

文章编号 : 0253-2239(2001)09-1047-05

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^{*}

刘 威 孙军强

(华中理工大学光电子工程系, 武汉 430074)

摘要: 提出和论述了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。基本思想是设计和采用一种全光学偏振态转换器,理论上能将随机偏振态的输入信号光转换为固定偏振方向且功率基本不变的线偏振光,利用它控制信号光的偏振态能够克服四波混频过程所固有的偏振敏感性。将这种方法与正交偏振双抽运方法结合起来,能较简单地实现偏振不敏感且具有近似常数转换效率的宽带四波混频光波长转换。

关键词: 光波长转换;四波混频;半导体光放大器

中图分类号: O437.1 文献标识码: A

1 引 言

全光波长转换器是全光通信系统和未来宽带波分复用网络中不可缺少的元件,它可以使得波分复用网络的组建、互联、和管理更具兼容性和灵活性。所谓全光波长转换是指不通过光-电-光的转换过程而是通过全光的方式将某一波长的光波上所携带的信号完全复制到另一波长的光载波上去。目前研究得最多的是以半导体光放大器为基础的全光波长转换器,包括交叉增益调制型(XGM)、交叉相位调制型(XPM)以及四波混频型(FWM)。

基于半导体光放大器的四波混频型全光波长转换器的基本原理是将信号光和较高功率的抽运光同时注入到半导体光放大器的有源层中,由于三阶非线性效应产生新的频率的光场,新光场完全复制了信号光,只是相位是共轭的。它的最大优点是对比特率和调制形式透明,并且可以实现色散补偿和多个波长信道同时转换。但其实用化还存在两大问题:1)偏振敏感性问题。由于四波混频过程本质上是偏振相关的,而实际传输系统中进入波长转换器中的信号光的偏振态是随机的,可能是线偏光,也可能是椭圆偏光或圆偏光,所以在半导体光放大器的有源层里信号光和抽运光间的拍频强度是不确定的,只有当两者为同向偏振的线偏光时转换效率才

有最大值。2)传统的基于半导体光放大器的四波混频型全光波长转换方法的转换效率与频率转换间距强烈相关。当频率转换间距从几十 GHz 上升到 2 THz 时,转换效率大约要减小 40 dB,这大大限制了转换范围,在实际中是根本不可用的。

目前国外所提出来的解决偏振敏感性问题方法主要有三种^[1]:1)同向偏振双抽运方法(CP)。基本思想是在两个同向偏振的抽运光间产生拍频,拍频强度不受信号光偏振态的影响。2)正交偏振双抽运方法(OP)。基本思想是使信号光的两个正交分量分别和两个正交偏振的抽运光场产生拍频,可以证明合成后的转换效率与信号光的偏振方向无关。3)双半导体光放大器法。基本方法是先用偏振分光镜将随机偏振态的信号光分解成两个正交偏振的线偏光,再分别注入到两个半导体光放大器中进行四波混频波长转换,然后合二为一。

这三种方法都存在缺点,双抽运方法严格地说仍存在一定的偏振敏感性,且难以实现和具有与频率转换间距无关的近似常数转换效率的正交偏振双抽运方法^[2]结合在一起,转换范围较小,缺乏实用前景,而双半导体光放大器法的结构较为复杂,由于分别在两个半导体光放大器中转换,难以保证合路后不产生码元的错位。并且两个半导体光放大器构成的转换器的光增益和相对转换效率的不平衡仍然引起一定的偏振敏感性。

本文提出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型全光波长转换方法。基本方法是在转换装置中加入一种新设计的全光学偏振态

^{*} 国家科委 863 高科技项目、华为科研基金和湖北省自然科学基金资助课题。

转换器,它能将任意偏振态的信号光在进入半导体光放大器之前转化为偏振方向固定且功率近似不变的线偏光,而抽运光的偏振方向是预先可以控制的,从而使进入半导体光放大器的抽运光和信号光始终具有相同的偏振方向,实现了波长转换效率与信号光初始偏振态无关的波长转换。我们预计此种方法比前面三种方法优越。

2 原 理

这种偏振态转换器的结构如图 1 所示,对其原理进行简要的描述,不涉及光学设计和工艺细节。

如图 1 所示,入射信号光经一大聚焦常数的 1/4 节距自聚焦透镜准直后垂直入射到单轴双折射晶体中,分解为两束正交偏振的线偏光: o 光和 e 光,半波片的光轴与 o 光偏振方向成 45° 角, o 光经半波片后偏振方向旋转 90° ,也成为 e 光,然后使它通过一适当厚度的单轴双折射晶体 6,平移它的光路,使

两束 e 光接近重合,再经一较大孔径、较小聚焦常数的 1/4 节距自聚焦透镜会聚在一起。显而易见,输出光场是偏振方向恒定的线偏振光,因而实现了偏振态的自动控制。

采用此偏振态转换器,就可以在信号光注入半导体光放大器之前先将其转换为固定偏振方向且功率近似不变的线偏光,从而实现偏振不敏感的基于半导体光放大器的四波混频型光波长转换。考虑到这种偏振态转换器同样可用来进行抽运光的偏振态控制,且即使信号光和抽运光的波长差达到 80 nm ,它们在晶体中的折射率差也是极小的,可以考虑将信号光和抽运光耦合到一起后注入到同一个全光学偏振态转换器转换为同向偏振的线偏光,再直接注入半导体光放大器中进行四波混频,这样不仅简化了实验装置,也避免了在耦合以及在光纤中的传输过程中偏振态又发生改变,因此我们采用如图 2 所示的实验装置。

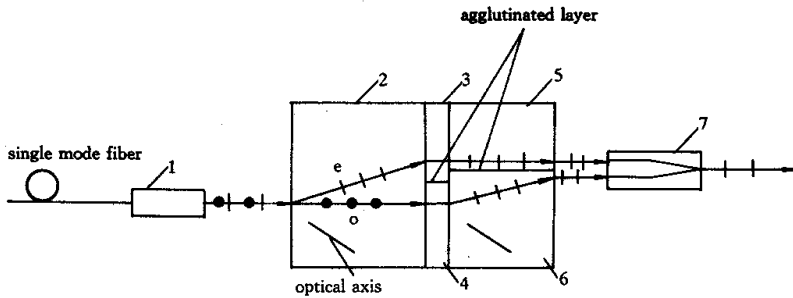


Fig. 1 Configuration of all-optical polarization state converter. 1 7 :graded-index lenses ; 2 6 :single-axis double-refraction crystal ; 3 5 :common quartz glass ; 4 $\lambda/2$ plate

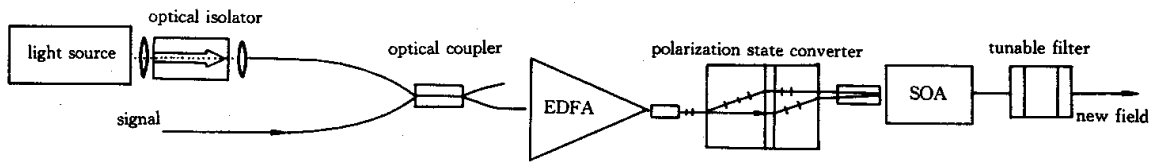


Fig. 2 Sketch of polarization-insensitive wavelength conversion adopting polarization state converter

3 分 析

3.1 偏振态转换器的简要分析

在图 1 中,假设入射光沿 z 方向传播, o 光偏振方向与 x 轴平行, e 光偏振方向与 y 轴平行,则不管入射光是线偏振光还是椭圆偏光或圆偏光,都可以表示为光矢量分别沿 x 轴和 y 轴的两个线偏光的叠加。经自聚焦透镜准直后,近似为平面波,其复振幅可表示为

$$E = E_x x + E_y y =$$

$$a_1 e^{(kz + \varphi_{0x})} x + a_2 e^{(kz + \varphi_{0y})} y =$$

$$a_1 e^{i\varphi_x} x + a_2 e^{i\varphi_y} y$$

E_x 和 E_y 分别表示沿 x 和 y 轴方向偏振的光场分量的复振幅, a_1 和 a_2 为幅值,用琼斯矩阵表示为

$$E = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 e^{i\varphi_x} \\ a_2 e^{i\varphi_y} \end{bmatrix},$$

因此入射光的强度为

$$I_{in} = |E_x|^2 + |E_y|^2 = a_1^2 + a_2^2,$$

当入射光束进入方解石晶体后被分解为 o 光和 e 光,它们的琼斯矢量分别为

$$o \text{ 光: } \begin{bmatrix} a_1 e^{i\varphi_x} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad e \text{ 光: } \begin{bmatrix} 0 \\ a_2 e^{i\varphi_y} \end{bmatrix}.$$

o 光经半玻片后, 出射光的琼斯矢量为 $\begin{bmatrix} 0 \\ a_1 e^{i\varphi_x} \end{bmatrix}$, 设线偏光转换器总的光学透过率为 T , 并假设 o 光和 e 光的透过率相同, 则两束光经合路后总光强为

$$I_{\text{out}} = \left| \sqrt{T} a_1 e^{i\varphi_x} \right|^2 + \left| \sqrt{T} a_2 e^{i\varphi_y} \right|^2 = T(a_1^2 + a_2^2),$$

可见出射光的功率与入射光的偏振态无关, 且偏振方向恒定。因此在基于半导体光放大器的四波混频型光波长转换系统中采用此偏振态转换器对信号光进行偏振态的转换, 就可以实现偏振不敏感的波长转换。需要指出的是, 由于事实上光学元件对 o 光和 e 光的透过率略有差异, 并且光路很难调节到理想状态, 故此偏振态转换器实际上存在着较小的偏振敏感性, 实验测得其偏振敏感度约为 1 dB。

3.2 自聚焦透镜对入射和出射光的变换作用

自聚焦透镜的折射率服从平方律分布, $n^2(r) = n_0^2(1 - Ar^2)$, n_0 是纤芯折射率, \sqrt{A} 是透镜的聚焦常数。图 1 中自聚焦透镜 1 用来将光纤发出的发散光束变换为平行光束。可以证明将光纤置于自聚焦透镜的焦点上, 在透镜输出端光束的半径和发散角分别为

$$\left. \begin{aligned} r_b &= \frac{NA_f}{[n_0 \sqrt{A} \sin(\sqrt{A}L)]} + r_f \cos(\sqrt{A}L), \\ \theta_b &= \arcsin[-r_f \sin(\sqrt{A}L) n_0 \sqrt{A}], \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

上式中 r_f 和 NA_f 分别是单模光纤纤芯半径和数值孔径, L 是自聚焦透镜的长度。我们选用的透镜长度是 1/4 节距, $\sqrt{A}L = \pi/2$, 焦点在透镜的端面上, 上两式成为

$$\left. \begin{aligned} r_b &= NA_f(n_0 \sqrt{A}), \\ \theta_b &= \arcsin(-r_f n_0 \sqrt{A}) \approx -r_f n_0 \sqrt{A}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

可由此计算图 1 中入射光束经自聚焦透镜 1 准直后的光斑直径和发散角, 为了使准直后光斑直径较小, 以便于后来的双光束耦合, 我们选用日本产的一种 $1.55 \mu\text{m}$ 波段大聚焦常数小孔径的自聚焦透镜, 其参数为 $\sqrt{A} = 0.481 \text{ mm}^{-1}$, $L = 3.27 \text{ mm}$, $n_0 = 1.5503$, 单模光纤的芯径为 $10 \mu\text{m}$, 数值孔径约为 0.1, 则由 (2) 式计算得光束半径为 0.134 mm , 发散角为 0.00373 rad , 是很好的平行光束。

自聚焦透镜 7 用来将两束 e 光耦合到单模光纤

或半导体光放大器的有源层中, 要求耦合后数值孔径很小, 因此用日本产的一种小聚焦常数的长自聚焦透镜, 参数为 $\sqrt{A} = 0.237 \text{ mm}^{-1}$, $L = 6.36 \text{ mm}$ 。光束经方解石晶体和半玻片后有较小的弥散, 假设两光束到达自聚焦透镜 7 的左端面时光斑扩散到直径 0.3 mm , 则两束光的总宽度约为 0.6 mm , 同样由 (2) 式计算出双光束耦合后的数值孔径约为 0.11, 已经与单模光纤的数值孔径很接近了, 故能获得较高效率的耦合。

3.3 偏振态转换器所产生的附加光程差和相位差对结果的影响

由于偏振态转换器将原信号光分解成了 o 光和 e 光, 在单轴双折射晶体中其光路的差异和折射率的差别所引起的光速的不同, 都会导致附加光程差和相位差, 下面分析它们对转换结果的影响。

首先说明信号码元不会构成影响。虽然全光学偏振态转换器会产生附加光程差和相位差, 但首先实际上偏振态转换器的设计中已经考虑到对光程差进行校正: 一方面经单轴双折射晶体分解产生的两束光都经过了两次折射, 其光路基本上是对称的, 另一方面对石英玻璃片 3 (见图 1) 选取合适的折射率, 可以进一步校正光程差。我们可以用数值估算来说明问题, 若经校正后光程差最大为 0.1 mm , 则渡越时间为 $\Delta t = 0.1 \times 10^{-3} / 3 \times 10^8 \text{ s} \approx 3.3 \times 10^{-13} \text{ s}$, 而即使是调制频率为 100 GHz 的数字信号, 其码元的持续时间也有 10^{-11} s , 远大于 $3.3 \times 10^{-13} \text{ s}$, 因此存在的光程差不会干扰正常码元。

接着证明这对四波混频过程的光波长转换效率不构成影响。首先要指出, 我们的研究范围限于实用中直接调制 (光强度调制) 和接收的数字式光纤通信系统。我们可以把经偏振态转换器后的信号光看成是由两束相位不同的同向线偏光的混合, 设其中一束的功率为 P_{S1} 、另一束功率为 P_{S2} , 它们分别与抽运光发生四波混频而产生波长转换的新光场, 设 P_{C1} 与 P_{C2} 为分别产生的新光场的功率, 由块理论^[1] 可得新光场的功率为

$$P_{C1} = P_p^2 P_{S1} G^3 R(\Delta\omega),$$

$$P_{C2} = P_p^2 P_{S2} G^3 R(\Delta\omega),$$

式中 $R(\Delta\omega)$ 是相对转换效率函数, G 是相应的半导体光放大器的增益。总的新光场光功率仍然是

$$P_C = P_{C1} + P_{C2} =$$

$$(P_{S1} + P_{S2}) P_p^2 G^3 R(\Delta\omega) =$$

$$P_S P_p^2 G^3 R(\Delta\omega).$$

转换效率不改变,因此单轴双折射晶体产生的附加相位差不会对波长转换效率和偏振不敏感的结果构成影响。

4 偏振不敏感且转换效率平坦的四波混频方法

文献 2 提出和采用两个正交抽运(BOP)以实现与频率转换间距无关的近似常数的转换效率的方法,并已报道了在超过 80 nm 的波长转换间距范围内实现了近似常数的转换效率和信噪比^[31]。我们可以将本文中所论述的偏振不敏感的方法与正交偏振

双抽运方法结合起来以实现既偏振不敏感又具有常数转换效率的基于半导体光放大器的四波混频型光波长转换,为此设计了如图 3 所示的方案。

如图 3 所示,偏振态转换器 1 将抽运光 1 和信号光转换为同向偏振的线偏光,偏振态转换器 2 将抽运光 2 转换为与之成正交偏振的线偏光(偏振态转换器 1 和 2 可采用相同的器件,正交放置即可),三束光经合路以后,注入半导体光放大器中产生四波混频。由于抽运光 2 与信号光及抽运光 1 成正交偏振,故拍频只发生在信号光及抽运光 1 之间,在有源层中产生增益和折射率光栅,抽运光 2 被其散射,产生两个边带:光频 F 和光频 C 。光谱如图 4 所示。

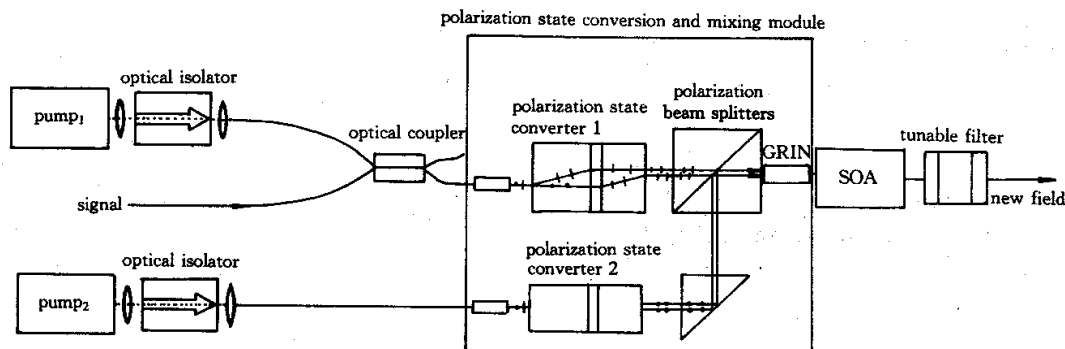


Fig. 3 Setup of polarization-insensitive BOP scheme adopting polarization state converter

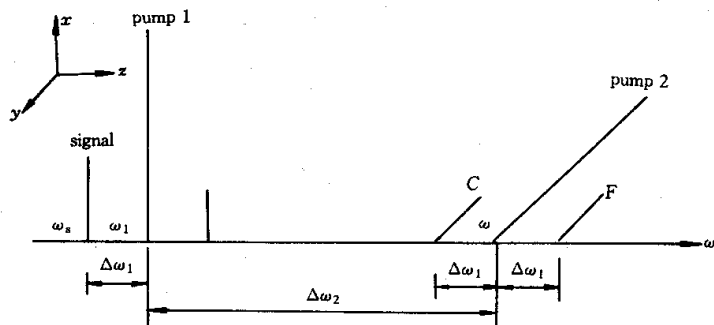


Fig. 4 A four-wave-mixing diagram of BOP scheme shown in the frequency domain

定义

$$A_1 = \sqrt{P_1 G_X}, A_2 = \sqrt{P_2 G_Y}, A_S = \sqrt{P_S G_X}$$

其中 P_1, P_2, P_S 分别为注入到半导体光放大器的抽运光 1、抽运光 2 和信号光的光功率, G_X, G_Y 是半导体光放大器对两个正交偏振方向光场的增益,由块理论得新光场 C 的波函数为

$$E_C = (A_S x) \cdot (A_1 x) \cdot r(\omega_s - \omega_1) \{ A_2 y \} \times \exp\{ [\omega_s - \omega_1 + \omega_2] t + \phi_s - \phi_1 + \phi_2 \}$$

新光场的功率为

$$P_C = E_C E_C^* = (A_1 A_2 A_S)^2 |r(\Delta\omega_1)|^2 = (A_1 A_2 A_S)^2 R(\Delta\omega_1) = P_1 P_2 P_S G_X^2 G_Y R(\Delta\omega_1)$$

其中 $R(\Delta\omega)$ 是相对转换效率函数^[41]。转换效率为

$$\eta = P_C / P_S = P_1 P_2 G_X^2 G_Y R(\Delta\omega_1) \quad (3)$$

由于频率转换间距为 $\Delta\omega_2$, 即抽运光 1 和抽运光 2 的频率差,由(3)式可见转换效率与 $\Delta\omega_2$ 无关,而只与抽运光 1 与信号光的频率差 $\Delta\omega_1$ 有关,因此实现了与频率转换间距无关的波长转换效率。

结论 提出和论述了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,设计了一种全光学偏振态转换器,它主要由双折射晶体、半波片和自聚焦透镜构成,能够将任意偏振态的输入光转化为偏振方向固定且功率基本不变的线偏振

光理论计算其输出光束数值孔径大约为 0.11,能够与单模光纤和半导体光放大器进行高效的耦合。将它用于对信号光进行偏振态的自动控制,能较简单地实现偏振不敏感的四波混频光波长转换,并且可以预计,它优越于双抽运方法和偏振分光镜法。

参 考 文 献

- [1] Lacey J P R, Summerfield M A, Madden S J. Tunability of polarization-insensitive wavelength converters based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **16**(12):2419 ~ 2427
- [2] Contestabile G, Martelli F, Mecozzi A *et al.*. Efficiency flattening and equalization of frequency up-and down-conversion using four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(10):1398 ~ 1401
- [3] Moga T J, Tucker R S, Lacey J P R. All-optical wavelength translation over 80 nm at 2.5 Gb/s using four-wave Mixing in a semiconductor optical amplifier. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(8):982 ~ 984
- [4] Zhou Jianhui, Park N, Dawson J W *et al.*. Efficiency of broadband four-wave mixing wavelength conversion using semiconductor traveling wave amplifiers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(1):50 ~ 52

A Novel Scheme for Polarization – Insensitive Optical Wavelength Conversion Based on Four-Wave Mixing in Semiconductor Optical Amplifier

Liu Wei Sun Junqiang

(Department of Optoelectronic Engineering , Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074)

(Received 22 May 2000 ; revised 3 August 2000)

Abstract : A novel scheme for polarization-insensitive optical wavelength conversion based on four-wave mixing (FWM) in semiconductor optical amplifier (SOA) is proposed and demonstrated. An all-optical polarization state converter which can automatically change random input polarization state into linear output polarization state with fixed polarization direction and power is employed in wavelength converter. Using it to control the polarization state of signal beam , the intrinsic polarization-sensitivity of FWM process can be overcome simply.

Key words : optical wavelength conversion ; four wave mixing ; semiconductor optical amplifier