



单脉冲时间精确可控的单纵模Nd:YAG激光器

戴殊韬 江涛 吴丽霞 吴鸿春 林文雄

Single-axial-mode Nd:YAG laser with precisely controllable laser pulse output time

Dai Shu-Tao Jiang Tao Wu Li-Xia Wu Hong-Chun Lin Wen-Xiong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 134202 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190393

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190393>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用于汤姆孙散射诊断的高重复高光束质量焦耳级Nd:YAG纳秒激光器

High repetition rate and high beam quality joule level Nd: YAG nanosecond laser for Thomson scattering diagnosis

物理学报. 2016, 65(15): 154204 <https://doi.org/10.7498/aps.65.154204>

用于空间碎片探测的百赫兹3.31 J高光束质量全固态Nd: YAG激光器

A 100 Hz 3.31 J all-solid-state high beam quality Nd:YAG laser for space debris detecting

物理学报. 2017, 66(5): 054205 <https://doi.org/10.7498/aps.66.054205>

基于单壁碳纳米管调Q锁模低阈值Tm,Ho:LiLuF4激光器

Passively Q-switched mode-locked low threshold Tm, Ho: LLF laser with an single walled carbon nanotubes saturable absorber

物理学报. 2018, 67(1): 014201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171748>

双波长二极管合束端面抽运掺镨氟化钪锂单纵模360 nm紫外激光器

Combined dual-wavelength laser diode beam end-pumped single longitudinal mode Pr³⁺:LiYF₄ 360 nm ultraviolet laser

物理学报. 2019, 68(5): 054202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182018>

双重复频率锁模Yb:YAG陶瓷激光器

Dual repetition-rate mode-locked Yb: YAG ceramic laser

物理学报. 2018, 67(9): 094206 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172345>

Nd:LuYAG混晶1123 nm被动调Q激光器

A diode pumped passively Q-switched Nd:LuYAG laser emitting at 1123 nm

物理学报. 2015, 64(17): 174203 <https://doi.org/10.7498/aps.64.174203>

单脉冲时间精确可控的单纵模 Nd:YAG 激光器*

戴殊韬¹⁾ 江涛²⁾ 吴丽霞¹⁾ 吴鸿春¹⁾ 林文雄^{1)†}

1) (中国科学院福建物质结构研究所, 中国科学院光电材料化学与物理重点实验室, 福州 350002)

2) (中国空气动力研究与发展中心, 超高速空气动力研究所, 绵阳 621000)

(2019年3月19日收到; 2019年4月10日收到修改稿)

报道了一种单脉冲输出时间精确可控的单纵模 Nd:YAG 激光器. 该激光器谐振腔采用自滤波非稳腔结构得到 TEM₀₀ 模, 利用磷酸钛氧铷电光晶体作为相位调制器来扫描腔长, 通过种子注入的扫描-保持-触发技术锁定腔模, 得到稳定的单脉冲输出时间精确可控的单纵模输出. 该 1064 nm 激光器输出脉冲能量为 50 mJ, 脉冲建立时间 48 ns, 单脉冲输出时间抖动小于 1%. 用波长计 WS7 测量脉冲的波长和线宽, 测量结果显示, 波长计干涉仪干涉条纹清晰光滑, 是典型的多光束干涉波形, 显示波长为 1064.40416 nm, 线宽 < 0.5 pm (波长计的极限分辨率). 同时以 0.1 Hz 的工作频率连续记录了 1700 发脉冲的波长, 波长抖动小于 0.1 pm (峰峰值).

关键词: 单纵模, 种子注入, 相位调制, 电光调 Q

PACS: 42.55.-f, 42.55.Rz, 42.60.Fc, 42.60.Gd

DOI: 10.7498/aps.68.20190393

1 引言

单纵模脉冲激光器在非线性频率变换、激光雷达、激光光谱学等领域有着非常重要的应用^[1-5]. 种子注入技术是实现单纵模输出最便捷最可靠的方法, 种子注入的基本思路是将一束频率特性优良的窄线宽低功率激光注入到高增益的从动激光器腔内, 以控制从动激光器输出激光的频率特性, 最终得到单纵模的输出.

种子注入技术有两种常用的方法. 一种是建立时间最小的方法^[6,7], 由于在种子注入的情况下, 单纵模激光脉冲的建立时间小于多纵模激光脉冲, 因此根据上一发激光脉冲的建立时间对激光器腔长进行相应的调整, 使得激光脉冲建立时间保持最小, 这样输出的激光就是单纵模的. 从上述技术原理可以看出, 对腔长的反馈控制是在每一个脉冲产生之后才进行的, 这种方法要求激光的输出要有很

好的继承性, 即激光器不能工作在诸如较大振动、剧烈温升或者强烈气流扰动的环境. 还有另一种是扫描-探测方法^[8,9], 该方法是在每一个激光器调 Q 前对谐振腔腔长进行快速扫描, 同时观察种子光经过从动腔之后的干涉信号, 检测到干涉峰时即表明从动腔纵模频率与种子光频率匹配. 采用这种方法控制的种子注入激光器基本能保持 100% 的单纵模概率, 并且具有很强的抗干扰能力. 但是传统的谐振探测技术也存在缺点, 主要在于每一周期内检测到谐振峰值的时间是不固定的, 给后续系统的时间同步带来困难.

为了解决这个问题, Walther 等^[10] 在种子注入的钛宝石激光器上提出了一种叫扫描-保持-触发的方法实现单纵模输出, 该方法与扫描-触发类似, 只是在检测到干涉峰值时没有马上打开 Q 开关, 而是根据干涉信号的幅度对扫描电压进行反馈控制, 使干涉信号保持在峰值, 然后反馈控制过程持续到一个预设的时间点后打开 Q 开关, 由于打开

* 国家重点研发计划 (批准号: 2016YFB0701000, 2017YFB1104500) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wxlin@fjirsm.ac.cn

Q 开关的时间可以精确设定, 因此激光脉冲输出的时间可以精确控制. 不过由于扫描腔长是通过加载在压电陶瓷上的电压来实现的, 压电陶瓷的非线性响应和振铃效应, 使得反馈精度降低, 反馈时间加长, 影响频率稳定. 周军^[11] 将该方法用在 Nd:YAG 激光器上, 但是由于压电陶瓷的非线性效应, 输出的频率不够稳定, 不时出现多纵模的成分. Hovis 等^[12] 用磷酸钛氧铷 (RTP) 晶体代替压电陶瓷作为腔内电光相位调制器, 采用扫描-触发的纵模锁定方法, 但是纵模输出不够稳定, 不时会有双纵模出现. 张俊旋等^[13,14] 也用电光晶体作为 Nd:YAG 激光器腔内相位调制器, 采用扫描-延时-触发的方法得到单纵模脉冲输出. 该锁定方法由时序控制系统在每个脉冲结束后对扫描电压起始时刻相对泵浦脉冲起始时刻的延时量进行反馈控制, 使得每次 Q 开关打开时处于泵浦脉冲后沿相同时刻, 因此不适合单脉冲输出的情况.

我们曾在自滤波非稳腔 (SFUR) 内采用 RTP

晶体作为相位调制器^[15], 使用扫描-触发的方法, 得到高光束质量窄线宽的单纵模输出. 本文对该技术做进一步的改进, 在 SFUR 腔内采用扫描-保持-触发的方法, 利用 RTP 电光晶体调谐腔长, 得到单脉冲输出时间精确可控的单纵模输出. 该激光器将作为光参量振荡器的泵浦源, 得到可调谐的紫外窄线宽光源^[16,17], 用于高超声速流场的光学诊断.

2 实验

种子注入的单纵模 Nd:YAG 激光器实验装置如图 1 所示. 种子源是一个商用的窄线宽 1064 nm 非平面环形腔固体激光器 (Coherent, Mephisto S200SE), 最高输出功率 200 mW, 线宽仅 1 kHz. 种子源后面跟一个 40 dB 隔离度的法拉第隔离器 (THORLABS, IO-5-1064-VHP) 防止后向脉冲激光损坏种子源, 一个二分之一波片将种子光的偏振方向转到 S 光方向, 由布儒斯特偏振片注入从动腔.

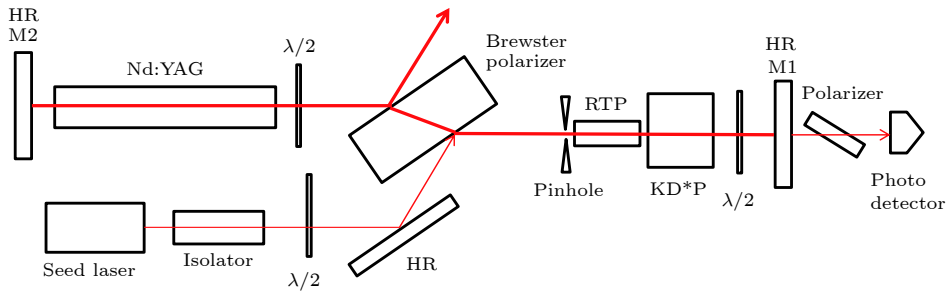


图 1 种子注入单纵模 Nd:YAG 激光器

Fig. 1. Schematic of the injection-seeded single-frequency Nd:YAG laser.

从动腔为 SFUR 结构^[18,19], SFUR 腔为实共焦非稳腔, 共焦处放置一滤波小孔, 小孔直径 (d) 的选择使得入射到它上面的平面波被反射镜 M1 聚焦成相同直径的埃里斑. 据此可以得到小孔光阑直径为

$$d = 2(0.61\lambda f_1)^{1/2}, \quad (1)$$

式中 f_1 为反射镜 M1 的焦距, λ 为激光波长, 反射镜 M1 的聚焦和光阑的衍射效应相互抵消, 使得焦平面处的热斑完全消除. 光阑和反射镜 M1 共同起到低通空间滤波器的作用, 因此能够得到光滑无调制的 TEM₀₀ 模空间分布. 腔内放一 RTP 电光晶体作为相位调制器调谐腔长, 代替传统的安装在腔镜上的压电陶瓷. 大约 1% 的种子光由 M1 全反镜漏出, 被光电探测器接收, 用于扫描-保持-触发技术

进行腔长控制和模式锁定, 来实现单纵模的输出.

扫描-保持-触发技术工作过程如下: 在每个泵浦周期内, 当腔内反转粒子数密度达到最高时, 对 RTP 晶体进行线性电压扫描, 同时对光电探测器探测到的干涉信号进行峰值检测, 在检测到干涉峰值时输出一个信号给晶体电压扫描电路, 该触发信号控制晶体电压扫描电路使得晶体的电压保持在该电压值上, 直到一个预设的时间点时触发 Q 开关, 激光脉冲输出.

3 实验结果与讨论

图 2 给出了扫描-保持-触发技术实际工作时的扫描电压信号和干涉信号, 由于电路系统的延时导

致了从检测到峰值到晶体扫描电压保持时,干涉信号从峰值下降了 10% 左右,相当于约 7 MHz 的失谐量,为了补偿这个失谐量,可以旋转光电探测器前的偏振片一定角度进行光学补偿^[20]. 其后干涉信号随扫描电压保持在了一个水平的位置. 实际工作时,7 MHz 的失谐量不会影响种子的成功注入.

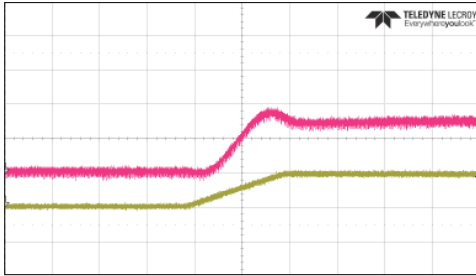


图 2 扫描-保持-触发技术实际工作过程波形图
Fig. 2. Waveform of the working of the ramp-hold-fire technique.

从图 2 中可以看到,在扫描-保持-触发技术中使用 RTP 晶体相位调制器代替压电陶瓷有很大的优势. 首先,在扫描速度上就提高了很多. 由于压电陶瓷的堆叠结构,扫描速度不能很快,通常在几百伏/几十微秒左右,而 RTP 晶体的响应时间可以忽略不计,完全取决于电路的扫描速度;其次,压电陶瓷是一种铁电材料,位移随电压的变化是非线性的,由于每次扫描到谐振峰所需时间不同,使得压电陶瓷在保持阶段产生与控制电压不一致的位移,引起频率的抖动,而 RTP 晶体产生的相移与电压完全成正比;最后,扫描电压从扫描到保持时的拐角所包含的高频成分会引起压电陶瓷的振荡,会导致谐振腔的不稳定,影响输出频率的稳定.

图 3 是输出脉冲能量随泵浦能量的关系,可以看出种子注入后激光脉冲能量比无种子注入时的

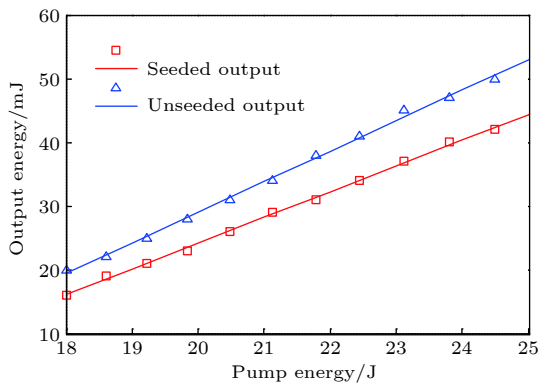


图 3 激光脉冲输出能量随泵浦能量的关系曲线
Fig. 3. Laser output energy with pumped energy.

多纵模能量下降了 20% 左右,这种现象和 BUTR 类似,我们称之为能量最小方法 (energy reduction, ER),也可以作为单纵模锁定判据^[21].

我们也将种子注入前后的脉冲波形同时显示在图 4 中,可以看到没有种子注入时,激光在自发辐射中建立,因此脉冲建立时间较长,为 79 ns,而种子注入后,激光在种子光中建立,脉冲建立时间缩短了 31 ns,为 48 ns,这就是种子注入的 BUTR 现象.

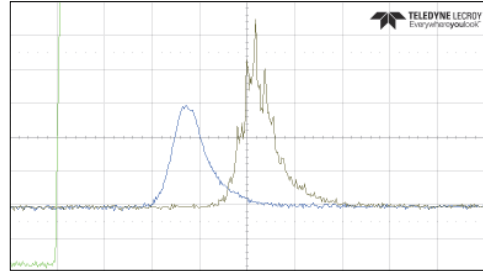


图 4 种子注入前后脉冲波形及建立时间
Fig. 4. Temporal pulse shape of the laser in seeded and unseeded operation.

根据我们对激光器的输出特性的要求,激光脉冲必须是单脉冲输出时间精确可控的,图 5 示出了 100 次单纵模脉冲波形的叠加,重复频率设置为 0.1 Hz,以模拟单脉冲工作模式. 可以看出脉冲形状基本一致,脉冲建立时间抖动 < 1%(RMS),能量计测得的能量抖动 < 1%(RMS),能量稳定性和建立时间稳定性都非常好.

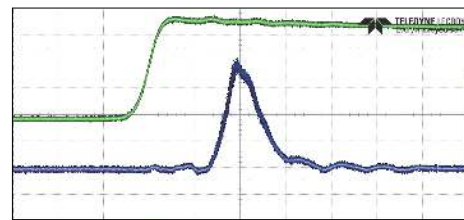


图 5 同步触发 100 次脉冲叠加图
Fig. 5. Temporal spatial of 100 accumulated laser pulse with synchronous trigger.

最后我们用商用的 Fizeau 型波长计 HighFinesse Angstrom WS7 测量输出的激光脉冲波长和线宽,结果如图 6 所示,此波长计含有两块不同精细度的楔形 Fizeau 标准具,图中上半部测得的比较密的干涉图样的是低精度的 Fizeau 标准具,下半部分测得比较疏的干涉图样的是高精度的 Fizeau 标准具,干涉条纹清晰光滑,是典型的多光束干涉波形,

显示波长为 1064.40416 nm, 线宽 < 0.5 pm(波长计的极限分辨率). 同时波长计也记录了激光器连续 1700 发脉冲的波长, 如图 7 所示, 波长抖动小于 0.1 pm(峰峰值).

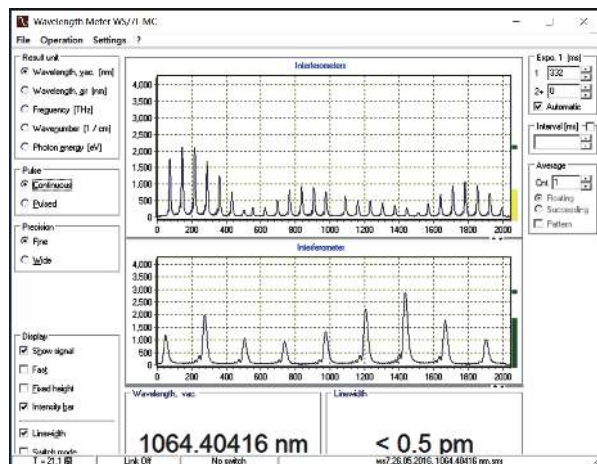


图 6 波长计 WS7 测量结果

Fig. 6. Measurement result of the wavemeter WS7.

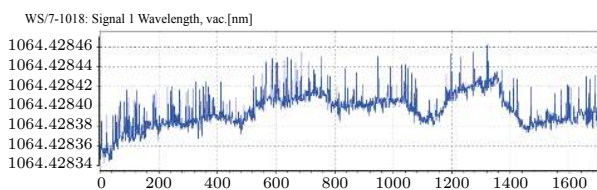


图 7 脉冲波长稳定性

Fig. 7. Laser wavelength stability.

4 结 论

本文选择自滤波非稳腔的激光器谐振腔结构, 采用扫描-保持-触发的种子注入腔模锁定技术, 利用 RTP 电光晶体相位调制器代替压电陶瓷调谐腔长. 电光晶体相位调制器完全消除了压电陶瓷的机械不稳定性、振铃效应和非线性响应问题, 提高扫描-保持-触发时腔模锁定的稳定性, 大大提高了单纵模激光的频率稳定性和建立时间稳定性, 获得了单脉冲时间精确可控的单纵模激光器. 该激光器输

出脉冲能量 50 mJ, 脉冲建立时间 48 ns, 单脉冲输出时间抖动小于 1%. 线宽 < 0.5 pm(波长计的极限分辨率), 波长抖动小于 0.1 pm(峰峰值, 1700 发脉冲).

参考文献

- [1] Kulatilaka W D, Anderson T N, Bougher T L, Lucht R P 2005 *Appl. Phys. B* **80** 669
- [2] Liu Z, Wu S, Liu B 2007 *Opt. Las. Tech.* **39** 541
- [3] Jiang N, Webster M, Lempert W R, Miller J D, Meyer T R, Ivey C B, Danehy P M 2011 *Appl. Opt.* **50** A20
- [4] Kawahara T D, Kitahara T, Kobayashi F, Saito Y, Nomura A 2011 *Opt. Express* **19** 3553
- [5] Luis V, Daniel P E, Daniel M, Jerry L, Daniel J A, Alec M W 2010 *Rev. Sci. Instrum.* **81** 063106
- [6] Schmitt R L, Rahn R A 1986 *Appl. Opt.* **25** 629
- [7] Schroder T, Lemmerz C, Reitebuch O, Wirth M, Wuhler C, Treichel R 2007 *Appl. Phys. B* **87** 437
- [8] Hendersen S W, Yuen E H, Fry E S 1986 *Opt. Lett.* **11** 715
- [9] Fry E D, Hu Q, Li X 1991 *Appl. Opt.* **30** 1015
- [10] Walther T, Larsen M P, Fry E S 2001 *Appl. Opt.* **40** 3046
- [11] Zhou J 2007 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Chinese Academy of Science) (in Chinese) [周军 2007 博士学位论文(北京: 中国科学院)]
- [12] Hovis F E, Culpepper C, Schum T, Witt G 2005 *Lidar Remote Sensing for Industry and Environmental Monitoring V* Honolulu, USA, November 9–11, 2004 p198
- [13] Zhang J, Zhu X, Zang H, Ma X, Yin S, Li S, Chen W 2014 *Appl. Opt.* **53** 7241
- [14] Zhang J X, Zhu X L, Zang H G, Chen W B 2016 *Chin. J. Laser* **43** 0601004 (in Chinese) [张俊旋, 朱小磊, 臧华国, 陈卫标 2016 中国激光 **43** 0601004]
- [15] Dai S T, Wu H C, Shi F, Deng J, Ge Y, Weng W, Lin W X 2018 *Chin. Phys. B* **27** 054212
- [16] Bhuiyan A H, Naik S V, Lucht R P 2010 *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition* Orlando, USA, January 4–7, 2010-1408
- [17] Bhuiyan A H, Richardson D R, Naik S V, Lucht R P 2009 *Appl. Phys. B* **94** 559
- [18] Gobbi P G, Morosi S, Reali G C, Zarkasi A S 1985 *Appl. Opt.* **24** 26
- [19] Koechner W 2006 *Solid-state Laser Engineering* (sixth Ed.) (New York: Springer) p55
- [20] Li F, Lu Z K, Zhao L, Zhang H P, Ding Z H 1998 *Acta Opt. Sin.* **18** 1479 (in Chinese) [李峰, 陆祖康, 赵岚, 张海平, 丁志华 1998 光学学报 **18** 1479]
- [21] Chen S, Lin W, Shi F, Huang J, Li J, Zheng H, Lin J, Xu C 2007 *Chin. Opt. Lett.* **5** 223

Single-axial-mode Nd:YAG laser with precisely controllable laser pulse output time^{*}

Dai Shu-Tao¹⁾ Jiang Tao²⁾ Wu Li-Xia¹⁾
Wu Hong-Chun¹⁾ Lin Wen-Xiong^{1)†}

1) (*Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China*)

2) (*China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China*)

(Received 19 March 2019; revised manuscript received 10 April 2019)

Abstract

In recent years, high-energy single-axial-mode Q-switched lasers have been widely studied and applied because of their wide applications such as in nonlinear optics, laser spectroscopy and light detection and ranging (LIDAR). Many applications require a Q-switched pulse that has not only single axial mode but also can be synchronized with an external system. But two most commonly used methods (the build-up time reducing technique and ramp fire technique) are difficult to achieve single-axial mode operation. In this work, we apply the ramp-hold-fire technique to an injection-seeded Nd:YAG laser. The slave oscillator is a self-filtering unstable resonator (SFUR). The SFUR oscillator can achieve a smooth spatial profile TEM₀₀ transverse mode. An RTP electro-optical crystal is adopted for intracavity phase modulator to modify the effective optical path length of the slave oscillator cavity. The seed-injection locking is realized by the ramp-hold-fire technique. The laser driver generates a pumping pulse. After a suitable time delay the driver is fired, a linear ramp voltage is applied to the RTP crystal. A photodiode detector monitors the interference signal. As soon as the interference peak is detected, the controlling electronics produces a stop signal. The ramp voltage on the RTP crystal is stopped and held at a fixed value. Then the Q-switch is fired at a set time, and finally single axial mode laser is demonstrated. Combining the advantages of intracavity phase modulation and Q-switch exact synchronization of the ramp hold fire technique, we obtain a narrow linewidth single-axial-mode laser pulse with precisely controllable output time. The laser is capable of generating 1064 nm pulse energy large than 50 mJ. The pulse build-up time is reduced by 31 ns to 48 ns. The pulse firing time is precisely controlled with jitter less than 1%. Then the frequency spectrum of the 1064 nm laser is measured with a commercial Fizeau wavemeter HighFinesse WS7. The multi-beam interference patterns of the pulse are shown to be smooth in the wavemeter. The wavelength is measured to be 1064.40416 nm and the linewidth is less than 0.5 pm which is limited by the instrument resolution. Meanwhile, the frequency stability is measured to be less than 0.1 pm (V-V) over 1700 pulses with a working frequency of 0.1 Hz.

Keywords: single frequency, seed injection, phase modulation, electro-optic

PACS: 42.55.-f, 42.55.Rz, 42.60.Fc, 42.60.Gd

DOI: 10.7498/aps.68.20190393

^{*} Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant Nos. 2016YFB0701000, 2017YFB1104500).

[†] Corresponding author. E-mail: wxlin@fjirsm.ac.cn