

基于 SOA 交叉增益调制的 2.5Gbit/s NRZ 码全光波长转换实验研究

周 黎, 王子宇

(北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871)

摘 要: 基于 SOA 交叉增益调制效应(XGM)进行了 2.5Gbit/s 31 位非归零(NRZ)伪随机码的全光波长转换实验,分析了该方案下转换信号的消光比、信噪比、平均功率与输入连续光、信号光功率、波长的关系.实验中转换信号的光信噪比可达 40dB 以上,消光比和信噪比均大于 10dB,符合 ITU-T G. 691 标准.信号波长向下转换间距可达 60nm,是目前基于 SOA 中的 XGM 效应进行波长转换获得的最大的波长间距.

关键词: 全光波长变换; SOA; 交叉增益调制(XGM); 消光比(ER); 信噪比(SNR)

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2008)04-0650-05

Experimental Analysis of All Optical Wavelength Conversion Based on 2.5Gbit/s NRZ Data Using XGM in SOA

ZHOU Li, WANG Zi-yu

(State Key Laboratory on Advanced Optical Communication Systems & Networks, Beijing University, Beijing 100871, China)

Abstract: All Optical Wavelength Conversion (AOWC) of 2.5Gbit/s non return to zero(NRZ) data based on cross gain modulation(XGM) in a semiconductor optical amplifier(SOA) is demonstrated. The experiment shows that the power and wavelength of input light have great influence on extinction ratio(ER), signal to noise ratio(SNR) and average power of converted signal. Optical SNR of converted signal is larger than 40dB. ER and SNR of detected signal are both larger than 10dB, meeting ITU-T G. 691 standard. The wavelength separation for down conversion is larger than 60nm. This is the largest separation achieved from wavelength down conversion based on XGM in SOA.

Key words: all optical wavelength conversion(AOWC); SOA; XGM; ER; SNR

1 引言

全光波长转换是波分复用(WDM, Wavelength Division Multiplexing)光纤通信网络的关键技术之一,国内外的许多研究单位已对此进行了广泛的研究^[1-9].利用 SOA(Semiconductor Optical Amplifier)中的 XGM(Cross Gain Modulation)效应进行全光波长转换(SOA-XGM-AOWC),相对于利用 SOA 中的 XPM(Cross Phase Modulation)效应进行全光波长转换(SOA-XPM-AOWC)方案具有结构简单,转换效率高特点,一直是全光波长转换技术的研究重点.虽然近年来有许多针对 SOA-XGM 方案进行高速波长转换的实验报道,但是这些实验大多是针对 RZ(Return to Zero)码的^[1-3],并且大多利用了 RZ 码具有丰富的非基频分量这一特性来提高转换信号质量^[1,2,4].但是目前已有的光通信网络系统采用的码型均为 NRZ

(Non-Return to Zero)码,由于 NRZ 码的主要能量集中在基频分量,选择非基频分量会严重增加系统的功率代价,所以,要将文献[1~3]的实验结果直接应用于实际波分复用光纤通信网络还不现实.另外,已有的针对 NRZ 码进行的波长转换实验,大多侧重变换机理和性能分析^[5].在速率高于 2.5Gbit/s 下进行的 SOA-XGM-AOWC 实验结果并不理想^[6],而且需要引入复杂结构^[7,8],使系统的调试难度加大.我们利用单个商用 SOA,对速率为 2.5Gbit/s,码长为 31 位的伪随机 NRZ 码进行了同向波长转换实验,并针对该技术在通信系统中的应用进行了详细的分析.实验结果表明,通过对 SOA 参数及其工作状态进行优化,可以利用单个 SOA 实现同向波长转换,转换信号的光信噪比可达 50dB 以上,消光比和信噪比均可达到 10dB 以上,符合 ITU-T G. 691 标准.而且,向短波长进行转换的波长间距达到了 60nm,

这是目前已有基于 SOA 中的 XGM 效应进行波长转换的实验报道^[6]中最大的波长转换间距。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。

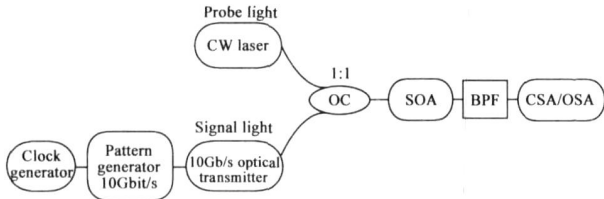


图 1 利用 SOA 交叉增益调制进行波长转换的实验装置

其中, CW laser 产生连续探测光; Clock generator 产生 2.5GHz 正弦波信号, 为码型发生器提供时钟信号; Pattern generator 是 10Gbit/s 码型发生器, 可以产生速率为 2.5Gbit/s、长度为 31 位的 NRZ 伪随机码电信号; Optical Transmitter 是 10Gbit/s 光发射机, 经过码型发生器调制产生泵浦信号光; OC 是分光比为 50:50 光耦合器, 在实验中作为合波器; SOA 是 CIP 公司生产的型号为 SOA-NL-OEC-1550 的半导体光放大器, 具有增益偏振敏感度小, 饱和增益恢复时间短的特点, 适合进行 SOA-XGM-AOWC 实验; BPF 是中心波长在 1535~1565nm 范围内可调的光滤波器, 3dB 带宽为 0.4nm, 插入损耗为 3~4dBm; CSA 是 Agilent 86100A 通信信号分析仪, 用于测量信号眼图以及时域波形; OSA 是 Advantest Q8384 光谱分析仪, 用于观测信号的频谱及光信噪比。

将泵浦信号光 λ_s 和连续探测光 λ_w 同时注入 SOA。当信号光为“0”码时, 放大器的增益正常, 探测光 λ_s 被正常放大, 表现为“1”码; 当信号光为“1”码时, 放大器的增益饱和, 探测光 λ_w 被 SOA 放大的倍数变小, 表现为“0”码。这样, 信号光 λ_s 上的信号被反向转化到 λ_w 波长上。由于受到 SOA 中载流子增益恢复时间的限制, 高速 NRZ 信号的消光比 (ER, Extinction Ratio) 和信噪比 (SNR, Signal to Noise Ratio) 往往不能同时达到最优。通过实验, 我们给出了 2.5Gbit/s NRZ 信号进行波长转换后, 转换信号的消光比和信噪比与连续探测波、泵浦信号光功率和波长的关系, 对已有的理论结果进行了充分的验证。实验结果表明, 利用 SOA 中的交叉增益调制, 可以在 2.5Gbit/s 速率下, 实现 NRZ 码向短波长进行间距为 60nm 的波长转换, 转换信号的质量可以达到 ITU-T G.691 标准。

3 实验内容

图 2~图 4 是在不同功率探测光下, 转换信号的消光比 (ER) 和信噪比 (SNR) 与信号光功率 (P_s) 的关系曲线, 其中 SOA 的偏置电流为 $I = 150\text{mA}$, 信号光波长 $\lambda_s = 1610.00\text{nm}$, 连续光波长 $\lambda_w = 1551.98\text{nm}$ 。

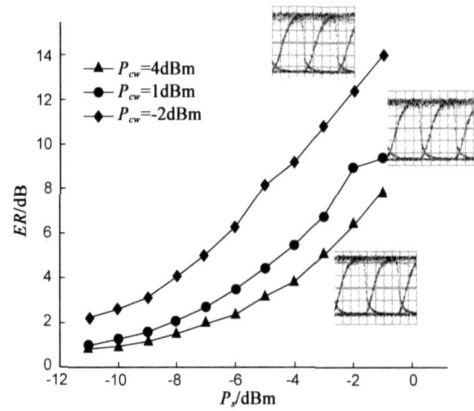


图 2 转换信号消光比 (ER) 与信号光功率 (P_s) 的关系曲线, 以及 $P_s = -1\text{dBm}$ 时转换信号的眼图。连续光功率 (P_{cw}) 依次取为 4dBm, 1dBm, -2dBm

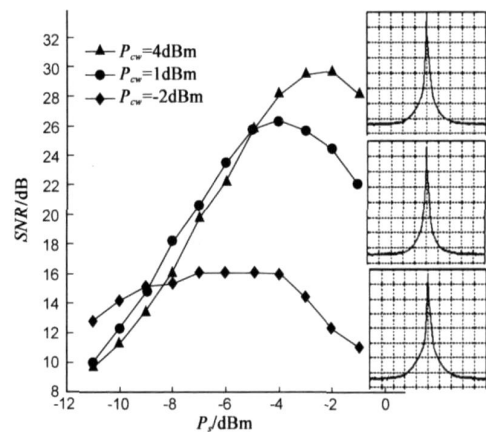


图 3 转换信号信噪比 (SNR) 与信号光功率 (P_s) 关系曲线, 以及 $P_s = -1\text{dBm}$ 时转换信号的光谱。连续光功率 (P_{cw}) 依次取为 4dBm, 1dBm, -2dBm, 光谱图对应的纵格单位为 10dB/div

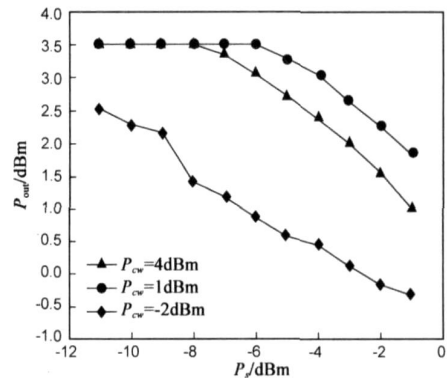


图 4 转换信号平均光功率 (P_{out}) 与泵浦信号光功率 (P_s) 关系曲线。连续光功率 (P_{cw}) 依次取为 4dBm, 1dBm, -2dBm

由图 2 可以看出, 转换信号的消光比会随着信号光功率的增加而得到改善, 但是, 功率较小的连续光有利于消光比的提高。转换信号的消光比取决于“1”码和“0”码的功率差值, 要获得较大的消光比, 应使转换信号的“0”码功率越小, “1”码功率越大。“1”码由于受到 SOA 本身放大增益的限制, 不可能无限制的增大。若其它实验条件不变, 当连续光功率为 4dBm, 1dBm, -2dBm, 转换

信号的“1”码功率依次为 0.31dBm, 0.27dBm, 0.26dBm; 而对应的转换信号的“0”码功率为 -7.27dBm, -9.20dBm, -10.94dBm. 可见, 转换信号的消光比主要是由“0”码功率决定的, 为了获得高的消光比, 必须减小转换信号的“0”码功率. “0”码功率对应的数学表达式为, $P_{out,0} = P_{cw} \times G_{s,1}$ 其中 $P_{out,0}$ 为转换信号的“0”码功率, P_{cw} 为连续光功率, $G_{s,1}$ 是泵浦信号光为“1”码时 SOA 的增益. 所以, 为了减小转换信号的“0”码功率, 一方面可以减小 P_{cw} ; 另一方面, 可以减小 $G_{s,1}$, 这可以通过增大泵浦信号光的平均功率实现. 所以增加信号光平均功率和减小连续光功率, 可以改善转换信号的消光比.

由图 3 可以看出, 适当增大泵浦信号光的功率 P_s 可以改善转换信号的信噪比 SNR, 但是, 当 P_s 超过一定的阈值后, SNR 会恶化.

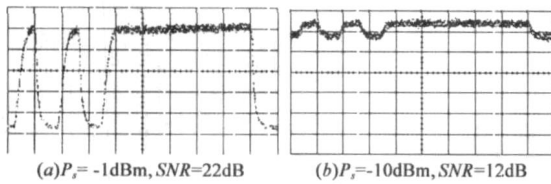


图 5 转换信号的时域波形图, 其中 $\lambda_s = 1610.00\text{nm}$, $\lambda_{cw} = 1551.98\text{nm}$, $P_{cw} = 1\text{dBm}$

图 5 给出了转换信号的时域波形图, 可以看到, SNR 的恶化主要是由转换信号的“0”码噪声过高引起的. 在 SOA 中, 不仅输入的泵浦信号光和连续光得到放大, 各种噪声信号也得到相应的放大. 这种被放大的噪声信号在正常情况下是不会对转换信号的“0”码造成影响, 如图 5(a) 所示. 但是, 当泵浦信号光功率过低而使转换信号的“0”码脉冲幅度过高时, 被放大的噪声信号对“0”码的影响就不能忽略了, 如图 5(b) 所示, 导致 SNR 降低. 而当 P_s 过高时, 噪声信号会对转换信号的“1”码进行恶化, 也会降低 SNR. 所以, 要获得最佳 SNR, 泵浦信号光的功率存在一个最佳值. 从图 3 可以看到, 这个最佳值与连续光功率有关.

图 3 还表明转换信号的 SNR 与连续光功率 P_{cw} 有关, 当信号光功率 $P_s > -5\text{dBm}$ 时, SNR 会随着连续光功率的增大而变大, 但是, 从图 2 可见, 连续光功率的增大会造成 ER 的恶化. 所以, 为了获得较好的 ER 和 SNR, 可以添加一路辅助光, 与泵浦信号光、连续光同时注入 SOA.

当泵浦信号光速率增大至 5Gbit/s 时, 我们发现转换信号的眼图将产生严重恶化, 如图 6 所示.

从图 6 可以看到, 当信号速率增大时, 转换信号的单个“1”码和连“1”码所对应的脉冲幅度出现了明显的差别, 眼图张开度变小, 信噪比降低. 当泵浦信号光由“1”码变为“0”码时, 受到载流子恢复时间的限制, SOA

的增益并不能立刻恢复到正常, 这就使得转换信号的上升时间比较长. 如果转换信号的“1”码持续时间较长(对应连“1”码), 脉冲幅度就能够被充分放大到最大值, 反之, 在“1”码还未达到最大值之前就开始向“0”码转换(对应单个“1”码), 其脉冲幅度就会小于最大值. 所以, 要利用 SOA-XGM 方案进行 5Gbit/s 以上速率的非归零码的波长转换, 需要载流子恢复时间更短的 SOA.

根据 ITU-T G.691 标准, 当信号的光信噪比大于 30dB, 消光比大于 10dB, 就可以进行长距离传输. 图 2 和图 3 给出了从 1610.00nm 向 1551.98nm 进行波长转换的信号眼图和光谱, 其中消光比和信噪比均大于 10dB, 光信噪比远高于 50dB, 满足 ITU-T G.691 标准要求.

图 4 表明转换信号的平均功率 P_{out} 会随着泵浦信号光功率 P_s 的增大而减小, 随着连续光功率 P_{cw} 的增大而增大. 这是由于 P_s 的增大抑制了连续光的增益放大倍数, 从而使转换信号的平均功率减小.

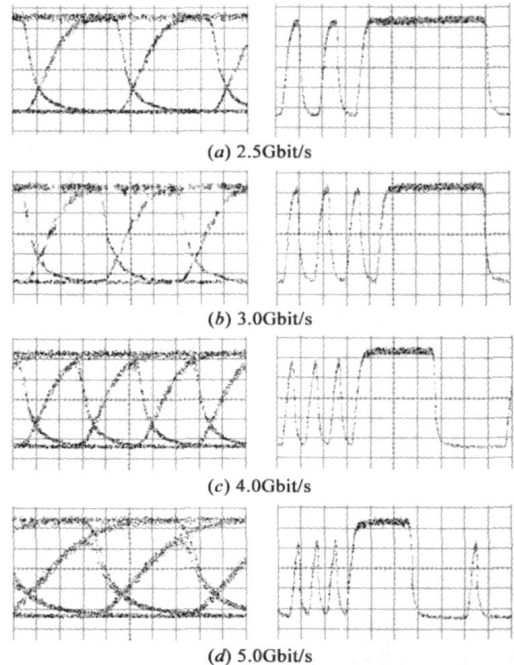


图 6 不同速率下转换信号的眼图和时域波形图, 其中 $\lambda_s = 1610.00\text{nm}$, $P_s = -1\text{dBm}$, $\lambda_{cw} = 1551.98\text{nm}$, $P_{cw} = 1\text{dBm}$

图 7 是在不同波长连续光下, 转换信号的消光比、平均功率与泵浦信号光波长的关系图. 其中 SOA 的偏置电流为 $I = 150\text{mA}$, 信号光功率 $P_s = -1\text{dBm}$, 连续光功率 $P_{cw} = 1\text{dBm}$.

图 7(a) 表明转换信号的消光比会随着泵浦信号光波长的增加而得到改善, 但是存在一个阈值波长; 而转换信号的功率变化趋势恰好相反.

图 8 是 SOA 在没有激光输入的情况下的增益谱. 可以看到, 当注入电流为 150mA 时, SOA 的最大增益波长在 1560nm 附近, 当连续光波长靠近最大增益波长时,

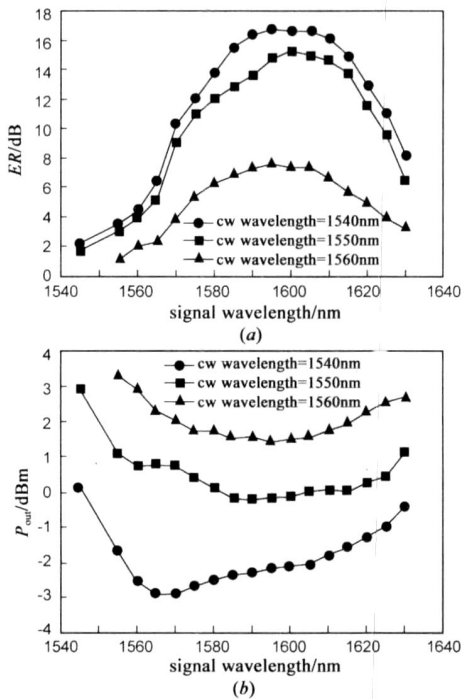


图 7 波长转换信号与泵浦信号光波长的关系曲线 (a) 消光比 (ER) 与泵浦信号光波长 (λ_p) 关系; (b) 转换信号平均光功率 (P_{out}) 与泵浦信号光波长 (λ_p) 关系; 连续光波长 (λ_{cw}) 依次取为 1540nm, 1550nm, 1560nm

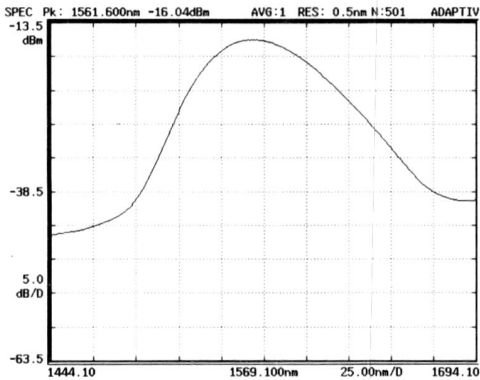


图 8 SOA 的增益谱, 注入电流 $I=150\text{mA}$

连续光得到充分放大, 一方面使得转换信号的平均功率增加, 另一方面, 导致转换信号的“0”码功率过高, 从而恶化消光比。所以连续光波长越靠近 1560nm, 转换信号的消光比越小, 平均功率越大。当泵浦信号光波长靠近最大增益波长时, 泵浦信号光吸收的载流子越多, 从而制约了连续光的放大, 使得转换信号的平均功率减小, 同时转换信号的“0”码功率也变小, 有利于提高消光比。所以, 在图 7 中, 转换信号的消光比会随着信号光波长的增加先增加后减小, 平均功率则先减小后增加。而且, 信号光的阈值波长并不是准确位于 1560.00nm。这是因为激光输入 SOA 时, 会引起了 SOA 内载流子密度的变化, 使得最大增益波长发生偏移, 图 7 还表明, 波长偏移量与连续光的波长有关。

从图 8 还可以看到, 增益谱在波长小于 1560.00nm 部分下降迅速, 这也导致了向长波长转换和向短波长转换具有不同的特点, 如图 9 所示。

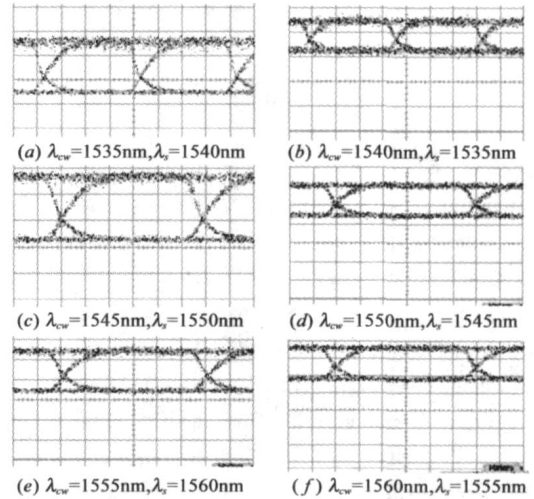


图 9 转换信号眼图, 其中眼图纵格对应 $400\mu\text{W}/\text{div}$, 黄色粗线对应 $0\mu\text{W}$

图 9 表明, 当泵浦信号光与连续光波长均小于 1560.00nm 时, 向长波长转换的信号质量不如向短波长转换的信号质量。从图 8 可以看到, 在此波长范围内, 波长较大的光对应较大的 SOA 放大倍数, 这就使得向长波长转换时的连续光吸收较多的载流子, 导致转换信号的“0”码幅度过高, 降低消光比。而进行向短波长转换时, 载流子主要被泵浦信号光吸收, 所以转换信号的“0”码幅度较小, 相应的消光比也较高。基于这一分析, 可以推断当泵浦信号光与连续光波长均大于 1560.00nm 时, 由于 SOA 的增益在这一范围内随着波长的增加而减小, 向长波长转换的信号会优于向短波长转换的信号, 这和实验结果是一致的。

4 总结

基于 SOA 中的 XGM 效应进行了 2.5Gbit/s, 31 位非归零伪随机码的全光波长转换实验, 根据波长转换基本原理, 对实验数据进行了详细分析。分析表明, 适当增大泵浦信号光功率可以改善转换信号的消光比和信噪比, 但是会增大系统功率代价; 增加连续光功率可以优化信噪比, 但是会恶化消光比; 使泵浦信号光波长靠近 SOA 峰值增益波长能够提高消光比, 同时增大系统功率代价; 而当连续光靠近 SOA 峰值波长, 转换信号的功率代价和消光比都会降低。文章还根据 SOA 增益谱的特点, 分析了利用 SOA-XGM 进行波长转换时, 向长波长转换与向短波长转换的不同特性及其原因。实验表明, 通过选择合适的泵浦信号光和连续光的功率、波长, 可以使进行波长转换的两束光的波长间隔达到 60nm, 所获得的转换信号光信噪比达到 50dB 以上, 并且消光比

和信噪比均大于 10dB, 符合 ITU-T G. 691 标准, 可以应用于实际的波分复用光纤通信网络. 分析表明, 只要能够获得载流子恢复时间更短的 SOA, 就有可能利用 SOA 中的 XGM 效应对更高速的 NRZ 码进行全光波长变换, 并且使得变换信号满足 ITU-T G. 691 标准.

参考文献:

- [1] Songnian Fu, Jianji Dong, P Shum, Liren Zhang. Experimental demonstration of both inverted and non-inverted wavelength conversion based on transient cross phase modulation of SOA [J]. Optics Express, 2006, 14(17) : 7587– 7593.
- [2] M L Nielsen, B Lavigne, B Dagens. Polarity preserving SOA-based wavelength conversion at 40 Gbit/ s using bandpass filtering [J]. Electronics Letters, 2003, 39(18) : 1334– 1335.
- [3] Y Liu, E Tangdongga, Z Li, Shaoxian Zhang, Huug de Waardt, G D Khoe, H J S Dorren. Error free all-optical wavelength conversion at 160Gb/ s using a semiconductor optical amplifier and an optical bandpass filter [J]. Journal of Light wave Technology, 2006, 24(1) : 230– 236.
- [4] Junqiang Sun. Performance improvements in XGM-based wavelength converters with converted signal feedback [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2004, 40(1) : 18– 22.
- [5] Terji Durhuus, Benny Mikkelsen, Carsten Joergensen, Soeren Lykke Danielsen, Kristian E Stubkjaer. All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(6) : 942– 954.
- [6] T G Silveira, A L J Teixeira, P M N P Monteiro, G M Tosi Beleffi. Cross gain modulation bandwidth enhancement in semiconductor optical amplifiers by means of detuned optical filter [J]. Electronics Letters, 2005, 41(13) : 761– 763.
- [7] Tomonori Yazaki, Ryo Inohara, Kosuke Nishimura, Masashi Usami. Experimental demonstration of 10G bit/s wavelength conversion based on cross gain modulation in cascaded semiconductor optical amplifiers [A]. International Conference on Indium Phosphide and Related Materials Conference Proceedings [C]. Kagoshima, Japan, 2004. 241– 244.
- [8] Zhang Xinliang, Huang Dexiu, Sun Junqiang, De Ming. A novel scheme for XGM wavelength conversion based on single port coupled SOA [J]. Chinese Physics, 2001, 10(2) : 124– 127.
- [9] Ryo Inohara, Kohsuke Nishimura, Munefumi Tsurusawa, Masashi Usami. Experimental analysis of cross phase modulation and cross gain modulation in SOA injecting cw assist light [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(9) : 1192– 1194.

作者简介:



周黎女, 1983 年 11 月出生于湖南. 2005 年毕业于北京大学无线电电子学系, 现为北京大学信息科学技术学院硕士研究生, 研究方向是光通信系统与网络.
E-mail: zL_pku@pku.edu.cn



王子宇 男, 1954 年 12 月出生于北京, 1982 年 1 月获成都电讯工程院工学学士学位, 1985 年 2 月获电子科技大学工学硕士学位, 现为北京大学电子学系教授, 博士生导师, 主要研究领域为高速及 WDM 光纤传输系统、毫米波技术等.