

反馈相位随机调制消除混沌半导体激光器的外腔长信息*

张建忠 王安帮 张明江 李晓春 王云才†

(太原理工大学物理与光电工程系光电工程研究所,太原 030024)

(2010年10月8日收到;2010年11月23日收到修改稿)

提出并数值证实利用反馈相位的随机调制可消除外腔半导体激光器反馈引起的时延结构. 研究发现,当反馈相位随机调制信号的速率处在 0.1—1 Gbit/s 范围,随机调制信号的切换幅值个数达到 5 时,在半导体激光器偏置电流(1.2—2.8 I_{th})和反馈速率(8—26 GHz)构成的参数空间中,反馈时延结构对应的外腔长信息可被有效地消除.

关键词: 半导体激光器, 外腔长, 反馈相位, 随机信号调制

PACS: 42.55.Px, 05.45.-a, 05.45.Gg

1. 引言

众所周知,外腔反馈半导体激光器在适当条件下可产生高维混沌激光. 由于混沌激光的类噪声、宽频谱和自相关曲线具有类似于 δ 函数的特性,混沌激光在保密通信^[1]、激光雷达^[2]、光时域反射仪^[3]和高速随机数产生^[4]等领域具有重要应用. 一方面,外腔反馈可使半导体激光器引入一个自由度,产生高维混沌激光;另一方面,外腔反馈也使半导体激光器输出的混沌激光普遍存在外腔引起的时延结构,即混沌激光的自相关曲线在反馈延迟处具有明显的峰值. 这会对混沌激光的应用产生严重影响. 例如,对于混沌光通信,保密性主要依赖于发射机参数确认的困难和收发系统同步对参数失配的敏感. 然而,外腔引起的时延结构对混沌保密通信攻击者提供了可能的线索. 我们也数值证明利用外腔长作为混沌光通信的密钥是易于破解的^[5]. 对于基于混沌激光的高速随机数发生器,外腔时延结构的出现会退化混沌激光的无序特性,进而影响随机数的统计性能. 对于混沌激光雷达和混沌光时域发射仪,混沌激光信号的相关曲线在反馈延迟处的明显峰值会降低它们的动态范围,甚至会引起目标误判. 因此,在混沌激光的应用中,外腔时延结构的

消除是至关重要的.

目前,已经有抑制外腔半导体激光器时延结构的方案被提出. 文献[6]理论研究表明,单反馈外腔半导体激光器在适当的反馈速率下,改变注入电流使激光器的弛豫振荡周期接近于外腔时延,可有效地抑制外腔引起的时延结构. 文献[7]和[8]分别实验研究了相干和非相干光反馈单外腔半导体激光器,在适当选择反馈速率和注入电流条件下,外腔引起的时延结构可被抑制. 此外, Lee 等人提出利用双反馈半导体激光器系统在一定条件下可使外腔时延结构变得复杂,从而抑制时延结构对应的外腔长信息^[9]. 然而,我们近来研究发现:无论单反馈还是双反馈,对于外腔长固定不变的混沌半导体激光器,尽管在自相关曲线中看不到外腔对应的时延结构,但是,通过观察其频谱的精细结构仍能提取时延结构对应的外腔长信息^[10]. Shahverdiev 等人理论证明利用混沌信号调制双反馈半导体激光器系统中的双外腔时延可消除外腔对应的时延结构^[11]. 在此,我们提出一个更简单的方案,利用伪随机信号调制单外腔半导体激光器反馈光的相位以实现外腔长的随机变化,从而消除混沌半导体激光器的外腔长信息.

在本文,我们数值研究了利用伪随机信号调制外腔半导体激光器反馈光的相位来消除外腔引起

* 国家自然科学基金科学仪器基础研究项目(批准号:60927007)和山西省青年科技研究基金(批准号:2010021003-4)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: wangyc@tyut.edu.cn

的时延结构. 在半导体激光器偏置电流和反馈速率构成的参数空间中, 进一步分析了伪随机调制信号的切换幅值个数和调制速率对消除外腔长信息的影响.

2. 理论模型

图 1 为外腔半导体激光器反馈光相位随机调制的装置示意图. 分布反馈半导体激光器 (DFB LD) 发出的激光经过光纤耦合器 (FC) 分成两束, 一束光经过光纤反射镜 (FR) 再反馈回 DFB LD 中, 引起 DFB LD 产生混沌激光. 反馈光的强度和偏振态可通过可变光衰减器 VOA 和偏振控制器 PC 来调节. 另一束光经过光隔离器 ISO 后, 利用光电探测器 PD 转换成电信号, 输入到示波器 OSC 中, 用来观察和记录 DFB LD 输出的混沌波形. 在混沌激光源的外腔中放置一个铌酸锂晶体制成的相位调制器 PM, 利用任意波发生器 AWG 产生的伪随机信号驱动相位调制器, 可改变反馈光的相位, 从而相当于实现激光混沌源外腔反馈时延的随机调制, 以致消除外腔引起的时延结构.

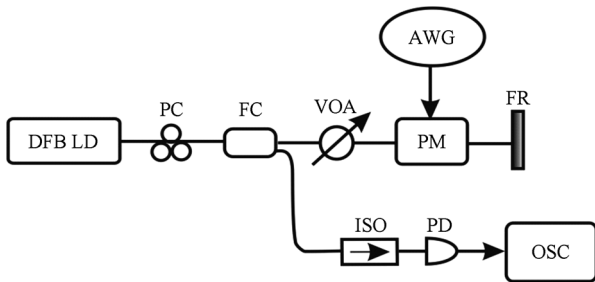


图 1 外腔半导体激光器反馈光相位随机调制的装置示意图

反馈光相位随机调制的半导体激光器混沌源可用光反馈的半导体激光器 Lang-Kobayashi 单模速率方程来描述^[12]:

$$\frac{dE(t)}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\alpha) \left[G(t) - \frac{1}{\tau_p} \right] E(t) + kE(t - \tau) \exp(-i\omega\tau + i\phi_m(t)), \quad (1)$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{1}{\tau_n} N(t) - G(t) |E(t)|^2, \quad (2)$$

$$G(t) = \frac{G[N(t) - N_0]}{1 + \varepsilon |E(t)|^2}, \quad (3)$$

E 和 N 分别是激光器腔内复电场强度和载流子密度; α 为线宽增强因子; G 为微分增益系数; N_0 为透明载流子密度; τ_p 为光子寿命; τ_n 为载流子寿命; ω

为半导体激光器的输出角频率; $I(t)$ 为半导体激光器的抽运电流密度, V 为激光腔的有源区体积; q 为电荷电量; τ 为光在外谐振腔的往返时间.

同时定义带反馈半导体激光器的反馈速率 k 为

$$k = \frac{1}{\tau_{in}} \frac{(1 - r_0^2)r}{r_0}, \quad (4)$$

其中 r_0 和 r 分别是激光器输出端面和外部反射镜面的反射率. τ_{in} 是光在激光器谐振腔内的往返周期. 数值模拟时, 激光器的主要参数取自参考文献 [13] 中的激光器参数值.

在 (1) 式中, $\phi_m(t)$ 为外腔半导体激光器反馈光被随机调制的相位, $\phi_m(t) = (\pi n_e^3 \gamma_{33} L / \lambda d) \cdot U(t)$; 其中, $\gamma_{33} = 30.8 \times 10^{-12} \text{ m/V}$, 是铌酸锂晶体的二阶非线性系数; $n_e = 2.2$ 是对应非常光的折射率, $L = 30 \text{ cm}$ 和 $d = 1 \text{ cm}$ 分别是铌酸锂晶体的长度和厚度, $U(t)$ 为加在相位调制器上的电压信号, 用来驱动外腔半导体激光器反馈光的相位变化. 由上式可以看出, 反馈光相位的变化与调制信号的幅度成线性关系. 选用的相位调制器半波电压为 157 V. 调制的电压信号为幅值随机变化的伪随机信号, 在实际中, 可用任意波发生器 (Agilent, 81180A) 硬件实现.

对于光反馈半导体激光器系统, 外腔引起的时延结构可用自相关函数和互信息技术进行确认, 当然, 利用这两种技术也可证明外腔长信息的消除. 自相关函数通常用来表征一个信号与其时延信号的相似程度, 其定义为

$$\rho(\Delta t) = \frac{\langle [P(t + \Delta t) - \langle P(t) \rangle][P(t) - \langle P(t) \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle [P(t) - \langle P(t) \rangle]^2 \rangle \langle [P(t + \Delta t) - \langle P(t) \rangle]^2 \rangle}}, \quad (5)$$

在这里, $P(t) = |E(t)|^2$ 代表外腔半导体激光器发射的混沌时间序列, Δt 为时间延迟. 外腔对应的延迟时间可从混沌激光信号自相关曲线的峰值位置提取出来.

互信息是信息论里一种有用的信息度量, 它是指两个事件集合之间的相关性. $P(t)$ 和 $P(t + \Delta t)$ 之间的互信息可定义为

$$M(\Delta t) = \sum_{P(t), P(t+\Delta t)} \varphi(P(t), P(t + \Delta t)) \times \log \frac{\varphi(P(t), P(t + \Delta t))}{\varphi(P(t))\varphi(P(t + \Delta t))}, \quad (6)$$

其中, $\varphi(P(t), P(t + \Delta t))$ 表示联合分布概率密度, $\varphi(P(t))$ 和 $\varphi(P(t + \Delta t))$ 分别表示边缘分布概

率密度. 混沌激光信号互信息曲线的峰值位置也可确定外腔对应的时延结构.

3. 数值结果及讨论

3.1. 反馈相位随机调制消除外腔时延结构

在研究反馈相位随机调制消除半导体激光器外腔时延结构之前,我们首先分析了半导体激光器偏置电流和反馈速率对外腔时延结构抑制的影响. 所选的半导体激光器外腔长为 0.6 m, 相应的反馈时延为 4 ns. 图 2 给出了外腔半导体激光器在不同偏置电流和反馈速率下, 输出混沌激光信号自相关曲线在外腔时延处对应的相关系数分布图. 横坐标表示反馈速率, 变化范围为 8—26 GHz; 纵坐标表示偏置电流, 变化范围为 1.2—2.8 I_{th} , 半导体激光器的阈值电流 I_{th} 为 18 mA. 图中不同的灰度代表不同大小的相关系数. 从图中可以看出, 相关系数整体分布在 0.1—0.8 之间, 不存在小于 0.1 的相关系数. 而相关系数分布在 0.1—0.2 之间的区域也是非常小的, 正如图中所示的深灰色区域. 这意味着, 尽管外腔半导体激光器通过调节偏置电流和反馈速率, 可以在合适的参数下抑制外腔时延结构^[6-8], 但是, 可选择的参数范围非常有限. 然而, 在偏置电流和反馈速率更大的参数空间中, 外腔时延结构是无法消除的. 例如, 在图 2 中所选的 Q 点, 半导体激光器的偏置电流为 32 mA, 反馈速率为 20 GHz, 外腔延迟处对应的相关系数为 0.51.

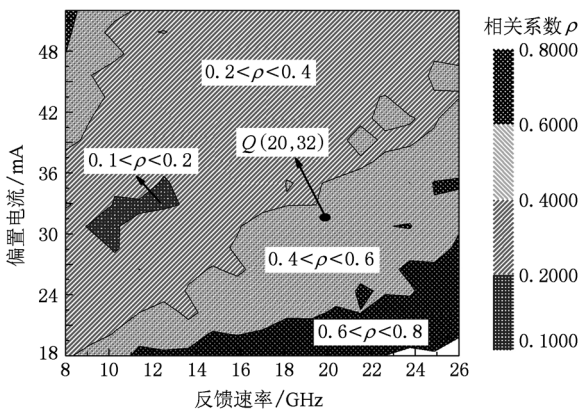


图2 在不同的偏置电流和反馈速率下, 半导体激光器输出混沌信号的自相关曲线在外腔延迟处的相关系数分布图

下面, 我们选择外腔半导体激光器工作在 Q 点

对应的参数下, 研究反馈相位随机调制对外腔时延结构消除的影响. 图 3 给出了外腔半导体激光器在反馈光相位随机调制前、后, 输出的混沌激光时序图及相应的自相关和互信息曲线图. 图 3(a) 和 (b) 分别表示外腔中相位调制器被伪随机信号调制前、后反馈光的相位变化. 当无随机信号调制时, 对应的就是简单的外腔半导体激光器情况. 图 3(c) 给出了半导体激光器在简单外腔反馈作用下输出的混沌时序图. 图 3(e) 和 (g) 分别给出了混沌激光对应的自相关和互信息曲线图. 可以看出, 混沌激光的自相关和互信息曲线在外腔对应的时延 4 ns 处都有明显的峰值, 且对应的相关系数和互信息系数分别是 0.51 和 0.26. 当利用码率为 0.5 Gbit/s 幅值随机变化的伪随机信号驱动相位调制器时, 外腔半导体激光器的反馈光相位也会发生随机变化, 如图 3(b) 所示. 此时, 外腔半导体激光器输出更为复杂的混沌激光, 如图 3(d) 所示, 相应的李亚谱诺夫指数为 $6.38 \times 10^8/s$, 而无反馈相位随机调制的半导体激光器, 输出混沌激光的李亚谱诺夫指数仅为 $2.46 \times 10^8/s$. 图 3(f) 和 (h) 进一步给出反馈相位随机调制后混沌激光对应的自相关和互信息曲线图. 可以看出, 在外腔时延 4 ns 处及附近 3.5—4.5 ns 的延迟时间窗口内, 自相关和互信息曲线都没有明显的峰值. 而且, 相应的自相关系数和互信息系数分别都低于 0.1 和 0.05. 由此表明, 利用伪随机信号调制外腔半导体激光器反馈光的相位, 可消除外腔引起的时延结构.

3.2. 调制信号对外腔时延结构消除的影响

我们进一步研究了伪随机调制信号切换幅值个数对外腔时延结构消除的影响. 图 4(a)—(d) 分别给出了加载到相位调制器上码率为 0.5 Gbit/s 的伪随机信号切换幅值个数从 2 增加到 5 时, 混沌激光的反馈相位对应的变化情况. 在此, 加载的伪随机调制信号具有良好的统计特性, 不同切换幅值水平分布均衡. 例如, 随机信号切换幅值个数为 5 时, 每一个切换幅值水平分布分别占 20%. 图 4(e)—(h) 分别给出了伪随机调制信号在不同切换幅值个数下, 外腔半导体激光器输出混沌激光的时序图. 经计算, 相应的李亚谱诺夫指数分别为 $2.51 \times 10^8/s$, $3.16 \times 10^8/s$, $4.02 \times 10^8/s$, $5.37 \times 10^8/s$. 由此表明, 随着伪随机调制信号切换幅值个数的增加, 输出混沌激光的动力学行为会变得更复杂. 然而, 从

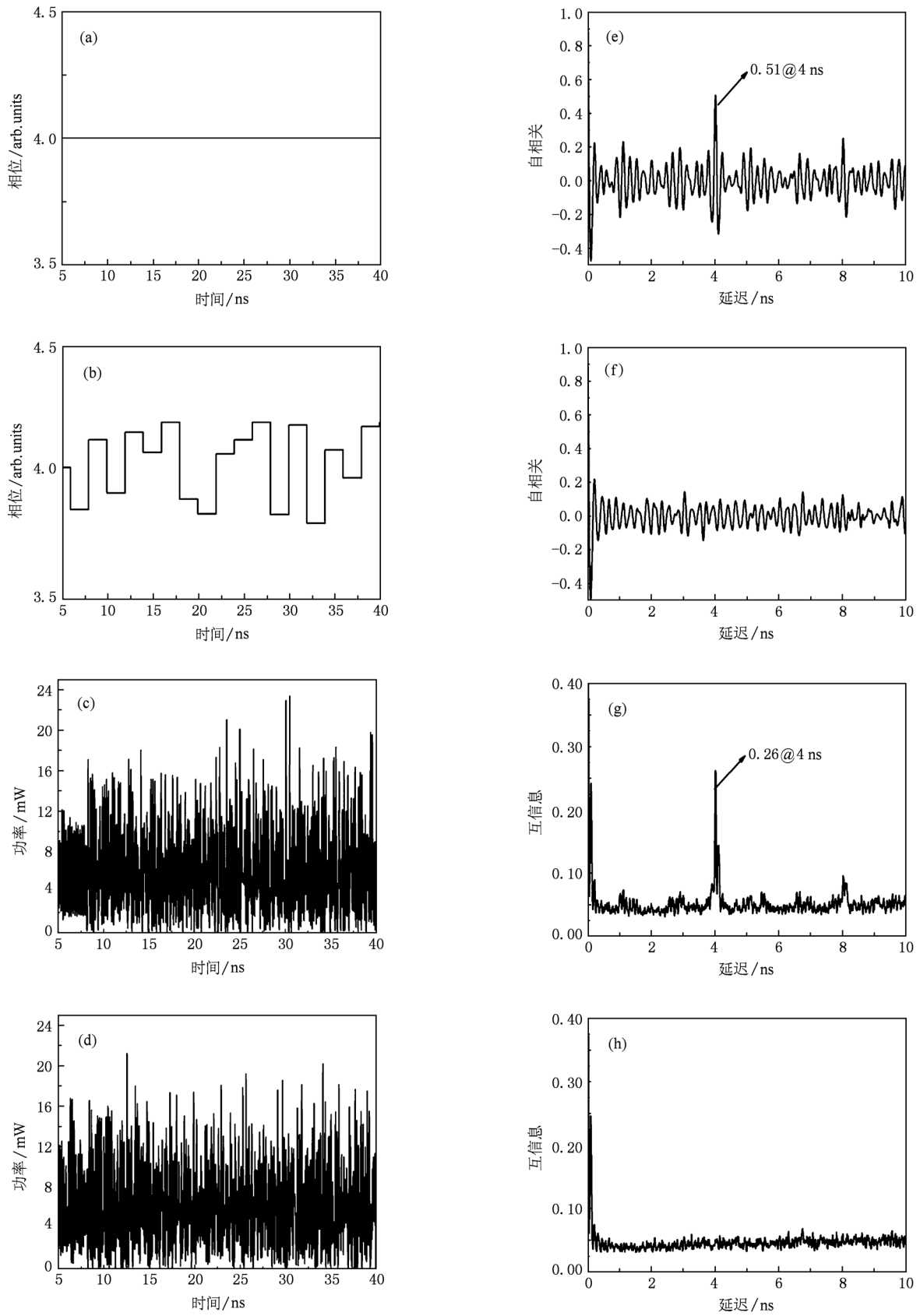
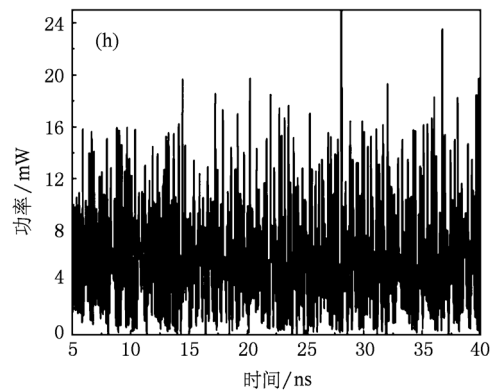
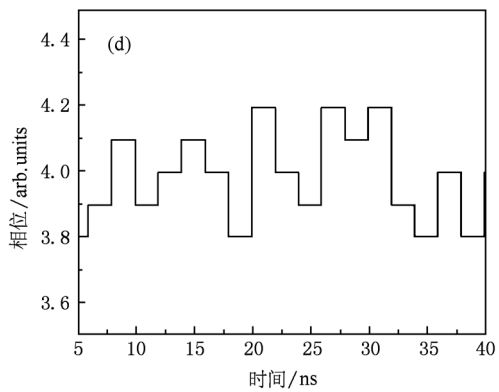
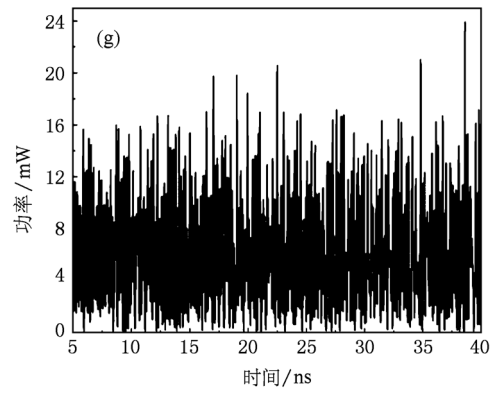
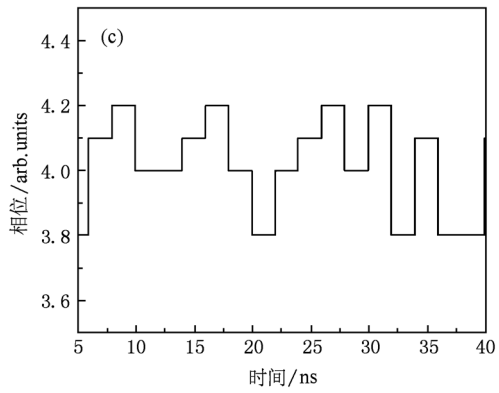
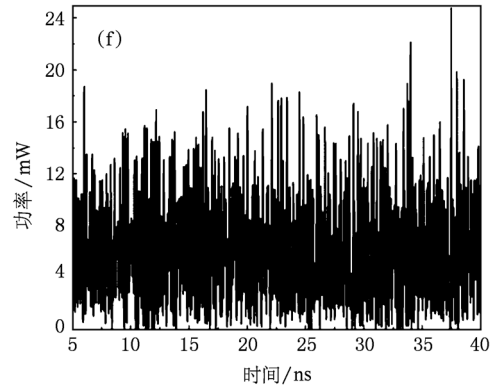
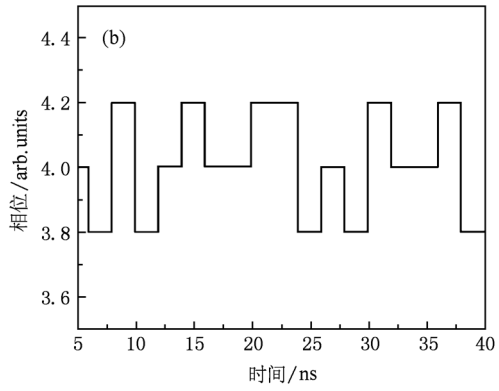
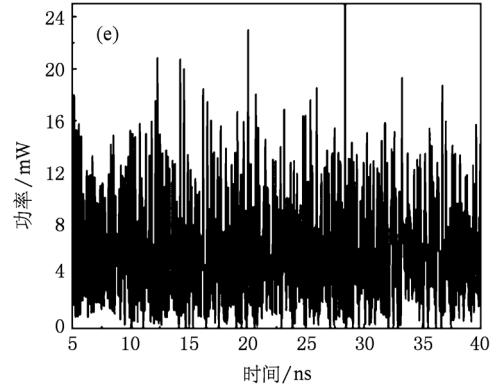
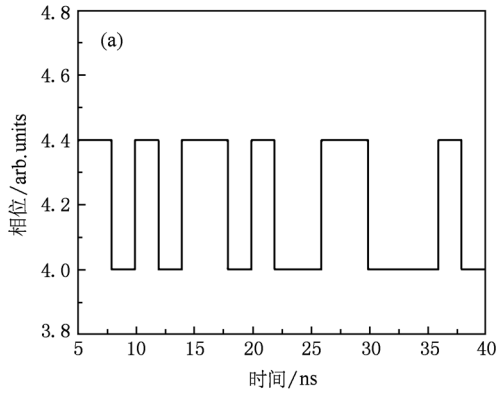


图3 有、无反馈相位随机调制,外腔半导体激光器的输出比较 (a),(b)反馈相位;(c),(d)混沌时序;(e),(f)自相关曲线;(g),(h)互信息曲线



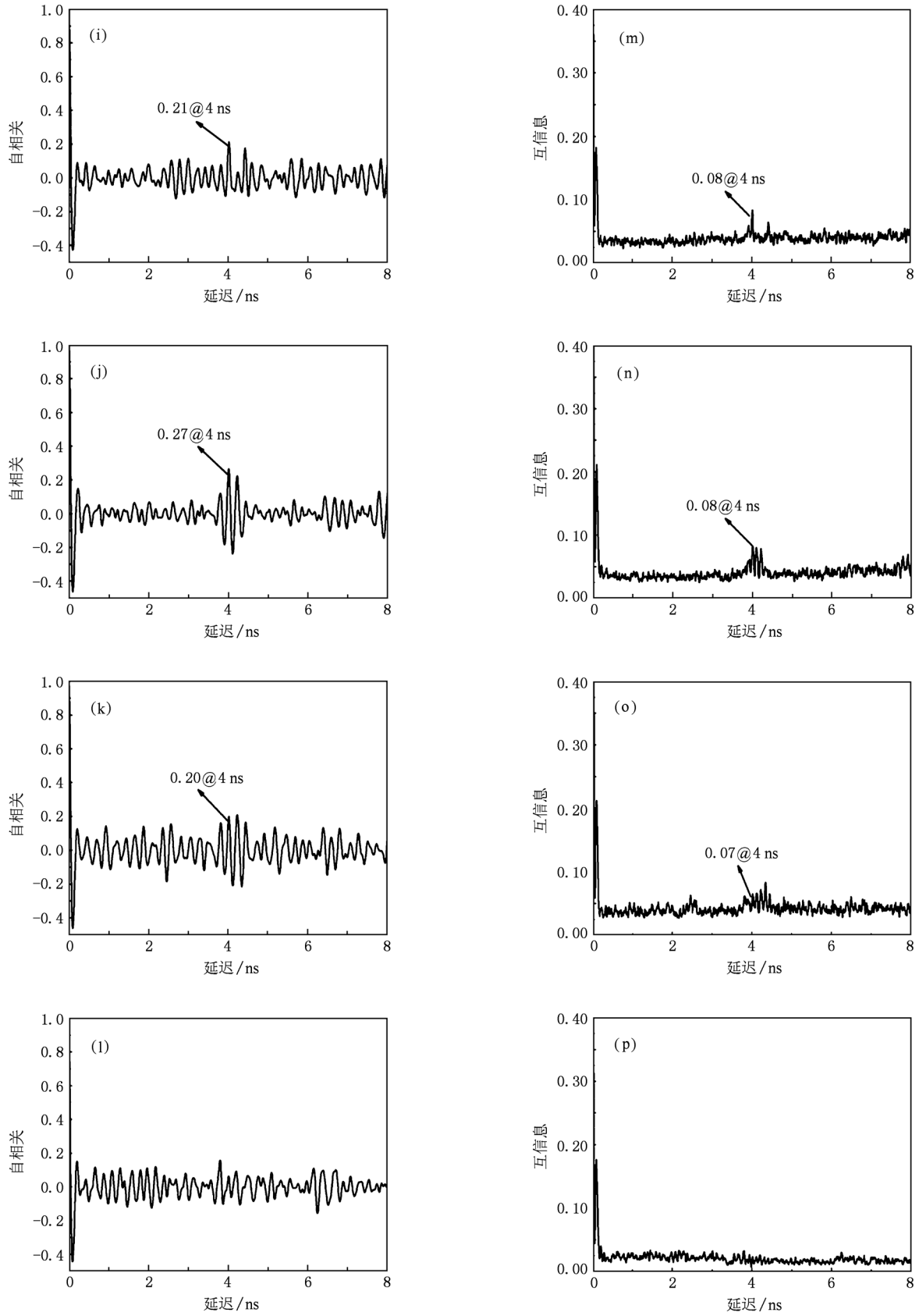


图4 随机调制信号切换幅值个数对外腔时延结构消除的影响 (a)–(d)反馈相位;(e)–(h)混沌时序;(i)–(l)自相关曲线;(m)–(p)互信息曲线

图 4(i)–(l) 和图 4(m)–(p) 所对应的自相关和互信息曲线可以看出, 随着伪随机调制信号的切换幅值从 2 增加到 5 时, 自相关和互信息曲线外腔延迟处对应的峰值会被完全抑制. 当伪随机调制信号切换幅值个数为 2 时, 自相关和互信息曲线在外腔时延 4 ns 处及附近的延迟窗口 3.5–4.5 ns 内会出现两个峰值. 尽管外腔延迟 4 ns 处所对应的相关系数已从 0.51 降到 0.21, 但是仍然没有消除外腔对应的时延结构. 我们也发现: 当伪随机调制信号切换幅值个数增加到 3 或 4 时, 自相关和互信息曲线在外腔时延 4 ns 处及附近的延迟窗口 3.5–4.5 ns 内会出现 3 或 4 个峰值, 如图 4(j), (n) 和图 4(k), (o) 所示. 但是这些峰值明显低于简单外腔半导体激光器反馈时延对应的峰值. 当伪随机调制信号切换幅值个数增加到 5 时, 整个自相关和互信息曲线没有明显的峰值. 在外腔时延 4 ns 处及附近的延迟窗口 3.5–4.5 ns 内, 自相关曲线的相关系数都小于 0.15, 互信息曲线的互信息系数都低于 0.05. 此时可以看到, 自相关曲线会显现出近似的周期振荡结构, 文献[6]研究表明, 这种振荡周期对应的是半导体激光器的弛豫振荡周期. 由此可得, 当伪随机调制信号切换幅值的个数等于和大于 5 时, 光反馈半导体激光器外腔对应的时延结构可被完全消除.

随后, 我们选取上面伪随机调制信号切换幅值个数为 5 的情况下, 进一步研究了调制速率对外腔时延结构消除的影响. 通过改变加载到相位调制器上驱动电压信号的调制速率, 从而使反馈光调制相位 $\phi_m(t)$ 的速率发生变化. 图 5(a)–(c) 分别给出了调制速率为 0.2, 0.5, 1 GHz 的条件下反馈光调制相位的变化情况. 而对应的外腔半导体激光器输出的混沌激光以及自相关和互信息曲线, 如图 5 所示. 可以看出, 在不同的调制速率下, 半导体激光器输出的自相关和互信息曲线在外腔时延 4 ns 处及附近的延迟窗口 3.5–4.5 ns 内, 都没有明显的峰值. 正如在图 4(l) 所示的一样, 图 5(g)–(i) 中的自相关曲线尽管没有外腔引起的明显峰值, 但仍然显现周期振荡的结构, 振荡的周期与半导体激光器的弛豫振荡周期一致. 为了研究调制信号更多的调制速率对半导体激光器外腔时延结构消除的影响. 图 6 将不同调制速率下对应的自相关曲线集合到一起形成了不同延迟对应的自相关系数的分布图. 纵坐标表示调制速率的变化范围, 从 0.1 到 1 GHz. 横坐

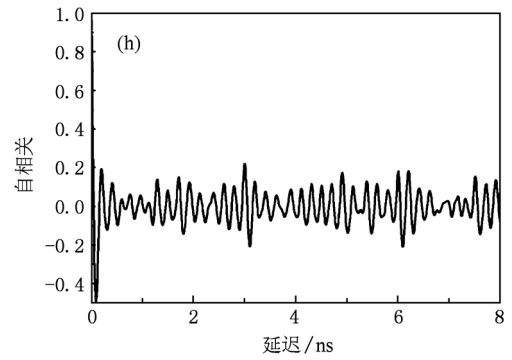
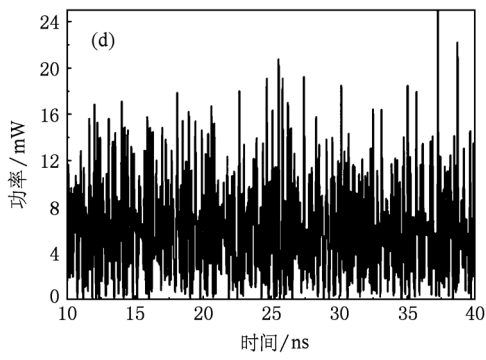
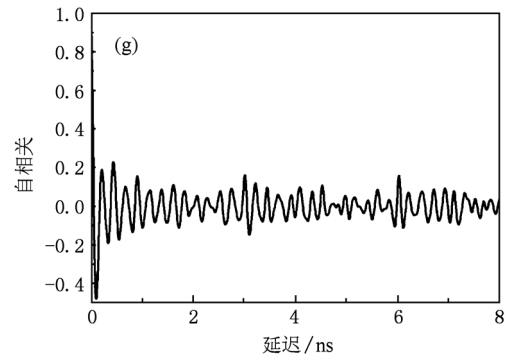
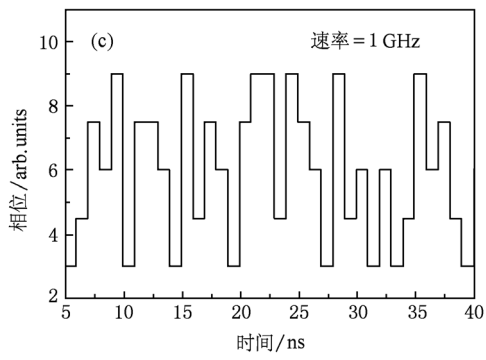
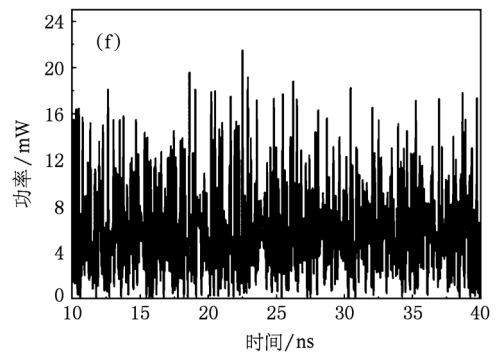
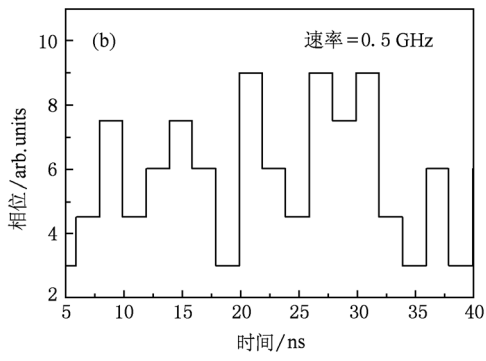
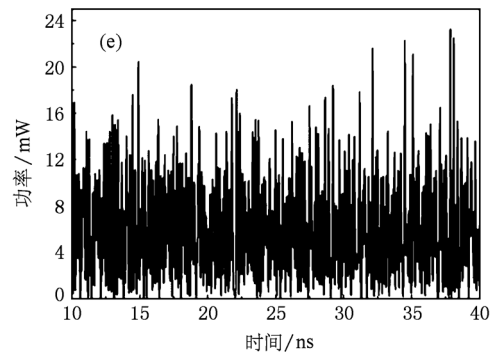
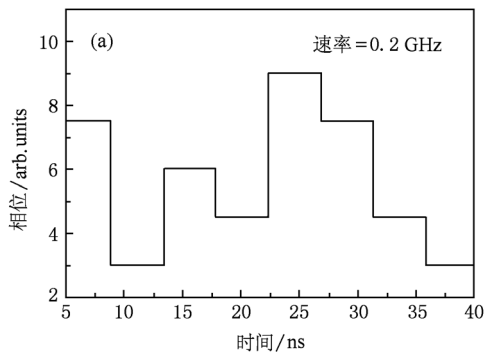
标表示延迟时间, 图中的灰度代表相关系数的大小. 从图 6 整个灰度分布可以看出, 相关系数的值落在了 -0.2 – 0.2 之间, 而且沿着横坐标方向相关系数的值成近似周期分布, 这与图 5(g)–(i) 的情况一致. 调制速率在 0.1–1 GHz 的变化范围内, 图 6 中的相关系数分布沿着纵坐标方向几乎没有变化. 这意味着, 当伪随机调制信号的切换幅值个数达到 5 时, 调制速率在 0.1–1 GHz 范围内, 都可有效地消除外腔对应的时延结构.

3.3. 反馈速率和偏置电流的影响

以上都是在偏置电流和反馈速率的参数空间中 Q 点的状态下, 研究伪随机信号调制反馈光相位消除半导体激光器外腔时延结构. 而偏置电流和反馈速率是外腔半导体激光器产生混沌激光的两个重要参数. 在此, 需进一步研究在不同的偏置电流和反馈速率下, 伪随机信号调制反馈相位消除外腔时延结构的情况. 选定加载到相位调制器上的伪随机信号切换幅值个数为 5, 调制速率为 0.5 Gbit/s. 半导体激光器的外腔长仍为 0.6 m, 对应的反馈延迟时间为 4 ns. 图 7 给出了半导体激光器在偏置电流 (1.2 – $2.8 I_{th}$) 和反馈速率 (8 – 26 GHz) 条件下, 反馈相位随机调制后的外腔半导体激光器输出自相关曲线在外腔时延处对应的相关系数分布图. 图中不同的灰度代表不同的相关系数值. 可以看出, 在整个偏置电流和反馈速率的参数空间中, 外腔反馈时延处的相关系数几乎分布在 0 – 0.2 之间, 这说明, 外腔半导体激光器的反馈相位经过伪随机信号调制后, 在偏置电流和反馈速率非常大的参数空间中, 可抑制外腔引起的时延结构. 这与前面图 2 给出的无反馈相位随机调制的外腔半导体激光器对应的相关系数分布图相比, 图 7 中的自相关系数值整体偏低, 而且在很大的区域出现了自相关系数分布在 0 – 0.1 , 而对于图 2 中的自相关系数不存在小于 0.1 的值, 且分布在 0.1 – 0.2 范围内的值也是很少的. 由此说明, 外腔半导体激光器通过反馈相位随机调制可明显改善外腔对应的时延结构.

4. 结 论

我们提出利用伪随机信号调制反馈光的相位, 可消除外腔半导体激光器的反馈时延结构. 通过利用外腔半导体激光器输出混沌信号的自相关和互



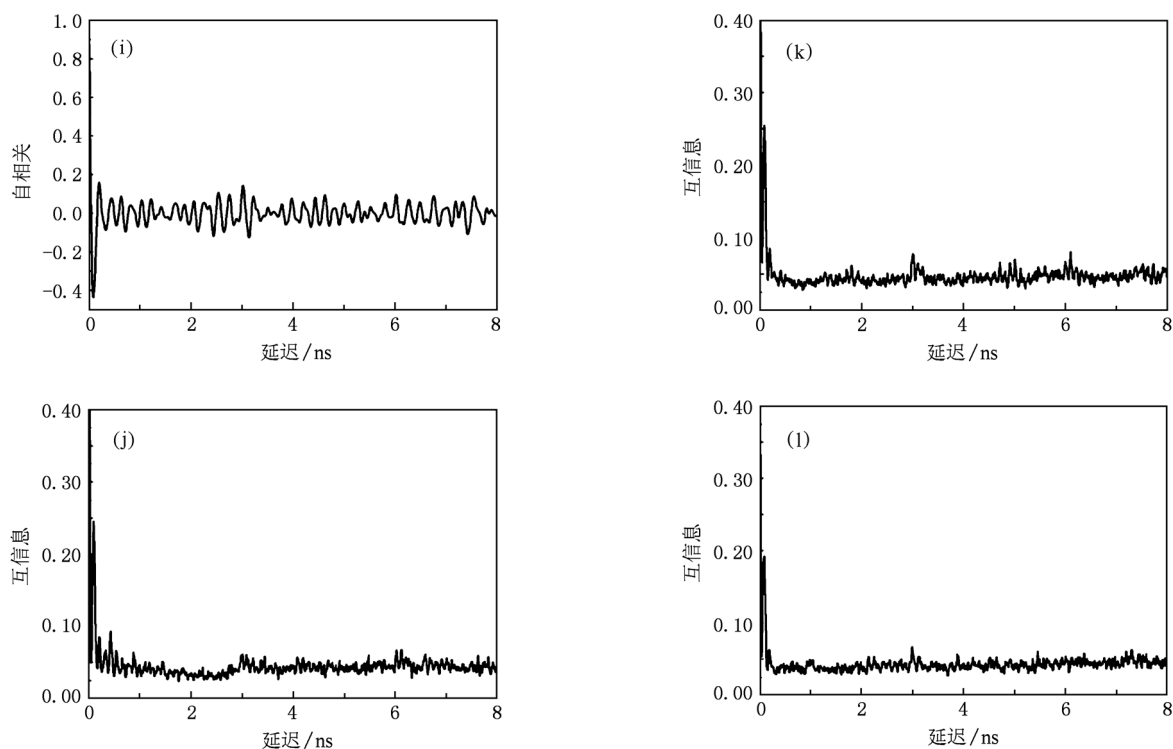


图5 反馈相位在不同的调制速率下,外腔半导体激光器输出的混沌激光及相应的自相关和互信息曲线 (a) — (c) 反馈相位; (d) — (f) 混沌时序; (g) — (i) 自相关曲线; (j) — (l) 互信息曲线

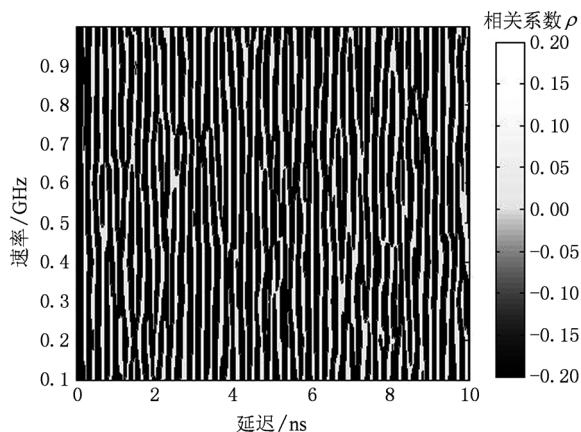


图6 反馈相位在调制速率 0.1—1 GHz 范围内,外腔半导体激光器输出混沌信号对应的自相关曲线分布图

信息分析技术,来确认外腔对应的时延结构的消除.数值研究表明,当伪随机信号的切换幅值个数达到5时,外腔半导体激光器在偏置电流(1.2—2.8I_{th})和反馈速率(8—26 GHz)的参数空间中,外腔延迟处对应的相关系数值几乎分布在0—0.2,反

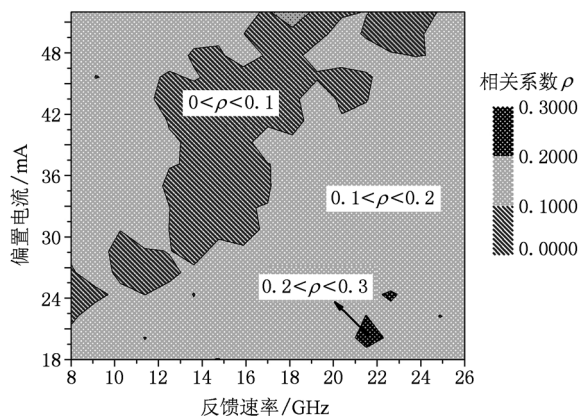


图7 反馈相位随机调制下,偏置电流和反馈速率对外腔时延结构消除的影响

馈时延对应的外腔长信息可有效地被消除,且不受伪随机信号调制速率的限制.消除外腔半导体激光器输出混沌激光信号中含有的外腔长信息,可为混沌保密通信、高速物理随机数产生及混沌激光测距等提供简单优质的混沌光源.

[1] 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

[2] Lin F Y, Liu J M 2004 *IEEE J. Quantum Electron* **40** 815

[3] Wang Y C, Wang B J, Wang A B 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 1636

- [4] Uchida A, Amano K, Inoue M, Hirano K, Naito S, Someya H, Oowada I, Kurashige T, Shiki M, Yoshimori S, Yoshimura K, Davis P 2008 *Nature Photon* **2** 728
- [5] Zhao Q C, Wang Y C, Wang A B 2009 *Appl. Opt.* **48** 3515
- [6] Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, Citrin D S 2007 *Opt. Lett.* **32** 2960
- [7] Wu J G, Xia G Q, Tang X, Lin X D, Deng T, Fan L, Wu Z M 2010 *Opt. Express* **18** 6661
- [8] Wu J G, Xia G Q, Cao L P, Wu Z M 2009 *Opt. Commun.* **282** 3153
- [9] Lee M W, Shore K A, Ortin S, Pesquera L, Valle A 2005 *IEE Proc. Optoelectron.* **152** 97
- [10] Wang Y C, Liang J S, Wang A B, Zhang M J 2010 *Electron. Lett.* **46** 1621
- [11] Shahverdiev E M, Shore K A 2009 *Opt. Commun.* **282** 3568
- [12] Zhang J Z, Wang A B, Wang Y C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3793 (in Chinese)[张建忠、王安帮、王云才 2009 物理学报 **58** 3793]
- [13] Wang Y C, Li Y L, Wang A B, Wang B J, Zhang G W, Guo P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4686 (in Chinese)[王云才、李艳丽、王安帮、王冰洁、张耕玮、郭萍 2007 物理学报 **56** 4686]

Elimination of time-delay signature in an external cavity semiconductor laser by randomly modulating feedback phase *

Zhang Jian-Zhong Wang An-Bang Zhang Ming-Jiang Li Xiao-Chun Wang Yun-Cai[†]

(Institute of Optoelectronic Engineering, Department of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(Received 2 August 2010; revised manuscript received 23 November 2010)

Abstract

We propose and numerically demonstrate that the feedback induced time – delay signature in an external cavity semiconductor laser can be eliminated by randomly modulating feedback phase. We find that when the rate of the random modulation signal is within the range of 0.1—1 Gb/s, and the number of the random variation amplitudes reaches 5, the time-delay signature corresponding to the external cavity can be effectively suppressed in the parameter space of injection current (1.2—2.8 I_{th}) and feedback rate (8—26 GHz).

Keywords: semiconductor laser, external cavity length, feedback phase, random signal modulation

PACS: 42.55.Px, 05.45.–a, 05.45.Gg

* Project supported by the Special Funds of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60927007) and the Shanxi Province Science Foundation for Youths (Grant No. 2010021003-4).

[†] Corresponding author. E-mail: wangyc@tyut.edu.cn