

基于 SOA XGM 的波长变换中归零与非归零码的啁啾特性研究

徐郁^{1,2}, 白光富^{1*}, 徐亮¹, 张家豪^{1,3}

¹贵州大学物理学院, 贵州 贵阳 550025;

²中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;

³湖北泰晶科技股份有限公司, 湖北 随州 441300

摘要 对基于半导体光放大器交叉增益调制效应的全光波长转换后的信号啁啾特性进行了分析。通过数值模拟方法研究了归零码和非归零码经过波长变换后的啁啾及波形变化特征,并研究了两种码型信号的啁啾与光功率、信号速率、波长、信号光消光比、码元波形参数、半导体光放大器偏置电流的关系。结果表明,当码元数量较少时,归零码与非归零码相比,信号会有更大的啁啾;上升沿(下降沿)占比小于 10% 信号周期时,转换光波形均会出现明显的过冲(下冲)现象,过冲(下冲)导致了转换光的啁啾峰值大于啁啾谷值;增加偏置电流会缓减过冲现象,同时会增加交叉增益效应,偏置电流在不同阶段对啁啾的影响效果是不同的;增大数据传输速率会使载流子浓度的变化加快,导致啁啾峰值(谷值)增加。光注入下增益峰值红移会使转换光啁啾对参考光波长和信号波长具有敏感性;消光比的变化也会改变半导体光放大器中的载流子浓度,进而影响转换光啁啾;增大参考光功率或者降低信号光功率能够导致啁啾降低。研究结果对基于半导体光放大器交叉增益调制效应的全光波长转换系统的实用化具有重要的意义。

关键词 光学器件; 半导体光放大器; 交叉增益调制; 波长变换; 啁啾; 归零码; 非归零码

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2423001

Chirp Characteristics of Converted Return-to-Zero and Non-Return-to-Zero Signals in SOA XGM Based Wavelength Conversion

Xu Yu^{1,2}, Bai Guangfu^{1*}, Xu Liang¹, Zhang Jiahao^{1,3}

¹College of Physics, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China;

²Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Hubei Taijing Technology Co., Ltd., Suizhou, Hubei 441300, China

Abstract The chirp characteristics of the converted signals in an all-optical wavelength conversion system based on cross gain modulation of a semiconductor optical amplifier are analyzed. By means of numerical simulation, the chirp and waveform changes of a return-to-zero code and a non-return-to-zero code after wavelength conversion are studied. The relationships of the chirp with optical power, signal rate, wavelength, signal extinction ratio, symbol waveform parameters, and bias current of the semiconductor optical amplifier are also studied. The results show that when the number of symbols is small, the return-to-zero code has a larger chirp than the non-return-to-zero code. When the proportion of rising edge (falling edge) is less than 10% of the signal cycle, the converted waveforms of return-to-zero and non-return-to-zero codes both appear obvious the overshoot (down-shoot) phenomenon. The overshoot (down-shoot) causes the chirp peak value of the converted light to be larger than the

收稿日期: 2021-05-25; 修回日期: 2021-06-22; 录用日期: 2021-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(61751102, 61965004)、贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2018]122)、贵州大学 SRT 项目(2017-10)

通信作者: *baiguangfu123@163.com

chirp valley value. Increasing the bias current can reduce the overshoot and enhance the cross gain modulation effect. The effect of bias current on chirp is different at different stages. The increase of data transmission rate accelerates the change of carrier concentration and leads to the enhancement of chirp peak value (valley value). The red shift of the gain peak under light injection makes the chirp sensitive to the reference light and signal wavelengths. The change of extinction ratio can also change the carrier concentration in the semiconductor optical amplifier, which affects the chirp of the converted light. Increasing the reference optical power or decreasing the signal optical power can obtain a lower chirped signal. The results are of great significance to the practical application of an all-optical wavelength conversion system based on the cross gain modulation effect of a semiconductor optical amplifier.

Key words optical devices; semiconductor optical amplifier; cross gain modulation; wavelength conversion; chirp; return-to-zero code; non-return-to-zero code

OCIS codes 230.4110; 250.5980; 130.7405

1 引言

随着多媒体、高清视频、大数据定向传输、大型物联网、智慧协同网络等新型数据业务和网络的出现,近年来人们对大带宽和低延迟网络的需求越来越迫切^[1-3]。为了获得更高的数据传输速率以满足新型数据业务的需求,光波分复用技术(WDM)在光通信网络中得到广泛使用。有研究报道,在密集波分复用技术(DWDM)下,单通道传输速率能够达到 100 TB/s^[4]。然而,随着网络用户和终端数量的增加,因交叉连接中的波长竞争,光通信系统出现的阻塞问题越发严重。因此,很多研究组使用多种波长变换方案来缓解波长竞争,实现波长再利用^[5-7]。传统方案是通过光/电/光(O/E/O)的方式^[5]:先将光信号转换为电信号,再将电信号调制到空闲的光波长上,但该过程受到“电子瓶颈”的限制。为了突破“电子瓶颈”并降低系统的延迟,在光域上实现波长变换的“全光波长变换”方案受到了很多研究组的关注^[6-9]。

半导体光放大器(SOA)作为重要的光子器件,易于与其他半导体器件集成,符合集成化光子系统的发展趋势,基于 SOA 的全光波长变换器一直是波长变换研究领域的热点问题^[10-14]。基于 SOA 的波长变换器可以利用 SOA 交叉增益调制(XGM)、交叉相位调制(XPM)和四波混频(FWM)三种非线性效应实现^[10-12]。与 XPM 和 FWM 相比,基于 SOA XGM 的波长变换器不需要复杂的保偏器件和相位控制器件,结构简单,极大地降低了成本,易于安装和维护^[15]。此外,SOA 的 XGM 有 THz 量级的工作带宽,对于无源光网络系统中的开关(OOK)信号,在波长变换方面具有很大的优势,基于 SOA XGM 的波长变换器是实用的优选方案。但是 SOA 的 XGM 会导致信号产生啁啾,信号在单模光纤传

输过程中,该啁啾将导致光纤色散引起的信号恶化^[16]。因此研究该方案中的信号啁啾特性对该波长变换器的实用化具有重要的意义。

文献[16]研究了探测光输入功率对转换后信号啁啾的影响。文献[17]使用传输矩阵研究了转换后信号的啁啾与 SOA 端面反射、信号光功率、参考光功率、信号光波长和参考光波长的关系。文献[18]进一步研究了信号光输入功率、探测光输入功率对转换后信号啁啾的影响。文献[19]全面地研究了转换后的信号啁啾特性,分析了基于 SOA XGM 的波长变换器中的信号光、探测光的输入功率、中心波长、转换速率、信号光消光比以及 SOA 偏置电流等对转换后信号啁啾的影响。以上研究工作没有讨论码型参数和码型格式对转换后信号啁啾的影响。文献[18-19]采用的波形是三阶超高斯波形,然而在实际系统中,因为占空比、上升沿、下降沿参数的变化,波形将与标准三阶超高斯波形有较大差别。因此,本文通过数值模拟方法,研究了常用的 OOK 信号[归零(RZ)码与非归零(NRZ)码]在基于 SOA XGM 的全光波长变换后的啁啾特性。利用 SOA 中光场同向传输模型,将 SOA 进行分段,并通过龙格-库塔法对行波方程进行求解。通过数值模拟结果,分析了码型参数、码型格式对转换后信号啁啾特性的影响,在此基础上进一步分析了输入信号和转换后信号的啁啾与光功率、信号速率、波长、信号光消光比、SOA 的偏置电流和信号参数的关系。

2 原理分析

假设 SOA 两端面是完全增透的(在交叉增益的系统中,一般 SOA 的端面反射率小于 0.1%^[20],其对交叉增益的影响可以忽略),且信号光和参考光同向传输,则 SOA 中光传输的行波方程^[17,19]为

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial P_i(z, t)}{\partial t} + \frac{\partial P_i(z, t)}{\partial z} = (\gamma g_i - \alpha_{in}) P_i(z, t), \quad (1)$$

式中: $i=1, 2$ 分别为信号光和参考光; P 为光功率; α_{in} 为损耗系数; g 为增益系数; γ 为模式限制因子; v_g 为群速度; z 为光场的位置; t 为时间。(1)式描述了信号光和参考光功率随时间和空间的变化。

假设光脉冲在 SOA 中的群速度 $v_g = 7.5 \times 10^7$ m/s, SOA 有源区长度为 $500 \mu\text{m}$, 则脉冲信号通过 SOA 所需时间是 6.67 ps, 该时间周期对应的信号速率为 150 Gbit/s, 一般波长转换的信号速率为 $2.5 \sim 40$ Gbit/s, 因此脉冲通过 SOA 的时间远小于脉冲周期, 即 $\frac{1}{v_g} \frac{\partial P_i(z, t)}{\partial t} \ll \frac{\partial P_i(z, t)}{\partial z}$ 。

因此, (1)式左边第一项可以忽略, (1)式变为

$$\frac{\partial P_i(z, t)}{\partial z} = (\gamma g_i - \alpha_{in}) P_i(z, t). \quad (2)$$

用 N 表示载流子浓度, V 表示 SOA 有源区的体积, I 表示 SOA 工作电流, e 表示一个电子的电荷量, 电流 I 定义为单位时间通过单位横截面积的总电荷量, 因此 $I/(eV)$ 可表示载流子浓度。由于辐射会消耗一部分载流子, 用 τ 表示自发辐射载流子寿命且 $\tau^{-1} = A + BN + CN^2$, 其中 A, B, C 为常系数。假设自发辐射速率与载流子浓度线性相关, 即可用 $N(z, t)/\tau$ 表示损耗的载流子, 则 SOA 中载流子浓度的方程为

$$\frac{\partial N(z, t)}{\partial t} = \frac{I}{eV} - \frac{N(z, t)}{\tau} - \sum_i \frac{\gamma g_i}{h\omega_i S} P_i, \quad (3)$$

式中: h 为约化普朗克常数; ω_i 为光子圆频率; $h\omega_i$ 为光子能量; S 为 SOA 有源区横截面面积。在受激辐射作用下, SOA 中的载流子浓度不断发生变化, 为了准确地描述 XGM 的物理过程, 我们采用常用的分段模型, 沿 SOA 纵向将其分成 m 段, 假设同一段内的小段内的载流子浓度是均匀的, 设第 j 段平均载流子浓度为 $N_j(t)$ 。为了求得 $N_j(t)$ 随时间的变化情况, (3)式中的光功率 P_i 也要用第 j 段的平均光功率 $\overline{P_{ij}}$ 来表示。在第 j 段中, 信号光和参考光的平均光功率为

$$\overline{P_{ij}} = P_{i,j-1} \frac{e^{Gx} - 1}{Gx}, \quad (4)$$

式中: $G = \gamma g - \alpha$, 其中 α 为线宽增强因子; x 为每段 SOA 的长度; $P_{i,j-1}$ 为第 $j-1$ 段的 SOA 输出的光功率。增益系数 g 是一个关于载流子浓度 N 和波长 λ 的函数^[17]:

$$g(N) = a(N - N_0) + \gamma_1(\lambda - \lambda_N)^2 + \gamma_2(\lambda - \lambda_N)^3, \quad (5)$$

式中: a 为微分增益常数; N_0 为透明载流子浓度; γ_1 和 γ_2 为经验常数, 分别表示 SOA 的增益带宽和增益曲线的不对称性; λ_N 为相应载流子浓度 N 下的峰值增益波长^[17]:

$$\lambda_N = \lambda_0 - \kappa_0(N - N_0), \quad (6)$$

式中: λ_0 是 $N = N_0$ 时的峰值增益波长; κ_0 为增益峰值漂移常数。

有光注入时, 受激辐射会使 SOA 内部的载流子浓度发生变化, 这样就导致折射率不断变化, 因此光的相位也随之变化。转换光的相位沿着光传输方向的变化为

$$\frac{d\varphi}{dz} = -\frac{1}{2} \gamma \alpha g, \quad (7)$$

式中: α 的表达式为

$$\alpha = -\frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{dn}{dN} / \frac{dg}{dN} \right), \quad (8)$$

式中: dg/dN 和 dn/dN 分别表示增益系数和折射率系数随载流子浓度的变化。转换后光信号的啁啾为

$$\Delta\nu = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{4\pi} \gamma \int_0^L \left(\frac{d\alpha}{dz} g + \frac{d\alpha}{dz} \alpha \right) dz, \quad (9)$$

式中: L 为 SOA 长度。

由于实际通信系统中所使用的光源为分布反馈或分布布拉格反射激光器, 线宽很窄, 在 MHz 量级, 而交叉增益的啁啾一般在 GHz 量级, 因此本文不考虑光源的影响。

求解平均载流子浓度以及(1)、(3)式的计算步骤如下: 输入信号光 $P_{1,0}(t)$ 和参考光 $P_{2,0}(t)$ 是初始条件, 先把 $P_{1,0}(t)$ 和 $P_{2,0}(t)$ 代入到(4)式中, 再把(4)式代入(3)式, 此时(3)式只包含一个未知数 $\overline{N_1(t)}$ 。对(3)式用龙格-库塔法进行数值求解, 就可以得到第一段 SOA 中的平均载流子浓度随时间的变化情况, 也就是 $\overline{N_1(t)}$ 。把 $\overline{N_1(t)}$ 代入(1)式, 即可求得信号光和参考光通过第 1 段 SOA 被放大之后的信号光功率 $P_{1,1}$ 和参考光功率 $P_{2,1}$ 。这个 $P_{1,1}$ 和 $P_{2,1}$ 又可以作为第 2 段 SOA 的输入光功率, 如此多次反复就可以求得最后一段 SOA 的输出功率, 也就是经过整个 SOA 放大的光功率。同样地, 在光经过每一小段 SOA 后, 利用(9)式计算啁啾频率的变化, 反复多次就可以得到通过整个 SOA 后光的啁啾。

3 数值计算结果与讨论

我们把半导体光放大器分成 1 段、10 段、20 段、30 段等多种情况,对比计算结果发现,1 段和 10 段的计算结果有很明显的差异,10 段以上与 10 段的计算结果则基本相同。因此,我们在计算时把半导体光放大器分成 10 段,每段 SOA 长度为 $50 \mu\text{m}$ 。使用四阶龙格-库塔法对 (3) 式进行数值求解,码元采样点数为 8192,半导体光放大器的偏置电流为 50 mA ,信号光平均功率为 0,消光比为 10 dB,波长为 1570 nm ,信号速率为 2.5 Gbit/s ,参考光功率为 -10 dBm ,波长为 1550 nm 。由于三阶超高斯函数得到的脉冲形状与实际调制得到的脉冲形状基本相

同,我们以三阶超高斯函数为基本函数构造码元波形,具体的函数形式为

$$y = 1 - \exp[-(t/c)^3], \quad (10)$$

式中: c 为上升沿控制参数。取光强从峰值光强的 10% 上升到峰值光强的 90% 的过程为波形的上升沿过程,对应的时间为上升沿时间,同样取光强从峰值光强的 90% 下降到峰值光强的 10% 的过程为波形的下降沿过程,对应的时间为下降沿时间。使上升沿从 0 开始,使下降沿在一个周期结束时处于 0,中间剩余部分补充为 1。NRZ 码在随机码型出现连 1 时,单个周期的高斯函数不归零。RZ 码无论是否出现连“1”,每个码元时隙都要归零。模拟计算时,相关物理参数如表 1 所示。

表 1 物理参数

Table 1 Physical parameters

Description	Symbol	Value	Unit
SOA length	L	500	μm
Material loss	α_{in}	20	cm^{-1}
Cross-sectional area of active layer	S	0.3	μm^2
Differential gain	a	2.5×10^{-16}	cm^2
Carrier density at transparency	N_0	9×10^{18}	cm^{-3}
Gain constant	γ_1	7.4×10^{18}	m^{-3}
Gain constant	γ_2	3.155×10^{25}	m^{-4}
Gain constant	κ_0	3×10^{-32}	m^4
Differential refractive index	dn/dN	-1.2×10^{-26}	m^4
Electron charge	e	1.6×10^{-19}	C
Current	I	50	mA
Non-radiative recombination constant	A	1×10^8	s^{-1}
Bimolecular recombination constant	B	2.5×10^{-11}	$\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Auger recombination constant	C	0.94×10^{-28}	$\text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$
Group velocity	v_g	7.5×10^7	ms^{-1}
Confinement factor	γ	0.3	

3.1 NRZ 码和 RZ 码波形参数对啁啾的影响

图 1 为 NRZ 码和 RZ 码信号光的输入波形、转换光输出波形和转换光啁啾,我们选取了全部周期中的 10 个周期。由图 1 可知,交叉增益调制效应使输入信号光与转换光反相,转换光的上升沿有正啁啾,下降沿有负啁啾。由 (8) 式可知,该结果是由于在上升沿和下降沿阶段,载流子浓度变化导致 SOA 中的折射率发生变化。转换光波形与输入信号光的波形相比,上升沿和下降沿变得不对称,转换光上升沿有明显的过冲(over shoot)现象,下降沿则有明显的下冲(under shoot)现象。这是由于转换光处于上升沿时获得较大的 SOA 增益,而光子寿命小于

载流子寿命,光子在上沿期间经历短暂的过冲后趋于平稳,波形上表现出过冲现象;在下降沿阶段,转换光的增益逐渐不占优势,由于光子寿命小于载流子寿命,进而出现下冲现象。受过冲和下冲的影响,在相同上升沿时间和下降沿时间下,上升沿功率的变化大于下降沿功率的变化,相应地,上升沿的峰值啁啾也略大于下降沿的谷值啁啾,峰值约为 6.26 GHz ,谷值约为 -5.92 GHz 。该结果与文献 [10] 的实验结果及理论分析结论是一致的,这也说明我们的理论是正确的。下面我们进一步研究上升沿占比(上升沿时间与码元周期的比值)和下降沿对啁啾峰值和谷值的影响。

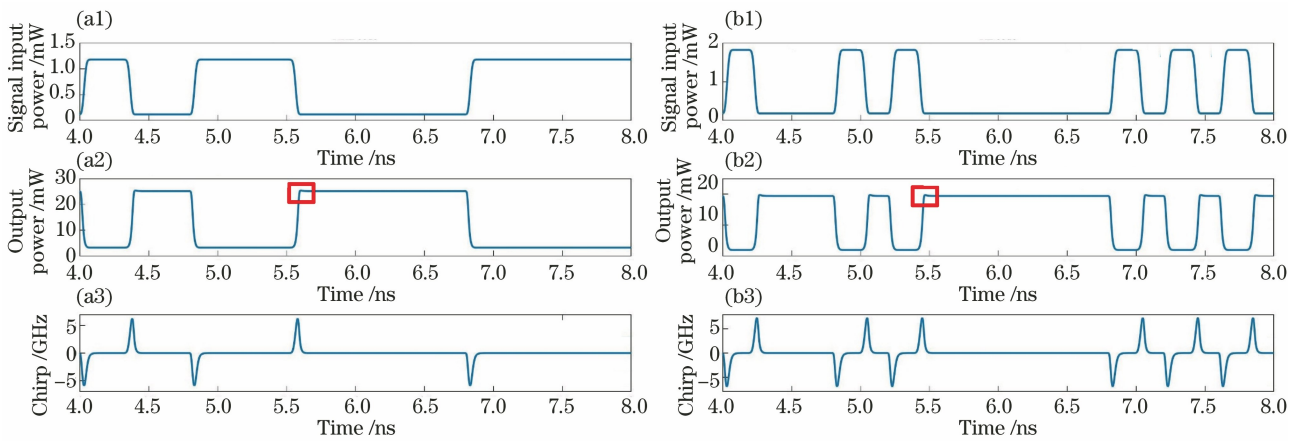


图 1 不同信号光的输入波形、转换光输出波形和转换光啁啾。(a1)(a2)(a3) NRZ 码;(b1)(b2)(b3) RZ 码

Fig. 1 Input waveforms of different signals and output waveforms and chirps of different converted signals.

(a1)(a2)(a3) NRZ code; (b1)(b2)(b3) RZ code

图 2(a)、(b)为波长变换后 NRZ 码和 RZ 码的啁啾峰值和谷值随上升沿占比的变化情况。图 3 是上升沿占比为 0.06 时信号光的输入波形、转换光输出波形及转换光啁啾,图 4 是上升沿占比为 0.18 时信号光的输入波形、转换光输出波形及转换光啁啾。从图 2(a)、(b)可以看出,两种码型信号光的啁啾峰值和谷值都随上升沿占比的增大而减小。这是由于在峰值功率不变的情况下,增大上升沿占比,上升沿和下降沿的功率变化趋于变缓,减缓了过冲现象(对比图 3 和图 4 可以看出,上升沿占比为 0.18 时,过冲现象已经变得不明显),从而峰值啁啾和谷值啁啾均减小;在同一上升沿占比情况下,RZ 码的啁啾峰值和谷值均比 NRZ 码的大,传输速率越大,其差别越明显。图 2(c)、(d)为波长变换后 NRZ 码和 RZ 码

码的啁啾峰值和谷值随速率的变化情况,两种码型的啁啾峰值都随速率的增加而增加。这是因为速率越大, dN/dt 就越大,所以转换后信号光的啁啾峰值越大。该结果与文献[21]报道的实验结果吻合。在文献[21]中,当字节内随机码元小于 64 时(本文使用的码元数量是 32 个),两种码型信号误码率(BER)维持 10^{-10} 所需的功率不一样,RZ 码比 NRZ 码多 0.5 dB 以上的功率亏损。需要说明的是,码元数量也会对啁啾产生影响(由于文献[19]已经对该问题进行了研究,这里只在该结论的基础上进行分析)。如果码元数量增加,其对 RZ 码信号的啁啾影响几乎不变,但对于 NRZ 码来说,增加码元数量会导致连“1”的数量增多,进而增大啁啾。因此,当码元个数增加时,NRZ 码的啁

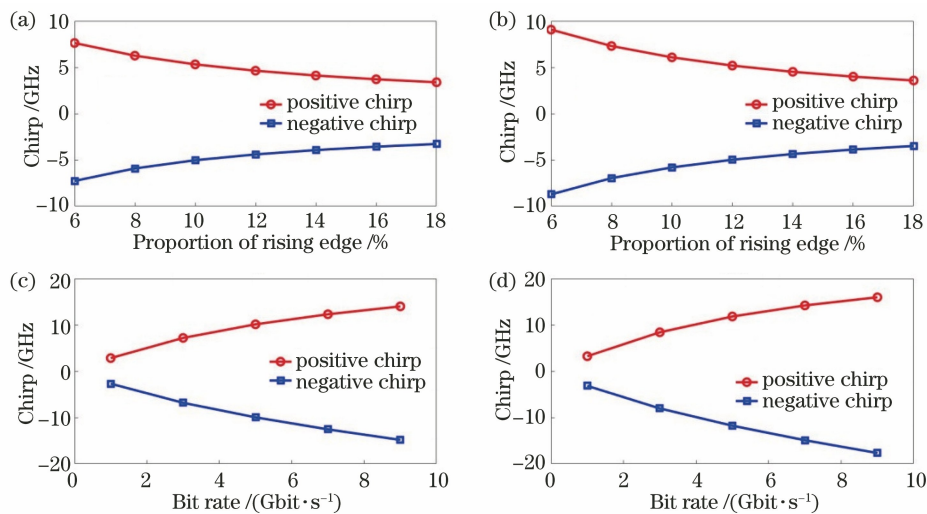


图 2 不同信号光的啁啾峰值和谷值随上升沿占比和速率的变化情况。(a)(c) NRZ 码;(b)(d) RZ 码

Fig. 2 Chirp peak and valley versus proportion of rising edge or bit rate for different signals.

(a)(c) NRZ code; (b)(d) RZ code

啾会大于 RZ 码的啾,最后导致 NRZ 码的功率亏损大于 RZ 码的功率亏损。由文献[21]可以看出,当码元个数达到 2^9 时, BER 维持在 10^{-10} ,

NRZ 码的功率亏损比 RZ 码的功率亏损大 2 dB,随着码元数量的增加,这种功率亏损的差值会更大。

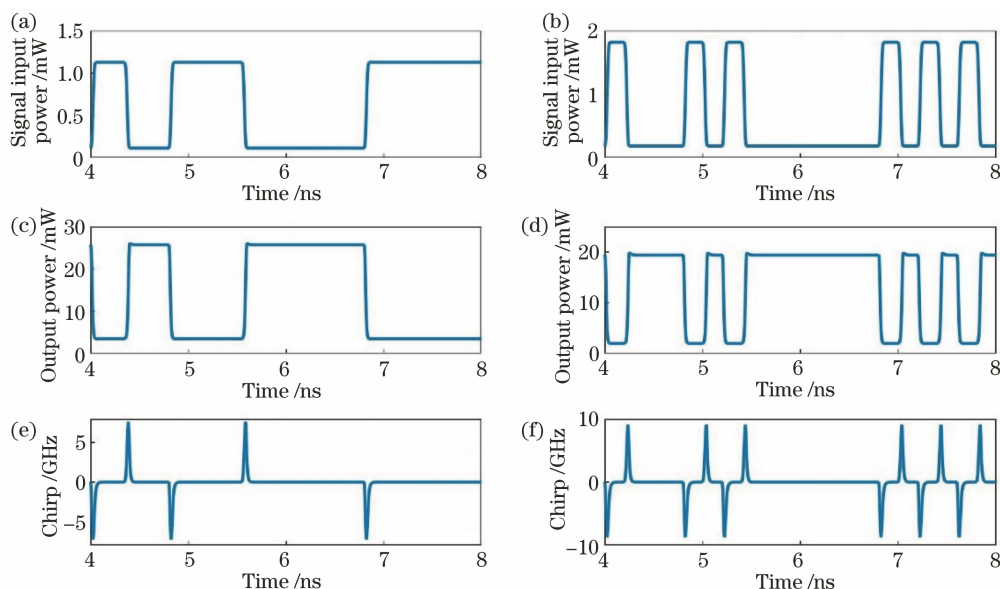


图 3 上升沿占比为 0.06 时不同信号光的输入波形、转换光波形及转换光啾随时间的变化。

(a)(c)(e) NRZ 码; (b)(d)(f) RZ 码

Fig. 3 Waveform of input signal and waveform and chirp of converted signal versus time at rising edge ratio of 0.06.

(a)(c)(e) NRZ code; (b)(d)(f) RZ code

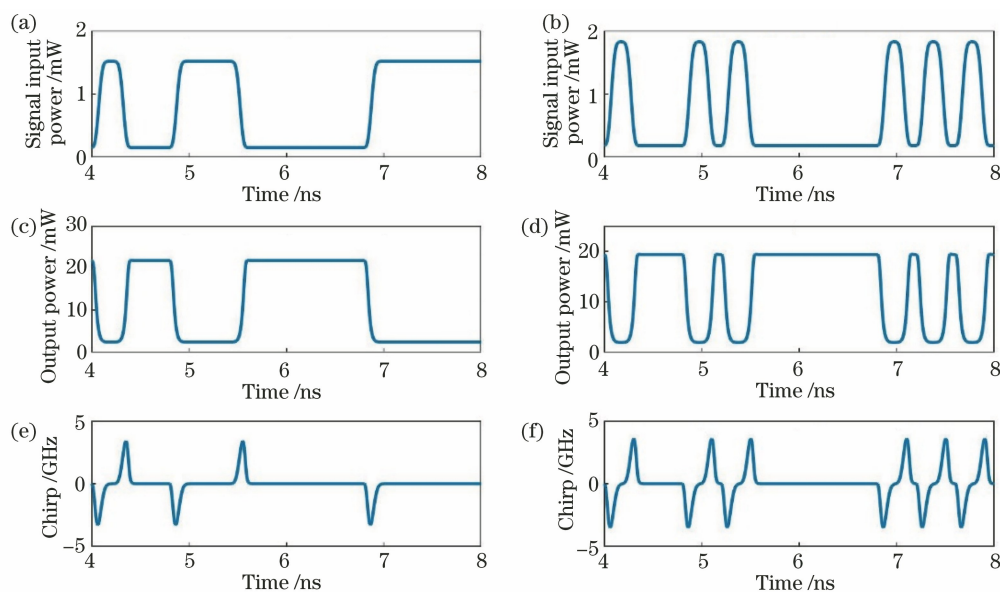


图 4 上升沿占比为 0.18 时不同信号光的输入波形、转换光波形及转换光啾随时间的变化。

(a)(c)(e) NRZ 码; (b)(d)(f) RZ 码

Fig. 4 Waveform of input signal and waveform and chirp of converted signal versus time at rising edge ratio of 0.18.

(a)(c)(e) NRZ code; (b)(d)(f) RZ code

3.2 光学参数对转换光啾的影响

3.2.1 转换光啾与波长的关系

图 5 为 NRZ 码、RZ 码转换光的啾随信号光波长和参考光波长的变换情况(改变信号光波长时,

参考光波长固定为 1550 nm;改变输入连续光波长时,信号光波长固定为 1570 nm)。在参考光波长固定的条件下,当信号光波长小于 1560 nm 时,NRZ 码转换光啾的峰值和谷值均随信号光波长的增加

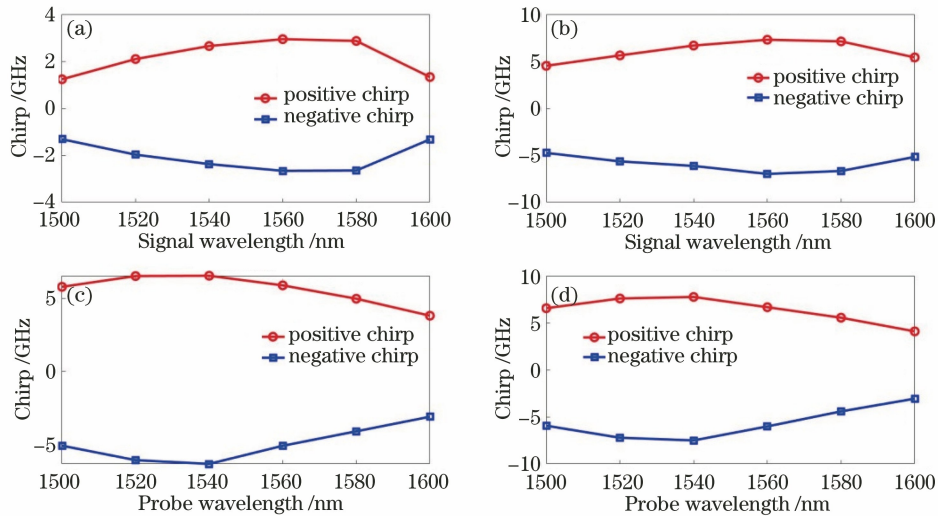


图 5 转换光的啁啾峰值和谷值随信号光波长和参考光波长的变换情况。(a)(c) NRZ 码;(b)(d) RZ 码

Fig. 5 Chirp peak and valley of converted signal versus wavelength of signal or reference light.

(a)(c) NRZ code; (b)(d) RZ code

而增大,当信号光波长为 1560 nm 时,啁啾峰值和谷值达到最大值,接着又随波长的增加而减小。这主要是因为光注入时,SOA 载流子增益峰值会出现红移现象。当信号光平均功率不变,光波长增加时,信号光注入的光子数变多,消耗载流子的能力增强,载流子浓度的变化加剧,啁啾值会增大,当信号光波长大于 1560 nm 时,由于偏离了 SOA 增益峰值对应的波长位置,红移的载流子增益峰值逐渐变小,载流子浓度的变化趋于平缓,啁啾又逐渐减小。当信号光波长固定时,转换光啁啾峰值和谷值均随参考光波长的增大而先减小后增大,参考光波长为 1550 nm 时啁啾峰值和谷值达到最小,考虑到在本文给出的参数条件下,SOA 的最大增益在 1540 nm 附近,此时的参考光具有最大增益。当参考光波长趋近于 1540 nm 时,由于在信号“0”时,信号光和参考光的增益饱和效应较弱,参考光与信号光的“0”时隙光强也基本处于同量级,消耗的载流子始终维持在同一个水平,这导致载流子的浓度没有发生剧烈变化,当信号光的上升沿或下降沿到来时,参考光消耗载流子的能力比其它波长位置处强,对载流子的剧烈变化有一定的抵抗作用,因此啁啾峰值和谷值处于极小值。当参考光波长偏离最大增益位置时,其抵抗载流子变化的能力逐渐减弱,啁啾峰值和谷值逐渐增大。因此,改变参考光和信号光的波长,使其偏离 SOA 增益峰值位置,进而会影响信号的啁啾,该结果已被实验证实^[18]。但参考光比较弱,其对载流子浓度变化的影响还是有限的,因此改变参考光波长

时的啁啾变化并不如改变信号光波长时明显,即改变信号光的功率更容易获得最小的啁啾值,进而将色散对信号的影响降到最小。

当信号光波长为 1570 nm 时,RZ 码的最小啁啾峰值和谷值出现在 1540 nm 位置处,与 NRZ 码相同,但是当参考光波长为 1550 nm 时,最大啁啾峰值和谷值出现在 1540 nm 处,这可能是由于时钟信号减缓了红移,最大啁啾出现在更短波长的位置。为了获得更小的啁啾,信号光波长需要偏离最佳增益位置,这与 NRZ 码有明显不同。由图 5 也可以看出,与 NRZ 码相比,RZ 码的转换光啁啾峰值和谷值更大,在光纤中传输时,更容易受到色散的影响。需要强调的是,随着字节长度变长,由于连“1”码元的出现,NRZ 码的啁啾会大于 RZ 码的啁啾,这可以从前面的讨论看到。

3.2.2 转换光啁啾与信号光消光比的关系

消光比表示“1”状态时的光功率与“0”状态时的光功率之比。图 6 为 NRZ 码和 RZ 码的转换光啁啾峰值和谷值随信号光消光比的变化情况。从图 6 可以看出,两种码型信号光的啁啾峰值都随信号光消光比的增加而增加。这是因为在平均光功率不变的情况下,消光比越大,状态“1”的功率越大,状态“0”的功率越小,受增益饱和效应和载流子竞争机制的影响,信号光在状态“1”时消耗的载流子数量比在状态“0”时更多,所以消光比越大,dN/dt 就越大,转换后信号光的啁啾峰值越大。当消光比增大到一定程度时,载流子已经处于较低水平,光功率的变化幅度趋于平缓,所以啁啾的变化也变缓,表现为斜率变小。

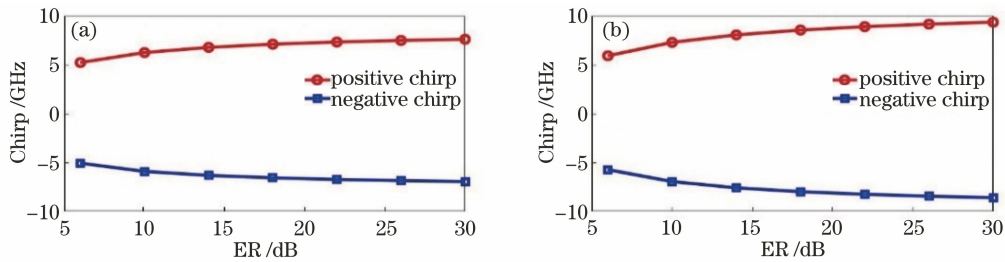


图 6 转换光啁啾随输入信号光消光比的变化情况。(a) NRZ 码;(b) RZ 码

Fig. 6 Chirp of converted signal versus extinction ratio of input signal. (a) NRZ code; (b) RZ code

3.2.3 转换光啁啾与功率的关系

图 7 为波长变换后 NRZ 码、RZ 码转换光的啁啾随信号光功率和参考光功率的变换情况(改变信号光功率时,参考光的输入功率固定为 -10 dBm,改变参考光输入功率时,信号光的功率固定为 0)。从图 7 (a)、(b)可以看出,两种码型信号的啁啾峰值都随信号光功率的增加呈上升趋势。这是由于信号光功率越大,信号光消耗载流子的速率越快,载流子浓度的变化越大,因此转换后信号光的啁啾峰值越大。当信号光功率增大到 10 dBm 时,啁啾开始变小,这是由于信号光太强,交叉增益已经不明显。从图 7(c)、(d)可

以看出,两种码型信号光的啁啾峰值都随参考光功率的增加呈下降趋势。这是由于参考光功率越大,参考光消耗的载流子数量就越多,信号光消耗的载流子数目降低,信号光的功率变化变缓,从而啁啾峰值和谷值降低。同时也要注意,参考光降低 30 dB,啁啾增大 7 GHz 左右,而信号光增大 30 dB,啁啾增大 10 GHz。这表明尽管增大参考光功率或者降低信号光功率都能够降低啁啾,但同时会使交叉增益效应变弱,进而降低转换后信号的消光比,致使信号的误码率增加。因此,在通过改变参考光和信号光来降低啁啾时,还要考虑到消光比对误码率的影响。

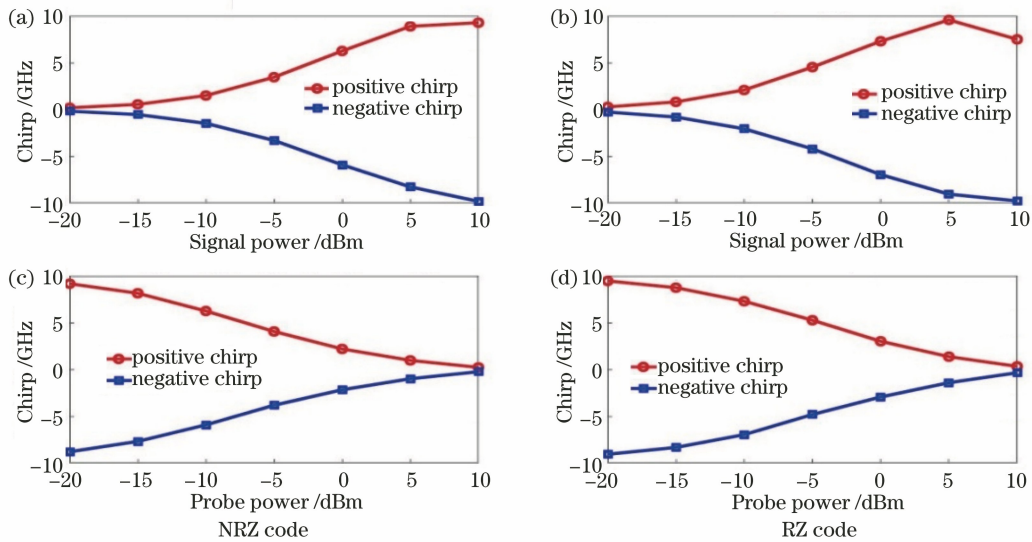


图 7 啁啾随信号光功率和参考光功率的变化情况

Fig. 7 Chirp versus signal or reference optical power

3.3 转换光啁啾与 SOA 偏置电流的关系

图 8 为 RZ 码和 NRZ 码信号光的啁啾峰值和谷值随 SOA 偏置电流的变化情况。从图 8 可以看出, NRZ 码和 RZ 码信号光的啁啾谷值都随偏置电流的增大而先减小后增大,在偏置电流为 100 mA 时达到最小值,这主要由两个因素共同决定。我们知道偏置电流增大会使信号光得到更大的增益,这会对载流子密度有更大的调制,引起啁啾增

强。当偏置电流小于 100 mA 时,虽然增大偏置电流会增大啁啾,但是增大偏置电流会使载流子更充分,会缓解过冲(或下冲),从而使过冲引起的啁啾减小,由于此时过冲引起的啁啾占主导,因此啁啾是逐渐变小的。当偏置电流大于 100 mA 时,过冲得到充分缓减,调制作用增强引起的增大的啁啾逐渐占主导,啁啾峰值又慢慢变大,但增大偏置电流并没有显著增强调制作用。该结论与文

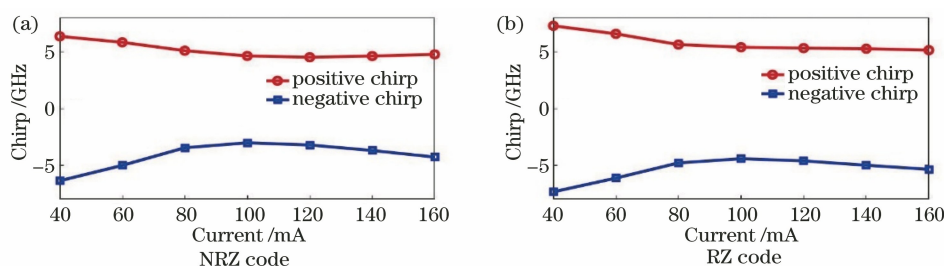


图 8 啁啾随 SOA 偏置电流的变化

Fig. 8 Chirp versus SOA bias current

献[10]的实验结果是一致的,在文献[10]中,当偏置电流从 100 mA 增大到 300 mA 时,波形没有显著变化,这说明过冲现象已经被充分抑制。

4 结 论

对基于 SOA XGM 的全光波长转换系统方案中 RZ 码和 NRZ 码的转换光波形和啁啾特性进行了理论分析,并使用龙格-库塔方法对模型进行了数值模拟。结果表明,当字节长度小于 64 时,与非归零码相比,归零码会有更大的啁啾;当上升沿占比和下降沿占比小于 10% 信号周期时,RZ 和 NRZ 码的转换光波形均会出现明显的过冲(下冲)现象,过冲(下冲)导致转换光的啁啾峰值大于啁啾谷值;增加偏置电流会缓减过冲现象,同时会增加 XGM 效应,在不同阶段对啁啾的影响效果是不同的;同时,增大数据传输速率会使载流子浓度的变化加快,导致啁啾峰值(谷值)增加。光学参数对转换光啁啾的影响也很明显,光注入下增益峰值红移会使转换光啁啾对参考光和信号波长具有敏感性;消光比的变化也会改变 SOA 中载流子浓度的变化,进而影响转换光啁啾;增大参考光功率或者降低信号光功率能够降低啁啾,但是增大参考光功率或降低信号光功率会使交叉增益效应变弱,进而降低转换后信号的消光比,致使信号的误码率增加。以上结果对基于 SOA XGM 的全光波长转换系统的参数设置具有一定的参考价值,对该波长变换器的实用化具有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] Pea R D, Mills M I, Hoffert E, et al. Methods and apparatus for interactive map-based analysis of digital video content: US8645832[P]. 2014-02-04.
- [2] Su C R, Chen J J, Chang K L. Content-based image retrieval on reconfigurable peer-to-peer networks[C]// 2013 International Symposium on Biometrics and Security Technologies, July 2-5, 2013, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2013: 203-211.
- [3] Kim S M, Han D H, Lee Y S, et al. Combined cognitive behavioral therapy and bupropion for the treatment of problematic on-line game play in adolescents with major depressive disorder [J]. Computers in Human Behavior, 2012, 28(5): 1954-1959.
- [4] Cheng T H, Yeo Y K, Wang Y X, et al. Design of a 100 Tb/s multicast-capable optical packet router (invited) [C] // 2010 International Conference on Communications and Mobile Computing, April 12-14, 2010, Shenzhen, China. New York: IEEE Press, 2010: 18-22.
- [5] Yoo S J B. Wavelength conversion technologies for WDM network applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(6): 955-966.
- [6] Hajomer A A E, Presi M, Andriolli N, et al. On-chip all-optical wavelength conversion of PAM-4 signals using an integrated SOA-based turbo-switch circuit[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(16): 3956-3962.
- [7] Rocha P, Sutuli T, Rossi S M, et al. Penalty-free semiconductor optical amplifier wavelength conversion of 32-GBd 4-QAM optical carriers[C]// 2019 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC), October 7-9, 2019, Sao Paulo, Brazil. New York: IEEE Press, 2019: 1-4.
- [8] Han B C, Yu J L, Zhang L T, et al. Reconfigurable all-optical logic gates with not-inverted data technique by using single semiconductor optical amplifier [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9): 2367-2371. 韩丙辰, 于晋龙, 张立台, 等. 利用单个半导体光放大器实现非反转归零码的可重构全光逻辑门[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2367-2371.
- [9] Wu C Q. Interaction of two light beams in semiconductor optical amplifier and its applications for all-optical signal processing (II) [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(11): 12-17. 吴重庆. 半导体光放大器的光-光互作用及在全光信

- 号处理中的应用(II)[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(11): 12-17.
- [10] Asghari M, White I H, Pentyl R V. Wavelength conversion using semiconductor optical amplifiers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(7): 1181-1190.
- [11] Dong J J, Zhang X L, Huang D X. Experimental and theoretical study on gain dynamics of SOA[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(2): 763-767.
董建绩, 张新亮, 黄德修. SOA 动态增益特性的理论和实验研究[J]. 物理学报, 2005, 54(2): 763-767.
- [12] Contestabile G, Maruta A, Sekiguchi S, et al. 80 Gbit/s multicast wavelength conversion by XGM in a QD-SOA [C] // 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication, September 19-23, 2010, Turin, Italy. New York: IEEE Press, 2010: 1-3.
- [13] Fu S N, Dong J J, Shum P, et al. Experimental demonstration of both inverted and non-inverted wavelength conversion based on transient cross phase modulation of SOA [J]. Optics Express, 2006, 14(17): 7587-7593.
- [14] Contestabile G, Presi M, Ciaramella E. Multiple wavelength conversion for WDM multicasting by FWM in an SOA [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(7): 1775-1777.
- [15] Lee K, Lim S D, Jhon Y M, et al. Broadcasting in colorless WDM-PON using spectrum-sliced wavelength conversion [J]. Optical Fiber Technology, 2012, 18(2): 112-116.
- [16] Zheng X Y, Guan K J, Ye P D. Chirp characteristics of a wavelength converter based on XGM in semiconductor optical amplifier[J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(11): 69-72.
郑学彦, 管克俭, 叶培大. 基于半导体光放大器交叉增益调制的全光波长变换器啁啾特性分析[J]. 电子学报, 1998, 26(11): 69-72.
- [17] Lee H, Yoon H, Kim Y, et al. Theoretical study of frequency chirping and extinction ratio of wavelength-converted optical signals by XGM and XPM using SOA's [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1999, 35(8): 1213-1219.
- [18] Willner A E, Shieh W. Optimal spectral and power parameters for all-optical wavelength shifting: single stage, fanout, and cascability [J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(5): 771-781.
- [19] Ye Y B, Zheng X P, Zhang H Y, et al. Chirp performance of converted signal in wavelength conversion based on cross-gain modulation in SOA [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(4): 436-440.
叶亚斌, 郑小平, 张汉一, 等. 基于半导体光放大器中交叉增益调制效应的波长转换啁啾特性的分析[J]. 光学学报, 2002, 22(4): 436-440.
- [20] Adams M J, Collins J V, Henning I D. Analysis of semiconductor laser optical amplifiers [J]. IEE Proceedings J—Optoelectronics, 1985, 132(1): 58-63.
- [21] Li Z H, Dong Y, Lu C, et al. Comparison of cross-gain modulation effect of Manchester-duobinary, RZ-DPSK, NRZ-DPSK, RZ, and NRZ modulation formats in SOAs [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(24): 2680-2682.