

微结构光纤近红外色散波产生的研究

陈其杰 周桂耀 石富坤 李端明 苑金辉 夏长明 葛姝

Study of near-infrared dispersion wave generation for microstructured fiber

Chen Qi-Jie Zhou Gui-Yao Shi Fu-Kun Li Duan-Ming Yuan Jin-Hui Xia Chang-Ming Ge Shu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 034215 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.034215

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034215>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

负性介电各向异性向列相液晶中空间光孤子的理论研究

Theoretical investigation of spatial optical solitons in nematic liquid crystals with negative dielectric anisotropy

物理学报.2014, 63(18): 184207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.184207>

Hirota 方程的怪波解及其传输特性研究

Rogue solution of Hirota equation and its transmission

物理学报.2014, 63(10): 104215 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104215>

非局域表面暗孤子及其稳定性分析

Nonlocal surface dark solitons and their stability analysis

物理学报.2014, 63(2): 024204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.024204>

强非局域非线性介质中的形变像散椭圆呼吸子

Shape-variant astigmatic elliptical breathers in strongly nonlocal nonlinear medium

物理学报.2013, 62(14): 144209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.144209>

输入面纵向偏移诱导的强非局域非线性光传输特性变化

Influence of the longitudinal shift of the entrance plane on the propagation properties of beams in strongly nonlocal nonlinear medium

物理学报.2013, 62(12): 124205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.124205>

微结构光纤近红外色散波产生的研究*

陈其杰 周桂耀[†] 石富坤 李端明 苑金辉 夏长明 葛姝

(华南师范大学, 广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广州 510006)

(2014年8月18日收到; 2014年9月18日收到修改稿)

采用有限元法对实验室自制的非线性微结构光纤进行理论分析, 表明该光纤具有良好的非线性和色散波产生的相位匹配特性. 为实现微结构光纤非线性的全光纤化, 本实验采用中心波长为1032 nm的光纤飞秒激光器作为抽运源, 获得了753—789 nm的近红外色散波. 实验中发现色散波中心波长和带宽随着抽运功率的改变会产生明显变化, 并且在不同光纤长度时, 色散波的频移量不同, 脉冲展宽及频谱也会有明显的变化. 实验结果与理论分析一致. 这些结果对实现微结构光纤非线性的全光纤化具有良好的借鉴作用, 为生物医疗应用特别是非线性光学显微成像术的近红外光源研究打下基础.

关键词: 微结构光纤, 色散波, 非线性, 近红外

PACS: 42.65.Tg, 42.81.Dp, 42.81.-i

DOI: 10.7498/aps.64.034215

1 引言

目前基于微结构光纤即光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF)^[1,2] 的非线性光学研究特别是具有窄带频谱成分的超短脉冲产生引起了人们的极大兴趣^[3,4]. PCF具备的灵活控制的色散和非线性特性使之成为制备宽波段窄带光源技术的关键利用四波混频^[5,6]和色散波^[7-9]等频率转换技术, 可以把抽运功率有效地转换到目标频谱区. 色散波通常作为超连续谱可见波段的组成部分, 是由于拉曼孤子受高阶色散扰动分裂, 在满足相位匹配条件时产生的^[9,10]. 目前基于PCF的色散波产生已经有了较成熟的研究和进展. Liu和Lægsgaard等基于全光纤得到了可见区的飞秒色散波^[11]. 赵兴涛等用钛宝石飞秒激光器抽运PCF包层节区产生可见及红外色散波^[12]. Yuan等利用具有双零色散点的PCF作为频率转换得到波长可调的高效中红外色散波^[3]. 然而, 用简便的光纤飞秒激光器抽运具有一个零色散点的PCF, 进而产生

色散波作为近红外光源的研究却很少.

近红外光源常应用在生物医疗领域^[13-15], 尤其是能提供高三维空间分辨率的分子结构信息的非线性光学显微成像术 (nonlinear light microscopy, NLM), 包括多光子荧光 (MPF) 和二次谐波 (SHG) 显微成像技术^[16,17]. 作为NLM的最常用光源^[16], 锁模钛宝石飞秒激光器虽然具有高能量宽波段可调范围并且工作范围覆盖大部分生物穿透窗口0.7—1.3 μm 的特点, 然而其繁重复杂的抽运、制冷和波长调谐系统却限制了在未来生物医疗上的应用^[17]. 本文采用中心波长为1032 nm的光纤飞秒激光器作为激励源, 实验室自制的零色散波长为1013 nm的微结构光纤作为频率转换, 产生色散波作为近红外光源, 有其独特的轻便紧凑的优势.

2 理论模拟

色散波的波长简单地由相位匹配条件决定, 即要求色散波以与孤子相同的相速度传输^[12]. 根据

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB327604)、国家自然科学基金 (批准号: 61377100) 和华南师范大学学生课外科研重点课题 (批准号: 13GDKB01) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: zguyao@163.com

光纤色散波理论, 其中心波长可从以下相位匹配方程获得^[17]

$$\sum_{m \geq 2} \frac{(\omega_{CR} - \omega_P)^m}{m!} \beta_m(\omega_P) = \frac{\gamma P_P}{2}, \quad (1)$$

其中 ω_{CR} 和 ω_P 分别代表了色散波和抽运脉冲的中心频率. β_m 是传播常数在抽运频率处的 m 阶导. γ 和 P_P 则分别指出了非线性系数和脉冲峰值功率.

本实验使用了我们实验室设计并拉制的 PCF, 截取长度 120 cm. 光纤纤芯直径 $d_c = 4.65 \mu\text{m}$, 纤芯周围空气孔平均孔径 $d = 4.6 \mu\text{m}$, 孔间距 $\Lambda = 5.18 \mu\text{m}$. 非线性相位匹配条件随抽运波长变化的模拟曲线(如图 1), 其中抽运脉冲的平均功率为 300 mW.

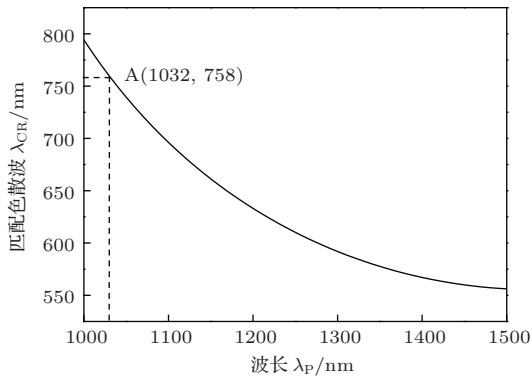


图 1 非线性相位匹配条件随抽运波长变化的模拟曲线 (水平点线和竖点线分别对应 758 nm 和 1032 nm)

从图 1 中可看出色散波的中心波长随着抽运波长的增大而逐渐减小, 并且在 1032 nm 处色散波中心波长在 758 nm 附近, 后面的实验结果与模拟结果一致.

用有限元法建立模型, 可以计算获得有效折射率和群速度色散. 图 2 和图 3 分别给出了光纤有效模面积 A_{eff} 和非线性系数 γ 随传输波长变化的趋势以及群速度色散曲线, 图 3 内插图表示实验 PCF 的截面结构图. 其中

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E(x, y)|^2 dx dy \right]^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E(x, y)|^4 dx dy}, \quad (2)$$

$$\gamma = 2\pi n_2 / \lambda A_{\text{eff}}, \quad (3)$$

$$D = -(2\pi c) / (\lambda^2) \partial^2 \beta(\omega) / \partial \omega^2, \quad (4)$$

E 为横向电场分布, n_2 为硅基非线性系数, 取值 $2.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, $\beta(\omega)$ 为模传输常数. 随传输波

长改变的有效模面积直接影响了光纤中的孤子自频移过程. 当抽运脉冲工作在光纤反常色散区并接近 1013 nm 零色散点时, 可以产生可见波段到近红外之间的色散波.

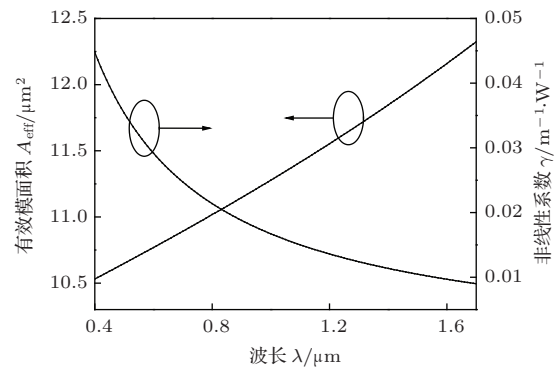


图 2 PCF 的有效模面积 A_{eff} 和非线性系数 γ

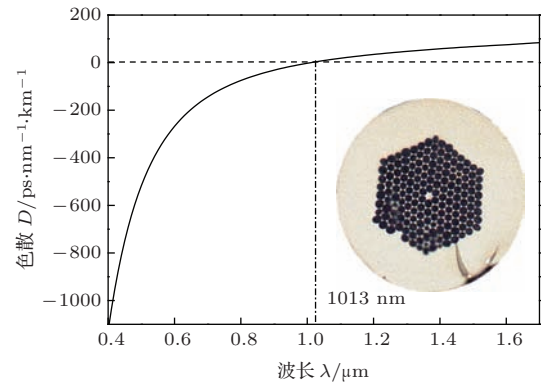


图 3 (网刊彩色) PCF 基模传输时群速度色散 D 随传输波长的变化曲线 (竖点划线对应零色散波长 1013 nm, 内插图表示实验中所用 PCF 截面结构图)

3 实验与结果分析

实验装置如图 4 所示, 抽运脉冲是中心波长 1032 nm, 脉宽 140 fs, 重复频率 50 MHz 的锁模光纤飞秒激光器. 脉冲经过 20 倍透镜聚焦后耦合进入非线性 PCF, 耦合效率可达 55%. 通过调整激光光束与光纤轴之间的角度来激发基模传输. 输出脉冲经半透半反镜一部分进入 CCD, 便于观察输出模场, 另一部分进入光谱分析仪 (Maya 2000PRO 和 NIRQUEST256) 进行测量, 光谱仪的测量范围分别为 200—1100 nm, 900—2500 nm.

用中心波长为 1032 nm 的飞秒脉冲抽运 120 cm 长的 PCF, 改变进入光纤的平均功率, 从 150 mW 增加到 450 mW, 得到随功率变化的输出谱, 如图 5 所示.

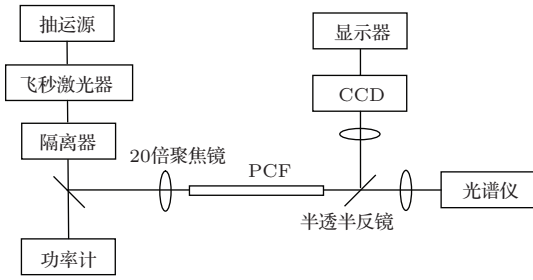


图4 近红外色散波产生实验装置图

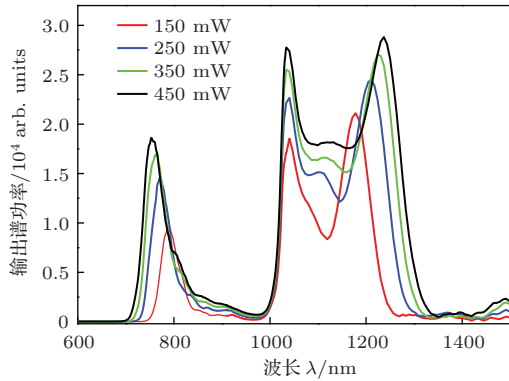


图5 (网刊彩色) 中心波长为 1032 nm 的飞秒脉冲抽运 120 cm 长 PCF 在 600—1500 nm 之间的输出谱变化. 抽运脉冲功率从 150 mW 增加到 450 mW

由于 PCF 的零色散波长在 1013 nm, 光纤工作在反常色散区, 在自相位调制作用下形成基阶孤子 [12]. 当抽运功率在 150—450 mW 变化时, 脉冲内拉曼散射和色散的共同作用造成孤子自频移现象, 本实验中孤子波从 1178 nm 红移到 1237 nm. 其中抽运功率增加到 250 mW 时出现明显的 1100 nm 附近的峰是拉曼增益的结果. 基于材料本身的拉曼效应和高阶色散的影响, 形成了孤子波和色散波之间的位相匹配 [9,10], 从而在蓝移波段形成了 789 nm, 771 nm, 765 nm 和 753 nm 的近红外独立峰, 并且抽运能量和孤子能量向蓝移色散波转移. 图 6 给出了色散波的中心波长和带宽随抽运功率的变化. 抽运功率增大时, 色散波中心波长往短波移, 带宽则从 46 nm 增加到 52 nm.

实验中通过波长转换获得的中心波长为 753—789 nm 的色散波和 1178—1237 nm 的孤子脉冲均处在生物医疗领域中 0.7—1.3 μm 的生物穿透窗口, 在生物医疗领域可应用在 NLM 的近红外光源. 由于脉宽作为 NLM 的激励源中最重要的因素之一, 而通常处于正常色散区的色散波在 PCF 传输过程中会经历严重的脉冲展宽, 因此选取合适的光纤长度能在形成色散波后减少脉冲展宽和能

量损耗. 而对于包括光谱光学相干层析 [18] 在内的其他生物光子应用则需要更长的非线性 PCF, 因其更依赖于抽运脉冲的低阈值和波长转换的高效率.

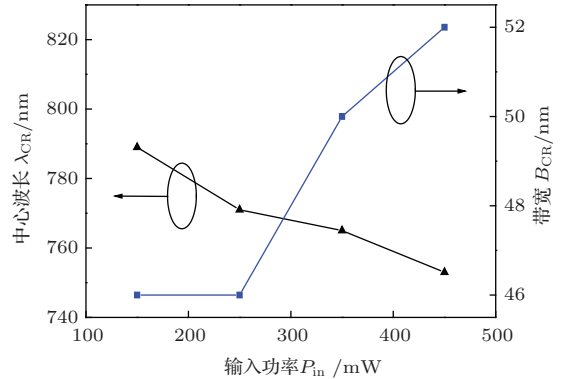


图6 (网刊彩色) 不同抽运功率下色散波的中心波长 λ_{CR} 和 B_{CR}

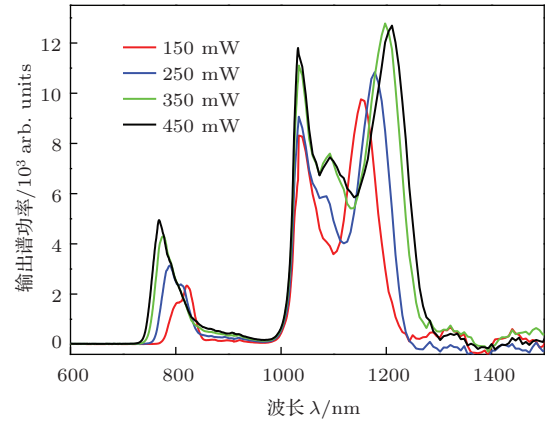


图7 (网刊彩色) 中心波长为 1032 nm 的飞秒脉冲抽运 50 cm 长 PCF 在 600—1500 nm 之间的输出谱变化(抽运脉冲功率从 150 mW 增加到 450 mW)

图 7 给出了飞秒脉冲经过长度 $L = 50$ cm 的 PCF 在不同功率下的输出谱. 当抽运功率在 150 mW 时, 有低能量的色散波产生, 其中心波长为 820 nm. 随着功率继续增加到 450 mW, 色散波中心波长分别为 789 nm, 777 nm, 768 nm. 当光纤长度 120 cm 时 (见图 6), 相对应地色散波中心波长分别为 789 nm, 771 nm, 765 nm 和 753 nm. 为了让对比更直观, 图 8 给出了两个长度的归一化输出谱. 可以看出随着抽运功率以及光纤长度的增加, 除了更多的能量转移到色散波, 并且频移量也增加, 这是由于相匹配的孤子脉冲在传输过程中的红移缘故. 并且激光脉冲在传输到 50 cm 处已经接近达到饱和长度, 其后的频移量增加缓慢. 因此如果应用于 NLM 可选取小于 50 cm 的 PCF, 在其他生物光

子应用可在损耗允许情况下选取较长PCF用于波长转换.

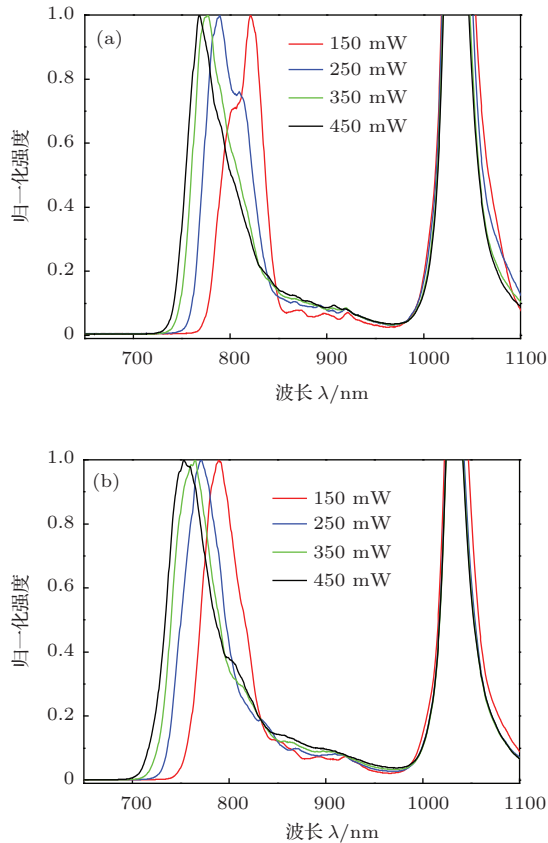


图8 (网刊彩色) (a) $L = 50$ cm; (b) $L = 120$ cm 长度的光纤在不同抽运功率下的归一化输出谱

光纤非线性过程一般依赖于脉冲宽度、峰值功率、中心波长以及光纤本身的参数,选择合适的条件可产生所需的色散波.本实验主要为了用简便轻巧的飞秒激光器抽运PCF得到特定波长的近红外色散波,为了提高转换效率,往后可以进行光纤参数和拉制工艺的优化,以及光路耦合的改善.

4 结 论

利用中心波长为1032 nm,脉宽为140 fs的飞秒脉冲抽运实验室自制的微结构光纤,获得了近红外波段的色散波.在150 mW到450 mW范围内改变抽运功率,孤子脉冲和色散波的中心波长分别在1178—1237 nm和753—789 nm范围移动,实验与理论分析结果一致.通过对比不同光纤长度50 cm和120 cm时的非线性实验,得到了色散波的频移量随光纤长度增加而增加的规律,讨论了不同光纤

长度对脉冲展宽及频谱变化的作用.实验所获得的近红外色散波处于生物医学窗口,特别在非线性光学显微成像术和光学相干层析等技术的近红外光源应用中有其独特的优势.

参考文献

- [1] Russell P ST J 2003 *Science* **299** 5605
- [2] Knight J C 2003 *Nature* **424** 01940
- [3] Yuan J H, Sang X Z, Wu Q, Yu C X, Farrell G 2013 *Laser Phys. Lett.* **10** 045405
- [4] Yuan J H, Sang X Z, Wu Q, Yu C X, Shen X W, Wang K R, Yan B B, Han Y, Zhou G Y, Semenova Y, Farrell G, Hou L T 2013 *Opt. Commun.* **291** 317
- [5] Shen X W, Yu C X, Sang X Z, Yuan J H, Han Y, Xia C M, Hou L T, Rao L, Xia M, Yin X L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 044203 (in Chinese) [申向伟, 余重秀, 桑新柱, 苑金辉, 韩颖, 夏长明, 侯蓝田, 饶岚, 夏民, 尹霄丽 2012 物理学报 **61** 044203]
- [6] Liu X X, Wang S T, Zhao X T, Chen S, Zhou G Y, Wu X J, Li S G, Hou L T 2014 *Spectrosc. Spectral Analy.* **34** 1460 (in Chinese) [刘旭, 王书涛, 赵兴涛, 陈爽, 周桂耀, 吴希军, 李曙光, 侯蓝田 2014 光谱学与光谱分析 **34** 1460]
- [7] Pureur V, Dudley J M 2011 *Opt. Commun.* **284** 1661
- [8] Wang W B, Yang H, Tang P H, Han F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 184202 (in Chinese) [王威彬, 杨华, 唐平华, 韩芳 2013 物理学报 **62** 184202]
- [9] Zhao X T, Zheng Y, Liu Z L, Li S G, Hou L T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 194210 (in Chinese) [赵兴涛, 郑义, 刘晓旭, 刘兆伦, 李曙光, 侯蓝田 2012 物理学报 **61** 194210]
- [10] Shen X W, Yuan J H, Sang X Z, Yu C X, Rao L, Xia M, Han Y, Xia C M, Hou L T 2012 *Chin. Phys. B* **21** 114102
- [11] Liu X M, Lægsgaard J, Møller U, Tu H H, Boppart S A, Turchinovich D 2012 *Opt. Lett.* **37** 2769
- [12] Zhao X T, Zheng Y, Han Y, Zhou G Y, Hou Z Y, Shen J P, Wang C, Hou L T 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064215 (in Chinese) [赵兴涛, 郑义, 韩颖, 周桂耀, 侯峙云, 沈建平, 王春, 侯蓝田 2013 物理学报 **62** 064215]
- [13] Horton N G, Wang K, Kobat D, Clark C G, Wise F W, Schaffer C B, Xu C 2013 *Nat. Photonics* **7** 205
- [14] Wang M, Li C Y, Sun Y F, Li M, Zhai X M, Wu D M 2013 *Acta. Opt. Sin.* **33** 0617003 (in Chinese) [王懋, 李春炎, 孙云飞, 李敏, 翟晓敏, 吴东岷 2013 光学学报 **33** 0617003]
- [15] Chen Y P, Li C B, Wang X L, Chu Q W, Long Z D 2014 *J. Optoelectronics • Laser* **25** 1023 (in Chinese) [陈延平, 李纯彬, 王晓玲, 储茜雯, 龙朱蒂 2014 光电子 **25** 1023]
- [16] Chen C B, Zhao M 2012 *Organ Tran.* **3** 283 (in Chinese) [陈传宝, 赵明 2012 器官移植 **3** 283]
- [17] Chan M C, Lien C H, Lu J Y, Lyu B H 2014 *Opt. Express* **22** 9498
- [18] Tsai M T, Chan M C 2014 *Opt. Lett.* **39** 865

Study of near-infrared dispersion wave generation for microstructured fiber*

Chen Qi-Jie Zhou Gui-Yao[†] Shi Fu-Kun Li Duan-Ming Yuan Jin-Hui
Xia Chang-Ming Ge Shu

(South China Normal University, GuangDong Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices, Guangzhou 510006, China)

(Received 18 August 2014; revised manuscript received 18 September 2014)

Abstract

Properties of nonlinear microstructured fiber fabricated in our laboratory are theoretically analyzed using the finite element method. This fiber has a high nonlinearity and phase matching for the dispersion wave generation. To achieve all-fiber nonlinearity in microstructured fiber, the dependence of dispersion wave on the pump power is investigated. When changing the pump power at 1032 nm with a femtosecond fiber laser, the near-infrared dispersion waves cover a region from 753 to 789 nm. The central wavelength and bandwidths alter obviously, and the fiber length has a remarkable impact on pulse broadening and frequency spectrum. Results coincide with the analyses. These results could be a reference for all-fiber nonlinearity of microstructured fiber, and lay a foundation for biological and medical applications, especially some researches on the near-infrared source for nonlinear light microscopy.

Keywords: microstructure fiber, dispersion wave, nonlinearity, near-infrared

PACS: 42.65.Tg, 42.81.Dp, 42.81.-i

DOI: [10.7498/aps.64.034215](https://doi.org/10.7498/aps.64.034215)

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2010CB327604), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61377100), and the Students' Extracurricular Scientific Key Project of South China Normal University (Grant No. 13GDKB01).

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