



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114675412 B

(45) 授权公告日 2023. 09. 22

(21) 申请号 202210456950.X

G02B 3/00 (2006.01)

(22) 申请日 2022.04.28

G02B 27/28 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 114675412 A

(56) 对比文件

CN 111722392 A, 2020.09.29

CN CN106154490 Y, 2016.11.23

(43) 申请公布日 2022.06.28

CN 114341674 A, 2022.04.12

(66) 本国优先权数据

202210444833.1 2022.04.26 CN

US 2007258096 A1, 2007.11.08

CN 111239993 A, 2020.06.05

(73) 专利权人 南京大学

CN 1075010 A, 1993.08.04

CN 108241208 A, 2018.07.03

地址 210023 江苏省南京市栖霞区仙林大道163号

CN 111897036 A, 2020.11.06

US 2018299595 A1, 2018.10.18

(72) 发明人 李涛 叶欣 陈晨 钱效 祝世宁

CN 105424242 A, 2016.03.23

(74) 专利代理机构 南京苏高专利商标事务所

(普通合伙) 32204

Beibei Xu .ETC.Metalens-integrated compact imaging devices for wide-field microscopy.Advanced Photonics.2020,第第2卷卷(第第6期期),第066004-1—066004-6页.

专利代理师 柏尚春

审查员 董向坤

(51) Int. Cl.

G02B 21/02 (2006.01)

G02B 21/36 (2006.01)

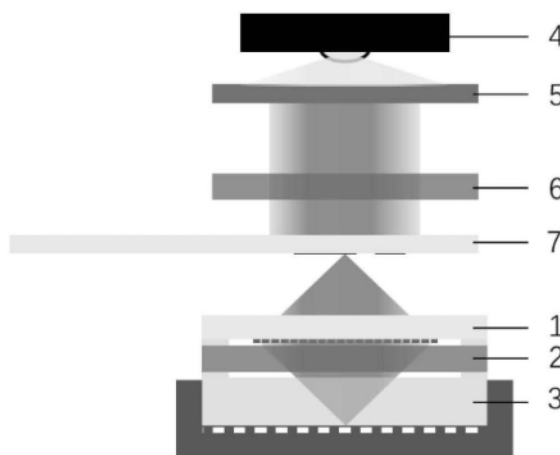
权利要求书1页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

一种基于偏振滤波的超构透镜集成成像器件及成像方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于偏振滤波的超构透镜集成成像器件及成像方法,所述方法将入射光调制为两种圆偏振状态,调制后的偏振态入射光经过待测物体后射入到超构透镜,所述超构透镜将偏振态入射光调制为偏振态出射光,偏振态出射光经过检偏圆偏振膜后射入CMOS图像传感器得到成像结果,超构透镜为复用透镜阵列,其通过设计偏振敏感的相位分布结构将两种圆偏振状态的入射光调制为同一种偏振态的聚焦光出射,圆偏振膜有效地滤除未被调制的光,提升了集成系统在放大和变波长成像时的成像信噪比,突破了原有的倍率和波长范围的限制,实现大面积、高分辨、大景深、高性能的集成成像。



1. 一种基于偏振滤波的超构透镜集成成像器件,包括超构透镜(1)和CMOS图像传感器(3),其特征在于,所述超构透镜(1)和CMOS图像传感器(3)之间还设有用于偏振滤波的检偏圆偏振膜(2);所述超构透镜(1)为复用超构透镜阵列,所述复用超构透镜阵列包含两套偏振敏感的聚焦相位阵列分布,即第一超构透镜阵列相位和第二超构透镜阵列相位,所述第一超构透镜阵列相位和第二超构透镜阵列相位分别将两种正交偏振入射光调制为出射光

$$\text{场} E_{out} = \begin{bmatrix} e^{i\phi_{RR}} \\ e^{i(-2\theta+\phi_{RL})} \end{bmatrix} \text{或} E_{out} = \begin{bmatrix} e^{i(2\theta+\phi_{LR})} \\ e^{i\phi_{LL}} \end{bmatrix},$$

经过所述圆偏振膜(2)后,得到同一偏振态聚焦光出射,其中 ϕ_{RR} , ϕ_{RL} , ϕ_{LR} , ϕ_{LL} 是传播相位, θ 是超构透镜(1)中单个结构的转角。

2. 一种基于偏振滤波的超构透镜集成成像方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤11,用滤波片(5)和起偏圆偏振膜(6)对入射光进行调制;

步骤12,调制后的偏振态入射光经过待测物体(7)后射入到超构透镜(1),所述超构透镜将偏振态入射光调制为聚焦的偏振态出射光;

步骤13,所述偏振态出射光经过检偏圆偏振膜(2)后射入CMOS图像传感器(3)得到成像结果;

所述超构透镜(1)为复用超构透镜阵列,所述复用超构透镜阵列包含两套偏振敏感的聚焦相位阵列分布,即由周期式的第一超构透镜阵列相位和第二超构透镜阵列相位交叉排布组成,起偏圆偏振膜(6)将入射光调制为第一偏振态和第二偏振态,第一偏振态入和第二偏振态正交;所述第一超构透镜阵列相位将所述第一偏振态的入射光调制为聚焦的同偏振态出射光,所述第二超构透镜阵列相位将所述第二偏振态的入射光调制为聚焦的正交偏振态出射光;所述同偏振态出射光的光场为 $e^{i\phi_{RR}}$ 或 $e^{i\phi_{LL}}$,所述正交偏振态出射光的光场为 $e^{i(2\theta+\phi_{LR})}$ 或 $e^{i(-2\theta+\phi_{RL})}$,其中 ϕ_{RR} , ϕ_{RL} , ϕ_{LR} , ϕ_{LL} 是传播相位, θ 是超构透镜(1)中单个结构的转角。

3. 根据权利要求2所述的基于偏振滤波的超构透镜集成成像方法,其特征在于,所述超构透镜(1)为复用超构透镜阵列,所述待测物体(7)经过两次成像后得到成像结果,方法为:

步骤21,所述起偏圆偏振膜(6)将入射光调制为第一偏振态,所述超构透镜(1)将调制后的偏振态入射光调制为聚焦的同偏振态出射光;所述偏振态出射光经过检偏圆偏振膜(2)后射入CMOS图像传感器(3)得到第一图像;

步骤22,所述起偏圆偏振膜(6)将入射光调制为第二偏振态,所述第二偏振态与第一偏振态正交,所述超构透镜(1)将调制后的偏振态入射光调制为聚焦的正交偏振态出射光;所述偏振态出射光经过检偏圆偏振膜(2)后射入CMOS图像传感器(3)得到第二图像;

步骤23,将所述第一图像和第二图像中一定视场范围的子图像拼接得到成像结果。

4. 根据权利要求3所述的基于偏振滤波的超构透镜集成成像方法,其特征在于,所述偏振态出射光为右旋偏振态,所述第一超构透镜阵列相位为 $\varphi_1=\phi_{RR}$,所述第二超构透镜阵列相位为 $\varphi_2=\phi_{LR}+2\theta$, ϕ_{RR} 和 ϕ_{LR} 为传播相位, θ 为超构透镜单个纳米结构的转角。

5. 根据权利要求3所述的基于偏振滤波的超构透镜集成成像方法,其特征在于,所述偏振态出射光为左旋偏振态,所述第一超构透镜阵列相位为 $\varphi_1=\phi_{LL}$,所述第二超构透镜阵列相位为 $\varphi_2=-2\theta+\phi_{RL}$, ϕ_{LL} 和 ϕ_{RL} 为传播相位, θ 为超构透镜单个纳米结构的转角。

一种基于偏振滤波的超构透镜集成成像器件及成像方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种超构透镜集成成像器件及成像方法。

背景技术

[0002] 传统的光学显微镜系统是基于传统折射光学元件构建的,往往体积庞大,结构复杂,且价格昂贵。为了实现小型化成像系统,一种可能的解决方案是使用平面衍射透镜,但是其效率低下且成像质量差,因此难以应用到对成像质量要求很高的系统中;另一种解决方案是采用无透镜的成像技术,但是该技术所需的后处理过程繁杂,且时间成本高。此外,现有成熟的显微技术都是基于单轴成像系统,因此成像的视场范围和分辨率之间存在相互制约的关系,无法在实现大视场的同时确保高分辨率成像。

[0003] 为了解决这些问题,中国专利“一种基于超构透镜阵列的大视场集成显微成像装置(申请号202010709243.8)”公开了一种超构透镜与CMOS图像传感器集成的成像系统MIID,该系统基于多轴成像方案实现了大面积高分辨成像。然而,MIID只适用于等大和缩小成像,当进行放大成像或切换波长进行景深成像时,由于成像效率的下降,采集的图像迅速降质,因此放大倍率和波长范围受限;相应的,MIID的成像分辨率受限于图像传感器CMOS的大小,超构透镜阵列集成时无法实现景深成像。

发明内容

[0004] 发明目的:本发明的目的是提供一种基于偏振滤波的超构透镜集成成像器件,以实现大面积、高分辨、大景深、高性能的集成成像,本发明的第二目的是提供一种基于偏振滤波的超构透镜集成成像方法。

[0005] 技术方案:本发明所述的基于偏振滤波的超构透镜集成成像器件,包括超构透镜和CMOS图像传感器,所述超构透镜和CMOS图像传感器之间还设有用于偏振滤波的检偏圆偏振膜。

[0006] 进一步地,超构透镜为复用超构透镜阵列,所述复用超构透镜阵列包含两套偏振敏感的聚焦相位阵列分布,即第一超构透镜阵列相位和第二超构透镜阵列相位,所述第一超构透镜阵列相位和第二超构透镜阵列相位分别将两种正交偏振入射光调制为同一偏振态聚焦光出射。

[0007] 进一步地,超构透镜为单超构透镜,将入射光偏振态调制为与其正交的偏振态出射。

[0008] 本发明所述的基于偏振滤波的超构透镜集成成像方法,包括如下步骤:

[0009] (11) 用滤波片和起偏圆偏振膜对入射光进行调制;

[0010] (12) 调制后的偏振态入射光经过待测物体后射入到超构透镜,所述超构透镜将偏振态入射光调制为聚焦的偏振态出射光;

[0011] (13) 所述偏振态出射光经过检偏圆偏振膜后射入CMOS图像传感器得到成像结果。

[0012] 进一步地,超构透镜为单片超构透镜,所述起偏圆偏振膜和检偏圆偏振膜的偏振

态正交。

[0013] 进一步地,超构透镜为复用超构透镜阵列,所述待测物体经过两次成像后的到成像结果,方法为:

[0014] (21)所述起偏圆偏振膜将入射光调制为第一偏振态,所述超构透镜将调制后的偏振态入射光调制为聚焦的同偏振态出射光;所述偏振态出射光经过检偏圆偏振膜后射入CMOS图像传感器得到第一图像;

[0015] (22)所述起偏圆偏振膜将入射光调制为第二偏振态,所述第二偏振态与第一偏振态正交,所述超构透镜将调制后的偏振态入射光调制为聚焦的正交偏振态出射光;所述偏振态出射光经过检偏圆偏振膜后射入CMOS图像传感器得到第二图像;

[0016] (23)将所述第一图像和第二图像中的一部分视场范围的子图像拼接得到成像结果。

[0017] 所述复用超构透镜阵列包含两套偏振敏感的聚焦相位阵列分布,即由周期式的第一超构透镜阵列相位和第二超构透镜阵列相位交叉排布组成,所述第一超构透镜阵列相位将所述第一偏振态的入射光调制为聚焦的同偏振态出射光,所述第二超构透镜阵列相位将所述第二偏振态的入射光调制为聚焦的正交偏振态出射光。

[0018] 所述偏振态出射光为右旋偏振态,所述第一透镜阵列相位为 $\varphi_1 = \phi_{RR}$,所述第二超构透镜阵列相位为 $\varphi_2 = \phi_{LR} + 2\theta$, ϕ_{RR} 和 ϕ_{LR} 为传播相位, θ 为超构透镜单个纳米结构的转角。

[0019] 所述偏振态出射光为左旋偏振态,所述第一透镜阵列相位为 $\varphi_1 = \phi_{LL}$,所述第二超构透镜阵列相位为 $\varphi_2 = -2\theta + \phi_{RL}$, ϕ_{LL} 和 ϕ_{RL} 为传播相位, θ 为超构透镜单个纳米结构的转角。

[0020] 有益效果:本发明与现有技术相比的优点在于,通过将超构透镜和圆偏振膜集成在CMOS图像传感器上,构建了偏振滤波的超构透镜成像器件,通过设计超构透镜的相位使得复用超构透镜阵列能对同偏振态入射光和正交偏振态入射光两种情况均独立调控为相同偏振态的出射聚焦光,圆偏振膜有效地滤除未被调制的光,提升了集成系统在放大和变波长成像时的成像信噪比,突破了原有的倍率和波长范围的限制,再将两种偏振态入射得到的图像进行拼接,实现大面积、高分辨、大景深、高性能的集成成像,可以通过切换照明波长实现约百微米深度信息的检测。

附图说明

[0021] 图1为本发明的基于偏振滤波的超构透镜集成成像器件结构图;

[0022] 图2为本发明的基于偏振滤波的超构透镜集成成像方法的光路结构图;

[0023] 图3为本发明实施例1中的两个超构透镜在有无检偏圆偏振膜(2)的情况下对标靶进行成像的结果;

[0024] 图4为本发明实施例1中的3倍放大的超构透镜在有无检偏圆偏振膜(2)的情况下,不同工作波长时对标靶进行成像的结果;

[0025] 图5为本发明实施例2中复用超构透镜阵列的相位周期性排布示意图;

[0026] 图6为本发明实施例2中的 16×16 子透镜的复用超构透镜阵列示意图;

[0027] 图7为本发明实施例2中在不同偏振光输入时采集到的图像及拼接后的成像结果,以及成像结果的局部放大图;

[0028] 图8为本发明实施例2中对生物样本的成像结果与光学显微镜成像结果对比图；

[0029] 图9为本发明实施例2中不同工作波长时对生物样本的成像结果。

具体实施方式

[0030] 下面结合附图对本发明的技术方案作进一步说明。

[0031] 如图1所示,本发明所述的基于偏振滤波的超构透镜集成成像器件,包括超构透镜(1)和CMOS图像传感器(3),超构透镜(1)和CMOS图像传感器(3)之间设有用于偏振滤波的检偏圆偏振膜(2),超构透镜(1)和检偏圆偏振膜(2)集成在CMOS图像传感器(3)上。

[0032] 所述超构透镜(1)可以是单超构透镜或周期排布的复用超构透镜阵列。

[0033] 单超构透镜是基于超构表面的几何相位原理设计的,未加入复用功能,仅调制与入射光正交偏振的出射光分量,检偏圆偏振膜(2)有效滤除与入射光同偏振的未被调制的背景光。但当入射光波长偏离设计波长时,偏振转换效率会降低,导致出射光有效分量减少,进而在未偏振滤波的情况下波长的偏差会导致成像质量快速下降。

[0034] 所述复用超构透镜阵列采用同偏振和正交偏振同时独立调控的方案,以此来满足相同出射光偏振态时,通过调控入射光偏振来实现两组相位分布的切换。所述偏振复用设计方法,基于几何相位和传播相位联合调控的原理,通过选取合适的单元结构和结构转角,来实现不同的强度和相位分布。具体分析来看,对于单个纳米结构单元而言,出射场和入射

场的关系可用琼斯矩阵描述: $J = R(-\theta) \begin{bmatrix} e^{i\phi_{RR}} & e^{i\phi_{LR}} \\ e^{i\phi_{RL}} & e^{i\phi_{LL}} \end{bmatrix} R(\theta) = \begin{bmatrix} e^{i\phi_{RR}} & e^{i(2\theta+\phi_{LR})} \\ e^{i(-2\theta+\phi_{RL})} & e^{i\phi_{LL}} \end{bmatrix}$; 其中 ϕ_{RR} ,

ϕ_{RL} , ϕ_{LR} , ϕ_{LL} 是传播相位, $R(\theta)$ 是旋转矩阵, θ 是单个结构的转角。基于纳米单元的镜面对称性,满足 $\phi_{RR} = \phi_{LL}$, $\phi_{RL} = \phi_{LR}$ 。当对应两种不同的圆偏振光入射时,出射光场分别对应

$E_{RCPinc_out} = \begin{bmatrix} e^{i\phi_{RR}} \\ e^{i(-2\theta+\phi_{RL})} \end{bmatrix}$, $E_{LCPinc_out} = \begin{bmatrix} e^{i(2\theta+\phi_{LR})} \\ e^{i\phi_{LL}} \end{bmatrix}$ 。复用调制的相位对应于 $\varphi_1 = \phi_{RR}$ 和

$\varphi_2 = \phi_{LR} + 2\theta$ (或 $\varphi_1 = \phi_{LL}$ 和 $\varphi_2 = -2\theta + \phi_{RL}$), 此外为了确保复用的两种情况调制强度一致,选择单元结构时需要确保同偏振和正交偏振的转换效率一致。

[0035] 如图2所示,本发明所述的基于偏振滤波的超构透镜集成成像方法,先搭建集成成像装置,包括白光LED(4)、滤波片(5)、起偏圆偏振膜(6)、待测物体(7)和本发明所述的基于偏振滤波的超构透镜集成成像器件。

[0036] 实施例1

[0037] 本实施例中超构透镜(1)为单片超构透镜,设计了两个焦距分别为 $360\mu\text{m}$ 和 $250\mu\text{m}$ 的基于几何相位的单超构透镜,直径均为 $250\mu\text{m}$,设计波长均为 470nm ,分别对应等大和三倍放大成像。起偏圆偏振膜(6)和检偏圆偏振膜(2)是正交偏振的两种膜,可以有效滤除未被调制的光分量。本实施例中的滤波片(5)中心波长为 470nm ,实际滤波片(5)的中心波长可根据超构透镜(1)的设计波长进行调整。

[0038] 超构透镜相位分布满足:

$$[0039] \quad \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (f - \sqrt{x^2 + y^2 + f^2})$$

[0040] 其中 φ 表示超构透镜的相位分布, λ 为设计的波长, f 为焦距, x, y 为每个纳米结构的

位置坐标。

[0041] 进行成像时,白光LED(4)发射的入射光依次经过滤波片(5)和起偏圆偏振膜(6),变为单色圆偏振光,单色圆偏振入射光照射到待测物体(7)上,被本发明所述的超构透镜集成成像器件接收。

[0042] 如图3所示为本实施例中两个超构透镜用于集成成像时,有无检偏圆偏振膜(2)两种情况下对标靶进行成像的结果,采集到的成像结果显示偏振滤波之后,透镜成像的信噪比得到了极大地提升,并且放大成像也得到了高性能图像。如图4所示为3倍放大的超构透镜,通过切换工作波长(410nm-570nm)在有无检偏圆偏振膜(2)两种情况下的宽带成像结果,相较于没有偏振滤波的器件结构,本发明中的方法有效地实现了更大带宽的高性能集成成像。

[0043] 实施例2

[0044] 本实施例中超构透镜(1)为复用超构透镜阵列,如图5所示为复用超构透镜阵列的相位周期性排布示意图,以 4×4 尺寸的阵列为例,图5中A区域包含 4×4 个子透镜相位,B区域包含 3×3 个子透镜相位和周围不完整的子透镜相位,复用超构透镜阵列的尺寸等于A区域的尺寸,A区域和B区域分别对应于两种不同偏振入射下的超构透镜阵列相位分布,采用交叉密排的分布方式可以有效地弥补单组超构透镜阵列相位成像时子透镜之间的视场盲区,通过切换偏振来实现大面积信息的获取。

[0045] 图6为设计的尺寸为 16×16 子透镜的超构透镜阵列示意图,即A区域包含 16×16 个子透镜相位,单个子透镜的直径为 $250 \mu\text{m}$,焦距为 $360 \mu\text{m}$ 。本实施例中的滤波片(5)中心波长为 470nm ,实际滤波片(5)的中心波长可根据超构透镜(1)的设计波长进行调整。

[0046] 复用超构透镜阵列中,子透镜的相位分布满足:

$$\begin{aligned}
 [0047] \quad \varphi_A &= \varphi_{RCP \rightarrow RCP} = -\frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{x^2 + y^2 + s^2} + \sqrt{x^2 + y^2 + s'^2}) \\
 \varphi_B &= \varphi_{LCP \rightarrow RCP} \\
 [0048] \quad &= -\frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{(r - \text{abs}(x))^2 + (r - \text{abs}(y))^2 + s^2} \\
 &\quad + \sqrt{(r - \text{abs}(x))^2 + (r - \text{abs}(y))^2 + s'^2})
 \end{aligned}$$

[0049] 其中 λ 为设计的波长, x, y 为每个纳米结构的位置坐标, r 为子透镜单元的半径, s 是成像的物距, s' 为成像的像距; φ 表示不同入射偏振态下的超构透镜相位分布,此处RCP为右圆偏振(right circular polarization),LCP为左圆偏振(left circular polarization)本实施例中 φ_A 为A区域每个子透镜的相位分布,将右旋的入射光调制为右旋的出射聚焦光, φ_B 为B区域每个子透镜的相位分布,将左旋的入射光调制为右旋的出射聚焦光,在实际使用时可以交换两区域的相位分布,本实施例中的复用超构透镜阵列将入射的左旋偏振光和右旋偏振光均调制为右旋偏振光,所述检偏圆偏振膜(2)为右旋偏振态,在实际使用中可以设计复用透镜阵列的相位使其将入射的左旋偏振光和右旋偏振光均调制为左旋偏振光,对应的检偏圆偏振膜(2)也为左旋偏振态。

[0050] 将复用超构透镜阵列集成到CMOS图像传感器(3)上,进行成像时,白光LED(4)发射的入射光依次经过滤波片(5)和起偏圆偏振膜(6),变为单色圆偏振光,单色圆偏振入射光照射到待测物体(7)上,被本发明所述的超构透镜集成成像器件接收,采集到第一图像,如

图7(a)所示,然后切换起偏圆偏振膜(6)的偏振态,再次采集到第二图像,如图7(b)所示,通过将第一图像和第二图像中的一部分视场范围的子图像拼接得到全视场成像结果,如图7(c)所示,相当于在确保子透镜分辨率的情况下将视场扩大了256倍。

[0051] 利用本发明所述成像方法对生物样品成像,如图8所示对比了本发明和光学显微镜10倍物镜下蚊子幼虫样品的成像结果,图8(a)展示了全视场的成像,图8(b)为全视场截出的与光学显微镜10倍物镜成像相同的区域,图8(c)为光学显微物镜的成像。可以看出,相较于相同成像分辨率的10倍物镜的成像,本发明所示的大视场成像不仅成像对比度有了显著的提升,并且单次成像的视场大小有了4-5倍的提升。

[0052] 图9展示了通过切换波长对蚊子幼虫样品进行的大视场景深成像,右下角的图可清晰分辨出不同的深度信息,60nm的波长带宽范围(450nm~510nm)都能实现高性能的成像,对应于约百微米的深度信息。

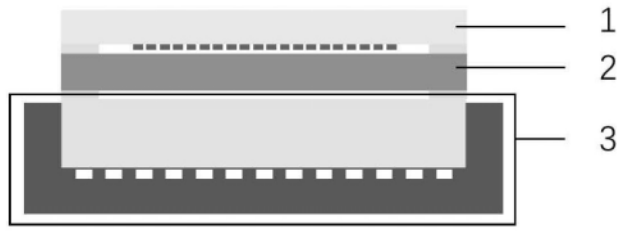


图1

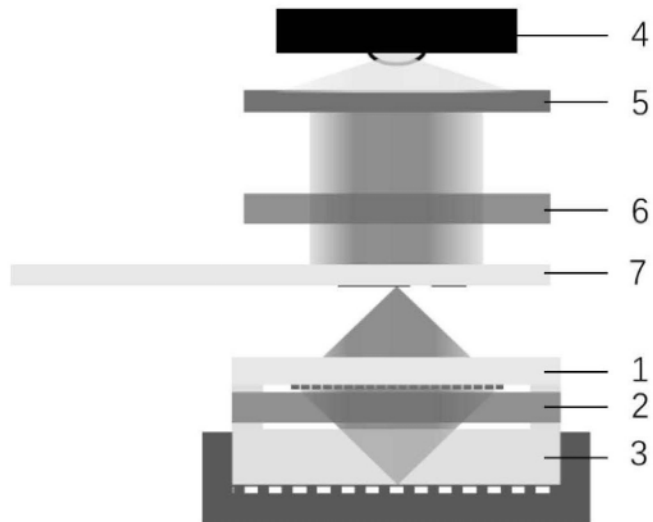


图2

	放大倍率=1	放大倍率=3
未偏振滤波		
偏振滤波		

图3

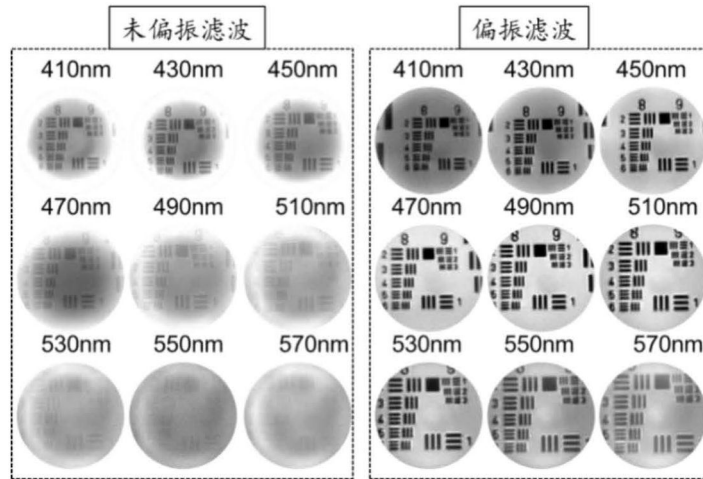


图4

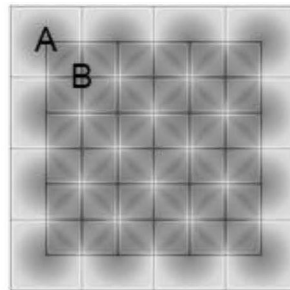


图5

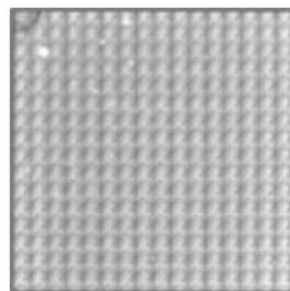


图6

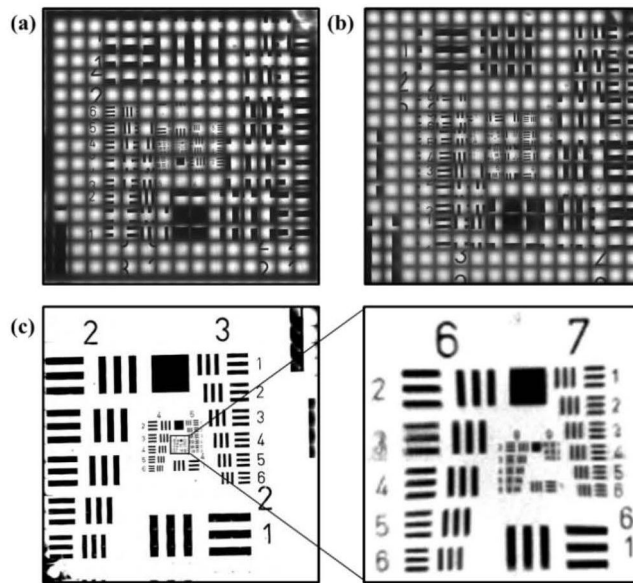


图7

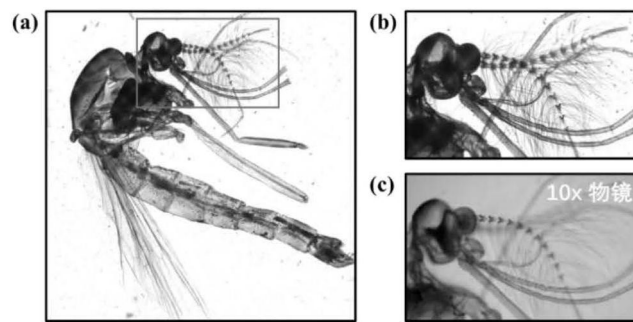


图8

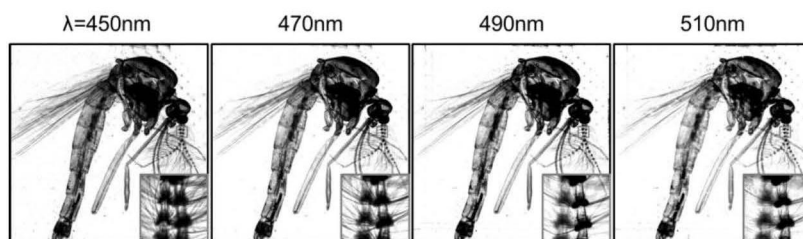


图9