

光学设计

几种光学超分辨技术研究

牛亚军¹, 查为懿¹, 常 军¹, 沈本兰¹, 杨海波², 闫秀生², 田 宏²

(1. 北京理工大学, 北京 100081; 2. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308)

摘要:随着人们对光学仪器分辨率的不懈追求,出现了超分辨这一概念。文中主要研究介绍了显微镜和投影光刻系统中的几种光学超分辨技术,并比较了两类系统超分辨技术的不同和联系,对光学超分辨技术进行总结。

关键词:超分辨;显微镜;投影光刻系统;分辨率

中图分类号:TH742

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2017)-04-0008-06

Research on Optical Super-resolution Technology

NIU Ya-jun¹, ZHA Wei-yi¹, CHANG Jun¹, SHEN Ben-lan¹, YANG Hai-bo², YAN Xiu-sheng², TIAN Hong²

(1. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Electro-optical Information Control and Security Technology, Tianjin 300308, China)

Abstract: With the continuous pursuit of optical instrument resolution, the concept of super-resolution is presented. Several kinds of super-resolution technologies in the optical microscopy and projection lithography system are mainly researched and introduced. And the difference and relation of the super-resolution technology between the two super-resolution projection lithography systems are compared. And the optical super-resolution technology is summarized.

Key words: super-resolution; microscopy; projection lithography system; optical instrument resolution

近年来,在世界范围内,对新型光学仪器及其分辨率的研究成为光学领域研究的热点。无论是军事领域还是民用领域,都对光学成像系统的分辨率提出了更高的要求。光学超分辨技术,作为光学工程领域内的一前沿研究课题,不仅涉及到光学成像系统设计,同时也是图像采集和处理领域关注的问题^[1]。如何实现成像系统的超分辨成为光电探测领域中不断探索和追求的重要目标。

分辨率被定义为通过系统而不被畸变的最精细的信号,而系统又可根据信号的传递过程被分为三个子系统,并分别对应三种分辨率^[2]。第一个子系统是光学信号传播的自由介质空间,其分辨率因受光的衍射效应限制而被称为衍射分辨率;第二个子系统是光电转换器——CCD相机,由于CCD像素

存在一定尺寸,信号被再次畸变,对应几何分辨率;第三个子系统则是电路,因探测器每个单元都存在各类噪声,这将限制最后得到的输出信号,对应噪声等效分辨率。

文中主要讨论针对第一个子系统,即突破衍射极限的超分辨技术。

光的衍射和光学器件的有限孔径会引起物体高频信息的丢失,从而导致图像模糊、物体的细节信息无法分辨。根据Abbe的衍射理论,通过一个镜头能分辨的两物点间的横向最小距离和纵向最小距离为(瑞利判据)^[3]

$$\Delta x = \frac{0.61\lambda}{n\sin\theta} \quad (1)$$

$$\Delta z = \frac{2\lambda}{(n\sin\theta)^2} \quad (2)$$

式中, λ 为波长; n 为介质折射率; θ 为镜头的物方孔径角。

换句话说,衍射极限意味着间隔小于 $\Delta x(z)$ 的两点通过该镜头是无法分辨出来的,相对的,超分辨技术就是用来分辨间隔小于 $\Delta x(z)$ 的两点的。对于可见光而言,衍射极限大约在200 nm左右。

从20世纪早期开始到现在,人们提出了多种获得光学超分辨的方法。这些技术被广泛地应用于光存储、超大规模集成电路的制作、星际光通信、生物显微镜、视网膜成像等领域中^[4]。

1 显微镜超分辨技术

显微镜超分辨技术总体可分为近场和远场两大类。光学仪器与样品之间的距离小于波长量级时,称为近场;大于波长量级时,则称为远场。

1.1 近场超分辨技术

为了避免远场衍射带来的Abbe分辨率极限,1928年E H Synge等^[5]提出近场扫描光学显微镜(NSOM, near-field scanning optical microscopy)。

近场超分辨技术通过限制光场来实现^[6],具体方法是使用一个尺度远小于波长量级的探针(如光纤)照明样品,使照明光场限定在50~100 nm范围内。当探针足够靠近样品表面时,其出射光与表面相互作用,显微镜则收集这些携带表面信息的光信号(一般是瞬逝波)成像。图1为一典型的近场扫描显微镜。

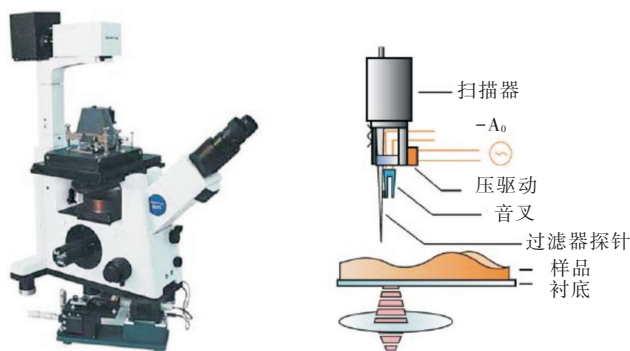


图1 近场扫描显微镜(NSOM)

近场扫描显微镜的分辨率不受远场衍射限制,而是受探针尖端大小限制,可以达到20~50 nm^[7],但该方法局限于对精细表面成像,如细胞膜、集成芯

片等,且对机械控制精度要求极高。

1.2 远场超分辨技术

远场超分辨显微镜工作在正常距离,通常利用荧光分子作为探针标记生物组织,然后探测样品的荧光成像,即所谓荧光显微镜。根据其看待样品的方式又可分为两类^[8]:将样品看做是密度连续变化的荧光团,或看做是一个个单分子标记物的集合体。前者利用结构光照明以及荧光分子的非线性响应效应产生谐波,使探测频带宽提高若干倍,增强分辨率;后者则是利用单分子定位技术实现超分辨。下面介绍几种典型的超分辨显微镜。

(1) 共焦扫描荧光显微镜

共焦扫描荧光显微镜(CSFM, confocal scanning fluorescence microscopy)于1960年前后由M. Minsky^[9]提出,其结构如图2所示。

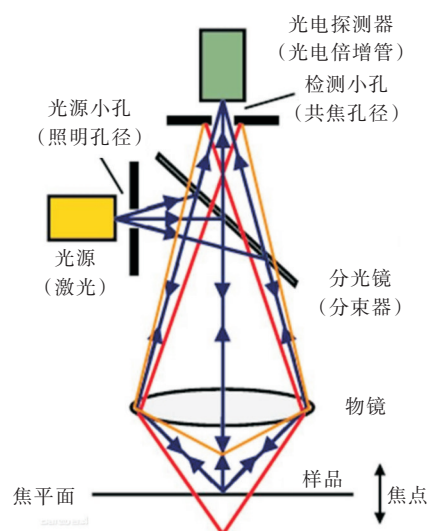


图2 共焦扫描荧光显微镜

CSFM的特点在于,照明针孔光阑和检测针孔光阑是共轲的,从而使焦平面以外的光线被阻挡,提高了轴向分辨率,其原理简单、操作性良好,适用于生物活细胞内部的三维成像。

在CSFM的基础上,应用新的技术进行改良,可进一步提高分辨率。对传统CSFM改良中应用最广泛的就是双光子共焦显微镜和4Pi共焦显微镜。前者利用双光子激发这种非线性效应,提高了显微镜的信号接收效率和信噪比,加深了显微镜的透视深度^[10];后者通过在样品两侧各放置一个物镜,使激发

光干涉照明,信号光干涉成像,将轴向分辨率提高5~7倍^[11]。

(2) 结构光照明显微镜

结构光照明显微镜(SIM, structured illumination microscopy)利用结构光照明样品,将原本不可分辨的高频信息编码入荧光图像中,结合计算解码获取高分辨率信息,可将横向分辨率提高至约100 nm^[7]。

图3为结构光照明显微镜原理示意图^[7]。

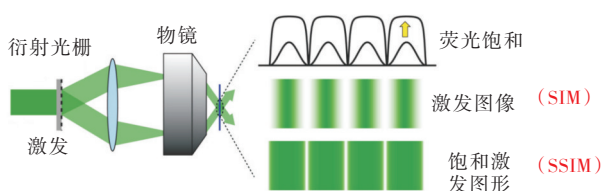


图3 结构光照明显微镜原理示意图

在SIM的基础上,引入荧光分子的非线性响应可产生谐波,使探测带宽继续提高。饱和和结构光照明显微镜(SSIM, saturated structured illumination microscopy)就是利用了饱和和受激发射产生非线性项,使其理论上不存在分辨率极限,且曾有研究称其实现了50 nm的横向分辨率^[12]。

(3) 受激发射损耗显微镜

受激发射损耗显微镜(STED, stimulated emission depletion)于1994年由S W Hell等^[13]人提出,其核心思想是利用第二激光器(STED激光器)引起PSF边缘区域的荧光分子受激辐射,然后通过滤波获得尺寸压缩的点扩散函数。STED技术与结构光照明结合,可实现约30 nm的横向分辨率;与4Pi显微技术相结合,可实现30~40 nm的轴向分辨率。图4为受激发射损耗显微镜原理示意图^[7]。

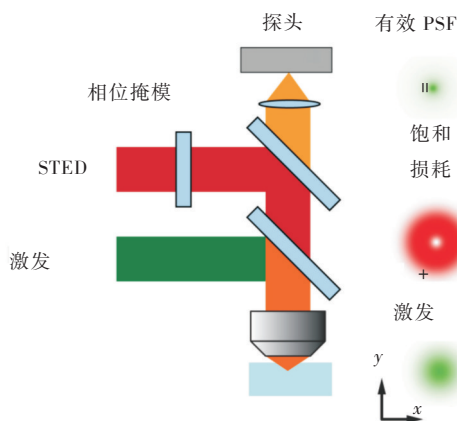


图4 受激发射损耗显微镜原理示意图

(4) STORM

STORM(stochastic optical reconstruction microscopy)是利用荧光分子个体高精度定位技术实现超分辨的。为避免邻近荧光分子图像的相互交叠,该技术采用发光可控的荧光分子标记样品。通过使不同的荧光分子在不同时间受激发光,将空间上交叠的分子图像在时间上分开,从而实现整体的高精度定位成像。华人科学家庄小威提出,应用该方法可得到20 nm的横向分辨率^[14]。图5为STORM成像过程示意图^[14]。

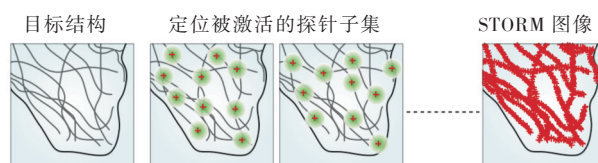


图5 STORM成像过程示意图

1.3 小结

综合上述内容可见,除了NSOM和CSFM外,其他超分辨技术都没有直接通过改良光学系统本身以获得直径小于衍射极限的光斑。SIM是通过结构光进行编码和解码实现超分辨,而光学系统直接得到的图像并不是超分辨的;STED则是针对荧光标记分子的特殊性质而提出的一种光斑边缘擦出的技术,故对于一般漫反射体的成像是不适用的;STORM更是一种基于荧光效应的、非传统意义上的成像技术,极具创新性。

2 投影光刻系统的超分辨技术

光学投影光刻技术是利用光学投影成像的原理,通过投影物镜,将掩模版上的图形成像在涂硅胶片上实现图形转移。目前集成电路生产中主要采用光学投影光刻技术。随着集成电路的日益集成化和微型化,投影光刻系统提出了超分辨的要求,以实现高精度加工。

投影光刻系统的光刻分辨率和焦深计算公式如下^[15]

$$R = k_1 \lambda / (n \sin \alpha) \quad (3)$$

$$DOF = k_2 \frac{\lambda}{(n \sin \alpha)^2} \quad (4)$$

易发现其分辨率(R)和焦深(DOF)公式与衍射

极限公式形式相同,只是系数 k_1 、 k_2 不同。这里, k_1 、 k_2 为工艺因子,根据采用的技术工艺不同, k_1 、 k_2 可取不同的值。当 $k_1 < 0.61$ 时,即实现了传统意义上的超分辨。图6为焦深概念原理示意图。

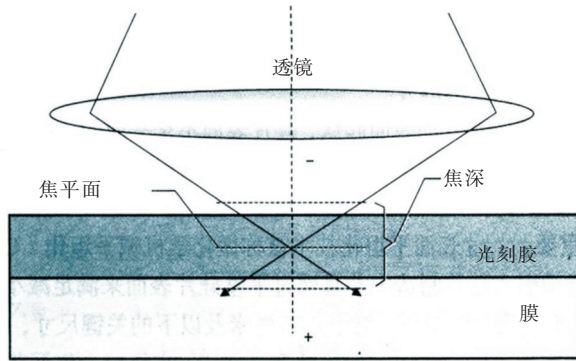


图6 焦深概念原理示意图

投影光刻系统的超分辨技术不同于显微镜的超分辨技术,它要求实现横向超分辨的同时,系统应有足够大的焦深,即纵向分辨率越“差”越好,从而可以降低涂硅胶片轴向的位置精度。

另外,投影光刻系统的超分辨技术需要实际获得直径小于衍射极限的光斑,因此上述显微镜超分辨技术中,只有近场超分辨技术和共焦扫描技术可以被应用到投影光刻系统中。除此之外,投影光刻系统也具有自己的一套分辨率增强技术,包括离轴照明技术、移相掩模、光学邻近效应校正以及光瞳滤波技术^[15]。

2.1 离轴照明技术

离轴照明技术(OAI, off-axis illumination)最早由日本学者于1991年提出^[16]。照明光线通过掩模版后发生衍射,0级衍射光是一束不包含任何空间信息的平面波^[17],只有1级以上的衍射光才携带了掩模版上的图案信息。因此,为了能够更好地在硅片上形成掩模的图像,必须有更多高级衍射光参与成像。离轴照明技术就是基于这样的思路,利用离轴照明,保证一定比例的高级衍射光成像,其原理如图7所示。

在图中传统照明与离轴照明方式下,系统的理论分辨率分别为^[18]

$$R_{\text{传统}} = \frac{\lambda}{2NA(1 + \sigma)} \quad (5)$$

$$R_{\text{离轴}} = \frac{\lambda}{2NA(1 + \sigma) + 2\theta_i} \quad (6)$$

式中, σ 为曝光系统的部分相干因子; θ_i 为离轴照明光束的入射角。应用离轴照明技术,可使图形分辨率改进20%。

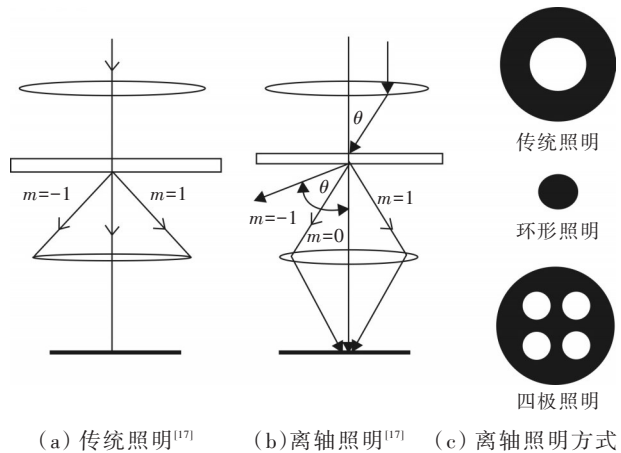


图7 离轴照明技术原理示意图

2.2 移相掩模技术

移相掩模版(PSM, phase shift mask)通过对光波相位的调制来改善成像的对比度和焦深。该技术最早于1982年由Levenson等人提出,并获得了高于传统方法的分辨率^[19]。

移相掩模有很多类型,但其原理基本相同。大多数PSM是在传统的二元铬掩模上的透光区域选择性地增加一层相移层。该层不改变透过率,而是使透过的光与无相移层区透过的光相位差180°,使一些级次的衍射波之间产生相消干涉,减弱暗区的光强度,从而提高图形对比度,改善光刻图形的分辨率。图8为常见移相掩模版及其效果示意图。

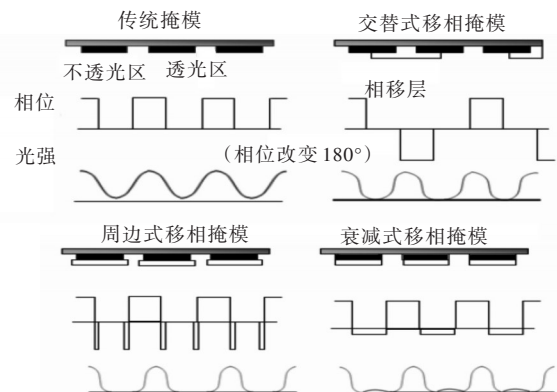


图8 常见移相掩模版及其效果示意图

衰减PSM则是将传统掩模上完全不透光部分变为微弱透光,并使相位移动 180° ,同样在边界处产生相消干涉,提高硅片上图形的分辨率。

2.3 光学邻近效应校正技术

光学邻近效应^[15](OPE, optical proximity effect)是指光刻过程中,由于掩模上相邻微细图形的衍射光相互干涉而造成像面光强分布发生改变,使曝光得到的图形偏离掩模设计所要求的尺寸和形状的现象。

光学邻近效应校正(OPC, optical proximity correction)技术,是在掩模设计时采用将图形预先畸变的方法对光学邻近效应加以校正,经过校正可在光刻后得到符合要求的图形。图9为光学邻近效应及光学邻近效应校正掩模设计图。

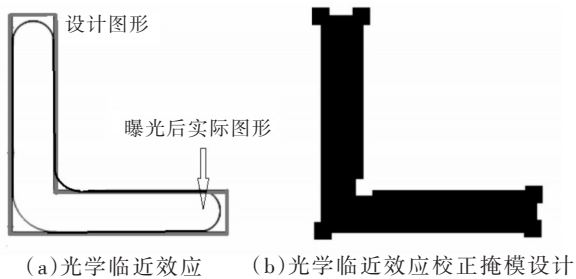


图9 光学邻近效应及光学邻近效应校正掩模设计

2.4 光瞳滤波技术与衍射超分辨元件

1952年,Toraldo首次将有限视场超衍射极限分辨率的概念引入光学成像领域^[20]。Toraldo的研究是利用放置在出瞳的衍射器件将出瞳光场调制为某种特殊的分布,则成像系统可以控制点扩散函数的零强度点位置。如果第一个零强度点使得主瓣尺寸小于衍射极限,则称其实现了光学超分辨。这种方法实质是通过改变光学系统的出瞳函数来实现超分辨的,其中引入瞳面的衍射器件称为超分辨衍射器件(DSE, diffractive super-resolution element)。

Toraldo所采用的DSE的形式是由无限窄的同心环带或有限窄的同心环带组成的光瞳滤波器。该光瞳滤波器每个圆环具有不同的位相和振幅透过率,这样在理论上就可以把衍射花样中心主斑压缩到无限小,从而提高了该光学系统的分辨率。自Toraldo之后,许多学者继续探索研究,相继提出了

多种实现光瞳滤波器和超分辨的方法^[21-23]。图10为DSE调制出瞳函数实现光学超分辨。

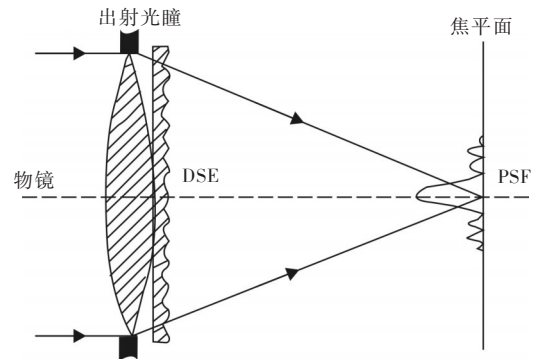


图10 DSE调制出瞳函数实现光学超分辨

这种方法也多用于光盘存储,并被称为变迹术^[24]。Vidal F Canales等人^[25]应用这种瞳函数调制的技术思路,提出将其与自适应技术相结合,应用于空间望远镜系统中。

3 结论

总的来说,所有的光学超分辨技术都是围绕着如何得到一个尺度更小的点扩散函数(PSF, point spread function),从前面介绍的几种超分辨技术也可看出这一点。

在实际应用中,各种超分辨思想和技术不是孤立存在的,为了最大程度地提高分辨率或同时获得横向和纵向的高分辨率,需要多种超分辨技术的优化组合,例如可将光瞳滤波技术应用到共焦扫描荧光显微镜中^[26],从而获得新型的复合技术,实现更高层次的超分辨。

参考文献

- [1] Park S C, Park M K, Kang M G. Super-resolution image reconstruction: a technical overview[J]. Signal Processing Magazine, IEEE, 2003, 20(3): 21-36.
- [2] Zalevsky Z, Mendlovic D. Optical superresolution[M]. Springer, 2004.
- [3] Rayleigh L. On the manufacture and theory of diffraction-gratings[J]. Philos Mag, 1874, 47: 193.
- [4] 云茂金, 万勇, 孔伟金, 等. 可调谐位相型光瞳滤波器的横向光学超分辨和轴向扩展焦深[J]. 物理学报, 2008, 57(1): 194-198.

- [5] Syngé E H. A suggested method for extending microscopic resolution into the ultra-microscopic region[J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1928, 6(35): 356-362.
- [6] 毛峥乐, 王琛, 程亚. 超分辨远场生物荧光成像—突破光学衍射极限[J]. 中国激光, 2008, 35(9): 1283.
- [7] Huang B, Bates M, Zhuang X. Super resolution fluorescence microscopy[J]. Annual Review of Biochemistry, 2009, 78: 993.
- [8] Heintzmann R, Gustafsson M G L. Subdiffraction resolution in continuous samples[J]. Nature Photonics, 2009, 3(7): 362-364.
- [9] Minsky M. Microscopy Apparatus[P]. US Patent, 3013467, 1961.
- [10] 唐志列, 梁瑞生, 常鸿森. 双光子和多光子共焦显微镜的成像理论[J]. 物理学报, 2000, 49(6): 1076-1080.
- [11] 许险峰, 徐锡金, 霍霞. 共聚焦激光扫描显微镜技术[J]. 激光生物学报, 2003, 12(2): 156-159.
- [12] Gustafsson M G L. Nonlinear structured-illumination microscopy: wide-field fluorescence imaging with theoretically unlimited resolution[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2005, 102(37): 13081-13086.
- [13] Hell S W, Wichmann J. Breaking the diffraction resolution limit by stimulated emission: stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy[J]. Optics Letters, 1994, 19(11): 780-782.
- [14] Zhuang X. Nano-imaging with STORM[J]. Nature Photonics, 2009, 3(7): 365.
- [15] 姚汉民, 胡松, 邢廷文. 光学投影曝光微纳加工技术[M]. 北京工业大学出版社, 2006.
- [16] Wiley J N, Fu T Y, Tanaka T, et al. Phase-shift mask pattern accuracy requirements and inspection technology[C]// International Society for Optics and Photonics, 1991: 346-355.
- [17] 郭立萍, 黄惠杰, 王向朝. 光学光刻中的离轴照明技术[J]. 激光杂志, 2005, 26(1): 23-25.
- [18] Luehrmann P F, Van Oorschot P, Jasper H, et al. 0.35 μm lithography using off-axis illumination[C]//Proceedings-SPIE the International Society for Optical Engineering, SPIE International Society for Optical, 1993: 103-103.
- [19] Levenson M D, Viswanathan N S, Simpson R A. Improving resolution in photolithography with a phase-shifting mask[J]. Electron Devices, IEEE Transactions on, 1982, 29(12): 1828-1836.
- [20] Di Francia G T. Super-gain antennas and optical resolving power[J]. Nuovo Cimento (1943-1954), 1952, 9: 426-438.
- [21] Davis J A, Guertin J, Cottrell D M. Diffraction-free beams generated with programmable spatial light modulators[J]. Applied Optics, 1993, 32(31): 6368-6370.
- [22] 王海凤, 干福熹, 陈仲裕. 一种新型衍射超分辨光学器件[J]. 光学学报, 2001, 21(5): 593-596.
- [23] Katz B, Rosen J. Super-resolution in incoherent optical imaging using synthetic aperture with Fresnel elements[J]. Opt Express, 2010, 18(2): 962-972.
- [24] 周辉, 赵晓枫, 阮昊. 光学超分辨技术在高密度光存储中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(2): 54.
- [25] Canales V F, de Juana D M, Cagigal M P. Superresolution in compensated telescopes[J]. Optics Letters, 2004, 29(9): 935-937.
- [26] Neil M A A, Juškaitis R, Wilson T, et al. Optimized pupil-plane filters for confocal microscope point-spread function engineering[J]. Optics Letters, 2000, 25(4): 245-247.

《光电技术应用》期刊收录情况介绍

《光电技术应用》期刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊、《中文科技期刊数据库》收录期刊、《中国期刊全文数据库》全文收录期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊、美国《乌利希期刊指南》收录期刊。期刊的影响因子连续几年上升,2015年入选《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊。

已与万方数据库签订合同,可以同步查询论文内容,更新及时。