

文章编号: 0253-2239(2007)02-03180-5

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*

谢瑛珂 夏光琼 吴加贵 林晓东 孔慧君 吴正茂

(西南大学物理学院, 重庆 400715)

摘要: 基于四波混频(FWM)的全光波长转换技术是未来多波长通信系统的核心技术之一。除半导体光放大器(SOA)外,半导体激光器也是进行波长变换的器件。实验研究了小频率失谐到大频率失谐下分布反馈(DFB)激光器中剩余法布里-珀罗腔模对非简并四波混频(NDFWM)的影响,并对其四波混频转换效率进行了分析。结果表明:当探测光波长与法布里-珀罗腔的某一谐振波长一致时,分布反馈激光器中的四波混频转换效率将得到显著的增强;当频率失谐为太赫兹时,仍可得到较高的四波混频转换效率。

关键词: 非线性光学; 四波混频; 分布反馈激光器; 法布里-珀罗腔模; 频率失谐

中图分类号: O437 文献标识码: A

Influences of Residual F-P Cavity Mode on Non-Degenerated Four-Wave Mixing in Distributed-Feedback Laser

Xie Yingke Xia Guangqiong Wu Jiagui Lin Xiaodong Kong Huijun Wu Zhengmao

(School of Physics, Southwest University, Chongqing 400715)

Abstract: All-optical wavelength conversion based on four-wave mixing (FWM) is one of the key technologies in future multi-wavelength telecommunication systems. Besides semiconductor optical amplifiers, semiconductor lasers are also good candidates for wavelength conversion. The influences of the residual F-P cavity mode on the non-degenerated FWM in a distributed-feedback (DFB) laser have been investigated from small to large range frequency detuning, as well as the conversion efficiency of conersion FWM. The experimental results show that the conversion efficiency of FWM can be enhanced obviously by the cavity resonance when the probe wavelength matches the F-P cavity mode; the FWM with high conversion efficiency can be achieved when the frequency detuning between the injection probe frequency and free-running frequency of DFB laser is up to terahertz.

Key words: nonlinear optics; four-wave mixing; distributed feedback lasers; Fabry-Perot cavity mode; frequency detuning

1 引 言

在现代光学技术中,波长转换在非线性光学、光谱学、光通信等许多研究领域内都有重要应用。基于四波混频(FWM)的全光波长转换技术是未来多波长通信系统的核心技术之一^[1]。与其他转换技术相比,四波混频具有波长转换形式的透明性、转换信号与源信号的全同性、大的波长转换范围、波长转换的连续可调性、多波长同时转换的能力、振幅调制和频率调制方式都可以实现转换等优势^[2~4],从而在

未来全光通信系统中有巨大的应用潜力。

目前,由于半导体光放大器(SOA)中的四波混频具有波长可调谐性和较高的转换效率(可达 20 dB),因此大部分四波混频实验是以半导体光放大器作为混频器件。近几年来,国内学者提出了一些基于半导体光放大器的波长转换方法,利用半导体光放大器光纤环构成环形激光器,向上变换最大距离可达 13.8 nm^[5~7]。但是基于半导体光放大器的四波混频同时需要强外部注入泵浦光源和探测光

* 重庆市自然科学基金(CSTC,2005BB3099,2006BB2331)资助课题。

作者简介: 谢瑛珂(1979—),男,四川富顺人,硕士研究生,主要从事激光与光纤通信方面的研究。

导师简介: 吴正茂(1970—),男,江西余干人,教授,主要从事半导体激光、光纤通信及光混沌通信技术方面的研究。

E-mail: zmwu@swu.edu.cn

收稿日期: 2006-03-28; 收到修改稿日期: 2006-06-01

源,构造比较复杂;而且由于半导体光放大器中自发辐射的强烈放大,高信噪比(SNR)的输出较难得到^[8~13]。与之相比,利用分布反馈(DFB)半导体激光器作为混频器件的四波混频能得到具有很高信噪比值的输出^[14],同时,由于分布反馈激光器自身就提供了很好的四波混频所需泵浦光,使得它不再需要外部的泵浦光。这样利用分布反馈激光器作为混频器件将使四波混频得到简化,有利于提高集成度和得到更好的波长转换效果^[15]。基于此,本文对分布反馈激光器中的四波混频特性进行了较为详细的实验研究,着重对分布反馈激光器中剩余法布里-珀罗腔模的影响进行研究。

2 实验系统

实验系统结构如图 1 所示,系统分为四波混频产生和探测装置两大部分,其中四波混频产生装置由波长可调谐的外部注入激光器和分布反馈激光器

组成。注入激光器[边模抑制比率(SMSR)大于 50 dB]的输出通过耦合透镜耦合进单模光纤中,经过 20:80 定向光纤耦合器,20%的能量进入光功率计 1 中进行监测,80%的能量通过拉锥处理的尾纤注入分布反馈激光器中,拉锥尾纤与分布反馈激光器的耦合率可从光功率计 2 处进行实时监控。为保证分布反馈激光器工作状态的稳定性,我们使用了低噪声电流源(ILX-Lightwave, LDX-3412)和高精度温控源(ILX-Lightwave, LDT-5412,控制精度 ± 0.01 K)。分布反馈激光器的输出光再次通过拉锥尾纤进入单模光纤中,然后通过耦合器使 20%能量进入探测分析系统中。光隔离器(ISO)2 的功能主要是防止各光纤接口的光反馈对分布反馈激光器的工作造成干扰。最后,通过 50:50 光纤耦合器,输入高分辨力光谱仪(ANDO AQ6137C,分辨力 0.01 nm)和光功率计 2 中。

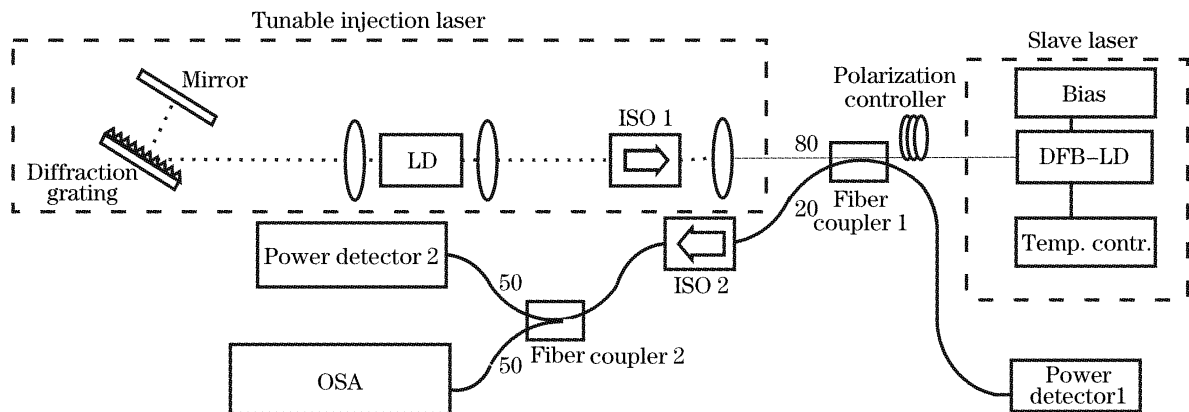


图 1 分布反馈激光器四波混频实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for FWM in a DFB laser

在此实验中,所使用的是武汉光迅公司提供的折射率耦合型分布反馈激光器芯片(阈值电流为 8.2 mA)。分布反馈激光器偏置在 35.02 mA,温度为 17 °C,其输出谱如图 2 所示。从图中可以看出,

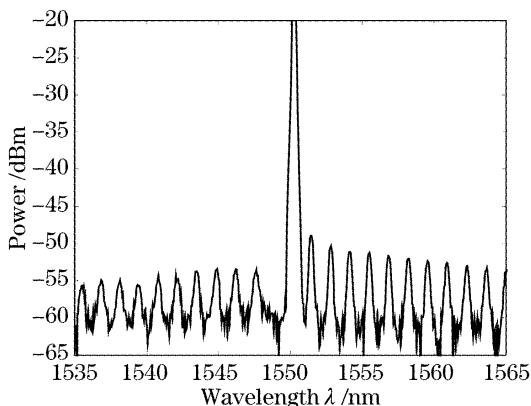


图 2 分布反馈激光器光谱图

Fig. 2 Measured spectrum of the DFB laser

其中心波长为 1550.30 nm,在中央峰的两侧有剩余的法布里-珀罗谐振腔模存在。

频率失谐和注入探测光功率是两个核心参量。对于频率失谐,可通过改变可调注入激光器的反射光栅的反射角度来得到不同的注入波长,从而改变频率失谐范围。对于注入探测光功率,通过改变注入激光器的偏置电流和改变拉锥尾纤与分布反馈激光器耦合率,可实现注入探测光功率在很大的范围内变化。

3 实验结果与讨论

在阈值以上分布反馈激光器芯片的有源区内同时存在两束相对传播的同频率相干光,直接作为四波混频的两束泵浦波,并在有源区(即谐振腔)中混频,这样四波混频泵浦光的频率就为 $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ 。

当探测光的频率为 $\omega_p = \omega + \delta$, 则对应共轭光的频率为 $\omega_c = \omega - \delta$.

我们首先研究了较小频率失谐的四波混频特征。从图 3(a)中可以看出,除了放大的探测光和激光器自身激射光外,还有由四波混频产生的共轭光。图 3(b)是注入探测光功率保持不变,波长取不同值

时所获的光谱重叠图,P1(Probe wave 1),P2,P3,P4,P5 分别代表不同波长的探测光,C1(Conjugate wave 1),C2,C3,C4,C5 分别代表其相对应的共轭光,可以看出,对于不同波长探测光,其共轭光输出功率显著不同。

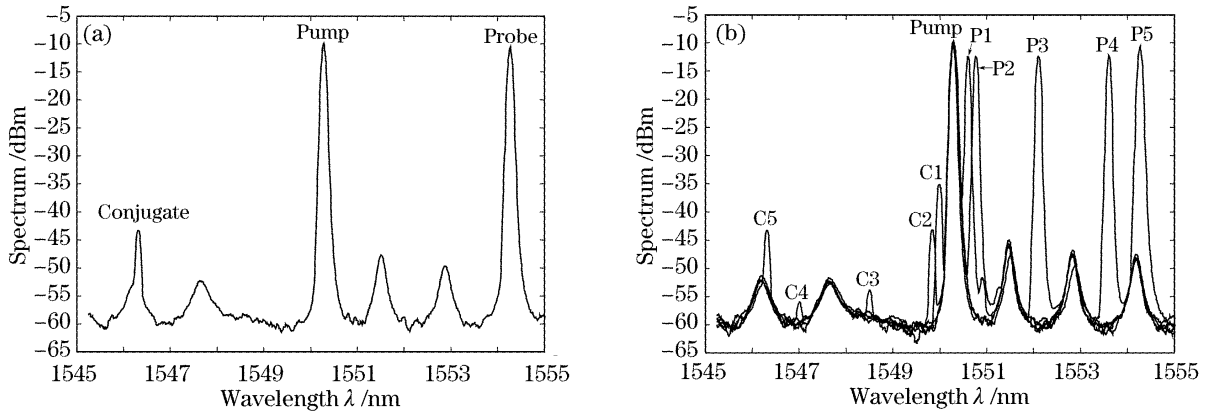


图 3 小范围四波混频波长变换光谱图

Fig. 3 Measured DFB laser spectra with small domain wavelength conversion for nondegenerate four-wave mixing

对于四波混频共轭光在一般的分布反馈激光器中的传播情况,根据行波近似^[16,17],有:

$$\frac{dE_{\text{conj}}}{dz} = \Gamma \left[\frac{g}{2} E_{\text{conj}} + i \frac{3\Gamma\mu_0\epsilon_0\omega^2}{8k_0 n} \chi^{(3)} E_{\text{pump}}^2 E_{\text{probe}} \right], \quad (1)$$

(1)式中 E_{conj} , E_{probe} 和 E_{pump} 分别代表共轭光,探测光和泵浦光的场强, k_0 是光在真空中的波矢, ω 为共轭光的角频率, n 是有源区折射系数, Γ 是光约束因子, $\chi^{(3)}$ 是材料三阶光学极化率, g 是考虑材料增益和损耗及腔端面反射后总的净增益, z 是沿有源区波导方向传播位移。

变换积分(1)式,应用在 $z=0$ 时 $E_{\text{conj}}=0$ 的行波边界条件,能得到四波混频转换效率的表达式

$$\eta = \left| \frac{E_{\text{conj}}}{E_{\text{probe}}} \right|^2 = \left| \frac{3k_0\Gamma\chi^{(3)} E_{\text{pump}}^2 \frac{\exp(\Gamma g L) - 1}{\Gamma g}}{4n} \right|^2, \quad (2)$$

其中 L 为激光器腔长。需要指出的是:由于实验用分布反馈激光器的剩余法布里-珀罗腔模式,它的四波混频机制不能单纯由(1)式、(2)式描述,还存在重要的法布里-珀罗腔多光束干涉效应。当探测光波长与法布里-珀罗腔的谐振波长一致时,由于干涉相长,其共轭光功率及它的转换效率都将得到显著提高。这一点由下面的图 4、图 5 可得到验证。

图 4 表示四波混频转换效率(共轭光输出功率与对应注入探测光功率之比)随共轭光波长变化的关系曲线。四波混频转换效率随共轭光波长成周期性起伏变化。当探测光波长与法布里-珀罗腔谐振

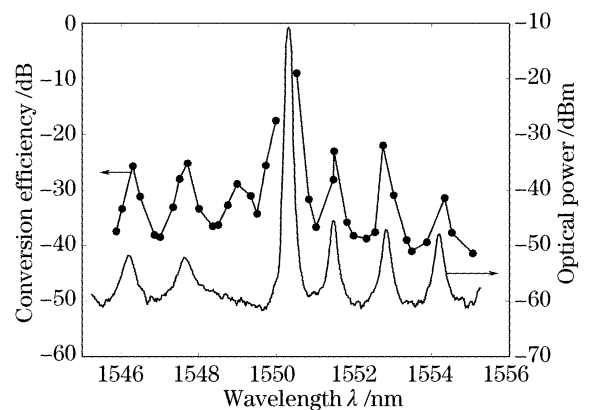


图 4 不同波长共轭光的四波混频转换效率

Fig. 4 Measured FWM conversion efficiency with different conjugate-wave wavelengths

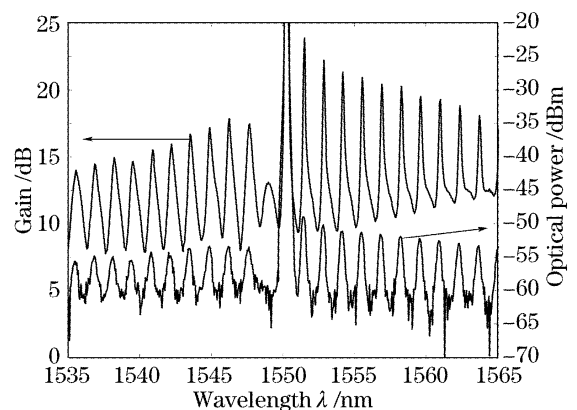


图 5 不同波长探测光的自身增益变化图

Fig. 5 Measured self-gain with different probe-wave wavelengths

波长相吻合时,分布反馈激光器中的四波混频现象将得到显著增强。另外,在图 4 中的 1549 nm 处,转

换效率曲线有一个与分布反馈光谱极不相符的突起。这是由于法布里-珀罗腔的谐振增强作用和激光器工作材料的三阶非线性极化率特性[载流子浓度调制效应(CDM),载流子热效应(CH)]共同作用的结果^[10]。探测光所获得的增益随波长的变化呈现类似的情况,如图 5 所示。图 5 中的下实线为自由振荡分布反馈激光器的光谱,上线为弱探测光功率(约 0.013 mW)注入情况下探测光所获得的增益随波长的变化曲线。对于图 5 中上线所包含的共振峰并不能简单由弱探测波理论预测,而必须考虑到分布反馈激光器谐振腔的共振作用。

为了进一步分析法布里-珀罗腔模对四波混频波长转换效率的影响,图 6 给出了实验测得的四波混频共轭光功率与注入探测光功率的关系曲线。图 6 中的曲线 a, b, c, d 分别对应探测光波长为 1550.53 nm, 1550.68 nm, 1553.68 nm, 1554.46 nm。其中连接各点的直线由最小二乘法拟合得出。从图中可以看出,共轭光功率的对数与探测光功率对数之间存在较好的线性关系;另外,由于直线在垂直方向上的排布反映了四波混频波长转换效率的高低,因此随着频率失谐的增大,转换效率总体呈现下降的趋势。但对于曲线 d(此时波长与法布里-珀罗腔谐振波长相吻合),虽然其频率失谐(520 GHz)大于曲线 c(423 GHz),但由于法布里-珀罗腔对四波混频的增强作用可以得到更大的转换效率。

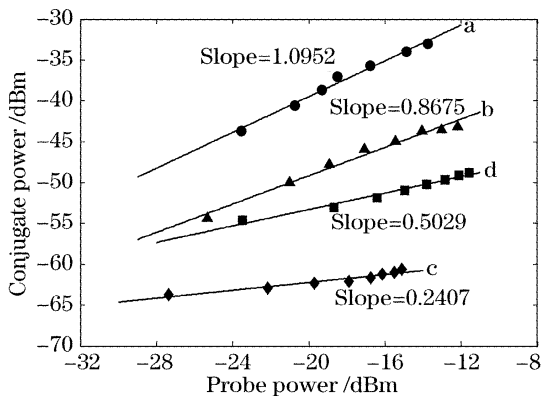


图 6 不同注入功率情况的探测光与对应共轭光的关系图
Fig. 6 Dependence of the measured multiple conjugate-wave output powers on the probe power

利用剩余法布里-珀罗腔对四波混频的增强作用,可实现大频率失谐(—1.25~2.5 THz)的四波混频,如图 7、图 8 所示。需要说明的是,图 7、图 8 中所有的探测光波长都被调节到与分布反馈激光器的剩余法布里-珀罗腔模谐振波长相吻合,以期得到较强的四波混频现象和较高的四波混频转换效率。图 7 是太赫兹范围内不同探测光波长的四波混频重

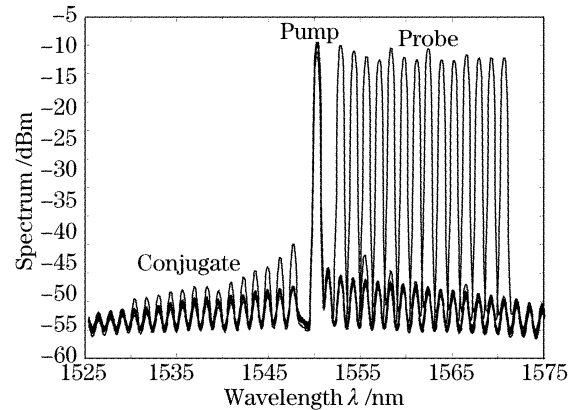


图 7 太赫兹范围内不同波长探测光的四波混频光谱图
Fig. 7 Measured DFB laser spectra with probe light with different wavelengths in terahertz domain for FWM

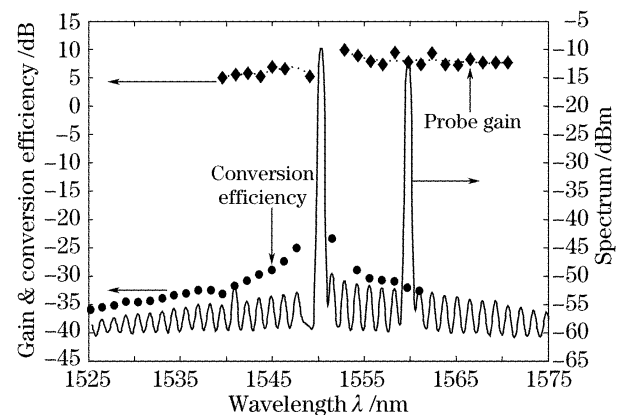


图 8 太赫兹范围内不同波长探测光自身增益率和四波混频转换效率的变化

Fig. 8 Wavelength dependence of signal self-gain and internal conversion efficiency in terahertz domain

叠光谱图,图 8 是相应的探测光增益和四波混频转换效率随波长的变换。从图中可以看出:在较大波长范围内(>2 THz)仍能得到较高的四波混频转换效率;由于四波混频转换效率具有不对称(尤其当频率失谐较小时,这种不对称性更加明显),这种不对称性主要是由半导体材料的三阶非线性极化率特性引起的^[17],因此,相比之下,频率失谐范围下转换比频率失谐范围上转换将更利于四波混频的产生。总之,由于剩余法布里-珀罗腔的增强作用,分布反馈激光器的四波混频现象能在很大波长范围内被观测到。

4 结 论

本文着重研究了剩余法布里-珀罗腔对分布反馈激光器中四波混频的影响。实验结果表明:当探测光波长与法布里-珀罗腔谐振波长相吻合时,分布反馈激光器中的四波混频现象将得到显著增强;四波混频的波长转换效率得到显著提高;在大频率失谐范围(± 2 THz)可观测到明显的四波混频现象。

这些结果对发展和改善四波混频波长转换技术具有重要意义,同时也为未来先进的全光通信网络提供了一个新的可行性技术方案。

参 考 文 献

- 1 S. J. B. Yoo. Wavelength conversion technologies for WDM network applications[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6): 955~966
- 2 Q. Lin, G. P. Agrawal. Effect of polarization-mode dispersion on fiber-based parametric amplification and wavelength conversion[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(10): 1114~1116
- 3 W. Wu, P. Yeh, S. Chi. Phase conjugation by four-wave mixing in single-mode fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(12): 1448~1450
- 4 J. E. Sharping, M. Fiorentino, P. Kumar *et al.*. Optical-parametric oscillator based on four-wave mixing in microstructure fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(19): 1675~1677
- 5 Chi Nan, Qi Jiang, Zheng Yuan *et al.*. 13.8 nm up-wavelength conversion using nondegenerate four-wave mixing in a semiconductor-fiber ring laser [J]. *Chin. J. Laser*, 2001, **A28**(3): 261~264 (in Chinese)
迟楠, 奇江, 郑远等. 利用半导体光纤环形激光器实现四波混频可调谐波长变化[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(3): 261~264
- 6 Liu Wei, Sun Junqiang. A novel scheme for polarization-insensitive optical wavelength conversion based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1047~1051 (in Chinese)
刘威, 孙军强. 一种新颖的偏振不敏感的基于半导体光放大器的四波混频光波长转换方法[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1047~1051
- 7 Hu Zhenhua, Huang Dexiu, Sun Junqiang *et al.*. Study of ultrafast process of semiconductor optical amplifier by four-wave mixing with incoherent light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8): 897~901 (in Chinese)
胡振华, 黄德修, 孙军强等. 非相干光四波混频研究半导体光放大器超快过程[J]. *光学学报*, 2003, **23**(8): 897~901
- 8 A. D'Ottavi, F. Girardin, L. Graziani *et al.*. Four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers: A practical tool for wavelength conversion [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1997, **3**(2): 522~528
- 9 G. P. Agrawal. *Fiber-Optic Communication Systems* [M]. New York: Wiley, 2002. 226~273
- 10 Jiang Yan, Cui Yiping, Pang Shuming. Theoretical analysis of nondegenerate four-wave mixing in semiconductor laser amplifiers[J]. *Acta Physica Sinica*, 1999, **48**(4): 673~683 (in Chinese)
蒋雁, 崔一平, 庞叔鸣. 半导体光放大器中非简并四波混频效应的理论分析[J]. *物理学报*, 1999, **48**(4): 673~683
- 11 J. Zhou, N. Park, K. J. Vahala *et al.*. Four-wave mixing wavelength conversion efficiency in semiconductor traveling-wave amplifiers measured to 65 nm of wavelength shift [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(8): 984~987
- 12 A. Uskov, J. Mork, J. Mark *et al.*. THz fourwave mixing in semiconductor optical amplifiers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(8): 944~946
- 13 A. D'Ottavi, F. Martelli, P. Spano *et al.*. Very high efficiency four-wave mixing in a single semiconductor traveling-wave amplifier[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(16): 2186~2188
- 14 I. Tomkos, I. Zacharopoulos, E. Roditi *et al.*. Experimental investigation of wavelength conversion based on four-wave mixing in a three-electrode distributed feedback laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(9): 1195~1197
- 15 J. Minch, S. L. Chuang. Dual-pump four-wave mixing in a double-mode distributed feedback laser[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, **17**(1): 53~62
- 16 H. Su, H. Li, L. Zhang *et al.*. Nondegenerate four-wave mixing in quantum dot distributed feedback lasers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(8): 1686~1688
- 17 G. P. Agrawal. Population pulsations and nondegenerate four-wave mixing in semiconductor lasers and amplifiers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1988, **5**(1): 147~159