

基于表面等离子体激发的光学操控技术

张兵心 陈淑芬 付 雷 邹正峰 孟彦彬

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 基于表面等离子体激发的光学操控技术由于其所需激光能量低、装置简单,近来引起了广泛关注。采用 Kretschmann 棱镜耦合法对金膜表面等离子体场进行激发,实现了对直径为 $10.8 \mu\text{m}$ 的聚苯乙烯粒子的有效操控。通过引入一微孔阵列对入射激光光斑图样进行调制,实现了聚苯乙烯微粒在金膜表面的阵列式分布。实验中使用的光源为输出功率 20 mW 的氦氖激光器,所需要的能量密度仅为传统激光光镊能量密度的几十分之一。由于该装置成本低、操控灵活且较低的激光能量密度可以防止对活体细胞的破坏,因此,可在医疗领域中的活体细胞及 DNA 操控等方面得到应用。

关键词 表面光学;光学操控;表面等离子体激发;棱镜耦合

中图分类号 E933.43 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0610001

Dynamic Patterning of Microparticles via Surface Plasmon Excitation

Zhang Bingxin Chen Shufen Fu Lei Zou Zhengfeng Meng Yanbin

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract Optical manipulation based on surface plasmon excitation has recently attracted significant interest for its low energy consumption and simple installation. Surface plasmon field is excited with Kretschmann prism coupling scheme and effective trapping of $10.8 \mu\text{m}$ diameter polystyrene beads is realized. By modulating the incident laser pattern with a micro-aperture array, microparticles are massively dynamic patterned on a homogeneous gold thin film. A 20 mW He-Ne laser is used in the experiment as the light source. The applied power intensity is tens of times weaker than that of laser tweezers. Owing to its advantages such as low cost, flexible manipulation ability and low power consumption, the trapping method can be used to the manipulation of living cells and DNAs in medical treatments.

Key words optics at surfaces; optical manipulation; surface plasmon excitation; prism coupling

OCIS codes 240.6680; 250.5403; 310.6628; 240.6690

1 引 言

表面等离子体场(SPF)是由外加电磁辐射与金属薄膜表面自由振动的电子相互作用而激发的。该场沿金属表面传播,在金属表面处场强最大,在垂直金属表面方向迅速衰减^[1,2]。随着近年来微纳加工技术的进步,表面等离子体光学在太阳能电池^[3~5]、表面增强光谱^[6]、传感器^[7~10]和高分辨率成像^[11]等领域得到了广泛应用。除此之外,由于 SPF 在金属表面的高度局域特性和增强特性,对于金属表面微小粒子的操控有着重要意义。Volpe 等^[12]用光子力显微镜对比测量了当 SPF 被激发和未被激发的情况下,施加在金膜表面上一电介质微粒的光子力

的大小。结果表明,在 SPF 被激发的情况下,被测电介质微粒上所施加的光子力是不存在 SPF 的情况下的 40 倍。Righini 等^[13]设计了一种基于表面等离子体激发的光学操控装置,在棱镜表面用电子束曝光的方法加工出直径为 $4.8 \mu\text{m}$,厚为 40 nm 的金质圆盘阵列,通过棱镜耦合激发 SPF,棱镜表面溶液中的电介质微粒纷纷被捕获在镀有金属圆盘的位置上。该实验装置用低于普通激光光镊一个数量级的能量,有效捕获了聚苯乙烯微粒。然而,它的缺点是一旦在棱镜表面加工好金属圆盘阵列,其相对位置便无法再改变,被操控的粒子只能被控制在棱镜表面镀有金属圆盘的位置上。Grigorenko 等^[14]的

收稿日期: 2012-02-13; **收到修改稿日期**: 2012-03-06

作者简介: 张兵心(1983—),男,博士研究生,主要从事表面等离子体光子学和光纤传感等方面的研究。

E-mail: zhangbingxin@gmail.com

导师简介: 陈淑芬(1955—),女,教授,博士生导师,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: chensf55@sina.com

工作则用到了更为复杂的纳米加工工艺。

本文通过引入一微孔阵列对入射激光光斑进行调制,实现了在均质金膜上将聚苯乙烯微粒按阵列分布。该实验中使用的是厚度 40 nm 的均质金膜,不需要复杂的刻蚀工艺,被操控微粒所排列成的图样完全取决于入射激光光斑被调制的图样,通过对入射激光光斑的调制便可实现被操控微粒的任意图样分布。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,系统的光路部分由激光器,电机驱动的反射镜和微孔阵列组成。为了激发 SPF,入射光需以 TM 偏振入射,如图 1 所示,即入射光磁场分量振动方向应平行于金膜表面。因此,实验中选用了输出为 TEM_{00} 模式线偏振光的氦氖激光器,该激光器波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$,功率 $P = 20 \text{ mW}$ (Edmund He-Ne laser, NT62-730)。入射光的偏振方向可沿轴向旋转激光器调节,在光路中配合检偏器检验便可获得实验所需的相应偏振态。入射光经反射镜反射后,透过微孔阵列入射至棱镜-金膜耦合系统。实验中使用的金膜厚度 $h = 40 \text{ nm}$,镀在折射率 $n = 1.73$ 的玻璃基底上,所用等边直角棱镜的折射率同为 1.73,金膜置于棱镜上表面通过折射率匹配油(Cargille Labs, L-RIM-678)与棱镜耦合。金膜表面由厚度为 1 mm 的聚二甲基硅氧烷(PDMS)垫片构成溶液腔。将聚苯乙烯稀释溶液加入溶液腔内,使用透明盖玻片覆盖 PDMS 溶液腔以防止溶液挥发,其中,聚苯乙烯微粒的直径为 $10.8 \mu\text{m}$ 。实验过程及结果通过光学显微镜观测,并由与显微镜相连接的电荷耦合器件(CCD)相机记录。

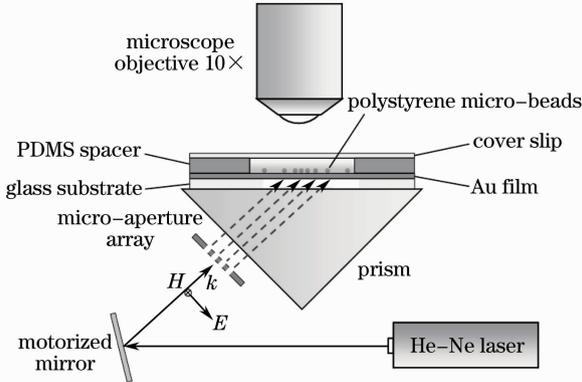


图 1 基于表面等离子体激发的光学操控实验装置图
Fig. 1 Experimental setup for optical manipulation based on surface plasmon excitation

3 实验结果与分析

3.1 表面等离子共振测量

表面等离子体波一般不可直接由表面入射光激发,因为表面等离子体波的波矢 $k_{sp} > k_0$,这里 k_0 为光在金膜表面电介质层(如空气,水溶液等)中的波矢^[1]。所以,激发 SPF 需要采用一定的波矢匹配方法,本文采用的是普遍采用的 Kretschmann 式棱镜耦合法,入射光经棱镜入射至金膜,金膜表面方向的人射波矢 k_x 可以写作

$$k_x = k_0 \sqrt{\epsilon} \sin \theta, \quad (1)$$

这里的 ϵ 为玻璃棱镜的相对介电常数, θ 为入射角。当以合适角度 θ 入射时,使

$$k_x = k_0 \sqrt{\epsilon} \sin \theta = k_{sp}, \quad (2)$$

便可以达到波矢匹配,激发 SPF。

实验中选用的棱镜为折射率 $n = 1.73$ 的高折射率棱镜,由(2)式可知,相比于普通 BK7 玻璃棱镜(折射率 1.52),高折射率棱镜的好处是,在较小入射角度时便可激发表面等离子体波,方便实验测量。特别是当金膜表面覆盖聚苯乙烯溶液后,由于金膜表面物质层折射率的增加,如使用折射率较低 BK7 棱镜,激发表面等离子体波所需的人射角将增加至 75° 左右。实验测量了在金膜与空气以及金膜与聚苯乙烯溶液界面激发 SPF 的条件,入射光经衰减由反射镜反射,以 TM 偏振入棱镜,如图 1 所示,此时磁场分量振动方向与金膜表面平行。逐步调整入射光角度,经金膜反射后,用光功率计(Coherent, OP-2 VIS,灵敏度为 1 nW)探测反射光强度。当 SPF 被激发时,由于大量的入射光能量已经与金膜表面的自由电子耦合发生谐振,因此只有极少部分入射光会在棱镜界面发生反射。所以,通过测量反射光强度可知,当反射光功率最低时,入射光与金膜表面电子耦合激发了 SPF。反射光强度随入射角度

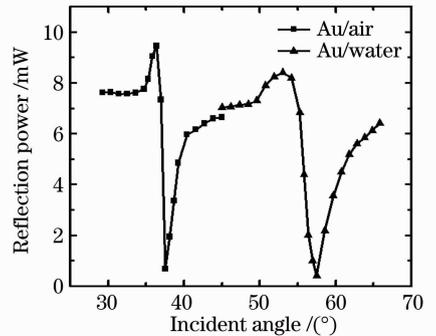


图 2 金膜反射光强随入射角度变化曲线
Fig. 2 Reflection power from Au film versus incident angles

变化的曲线如图 2 所示,实验测得 40 nm 厚的金膜在空气界面处反射光功率最低时所对应的角度为 37° 。当金膜表面覆盖聚苯乙烯水溶液后,由于金膜表面介质折射率的增加,反射光功率最低时对应角度变为 57° 。

3.2 对聚苯乙烯微粒的操控

将稀释的聚苯乙烯溶液加入溶液腔,溶液初始状态见图 3(a)所示。可见聚苯乙烯微粒均匀分布在金膜表面。调整入射光为 TE 偏振(即电场分量的振动方向平行于金膜表面),以 57° 入射角照射金膜,因只有 TM 偏振才可以激发 SPF,所以此时入射光并未与金膜发生耦合。经过 3 min 时间,溶液中聚苯乙烯微粒未见明显变化。调整入射光偏振态以 TM 偏振入射,保持 57° 入射角,此时由于入射光与金膜耦合激发 SPF,金膜表面溶液中的聚苯乙烯微粒受光子力和温度环流的影响,渐渐趋向于金膜表面的光斑位置。入射光以 TM 偏振入射 3 min 后聚苯乙烯微粒的分布如图 3(b)所示。

施加在聚苯乙烯微粒上的光子力主要由两部分组成^[15,16]: 1) 梯度力,也叫极化力,来自于外加电磁

场的电场分量与微粒自身电荷间的作用,相当于库仑力。它的方向指向外加电磁场场强最强的区域。在本实验中,梯度力的作用是将微粒拉向金膜表面场强最强的位置,对于微粒操控过程来说是一种吸引力,微粒被拉向光场的中心区域; 2) 散射力,也叫辐射力,这个力来自于外加电磁场的磁场分量与微粒本身位移电流密度之间的作用。该力的方向沿着入射光的波矢方向,在本实验对微粒捕获的过程来说,是一种排斥力,它将微粒推向远离光场中心的方向。施加在微粒上的这两个力的大小都取决于外在电磁场的场强,当 SPF 被激发后,由于其表面增强特性,其场强远大于入射光场强,施加在微粒上的这两部分力都得到了增强。但是,仅仅靠这两个力的作用,很难在均质的金膜表面将微粒限制住的^[13]。因此,另外一个力的作用不可忽视,即金膜吸收了激光能量后,由温度梯度引起的温度环流的作用。这个梯度环流会将聚苯乙烯微粒推向光场中心区域温度最高的位置^[17,18],可以克服散射力的排斥作用。以上三部分的作用,最终导致大量聚苯乙烯微粒被限制在激光光斑位置处。

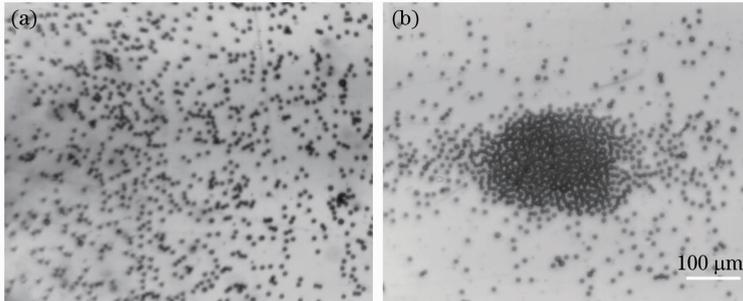


图 3 基于 SPF 的对聚苯乙烯微粒的操控。(a)激光未照射时溶液中微粒的分布;(b)激发 SPF 3 min 后微粒集中到入射激光光斑位置

Fig. 3 Manipulation of Polystyrene beads via SPF excitation. (a) Distribution of micro-beads without laser shining; (b) micro-beads gather together around the incident laser area after 3 min excitation of SPF

在观察到 SPF 对微粒的操控现象后,下一步目标是实现对微粒的实时动态操控。基本想法是将入射激光光斑进行调制,使入射光斑在金膜表面形成图样,从而在金膜表面多个位置激发 SPF 对微粒进行捕获。最为理想的调制方法是使用商用光调制器件实现调制,例如数字透镜元件(DMD),该器件由大量的微透镜阵列组成,每一个像素点相互独立,通过计算机控制,可以得到任何自定义的反射光图样。

在本实验中,使用的是一个简化的 2×3 微孔阵列代替 DMD,调整入射光偏振态为 TM 偏振,以 57° 入射角入射激发 SPF。入射光经微孔阵列在金膜上形成一个 2×3 的光斑阵列,如图 4(a)所示。

每个光斑的大小约为 0.01 mm^2 ,相应的激光能量密度约为 10^6 W/m^2 ,仅为传统激光光镊能量密度的几十分之一。图 4(b)给出了在未经激光照射时溶液中微粒的分布,聚苯乙烯微粒在各方向上均匀分布。当激光对金膜进行照射时,观察到溶液中聚苯乙烯微粒开始渐渐向各个激光光斑所在位置移动。经过 5 min 的照射,在每个激光光斑位置处均有一定数量的聚苯乙烯微粒集中,如图 4(c)所示。持续照射金膜,又经过 5 min 后,观察到每个激光光斑所在位置聚集了更多数量的聚苯乙烯微粒,如图 4(d)所示。实验有效地将聚苯乙烯微粒按阵列分布在金膜表面,如用商用 DMD 实时动态调制入射光光斑图

样,该系统可以实现对被操控物体的实时动态操控。

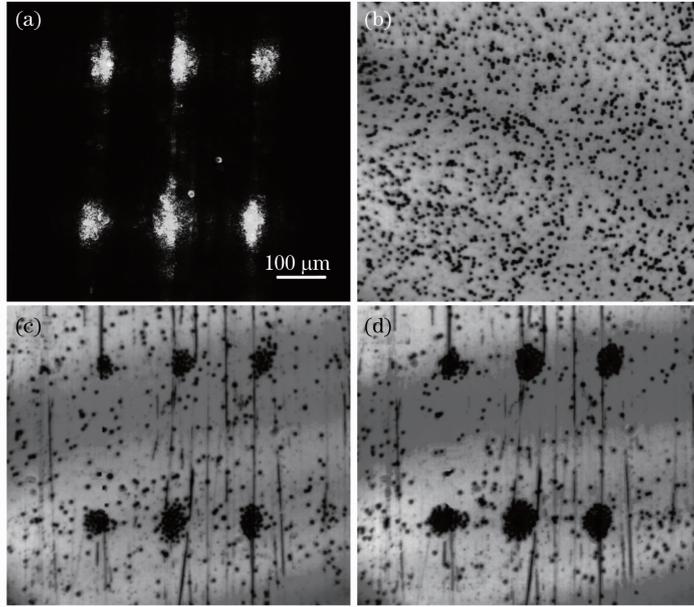


图 4 对聚苯乙烯微粒的阵列操控。(a)被调制的激光光斑;(b)激光未照射时溶液中微粒分布;
(c) 5 min 后微粒渐渐集中到各激光光斑位置;(d) 10 min 后微粒的分布图样

Fig. 4 Dynamic patterning of Polystyrene beads. (a) Modulated laser pattern; (b) distribution of micro-beads without laser shining; (c) micro-beads move towards the incident laser pattern areas after 5 min excitation of surface plasmon fields; (d) distribution pattern of micro-beads after 10 min excitation

4 结 论

提出了一种基于 SPF 激发的光学操控技术,利用在金膜表面激发的 SPF,对直径 $10.8 \mu\text{m}$ 的聚苯乙烯微粒实现了有效操控。通过使用一个 2×3 的微孔阵列对入射激光光斑进行调制,成功使聚苯乙烯微粒在金膜表面形成阵列分布。实验系统所需激光能量低,器件加工简单,如使用商用数字微透镜器件对入射光进行实时调制,便可对被操控微粒实现实时动态操控。

参 考 文 献

- 1 Stefan A. Maier. Plasmonics: Fundamentals and Applications [M]. New York: Springer, 2007. 65
- 2 William L. Barnes, Alain Dereux, Thomas W. Ebbesen. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 824~830
- 3 K. Nakayama, K. Tanabe, H. A. Atwater. Plasmonic nanoparticle enhanced light absorption in GaAs solar cells[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(12): 121904
- 4 K. R. Catchpole, A. Polman. Plasmonic solar cells[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(26): 21793~21800
- 5 J. N. Munday, H. A. Atwater. Large integrated absorption enhancement in plasmonic solar cells by combining metallic gratings and antireflection coatings [J]. *Nano Lett.*, 2011, **11**(6): 2195~2201
- 6 Qingzhen Hao, Yong Zeng, Bala Juluri *et al.*. Metallic membranes with subwavelength complementary patterns: distinct substrates for surface enhanced raman scattering[J]. *ACS Nano*,

- 2011, **5**(7): 5472~5477
- 7 Guan Chunying, Yuan Libo, Shi Jinhui. Microstructured-fiber surface plasmon resonance sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0206003
关春颖, 苑立波, 史金辉等. 微孔光纤表面等离子体共振传感特性分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0206003
- 8 Wan Yan, Liang Dakai, Zeng Jie *et al.*. Prism surface plasmon wave sensor system based on polarizing beam splitter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1354~1357
万 艳, 梁大开, 曾 捷等. 基于偏振分光棱镜的表面等离子体波传感系统[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1354~1357
- 9 Lü Qiang, Huang Dexiu, Yuan Xiuhua *et al.*. Sensitivity of surface plasmon resonance sensor for different wavelengths[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 972~976
吕 强, 黄德修, 元秀华等. 不同波长下表面等离子体共振传感器的灵敏度[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 972~976
- 10 Liu Chang, Zou Zhengfeng, Chen Shufen *et al.*. Surface plasmon resonance sensor based on compact disk grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(3): 0314001
刘 畅, 邹正峰, 陈淑芬等. 基于光盘光栅的表面等离子体共振传感器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(3): 0314001
- 11 Gan Fuxi, Wang Yang. Breaking through the optical diffraction limits, developing the nano-optics and photonics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900104
干福熹, 王 阳. 突破光学衍射极限, 发展纳米光学和光子学[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900104
- 12 G. Volpe, R. Quidant, G. Badenes *et al.*. Surface plasmon radiation forces[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**(23): 238101
- 13 M. Righini, A. Zelenina, C. Girard *et al.*. Parallel and selective trapping in a patterned plasmonic landscape[J]. *Nature Physics*, 2007, **3**(5): 477~480
- 14 A. Grigorenko, N. Roberts, M. Dickinson *et al.*. Nanometric optical tweezers based on nanostructured substrates[J]. *Nature*

Photonics, 2008, 2(6): 365~370

- 15 R. Quidant, C. Girard. Surface-plasmon-based optical manipulation[J]. *Laser & Photon. Rev.*, 2008, 2(1-2): 47~57
- 16 M. Righini, C. Girard, R. Quidant. Light-induced manipulation with surface plasmons[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2008, 10(9): 093001
- 17 Wei Yan. Surface-Plasmon-Based Manipulation of Microparticles

and Dynamic Study[D]. United States: The Pennsylvania State University, 2008

- 18 Miao Xiaoyu, Wilson Benjamin, Pun Suzie *et al.*. Optical manipulation of micron/submicron sized particles and biomolecules through plasmonics [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(18): 13517~13525

栏目编辑: 韩峰

20 W 全光纤结构掺铥皮秒脉冲光纤激光器

2.0 μm 波段掺铥光纤激光器可广泛应用于人眼安全雷达、激光传感、生物医疗以及材料加工等领域, 已逐步成为近年来国内外新型激光源研究的热点之一。目前, 2.0 μm 波段掺铥连续光纤激光器平均输出功率已达千瓦量级, 掺铥单频光纤激光器输出功率也达到了 608 W。然而, 具有峰值功率高、脉冲宽度短的 2.0 μm 波段掺铥飞秒、皮秒脉冲光纤激光器的平均输出功率还相对较低, 目前报道的最高结果也只有几瓦输出。

2012 年 4 月, 北京工业大学高功率光纤激光课题组成功实现了全光纤结构平均输出功率达 20.7 W、峰值功率达 11.2 kW 的掺铥皮秒脉冲光纤激光器。实验结构原理如图 1(a) 所示, 该掺铥皮秒脉冲光纤激光器由种子源和两级掺铥光纤放大器

组成。激光种子源的最大输出功率为 10 mW, 重复频率为 103 MHz, 脉冲宽度约为 15 ps[图 1(b)]。掺铥光纤主放大级主要包括隔离器、多模半导体激光器、(6+1) \times 1 的多模抽运合束器、掺铥双包层光纤、抽运剥离器等。其中, 20/400 μm 的大芯径双包层掺铥光纤作为激光增益介质, 中心波长为 790 nm 的多模半导体激光器作为抽运源, 6 个多模半导体激光器总的最大输出功率为 69 W。如图 1(c) 所示, 激光主放大级的输出功率与抽运功率几乎成线性增加, 在抽运功率增加到 69 W 时, 最大平均输出功率为 20.7 W, 最大脉冲峰值功率为 11.2 kW, 激光斜率效率为 42%。如图 1(d) 所示, 激光脉冲宽度 (τ_{pulse}) 为 18 ps, 激光中心波长为 1962.7 nm, 3 dB 光谱带宽约为 0.5 nm。

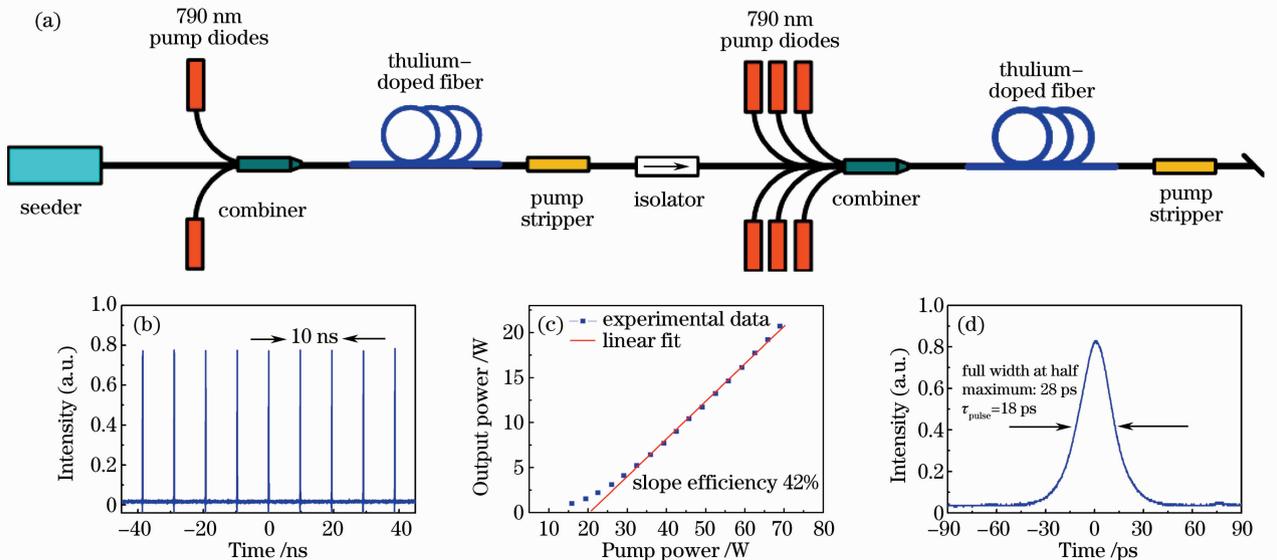


图 1 (a) 实验装置图; (b) 种子源激光脉冲串; (c) 平均输出功率; (d) 激光脉冲宽度

Fig. 1 (a) Schematic setup of the fiber laser; (b) pulse train of the seeder; (c) average output power of the fiber laser; (d) autocorrelation trace of the laser pulse

刘江 王潜 王璞*

(北京工业大学激光工程研究院 国家产学研激光技术中心, 北京 100124)

* E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn

收稿日期: 2012-04-19; 收到修改稿日期: 2012-05-04