doi:10.3788/gzxb20134209.1009

基于光纤中受激喇曼散射效应的全光多波长 转换耦合器

徐军华",冷斌^b,李栋^c,赵云^c,巩稼民^c,惠战强^c

(西安邮电大学 a. 理学院, b. 通信与信息工程学院, c. 电子工程学院, 西安 710121)

摘 要:基于光纤中受激喇曼散射效应,运用级联同种光纤设计出全光多波长转换耦合器,使转换 输出的各路信号光功率相等.建立了全光多波长转换设计方案的理论模型,给出了设计原理框图以 及实现方法,并以1路泵浦信号光、4 路连续探测光为例,通过 OptiSystem 软件进行了仿真,仿真 结果表明:所设计的全光多波长转换耦合器能同时对4路探测光实现波长转换,转换输出的信号光 码型和输入泵浦信号光码型基本一致;转换效率和消光比随着探测光波长的增大而增大,最大值分 别为-34 dB 和 36.68 dB;Q 因子随着探测光波长的增大而减少,最大值为 128.29;在级联光纤之 后,4 路输出信号光峰值功率和消光比基本相等,Q 因子整体数值相对于全光多波长转换后有所下 降,最大值为 89.5455,验证了该方案的可行性.

关键词:光纤通信;非线性光学;级联光纤;受激喇曼散射;波分复用;全光多波长转换;转换效率;Q 因子

文章编号:1004-4213(2013)09-1009-9

中图分类号:TN929.11 文献标识码:A

All-optical Multi-wavelength Conversion Coupler Based on Stimulated Raman

Scattering in Optical Fiber

XU Jun-hua^a, LENG Bin^b, LI Dong^c, ZHAO Yun^c, GONG Jia-min^c, HUI Zhan-qiang^c

(a. School of Science, b. School of Communication and Information Engineering,

c. School of Electronics Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: Based on stimulated Raman scattering theroy in optical fiber, an all-optical wavelength conversion coupler is designed. The wavelength converter was processed to achieve an equal power in each channel by cascaded optical fiber. All-optical wavelength conversion theoretical model, the design scheme and implemented method are presented. The simulations are calculatated by OptiSystem with a pump signal and 4 continuous probe signals. 4 wavelength converted continuous probe signals and analogous input-output code type are showed as the simulation result. The inceasing conversion efficiency and the growing extinction ratio are presented by the wavelength growth. The maximum conversion efficiency and extinction ratio are -34 dB and 36. 68 dB respectively. The decreasing Q factor is showed with probe signal wavelength gorwth and 128. 29 is the maximum Q factor value. 4 outputs signal light peak power and extinction ratio are approximately the same after cascading the optical fiber. The decreasing Q factor value is presented by cascading the optical fiber and the maximum value is 89. 5455. The feasibility is verified by the scheme.

基金项目:国家自然科学基金(青年基金项目)(No. 61201193)和西安市科技计划项目(No. CX12188)资助

第一作者:徐军华(1963-),女,工程师,主要研究方向为光纤光学和光通信.Email:wulishiyan@xupt.edu.cn

通讯作者:冷斌(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤光学和光通信.Email:leng6610506@sina.com

导 师: 巩稼民(1962-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤光学和光通信. Email: gjm@xupt. edu. cn

收稿日期:2013-05-14;录用日期:2013-08-08

Key words: Optical fiber communication; Nonlinear optics; Cascade fiber; Stimulated raman scattering; Wavelength division multiplexing; All-optical multi-wavelength conversion; Conversion efficiency; *Q* factor

0 引言

随着网络时代的飞速发展,社会对信息的需求 量呈爆炸性增长,急需发展超高速超大容量的光纤 通信系统.密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing,DWDM)技术被认为是提高 通信容量的最有效途径.而全光波长转换器是 DWDM系统、全光网络以及全光交换系统的重要器 件,是实现波长的再次利用和再次分配,充分发挥宽 带资源,提高网络系统容量的必要手段^[1-2].

当前,实现全光波长转换的方法有基于半导体 光放大器的交叉增益调制效应^[3]、交叉相位调制效 应^[4]、交叉偏振调制效应^[5]、四波混频效应^[6];基于 电吸收调制器中交叉吸收调制效应^[7];基于周期极 化铌酸锂波导的级联和频、差频产生效应^[8];基于光 纤的交叉相位调制效应^[9]、四波混频效应^[10]、交叉 偏振调制效应^[11];基于硅纳米线的交叉相位调制效 应^[12]、四波混频效应^[13];基于硫化物波导的交叉相 位调制效应^[14]、四波混频效应^[15];基于碳纳米管基 复合物的四波混频效应^[16]等.

这些全光波长转换方法主要实现把某一波长的 输入光信号转换为另一种波长的输出光信号,即单 对单的波长转换.但高速大容量 DWDM 系统中需 要实现多波长转换.多波长转换器主要用来增加网 络的传输带宽和传输距离,并降低网络扩容成本.多 波长转换器可以使网络容量在不影响原有业务的情 况下迅速成倍地增加,同时提高网络的安全性.本文 运用级联同种光纤设计出一种基于受激喇曼散射效 应(Stimulated Raman Scattering,SRS)的全光多路 波长转换耦合器,不但可以实现一对多路的波长转 换,而且还可以使各路转换输出的信号光功率相等.

1 基于 SRS 的全光多波长转换技术

忽略自发辐射和后向瑞利散射的影响,全光多 波长转换耦合器数学模型的依据为基于光纤中 N 信道前向瞬态 SRS 耦合波方程^[17]

$$\frac{\partial n_i(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{u_i} \frac{\partial n_i(z,t)}{\partial t} = -\alpha n_i(z,t) + \sum_{j=1}^N r_{ij} n_j(z,t) n_i(z,t) \quad (i=1,\cdots,N)$$
(1)

 $n_i(z,t)|_{z=0} = n_i(t) \quad (i=1,\cdots,N)$ (2)

式中n_i(t)为各信道在z=0处、t时刻入射的初始光

子通量,α为线性衰减系数.设*i*信道中光信号的群 速度为*u_i*,*r_{ij}为<i>i*,*j*信道之间光子通量的喇曼增益 系数.在不考虑色散引起的群速度失配条件下,假设 各信道中信号光在光纤中的群速度相同(为*u*),此 时式(1)满足式(2)条件的解析解功率形式为^[17]

$$\begin{cases} p_i(z,t) = p_i(t-z/u) e^{-\alpha z} \frac{p_{\Sigma}(t-z/u)}{\sum\limits_{j=1}^{N} \frac{v}{\nu_j}} p_j(t-z/u) e^{G_{ji}} \\ (i=1,2,\cdots,N) \\ p_i(z,t) = n_i(z,t) h_{\nu_i} \\ p_{\Sigma}(t-z/u)) = \sum\limits_{j=1}^{N} p_j(t-z/u) \frac{v}{\nu_j} \\ G_{ji} = -\frac{k}{\overline{\lambda} M A_e} (\widetilde{\nu}_j - \widetilde{\nu}_i) p_{\Sigma}(t-z/u) L_e \end{cases}$$
(3)

式中 L_e 为光纤中z处的有效互作用距离; A_e 为光 纤的有效截面积; $P_i(t-z/u)$ 为第i信道t时刻在光 纤z处的的光功率; $P_z(t-z/u)$ 表示t时刻光纤中z处的各信道光功率之和; G_{ji} 为第i、j信道之间的增 益; $\overline{\nu}$ 为各信道光波频率的统计平均值, v_j 为第j信 道的光波频率, $\widetilde{\nu}_i$ 为第i 信道频移量,其单位为 cm⁻¹; $\overline{\lambda}$ 为信道波长的平均值,此处它是一个无量纲 量,其大小取单位为 μ m时的值;k为最小二乘拟合 直线的斜率;M为保偏系数且取值范围为1 $\leq M \leq$ 2;h为普朗克常量.

在利用 SRS 放大原理实现全光波长转换时,泵 浦信号光功率远远大于探测光功率,若以第一信道 作为泵浦信号光,探测光依次排列,则式(3)可以简 化为

$$P_i(z,t) = P_i(t-z/u)e^{-\alpha z}e^{-G_{li}}$$
 (i=2,...,N) (4)

$$G_{1i} = -\frac{k}{\lambda_1 M A_e} (\tilde{\nu}_1 - \tilde{\nu}_i) P_1 (t - z/u) \frac{\tilde{\nu}}{\nu_1} L_e$$

(i=2,...,N) (5)

$$L_{\rm e} = (1 - {\rm e}^{-\alpha z})/\alpha \tag{6}$$

由式(4)、(5)可得:在光纤长度和待转换目标波 长确定情况下,G₁₁只随着泵浦信号光功率的变化而 变化.由式(4)得到随泵浦信号光功率变化的增益为 G=e^{-αc-G₁₁}.由于增益随泵浦信号光变化,则其对探 测光的放大倍数将随着泵浦信号光的变化而变化. 这样就相当于利用泵浦光来调制探测光,泵浦光的 能量和信息就会传递到探测光上.因此,引入多路探 测光,将每路调制过的探测光输出,就可以实现多路 波长转换.

1011

2 转换输出光功率相等的设计方案

2.1 方案概述

图 1 为泵浦光波长为 1 455 nm 时康宁非零色 散位移光纤(NZ-DSF)的喇曼增益效率图^[18].由图 1 可知,光纤中的喇曼增益效率在频移小于 440 cm⁻¹时随着频移的增大而增大;在频移大于 440 cm⁻¹时随着频移的增大而减小.





因此,可以在多路波长转换实现了喇曼增益放 大后级联一段补偿光纤,合理地改变补偿部分泵浦 光的波长和光纤长度,前增益后补偿,最终使输出的 信号光功率相等.设计原理框图如图 2.



图 2 全光多波长转换耦合器原理 Fig. 2 Block diagram of all-optical multi-wavelength conversion coupler

采用图 1 所示的 NZ-DSF 光纤进行全光多波长转换及增益补偿.取波长转换部分频移范围为[375,425] cm⁻¹,对应补偿部分频移范围为[490,540] cm⁻¹,利用最小二乘法拟合直线得

 $\gamma_0(\Delta \widetilde{\nu}) = k_1 \Delta \widetilde{\nu} + \gamma_1(\Delta \widetilde{\nu} \in [375, 425] \text{ cm}^{-1})(7)$

 $\gamma_0(\Delta \tilde{\nu}) = k_2 \Delta \tilde{\nu} + \gamma'_1(\Delta \tilde{\nu} \in [490, 540] \text{ cm}^{-1})$ (8) 式中 $k_1 \, k_2$ 分别为波长转换部分和补偿部分的拟合 直线 斜率, $k_1 = 2.0 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \cdot \text{w}^{-1}/\text{ cm}^{-1}$, $k_2 =$ $-8.2 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \text{ w}^{-1}/\text{cm}^{-1}$; γ_1 、 $\dot{\gamma_1}$ 分别为波长转 换部分和补偿部分起始点的喇曼增益效率值 $\gamma_1 = 0.68(\text{km} \cdot \text{w})^{-1}$; $\dot{\gamma_1} = 0.66(\text{km} \cdot \text{w})^{-1}$.

2.2 方案设计分析

在波长转换过程中,由于泵浦光功率远远大于 信号光功率,所以只考虑泵浦光与信号光之间的 SRS效应,忽略信号光之间的 SRS效应.则由式(4) 可推导出光纤中 z 处各信道光功率的表达式为

$$p_i(z,t) = p_i\left(t - \frac{z}{u}\right) e^{-\alpha z} e^{\left[\frac{g_{1i}}{M\Lambda_e}p_p(t - \frac{z}{u})L_e\right]}$$
(9)

式中, g_{1i} 是喇曼功率增益系数, A_e 为光纤的有效截面积.喇曼增益效率和喇曼增益系数之间存在关系 $\gamma_R = g_R / A_e^{[19]}$,相邻信道信号光之间的频移间隔为 v_d ,取信号光等间隔排列,在M=1即在泵浦光为线 偏振光的情况下,式(9)化简为

$$p_{i}(z,t) = p_{i}\left(t - \frac{z}{u}\right) e^{-\alpha z} e^{\left\{\left[\gamma_{1} + (i-1)k_{1}v_{d}\right]p_{p}(t-z/u)L_{e}\right\}}$$
(10)

设两段光纤的长度分别为 L_1 、 L_2 ,两段光纤的 泵浦光波长分别为 λ_p 、 λ'_p ,第 *i* 个信道传输的信号光 的波长为 λ_i ,泵浦光 λ_p 对 λ_i 增益效率为 γ_1 ,泵浦光 λ'_p 对 λ_i 的增益效率为 γ'_1 ,则光纤 L_1 处的输出光功 率为

$$p_{i}(L_{1},t) = p_{i}\left(t - \frac{L_{1}}{u}\right) e^{-aL_{1}} e^{\left\{ [\gamma_{1} + (i-1)k_{1}v_{d}]p_{p}(t - \frac{L_{1}}{u})L_{e} \right\}}$$

$$(i = 1, \cdots, N)$$
(11)

光纤 L₂ 处的输出光功率为

$$p_{i}(L_{2},t) = p_{i}(L_{1},t-\frac{L_{2}}{u})e^{-aL_{2}}e^{\left\{\left[\gamma_{1}^{'}+(i-1)k_{2}v_{d}\right]p_{p}^{'}(t-\frac{L_{2}}{u})L_{e}\right\}}$$

$$(i=1\cdots N)$$
(12)

设计中给出的光纤长度很短,群速度非常大,为 了简便分析,可以忽略时延带来的误差,联立式 (11)、(12)得出输出信号的最终功率为

$$b_i(L_2,t) = p_i(t) e^{-a(L_1+L_2)}$$
 •

 $e^{\{[\gamma_{1}p_{p}(t)L_{e}+\gamma_{1}p_{p}(t)L_{e}]+(i-1)v_{d}[k_{1}p_{p}(t)L_{e}+k_{2}p_{p}(t)L_{e}]\}}$ (13)

由式(13)可知,要实现输出的光功率相等,就要 使得输出功率 $p_i(L_2,t)$ 不随信道数 i和时间 t 的变 化而变化,即输出信号光功率的取值与信道和时间 都无关^[17].按照设计思路,第二段光纤输入的泵浦 光是稳定的,它的功率不随时间而变,为一恒定值 $p'_p(0)$;第一段光纤输入的泵浦信号光在码字为"1" 处的功率值也是一个稳定值为 $p_p(0)$,泵浦信号光 在"0"码字处功率很小可忽略不计,即在一时间段为 "1"码字处时,输出功率 $p_i(L_2,t)$ 不随时间 t 而变 化.要使输出功率 $p_i(L_2,t)$ 不随信道数 i 的变化而 变化,那么就满足 $(i-1)\nu_{\rm d}[k_1P_{\rm p}(0)L_{\rm e}+k_2P'_{\rm p}(0)L'_{\rm e}]=0$ (14)

由式(14)可以看出,通过选取不同种类的光纤、 调节泵浦信号光源的峰值功率、第二段泵浦光的光 功率以及设置两段光纤长度就可以实现增益补偿, 使得输出的信号光功率相等.以 Corning NZ-DSF 为光纤,假设第二段泵浦光的光功率与第一段泵浦 信号光的峰值功率相等,即 $p'_{p}(0) = p_{p}(0),则式$ (14)可简化为

$$k_1 L_{\rm e} + k_2 L' \,{\rm e} = 0 \tag{15}$$

由于两个斜率是给定的,只要通过式(15)就可 以计算出符合要求的两部分光纤长度,从而使不同 信道的转换输出信号光的光功率相等.

3 仿真结果和分析

利用 OptiSystem 仿真软件对该设计模型进行 仿真分析,给定具体参量:总共信道数 n=5,衰减系 数 $\alpha = 0.2$ dB/km;保偏系数 M = 1;探测光功率 $p_i =$ 1×10^{-6} W;泵浦光峰值功率 $p_{\rm p} = p'_{\rm p} = 5$ W; 群速度 $u=2.0\times10^8$ m/s; 光源采用连续激光器,光谱宽度 1 MHz,连续探测光波长依次为 $\lambda_1 = 1538 \text{ nm}, \lambda_2 =$ 1 542 nm、λ₃=1 546 nm、λ₄=1 550 nm;波长转换部 分泵浦波长为λ。=1 455 nm,频移范围为[375,425] cm⁻¹,对应补偿部分频移范围为[490,540] cm⁻¹, 泵浦波长为 λ_{p} =1430.2 nm; 第一段光纤长度 L₁=0.5 km,由式(6)和式(15)可得第二段光纤长 度 L₂≈0.117 km. 耦合器对泵浦光与探测光产生功 率的衰减均忽略不计,光电探测器的响应度设为 1 A/W, 暗电流为 10 Na, 忽略自发辐射噪声和散弹 噪声. 仿真中, 信号利用强度调制产生, 比特序列为 "1010010",速率为 10 Gbit/s.

3.1 全光多波长转换光谱图

全光多波长转换前和转换后的光谱图如图 3. 图 3(a)为转换前泵浦信号光和四路探测光的光谱





Fig. 3 The optical spectrum of the pump signal light and the probe light

图,可以看出泵浦信号光和探测光之间并没有发生 作用,四路探测光的光功率相等;图3(b)为转换后 泵浦信号光和四路探测光的光谱图,可以看出四路 探测光功率明显变大、谱线明显展宽,这说明四路探 测光在经过喇曼放大的同时,也得到了泵浦信号光 所携带的信息.对比图3(a)和图3(b),可以明显看 出全光多波长转换之后,四路探测光的光功率受到 了不同程度的放大,光功率不再相等.

3.2 全光多波长转换后的信号波形图和转换效率 分析

3.2.1 信号波形图和眼图

图 4 为泵浦信号光的波形图.图 5 为四路探测 光在波长转换后输出的信号波形图和眼图.由图 5 可以看出,四路转换后输出信号光的码型与输入泵 浦信号光的码型基本一致,且消光比大,峰峰抖动 小,转换信号眼图清晰,张开度好,说明泵浦信号光 与探测光在光纤中发生受激喇曼效应,泵浦光的能 量和波形传递给了每一路探测光,实现了多路波长 转换.



Fig. 4 The waveform of pumped signal light



3.2.2 转换效率

转换效率是衡量波长转换性能的一个重要参

量. 转换效率定义为 $\eta = 10 \log(P_c/P_s)^{[20]}$,其中 P_c 和 P_s 分别为转换信号光功率和泵浦信号光功率. 四路

探测光在经过波长转换后的转换效率如图 6. 可以 看出随着探测光波长的增加,转换效率也随之增大.



图 6 四路输出信号光的转换效率

Fig. 6 The conversion efficiency of four output signal light

这说明在[0,440]cm⁻¹的频移范围内,随着频移的 增大,喇曼增益变大,从而基于受激喇曼效应进行波 长转换的转换效率也随之增大.

3.3 级联光纤之后输出信号波形图和峰值功率分析3.3.1 信号波形图和眼图

图 7 为级联光纤之后输出信号光波形图和眼 图.由图 7 可以看出,适当选取补偿部分光纤的长 度,四路信号最终的输出信号光功率均在 3.5 dBm 附近,基本相等.而且信号的波形相较于原始输入信 号基本一致,并无太大变化.相应的眼图清晰,张开 度好,说明了这种设计方法是可行的.



(c) The waveform diagram and eye diagram of λ_3 after cascaded fiber





图 7 级联光纤之后输出信号光波形图和眼图

Fig. 7 The waveform and eye diagram of output signal light after cascaded fiber

3.3.2 峰值功率

对比图 5 全光多路波长转换输出的信号波形 图,两部分对应四路输出信号光的峰值功率如图 8.





由图 8 可以清晰地看出,在级联光纤之后,转换 输出的信号光和泵浦光 λ_ρ 在第二段光纤中再次发 生 SRS 效应,探测光被继续放大,输出的信号峰值 功率相对于多波长转换后输出的信号峰值功率呈现 出平坦性,基本实现了输出的光功率相等.说明了利 用级联光纤来设计实现输出光功率相等的 SRS 效 应全光多路波长转换耦合器是可行的.

图 8 中四路信号输出峰值功率的微小差异,是 由以下原因造成:

1)仿真中,波长转换部分的频移范围[375, 425] cm⁻¹,以及在增益谱线图上读取的对应的补偿 部分频移范围[490,540] cm⁻¹不是一个精确值.

2)仿真中,计算补偿部分光纤长度时,波长转换 部分直线斜率 $k_1 = 2.0 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}/\text{cm}^{-1}$ 和 补偿部分直线斜率 $k_2 = -8.2 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \text{W}^{-1}/\text{cm}^{-1}$ 是在相应的频移范围内计算出的拟合直线斜 率,故数值上会产生一定的误差.

3)理论推导中忽略了探测光之间的非线性效应

的影响,但实际中随着频移量的增加,光纤 SRS 放 大作用的增强,每路探测光之间的非线性影响是不 可避免的.

3.4 波长转换后和级联光纤之后的消光比、Q因子 分析

3.4.1 消光比对比分析

研究输出光消光比的特性,可以衡量和评价一 个系统的性能优劣.高输出消光比有利于信号的解 复用和最佳判决,减小系统的误码率,同时也有利于 波长转换器的级联和全光网络中的功率均衡的管 理^[21].探测光在多波长转换后的消光比和级联光纤 之后的消光比如图 9.



图 9 四路输出信号光的消光比 Fig. 9 The extinction ratio of four output signal light

由图 9 可以看出多波长转换后的信号消光比随 着探测光波长的增大而增大,最大消光比为 36.68 dB.级联光纤之后,所得到的消光比均在 33.5 dB 左 右,呈现出平坦性,验证了本方案的可行性.

3.4.2 Q因子分析

由于所设计的多波长转换系统比特率较高,同时,光纤中的非线性效应较强,因此,对于转换信号 质量的表征,以Q因子为判断依据,Q因子是指在 光接收机最佳判决点,信号与噪声的比值,即Q= $(\mu_1 - \mu_0)/(\sigma_1 - \sigma_0)$,其中, μ_1 是"1"电平时的平均电 平, μ_0 是"0"电平时的平均电平, σ_1 和 σ_0 是"1"电平 和"0"电平时的标准方差^[22].

探测光在多波长转换后的Q因子和级联光纤 之后的Q因子如图10.由图10可以看出,多波长转 换后Q因子最大为128.29,级联光纤之后Q因子最 大为89.5455,整体数值都比较大,这是由于在进行 仿真时忽略了噪声的影响,所以系统的整体信噪比 就会很大,Q因子自然而然就会很大.而随着探测光 波长的增大,Q因子自然而然就会很大.而随着探测光 波长的增大,Q因子整体呈现减小的趋势.这是由于 多路探测光在光纤中传输时,相互之间会产生非线 性效应,从而影响信号质量,导致Q因子降低.对比 多波长转换后和级联光纤之后Q因子数值,可以看 出级联光纤之后Q因子数值有所下降,这是由于在 级联光纤之后,转换输出的信号光再次受到所级联 第二段光纤中的衰减、色散和非线性影响,从而导致 信号质量的降低.



图 10 四路输出信号光的 Q 因子 Fig. 10 The Q Factor of four output signal light

4 结论

基于光纤中受激喇曼效应,提出了一种输出光 功率相等的全光多波长转换耦合器的设计方案.通 过仿真验证,探讨了全光多波长转换的转换效率、多 波长转换和级联光纤之后的峰值功率、消光比和 Q 因子.结果表明,所设计的全光波长转换耦合器能同 时对速率为 10 Gbit/s 的 4 路连续探测光实现波长 转换,转换后信号光码型与输入泵浦信号光的码型 基本一致,转换效率和消光比随着探测光波长的增 大而增大,最大转换效率达到-34 dB,最大消光比 为 36.68 dB;Q 因子随着探测光波长的增大而减 小,最大为 128.29.在级联光纤之后,所设计的耦合 器实现了 4 路输出信号光峰值功率和消光比基本相 等,Q 因子数值相较于多波长转换后有所降低,最大 为 89.545 5,信号质量良好,验证了本方案的可行 性.

参考文献

- [1] FANG Nian. All-optical wavelength converter and its application in optical networks [D]. Shanghai: Shanghai University, 2009.
 方捻. 全光波长变换器及其在光网络中的应用研究[D]. 上 海:上海大学,2009.
- [2] YANG Xu-dong, ZENG Qing-ji, LIU Feng-qing, et al. Blocking performance of all-optical networks under dynamic traffic[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(6): 706-709.
 杨旭东,曾庆济,刘逢清,等. 全光网络中动态业务下的阻塞 性能分析(英文)[J].光子学报,2003,32(6):706-709.
- [3] BISCHOFF S, NIELSEN M L, MORK J. Improving the alloptical response of SOAs using a modulated holding signal[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(5): 1303-1308.
- [4] HATTA T, MIYAHARA T, MIYAGAKI Y, et al. Polarization-insensitive monolithic 40-Gbps SOA-MZI wavelength converter with narrow active waveguides [J]. Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13 (1): 32-39.
- [5] FU Song-nian, WAND Min-xue, ZHONU Wen-de, et al. SOA nonlinear polarization rotation with linear polarization maintenance: characterization and applications[J]. Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2008, 14(3): 816-825.
- [6] ZHU Yi-xiao, CHEN He-ming. 40 Gb/s optical 3R-regeneration using FWM in SOA and SPM in HNLF[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(SUP): 49-52.
 朱绎晓,陈鹤鸣.利用 SOA 中 FWM 效应以及高非线性光纤中 SPM 实现 40Gb/s 信号的全光 3R 再生(英文)[J]. 光子学报,2007,36(增刊):49-52.
- [7] NISHIMURA K, INOHARA R, USAMI M, et al. All-optical wavelength conversion by electroabsorption modulator [J]. Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11 (1): 278-284.
- [8] WAND Jian, SUN Jun-qiang, ZHANG Xin-liang, et al. Alloptical tunable wavelength conversion with extinction ratio enhancement using periodically poled lithium niobate waveguides[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26 (17): 3137-3148.
- [9] YI A L, YAN L S, LUO B, et al. Wavelength conversion of RZ-OOK PDM signals based on XPM in highly nonlinear fiber [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(6): 341-343.
- [10] SHAO Xiao-jie, YANG Dong-xiao, GENG Dan. Wavelength conversion based on four2wave mixing in photonic crystal fiber[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(3): 652-655.
 邵潇杰,杨冬晓,耿丹.基于光子晶体光纤四波混频效应的波长转换研究[J].光子学报,2009,38(3):652-655.
- [11] LU G W, CHEN L K, CHAN C K, et al. All-optical tunable wavelength conversion based on cross-polarization modulation in nonlinear photonics crystal fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 41(4): 203-205.
- [12] JALALI B, FATHPOUR S. Silicon photonics [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4600-4615.
- [13] VERMEULEN N, SIPE J E, LEFEVRE Y, et al. Wavelength conversion based on Raman-and non-resonant four-wave mixing in silicon nanowire rings without dispersion engineering [J]. Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(4): 1078-1091.
- [14] LAMONT M R E, TAEED V G, ROELENS M AF, et al. Error-free wavelength conversion via cross-phase modulation in 5cm of As₂S₃ chalco-genide glass rib waveguide [J]. Electronics Letters, 2007, 43(17): 945-947.

- [15] PELUSI M D, TA'EED V U, FU Li-bin, et al. Applications of highly-nonlinear chalcogenide glass devices tailored for high-speed all-optical signal processing [J]. Journal of Selected Topics Quantum Electronics, 2008, 14(3): 529-539.
- [16] CHOW K K, TSUJI M, YAMASHITA S. Single-walled carbon-nanotube-deposited tapered fiber for four-wave mixing based wavelength conversion[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(6): 061104-061104-3.
- [17] GONG Jia-min. Dense wavelength division multiplexing in a quartz optical fiber communication systems stimulated Raman scattering and stimulated Brillouin scattering effect[D]. Xi' an: Xi'an Jiaotong University, 1999.
 巩稼民.密集波分复用石英光纤通信系统中的受激喇曼散射和受激布里渊散射效应[D].西安:西安交通大学,1999.
- [18] LI Kai. Gain-flattened raman fiber amplifier[D]. Xi'an: Xi' an University of Posts and Telecommunications, 2009.
 李凯. 增益平坦的喇曼光纤放大器的研究[D]. 西安:西安邮 电大学,2009.

- [19] ALFREDO Almeida de Araujo, CHRISTIANO J S de Matos. Analysis of raman amplification in a practical, lowloss, photonic crystal fiber[C]. IEEE MTT-S, IMOC 2007: 211-213.
- [20] HUI Zhang-qiang, ZHANG Jian-guo. All-optical format conversion from non-return-to-zero to return-to-zero based on four-wave mixing in photonic crystal fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(1): 242-251.
 惠战强,张建国. 基于光子晶体光纤中四波混频效应的单刀双 非归零到归零码形转换[J]. 物理学报,2012,61(1):242-251.
- [21] ZHU Zhu-qing, WANG Fa-qiang, YIN Kui-xi. Study on signal extinction ratioin WDM-OTDM wavelength conversion
 [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(10): 1245-1251.
 竹青,王发强,殷奎喜. 波分复甩光时分复用波长转换信号的 消光比研究[J]. 中国激光,2004,31(10):1245-1251.
- [22] ZHANG Jun-yi, WU Jian, FENG Chuan-fen, et al. Alloptical logic or gate exploiting nonlinear polarization rotation in an SOA and red-shifted sideband filtering [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(1): 33-35.