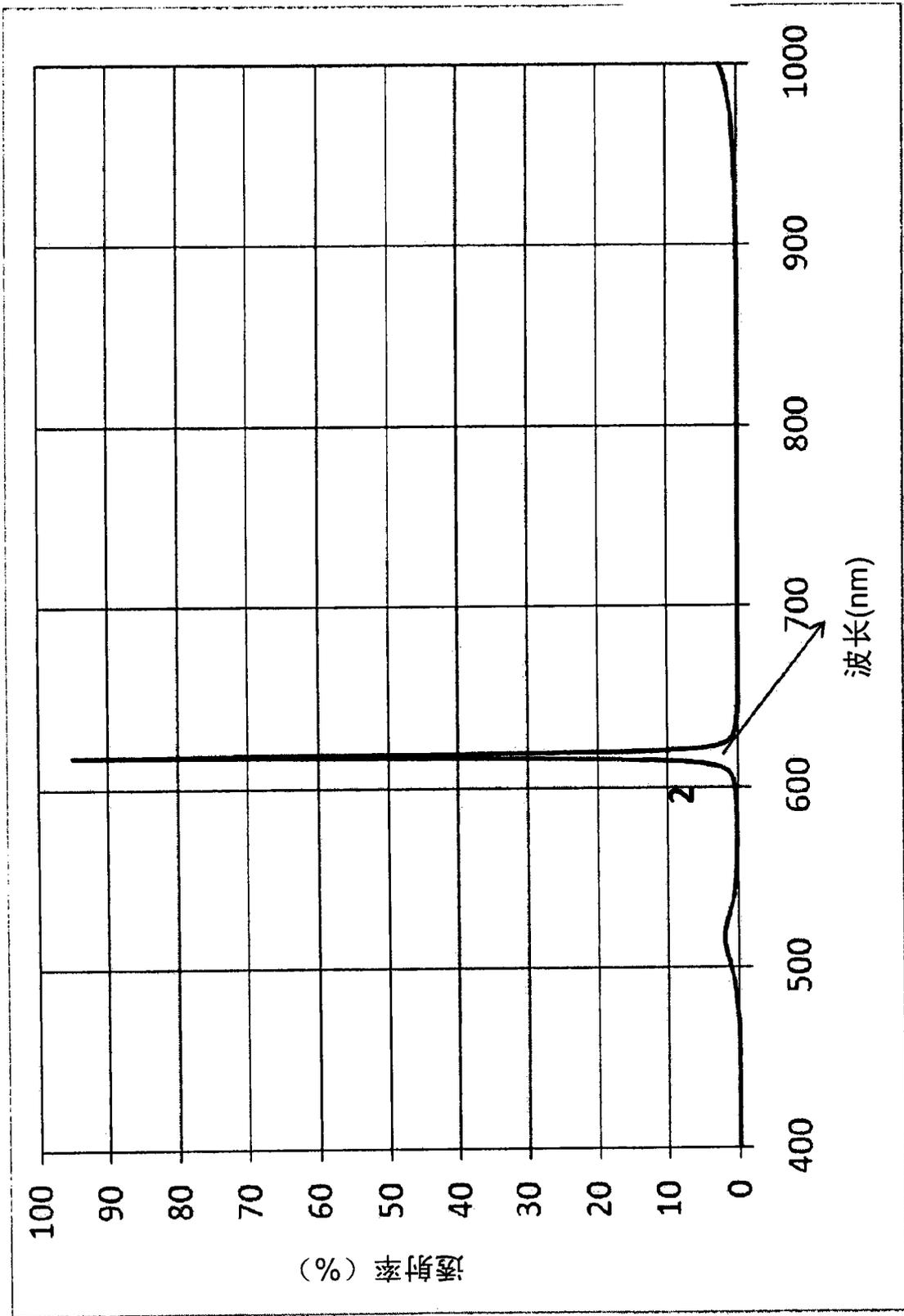


图7c

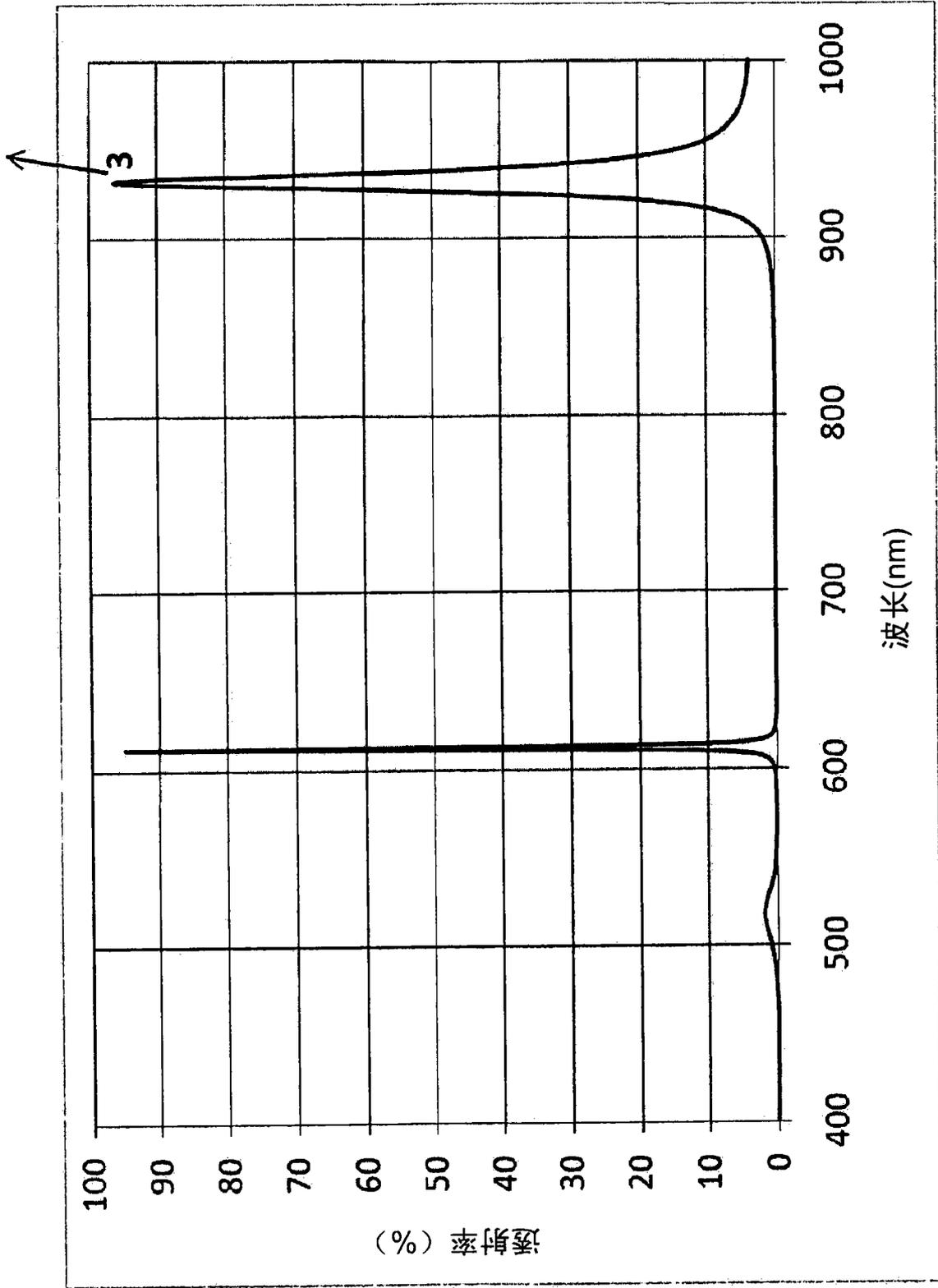


图7d

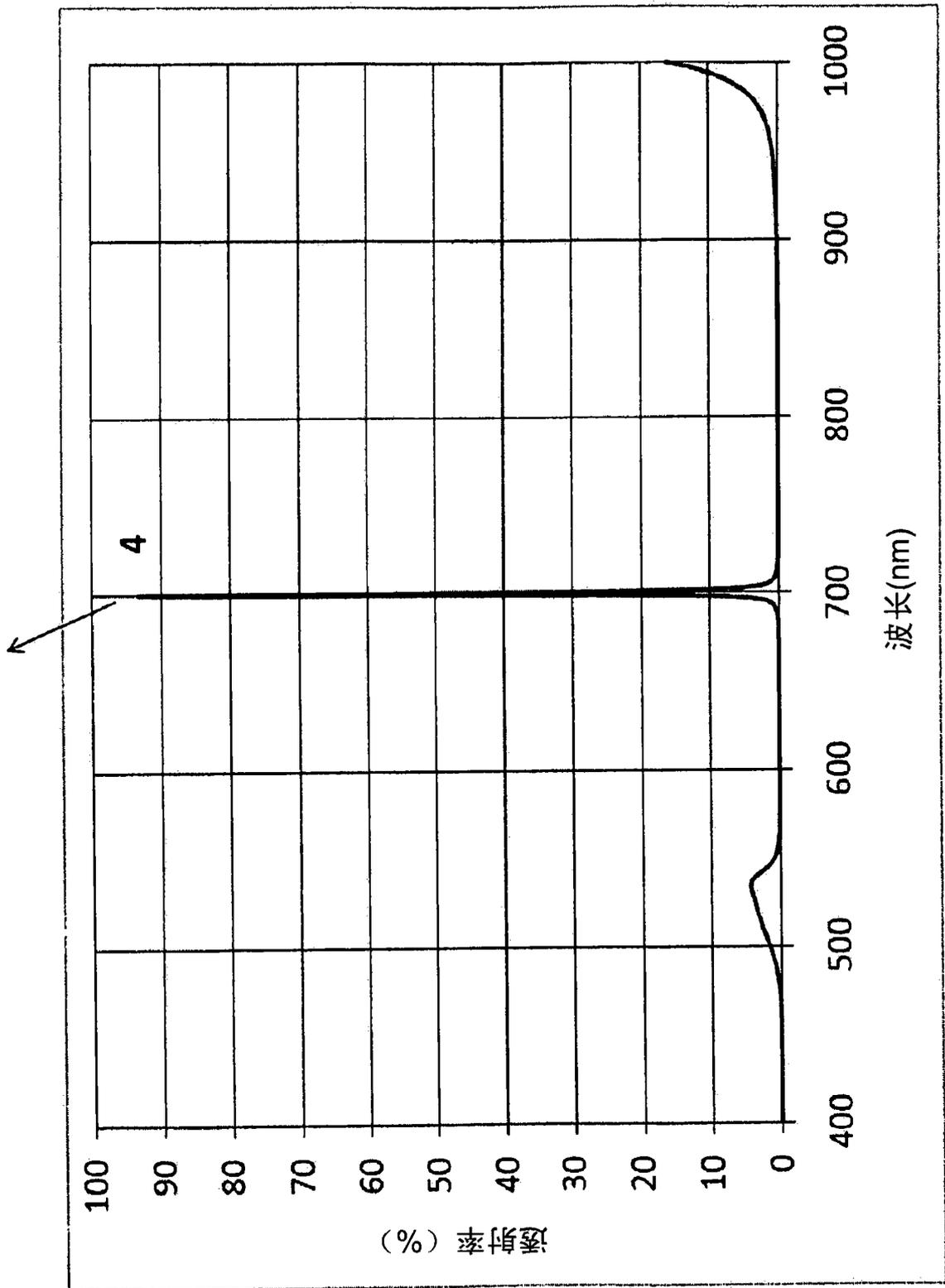


图7e

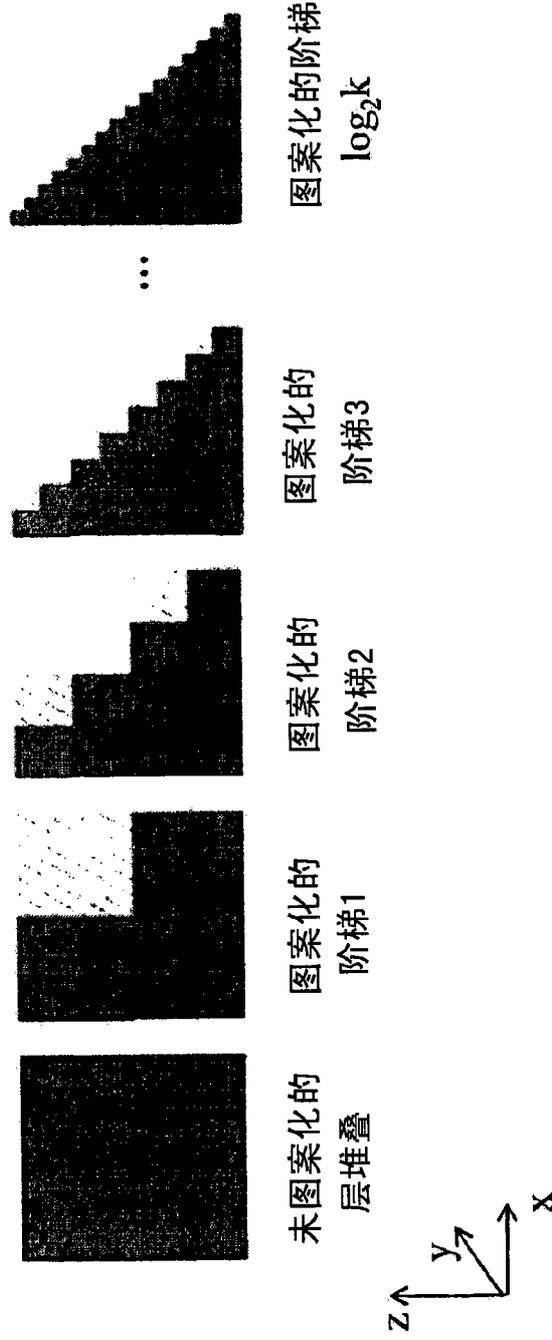
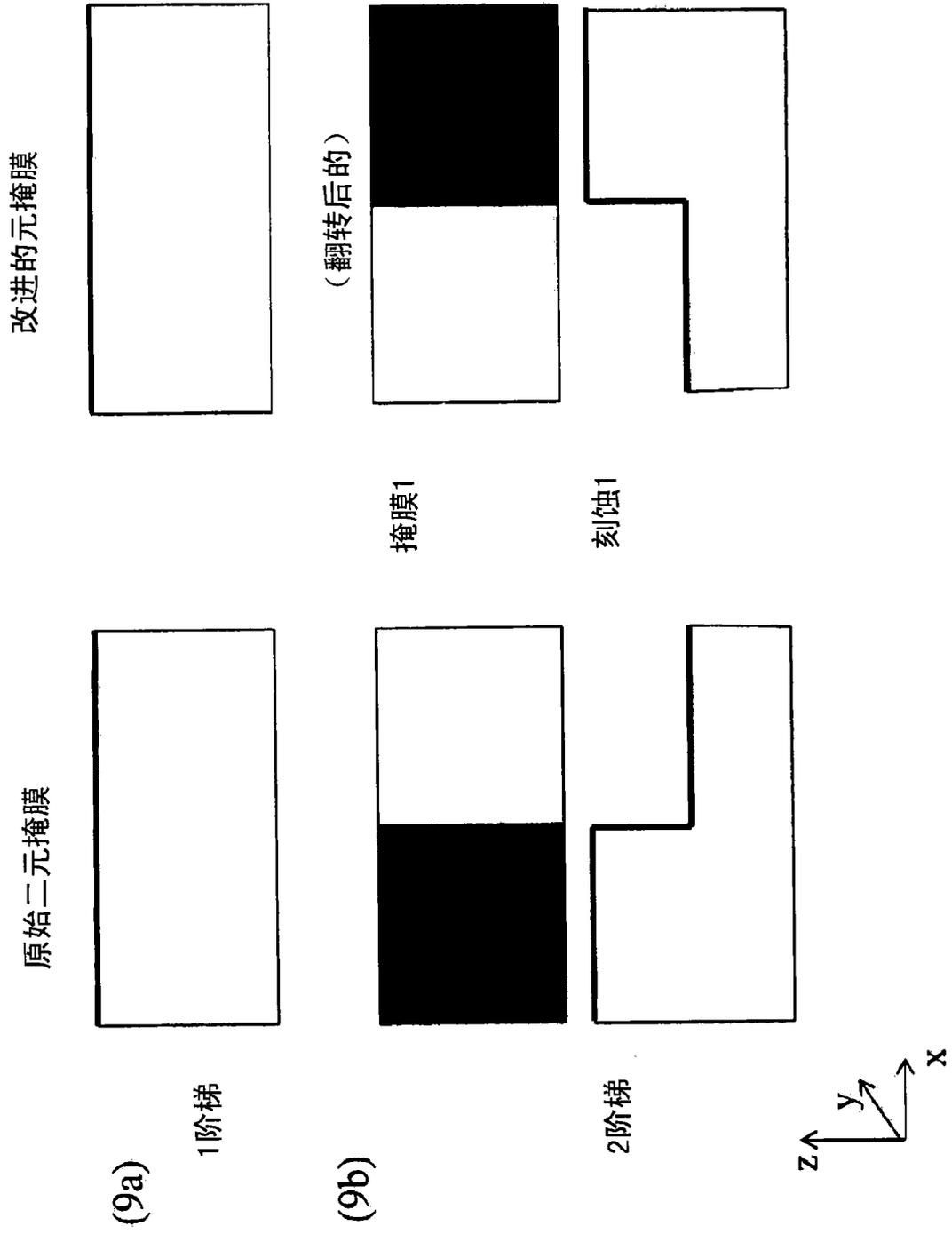
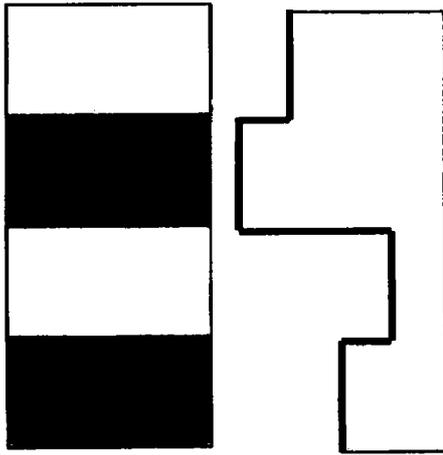


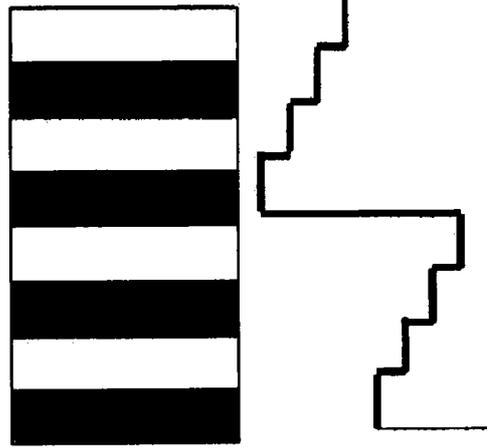
图8





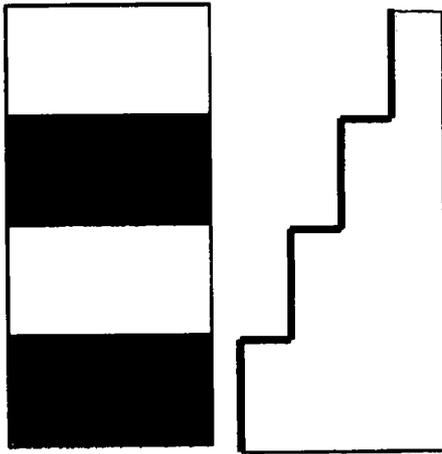
掩膜2

刻蚀2



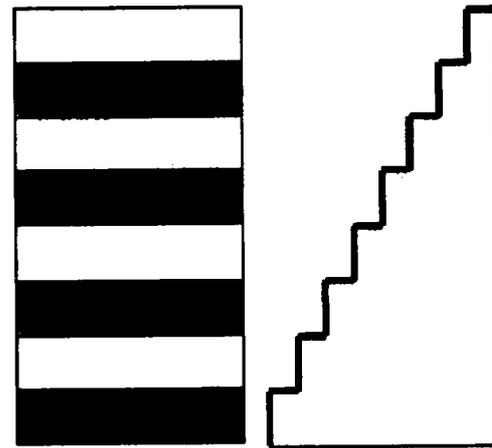
掩膜3

刻蚀3



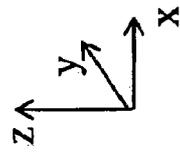
(9c)

4阶梯



(9d)

8阶梯



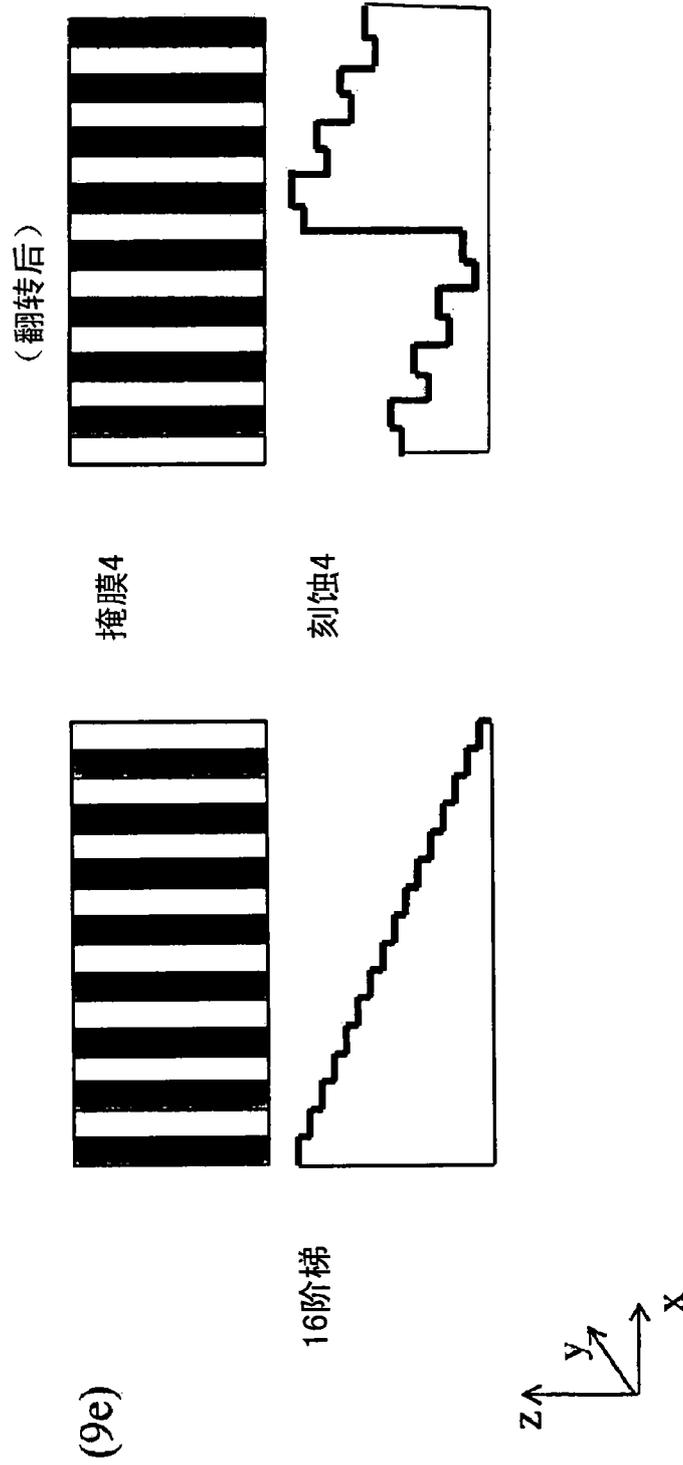
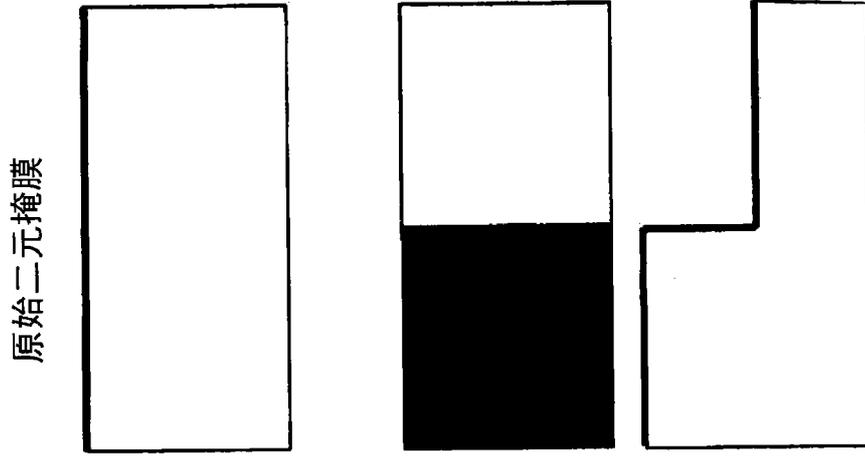
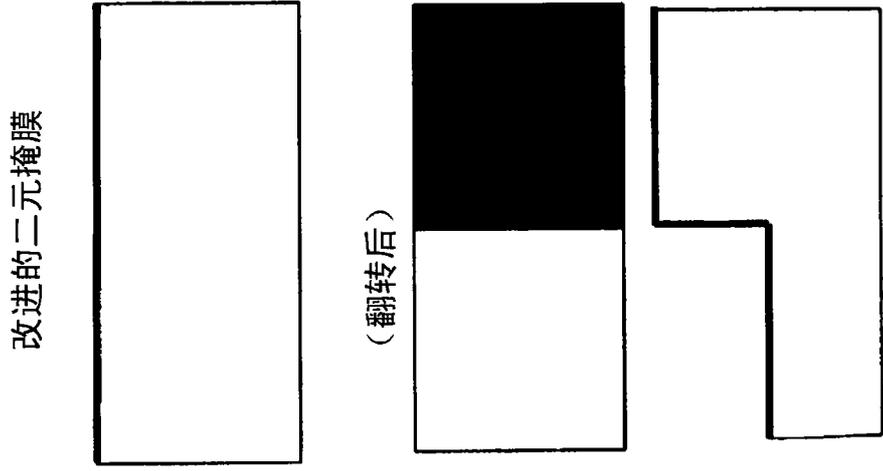
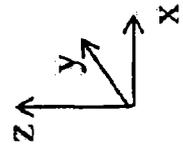


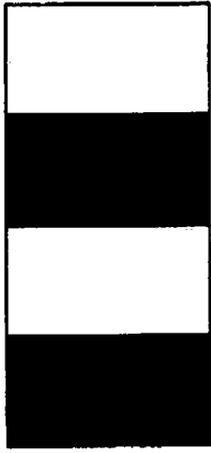
图9



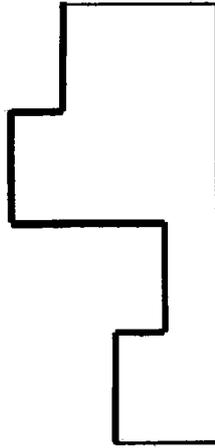
(10a)  
1阶梯

(10b)  
2阶梯





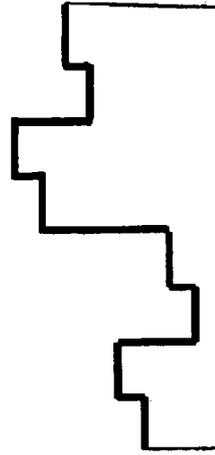
掩膜2



刻蚀2



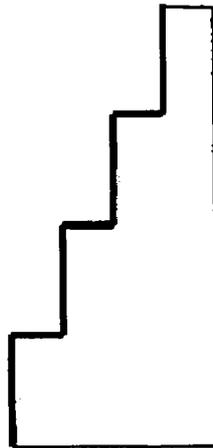
掩膜3



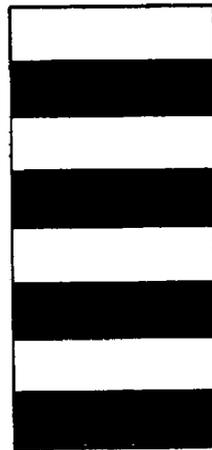
刻蚀3



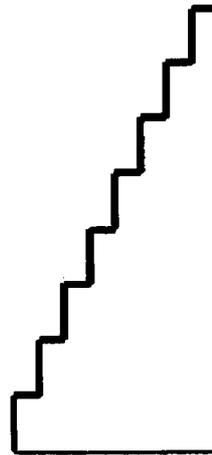
(10c)



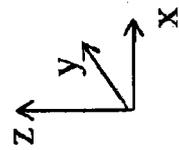
4阶梯

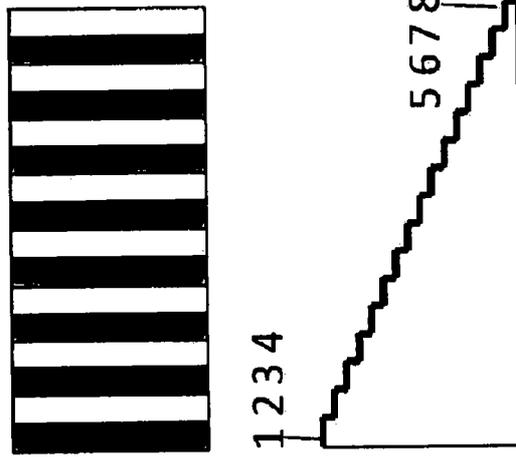
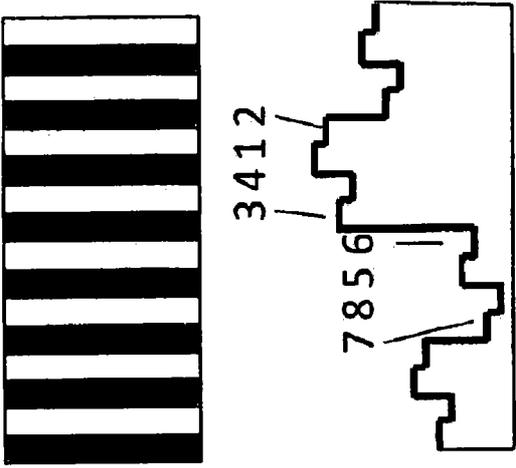


(10d)



8阶梯





(10e)

16阶梯

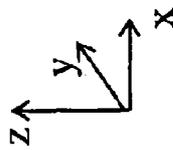


图10

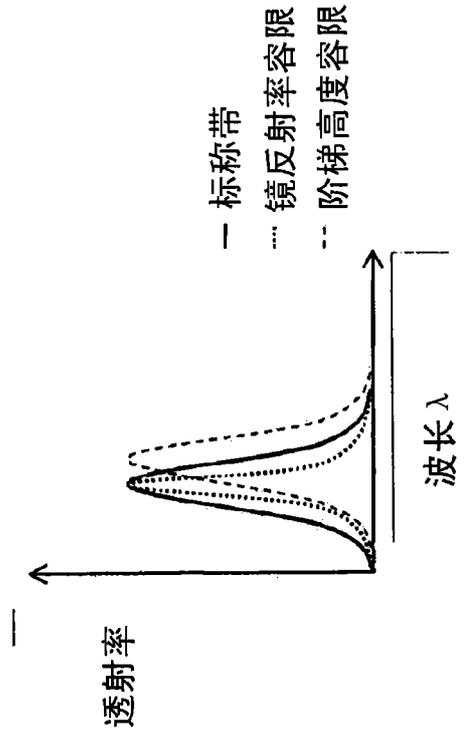


图11

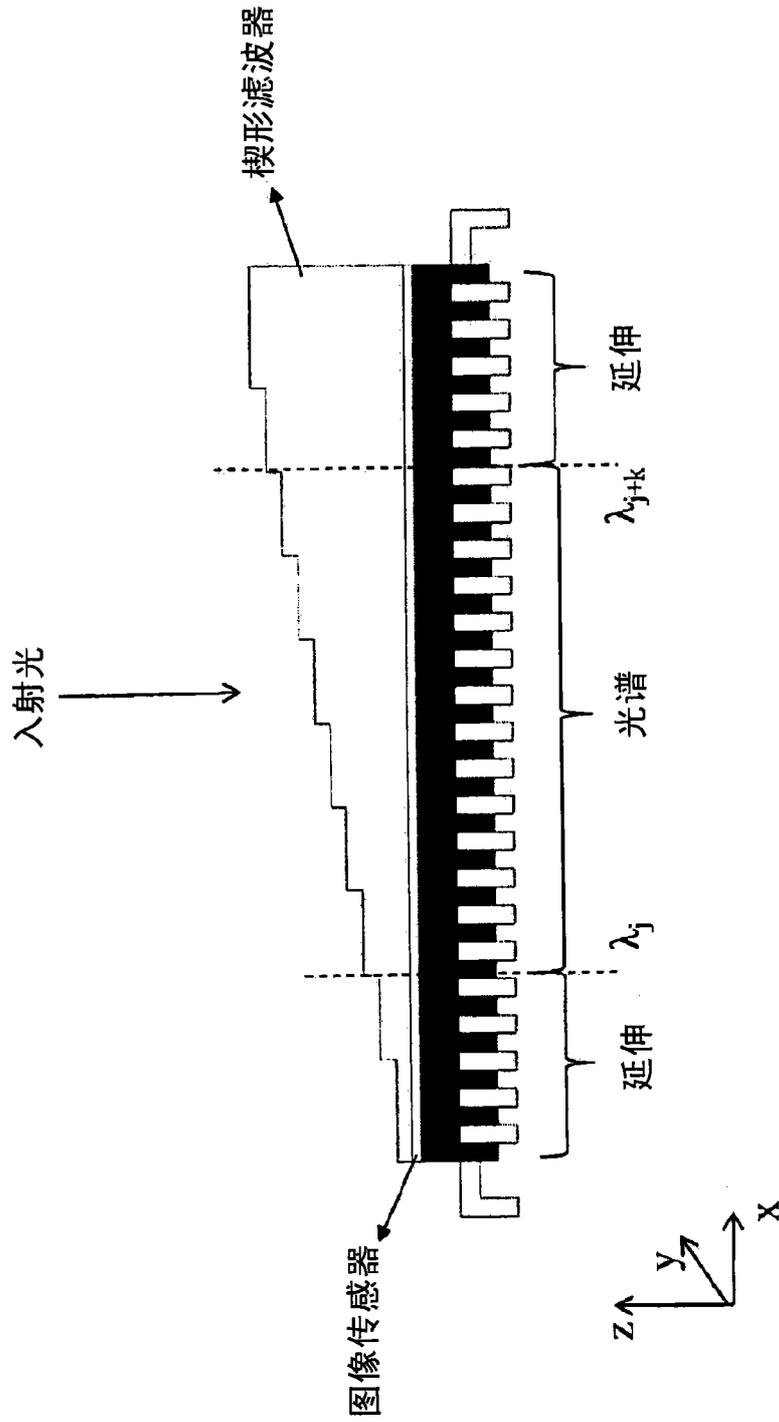


图12

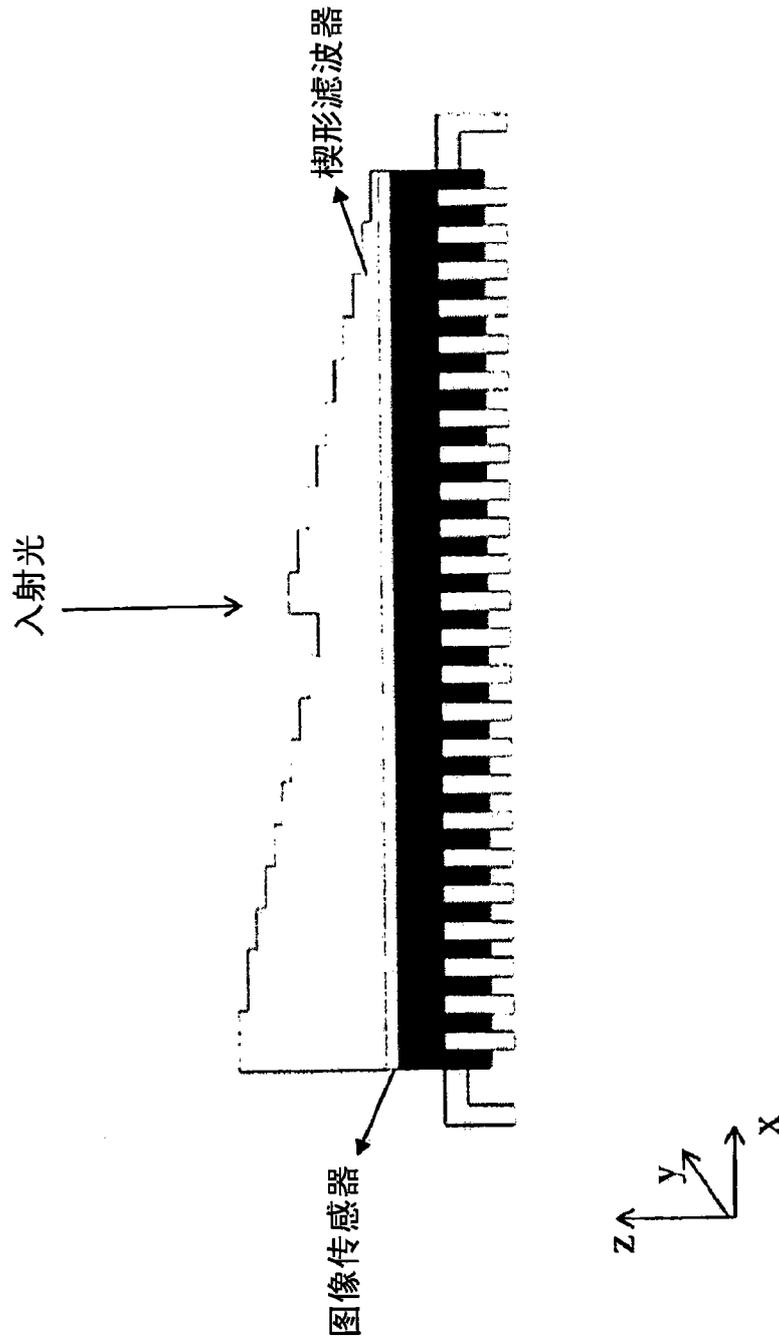


图13

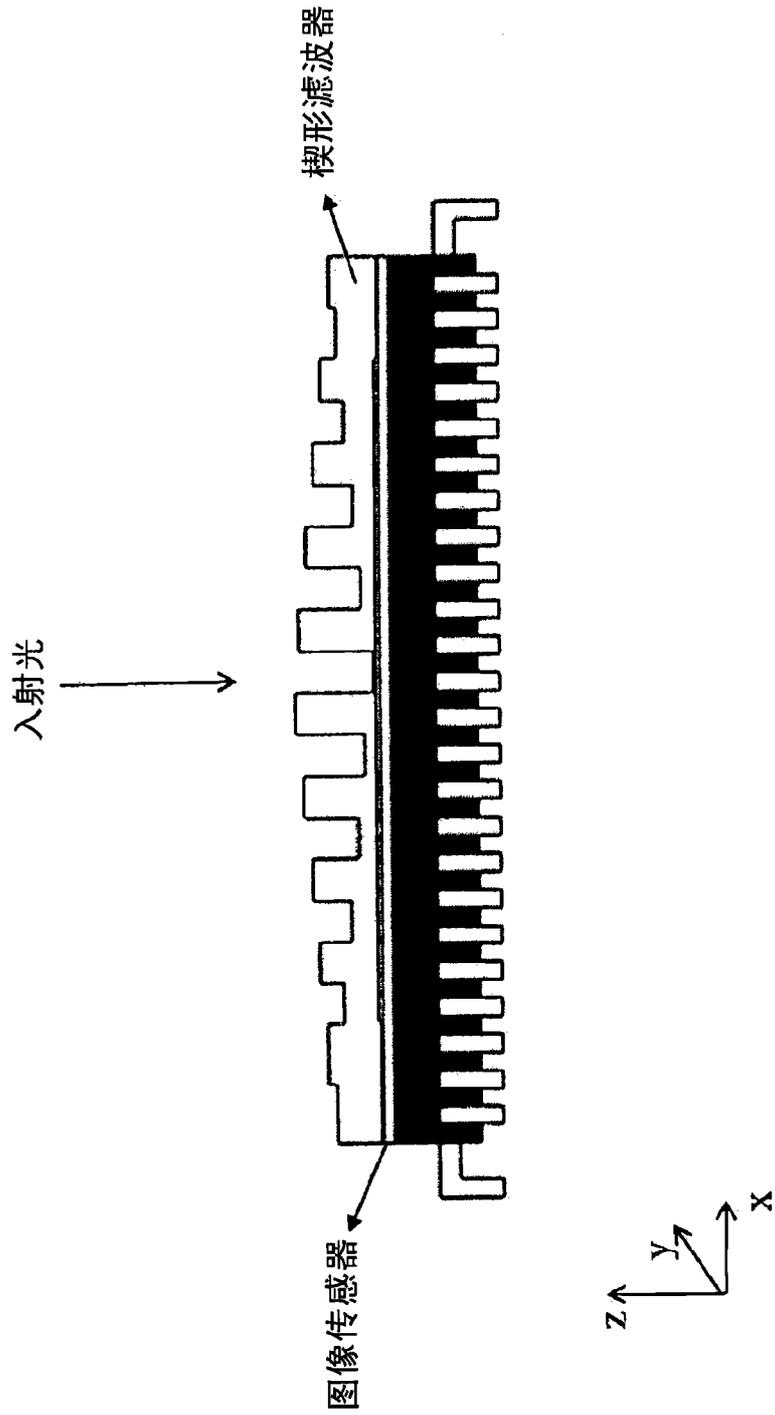
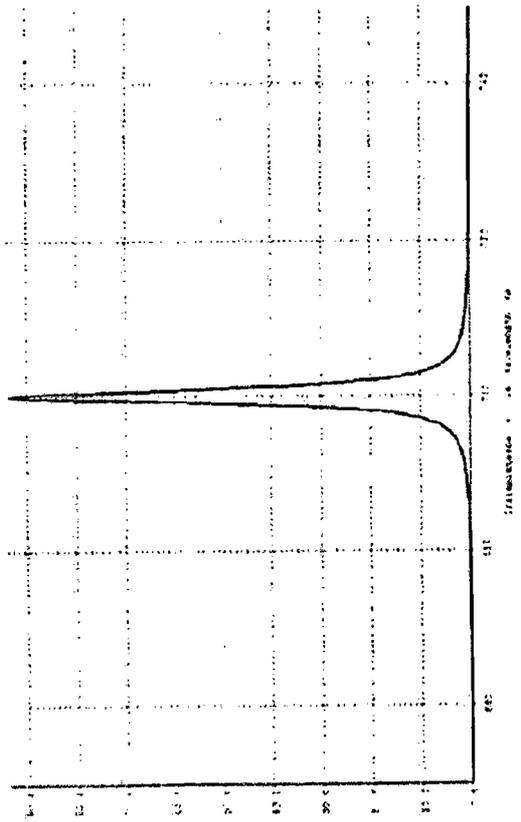
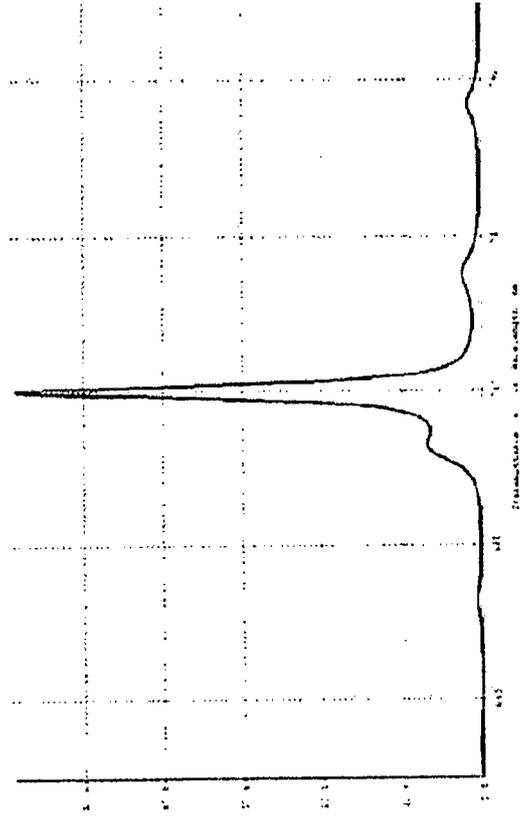


图14



(15a)

衬底=二氧化硅



(15b)

0.35 μm LOCOS COMS工艺  
单块

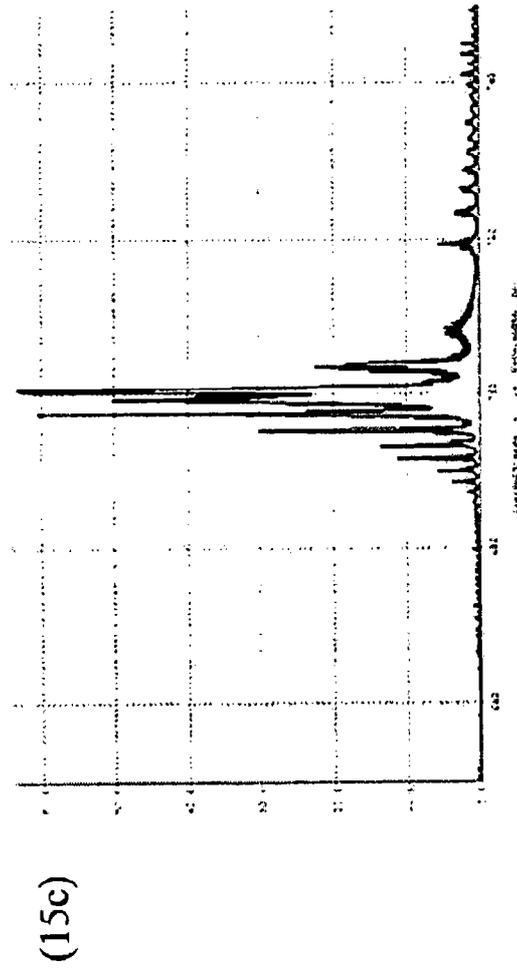


图15

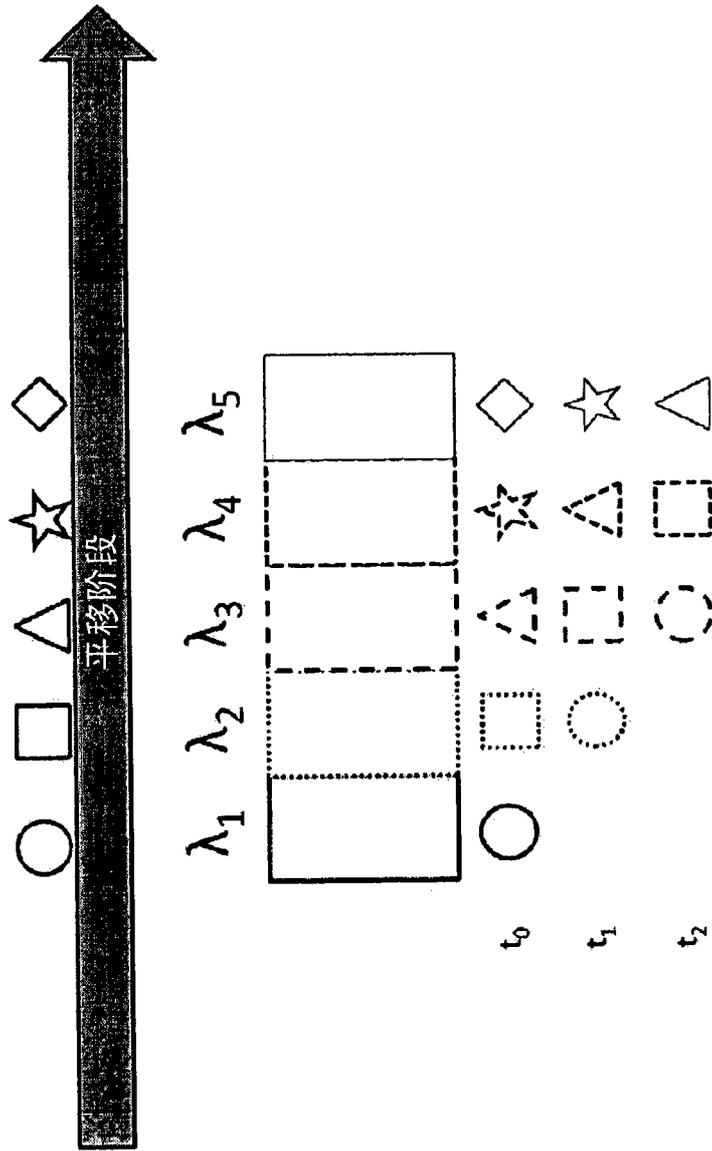


图16

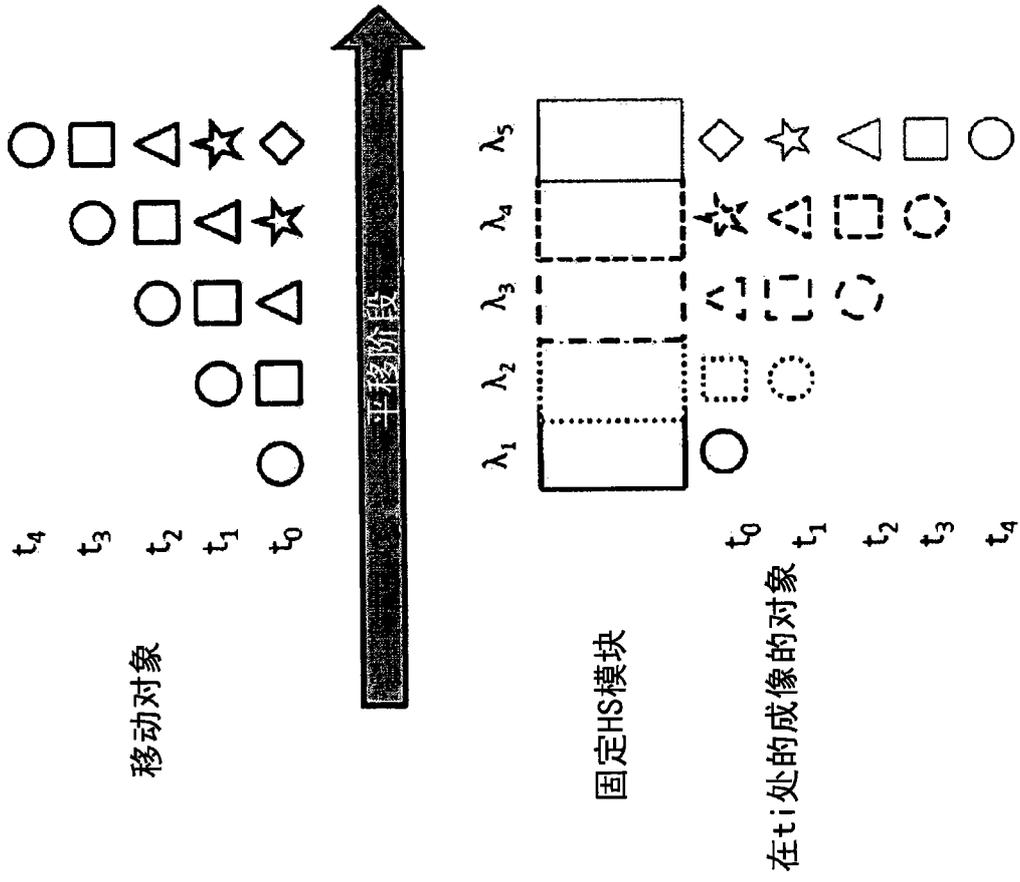


图17

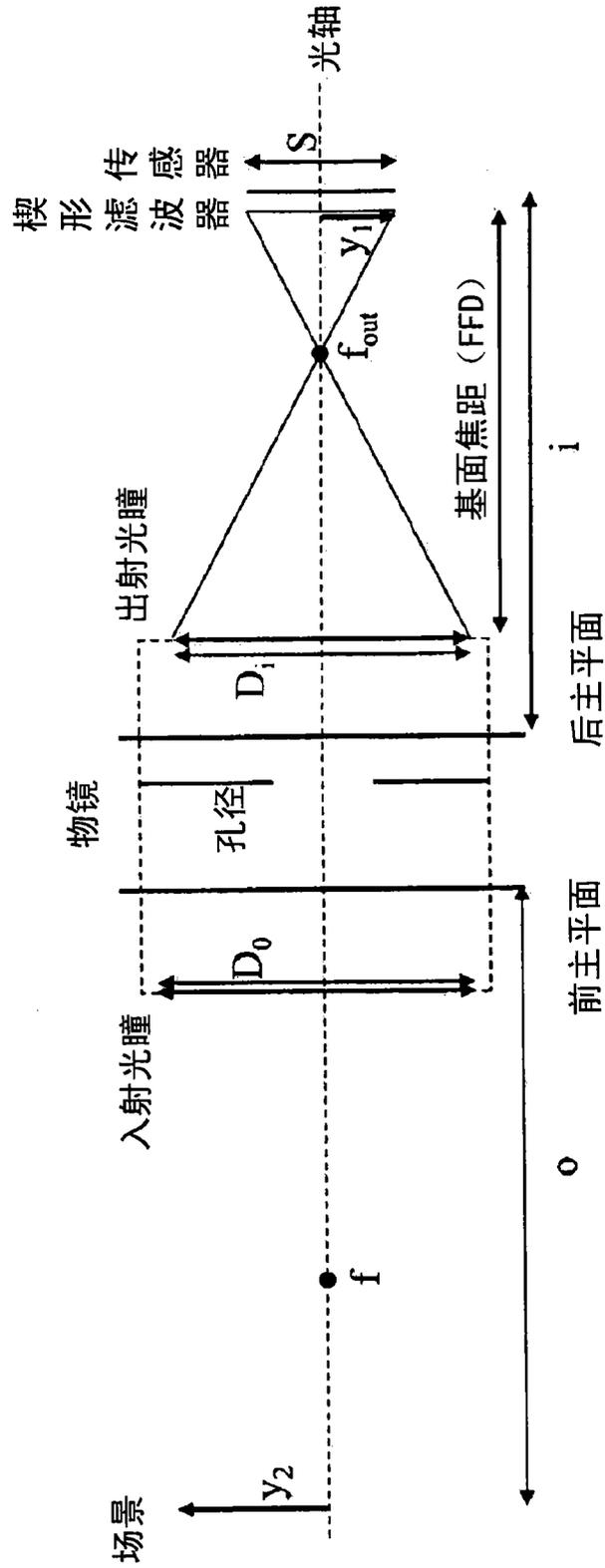


图18

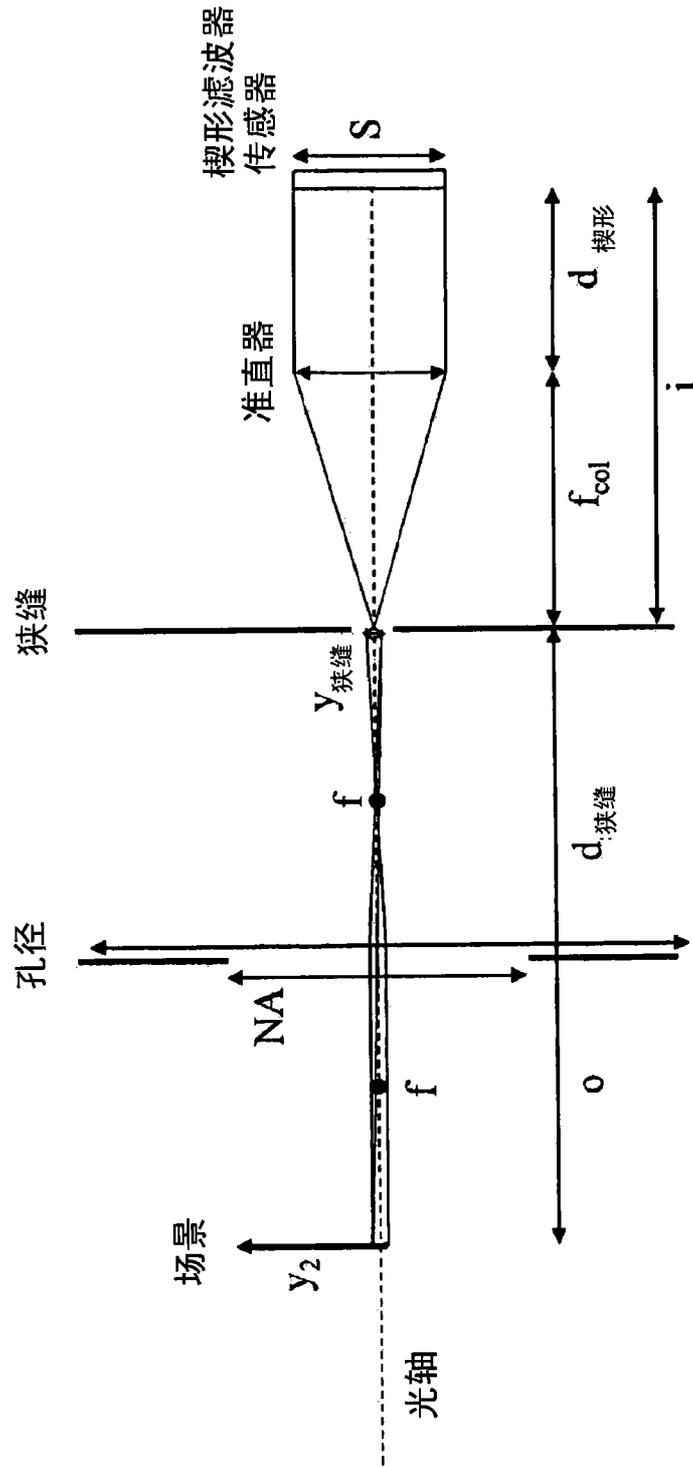


图19

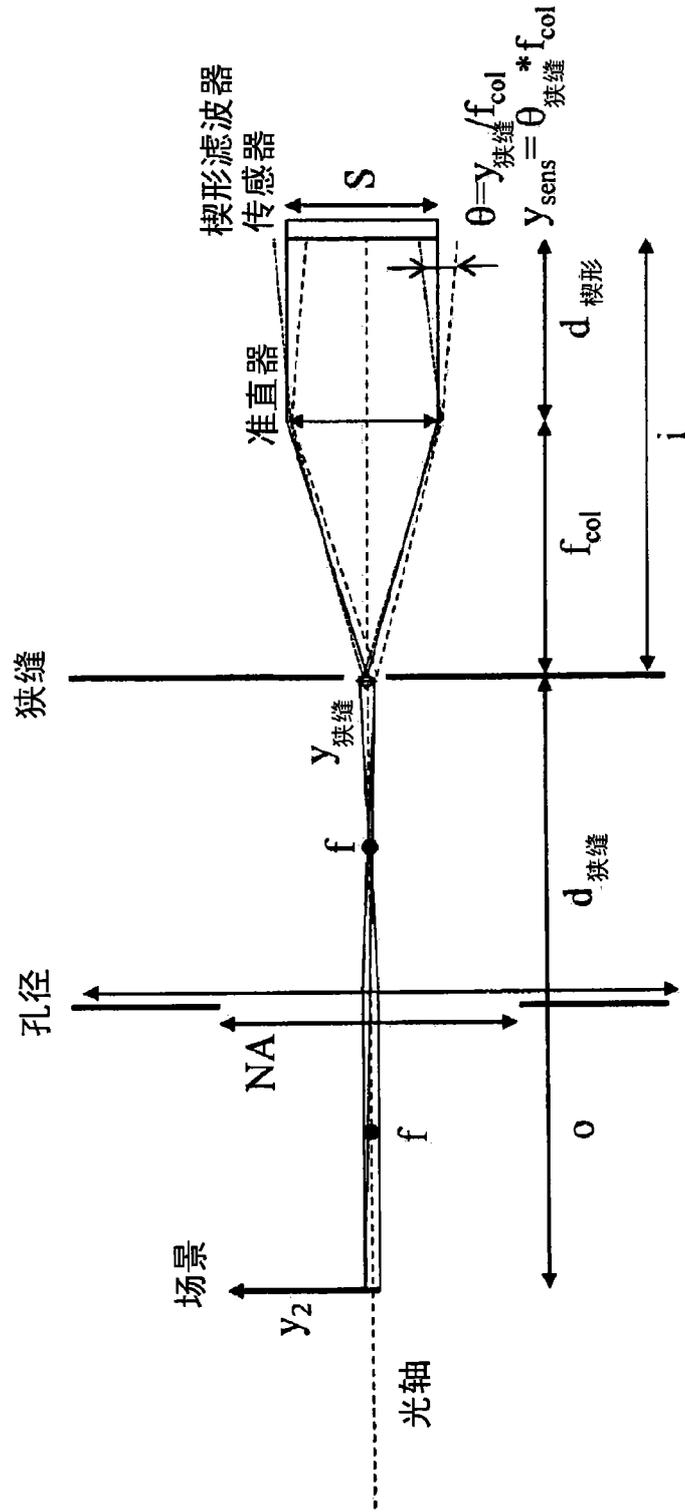


图20

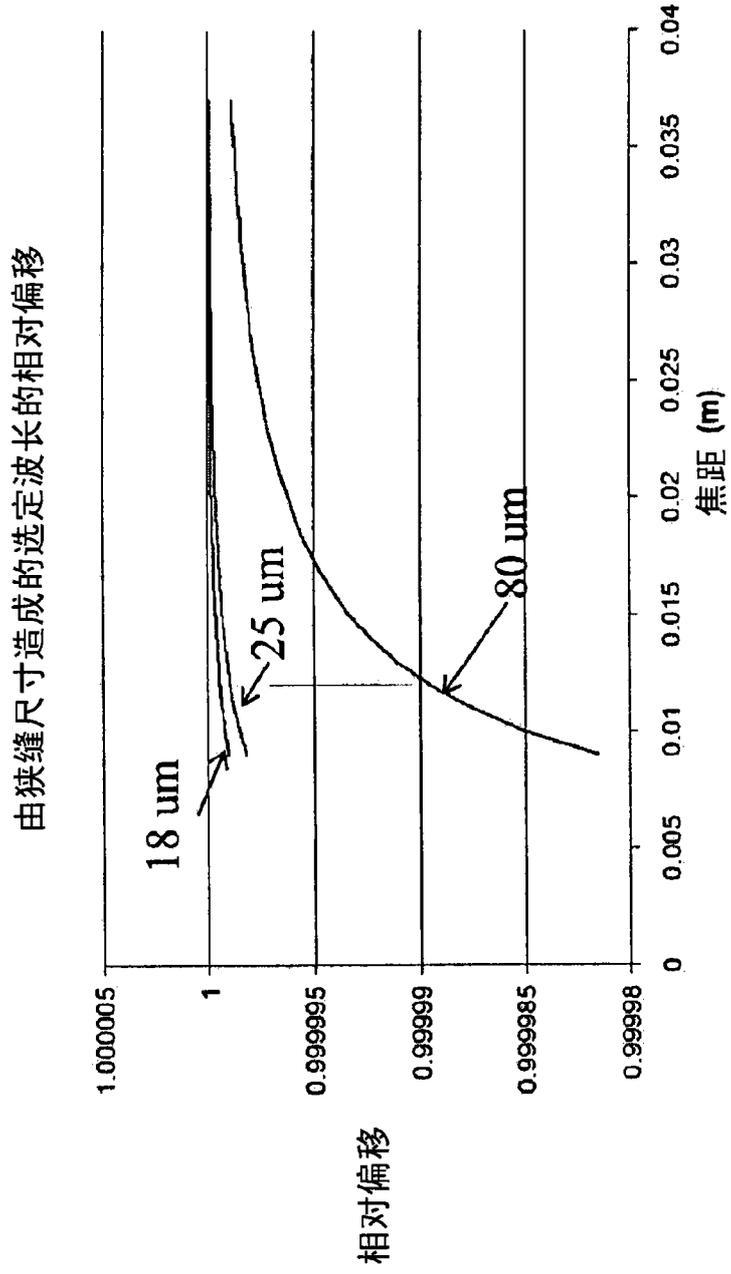


图21

由于角度紊乱产生的波长偏移

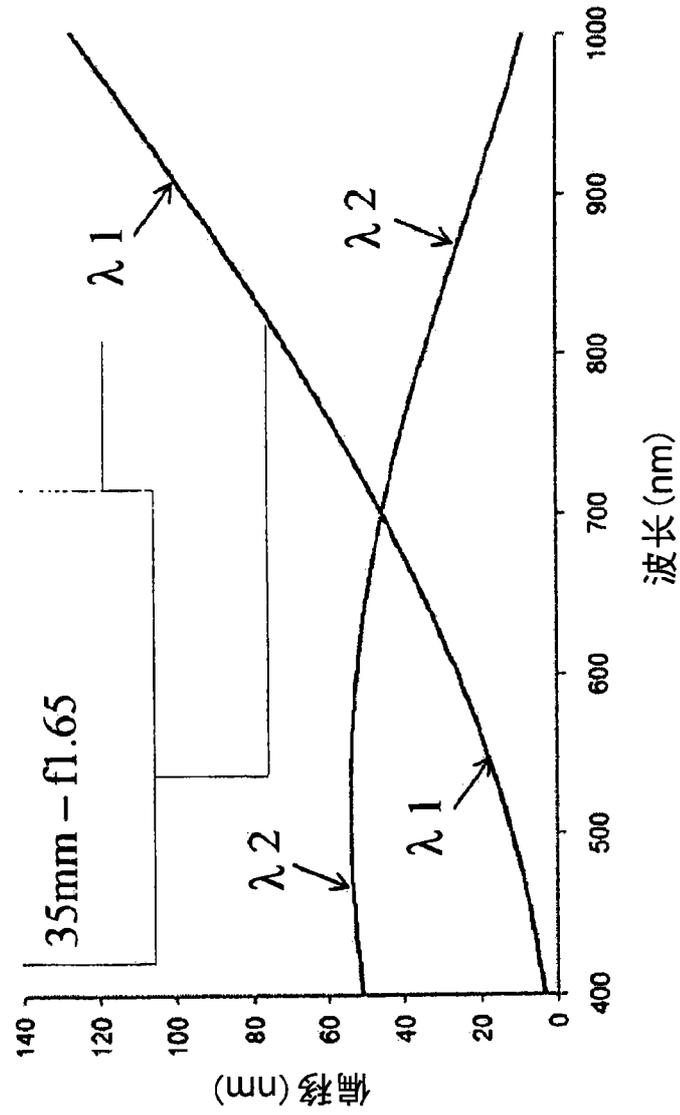


图22a

由于角度紊乱产生的波长偏移

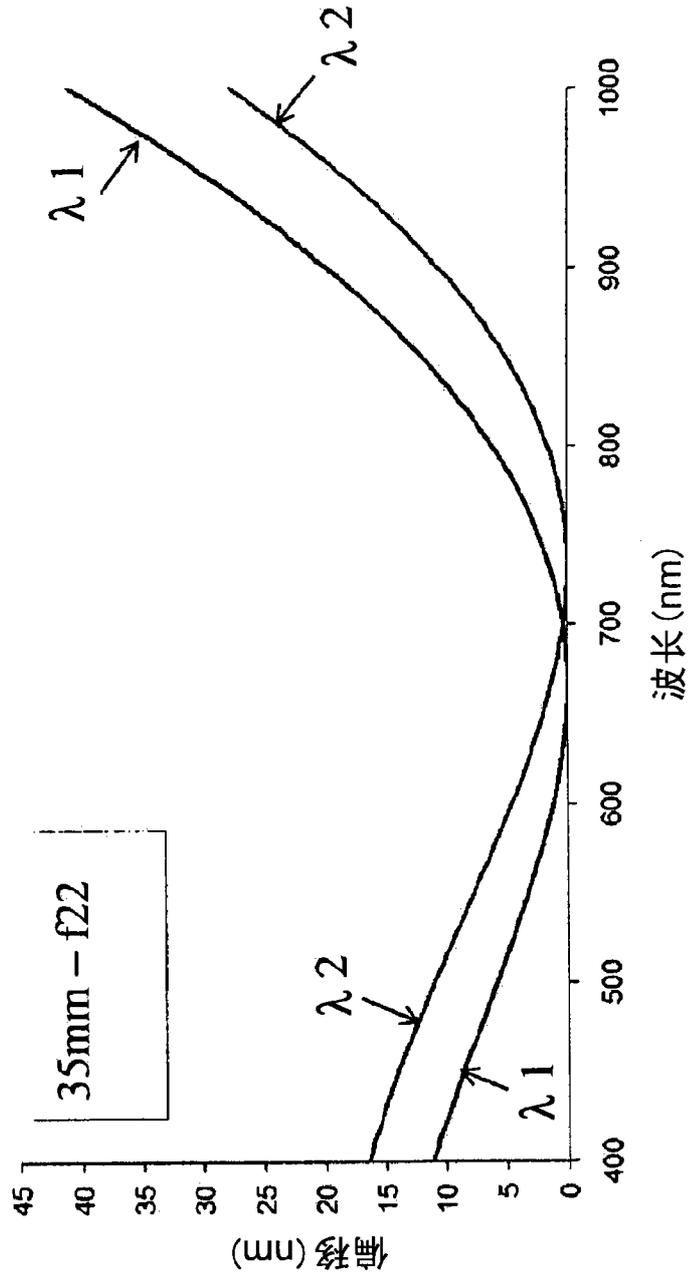


图22b

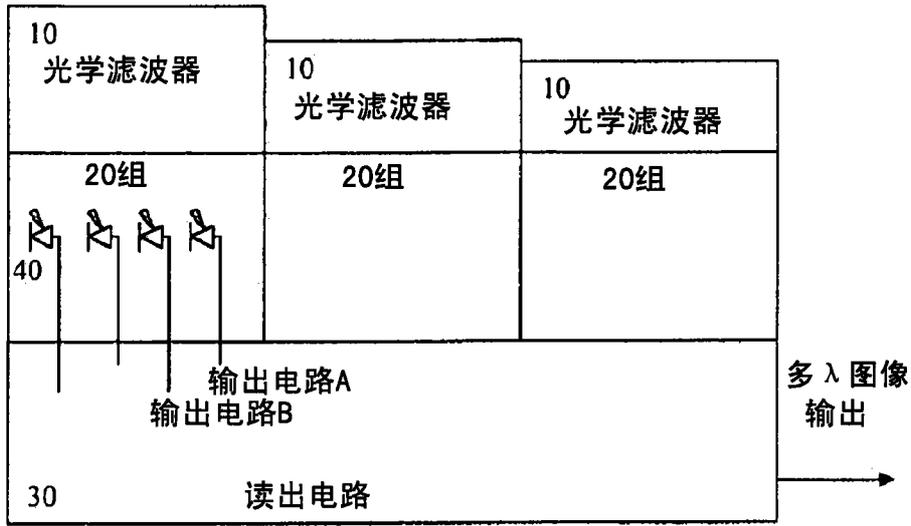


图23

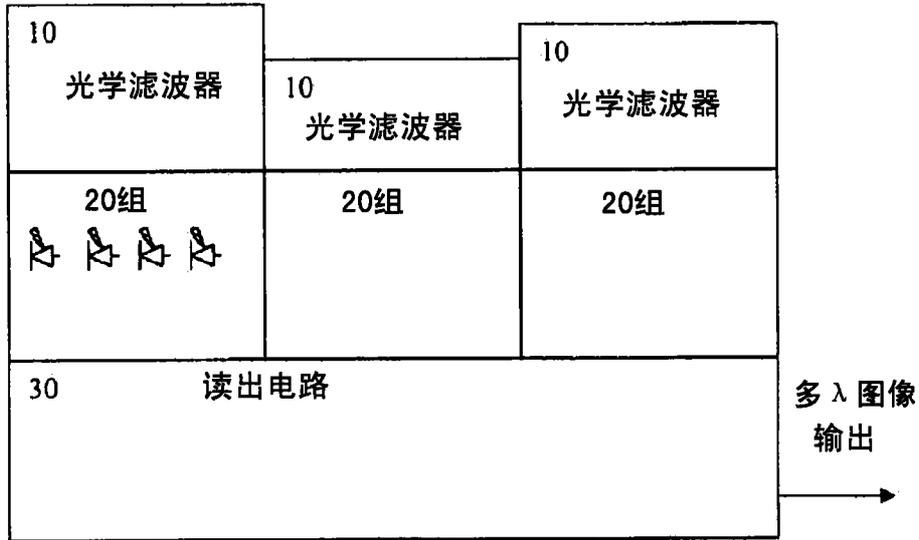


图24



图25



图26

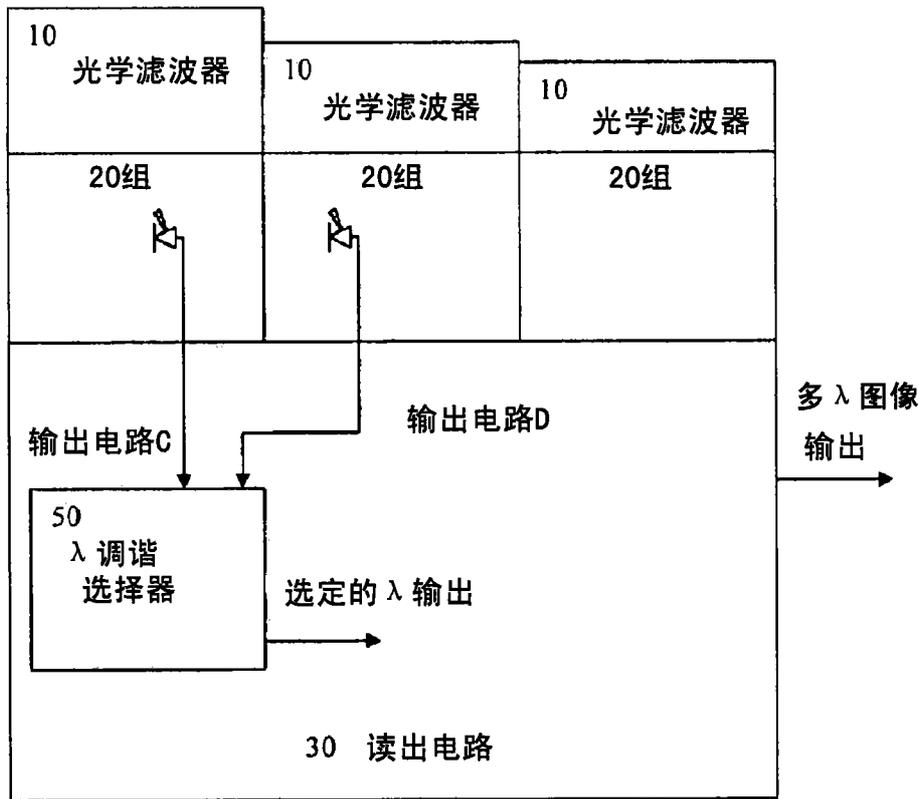


图27

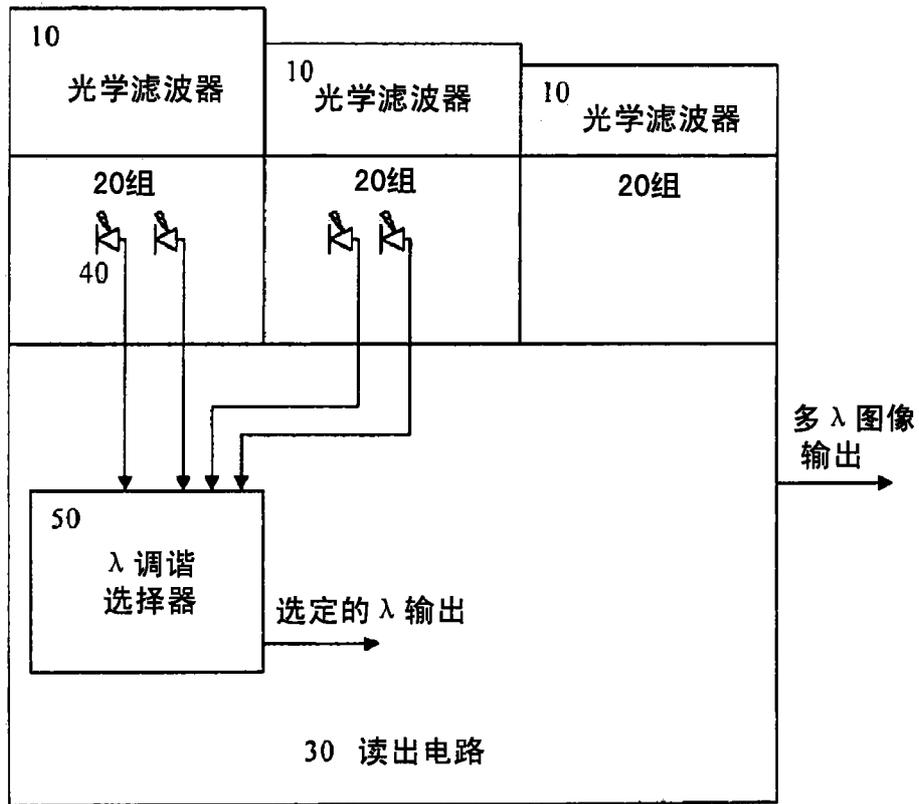


图28

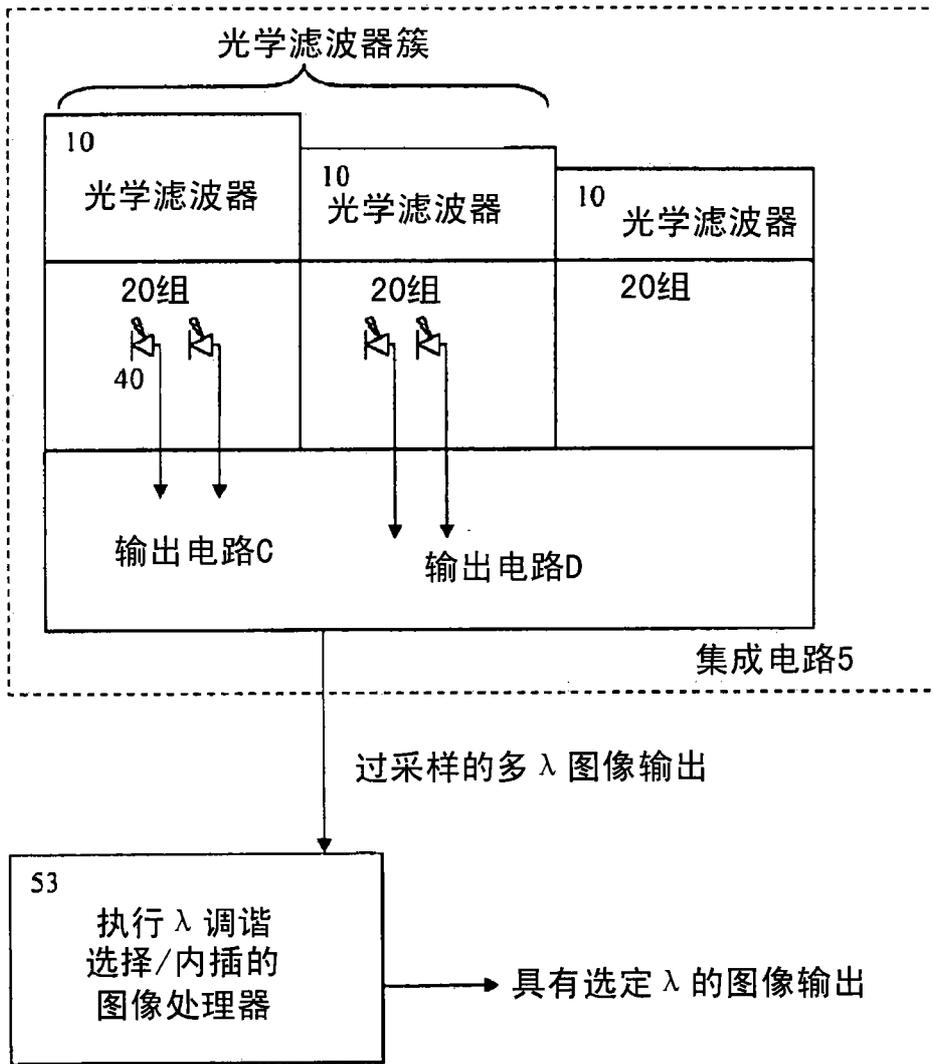


图29

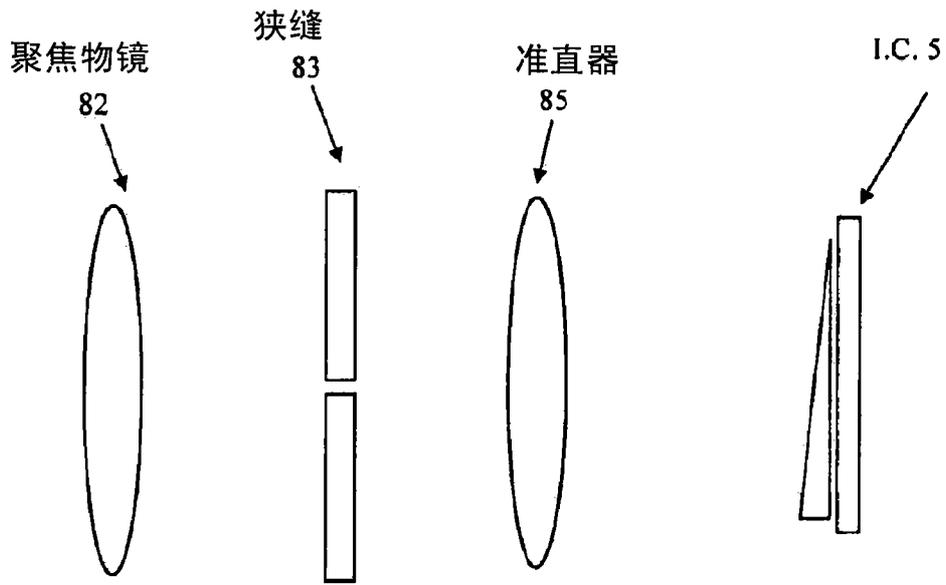


图30

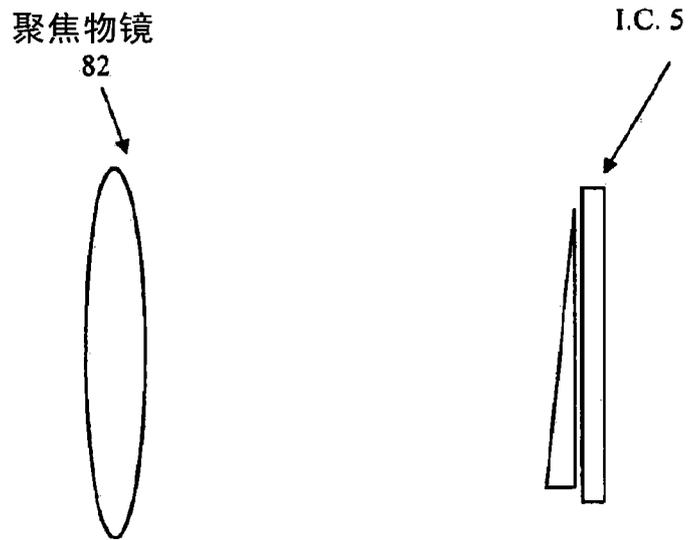


图31