

碳纳米管锁模双包层光纤激光器的实验研究*

王莎莎 潘玉寨[†] 高仁喜 祝秀芬 苏晓慧 曲士良

(哈尔滨工业大学威海校区, 光电科学系, 威海 264209)

(2012 年 6 月 5 日收到; 2012 年 7 月 11 日收到修改稿)

本文采用双包层掺铒光纤作为增益介质, 用单壁碳纳米管作为饱和吸收体, 获得最高输出功率为 336 mW 的锁模脉冲激光. 用飞秒激光诱导水击穿孔法直接在单模光纤上制备出 D 形区, 通过在 D 形光纤上滴涂单壁碳纳米管溶液, 成功制备出碳纳米管饱和吸收体, 并对其饱和吸收特性进行测试, 发现其调制深度为 27%. 利用该饱和吸收体作为锁模器件, 制备出具有环形腔结构的锁模光纤激光器. 当抽运功率为 4 W 时, 获得了脉宽为 93.8 fs, 中心波长为 1083.8 nm, 3 dB 谱宽为 8.6 nm, 重复频率为 5.59 MHz, 平均功率为 336 mW 的飞秒脉冲激光输出.

关键词: 双包层光纤激光器, 被动锁模, 单壁碳纳米管, D 形光纤

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Fc

DOI: 10.7498/aps.62.024209

1 引言

超短脉冲激光器被广泛应用在物质光谱分析, 材料加工, 精密仪器检测以及其他重要的科学领域^[1,2]. 锁模技术是产生超短脉冲的主要方法, 其中被动锁模主要包括利用非线性光纤环形镜、在腔内插入半导体可饱和吸收镜或非线性偏振旋转效应等效可饱和吸收体附加脉冲锁模^[3-5]. 目前, 许多商业化的被动锁模超短脉冲激光器是基于半导体饱和吸收镜 (SESAM) 的被动锁模技术. 但是 SESAM 的恢复时间较长 (约几纳秒)^[6], 光损伤阈值很低 ($48\text{--}67\text{ mJ/cm}^2$)^[7], 光谱范围窄 ($900\text{--}2300\text{ nm}$)^[8], 而且 SESAM 的制作工艺复杂, 生产成本低. 因此, 科研工作者一直在努力寻找一种新型的可饱和吸收体材料.

1991 年, Iijima 等发现了碳纳米管^[9], 碳纳米管 (CNTs) 是单层或多层石墨片卷曲而成的空心圆柱体. 在发现不久, 其优越的电子学、力学和光学特性引起了人们的强烈关注^[10,11]. 近年来, 由于碳纳米管 (SWCNTs) 独特的非线性光学特性, 它被作为饱和吸收体应用在光纤激光器中, 与 SESAM 相比,

碳纳米管饱和吸收体具有超快的恢复时间 ($< 800\text{ fs}$)^[12], 更宽的光谱带宽 ($300\text{--}2300\text{ nm}$)^[13], 更高的损伤阈值和较低的生产成本等优点, 使得超短脉冲激光器的研究取得了很大进展.

基于单壁碳纳米管饱和吸收体的锁模光纤激光器的研究十分广泛. Set 等^[14]用 SWCNTs 作为饱和吸收体, 在环形和线形掺铒 (Er) 光纤激光器中实现了锁模运转, 脉宽分别为 1.1 ps 和 318 fs, 中心波长均为 1500 nm. 2006 年, Valle 等^[15], 报道了脉宽为 1.76 ps, 输出功率为 0.1 mW, 波长为 1.535 μm 的单壁碳纳米管锁模铒共掺磷酸盐玻璃波导激光器. 2010 年, Im 等^[16]在 V 形光纤里涂上单壁碳纳米管, 利用碳纳米管与倏逝场的作用实现锁模, 获得了脉宽为 5.8 ps, 平均功率为 55.6 mW 的脉冲输出. 但是由于这些单壁碳纳米管锁模光纤激光器的增益光纤均为单包层光纤, 平均输出功率都比较的低, 所以研究人员采用双包层光纤放大器对上述锁模超短脉冲进行放大, 以获得更高的脉冲能量和平均输出功率^[17-19]. 本课题组采用双包层掺铒光纤作为增益介质, 并用飞秒激光诱导水击穿孔法, 制备出了单模 D 形光纤, 在 D 形光纤里滴涂上单壁碳纳米管溶液, 利用单壁碳纳米管溶液与倏逝场的

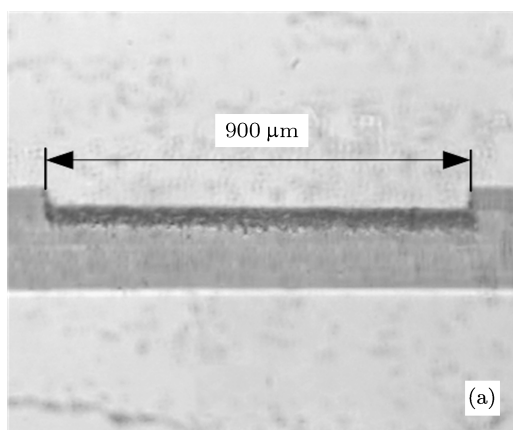
* 山东省自然科学基金 (批准号: ZR2010FQ017)、哈尔滨工业大学科研创新基金 (批准号: HIT-NSRIF. 2009146) 和哈工大科技创新团队计划项目资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: panyzh2002@163.com

作用实现锁模, 获得了飞秒脉冲激光运转, 平均输出功率达 336 mW, 单脉冲能量达 60 nJ.

2 单壁碳纳米管锁模器件的制备及表征

利用飞秒激光诱导水击穿孔法^[20]对截面长度为 0.5 m 的 Nufern 单模光纤进行表面刻蚀, 制备出单模 D 形光纤, D 形区的深度为 40 μm , 长度为 900 μm ; 将 5 ml 分散后的质量分数为 2% 的单壁碳纳米管溶液与 50 ml 的去离子水混合, 超声振荡 6 h 后, 获得所需浓度的单壁碳纳米管溶液, 在 2000 倍光学显微镜下观察发现单壁碳纳米管分散均匀性很好, 用分光光度计 (photolab6600UV-VIS) 对得到的单壁碳纳米管溶液进行吸收光谱的测量, 吸收光谱如图 1 所示. 从图上可以看出单壁碳纳米管溶液吸收光谱的范围很宽. 然后将制备的单壁碳纳米管溶液滴涂到 D 形光纤区域, 真空烘干得到了单壁碳纳米管饱和吸收体. 图 2(a) 是将 D 形光纤放在 1000 倍光学显微镜下的侧面图. 图 2(b) 是用电子扫描显微镜 (SEM) 观察到的单壁碳纳米管沉积在 D 形光纤表面的情况.



为了测量制备成的单壁碳纳米管的饱和吸收行为, 将带有单壁纳米管锁模器的单模光纤接入一个输出波长为 1064 nm 的光纤激光器输出端. 该激光器为连续工作, 利用抽运源电流控制激光器的输出功率, 分别测出接入前和接入后的不同抽运功率下的输出功率, 两组数据作相应计算, 得到锁模器的损耗率随输入功率的变化曲线, 如图 3 所示. 从图上可以看出随着输入功率的增大, 碳纳米管饱和吸收体的损耗逐渐减小, 其最大损耗率为 45.4%, 调制深度为 27%.

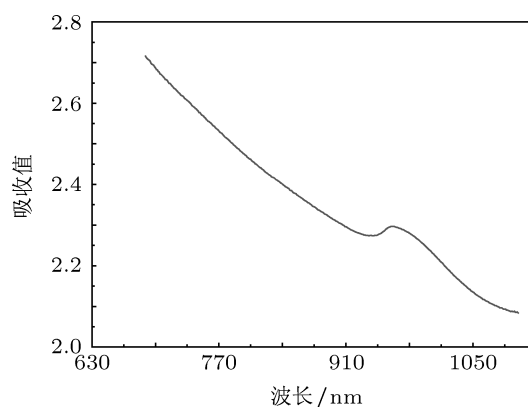


图 1 单壁碳纳米管溶液吸收谱

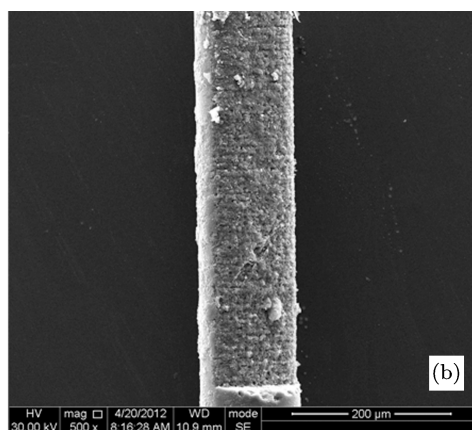


图 2 单模 D 形光纤侧面图和单壁碳纳米管饱和吸收体 SEM 图 (a) D 形光纤侧面图; (b) 单壁碳纳米管饱和吸收体 SEM 图

3 单壁碳纳米管被动锁模掺镜双包层光纤激光器

单壁碳纳米管被动锁模光纤激光器采用环形腔结构, 如图 4 所示, 光纤激光器的腔长为 36.5 m, 主要由多模抽运合束器, 长度为 10 m 的双包层掺镜增益光纤 (YDE) (主要参数: 内包层直径为 130 μm , 数值孔径 (NA) 为 0.45, 模场直径为 6.3 μm , 数

值孔径为 0.12), 长度为 20 m 的 HI1060 单模光纤 (模场直径为 6.2 μm , 与 YDE 模场匹配) 作为色散补偿, 偏振控制器 (PC), 光隔离器 (ISO), 单壁碳纳米管饱和吸收体 (SWNT-SA), 输出耦合器 (Coupler, 20/80) 构成. 抽运源采用中心波长为 915 nm 的多模光纤 LD 模块, 最大输出功率为 10 W. 激光脉冲从耦合器 (coupler) 的 20% 一端输出, 80% 另一端反馈.

单壁碳纳米管饱和吸收体与倏逝场相互作用

过程如图4右上插图所示,饱和吸收体的吸收率与腔内的光强有关,可表示为 $A = A_0/[1 + (I/I_{\text{sat}})]$,其中 A 表示饱和吸收体的吸收率, A_0 为小信号吸收率, I 表示腔内的光强, I_{sat} 表示饱和光强.基于两者这样的关系,从而当光脉冲通过单壁碳纳米管饱和吸收体时,由于光脉冲的中心部分的光强比两翼的光强高,所以光脉冲的中心部分经过单壁碳纳米管饱和吸收体时吸收率小,两翼经过单壁碳纳米管饱和吸收体时吸收率大,经过光脉冲在环形腔内的无数次循环,从而使光脉冲的前后沿的光强越来越弱,但一般光脉冲的前沿比后沿吸收的多,因为一般锁模脉冲的持续时间比单壁碳纳米管饱和吸收体的弛豫时间短,中心部分的光会越来越强,从而光脉

冲不断被压缩,最后形成稳定的超短脉冲序.

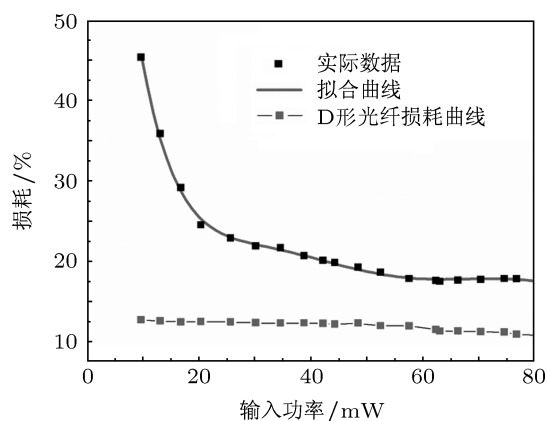


图3 锁模器的损耗率随输入功率的变化曲线

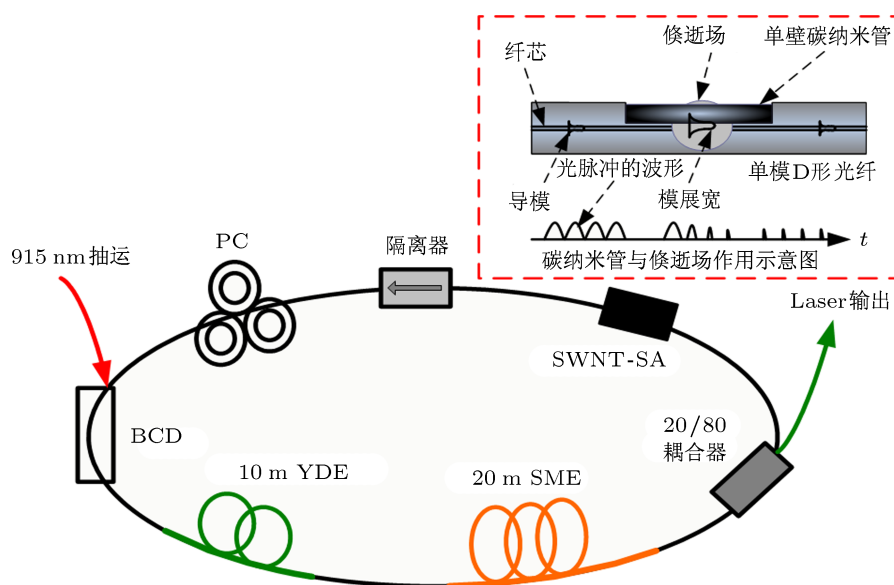


图4 单壁碳纳米管锁模光纤激光器实验装置图

4 实验结果以及分析

将锁模光纤激光器的输出端,对准高速 InGaAs 光电探测器,光电探测器的输出端接入 100 MHz 的数字存储示波器 (ADS1102C) 上.当抽运功率在 75 mW 时出现了调 Q 脉冲现象,继续加大功率到 0.27 W 时出现了调 Q 锁模现象,直到抽运功率为 0.56 W 时,才出现了锁模现象,这时适当的调节偏振控制器,就得到了比较稳定的锁模脉冲序列的输出,图 5(a) 为抽运功率为 4 W 时测得的光纤激光器稳定的锁模脉冲序列,从图上可以看出脉冲为单脉冲,没有出现多脉冲或脉冲分裂现象,保持此状态 7 h

后,脉冲序列仍比较的稳定.此时锁模脉冲的重复频率为 5.59 MHz,重复周期为 178.7 ns,平均功率能够达到 336 mW,相应的单脉冲能量为 60.1 nJ.根据公式 $f = c/nL$ 可知,重复频率与光纤激光器的腔长相符合.

将锁模光纤激光器的输出端射入光纤光谱仪 (YOKOGAWA, AQ6370B) 中测量其光谱特性,测得的锁模光纤激光器的脉冲光谱如图 5(b) 所示.锁模光纤激光器输出端与光谱仪探测光纤输入端的距离约为 16 cm.从图上看锁模脉冲中心波长为 1083.8 nm, 3 dB 谱线宽度为 8.6 nm.将锁模光纤激光器的输出光束经透镜聚焦后射入二次谐波自相

关仪 (Swamp Optics 8-50-USB) 中, 测得锁模光纤激光器的时域脉冲如图 5(c) 所示, 从图上可以看出脉冲宽度为 93.8 fs, 且脉冲的底端平坦, 没有产生子脉冲.

随着抽运功率的增加, 锁模光纤激光器的输出功率也不断增加, 用数字功率计 (LP-3A) 测得的输出功率随抽运功率的变化曲线, 如图 5(d) 所示. 图中直线的斜率为 0.084, 转换成腔内的功率, 锁模光纤激光器光-光转换效率为 42%. 可见

与双包层的锁模光纤放大器相比^[17-19], 该光纤激光器的光-光转换效率略低, 主要是由碳纳米管饱和吸收体光纤锁模器的非饱和损耗造成的. 从图 3 可以看出在输入功率为 80 mW 时, 其非饱和损耗约为 18.4%. 实验中所用的其他无源光器件均采用 HI1060 光纤, 故其光纤传输损耗可忽略. 但从实验结果来看, 该锁模光纤激光器的光-光转换效率高于单包层的锁模光纤激光器^[14-16].

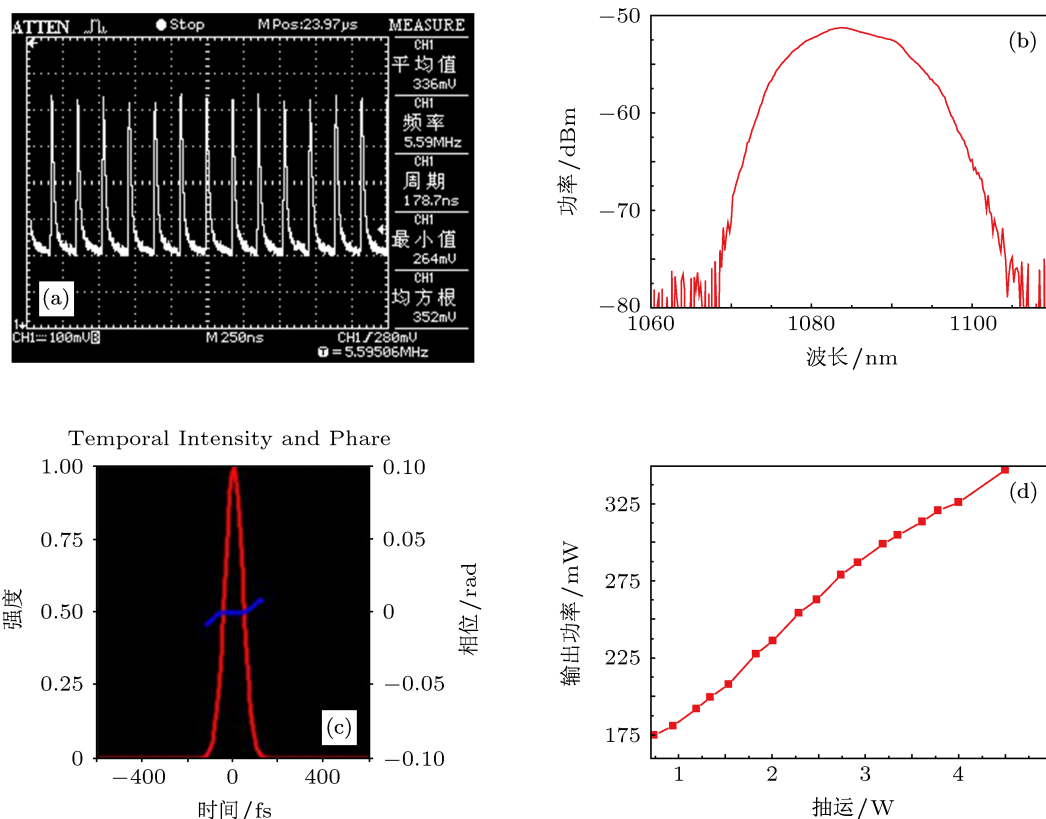


图5 单壁碳纳米管锁模光纤激光器输出特性图 (a) 锁模脉冲序列; (b) 激光光谱 (c) 自相关曲线; (d) 输出功率伴随着抽运功率的变化曲线

5 结 论

本文采用环形腔设计, 利用单壁碳纳米管的饱和吸收特性, 实现了双包层掺镱光纤激光器的被动锁模激光输出. 在抽运功率为 4 W 时获得了重复频率为 5.59 MHz, 脉宽为 93.8 fs, 3 dB 谱宽为 8.6 nm 的 1083.8 nm 波长的锁模激光脉冲, 此时最高输出

功率为 336 mW, 相应的单脉冲能量为 60.1 nJ. 实验表明在基于单壁碳纳米管饱和吸收体的全光纤环形腔结构的被动锁模光纤激光器中采用大功率多模输出半导体激光器作为抽运光源, 双包层光纤作为增益介质可实现高重复频率, 高单脉冲能量的飞秒脉冲的输出.

- [1] Nishizawa N, Seno Y, Sumimura K 2008 *Opt. Express* **16** 13
- [2] Keller U 2003 *Nature* **424** 6950
- [3] Lin H H, Lu Z H, Wang J J, Zhang Y, Wang F R, Xu D P, Zhang R, Li M Z, Deng Q H, Luo Y M, Tang J, Ding L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5646 (in Chinese) [林宏矣, 卢振华, 王建军, 张颖, 王凤蕊, 许党朋, 张锐, 李明中, 邓青华, 罗意鸣, 唐军, 丁磊 2008 物理学报 **57** 5646]
- [4] Yang L Z, Chen G F, Wang Y S, Zhao W, Ding G L, Xiong H J 2005 *Chinese. J. Lasers* **32** 153 (in Chinese) [杨玲珍, 陈国夫, 王屹山, 赵卫, 丁广雷, 熊红军 2005 中国激光 **32** 153]
- [5] Huang X J, Liu Y Z, Sui Z, Li M Z, Li X, Li H H, Wang J J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1191 (in Chinese) [黄绣江, 刘永智, 隋展, 李明中, 李忻, 林宏矣, 王建军 2006 物理学报 **55** 1191]
- [6] Chen H Y 2008 *Optical Communication Technology* **12** 5 (in Chinese) [陈海燕 2008 光通信技术 **12** 5]
- [7] Li J P, Chao S Y, Wu Z B, Wang Y G, Zhang Z G, Wang Q Y, Zhao Y P, Zhu X N 2005 *Nanotechnology and Precision Engineering* **3** 142 (in Chinese) [李建萍, 曹士英, 吴祖斌, 王勇刚, 张志刚, 王清月, 赵友博, 朱晓农 2005 纳米技术与精密工程 **3** 142]
- [8] Liu P Z, Hou J, Zhang B, Chen J B 2011 *Chinese. J. Lasers* **38** 0702017 (in Chinese) [刘鹏祖, 侯静, 张斌, 陈金宝 2011 中国激光 **38** 0702017]
- [9] Iijima S 1991 *Nature* **354** 6348
- [10] Li W Z, Wen J G, Senett M 2003 *Chem. Phys. Lett.* **368** 3
- [11] Ebbesen T W, Lezec H J, Hiura H 1996 *Nature* **382** 6586
- [12] Kieu K, Mansuripur M 2007 *Opt. Express* **32** 2242
- [13] Sun Z, Hasan T, Ferrari A C P 2012 *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* **44** 1082
- [14] Sze Y, Hiroshi Y, Yuichi T 2004 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Elect.* **10** 1
- [15] Valle G D, Osellame R, Galzerano G 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 23
- [16] Im J H, Choi S Y, Rotermund F 2010 *Opt. Express* **18** 21
- [17] Zhao H M, Lou Q H, Zhou J, Dong J X, Wei Y R, Wang Z J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3525 (in Chinese) [赵宏明, 楼棋洪, 周军, 董景星, 魏运荣, 王之江 2008 物理学报 **57** 3525]
- [18] Dong X L, Xiao H, Ma Y X, Zhou P, Gou X F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 064207 (in Chinese) [董小林, 肖虎, 马阎星, 周朴, 郭少峰 2012 物理学报 **61** 064207]
- [19] Ren G J, Wei Z, Yao J Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 941 (in Chinese) [任广军, 魏臻, 姚建铨 2009 物理学报 **58** 941]
- [20] Li Y, Qu S L 2011 *Opt. Express* **36** 4236

Mode-locked double-clad fiber laser with a carbon nanotubes saturable absorber*

Wang Sha-Sha Pan Yu-Zhai[†] Gao Ren-Xi Zhu Xiu-Fen
Su Xiao-Hui Qu Shi-Liang

(Dept. of opt-electronics, Harbin institute of technology at Weihai, Weihai 264209, China)

(Received 5 June 2012; revised manuscript received 11 July 2012)

Abstract

In this paper, the mode-locked laser pulse with a maximum power of 366 mW is achieved by using Yb-ions-doped double-clad fiber as the gain medium and single-walled carbon nanotubes (SWCNTs) as the saturable absorber (SA). The saturable absorber with a modulation depth of 27% is fabricated by spreading the well-dispersed SWCNTs on the D-shaped segment of the fiber, which is directly etched on the standard single-mode fiber by water-assisted femtosecond laser ablation. The ring-cavity structure fiber laser is fabricated based on the SWCNT-SA. The mode-locked pulse width of 93.8 fs, central wavelength of 1083.8 nm, and 3 dB bandwidth of 8.6 nm at the repetition rate of 5.59 MHz are obtained in the optimized polarization state under a pump power of 4 W.

Keywords: double-clad fiber lasers, passive mode locking, single-walled carbon nanotube saturable absorber, D-shaped fiber

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Fc

DOI: 10.7498/aps.62.024209

* Project supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province (Grant No. ZR2010FQ017), the Nature Scientific Research Innovation Foundation (Grant No. HIT.NSRIF.2009146), and the Program of Excellence Team in the Harbin Institute of Technology.

[†] Corresponding author. E-mail: panyzh2002@163.com