

# 交叉增益调制的全光波长转换的 消光比特性分析\*

孙军强<sup>1)</sup> 黄德修<sup>1)</sup> 易河清<sup>2)</sup>

1), 华中理工大学光电子工程系, 武汉 430074  
2), 武汉邮电科学研究院, 武汉 430074

**摘 要** 建立了基于半导体光放大器交叉增益调制的波长转换理论模型。讨论了放大器的偏置电流、抽运光参数以及探测光参数对转换后信号消光比特性的影响。结果表明, 大的抽运光功率, 小的探测光功率以及合适的转换波长间隔有利于获得大的消光比。

**关键词** 波长转换, 交叉增益调制, 消光比。

## 1 引 言

全光波长转换将成为未来波分复用光纤通信系统中不可缺少的关键技术。它能够避免路由节点处的信息拥塞, 增加网络组建、管理的灵活性<sup>[1, 2]</sup>。尽管实现全光波长转换的方法很多, 然而基于半导体光放大器的四波混频<sup>[3]</sup>、交叉增益调制<sup>[4]</sup>或交叉相位调制<sup>[5]</sup>的波长转换却倍受众多学者的青睐。本文主要讨论基于半导体光放大器交叉增益调制机理的波长转换特性。当抽运光(波长为  $\lambda_1$ , 具有一定调制深度的载有信息的调制光)注入到半导体光放大器后, 使半导体光放大器中载流子随着抽运光强的变化而变化, 从而使半导体光放大器的增益也得到同样的调制。随着调制光强的增加, 半导体光放大器的增益将减少, 但当调制光强减弱时, 放大器的增益将迅速恢复到原来的数值。所以, 同调制信号相比较, 半导体光放大器的增益呈反相调制。当另一种波长( $\lambda_2$ )的光(称之为探测光)耦合进半导体光放大器后, 呈反相调制的增益将对连续的探测光作调制, 同时使抽运光载有的信息通过增益调制而传递给探测光。也就是说, 将波长  $\lambda_1$  上载有的信息转换到了波长  $\lambda_2$  上。从而实现了波长转换, 其特点是转换前后光信号的相位差  $\pi$ 。

交叉增益调制的波长转换是最简单的全光波长转换形式。已有文献报道<sup>[6]</sup>, 利用这种机制实现了 40 Gbit/s 的全光波长转换。然而, 这种全光波长转换器会使光信息信号在转换过程中附加很大的啁啾, 再经标准单模光纤传输后产生高的误码率; 另外, 这种波长转换器使得转换后的信号的消光比退化。

众多学者对交叉增益调制的波长转换进行了实验研究。而理论研究则更多地注重了转换

\* 国家科委 863 高技术项目、湖北省自然科学基金以及华为科研基金资助项目。

收稿日期: 1998-07-06; 收到修改稿日期: 1998-08-31

效率、转换带宽的影响因素<sup>[7]</sup>。在实际的通信系统中,信号的消光比也是影响通信质量的一个重要因素。本文通过建立交叉增益调制波长转换的理论模型,重点讨论转换前后信号的消光比特性随半导体光放大器特性参数的变化关系。

## 2 理 论

在半导体光放大器中传输的抽运光、探测光满足如下的微分方程:

$$\frac{\partial P_1}{\partial z} = (\Gamma g_1 - \alpha) P_1, \quad (1)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial z} = (\Gamma g_2 - \alpha) P_2. \quad (2)$$

(1)式、(2)式中,  $g_1$ 、 $g_2$  为在抽运光、探测光波长  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  处且载流子浓度为  $N$  的增益系数;  $\Gamma$  为模场限制因子(本文中,令对应于抽运光、探测光具有相同的数值);  $P_1$ 、 $P_2$  为抽运光、探测光的功率;  $\alpha$  为放大器的内部损耗。半导体光放大器中载流子浓度  $N$  满足如下的速率方程:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{I}{eV} - (AN + BN^2 + CN^3) - \frac{\Gamma g_1 P_1}{A_{\text{eff}} h \omega_1} - \frac{\Gamma g_2 P_2}{A_{\text{eff}} h \omega_2}. \quad (3)$$

式中,  $AN + BN^2 + CN^3$  为自发复合速率, 三项分别对应于非辐射复合、双分子复合、俄歇复合系数( $A$ 、 $B$ 、 $C$  为常数, 如表 1 所列);  $I$  为驱动电流;  $e$  为电子电荷;  $V$  为增益区体积;  $A_{\text{eff}}$  为

增益区的有效截面积;  $h \omega (i = 1, 2)$  为抽运光、探测光的光子能量。增益系数  $g_1$ 、 $g_2$  不仅同载流子浓度  $N$  有关, 而且同注入光的波长有关。半导体光放大器的增益谱一般是非对称的抛物线型, 根据实验的经验值, 增益系数可表达为<sup>[8]</sup>:

$$g_i(N) = a(N - N_0) - \gamma_1(\lambda_i - \lambda_p)^2 + \gamma_2(\lambda_i - \lambda_p)^3 \quad (i = 1, 2), \quad (4)$$

式中,  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  为经验值(如表 1 所列)。  $N_0$  为半导体光放大器刚达到透明的载流子浓度。  $\lambda_p$  为峰值波长。半导体光放大器偏置电流的变化, 形成载流子浓度的变化, 造成半导体光放大器增益谱的峰值波长的变化。一般情况下, 随着注入电流的增加, 光放大器的增益峰值波长将发生蓝移; 注入抽运光和探测光的光强的变化同样会消耗半导体光放大器的载流子, 从而也使增益谱的峰值波长发生漂移。峰值波长与载流子浓度  $N$  的关系可表示为<sup>[8]</sup>:

$$\lambda_p = \lambda_0 - k_0(N - N_0), \quad (5)$$

式中,  $\lambda_0$  为半导体光放大器刚达到透明时的峰值波长,  $k_0$  为实验所得的经验值。

本文主要是讨论交叉增益调制机理的波长转换后信号的消光比变化情况。只需考虑“0”信号及“1”信号的注入光功率下波长转换情况, 而不考虑从“0”信号到“1”信号转变过程中的上升及下降时间以及转换后光信号的畸变。当光放大器中注入“0”信号或“1”信号时, 可认为放大器工作在稳态情况。求解稳态方程时, 假设  $\partial N / \partial t = 0$ , 即忽略“0”及“1”信号的跳变而引起的载流子浓度的变化。但是载流子浓度的分布, 特别是沿着  $z$  轴的分布不具有均匀性, 因此可以将半导体光放大器的增益区沿光场传播的  $z$  轴方向划分为许多段, 并且认为每段增益区的载流子分布是均匀的。对(1)式, (2)式光功率传播沿半导体光放大器方向积分, 可得:

$$P_i(z) = P_{i0} \exp(-\alpha z) \exp(\Gamma g_i z), \quad (i = 1, 2) \quad (6)$$

从(6)式可知, 一定长度的半导体光放大器的内部损耗, 可近似地等效于起始注入光功率的耦合效率, 而光在放大器内的传输可近似地认为是无损耗的传输。基于上述假设,  $\Delta z_k$  段上的载流子浓度  $N_k$  由下列方程求出:

$$\Delta z_k \frac{\partial N_k}{\partial t} = \frac{I \Delta z_k}{eV} - (A N_k + B N_k^2 + C N_k^3) \Delta z_k - \sum_{i=1,2} \frac{P_{ik-1} \exp(-\alpha \Delta z_k)}{A_{\text{eff}} h \omega} (G_{ik} - 1) = 0, \quad (7)$$

其中,

$$G_{ik} = \frac{P_{ik}}{P_{ik-1}} = \exp[\Gamma g_i(N_k) \Delta z_k]. \quad (8)$$

为  $\Delta z_k$  长度的光放大器增益。然后就每一  $\Delta z_k$  段, 应用(7)式、(8)式进行数值计算, 可获得光放大器输出端的“0”及“1”信号的光功率大小。假设注入抽运光的调制可表示为  $P_{10} = \{P_{10}^0, P_{10}^1\}$ , 经历光放大器波长转换后, 探测光获得的增益可表示为  $G_{2L} = \{G_{2L}^0, G_{2L}^1\}$ , 上标“0”和“1”分别对应于通信系统中的“0”及“1”信号。因而, 输出信号的消光比可表示为:

$$\mu_{\text{out}} = 10 \lg \left( \frac{P_{2L}^1}{P_{2L}^0} \right). \quad (9)$$

$L$  为半导体光放大器的总增益区长度。消光比是指信号中“0”信号的强度与“1”信号的强度的比值, 并用分贝来表示。传输信号的消光比的大小直接关系到信号误码率的大小, 因而, 是衡量光通信系统质量的一个重要的物理量。

### 3 理论结果及分析

考虑工作在  $1.3 \mu\text{m}$  波段的掩埋异质结半导体光放大器, 其参数如表 1 所列。选择探测光的波长为  $1370 \text{ nm}$ , 探测光功率为  $0.2 \text{ mW}$ , 抽运光的“0”信号光功率为  $0.1 \text{ mW}$ , 光放大器的偏置电流为  $150 \text{ mA}$ , 在不同的抽运光“1”信号光功率下, 转换信号的输出消光比与泵浦光波长的关系如图 1 所示。随着抽运光的增加, 输出消光比逐渐增大。且在最佳的抽运光波长时有最大的消光比。然而最佳波长随抽运光功率的增加向长波方向移动。这是由于强的抽运光消耗了半导体增益区内的载流子, 而导致增益谱的峰值波长向长波方向漂移。一般情况下, 将抽运光波长选择在增益谱峰值波长附近, 以获得最大的增益调制深度, 而得到最大的消光比。

Table 1. Physical constants of the SOA<sup>[8]</sup>

parameter notation	value	description
$A$	$2.5 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$	nonradiative recombination constant
$B$	$1.0 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	bimolecular recombination constant
$C$	$9.4 \times 10^{-29} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$	auger recombination constant
$d$	$0.15 \mu\text{m}$	active layer thickness
$w$	$2.0 \mu\text{m}$	active layer width
$L$	$500 \mu\text{m}$	active layer length
$\Gamma$	$0.3$	confinement factor
$N_0$	$1.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	transparency carrier density
$a$	$2.5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$	material gain constant
$\gamma_1$	$0.074 \text{ cm}^{-1} \text{ nm}^{-2}$	gain bandwidth constant
$\gamma_2$	$3.155 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1} \text{ nm}^{-3}$	asymmetry constant of gain curve
$k_0$	$3 \times 10^{-17} \text{ nm cm}^3$	Gain-peak shift constant
$\lambda_0$	$1350 \text{ nm}$	peak wavelength at transparency

当输入抽运光的消光比为  $10 \text{ dB}$  时, 在不同的偏置电流下输出消光比与抽运光波长的关系示于图 2。

与图 1 相比较，最佳抽运波长向长波方向的漂移量减小了。这是因为大的注入电流导致增益谱的峰值波长向短波方向漂移。从而使抽运光引起的波长漂移得到抑制。尽管大的偏置电流可获得大的输出消光比，然而偏置电流的增加，也增大了光放大器的自发辐射功率，光放大器解理面剩余反射率的存在，光放大器的振荡限制了实际的驱动电流的提高。

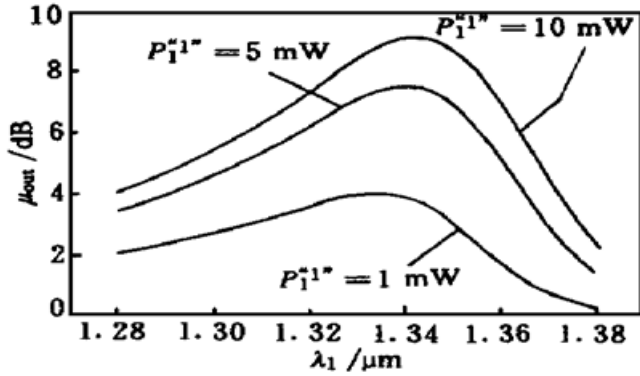


Fig. 1 Output extinction ratio versus pump wavelengths for different values of  $P_1^{in}$ .  $I_{bias} = 150 \text{ mA}$ ,  $\lambda_2 = 1370 \text{ nm}$ ,  $P_2 = 0.2 \text{ mW}$ ,  $P_1^{0*} = 0.1 \text{ mW}$

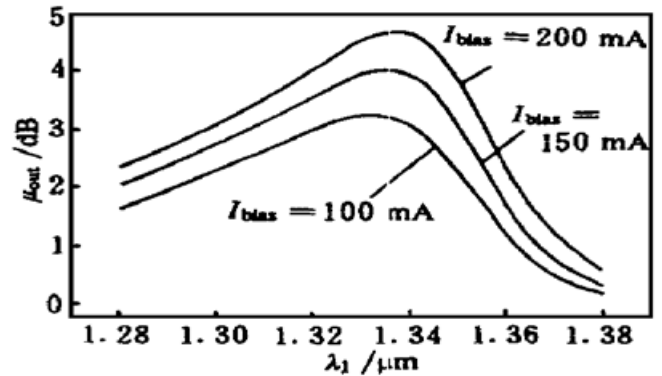


Fig. 2 Output extinction ratio as a function of pump wavelengths under different values of SOA bias current with input extinction ratio of 10 dB. The other parameters are same as shown in Fig. 1

维持光放大器的参数不变，不同的探测光波长下输出消光比与抽运光波长的关系示于图 3。从图中可以看出，最佳的抽运波长随着探测光波长的变化而改变。所以输出消光比与两波长的差有关。

图 4 为不同抽运光功率下输出消光比与转换波长差的关系。从图中可以看到，下转换的消光比要优于上转换的消光比。通过分析半导体光放大器的“0”、“1”信号的增益线型，可以发现，下转换的增益差要比上转换的增益差大。因此，输出消光比不仅与抽运光的功率有关而且与抽运光的波长选择有关。

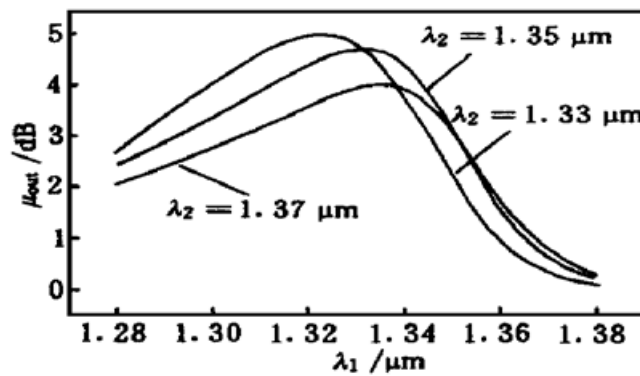


Fig. 3 Output extinction ratio as a function of pump wavelengths for different probe wavelengths. The other parameters are same as shown in Fig. 1

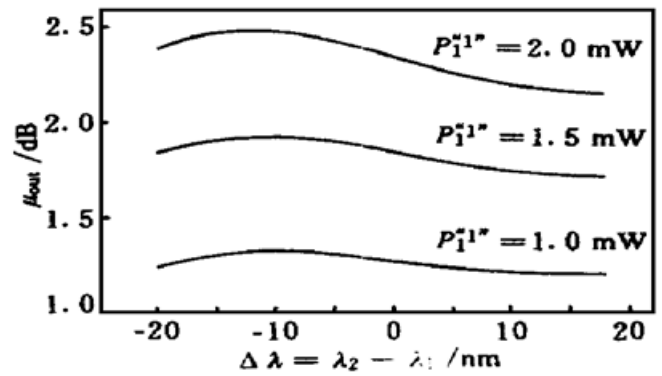


Fig. 4 Output extinction ratio as a function of wavelength spans for different pump powers  $P_1^{in}$ . The other parameters are same as shown in Fig. 1

图 5 为不同的抽运光功率下，输出消光比同注入探测光功率的关系。注入的抽运光功率越大，输出消光比也越大，且随着探测光功率的增加，输出消光比减小。这主要是由于交叉增益调制的波长转换是抽运光造成增益饱和与探测光获得放大共同作用的结果。因此，大的抽运光功率以及小的探测光功率都有利于获得大的消光比。

在不同的抽运“0”信号光功率下，输出消光比与输入消光比的关系示于图 6。输出消光比

随着输入消光比的增加而增加, 在相同的输入消光比下, 抽运光的  $\sigma$  信号功率越大, 输出消光比也越大。这是由于对应于大的抽运光  $\sigma$  信号功率,  $\omega$  信号功率也大, 从而对放大器饱和贡献也大, 因而实现了大的输出消光比。

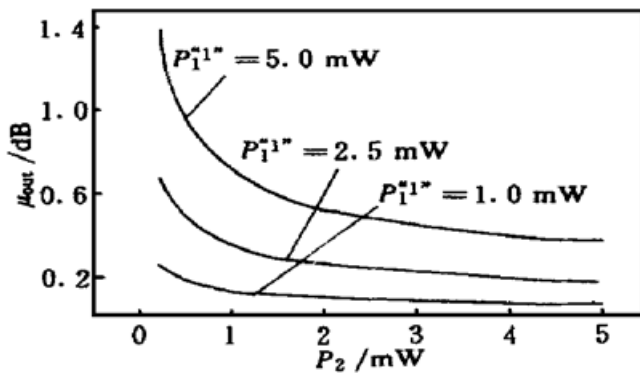


Fig. 5 Output extinction ratio as a function of the probe power with the different pump powers  $P_1^{\sigma}$ . The other parameters are same as shown in Fig. 1

综上所述, 要获得大的消光比, 应选择大的抽运光功率、小的探测光功率以及合适的转换波长间隔。波长转换器的性能特性还需考虑转换带宽、转换后信号的信噪比以及啁啾大小。这些将另文撰文讨论。

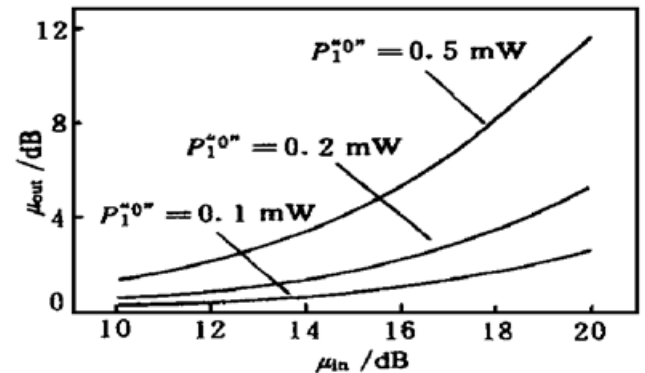


Fig. 6 Output extinction ratio versus input extinction ratio for different values of  $P_1^{\sigma}$ . The other parameters are same as shown in Fig. 1

**结 论** 根据半导体光放大器的载流子速率方程以及抽运光、探测光在光放大器中的传输方程, 建立了基于半导体光放大器交叉增益调制的波长转换的理论模型。重点讨论了放大器的偏置电流、抽运光参数以及探测光特性对转换后信号消光比特性的影响。结果表明, 要获得大的消光比, 应选择大的抽运光功率, 小的探测光功率以及合适的转换波长间隔。大的偏置电流虽然能获得大的消光比, 但是受到放大器实际的工作电流的限制, 放大器的偏置电流不宜选择太大。

### 参 考 文 献

- [1] Iannone E, Sabella R, de Stefano L *et al.*. All-optical wavelength conversion in optical multicarrier networks. *IEEE Trans. on Commun.*, 1996, **44**(6) : 716~ 723
- [2] Yoo S J. Wavelength conversion technologies for WDM network applications. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6) : 955~ 966
- [3] Zhou J, 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
- [4] Wiesenfeld J M, Perino J S, Gnauck A H *et al.*. Bit error rate performance for wavelength conversion at 20 Gbit/s. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(9) : 720~ 721
- [5] Dudhuus T, Joergensen C, Mikkesen B *et al.*. All optical conversion by SOA's in a Mach-Zehnder configuration. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(1) : 53~ 55
- [6] Ellis A D, Davies D A O, Keiyy A *et al.*. Data driven generation of semiconductor amplifier loop mirror at 40 Gbit/s. *Electron. Lett.*, 1994, **31**(15) : 1245~ 1247
- [7] A Mecozzi. Small-signal theory of wavelength converters based on cross-gain modulation in semiconductor optical amplifiers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(11) : 1471~ 1473
- [8] Willner A E, Shieh W. Optimal spectral and power parameters for all-optical wavelength shifting, single stage, fanout, and cascability. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(5) : 771~ 779

## Analysis of Extinction Ratio Characteristics in All-Optical Wavelength Conversion Based on Cross-Gain Modulation

Sun Junqiang<sup>1)</sup> Huang Dexiu<sup>1)</sup> Yi Heqing<sup>2)</sup>

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

2), Wuhan Research Institute of Post and Telecommunication, Wuhan 430074

(Received 6 July 1998; revised 31 August 1998)

**Abstract** A theoretical model of wavelength conversion based on cross-gain modulation in a semiconductor optical amplifier (SOA) has been established. The influences of SOA bias current as well as pump and probe light parameters on extinction ratio characteristics of converted signals are discussed. The results show that higher pump power, lower probe power and suitable wavelength spans between pump and probe light wavelengths have the advantages to achieve the higher extinction ratio.

**Key words** wavelength conversion, cross-gain modulation, extinction ratio.

### 第四届全国光学前沿问题研讨会在北海市举行

由中国光学学会基础光学委员会和中国物理学会光物理专业委员会主办、中国科学院物理研究所光物理实验室承办的全国第四届光学前沿问题研讨会于 1999 年 11 月 2 日至 5 日在广西壮族自治区北海市举行, 会议由中国光学学会基础光学专业委员会副主任聂玉昕研究员和中国物理学会光物理专业委员会副主任邹英华教授共同主持。来自全国 22 所大学和科学研究所的 70 位代表出席了会议。

在大会上的邀请报告有 7 篇, 它们是: 清华大学近代物理系李师辟教授的“原子的磁导引”; 北京大学物理系邹英华教授的“薄膜的近场拉曼和超快光谱”; 中国科学院物理研究所张道中研究员和金崇君先生的“光子晶体的研究进展”; 中国科学院上海光学精密机械研究所韩申生研究员的“超高能量密度下参量不稳定性的控制、超热电子及其应用”; 北京师范大学分析测试中心的陈晓波教授的“800 nm LD 激光导致的 TmYb 共掺氟氧化物微晶玻璃的间接上转换敏化发光”; 中山大学超快激光光谱学国家实验室周建英教授和罗琦博士的“飞秒相干瞬态过程的相位光谱技术与应用”; 以及暨南大学化学系蔡继业教授的“Ba+ HI 态态反应的高分辨率激光光谱及反应机理分析”。此外, 在大会上报告的论文有 19 篇, 会上围绕这些论文进行了认真而热烈的讨论。会议提出的许多论文是作者和作者所在研究组的最新研究成果。

会议期间, 还举行了中国光学学会基础光学委员会和中国物理学会光物理专业委员会的联席会议, 讨论了两个专业委员会换届的准备工作和 2000 年两个专业委员会的会议计划, 初步确定明年 8 月末两个专业委员会联合在云南省召开“2000 年全国基础光学和光物理学术报告会”。

曹 怡