



国家知识产权局

200231

上海市徐汇区桂平路 555 号 45 幢 6 层 603 室
上海恒慧知识产权代理事务所（特殊普通合伙） 徐红银
(021-54400090),禹雪平(021-54400090)

发文日:

2022 年 10 月 21 日



申请号或专利号: 202211294179.7

发文序号: 2022102102201780

专 利 申 请 受 理 通 知 书

根据专利法第 28 条及其实施细则第 38 条、第 39 条的规定，申请人提出的专利申请已由国家知识产权局受理。现将确定的申请号、申请日、申请人和发明创造名称通知如下：

申请号：202211294179.7
申请日：2022 年 10 月 21 日
申请人：上海交通大学
发明创造名称：一种基于双光梳的单像素全息方法及系统

经核实，国家知识产权局确认收到文件如下：

说明书 每份页数:7 页 文件份数:1 份
实质审查请求书 每份页数:1 页 文件份数:1 份
权利要求书 每份页数:2 页 文件份数:1 份 权利要求项数： 10 项
发明专利请求书 每份页数:5 页 文件份数:1 份
说明书摘要 每份页数:1 页 文件份数:1 份
说明书附图 每份页数:1 页 文件份数:1 份

提示：

1. 申请人收到专利申请受理通知书之后，认为其记载的内容与申请人所提交的相应内容不一致时，可以向国家知识产权局请求更正。
2. 申请人收到专利申请受理通知书之后，再向国家知识产权局办理各种手续时，均应当准确、清晰地写明申请号。
3. 国家知识产权局收到向外国申请专利保密审查请求书后，依据专利法实施细则第 9 条予以审查。

审 查 员：自动受理

审查部门：专利局初审及流程管理部





(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115453841 A

(43) 申请公布日 2022. 12. 09

(21) 申请号 202211294179.7

(22) 申请日 2022.10.21

(71) 申请人 上海交通大学

地址 200240 上海市闵行区东川路800号

(72) 发明人 杨悦晨 周楷璐 胡晨华 林航
何广强

(74) 专利代理机构 上海恒慧知识产权代理事务
所(特殊普通合伙) 31317

专利代理师 徐红银 禹雪平

(51) Int. Cl.

G03H 1/04 (2006.01)

G03H 1/22 (2006.01)

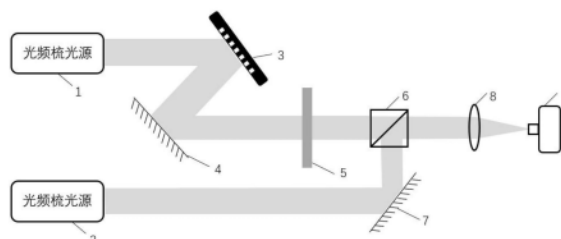
权利要求书2页 说明书5页 附图1页

(54) 发明名称

一种基于双光梳的单像素全息方法及系统

(57) 摘要

本发明提供一种基于双光梳的单像素全息方法及系统,所述方法包括:由第一光频梳光源提供第一光频梳,所述第一光频梳入射至空间光调制器,并经反射后投射过待成像物体;由第二光频梳光源提供第二光频梳,所述第二光频梳经反射后,与透过待成像物体的第一光频梳发生干涉,经过透镜汇聚之后,由光电探测器接收光信号并完成光电转换;调整空间光调制器的工作模式,重复以上步骤,直到遍历空间光调制器的工作模式,最后由计算机程序进行3D全息图像复原,得到全息图像。本发明通过双光梳光源与单像素全息技术的结合,实现物体三维立体图像的重构,可以同时表征影像特征、辐射特征及光谱特征。



1. 一种基于双光梳的单像素全息方法,其特征在于,包括:

由第一光频梳光源提供第一光频梳,所述第一光频梳入射至空间光调制器,并经反射后投射过待成像物体;

由第二光频梳光源提供第二光频梳,所述第二光频梳经反射后,与透过待成像物体的第一光频梳发生干涉,经过透镜汇聚之后,由光电探测器接收光信号并完成光电转换;

调整空间光调制器的工作模式,重复以上步骤,直到遍历空间光调制器的工作模式,最后由计算机程序进行3D全息图像复原,得到全息图像。

2. 根据权利要求1所述的基于双光梳的单像素全息方法,其特征在于,所述第一光频梳光源和所述第二光频梳光源基于微纳谐振腔产生稳定的光频梳。

3. 根据权利要求1所述的基于双光梳的单像素全息方法,其特征在于,所述第一光频梳与第二光频梳的重复频率相差4GHz以内。

4. 根据权利要求1所述的基于双光梳的单像素全息方法,其特征在于,所述第二光频梳与透过待成像物体的第一光频梳在偏振分束器发生干涉被合成一束光。

5. 根据权利要求1所述的基于双光梳的单像素全息方法,其特征在于,所述光电探测器为单像素光电探测器。

6. 根据权利要求1所述的基于双光梳的单像素全息方法,其特征在于,调整空间光调制器的工作模式,重复以上步骤,直到遍历空间光调制器的工作模式,包括:保持两个光频梳光源的输出状态不变,调整空间光调制器的工作模式,使得第一光频梳经空间光调制器反射的反射光状态改变,再与第二光频梳发生干涉。

7. 根据权利要求1所述的基于双光梳的单像素全息方法,其特征在于,调整空间光调制器的工作模式,重复以上步骤,直到遍历空间光调制器的工作模式,其中:遍历空间光调制器所需的工作模式,以收集足够的信号;其中,空间光调制器所需的工作模式数量与成像总像素数量一致。

8. 根据权利要求1所述的基于双光梳的单像素全息方法,其特征在于,所述由计算机程序进行3D全息图像复原,包括:

将接收到的信号按照不同的频率成分分开;

对每个频率成分单独重建全息图像,得到待成像物体的多张复原图像;

综合多张复原图像,得到待成像物体的光谱信息和辐射信息。

9. 根据权利要求1所述的基于双光梳的单像素全息方法,其特征在于,所述由计算机程序进行3D全息图像复原,其中,

计算机程序对图像的重建过程基于空间光调制器工作模式的选取;

所述全息图像包括待成像物体的空间、光谱和辐射三个方面的信息。

10. 一种基于双光梳的单像素全息系统,用于实现权利要求1-9任一项所述的基于双光梳的单像素全息方法,其特征在于,包括:第一光频梳光源、第二光频梳光源、空间光调制器、第一反射镜、第二反射镜、偏振分束器、透镜和光电探测器;其中,

所述第一光频梳光源产生的第一光频梳经所述空间光调制器及所述第一反射镜反射后,透射过待成像样品;同时,所述第二光频梳光源产生的第二光频梳经所述第二反射镜反射后,与透过待成像样品的所述第一光频梳在所述偏振分束器发生干涉,合成一束光,经过所述透镜汇聚之后,由所述光电探测器接收光信号并完成光电转换;

保持两个光频梳光源的输出状态不变,调整所述空间光调制器的工作模式,使得所述第一光频梳经所述空间光调制器反射的反射光状态改变,再与所述第二光频梳在所述偏振分束器发生干涉,再由所述光电探测器接收光信号并完成光电转换;重复该过程,直到遍历所述空间光调制器所需的工作模式,收集足够的信号,最后由计算机程序进行3D全息图像复原。

一种基于双光梳的单像素全息方法及系统

技术领域

[0001] 本发明涉及全息成像技术领域，具体地，涉及一种基于双光梳的单像素全息方法及系统。

背景技术

[0002] 全息技术是一种不仅可以记录光场的振幅，并且可以记录光场的相位的方法。全息技术首先通过干涉原理记录物体的光波信息，即全息拍摄过程，该过程将光束一分为二，其中一束经被拍摄物体后与另一束发生干涉，全息干板记录该干涉条纹，即记录下所有振幅及相位信息。全息底片经过显影、定影等程序后，形成全息图。数字全息技术是采用光电传感器件代替全息干板记录光波信息，采用计算机模拟的方式完成被拍摄物体的成像及再现过程。

[0003] 2005年，美国RICE大学的研究人员根据压缩感知理论设计出了单像素相机，通过数字微镜阵列(DMD)的调制矩阵对含有图像信息的光场强度进行编码，然后通过透镜将所有的光收集起来，并由单像素光电检测器件完成光电转换，但是该技术生成的图像不包含空间坐标信息。2015年，中国发明专利CN105467806A在该基础上发明了单像素全息相机，利用空间振幅调制装置的变换矩阵来对物体的菲涅尔衍射全息图的傅里叶频谱信息进行编码，由单像素强度检测模块完成时变信号的分析 and 记录，通过多次改变空间振幅调制装置的变换矩阵并进行相应的测量，最终得到物体全息图的成像结果。但是，该技术仅记录物体的空间位置信息，不能记录待测物体的光谱信息。

[0004] 光学频率梳，简称光频梳，是一种由频率间隔相等的谱线组成的电磁波，该频率间隔称为重复频率。其中，基于微纳谐振腔非线性参量过程产生的耗散克尔孤子光学频率梳，具有高度相干、高重复频率和低噪声等特性，在光通信、超快测距、调频连续波激光雷达、低相噪微波产生、光学频率合成、双梳光谱和量子密钥分发等领域得到广泛应用。

[0005] 双光梳数字全息技术是以两个光频梳产生系统作为光源，以光电探测器矩阵作为探测器的数字全息系统。该系统运作时首先通过光频梳产生系统产生一个光频梳，其光束透射过待成像的三维物体或经待成像物体反射，与另一个重复频率之差较小的光频梳在探测器矩阵上发生干涉，由探测器记录下干涉条纹信息，最后通过处理程序对图像进行复原。相比于传统的数字全息技术，双光梳全息可以在一次成像过程中由不同梳齿产生多个复原图像，从而得到待成像物体的3D特征和光谱特征。

[0006] 然而，现有的双光梳数字全息技术主要存在以下两个局限性：第一，由于复原图像通常是数万个像素，而相应的大规模探测器阵列造价比较昂贵，而且在某些情况下(例如非可见光波段)，探测器阵列有可能无法制造或者成本过高；第二，光电探测器矩阵的带宽通常比较有限，这对于所用的两个光频梳之间的重复频率之差有严格的要求。以上两个局限性，导致现有的双光梳全息技术成本较高、成像效果和适用范围具有一定的局限性。

发明内容

[0007] 针对现有技术中的缺陷,本发明的目的是提供一种基于双光梳的单像素全息方法及系统,以使双光梳全息技术能够使用两个重频差较大的光频梳进行成本较低的全息成像,并能够获得待测物体的光谱特征。

[0008] 根据本发明的一个方面,提供一种基于双光梳的单像素全息方法,该方法包括:

[0009] 由第一光频梳光源提供第一光频梳,所述第一光频梳入射至空间光调制器,并经反射后投射过待成像物体;

[0010] 由第二光频梳光源提供第二光频梳,所述第二光频梳经反射后,与透过待成像物体的第一光频梳发生干涉,经过透镜汇聚之后,由光电探测器接收光信号并完成光电转换;

[0011] 调整空间光调制器的工作模式,重复以上步骤,直到遍历空间光调制器的工作模式,最后由计算机程序进行3D全息图像复原,得到全息图像。

[0012] 进一步地,所述第一光频梳光源和所述第二光频梳光源基于微纳谐振腔产生稳定的光频梳。

[0013] 进一步地,所述第一光频梳与第二光频梳的重复频率相差4GHz以内。

[0014] 进一步地,所述第二光频梳与透过待成像物体的第一光频梳在偏振分束器发生干涉被合成一束光。

[0015] 进一步地,所述光电探测器为单像素光电探测器。

[0016] 进一步地,调整空间光调制器的工作模式,重复以上步骤,直到遍历空间光调制器的工作模式,包括:保持两个光频梳光源的输出状态不变,调整空间光调制器的工作模式,使得第一光频梳经空间光调制器反射的反射光状态改变,再与第二光频梳发生干涉。

[0017] 进一步地,调整空间光调制器的工作模式,重复以上步骤,直到遍历空间光调制器的工作模式,其中:遍历空间光调制器所需的工作模式,以收集足够的信号;其中,空间光调制器所需的工作模式数量与成像总像素数量一致。

[0018] 进一步地,所述由计算机程序进行3D全息图像复原,包括:

[0019] 将接收到的信号按照不同的频率成分分开;

[0020] 对每个频率成分单独重建全息图像,得到待成像物体的多张复原图像;

[0021] 综合多张复原图像,得到待成像物体的光谱信息和辐射信息。

[0022] 进一步地,所述由计算机程序进行3D全息图像复原,其中,计算机程序对图像的重建过程基于空间光调制器工作模式的选取。

[0023] 进一步地,所述全息图像包括待成像物体的空间、光谱和辐射三个方面的信息。

[0024] 根据本发明的另一个方面,提供一种基于双光梳的单像素全息系统,用于实现上述基于双光梳的单像素全息方法,具体的,该系统包括:第一光频梳光源、第二光频梳光源、空间光调制器、第一反射镜、第二反射镜、偏振分束器、透镜和光电探测器;其中,

[0025] 所述第一光频梳光源产生的第一光频梳经所述空间光调制器及所述第一反射镜反射后,透射过待成像样品;同时,所述第二光频梳光源产生的第二光频梳经所述第二反射镜反射后,与透过待成像样品的所述第一光频梳在所述偏振分束器发生干涉,合成一束光,经过所述透镜汇聚之后,由所述光电探测器接收光信号并完成光电转换;

[0026] 保持两个光频梳光源的输出状态不变,调整所述空间光调制器的工作模式,使得所述第一光频梳经所述空间光调制器反射的反射光状态改变,再与所述第二光频梳在所述

偏振分束器发生干涉,再由所述光电探测器接收光信号并完成光电转换;重复该过程,直到遍历所述空间光调制器所需的工作模式,收集足够的信号,最后由计算机程序进行3D全息图像复原。

[0027] 与现有技术相比,本发明具有如下至少之一的有益效果:

[0028] 1. 本发明将双光梳技术应用于数字全息成像,利用双光梳多频率成分的特性,在一次成像中获得多张全息成像图,能够提升成像结果对待测物体的表征维度,同时取得待测物体影像及光谱特征。

[0029] 2. 本发明采用探测器为单个光电探测器的单像素全息方法,允许双光梳光源的重频差在相对较大的范围内变化,从而能够降低传统数字全息方法中对探测器阵列的要求。

附图说明

[0030] 通过阅读参照以下附图对非限制性实施例所作的详细描述,本发明的其它特征、目的和优点将会变得更明显:

[0031] 图1为本发明一实施例的基于双光梳的单像素全息方法的光路示意图;

[0032] 图2为本发明一实施例的不同 m 、 n 值下的Hermite-Gauss正交基示意图。

[0033] 图中:1为第一光频梳光源,2为第二光频梳光源,3为空间光调制器,4为第一反射镜,5为待成像样品,6为偏振分束器,7为第二反射镜,8为透镜,9为光电探测器。

具体实施方式

[0034] 下面结合具体实施例对本发明进行详细说明。以下实施例将有助于本领域的技术人员进一步理解本发明,但不以任何形式限制本发明。应当指出的是,对本领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明构思的前提下,还可以做出若干变形和改进。这些都属于本发明的保护范围。

[0035] 本发明实施例提供一种基于双光梳的单像素全息方法,该方法包括:

[0036] S1,由第一光频梳光源提供第一光频梳,第一光频梳入射至空间光调制器(SLM),空间光调制器为反射式空间光调制器,并经反射后投射过待成像物体(待测样品);

[0037] S2,由第二光频梳光源提供第二光频梳,第二光频梳经反射后,与透过待成像物体的第一光频梳发生干涉,经过透镜汇聚之后,由光电探测器接收光信号并完成光电转换;

[0038] S3,调整空间光调制器的工作模式,调整经其不同位置透射或反射的光的振幅,重复步骤S1和S2,直到遍历所有需要的空间光调制器的工作模式,最后由计算机程序进行3D全息图像复原,得到全息图像。

[0039] 本发明实施例由两个光梳光源产生两个光频梳,分别作为物光与参考光,其中物光通过空间光调制器照射物体,经物体透射后与参考光发生干涉,再经透镜汇聚后由单个光电探测器转化为电信号。调整空间光调制器的工作模式,获得不同模式下的信号,也通过单像素光电探测器完成光电转换,最后通过计算机处理程序完成物体三维图像的重建。本发明结合双光梳技术与单像素全息技术,提升成像结果对待测物体的表征维度,同时取得待测物体影像及光谱特征,实现物体三维立体图像的重构。

[0040] 在一些实施方式中,第一光频梳光源和第二光频梳光源基于微纳谐振腔产生稳定的光频梳。第一光频梳与第二光频梳的重复频率有一定差距,重复频率相差的数值(重复频

率差)决定了每次成像可以获得的全息图像数量,其关系为:全息图像数量=探测器带宽/重复频率差,光电探测器为单像素光电探测器,用于探测到达接收器的光强。采用探测器为单像素光电探测器的单像素全息方法,只需双光梳光源在干涉后产生的信号频率范围在单像素光电探测器的带宽之内即可,而单像素光电探测器的带宽通常较大,因此允许双光梳光源的重频差在相对较大的范围内变化,降低传统数字全息方法中对探测器阵列的要求。优选地,第一光频梳与第二光频梳的重复频率相差4GHz以内,根据上述全息图像数量与探测器带宽、重复频率差的关系,如果单像素光电探测器带宽为40GHz,则每次成像可得到至少10张全息图像,从而可以在一次成像中获得多张全息成像图,每张全息图均可体现待测样品的空间特性,综合多张全息图取得样品的光谱和辐射特性。

[0041] 在一些实施方式中,第二光频梳与透过待成像物体的第一光频梳在偏振分束器发生干涉被合成一束光。

[0042] 在一些实施方式中,调整空间光调制器的工作模式,重复以上步骤,直到遍历空间光调制器的工作模式,包括:保持两个光频梳光源的输出状态不变,调整空间光调制器的工作模式,使得第一光频梳经空间光调制器反射的反射光状态改变,再与第二光频梳发生干涉。

[0043] 在一些实施方式中,调整空间光调制器的工作模式,重复以上步骤,直到遍历空间光调制器的工作模式,其中:遍历空间光调制器所需的工作模式,以收集足够的信号。空间光调制器的工作模式数量由成像精度决定,空间光调制器所需的工作模式数量与成像总像素数量一致,如需要对物体进行256*256像素的成像,则空间光调制器所需模式数量为65536,这些模式可以来源于一族正交基。

[0044] 在一些实施方式中,由计算机程序进行3D全息图像复原,包括:将接收到的信号按照不同的频率成分分开;对每个频率成分单独重建全息图像,得到待成像物体的多张复原图像;综合多张复原图像,得到待成像物体的光谱信息和辐射信息。全息图像包括待成像物体的空间、光谱和辐射三个方面的信息,可以同时表征影像特征、辐射特征及光谱特征。

[0045] 在一些实施方式中,由计算机程序进行3D全息图像复原,其中,计算机程序对图像的重建过程基于空间光调制器工作模式的选取,空间光调制器的模式来源于不同正交基时,重建的过程有所区别,但是其基本思想均为将空间光调制器不同模式下探测到的信号投影在正交基上,实现图像的复原。

[0046] 上述实施例中的基于双光梳的单像素全息方法,利用基于双光梳的单像素全息系统实现,系统的结构示意图如图1所示。该系统包括第一光频梳光源1、第二光频梳光源2,空间光调制器3,第一反射镜4、第二反射镜7,偏振分束器6,透镜8,光电探测器9。其中,第一光频梳光源1产生的第一光频梳经空间光调制器3及第一反射镜4反射后,透射过待成像样品5。同时,第二光频梳光源2产生的第二光频梳经第二反射镜7反射后,与透过待成像样品5的第一光频梳在偏振分束器6发生干涉,合成一束光,经过透镜8汇聚之后,由光电探测器9接收光信号并完成光电转换。保持两个光频梳光源的输出状态不变,调整空间光调制器3的工作模式,使得第一光频梳经空间光调制器3反射的反射光状态改变,再与第二光频梳在偏振分束器6发生干涉,再由光电探测器9接收光信号并完成光电转换。重复以上步骤,直到遍历空间光调制器所需的工作模式,收集足够的信号,最后由计算机程序进行3D全息图像复原。其中,计算机程序进行3D全息图像复原,包括:将接收到的信号按照不同的频率成分分开;

对每个频率成分单独进行3D图像的复原,即可得到待测样品的3D成像信息;综合多张复原图像,即可得到待测样品的光谱信息。

[0047] 上述实施例利用两个光频梳作为全息成像系统的光源,通过空间光调制器对含有图像信息的光场强度进行编码,然后通过透镜将所有的光收集起来,并由单像素光电检测器件完成光电转换,最后由计算机处理程序对待测物体完成复原成像并获得其光谱信息。计算机程序对图像的重建过程基于空间光调制器工作模式的选取,在一个具体的实施方式中,一束已知的光照射在样品上时,透过样品的光场可写作:

$$[0048] \quad O(x, y, z, \lambda) = A(x, y, z, \lambda) e^{i\phi(x, y, z, \lambda)}$$

[0049] 其中 $A(x, y, z, \lambda)$ 为样品在不同波长下的空间透射率, $\phi(x, y, \lambda)$ 为传播过程中相位的改变。对于单个频率成分,光场可写为 $O(x, y, z) = A(x, y, z) e^{i\phi(x, y, z)}$ 。进而, $O(x, y, z)$ 可被Hermite-Gauss正交基组 $H_{mn}(x, y, z)$ 分解为:

$$[0050] \quad O(x, y) = \sum_{ij} a_{ij} u_{ij}(x, y, z).$$

[0051] Hermite-Gauss正交基组中每一个基 $u_{ij}(x, y, z)$ 都包含了光场的相位信息,相应的表达式为:

$$[0052] \quad u_{mn}(x, y, z) = A_{mn} \frac{w_0}{w(z)} H_m \left[\frac{\sqrt{2}x}{w(z)} \right] H_n \left[\frac{\sqrt{2}y}{w(z)} \right] \exp \left(-\frac{x^2 + y^2}{w^2(z)} \right) \exp \left(-ik \frac{x^2 + y^2}{2R(z)} + i(m+n+1)\zeta(z) \right)$$

[0053] 其中 $\zeta(z) = \arctan \frac{z}{z_0}$, $R(z) = z \left(1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right)$, $w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2}$, $z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$, $w_0 = \sqrt{\frac{\lambda z_0}{\pi}}$ 。 $H_m(x)$ 为m阶Hermite多项式。光电探测器放在一个固定位置时,传播距离 z 为一个定

值,即 u_{mn} 是一个二维函数。图2为 m 为0、1、2、3, n 为0、1、2时 u_{mn} 对应的光强图像。

[0054] 将Hermite-Gauss正交基组中每一个基根据全息所需像素数量进行离散化,并设定相应的空间光调制器模式。空间光调制器的工作模式需满足,当一束平行光入射空间光调制器时,其出射光强度分布与 u_{mn} 函数值一致。工作时遍历该精度下的所有模式,光电探测器即可接收到所有模式下的光强,根据正交分解原理,计算机程序即完成图像的复现。

[0055] 以上对本发明的具体实施例进行了描述。需要理解的是,本发明并不局限于上述特定实施方式,本领域技术人员可以在权利要求的范围内做出各种变形或修改,这并不影响本发明的实质内容。上述各优选特征在互不冲突的情况下,可以任意组合使用。

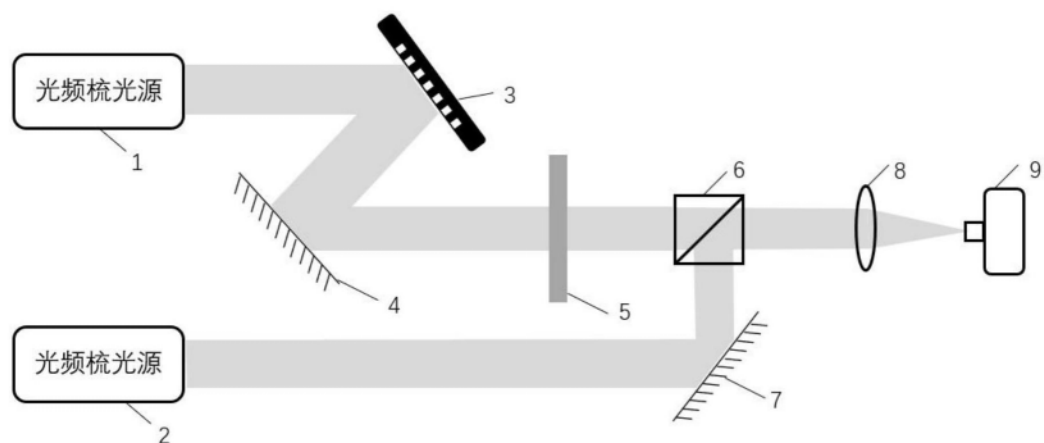


图1

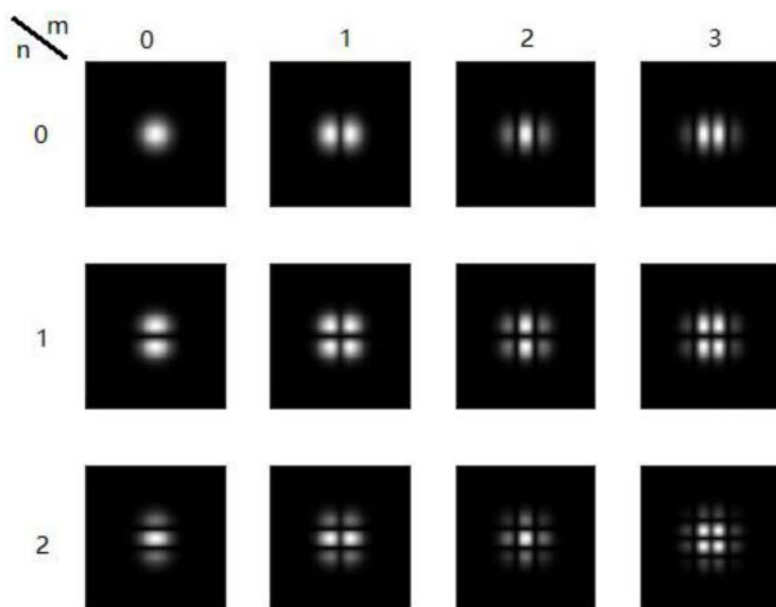


图2