

# 共同噪声驱动分布式布拉格反射半导体激光器混沌同步研究

杜以成<sup>1,2</sup>, 张蓉<sup>1,2</sup>, 王龙生<sup>1,2</sup>, 贾志伟<sup>1,2</sup>, 王安帮<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024;

<sup>2</sup>太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024

**摘要** 提出并理论研究了基于三段式分布式布拉格反射(DBR)半导体激光器的噪声共驱混沌同步。互相关与关联维分析表明,噪声光注入强度在 0.34~0.83 内时,一对参数匹配的 DBR 激光器可以实现混沌同步。更重要的是,混沌同步对激光器光栅区、相位区参数失配非常敏感,具有更大的硬件参数空间;通过对光栅区电流进行调制,可实现快速的混沌同步开关控制,其同步恢复时间仅约为 4 ns。利用 DBR 激光器混沌同步有望实现高速安全的混沌激光密钥分发。

**关键词** 激光器; 混沌激光; 混沌同步; 半导体激光器; 密钥分发

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2314003

## Chaos Synchronization of Distributed Bragg Reflection Semiconductor Lasers Driven by Common Noise

Du Yicheng<sup>1,2</sup>, Zhang Rong<sup>1,2</sup>, Wang Longsheng<sup>1,2</sup>, Jia Zhiwei<sup>1,2</sup>, Wang Anbang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

<sup>2</sup>College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China

**Abstract** We proposed and numerically studied a method for chaotic synchronization of three-section distributed Bragg reflection (DBR) semiconductor lasers driven by a common noise. The analysis of cross-correlation and correlation dimension shows that a pair of parameter-matched DBR lasers can achieve chaos synchronization when the injection strength of noise light is within 0.34–0.83. More importantly, chaos synchronization is very sensitive to the mismatch of parameters in grating region and phase region of DBR laser, and DBR laser has a large space for hardware parameters. By modulating the current in the grating region, the chaos synchronization on-off keying can be realized, and the synchronization recovery time is only about 4 ns. Using chaos synchronization of DBR laser, we are expected to achieve high-speed and secure chaotic laser key distribution.

**Key words** lasers; chaos laser; chaos synchronization; semiconductor laser; key distribution

## 1 引言

半导体激光器混沌同步在高速保密通信<sup>[1-3]</sup>领域具有重要应用。目前报道的激光器同步方式主要分为主从注入<sup>[4]</sup>和共同信号驱动<sup>[5]</sup>两类。主从式混沌同步<sup>[6]</sup>通常是将一个半导体激光器(主激光器)输出的混沌光注入到另一个激光器(从激光器),使其输出相同的混沌波形。需指出,从激光器弛豫振荡频率限制了

混沌保密通信速率<sup>[7]</sup>。共同信号驱动方式<sup>[8]</sup>是将同一个复杂的驱动光(SLD)分别注入两个非耦合的激光器,使它们产生相同且与驱动信号低相关的响应输出。由于两个激光器不再直接耦合,因此,基于共驱混沌同步的保密通信可以突破激光器的弛豫振荡频率对信息速率的限制<sup>[9-11]</sup>。更有趣的是,得益于激光器响应与驱动信号的低相关性,共驱同步促生了新型高速物理层密钥分发<sup>[2,12-13]</sup>。例如:2012年 Yoshimura 等<sup>[2]</sup>首次在

收稿日期: 2022-05-09; 修回日期: 2022-06-09; 录用日期: 2022-06-13

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1803500)、山西省重点研发计划国际科技合作项目(201903D421012)、国家自然科学基金(61822509,61805170,62035009)、山西省“1331”工程重点创新团队项目、山西省高等学校中青年拔尖创新人才计划基金

通信作者: \*wanganbang@tyut.edu.cn

实验上利用分布反馈式(DFB)激光器的共驱同步实现了 182 kbit/s 密钥分发;2021 年本课题组<sup>[14]</sup>从实验上利用法布里-珀罗(F-P)激光器共驱同步实现了 160 km、0.75 Gbit/s 密钥分发。

2007 年 Yamamoto 等<sup>[5]</sup>从实验上利用混沌激光作为驱动信号实现了 DFB 半导体激光器共驱混沌同步;随后, Oowada 等<sup>[8]</sup>实验研究了光反馈 DFB 激光器在混沌光共驱下的同步特性,发现通过反馈光相位可以调节激光器的同步性。2012 年 Yoshimura 等<sup>[2]</sup>提出了基于噪声光共驱光反馈 DFB 激光器的密钥分发方案,并对反馈相位进行随机调制,实现同步开关键控,以提高安全性。此后, Koizumi 等<sup>[12]</sup>采用两个光反馈 DFB 激光器的级联同步进一步提高密钥分发安全性; Sasaki 等<sup>[15]</sup>利用单片集成光反馈 DFB 激光器提高了同步及密钥分发稳定性。实验发现,键控过程中光反馈 DFB 激光器的同步恢复时间长达 68 ns,这严重限制了密钥分发速率<sup>[16]</sup>。Jiang 等<sup>[17]</sup>数值研究了光反馈垂直腔面发射(VCSEL)半导体激光器的共驱同步,预期在驱动光偏振态正交键控下的同步恢复时间可达 13 ns。此外,一些实验研究先后表明,无外部反馈情况下法布里-珀罗(F-P)、VCSEL 半导体激光器均可在噪声光驱动下实现同步,并具有较短的同步恢复时间<sup>[14,18]</sup>。文献[14]中实验表明 F-P 激光器共驱同步的恢复时间可达亚纳秒。最近, Huang 等<sup>[18]</sup>数值研究了量子点自旋极化 VCSEL 激光器的共驱同步,预期通过键控泵浦偏振得到约百皮秒的同步恢复时间。综上,已报道的响应激光器分别有 DFB 激光器、F-P 激光器和 VCSEL 激光器。此外,共驱同步结构中响应激光器可以带有光反馈亦可不带,分别称为闭环和开环结构。闭环同步结构下,外腔延时反馈的影响导致同步恢复时间长,限制了混沌密钥分发的速率。开环同步结构可实现较快的同步恢复时间,但是现有激光器的参数空间较小、不易对激光器自身参数进行键控。因此,实现高速键控的共驱混沌同步成为密钥分发的关键。

针对上述问题,本文提出一种共同噪声驱动 DBR 激光器的开环混沌同步方案。典型的 DBR 激光器由增益区、相位区和光栅区组成,比 DFB 激光器具有更大的参数空间。更重要的是,在开环结构下即可通过光栅区或相位区电流对 DBR 激光器波长实施调制,无需增加外部反馈,因此该结构有望实现快速的波长键控同步,有利于提高密钥分发速率。本文数值研究了 DBR 激光器共驱混沌同步的条件、参数失配的影响和混沌同步开关键控,理论预期同步恢复时间可达 4 ns,并分析了其原因。

## 2 DBR 半导体激光器混沌同步模型

共同噪声驱动 DBR 激光器混沌同步的装置如图 1 所示。SLD 经过光学滤波器(OF)产生中心波长为  $\lambda_0$ 、谱宽为  $\Delta\lambda_0$  的驱动光。驱动光经耦合器(3 dB coupler)分成两路(记为  $SL_A$  和  $SL_B$ ),分别注入一对参数匹配的三段式 DBR 激光器。通过衰减器(VOA)和偏振控制器(PC)分别调节注入光强度和偏振态,使得激光器达到同步振荡。进一步地,可采用单模光纤(SMF)和色散补偿光纤(DCF)组合构建驱动光的传输链路,实现远距离同步。

采用 VPI transmissionMaker 光通信系统与器件仿真软件对上述系统进行数值模拟,并在增益区中添加了自发辐射噪声。三段式 DBR 激光器的增益区、相位区、光栅区的长度分别为  $700\ \mu\text{m}$ 、 $100\ \mu\text{m}$ 、 $500\ \mu\text{m}$ ,其他主要内部参数设置见表 1。当阈值电流  $I_{th}=40\ \text{mA}$ 、增益区电流  $I_g=1.5I_{th}$ 、相位区电流  $I_p=0\ \text{mA}$ 、光栅区电流  $I_D=20\ \text{mA}$  时,激光器的输出光功率为 4.09 mW,中心波长为 1552.42 nm。模拟过程中,噪声驱动光的中心波长为  $\lambda_0=1552.44\ \text{nm}$ 、3 dB 谱宽  $\Delta\lambda_0=0.24\ \text{nm}$ 。需指出,噪声驱动光谱只需覆盖激光器光谱即可。同时,为了验证光纤传输的可行性,在驱动器到激光器之间设置了 80 km 标准单模光纤和 16 km 色散补偿光纤,色散补偿残差为 0 ps/nm。

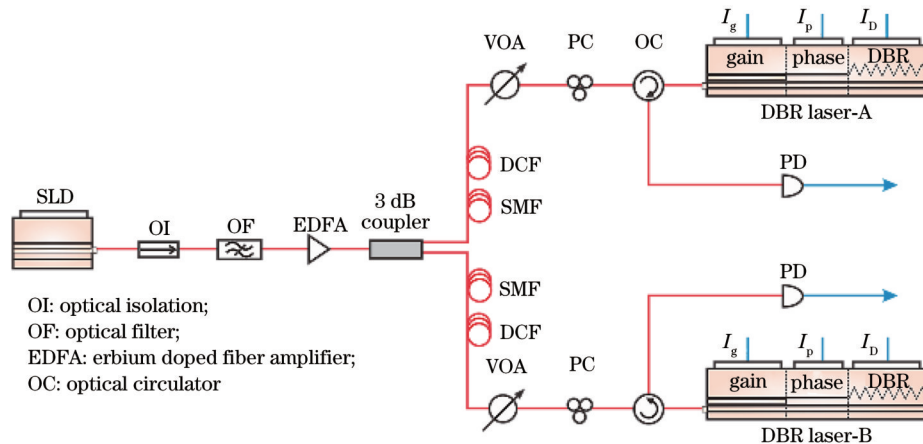


图 1 共同噪声驱动 DBR 激光器混沌同步的装置图

Fig. 1 Device diagram of common noise-driven chaotic synchronization of DBR lasers

表 1 DBR 半导体激光器的部分内部参数

Table 1 Some internal parameters of DBR semiconductor laser

Symbol	Description	Value
$\alpha$	Linewidth factor	3
$r$	Interface reflection coefficient	0.32
$L_{\text{gain}}$	Active region length	700 $\mu\text{m}$
$L_{\text{phase}}$	Phase region length	100 $\mu\text{m}$
$L_{\text{grating}}$	Grating region length	500 $\mu\text{m}$
$W$	Active region width	2.50 $\mu\text{m}$
$T$	Active region thickness	40 nm
$G_{\text{n}}$	Nonlinear gain coefficient	$1 \times 10^{-23} \text{ m}^3$
$D_{\text{c}}$	Initial carrier density	$1 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$
$G_{\text{l}}$	Gain coefficient linear	$3 \times 10^{-20} \text{ m}^2$
$D_{\text{ct}}$	Carrier density transparency	$1.5 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$
$f_{\text{stop}}$	Grating stopband frequency	-400 GHz

采用互相关系数  $C$  表征两个激光器输出的同步质量<sup>[19]</sup>:

$$C = \frac{\langle [x(t) - \langle x(t) \rangle][y(t) - \langle y(t) \rangle] \rangle}{\sigma_1 \sigma_2}, \quad (1)$$

式中:  $x(t)$  和  $y(t)$  分别表示两组时序波形;  $\langle \cdot \rangle$  表示取平均值;  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  表示两组时序波形的标准差。互相关系数  $C$  越大, 两组时序的同步性越高, 互相关系数  $C$  为 1, 则表示两组混沌时序完全同步。

为减小噪声的影响, 采用二次嵌入方法计算 DBR 激光器时间序列的关联维度<sup>[20]</sup>。首先将数据点为  $N$  的混沌时间序列  $\{x_k, k=1, 2, \dots, N\}$ , 以嵌入时延  $\tau$ 、嵌入维  $M$  重构相空间矢量  $\mathbf{Y}(k) = [x_k, x_{k+\tau}, \dots, x_{k+(M-1)\tau}]$ 。为了充分利用采样数据, 第一次嵌入时延  $\tau=1$ 。然后对相空间进行奇异值分解, 获得主分量  $\mathbf{P}(k) = [p_1(k), p_2(k), \dots, p_M(k)]$ , 该主分量将明显大于噪声的前  $m$  个主分量  $\mathbf{P}'(k) = [p_1(k), p_2(k), \dots, p_m(k)]$ , 以嵌入时延  $\tau$ 、嵌入维  $M'$  重构出更高维度的相空间矢量  $\mathbf{Y}'(k) = [\mathbf{P}'_k, \mathbf{P}'_{k+\tau}, \dots, \mathbf{P}'_{k+(M'-1)\tau}]$ , 其中嵌入时延  $\tau$  是通过 C-C 方法<sup>[21]</sup> 计算得到的。二次嵌入相空间中距离小于  $r$  的两个矢量被称为关联矢量, 关联矢量的数量在  $N^2$  种组合中所占的比例称为关联积分。关联积分可表示为

$$I_C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \Theta(r - \|\mathbf{Y}'(i) - \mathbf{Y}'(j)\|), \quad (2)$$

式中:  $\Theta$  为 Heaviside 函数。如果随着嵌入维数  $M'$  的增加,  $\ln[I_C(r)]$  关于  $\ln r$  线性部分的斜率收敛于一个大于零的数值, 则该斜率即为时间序列的关联维度  $D_2$ 。  $D_2$  可表示为

$$D_2(r) = \frac{d \ln [I_C(r)]}{d \ln r}. \quad (3)$$

### 3 数值模拟结果

#### 3.1 混沌同步典型结果

首先展示一个典型的激光器同步结果。图 2(a) 显示驱动光和两个 DBR 激光器自由运行时的光谱; 可

见, 激光器中心波长、边模均一致, 驱动光光谱覆盖激光器中心波长。注入强度 ( $k_i$ ) 定义为注入到响应激光器的光功率与响应激光器自由运行时的光功率的比值。当驱动光注入强度为 0.43 时, 两个响应激光器光谱发生相同的变化, 即光谱展宽、峰值红移, 如图 2(b) 所示。图 3(a)、3(b) 分别显示了相应的驱动光以及两个 DBR 激光器输出信号的时序波形和功率谱。可见, 激光器的输出波形具有高度的相似性, 两者的功率谱也一致。两个激光器输出波形的相关散点图清晰地呈现了线性相关性, 如图 3(c) 所示, 两者互相关系数为 0.97。结果表明激光器之间实现了高度同步的响应输出。需要指出的是, 响应激光器 ( $\text{SL}_A$ ) 与 SLD 之间的相关散点图却不呈现明显的相关性, 如图 3(d) 所示, 两者互相关系数仅为 0.44。值得注意的是, 尽管激光器的弛豫频率为 2.3 GHz, 在驱动光注入下输出随机波形的 80% 能量带宽<sup>[22]</sup> 可达 12.5 GHz。因此, 利用 DBR 半导体激光器可以输出高度同步的宽带随机波形, 且该波形与驱动信号的相关度低, 可满足混沌密钥分发的应用需求<sup>[23]</sup>。

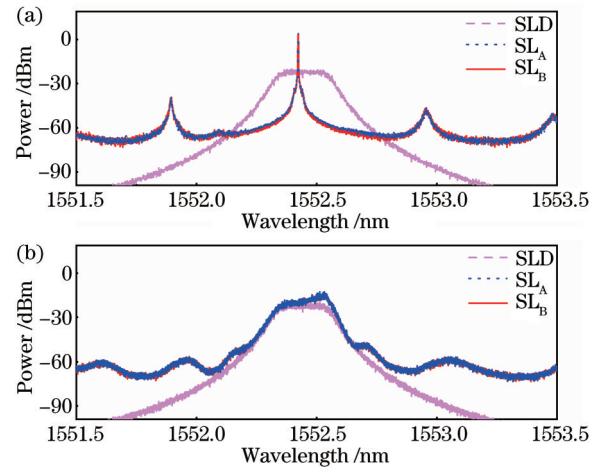


图 2 DBR 半导体激光器光谱 ( $I_g=60 \text{ mA}$ ,  $I_p=0 \text{ mA}$ ,  $I_D=20 \text{ mA}$ ,  $\lambda_d=1552.44 \text{ nm}$ ,  $\Delta\lambda_d=0.24 \text{ nm}$ ,  $k_i=0.43$ )。

(a) 无噪声注入; (b) 噪声注入

Fig. 2 Optical spectra of DBR semiconductor laser ( $I_g=60 \text{ mA}$ ,  $I_p=0 \text{ mA}$ ,  $I_D=20 \text{ mA}$ ,  $\lambda_d=1552.44 \text{ nm}$ ,  $\Delta\lambda_d=0.24 \text{ nm}$ , and  $k_i=0.43$ ). (a) Without noise injection; (b) with noise injection

图 4 给出了注入强度对响应激光器同步性  $C_{AB}$  (方形+曲线) 以及驱动-响应相关性  $C_{AD}$  (圆点+曲线) 的影响。当注入强度逐渐增大时, 激光器自身噪声的影响相对减弱, DBR 激光器呈现出对驱动噪声的响应, 同步性逐渐增强。当注入强度大于 0.33 时, 响应之间的相关性大于 0.90。当注入强度增加到 0.42 后, 激光器自身噪声不再有明显影响, 同步性趋于稳定。随着注入强度的增加, 响应激光器输出中包含的驱动信号的成分逐渐增加, 所以主从同步性会随之增大。

使用主成分分析和相空间再嵌入的方法<sup>[20]</sup>减小注

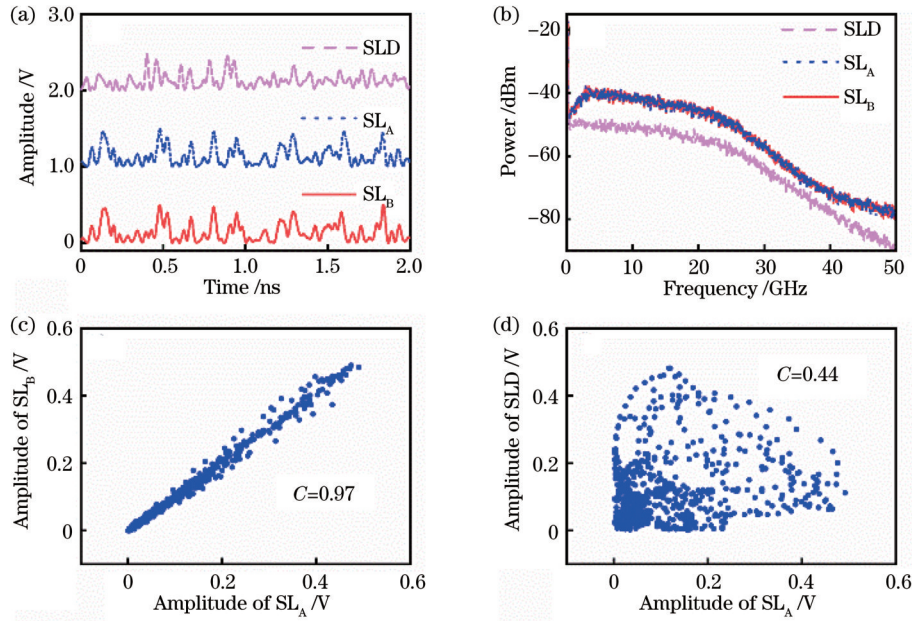


图 3 共同噪声驱动 DBR 激光器混沌同步。(a) 时序波形; (b) 频谱; (c) 响应激光器  $SL_A$  和  $SL_B$  的强度波形之间的相关散点图; (d) 响应激光器  $SL_A$  强度波形与驱动光的相关散点图  
 Fig. 3 Common noise-driven chaos synchronization of DBR lasers. (a) Time series; (b) RF spectra; (c) correlation dot plot of intensity waveforms of  $SL_A$  and  $SL_B$ ; (d) correlation dot plot of driving signal and intensity waveform of  $SL_A$

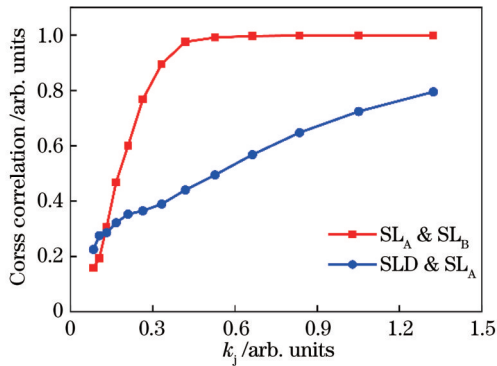


图 4 注入强度  $k_j$  对激光器同步性 ( $C_{AB}$ ) 及驱动-响应相关性 ( $C_{AD}$ ) 的影响  
 Fig. 4 Influence of injection strength  $k_j$  on synchronization between response lasers ( $C_{AB}$ ) and driving-response correlation ( $C_{AD}$ )

入噪声的影响, 计算响应激光器输出波形的关联维。分析了不同注入强度下响应激光器输出波形的关联维, 结果显示在图 5 中。在注入强度为 0.34 时, 关联积分的斜率在  $\ln r$  的 2.2~3.4 区域内收敛, 其收敛值即为关联维度, 大小为 2.3。在注入强度为 0.53 时, 关联积分的斜率在  $\ln r$  的 2.4~2.8 区域内收敛, 收敛区间相对变小, 但是关联维度增大至 2.8。在注入强度为 0.83 时, 关联积分的斜率收敛在  $\ln r$  为 2.6 附近, 收敛区间近似于一个点, 关联维度增大至 3.2。此时 DBR 激光器输出时序的关联维恰好不收敛。在注入强度为 1.32 时, 关联积分的斜率没有收敛区间, 这是因为此时主从同步性为 0.80, 响应激光器的输出中噪声占主要成分。结果表明噪声光注入的 DBR 激光器的输出

中包含混沌成分, 随着注入强度的增大, 其输出的关联维度增大, 但是当注入强度大于 0.83 时, 噪声成分占主导, 会导致关联维度无法收敛。

### 3.2 参数失配对同步性的影响

混沌同步对响应激光器的外部工作条件以及激光器本身的内部参数有着较高的要求<sup>[24]</sup>。因此研究激光器参数失配对同步性的影响, 以分析噪声驱动 DBR 激光器光栅区电流失配对同步性的影响。将  $SL_A$  光栅区电流  $I_{DA}$  固定在 20 mA, 改变  $SL_B$  激光器的光栅区电流  $I_{DB}$ , 结果如图 6(a) 所示。当  $I_{DB}=I_{DA}=20$  mA 时, 互相关系数最大。随着光栅区电流失配量  $|I_{DB}-I_{DA}|$  的增加, 同步性下降; 当失配量达到 0.8 mA 时, 互相关系数降低至 0.90。当 DBR 激光器的光栅区电流增大时, 由于自由载流子等离子体效应和量子限制 Stark 效应, 激光器波长蓝移<sup>[25]</sup>; 反之, 当光栅区电流减小时, 中心波长红移。因此, 图 6(b) 给出了图 6(a) 相应的激光器中心波长失配量  $|\lambda_B-\lambda_A|$  对同步系数的影响。可见, 在波长失配量为零时, 同步性达到最大值; 当波长失配量达到 2.3 pm 时, 同步系数降低至 0.90。相位区电流失配也同样会引起激光器中心波长失配, 从而影响 DBR 激光器的混沌同步质量, 其影响规律应与图 6(b) 一致, 因此本文不再赘述。

DBR 激光器的波长失配对同步性的影响结果与噪声驱动 DFB 激光器同步结果相似<sup>[14]</sup>。然而, DFB 激光器波长调谐通常通过温度控制, 调谐速度慢。相比之下, DBR 激光器除了有源区温度控制外, 还可以通过光栅区或相位区电流进行调节, 不仅调谐速度更快, 还扩展了硬件参数空间, 进而提升混沌保密通信或密

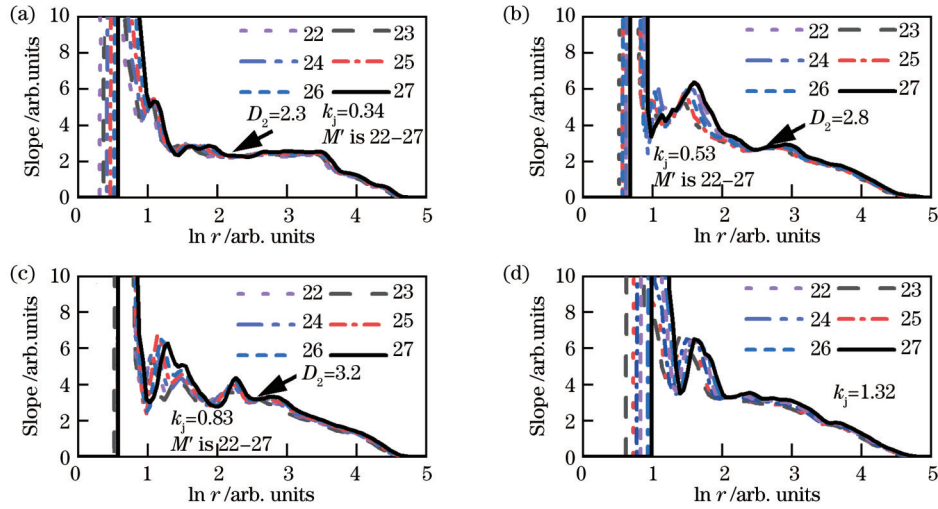


图 5 DBR 激光器强度波形的关联维度计算结果 ( $N=1300, \tau=1, M=50, m=2, \tau'=1, M'$  为 22~27)。(a)  $k_j=0.34$ ; (b)  $k_j=0.53$ ; (c)  $k_j=0.83$ ; (d)  $k_j=1.32$

Fig. 5 Correlation dimension calculation results of DBR laser intensity waveform ( $N=1300, \tau=1, M=50, m=2, \tau'=1$ , and  $M'$  is 22-27). (a)  $k_j=0.34$ ; (b)  $k_j=0.53$ ; (c)  $k_j=0.83$ ; (d)  $k_j=1.32$

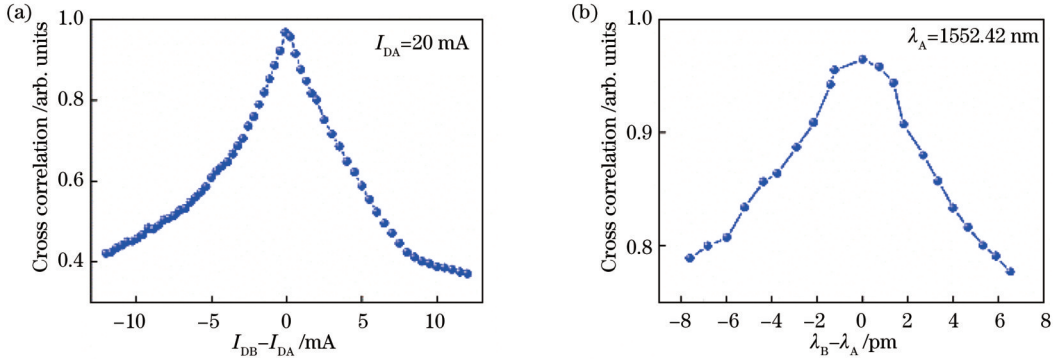


图 6 光栅区电流失配和波长失配对 DBR 激光器混沌同步的影响。(a) 光栅区电流失配; (b) 波长失配

Fig. 6 Influence of grating region current detuning and wavelength mismatch on chaos synchronization of DBR Lasers. (a) Mismatch of current in grating region; (b) wavelength mismatch

钥分发的安全性<sup>[24]</sup>。

进一步研究了注入强度失配和增益区电流失配对  $C_{AB}$  的影响。首先, 将  $SL_A$  的注入强度  $k_{jA}$  固定在 0.43, 改变  $SL_B$  的注入强度  $k_{jB}$ , 结果如图 7(a) 所示。当  $k_{jA} = k_{jB} = 0.43$  时, 互相关系数最大。随着注入强度失配量  $|k_{jB} - k_{jA}|$  的增加,  $C_{AB}$  下降, 但是在正失配的方向, 同步性变化相对缓慢; 当注入强度失配量在  $-0.05 \sim 0.04$  时,  $C_{AB}$  大于 0.90。其次, 将  $SL_A$  的增益区电流  $I_{gA}$  固定在 60 mA, 改变  $SL_B$  的增益区电流  $I_{gB}$ , 结果如图 7(b) 所示。当  $I_{gA} = I_{gB} = 60$  mA 时, 互相关系数最大。随着增益区电流失配量  $|I_{gB} - I_{gA}|$  的增加, 同步性  $C_{AB}$  下降, 但是在负失配的方向, 同步性变化相对缓慢; 当增益区电流失配量在  $-1.4 \sim 1.1$  mA 时,  $C_{AB}$  大于 0.90。分析发现注入强度失配和增益区电流失配对  $C_{AB}$  的影响趋势大致相反, 其原因是: 当注入功率不变且增大增益区电流时, 激光器自由运行时的光功率增大, 注入强度减小; 反之, 注入强度增大。另外, 还分析 DBR 激光器光栅区长度  $L_{grating}$  和相位区长度  $L_{phase}$  失配

对  $C_{AB}$  的影响, 固定  $SL_A$  的长度不变, 调节  $SL_B$  的长度, 结果如图 7(c) 和 (d) 所示。DBR 激光器有效腔长是增益区、相位区和光栅区三者有效腔长之和。当光栅区长度减小时, 整体的有效腔长减小, 伴随着腔模蓝移和光栅反射谱红移, 导致响应激光器波长失配, 从而影响同步性。要实现  $C_{AB}$  大于 0.90, 光栅区长度需要在  $-0.5\% \sim 0.5\%$  的失配范围内。相位区长度的减小使得腔内模式发生蓝移, 且当光栅反射谱不变时, 激光器输出波长会呈现锯齿状变化。因此,  $C_{AB}$  随着相位区长度失配发生周期性变化, 且循环周期约为 43.8%, 要实现  $C_{AB}$  大于 0.90, 相位区长度同样需要在  $-0.5\% \sim 0.5\%$  的失配范围内。DBR 激光器由多个区组成, 具有更多的参数, 因此在混沌同步方面, 其具有更大的密钥空间。

### 3.3 波长键控及混沌同步恢复时间

上述研究表明, DBR 激光器的混沌同步对参数失配非常敏感, 这保障了混沌加密应用的安全性, 即窃听器难以获得相同参数的激光器。如果对激光器的某个

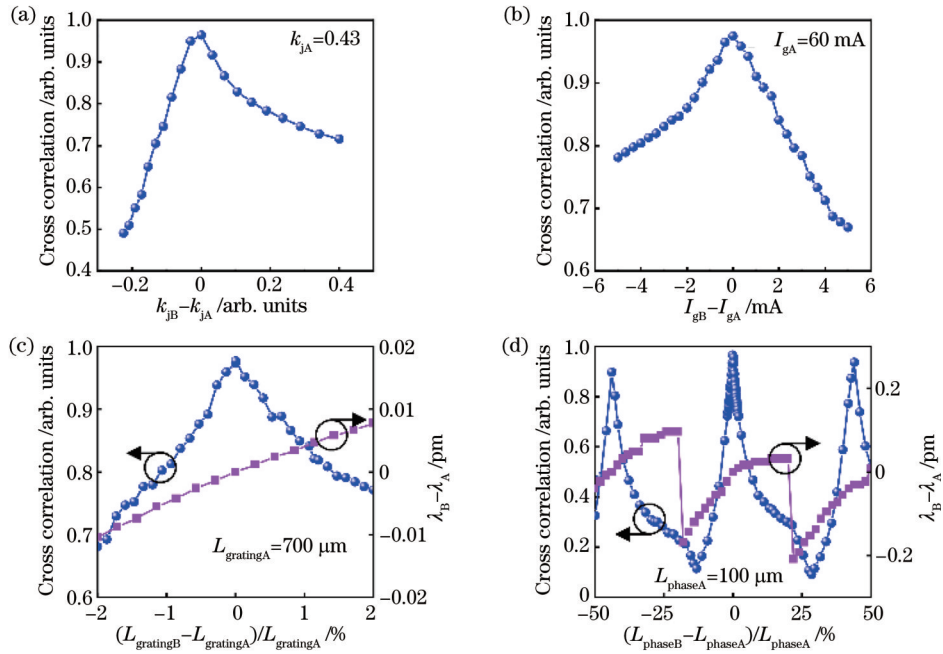


图 7 参数失配对混沌同步的影响。(a)注入强度;(b)增益区电流;(c)光栅区长度( $L_{grating}$ );(d)相位区长度( $L_{phase}$ )  
 Fig. 7 Influence of parameter mismatch on chaos synchronization. (a) Injection strength; (b) gain region current; (c) length of grating region ( $L_{grating}$ ); (d) length of phase region ( $L_{phase}$ )

硬件参数施加动态键控,会进一步提升安全程度<sup>[23]</sup>。这一方法通常用于密钥分发<sup>[2]</sup>中,键控过程中混沌同步恢复时间决定了密钥分发速率<sup>[15]</sup>。为此,进一步研究 DBR 激光器混沌同步的波长键控及其同步恢复时间。

通过光栅区电流调制的方式进行 DBR 激光器的波长键控。设定  $I_{DA}=20$  mA,并对激光器  $SL_B$  的光栅区电流  $I_{DB}$  施加 5 MHz 方波调制,高、低电平分别为 10 mA 和 20 mA,相应的中心波长分别为 1552.98 nm

和 1552.42 nm。在键控过程中,激光器  $SL_B$  与  $SL_A$  的初始(未注入时)中心波长失配量分别为 0.56 nm 和 0 nm,因此,驱动光的光谱线宽增加到 0.80 nm,中心波长调节为 1552.72 nm,驱动光的光谱始终覆盖两个激光器波长,驱动光注入强度设置为 0.54,典型的波长键控混沌同步如图 8(a)所示。当  $I_{DB}$  从 10 mA 切换到 20 mA 时,波长  $\lambda_B$  蓝移,波长失配量从 0.56 nm 减小到 0 nm,响应激光器  $SL_B$  和  $SL_A$  迅速从非同步状态过渡到同步状态,其混沌同步恢复时间为 3.6 ns。为分

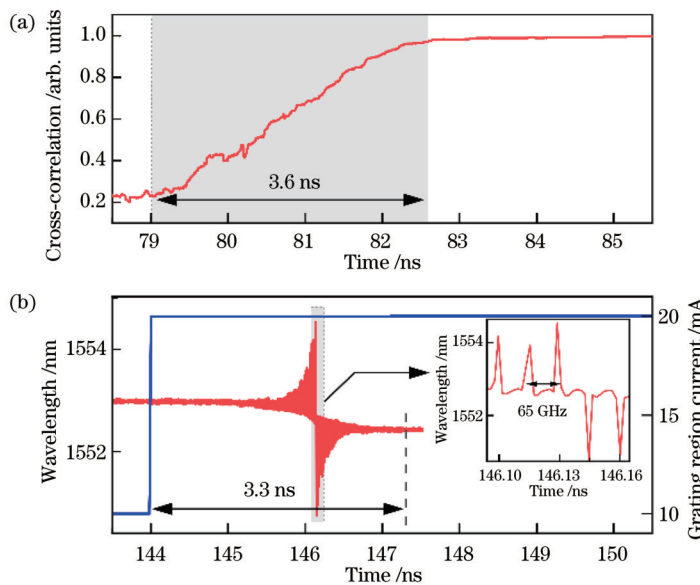


图 8 混沌同步恢复时间分析。(a) DBR 激光器波长键控的同步恢复时间;(b) DBR 激光器中心波长变化  
 Fig. 8 Analysis of chaos synchronization recovery time. (a) Synchronization recovery time of DBR laser wavelength keying; (b) variation of center wavelength of DBR laser

析同步恢复时间的决定因素,研究了键控过程中激光器波长的变化情况,结果如图 8(b)所示,图 8(b)中插图为其局部放大图。光栅区的注入电流发生变化时,波长首先会发生缓慢的变化,再进行振荡,振荡频率约为 65 GHz,之后振荡方向反转,最后缓慢趋于稳定。这一波长的切换过程所需要的时间约为 3.3 ns,与同步恢复时间基本对应。因此,在共同噪声驱动开环 DBR 激光器的波长键控混沌同步恢复时间是由波长切换时间决定的。

## 4 结 论

理论研究了噪声光信号驱动下三段式 DBR 激光器输出的同步性。结果表明,在注入强度大于 0.33 时,DBR 激光器可以实现混沌同步。DBR 激光器的混沌同步对光栅区、相位区等参数失配非常敏感,表明其具有更大的硬件参数空间。数值模拟证明通过光栅区电流进行波长键控可以实现 DBR 激光器的混沌同步快速开关键控,混沌同步恢复时间由激光器波长切换时间决定,约为 3.6 ns。因此,DBR 激光器的混沌同步有望为高速安全的混沌密钥分发提供新途径。

### 参 考 文 献

- [1] Argyris A, Syvridis D, Larger L, et al. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links[J]. *Nature*, 2005, 438(7066): 343-346.
- [2] Yoshimura K, Muramatsu J, Davis P, et al. Secure key distribution using correlated randomness in lasers driven by common random light[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(7): 070602.
- [3] 周玉鑫, 毕美华, 滕旭阳, 等. 基于混沌映射的 OFDM-PON 物理层加密及系统性能增强算法[J]. *光学学报*, 2021, 41(16): 1606002.  
Zhou Y X, Bi M H, Teng X Y, et al. Physical layer encryption and system performance enhancement algorithm based on chaos mapping in OFDM-PON[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(16): 1606002.
- [4] Sugawara T, Tachikawa M, Tsukamoto T, et al. Observation of synchronization in laser chaos[J]. *Physical Review Letters*, 1994, 72(22): 3502-3505.
- [5] Yamamoto T, Oowada I, Yip H, et al. Common-chaotic-signal induced synchronization in semiconductor lasers[J]. *Optics Express*, 2007, 15(7): 3974-3980.
- [6] Fischer I, Liu Y, Davis P. Synchronization of chaotic semiconductor laser dynamics on subnanosecond time scales and its potential for chaos communication[J]. *Physical Review A*, 2000, 62(1): 011801.
- [7] Murakami A, Shore K A. Chaos-pass filtering in injection-locked semiconductor lasers[J]. *Physical Review A*, 2005, 72(5): 053810.
- [8] Oowada I, Ariizumi H, Li M, et al. Synchronization by injection of common chaotic signal in semiconductor lasers with optical feedback[J]. *Optics Express*, 2009, 17(12): 10025-10034.
- [9] Annovazzi-Lodi V, Aromataris G, Benedetti M, et al. Private message transmission by common driving of two chaotic lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(2): 258-264.
- [10] Wu J G, Wu Z M, Tang X, et al. Experimental demonstration of LD-based bidirectional fiber-optic chaos communication[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(6): 587-590.
- [11] Wang L S, Mao X X, Wang A B, et al. Scheme of coherent optical chaos communication[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(17): 4762-4765.
- [12] Koizumi H, Morikatsu S, Aida H, et al. Information-theoretic secure key distribution based on common random-signal induced synchronization in unidirectionally-coupled cascades of semiconductor lasers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 17869-17893.
- [13] 武超人, 高华, 王龙生, 等. 基于对称相移键控混沌同步的高速密钥安全分发[J]. *中国激光*, 2022, 49(4): 0406001.  
Wu C R, Gao H, Wang L S, et al. High-speed secure key distribution based on symmetric phase-shift-keying chaos synchronization[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(4): 0406001.
- [14] Gao H, Wang A B, Wang L S, et al. 0.75 Gbit/s high-speed classical key distribution with mode-shift keying chaos synchronization of Fabry-Perot lasers[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 172.
- [15] Sasaki T, Kakesu I, Mitsui Y, et al. Common-signal-induced synchronization in photonic integrated circuits and its application to secure key distribution[J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 26029-26044.
- [16] 吴梅, 王龙生, 王云才, 等. 垂直腔面发射激光器的混沌同步恢复时间研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(21): 210607.  
Wu M, Wang L S, Wang Y C, et al. Research on chaos resynchronization time of vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(21): 210607.
- [17] Jiang N, Xue C P, Liu D, et al. Secure key distribution based on chaos synchronization of VCSELs subject to symmetric random-polarization optical injection[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(6): 1055-1058.
- [18] Huang Y, Zhou P, Li N Q. High-speed secure key distribution based on chaos synchronization in optically pumped QD spin-polarized VCSELs[J]. *Optics Express*, 2021, 29(13): 19675-19689.
- [19] Aida H, Arahata M, Okumura H, et al. Experiment on synchronization of semiconductor lasers by common injection of constant-amplitude random-phase light[J]. *Optics Express*, 2012, 20(11): 11813-11829.
- [20] Fraedrich K, Wang R S. Estimating the correlation dimension of an attractor from noisy and small datasets based on re-embedding[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1993, 65(4): 373-398.
- [21] Kim H S, Eykholt R, Salas J D. Nonlinear dynamics, delay times, and embedding windows[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1999, 127(1/2): 48-60.

- [22] Lin F Y, Chao Y K, Wu T C. Effective bandwidths of broadband chaotic signals[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2012, 48(8): 1010-1014.
- [23] Muramatsu J, Yoshimura K, Davis P, et al. Secret-key distribution based on bounded observability[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(10): 1762-1780.
- [24] Wang D M, Wang L S, Guo Y Y, et al. Key space enhancement of optical chaos secure communication: chirped FBG feedback semiconductor laser[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 3065-3073.
- [25] Han L S, Liang S, Xu J J, et al. DBR laser with over 20-nm wavelength tuning range[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(9): 943-946.