

# 利用频谱仪提取双反馈混沌半导体激光器的外腔长度密钥\*

梁君生 武媛 王安帮 王云才<sup>†</sup>

(太原理工大学光电工程研究所, 太原 030024)

(2010年8月23日收到; 2011年4月15日收到修改稿)

光反馈半导体激光器产生的高维宽带混沌载波, 应用于光混沌通信系统中. 激光器的外腔长度用作混沌保密通信的附加密钥. 本文实验研究了光反馈混沌半导体激光器外腔长度密钥的识别. 通过对长腔光反馈产生的混沌频谱进行局部放大, 分析其精细结构, 结果表明: 无论是单反馈半导体激光器还是有不同外腔长度比的双反馈半导体激光器, 都可以利用频谱仪直接提取出激光器的外腔长度信息.

**关键词:** 混沌, 双反馈, 外腔长度, 半导体激光器

**PACS:** 42.65.Sf, 42.55.Px, 05.45.-a

## 1 引言

近年来, 利用混沌信号的不可预测性以及类噪声的特性, 可提高通信系统的安全性, 使得混沌在保密通信中的应用价值受到人们关注. 文献 [1] 在电路中实现了混沌同步, 混沌信号在发射端作为信号的载体去传输和编译信号, 在接收端通过混沌同步和解调把信号提取出来 [2,3]. 随后, 人们发现电路产生的混沌带宽较窄, 很难达到数 GHz, 带宽如此窄的混沌信号难以满足当今信息的高速大容量的传输. 于是人们开始把目光转向基于激光器的光混沌通信 [4]. 由于利用光反馈或光电反馈很容易地产生宽带高维的混沌信号 [5-7], 因此它们被广泛应用到混沌通信系统 [8]. 在混沌保密通信中, 激光器的内部参数 (如内腔结构, 中心波长, 阈值电流等) 经常被作为首选密钥, 但是这些参数由激光器生产厂家选择, 限制了使用者可用密钥的空间. 为此许多文献提出用光反馈激光器的外腔长度来作为混沌通信系统的附加密钥 [9,10], 关于其保密性的讨论引发了研究者对腔长提取和隐藏的研究兴趣. 对于

简单的单反馈系统, 研究者发现通过自相关, 互信息以及预测误差分析等方法, 很容易从单反馈半导体激光器产生的混沌时间序列中得到外腔长度密钥 [11-13], 其保密性较差. 为了增强混沌通信系统的安全性, 人们又转向探讨用双反馈产生混沌 [14] 来隐藏腔长. 近来, 有研究者认为双反馈系统的腔长信息仍可以利用自相关或互信息的方法提取出来 [15]; 但也有研究者认为: 在两种特定的反馈方式下, 两个反馈外腔长度相等并且反馈强度也近似相等和外腔长度成整数比的情况下, 可以隐藏外腔长度信息 [16].

我们的前期工作发现, 单反馈时反馈腔的谐振会调制混沌光的功率谱 [17]. 因而推测通过频谱分析, 同样可以提取双反馈的谐振信息. 在本文中, 通过对比半导体激光器分别在单反馈与双反馈情况下的混沌频谱图, 发现在双反馈下半导体激光器产生的混沌频谱存在类似于包络的调制, 证明双反馈两外腔长度成整数比和非整数比时, 都能通过频谱直接获取外腔长度信息. 结果表明, 频域分析比时域分析更为精确和灵敏, 也表明光反馈半导体激光

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60777041)、国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 60908014)、山西省青年科学基金 (批准号: 2009021003)、山西省科技攻关项目 (批准号: 20100321055-02)、太原市科技明星专项 (批准号: 09121007) 和瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金 (批准号: SKLST201015) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: wangyc@tyut.edu.cn

器的外腔长度信息难于消除.

## 2 实验装置及结果

### 2.1 实验装置

双反馈半导体激光器产生的高维混沌的实验装置如图 1 所示. 实验中使用的武汉电信器件有限公司研制生产的半导体激光器 (LDM5S752) 由低噪声电流源进行驱动 (Newport, MODEL 501), 激光器的偏置电流为 33 mA (1.5 倍阈值电流), 工作温度由温度控制器 (ILX-Lightwave, LDT-54102) 监控在 20 °C. 在此状态下激光器的输出光功率 ( $P_0$ ) 为 1.1 mW, 中心波长为 1554 nm, 激光器的弛豫振荡频率在 3 GHz 附近. 光纤耦合器 (FC<sub>1</sub>) 耦合比

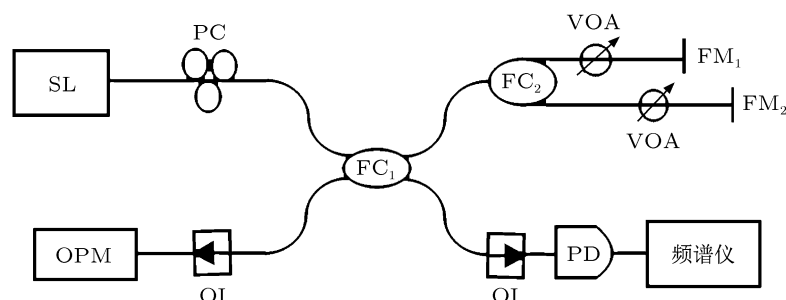


图 1 实验装置图 (SL, 半导体激光器; PC, 偏振控制器; F, 光纤耦合器; VOA, 可调谐光纤衰减器; FM, 光纤反射镜; OI, 光纤隔离器; OPM, 光功率计; PD, 光电探测器)

为便于叙述, 外部反馈腔长和反馈强度分别记为  $L_{1,2}$  和  $FPR_{1,2}$ , 其中下标分别表示反射镜  $FM_1$  和  $FM_2$  形成的光反馈. 反馈强度  $FPR$  定义为  $10 \log(P_1/P_0)$ , 其中  $P_1$  与  $P_0$  分别为反馈光功率与激光器输出功率. 通常腔长为  $L$  的光反馈将诱发频率为  $f = c/2nL$  外腔谐振, 其中  $c$  为光速,  $n = 1.5$  为光纤折射率. 因此, 若要通过频谱分析提取外腔长度信息, 频谱分析仪的分辨率带宽 (RBW) 应当小于外腔谐振频率. 在本文实验中, RBW 设置为 1 kHz.

### 2.2 实验结果

在实验中, 首先研究了单反馈的情形, 如图 2 所示, 设置外腔长为 7.300 m, 反馈强度  $FPR = -13$  dB. 利用频谱仪从 0—8 GHz 频率范围观察, 如图 2 中的插图, 发现混沌的频谱比较光滑平坦, 外腔谐振频率不容易获得. 但是在激光

为 70:30, 其中 70% 端口作为半导体激光器的反射端, 30% 端口作为探测端. 耦合器  $FC_2(50:50)$  将输出光束分成两路, 与光纤反射镜  $FM_1$  和  $FM_2$  组成了半导体激光器的两个外腔从而构成双反馈系统, 当去掉一个光纤反射镜可以很容易将双反馈系统装置变成单反馈实验装置. 可调谐光纤衰减器 (VOA) 和偏置控制器 (PC) 用来控制反馈回半导体激光器的光强和偏振状态. 光纤隔离器 (OI) 是防止仪器端面的反射对半导体激光器产生影响. 光功率计 (OPM) 用来监控反馈回半导体激光器的光强度 ( $P_1$ ). 利用带宽为 47 GHz 超快低暗电流探测器 (u2t, XPDV2020) 将光信号转换为电信号, 并用高扫描速率频谱仪 (Agilent, N9020A) 进行监控分析.

器的弛豫振荡频率附近, 混沌输出的频谱会有明显的浮动. 对弛豫振荡频率附近的频谱进行局部放大观察. 发现混沌频谱被类似于正弦的周期信号所调制, 正弦周期恰好等于激光器的外腔谐振频率  $f$ . 因此, 根据谐振频率与外腔长度间的关系, 即可获得反馈外腔的长度.

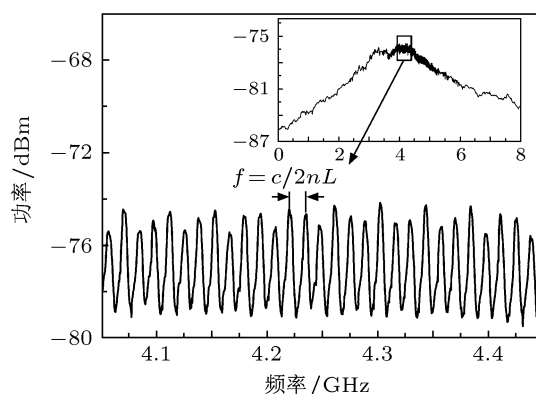


图 2 单反馈频谱图  $L = 7.300$  m, 反馈强度  $FPR = -13$  dB

显然, 该方法提取光反馈混沌半导体激光器外腔长度的误差主要取决于频谱测量的分辨率带宽, 即  $\Delta L = \frac{2nL^2}{c} \text{RBW}$ . 因为  $\text{RBW} = 1 \text{ kHz}$ , 且图 2 中可知谐振频率  $f$  为  $13.698 \text{ MHz}$ , 所以外腔长度的测量结果为  $L = (7.3003 \pm 0.0005) \text{ m}$ . 由此可知, 通过混沌频谱的谐振频率可以准确地提取出单反馈的外腔长度信息.

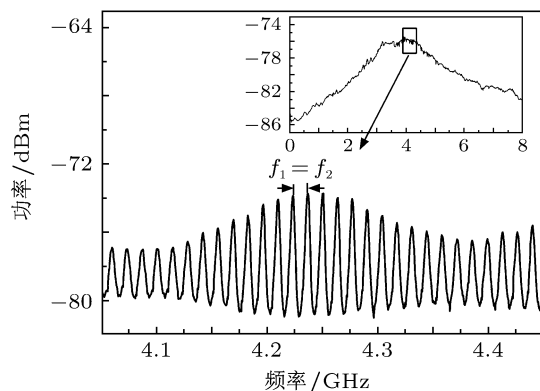


图 3 双反馈频谱图  $L_1 = L_2 = 7.300 \text{ m}$ , 反馈强度  $\text{FPR}_1 + \text{FPR}_2 = -13 \text{ dB}$

进而利用频谱法研究了双反馈的情形. 设置双反馈系统两外腔长度相等均为  $7.300 \text{ m}$ , 两反馈强度近似相等并且  $\text{FPR}_1$  与  $\text{FPR}_2$  的和等于  $-13 \text{ dB}$ . 断开任意一个光纤反射镜可将双反馈系统装置变成单反馈实验装置, 如同上述单反馈的方法, 利用频谱仪分别测得两腔的谐振频率为  $13.698 \text{ MHz}$  和  $13.697 \text{ MHz}$ , 相应的外腔长度为  $7.3003 \text{ m}$  和  $7.3008 \text{ m}$ , 在测量误差范围内, 两腔长度可认为是相等的. 从图 3 等腔长双反馈的混沌频谱图中发现: 外腔反馈产生的谐振峰在频谱图上等间隔均匀分布, 与图 2 单反馈的频谱图相似; 但与其不同之处在于, 双反馈的混沌频谱图中存在明显的类似于包络的调制. 因此, 当两外腔长度相等时, 从存在包络调制的混沌频谱图中, 通过外腔谐振频率即可确定相等的两外腔长度. 从图 3 中可知, 外腔谐振频率  $f_1 = f_2 = 13.698 \text{ MHz}$ , 两反馈外腔长度的测量结果为  $L_1 = L_2 = (7.3003 \pm 0.0005) \text{ m}$ . 而此情形正是文献 [16] 中所用时域分析法不能识别的, 可能的原因是由于混沌的类噪声特性, 不能直接从时序上体现反馈腔的谐振, 而只能通过一些算法 (如自相关、互信息) 对其进行分析处理得到, 但在这些算法中有可能受噪声影响将腔长信息隐藏起来.

图 4 是双反馈两外腔长度为整数比时的频谱图, 实验中  $L_1(7.300 \text{ m}):L_2(14.600 \text{ m}) = 1:2$ . 图 4(a) 为两外腔反馈强度近似相等时 ( $\text{FPR}_1 \approx \text{FPR}_2 \approx -13 \text{ dB}$ ) 的频谱图, 在图 4(a) 频谱图上仍然可以看到双反馈产生的频谱包络,

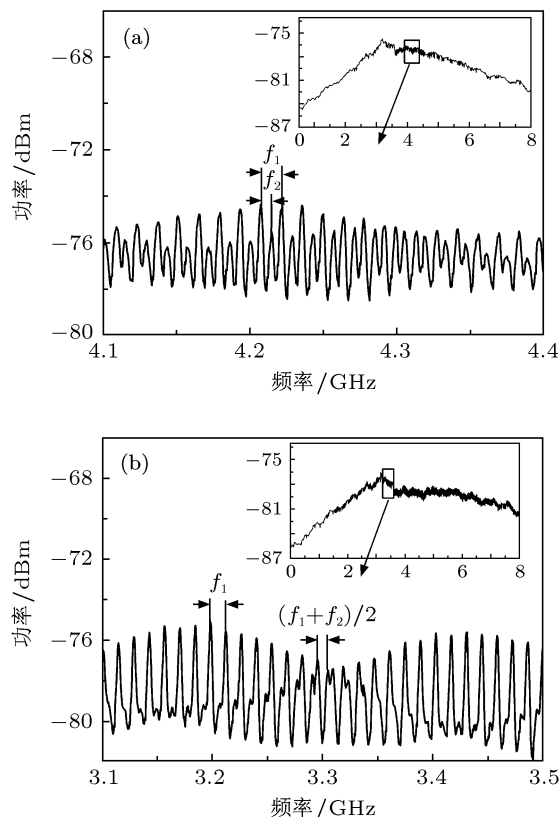


图 4 双反馈频谱图  $L_1 = 7.300 \text{ m}$ ,  $L_2 = 14.600 \text{ m}$  (a)  $\text{FPR}_1 \approx \text{FPR}_2 \approx -13 \text{ dB}$ ; (b)  $\text{FPR}_1 = -13 \text{ dB}$ ,  $\text{FPR}_2 = -17 \text{ dB}$

其中包络的频谱长度和包络之间的频率间隔都是外腔反馈谐振频率的整数倍, 倍数即包络里谐振峰之间的间隔数. 在频谱包络内发现有高低相间的谐振峰, 如图中标注相邻两高低谐振峰之间的频率间隔为  $f_2$ , 两个相邻高谐振峰之间的频率间隔为  $f_1$ . 当反馈强度不等时 ( $\text{FPR}_1 = -13 \text{ dB}$ ,  $\text{FPR}_2 = -17 \text{ dB}$ ) 如图 4(b) 所示, 与反馈强度近似相等时相比, 从插入图中发现反馈强度不等时频谱波动幅度更大; 而从放大的频谱中发现在频谱包络内没有高低相间分布的谐振峰, 只有类似于外腔长度相等情况下的谐振峰分布, 两谐振峰之间的频率间隔等于反馈强度大的反馈外腔产生的谐振频率, 在本实验中为  $f_1$ . 当观察两频谱包络之间的过渡段时, 会发现一个非常有趣

的现象, 就是一个谐振峰会变宽而且发生分叉, 如图 4(b) 中的标记所示在过渡处两分叉的谐振峰之间的频谱间隔为两反馈外腔谐振频率的平均值, 即  $(f_1 + f_2)/2$ . 从图 4 中可得外腔谐振频率  $f_1 = 13.698$  MHz,  $f_2 = 6.849$  MHz, 从而得到腔长信息  $L_1 = 7.3003$  m,  $L_2 = 14.6006$  m, 相应的测量误差为  $\Delta L_1 = 0.0005$  m,  $\Delta L_2 = 0.002$  m, 其测量结果即为  $L_1 = (7.3003 \pm 0.0005)$  m,  $L_2 = (14.601 \pm 0.002)$  m. 因此当反馈外腔长度成整数比时无论反馈强度相等还是不等都可以从频谱包络中计算出半导体激光器的反馈外腔长度, 而不像文献 [16] 中所认为的此种情况下腔长信息可隐藏.

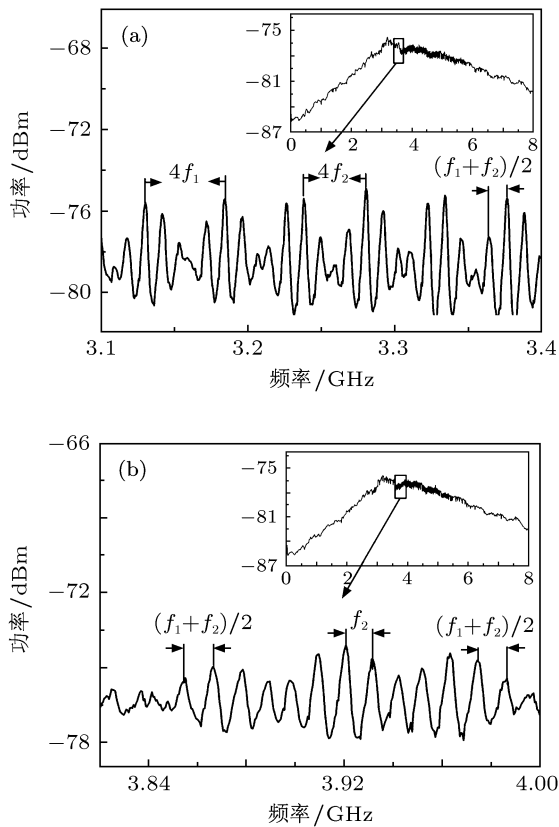


图 5 双反馈频谱图  $L_1 = 7.300$  m,  $L_2 = 9.300$  m  
(a)  $FPR_1 \approx FPR_2 \approx -13$  dB; (b)  $FPR_1 = -13$  dB,  $FPR_2 = -11$  dB

图 5 为反馈外腔长度非整数比情况下的频谱图, 两外腔长度分别为  $L_1 = 7.300$  m,  $L_2 = 9.300$  m. 当两外腔反馈强度近似相等时 ( $FPR_1 \approx FPR_2 \approx -13$  dB), 如图 5(a) 所示, 仍然对频谱的局部放大图进行分析, 发现此情形的频

谱包络比外腔长度成整数倍的频谱包络小, 频谱包络内的谐振峰间隔为两反馈谐振频率的平均值即  $(f_1 + f_2)/2$ , 这与文献 [14] 的实验结果一致. 而两个相邻频谱包络内最高谐振峰之间的频率间隔为外腔谐振频率  $f_1$  或  $f_2$  的整数倍, 倍数等于谐振峰之间的间隔数, 本实验中间隔数为 4, 其中在包络过渡处会出现谐振峰的分叉计算时只算作一个谐振峰如图 5(a) 中的标注所示. 当两外腔反馈强度不等时 ( $FPR_1 = -13$  dB,  $FPR_2 = -11$  dB), 如图 5(b) 所示, 从中可以发现频谱包络内谐振峰之间的频率间隔为反馈强度强的反馈腔产生的谐振频率, 本实验中即谐振频率  $f_2$ , 同时在相邻包络之间的过渡处也发现在过渡区附近两谐振之间的频率间隔为两反馈谐振频率的均值即  $(f_1 + f_2)/2$ . 从图中可得外腔谐振频率  $f_1 = 13.698$  MHz,  $f_2 = 10.752$  MHz, 则其外腔长度为  $L_1 = 7.3003$  m,  $L_2 = 9.3005$  m, 相应的测量误差分别  $\Delta L_1 = 0.0005$  m,  $\Delta L_2 = 0.0008$  m, 即测量结果为  $L_1 = (7.3003 \pm 0.0005)$  m,  $L_2 = (9.3005 \pm 0.0008)$  m. 所以当腔长为非整数比时仍然可以利用频谱仪将两外腔长度提取出来.

### 3 结论

本文从实验方面对长腔双反馈产生的混沌频谱进行了细致的分析, 实验结果表明双反馈会对混沌的频谱进行调制从而产生频谱包络. 在两外腔反馈强度近似相等情况下, 两外腔长度成整数比时两外腔延迟时间都可以从频谱包络内谐振峰分布判断出来, 其中长腔产生的谐振频率按整数比分布在短腔产生的谐振频率内; 两外腔长度比为非整数时频谱包络内谐振峰之间的间隔为两反馈谐振频率的平均值, 相邻频谱包络之间的频率间隔为某一个外腔谐振频率的整数倍. 在两外腔反馈强度不等情况下, 频谱包络内的谐振峰之间的间隔等于反馈强度强的外腔产生的谐振频率, 在频谱包络过渡处的两谐振峰之间的间隔为两反馈谐振频率的平均值. 所以本文从实验上证明了长腔双反馈的外腔长度信息是不可消除的. 本文的工作对研究半导体激光器的双反馈混沌动态特性以及混沌保密通信的安全性是有益的.

- [1] Pecora L M, Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821
- [2] Cuomo K M, Oppenheim A V 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 65
- [3] Kim C M, Kye W H, Rim S, Lee S Y 2004 *Phys. Lett. A* **333** 235
- [4] Li X F, Pan W, Luo B, Ma D 2006 *IEEE J. Quantum Electron.* **42** 953
- [5] Vicente R, Daudén J, Colet P, Toral R 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 541 .
- [6] Kong L Q, Wang A B, Wang H H, Wang Y C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2266 (in Chinese) [孔令琴, 王安帮, 王海红, 王云才 2008 物理学报 **57** 2266]
- [7] Zhao Y F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6058 (in Chinese) [赵严峰 2009 物理学报 **58** 6058]
- [8] Argyris A, Syvridis D, Larger L, Annovazzi-Lodi V, Colet P, Fischer I, Garcia-Ojalvo J, Mirasso C R, Pesquera L, Shore K A 2005 *Nature* **437** 343
- [9] Annovazzi-Lodi V, Merlo S, Norgia M, Scirè A 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 117
- [10] Paul J, Sivaprakasam S, Spencer P S, Shore K A 2003 *J. Opt. Soc. Am. B* **20** 497
- [11] Hegger R, Büchner M J, Kantz H, Giaquinta A 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 558
- [12] Udaltsov V S, Goedgebuer J P, Larger L, Cuenot J B, Levy P, Rhodes W T 2003 *Phys Lett. A* **308** 54
- [13] Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, Citrin D S, Ortin S 2009 *IEEE J. Quantum Electron.* **45** 879
- [14] Lee M W, Rees P, Shore K A, Ortin S, Pesquera L, Valle A 2005 *IEE Proc. Optoelectron.* **152** 97
- [15] Locquet A, Ortin S, Udaltsov V, Larger L, Citrin D S, Pesquera L, Valle A 2006 *Proc. of SPIE* **6184** 61840L
- [16] Wu J G, Xia G Q, Wu Z M 2009 *Opt. Express* **17** 20124
- [17] Wang Y C, Liang J S, Wang A B, Zhang M J 2010 *Electron. Lett.* **46** 1621

## Extracting the external-cavity key of a chaotic semiconductor laser with double optical feedback by spectrum analyzer\*

Liang Jun-Sheng Wu Yuan Wang An-Bang Wang Yun-Cai<sup>†</sup>

(Institute of Optoelectronic Engineering, Dept. of Physics & Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(Received 23 August 2010; revised manuscript received 15 April 2011)

### Abstract

Optical-feedback laser diode has been widely applied in chaotic optical communication, because it can simply generate wideband and high-dimension chaos and its external-cavity length is often regarded as an additional key. In this paper, it is experimentally demonstrated that the time delay signature of a chaotic laser diode with optical feedback can be identified. Through locally enlarging the power spectrum of chaotic light and observing its fine structure, the external-cavity key can be directly extracted by the spectrum analyzer, regardless of the laser diode with single or dual optical feedback of a different external cavity length ratio.

**Keywords:** chaos, double feedback, external-cavity length, semiconductor lasers,

**PACS:** 42.65.Sf, 42.55.Px, 05.45.-a

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60777041), the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60908014), the Natural Science Foundation of Shanxi Province, China (Grant No. 2009021003), the Key Research Project of Science and Technology of Shanxi, China (Grant No. 20100321055-02), the Taiyuan Science and Technology Stars Project of China (Grant No. 09121007), and the Open Research Fund of State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. SKLST 201015).

<sup>†</sup> E-mail: wangyc@tyut.edu.cn