



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116430687 A

(43) 申请公布日 2023. 07. 14

(21) 申请号 202310698595.1

(22) 申请日 2023.06.14

(71) 申请人 之江实验室

地址 311121 浙江省杭州市余杭区中泰街
道科创大道之江实验室

申请人 浙江大学

(72) 发明人 丁晨良 匡翠方 苏晨怡 杨顺华

徐良 刘勇 刘旭

(74) 专利代理机构 上海科盛知识产权代理有限

公司 31225

专利代理师 蒋亮珠

(51) Int. Cl.

G03F 7/20 (2006.01)

G02B 27/10 (2006.01)

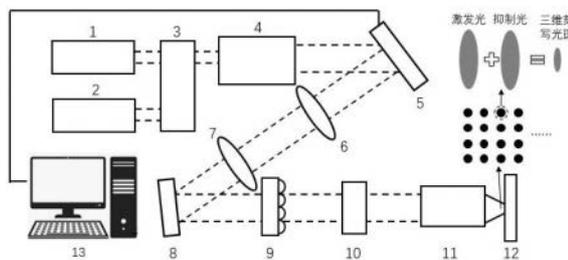
权利要求书2页 说明书9页 附图3页

(54) 发明名称

一种基于双光束的高通量超分辨三维刻写方法与系统

(57) 摘要

本发明涉及一种超分辨激光纳米直写光刻技术,具体涉及一种基于双光束的高通量超分辨三维刻写方法与系统,该方法为,合束光平行入射数字微镜器件并经数字微镜器件反射后入射微透镜阵列,于微透镜阵列焦平面处形成聚焦点阵,使该聚焦点阵成像于双光束光刻胶表面形成激发光束与抑制光束重合的刻写点阵,对双光束光刻胶进行曝光;合束光由激发光束与抑制光束合束得到;通过调节数字微镜器件区域微镜的开关状态,调控刻写点阵中各点处的能量;通过调节抑制光束的能量,使刻写点阵中各点于中心区域形成光刻胶聚合促进,于外围区域形成光刻胶聚合抑制。与现有技术相比,本发明实现了高通量、超分辨、三维纳米结构的刻写,大幅提升刻写精度与效率。



1. 一种基于双光束的高通量超分辨三维刻写方法,其特征在于,合束光平行入射数字微镜器件并经数字微镜器件反射后入射微透镜阵列,于微透镜阵列焦平面处形成聚焦点阵,使该聚焦点阵成像于双光束光刻胶表面形成激发光束与抑制光束重合的刻写点阵,对双光束光刻胶进行曝光;

所述的合束光由激发光束与抑制光束合束得到;

所述的刻写点阵中单点的光强分布为高斯分布;

通过调节数字微镜器件区域微镜的开关状态,调控刻写点阵中各点处的能量;

通过调节抑制光束的能量,使刻写点阵中各点于中心区域形成光刻胶聚合促进,于外围区域形成光刻胶聚合抑制。

2. 根据权利要求1所述的一种基于双光束的高通量超分辨三维刻写方法,其特征在于,所述的激发光束为飞秒激光光束,波长范围为400-800nm;所述的抑制光束为连续激光光束、皮秒激光光束和纳米激光光束中的任意一种,波长范围为400-800nm。

3. 根据权利要求2所述的一种基于双光束的高通量超分辨三维刻写方法,其特征在于,激发光束与抑制光束波长相等。

4. 根据权利要求1所述的一种基于双光束的高通量超分辨三维刻写方法,其特征在于,所述的双光束光刻胶中光引发剂材料为苯偶酰、苯甲酮、二乙酰、螺[1,3,3-三甲基吲哚-(6'-硝基苯并二氢吡喃)]、7-二乙氨基-3-噻吩甲酰基香豆素和2-异丙基硫杂蒽酮中的任意一种。

5. 一种基于双光束的高通量超分辨三维刻写方法的系统,其特征在于,采用如权利要求1-4任一所述的方法进行三维刻写;

该系统包括光源、合束模块(3)、数字微镜器件(5)、微透镜阵列(9)、物镜(11)和三维样品台(12);

所述的光源分别发射激发光束和抑制光束;

所述的合束模块(3)将来自光源的激发光束和抑制光束合束后入射所述的数字微镜器件(5),所述的数字微镜器件(5)反射合束光并使其入射微透镜阵列(9),微透镜阵列(9)于焦平面处形成聚焦点阵,聚焦点阵通过物镜(11)成像于三维样品台(12)上形成刻写点阵;

所述的双光束光刻胶设置于三维样品台(12)上。

6. 根据权利要求5所述的一种基于双光束的高通量超分辨三维刻写方法的系统,其特征在于,所述的合束模块(3)包括第一二分之一玻片(14)、偏振分光棱镜(15)、第二二分之一玻片(16)和第二反射镜(17);

所述第一二分之一玻片(14)对光源发出的第一激光光束进行偏振态调制,使第一激光光束经过所述偏振分光棱镜(15)后,所有能量发生透射;

所述第二二分之一玻片(15)对光源发出的第二激光光束进行偏振态调制,使第二激光光束经过第二反射镜(17)并入射所述偏振分光棱镜(15)后,所有能量发生反射。

7. 根据权利要求5所述的一种基于双光束的高通量超分辨三维刻写方法的系统,其特征在于,所述的系统还包括设置于合束模块(3)和数字微镜器件(5)之间的扩束模块(4),使合束光扩束至与数字微镜器件(5)的有效作用面积相匹配;

所述扩束模块(4)包括第四透镜(18)、小孔(19)和第五透镜(20);所述小孔(19)设置于第四透镜(18)与第五透镜(20)之间的焦平面处,用于对合束光进行滤波,第四透镜(18)与

第五透镜(20)形成的放大倍率大于1,用于对合束光进行扩束。

8.根据权利要求5所述的一种基于双光束的高通量超分辨三维刻写方法的系统,其特征在于,所述的数字微镜器件(5)与所述的微透镜阵列(9)之间还依次设置有第一透镜(6)和第二透镜(7),数字微镜器件(5)、第一透镜(6)、第二透镜(7)与微透镜阵列(9)形成4F成像关系。

9.根据权利要求8所述的一种基于双光束的高通量超分辨三维刻写方法的系统,其特征在于,所述的第二透镜(7)与微透镜阵列(9)之间还设有第一反射镜(8)。

10.根据权利要求5所述的一种基于双光束的高通量超分辨三维刻写方法的系统,其特征在于,所述的微透镜阵列(9)与所述的物镜(11)之间还设置有第三透镜(10),微透镜阵列(9)的焦平面、第三透镜(10)、物镜(11)和三维样品台(12)形成4F成像关系。

一种基于双光束的高通量超分辨三维刻写方法与系统

技术领域

[0001] 本发明涉及一种超分辨激光纳米直写光刻技术,具体涉及一种基于双光束的高通量超分辨三维刻写方法与系统。

背景技术

[0002] 双光子激光直写技术凭借其高分辨加工能力、低热影响性、加工材料广泛、环境要求低、具有真三维加工能力等特点,一直是三维微纳加工技术中的研究热点。刻写分辨率与刻写速度两个重要指标的有效提升,是激光直写技术研究发展的核心,也是其满足各个领域发展需求的关键。

[0003] 对于刻写分辨率,严格意义上,通过激光能量与光刻胶材料阈值的严格控制,可以实现任意尺寸的刻写。然而在实际刻写过程中,越接近刻写阈值,制造过程对激光能量波动就越敏感,刻写结构的均匀性急剧恶化,因此,科研人员常采用光学成像领域的衍射分辨率极限作为直写技术系统的刻写极限。双光子直写技术基于其飞秒激光与材料的非线性作用机理(通常为双光子吸收机制,即曝光剂量正比于入射光强的平方),系统的横向与轴向(约为横向的2.5倍)刻写尺寸极限都可以缩小为原来的 $1/\sqrt{2}$ 。也就是说,若采用波长为405 nm的飞秒激光光源与数值孔径为1.4的物镜,系统横向与轴向刻写尺寸极限约为125 nm与312.5 nm。

[0004] 另一方面,对于刻写效率,目前市场上最为成熟的双光子直写设备——德国NanoScribe公司的Photonic Professional GT系列快速高分辨系统能够达到约160 nm的刻写精度与10mm/s的刻写速度,在刻写 1 mm^3 体积的三维结构时需要花费数天时间。精度的不足影响了该技术在芯片、纳米制造等领域的重要运用,难以发挥该技术独特的优势;耗时长则不仅大幅降低了刻写效率,而且在加工过程中带来的不确定因素也大幅增加,严重影响了该技术在实际应用中的推广。因此,双光子直写设备难以真正地应用于产业化生产当中,进而难以产生真正的技术革新。

[0005] 如果激光直写3D光刻技术能实现精度上的大幅提升,并结合速度上的稳步增长,发挥其优势的同时弥补刻写精度与刻写效率的劣势,便可为国产光刻技术谋求新突破,更好地顺应多功能感知系统中的关键敏感单元、微纳结构以及空间互联电路的制造需求,使兼具高通量、高精度、超快速、三维化、复杂性、大面积的微纳加工技术与装备成为可能。

[0006] 中国专利CN202111528094.6公开了基于微透镜阵列和DMD的高通量超分辨激光直写系统,该系统使用一片包括 $m \times m$ 个镜元的微透镜阵列产生 $m \times m$ 束并行光束,结合紫外飞秒激光器、四光束分束器、DMD、合束器、平板光束位移元件、透镜、物镜搭建而成的光路在物镜焦平面上形成 $2m \times 2m$ 个焦点点阵分布,将基于微透镜阵列和DMD的激光直写通量提高到原来的4倍,大幅提高直写速度,且每个焦点可由DMD独立调节光强,从而结合直写算法实现任意图形的并行超分辨激光直写。该技术方案中主要改进是通过提高激光直写通量以提高直写速度;但是提高激光直写通量对应的也需要额外设置更多的配套设备和单元,使得系统结构整体十分复杂,操作较为麻烦,并且该系统在刻写精度上没有做进一步的提升。

[0007] 中国专利CN202211493606.4公开了基于双步双光子效应的高通量超分辨纳米刻写方法与装置,将存在延时的一个激发光和一个促进光合束,入射到数字微镜器件,随后成像到三维样品台的基板上涂覆的具有双步双光子效应的光刻胶上;根据所需刻写结构控制数字微镜器件,完成基板所在焦面处的曝光,同时控制三维样品台,以及激发光和促进光的延时,使延时大于光刻胶分子的单重态的激发态 S_1 到多重态 T_1 ,进而实现双步双光子效应,实现任意三维纳米结构的刻写;激发光和促进光为同一波长且重复频率相同的激光束,且激发光的脉宽为飞秒,促进光的脉宽为皮秒或者纳秒。该技术方案中通过时延效果使光刻胶上实现双光子吸收与三重态吸收,形成类似三光子吸收的效果,进而实现更小的刻写精度;但是时延需要精准控制,对操作要求和控制精度要求均较高,并且利用的是类似三光子吸收的效果,难以大幅减小刻写尺寸,且难以有效消除多点刻写时点与点之间的邻近效应,导致刻写周期难以达到预期。

[0008] 由上可见,现有技术所提出的双光子激光直写技术的可行方案仍存在一些缺陷而使其较难去实际规模应用,因而仍需要对技术进行改进以满足光刻需要。

发明内容

[0009] 本发明的目的就是为了解决上述问题至少其一而提供一种基于双光束的高通量超分辨三维刻写方法与系统,以解决现有技术中激光直写3D光刻技术难以满足刻写精度与刻写效率的需要,实现了高通量、超分辨、三维纳米结构的刻写,大幅提升刻写精度与效率。

[0010] 本发明的目的通过以下技术方案实现:

[0011] 本发明第一方面公开了一种基于双光束的高通量超分辨三维刻写方法,合束光平行入射数字微镜器件(DMD)并经数字微镜器件反射后入射微透镜阵列(MLA),于微透镜阵列焦平面处形成聚焦点阵,使该聚焦点阵成像于双光束光刻胶表面形成激发光束与抑制光束重合的刻写点阵,且激发光束与抑制光束聚焦点的强度分布都为高斯分布,对双光束光刻胶进行曝光;

所述的合束光由激发光束与抑制光束合束得到;

通过调节数字微镜器件区域微镜的开关状态,调控刻写点阵中各点处的能量;

通过调节抑制光束的能量,使刻写点阵中各点于中心区域形成光刻胶聚合促进,于外围区域形成光刻胶聚合抑制。

[0012] 优选地,所述的激发光束为飞秒激光光束,波长范围为400-800nm;所述的抑制光束为连续激光光束、皮秒激光光束和纳米激光光束中的任意一种,波长范围为400-800nm。

[0013] 优选地,激发光束与抑制光束波长相等,此时所导致的色差影响最小。

[0014] 优选地,所述的双光束光刻胶中光引发剂材料为苯偶酰、苯甲酮、二乙酰、螺[1,3,3-三甲基吲哚-(6'-硝基苯并二氢吡喃)]、7-二乙氨基-3-噻吩甲酰基香豆素和2-异丙基硫杂蒽酮中的任意一种。

[0015] 本发明第二方面公开了一种基于双光束的高通量超分辨三维刻写方法的系统,采用如上任一所述的方法进行三维刻写;

该系统包括光源、合束模块、数字微镜器件、微透镜阵列、物镜和三维样品台;

所述的光源分别发射激发光束和抑制光束;

所述的合束模块将来自光源的激发光束和抑制光束合束后入射所述的数字微镜

器件,所述的数字微镜器件反射合束光并使其入射微透镜阵列,微透镜阵列于焦平面处形成聚焦点阵,聚焦点阵通过物镜成像于三维样品台上形成刻写点阵;

所述的双光束光刻胶设置于三维样品台上。

[0016] 优选地,所述的合束模块包括第一二分之一玻片、偏振分光棱镜、第二二分之一玻片和第二反射镜;

所述第一二分之一玻片对光源发出的第一激光光束进行偏振态调制,使第一激光光束经过所述偏振分光棱镜后,所有能量发生透射;

所述第二二分之一玻片对光源发出的第二激光光束进行偏振态调制,使第二激光光束经过第二反射镜并入射所述偏振分光棱镜后,所有能量发生反射。

[0017] 优选地,所述的系统还包括设置于合束模块和数字微镜器件之间的扩束模块,使合束光扩束至与数字微镜器件的有效作用面积相匹配;

所述扩束模块包括第四透镜、小孔和第五透镜;所述小孔设置于第四透镜与第五透镜之间的焦平面处,用于对合束光进行滤波,第四透镜与第五透镜形成的放大倍率大于1,用于对合束光进行扩束。

[0018] 优选地,所述的数字微镜器件与所述的微透镜阵列之间还依次设置有第一透镜和第二透镜,数字微镜器件、第一透镜、第二透镜与微透镜阵列形成4F成像关系。

[0019] 所述的4F成像关系具体为所述数字微镜阵列DMD与所述第一透镜的距离等于所述第一透镜的焦距,所述第一透镜与所述第二透镜的间距为两者焦距和,所述第二透镜与所述微透镜阵列MLA的距离等于所述第二透镜的焦距。

[0020] 优选地,所述的第二透镜与微透镜阵列之间还设有第一反射镜。

[0021] 优选地,所述的微透镜阵列与所述的物镜之间还设置有第三透镜,微透镜阵列的焦平面、第三透镜、物镜和三维样品台形成4F成像关系。

[0022] 所述的4F成像关系具体为所述微透镜阵列MLA的焦平面与所述第三透镜的距离等于所述第三透镜的焦距,所述第三透镜与所述物镜的间距为两者焦距和,所述物镜与所述三维样品台的距离等于所述物镜的焦距。

[0023] 本发明的工作原理为:

[0024] 双光束光刻胶在超分辨刻写方法中抑制光束对激发光束存在特殊抑制现象,随着抑制光能量增强光刻胶聚合发生先抑制效果增强,后抑制效果减弱,随后转变为促进的现象,使两个聚焦光束三维中心区域发生光刻胶聚合促进现象,外围区域发生光刻胶聚合抑制现象;通过调节入射抑制光束的能量并利用上述原理,可实现三维结构的超分辨刻写。

[0025] 与现有技术相比,本发明具有以下有益效果:

[0026] 本发明利用双光束超分辨刻写方法中抑制光束对激发光束的特殊抑制现象,即随着抑制光能量增强发生先抑制效果增强,后抑制效果减弱,随后转变为促进的现象,将激发光束与抑制光束通过物镜聚焦于同一空间区域,再利用以上特殊现象,让两个聚焦点中心发生促进现象,让边缘能量弱的部分发生抑制现象,不仅能减小三维刻写线宽,而且能有效抑制多点刻写时的邻近效应,进而实现三维结构的超分辨刻写。本发明利用以上原理,将两束同波长的光束(激发光束与抑制光束)进行合束,结合数字微镜阵列DMD与微透镜阵列MLA,在物镜焦平面处形成并行刻写点阵,刻写点阵中每一个点都是由激发光束与抑制光束的聚焦点组成,且两者能量分布在空间上重合,数字微镜DMD上固定区域微镜的开关用于对

刻写点阵中各个点的能量调控,结合三维位移台的高精度移动,实现高通量超分辨三维纳米结构的刻写,大幅提升刻写精度与效率,可以有效的运用于硅光芯片、新型传感器、人工智能、新型材料等新兴领域。

附图说明

- [0027] 图1为本发明的系统的一种示例下的结构示意图;
- [0028] 图2为本发明的合束模块的一种示例下的结构示意图;
- [0029] 图3为本发明的扩束模块的一种示例下的结构示意图;
- [0030] 图4为本发明中抑制光束对激发光束的特殊抑制现象的测试结果图;
- [0031] 图5为实施例1(双光束)与对比例1(单光束)的对比测试结果图;
- [0032] 图中:1-第一光源;2-第二光源;3-合束模块;4-扩束模块;5-数字微镜器件;6-第一透镜;7-第二透镜;8-第一反射镜;9-微透镜阵列;10-第三透镜;11-物镜;12-三维样品台;13-控制器;14-第一二分之一玻片;15-偏振分光棱镜;16-第二二分之一玻片;17-第二反射镜;18-第四透镜;19-小孔;20-第五透镜。

具体实施方式

- [0033] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。
- [0034] 这里将详细地对示例性实施例进行说明,其示例表示在附图中。下面的描述涉及附图时,除非另有表示,不同附图中的相同数字表示相同或相似的要素。以下示例性实施例中所描述的实施方式并不代表与本申请相一致的所有实施方式。相反,它们仅是与如所附权利要求书中所详述的、本申请的一些方面相一致的装置和方法的例子。
- [0035] 在本申请使用的术语是仅仅出于描述特定实施例的目的,而非旨在限制本申请。在本申请和所附权利要求书中所使用的单数形式的“一种”、“所述”和“该”也旨在包括多数形式,除非上下文清楚地表示其他含义。还应当理解,本文中使用的术语“和/或”是指并包含一个或多个相关联的列出项目的任何或所有可能组合。
- [0036] 应当理解,尽管在本申请可能采用术语第一、第二、第三等来描述各种信息,但这些信息不应限于这些术语。这些术语仅用来将同一类型的信息彼此区分开。例如,在不脱离本申请范围的情况下,第一信息也可以被称为第二信息,类似地,第二信息也可以被称为第一信息。取决于语境,如在此所使用的词语“如果”可以被解释成为“在……时”或“当……时”或“响应于确定”。
- [0037] 作为本发明的一个方面,本发明的一种基于双光束的高通量超分辨三维刻写方法,将激发光束与抑制光束先进行合束(并根据需要进行扩束)后,平行入射到数字微镜器件5(缩写为DMD)上,而后DMD反射的合束光(优选经过4F成像)入射到微透镜阵列9(缩写为MLA)上,合束光经过MLA后在其焦平面位置处形成聚焦点阵,该聚焦点阵随后成像于双光束光刻胶上,形成激发光束与抑制光束相重合的刻写点阵,且激发光束与抑制光束聚焦点的强度分布都为高斯分布。
- [0038] 该方法中,DMD上固定区域微镜的开关用于对刻写点阵中各个点的能量调控;
- 超分辨刻写过程中,通过调节入射抑制光束的能量,利用双光束光刻胶在超分辨刻写方法中抑制光束对激发光束的特殊抑制现象,即随着抑制光能量增强光刻胶聚合发生

先抑制效果增强,后抑制效果减弱,随后转变为促进的现象,使两个聚焦于双光束光刻胶表面的光束三维中心区域发生光刻胶聚合促进现象,外围区域发生光刻胶聚合抑制现象,进而实现三维结构的超分辨刻写。

[0039] 该方法中,所使用的激发光束可为飞秒激光光束,其波长范围可为400-800nm,所使用的抑制光束可为连续激光光束、皮秒激光光束或纳米激光光束,其波长范围可为400-800nm。更优的,若将激发光束与抑制光束所选用的波长相一致,则可以有效降低产生的色差影响。

[0040] 该技术中,所使用的双光束光刻胶可采用本领域中的现有双光束光刻胶,比如双光束光刻胶中所含有的光引发剂材料可选择苯偶酰、苯甲酮、二乙酰、螺[1,3,3-三甲基咪啉-(6'-硝基苯并二氢吡喃)]、7-二乙氨基-3-噻吩甲酰基香豆素和2-异丙基硫杂蒽酮中的任意一种。

[0041] 作为本发明的另一个方面,实现一种基于双光束的高通量超分辨三维刻写方法的装置,主要包括光源、合束模块3、DMD、MLA、物镜11和三维样品台12;光源分别射出的激发光束与抑制光束进入合束模块3合束为合束光后入射DMD,DMD将合束光反射至MLA并入射,MLA于焦平面处形成点间距相等的聚焦点阵,随后通过物镜11将该聚焦点阵照射成像于三维样品台12承载的双光束光刻胶的表面,形成激发光束与抑制光束重合的刻写点阵,实现对双光束光刻胶进行曝光,进而可完成任意三维图案的快速、高精度刻写。

[0042] 该系统中,光源包括第一光源1和第二光源2,分别发射激发光束和抑制光束,两者可采取平行入射合束模块3的形式设置。

[0043] 该系统中,合束模块3至少由第一二分之一玻片14、偏振分光棱镜15、第二二分之一玻片16和第二反射镜17共同构成;其中的第一二分之一玻片14用于对第一光源1发出的激光(激发光束或抑制光束)进行偏振态调制,使该激光经过偏振分光棱镜15后,所有能量均能进行透射;第二二分之一玻片16对第二光源2发出的激光(激发光束或抑制光束)进行偏振态调制,使该激光经第二反射镜17反射并经过偏振分光棱镜15后,所有能量均能发生反射,进而实现两个入射光束的合束。根据实际使用时的合束需求,可在该合束模块3中对应添加合适的部件以改善合束情况、提升合束效果。基于平行入射的激发光束与抑制光束,在合束模块3中的第一二分之一玻片14与第二二分之一玻片16对应平行设置,其中一束光束透过第一二分之一玻片14后直接入射偏振分光棱镜15并在偏振分光棱镜15中发生透射,另一束光束通过45°设置的第二反射镜17反射后再入射偏振分光棱镜15并在偏振分光棱镜15中再发生45°的反射,使得输出偏振分光棱镜15的为激发光束与抑制光束的合束光。

[0044] 该系统中,在合束模块3与DMD之间可以根据需要设置扩束模块4,使经过扩束模块4后完成扩束的合束光可以匹配DMD上的有效作用面积,根据不同使用需求,可设计为开普勒设计或伽利略设计。本系统通常可选开普勒设计形式,具体的,该扩束模块4包括第四透镜18(输入透镜)、小孔19和第五透镜20(输出透镜);其中小孔19位于第四透镜18和第五透镜20之间的焦平面处,用于对合束光进行滤波,第四透镜18和第五透镜20通过小于1的焦距比(扩束比大于1)产生的扩束作用用于对合束光进行扩束;合束光入射第四透镜18后经过小孔19滤波由第五透镜20输出。

[0045] 该系统中,在DMD与MLA之间可依次设置第一透镜6和第二透镜7,DMD、第一透镜6、第二透镜7和MLA共同构成4F成像关系,即DMD与第一透镜6的距离等于第一透镜6的焦距,第

一透镜6与第二透镜7的间距为两者焦距和,第二透镜7与MLA的距离等于第二透镜7的焦距。此外,在第二透镜7与MLA之间还额外设置有一第一反射镜8,该第一反射镜8将透过第二透镜7的合束光转向使之水平入射MLA。

[0046] 该系统中,在MLA与物镜11之间还设置有第三透镜10,并且MLA的焦平面、第三透镜10、物镜11与三维样品台12之间共同形成4F成像关系,即MLA的焦平面与第三透镜10的距离等于第三透镜10的焦距,第三透镜10与物镜11的间距为两者焦距和,物镜11与三维样品台12的距离等于物镜11的焦距。

[0047] 实施例1

[0048] 在本实施例的方案中,一种基于双光束的高通量超分辨三维刻写方法:

将第一光源1发出的激发光束与第二光源2发出的抑制光束先进行合束与扩束,平行入射到数字微镜器件5DMD上,而后经过4F成像到微透镜阵列9MLA上,合束光经过MLA后在其焦平面形成聚焦点阵,该聚焦点阵随后经第三透镜10和物镜11成像于物镜11焦平面处(双光束光刻胶位于此处),形成激发光束与抑制光束重合的刻写点阵。

[0049] DMD上固定区域微镜的开关用于对刻写点阵中各个点的能量调控;超分辨刻写过程中,通过调节入射抑制光束的能量,利用双光束光刻胶在超分辨刻写方法中抑制光束对激发光束的特殊抑制现象,即随着抑制光能量增强光刻胶聚合发生先抑制效果增强,后抑制效果减弱,随后转变为促进的现象,使两个聚焦光束三维中心区域发生光刻胶聚合促进现象,外围区域发生光刻胶聚合抑制现象,进而实现三维结构的超分辨刻写。

[0050] 更具体的,本实施例中,第一光源1与第二光源2发出的激光波长都选取为532 nm,其中第一光源1发出激发光束为飞秒光束,本实施例中脉宽选择为140 fs,重复频率为80 MHz,出射光直径为2 mm;第二光源2发出的抑制光束为连续波长的光束,出射光直径也为2 mm。本实施例中双光束光刻胶的光引发剂材料为苯偶酰,其他混合物选取为癸二酸双(2,2,6,6-四甲基-4-哌啶基-1-氧基)酯(BTPOS)和季戊四醇三丙烯酸酯(PETA),其中苯偶酰的质量分数为1.7wt%,癸二酸双(2,2,6,6-四甲基-4-哌啶基-1-氧基)酯的质量分数为2.1wt%。

[0051] 在本实施例的方案中,一种基于双光束的高通量超分辨三维刻写方法的装置:

如图1所示,包括第一光源1、第二光源2、合束模块3、扩束模块4、DMD、第一透镜6、第二透镜7、第一反射镜8、MLA、第三透镜10、物镜11、三维样品台12和控制器13;第一光源1发出激发光束,第二光源2发出抑制光束,两者进入合束模块3后实现合束,随后合束光经过扩束模块4后完成扩束以匹配DMD上的有效作用面积,合束光经过DMD反射后,经过第一透镜6与第二透镜7后照射到第一反射镜8上,经第一反射镜8反射的合束光经过MLA后,在其焦平面位置形成间距相等的聚焦点阵,随后进一步通过第三透镜10与物镜11后照射到三维样品台12上,形成阵列刻写点阵,实现对光刻胶的曝光,完成任意三维图案的快速、高精度刻写。

[0052] 本实施例中合束模块3如图2中所示,包括第一二分之一玻片14、偏振分光棱镜15、第二二分之一玻片16和第二反射镜17;第一二分之一玻片14用于对第一光源1发出的激发光束进行偏振态调制,使其经偏振分光棱镜15后,所有能量均能够透射过偏振分光棱镜15;第二二分之一玻片16对第二光源2进行偏振态调制,使其经过偏振分光棱镜15后,所有能量发生反射,进而实现两个入射光束的合束。本实施例中选取适用于532 nm波长的第一二分之一玻片14、偏振分光棱镜15与第二二分之一玻片16;且如图2所示的,在合束模块3中,第一二分之一玻片14和第二二分之一玻片16一上一下平行的设置,在第一二分之一玻片14后

设置偏振分光棱镜15,在第二二分之一玻片16后设置第二反射镜17,使进入合束模块3的激发光束(即图中的第一光束)经第一二分之一玻片14的偏振态调制后入射偏振分光棱镜15,并全部发生透射,进入合束模块3的抑制光束(即图中的第二光束)经第二二分之一玻片16的偏振态调制后再通过第二反射镜17反射至偏振分光棱镜15,并全部发生反射,进而使激发光束与抑制光束实现合束。

[0053] 合束光随后进入扩束模块4中,其如图3所示,包括第四透镜18、小孔19和第五透镜20;小孔19位于第四透镜18和第五透镜20之间的焦平面处,即是说小孔19位于第四透镜18的后焦平面处同时也位于第五透镜20的前焦平面处,第四透镜18和第五透镜20用于对合束光进行扩束,小孔19用于对合束光进行滤波。该实施例中,第四透镜18的焦距选取为50 mm,第五透镜20的焦距选取为300 mm,放大倍率为6倍,小孔19的直径选取为15 μm ,进而完成滤波与扩束。

[0054] 合束光经过扩束模块4的扩束后入射到DMD上,并经DMD反射后进一步入射至MLA上。

[0055] 本实施例的DMD选取的是德州仪器的d1p9500,其像素为 1920×1080 ,适合于可见光波段,DMD的有效面积为 $20.7 \text{ mm} \times 11.7 \text{ mm}$,单个微镜的尺寸是 $10.8 \mu\text{m}$ 。当DMD处于全开模式时,合束光反射进入后续光路。

[0056] 本实施例中选择数量为 70×70 个、微透镜间距为 $162 \mu\text{m}$ 的MLA,因此其有效面积为 $11.34 \text{ mm} \times 11.34 \text{ mm}$ 。

[0057] 与MLA相配合的选取DMD的有效控制面积为 $11.34 \text{ mm} \times 11.34 \text{ mm}$ 的区域,两者有效面积的比例为1:1,因此第一透镜6与第二透镜7选取相同的焦距,两者的焦距都为100 mm,并且DMD、第一透镜6、第二透镜7与MLA满足4F成像关系,即DMD与第一透镜6的距离等于第一透镜6的焦距,为100 mm,第一透镜6与第二透镜7的间距为两者焦距和200 mm,第二透镜7与MLA的距离等于第二透镜7的焦距,100 mm。

[0058] 由单个微镜的尺寸是 $10.8 \mu\text{m}$,光束经过DMD与MLA的成像比例为1:1,可知 15×15 个微镜的区域对应一个微透镜的区域,进而可通过调节该区域微镜的开关状态,可以对经过微透镜的光束能量进行快速的调整。

[0059] 本实施例中第三透镜10选取的是焦距为200 mm的透镜,优选可选择场镜作为第三透镜10,物镜11选取的是焦距为2 mm,放大倍率为100倍,数值孔径为1.4的油镜;MLA的焦平面、第三透镜10、物镜11与三维样品台12满足4F成像关系,即MLA的焦平面与第三透镜10的距离等于第三透镜10的焦距,200 mm,第三透镜10与物镜11的间距为两者焦距和,202 mm,物镜11与三维样品台12的距离等于物镜11的焦距,2 mm。

[0060] 三维样品台12上设置双光束光刻胶,通过三维样品台12中高精度驱动电机可实现X、Y、Z轴方向的三维运动,协助实现二维打印结构的拼接与三维图案快速、高精度的刻写。

[0061] 此外,在该系统中,还连接有控制器13,可采用如PLC控制器13、电脑等对系统进行自动化控制。该控制器13分别与第一光源1、第二光源2和DMD的开关形成电气连接且该控制器13还与三维样品台12的驱动电机的开关相电气连接,通过该控制器13可控制启停第一光源1与第二光源2,并且控制DMD及DMD中各固定区域微镜的开闭状态,以及控制三维样平台的精确三维移动。

[0062] 刻写前,控制器13控制开启第一光源1与第二光源2,并且控制DMD处于关闭状态,

此时合束光无法进入第一透镜6,进而无法达到成像面。将双光束光刻胶置于基板上,而后将基板安装放置于三维样品台12上,通过调节轴向距离,使双光束光刻胶调整至物镜11的焦距处。

[0063] 刻写过程中,首先开启第一光源1的能量,并且通过控制器13对第一光源1的总能量进行调节,使其在焦平面处能够刻写出点阵结构,随后通过对刻写点阵结构的精密测量,利用DMD上各个子区域与每个刻写点的对应关系,对每个刻写点的能量进行调节,使刻写点阵中的能量保持均匀。

[0064] 根据图4中对双光束超分辨刻写方法中抑制光束对激发光束的特殊抑制现象的测试图,可以发现当激发光能量一定时,刻写结构先是随着抑制光的增强逐渐消失,而后又逐渐增强。因而选取图中左下部分对应区域的能量(促进部分),对第一光源1与第二光源2的能量进行优化,随后根据所需刻写三维结构同时控制DMD上对应区域微镜(70*70)的开关与三维样品台12的位移情况,可同时实现4900点阵的并行刻写(点之间可独立开关),进而实现任意三维纳米结构在双光束光刻胶上的高通量、超分辨的刻写。

[0065] 图5中为本发明与单光束刻写效果对比电镜图。其中,左上图为利用第一光源1(激发光束)进行直接刻写的三维结构(单光束条件下的刻写),其轴向周期为220 nm;可以从倾斜视角下发现其在轴向的线条已经难以分辨,如右上图所示,由此可见单一光源无法实现轴向220 nm周期的刻写。当加入第二光源2(抑制光束)时,此时第一光源1的能量不变,第二光源2对应选取图4中左下促进部分的能量,其刻写结果如图5中左下图所示,从其侧面放大电镜图(右下图)可以清晰发现,其轴向线条可以被分辨,因此提升了超分辨刻写能力,实现了220 nm轴向周期的刻写。

[0066] 实施例2

[0067] 本实施例中,所用双光束光刻胶的光引发剂材料选择为螺[1,3,3-三甲基吲哚-(6'-硝基苯并二氢吡喃)],其余与实施例1保持一致。

[0068] 需要额外说明的是,对于本方法及本系统中所使用的双光束光刻胶的光引发剂材料,除实施例1中所用的苯偶酰及实施例2中所用的螺[1,3,3-三甲基吲哚-(6'-硝基苯并二氢吡喃)]以外,还可根据实际需求选择如苯甲酮、二乙酰、7-二乙氨基-3-噻吩甲酰基香豆素、2-异丙基硫杂蒽酮等任意一种合适的光引发剂材料或多种光引发剂材料的合适组合。

[0069] 实施例3

[0070] 本实施例中,所用的激发光束的波长采用600nm,且为飞秒光束;所用的抑制光束的波长仍采用600nm,且为皮秒光束,其他与实施例1保持一致。

[0071] 需要额外说明的是,对于本方法及本系统中所使用的激发光束和抑制光束,两者波长可在400-800nm中任取,且可为相同波长,也可为不同波长,优选采用波长相等的激发光束与抑制光束,充分避免色差带来的影响(色差会导致聚焦光斑中心不重合);激发光束仅建议采用飞秒激光光束,而抑制光束根据实际环境、设备情况及实验需要可选择连续激光光束(实施例1)、皮秒激光光束(实施例3)或还可选择纳米激光光束。

[0072] 上述的对实施例的描述是为便于该技术领域的普通技术人员能理解和使用发明。熟悉本领域技术的人员显然可以容易地对这些实施例做出各种修改,并把在此说明的一般原理应用到其他实施例中而不必经过创造性的劳动。因此,本发明不限于上述实施例,本领域技术人员根据本发明的揭示,不脱离本发明范畴所做出的改进和修改都应该在本发明的

保护范围之内。

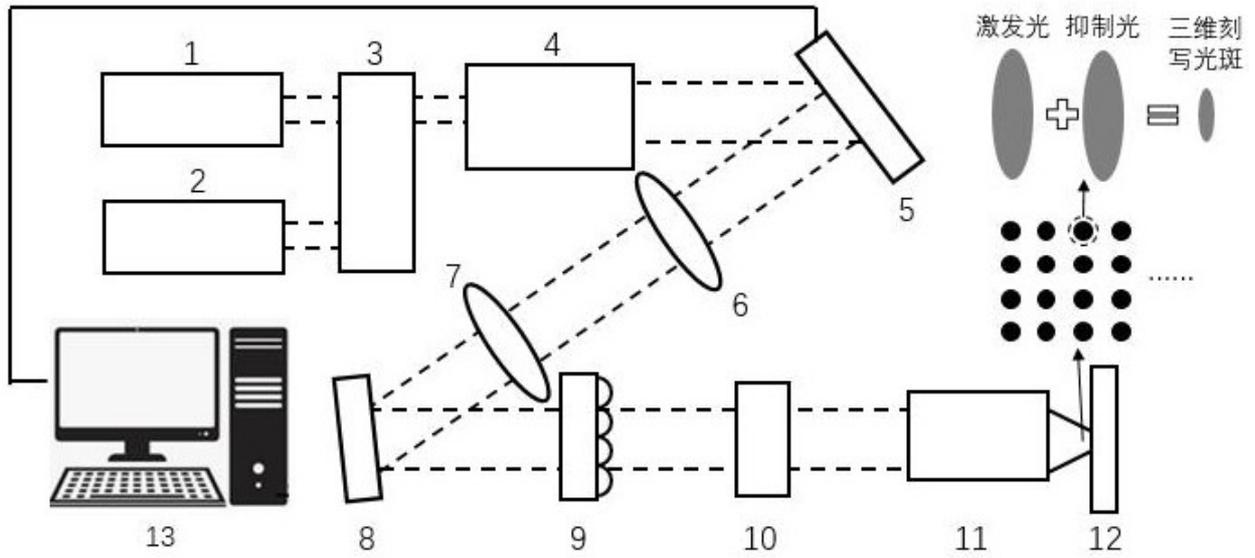


图 1

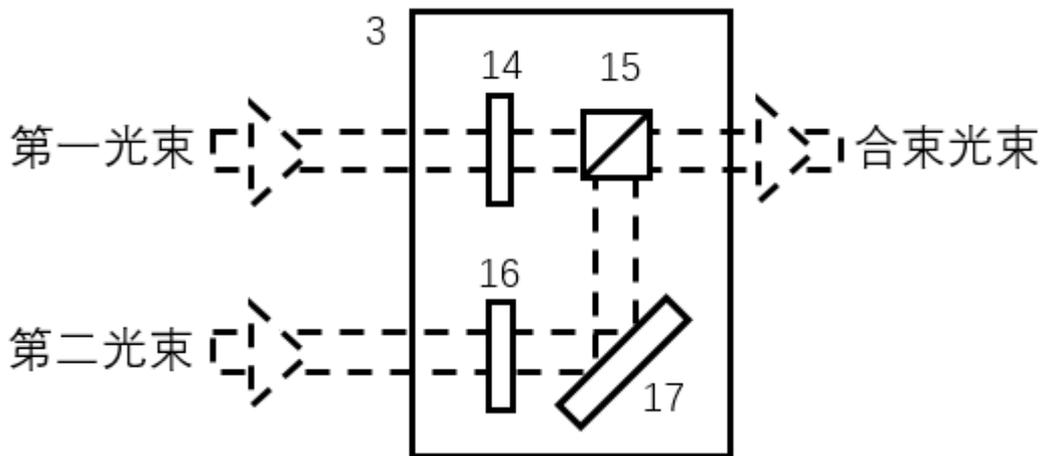


图 2

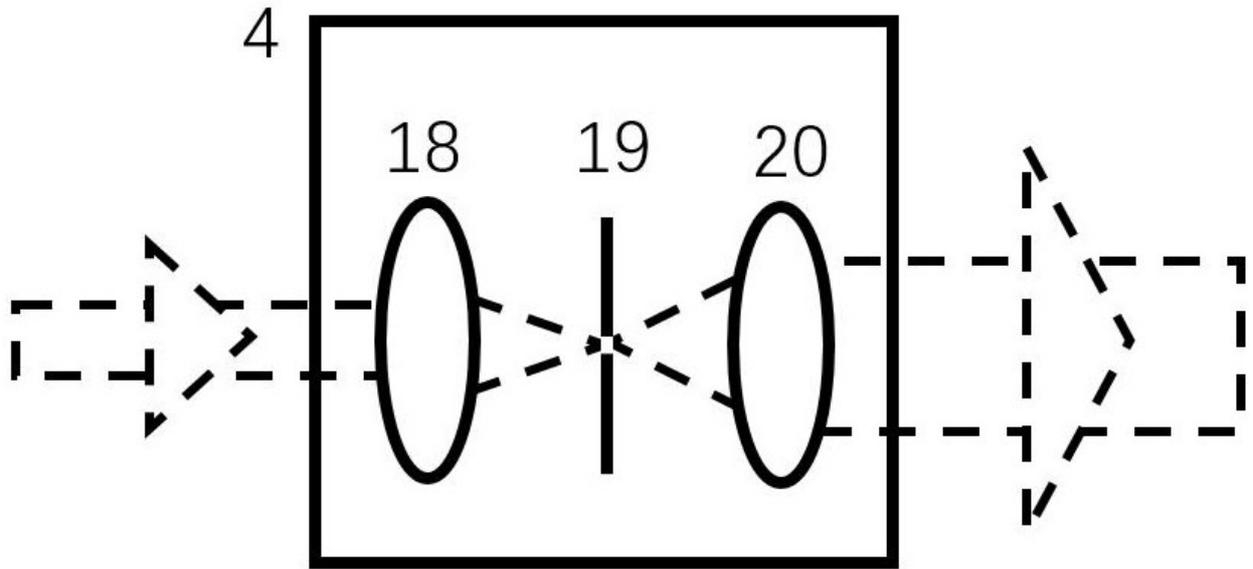


图 3

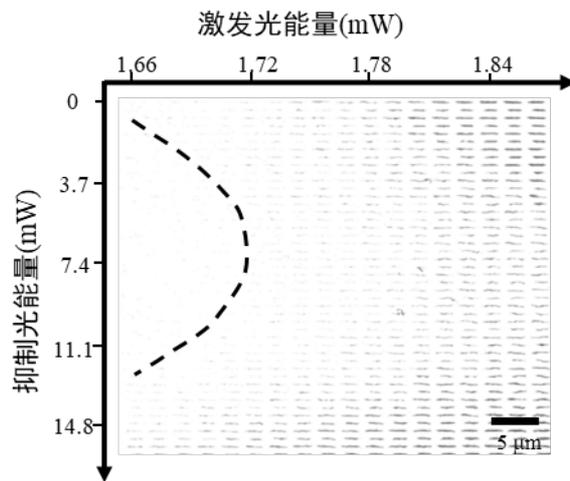


图 4

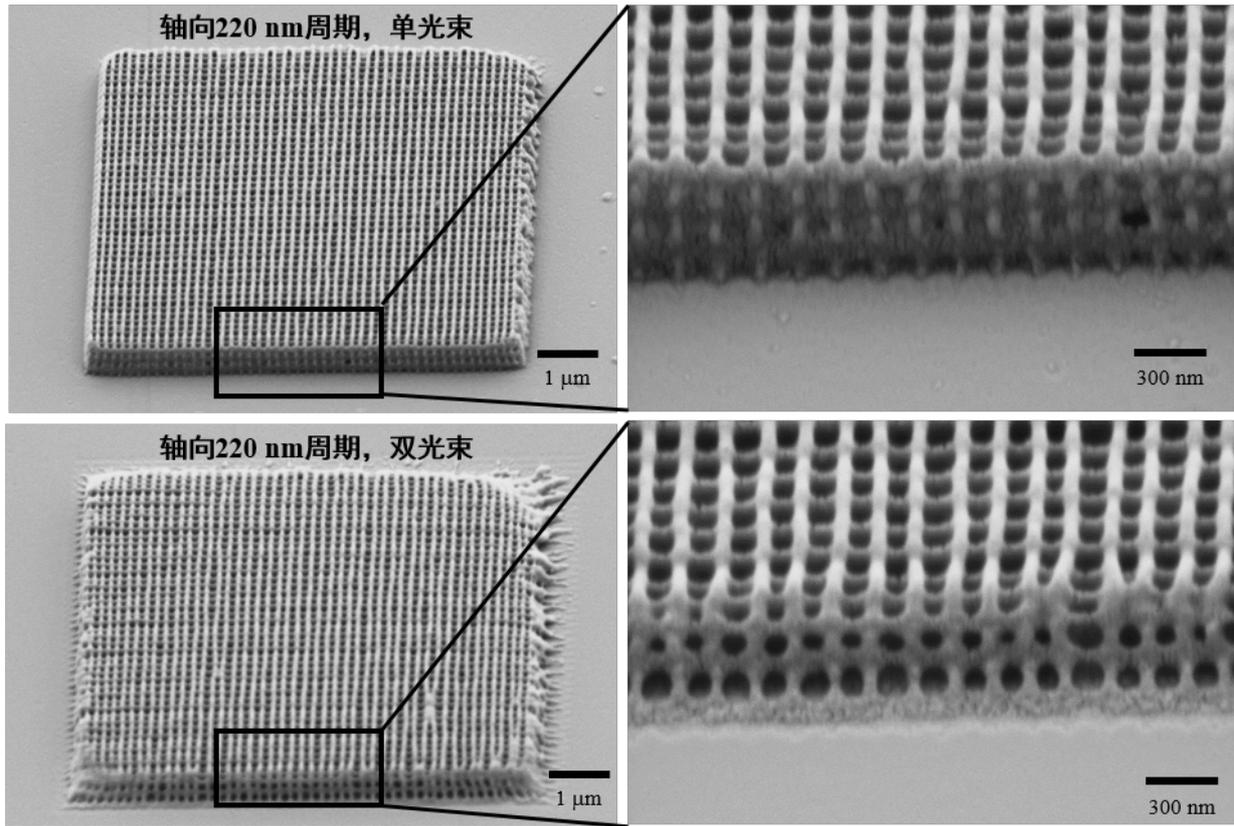


图 5