

基于倏逝波照明的空间移频超分辨成像技术研究*

凌进中^{1)2)†} 郭金坤¹⁾ 王昱程¹⁾ 刘鑫¹⁾ 王晓蕊^{1)‡}

1) (西安电子科技大学光电工程学院, 西安 710071)

2) (中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2023 年 6 月 3 日收到; 2023 年 8 月 16 日收到修改稿)

空间移频超分辨成像技术利用样品表面的微纳结构对照明倏逝波的散射, 使其转换为传播波, 并将倏逝波携带的高频空间信息转换成低频信息, 可被远场的显微物镜所接收, 实现超分辨成像. 其极限分辨率由照明的倏逝波波长决定, 但分辨率仅在倏逝波波矢方向上有提升. 在现有的棱镜全反射倏逝波生成方案中, 倏逝波的最短波长受棱镜折射率的限制, 因此其最高分辨率也受限制; 且生成的倏逝波波矢为单一方向, 因此分辨率存在方向差异性. 为解决上述问题, 建立了完整的空间移频超分辨成像仿真模型, 并提出了一种新型倏逝波生成方案, 可利用微纳结构产生波长更短、具有全方向波矢的倏逝波. 结果显示, 新方案可产生波长更短的倏逝波, 并消除成像分辨率的方向差异性, 从而避免现有方案中的多方位成像和图像后处理. 空间移频超分辨成像技术具有大视场、高分辨、结构简单、操作方便、无需逐点扫描、可与普通光学显微镜兼容等优点, 改进后将具有更广阔的应用空间.

关键词: 显微镜, 超分辨成像, 近场照明, 倏逝波**PACS:** 42.30.-d, 07.60.Pb, 98.52.Cf, 78.47.dc**DOI:** 10.7498/aps.72.20230934

1 引言

自阿贝提出衍射极限以来, 科学家们利用各种技术手段绕过或突破光学衍射极限, 以实现超高成像分辨率, 并数次获得诺贝尔物理学奖和化学奖. 其中以受激发射损耗荧光显微镜、随机光学重建显微镜、光激活定位显微镜为代表的荧光超分辨显微镜实现了纳米级的成像分辨率, 从而极大地促进了生物医疗及生命科学的进步. 然而在非荧光成像领域, 虽有众多超分辨成像技术, 例如结构光照明显微术^[1,2]、光学超振荡透镜^[3,4]、点扩散工程^[5,6]、微球辅助纳米显微镜^[7-10]等, 但都受限于理论本身或工程实际, 分辨率很难突破 50 nm, 距离纳米级的

成像分辨率还有很大的差距.

空间移频超分辨成像 (spatial frequency shift super-resolution imaging, SFSSRI) 是一种极具潜力的纳米成像技术, 可利用样品表面微纳结构对入射倏逝波的散射, 使之转换成传播波, 进而获取样品表面的超精细空间信息, 其极限分辨率由倏逝波的波长决定. 受合成孔径成像技术的启发, SFSSRI 技术也是通过空间频谱的移动、拼接等操作来获取目标的更高空间频率信息, 从而实现更高的成像分辨率. 国外学者对 SFSSRI 技术的原理进行了大量研究, 并拓展了相关应用领域. 在成像原理上, 由空间频谱成像技术拓展出了集成干涉成像系统^[11,12]、傅里叶叠层成像技术^[13]、合成孔径显微镜^[14]等. 例如美国康涅狄格大学 Zheng 等^[13]利用不同角度

* 国家自然科学基金 (批准号: 62075176, 62005206) 和瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金 (批准号: SKLST202208) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jzling@xidian.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: xrwang@mail.xidian.edu.cn

照明所对应的不同空间频率, 合成出超越物镜本身分辨率的超分辨图像; Lee 和 Weiner^[14] 提出一种利用相位恢复来获得更高空间频率的超分辨成像方法; Alekseyev 等^[15] 利用声子散射, 将倏逝波转化成远场传导波, 实现了可见光波段的 SFSSRI, 并可推广至红外和太赫兹波段. 在应用上, Kim 等^[16] 利用合成孔径显微镜技术获得了超越衍射极限的成像分辨率, 并对肝细胞进行了清晰成像. 文献^[17–21] 对 SFSSRI 技术进行了深入的研究, 并指出了该方案的关键技术问题. 2013 年, Hao 等^[17] 提出了一种利用纳米光纤泄露的倏逝波进行照明的超分辨成像方案, 并实验证实了 SFSSRI 的可行性. 同年, Hao 等^[18] 又利用棱镜全反射产生的倏逝波进行近场照明, 实现了 150 nm 的成像分辨率, 并研究了倏逝波波矢与光栅矢量夹角对成像分辨率的影响, 即只有在波矢方向上可以获得最高的成像分辨率, 而在与之垂直的方向上, 分辨率并没有改善. 为此, 将多个方向倏逝波照明成像的结果进行后处理, 可获得完整的超分辨图像. 2017 年, Liu 等^[19] 利用荧光纳米线环的近场照明, 实现了远场超分辨成像; 2019 年, Pang 等^[20] 深入研究了 SFSSRI 技术中存在的像质问题, 指出了空间移频成像技术中的放大率畸变和部分频谱缺失问题. 2021 年, Ling 等^[22] 利用微粒散射光的近场照明, 实现了 SFSSRI, 验证了该方案中成像分辨率的方向差异性, 并提出了一种环形照明方案以解决上述成像质量问题.

然而, 上述模型中倏逝波的最短波长仍受光学材料折射率的限制, 无法进一步提升系统的成像分辨率. 为解决上述问题, 本文提出一种基于微纳结构的新型倏逝波生成方案, 可突破材料折射率的限制, 实现更短的倏逝波波长. 另外, 所生成的倏逝波具有全方向波矢, 因此在各个方向上具有相同的成像分辨率, 解决了成像分辨率方向差异性问题. 仿真结果验证了新方案的可行性, 可极大提升空间移频成像技术的成像效率, 为该技术的广泛应用奠定了基础.

2 理论分析

2.1 SFSSRI 技术及其分辨率极限

根据空间频率和分辨率的关系, 只要能够获取目标的高频空间信息, 即可实现对目标的超分辨成

像. 然而, 普通的光学成像系统都是低通滤波器, 超过物镜自身截止频率 K_{\max} 的高频信号都无法进入物镜. 截止频率对应的空间距离, 即为成像物镜的极限分辨率. 受合成孔径技术的启发, 研究人员提出 SFSSRI 技术, 通过调制技术将物镜原本无法接收的高频信息转移到物镜的低通频带范围内, 从而实现超越衍射极限的成像分辨率. 例如结构光照明技术, 物镜接收到的空间频率 K_{rec} 为样品空间表面结构的频率 K_{obj} 与照明光场空间频率 K_{ill} 的差频信号, 即

$$K_{\text{rec}} = K_{\text{obj}} - K_{\text{ill}}. \quad (1)$$

由于 K_{rec} 的极限为衍射极限所对应的截止频率 K_{\max} , 而对远场照明光的空间频率同样受到衍射极限的限制, 即 K_{ill} 的极值也是 K_{\max} . 因此, 该方案中能够获取的样品空间频率的理论极限为 $2K_{\max}$, 即分辨率提升 1 倍. 若需进一步提升成像分辨率, 则只能选择空间频率更高的倏逝波作为照明光场. 若倏逝波的空间频率为 K_{evan} , 则成像系统能接收的最高频率为 $K_{\text{evan}} + K_{\text{obj}}$, 因此最小可分辨距离 Δ_{\min} 为

$$\begin{aligned} \Delta_{\min} &= \frac{1}{K_{\text{evan}} + K_{\text{obj}}} = \frac{1}{1/\lambda_{\text{evan}} + 1/d} \\ &= \frac{d \cdot \lambda_{\text{evan}}}{d + \lambda_{\text{evan}}}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中, λ_{evan} 为照明倏逝波的波长, d 为物镜能分辨的最小距离. 因此在物镜已经确定的情况下, 可通过缩短照明倏逝波的波长来不断提升系统的成像分辨率.

在图 1 所示的成像频谱空间中, 物镜原本能够接收的空间频率范围为蓝色圆形部分, 其最大值为 K_{\max} . 若照明倏逝波的波矢为沿 x 轴的 K_{evan} , 经过移频后, 则物镜能够成像的频谱范围整体向右平移, 如图 1 中虚线包括的范围. 因此, 在基于近场照明的移频成像系统中, 沿倏逝波波矢方向可获

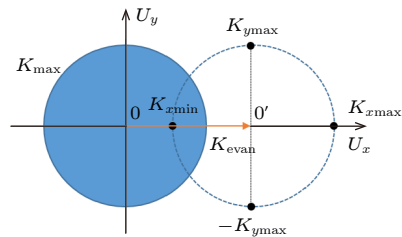


图 1 空间移频成像中的频谱移动示意图

Fig. 1. Spatial frequency shifting in imaging system.

得超越衍射极限的分辨率,而在与之垂直的方向上,其分辨率不会发生改变,即系统在各个方向上分辨率不同.由此可见,SFSSRI技术中存在两个关键问题:如何缩短倏逝波的波长,以进一步提升系统的成像分辨率;如何解决成像系统的分辨率方向差异性.

2.2 倏逝波的产生及其波长、波矢

倏逝波的产生在SFSSRI技术中至关重要,而最常见的方式为利用直角棱镜的全反射来生成倏逝波,如图2(a)所示.光线垂直入射进入棱镜,在棱镜的上表面发生全反射,即在棱镜的上方出现了一层向右传播的倏逝场,记作 K_{evan} ,其在垂直方向上振幅呈指数衰减,因此可渗透的深度约为一个波长的距离.生成的倏逝波波长与棱镜的折射率以及入射角有关,可表示为

$$\lambda_{\text{evan}} = \lambda_0 / (n \cdot \sin\theta), \quad (3)$$

其中 λ_0 为入射光的波长, n 为棱镜的折射率,而 θ 为发生全反射时的入射角.由此可见,全反射时倏逝波的波长受到棱镜折射率和入射角度的限制,无法不断缩短,因此近场照明成像系统的分辨率也无法不断提升.

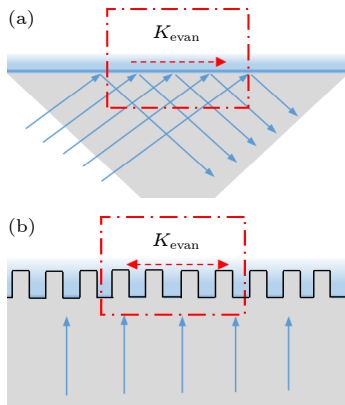


图2 两种倏逝波的产生方案 (a) 基于棱镜全反射; (b) 基于微纳结构的倏逝波生成

Fig. 2. Two methods for the generation of evanescent wave: (a) Scheme based on the total internal reflection at upper surface of prism; (b) scheme based on the transmission wave from nano-structures.

而另一种产生倏逝波的方法为微纳结构对光场的调制,如图2(b)所示.当平面波从基底入射到带有微纳结构的上表面时,由于微纳结构的折射率调制,使得透射光的波前被调制,从而形成了带有高频空间信息的倏逝波.经过一段距离的传输,倏

逝场的振幅按指数衰减,只剩下传播场信息,即在距离微纳结构一个波长以内的近场区域,同时包含倏逝场和传播场,而在远场区域仅有传播场.

为对比两种方案所产生倏逝波的特性差异,将二者在分界面处的光强分布和相位分布进行仿真,如图3所示.当波长为500 nm的平面波以 45° 入射在 $n = 2.0$ 的棱镜上表面全反射时,分界面下方的光强为入射光和反射光干涉形成的条纹,而分界面上方的光强呈指数衰减,如图3(a)所示.图3(b)为分界面上的光场相位分布,根据等相位面可知倏逝波的波矢方向向右,其波长约为350 nm,与(3)式的计算结果一致.与棱镜全反射模型相比,利用微纳结构产生的倏逝波无法与透射场分开,即在微纳结构上方的近场区域内既存在倏逝波也有传播波.例如采用周期为400 nm、线宽100 nm,深度400 nm,折射率为3的矩形光栅作为倏逝波生成器,若波长为500 nm的平面波垂直入射后,其表面的相位分布如图3(c)所示.在近场区域,原本的平面波前受到微纳结构的调制,变成了携带高频空间信息的正弦型波前;而当远离微纳结构时,高频信息丢失,其波前又恢复为平面.将探测器放置在微纳结构上方的近场区域,可获得其相位分布,如图3(d)所示.两个相邻的等相位面之间的间隔为倏逝波的波长,恰好等于微纳结构的周期,波矢方向为垂直于等相位面的方向.因此,可通过更加精细的微纳结构来获取更短波长的倏逝波.

3 建模与仿真研究

3.1 SFSSRI 仿真模型的建立

根据SFSSRI的过程,可将其分为3个部分:倏逝波的产生及其与样品的相互作用;样品表面的光场传输至焦平面;焦平面上的光场分布经过透镜组后到达像面,在CCD上成像,如图4所示.无论是棱镜全反射、还是微纳结构模型,均可以使用时域有限差分法(finite-difference time-domain algorithm, FDTD)来仿真倏逝波的产生,以及倏逝波与微纳结构的相互作用;再使用衍射的角谱理论,将近场探测器获得的光场信息投影至物镜的焦平面位置,从而获得焦平面上的光场信息;最后,使用Chirp-Z变换来计算经过显微物镜和筒镜后在像面上得到的成像结果.

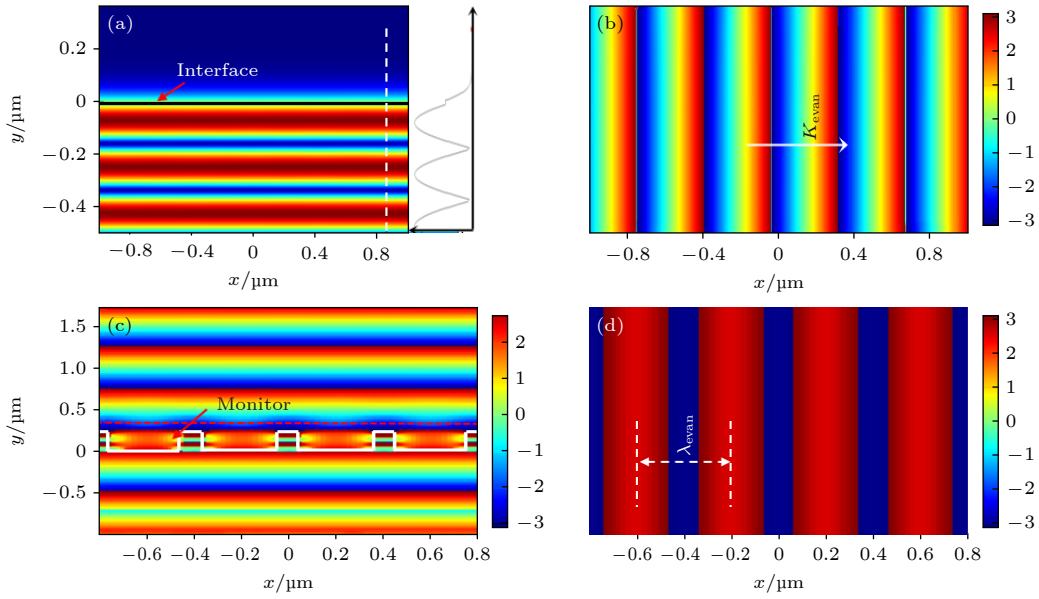


图 3 两种方案中倏逝波的特性比较 (a) 棱镜全反射时横截面上的光强分布; (b) 棱镜上表面的相位分布; (c) 微纳结构附近的相位分布; (d) 微纳结构上方探测器位置的相位分布

Fig. 3. Comparison of evanescent wave generated by above two methods: (a) Light intensity distribution around the interface of prism when total internal reflection occurs; (b) light phase distribution at the upper interface of prism; (c) light phase distribution around the nano-structure; (d) phase distribution at the monitor closely above the nano-structure.

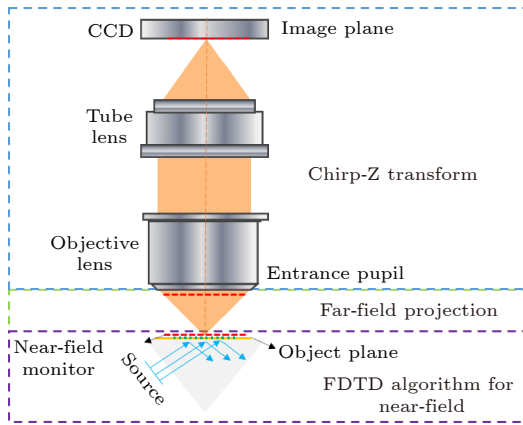


图 4 SFSSRI 仿真模型示意图

Fig. 4. Schematic diagram of the simulation model for SFSSRI.

3.2 SFSSRI 特性的验证

为验证成像模型的正确性, 选择了一组 3 条线的成像样品, 线条宽度为 100 nm, 相邻线条的中心间隔为 d , 如图 5(a) 所示. 仿真中使用的入射光波长为 500 nm, 物镜的数值孔径 (numerical aperture, NA) 为 0.9. 首先, 用平面波直接照明成像样品, 验证远场照明时系统的成像分辨率. 当线条间隔为 500 nm 时, 3 条线可以清晰成像, 如图 5(b) 所示; 当线条间隔缩小至 460 nm 时, 3 线条恰好可分辨, 如图 5(c) 所示; 继续缩小线条间距至 430 nm 时,

3 条线的中心位置连为一体, 线条无法分辨, 如图 5(d) 所示. 由此可见系统的最小可分辨距离约为 460 nm, 与理论值基本一致. 随后, 使用全反射时棱镜上表面的倏逝波来照明样品, 棱镜的折射率 $n = 1.5$, 其成像结果如图 5(e) 和图 5(f) 所示. 当线条间隔为 300 nm 时, 3 条线可以清晰分辨, 而当间隔缩短至 280 nm 时, 3 条线隐约可见. 相比远场照明, 倏逝波的近场照明显著提升了系统的成像分辨率. 若提升棱镜的折射率至 $n = 1.8$, 则系统的成像分辨率可进一步提升, 间隔为 280 nm 的样品仍然可清晰分辨, 而间隔为 250 nm 时无法分辨, 如图 5(g) 和图 5(h) 所示. 根据 (3) 式, 全反射时倏逝波的波长由棱镜的折射率和入射角决定, 无法继续缩短. 因此, 要进一步提升成像分辨率, 就必须另辟蹊径, 以产生更短波长的倏逝波.

为验证空间移频成像中分辨率的方向差异性, 继续选用线宽 100 nm、间隔 300 nm 的线状样品进行测试. 样品方向与棱镜表面所产生的倏逝波波矢如图 6(a) 所示, 其中倏逝波沿 x 轴方向传播, 线条方向与 y 轴的夹角为 θ . 当 $\theta = 0^\circ$ 时, 线条方向与倏逝波的波矢方向垂直, 此时成像结果中 3 条线清晰可辨, 如图 6(b) 所示; 整体旋转样品, 保持线条的间距不变, 成像结果如图 6(c) — (g) 所示. 随着样品方向的改变, 其成像结果中 3 条线逐渐变得

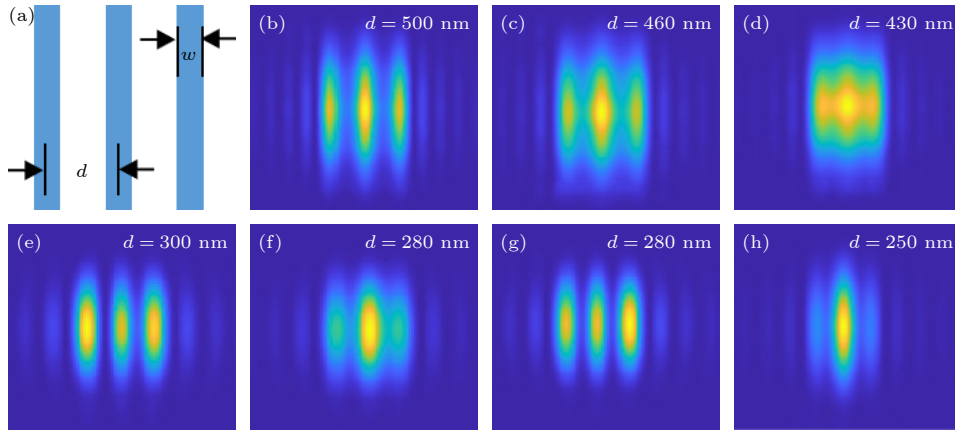


图 5 远场照明与近场照明时的成像分辨率比较 (a) 成像目标及参数; (b)–(d) 远场照明的成像结果; (e), (f) 棱镜折射率 $n = 1.5$ 时的近场照明成像结果; (g), (h) 棱镜折射率 $n = 1.8$ 时的近场照明成像结果

Fig. 5. Imaging resolution contrast between far-field illumination and near-field evanescent wave illumination: (a) Imaging target and its parameters; (b)–(d) imaging results obtained by far-field illumination; (e), (f) imaging results of near-field illumination when the refractive index of prism $n = 1.5$; (g), (h) imaging results of near-field illumination when the refractive index of prism $n = 1.8$.

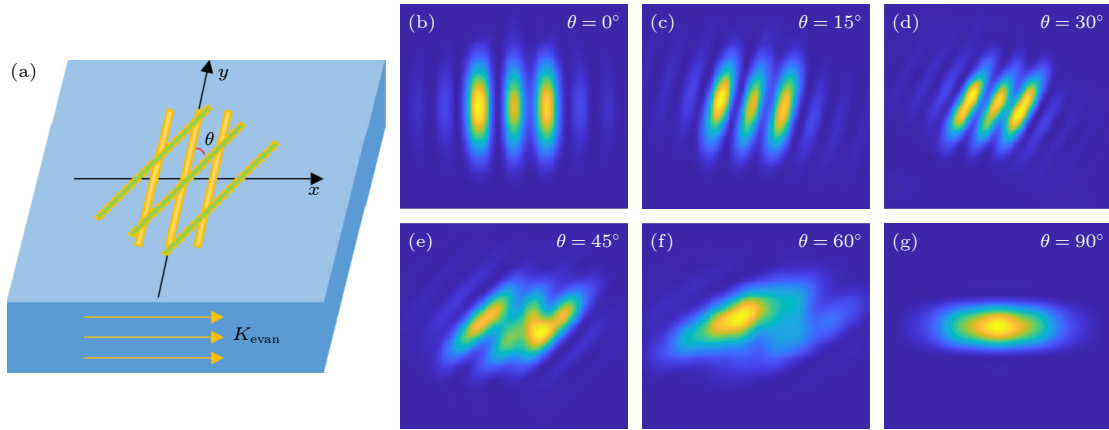


图 6 SFSSRI 中的分辨率方向差异性 (a) 成像样品的方位示意图; (b)–(g) 不同方位角时样品的成像结果

Fig. 6. Directional differences in imaging resolution of spatial frequency shift super-resolution imaging: (a) Imaging target and its direction; (b)–(g) imaging results obtained at different azimuth angles.

模糊, 当 $\theta > 30^\circ$ 时, 3 条线无法分辨. 由此可见, 在倏逝波的波矢方向上, 成像分辨率较高, 其极限分辨率取决于倏逝波的波长, 而在与之垂直的方向上, 分辨率最低, 与远场照明时的分辨率无异.

3.3 新型倏逝波生成器及其在 SFSSRI 中的应用

为解决基于棱镜全反射的倏逝波生成器中出现的上述问题, 提出一种新型倏逝波生成器, 如图 7(a) 所示. 其核心部件为透明基底上的同心圆环形状的微纳结构 (周期 300 nm, 线宽 150 nm, 深度 200 nm, 折射率为 2), 圆环中心半径 1 μm 的圆形区域不设微纳结构; 相邻圆环间的间隔可调控倏逝波的波长; 圆环的折射率和厚度可调制近场区

域相位差的大小. 由于该结构的旋转对称性, 可生成具有全方向波矢的倏逝波, 即圆环中心位置的光场具有任意方向的波矢, 因此可解决棱镜全反射模型中的分辨率方向差异性问题. 其生成倏逝波的相位分布如图 7(b) 所示, 其中蓝色部分为微纳结构对平面波前调制后的结果; 中心区域的相位为倏逝波向内传输形成的相位分布; 白色箭头方向垂直于等相位面, 为波矢方向.

将上述微纳结构中心区域生成的倏逝波用于近场照明成像, 并与棱镜全反射时生成的倏逝波照明成像进行比较, 可看出二者的明显区别. 分别选择线宽 150 nm、周期 300 nm 的一组同心圆环和线宽 100 nm、周期 300 nm 的一组十字条纹作为成像目标, 如图 8(a) 和图 8(b) 所示. 利用棱镜

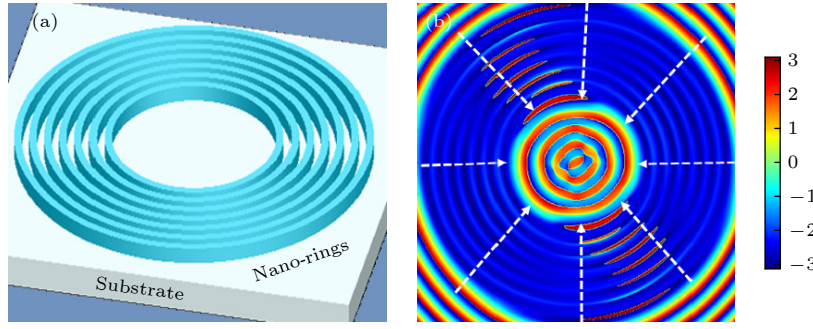


图 7 微纳结构及其产生的倏逝波 (a) 微纳结构示意图; (b) 微纳结构表面倏逝波的相位分布

Fig. 7. Directional differences in imaging resolution of spatial frequency shifting super-resolution imaging method: (a) Sketch of the nano-structure; (b) phase distribution of the evanescent wave generated above the upper surface of nano-structure.

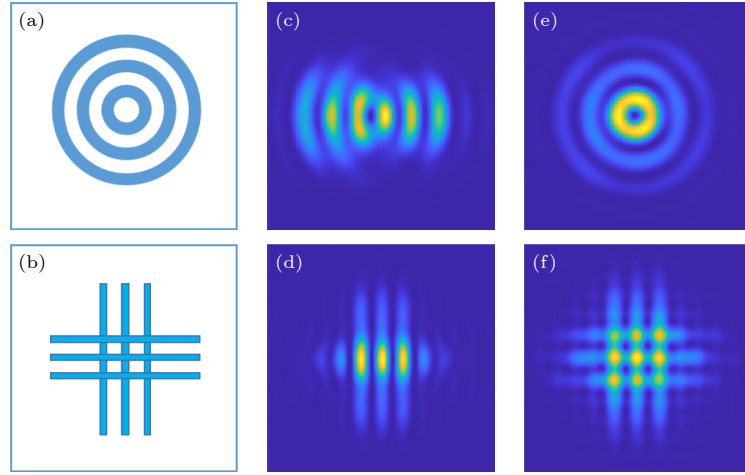


图 8 不同倏逝波的成像性能比较 (a), (b) 成像样品的结构示意图; (c), (d) 利用棱镜全反射所生成的倏逝波照明的成像结果; (e), (f) 利用微纳结构生成的倏逝波照明的成像结果

Fig. 8. Comparison of imaging characteristic under different evanescent wave illumination: (a), (b) Sketch of the imaging targets; (c), (d) imaging results obtained under the evanescent wave illumination generated by the total internal reflection at prism surface; (e), (f) imaging results obtained under the evanescent wave illumination generated by nano-structures.

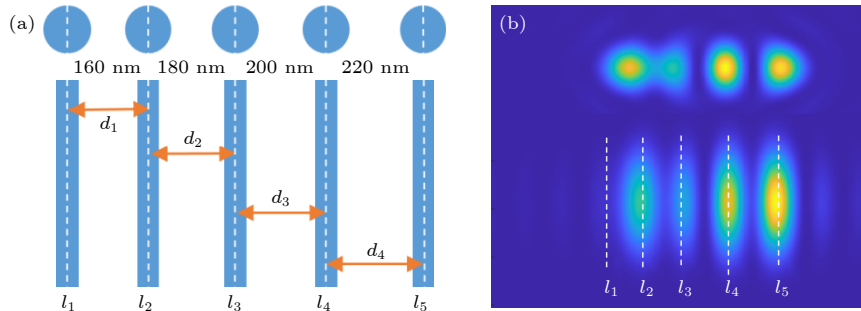


图 9 超高成像分辨率的实现 (a) 成像样品的结构示意图; (b) 倏逝波照明的成像结果

Fig. 9. Realization of ultra-high imaging resolution: (a) Parameters of the imaging targets; (b) imaging results under evanescent wave illumination.

全反射时产生的倏逝波进行照明, 其成像结果如图 8(c) 和图 8(d) 所示, 从图中可看出不同方向的分辨率差异以及图像的强度差异; 改用上述微纳结构中心区域的倏逝场近场照明, 其成像结果如图 8(e) 和图 8(f) 所示, 其成像分辨率和成像强度

在各方向基本一致, 因此可避免因倏逝波方向单一而带来的分辨率方向差异性.

最后, 为验证基于微纳结构产生的超短倏逝波具有极高的成像分辨率, 选择线宽 100 nm, 周期 200 nm, 深度 200 nm, 折射率为 2 的一维矩形光

栅结构作为倏逝波生成器, 将其生成的波长为 200 nm 的倏逝波用于近场照明成像. 远场入射光波长为 500 nm, 显微物镜的数值孔径为 0.9. 成像样品为间距渐变的线状样品和点状样品, 其结构参数如图 9(a) 所示, 最小间隔为 160 nm, 最大间隔为 220 nm. 成像结果如图 9(b) 所示, 从图中可以看出, 当相邻线条的中心间距大于 180 nm 时, 两条线可分辨. 若中心间距小于 180 nm 时, 则两条线相互融合, 无法分辨. 换点状目标后, 有类似的成像效果. 因此, 最小可分辨距离为 180 nm, 与 (2) 式中的理论预测基本一致.

4 结 论

通过对 SFSSRI 系统的完整建模, 仿真分析了其极限分辨率与照明倏逝波波长的关系, 并演示了其成像分辨率的方向差异性. 为突破现有技术方案中棱镜的材料折射率对极限分辨率的限制并解决其成像分辨率的方向差异性, 提出一种基于微纳结构的倏逝波生成器, 生成了波长更短且具有全方向波矢的倏逝波, 解决了单一方向倏逝波照明中存在的成像分辨率差异性, 从而避免了多次成像和图像后处理, 可极大地拓展该方案的应用领域, 为光学超分辨成像提供一种新的选择. 在后续工作中, 我们将实验验证上述结论, 并深入研究 SFSSRI 技术中的频谱拓宽技术, 以获得更高的成像分辨率和更优的成像质量.

参考文献

- [1] Kner P, Chhun B, Griffis E, Winoto L, Gustafsson M 2009 *Nat. Methods* **6** 339
- [2] Shao L, Kner P, Gustafsson M 2011 *Nat. Methods* **8** 1044
- [3] Rogers E, Lindberg J, Zheludev N 2015 *Nat. Mater.* **11** 432
- [4] Qin F, Huang K, Wu J J, Jiao J, Luo X, Qiu C W, Hong M H 2015 *Sci. Rep.* **5** 09977
- [5] Hajj B, Beheiry E, Dahan M 2016 *Biomed. Opt. Express* **7** 726
- [6] Izeddin I, Beheiry M, Andilla J, Ciepielewski D, Darzacq X, Dahan M 2012 *Opt. Express* **20** 4957
- [7] Wang Z B, Guo W, Li L, Luk'yanchuk B, Khan A, Liu Z, Chen Z C, Hong M H 2011 *Nat. Commun.* **2** 218
- [8] Zhou S, Deng Y, Zhou W, Yu M, Urbach H, Wu Y 2017 *Appl. Phys. B* **123** 236
- [9] Kwon S, Park J, Kim K, Cho Y, Lee M 2022 *Light-Sci. Appl.* **11** 32
- [10] Yan Y Z, Li L, Feng C, Guo W, Lee S J, Hong M H 2014 *ACS Nano* **8** 1809
- [11] Lü G, Li Q, Chen Y, Feng H, Xu Z, Mu J 2019 *Opt. Rev.* **26** 664
- [12] Gao W P, Yuan Y, Wang X R, Ma L, Zhao Z S, Yuan H 2021 *Opt. Express* **29** 11869
- [13] Zheng G, Horstmeier R, Yang C 2015 *Nat. Photonics* **9** 621
- [14] Lee D J, Weiner A M 2014 *Opt. Express* **22** 9380
- [15] Alekseyev L, Narimanov E, Khurgin J 2012 *Opt. Express* **19** 22350
- [16] Kim M, Choi Y W, Fang Y C, Sung Y J, Dasari R R, Feld M S, Choi W 2011 *Opt. Lett.* **36** 148
- [17] Hao X, Liu X, Kuang C F 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 013104
- [18] Hao X, Kuang C F, Li Y H, Liu X 2013 *Opt. Lett.* **38** 2455
- [19] Liu X, Kuang C F, Hao X, Pang C L, Xu P, Li H, Liu Y, Yu C, Xu Y, Nan D, Shen W, Fang Y, He L, Liu X, Yang Q 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 076101
- [20] Pang C L, Li J X, Tang M W, Wang J P, Mela I, Ströhl F, Hecker L, Shen W D, Liu Q L, Liu X W, Wang Y N, Zhang H, Xu M, Zhang X H, Liu X, Yang Q, Kaminski C 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1900188
- [21] Hao X, Yang Q, Kang C F, Liu X 2021 *Acta Opt. Sin.* **41** 0111001 (in Chinese) [郝翔, 杨青, 匡翠方, 刘旭 2021 光学学报 **41** 0111001]
- [22] Ling J Z, Wang Y C, Liu X, Wang X R 2021 *Opt. Lett.* **46** 1265

Research on spatial frequency shift super-resolution imaging based on evanescent wave illumination*

Ling Jin-Zhong^{1)2)†} Guo Jin-Kun¹⁾ Wang Yu-Cheng¹⁾

Liu Xin¹⁾ Wang Xiao-Rui^{1)‡}

1) (School of Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

2) (State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(Received 3 June 2023; revised manuscript received 16 August 2023)

Abstract

In spite of the success of fluorescence microscopes (such as stimulated emission depletion microscopy,

stochastic optical reconstruction microscopy and photoactivated localization microscopy) in biomedical field, which have realized nanometer scale imaging resolution and promoted the great development of bio-medicine, the super-resolution imaging method for non-fluorescent sample is still scarce, and the resolution still has a big gap to nanometer scale. Among existing methods, structured illumination microscopy, PSF engineering, super-oscillatory lens and microsphere assisted nanoscopy are more mature and widely used. However, limited by the theory itself or engineering practice, the resolutions of these methods are hard to exceed 50 nm, which limits their applications in many fields. Enlightened by synthetic aperture technique, researchers have proposed spatial frequency shift super-resolution microscopy through shifting and combining the spatial frequency spectrum of imaging target, which is a promising super-resolution imaging scheme, for its resolution limit can be broken through continually. Currently, owing to the limitation of the refractive index of optical material, the wavelength of illumination evanescent wave is hard to shorten when this wave is generated at prism surface via total internal reflection, which determines the highest resolution of this spatial frequency shift super-resolution imaging system. Another deficiency of this scheme is the difference in imaging resolution among different directions, for the image has the highest resolution only in the direction along the wave vector of illumination evanescent wave; while, the image has the lowest resolution in the direction perpendicular to the wave vector, which is the same as that obtained by far-field illumination.

In order to solve the above thorny questions, a new model of generating the evanescent wave is proposed, which can generate an omnidirectional evanescent wave with arbitrary wavelength based on the phase modulation of nano-structure, and solve the both problem in imaging system at the same time. To verify the our scheme, we set up a complete simulation model for spatial frequency shift imaging scheme, which includes three parts: the generation of evanescent wave and the interaction of the evanescent wave with the nano-structures at imaging target, which can be simulated with FDTD algorithm; the propagation of light field from near-field to far-field region, from the sample surface to the focal plane of objective lens, which can be calculated with angular spectrum theory; the propagation of light field from the focal plane to the image plane, which can be worked out with Chirp-Z transform.

Firstly, with this complete simulation model, we compare the resolution of microscopy illuminated by evanescent wave with that by propagating wave. The experimental results verify the super-resolution imaging ability of evanescent wave illumination and the influence of prism refractive index. The higher the refractive index, the shorter the wavelength of evanescent wave is and the higher the resolution of spatial frequency shift imaging system. Secondly, we demonstrate the resolution difference in a series of directions with a three-bar imaging target rotated to different directions. The result shows that the highest imaging resolution occurs in the direction of illumination evanescent wave vector, and the lowest resolution appears in the direction perpendicular to the wave vector. Finally, we simulate the evanescent wave generated by nano-structure and demonstrate its properties of wavelength and vector direction. When applied to near-field illumination super-resolution imaging, the omnidirectional evanescent wave solves the both problems in the model of total internal reflection from the prism surface.

Therefore, the advantages of our scheme are higher imaging resolution and faster imaging speed, no need for multi-direction and multiple imaging, and also image post-processing. In this study, a new spatial frequency shift super-resolution imaging method is proposed, which lays a theoretical foundation for its applications.

Keywords: microscopy, super-resolution imaging, near-field illumination, evanescent wave

PACS: 42.30.-d, 07.60.Pb, 98.52.Cf, 78.47.dc

DOI: 10.7498/aps.72.20230934

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62075176, 62005206) and the Open Research Fund of State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, China (Grant No. SKLST202208).

† Corresponding author. E-mail: jzling@xidian.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: xrwang@mail.xidian.edu.cn



基于倏逝波照明的空间移频超分辨成像技术研究

凌进中 郭金坤 王昱程 刘鑫 王晓蕊

Research on spatial frequency shift super-resolution imaging based on evanescent wave illumination

Ling Jin-Zhong Guo Jin-Kun Wang Yu-Cheng Liu Xin Wang Xiao-Rui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 224202 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230934

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230934>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

平场复用多焦点结构光照明超分辨显微成像

Flat-field multiplexed multifocal structured illumination super-resolution microscopy

物理学报. 2022, 71(4): 048704 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211712>

一种用于线粒体受激辐射损耗超分辨成像的新型探针

Study on a novel probe for stimulated emission depletion Super-resolution Imaging of Mitochondria

物理学报. 2020, 69(16): 168702 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200171>

基于宽带立体超透镜的远场超分辨率成像

Far-field super-resolution imaging based on wideband stereo-metalens

物理学报. 2018, 67(9): 094101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172608>

荧光寿命显微成像技术及其应用的最新研究进展

Recent progress of fluorescence lifetime imaging microscopy technology and its application

物理学报. 2018, 67(17): 178701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180320>

分孔径离轴同时偏振超分辨率成像光学系统像差校正

Aberration correction of aperture-divided off-axis simultaneous polarization super-resolution imaging optical system

物理学报. 2022, 71(21): 214201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220946>

受激辐射损耗超分辨显微成像系统研究的新进展

New advances in the research of stimulated emission depletion super-resolution microscopy

物理学报. 2020, 69(10): 108702 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200168>