

单片集成放大反馈激光器的脉冲包络动力学实验研究

陈熙 赵玲娟 陈建军 王会苹 吴正茂 陆丹 夏光琼

Experimental investigations on the dynamical characteristics of pulse packages in a monolithically integrated amplified feedback laser

Chen Xi Zhao Ling-Juan Chen Jian-Jun Wang Hui-Ping Wu Zheng-Mao Lu Dan Xia Guang-Qiong

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 214209 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.214209

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.214209>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2016/V65/I21>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

硅基光源的研究进展

[Research progress of silicon light source](#)

物理学报.2015, 64(20): 204208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64>.

硅基槽式微环谐振腔型偏振解复用器全矢量分析

[Full-vectorial analysis of a polarization demultiplexer using a microring resonator with silicon-based slot waveguides](#)

物理学报.2015, 64(19): 194207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194207>

硅基光子集成研究进展

[Research progress of silicon-based photonic integration](#)

物理学报.2014, 63(10): 104218 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104218>

基于 Add-drop 型微环谐振腔的硅基高速电光调制器设计

[Design of a high-speed silicon electro-optical modulator based on an add-drop micro-ring resonator](#)

物理学报.2013, 62(19): 194210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.194210>

基于热膨胀效应的可调光功率分束器设计

[Design of tunable optical power splitter based on thermal expansion effect](#)

物理学报.2013, 62(2): 024218 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.024218>

单片集成放大反馈激光器的脉冲包络动力学 实验研究*

陈熙¹⁾ 赵玲娟²⁾ 陈建军¹⁾³⁾ 王会苹¹⁾ 吴正茂¹⁾ 陆丹²⁾ 夏光琼^{1)†}

1)(西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

2)(中国科学院半导体研究所, 半导体材料科学重点实验室, 北京 100083)

3)(新疆医科大学医学工程技术学院, 乌鲁木齐 830011)

(2016年6月20日收到; 2016年8月16日收到修改稿)

实验研究了由分布反馈激光器区(DFB区)、相位控制区(P区)以及放大反馈区(A区)所构成的三段式单片集成放大反馈激光器(AFL)所产生的脉冲包络(PPs)的动力学特征,并分析了P区电流 I_P 和A区电流 I_A 对PPs的重复频率 ν_{PP} 以及包络规则性的影响.研究表明:DFB区电流 I_{DFB} 相对较大时,AFL存在两个模式,此时通过选取合适的 I_P 和 I_A 可使AFL工作在PPs动力学状态;对于一给定的 I_P , I_A 在两个分离区域内可使AFL呈现PPs状态.随着 I_A 的增加,在 I_A 相对较小的区域,AFL输出PPs的重复频率 ν_{PP} 以及表征PPs规则性的时间序列自相关函数的次最大值 σ 均呈现单调下降趋势.而在 I_A 相对较大的区域, ν_{PP} 呈现出先减小然后小幅波动的变化趋势,而 σ 则总体呈现先增加后减小的趋势;对于一给定的 I_A , I_P 的变化也会对AFL输出PPs的特性产生显著影响,在AFL呈现PPs状态所要求的 I_P 的变化范围内,随着 I_P 的增加, ν_{PP} 呈现出先减小后增大而 σ 则呈现先增加后减小的变化趋势.通过观测 I_A , I_P 连续变化时AFL的动力学特性,确定了AFL呈现PPs在 I_A 和 I_P 构成的参量空间的分布图谱.

关键词: 单片集成, 放大反馈激光器, 脉冲包络

PACS: 42.82.-m, 42.55.Px, 42.65.Sf

DOI: 10.7498/aps.65.214209

1 引言

半导体激光器(SLs)因其尺寸小、易集成、可直接调制、成本低等众多优点,已成为目前光通信、全光信息处理领域不可或缺的基础器件^[1-3].众所周知,SLs在不同外部扰动下可呈现单周期、多周期、混沌、相干坍塌、低频起伏等非线性动力学状态^[4-9],这些动力学状态在光生微波、光信息处理、光混沌保密通信以及混沌雷达^[10-14]等方面有着潜在的应用前景.

对光反馈SLs系统而言,其反馈腔的长度决定了系统中外腔频率 ν_{EC} 的大小.通常,可依据

外腔频率 ν_{EC} 和激光器的自身弛豫振荡频率 ν_{RO} 的相对大小对光反馈SLs系统进行分类^[15].若 $\nu_{EC} < \nu_{RO}$,则为长腔反馈SLs系统(LCR-SLs);而当 $\nu_{EC} > \nu_{RO}$ 时,则为短外腔反馈SLs(SCR-SLs)系统.与LCR-SLs不同的是,SCR-SLs中较短的外腔长度会导致系统的输出对反馈光的相位变化非常敏感,微小的相位变化即可引起SCR-SLs的非线性动力学行为发生显著改变^[4,16-19].

早期对光反馈SLs系统的研究大多基于由分立元件构成的离散系统,相对而言有利于搭建LCR-SLs.由于受限于反馈腔中需要置入其他的元件以控制反馈参量这一因素,离散的SCR-SLs系统搭建比较困难,且外腔长度难以降到厘米级水

* 国家自然科学基金(批准号: 61275116, 61475127, 61575163)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gqxia@swu.edu.cn

平. 为了构建更短的 SCR-SLs 系统, 人们提出了基于光子集成技术的实现方案^[20,21], 即将分布反馈半导体激光器区 (DFB 区)、相位控制区 (P 区) 以及放大反馈区 (A 区) 等多个功能区集成在同一芯片上, 成为单片集成的放大反馈激光器 (AFL). 相对于离散的 SCR-SLs 系统, AFL 中由 P 区和 A 区构成的外腔不仅反馈长度更短, 而且 A 区能提供光放大将使其可提供反馈强度的范围更宽, 同时其更高的稳定性、更低的功耗以及可批量化生产等特性将使其更具竞争优势^[22-24]. 近些年来, 国内外相关学者对单片集成 AFL 输出的非线性动力学特性展开了一系列的实验和理论探索^[25-29]. 例如, Bauer 等^[26] 理论和实验研究了三段式 AFL 中色散调 Q 自脉动 (DQS) 和双模拍频自脉动 (MB) 的动力学特性, 研究结果表明: 较小的放大反馈电流 (I_A) 可使 AFL 出现 DQS 现象, 而 I_A 较大时可诱导产生 MB 现象, 过大的 I_A 将使这两种自脉冲状态共存; Loose 等^[27] 实验和理论研究了三段式 AFL 中的多稳特性, 研究结果显示 I_{DFB} 略高于阈值的条件下, 由 I_P 和 I_A 构成的参数空间中存在多个三稳态的区域, 系统最终输出的动力学态取决于参量的变化路径; 我们对三段式 AFL 动力学特性也进行了实验研究, 对于 AFL 处于单模输出的情形, 通过选取合适的三个区电流, AFL 可呈现单周期、倍周期及混沌等动力学态^[28]. 我们注意到, 通过在三段式 AFL 的基础上增加一段无源波导使其具有更长的外腔长度 (厘米级). Toomey 等^[29] 最近实验研究了四段式 AFL 的动力学特征, 他们的研究结果表明: 通过选择合适的工作区偏置电流可满足

$\nu_{EC} < \nu_{RO}$ (对应长腔反馈) 以及 $\nu_{EC} > \nu_{RO}$ (对应短腔反馈); 在短腔反馈的条件下, 该激光器可呈现脉冲包络 (PPs) 动力学输出; 而对于长腔反馈情形, 该激光器可实现宽带混沌输出. 尽管该工作实验观测到了 PPs 现象, 但并未对其开展深入的研究.

在本文中, 基于我们自主研制的一外腔长度约为 $560 \mu\text{m}$ 的三段式 AFL^[28], 系统地实验研究了该激光器的 PPs 输出特性. 借助于实验观测的 AFL 输出时间序列、功率谱以及时间序列的自相关函数, 分析了 I_P 和 I_A 对 PPs 的重复频率 ν_{PP} 以及包络规则性的影响, 并给出了 AFL 呈现 PPs 动力学状态在由 I_P 和 I_A 构成的参数空间的分布图谱.

2 实验装置

图 1 为我们所采用的实验装置示意图. 实验中所用的单片集成 AFL 是由我们自主研制的^[28], 其由分布反馈激光器区 (DFB 区)、相位控制区 (P 区)、放大反馈区 (A 区) 所构成, 每区的长度分别为 $220, 240, 320 \mu\text{m}$. 在整个实验过程中, 三个低噪声、高精度电流温度控制源 (ILX-Lightwave LDC-3724B) 为 AFL 三个工作区分别提供大小为 I_{DFB} , I_P 和 I_A 的偏置电流, 并将三个工作区的温度均稳定在 $22.15 \text{ }^\circ\text{C}$. AFL 输出光信号经由准直透镜 1 (AL1)、光隔离器 (ISO)、另一个准直透镜 2 (AL2) 和光纤耦合器 (FC1) 分成两部分后进入探测系统. 其中 20% 的光信号输入到光谱分析仪 (OSA, Ando AQ6317C) 进行光谱测定, 另外 80% 的光信号经掺

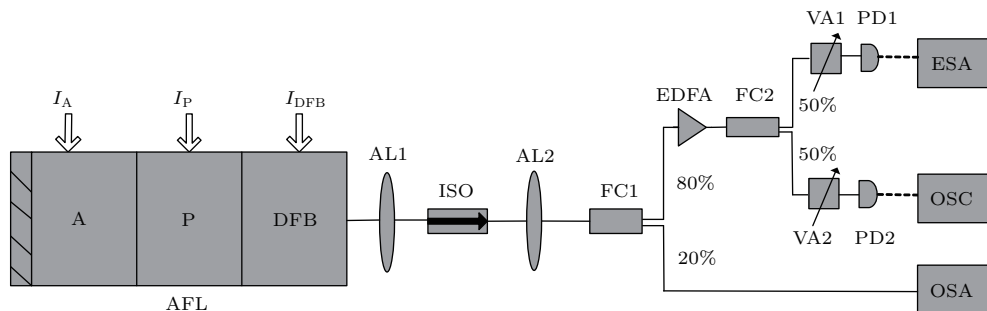


图 1 实验系统结构图, 其中, AFL, 放大反馈激光器; DFB, 分布反馈激光器区; P, 相位控制区; A, 放大反馈区; AL, 准直透镜; ISO, 光隔离器; FC, 光纤耦合器; EDFA, 掺铒光纤放大器; VA, 可调衰减器; PD, 光电探测器; ESA, 电谱分析仪; OSC, 示波器; OSA, 光谱分析仪; 实线, 光路径; 虚线, 电学路径

Fig. 1. Schematic diagram of experimental system. AFL, amplified feedback laser; DFB, distributed feedback laser section; P, phase section; A, amplified feedback section; AL, aspheric lens; ISO, optical isolator; FC, fiber coupler; EDFA, erbium doped fiber amplifier; VA, variable attenuator; PD, photo-detector; ESA, electrical spectrum analyzer; OSC, oscilloscope; OSA, optical spectrum analyzer. Solid lines, optical paths; dashed lines, electrical paths.

铟光纤放大器(EDFA, Corning PureGain™ 2500C)和光纤耦合器(FC2)后被再次分成两部分,其中50%的光信号经过可调衰减器1(VA1)和带宽为70 GHz的光电探测器(PD1, U2T XPDV2150R)转成电信号后输入到67 GHz带宽的电谱分析仪(ESA, R&S@FSW)进行电谱分析. 另外50%的光信号经过可调衰减器2(VA2)和带宽为47 GHz的光电探测器(PD2, U2T XPDV2150R)转成电信号后输入16 GHz带宽的示波器(OSC, Agilent DSOX91604A)进行时间序列的监测.

3 结果与分析

图2给出了当AFL相位控制区电流 I_P 和放大反馈区电流 I_A 均为0 mA时,实验测得的输出功率随DFB区电流 I_{DFB} 的变化曲线(图2(a)),以及 I_{DFB} 取不同值时的输出光谱(图2(b)).从图2(a)

可知,此时AFL的阈值电流为25.60 mA. I_{DFB} 从阈值电流逐渐增加,AFL的输出功率随 I_{DFB} 的增加首先呈现快速、线性增大的趋势;而当 I_{DFB} 超过68.00 mA之后,激光器输出功率随 I_{DFB} 的增大呈现先缓慢增大随后逐渐减小的趋势. AFL的输出功率呈现这样的变化趋势与AFL中所激射的模式有关.如图2(b)所示,当 $I_{DFB} < 68.00$ mA时(如30.00, 46.00, 60.00 mA),AFL工作在单一模式;而当 I_{DFB} 增加到68.00 mA以后,光谱上可清楚地看到两个模式. AFL呈现双模输出是由于在较大的 I_{DFB} 条件下,模式简并效应使阻带两侧的复合腔模式具有近似相等的增益,最终导致双模工作[25]. 我们的实验研究结果表明,PPs动力学态仅发生在AFL工作在双模的情形.在接下来的讨论中,我们将 I_{DFB} 的值固定在86.15 mA以满足AFL呈现双模输出.

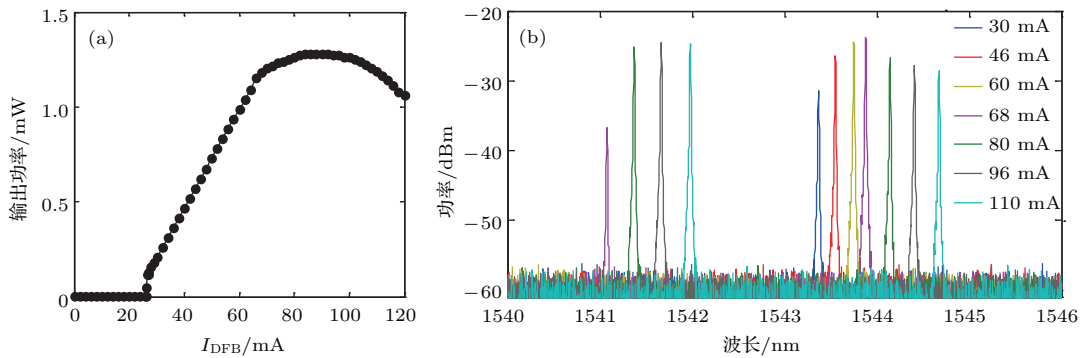


图2 (网刊彩色) $I_A = I_P = 0$ mA时, (a) 实验测得的AFL输出功率随 I_{DFB} 增大的变化曲线, 以及 (b) I_{DFB} 取不同值时AFL输出的光谱

Fig. 2. (color online) For $I_A = I_P = 0$ mA, (a) the measured output power of AFL with increased I_{DFB} and (b) optical spectra under different I_{DFB} .

3.1 脉冲包络动力学状态

图3给出了 $I_{DFB} = 86.15$ mA, $I_P = 94.00$ mA及 $I_A = 9.20$ mA时AFL输出PPs的时序图、功率谱和自相关函数曲线.从图3(a)可以看出,此时AFL输出的时间序列包含一系列时间间隔相等的短脉冲,这些短脉冲的峰值功率受到一个慢变包络的调制,即表现出PPs[16].在每一个慢变包络中,短脉冲的峰值强度随时间的演化规律为:输出强度经历爆发性的增长后形成包络的第一个脉冲,接下来的脉冲峰值强度依次减小,直到输出功率下降到近似为0后又开始进入下一个包络.需要指出的是,每个包络中所包含的短脉冲的频率应该等于

光在外腔中往返的频率 ν_{EC} .而对于本实验中所用的AFL,其外腔的长度为560 μm ,从而导致其外腔往返频率 ν_{EC} (约为67.00 GHz)超过了实验中PD2, OSC的带宽,因此在探测到的AFL输出时间序列中PPs所包含的短脉冲序列未能被真实再现.由图3(b)可以看出,AFL输出的功率谱在低频处存在一个尖峰,此尖峰对应的频率即为包络的重复频率(ν_{PP}),约为1.155 GHz;功率谱在13.81 GHz处还存在一凸起,其对应激光器的弛豫振荡 ν_{RO} .另外,由于受限于实验中所用的ESA的带宽限制,在功率谱中未能探测到外腔的往返频率 ν_{EC} .根据文献[18],自相关函数的次最大 σ (除时间位移为0以外的最大值)的值可用于表征脉冲包络的规则性,

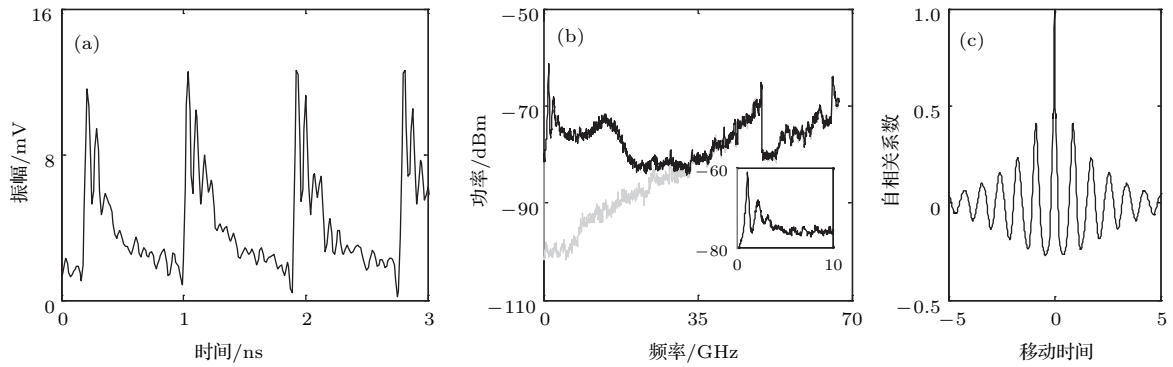


图3 $I_{\text{DFB}} = 86.15$ mA, $I_{\text{P}} = 94.00$ mA 及 $I_{\text{A}} = 9.20$ mA 时, AFL 产生 PPs 的 (a) 时序图、(b) 功率谱和 (c) 自相关函数曲线, 其中, 功率谱中的灰色线代表 ESA 的本底噪声

Fig. 3. For $I_{\text{DFB}} = 86.15$ mA, $I_{\text{P}} = 94.00$ mA and $I_{\text{A}} = 9.20$ mA, (a) the time series, (b) power spectra and (c) self-correlation function curves of the pulse packages (PPs) output from the AFL. The gray line in power spectrum denotes the noise floor.

σ 越大, 说明 PPs 的规则性越好. 从图 3 (c) 可以看出, σ 接近于 0.5, 说明此时 PPs 具有较好的规则特性; 而自相关函数的峰值衰减比较缓慢, 说明 AFL 输出的时间序列在较长的时间间隔内都能保持一定程度的关联性.

3.2 放大反馈区电流 I_{A} 对 PPs 输出特性的影响

可以预计, 在 I_{DFB} 保持一定的条件下, AFL 输出的动力学行为应与放大反馈区的电流 I_{A} 以及相位控制区的电流 I_{P} 相关. 首先, 固定 I_{P} 研究 I_{A} 取不同值时 AFL 的输出特性. 图 4 给出了 $I_{\text{DFB}} = 86.15$ mA, $I_{\text{P}} = 96.00$ mA 时, I_{A} 取不同值时 AFL 输出的时序图 (第一列)、功率谱 (第二列) 和相应的自相关函数曲线 (第三列). 当 $I_{\text{A}} = 6.00$ mA (图 4 (a)), 系统输出功率几乎维持在一个常数水平, 小的起伏源于自发辐射噪声, 而功率谱接近于 ESA 的本底噪声. 因此, 此时 AFL 工作在稳态 (S). 当电流 I_{A} 增加到 6.60 mA 时 (图 4 (b)), AFL 输出的时间序列为一系列短脉冲, 而短脉冲的峰值强度受到一个慢变振幅调制. 功率谱包含一系列等间隔的频率峰, 第一峰值出现在 2.394 GHz, 其值比旁边的最小值高出近 30.0 dB. 自相关曲线的峰值呈现缓慢减小的趋势, 在 (-5 ns, 5 ns) 范围内均存在较强的相关性. 以上特点说明此时 AFL 工作在 PPs 状态, 其重复频率 $\nu_{\text{PP}} = 2.394$ GHz. 当 $I_{\text{A}} = 7.80$ mA 时 (图 4 (c)), 此时尽管在每个包络内均包含峰值逐渐递减的短脉冲, 但包络的规则性较差, 反映在其功率谱的第一峰值与旁边的极小值的差值较小, 大

约为 8.0 dB. 同时, 功率谱连续且整体上移, 其自相关函数随着时间移动呈现快速下降趋势, 当时间移动超过 1 ns 后几乎没有相关性. 基于以上特点, 可以判定此时 AFL 进入混沌态 (C). 当 I_{A} 继续增大到 9.80 mA 时 (如图 4 (d) 所示), AFL 输出特性总体与图 4 (b) 相似, 但包络的重复频率更小, 约为 1.088 GHz, 每个包络中短脉冲的峰值衰减也更快. 当 I_{A} 增大到 11.60 mA 时, AFL 的输出特性与 $I_{\text{A}} = 6.00$ mA 类似, 此时 AFL 处于稳态 (S).

上述实验结果表明: 选择合适的 I_{A} , 可使 AFL 呈现 PPs 动力学状态, I_{A} 的取值对 PPs 的重复频率 ν_{PP} 以及自相关函数的次最大 σ 均有影响. 为了更为清晰地描述 I_{A} 对 AFL 呈现的 PPs 动力学状态的影响, 图 5 给出了 $I_{\text{DFB}} = 86.15$ mA, $I_{\text{P}} = 96.00$ mA 时, PPs 重复频率 ν_{PP} (图 5 (a)) 以及自相关函数的次最大 σ (图 5 (b)) 随 I_{A} 的演化. 实验结果表明, 当电流位于 6.60—7.20 mA 以及 8.60—10.40 mA 这两个区域范围内时, AFL 可呈现 PPs 状态. 从图 5 (a) 可以看出, PPs 的重复频率 ν_{PP} 随 I_{A} 的增加在 I_{A} 相对较小的区域 (6.60—7.20 mA) 呈现近似线性递减的趋势, 而在 I_{A} 相对较大的区域 (8.60—10.40 mA) 则呈现先减小然后出现波动的趋势. 而当 7.20 mA < I_{A} < 8.60 mA 时, AFL 的输出不属于 PPs 状态. 如图 5 (b) 所示, σ 随 I_{A} 的演化规律在 6.60—7.20 mA 区域内与 ν_{PP} 随 I_{A} 的变化规律一致, 但对于 I_{A} 处于 8.60—10.40 mA 范围内, 随着 I_{A} 随加, σ 总体呈现先增加后减小的趋势.

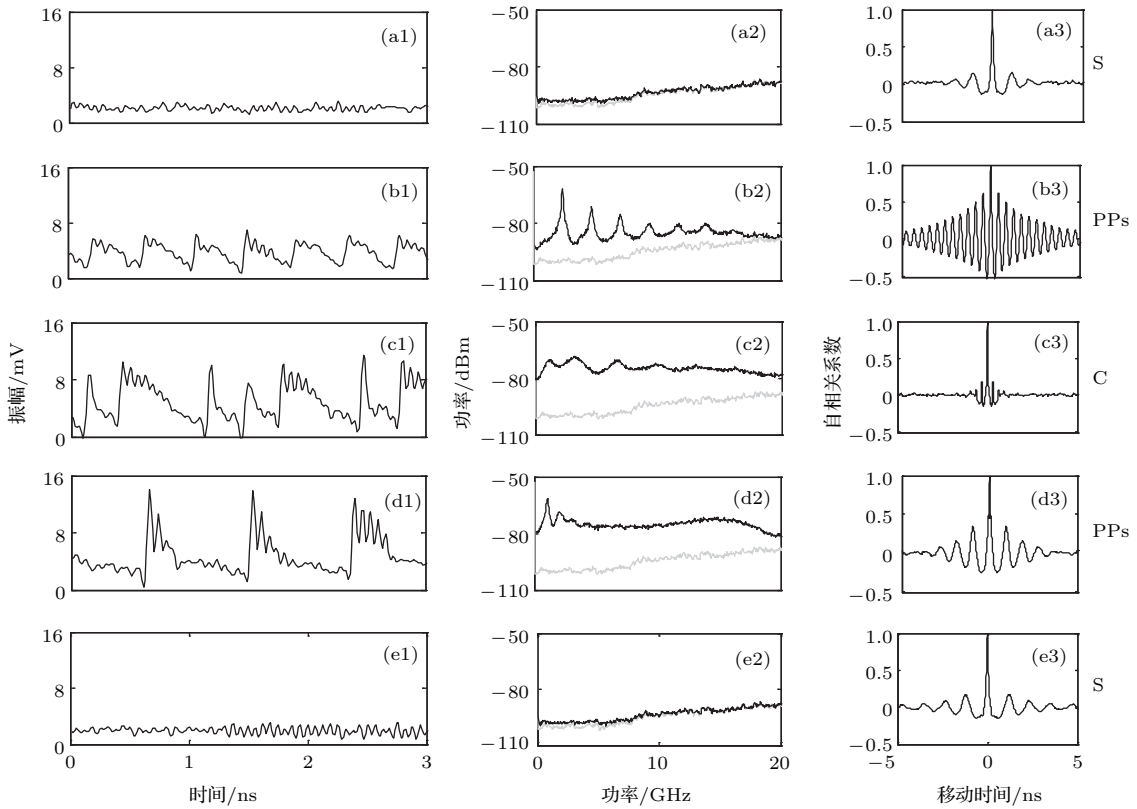


图4 $I_{DFB} = 86.15$ mA, $I_P = 96.00$ mA 时, 不同 I_A 情况下 AFL 输出的时序图 (第一列)、功率谱 (第二列) 和自相关函数曲线 (第三列) (a1)—(a3) $I_A = 6.00$ mA; (b1)—(b3) $I_A = 6.60$ mA; (c1)—(c3) $I_A = 7.80$ mA; (d1)—(d3) $I_A = 9.80$ mA; (e1)—(e3) $I_A = 11.60$ mA; 功率谱中的灰色线代表 ESA 的本底噪声; S, 稳态; PPs, 脉冲包络; C, 混沌

Fig. 4. For $I_{DFB} = 86.15$ mA and $I_P = 96.00$ mA, the time series (the first column), power spectra (the second column) and self-correlation function curves (the third column) of the AFL outputs under $I_A = 6.00$ mA (a1)—(a3), 6.60 mA (b1)—(b3), 7.80 mA (c1)—(c3), 9.80 mA (d1)—(d3), and 11.60 mA (e1)—(e3), respectively. The gray lines in power spectra denote the noise floor. S, stable state; PPs, pulse packages; C, chaotic state.

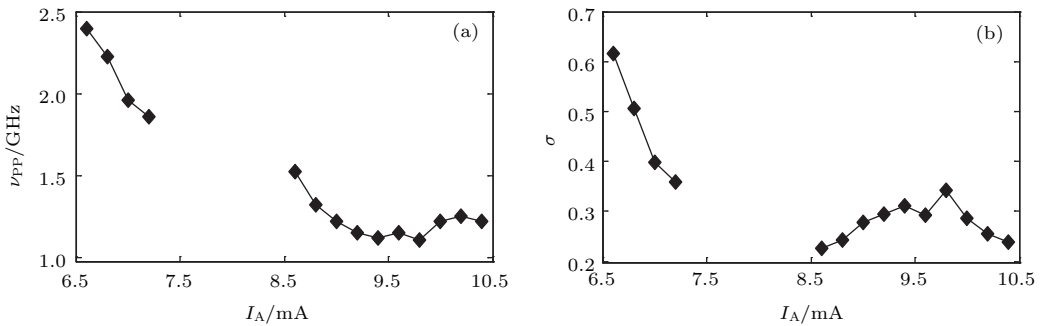


图5 $I_{DFB} = 86.15$ mA 和 $I_P = 96.00$ mA 时, (a) PPs 重复频率 ν_{PP} , (b) 自相关函数的次最大 σ 随 I_A 的变化规律

Fig. 5. Dependence of (a) the repeated frequency ν_{PP} of PPs and (b) the secondary maximum σ of the self-correlation on I_A under $I_{DFB} = 86.15$ mA and $I_P = 96.00$ mA.

3.3 相位控制区电流 I_P 对 PPs 输出的影响

接下来, 我们观察相位控制区电流 I_P 对 AFL 动力学状态的影响. 图 6 给出了 $I_{DFB} = 86.15$ mA 和 $I_A = 9.00$ mA 时, I_P 分别取不同值时 AFL 输

出的时序图 (第一列)、功率谱 (第二列) 和相应的自相关函数曲线 (第三列). 当 $I_P = 86.50$ mA (图 6(a)) 以及 $I_P = 98.00$ mA (图 6(e)) 时, 此时 AFL 处于稳态, 其输出的功率维持在一个常数水平, 功率谱接近于 ESA 的本底噪声; 而当 I_P 取

91.50 mA (图6(b)), 93.50 mA (图6(c)) 以及 94.5 mA (如图6(d)所示) 时, AFL 均呈现 PPs 动力学状态, 功率谱在脉冲包络重复频率处均存在明显的峰, 其比旁边的极小值高出 15.0 dB, 同时从自相关函数中可以看出时间移动在 (-5 ns, 5 ns) 范围内变化时, 均存在较强的相关性.

图7给出了 $I_{DFB} = 86.15$ mA, $I_A = 9.00$ mA 时, PPs 重复频率 ν_{PP} (图7(a)) 以及自相关函数的次最大 σ (图7(b)) 随 I_P 的变化. I_P 在 90.50—96.00 mA 范围内, AFL 可呈现 PPs 状态. 从图7(a)可知, ν_{PP} 随 I_P 的增大呈现先减小后增大的趋势, 在 $I_P = 94.00$ mA 时, ν_{PP} 达到极小值.

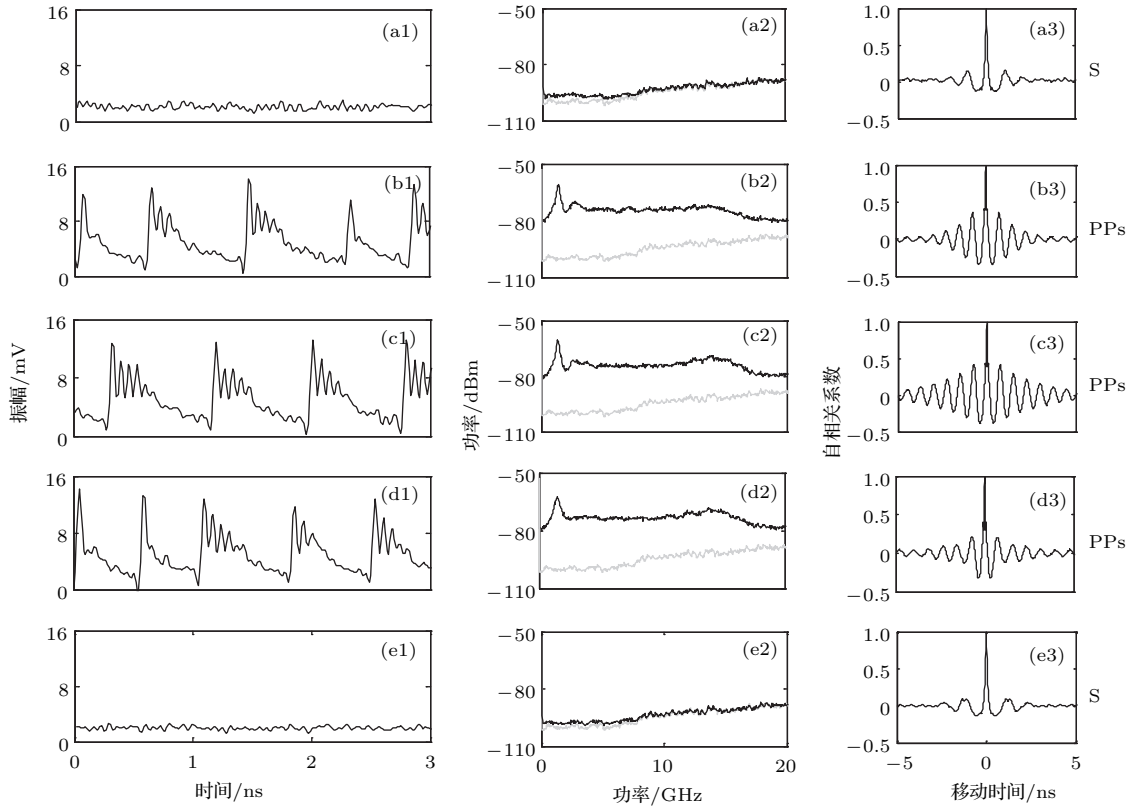


图6 $I_{DFB} = 86.15$ mA, $I_A = 9.00$ mA 时, 不同 I_P 情况下 AFL 输出的时序图 (第一列)、功率谱 (第二列) 和自相关函数曲线 (第三列) (a1)—(a3) $I_P = 86.50$ mA; (b1)—(b3) $I_P = 91.50$ mA; (c1)—(c3) $I_P = 93.50$ mA; (d1)—(d3) $I_P = 94.5$ mA; (e1)—(e3) $I_P = 98.00$ mA; 功率谱中的灰色线代表 ESA 的本底噪声; S, 稳态; PPs, 脉冲包络
Fig. 6. For $I_{DFB} = 86.15$ mA and $I_A = 9.00$ mA, the time series (the first column), power spectra (the second column) and self-correlation function curves (the third column) of the AFL outputs under $I_P = 86.50$ mA (a1)—(a3), 91.50 mA (b1)—(b3), 93.50 mA (c1)—(c3), 94.50 mA (d1)—(d3), and 98.00 mA (e1)—(e3), respectively. The gray lines in power spectra denote the noise floor. S, stable state; PPs, pulse packages.

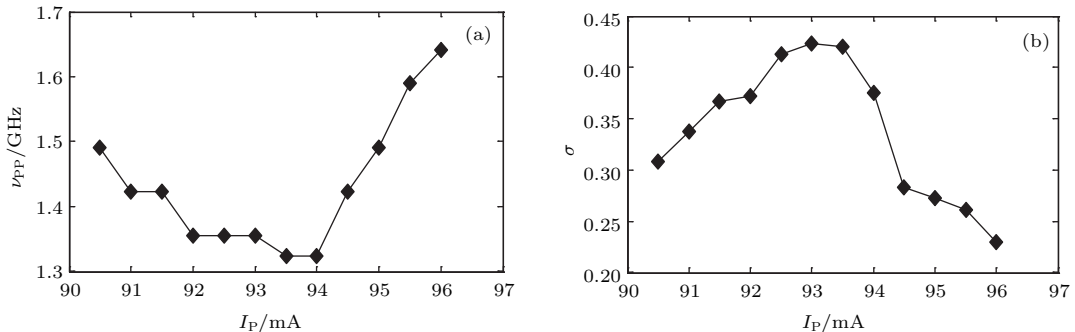


图7 $I_{DFB} = 86.15$ mA 和 $I_A = 9.00$ mA 时, (a) PPs 重复频率 ν_{PP} , (b) 自相关函数的次最大 σ 随 I_P 的变化规律
Fig. 7. Dependence of (a) the repeated frequency ν_{PP} of PPs and (b) the secondary maximum σ of the self-correlation on I_P under $I_{DFB} = 86.15$ mA and $I_A = 9.00$ mA.

而随着 I_P 的增大, σ 呈现先逐渐增加, 达到最大值后再逐渐减小. 值得注意的是, 当 I_P 超过 94.00 mA, σ 的值急剧下降, 说明包络的规则性严重劣化.

3.4 AFL 呈现 PPs 在 I_A 和 I_P 构成的参数空间内的分布

在 $I_{DFB} = 86.15$ mA 的条件下, 通过连续调节 I_P 和 I_A 可得到 AFL 呈现 PPs 动力学状态在 I_P 和 I_A 构成的参数空间的分布, 结果如图 8 所示. 在该图中, 白色区域对应 AFL 呈现非 PPs 状态, 而有颜色的区域 (I—IV) 则对应 AFL 工作在 PPs 状态, 不同的颜色表征 σ 值处于不同的范围. 从图 8 可以看出, 在 I_P 的变化范围为 0—100 mA、而 I_A 的变化范围为 5.5—13.5 mA 条件下, 存在四个分离的区域可使 AFL 呈现 PPs 状态. 在 I 区, I_P 较小而 I_A 较大, 此时得到的 PPs 的规则性相对较差, σ 值处于 [0.2, 0.3] 范围内 (深蓝色); 在 II 区, 除 σ 值处于 [0.2, 0.3] 以外, 还存在 σ 值处于 [0.3, 0.4] 的小范围区域 (淡蓝色), 此时包络的规则性较好, 但实验观测结果显示每个包络里面所包含的短脉冲的规律性较差; III 区和 IV 区所对应的 I_P 均大于 90 mA, 此时可得到包络规则性强 (σ 值大于 0.4) 的 PPs, 如图中红色区域所示. $\sigma > 0.4$ 的区域仅占 PPs 区域非常小的范围, 这说明为了得到规则性强的 PPs, 需要在给定 I_{DFB} 条件下, 对 I_P 和 I_A 进行精确控制.

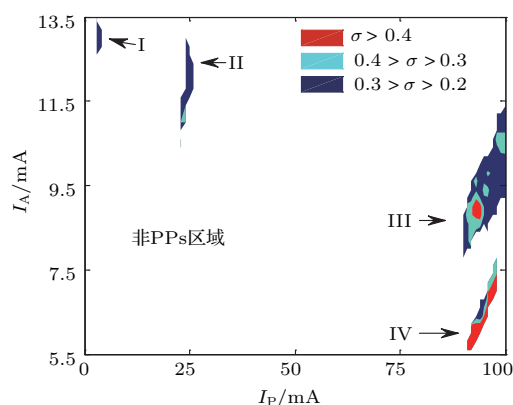


图 8 (网刊彩色) $I_{DFB} = 86.15$ mA 时, AFL 呈现 PPs 状态在 I_P 和 I_A 参数空间内的分布图谱. 图中白色区域为非 PPs 区域, 有色区域为 PPs 区域, 不同颜色对应 σ 处于不同范围.

Fig. 8. (color online) Mapping of PPs in the parameter space of I_P and I_A for $I_{DFB} = 86.15$ mA. The white region is for non-PPs, and the colorful regions are for PPs in which different colors denote different range of σ .

4 结 论

本文实验研究了三段式单片集成 AFL 的脉冲包络 (PPs) 动力学特性, 重点关注各区偏置电流对 PPs 的重复频率 ν_{PP} 以及包络规则性的影响. 结果表明: PPs 动力学态仅发生在 AFL 工作在双模的情形; 在 DFB 区电流 I_{DFB} 相对较大时 AFL 将呈现双模输出, 通过合理选择放大反馈区电流 I_A 和相位控制区电流 I_P , AFL 可呈现 PPs 输出; 固定 $I_{DFB} = 86.15$ mA, $I_P = 96.00$ mA, 当 I_A 在 6.5—10.5 mA 范围内连续变化时, 在两个区域 AFL 可实现 PPs 输出, 且 PPs 的重复频率 ν_{PP} 以及包络的规则性与 I_A 的变化密切相关; 固定 $I_{DFB} = 86.15$ mA, $I_A = 9.00$ mA, 当 I_P 在 90.00—97.00 mA 范围内连续变化时, AFL 均可实现 PPs 输出, 随着 I_P 逐渐增大, ν_{PP} 呈现出先减小后增大的趋势, 而表征 PPs 规则性的时间序列自相关函数的次极大 σ 则呈现出先增大后减小的趋势; 最后, 对于 $I_{DFB} = 86.15$ mA, 通过观测 I_A 在 5.5—13.5 mA 范围内以及 I_P 在 0—100.0 mA 范围内 AFL 输出的动力学状态特性, 确定了在 I_P 和 I_A 所构成的参数空间 AFL 呈现 PPs 的分布图谱. 本文的研究对于人们深入了解集成半导体激光器的输出动力学特性具有一定的参考价值.

参考文献

- [1] Lin C F, Su Y S, Wu B R 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 3
- [2] Koyama F 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 4502
- [3] Iga K 2000 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **6** 1201
- [4] Hu H P, Yu Z L, Liu L F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 190504 (in Chinese) [胡汉平, 于志良, 刘凌锋 2012 物理学报 **61** 190504]
- [5] Kim B, Locquet A, Choi D, Citrin D S 2015 *Phys. Rev. A* **91** 061802
- [6] Zhong D Z, Ji Y Q, Deng T, Zhou K L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 114203 (in Chinese) [钟东洲, 计永强, 邓涛, 周开利 2015 物理学报 **64** 114203]
- [7] Lenstra D, Verbeek B H, Den Boef A J 1985 *IEEE J. Quantum Electron.* **21** 674
- [8] 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]
- [9] Hong Y H, Spencer P S, Shore K A 2004 *Opt. Lett.* **29** 2151
- [10] Li N Q, Pan W, Xiang S Y, Luo B, Yan L S, Zou X H 2013 *Appl. Opt.* **52** 1523

- [11] Liu H J, Feng J C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1484 (in Chinese) [刘慧杰, 冯久超 2009 物理学报 **58** 1484]
- [12] Pan B W, Lu D, Sun Y, Yu L Q, Zhang L M, Zhao L J 2014 *Opt. Lett.* **39** 6395
- [13] Jin S Z, Li Y Q, Xiao M 1996 *Appl. Opt.* **35** 1436
- [14] Lin F Y, Liu J M 2004 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **10** 991
- [15] Tager A A, Elenkrig B B 1993 *IEEE J. Quantum Electron.* **29** 2886
- [16] Heil T, Fischer I, Elsässer W, Gavrielides A 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 243901
- [17] Tabaka A, Panajotov K, Veretennicoff I, Sciamanna M 2004 *Phys. Rev. E* **70** 036221
- [18] Tabaka A, Peil M, Sciamanna M, Fischer I, Elsässer W, Thienpont H, Veretennicoff I, Panajotov K 2006 *Phys. Rev. A* **73** 013810
- [19] Peil M, Fischer I, Elsässer W 2006 *Phys. Rev. A* **73** 023805
- [20] Koch T L, Koren U 1991 *IEEE J. Quantum Electron.* **27** 641
- [21] Charbonneau S, Koteles E S, Poole P J, He J J, Aers G C, Haysom J, Buchanan M, Feng Y, Delage A, Yang F, Davies M, Goldberg R D, Piva P G, Mitchell I V 1998 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **4** 772
- [22] Yu L Q, Lu D, Pan B W, Zhao L J, Wu J G, Xia G Q, Wu Z M, Wang W 2014 *J. Lightwave Technol.* **32** 3595
- [23] Monfils I, Cartledge J C 2009 *J. Lightwave Technol.* **27** 619
- [24] Bauer S, Brox O, Kreissl J, Sahin G, Sartorius B 2002 *Electron. Lett.* **38** 334
- [25] Yee D S, Leem Y A, Kim S T, Park K H, Kim B G 2007 *IEEE J. Quantum Electron.* **43** 1095
- [26] Bauer S, Brox O, Kreissl J, Sartorius B, Radziunas M, Sieber J, Wünsche H J, Henneberger F 2004 *Phys. Rev. E* **69** 016206
- [27] Loose A, Goswami B K, Wünsche H J, Henneberger F 2009 *Phys. Rev. E* **79** 036211
- [28] Wu J G, Zhao L J, Wu Z M, Lu D, Tang X, Zhong Z Q, Xia G Q 2013 *Opt. Express* **21** 23358
- [29] Toomey J P, Kane D M, McMahon C, Argyris A, Syvridis D 2015 *Opt. Express* **23** 18754

Experimental investigations on the dynamical characteristics of pulse packages in a monolithically integrated amplified feedback laser*

Chen Xi¹⁾ Zhao Ling-Juan²⁾ Chen Jian-Jun¹⁾³⁾ Wang Hui-Ping¹⁾ Wu Zheng-Mao¹⁾
Lu Dan²⁾ Xia Guang-Qiong^{1)†}

1) (School of Physical Science and Technology Southwest University, Chongqing 400715, China)

2) (Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Science, Beijing 100083, China)

3) (School of Medical Engineering Technology, Xinjiang Medical University, Urumqi 830011, China)

(Received 20 June 2016; revised manuscript received 16 August 2016)

Abstract

Under suitable external perturbation such as optical feedback, optical injection or optoelectronic feedback, semiconductor lasers can be driven to realize diverse dynamic outputs including period-one, period-two, multi-period, pulse packages (PPs), chaos, etc., which have potential applications in optical secure communications, microwave photonics, lidar, high speed random signal generation, etc.. For the PPs dynamics, most of previous relevant investigations are usually based on a system composed of discrete elements. In this work, we experimentally investigate the PP dynamical characteristics in a three-section monolithically integrated amplified feedback laser (AFL) composed of a distributed feedback (DFB) laser section, a phase (P) section, and an amplified feedback (A) section. For the AFL, the sections P and A act as a compounded feedback cavity in which the feedback phase and strength can be varied by adjusting the current in section P (I_P) and the current in section A (I_A), respectively. Via the power spectrum and self-correlation function curve of the time series output from the AFL, the influences of I_P and I_A on repeated frequency (ν_{PP}) and regularity of PPs are analyzed in detail. The results indicate that, for the section DFB, whose current (I_{DFB}) is biased at a relatively large level, the AFL can realize two-mode oscillation. After further choosing appropriate I_P and I_A , the AFL can behave as the dynamical state of PPs. Under $I_{DFB} = 86.15$ mA and $I_P = 96.00$ mA, through varying I_A in a range of 6.50–10.50 mA, there exist two separated regions for I_A to make the AFL operate at PPs. For the region with relatively small value of I_A , both ν_{PP} and the secondary maximum (σ) of self-correlation curve characterizing the regularity of PPs monotonically decrease with the increase of I_A . However, for the region with relatively large value of I_A , with the increase of I_A , ν_{PP} first decreases and then fluctuates in a tiny range, but σ first increases, and further reaches an extreme value, and then decreases. Under $I_{DFB} = 86.15$ mA and $I_A = 9.00$ mA, the output characteristics of PPs are significantly affected by I_P . With I_P increasing from 90.5 mA to 96.5 mA, ν_{PP} first decreases, and then increases after reaching a minimal value, meanwhile σ shows an approximately opposite variation trend. Finally, for $I_{DFB} = 86.15$ mA, the mapping of PPs in the parameter space of I_P and I_A is given and the evolution regularities of PPs are also presented.

Keywords: monolithically integration, amplified feedback lasers, pulse packages

PACS: 42.82.-m, 42.55.Px, 42.65.Sf

DOI: 10.7498/aps.65.214209

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61275116, 61475127, 61575163).

† Corresponding author. E-mail: gqxia@swu.edu.cn