

利用非线性光学环路镜实现 多个波长的同时变换*

余建军 陈树强 管克俭

(北京邮电大学电信工程学院光通信中心, 北京 100876)

杨伯君

(北京邮电大学基础科学部, 北京 100876)

摘 要 利用非线性光学环路镜(NOLM)成功地实现了多个波长的同时变换。最大波长变换间距大于 25 nm。实验系统中采用增益开关分布反馈半导体激光器(GS DFB-LD)产生的超短光脉冲作为控制光, 频谱分割法得到多波长激光作为信号光。改变控制光的输入功率或非线性光学环路镜中的偏振控制器的偏振方向能够改变不同变换波长信号的性能。

关键词 全光波长变换, 非线性光学环路镜, 光纤通信, 波分复用, 频谱分割法。

1 引 言

波分复用(WDM)可以提高光纤传输容量。包含多个节点的复杂高速光传输网络需要有效的波长变换器防止波长阻塞, 使波长可以重复利用, 提高网络管理的灵活性。利用半导体光放大器(SOA)中的交叉增益调制(XGM)和交叉相位调制(XPM)^[1-3], 或非线性光学环路镜可进行全光波长变换^[4-9]。基于半导体光放大器的波长变换由于其中的载流子寿命较长, 变换信号的消光比较小, 使变换速度受到限制。利用非线性光学环路镜进行全光波长变换可以实现比特率透明的波长变换, 输出信号的消光比与输入信号相比有所改善。非线性光学环路镜作为一种很有前途的全光交换装置, 正在得到日益广泛的应用。一方面由于光纤中非线性作用响应时间极短, 硅光纤的非线性光学环路镜具有达到 10^{12} bit/s 交换速度的潜力。另一方面非线性光学环路镜自身的平衡干涉结构允许使用较长的光纤长度(长于 1km), 掺铒光纤放大器的广泛使用又能够很容易地获得高功率的光信号, 所以可得到较强的非线性效应, 实现波长变换。文献[3]报道了利用非线性光学环路镜进行 10 Gbit/s 的波长变换, 但变换间距仅为 8 nm。我们曾报道了采用非线性光学环路镜进行 2.5 Gbit/s 的 RZ 脉冲的波长变换^[7]。变换间距到达 20 nm, 但变换信号仅一路信号。在波分复用网络中同时实现多个波长变换具有较大的意义, 文献[3]采用半导体光放大器同时进行了 4 个信道的波长变换。文献[11]报道了利用光纤的非线性效应实现多个波长的同时变换。但用这种方式进行多个波长变换时, 光

* 国家自然科学基金、邮电部重点资金和霍英东青年教师基金资助。

收稿日期: 1998-12-14; 收到修改稿日期: 1999-06-10

纤的零色散波长必须与控制光严格匹配, 而且要求很高的脉冲峰值功率, 一旦脉冲峰值功率小于某一值, 将不能实现波长变换。本文报道采用非线性光学环路镜同时进行六个不同信道的波长变换实验, 它不需要使控制光、信号光与色散位移光纤零色散波长严格匹配, 且控制光功率只需要大于 10 dBm 便能实现全光多波长的变换。

2 实验原理

非线性光学环路镜的原理如图 1 所示。它根据光纤的萨格赖克 (Sagnac) 干涉原理制成, 其中包括一个功率耦合比为 50:50 的 2×2 耦合器, 连接耦合器两臂的光纤环路, 另外还包括一个将控制脉冲引入环中的波分复用耦合器, 和一个偏振控制器(PC)。光纤环路作为克尔介质, 非线性作用就在其中完成。信号光输入 2×2 耦合器的端口 1, 在端口 3 和端口 4 分成具有等强度两束光。这两束脉冲在相反方向进行传输。当沿环路传输完后, 这两个信号分量在耦合器中进行干涉, 顺时针与逆时针信号将产生相位差。控制光通过一个波分复用耦合器沿顺时针方向注入到光纤环路中, 由于交叉相位调制, 与控制光同方向传输并在时域上相互叠加的那部分信号, 将经历一个非线性相移。由于信号光在两个方向上的相位差, 造成端口 2 有信号输出。若控制光使信号光的相位差在 0 和 π 之间变化就实现了全光波长变换。

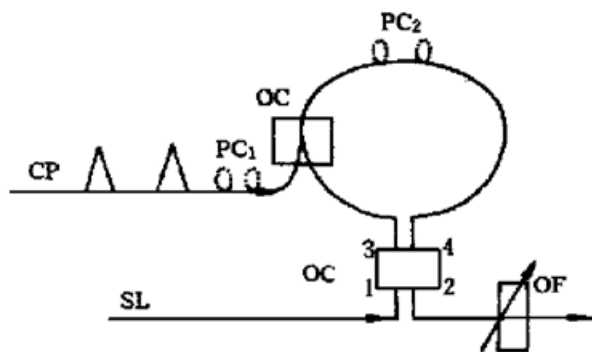


Fig. 1 The principle setup of NOLM. CP: the control pulse, OC: optical coupler, PC: polarization controller, SL: signal laser, OF: optical filter

利用频谱分割法得到多波长的激光在波分复用系统中是一种非常廉价的光源产生方法, 这种方法将具有潜在的使用价值^[1]。其原理是利用法布里-珀罗滤波器对掺铒光纤放大器的自发辐射噪声进行滤波从而得到等间距的多波长输出。

3 实验装置

实验装置如图 2 所示。实验所使用的仪器和器件如下: 取样示波器为美国泰克公司的 11801C 型, 取样带宽为 50 GHz。光谱仪为日本 ANDO 公司 AQ-6513B 型, 最小分辨率为 0.05 nm。高速宽带宽光电变换器 3 dB 带宽为 20 GHz。掺铒光纤放大器 EDFA₁ 的性能如下: 饱和输出平均功率为 17 dBm, 小信号增益为 35 dB, 放大器噪声指数为 6.4 dB。EDFA₃、EDFA₄、EDFA₅ 性能相同: 饱和输出平均功率为 16 dBm, 小信号增益为 30 dB, 放大器噪声指数为 5.2 dB 左右。EDFA₂ 特性如下: 饱和输出平均功率为 14 dBm, 小信号增益为 35 dB, 放大器噪声指数为 4.2 dB 左右。实验中所用 EDFA 3 dB 平坦带宽均大于 10 nm。在此实验中增益开关分布反馈半导体激光器(GSDFB-LD)为控制光, 中心波长为 1533.9 nm。脉冲最大宽度为 39 ps, 经过正常色散光纤压缩后脉冲宽度为 20 ps, 压缩后的脉冲波形和光谱如图 3 所示。从图 3 可见探测光重复频率为 2.5 GHz。增益开关分布反馈半导体激光器经过重复频率为 2.5 GHz 较大功率的微波调制后产生增益开关效应, 引起光脉冲频谱展宽。实验中非线性光学环路镜(NOLM)光纤为色散位移光纤, 长度为 3 km, 零色散波长为 1543 nm。可调谐光滤波器 3 dB 带宽为 0.9 nm(Santec 公司产品, 型号为 OTF-300, 可调谐范围为 1530~

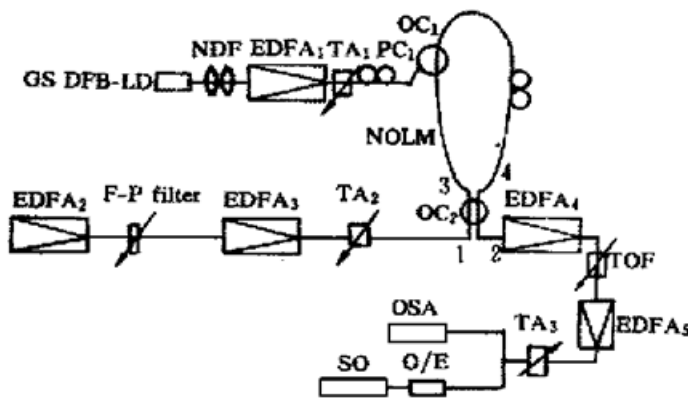


Fig. 2 The experimental setup. GS DFB-LD: gain-switched distributed feedback laser diode, EDFA: erbium doped fiber amplifier, TA: tunable attenuator, OTF: optical tunable filter, SO: sampling oscilloscope, O/E: optical and electrical converter, OC: optical coupler, NOLM: nonlinear optical loop mirror, PC: polarization controller, F-P filter: Fabry-Poret filter

入非线性光学环路镜。由于同时对多路信号光进行了波长变换，变换后每路信号功率较小，因此在滤波以前先将从光耦合器 OC₂ 的端口 2 输出的光信号用 EDFA₄ 放大后再用可调谐光滤波器对不同变换信号光进行滤波，得到的变换光再用 EDFA₅ 进行放大。

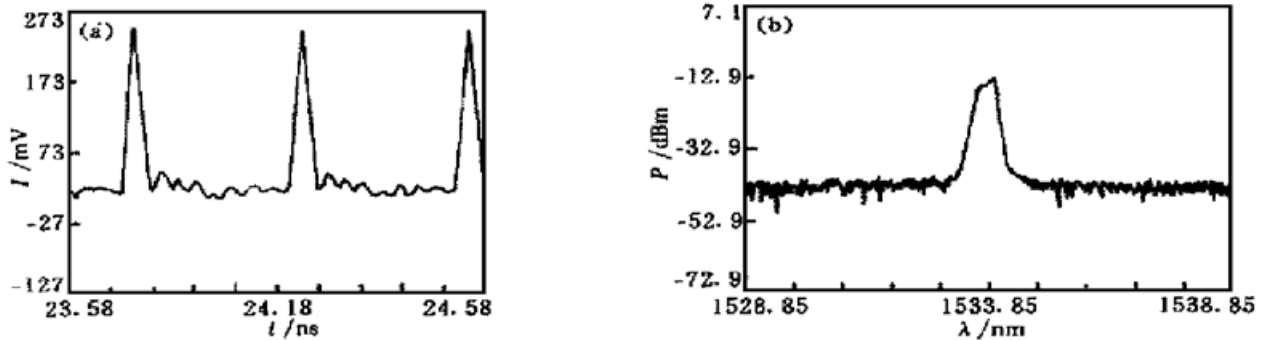


Fig. 3 The waveform (a) and optical spectrum (b) of the compressed control optical pulse

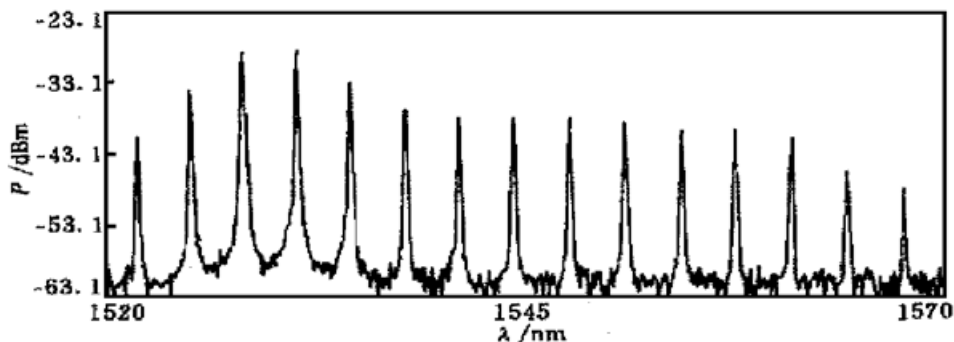


Fig. 4 The optical spectrum with EDFA₂ filtered by a F-P filter

1570 nm)。法布里-珀罗滤波器自由谱域约为 3.3 nm, 3 dB 带宽为 0.09 nm。

对 EDFA₂ 的放大的自发辐射滤波后光谱如图 4 所示。由图 4 可见大于 1540 nm 的中心波长分别为 1540.9 nm、1544.2 nm、1547.4 nm、1550.7 nm、1554.0 nm、1557.3 nm、1560.7 nm。还可看到这些不同波长的光谱峰值功率基本相等。

控制光经 EDFA₁ 放大后经光耦合器 OC₁ 进入非线性光学环路镜，为了改变控制光偏振方向，在进入非线性光学环路镜以前用偏振控制器 PC₁ 调整控制光的偏振方向。用 EDFA₃ 对频谱分割得到的多波长信号光进行能量放大。为了控制信号光和控制光的光强，在进入非线性光学环路镜前在控制光和信号光光路中均加入一个可调衰减器。经 EDFA₃ 放大后的信号光从光耦合器 OC₃ 的端口 1 进

4 实验结果

通过可调衰减器的衰减,使进入非线性光学环路镜的控制光和信号光功率分别为 15 dBm 和 8 dBm。适当调整 PC₁ 和 PC₂ 的偏振控制方向,图 5(a) 显示了从光耦合器 OC₂ 端口 2 输出的变换信号的光谱图。可见中心波长为 1544.2 nm、1547.4 nm、1550.7 nm、1554.0 nm、1557.3 nm、1560.7 nm、1564 nm 的变换信号光谱比较明显。改变偏振控制器 PC₂ 的偏振控制方向或者改变进入非线性光学环路镜的控制光功率(文献[4]指出改变控制光功率与改变非线性光学环路镜中的偏振态具有相同的作用),发现从端口 2 输出的光谱发生改变,测量得到的光谱如图 5(b) 所示。比较图 5(a) 和图 5(b) 可以看到,在两图中信号光中心波长为 1544.2 nm、1547.4 nm、1550.7 nm、1554.0 nm、1557.3 nm、1560.7 nm 的光谱均比较明显,但幅度有变化。图 5(a) 中变换信号功率最大的信号中心波长为 1550.7 nm,其次为 1554.0 nm、1547.4 nm、1557.3 nm、1560.7 nm、1564 nm,最小为 1544.2 nm。但在图 5(b) 中变换信号功率最大的中心波长为 1557.3 nm,其次为 1544.2 nm、1547.4 nm 和 1560.7 nm,最小为 1554.0 nm 和 1550.7 nm。如果再改变偏振控制器的偏振方向,得到的信号光谱与图 5(a) 和图 5(b) 不同。但是 1544.2 nm、1547.4 nm、1550.7 nm、1554.0 nm、1557.3 nm、1560.7 nm 这几个光谱比较明显。其他光谱不明显的主要原因是由于掺铒光纤放大器的增益峰值决定的。所使用的掺铒光纤放大器在波长为 1545~1560 nm 波长段有较大的增益,由于模式竞争其它信道的变换信号光被压缩。至于不同信道的光谱幅度与非线性光学环路镜中的偏振控制器的偏振方向有关则有待进一步研究。

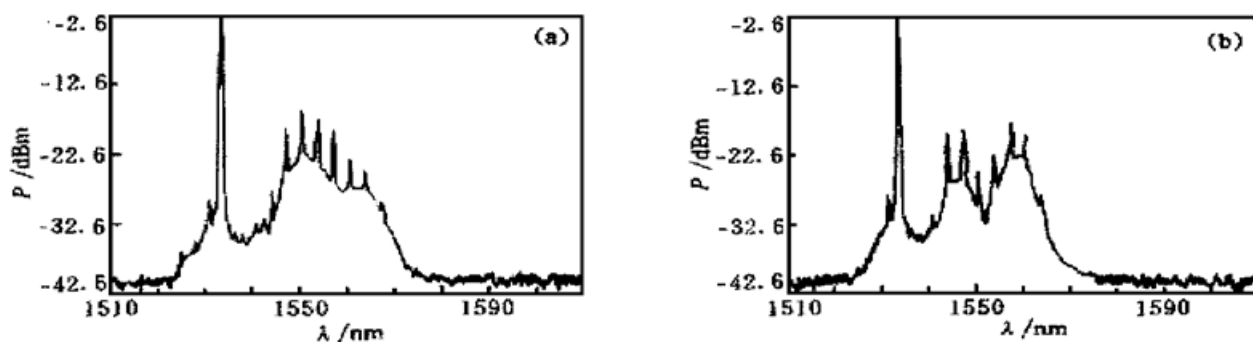


Fig. 5 The optical spectrum from port 2 of the OC₂

对图 5(a) 所示的变换信号光进行滤波,分别得到了中心波长为 1544.2 nm、1547.4 nm、1550.7 nm、1554.0 nm、1557.3 nm 和 1560.7 nm 变换信号的光谱和波形图。最大变换波长为 1560.7 nm,可见最大变换间距大于 25 nm。其光谱和波形如图 6 所示。图 6(b) 中在 1533 nm 处的小峰是滤波器过滤不彻底引起的。因为变换信号光 1544.2 nm 与控制光中心波长 1533 nm 相距较近,且从图 5 可见控制光功率相对于变换信号光很大,但此小峰峰值功率较中心波长为 1544.2 nm 的峰值功率小 12 dBm,因此对中心波长为 1544.2 nm 的变换信号光影响不大。同时还能看到当变换信号光中心波长大于 1550 nm 时,波长越长,变换信号性能越差,这是由于图 5(a) 中的光谱决定的。光谱图中大的脉座是由掺铒光纤放大器的性能,以及掺铒光纤放大器级联和每一信号的频谱相对较小共同作用引起的。

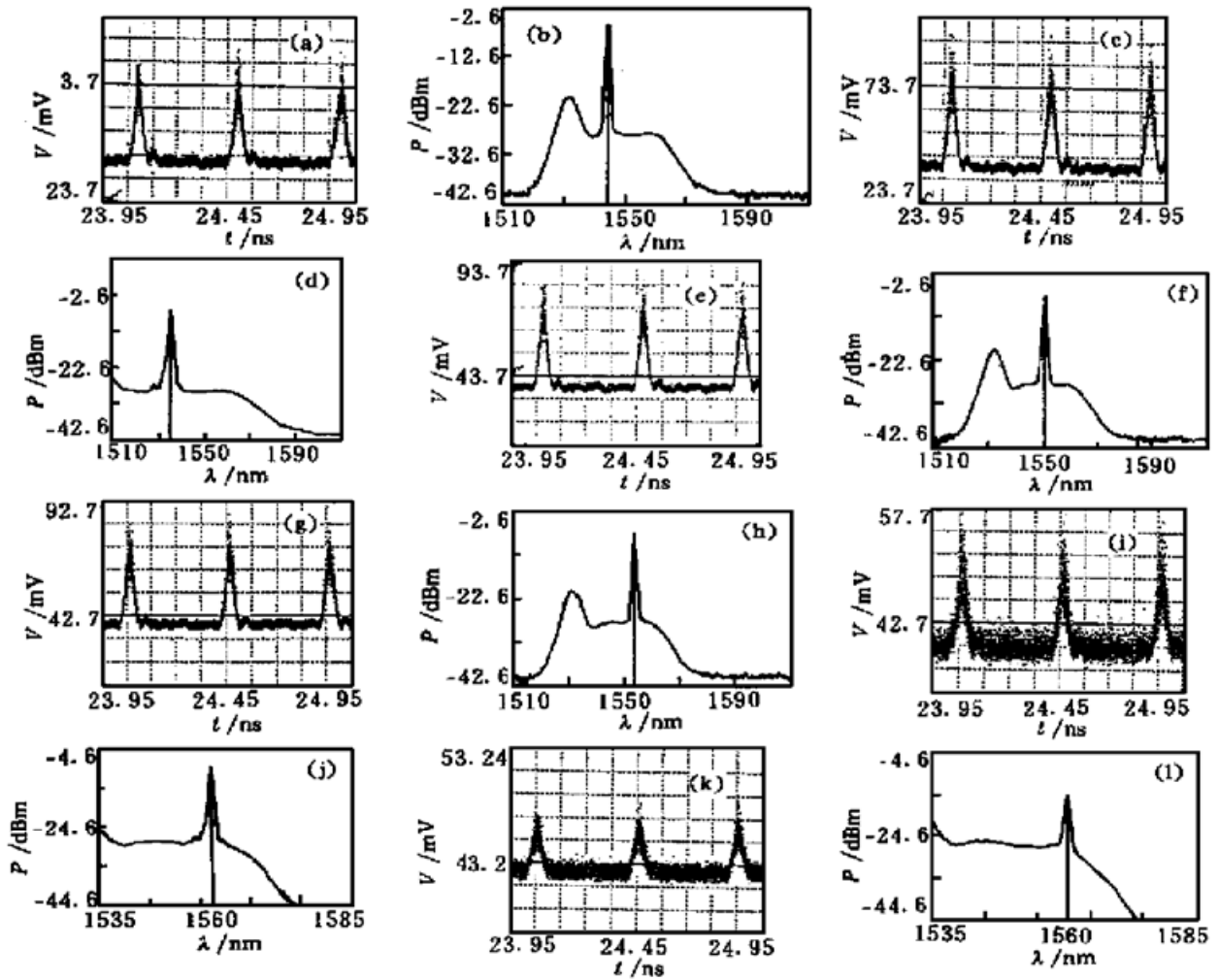


Fig. 6 The waveform and optical spectrum of the converted signal with different wavelength. (a) Waveform with the center wavelength of 1544.2 nm, (b) Optical spectrum with the center wavelength of 1544.2 nm, (c) Waveform with the center wavelength of 1547.4 nm, (d) Optical spectrum with the center wavelength of 1544.2 nm, (e) Waveform with the center wavelength of 1550.7 nm, (f) Optical spectrum with the center wavelength of 1550.7 nm, (g) Waveform with the center wavelength of 1554.0 nm, (h) Optical spectrum with the center wavelength of 1554.0 nm, (i) Waveform with the center wavelength of 1557.3 nm, (j) Optical spectrum with the center wavelength of 1557.3 nm, (k) Waveform with the center wavelength of 1560.7 nm, (l) Optical spectrum with the center wavelength of 1560.7 nm

结 论 采用非线性光纤环路镜作为波长变换介质成功地将 2.5 Gbit/s、脉宽为 20 ps、中心波长为 1533 nm 的控制光脉冲变换到 6 个不同波长的信号光上，最大变换间距大于 25 nm。变换信号光性能取决于控制光入纤功率或非线性光学环路镜中的偏振控制器的偏振方向。

感谢国家科委 863 高科技重大课题《0 Gbit/s OTDM 光孤子关键技术研究》课题组提供了部分实验设备。

参 考 文 献

- [1] Mikkelsen B, Durhuus T, Joergensen C R J *et al.*. Polarization insensitive wavelength conversion of 10 Gbit/s signals with SOAs in Michelson interferometer. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(2) : 260~ 261
- [2] Wiesenfeld J M, Glance B, Perino J S *et al.*. Wavelength conversion at 10 Gbit/s using a semiconductor optical amplifier. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1993, **5**(10) : 1300~ 1303
- [3] Lacey J P R, Madden S J, Summerfield M A. Four-channel polarization-insensitive optically transparent wavelength converter. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(10) : 1355~ 1357
- [4] Kauschenbach K A, Hall K L, Livas J C *et al.*. All-optical pulse width and wavelength conversion at 10 Gbit/s using a nonlinear optical loop mirror. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(9) : 1130~ 1132
- [5] Wang Ding, Golovchenko E A, Pilipetskii A N *et al.*. Nonlinear optical loop mirror based on standard communication fiber. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(4) : 642~ 646
- [6] Lee K S, Shu C. Optical loop mirror multiplexer. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(12) : 1444 ~ 1446
- [7] 余建军, 史寒星, 迟楠等. 利用非线性光纤环路镜将 2.5 Gbit/s 归零码光脉冲波长变换 20 nm. 高技术通讯, 1999, **9**(1) : 22~ 24
- [8] Bigo S, Desurvire E, Desruelle B. All-optical RZ-to-NRZ format conversion at 10 Gbit/s with nonlinear optical loop mirror. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(22) : 1868~ 1869
- [9] Bigo S, Desurvire E, Desruelle B *et al.*. Bit rate enhancement through optical NRZ-to-RZ conversion and passive time-division multiplexing for soliton transmission systems. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(2) : 984~ 985
- [10] Lee J S, Chung Y C, Digiovanni D J. Spectrum-sliced fiber amplifier light source for multichannel WDM applications. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(12) : 1458~ 1461
- [11] 余建军, 管克俭, 郑学彦等. 单个波长到多个波长的波长变换实验. 光子学报, 1998, **27**(8) : 729~ 733

Simultaneously Realizing Multi-Wavelength Conversion Using Nonlinear Optical Loop Mirror

Yu Jianjun Chen Shuqiang Guan Kejian

(Optical Communication Center, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Yang Bojun

(The Department of Basic Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

(Received 14 December 1998; revised 10 June 1999)

Abstract Multi-wavelength conversion was simultaneously achieved by using nonlinear optical loop mirror (NOLM). The maximum separation of the wavelength conversion between the control laser and the signal laser is larger than 25 nm. In the system, the gain switched distributed feed-back laser-diode is used as the control pulse with the pulse width of 20 ps, the spectrum-sliced fiber amplifier light source is used as the signal lasers with multi-wavelength output. The performance of the converted signal with different wavelength depends on the control optical power or the direction of the polarization controller in NOLM.

Key words all optical wavelength conversion, nonlinear optical loop mirror, optical fiber communications, wavelength division multiplexer, spectrum-slicing.