

文章编号 : 0258-7025(2001)02-0183-03

交叉增益型波长转换器的参数优化*

张新亮 孙军强 刘德明 黄德修

(华中科技大学光电子工程系 武汉 430074)

提要 在考虑放大自发辐射消耗载流子的前提下,运用放大器的分段模型和传输矩阵方法,理论分析了交叉增益(XGM)型波长转换器应用于通信系统中的误码率特性。基于误码率特性的分析,对波长转换器中放大器有源腔长度和内部损耗、转换波长间隔、探测功率和平均抽运功率等参数进行了优化。

关键词 半导体光放大器,交叉增益型波长转换器,放大自发辐射,误码率,参数优化

中图分类号:TN 929.11 文献标识码:A

Parameters Optimization in XGM Wavelength Conversion

ZHANG Xin-liang SUN Jun-qiang LIU De-ming HUANG De-xiu

(Department of Optoelectronics Engineering, HUST, Wuhan 430074)

Abstract Based on analyzing of bit-error performance, parameters optimization for XGM wavelength conversion in semiconductor-optical amplifiers (SOA), which was used in communication system, is presented in this paper. Segmented model for SOA, transferring matrix method (TMM) and average spontaneous emission power are exploited in the theoretical analysis. Carrier consumption due to amplified spontaneous emission is introduced in the carrier rate equation. Results show that there exist optimal values of probe power, average pump power, conversion span and length of active cavity for special condition. It is also shown that small waveguide internal loss is helpful to achieve good bit-error performance.

Key words semiconductor optical amplifier, XGM wavelength conversion, bit-error performance, amplified spontaneous emission, parameter optimization

波长转换器能重复利用波长,使网络便于管理,是全光网络的关键光电子器件。输出消光比、转换效率和误码率都是衡量波长转换器性能的重要指标,而消光比和转换效率两个性能指标在某些方面是相互制约的,不适合用来进行波长转换器参数的优化。误码率是衡量通信系统性能的最关键指标,并能综合消光比、转换效率和噪声等多方面的性能,是进行波长转换器参数优化的可靠依据。本文基于对误码率特性的分析,对波长转换器中放大器有源腔长度、有源区内部损耗、波长转换间隔、探测功率和平均抽运功率等参数进行了优化,对放大器的设计制作和合理选择波长转换工作条件等有指导作用。

1 理论模型

对于采用波长转换器的通信系统,可将发射机与转换器等效成点到点通信系统中的发射机,用转换器输出光信号的消光比、功率和噪声特性代替原信号(抽运信号)的相对应指标就可以利用相应公式来计算误码率特性。一般通信系统中,误码率可表示为

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad \text{其中 } Q = \frac{I_{ph}^{on} - I_{ph}^{off}}{\sigma_{tot}^{on} + \sigma_{tot}^{off}} \quad (1)$$

式中 Q 为通信系统中的超噪比, I_{ph} 代表探测器输出电流, σ_{tot}^y 为探测器输出电流的标准偏差,即总噪声幅度。 $y = on, off$ 分别对应传号("1"信号)和空号("0"信号),采用转换器的通信系统, Q 值可表示为

$$Q = \left[(ER_{out} - 1) \sqrt{\Delta\nu} \right] \left/ \left[\sqrt{h \frac{c}{\lambda_s} \frac{ER_{out} + 1}{P_{rec}} + 2RIN^{off}} + ER_{out} \sqrt{h \frac{c}{\lambda_s} \frac{(ER_{out})^2 + 1}{P_{rec}} + 2RIN^{on}} \right] \quad (2)$$

* 国家高技术研究发展计划(863-307-16-03)和湖北省自然科学基金(97J100)资助。

收稿日期:1999-11-02;收到修改稿日期:1999-12-22

式中 RIN 代表输出信号上的相对强度噪声, $\Delta\nu$ 代表放大器的等效噪声带宽, λ_s 为探测光波长, P_{rec} 为随波长转换器输出功率的变化而不断调整的判决阈值, ER_{out} 为输出信号的消光比, 并有

$$P_{rec} = a \frac{(P_s^{out})^n + (P_s^{out})^m}{2}, ER_{out} = (P_s^{out})^n / (P_s^{out})^m$$

a 为发射机与接收机之间引入的损耗, 本文中假定采用波长转换器的系统与不采用的系统具有相同的损耗。

由公式 (1) 和 (2) 可知, 要计算误码率, 必须先确定放大自发辐射噪声的功率谱密度、输出消光比和输出平均功率。通常可采用如图 1 所示的放大器分段模型, 利用传输矩阵方法对波长转换器进行研究^[1]。放大器被均匀地分成 M 段, 每一段长度为 Δz 。只要 M 足够大, 就可以认为在放大器的每一小段中载流子是均匀分布的。图中所示的 $P_p^k, S_+^k, S_-^k, P_s^k$ 分别代表耦合进放大器第 k 段中的抽运光功率、正向传播放大自发辐射功率、负向传播放大自发辐射功率和探测光功率。

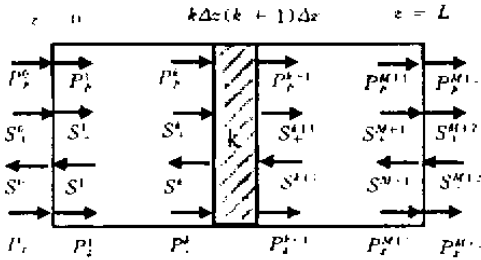


图 1 用于交叉增益型波长转换器的放大器的分段模型
Fig. 1 Segmented model for SOA used in XGM wavelength conversion

对于放大器第 k 部分, 由稳态时的载流子速率方程和行波传输方程可得到

$$0 = \frac{I}{e \cdot V} - \frac{N_k}{\tau_s} - ASE(k) - \frac{1}{\tau_s} \sum_{i=p,s} \frac{P_i^k}{P_{sat,i}} (N_k - N_0) \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} P_p^{k+1} \\ P_s^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp[(\Gamma g_p^k - \alpha_{int}) \Delta z] & 0 \\ 0 & \exp[(\Gamma g_s^k - \alpha_{int}) \Delta z] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_p^k \\ P_s^k \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$S_+^{k+1} = S_+^k G_k + \Delta S_k \quad S_-^k = S_-^{k+1} G_k + \Delta S_k \quad (5)$$

其中 $I, e, V, \tau_s, N_0, \Gamma, \alpha_{int}, P_{sat,i}$ 为常用物理符号。 N_k 为第 k 段放大器中的载流子浓度, $ASE(k)$ 为放大自发辐射消耗的载流子, g_i^k 为第 k 段的模式增益系数, G_k 为自发辐射光子在第 k 段获得的平均净增益,

ΔS_k 为第 k 段自身产生的自发辐射功率。

本文为了考虑放大自发辐射引起的载流子消耗, 引入平均自发辐射功率的概念, 忽略不同模式之间的增益差以及载流子浓度变化引起的噪声功率的变化, 认为每一段中产生的自发辐射功率是相等的。而每一小段放大器中产生的平均自发辐射功率 ΔS 可表示为^[2]

$$\Delta S = \chi (G_p - 1) \frac{\bar{N}}{\bar{N} - N_0} \frac{\Gamma g_p}{\Gamma g_p - \alpha_{int}} h\nu_p \Delta\nu_1 \quad (6)$$

式中 G_p, ν_p 和 g_p 分别为对应增益峰值波长的增益 (每一段中获得的) 频率和增益系数, 并有 $G_p = \exp[(\Gamma g_p - \alpha_{int}) \cdot \Delta z]$, \bar{N} 为放大器的平均载流子浓度 (传号与空号时不相同), $\Delta\nu_1$ 代表放大器的增益带宽, $\bar{N} / (\bar{N} - N_0)$ 代表受激吸收导致的粒子数反转系数, $\Gamma g_p / (\Gamma g_p - \alpha_{int})$ 代表内部损耗导致的粒子数反转系数。

另一方面, 由公式 (5) 中的递推关系, 可得正向和反向的放大自发辐射噪声功率, 进而可得到放大自发辐射消耗的载流子和噪声功率谱密度

$$ASE(k) = \frac{2\Gamma g_p \Delta\nu_1}{A} [(G_p)^k + (G_p)^{M-k+1} - 2G_p] \cdot \frac{\bar{N}}{\bar{N} - N_0} \frac{\Gamma g_p}{\Gamma g_p - \alpha_{int}} \quad (7)$$

$$e_{ASE} = \frac{S^{out}}{\Delta\nu_1} = \frac{2\Gamma g_p}{Ah\nu_p} [(G_p)^M - 1] \cdot \frac{\bar{N}}{\bar{N} - N_0} \frac{\Gamma g_p}{\Gamma g_p - \alpha_{int}} \quad (8)$$

式中 A 为有源区横向剖面的面积。确定放大自发辐射引起的载流子消耗之后, 就可以利用传输矩阵方法对波长转换器进行求解。确定输出消光比、平均功率和噪声功率谱密度之后, 就可以利用公式 (1) 和 (2) 计算误码率。

2 结果与讨论

理论分析中, 传输速率为 10 Gbit/s, 抽运光的消光比为 10 dB, 传号和空号的相对强度噪声都为 -120 dB/Hz, 放大器透明时的增益峰值波长为 1550 nm, 3 dB 增益带宽为 50 nm, 放大器的小信号增益 (相对于探测通道) 为 18dB, 抽运光波长固定为 1550 nm, 探测光波长随讨论的波长间隔改变而改变。放大器的有源区长度为 500 μm , 计算中被均匀地分成 1000 段, 每一段长为 0.5 μm 。

图 2 为不同波长间隔条件下误码率特性与探测光功率的关系,此时抽运通道平均光功率为 4 dBm。可见不同波长间隔条件下都存在一最佳的探测光功率,并且波长向下转换(间隔为负值)的误码率特性优于向上转换的。由于探测功率的增加会减小转换器的输出消光比而提高转换效率,当探测功率较小时消光比特性较好,而较低的转换效率对误码率的影响要大,所以转换效率的提高会使误码率特性改善,而当消光比恶化对 Q 值的影响超过转换效率的影响而起主要作用时,误码率特性会逐渐恶化。

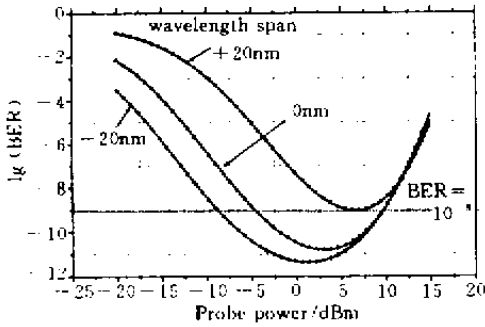


图 2 不同波长间隔条件下误码率与探测光功率的关系
Fig.2 Bit error rate versus probe power for different wavelength conversion span

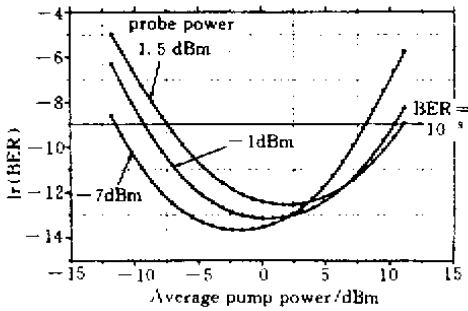


图 3 不同探测功率条件下误码率与平均抽运功率的关系
Fig.3 Bit error rate versus average pump power for different probe power

图 3 为不同探测功率条件下,误码率特性与平均抽运功率的关系。平均抽运功率提高时,转换效率同样会降低,而消光比特性会得到改善,二者的相互制约作用使得存在一最佳的抽运功率。并且不同的探测功率对应不同的最佳抽运功率,抽运功率小于最佳抽运功率时,探测功率越小,误码率特性越好,而当抽运功率大于最佳抽运功率时,则相反。这是由于平均抽运功率较小时,相对于较差的输出消光比来说,转换效率对误码率的影响要小,因而抽运

功率增加,消光比特性改善,误码率特性会逐渐变好。而当转换效率的影响占主要地位时,平均抽运功率的提高和探测功率的降低,会使转换效率降低,误码率特性恶化。

计算还表明,放大器越长 ASE 噪声越大,但在前面的分析中波长转换器的输出信号需经过较大的损耗再进入接收机,接收功率 P_{rec} 的量级很小,因而 ASE 噪声对误码率的影响没有被反映出来。为了真实反映 ASE 噪声对波长转换器性能的影响,文中计算了有源区内部损耗不同和放大器长度不同条件下,波长转换器直接输出信号的 Q 值,如图 4 所示。可见对于不同的损耗,存在不同的最佳有源腔长度,并且损耗小时 Q 值要大于损耗大时的值。在前面给定的条件下,损耗为 10 cm^{-1} 时,最佳长度约为 1 mm,而损耗为 40 cm^{-1} 时,最佳长度为 $600\text{ }\mu\text{m}$ 。

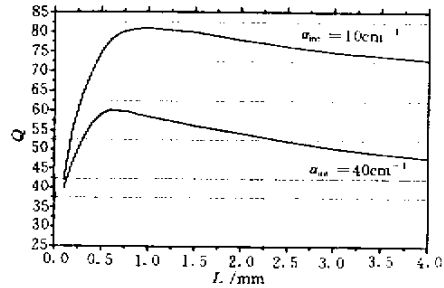


图 4 不同有源区内部损耗条件下波长转换输出信号 Q 值与放大器长度关系
Fig.4 Q -factor versus the SOA length for different internal loss of the active region

3 结 论

本文的结果表明:对应不同的波长转换范围,存在不同的最佳探测功率,并且波长下转换的误码率性能优于上转换的,对应不同的探测功率,存在不同的最佳平均抽运功率,对应不同的内部损耗,存在不同的最佳有源腔长度,并且小损耗有利于得到更佳的误码率特性。因此可以基于误码率特性,对波长转换器的结构参数和外部条件进行优化,以得到最佳性能的器件应用于通信系统中。

参 考 文 献

1. I. D. Henning, M. J. Adams, J. V. Collins. Performance predictions from a new optical amplifier model. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1985, **QE-21**(6):609~613
2. Lars Thylen. Amplified spontaneous emission and gain characteristics of Fabry-Perot and traveling wave type semiconductor laser amplifiers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(8):1532~1537