

光通信中的光电子器件讲座

第三讲 全光通信网中的波长变换技术*

王葵如 任建华 余重秀

(北京邮电大学电子工程学院 北京 100876)

摘 要 文章简述了波长变换器在全光通信网中的作用和研究意义,讲解了各种波长变换器的原理、结构和所用器件,并分析了它们各自的优缺点。

关键词 全光网,波长变换

WAVELENGTH CONVERSION TECHNOLOGY FOR ALL- OPTICAL NETWORKS

WANG Kui- Ru REN Jian- Hua YU Chong- Xiu

(School of Electronics Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract We review the applications and significance of wavelength converters for all-optical networks. Various wavelength conversion techniques, the structures and devices, and their advantages and shortcomings are discussed.

Key words all-optical network, wavelength conversion

1 前言

网络如今已成为家喻户晓的名词,随着用户数量和信息需求量的急剧增加,网络的发展速度已经远远超出了人们的想像。保守的估计,数据通信流量每6个月翻一番。因此,在网络研究领域里,需要不断有新思想和新技术涌现,全光波长转换器就是目前光通信网中研究的一个热点。

光通信网有两大主要组成部分——传输和交换。整个光网络就好像地面上的交通网,传输线(即光纤)相当于马路,而交叉路口在光网络中称为节点。在节点处要进行路由或交换,以分配信息下一步所走的路径。路由器的作用是先将信息存储,然后根据它要到达的地址选择路径转发出去。在骨干光网络中节点起枢纽作用,主要是由交叉连接设备和分叉复用器构成。交叉连接设备是根据所传信息的地址将其交换到合适的路径上继续传输,分叉复用器则可以让到达本地的信号下路和让从本地发出的信号上路^[1]。在现在的光通信网中,传输部分是由光来完成的,节点处的路由和交换还是采用电的方式。当信息从一端向另一端进行传送时,中间往往要经过

很多个节点,每个节点处都要进行光-电-光的转换,即先将光信号转换为电信号,经过信号处理后再转换为光信号。这样,既影响传输速率,又增加了设备成本,而且目前的电子交换和信息处理网络的发展已接近于电子速率的极限,再要提高速率,将受到电子瓶颈的限制。解决的办法是在交换系统中引入光子技术,实现光路由、光交叉连接(OXC)和光分叉复用(OADM),这就是全光通信网。

从20世纪90年代中期开始,由于波分复用(WDM)方式在光通信网的发展中具有无可比拟的优越性,前景非常看好,因此WDM系统的研究有了飞速发展。随着波分复用器、光放大器、光纤等研究的不断推进,波长信道数在逐步增加。我们认为,WDM网的带宽很宽,可以满足每个用户的需求,但一根光纤中能够复用的波长数量终归是有限的,而且任何两路信号在一根光纤中不能使用同一波长,所以可用波长数将大大少于节点的数目和用户数量。如果采用波长变换技术,可以让信号在节点上从一个波长变换到另一个波长,使同一波长在不同的区域中重复使用,这样就解决了波长争用的问题。因

* 2001-05-21收到初稿,2001-07-20修回

此,波长变换技术是 WDM 全光通信网中非常关键的技术之一。

光波长变换技术分为两大类,一类是采用光-电-光的方式,即先将输入的光信号转换为电信号,由电信号去驱动另一个波长的激光器,再将电信号转换为光信号,实现波长转换;另一类为全光波长变换方式,是指不经过光-电转换,直接在光域内将某一波长的光信号转换到另外一个波长上。光-电-光的方式技术上比较成熟,在转换过程中还可以对信号进行整形、重新定时,但是没有克服电子瓶颈问题,因此,全光波长变换是比较看好的方向。现在正在研究的全光波长变换技术,根据其所采用的基本物理原理可分为:交叉增益调制型、交叉相位调制型、四波混频效应和差频效应等^[2],利用的元器件有半导体光放大器、半导体激光器、光纤及铌酸锂等非线性介质光波导。从实用化的角度来看,要求波长变换器转换效率高,转换带宽宽,转换速度快,并且能够进行多个波长信道的同时转换,对于信号传输的速率透明,对输入信号的偏振方向不敏感等。到目前为止,只有基于半导体光放大器交叉相位调制的波长变换器作为商品出售,其他类型的器件还处于实验室研究阶段。下面,分别介绍几种类型的光波长变换技术。

2 全光波长变换技术

2.1 基于交叉增益调制(XGM)的波长变换

交叉增益调制是用信号光携带的信息调制有源介质的增益,使得在同一介质中传播的另一束连续光(称为探测光)的输出光强随信号光变化,由此将信息从信号光转换到探测光上。能够利用此方法实现波长变换的器件主要有半导体光放大器(SOA)和半导体激光器。

半导体光放大器结构上类似于无谐振腔的激光器,具有很高的信号增益,偏振敏感度低,转换速率高,体积小,便于集成化。常见的 SOA-XGM 波长变换器的实现方法如图 1 所示^[3]。SOA 工作于饱和状态,输入为强度调制的信号光 λ_s 和连续光(也称探测光) λ_c ,信号光通过光强变化对 SOA 的饱和区增益进行调制,使输出光 λ_c 的光强随调制信号变化而含有 λ_s 携带的信息,以此实现波长转换功能。因为利用了增益饱和效应,转换后的信号与输入信号是反相的。图 1(a)和图 1(b)分别为信号光与连续光同向输入和反向输入的情况,为了不让信号光从输

出端输出,图 1(a)中插入一个滤波器以滤除 λ_s 。

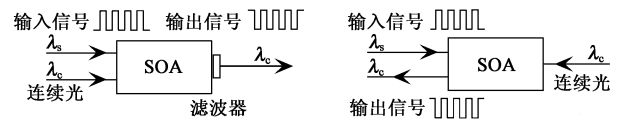


图 1 SOA-XGM 波长变换器
(a) 同向输入; (b) 反向输入

SOA-XGM 结构简单,缺点是由于利用了饱和吸收效应,变换后的信号消光比较小($< 8\text{ dB}$),放大器自发辐射噪声的影响使信噪比下降。实际使用时,信号从起点到终点的传输过程中需要经过多次变换,这样就会使信号严重恶化,甚至不能接收到信息。另外,由于有源层载流子密度的变化将引起变换信号较大的频率啁啾(其定义请参见文献[4]),增加了色散对传输系统的影响。

利用 DFB 激光器也可以实现交叉增益调制^[5],方案如图 2 所示。DFB 激光器原输出为连续光 λ_p ,信号光 λ_s 通过环行器入射进 DFB 激光器中,当 λ_s 为“1”时,消耗了激光器上能级的载流子,使它对本身激光波长 λ_p 的增益下降到阈值以下,此时 λ_p 的输出为“0”;当 λ_s 为“0”时,输入光功率很小,不影响 λ_p 的增益,这时 λ_p 的输出为“1”,这样就实现了波长变换。与 SOA-XGM 类似,变换后的信号同输入信号反相,如果要得到同相变换,可以将两个变换器级联使用。该方案由于利用了激光器的阈值效应,所以能够较好地抑制自发辐射噪声,提高器件的信噪比。

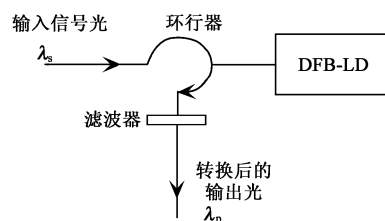


图 2 激光器交叉增益调制波长变换器

将图 2 中的 DFB-LD 换为外腔激光器,构成腔的一个反射镜用布拉格(Bragg)光纤光栅(FBG)代替,该结构称为光纤光栅外腔波长变换器(图 3)。转换后的波长将由 FBG 的反射波长确定,波长稳定度高,无频率啁啾问题。光纤光栅的反射波长可以通过外界因素(温度、应力等)调整,由此能够实现可调谐的波长变换。

2.2 基于交叉相位调制(XPM)的波长变换

让信号光与探测光在同一非线性介质中传输,物理

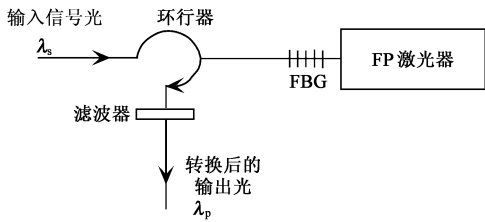


图3 光纤光栅外腔波长变换器

通过信号光的强度变化调制介质的有效折射率,从而改变探测光的传播相位,这就是交叉相位调制的原理.用半导体光放大器构成的交叉相位调制波长变换器如图4所示^[3].其基本结构是一个马赫-曾德尔干涉仪(MZI),两个SOA分别放置在两臂上,连续的探测光 λ_c 从左端输入,经过1点的3dB耦合器均匀分配到两个臂,通过SOA后在2点干涉输出.信号光 λ_s 从右端输入,经3点耦合器进入SOA1中,由于SOA有源区的折射率与载流子密度有关,信号光强度变化将引起SOA折射率改变,使探测光通过MZI的两臂时光程不相等,产生相位差,造成右端输出光信号 λ_c 的光强随输入信号光 λ_s 的强度变化.与交叉增益调制相比较,采用干涉仪结构可以提高器件的消光比,减小频率啁啾;增加探测光的功率能够抑制SOA的自发辐射噪声,从而提高变换器的信噪比.

图4结构的波长变换器也可以用各种非线性介质波导来实现.在介质上制作MZ型波导,通过信号光 λ_s 的光强调制一个臂的折射率,使探测光 λ_c 经过两臂后干涉相长或相消,相长时输出为“1”,相消时为“0”,这样,就将 λ_s 携带的信息转换到 λ_c 上.

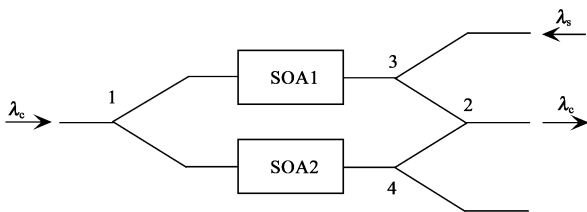


图4 SOA-XPM波长变换器

另一个基于交叉相位调制的典型例子是非线性光纤环镜(Nonlinear optical-loop mirror,简称NOLM)^[6,7],它是利用了Sagnac干涉原理和光纤的非线性效应产生相移而实现波长变换的,结构如图5所示.色散位移光纤(DSF)作非线性介质.连续的探测光从左端口输入,经3dB耦合器分成功率相等但传输方向相反的两束光.没有非线性作用时,两路光

光程相同,传输后在耦合器中干涉,反射回左边输入端口,而右端口无输出.当较强的信号光注入并沿顺时针方向传输时,由于光学克尔(Kerr)效应引起非线性光纤的折射率变化,使得沿同方向传输的探测光相位增加,反方向传输时光因相互作用时间很短,相位变化忽略不计.返回耦合器时,由于两束探测光存在相位差,因此右端口有被调制的 λ_c 输出.非线性光纤环镜波长变换器结构简单,转换速率高,波长变换范围大.但是,需要较长的色散位移光纤,会引起输出脉冲展宽;转换效率低,为了产生非线性效应,要求输入信号的光强很大.

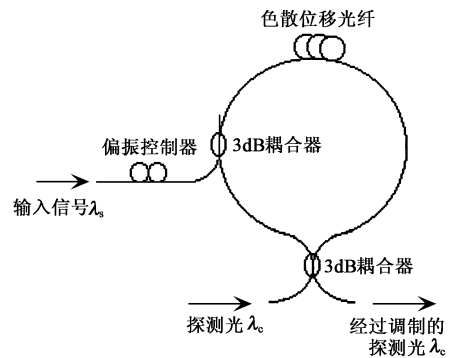


图5 非线性光纤环镜波长变换器

2.3 基于混频效应的波长变换

我们知道,当几个不同频率的强光进入介质时,由于光学非线性效应使它们之间发生能量与动量的转换,产生新频率的光波.新光波的强度与输入光波强度的乘积成正比,相位和频率是几个输入光波的线性组合,所以,混频产生的光波可以保留信号光的振幅和相位信息,是一种严格透明的波长变换方法.而且,转换过程中频率啁啾被反转,长距离传输中可以自动进行色散补偿.另外,它还是唯一一种能够同时将多个输入波长转换为多个输出波长的方法.非线性光学效应可以通过介质的非线性电极化和耦合波方程分析、求解,在波长变换中主要有两个应用:四波混频(FWM)和差频(DFG).

四波混频原理是基于介质的三阶非线性效应.在介质中同时注入一束较强的连续抽运光和一束较弱的信号光,频率分别为 ω_p 和 ω_s ,因非线性作用将产生两个新的光波 $\omega_1 = 2\omega_p - \omega_s$ 和 $\omega_2 = 2\omega_s - \omega_p$,被称为混频光和闲频光,混频光的强度远大于闲频光,并且复制了信号光的振幅和相位信息,这样就实现了波长转换的目的.但是,由于输出光中既有混频光,还有闲频光,闲频光的波长很可能与DWDM系

统中的另一个波长信道重合,当进行多波长变换时就会造成信道间的串扰。

差频变换可以克服四波混频中串扰的问题。差频基于介质的二阶非线性效应,当选取合适的晶轴方向,较强的连续抽运光和较弱的信号光(频率为 ω_p 和 ω_s)注入晶体,将产生一个 $\omega = \omega_p - \omega_s$ 的差频光,同时,信号光携带的信息转换到该频率上来。

目前研究的利用四波混频进行波长变换的器件有半导体光放大器、DFB激光器和光纤。而半导体光放大器具有非线性作用强、转换效率高、信号脉冲相位保持不变、波长变换范围较大等优点,更受人们重视。其缺点是,转换效率依赖于抽运光和信号光的偏振态,并且随转换带宽增大而下降。为了克服偏振问题,采用正交双抽运四波混频方式^[8],图6为此结构示意图。两路波长相同的抽运光偏振态相互垂直,经过两个耦合器与信号光一起输入SOA,在其中进行四波混频,混频光经过滤波器后输出,其他的频率则被滤掉。为了提高信噪比,可以采取波长不同、偏振平行的双抽运方案^[9]。基于激光器和光纤的四波混频因效率较低,研究得相对少些。

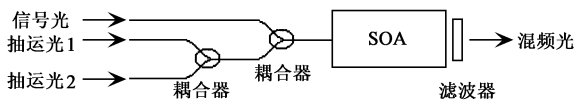


图6 SOA四波混频波长变换器

基于差频效应的波长变换器主要采用 LiNbO_3 或 AlGaAs 材料,可变换的波长范围很宽(达到90nm),并能够实现多个波长同时变换,转换效率高,转换后频谱反转,有利于色散补偿^[1,10]。朗讯公司已研制出 LiNbO_3 波长变换器,从实用化的角度来看,该器件的前景较好。

3 结束语

本文介绍了几种波长变换的原理、方案和所用器件、材料。不论哪种类型,其基本思想都是利用光

学非线性特性。由于激光器和光纤的非线性系数较小,性能难以提高,因此对它们的研究逐渐减少。研究较多的是基于SOA的交叉相位调制和四波混频,SOA-XPM具有啁啾小,转换速率和转换效率高,转换带宽大等优点,研究比较成熟,将干涉臂做成波导与SOA集成在一块芯片上,可以较好地控制两臂差,并提高其工作稳定性。但是,由于它是利用信号光强调制两臂的折射率差,因此对输入光功率有比较严格的要求。SOA-FWM波长变换对调制方式、信号格式完全透明,信号速率高,变换范围大,转换后的频谱也是反转的,可以有效地进行传输系统的色散补偿。 LiNbO_3 -DFG的波长转换器因利用的是二阶非线性效应,转换效率要比SOA-FWM的大,并且不产生闲频光,更有利于WDM系统的多波长变换。但是,因采用了 LiNbO_3 基片,不便于与其他的半导体器件集成。

波长变换器是DWDM全光通信网中解决波路由竞争的关键器件,它吸引着国内外众多的研究人员致力于此项工作。从目前的研究结果看,无论哪种方案都不尽完美,需要人们从中取舍,或研究开发更好的波长变换器。

参 考 文 献

- [1] 辛雨等.物理,2001,30:571[Xin Y *et al.* Wuli(Physics),2001,30:571(in Chinese)]
- [2] Yoos S J B. J. Lightwave Technology,1996,14(6):955
- [3] Teji Durhuus *et al.* J. Lightwave Technology,1996,14(6):942
- [4] 孙学军,张述军等. DWDM传输系统原理与测试.北京:人民邮电出版社,2000.8[Sun X J,Zhang S J *et al.* The Principle and Testing of DWDM Transmitting System. Beijing: People's Post & Telecommunications Publishing House,2000.8(in Chinese)]
- [5] Inoue K,Yoshino M. Electron. Lett.,1996,32(23):2165
- [6] Mortimore D. J. Lightwave Technology,1988,6(7):1217
- [7] Rauschenbach K A *et al.* Photon. Technol. Lett.,1994,6(9):1130
- [8] Zacharopoulos I *et al.* Photon. Technol. Lett.,1998,10(3):352
- [9] Tomkos I,Zacharopoulos I *et al.* Appl. Phys. Lett.,1998,72(5):2449
- [10] Xu C Q *et al.* Appl. Phys. Lett.,1993,63(26):3559