

全啁啾镜色散补偿的亚 8 fs 钛宝石激光器

范海涛 王胭脂 王兆华 叶蓬 胡国行 秦爽 何会军 易葵 邵建达 魏志义

All chirped mirrors long-term stable sub-8 fs Ti:sapphire oscillator

Fan Hai-Tao Wang Yan-Zhi Wang Zhao-Hua Ye Peng Hu Guo-Hang Qin Shuang He Hui-Jun Yi Kui Shao Jian-Da Wei Zhi-Yi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 144204 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.144204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.144204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2015/V64/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于单个 BBO 晶体载波包络相位稳定的高效率光参量放大器

High efficient CEP-stabilized infrared optical parametric amplifier made from a BBO single crystal

物理学报.2014, 63(21): 214203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214203>

基于多光子脉冲内干涉相位扫描法对飞秒激光脉冲进行相位测量和补偿的研究

Spectral phase measurement and compensation of femtosecond laser pulse based on multi-photon intra-pulse interference phase scan

物理学报.2014, 63(16): 164207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.164207>

环形定子的激光致表面波机理及可视化探测研究

Theoretical and visualization study of laserinduced surface acoustic wave on annular stator

物理学报.2013, 62(22): 224209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.224209>

宽带啁啾镜对的设计和制备

Design and fabrication of broadband chirped mirror pair

物理学报.2013, 62(20): 204207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.204207>

基于全正色散光子晶体光纤的超连续谱光源

Supercontinuum generation based on all normal dispersion photonic crystal fiber

物理学报.2013, 62(18): 184210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.184210>

全啁啾镜色散补偿的亚 8 fs 钛宝石激光器*

范海涛¹⁾ 王胭脂²⁾ 王兆华¹⁾ 叶蓬¹⁾ 胡国行²⁾ 秦爽¹⁾ 何会军¹⁾
易葵²⁾ 邵建达²⁾ 魏志义^{1)†}

1) (中国科学院物理研究所, 光物理重点实验室, 北京 100190)

2) (中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国科学院强激光材料重点实验室, 上海 201800)

(2014 年 12 月 31 日收到; 2015 年 1 月 28 日收到修改稿)

报道了一种基于全啁啾镜腔内色散补偿的、可长期稳定运行的亚 8 fs 钛宝石激光器. 在 4 W 绿光抽运下, 可获得 300 mW、86 MHz 脉冲输出. 腔内用于色散补偿的两对啁啾镜是国内自主设计自行镀膜的, 其对色散的精确控制可以在腔内不加尖劈对的情况下获得半宽超过 150 nm 超宽带输出. 利用腔外色散补偿, 脉冲宽度被压缩至 7.9 fs, 这是目前采用国产啁啾镜获得的最短脉宽, 也是无尖劈对谐振腔获得的最短脉宽. 同时, 利用电路系统提供实时反馈调节, 可保证钛宝石激光器长期稳定运行, 24 h 内功率抖动约 0.6%.

关键词: 啁啾镜, 钛宝石, 长期稳定, 亚 8 fs

PACS: 42.65.Re, 42.65.Hw, 42.65.Jx

DOI: 10.7498/aps.64.144204

1 引言

1991 年, Spence 等^[1] 利用克尔效应实现了飞秒脉冲输出, 随后钛宝石激光器的脉宽不断缩短并进入到与载波周期可比拟的时间量级. 这种周期量级的飞秒激光在超快光谱学^[2]、强场物理^[3]、时间频率基准^[4] 等方面有广泛的应用. 2008 年, Crespo 等^[5] 从钛宝石振荡器中直接获得了 4.9 fs 的脉冲. 国内也已报道了最短 7 fs 的脉冲^[6], 然而这些结果都是基于进口啁啾镜, 并在腔内插入尖劈对进行腔内色散补偿而获得的. 使用国内自主镀膜的啁啾镜搭建的钛宝石激光器, 已报道的最短脉宽为 9.7 fs^[7], 但是其功率和效率较低. 近年来, 人们在追求更短脉宽、更高功率的同时, 也在不断地将钛宝石振荡器实用化和小型化. 但利用克尔效应锁模获得飞秒脉冲, 锁模状态易受外界环境干扰而打断, 且一旦被打断无法自动重新启动. 因此在复杂环境中保证锁模序列的稳定性对于长期实验和工程应用至关重要. 此外, 脉宽小于 10 fs 的振荡

器^[8-11] 由于需要特殊设计的啁啾镜, 因此成本更高, 限制了其应用. 本文利用国内自主设计、镀制的啁啾镜进行色散补偿, 同时腔内未插入尖劈对, 有效地降低了成本, 简化了腔型, 获得脉宽 7.9 fs 的锁模脉冲序列, 平均功率 300 mW, 并通过电路反馈系统提高了激光系统功率稳定性, 24 h 内功率抖动为 0.6%.

2 实验

图 1 是全啁啾镜补偿色散钛宝石激光器的光路结构示意图. 增益介质是一块长度为 4 mm 的高掺杂的布儒斯特角切割的钛宝石晶体, 质量因数大于 100, 对 532 nm 波长激光的吸收系数为 6.75 cm^{-1} ; 抽运源是一台腔内倍频的全固态掺钕钒酸钪绿光连续激光器, 最大功率为 5 W; M7 和 M8 为 -70 fs^2 国产凹面啁啾镜对, 曲率半径为 100 mm, 背对钛宝石的一面镀有 532 nm 减反射膜, 透过率 $> 99\%$, 其与提供 -100 fs^2 的国产平面

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2013CB922402)、国家重大科学仪器设备开发专项基金 (批准号: 2012YQ120047) 和国家自然科学基金 (批准号: 11174361) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zywei@iphy.ac.cn

啾啾镜对 M4 和 M5, 共同用来补偿谐振腔内晶体和空气引入的正啾啾, 制备的啾啾镜对色散的控制使得谐振腔在不安装石英尖劈对的情况下, 净色散可接近零, 简化了腔型结构; M6 和 M9 是没有啾啾的平面镜. OC 是透过率 10%、带宽为 700—900 nm 的国产耦合输出镜, 其输出率是特殊设计的: 输出率过高, 会导致腔内功率下降, 减弱自相位调制效应, 无法获得超宽带光谱; 而过低的输出率则会导致腔内功率过高, 引发双脉冲、直流等效应.

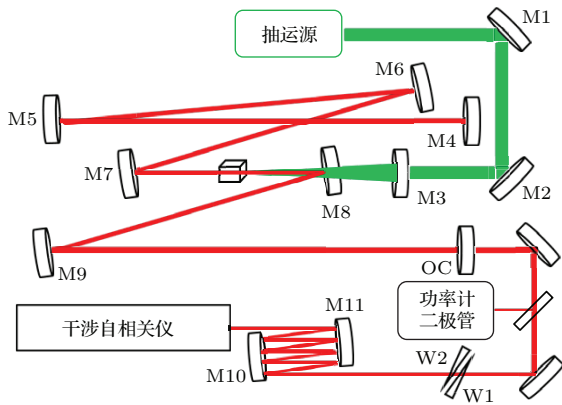


图 1 全啾啾镜补偿色散钛宝石激光器的光路结构示意图
Fig. 1. Schematic layout of all chirped mirror Ti:Sapphire oscillator.

实验中, 在 4 W 绿光抽运下, 谐振腔可以输出大于 1 W 的 800 nm 连续光. 改变晶体与两个凹面镜之间的距离, 谐振腔进入锁模区. 微调两个凹面镜的位置, 增加腔内的自相位调制效应, 轻推固定 M5 镜的平移台, 可以实现锁模, 锁模序列的频域特性如图 2 所示, 其重复频率为 86 MHz.

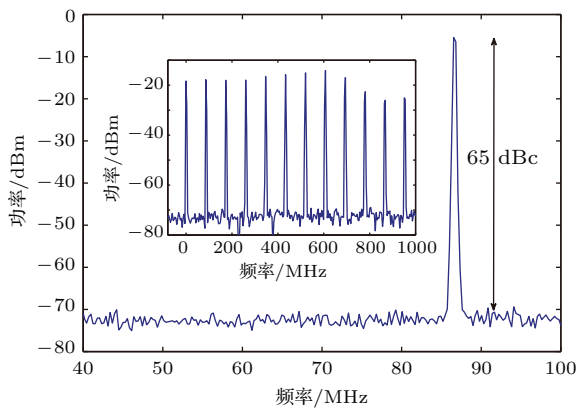


图 2 锁模脉冲频域特性

Fig. 2. Frequency domain properties of the mode-locked pulses.

图 3(a) 和图 3(b) 分别给出了不同介质在钛宝 石荧光光谱范围内引入的二阶和三阶色散, 表 1 列

出了激光腔内外各元件使用的材料及其在 800 nm 中心波长处的二阶和三阶材料色散值. 空气引入的色散量微乎其微, 相同长度下其色散量与钛宝石和熔石英差三个数量级, 但在钛宝石激光器内部, 空气与钛宝石、熔石英的长度也相差三个数量级, 所以 对于周期量级的脉冲进行色散控制, 空气的色散也是不可忽视的.

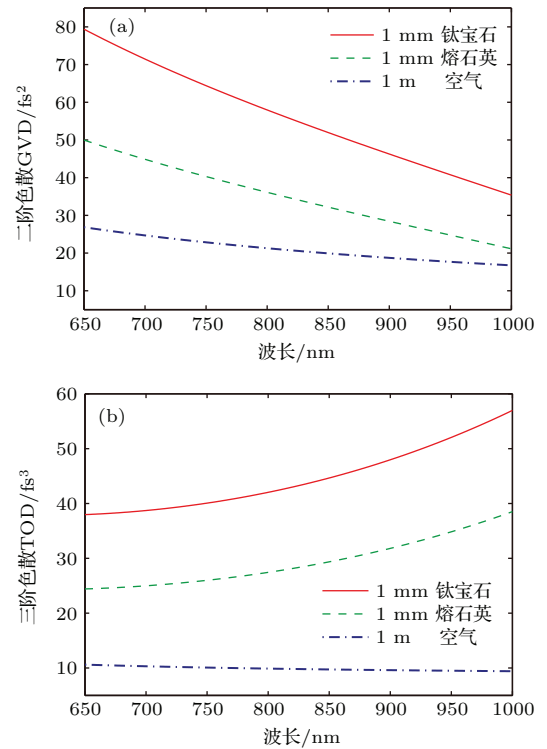


图 3 不同介质材料单位长度引入的色散量 (a) 钛宝石、熔石英和空气单位长度引入的二阶色散量; (b) 钛宝石、熔石英和空气单位长度引入的三阶色散量

Fig. 3. Dispersion introduced by different materials per unit length: (a) GVD introduced by Ti:Sapphire, fused silica and air per unit length; (b) TOD introduced by Ti:Sapphire, fused silica and air per unit length.

表 1 激光器内外各元件在中心波长处引入的色散
Table 1. Dispersion introduced by laser components at central wavelength.

元件	材料	厚度	二阶色散	三阶色散
增益介质	钛宝石	4 mm	58 fs ² /mm	42 fs ³ /mm
输出镜	熔石英	2 mm	36 fs ² /mm	27.4 fs ³ /mm
尖劈对	熔石英	~2 mm	36 fs ² /mm	27.4 fs ³ /mm
谐振腔	空气	~2 m	21.3 fs ² /m	9.9 fs ³ /m

精细控制腔内啾啾镜引入的色散量, 激光器输出光谱(图 4(a) 蓝色实线)底宽覆盖

650—1000 nm, 半宽超过 150 nm, 支持 6.6 fs 的傅里叶转换极限脉冲(图 4(b) 蓝色实线). 腔内振荡的激光经输出镜、空气及相关仪器的分束片等材料后, 会引发脉冲展宽, 故需要在腔外加装色散元件对色散进行预补偿. 腔外色散元件包括一对 -50 fs^2 的啁啾镜和一对石英尖劈提供可调整正色散. 激光在每片啁啾镜上反射 4 次, 一共引入约 -400 fs^2 的负色散, 尖劈楔角为 $2^\circ 48'$, 最薄处厚度为 $200 \mu\text{m}$, 可以提供 $14\text{—}140 \text{ fs}^2$ 连续可调的二阶正色散.

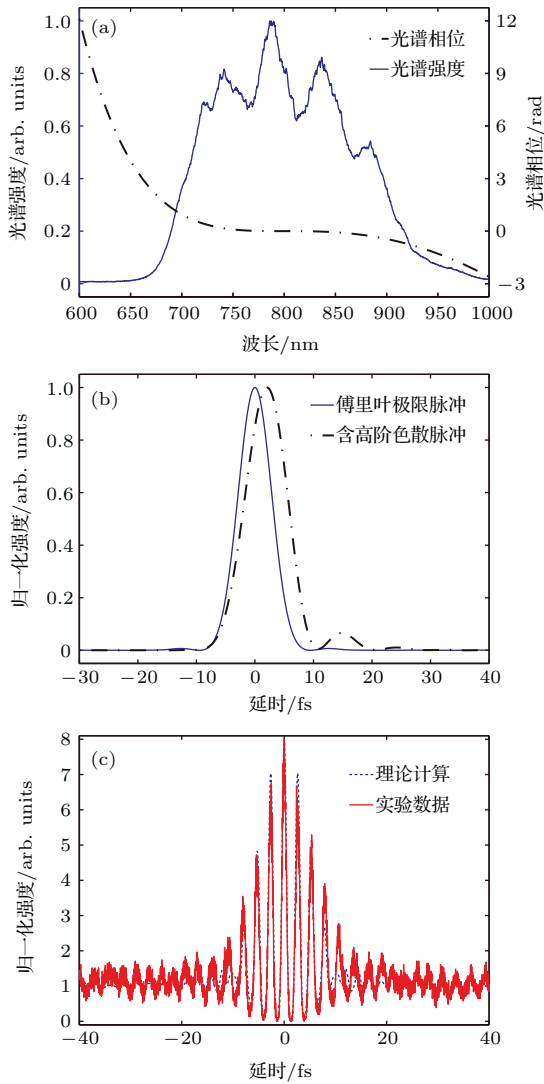


图 4 (网刊彩色) 钛宝石激光器输出参数及理论模拟 (a) 光谱强度实验数据和光谱相位理论计算; (b) 傅里叶极限脉冲和含高阶色散脉冲波形; (c) 干涉自相关实验数据与理论计算对比图

Fig. 4. (color online) Output parameters of the oscillator and theoretical simulation results: (a) spectrum of the laser and calculated spectral phase; (b) envelope profile of F.T. limited pulse and pulse with high order dispersion; (c) experimental data and theoretical calculation of the interferometric auto-correlation.

当输出激光的二阶色散得以较好地补偿时, 三阶色散对脉冲包络和脉宽产生较大影响. 图 4(b) 黑色虚线是具有 150 fs^3 的三阶色散的脉冲的时域波形. 可以看出, 由于三阶色散的影响, 脉冲对称性被破坏, 脉冲尾部有较剧烈的振荡. 对该脉冲进行干涉自相关, 其信号如图 4(c) 蓝色虚线所示, 其与商用的干涉自相关仪(Femtolasers Produktions GmbH)测得的干涉自相关曲线(图 4(c) 红色实线)高度吻合, 曲线半高宽内包含 5.5 个干涉条纹. 此时钛宝石激光器输出脉冲的二阶色散已被完全补偿, 但是腔内外透射元件引入的三阶材料色散以及钛宝石晶体中自相位调制效应引入的高阶色散, 使得脉冲从傅里叶极限脉宽(图 4(b) 蓝色实线)展宽至约 7.9 fs.

克尔效应锁模虽然可以获得脉宽极短的脉冲, 但其对环境较为敏感, 机械振动、温度变化等都会影响锁模状态. 大振幅的机械振动会导致锁模状态终止, 而温度慢飘将影响锁模功率. 针对这两个因素, 我们分别从结构设计和电路控制两方面, 被动和主动地保障激光器稳定运行. 利用一体化密闭机壳设计, 将抽运源和谐振腔集成在同一块底板上, 可有效地减弱其相对振动. 此外, 谐振腔内除了端镜和输出镜以外, 全部使用小型不可调镜架, 使用厚径比大的镜片, 以减弱温度漂移热胀冷缩对镜片指向的影响.

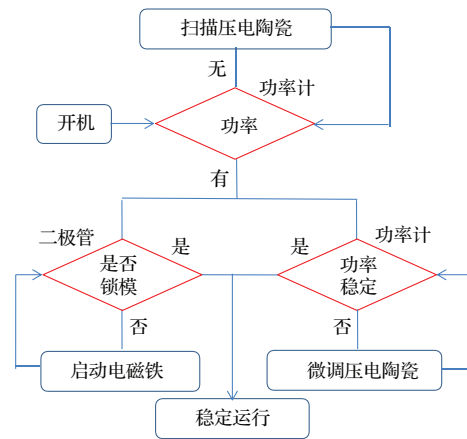


图 5 电路反馈逻辑图

Fig. 5. Logic of electronic feed-back loop.

与此同时, 我们设计了电路反馈系统, 其逻辑如图 5. 在图 1 中抽运光伺服镜 M1 上安装两个压电陶瓷(伸长量为 $9.1 \mu\text{m}$), 分别从水平和竖直两个维度精确控制反射镜的姿态. 在输出镜后增加石英分束片分出约 1% 的功率, 进行功率和锁模信号探

测. 在固定啁啾镜 M5 的平移台上安装管式电磁铁 (GCT25/30), 当由于空气扰动或机械振动锁模状态被打断时, 光电二极管可以立即探测到该变化, 并通过控制电路启动电磁铁, 推动平移台重新启动锁模; 而当由于温湿度漂移等原因激光功率有所下降时, 功率计可以立即探测到功率变化, 并通过电路控制压电陶瓷的伸长量, 微调抽运光的指向, 将激光功率恢复至最大值, 从而保证激光器长期稳定运行在同一锁模状态下.

如图 6 所示, 我们测试了 24 h 内钛宝石激光器的功率稳定性. 当不加装压电陶瓷时, 由于昼夜温度变化导致输出功率有较大漂移, 约为 1.6%; 而加装压电陶瓷进行实时负反馈, 输出功率的漂移减弱到约 0.6%.

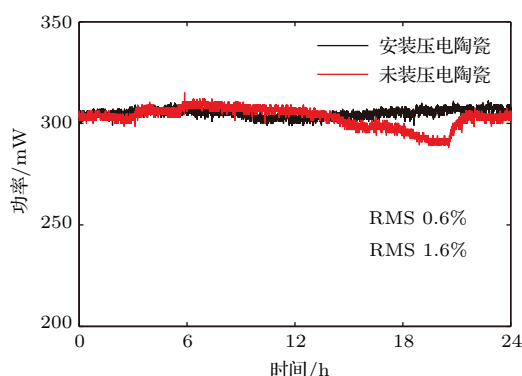


图 6 (网刊彩色) 功率稳定性对比

Fig. 6. (color online) Power stability of the oscillator with/without piezoelectric ceramics.

3 结 论

本文利用两对国产啁啾镜对, 在腔内不加石英尖劈对的情况下获得超宽带光谱输出, 进行腔外脉冲压缩后获得 7.9 fs 激光输出. 据我们所知, 该结果为国产啁啾镜获得的最短脉宽^[12,13]. 此外, 不插入尖劈对的设计大大简化了腔型结构, 同时提高了系统稳定性, 7.9 fs 同时也是腔内无尖劈的钛宝石激光振荡器获得的最短脉宽. 分别通过结构设计和反馈控制, 从被动和主动两方面消除机械振动、温

度漂移等引入的不稳定性, 实现了钛宝石激光器的长期稳定运行, 24 h 内功率抖动约 0.6%.

感谢北京大学物理学院赵研英博士、中科院物理所沈忠伟博士的有益讨论.

参考文献

- [1] Spence D E, Kean P N, Sibbett W 1991 *Opt. Lett.* **16** 42
- [2] Gilbertson S, Chini M, Feng X, Khan S, Wu Y, Chang Z 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 263003
- [3] Zhao K, Zhang Q, Chini M, Wu Y, Wang X, Chang Z 2012 *Opt. Lett.* **37** 3891
- [4] Udem T, Holzwarth R, Hansch T W 2002 *Nature* **416** 233
- [5] Crespo H M, Birge J R, Falcao-Filho E L, Sander M Y, Benedick A, Kartner F X 2008 *Opt. Lett.* **33** 833
- [6] Zhao Y Y, Wang P, Zhang W, Tian J R, Wei Z Y 2007 *Sci. China: Phys. Mech. Astron.* **37** 123 (in Chinese) [赵研英, 王鹏, 张炜, 田金荣, 魏志义 2007 中国科学 G **37** 123]
- [7] Song Y J, Hu M L, Wang Y Z, Shao J D, Jin Y X, Chai L, Fan X Z, Wang Q Y 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 3215 (in Chinese) [宋有建, 胡明列, 王胭脂, 邵建达, 晋云霞, 柴路, 范修正, 王清月 2010 光学学报 **30** 3215]
- [8] Zhang Q, Zhao Y Y, Wei Z Y 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 044208
- [9] Zhang L, Han H N, Zhang Q, Wei Z Y 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 114208
- [10] Jung I D, Kartner F X, Matuschek N, Sutter D H, Morier-Genoud F, Zhang G, Keller U 1997 *Opt. Lett.* **22** 1009
- [11] Morgner U, Kartner F X, Cho S H, Chen Y, Haus H A, Fujimoto J G, Ippen E P 1999 *Opt. Lett.* **24** 411
- [12] Wang Y Z, Shao J D, Yi K, Qi H J, Wang D, Leng Y X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 204207 (in Chinese) [王胭脂, 邵建达, 易葵, 齐红基, 王玓, 冷雨欣 2013 物理学报 **62** 204207]
- [13] Liao R, Wen J H, Liu Z G, Deng L, Zhang H C, Lai T S, Lin W Z 2002 *Chin. Sci. Bull.* **47** 345 (in Chinese) [廖睿, 文锦辉, 刘智刚, 邓莉, 张海潮, 赖天树, 林位株 2002 科学通报 **47** 345]

All chirped mirrors long-term stable sub-8 fs Ti:sapphire oscillator*

Fan Hai-Tao¹⁾ Wang Yan-Zhi²⁾ Wang Zhao-Hua¹⁾ Ye Peng¹⁾ Hu Guo-Hang²⁾
Qin Shuang¹⁾ He Hui-Jun¹⁾ Yi Kui²⁾ Shao Jian-Da²⁾ Wei Zhi-Yi¹⁾†

1) (Key Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2) (Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

(Received 31 December 2014; revised manuscript received 28 January 2015)

Abstract

A long-term stable sub-8 fs Ti:sapphire oscillator based on domestic chirped mirrors is reported. It outputs 300 mW mode-locked pulses at 86 MHz under 4 W pump power. The second order and third order of dispersion introduced by the components of the oscillator are analyzed. Two pairs of domestically designed and fabricated chirped mirrors are utilized to compensate the dispersion introduced by the crystal and the air in cavity. By precisely controlling the dispersion of chirp mirrors, the output pulses have an ultra-broad bandwidth exceeding 150 nm (FWHM) without the insertion of wedges. With the assistance of extra-cavity dispersion compensation, a pulse duration of 7.9 fs is achieved. This is the shortest pulse duration ever reported by using domestic chirped mirrors, and the shortest pulse duration achieved without intra-cavity wedges, to the best of our knowledge. Structure design and electronic feed-back loops are employed to improve the stability of the oscillator passively and actively, respectively. With the assistance of piezoelectric ceramic, the power stability within 24 h is measured to be 0.6%, which is significantly better than that without them.

Keywords: chirped mirrors, Ti:sapphire, long-term stable, sub-8 fs

PACS: 42.65.Re, 42.65.Hw, 42.65.Jx

DOI: 10.7498/aps.64.144204

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2013CB922402), the Special Foundation of State Major Scientific Instrument and Equipment Development of China (Grant No. 2012YQ120047), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11174361).

† Corresponding author. E-mail: zywei@iphy.ac.cn