

垂直腔面发射激光器的饱和效应对慢光延时影响的研究

马雅男[†] 罗斌 潘炜 闫连山 邹喜华 易安林 叶佳 温坤华 郑狄

(西南交通大学信息科学与技术学院, 成都 610031)

(2010 年 11 月 2 日收到; 2011 年 3 月 9 日收到修改稿)

通过理论和实验研究了 1550 nm 量子阱垂直腔面发射激光器 (QW-VCSEL) 的饱和效应对 2.5 Gbps 二进制伪随机序列 (PRBS) 慢光延时的影响. 利用 Fabry-Perot 腔边界条件结合光场分布, 推导出 VCSEL 中信号相位和延时表达式, 并结合速率方程, 建立信号功率与延时之间的联系. 实验研究了在 VCSEL 逐渐达到饱和状态过程中 PRBS 信号的延时时间和眼图的变化情况. 理论和实验结果表明, 由于受饱和效应的影响, 大功率信号在 VCSEL 中传输得到更好的信号质量, 但以牺牲延迟时间为代价. 为了获得较大的时延, 一方面需要控制信号功率, 其次还需要调节信号波长以追踪由于饱和效应导致的 VCSEL 峰值增益波长的变化轨迹.

关键词: 慢光延时, 垂直腔面发射激光器, 饱和效应

PACS: 42.79.Vb, 42.55.Px, 42.60.Da

1 引言

近年来控制光波在介质中的传输速度逐渐成为光存储领域的研究热点. 目前已有多种方式实现慢光延时, 包括电磁感应透明^[1,2]、光纤受激 Brillouin 散射^[3,4]、光子晶体波导^[5]和具有 Fabry-Perot (F-P) 腔结构的垂直腔面发射激光器 (VCSELs)^[6,7]等. 其中 VCSELs 因为具有延迟时间可控、工作在室温条件、易于集成等优点^[8], 在全光缓存领域具有巨大的应用前景.

利用 VCSEL 实现慢光延时主要是基于相干布居数震荡效应^[9], 依据 K-K 关系^[10], 器件工作在放大状态时, 增益谱中尖锐的增益峰将导致相位正色散在该频谱范围内迅速增大, 从而引起信号的慢光延时. 基于该原理, Chang-Hasnain 等^[6]首次观测到正弦调制信号在 VCSELs 中的慢光延时; 随后 Peng 等^[7,8]又研究了调制频率和偏置电流对信号延迟时间的影响. 而饱和效应作为 VCSELs 的一个重要特性, 至今还没有在慢光研究中进行深入的探讨. 由于 VCSELs 工作在阈值电流以下作为放大器使用时, 较小的信号功率就极易引起器件增益的

饱和, 因此研究慢光延时过程中饱和效应对信号的影响具有一定的实际意义.

针对上述讨论, 本文首先建立 VCSEL 慢光延时的理论模型, 从 F-P 腔^[11]边界条件出发, 并考虑信号光场在传输方向上的分布, 推导出信号的相位谱和延时谱与腔内载流子密度之间的关系表达式, 并与速率方程^[12]相结合, 最终建立信号功率与时延的关系. 随后通过实验测量了 2.5 Gbps 二进制伪随机序列 (PRBS) 在 VCSEL 中的慢光延时, 通过改变信号功率, 研究了 VCSEL 达到饱和状态时对信号延时时间和信号眼图的影响. 理论分析结果与实验数据相符合, 证明了研究方法的可行性, 为今后 VCSEL 慢光延时的发展奠定了基础.

2 理论模型

利用 VCSEL 产生慢光延时的过程如图 1 所示. 图中延时信号谱与输入信号谱之间的关系表示为 $\tilde{E}_{\text{ref}}(\omega) = \tilde{E}_{\text{in}}(\omega)g(\omega)\exp(i\psi(\omega))$, 其中 $g(\omega)\exp(i\psi(\omega))$ 是 VCSEL 的传递函数, 其相位

[†] E-mail: mayananaa@sohu.com

正色散的取值决定了信号的延迟时间, 即 $\tau(\omega) = -d\psi(\omega)/d\omega$.

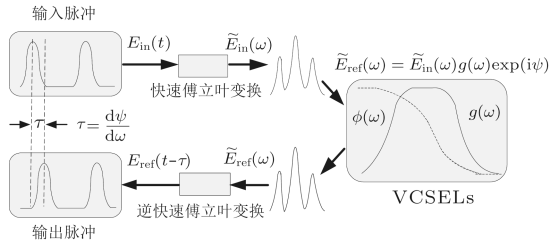


图1 VCSELs 中信号延时过程示意图

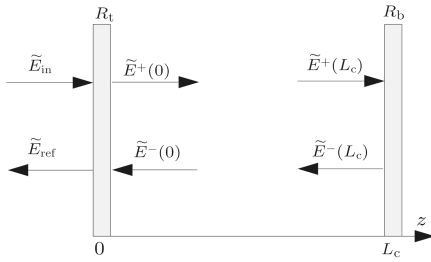


图2 信号在 VCSELs 腔内传输示意图

目前计算传递函数的方法主要是利用微腔理论, 将 VCSEL 腔体看成由高反射率反射镜夹一个有源腔构成, 如图 2 所示. 顶部、底部镜面反射率分别为 R_t 和 R_b , 有源腔腔长为 L_c , 信号场 $\tilde{E}_{in}$ 由顶部反射镜入射, 沿有源腔轴向 z 传输, 经过两侧分布 Bragg 反射镜 (DBR) 多次反射后形成驻波, 最终从顶部反射镜输出, 其中信号场在 VCSEL 两端面满足边界条件:

$$\begin{aligned} \tilde{E}^+(0) &= \tilde{E}_{in} \sqrt{1 - R_t} \\ &+ \sqrt{R_t} \exp(-i\pi) \tilde{E}^-(0), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\tilde{E}^-(L_c) = \sqrt{R_b} \exp(-i\pi) \tilde{E}^+(L_c), \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \tilde{E}_{ref} &= \sqrt{R_t} \exp(-i\pi) \tilde{E}_{in} \\ &+ \sqrt{1 - R_t} \tilde{E}^-(0), \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $E^\pm(0)$ 和 $E^\pm(L_c)$ 分别对应 $z = 0$ 和 $z = L_c$ 时正负 z 方向信号场. 信号场 $E^\pm(z)$ 在腔内传输过程满足 [11,13]:

$$\frac{\partial \tilde{E}^\pm(z)}{\partial z} = \pm \frac{g_c}{2} \tilde{E}^\pm(z) \mp ik \tilde{E}^\pm(z), \quad (4)$$

式中 k 是介质中的传播常数, $k = 2\pi n_c/\lambda$, n_c 为介质有效折射率, λ 是真空中信号波长, 模式增益为 $g_c = \xi \Gamma g_m - a_c$, 其中 ξ 是增益增强因子, 它反映了 F-P 腔驻波波峰与有源区量子阱的对准程度, 纵向限制因子 $\Gamma = L_a/L_c$, 其中 L_a 是增益区厚度, a_c 是腔内平均吸收系数, 材料增益 g_m 是与载流子密度 N 有关的量, 即 [11,12]

$$g_m(N) = g_0 \ln \left(\frac{N_s + N}{N_{tr} + N_s} \right), \quad (5)$$

式中, N_{tr} 是透明载流子浓度, g_0 和 N_s 分别对应增益拟合参量和载流子拟合参量.

根据 (4) 式, 结合边界条件, 可以得到反射模式下 VCSEL 的传递函数表达式:

$$\begin{aligned} g(\omega) \exp(i\psi(\omega)) &= \\ &= \frac{-\sqrt{R_t} + \sqrt{R_b} G_s \exp(-2i\theta)}{1 - \sqrt{R_b R_t} G_s \exp(-2i\theta)}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $G_s = \exp(g_c L_c)$, 为单程增益, 单程失谐相位 $\theta = 2\pi n_c L_c (1/\lambda - 1/\lambda_0)$, 它反映了信号波长与谐振腔波长 λ_0 的失谐程度. 根据 (6) 式不难推导相位和延时表达式:

$$\psi(\omega) = \arctan \left(\frac{R_b^{1/2} (R_t - 1) G_s \sin(2\theta)}{R_b^{1/2} (R_t + 1) G_s \cos(2\theta) - R_t^{1/2} (1 + R_b G_s^2)} \right), \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \tau(\omega) &= \frac{2L_c}{c} \\ &\times \frac{R_b G_s^2 (1 - R_t^2) - \sqrt{R_t R_b} (1 + R_b G_s^2) G_s (1 - R_t) \cos \theta}{R_t + R_b G_s^2 (1 + R_t^2 + R_t R_b G_s^2) - 2\sqrt{R_t R_b} (1 + R_b G_s^2) G_s (1 + R_t) \cos \theta + 4R_t R_b G_s^2 \cos^2 \theta}. \end{aligned} \quad (8)$$

从 8 式可以看出信号的相位和延时量与腔内载流子浓度有关, 载流子浓度又满足速率方程 [12]:

$$\frac{I}{eV} = (AN + BN^2 + CN^3) + g_m \frac{\lambda}{hc A_{eff}} P_{in}, \quad (9)$$

式中 A, B, C 分别对应非辐射复合、自发辐射复合和 Auger 复合系数, I 为有效注入电流, e 是电子电量, P_{in} 为输入信号功率, V 和 A_{eff} 分别对应有源区体积和面积 [14].

3 数值模拟

数值计算所采用的参数值参照文献 [9] 中给出的数据, 并由表 1 列出. 为拟合实验中所用的 PRBS 信号, 我们采用具有较陡的上升沿和下降沿的超 Gauss 脉冲作为输入信号, 即 $P_{in} = P_m \exp(-(t/T_0)^6)$, 其中 P_m 为峰值功率, T_0 表征脉宽. 同时, 在计算中 VCSEL 顶部和底部 DBR 反射率分别为 0.985 和 0.99.

表 1 计算采用的参数值

物理量/单位	数值
有效腔长 $L_c/\mu\text{m}$	2.20
腔内折射率 n_c	3.20
非辐射复合系数 A/s^{-1}	1.00×10^8
辐射复合系数 $B/\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	1.00×10^{-10}
Auger 复合系数 $C/\text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$	2.00×10^{-29}
有源区面积 $A_{\text{eff}}/\mu\text{m}^2$	6.40×10
有源区体积 $V/\mu\text{m}^3$	8.30
增益放大因子 ξ	1.80
有源区厚度 $L_a/\mu\text{m}$	1.30×10^{-1}
腔内平均吸收系数 a_c/cm^{-1}	1.50×10
增益拟合参量 g_0/cm^{-1}	1.58×10^3
透明载流子浓度 $N_{\text{tr}}/\text{cm}^{-3}$	1.10×10^{18}
载流子拟合参量 N_s/cm^{-3}	-6.3×10^{17}

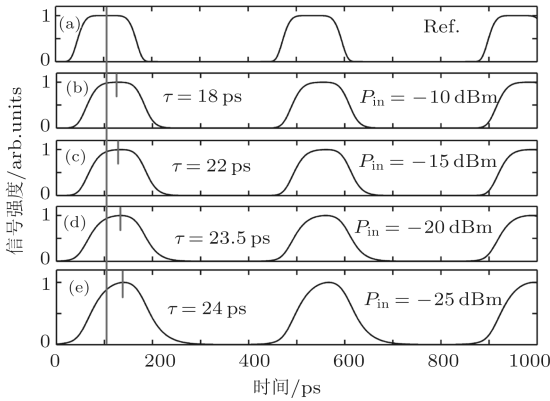


图 3 不同功率延迟信号的仿真时域波形 (a) 参考波形; (b) 信号功率为 -10 dBm 时延迟曲线; (c) 信号功率为 -15 dBm 时延迟曲线; (d) 功率为 -20 dBm 时延迟曲线; (e) 信号功率为 -25 dBm 时延迟曲线

本文中重点考察大功率信号输入引起的 VCSEL 饱和效应对慢光延时的影响, 所采用的研究方法如图 1 所示. 时域信号经 Fourier 变换后与所求得的 VCSEL 传递函数相乘, 得到的输出信号经反 Fourier 变换后即及时域慢光延时信号. 其中传递函数的求解过程如下所述: 首先将注入电流值和信号功率代入 (9) 式, 得到一个关于载流子浓度的非线性方程, 解出 N 值即得到材料增益和模式增益, 进而求得 VCSEL 单程增益 G_s , 将其带入 (6) 式即可得到整个放大器的传输函数.

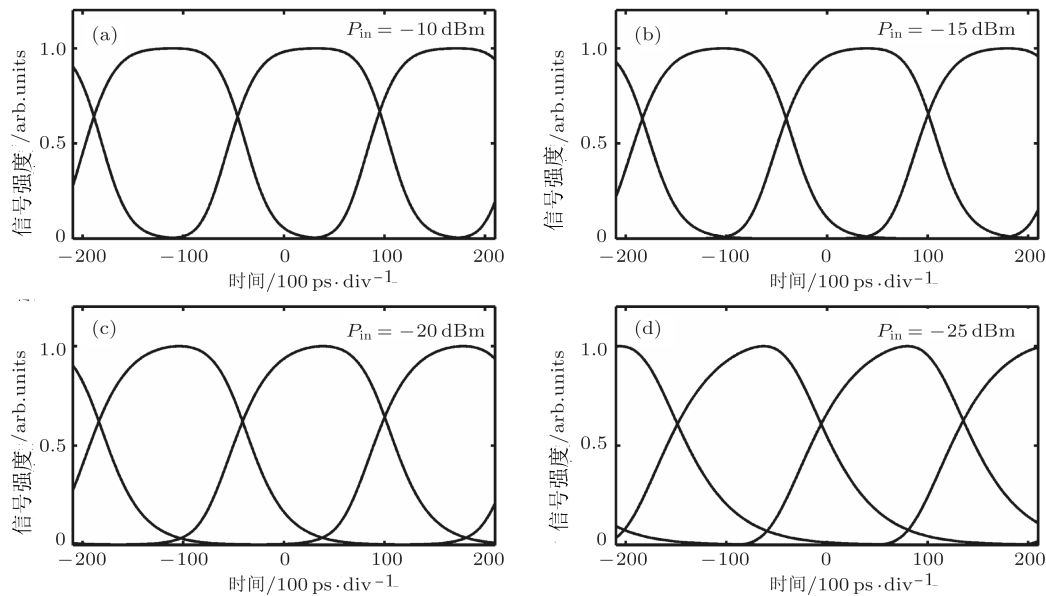


图 4 不同功率延时信号的仿真眼图 (a) 功率为 -10 dBm 时信号的眼图; (b) 功率为 -15 dBm 时信号的眼图; (c) 功率为 -20 dBm 时信号的眼图; (d) 功率为 -25 dBm 时信号的眼图

根据上述方法,在注入电流为 1.75 mA,码速率为 2.5 Gbps 时,不同功率信号进入 VCSEL 后,其延时输出的时域波形如图 3 所示.从图中可以看出,随着光强度的增大,输出信号与参考信号之间的时延差逐渐减小.这是因为随着信号光功率的增加,VCSEL 有源区内载流子浓度下降而使得其腔内信号单程增益减小,进而放大器增益下降并且信号延时时间缩短.与此同时,随着信号功率的增大,信号在延时过程中产生的畸变逐渐减小,相应的输出信号眼图由图 4 所示.出现这一现象的原因是当 VCSEL 随着信号功率的增大逐渐达到饱和状态时,增益带宽的增加引发延时带宽在更广的频谱范围内扩展,这一变化使 VCSEL 更合适于宽带信号的传输,从而提高了输出延时信号的质量.

4 实验结果

依据文献 [6—8] 中描述搭建了 VCSEL 的慢光实验平台,其实验装置如图 5 所示.图中慢光产生装置是工作在反射模式下波长为 1550 nm 的单膜量子阱 (QW)VCSEL(RayCan RC32xxx1-F 型).进入 VCSEL 的激光束首先从可调谐激光器中发射,经过 Mach-Zehnder (M-Z) 调制器后,调制生成 PRBS 信号,随后信号经过偏振控制器和光衰减器后被分为两路,一路进入 QW-VCSEL,另一路进入光功率计进行功率监测.最后从 VCSEL 反射输出的信号经过放大器和滤波器后进入示波器.因为延迟信号光需要与初始信号光进行同步,所以从 PRBS 源输出的电信号有一半输入示波器中.

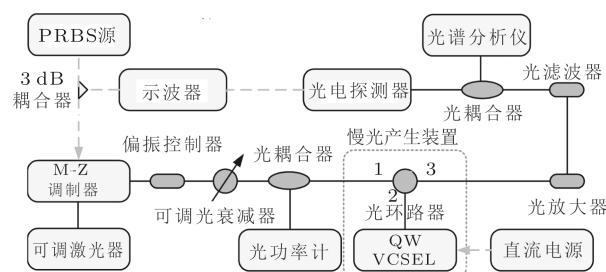


图 5 QW-VCSEL 中 PRBS 信号慢光延时的实验装置示意图

在实验之前,首先需要关注两个重要的参量:VCSEL 的阈值电流和峰值增益波长,因为它们决定了 VCSEL 作为放大器工作时的偏置电流范围和信号波长的调谐范围.因此我们首先测量了

VCSEL 的 P - I 特性曲线和阈值电流下的光谱图,如图 6 所示.发现随着电流的增大,VCSEL 输出光功率初始变化较小,当偏置电流超过 2 mA 时,输出功率逐渐增大并且与注入电流成线性关系,由此可知阈值电流约为 2 mA (I_{th}).在该电流下利用示波器观测 VCSEL 的输出光谱,图 6 显示增益峰值波长为 1531.92 nm, 3 dB 带宽约为 7 GHz.根据测量结果,实验选取 1.75 mA 的偏置电流使 VCSEL 工作在放大状态,并调节激光器追踪此时增益峰值波长,该波长应小于测量值 1531.92 nm.由于 VCSEL 窄带宽的限制,实验选取调制信号速率为 2.5 Gbps.

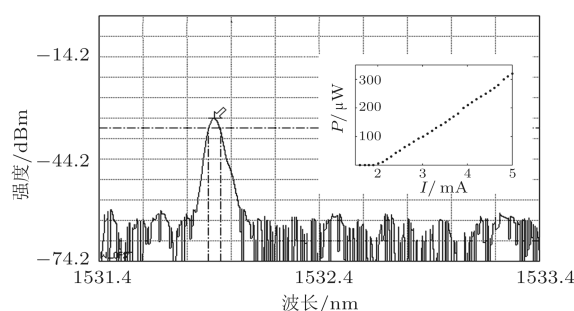


图 6 注入电流 $I = 2.0$ mA 时 VCSEL 的光谱图内插图内为 VCSEL 的 P - I 特性曲线图

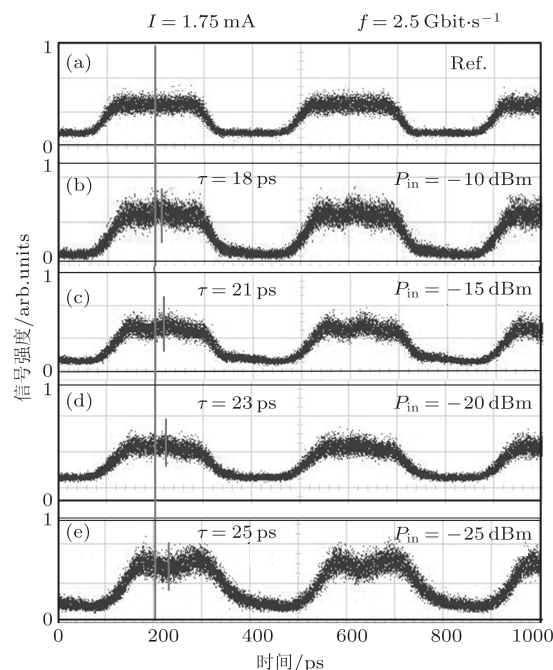


图 7 当注入电流为 1.75 mA 时不同功率延迟信号的时域波形 (a) 参考波形; (b) 信号功率为 -10 dBm 时的延迟曲线; (c) 信号功率为 -15 dBm 时的延迟曲线; (d) 功率为 -20 dBm 时的延迟曲线; (e) 信号功率为 -25 dBm 时的延迟曲线

在以上给定的实验条件基础上,通过调节衰减

器, 我们得到了不同功率下 PRBS 延时信号的时域波形, 如图 7 所示, 其中时域参考波形是当 VCSEL 不工作时信号光直接通过整条光路而得到的, 它已将线路和其他器件造成的延迟包含在内, 因此当 VCSEL 工作在放大状态时, 信号波形相对于参考波形出现的时延即为放大器引起的慢光延时. 从图 7 中可以看出信号延迟时间随着信号光强度的增大逐渐减小, 由理论分析可知造成这一现象的原因是 VCSEL 中增益饱和效应的出现. 腔内载流子浓度的降低引起增益的下降, 根据 K-K 关系, 增益的饱和导致信号延迟时间的减小. 因此饱和效应导致信号时延缩短通过理论分析和实验验证共同得到了证实.

与图 7 中曲线测试条件相同, 图 8 给出了不同

功率 PRBS 延时信号的眼图, 图中延迟信号的质量随着功率的增大而有所改善, 改善的原因有以下两点: 首先信号功率越高, 眼图中眼睛张角越大, 因此眼图更加清晰可辨; 其次更重要的原因是依据理论分析所述, 饱和效应扩展了增益谱和延迟谱的带宽, 使其更加适合于宽带信号的传输, 从而提高了延时信号的质量.

综合理论分析和实验结果, VCSEL 中高功率信号由于受到饱和效应的影响更容易得到较好的信号质量, 但以牺牲延迟时间为代价, 因此为了增大信号延迟量, 需要在适当降低信号功率以减小饱和效应影响的同时, 进一步优化器件的结构^[15-17], 扩展器件的传输带宽, 使 VCSEL 更适于宽带信号的慢光传输.

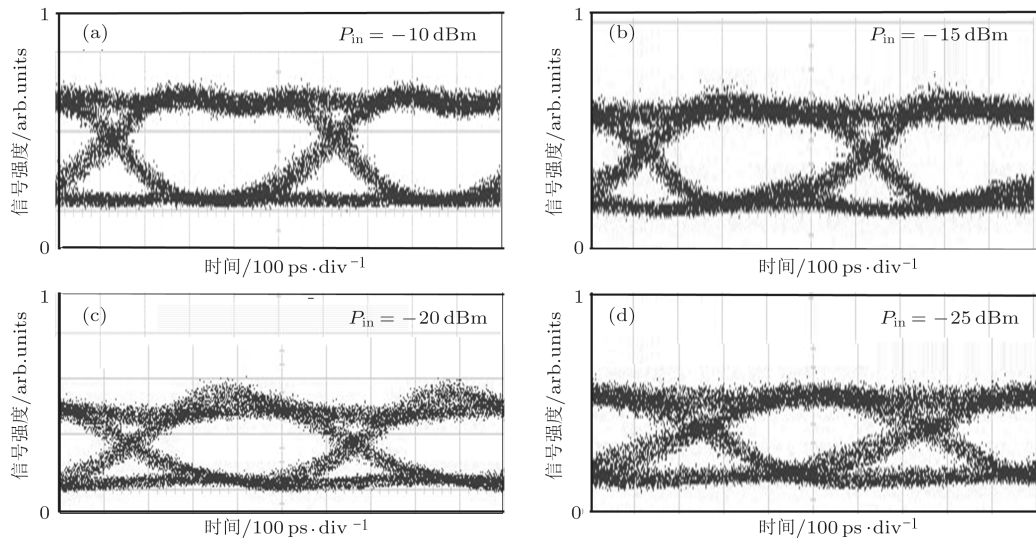


图 8 注入电流 $I = 1.75$ mA 时不同功率 PRBS 延时信号的眼图 (a) 功率为 -10 dBm 时信号的眼图; (b) 功率为 -15 dBm 时信号的眼图; (c) 功率为 -20 dBm 时信号的眼图; (d) 功率为 -25 dBm 时信号的眼图

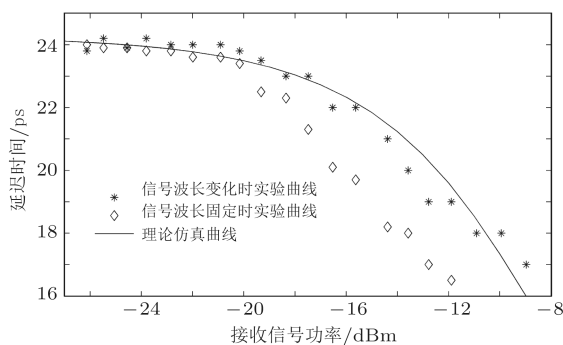


图 9 注入电流为 1.75 mA 时 PRBS 信号延迟时间随信号功率变化的曲线图

信号功率变化的实验和仿真曲线, 图中随着信号功率的增大, 延迟时间从初始的缓慢减小逐渐出现越来越剧烈的下降, 这一现象结合增益饱和曲线^[13]进一步验证了饱和效应导致延时下降这个观点, 图中仿真曲线与实验曲线拟合程度较高, 也证明了 VCSEL 慢光模型的正确性.

实验中随着信号功率的增大, 我们还发现增益的峰值波长向短波长方向移动, 这一变化导致峰值波长与固定的信号波长在 VCSEL 腔内无法实现最佳共振, 从而减小了输出信号的增益, 降低了信号延迟时间, 如图 9 所示. 为了削弱这一影响, 在增大信号功率的同时, 还需要调节信号波长来跟踪增益

图 9 所示为 VCSEL 中 PRBS 信号延迟时间随

峰值波长的变化轨迹, 从而得到最佳实验结果.

5 结 论

研究了 VCSEL 的饱和效应对 2.5 Gbps PRBS 慢光延迟的影响. 通过理论分析和实验研究发现 VCSEL 中大功率信号输入极易引起增益饱和效应, 从而导致增益和延时谱峰值的下降、带宽的扩展和峰值波长的漂移, 这些变化使得慢光信号失真减小, 但延时时间降低. 因此为了保持“0/1”序

列时延的一致性, 需要在适度控制信号功率的同时, 调节信号波长与增益峰值波长保持一致, 并优化 VCSEL 器件的结构, 使增益和延时谱具有更平坦的宽带, 从而在有效降低信号失真的同时增大信号延时量. 文中数值仿真与实验结果符合较好, 对 VCSEL 慢光延时的理论研究有一定的指导意义.

作者感谢西南大学物理学院夏光琼老师提供 VCSEL 器件.

-
- [1] Hau L V, Harris S E, Dutton Z, Behroozi C H 1999 *Nature* **397** 594
 - [2] Liang Q C, Wang H H, Jiang Z K 2007 *Acta Opt. Sin.* **27** 94 (in Chinese) [梁卿昌, 王海华, 蒋占魁 2007 光学学报 **27** 94]
 - [3] Zhu Z M, Dower A M C, Gauthier D J, Zhang L, Willner A E 2007 *J. Lightwave Technol.* **25** 201
 - [4] Yan L S, Zheng D, Pan W, Luo B, Zhang B, Zhang L 2009 *Opt. Commun.* **282** 4431
 - [5] Zhang Y D, Weng W, Yu B, Yuan P 2007 *Laser Optoelectron. Prog.* **44** 26 (in Chinese) [掌蕴东, 翁文, 喻波, 袁萍 2007 激光与光电子学进展 **44** 26]
 - [6] Zhao X, Palinginis P, Pesala B, Chang-Hasnain C J 2005 *Opt. Express* **13** 7899
 - [7] Peng P C, Lin C T, Kuo H C, Liu J N, Tsai W K, Lin G, Yang H P, Lin K F, Chi J Y, Chi S, Wang S C 2007 *Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference* Anaheim CA, October 15–18, 2007 p1
 - [8] Peng P C, Wu F M, Lin C T, Chen J H, Shih P T, Kao W C, Jiang W J, Kuo H C, Chi S 2008 *Lasers and Electro-Optics 2008 and 2008 Conference on Quantum Electronics Laser Science* San Jose, CA, May 4–9, 2008 p1
 - [9] Chang-Hasnain C J, Ku P C, Kim J, Chuang S L 2003 *Proc. IEEE* **91** 1884
 - [10] Zhang Z Y, Zhou X J, Shi S H, Liang R 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4694 (in Chinese) [张旨遥, 周晓军, 石胜辉, 梁锐 2010 物理学报 **59** 4694]
 - [11] Qin Z M, Luo B, Pan W 2006 *Laser Technol.* **30** 452 (in Chinese) [秦张森, 罗斌, 潘炜 2006 激光技术 **30** 452]
 - [12] Xu J H, Luo B, Pan W, Qin Z M, Wang F 2007 *Opto-Electron. Eng.* **34** 100 (in Chinese) [许江衡, 罗斌, 潘炜, 秦张森, 汪帆 2007 光电工程 **34** 100]
 - [13] Laurand N, Calvez S, Dawson M D, Kelly A E 2007 *Lasers and Electro-Optics Society of the IEEE Montreal QC Canada*, January 1, 2006 p20
 - [14] Wang G, Luo B, Pan W, Xiong J 2005 *Chin. Phys.* **14** 2561
 - [15] Lim S F, Chang-Hasnain C J 1995 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **7** 1240
 - [16] Zhang Y Y, Cheng C H 2007 *J. Microwave* **23** 103 (in Chinese) [庄砚研, 程崇虎 2007 微波学报 **23** 103]
 - [17] Guo C Z, Chen S L 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 1731 (in Chinese) [郭长志, 陈水莲 1997 物理学报 **46** 1731]

Dependence of slowing light in vertical-cavity surface-emitting laser on saturation effect

Ma Ya-Nan[†] Luo Bin Pan Wei Yan Lian-Shan Zou Xi-Hua
Yi An-Lin Ye Jia Wen Kun-Hua Zheng Di

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

(Received 2 November 2010; revised manuscript received 9 March 2011)

Abstract

The dependence of slowing light on the saturation effect in the vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) is demonstrated. Combining the boundary conditions with the optical field distribution in VCSEL, the phase expression and the delay expression of the signal are derived. Based on these expressions and the rate equation, the relation between signal power and time delay is presented. Then the experimental demonstration shows the delays and the eye diagrams of a 2.5 Gbps pseudo-random binary sequence (PRBS) signal, when the VCSEL is working in the saturation condition. The theoretical and experimental results show that the high-power signal transmitted in the VCSEL could achieve better signal quality at the expense of the lower time delay. In order to obtain larger delay, on the one hand, the signal power should be controlled. On the other hand, the signal wavelength should be carefully adjusted to track the peak gain wavelength of the VCSEL caused by the saturation effect.

Keywords: slow light, vertical cavity surface emitting laser, saturation effect

PACS: 42.79.Vb, 42.55.Px, 42.60.Da

[†] E-mail: mayananaa@sohu.com