

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0064-04

半导体激光器实现波长变换的误码率特性分析

王丽丽¹ 任建华² 邱相艳¹ 李艳玲¹ 徐大雄²

(¹ 鲁东大学物理与电子工程学院, 山东 烟台 264025; ² 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876)

摘要 在半导体激光器实现波长转换的理论模型中引入互耦合系数, 根据改进后的波长转换模型, 得出了波长转换的误码率特性与理论模型中的互耦合系数的关系, 并进行了数值模拟和实验验证。数值模拟结果表明, 互耦合系数的大小取决于信号光和探测光功率及其波长间隔, 互耦合系数越大, 波长变换的误码率越小。理论与实验结果表明, 只有在大的信号光功率、小的探测光功率和较小波长间隔情况下, 即当互耦合系数取值较大时, 波长转换的误码率才能达到最小, 信号光功率的减小及探测光功率的偏大均会增大系统的误码率。

关键词 光通信; 误码率; 互耦合系数; 波长变换

中图分类号 TN248.4; TN929.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200835s2.0064

Analysis of Bit Error Rate in LD Wavelength Conversion

Wang Lili¹ Ren Jianhua² Qiu Xiangyan¹ Li Yanling¹ Xu Daxiong²

(¹ College of Physics and Electronic Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China
² Electronic Engineering School, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract The mutual coupling parameter was introduced into the theoretical model of semiconductor laser wavelength conversion. Based on the improved theoretical model of wavelength conversion, the bit error rate versus mutual coupling parameter was given. The simulated results demonstrated that the mutual coupling parameter depended on the powers of signal and probe lights and the wavelength space between them. The higher the mutual coupling parameter, the less the bit error rate. It was also demonstrated that with higher signal power, lower probe power and lower wavelength space between them, which means larger mutual coupling parameter, the bit error rate of wavelength conversion is minimum, the decreasing of signal light and the increasing of probe light will increase the bit error rate.

Key words optical communication; bit error rate; gain saturation; wavelength conversion

1 引言

随着波分复用(WDM)技术的广泛应用,全光波长转换器的研究受到广泛关注。通过波长变换器能够有效解决全光网特别是多用户环形网、星型网中的波长路由竞争问题,对于分散网络管理,提高安全性,提高波长重用率和网络配置的灵活性等具有重要意义^[1]。目前已有基于 LiNbO₃ 波导^[2,3]、四波混频^[4,5]和光纤光栅外腔半导体激光器^[6]的波长变换技术。本文利用激光器增益饱和效应实现波长变换的技术,通过注入信号造成谐振波长的增益饱和,将信号光中的码流信息直接调制到谐振激光波长上,对连续运转激光器进行高速直接光调制。具有结构简单、响应速度快、技术稳定性好、经济实用和易于达到实用化要求等诸多优点。针对这种技术,本文提出了改进的理

论分析模型,并利用该模型对波长变换的误码率特性进行了数值模拟和实验验证。

2 理论模型

半导体激光器实现波长变换的装置如图 1 所示。外部的信号光(其波长为 λ_1)经耦合器和环行

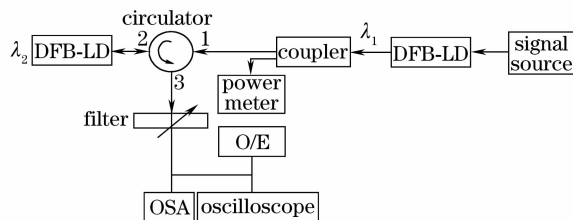


图 1 波长变换实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for wavelength conversion

器进入半导体激光器(连续的探测光,其波长为 λ_2),当外部信号光为“1”时,激光器对其本身激发光的增益下降,所以激光振荡被抑制,输出为“0”,而当外部信号光为“0”时,半导体激光器输出“1”,这样,

信号光的信息就转换到激光器的输出波长上,但是两者反相。

当信号光注入时,半导体激光器有源层中载流子密度 N 与光腔中光子密度 S 的速率方程^[7]为

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{ed} - \frac{N}{\tau_s} - v_g G(1 - \epsilon S)(S + \beta_m S_{in}), \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = v_g \Gamma G(1 - \epsilon S)S - \frac{S}{\tau_p} + \frac{\Gamma \beta_{sp} N}{\tau_e}, \quad (2)$$

$$G = a(N - N_t), \quad (3)$$

$$\beta_m = \frac{(\Delta\nu/2)^2}{P_s} \frac{(\nu_1 - \nu_0)^2 P_{\nu_2} + (\nu_2 - \nu_0)^2 P_{\nu_1} + (\Delta\nu/2)^2 (P_{\nu_1} + P_{\nu_2} + P_{\nu_1} P_{\nu_2} / P_s)}{[(\nu_2 - \nu_0)^2 + (\Delta\nu/2)^2 (1 + P_{\nu_2} / P_s)][(\nu_1 - \nu_0)^2 + (\Delta\nu/2)^2 (1 + P_{\nu_1} / P_s)]}, \quad (4)$$

式中 ν_1 和 P_{ν_1} 和 ν_2 和 P_{ν_2} 分别是信号光和探测光的频率及光强, Δn^0 为初始反转粒子数密度, φ_{ν_i} 表示频率为 ν_i 的强光的光子数密度($i = 1, 2$), $P_{\nu_i} = \varphi_{\nu_i} h\nu_i \nu$, $m_{\nu}(\nu_1)$ 为频率 ν_1 处的单色模密度 $m_{\nu}(\nu_1) = 8\pi\nu_1^2/\nu^3$, $g(\nu_1, \nu_0)$ 为激光介质在 $\nu = \nu_0$ 处的线型函数, P_s 为饱和功率,其数值决定于增益介质的性质, N 为载流子密度, S 为激光器出射光子密度, J 为激光器工作电流密度, d 为有源区厚度, e 为电子电荷量, $v_g = c/n$ 为群速度, β_m 为互耦合系数, S_{in} 为注入信号光子密度, n 为有效模折射率, Γ 为限制因子, a 为微分增益系数, N_t 为透明载流子密度, ϵ 为饱和系数, τ_e 为载流子寿命, β_{sp} 为自发辐射因子, τ_p 为有效光子寿命。

以看到,互耦合系数的模值小于1,其模值的大小与波长间隔及信号光功率有关,波长间隔越小,信号光功率越大,互耦合系数越大。图中 $P_{\nu_1}^{“1”}$ 为信号光“1”码光功率。

3 误码率计算

在高斯近似下,波长变换的误码率解析式近似表达为

$$P_e = \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q\sqrt{2\pi}}, \quad (5)$$

式中 Q 为信噪比参量

$$Q = \frac{\sqrt{P^{“1”}} - \sqrt{P^{“0”}}}{\sqrt{N^{“1”}} + \sqrt{N^{“0”}}}, \quad (6)$$

式中 $P^{“1”}$ 和 $P^{“0”}$ 分别为波长变换后的“1”码和“0”码所对应的光功率, N 为系统的噪声,满足 $N = N_{shot} + N_{s-sp} + N_{sp-sp} + N_{th}$,其中 N_{shot} 为系统的散粒噪声, N_{s-sp} 为信号-ASE拍频噪声, N_{sp-sp} 为自发辐射拍频噪声, N_{th} 为接收机热噪声。

此理论模型与通常模型^[8,9]的不同之处在于(1)式注入信号光子密度 S_{in} 前加入了互耦合系数 β_m ,其物理含义指的是实现波长变换的两波长之间的调制深度,调制深度越大,波长转换的效果越好,即互耦合系数的大小直接影响着波长变换的消光比和误码率特性。

图3为波长变换误码率与互耦合系数 β_m 的关系曲线,可以看出,两波长间的互耦合系数越大,波长变换的误码率越小,这与对互耦合系数 β_m 的分析

互耦合系数数值模拟的结果^[7]如图2所示。可

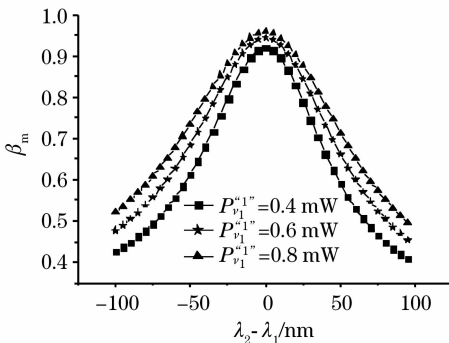


图2 互耦合系数与波长间隔的关系

Fig. 2 Mutual coupling parameter versus wavelength space

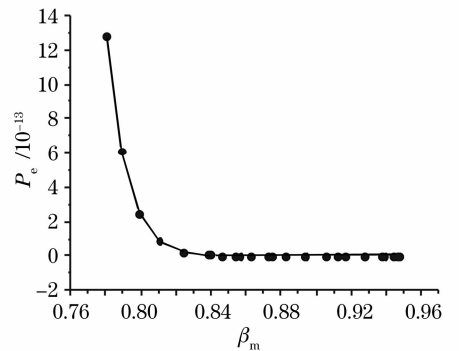


图3 误码率与互耦合系数的关系曲线

Fig. 3 Bit error rate P_e versus mutual coupling parameter

一致,即 β_m 是实现波长变换的两波长之间的调制深度,调制深度越大,波长转换的效果越好,消光比越大,说明了引入的互耦合系数 β_m 的大小直接影响着波长变换的误码率特性。

4 实验结果及讨论

测量了不同信号光及探测光功率进行波长变换的误码率,得到如图 4,图 5 所示的曲线。实验中信号光波长 1543 nm,探测光波长 1553.9 nm。

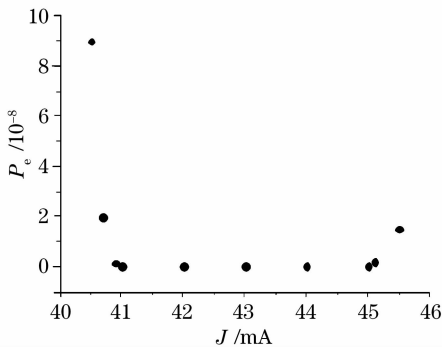


图 4 输出误码率与注入信号光功率的关系

Fig. 4 Output P_e as a function of the injected current of signal light

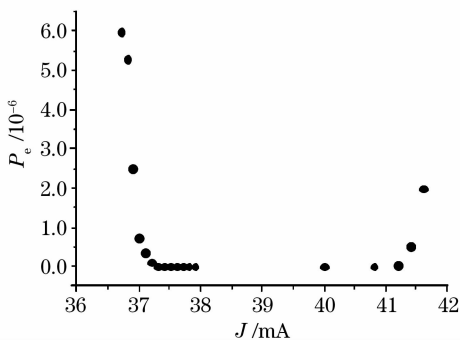


图 5 输出误码率与注入探测光电流的关系

Fig. 5 Output P_e as a function of the injected current of probe light

可以看到,只有在一定的注入信号光功率和探测光功率条件下,系统误码率达到最小值。实验中,信号光的注入电流在 41~45 mA,探测光的注入电流在 38~40 mA 时,系统误码率最小,接近于 0,此时根据互耦合系数的定义式(4)计算得到互耦合系数 $\beta_m \approx 1$,这与本文对互耦合系数和误码率关系的分析一致。由图 2 可知,信号光和探测光波长确定的情况下,波长变换的互耦合系数取决于信号光和探测光的功率。根据图 3 所示,互耦合系数的大小决定波长变换的误码率,因此误码率的大小取决于信号光和探测光的功率(或半导体激光器的注入电

流,如图 4,图 5 所示)。

图 6(a)为信号光注入电流 42.7 mA,探测光注入电流 37.4 mA 时波长变换的结果,虚线为信号光,实线为波长转换的探测光。可以看到,由于增益饱和效应,两信号位相相反。图 6(b)所示为在相应的注入电流情况下,两信号的光强曲线。

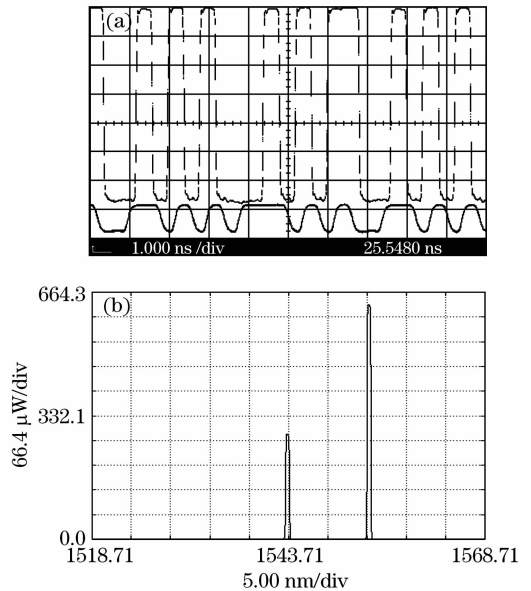


图 6 (a) 信号光和探测光功率分别为 0.3 mW 和 0.63 mW 时的波长变换图; (b) 信号光和探测光的光功率谱

Fig. 6 (a) Waveforms of wavelength conversion when the powers of injected signal light and probe light are 0.3 mW and 0.63 mW, respectively; (b) optical spectra of injected signal light and probe light when the powers of injected signal light and probe light are 0.3 mW and 0.63 mW, respectively

图 7(a)所示为信号光注入电流 42.7 mA,探测光注入电流 41.6 mA 时波长变换的结果,图 7(b)是在相应的注入电流情况下,两信号的光强曲线。两组实验结果比较可得,在信号光功率减小,探测光功率增大的情况下,波长变换的结果明显劣化,这与对互耦合系数的分析一致,信号光功率的减小和探测光功率的增加均会引起互耦合系数的减小,导致波长变换性能变差,从而影响系统的误码率。实验中光谱仪采用 ADVANTEST Q8384 OPTICAL SPECTRUM ANALYZER,数字通信分析仪采用 hp HEWLETT 83480A,脉冲信号产生器采用 ANRITSU PULSE PATTERN GENERATOR,型号为 MP1763C 0.05—12.5 GHz,误码检测采用 ANRITSU ERROR DETECTOR,型号 MP1764C 0.05—12.5GHz。

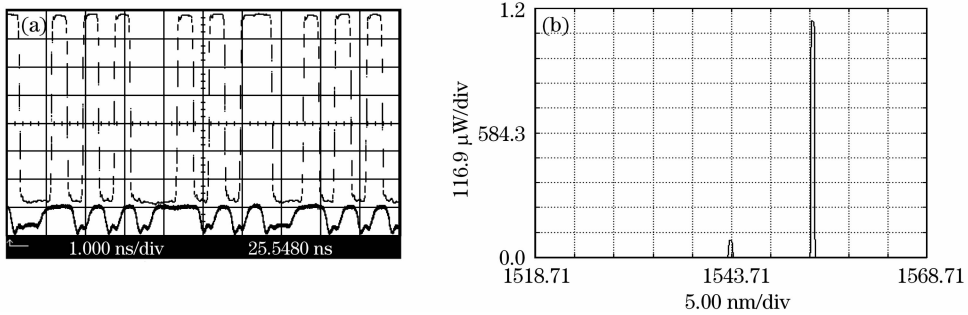


图 7 (a) 信号光和探测光的功率分别为 0.1 mW 和 1.1 mW 时的波长变换图；(b) 信号光和探测光的光功率谱

Fig. 7 (a) Waveforms of wavelength conversion when the powers of injected signal light and probe light are 0.1 mW and 1.1 mW, respectively; (b) optical spectra of injected signal light and probe light when the powers of injected signal light and probe light are 0.1 mW and 1.1 mW, respectively

5 结 论

数值模拟了误码率与引入的互耦合系数 β_m 的关系,并且进行了实验验证。只有在一定的信号光和探测光功率情况下,系统的误码率才能达到最小,信号光功率的减小和探测光功率的增加均会引起系统误码率的增加,这与对互耦合系数的分析相一致。

参 考 文 献

- 1 Shaveta Rain, Ajay K Sharma, Paramjeet Singh. Restoration approach in WDM optical networks[J]. *Optic*, 2007, **118**(1): 25~28
- 2 Jian Wang, Junqiang Sun, Xinliang Zhang *et al.*. Experimental observation of tunable wavelength down- and up-conversions of ultra-short pulses in a periodically poled LiNbO₃ waveguide[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **269**(1): 179~187
- 3 Wang Jian, Sun Junqiang, Sun Qizhen. Tunable wavelength converters of picosecond pulses based on periodically poled LiNbO₃ waveguides[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1453~1458
- 王 健,孙军强,孙琪真. 周期域反转铌酸锂可调谐波长转换器的皮秒脉冲实验[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1453~1458
- 4 Xu Hongchun, Huang Dexiu, Sun Junqiang *et al.*. All-optical

wavelength converter based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2001, **12**(11): 1108~1111

- 徐红春,黄德修,孙军强 等. 基于半导体光放大器的四波混频型全光波长转换器[J]. *光电子·激光*, 2001, **12**(11): 1108~1111
- 5 Xie Yingke, Xia Guangqiong, Wu Jiagui *et al.*. Influences of residual F-P cavity mode on non-degenerated four-wave mixing in distributed-feedback laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 318~322
 - 谢瑛珂,夏光琼,吴加贵 等. 分布反馈激光器中剩余法布里-珀罗腔模对非简并四波混频特性的影响[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 318~322
 - 6 T. Durhuus, R. J. S. Pedersen, B. Mikkelsen *et al.*. Optical wavelength conversion over 18 nm at 2.5 Gb/s by DBR-laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(1): 86~88
 - 7 Wang Lili, Zhao Tonggang, Rao Lan *et al.*. Analysis of extinction rate characteristics in LD wavelength conversion[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2006, **17**(3): 328~333
 - 王丽丽,赵同刚,饶 岚 等. 半导体激光器实现波长变换的消光比特性分析[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(3): 328~333
 - 8 M. Yamada. Transverse and longitudinal mode control in semiconductor injection lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1983, **QE-19**(9): 1365~1380
 - 9 G. P. Agrawal. Gain nonlinearities in semiconductor lasers: theory and application to distributed feedback lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(6): 860~868