

基于热膨胀效应的可调光功率分束器设计*

唐雄贵[†] 廖进昆 李和平 刘永 刘永智

(电子科技大学光电信息学院, 成都 610054)

(2012 年 6 月 5 日收到; 2012 年 6 月 27 日收到修改稿)

可调光功率分束器是集成光子系统中的重要功能器件, 其光功率输出具有动态可控特性, 诸多光子系统对其有着广泛需求. 本文基于空隙槽型 Y 分支波导结构, 利用热膨胀效应, 提出了一种新型可调光功率分束器实现方法, 通过调控温度来改变分支处空隙槽的宽度, 以实现其分支波导的光功率输出的动态变化. 采用有限元方法, 对其热膨胀形变和光学性能进行了模拟分析. 其模拟结果表明, 该器件能实现大范围光分束调控, 且对波长和偏振态依赖性低; 同时, 该器件具有结构简单、易于设计和制作、易于调控等优点, 这种新型器件在各种光子系统中具有重要应用前景.

关键词: 集成光学, 光功率分束器, 热膨胀效应, 调控特性

IPACS: 42.82.-m, 42.82.Gw, 42.82.Et, 42.79.Gn

DOI: 10.7498/aps.62.024218

1 引言

光功率分束器是集成光子系统中不可或缺的关键器件之一, 在系统中用于有效配置光功率分配, 以实现其他不同功能器件之间的有效集成, 它起着桥梁和纽带作用. 另外, 它在光通信系统、光无源网络、光局域网以及光纤用户网中也有广泛应用, 如用来进行光路连接、光功率资源合理分配以及网络测试与监控等. 基于此, 人们已提出多种实现方案^[1-7], 但是这些具有不同结构形式的光功率分束器, 通常属于“静态”型传统结构, 其光功率输出不能在线动态变化, 这不仅使其应用领域和范围受到较大限制, 同时, 在与其他可调光子器件集成时也将产生新的诸多问题.

近年来, 可调光功率分束器的研究开始引起了人们的关注和重视, 这种新型器件不仅能解决光子系统中不同功能器件对光功率资源有不同需求的问题, 同时能使系统中各个器件在不同时刻对光功率资源的不同需求也会得到动态满足, 这对于提升系统性能、设计与制作具有新型功能的系统起着至关重要的作用. 另外, 它还可用来替代系统中的

其他功能光子器件 (如光衰减器), 从而可有效降低系统设计与制作难度、提高系统集成度. 目前, 可变光分束器的实现方案有多种^[8-11], 主要分为: 机械微移型、光子晶体型、多模干涉型、微棱镜型等. 但是, 这些方案通常在调控性能、或制作难度、或波长依赖性、或结构参数敏感性、或结构紧凑性等某一方面或多个方面存在较大缺点, 离实际应用还有较大距离. 因而, 深入探索新型可调光分束器实现方案具有重要的科学意义和应用价值.

基于此, 本文设计了一种空隙槽型 Y 分支波导结构, 利用热膨胀效应, 提出了一种新型光功率分束调控方法, 以实现易于设计与制作、易于调控、调控范围大、波长和偏振依赖性低的可调光分束器; 并采用有限元数值计算方法, 对其调控过程进行了模拟分析.

2 结构与原理分析

通常, 按制作材料来源分为无机与有机聚合物波导器件, 而有机聚合物波导器件因具有诸多优异特性, 目前已引起人们的广泛关注^[12]. 与无机材料相比, 有机聚合物通常还具有较大的热膨胀系数和

* 国家自然科学基金 (批准号: 60908024, 61077017, 61090393) 和中央高校基本业务费基金 (批准号: ZYGX2011J050) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: tangxg@uestc.edu.cn

较为接近的热光系数. 这里选用有机聚合物来设计器件, 所设计的可调光功率分束器如图 1 所示, 其中图 1(a) 为其整体结构, 图 1(b) 为单个 Y 分支放大图, 图 1(c) 为其波导横截面结构. 这是一个 $1 \times N$ 波导型可调光功率分束器, 它由 $N-1$ 个 Y 分支波导串接而成, 在每一个 Y 分支波导的分支处有一个空隙槽, 在对应空隙槽下方有一个控制电极, 用于加热以控制分支处的温度. 分束器的波导为条形或脊形结构, 由上包层、芯层、下包层构成, 其折射率分别为 n_1 , n_2 和 n_3 , 均为有机聚合物材料, 它们具有接近的较大热膨胀系数. 这里假定波导为条形结构, 设波导芯层的宽度和厚度分别为 W 和 d . 空隙槽初始宽度为 w , 空隙槽与右分支波导的夹角为 θ . 基底材料选用无机材料, 如硅片或玻璃, 其热膨胀系数较小. 当光束通过光纤耦合到波导输入端口后, 光束在光波导中传播; 当到达第一个 Y 分支处时, 由于空隙槽初始宽度较大, 其折射率远小于波导折射率, 故光束传播到该分支处发生全内反射, 将沿着左分支波导传播; 若该位置的控制电极加热, 将引起该位置的温度升高, 由于热膨胀效应, 从而导致该位置处空隙槽宽度变小, 当空隙宽度接近为工作波长量级时, 由于光学隧道效应, 其空隙槽内的倏逝波将部分耦合进右分支波导, 从而使得左右分支波导内光功率发生了改变. 随着温度进一步升高, 空隙槽宽度也将进一步减小, 左分支波导内光功率继续减小, 而右分支内光功率继续增加, 从而实现光功率输出的动态调控. 当光信号传播到其后续 Y 分支处时, 因相同的工作原理, 其左右分支波

导内光功率输出也将同样被调控. 因此, 通过合理设计和制作空隙槽初始宽度, 有效调控加热电极的温度, 利用热膨胀来改变空隙槽的宽度, 从而实现对 $1 \times N$ 波导型光功率分束器光功率输出的调控目的. 该可调光功率分束器结构相对简单, 其制作也较为容易, 且与传统的光波导器件制作工艺兼容.

为简化设计和分析, 这里采用有效折射率方法, 将三维光波导的传输问题转化为二维光波导传输问题^[13]. 在分支处, 传播到该位置的光束因反射而发生偏向, 因而反射后光束传播方向应与左分支波导走向趋于一致. 由图 1(b) 可以看出, 其 Y 分支波导的分支角为 θ' 等于空隙槽与右分支波导夹角 θ 的 2 倍, 即 $\theta' = 2\theta$. 而空隙槽与右分支波导的夹角 θ 则由波导区等效折射率 N_1 、空隙槽区等效折射率 N_2 、以及波导中的高阶模的等效传输常数 β 来共同决定, 即其值应满足

$$\theta < \cos^{-1}(N_2/N_1) - \cos^{-1}[\beta/(k_0 N_1)]. \quad (1)$$

若波导处于单模条件, 则 $\beta = k_0 N_1$, 其夹角 θ 可简化为

$$\theta < \cos^{-1}(N_2/N_1). \quad (2)$$

另外, 需要指出的是, 虽然在光分束调控过程中因热光效应会引起波导芯层与包层的折射率发生改变, 但只需选择热光系数较为接近的芯层与包层材料, 其折射率变化趋势相同且改变量较为接近, 这对于波导内光束传播和分支处光功率分束性能影响很小.

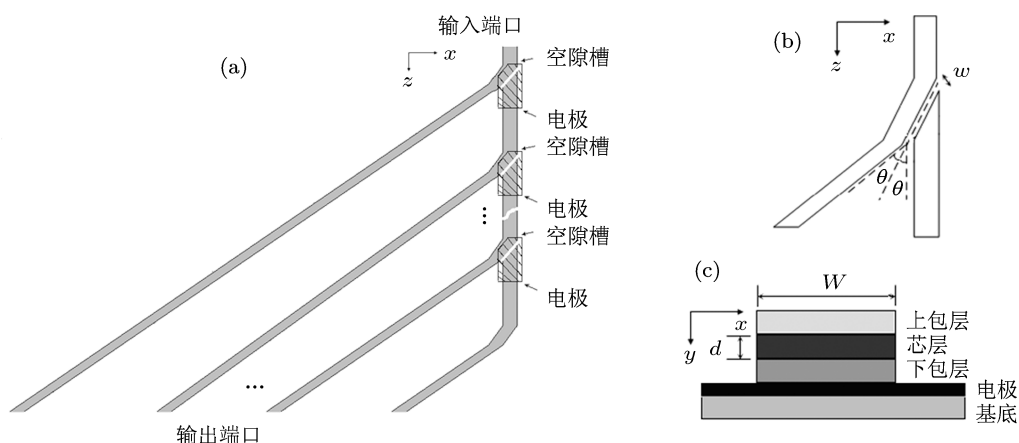


图 1 (a) 可调光功率分束器结构; (b) 单个 Y 分支结构; (c) 波导横截面图

3 模拟与分析

针对所提出的可调光功率分束器, 这里采用有限元方法进行模拟. 该方法是以变分原理和加权余量法为基础的数值计算方法, 已在各种科学和工程问题的仿真中得到广泛应用, 这里不再对该方法的相关理论进行详细叙述, 可参考文献 [14]. 这里, 我们利用该方法对在不同温度条件下可调光功率分束器性能进行模拟, 具体包括: 空隙槽形变和光束传播过程中的光场分布. 模拟过程中所选用的有关参数如下: 工作波长为 $1.55\ \mu\text{m}$, 其偏振态为 TM 波; 芯层宽度为 $1.5\ \mu\text{m}$, 芯层的厚度为 $1.8\ \mu\text{m}$, 空隙槽初始宽度 $2.0\ \mu\text{m}$; 上、下包层材料为 PMMA, 其折射率为 1.48; 其芯层材料为 SU-8, 其折射率为 1.57(PMMA 和 SU-8 均由美国 MicroChem Corp. 生产). 这两种材料 PMMA 和 SU-8 均有较大的热膨胀系数, 两者大小较为接近, 分别为 70ppm/K 和 52ppm/K , 且有较大的玻璃化温度 (大于 $200\ ^\circ\text{C}$); 这里选用硅片作为基底材料, 其热膨胀系数很小 (约为 2.3ppm/K), 其热膨胀效应可忽略不计. 在模拟过

程中, 设控制电极在加热过程中温度变化范围为 $20\ ^\circ\text{C}$ — $100\ ^\circ\text{C}$, 其加热区域为 $400\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$, 其空隙槽宽度变化量在不同温度下的模拟结果如图 2(a) 所示. 由图可以看出, 其变化范围为 0 — $2.13\ \mu\text{m}$, 而空隙槽宽度所需要的变化范围只须达到 0 — $2.0\ \mu\text{m}$, 因而温度变化范围只需在 $20\ ^\circ\text{C}$ — $95\ ^\circ\text{C}$ 之间即可. 图 2(b) 表示控制电极温度为 $80\ ^\circ\text{C}$ 时空隙槽的热膨胀形变, 图中黑色和灰色区分别表示空隙槽热膨胀前、后的波导纵向截面形状, 此时空隙槽宽度变化量为 $1.60\ \mu\text{m}$. 另外, 在控制电极加热过程中, 由于热光效应, 波导芯层与包层折射率将发生改变; SU-8 和 PMMA 的热光系数分别为 $-1.87 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 和 $-1.5 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$, 其值均为负值且较为接近; 当温度从 $20\ ^\circ\text{C}$ 升高 $100\ ^\circ\text{C}$, 其波导芯层与包层折射率变化量分别为 -0.0149 和 -0.0120 ; 由于其折射率均随温度升高而减小, 且变化速率接近, 因而其波导芯层与包层的折射率差的变化量仅为 0.0029 , 这种变化对于光束器性能影响很小. 限于文章篇幅, 这里不再给出波导芯层和包层内的温度和折射率的空间分布.

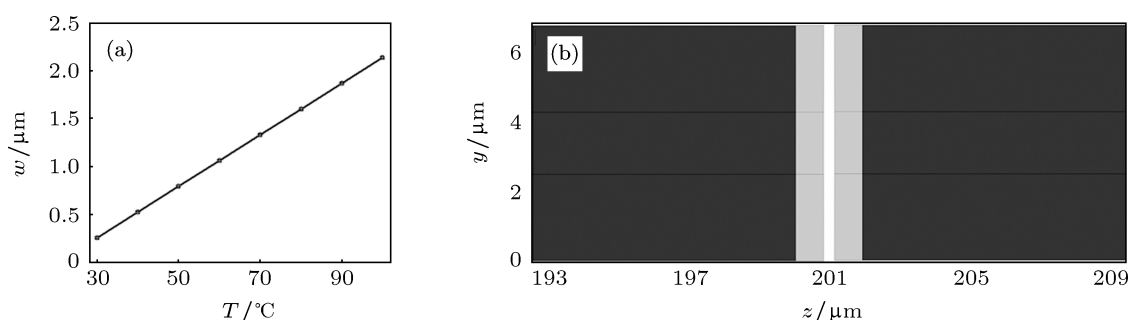


图 2 (a) 空隙槽宽度变化量随温度变化关系; (b) 波导在热膨胀前后的纵向截面模拟面形

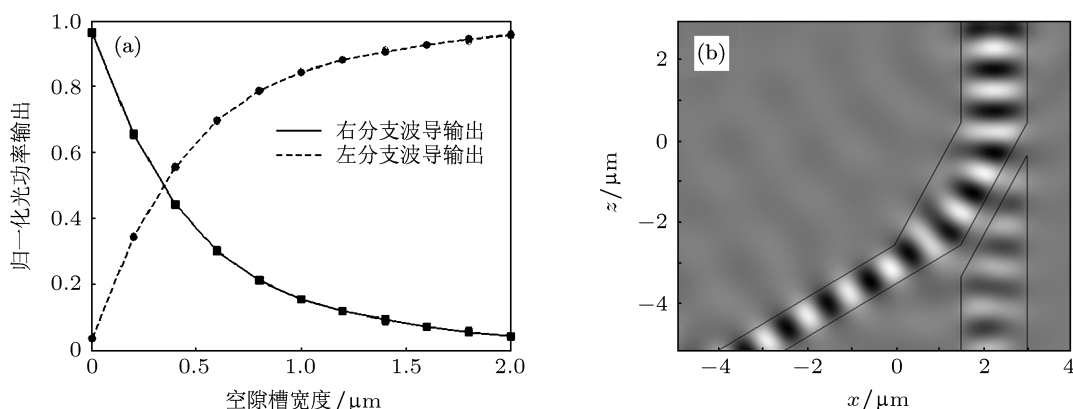


图 3 (a) 归一化光功率输出随空气槽宽度变化关系; (b) 空隙槽宽度等于 $0.8\ \mu\text{m}$ 时的光场分布

首先以 1×2 可调光功率分束器为例, 采用有限元方法, 模拟计算了其左、右分支归一化光功率输出随空隙槽宽度的变化关系, 如图 3(a) 所示, 其中虚线和实线分别表示左、右分支的归一化光功率输出. 由图可以看出, 左分支波导的光功率输出随空隙槽宽度增加而增加, 而右分支波导的光功率输出随空隙槽宽度增加而减小, 且调控范围大. 同样, 对于 TE 波入射条件, 我们对其左、右分支归一化光功率输出随空隙槽宽度的变化关系也进行了数值计算, 其变化曲线与图 3 中曲线基本类似, 其原因是光功率分束调控功能是基于倏逝波的泄漏耦合来实现的, 故对偏振态变化不敏感. 因而, 该器件具有偏振依赖性低的特点, 这在集成光子系统中实际应用十分重要. 在图 3 (b) 中, 给出了空隙槽宽度等于 $0.8 \mu\text{m}$ 时光束在波导传播过程内的光场分布.

通常, 入射光信号存在一定的谱宽, 约几纳米至几十纳米, 如光通信系统 C 带窗口为 $1530\text{--}1565 \text{ nm}$. 这里进一步考察了其左、右分支归一化光功率输出在空气槽宽度为 $0.8 \mu\text{m}$ 、TM 波入射条件下随入射波长变化曲线. 模拟结果如图 4, 其中虚线和实

线分别表示左、右分支的归一化光功率输出. 模拟结果表明, 其各个分支光功率输出在不同入射波长下变化很小. 由此可以看出, 该器件的波长依赖性很低, 这对于其实际应用十分有用.

最后, 根据上述模拟分析, 我们设计了 1×3 可调光功率分束器, 模拟了其在不同空隙槽宽度条件下的光波在波导内传播的光场分布, 其模拟结果如图 5 所示, 其中入射波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 、偏振态为 TM

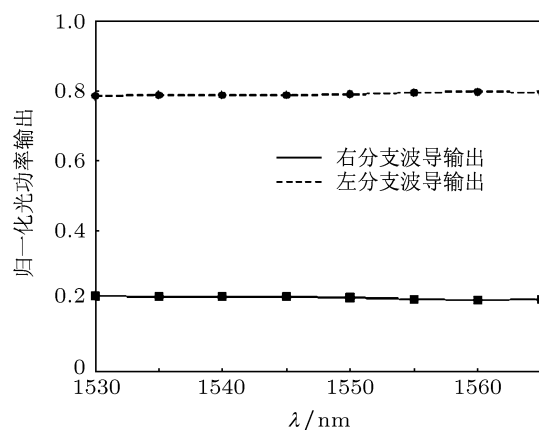


图 4 归一化光功率输出随工作波长变化关系

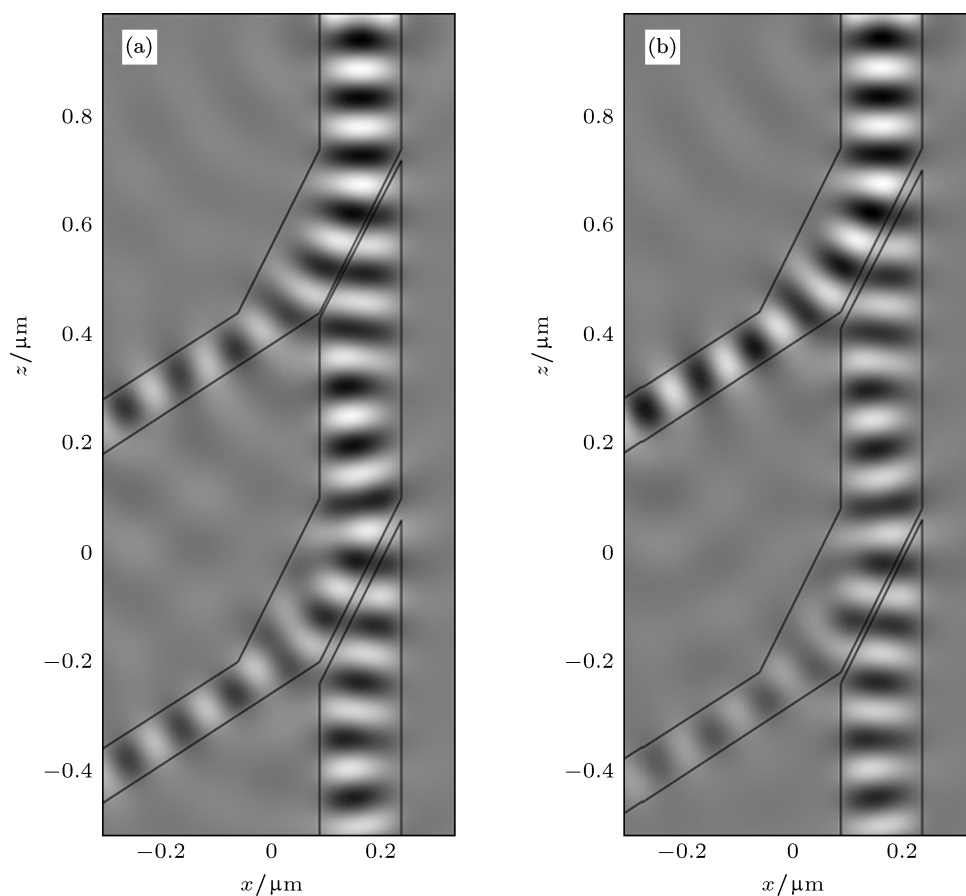


图 5 1×3 型可调光功率分束器光束传播过程中的光场分布, (a) $w_1 = 0.4 \mu\text{m}$, $w_2 = 0.2 \mu\text{m}$; (b) $w_1 = 0.2 \mu\text{m}$, $w_2 = 0.4 \mu\text{m}$

波. 图 5(a) 和 (b) 分别表示上、下两个空气槽的宽度为: (a) $w_1 = 0.4 \mu\text{m}$, $w_2 = 0.2 \mu\text{m}$, (b) $w_1 = 0.2 \mu\text{m}$, $w_2 = 0.4 \mu\text{m}$. 模拟结果表明通过电极加热来改变各个空气槽的宽度, 能够容易实现各个分支中光功率输出的调控. 对于输出波导端口数超过 3 的 $1 \times N$ 可调光功率分束器, 利用本文所提出的方法同样能够实现, 这里不再举例一一加以模拟分析. 这种基于热膨胀效应的 $1 \times N$ 波导型可调光功率分束器, 具有结构简单、易于设计与制作、波长和偏振依赖性低、调控范围大等优点, 在集成光子系统中具有重要的应用前景.

4 总 结

本文提出了一种新型可调光功率分束器, 该器件是由具有空隙槽的 Y 分支波导结构构成; 利用热膨胀效应, 调控分支处空隙槽的宽度, 从而改变其分支波导光功率输出. 采用有限元数值计算方法, 对其调控过程中的热形变和光分束性能进行了模拟仿真. 模拟结果表明, 通过热形变改变空隙槽宽度, 可实现大范围光分束调控, 同时, 其波长和偏振态依赖性低. 这种具有结构简单、易于设计和制作、易于调控等优点的光功率分束器在集成光子系统中潜在应用前景广阔.

-
- [1] Olivero M, Svalgaard M 2006 *Opt. Express* **14** 162
 - [2] Chung K B, Yoon J S 2003 *Opt. Quant. Electron.* **35** 959
 - [3] Bayindir M, Temelkuran B, Ozbay E 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 3902
 - [4] Veronis G, Shanhui Fan 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 131102-1
 - [5] Shuo-Yen Tseng, Choi S, Kippelen B 2009 *Opt. Lett.* **34** 512
 - [6] Tang X G, Liao J K, Li H P, Lu R G, Liu Y Z 2009 *Acta Optica Sinica* **29** 2077 (in Chinese) [唐雄贵, 廖进昆, 李和平, 陆荣国, 刘永智 2009 光学学报 **29** 2077]
 - [7] Tang X G, Liao J K, Li H P, Zhang L, Lu R G, Liu Y Z 2010 *Opt. Express* **18** 21697
 - [8] Zhang Y W, Liu L Y, Wu X, Xu L 2008 *Opt. Commun.* **281** 426
 - [9] Chen Q H, Wu W G, Yan G Z, Wang Z Q, Hao Y L 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 632
 - [10] Thapliya R, Kikuchi T, Nakamura S 2007 *Appl. Opt.* **46** 4155
 - [11] Tang X G, Liao J K, Li H P, Zhang L, Lu R G, Liu Y Z 2011 *Chin. Opt. Lett.* **9** 012301-1
 - [12] Wong W H, Liu K K, Chan K S 2006 *J. Cryst. Growth* **288** 100
 - [13] Kawano K, Kitoh T 2001 *Introduction to optical waveguide analysis: solving Maxwell's equations and the Schrödinger equation* (New York: John Wiley & Sons, Inc.) p20
 - [14] Jin J M 2002 *The Finite Element Method in Electromagnetics* (New York: John Wiley & Sons Inc.) p19

Design of tunable optical power splitter based on thermal expansion effect*

Tang Xiong-Gui[†] Liao Jin-Kun Li He-Ping Liu Yong Liu Yong-Zhi

(School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(Received 5 June 2012; revised manuscript received 27 June 2012)

Abstract

The tunable optical power splitter is a key optical component used to dynamically control its optical power at its output ports, which has a wide application in many optical fields. A novel approach to controllable optical power splitter is proposed in this work, which is based on thermal expansion effect resulting in width variation of air gap at the branching point of Y-branch waveguide. The thermal expansion profile and the optical performance are simulated by using the finite element method (FEM). The simulation results show that the tunable optical power splitter can exhibit good performance such as large dynamical range, low dependence of operation wavelength and its optical polarization. In addition, the proposed splitter with a simple structure can be easily designed, fabricated and controlled, which is very useful for potential application in integrated optical system.

Keywords: integrated optics, optical power splitter, thermal expansion effect, controllable performance

PACS: 42.82.-m, 42.82.Gw, 42.82.Et, 42.79.Gn

DOI: 10.7498/aps.62.024218

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60908024, 61077017, 61090393), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (Grant No. ZYGX2011J050).

[†] Corresponding author. E-mail: tangxg@uestc.edu.cn