

## 混沌光注入半导体激光器中极端事件的演变\*

戈杉杉<sup>1)</sup> 王腾午<sup>1)</sup> 戈静怡<sup>1)</sup> 周沛<sup>1)2)†</sup> 李念强<sup>1)2)‡</sup>

1) (苏州大学, 光电科学与工程学院, 苏州纳米科技协同创新中心, 苏州 215006)

2) (苏州大学, 教育部/江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏省先进光学制造技术重点实验室, 苏州 215006)

(2023年5月9日收到; 2023年5月29日收到修改稿)

基于相位共轭光反馈混沌激光系统(主激光器)产生的极端事件,研究了将其输出注入到一个自由运行的半导体激光器(从激光器)的演化情况.通过注入参数空间中极端事件相对数量的二维统计图分析注入参数对极端事件产生的影响,发现在主从激光器混沌输出高相关性参数区域,从激光器中的极端事件的相对数量趋向于一个接近主激光器中极端事件相对数量的稳定值;在某些特定的弱相关区域,从激光器中的极端事件的相对数量趋向于增加.研究结果证明了通过光注入控制极端事件的可能性,有利于优化混沌激光系统性能或拓展其应用场景.

**关键词:** 半导体激光器, 极端事件, 混沌光注入, 相位共轭光反馈**PACS:** 42.55.Px, 05.45.-a, 05.45.Pq**DOI:** 10.7498/aps.72.20230759

## 1 引言

具有高影响、异常量级、不可预测性和偏离高斯统计特点的异常波(rogue wave, RW)最初是在海洋学中被提出的,用来描述罕见的高振幅海浪,在自然、技术和社会环境系统中受到了极大的关注<sup>[1]</sup>.由于高振幅RW在现实场景中会造成破坏性影响,因此研究RW的产生与形成机制是非常有意义的.然而,RW自身的稀有性以及实验实施的困难性一直限制着人们理解RW形成机理.2007年,Solli等<sup>[2]</sup>将光场在光纤中的传播与海洋中RW的出现进行类比,引入了光学RW的概念,即极端事件(extreme event, EE).得益于快速的动态特性,光纤传输系统成为检测EE的最佳测试平台之一.此后,EE的研究进入了一个繁荣期,人们提出了不同的光学系统来分析EE的产生和演变.线性系统是研究EE最广泛的系统之一,例如玻璃纤维<sup>[3]</sup>、随机介质<sup>[4]</sup>

和线性干涉模型<sup>[5]</sup>中的线性光传播.除了上述线性系统,人们还致力于研究产生EE的非线性系统,如微结构光纤<sup>[2]</sup>和锥形渐变折射率非线性光纤<sup>[6]</sup>.在这些非线性系统中,主要是利用非线性薛定谔方程来研究EE的形成机理.近年来,确定性非线性系统,如半导体激光器,被广泛用于研究EE的产生,这极大地加速了EE相关研究的发展.

一方面,具有丰富动力学特性的半导体激光器为理解和预测EE提供了一个廉价和可控的平台.另一方面,EE的行为是理解不同激光系统中基础物理的有力工具.目前,已经有很多研究集中在受到光注入以及光反馈的半导体激光器中<sup>[7-20]</sup>.例如,Bonatto等<sup>[19]</sup>实验观察到光注入半导体激光器输出强度中出现了罕见的巨脉冲,脉冲幅度的长尾概率分布符合EE的特征.利用最大李雅普诺夫指数(largest Lyapunov exponents, LLE),发现EE只出现在混沌区域,表明这种EE源于确定性非线性.在后来的工作中,结合相空间轨迹图,他们进

\* 国家自然科学基金(批准号: 62004135, 62001317, 62171305, 62111530301)、江苏省高等学校自然科学研究重大项目(批准号: 20KJA416001, 20KJB510011)和江苏省自然科学基金(批准号: BK20200855)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: peizhou@suda.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: nli@suda.edu.cn

一步证明了确定性 EE 是由一个类似混沌危机的过程产生的<sup>[9]</sup>. 物理机制的理解为提高注入半导体激光器的性能提供了一条途径, 例如, EE 可以在较长的时间内被预测, 并且可以随着噪声的变化而增加或抑制其产生概率. 此外, 时滞非线性光学中也研究了 EE 的形成<sup>[7,8,12,14,16]</sup>. 例如, Dal Bosco 等<sup>[7]</sup>报道了一个光学时滞系统的脉动动力学中的极端事件, 研究了反馈强度对极端事件性质的影响. Reinoso 等<sup>[8]</sup>对具有光反馈的半导体激光器在短腔区产生的脉冲进行了数值研究, 发现对于某些参数, 偶尔会产生高到足以被认为是极端事件的脉冲. 2015 年, Mercier 等<sup>[12]</sup>在一个相位共轭反馈的激光二极管中观察到与异常涌浪具有相似统计特性的极强脉冲, 证实了 EE 产生于自脉动解的一系列分岔, 即外腔模式.

尽管具有光注入或光反馈的半导体激光器中 EE 的研究已经得到了相当多的关注, 但是对于两者相结合的系统 EE 的产生与调控仍然缺乏深入和全面的研究. 一个有趣的问题是, 具有 EE 的光反馈主激光器 (master laser, ML) 的混沌输出注入到一个从激光器 (slave laser, SL) 中, 是否能够触发、增强或抑制从激光器中 EE 的产生. 近期, Huang 等<sup>[17]</sup>通过实验研究了受到混沌光注入的 SL 中 EE 的演变, 其中 ML 受到传统光反馈 (conventional optical feedback, COF). 他们揭示了注入参数对 SL 中 EE 出现的重要性, 在所选择的注入参数范围内, 可显著提高 EE 的出现概率, SL 中 EE 的出现与注入锁定机制相关联. 相位共轭反馈 (phase-conjugate feedback, PCF) 是另一种类型的光反馈, 与 COF 相似, 在适当的工作条件下, PCF 可以诱导出混沌动力学<sup>[21]</sup>. 然而, 相比于 COF, 对于相同的系统固有参数和操作参数 (延迟、泵浦电流和反馈强度), PCF 系统产生的混沌带宽更大, 光谱平坦度更优以及复杂性更高<sup>[22]</sup>, 这些优越特性增加了使用 PCF 代替 COF 的内在优势, 即反馈场的自对准和高反馈耦合效率. 相位共轭反射镜也很容易实现, 例如, 利用自泵浦的、适当对齐的光折变晶体的内部反射率<sup>[23]</sup>. 因此, 本文致力于利用 PCF 代替 COF, 进一步研究 PCF 与光注入相结合的混沌光注入系统中 EE 的产生与调控. 基于此, 对基于 PCF 的混沌光注入系统 (chaotic optical injection system based on PCF, COIS-PCF) 进行了数值模拟, 研究输出中 EE 的演变情况, 通过讨论不

同注入参数的选择对 EE 出现的作用, 发现当主从系统的互相关系数 (cross-correlation coefficient, CC) 进入部分区间内 (如 0—0.2, 0.4—0.6), SL 中会对 EE 出现产生明显的增强作用. 此外, 还发现调节反馈强度和 ML 的泵浦电流大小也会对系统中 EE 的出现产生影响.

## 2 理论模型

基于 Lang-Kobayashi 模型提出了下列的方程用于描述当前研究的系统<sup>[24–26]</sup>, 其中 ML 方程为

$$\frac{dE_M(t)}{dt} = \frac{1 + i\alpha}{2} \left( G_M - \frac{1}{\tau_p} \right) E_M(t) + k_f E_M^*(t - \tau_M) e^{i\phi_{PCM}}, \quad (1)$$

$$\frac{dN_M(t)}{dt} = \frac{J_M}{q} - \frac{N_M}{\tau_e} - G_M |E_M|^2, \quad (2)$$

$$G_M(t) = \frac{g [N_M(t) - N_0]}{1 + \varepsilon |E_M(t)|^2}. \quad (3)$$

SL 方程为

$$\frac{dE_S(t)}{dt} = \frac{1 + i\alpha}{2} \left[ G_S - \frac{1}{\tau_p} \right] E_S(t) + k_{inj} E_M(t - \tau_c) \times \exp[-i(2\pi f_{ML}\tau_c - 2\pi\Delta f t)], \quad (4)$$

$$\frac{dN_S(t)}{dt} = \frac{J_S}{q} - \frac{N_S}{\tau_e} - G_S |E_S|^2, \quad (5)$$

$$G_S(t) = \frac{g [N_S(t) - N_0]}{1 + \varepsilon |E_S(t)|^2}, \quad (6)$$

式中, 下标 M 和 S 分别代表主激光器 ML 和从激光器 SL;  $E(t)$  和  $N(t)$  表示慢变电场和载流子密度;  $G$  为光增益;  $g$  为差分增益系数;  $\varepsilon$  为增益饱和系数;  $\alpha$  为线宽增强因子;  $N_0$  为透明载流子数;  $\tau_p$  为有源区内光子的寿命;  $\tau_e$  为有源区内载流子的寿命;  $J$  为泵浦电流 ( $J_{th}$  为阈值电流);  $q$  为电子电荷;  $\phi_{PCM}$  为相位共轭反射镜引起的相移 (不失一般性, 假定  $\phi_{PCM} = 0$ );  $k_f$  为反馈强度;  $\tau_M$  为主激光器中的反馈时延;  $f_{ML}$  为主激光器的中心频率;  $k_{inj}$  为注入强度;  $\tau_c$  为注入时延 (不失一般性, 假定  $\tau_c = 0$ );  $\Delta f$  为主从激光器频率失谐 ( $\Delta f = \Delta f_{ML} - \Delta f_{SL}$ , 其中  $f_{SL}$  为从激光器的中心频率).

这里采用四阶龙格-库塔算法来解方程 (1)—方程 (6), 选取步长  $h = 1$  ps, 仿真时长为 11  $\mu$ s, 选取后 10  $\mu$ s 计算 EE 的相对数量. 激光器的参数取值为<sup>[12,24–26]</sup>:

$g = 1.5 \times 10^4$ ,  $\alpha = 5$ ,  $N_0 = 1.5 \times 10^8$ ,  $\varepsilon = 5 \times 10^{-7}$ ,  
 $\tau_p = 2$  ps,  $\tau_M = 2.24$  ns,  $\tau_e = 2$  ns,  $J_{th} = 14.7$  mA,  
 $J_M = 1.05J_{th}$ ,  $J_S = 2J_{th}$ ,  $f_{ML} = 193.55$  THz,  
 $q = 1.602 \times 10^{-19}$  C.

为了描述两个激光器之间的相关性, 计算了互相关系数 CC, 表达式如下 [27–29]:

$$\begin{aligned}
 CC_{M,S} = & \langle [I_S(t + \Delta t) - \langle I_S(t + \Delta t) \rangle] [I_M(t) - \langle I_M(t) \rangle] \rangle \\
 & \times \left\langle [I_S(t + \Delta t) - \langle I_S(t + \Delta t) \rangle]^2 \right\rangle^{-1/2} \\
 & \times \left\langle [I_M(t) - \langle I_M(t) \rangle]^2 \right\rangle^{-1/2}, \quad (7)
 \end{aligned}$$

其中  $I(t)$  表示强度时间序列; 下标 M 和 S 分别表示 ML 和 SL;  $\Delta t$  为时间偏移;  $\langle \cdot \rangle$  为时间平均值. CC 值越大, 两激光器输出之间的相关性越高. 特别地, 值为 1 对应于完全同步, 而值为 0 表示没有相关性.

这里定义事件为序列中的局部极大值, 而为了将 EE 与所有其他事件区分开来, 采用了一种常见的标准异常指数 (abnormality index, AI), 该指数在以往的研究中被广泛使用 [12,16,30–32]. 一个事件  $n$  的 AI 被定义为

$$AI_n = Hf_n / H_{1/3}, \quad (8)$$

其中  $Hf_n$  为事件  $n$  的峰值高度与该序列所有事件平均高度之差, 而  $H_{1/3}$  为  $Hf_n$  中最高三分之一事件峰值的平均值. 如果一个事件  $n$  的异常指数满足  $AI_n \geq 2$ , 该事件即为极端事件. 此外, EE 的相对数量表示强度时间序列中的 EE 占有所有峰值的比例.

### 3 结果与讨论

首先, 研究了作为混沌注入信号源 ML 中的时序. 图 1 为 ML 的输出时序和峰值强度的概率密度

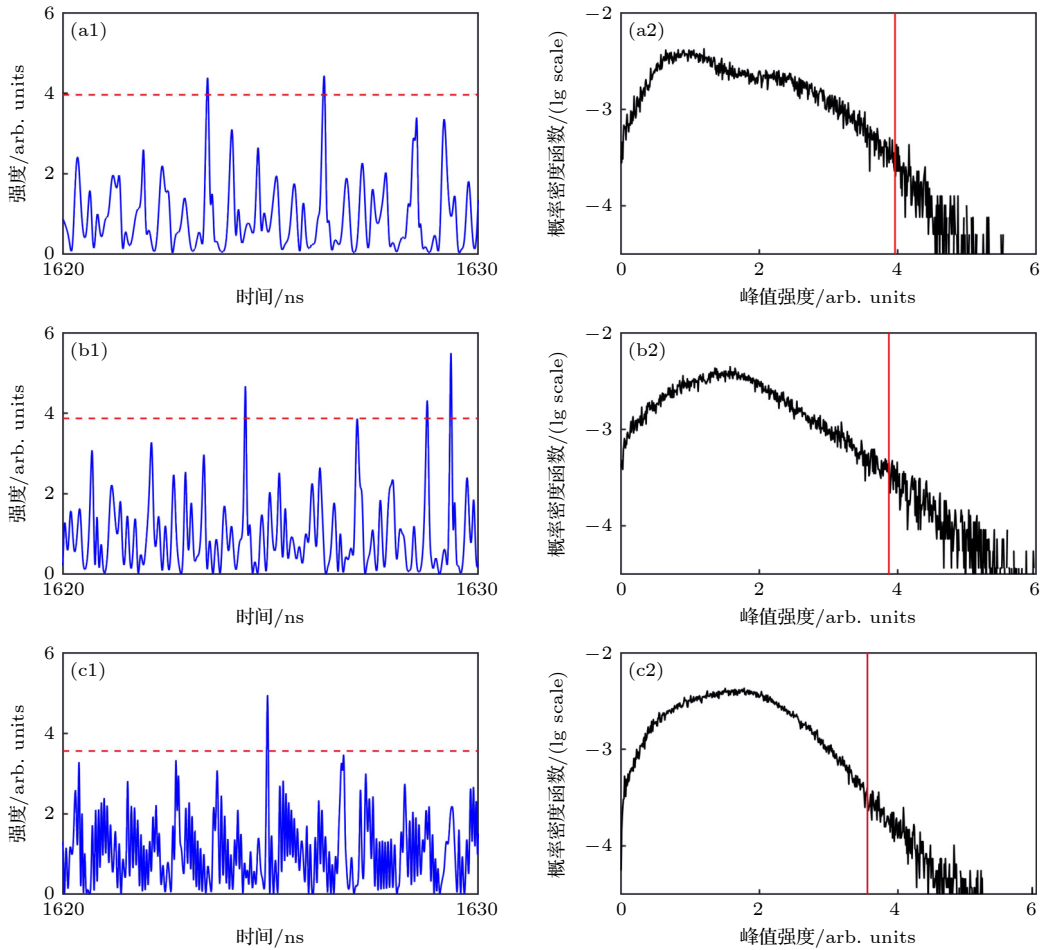


图 1 ML 的时序图和峰值强度的统计分布图 (红色虚线和竖线代表极端事件的阈值  $AI = 2$ ) (a)  $k_f = 9$  ns $^{-1}$ ; (b)  $k_f = 15$  ns $^{-1}$ ; (c)  $k_f = 30$  ns $^{-1}$

Fig. 1. Time series and statistical distributions of peak intensity in ML (Red dashed lines and vertical lines represent the threshold of EEs,  $AI = 2$ ): (a)  $k_f = 9$  ns $^{-1}$ ; (b)  $k_f = 15$  ns $^{-1}$ ; (c)  $k_f = 30$  ns $^{-1}$ .

函数 (probability density function, PDF). 结合图 1 中 PDF 呈现的长尾特征和 ML 的输出时序, 很容易知道 ML 处于混沌状态. 经计算, 在反馈强度  $k_f = 9 \text{ ns}^{-1}$  时, ML 中 EE 的相对数量为 1.84%, 当反馈强度增加到  $k_f = 15 \text{ ns}^{-1}$ , EE 相对数量增加到 3.13%, 再进一步增加反馈强度到  $k_f = 30 \text{ ns}^{-1}$ , EE 相对数量减小为 2.29%. 事实上, 增加反馈强度会使带有 PCF 的半导体激光器振荡在一个或几个谐波频率越来越高的外腔模式之间<sup>[44]</sup>, 正如图 1(a1)—(c1) 所示, 在 10 ns 的时间范围内, 随着反馈强度增加, 脉冲数量逐渐增多. 当反馈强度从  $9 \text{ ns}^{-1}$  增加到  $15 \text{ ns}^{-1}$  时, 由于反馈强度的增加, 激光器可能工作在更高阶的外腔模式下, 于是在固定的时间间隔内更多的高强度脉冲出现, EE 的相对数量增加. 而反馈强度从  $15 \text{ ns}^{-1}$  增加到  $30 \text{ ns}^{-1}$  时, 由于更多强度低于 EE 阈值的脉冲产生, 因而 EE 的相对数

量减小. 这些分析表明反馈强度可显著影响 EE 的产生, 类似的现象在带有 COF 的垂直腔面发射激光器 (vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL) 中也被观察到<sup>[30]</sup>.

接着, 分析 SL 输出中的 EE 情况. 这里选择了一个适中的注入强度  $k_{inj} = 100 \text{ ns}^{-1}$  和反馈强度  $k_f = 15 \text{ ns}^{-1}$ , 展示了三种频率失谐下的 SL 中的时序和对应的峰值强度的 PDF. 图 2(a) 为频率失谐为正失谐  $\Delta f = 15 \text{ GHz}$  时的情况, 此时在 10  $\mu\text{s}$  的时序中 EE 的相对数量为 2.12%; 在图 2(b) 所示的零失谐情形中, EE 的相对数量为 4.71%; 而图 2(c) 对应负频率失谐  $\Delta f = -20 \text{ GHz}$ , 通过计算得到 EE 的相对数量为 1.29%. 相比于零失谐情形, 在正失谐的情形中, 可以在固定的时间间隔内观察到更多的高强度振荡脉冲, 这导致 EE 的阈值显著变高, 一些原来刚高于零失谐阈值的 EE, 由于新阈

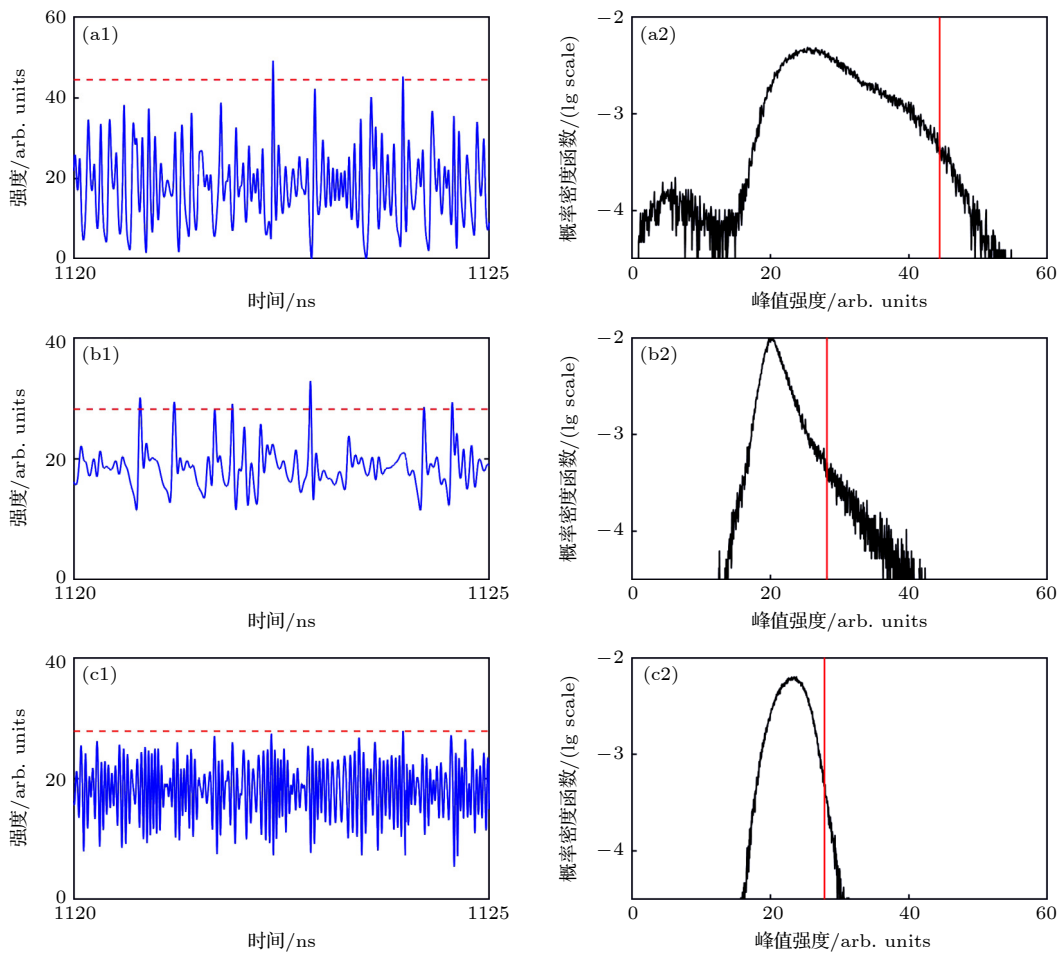


图 2  $k_f = 15 \text{ ns}^{-1}$ ,  $k_{inj} = 100 \text{ ns}^{-1}$  时, SL 的时序图和峰值强度的统计分布图 (红色虚线和竖线代表极端事件的阈值  $AI = 2$ ) (a)  $\Delta f = 15 \text{ GHz}$ ; (b)  $\Delta f = 0 \text{ GHz}$ ; (c)  $\Delta f = -20 \text{ GHz}$

Fig. 2. Time series and statistical distributions of peak intensity in SL at  $k_f = 15 \text{ ns}^{-1}$  and  $k_{inj} = 100 \text{ ns}^{-1}$  (Red dashed lines and vertical lines represent the threshold of EEs,  $AI = 2$ ): (a)  $\Delta f = 15 \text{ GHz}$ ; (b)  $\Delta f = 0 \text{ GHz}$ ; (c)  $\Delta f = -20 \text{ GHz}$ .

值变高不再是 EE, 因而 EE 的相对数量较零失谐情形下有所降低. 同样, 负失谐情形中, 也可以在固定的时间间隔内观察到更多的振荡脉冲, 但是出现的主要是强度不太大的脉冲, 很少有高强度脉冲出现, 甚至零失谐中的部分高强度脉冲被抑制, 导致 EE 的阈值和零失谐阈值相比几乎不变, 同时由于更多低于阈值的脉冲的出现, 这种情形下 EE 的相对数量低于零失谐情形. 由以上结果可以知道, 频率失谐也可以影响 EE 的产生.

下面研究注入强度对 SL 中 EEs 的影响. 图 3 展示了在  $\Delta f \in [-20, 15]$  GHz,  $k_f \in [9, 30]$  ns<sup>-1</sup> 条件下, EE 相对数量随注入强度  $k_{inj}$  的变化情况. 在零失谐情形下, SL 中 EE 的相对数量几乎在整个参数范围内都是高于 ML 中 EE 的相对数量, 表现为增强作用. 对于负失谐的情形, 即  $\Delta f = -20$  GHz 时, 当注入强度约小于 150 ns<sup>-1</sup> 时, SL 中 EE 相对数量低于 ML, 表现为抑制作用, 超过 150 ns<sup>-1</sup>, SL 中 EE 相对数量主要表现为增强作用. 对于  $\Delta f = 15$  GHz 正失谐情形, EE 的相对数量会随着注入强度的增大先增大后减小, 随着注入强度的进一步增大, EE 的相对数量会再次增加并逐渐达到饱和, 在整个注入强度的参数范围内, EE 的相对数量会在一些区域被抑制, 另外一些区域被增强, 当反馈强度达到 30 ns<sup>-1</sup>, EE 相对数量得到增强的区域最为广泛. 通过比较图 3(a)—(c), 发现随着反馈强度增加, 零失谐和负失谐情形中, SL 中 EE 相对数量得到增强的参数范围几乎不发生改变, 而在正失谐情形中的 EE 相对数量得到增强的参数范围先缩小, 后扩大. 因而可知: 注入强度对 SL 中 EE 的相对数量的增强、抑制同样也很关键, 同时注入强度的作用还会受到反馈强度的影响.

为了全面研究 SL 中 EE 相对数量随注入参数的变化情况, 图 4(a1)—(c1) 展示了不同反馈强度下 SL 中 EE 相对数量随注入参数  $\Delta f, k_{inj}$  变化的二维图. 图 4(a1)—(c1) ML 中的 EE 相对数量分别为 1.84%, 3.13%, 2.29%, 图中的蓝色区域表示 SL 中 EE 相对数量受到抑制, 黄绿色区域表明 SL 中 EE 的相对数量接近于 ML 中 EE 的相对数量, 深红色区域对应 EE 相对数量得到增强. 考虑到 SL 中 EE 的发生可能与 ML 和 SL 之间的相关性有关, 还展示了注入参数空间中对应的 CC 的二维映射图, 如图 4(a2)—(c2) 通过三种反馈强度的比较可以发现, 随着反馈强度的增加, 用暗红色标

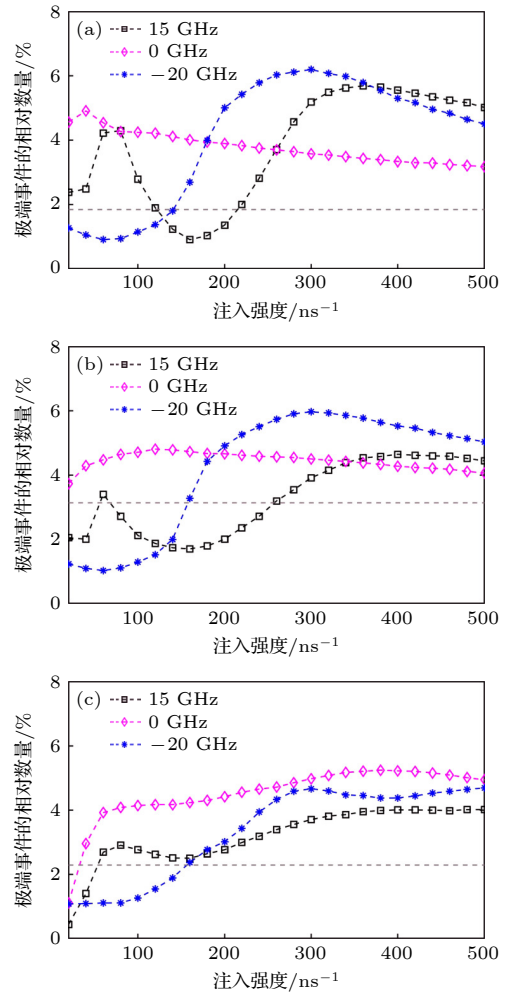


图 3 SL 中 EE 的相对数量随着注入强度变化情况 (灰色虚线代表 ML 中 EE 的相对数量) (a)  $k_f = 9$  ns<sup>-1</sup>; (b)  $k_f = 15$  ns<sup>-1</sup>; (c)  $k_f = 30$  ns<sup>-1</sup>

Fig. 3. Relative number of EEs versus injection strength (Gray dashed lines represent the relative number of EEs in ML): (a)  $k_f = 9$  ns<sup>-1</sup>; (b)  $k_f = 15$  ns<sup>-1</sup>; (c)  $k_f = 30$  ns<sup>-1</sup>.

记的高相关性的区域在选定的参数空间中越来越小. 值得注意的是, 在该区域内反馈强度为 9 ns<sup>-1</sup> 时, SL 中 EE 的相对数量接近于 ML 中 EE 的相对数量. 然而, 随着反馈强度的增大, 例如, 反馈强度为 15 ns<sup>-1</sup> 以及 30 ns<sup>-1</sup> 时, 高相关性区域内 EE 的相对数量显著增加. 有趣的是, 在该区域之外, 当 CC 在 0.4—0.6, 对应图 4(a2)—(c2) 中的黄绿色区域时, 相应的参数区域在图 4(a1)—(c1) 均被标记了暗红色, 也就是说, 在三种不同的反馈强度下, 正负失谐部分都存在 EE 相对数量得到明显增强的区域. 进一步观察, 还发现该增强区有逐渐扩大的趋势, 同时负失谐增强区始终大于正失谐增强区, 这揭示了非零线宽增强因子带来的关于零失谐的不对称行为<sup>[2]</sup>. 此外, 在图 4(a2)—(c2) 中的蓝色

区域, 即 CC 低于 0.2 时, 在对应的图 4(a1)—(c1) 中正失谐部分还有一块暗红色增强区域, 该增强区域的产生类似于已经报道的传统光反馈形成的混沌光注入系统 (chaotic optical injection system based on COF, COIS-COF)<sup>[17]</sup>. 上述讨论表明: 在 ML 和 SL 相关性不高的特定参数区域中, SL 中 EE 相对数量可能会被增强, 尤其在 CC 处于 0.4—0.6 时, 被增强的概率很大, 当 CC 低于 0.2 时, 正失谐参数下 EE 的产生也可能被增强. 而反馈强度的增大, 一方面可以扩大高相关系数外的增强区域, 另一方面可以增加高相关性区域内的 EE 相对数量.

下面考虑在 COIS-PCF 中调节 ML 的泵浦电流  $J_M$  对 EE 产生的影响. 在讨论 SL 之前先讨论 ML 中产生的 EE. 为了便于讨论, 固定了 ML 的反馈强度  $k_f = 30 \text{ ns}^{-1}$  和阈值电流  $J_{th} = 14.7 \text{ mA}$ , 只调节 ML 的泵浦电流. 通过观察图 5 中展示的不同泵浦电流下 ML 中的时序和对应的峰值强度的 PDF, 很容易知道 ML 输出均处于混沌状态, 都有少量 EE

产生, 经计算其相对数量分别为 2.29%, 1.90%, 1.30%, 1.36%. 对于图 5(a)—(c), 尽管随着泵浦电流变大, 有高强度的脉冲出现, 但信号时序的平均强度增加使得 EE 的阈值变高, 导致 EE 的相对数量降低. 而在图 5(c), (d) 中, 泵浦电流进一步增加, 由于激发强度较小的脉冲数量变少, 后者中 EE 相对数量反而略高于前者. 由此可知, ML 的泵浦电流  $J_M$  同样影响着 EE 的产生.

接着我们进一步研究  $J_M$  对 SL 中 EE 的影响. 图 6(a1)—(d1) 为  $J_M/J_{th} \in [1.05, 2]$ ,  $k_f = 30 \text{ ns}^{-1}$  条件下, SL 中产生 EE 的相对数量随注入参数  $\Delta f$  和  $k_{inj}$  变化的二维图, 其中 ML 的 EE 相对数量分别为 2.29%, 1.90%, 1.30%, 1.36%, 对应图中淡蓝色区域. 同样地, 图 6(a2)—(d2) 也展示了注入参数空间中对应的 CC 的二维映射图. 通过对比 4 种  $J_M$  的映射图, 发现随着  $J_M$  不断增加, 参数空间中用暗红色标记的 ML, SL 高相关性区域不断扩大, 而在高相关性区域参数下 SL 中产生 EE 的

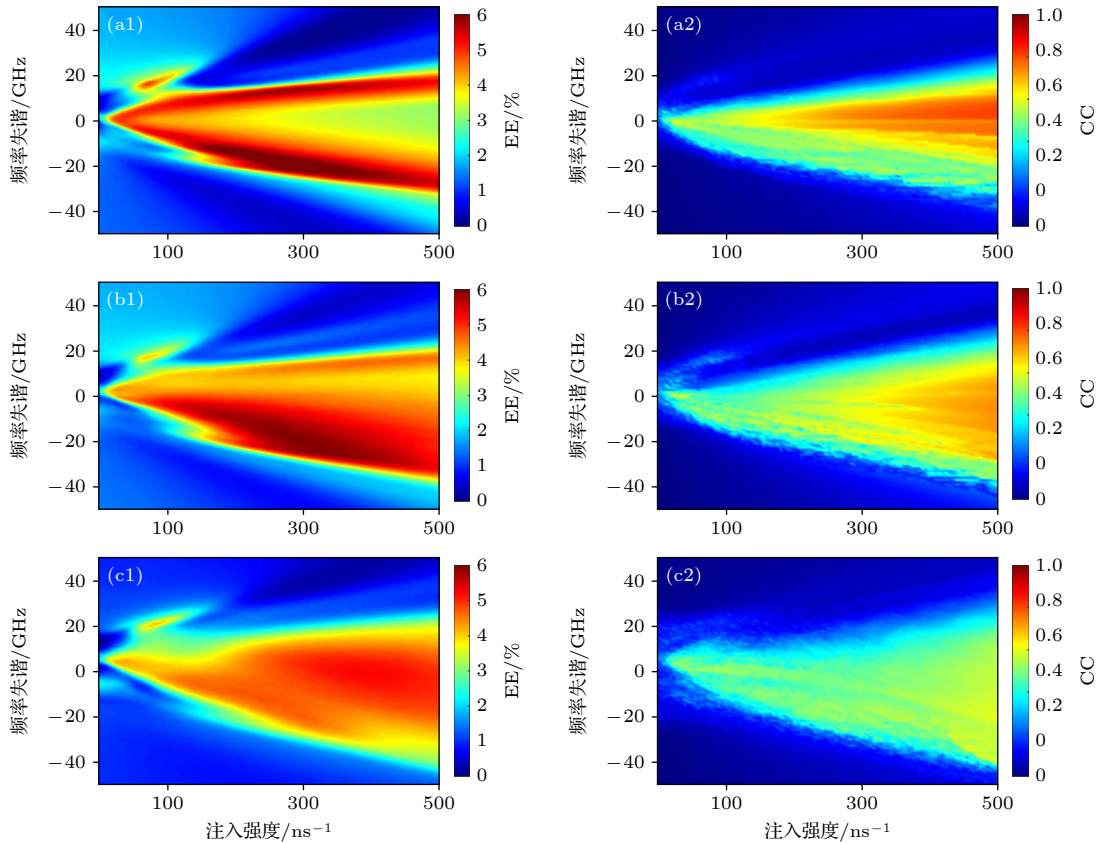


图 4 COIS-PCF 中 EE 相对数量在注入参数空间内的二维图 (a1)—(c1) 以及对应的主从激光器互相关系数的二维映射图 (a2)—(c2): (a)  $k_f = 9 \text{ ns}^{-1}$ ; (b)  $k_f = 15 \text{ ns}^{-1}$ ; (c)  $k_f = 30 \text{ ns}^{-1}$

Fig. 4. Maps of relative number of EEs generated from the COIS-PCF in the injection-parameter space (a1)—(c1) and corresponding CC between the ML and SL (a2)—(c2): (a)  $k_f = 9 \text{ ns}^{-1}$ ; (b)  $k_f = 15 \text{ ns}^{-1}$ ; (c)  $k_f = 30 \text{ ns}^{-1}$ .

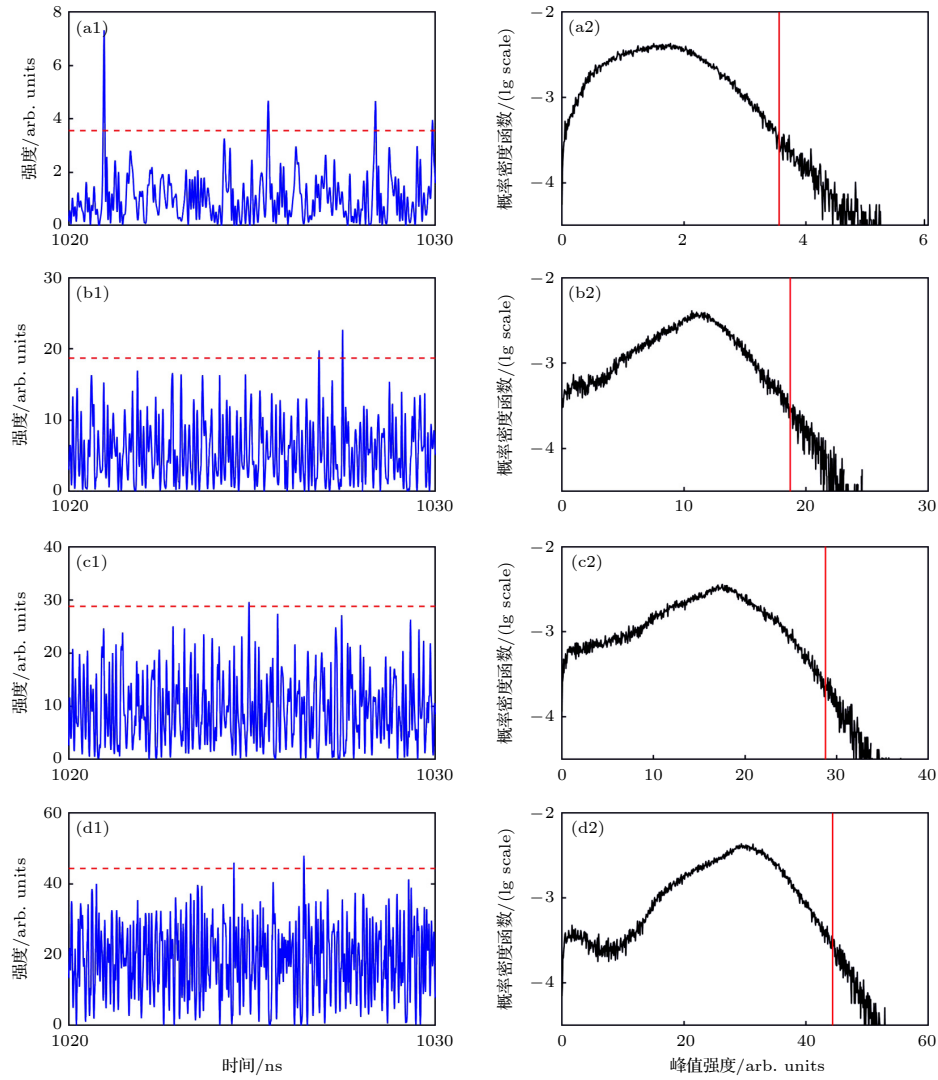


图 5  $k_f = 30 \text{ ns}^{-1}$  时, ML 的时序图和峰值强度的统计分布图 (红色虚线代表极端事件的阈值  $AI = 2$ ) (a)  $J_M = 1.05 J_{th}$ ; (b)  $J_M = 1.30 J_{th}$ ; (c)  $J_M = 1.50 J_{th}$ ; (d)  $J_M = 2.00 J_{th}$

Fig. 5. Time series and statistical distributions of peak intensity in ML at  $k_f = 30 \text{ ns}^{-1}$  (Red dashed lines and vertical lines represent the threshold of EEs,  $AI = 2$ ): (a)  $J_M = 1.05 J_{th}$ ; (b)  $J_M = 1.30 J_{th}$ ; (c)  $J_M = 1.50 J_{th}$ ; (d)  $J_M = 2.00 J_{th}$ .

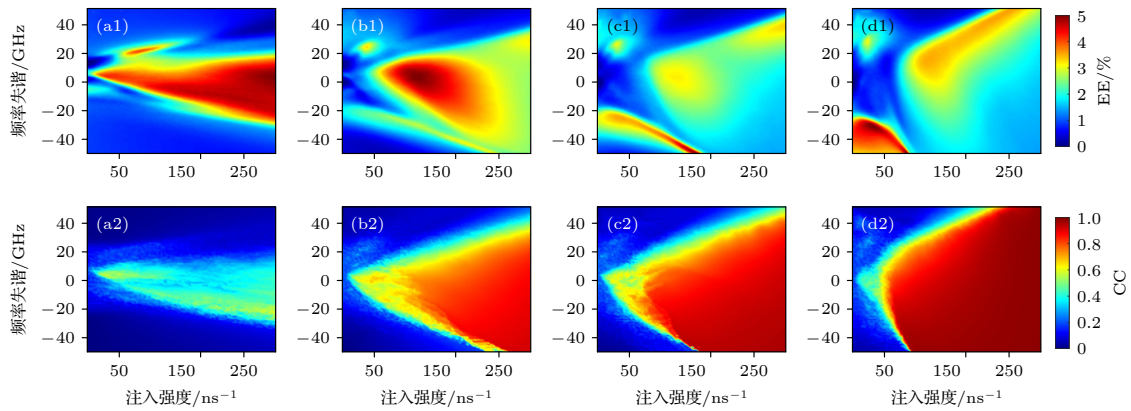


图 6 COIS-PCF 中 EE 相对数量在注入参数空间内的二维图 (a1)—(d1) 以及对应的从激光器互相关系数 (a2)—(d2) (a)  $J_M = 1.05 J_{th}$ ; (b)  $J_M = 1.30 J_{th}$ ; (c)  $J_M = 1.50 J_{th}$ ; (d)  $J_M = 2.00 J_{th}$

Fig. 6. Maps of relative number of EEs generated from the COIS-PCF in the injection-parameter space (a1)–(d1) and corresponding CC between the ML and SL (a2)–(d2): (a)  $J_M = 1.05 J_{th}$ ; (b)  $J_M = 1.30 J_{th}$ ; (c)  $J_M = 1.50 J_{th}$ ; (d)  $J_M = 2.00 J_{th}$ .

相对数量均趋向于一个接近 ML 中 EE 相对数量的稳定值, 并且类似于图 4, 主从激光器 CC 在 0.4—0.6 的参数区域也出现了红黄色的增强区域. 值得注意的是, 在图 6(a2) 中 CC 低于 0.2 的蓝色区域对应的参数下, 尽管在正失谐部分有 EE 增强区, 却并未在负失谐部分触发 EE 增强区, 但当  $J_M$  不断增加, 如图 6(b1)—(d1) 所示, 负失谐部分逐渐产生了一块不断增大的红黄色增强区. 于是可以得出结论: ML 的泵浦电流  $J_M$  增加会导致参数空间中高相关性区域的扩大, 同时促进低相关性区域中 EE 负失谐增强区的产生与增大.

## 4 结 论

本文对 COIS-PCF 系统进行仿真, 数值分析了混沌输出中 EE 的特性. 通过观察可知在研究的参数范围内, 作为注入源的 ML 和被注入的 SL 始终工作在混沌状态, 输出中均有 EE 的产生. 接着讨论了注入参数对输出中 EE 相对数量的影响, 结果表明: 在高相关性参数区域, SL 中 EE 的相对数量趋向于一个接近 ML 中 EE 相对数量的稳定值; 在 CC 处于 0.4—0.6 的参数区域, 有很大概率会出现 EE 的增强区; 而 CC 低于 0.2 的区域仅在正失谐部分有增强区的出现. 进一步, 发现对于相同的注入参数范围, 反馈强度的增加不仅会扩大增强参数区域, 还会增加高相关性区域内的 EE 相对数量. 此外, 在一个适当的反馈强度条件下, 不断增加 ML 的泵浦电流并进行比较, 发现 ML 泵浦电流的增大会导致主从系统有更大的锁定参数范围, 还会在负失谐部分产生一个不断扩大的 EE 增强区.

## 参考文献

- [1] Talouneh K, Rimoldi C, Kheradmand R, Tissoni G, Eslami M 2020 *Phys. Rev. A* **102** 033508
- [2] Solli D R, Ropers C, Koonath P, Jalali B 2007 *Nature* **450** 1054
- [3] Arecchi F T, Bortolozzo U, Montina A, Residori S 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 153901
- [4] Metzger J J, Fleischmann R, Geisel T 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 203903
- [5] Birkholz S, Bree C, Veselic I, Demircan A, Steinmeyer G 2016 *Sci. Rep.* **6** 35207
- [6] Kumar C N, Gupta R, Goyal A, Loomba S, Raju T S, Panigrahi P K 2012 *Phys. Rev. A* **86** 025802
- [7] Dal Bosco A K, Wolfersberger D, Sciamanna M 2013 *Opt. Lett.* **38** 703
- [8] Reinoso J A, Zamora-Munt J, Masoller C 2013 *Phys. Rev. E* **87** 062913
- [9] Zamora-Munt J, Garbin B, Barland S, Giudici M, Leite J R R, Masoller C, Tredicce J R 2013 *Phys. Rev. A* **87** 035802
- [10] Ahuja J, Nalawade D B, Zamora-Munt J, Vilaseca R, Masoller C 2014 *Opt. Express* **22** 28377
- [11] Perrone S, Vilaseca R, Zamora-Munt J, Masoller C 2014 *Phys. Rev. A* **89** 033804
- [12] Mercier E, Even A, Mirisola E, Wolfersberger D, Sciamanna M 2015 *Phys. Rev. E* **91** 042914
- [13] Choi D, Wishon M J, Barnoud J, Chang C Y, Bouazizi Y, Locquet A, Citrin D S 2016 *Phys. Rev. E* **93** 042216
- [14] Lee M W, Baladi F, Burie J R, Bettiati M A, Boudrioua A, Fischer A P 2016 *Opt. Lett.* **41** 4476
- [15] Jin T, Siyu C, Masoller C 2017 *Opt. Express* **25** 31326
- [16] Uy C H, Rontani D, Sciamanna M 2017 *Opt. Lett.* **42** 2177
- [17] Huang Y, Zhou P, Zeng Y, Zhang R H, Li N Q 2022 *Phys. Rev. A* **105** 043521
- [18] Li X Z, Zhou X Q, Gu Y Y, Zhao M S 2022 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **28** 0600108
- [19] Bonatto C, Feyereisen M, Barland S, Giudici M, Masoller C, Leite J R, Tredicce J R 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 053901
- [20] Jiang N, Zhao A, Xue C, Tang J, Qiu K 2019 *Opt. Lett.* **44** 1536
- [21] Lawrence J S, Kane D M 2001 *Phys. Rev. A* **63** 033805
- [22] Rontani D, Mercier E, Wolfersberger D, Sciamanna M 2016 *Opt. Lett.* **41** 4637
- [23] Feinberg J 1982 *Opt. Lett.* **7** 486
- [24] Jiang N, Zhao A, Liu S, Zhang Y, Peng J, Qiu K 2020 *Opt. Express* **28** 9477
- [25] Mu P, Pan W, Yan L, Luo B, Zou X 2017 *IEEE Photonics J.* **9** 1
- [26] Zhang R, Zhou P, Yang Y, Fang Q, Mu P, Li N 2020 *Opt. Express* **28** 7197
- [27] Mu P H, Pan W, Li N Q 2018 *Opt. Express* **26** 15642
- [28] Huang Y, Zhou P, Li N Q 2021 *Opt. Express* **29** 19675
- [29] Zhao A, Jiang N, Peng J, Liu S, Zhang Y, Qiu K 2022 *Opto-Electron. Adv.* **5** 200026
- [30] Zeng Y, Zhou P, Huang Y, Li N 2022 *Opt. Lett.* **47** 142
- [31] Rimoldi C, Barland S, Prati F, Tissoni G 2017 *Phys. Rev. A* **95** 023841
- [32] Tlidi M, Panajotov K 2017 *Chaos* **27** 013119

# Evolution of extreme events in chaotic light-injected semiconductor lasers\*

Ge Shan-Shan<sup>1)</sup> Wang Teng-Wu<sup>1)</sup> Ge Jing-Yi<sup>1)</sup>

Zhou Pei<sup>1)2)†</sup> Li Nian-Qiang<sup>1)2)‡</sup>

1) (*Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China*)

2) (*Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Soochow University, Suzhou 215006, China*)

( Received 9 May 2023; revised manuscript received 29 May 2023 )

## Abstract

Rare ultrahigh pulses, classified as rogue waves (RWs), are inevitable and catastrophic in many different systems. Considering the damage they may produce, it is meaningful to understand the formation mechanism of these pulses and, if possible, control them. However, the rarity of RW and the difficulty in implementing the experiment are major limitations to understanding their formation. In 2007, Solli et al. (Solli D R, Ropers C, Koonath P, Jalali B 2007 *Nature* **450** 1054) introduced the concept of optical RW, i.e. extreme event (EE) by comparing the appearance of oceanic RWs with the propagation of light fields in optical fibers. After that, the research of EEs entered into a flourishing period and different optical systems were proposed to analyze the generation and origin of EEs. Linear system is one of the most widely studied EE systems, such as linear light propagation in glass fibers, random media, and linear interference models. In addition to the linear systems mentioned above, efforts have also been made to produce nonlinear systems of EEs, such as microstructure fibers and tapered gradient exponential nonlinear fibers. In these nonlinear systems, the formation mechanism of EE is studied by using the nonlinear Schrödinger equation. Recently, the EEs in semiconductor laser systems have received a great deal of attention. On the one hand, semiconductor lasers with rich dynamic properties provide a cheap and controllable platform for understanding and predicting EE. The behavior of EE, on the other hand, is a powerful tool for understanding the fundamental mechanism of different laser systems.

In this work, based on the EEs generated in a semiconductor laser with phase-conjugate optical feedback (the master laser, ML), we inject its output into another free-running semiconductor laser (the slave laser, SL) and discuss the evolution of EEs in the system by numerical simulation. Herein, we analyze the influence of injection parameters on EEs through the two-dimensional maps of the relative number of EEs in the injection-parameter space. It can be concluded that in an area of high correlation, the relative number of EEs in SL tends to be a stationary value close to that in ML, while it may be enhanced in some weakly correlated regions. The results demonstrate the possibility of controlling EEs by optical injection, which is beneficial to optimizing the performance of chaotic laser systems or expanding their application scope.

**Keywords:** semiconductor laser, extreme event, chaotic optical injection, phase-conjugate optical feedback

**PACS:** 42.55.Px, 05.45.-a, 05.45.Pq

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230759

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62004135, 62001317, 62171305, 62111530301), the Natural Science Research Project of Jiangsu Higher Education Institutions of China (Grant Nos. 20KJA416001, 20KJB510011), and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK20200855).

† Corresponding author. E-mail: [peizhou@suda.edu.cn](mailto:peizhou@suda.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [nli@suda.edu.cn](mailto:nli@suda.edu.cn)



## 混沌光注入半导体激光器中极端事件的演变

戈杉杉 王腾午 戈静怡 周沛 李念强

### Evolution of extreme events in chaotic light-injected semiconductor lasers

Ge Shan-Shan Wang Teng-Wu Ge Jing-Yi Zhou Pei Li Nian-Qiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 164201 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230759

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230759>

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

#### 半导体激光器混沌输出的延时特征和带宽

Time delay signature and bandwidth of chaotic laser output from semiconductor laser

物理学报. 2020, 69(9): 090501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191881>

#### 自混沌光相位调制光反馈半导体激光器输出光的混沌特性

Chaotic characteristics of output light from semiconductor laser with self-chaotic phase modulation and optical feedback

物理学报. 2022, 71(15): 150502 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220204>

#### Parity-time对称性对电注入半导体激光器的模式控制

Mode control of electrically injected semiconductor laser with parity-time symmetry

物理学报. 2020, 69(2): 024202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191351>

#### 基于双路光电反馈下光注入半导体激光器的高性能线性调频信号产生

High-performance linear frequency-modulated signal generation based on optically injected semiconductor laser with dual-loop optoelectronic feedback

物理学报. 2022, 71(21): 214204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221308>

#### 半导体激光器输出混沌光的延时特性和带宽

Time delay characteristics and bandwidth of chaotic laser from semiconductor laser

物理学报. 2018, 67(14): 140501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180035>

#### 双凹型谐振腔结构的金属半导体纳米激光器的数值仿真

Numerical study of metallic semiconductor nanolasers with double-concave cavity structures

物理学报. 2019, 68(22): 224201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190972>