

利用半导体光放大器(SOA)实现全光波长变换(WC)*

程振杰 余重秀

(北京邮电大学电子工程系 北京 100876)

摘要: 利用 SOA 实现波长变换有 3 种技术:交叉增益调制(XGM)、交叉相位调制(XPM)和四波混频(FWM)。作者描述了这三种技术的特点、基本原理、系统结构,介绍了有应用前景的波长变换方案。

关键词: 波长变换 波分复用 交叉增益调制 交叉相位调制 四波混频 双折射 光纤光栅滤波器

All optical wavelength conversion in semiconductor optical amplifier(SOA)

Cheng Zhenjie ,Yu Chongxiu

(Department of Electronic Engineering ,BUPT ,Beijing ,100876)

Abstract : We show three wavelength conversion technologies based on XGM , XPM and FWM of SOA. We introduce their principles , characters and useful experiment setups for the future alloptical WDM network.

Key words : wavelength conversion wavelength-division multiplexing cross-gain modulation cross-phase modulation four wave mixing birefringence fiber Bragg grating filter

引 言

全光波长变换(WC)是波分复用(WDM)光网络中提供波长路由和波长再利用的关键技术。它利用有限的波长资源,支持不同波长之间的连接,提高了网络的灵活性和效率。因此,随着 WDM 全光网的发展,波长变换技术越来越受到人们的关注。在众多的波长变换方法中,

利用半导体光放大器(SOA)的交叉增益调制(XGM)^[2-5]、交叉相位调制(XPM)^[6,7]和四波混频(FWM)^[8-14]技术倍受人们的青睐。SOA 具有结构简单、可集成、转化速率快、转化效率高优点,所以,很适于在将来的大规模集成的通信网中应用。XGM、XPM 和 FWM 这三种波长变换技术实现起来各有千秋:XGM 调制结构简单,但消光比较低^[2,5];XPM 调制可以实现高速、低啁啾,但注入 SOA 的光功率的动态范围小^[6];FWM 对调制和比特率透明,但转化效率不稳定、偏振敏感^[9,10]。目前,美国、日本和欧洲一些国家的科技人员已经在电光波长变换的基础上提出了全光波长变换的光交叉连接(OXC)节点模型^[1]。我国也有一些单位进行了这方面的研究,如清华大学、北京邮电大学等。笔者针对实际网络的需求,介绍几种具有实际应用价值的国际上最新波长变换方案,这些方案在一定程度上弥补了 XGM、XPM 和 FWM 三种技术的不足,推动了全光波长变换实用化的进程。

1 利用交叉增益调制(XGM)实现波长变换

利用 XGM 调制进行波长变换如图 1。将泵辅信号光脉冲 λ_1 和连续探测波 λ_2 注入到 SOA 里。当信号脉冲 λ_1 处于上升沿时,载流子密度迅速增大,放大器的增益很快饱和,因此,信号脉冲 λ_1 为 1 时,转化到连续探测波 λ_2 上的信号为 0。当信号脉冲 λ_1 处于下降沿时,载流子密度迅速减小,放大器的增益恢复,因此,信号脉冲 λ_1 为 0 时,转化到连续探测波 λ_2 上的信号为 1。这样,信号光 λ_1 上的光脉冲被反转转化到波长 λ_2 上。即如果 λ_1 上的信号脉冲为 1011,转化到 λ_2 上的信号为 0100。利用 XGM 调制进行波长变换,只需要一个 SOA,结构简单,转化效率高,但消光比(ER)较低。如果多个 WC 级联,需要的信号光功率就会很大。尤其是向长波长转化时,

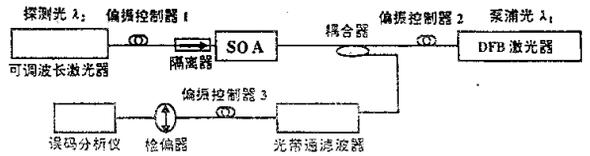


图 1 利用 SOA 双折射效应的波长变换实验装置

ER 更低。为了增大 ER,可以利用 SOA 的双折射效应。

将信号波长由 λ_1 转换到 λ_2 时,让任意方向偏振的信号光 λ_1 和具有固定偏振方向的连续波(WC) λ_2 同时注入到 SOA,如图 2。信号光 λ_1 引起的双折射将影响到连续

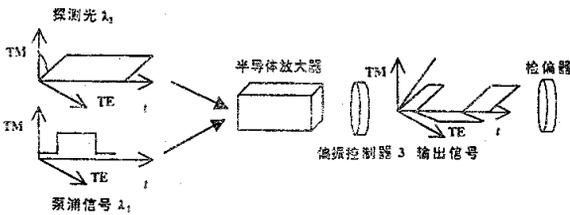


图 2 利用 SOA 的双折射效应实现波长变换的原理图

波的偏振。线性偏振光 λ_2 通过 SOA 时,变为椭圆偏振光。因此,转换后的信号光,不仅在振幅上有增益,而且也有双折射引入的偏振方向的变化。为了充分利用引入的双折射效应,可以调节 PC_1 、 PC_3 和检偏器,直到得到最大的消光比。检偏器 POL 滤除探测光 λ_2 中由于双折射效应而改变了偏振方向的那部分光。这种波长变换和传统的 XGM 调制波长变换的区别是在 SOA 后面加了一个检偏器,从而使消光比增大,注入光功率减小。

文献[2]中实验记录了探测光束 λ_2 处于 1528~1566nm 范围的消光比和能耗(PP)。SOA 后面有偏振器和没有偏振器两种情况中,前者 ER 值为 6.0~10dB,后者为 4.5~10dB,前者比后者增加了 0.8~2.1dB。在长波长区,两者的差别较大。

利用一个 SOA 和一个光纤光栅滤波器(FGF),也可以提高消光比,相应地减小入射光功

率如图3。将泵浦光脉冲 λ_1 和连续探测信号 λ_2 注入到 SOA 里,当信号脉冲 λ_1 处于上升沿时,载流子密度和放大器的增益很快饱和,SOA 的折射率增大,伴随着泵浦信号 λ_1 转化到波长 λ_2 的同时,还有一个向长波长的漂移。同样,当信号脉冲 λ_1 处于下降沿时,伴随着增益放大的恢复,转化信号波有一个向短波长的漂移。每个漂移波都会在波长 λ_2 产生与输入泵浦脉冲相同的信号。调节连续探测波 λ_2 ,使得 SOA 输出端的光纤光栅滤波器(FGF)只能通过一个漂移波。利用这种技术可显著增加消光比,文献[5]中有与没有 FGF 两种情况下的眼图证明了这一点:有滤波器时的转化信号眼张开较大,与输入信号眼图近似;无滤波器时的转化信号眼张开较小,与输入信号眼图差别较大。

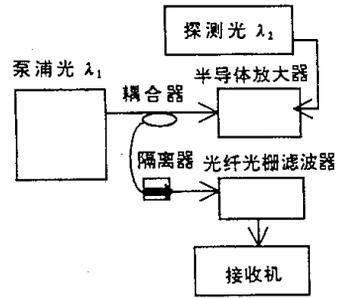


图3 利用 FGF 提高消光比的实验装置

在实际操作时,可以考虑将以上两种技术结合,在 FGF 滤波器滤波的同时,用 POL 检偏。

2 利用交叉相位调制(XPM)实现波长变换

一般地,利用两个 SOA 可以构成 Michelson 或 Mach-Zehnder 干涉仪。利用光波在两臂中传播产生的相位差实现 XPM 调制,如图4。将连续的探测信号 λ_2 注入到干涉仪且平分到两

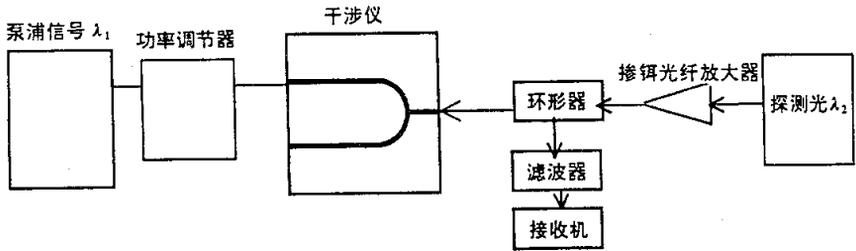


图4 测量 Michelson 干涉仪波长变换器输入功率动态范围的实验装置

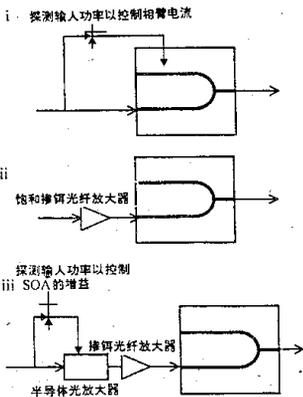


图5 3种扩大注入干涉仪光功率动态范围的方案

臂中,光在干涉仪的抛光面上反射。将泵浦信号光 λ_1 注入到干涉仪的一个臂中。干涉仪两臂的调节电流和输入信号光功率决定两臂的相位差。当位相差满足一定条件时, λ_1 波长上的输入信号转换到 λ_2 上。这种调制具有高速、低啁啾、波长独立等特点,但干涉仪输入光功率的动态范围小。对 10Gbps 信号,实验表明,输入光功率在 4 ~ 7dBm 范围时,信号的能量损失较小,动态范围只有 3 ~ 4dB^[6]。另外,干涉仪对功率敏感,输入功率的一个小的变化,就会导致输出功率的一个大的变化。为了增大输入光功率的动态范围,有3种技术,如图5。

(1)控制干涉仪的调节电流。加一个探测控制电路,探测输入光功率的变化,相应的改变相臂的调节电流。这种方法可以把动态范围扩大到 3 ~ 8dB。由于控制速度只取决于电路的速度,而干涉仪对电流的响应约为 1ns,所以控制速度很快。

(2)干涉仪前加掺铒光纤放大器(EDFA)。将 EDFA 的饱和输出功率设计到干涉仪的最

大输入光功率,如 4~7dBm。EDFA 的输入功率范围约为 40dB,所以,这种方法可以把波长转换器的动态范围提高到~40dB。EDFA 增益恢复时间较长,约 1ms,所以,这种方法适于输入光功率慢变的系统。

(3)干涉仪前加 EDFA 和 SOA。用电路探测输入光功率的变化,相应地调节 SOA 的增益,使 SOA 的输出光功率平稳。在 SOA 后加 EDFA,将 EDFA 的饱和输出功率限制到 4~7dBm。SOA 的输入功率范围约为 28dB,所以,这种方法可以将波长转换器的动态范围扩大到约 28dB。这一系统的调节响应时间由 SOA 的反应速度决定,可以达到纳秒量级。这一方法适于打包分组交换,因为分组网中,能量是随着信息包的流量快速变化的。

3 利用四波混频(FWM)实现波长变换

在量子力学术语中,一个或几个光波的光子被湮灭,同时产生几个不同频率的新光子,且在此参量作用过程中,净能量和动量是守恒的,这样的过程就称为四波混频过程。四波混频有两类,一类对应 3 个光子合成 1 个光子的情形,新光子的频率为 $\omega_4 = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3$ 。当 $\omega_1 = \omega_2 \neq \omega_3$ 时,相应的频率为 $2\omega_1 + \omega_3$ 。另一类为两个不同频率 ω_1 和 ω_2 的光子湮灭,同时产生两个频率为 ω_3 和 ω_4 的新光子的情形,即 $\omega_3 + \omega_4 = \omega_1 + \omega_2$ 。在 $\omega_1 = \omega_2$ 时,相当于频率为 ω_1 的强泵浦波产生两对称的边带,频率分别为 ω_3 和 ω_4 。假定 ω_3 小于 ω_4 ,频移为 $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_3 = \omega_4 - \omega_1$ 。四波混频把强泵浦波的能量传输给相对于泵浦频率发生上、下频移的两个波。另一方面,若频率为 ω_3 的弱信号也同泵浦波一起进入光纤,此信号将被放大,同时产生频率为 ω_4 的新频率波。

利用 SOA 进行 FWM 调制,具有对调制和比特率透明、信号脉冲相位保持不变、波长变换范围大等优点。缺点是转化效率不稳定、偏振敏感、输出光的信噪比极大地依赖于输入信号光和输出信号光之间的频差等。为了解决这些问题,可以采用垂直双泵浦四波混频。如图 6。 p_1 和 p_2 是泵浦光, s 是信号光。泵浦光 p_1 和信号光 s 的偏振取 TE 方向,泵浦光 p_2 的偏振方向取 TM 方向。频率分布如图 7b。 p_1 , p_2 和 s 3 种光的频率分别为 ω_1 , ω_2 和 ω_s 。 p_1 和 s 之间的频差为 $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_s$ (固定), p_1 和 p_2 之间的频差为 $\Delta\omega_1 = \omega_2 - \omega_1$ (可调)。在 SOA 的输出端, s_2 携带的信息同输入信号光 s 相同,是输入信号光 s 的复制,只是频率变化了 $\Delta\omega_1$, $\omega_1 - \omega_s = \omega_2 - \omega_{s_2}$ 。 c_2 是 s_2 的共轭项, c_1 是 s 的共轭项。采用集总模型来分析^[9]输出光场中 s_2 为:

$$E_{s_2} = (A_s \cdot A_1) r(\omega_s - \omega_1) A_2 \exp\{[(\omega_s - \omega_1 + \omega_2)t + \varphi_s - \varphi_1 + \varphi_2]\} + (A_2 \cdot A_1) r(\omega_2 - \omega_1) A_s \exp\{[(\omega_2 - \omega_1 + \omega_s)t + \varphi_2 - \varphi_1 + \varphi_s]\}$$

式中, $A_m = A_{mx}x + A_{my}y$ ($m = 1, 2, s$), A_x 和 A_y 分别是光场在 x 和 y 偏振态上的幅度。 x 和 y 是单位矢量。 $|r(\Delta\omega)|^2 = R(\Delta\omega)$ 是转化效率。 E_{s_2} 场由两部分构成。第一部分是信号光和第一泵浦光作用散射到第二泵浦项,这一项依赖于 $\Delta\omega$, 是固定的。第二项中两泵浦光的偏振方向差 90° , 故此项为 0, 即两泵浦光没有相互作用。因此,输出光场和泵浦光 p_2 有同样的偏振态。利用这种方案,可以消除四波混频中其它杂散项的串扰,还可以通过预滤波减少 ASE

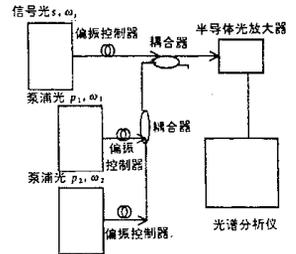


图 6 垂直双泵浦波长变换的实验装置

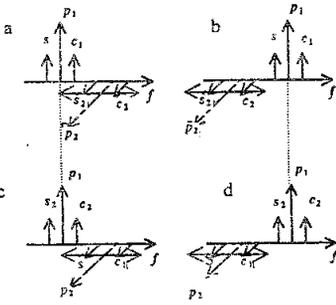


图7 频率分布图

噪声。利用双泵浦,转化效率和信噪比都比单泵浦高,而且更稳定^[9]。与原信号频率相比,当 $\omega_2 > \omega_1 + 2\Delta\omega$ 时,转化信号比原信号频率高;当 $\omega_2 < \omega_1 + 2\Delta\omega$ 时,转化信号比原信号频率低,如图 7a 和图 7b。

另外,还可以让泵浦光的频率固定,偏振保持 TE 方向,泵浦光 p_2 和信号光 s 的频率可调,偏振取 TM 方向,同时保持 p_2 和 s 之间的频差不变。转化信号 s_2 与原信号光相比,即可以在高频,也可以在低频,如图 7c 和图 7d。

4 总 结

利用 SOA 的 XGM, XPM 和 FWM 调制,可以有效地进行波长变换。在 XGM 调制时,加入检偏器或光纤光栅,可以使消光比增加;在 XPM 调制时,通过加入控制电路、EDFA 或同时加入 SOA 和 EDFA,可以分别使输入功率的动态范围扩大到 3 ~ 8dB, ~ 40dB 和 ~ 28dB。在 FWM 中,利用垂直极化双泵浦可以大大提高转化效率和信噪比。

波分复用光网络(WDM)是高速、大容量通信网的基础,目前,网络节点的电光和光电变换带来的电子瓶颈问题是限制网络速度的主要问题。WDM 网中节点的光化是光纤通信网发展的必然趋势,全光波长变换是其中的关键技术。利用 SOA 进行全光波长变换是技术上的一个重要突破,但目前这 3 种变换技术仍存在不足,需要以后进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Danielsen S L, Hansen P B, Stubkjaer K E. *J Lightwave Technology*, 1998, 16(12): 2095 ~ 2108
- 2 Lee H J, Sohn M, Kim K *et al.* *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(2): 185 ~ 187
- 3 Ueno Y, Nakamura S, Tajima K *et al.* *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(3): 346 ~ 348
- 4 Stephens M F C, Asghari M, Penty R V *et al.* *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(4): 449 ~ 451
- 5 Cho P S, Mahgerefteh D, Goldhar J *et al.* *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(1): 66 ~ 68
- 6 Danielsen S L, Hansen P B, Stubkjaer K E *et al.* *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(1): 60 ~ 62
- 7 Ma B, Nakano Y. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(2): 188 ~ 190
- 8 Contestabile G, Martelli F, Mecozzi A *et al.* *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(10): 1398 ~ 1400
- 9 Morgan T J, Lacey J P R, Tucker R S. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(10): 1401 ~ 1403
- 10 Tomkos I, Zacharopoulos I, Syvridis D *et al.* *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(10): 1404 ~ 1406
- 11 Diez S, Schmidt C, Ludwig R *et al.* *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(2): 212 ~ 214
- 12 Inoue J, Kawaguchi H. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(11): 1566 ~ 1568
- 13 Uchida A, Takeoka M, Nakata T *et al.* *J Lightwave Technology*, 1998, 16(1): 92 ~ 99
- 14 Agrawal G P 著, 胡国维, 黄超译. *非线性光纤光学*. 天津: 天津大学出版社, 1992: 315 ~ 318

作者简介 程振杰,男,1972 年出生。博士生。现从事全光通信网的研究。

收稿日期:1999-07-02 收到修改稿日期:1999-10-13