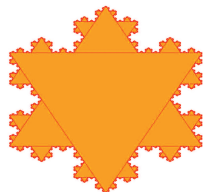


文章编号: 1005-4642(2023)09-0016-06

拓
展
与
创
新



聚焦激光束: 从科研到教学的应用

吕俊鹏¹, 高磊¹, 刘琳¹, 章琦¹, 刘宏微²

(1. 东南大学物理学院, 江苏南京 211189;

2. 南京师范大学物理与技术学院, 江苏南京 210023)

摘要: 列举了聚焦激光束在光镊、显微激光改性和显微测量等科研领域中的典型应用实例, 设计了荧光检测以及激光微纳加工系统一体化的教学实验. 通过显微光谱检测系统获得了红宝石的光致发光信号, 并分析了光谱的产生机理. 教师通过指导学生搭建聚焦激光光路, 实现微纳加工和热光学性质测试, 强化了学生在激光应用技术方面的知识与技能.

关键词: 聚焦激光束; 微纳操控; 微纳加工; 光致发光

中图分类号: TN247

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2023.09.003

随着激光技术的快速发展, 聚焦激光束在工业、军事、生活中的应用越来越广泛. 聚焦激光束具有高空间分辨率、强能量密度等特点, 已成为微纳科研领域中的重要技术手段. 本文简述了聚焦激光束的原理, 列举了聚焦激光束的科研应用, 设计了基于前沿聚焦激光技术转化的教学实验, 着重强化学生的光学理论与技术基础, 培养学生的激光应用技能, 掌握基础微纳加工/光刻原型设备的搭建技能, 拓展聚焦激光技术的应用.

1 聚焦激光束的原理

激光, 即受激辐射光放大, 其工作原理为: 原子中的电子吸收能量从低能级跃迁到高能级, 激发态电子经外场光子诱导, 从高能级再跃迁回低能级, 产生与诱导光子能量、偏振、运动方向等特征高度一致的辐射光子形成受激辐射, 并在精确设计的光学谐振腔中产生光子增益, 最终形成稳定的光子输出模式, 例如 TEM_{00} 模. 根据光子发射的时域分布, 激光通常分为连续波激光和脉冲激光, 通过锁模技术, 脉冲激光的脉宽可以达到 fs 量级. 在具体实践应用中, 为了提高激光的空间分辨率与能量密度, 通常需要使用光学透镜组对激光进行聚焦, 以形成聚焦激光束. 聚焦激光束的聚焦尺寸 (d) 正比于激光波长 (λ), 反比于透镜组的数值孔径 ($R_{N.A.}$), 受限于光学衍射极限, 一

般用 $d \sim 1.22\lambda/R_{N.A.}$ 估算聚焦尺寸.

2 聚焦激光束的科研应用举例

2.1 光镊

现代物理学已经证明光子具有动量, 因此当高度聚焦的激光光束作用于粒子时, 光子通过散射过程的动量交换与粒子相互作用, 从而产生光辐射力. 光辐射力可分为梯度力和散射力, 梯度力的方向始终为电场强度梯度的方向, 而散射力的方向则为光束传输的方向. 梯度力和散射力共同作用于粒子, 最终两者的合力决定粒子在光场中的运动情况. 为了实现在三维尺度上稳定地捕获和操纵粒子, 梯度力的轴向分量需克服散射力, 因此用作光源的聚焦激光光束在轴向上须具备足够大的梯度光强分布. 通常使用高数值孔径的物镜聚焦激光光束, 平衡轴向上的梯度力与散射力, 形成三维光学势阱, 从而把粒子稳定地捕获在光束的焦点附近, 并且捕获的粒子可随光束焦点的移动而移动.

1986 年, Ashkin 等人使用经过强聚焦的单束激光作为捕获粒子的光源, 将生物细胞稳定地捕获于三维光学势阱内^[1]. 由于单光束操控微纳粒子的过程与用镊子夹住物体的过程类似, 所以利用光束捕获和操纵粒子的技术也称为光镊技术. 由于该技术中光辐射力微弱 (pN 量级), 因而

收稿日期: 2022-11-11; **修改日期:** 2023-04-07

作者简介: 吕俊鹏 (1986—), 男, 山东莱阳人, 东南大学物理学院教授, 博士, 研究方向为物理光电子学. E-mail: phyljp@seu.edu.cn

光镊能够实现无接触以及无机械性损伤地捕获和操控 μm 量级的粒子. 这一优点使得光镊技术成为物理学、化学、生物学等研究的重要工具^[2-3], Ashkin 也因此获得 2018 年诺贝尔物理学奖.

典型的光镊装置如图 1 所示, 通常包含激光光源、光学显微镜、光镊移动控制模块、位移检测传感模块、CCD 相机与电脑. 图 1 所示装置使用红外/氦氖激光光源并配合使用高数值孔径物镜将激光束聚焦到光学衍射极限来实现光镊^[4]. 通过操控物镜, 可以在获得聚焦捕获光的同时对被捕获的物体进行成像. 目标物体通常置于小型微流体腔中, 并将其固定在电动或压电驱动的平移台上以实现三维方向上可控的 μm 精度运动^[5]. 通常情况下, 光镊只需要很小的光功率 (低至几 mW) 即可对 μm 甚至 nm 尺度的目标对象进行捕获. 捕获的实现主要依赖于聚焦激光束产生的光子力. 以微纳颗粒为例, 其光学响应通常用偶极子模型描述, 其与光场相互作用的强度由偶极极化率决定. 对于半径为 r 和相对介电常量为 ϵ 的球体, 其偶极极化率为^[6]

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 - \frac{ik^3\alpha_0}{6\pi\epsilon_0}}, \quad (1)$$

其中, α_0 为理想情况下忽略偶极作用的极化率, 由 Clausius-Mossotti 关系式, $\alpha_0 = 4\pi\epsilon_0 r^3 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}$; k 为场波矢, ϵ_0 为真空介电常量; 分母为考虑偶极与散射场相互作用而产生的修正项. 作用于偶极子的光子力可表示为^[6]

$$\langle F \rangle = \frac{1}{2} \text{Re} \left(\sum_{j=x,y,z} \alpha E_j \nabla E_j^* \right), \quad (2)$$

其中, E_j 为电场分量. 式(2)也可表示为

$$\langle F \rangle = \frac{1}{4} \text{Re} (\alpha) \nabla |\mathbf{E}|^2 + \frac{\sigma}{2c} \text{Re} (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) + \frac{\sigma c \epsilon_0}{4\omega i} \nabla \times \mathbf{E} \times \mathbf{E}^*, \quad (3)$$

其中, \mathbf{E} 为电场强度, \mathbf{H} 为磁场强度, σ 为消光截面, c 为真空中的光速, ω 为光场的角频率. 式(3)中的第 1 项表示由电场强度的梯度引起的力, 主导光镊中的三维约束; 第 2 项为辐射压力对应于传播方向上的力; 第 3 项是由空间极化梯度的存在产生的力, 如图 2 所示. Bustamante 等人已证明, 该光学作用力在 pN 量级^[7]. 对于待操控的目标对象来说, 激光束会聚形成的强聚焦光斑会形

成三维光学势阱, 微粒将被束缚在其中. 一旦微粒偏离势阱中的能量最低点, 就会受到指向稳定点的恢复力作用而无法摆脱束缚. 移动聚焦光斑, 目标对象也会随之移动, 因此实现了对微粒的捕获和操控.

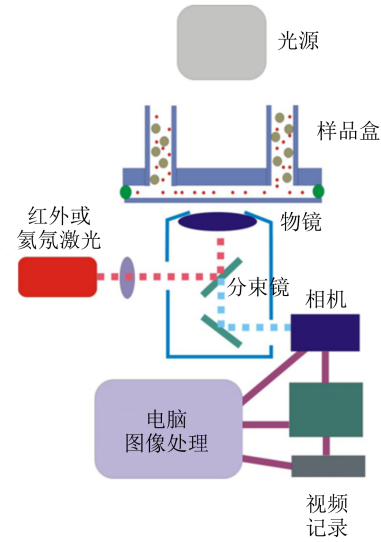


图 1 光镊装置示意图

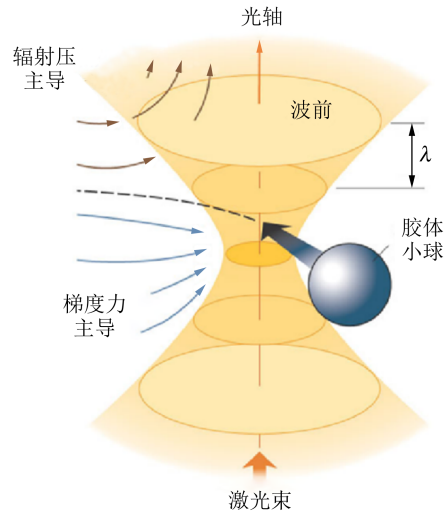


图 2 聚焦激光束光场强度和辐射压力空间梯度示意图

2.2 显微激光改性

基于光与物质的相互作用, 聚焦激光束可以用来修饰甚至改变材料的性质. 显微激光改性通常利用显微镜聚焦高功率激光束 (mW 量级) 对样品进行辐照, 在激光束与样品相互作用过程中, 通过局域热效应、局域化学反应等方式改变样品的物理性质、化学组分、应力状态等, 实现调控样品的性能. 结合空间定位系统、显微镜 μm 级的空

间分辨率、激光工作模式的选择(连续波激光、脉冲激光等)、激光参量的调节(波长、功率、偏振、脉宽、脉冲频率等),对样品进行可控的高精度图案化改性. 由于材料对激光束具有反射和吸收效应,激光改性通常发生在材料的表面区域,这使得显微激光改性技术适用于低维材料本征性质改性的研究,例如以石墨烯为代表的具有原子级厚度的二维材料体系^[8].

图 3 为改性光路示意图,通过物镜将高密度能量的聚焦激光束入射到微纳材料表面,结合电动位移台、CCD 成像设备以及特定的扫描移动程序,实现对目标材料精准的实时监控、加工和改性. 例如,激光微纳加工可集中应用于超材料的表面结构图案化,得到交叉等离子体共振结构,与偏振开关共同作用实现彩色相位调制的全息图像^[9]. 通过控制聚焦激光的能量、扫描时间等参量,聚焦激光束可用于微纳改性^[10],在不同化学环境中利用聚焦激光束扫描材料,可以对材料中缺陷的状态实现精准调控,进而控制材料的发光性能,实现信息数据在材料媒介中的直写式写入、加密以及可视化读取. 图 4 所示为利用二维材料单层 WS_2 实现上述功能^[11-12],其中,(a)为激光直写前单层 WS_2 的光学图像,(b)为写入信息后单层 WS_2 的荧光图像,(c)为激光直写后单层 WS_2 的光学图像,(d)为写入信息后激光读取单层 WS_2 的加密信息.

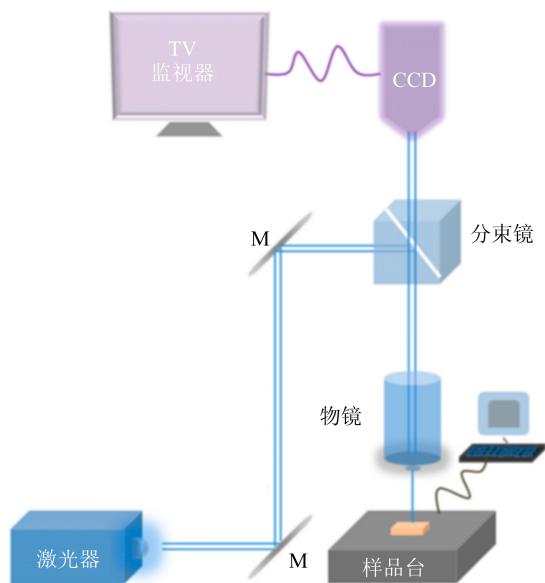


图 3 改性光路示意图^[10]

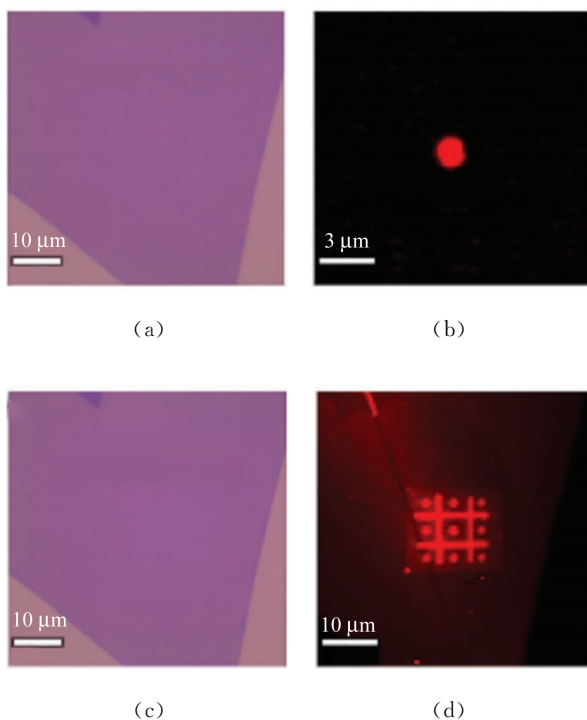


图 4 激光直写式信息加密存储^[12]

2.3 显微测量

显微光谱测量系统是能够同时实现 μm 级物体观测和光谱信息采集的仪器. 显微光谱测量系统一般可分为 3 个模块:照明与成像模块、激光激发模块以及光谱接收分析模块. 可见,显微光谱测量系统可以兼容显微激光改性. 不同于显微激光改性,显微光谱测量系统不仅保持了显微镜对微小区域实时成像的特点,更具备采集该区域物体从紫外到红外光波段内光谱信息的能力,可普遍应用于微纳光学、材料学、生物技术等领域. 通常来讲,显微测量系统能够用来实现反射、透射、荧光、拉曼、荧光寿命等多种光谱的测量.

在光镊被发明之后,以聚焦激光束为核心,衍生出了各种高分辨率测量技术,推动了物理、材料、生物等学科快速发展. 例如,基于光镊捕获物体的特点,开发出扫描探针技术——光子力显微镜^[8],可以测量 fN 量级的极小力,突破了光学衍射极限对样品表面特征进行成像,且兼具高速 (10^4 kHz 量级的采样率)的三维成像特点,从而提升微纳操控的精度^[13],通过高位置敏感性和低弹簧常量的结合使该技术的分辨率远远超过其他扫描探针技术^[14].

聚焦激光束同时可用来探知物质的组分、结构及相对含量. 例如,显微共聚焦激光拉曼光谱

仪中通常使用 TEM_{00} 连续波激光作为激发源,入射激光和材料分子或晶格产生相互作用而损失(或获得)部分能量,致使散射光的频率发生变化,通过光栅对散射光的分光作用以及监测散射光特征峰强度的变化,以此来分析物质组分、结构等性质。同时,显微共聚焦技术可以缩小激光光斑的尺寸($1\sim 2\ \mu\text{m}$),显著提高测量拉曼信号的空间分辨率。目前,拉曼光谱已成为现代材料结构分析的重要技术手段。

3 基于聚焦激光束技术的教学拓展

基于光与物质的相互作用过程及荧光材料在生产生活中的广阔应用前景,以激光微纳加工及

荧光检测一体化系统的光路搭建为技能培训基础,光路设计如图 5 所示(为了避免仪器被损坏,在光谱仪前增加了带通滤波片,以减少反射激光的辐照)。通过搭建 $4f$ 系统,将光源出射的发散白光变为准直平行光束。利用光阑控制进光量,调节操控区域的照明亮度;利用反射镜可分别调节白光光路和激光光路的准直性并对二者在传播方向上进行耦合;利用半透半反棱镜将激光和白光同时引入系统,实现微纳操控和监测加工过程。同时,光学摄像机辅助采集样品形貌信息,引入光谱仪接收材料的光致发光信号。其中,聚焦激光光斑和所探照区域视野的大小可通过选择不同数值孔径的物镜来实现。

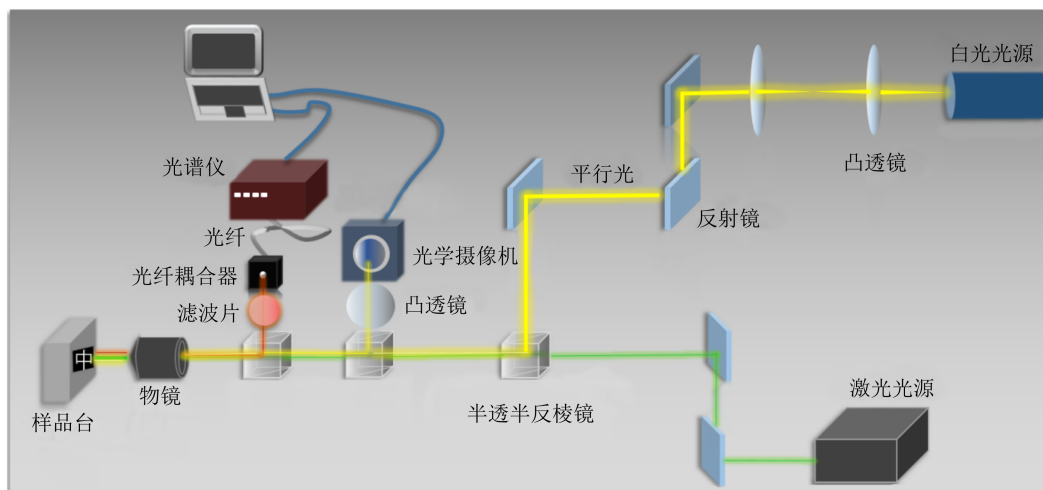


图 5 荧光检测以及激光微纳加工系统一体化教学实验的光路图

学生按照图 5 搭建光路,光路系统的调试按照等高同轴的原则。增大激光功率后可以实现材料的改性加工。

使用 CCD 相机拍摄的典型微纳加工结果如图 6 所示。

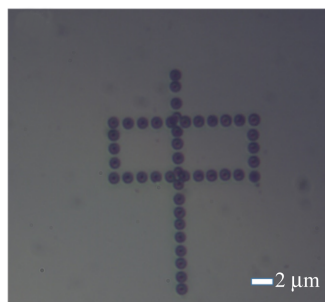


图 6 CCD 相机拍摄的典型微纳加工结果

光谱仪的引入,可以拓展聚焦激光系统的光谱学应用性。在显微光谱应用中,聚焦激光束通常作为激发源。利用聚焦的激发光,可以探测物体或材料光致发光的过程。例如在半导体中,光致发光过程是指材料在光子的激发下,电子从价带跃迁至导带并在价带产生空穴,电子和空穴在各自的导带和价带中通过弛豫达到各自未被占据的最低激发态,形成准平衡态,准平衡态下的电子和空穴再通过复合发光。

课程以使用搭建的显微光谱检测系统获得红宝石的光致发光信号为实验内容,并对所获得的光谱进行机理分析。红宝石的主要成分为 Al_2O_3 , 掺有少量的 Cr。Cr 的外层电子排布为 $3d^5 4s^1$, Cr 掺入 Al_2O_3 晶格,失去外层 3 个电子后变成 Cr^{3+} 。当红宝石受到外界光源刺激, Cr^{3+} $3d$ 轨道上的 3

个电子发生能级跃迁^[15].

图 7(a) 所示为学生测量的聚焦激光束信号 (532.5 nm) 和红宝石光致发光 (694.7 nm) 信号, 其中图 7(b) 为红宝石光致发光信号的局部放大. 可以看到, 借助光谱仪可以探测可见光波段内任意波长处的光强信息.

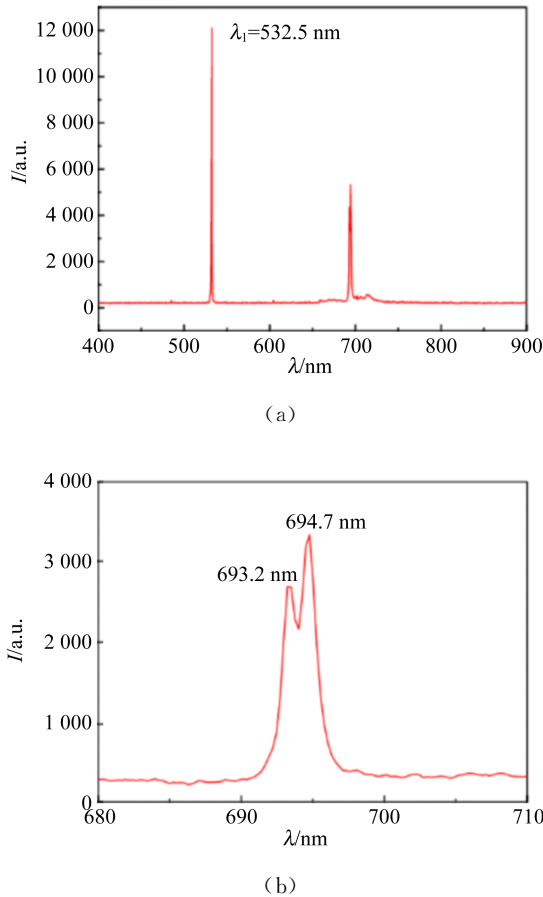


图 7 红宝石的光致发光光谱

结合图 8 中 Cr^{3+} 与激光作用的能级结构图, 4A_2 是基态, 2E 是亚稳态, 4F_1 和 4F_2 是 2 个吸收带. 红宝石被 532.5 nm 的聚焦激光激发后, 电子从 4A_2 跃迁至 3E , 再通过无辐射弛豫过程至亚稳态 2E . 电子在从亚稳态 2E 返回跃迁至基态的过程中, 产生 2 条强荧光 R_1 ($\lambda=694.7$ nm) 和 R_2 ($\lambda=693.2$ nm), 通过光谱仪收集信号, 得到红宝石的光致发光光谱图. 值得注意的是, 虽然区别于半导体中光致发光来自于电子空穴对的复合, 红宝石的光致发光来自于离子的受激-退激过程, 但二者的发光机制本质上都是电子从高能级向低能级产生的跃迁辐射.

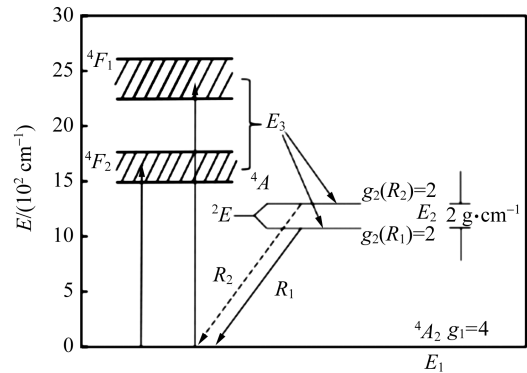


图 8 红宝石晶体中 Cr^{3+} 能级及跃迁过程

4 结束语

将聚焦激光束的前沿科研技术转化为面向本科生的实验技能培训, 有效提炼前沿科研成果中的创新思想融入到教学的各个阶段, 以拓宽学生的科研视野 (例如光镊与光致发光的物理原理为学生展示了丰富的光与物质的相互作用过程). 同时, 从前沿科研成果入手提高学生的科研格局和创新意识, 突出在实验过程中培养学生的动手能力 (例如荧光光谱检测及激光微纳加工系统的设计搭建与按需改造), 鼓励学生在实验及数据分析过程中对问题进行针对性的思辨, 对聚焦激光束的应用场景拓展进行思考. 教学实践表明: 在系统完成课程后, 学生的自主创新能力得到提升.

参考文献:

- [1] Ashkin A, Dziedzic J M, Bjorkholm J E, et al. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles [J]. Optics Letters, 1986, 11(5):288-290.
- [2] Zhang X H, Halvorsen K, Zhang C H, et al. Mechanoenzymatic cleavage of the ultralarge vascular protein von Willebrand factor [J]. Science, 2009, 324:1330-1334.
- [3] Draine B T. The discrete-dipole approximation and its application to interstellar graphite grains [J]. Astrophysical Journal, 1988, 333(2):848-872.
- [4] Neuman K C, Block S M. Optical trapping [J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75:2787-2809.
- [5] Lee W M, Reece P J, Marchington R F, et al. Construction and calibration of an optical trap on a fluorescence optical microscope [J]. Nature Proto-

- cols, 2007,2:3226-3238.
- [6] Maragò O M, Jones P H, Gucciardi P G, et al. Optical trapping and manipulation of nanostructures [J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8 (11): 807-819.
- [7] Bustamante C, Bryant Z, Smith S B. Ten years of tension: Single-molecule DNA mechanics [J]. *Nature*, 2003,421:423-427.
- [8] You R, Liu Y Q, Hao Y L, et al. Laser fabrication of graphene-based flexible electronics [J]. *Advanced Materials*, 2020,32(15):1901981.
- [9] Zhang Y N, Shi L, Hu D J, et al. Full-visible multifunctional aluminium metasurfaces by in situ anisotropic thermoplasmonic laser printing [J]. *Nanoscale Horizons*, 2019,4:601-609.
- [10] Lu J P, Lu J H, Liu H W, et al. Improved photoelectrical properties of MoS₂ films after laser micromachining [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(6): 6334-6343.
- [11] Venkatakrishnan A, Chua H, Tan P X, et al. Microsteganography on WS₂ monolayers tailored by direct laser painting [J]. *ACS Nano*, 2017,11(1): 713-720.
- [12] Zhao W W, Cai S, Wei X, et al. The thinnest light disk: Rewritable data storage and encryption on WS₂ monolayers [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021,31:2103140.
- [13] Rohrbach A, Tischer C, Neumayer D, et al. Trapping and tracking a local probe with a photonic force microscope [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004,75:2197-2210.
- [14] Neuman K C, Nagy A. Single-molecule force spectroscopy: Optical tweezers, magnetic tweezers and atomic force microscopy [J]. *Nature Methods*, 2008,5(6):491-505.
- [15] 梅曼 T H. 红宝石中的受激光辐射[J]. 龚旗煌,译;邹英华,评. *华北京大学学报(自然科学版)*, 2002,38(S1):63-65.

Focused laser beams: Applications from research to teaching

LYU Junpeng¹, GAO Lei¹, LIU Lin¹, ZHANG Qi¹, LIU Hongwei²

(1. School of Physics, Southeast University, Nanjing 211189, China;

2. School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Typical application examples of focused laser beam in optical tweezers, microscopic laser modification and microscopic measurement were listed, and the teaching experiment integrated fluorescence detection and laser micro-nano processing system was designed. The photoluminescence signal of rubies was detected by microspectral system, and the mechanism of spectral generation was analyzed. Students' knowledge and skills in laser application technology could be strengthened when the teacher guided students to build focused laser optical paths and realize micro-nano processing and thermo-optical property testing.

Key words: focused laser beam; micro-nano manipulation; micro-nano manufacture; photoluminescence

[编辑:任德香]