

# 基于多电极单端耦合半导体光放大器的 交叉增益调制型波长转换器<sup>\*</sup>

李培丽<sup>1,2)†</sup> 黄德修<sup>1)</sup> 张新亮<sup>1)</sup> 朱光喜<sup>2)</sup>

1) 华中科技大学武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

2) 华中科技大学电子信息与工程系, 武汉 430074)

(2005 年 11 月 10 日收到, 2005 年 11 月 22 日收到修改稿)

提出了一种新型的基于多电极单端耦合半导体光放大器(SOA)的交叉增益调制(XGM)型波长转换方案,并建立了这种波长转换器完整的宽带理论模型.通过数值模拟的方法,比较了基于多电极单端耦合 SOA 的 XGM 型波长转换和基于单电极单端 SOA 的 XGM 型波长转换的输出特性.结果表明前者的输出消光比优于后者,而且啁啾特性也略有改善.

关键词:多电极,波长转换,单端耦合半导体光放大器,交叉增益调制,消光比,啁啾

PACC:4265K,4265M,4255P

## 1. 引 言

全光波长转换器可以解决多节点复杂的高速波分复用(DWDM)网络中波长阻塞和波长竞争等问题,是全光通信系统及未来宽带网络中必不可少的关键器件之一<sup>[1,2]</sup>.实现全光波长转换的方法有很多种,而基于半导体光放大器(SOA)的交叉增益调制(XGM)型波长转换器具有结构简单、转换效率高、波长转换范围宽、对偏振不敏感等优点<sup>[3-6]</sup>,一直是研究的热点.但 XGM 型波长转换器的最大缺点就是输出消光比退化问题,尤其在波长上转换时更为严重.文献 7)中实现了一种基于单端耦合 SOA 的 XGM 型波长转换,改善了输出消光比特性.文献 8)对这种波长转换器的啁啾特性进行了理论研究.本文在这种方案的基础上,提出了基于多电极单端耦合 SOA 的 XGM 型波长转换方案.利用多电极来实现电流的非均匀注入,优化了 SOA 有源区中的载流子分布,从而提高了其输出消光比;并且考虑了 SOA 的材料增益谱、载流子的空间分布、光场的纵向分布和宽带自发辐射,建立了这种波长转换器完整的宽带理论模型;利用宽带理论模型,通过数值模拟的方

法,比较了这种波长转换和基于单电极单端半导体光放大器的交叉增益调制型波长转换的输出特性,结果表明前者的输出消光比特性优于后者.

## 2. 原 理

文献 7)中 XGM 型波长转换器采用的单端耦合 SOA 是单电极的,电流为均匀注入方式;SOA 的输入、输出共用一个端口,后端面具有适当的反射率.图 1 给出了当信号光平均功率为 -20dBm、探测光功率为 -30dBm 时,这种波长转换器的 SOA 有源区中的载流子分布.从图中可以看出,载流子浓度沿 SOA 腔长方向分布是不均匀的,从 SOA 的后端面到前端面,载流子浓度越来越小.这主要是因为光波在 SOA 中传输时不断被放大而消耗载流子,到达后端面时光强已经比较强,由后端面反射回前端面的过程中又消耗了大量载流子,最后光功率增大到载流子浓度不足以再维持其放大,就发生了增益饱和效应.因此,设想将电流由均匀注入改为前面大后面小的非均匀注入,则 SOA 的前面部分载流子浓度比较大,可以使光在 SOA 中传输时能充分利用载流子,不容易发生增益饱和,提高增益,从而改善输出特

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展规划(批准号:G2000036605)、国家高技术研究发展计划(批准号:2002AA312160)和武汉市青年晨光人才计划(批准号:2003500201602)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: lplthl@sohu.com

性.多电极 SOA 就是实现非均匀注入电流的一种最简单方法.因此,本文提出了基于多电极单端耦合 SOA 的 XGM 型波长转换方案.

图 2 是基于多电极单端耦合 SOA 的 XGM 型波长转换器的结构示意图. SOA 是多电极、单端耦合的 SOA,各电极之间电绝缘,SOA 被分为多节结构,各节的长度和电流可以根据需要灵活调节,本文采用的是两电极 SOA.信号光和探测光通过耦合器经环形器的 2 端口输入到多电极单端耦合 SOA 中,在 SOA 中发生 XGM 效应,探测光上就携带有与输入信号光反相的信息,经 SOA 反射端反射回来,从输出端口经环形器的 3 端口输出.

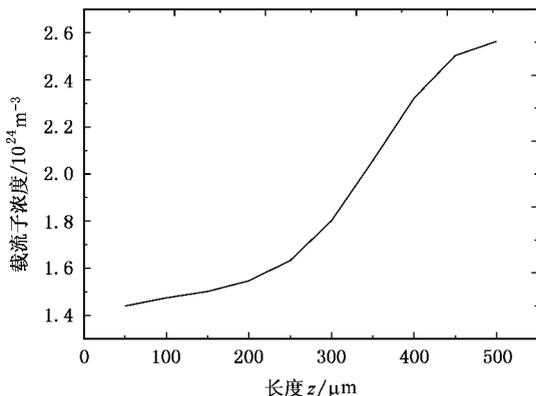


图 1 单端耦合 SOA 中的载流子浓度的空间分布

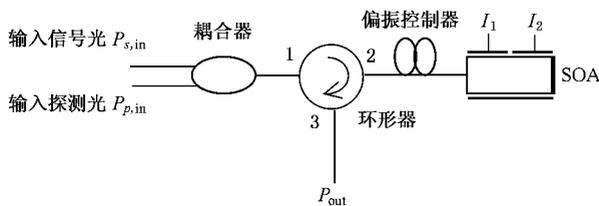


图 2 基于多电极单端耦合 SOA 的 XGM 型波长转换器的结构示意图

### 3. 理论模型

本文考虑了 SOA 的材料增益谱、载流子的空间分布、光场的纵向空间分布和宽带自发辐射,建立了完整的基于多电极单端耦合 SOA 的 XGM 型波长转换器的宽带理论模型.由于载流子浓度在 SOA 中的分布是不均匀的,因此对 SOA 进行分段,即将整个 SOA 看成由  $n$  个子段串连而成,当  $n$  足够大时,可

近似认为在这些子段中载流子浓度的分布是均匀的.在子段  $i$  中,信号光和转换光的传输可由下式描述:

$$\pm \frac{\partial P_{j,i}^{\pm}(z,t)}{\partial z} = [\Gamma(g_{j,i}(N) - \alpha_1) - \alpha_2(1 - \Gamma) - \alpha_3] P_{j,i}^{\pm}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi_{j,i}(z,t)}{\partial z} = -\frac{1}{2} \Gamma \alpha g_{j,i}(N), \quad (j = p, s) \quad (2)$$

其中  $\Gamma$  为模场限制因子,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  和  $\alpha_3$  分别为 SOA 的损耗系数,  $\alpha$  为线宽增强因子,  $g_{j,i}(N)$  为 SOA 的材料增益,由密度矩阵可以推导出其理论表达式为<sup>[9,10]</sup>

$$g(\nu, N) = \frac{e^2 |M|^2}{4\pi^2 \epsilon_0 m_0^2 c n_g \nu} \left( \frac{8\pi^2 m_c m_{hh}}{h^2 (m_c + m_{hh})} \right)^{3/2} \times (h\nu - E_g)^{1/2} [f_c(\nu) + f_v(\nu) - 1], \quad (3)$$

其中  $|M|^2$  为动量矩阵,  $e$  为电子电荷量,  $h$  为普朗克常量,  $\epsilon_0$  为真空中介电常数,  $m_0$  为自由电子质量,  $m_c$  为导带中的有效电子质量,  $m_{hh}$  为价带中的有效重空穴质量,  $c$  为真空中的光速,  $n_g$  为折射率,  $\Delta$  为自旋轨道裂距,  $E_g$  为带隙能量,  $f_c$  和  $f_v$  分别为导带和价带的狄拉克分布.

在 SOA 中,自发辐射和信号光、探测光一样参与消耗载流子,使增益达到饱和,不同的是自发辐射在很宽的波长范围内连续分布,并且相位随机.计算 ASE 噪声,把整个 ASE 谱宽分为  $m$  段.在 SOA 的第  $i$  子段,波长为  $\lambda_j$  的 ASE 的传输方程可表示为

$$\pm \frac{dW_{j,i}^{\pm}(z,t)}{dz} = [\Gamma(g_{j,i}(N) - \alpha_1) - \alpha_2(1 - \Gamma) - \alpha_3] \times W_{j,i}^{\pm}(z,t) + 2\Gamma g'_{j,i} \frac{hc^2}{\lambda_j^3}, \quad (4)$$

其中  $W_{j,i}(z,t)$  为功率谱密度,单位是 W/nm,  $g'_{j,i}$  为受激发射系数,可以由下式给出:

$$g'(\nu, N) = \frac{e^2 |M|^2}{4\pi^2 \epsilon_0 m_0^2 c n_g \nu} \left( \frac{8\pi^2 m_c m_{hh}}{h^2 (m_c + m_{hh})} \right)^{3/2} \times (h\nu - E_g)^{1/2} f_c(\nu) f_v(\nu). \quad (5)$$

描述 SOA 中载流子变化的速率方程为

$$\begin{aligned} \frac{dN_i}{dt} = & \frac{I_i}{ewdl} - (c_1 N_i + c_2 N^2 + c_3 N^3) \\ & - \sum_{j=p,s} g_{j,i} \frac{G_{j,i} - 1}{\ln G_{j,i}} \frac{(P_{j,i}^+ + P_{j,i}^-) \lambda_j}{hcw} \\ & - \sum_{j=1}^m g_{j,i} \left[ \frac{2g_{j,i}}{g} \left( \frac{G_{j,i} - 1}{\ln G_{j,i}} - 1 \right) \right] \end{aligned}$$

$$+ \frac{G_{j,i} - 1}{\ln G_{j,i}} \frac{\Delta\lambda (W_{j,i}^+ + W_{j,i}^-) \lambda_j}{hcwd} \Big] , \quad (6)$$

其中  $I_i$  为第  $i$  子段的电流强度,  $w$ ,  $d$  和  $l$  分别为 SOA 有源区的宽、厚度和第  $i$  子段的长,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  分别为缺陷和捕获中心引起的非辐射复合系数、双分子复合系数和 Auger 复合系数,  $G_{j,i}$  是经过 SOA 第  $i$  子段获得的增益.

这种波长转换器的边界条件为

$$P_j^+(0, t) = (1 - R_1)P_{j,in} + R_1 P_j^+(0, t), \quad (7)$$

$$P_j^+(L, t) = R_2 P_j^+(L, t), \quad (j = p, s) \quad (8)$$

对于这种波长转换器来说, 其一端为反射端, 输出与输入为同一端口, 因此输出光为

$$P_{j,out} = (1 - R_1)P_j^-(0, t), \quad (j = p, s) \quad (9)$$

由(1)(2)(4)和(6)–(9)式联立, 可以计算出输出信号光、探测光功率和它们的总相移. 这样就可以研究基于多电极单端耦合 SOA 的 XGM 型波长转换器的各种输出特性了.

## 4. 理论结果

计算中采用的参数值如表 1 所示.

表 1 计算采用的参数值

符号	参量	取值
$L$	有源区长度/m	$5 \times 10^{-4}$
$w$	有源区宽度/m	$3.3 \times 10^{-6}$
$d$	有源区厚度/m	$0.15 \times 10^{-6}$
$c_1$	非辐射复合系数/ $s^{-1}$	$1.5 \times 10^8$
$c_2$	双分子复合系数/ $m^3 \cdot s^{-1}$	$2.5 \times 10^{-17}$
$c_3$	Auger 复合系数/ $m^6 \cdot s^{-1}$	$9.4 \times 10^{-41}$
$\alpha_1$	有源层的损耗/ $m^{-1}$	$1.4 \times 10^4$
$\alpha_2$	涂覆层的损耗/ $m^{-1}$	$2.0 \times 10^3$
$\alpha_3$	散射损耗/ $m^{-1}$	$1.0 \times 10^3$
$\Gamma$	光限制因子	0.3
$n$	折射率	3.22
$\lambda_1$	ASE 谱的起始波长/m	$1.500 \times 10^{-6}$
$\lambda_m$	ASE 谱的结束波长/m	$1.600 \times 10^{-6}$
$m$	ASE 谱的分段数	20
$n$	SOA 的分段数	10

在模拟计算中, 取入射信号光为 2.5Gb/s 的无啁啾理想超高斯序列, 调制格式为 010010100, 波长为 1550nm、峰值功率为 -5dBm; 探测光波长为 1530nm、峰值功率为 -20dBm; 本文采用的两电极单端耦合 SOA, 两个电极对应的腔长  $L_1$  和  $L_2$  皆为 250 $\mu$ m, 注入电流  $I_1$  和  $I_2$  分别为 90mA 和 60mA; 相应地单电极单端耦合 SOA 的腔长  $L$  为 500 $\mu$ m, 注入

电流  $I$  为 150mA.

利用数值模拟的方法, 对基于多电极单端耦合 SOA 和基于单电极单端耦合 SOA 的两种 XGM 型波长转换器的输出特性进行了比较. 图 3 和图 4 分别给出了它们的输出探测光功率和频率啁啾随时间的变化情况. 从图 3 可以看出, 基于多电极单端耦合

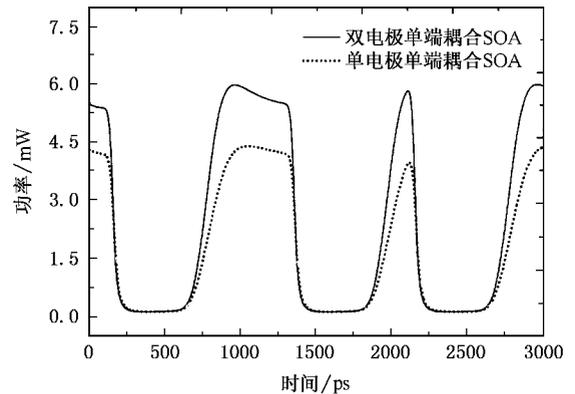


图 3 基于多电极单端耦合 SOA 和基于单电极单端耦合 SOA 的两种 XGM 型波长转换器的输出探测光功率随时间的变化

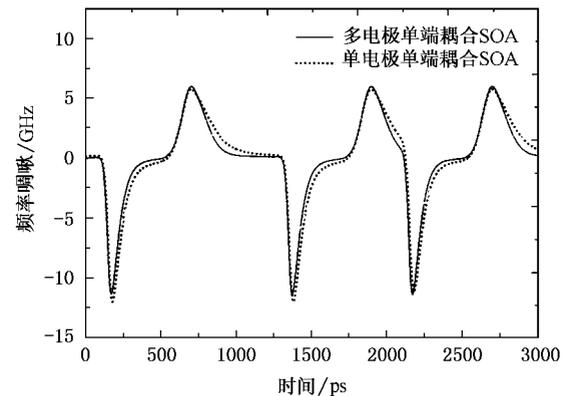


图 4 基于多电极单端耦合 SOA 和基于单电极单端耦合 SOA 的两种 XGM 型波长转换器的输出探测光频率啁啾随时间的变化

SOA 的 XGM 型波长转换器的输出消光比特性得到明显改善. 这是由于采用两电极结构 SOA, 使 SOA 前面部分的载流子浓度大于后面部分的. 在光从后端面反射回来的过程中, 虽然要消耗越来越多的载流子, 由于前面部分的载流子浓度高, 可以提供载流子而继续放大, 不容易发生增益饱和, 从而提高了增益. 这就意味着信号光和探测光放大倍数增大. 由于 XGM 效应, 相应地探测光被调制程度加深, 所以其输出探测光的消光比大. 从图 4 可以看出, 同基于单电极单端耦合 SOA 的波长转换器相比, 基于多电极

单端耦合 SOA 的 XGM 型波长转换器的输出探测光频率啁啾不仅没有退化,而且还略有改善.

多电极单端耦合 SOA 的各电极长度和反射端反射率对这种波长转换器的输出特性有一定影响,合理优化这两个参数,应该可以得到更好的输出特性.

## 5. 结 论

本文提出了一种新型的基于多电极单端耦合

SOA 的 XGM 型波长转换方案,同时建立了这种波长转换器完整的宽带理论模型;利用这个宽带理论模型,通过数值模拟的方法,理论上同基于单电极单端耦合 SOA 的 XGM 型波长转换器的输出特性进行了比较.结果表明:在其他工作参数相同的情况下,基于多电极单端耦合 SOA 的 XGM 型波长转换器的输出探测光的消光比有明显提高,并且其频率啁啾也略有改善.

- [ 1 ] Ramamurthy B , Mukherjee B 1998 *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* **16** 1061
- [ 2 ] Barry R A , Humblet P A 1996 *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* **14** 858
- [ 3 ] Durhuus T , Mikkelsen B , Joergensen C *et al* 1996 *J. Lightwave Technology* **14** 942
- [ 4 ] Joergensen C , Durhuus T , Braagaard C *et al* 1993 *IEEE Photonics Technology Letters* **5** 657
- [ 5 ] Zhang X L , Sun J Q , Liu D M *et al* 2000 *Acta Physica Sinica* **49** 741 ( in Chinese )[ 张新亮、孙军强、刘德明等 2000 物理学报 **49** 741 ]
- [ 6 ] Xu F , Zhang X L , Huang D X 2004 *Acta Physica Sinica* **53** 2165

( in Chinese )[ 徐 帆、张新亮、黄德修 2004 物理学报 **53** 2165 ]

- [ 7 ] Zhang X L , Huang D X , Sun J Q *et al* 2001 *Chinese Physics* **10** 124
- [ 8 ] Dong J J , Zhang X L , Huang D X 2005 *Acta Photonica Sinica* **34** 255 ( in Chinese )[ 董建绩、张新亮、黄德修 2005 光子学报 **34** 255 ]
- [ 9 ] Mikkelsen B 1994 *Ph. D Thesis* Denmark University of Technical p163
- [ 10 ] Li P L , Zhang X L , Chen J *et al* 2005 *Acta Physica Sinica* **54** 1222 ( in Chinese )[ 李培丽、张新亮、陈 俊等 2005 物理学报 **54** 1222 ]

# Wavelength converter based on cross-gain modulation in multi-electrode single-port-coupled semiconductor optical amplifier<sup>\*</sup>

Li Pei-Li<sup>†</sup> Huang De-Xiu Zhang Xin-Liang Zhu Guang-Xi

1 *Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*

2 *Department of Electronics and Information, Huazhong University of Science and Technology Wuhan 430074, China*

( Received 10 November 2005 ; revised manuscript received 22 November 2005 )

## Abstract

A new scheme for cross-gain modulation ( XGM ) wavelength converter based on multi-electrode single-port-coupled semiconductor optical amplifier ( SOA ) is proposed , and a comprehensive broad-band dynamic model of this kind of wavelength converter is presented . By numerical simulation , the output performances of two kinds of XGM wavelength converter based on multi-electrode single-port-coupled SOA and based on single-port-coupled SOA are investigated . The result shows that the extinction ratio of XGM wavelength converter based on multi-electrode single-port-coupled SOA is greater than that of the later .

**Keywords :** multi-electrode , wavelength conversion , single-port-coupled SOA , XGM , extinction ratio , chirp

**PACC :** 4265K , 4265M , 4255P

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China ( Grant No. G2000036605 ), the National High Technology Development Program of China ( Grant No. 2002AA312160 ), and the " Chen Guang " Foundation of Wuhan , China ( Grant No. 2003500201602 ).

<sup>†</sup> E-mail : lplthl@sohu.com