

光注入半导体激光器产生单边带效应的研究

缪婉仪^{1,2} 方 捻^{1,2} 王陆唐^{1,2}

¹上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072

²上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072

摘要 在光注入半导体激光器中,为了更好地利用单周期振荡的单边带效应产生光载无线通信(RoF)系统所需的单边带光,通过数值模拟的方法研究产生单边带效应的注入条件和影响因素。通过在不同注入强度和频率失谐下仿真光注入半导体激光器的速率方程,找到了产生单边带效应的条件范围。选取弱注入与强注入两种特定情况分别研究各参数对产生单边带效应的影响。结果发现,无论是弱注入还是强注入时,单边带效应都随偏置电流和线宽增强因子的减小而更加明显。弱注入时单边带效应随频率失谐的增大而变好,而强注入时需减小频率失谐才能得到较好的单边带效应。此外,强注入时单边带效应还会随着腔衰减率的增大而增强。因此,要想获得好的单边带光,需选取合适的激光器类型与外部注入参数。

关键词 激光器; 半导体激光器; 非线性动力学; 光注入; 单边带效应

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0214001

Single-Side Band Effect Based on Optically Injected Semiconductor Laser

Miao WanYi^{1,2} Fang Nian^{1,2} Wang Lutang^{1,2}

¹Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China

²School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract In order to produce single-side band (SSB) light needed by radio over fiber (RoF) system with the SSB effect of period-one oscillation based on an optically injected semiconductor laser, the injection conditions and influencing factors are investigated by numerical simulation method. By the rate equations of the optically injected semiconductor laser under different injection intensities and frequency detunings, the ranges of producing SSB effect are found. Two special cases of weak injection and strong injection are selected, in which the influences of various parameters on the SSB effects are researched, respectively. The results show that in the cases of weak and strong injections, SSB effects become obvious with the decrease of the normalized bias current density and linewidth enhancement factor. In the case of weak injection, the SSB effect becomes good with the increase of the frequency detuning. However, it is necessary to decrease the frequency detuning for producing the SBB effect well in the case of strong injection. In addition, SSB effect gets enhanced with the increase of the cavity decay rate in the case of strong injection. Therefore, in order to get a good SSB light, the appropriate laser type and external injection parameters should be selected.

Key words lasers; semiconductor lasers; nonlinear dynamics; optical injection; single-side band effect

OCIS codes 140.5960; 140.3570; 190.4360

1 引 言

近年来,光注入半导体激光器由于其混沌振荡、单周期振荡、倍周期振荡、低频起伏等丰富的非线性效应受到了广泛的关注^[1-7]。这些非线性效应被应用在军事、通信、医疗等领域。比如混沌信号因其具有的宽

收稿日期: 2015-06-21; 收到修改稿日期: 2015-08-10

基金项目: 上海市浦江人才计划(14PJD017)、上海市重点学科(S30108)

作者简介: 缪婉仪(1991—),女,硕士研究生,主要从事光通信方面的研究。E-mail: 18321731053@163.com

导师简介: 方 捻(1972—),女,博士,教授,主要从事光通信与光传感方面的研究。E-mail: nfang@shu.edu.cn(通信联系人)

带、平坦功率谱以及类噪声特性,使得混沌保密通信、混沌抗干扰雷达等众多应用被相继提出^[3-4]。近年来单周期振荡成为一个新的研究热点,牛生晓等^[5]用半导体激光器的单周期振荡产生可调谐高频微波,从而避免利用电流调制产生高频微波的弊端。张明江等^[6]研究了线宽增强因子对外光注入半导体激光器非线性单周期振荡特性的影响。Chan等^[9-10]利用光注入半导体激光器产生的单周期振荡效应,在合适的参数下还可以产生单边带效应。单边带效应是单周期振荡的一个特别现象,通过改变相关参数,使单周期振荡中的某一边带得到抑制。然而,至今还无人对光注入半导体激光器产生单边带效应的现象做进一步的深入研究。单边带光因其在光纤中传播的传输色散较小而成为光载无线(RoF)通信系统的优选^[11]。而利用光注入半导体激光器非线性现象中的单边带效应产生所需的单边带光,相对于传统利用电光调制器^[12]产生单边带光的方法,结构简单,易于实现。

为了更好地利用光注入半导体激光器产生单边带光,通过数值模拟的方法,改变注入条件以及激光器自身参数,研究其产生单边带效应的注入条件和影响因素。从光注入条件下的半导体激光器的动态速率方程出发,分别仿真研究了注入强度、频率失谐、偏置电流以及线宽增强因子等对产生单边带效应的影响。研究结果可为RoF系统需要的单边带光的产生提供理论指导。

2 理论模型

光注入半导体激光器的常见形式如图1所示。SL1为主激光器,其输出光经偏振控制器(PC)、可调衰减器(TA)和环形器注入从激光器SL2,通过环形器的第3个端口输出,可以在输出端接光谱分析仪等仪器进行监测。

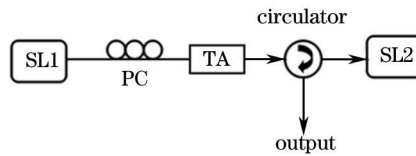


图1 光注入半导体激光器示意图

Fig.1 Schematic diagram of optically injected semiconductor laser

从激光器的输出变化可描述为^[10]

$$\frac{da_r}{dt} = \frac{1}{2} \left[\frac{\gamma_c \gamma_n}{\gamma_s \tilde{J}} \tilde{n} - \gamma_p (a_r^2 + a_i^2 - 1) \right] (a_r + ba_i) + \xi_i \gamma_c \cos \Omega_i t, \quad (1)$$

$$\frac{da_i}{dt} = \frac{1}{2} \left[\frac{\gamma_c \gamma_n}{\gamma_s \tilde{J}} \tilde{n} - \gamma_p (a_r^2 + a_i^2 - 1) \right] (-ba_r + a_i) - \xi_i \gamma_c \sin \Omega_i t, \quad (2)$$

$$\frac{d\tilde{n}}{dt} = -[\gamma_s + \gamma_n (a_r^2 + a_i^2)] \tilde{n} - \gamma_s \tilde{J} (a_r^2 + a_i^2 - 1) + \frac{\gamma_s \gamma_p}{\gamma_c} \tilde{J} (a_r^2 + a_i^2) (a_r^2 + a_i^2 - 1), \quad (3)$$

式中 a_r, a_i 分别表示从激光器输出光复振幅的实部与虚部,(1)式、(2)式最右边的一项即为注入项, ξ_i 为经过归一化的无量纲的注入强度, $\Omega_i = 2\pi f_i$ 为主、从激光器间的失谐角频率, f_i 为两激光器间的频率失谐。 $\tilde{n} = N/N_0 - 1$ 为归一化后的载流子密度, N 为载流子密度, N_0 为从激光器自由振荡时 N 的稳态值。 $\tilde{J} = (J - J_{th})/J_{th}$ 表示经过归一化后的半导体激光器的偏置电流密度,其中 J 表示实际注入半导体激光器的电流密度, J_{th} 为激光器的阈值电流密度。 b 为半导体激光器的线宽增强因子, γ_c 为腔衰减率, γ_s 为载流子自发弛豫速率, 并有 $\gamma_c = 1/\tau_c$, $\gamma_s = 1/\tau_s$, 其中 τ_c 为光子寿命, τ_s 为载流子自发复合寿命, γ_n 为载流子差分弛豫速率, γ_p 为载流子非线性弛豫速率。

3 仿真及结果

利用 Matlab 软件的 Simulink 平台对光注入半导体激光器的动态速率方程进行仿真,采用四阶 Runge-Kutta 算法,步长为 2.5 ps,计算时间为 0.1 μ s。初始的仿真参数如表1所示。首先在表1各参数取值下,通过改变注入强度 ξ_i 和频率失谐 f_i ,得到不同的动力学状态,包括单边带效应。一个单边带光谱的例子,如图2所示,其

中 $f_c = f_i - f_0$, f_0 为单周期振荡的振荡频率。以右边带减去左边带的光功率差(OPD)衡量产生的单边带效应的效果, OPD 越大, 单边带效应越明显。图 2 中的 OPD 值为 45 dB。根据文献[10]以及我们大量的仿真结果, 画出光注入半导体激光器动态特性分布图, 如图 3 所示。绿色部分为单边带效应区域, 其中每条曲线对应一个边带光功率差 OPD 的分贝值。白色区域为注入锁定区域, 其他部分代表其他非线性动力学状态。

表 1 初始的仿真参数

Table 1 Initial simulation parameters

Parameter	γ_c	γ_s	γ_n	γ_p	b	\tilde{J}
Value	5.36×10^{11}	5.96×10^9	7.53×10^9	1.91×10^{10}	3	1.222

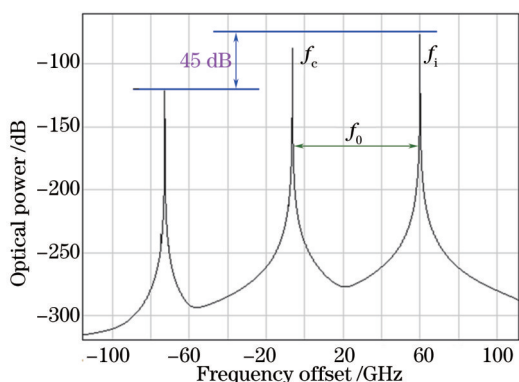


图 2 单边带效应示意图

Fig.2 Schematic diagram of SSB effect

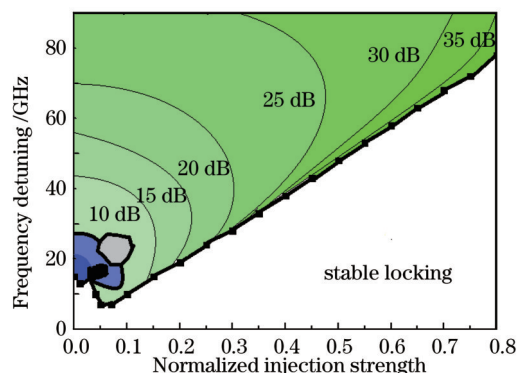


图 3 光注入半导体激光器动态特性分布图

Fig.3 Map of dynamic characteristics of optically injected semiconductor laser

通过对注入强度和频率失谐的不断调整, 最后选取 $\xi_i = 0.0001$, $f_i = 60$ GHz 的弱注入和 $\xi_i = 0.7$, $f_i = 60$ GHz 的强注入两种特定注入条件下的单边带现象进行深入的仿真研究。在这两种注入条件下, 分别改变其他参数的大小, 研究不同参数对单边带效应的影响。

另外需注意的是, 表 1 中 4 个速率参数加上线宽增强因子, 这 5 个激光器的自身参数足以确定其动力学行为。腔衰减率 γ_c 和载流子自发弛豫速率 γ_s 对给定激光器来说是常数, 与光功率无关, 可以直接测量得到。而载流子差分弛豫速率 γ_n 和载流子非线性弛豫速率 γ_p 却和光功率有线性关系^[13]:

$$\gamma_n = g_n S_0, \gamma_p = \Gamma \gamma_n, \quad (4)$$

$$S_0 = \frac{\eta_{inj} \tilde{J} J_{th}}{\gamma_c e \nu_{mode}}, \quad (5)$$

式中 S_0 为大于阈值的直流偏置下处于稳态振荡的半导体激光器的光子密度, g_n 为差分增益参数, Γ 为增益重叠因子, 对于不含量子阱的双异质结结构的半导体激光器, 增益重叠因子可看作和模式限制因子相同。 η_{inj} 为电流注入半导体激光器的注入效率, e 为元电荷, ν_{mode} 为激光模式的有效体积。由(4)、(5)两式得, 载流子差分弛豫速率 γ_n 、载流子非线性弛豫速率 γ_p 都与归一化偏置电流密度 \tilde{J} 、腔衰减率 γ_c 有关。所以本次仿真研究的影响产生单边带效应的参数就确定为频率失谐、注入强度和归一化偏置电流这 3 个外部参数以及腔衰减率、载流子自发弛豫速率、线宽增强因子这 3 个内部参数。

3.1 弱注入条件下各参数对单边带效应的影响

将注入强度设定为 $\xi_i = 0.0001$, 即弱注入的情况。由于 $\tilde{J} = (J - J_{th})/J_{th}$, 而只有当偏置电流大于阈值电流时半导体激光器才可以工作, 所以归一化偏置电流密度一定大于零。线宽增强因子的大小一般为 $1 \sim 10^{81}$, 不同激光器的线宽增强因子各不相同, 它描述了激光器腔共振频率随增益变化的程度^[14]。光子寿命 τ_c 和载流子自发复合寿命 τ_s 一般都在皮秒至纳秒量级。在上述取值范围内, 分别改变归一化偏置电流密度、频率失谐、腔衰减率、载流子自发弛豫速率以及线宽增强因子的大小, 研究它们对单边带效应的影响。

首先在表 1 的激光器自身参数和弱注入的强度保持不变的情况下, 单独改变另外 2 个外部参数, 考察其对单边带效应的影响。仿真结果如图 4 所示, 其中图 4(a)和图 4(b)分别为单边带光的边带光功率差 OPD 与归

一化偏置电流密度以及频率失谐的关系图。在弱注入条件下,归一化偏置电流密度的减小,频率失谐的增大都可以使边带光功率差增大,也就是说可以得到更好的单边带光。

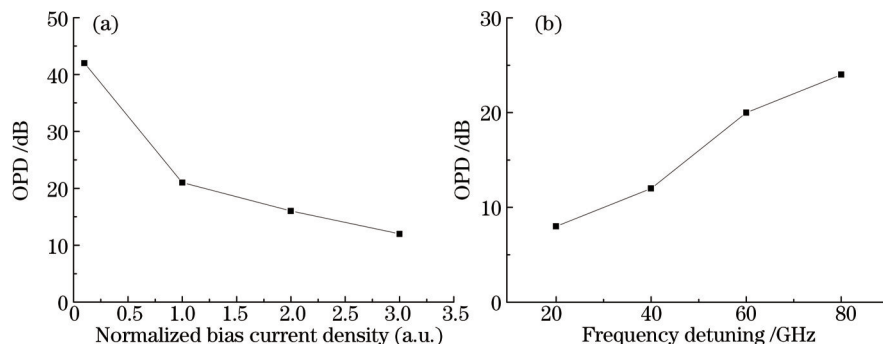


图4 边带光功率差与外部参数的关系。(a) 归一化偏置电流密度;(b) 频率失谐

Fig.4 Optical power difference between both side bands and external parameters. (a) Normalized bias current density; (b) frequency detuning

接着对半导体激光器自身参数,即腔衰减率、载流子自发弛豫速率以及线宽增强因子进行仿真研究。同样保持其他参数如表1中数值不变,分别改变其中的某个激光器自身参数,研究其对单边带效应的影响。仿真发现,载流子自发弛豫速率和腔衰减率的变化不能明显改变单边带光的边带光功率差,即不影响单边带效应,而线宽增强因子的变化会影响单边带效应,具体仿真结果如图5所示。图5为单边带光的边带光功率差与线宽增强因子的关系。如图5所示,线宽增强因子的减小可以得到更好的单边带光。

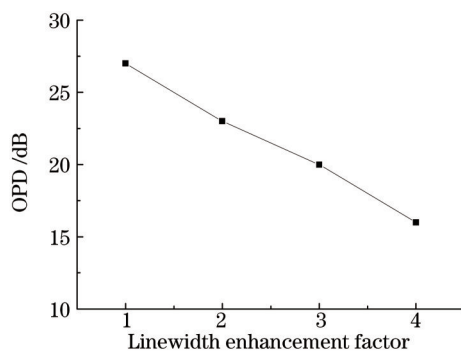


图5 边带光功率差与线宽增强因子的关系

Fig.5 Optical power difference between both side bands and linewidth enhancement factor

3.2 强注入条件下各参数对单边带效应的影响

另一方面,将注入强度设定为 $\xi_i = 0.7$,分别改变归一化偏置电流密度、频率失谐、腔衰减率、载流子自发弛豫速率、线宽增强因子的大小,研究它们对单边带效应的影响。图6给出了外部参数影响的仿真结果,其中图6(a)和图6(b)分别为单边带光的边带光功率差OPD与偏置电流以及频率失谐的关系图。如图6所示,随着频率失谐和偏置电流的减小,单边带效应更加明显。特别是在归一化偏置电流密度小于1的情况下,继续减

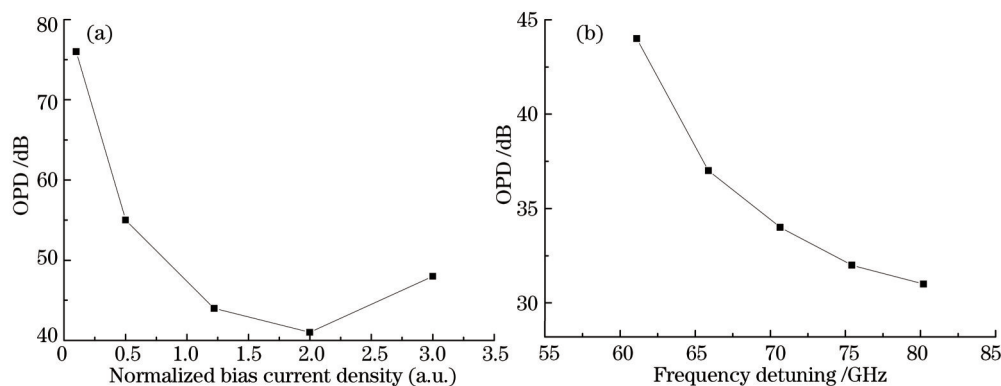


图6 边带光功率差与外部参数的关系。(a) 归一化偏置电流密度;(b) 频率失谐

Fig.6 Optical power difference between both side bands and external parameters. (a) Normalized bias current density; (b) frequency detuning

小其值,单边带效应得到明显的提升。这里要注意的是,归一化偏置电流密度大于4后半导体激光器进入注入锁定状态,所以图6中没有给出更大的电流值。

对半导体激光器自身参数的影响效果的仿真研究发现,载流子自发弛豫速率的改变几乎不影响单边带效应,而腔衰减率的增大和线宽增强因子的减小都可以产生更好的单边带光,如图7所示。

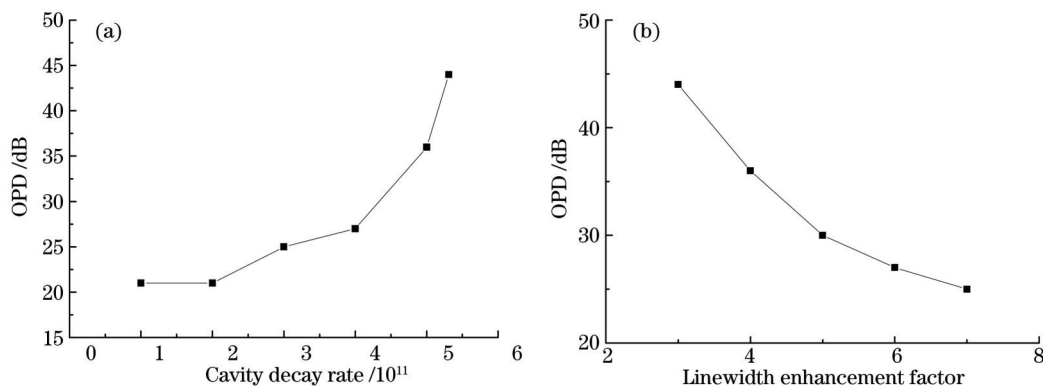


图7 边带光功率差与内部参数的关系。(a)腔衰减率;(b)线宽增强因子

Fig.7 Optical power difference between both side bands and internal parameters. (a) Cavity decay rate; (b) linewidth enhancement factor

4 结 论

利用光注入半导体激光器的动态速率方程组,通过改变外部注入条件参数和激光器自身参数值,仿真研究了产生单边带效应的注入条件和影响因素。研究产生单边带效应的注入参数的取值范围;在产生单边带效应的范围内,分别选取弱注入和强注入两种特定的注入条件,通过改变注入强度、频率失谐、归一化偏置电流密度等外部参数以及腔衰减率、载流子自发弛豫速率、线宽增强因子等内部参数,仿真研究这些参数对产生单边带效应的影响。结果显示,单边带效应的产生主要和线宽增强因子、腔衰减率、偏置电流、注入强度以及频率失谐有关。无论是弱注入还是强注入时,单边带效应都随偏置电流和线宽增强因子的减小而更加明显。这是由于半导体激光器的红移效应随偏置电流的增大而增大^[15],单周期振荡的频率 f_0 随线宽增强因子的增大而增大^[8],说明线宽增强因子越大,注入引起的红移效应越明显,从而使得左边带变强,边带光功率差变小。弱注入时单边带效应随频率失谐的增大而变好,而强注入时需减小频率失谐才能得到较好的单边带效应。因为弱注入时,注入引起的红移效应占主导,增大频率失谐导致红移效应减弱,左边带变弱,从而使边带光功率差变大。而强注入时注入引起的拉动效应占主导,频率失谐越小,拉动效应越明显,能量越集中到右边带,从而增强了单边带效应。此外,强注入时单边带效应还会随着腔衰减率的增大而增强。研究结果对利用光注入半导体激光器的方法产生单边带光的研究具有重要的参考价值。

参 考 文 献

- 1 Hwang S K, Liu J M. Dynamical characteristics of an optically injected semiconductor laser[J]. Opt Commun, 2000, 183(1-4): 195-205.
- 2 Simpson T B, Liu J M, Gavrielides A, *et al.*. Period-doubling route to chaos in a semiconductor laser subject to optical injection[J]. Appl Phys Lett, 1994, 64(26): 3539-3541.
- 3 Meng Lina, Zhang Mingjiang, Zheng Jianyu, *et al.*. Chaotic ultra-wideband microwave signal generation utilizing an optical injection chaotic laser diode[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(12): 124212.
孟丽娜,张明江,郑建宇,等.外部光注入混沌激光器产生超宽带微波信号的研究[J].物理学报,2011,60(12):124212.
- 4 Pan Xingmao, Wu Zhengmao, Tang Xi, *et al.*. Chaos synchronization and communication in mesh network based on mutually coupled semiconductor lasers[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1202005.
潘兴茂,吴正茂,唐曦,等.基于互耦半导体激光器的混沌网状网络的同步与通信[J].中国激光,2013,40(12):1202005.
- 5 Niu Shengxiao, Wang Yuncai, He Hucheng, *et al.*. Tunable photonic microwave generation using optically injected semiconductor laser [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(10): 7241-7245.
牛生晓,王云才,贺虎成,等.光注入半导体激光器产生可调谐高频微波[J].物理学报,2009,58(10):7241-7245.
- 6 Xiong Jintian, Wang Rong, Pu Tao, *et al.*. Amplification properties of a distribution feedback semiconductor laser under optical injection

- and its application in generating microwave signals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0614002.
- 熊锦添, 王 荣, 蒲 涛, 等. 光注入条件下分布反馈半导体激光器的放大特性研究及其在微波信号产生中的应用[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0614002.
- 7 Zhang Li, Wang Anbang, Li Kai, *et al.*. Fiber fault visible chaotic optical time domain reflectometry measurement method[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0308007.
- 张 丽, 王安邦, 李 凯, 等. 光纤故障可视的混沌光时域反射测量方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0308007.
- 8 Zhang Mingjiang, Liu Tiegeng, Li Jingxia, *et al.*. Effects of linewidth enhancement factor on the nonlinear period-one oscillation of a semiconductor laser with external optical injection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(4): 542–546.
- 张明江, 刘铁根, 李静霞, 等. 线宽增强因子对外光注入半导体激光器非线性单周期振荡特性的影响[J]. *光子学报*, 2011, 40(4): 542–546.
- 9 Chan S C, Liu J M. Frequency modulation on single sideband using controlled dynamics of an optically injected semiconductor laser[J]. *IEEE J Quantum Elect*, 2006, 42(7): 699–705.
- 10 Chan S C, Hwang S K, Liu J M. Period-one oscillation for photonic microwave transmission using an optically injected semiconductor laser[J]. *Opt Express*, 2007, 15(22): 14921–14935.
- 11 Chen Chuan, Jin Minglu, Hao Yuwen. Research on technology of external modulation on millimeter-wave RoF optical communication systems[J]. *Optical Communication Technology*, 2009, (4): 59–61.
- 陈 川, 金明录, 郝育闻. 毫米波 RoF 光通信系统中外调制技术的研究[J]. *光通信技术*, 2009, (4): 59–61.
- 12 Zhang Yimin, Chen Lin, Cao Zizheng, *et al.*. Experimental research about a full-duplex OFDM-ROF system based on intensity modulator [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(7): 1744–1749.
- 张益民, 陈 林, 曹子峥, 等. 基于强度调制器的全双工 OFDM-ROF 系统实验研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(7): 1744–1749.
- 13 Liu J M. *Photonic Devices*[M]. Cambridge University Press, 2005.
- 14 Li Wei, Fang Xiaohui, Xu Tiefeng, *et al.*. Theory analysis of strong optical injection-locked semiconductor lasers[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2010, 31(5): 709–712.
- 李 威, 方晓惠, 徐铁峰, 等. 强光注入锁定半导体激光器的理论分析[J]. *半导体光电*, 2010, 31(5): 709–712.
- 15 Li Chengren, Song Changlie, Li Shufeng, *et al.*. Experimental investigation of the change of semiconductor laser output wavelength corresponding to operation current[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(2): 144–147.
- 李成仁, 宋昌烈, 李淑凤, 等. 半导体激光器输出波长随工作电流变化的实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2003, 32(2): 144–147.

栏目编辑: 王晓琰