

# 行波放大器增益饱和特性理论研究\*

张哲民<sup>a</sup> 陈维友<sup>b</sup> 刘式墉<sup>b</sup> 黄德修<sup>a</sup>

a, 华中理工大学光电子工程系, 武汉 430074

b, 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区, 长春 130023

**摘 要** 以行波放大器速率方程为基础, 采用传输矩阵方法, 对行波放大器的增益饱和特性进行了理论研究, 讨论了增益饱和特性对电流注入水平、腔面反射率的依赖关系, 以及俄歇复合过程在行波放大器增益放大中的作用, 虽然俄歇复合过程可能提高饱和光强, 但它会降低内量子效率及非饱和增益, 对器件的实际工作特性没有益处。

**关键词** 行波放大器, 增益饱和, 速率方程, 传输矩阵方法。

## 1 引 言

作为非再生中继放大器、前置放大器, 行波放大器(TWA)不仅在长距离光纤通信系统中起着重要作用, 而且可与其它半导体光学器件集成形成集成光路, 集成光路对宽带光纤通信网的发展有着重要作用。行波放大器的增益饱和特性对其能否充分发挥作用有着很大影响, 在简单近似下, 行波放大器的饱和光强可表示为<sup>[1]</sup>

$$I_s = h\nu\Gamma a\tau \quad (1)$$

式中  $h\nu$  为光子能量,  $a$  为微分增益,  $\Gamma$  为限制因子,  $\tau$  为载流子寿命。从上式可以看出,  $\tau$  越小, 行波放大器的饱和光强越大, 其饱和特性越好。在长波长半导体激光器和放大器中, 俄歇复合几率较大, 可降低载流子寿命, 从而提高放大器饱和光强。但从作者对俄歇复合过程的认识, 俄歇复合过程只会恶化器件性能。本文通过求解载流子和光子速率方程, 对行波放大器光放大过程中俄歇复合过程的作用进行了理论分析, 并讨论了不同波长的增益饱和特性与注入电流密度、腔面反射率的关系。

## 2 理论模型及计算方法

传输矩阵方法用来分析复杂结构激光器<sup>[2]</sup>, 能节省计算时间, 提高计算效率。为了简单起见, 认为输入信号为单频, 不考虑载流子浓度不同引起的折射率变化。同一般激光器一样, 行波放大器的特性可以通过速率方程进行数学分析。这些方程描述了有源区中注入载流子与光子的相互作用<sup>[2]</sup>:

\* 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区开放课题资助。

收稿日期: 1995年7月27日; 收到修改稿日期: 1995年12月25日

$$\frac{dn}{dt} = \frac{j}{ed} - (A_{nr}n + Bn^2 + Cn^3) - \left[ \frac{cg}{N_g} \right] \Gamma S \quad (2)$$

$$\frac{dS}{dt} = \beta R_{sp} + \left[ \frac{\Gamma c}{N_g} \right] g_m S - \frac{S}{t_p} \quad (3)$$

其中  $n$  和  $S$  分别为载流子浓度和光子密度,  $A_{nr}$ 、 $B$ 、 $C$  分别为非辐射复合中心产生的非辐射复合系数、辐射复合系数、俄歇复合系数。  $t_p$  为由腔面输出损耗对应的光子寿命,  $R_{sp}$  为辐射复合速率,  $\beta$  为自发辐射耦合进激射模的比例因子。  $j$  是注入电流密度,  $N_g$  是群折射率,  $c$  为真空里的光速,  $e$  为电子电荷。  $g$  为材料增益系数,  $g_m = \Gamma_g - \alpha$  为模增益,  $\alpha$  为内损耗系数,  $d$  为有源区厚度。(2) 式右端三项分别代表载流子注入、自发辐射复合及其他非辐射复合总的复合、受激辐射复合引起的载流子浓度变化; (3) 式右端三项分别代表耦合到腔模的自发辐射复合、受激辐射复合、腔面损耗引起的光子浓度变化, 内损耗的作用包含在第二项里。

传输矩阵方法将有源区沿腔轴方向分成若干个区域, 在每个区域求解上述方程, 因而可以得到载流子及光子沿纵向的分布。这对分析行波放大器非常重要, 因为与对称腔面二极管激光器不同, 在行波放大器中, 输入端光强比输出端光强小得多, 沿光传播的腔轴方向光子分布很不均匀, 载流子也因消耗程度不一样在纵向呈不均匀分布, 导致增益沿腔轴方向变化很大。

以前研究表明, 耦合进激射模的自发辐射对噪声特性影响较大, 但只要放大器不是被偏置于激射阈值附近, 对增益及其饱和特性的贡献却可以忽略<sup>[3]</sup>。因此在计算中, 没有考虑自发辐射的影响。引入增益对波长及载流子浓度的依赖关系<sup>[1]</sup>,

$$g = a(n - n_0) - a_2(\lambda - \lambda_p)^2 \quad (4)$$

$$\lambda_p = \lambda_0 + a_3(n - n_0) \quad (5)$$

式中  $n_0$  为透明载流子浓度,  $\lambda_p$  为峰值增益波长,  $a_2$ 、 $a_3$  为常数,  $a_3$  反映了能带填充效应对峰值增益波长的影响。  $\lambda_0$  为达到透明条件时的峰值波长。具体计算方法参考文献[2], 该文只讨论了行波放大器的增益及其饱和特性, 将输入为零的边界条件引入即可研究不同反射腔面二极管激光器的增益纵向分布。

### 3 计算结果及分析

利用上述方法, 讨论偏置在阈值以下的行波放大器的增益饱和特性。

Table 1. Structural and material parameters used in calculation

differential gain $a$ ( $\text{cm}^2$ )	$4.63 \times 10^{-16}$	cavity length $L$ (mm)	0.5
constant $a_2$ ( $1/\text{cm}/\text{nm}^2$ )	0.15	width of active area $W$ ( $\mu\text{m}$ )	1.5
constant $a_3$ ( $\text{nm}/\text{cm}^3$ )	$-2.7 \times 10^{17}$	thickness of active area $d$ (m)	0.2
transparency carrier concentration $n_0$ ( $1/\text{cm}^3$ )	$8.31 \times 10^{17}$	optical confinement factor $\Gamma$	0.25
Auger coefficient $A_{nr}$ ( $1/\text{s}$ )	$1 \times 10^8$	total internal loss $\alpha$ ( $1/\text{cm}$ )	25
$B$ ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )	$1 \times 10^{-10}$	peak-gain wavelength $\lambda_0$ ( $\mu\text{m}$ )	1.5
$C$ ( $\text{cm}^6/\text{s}$ )	$7.5 \times 10^{-29}$	facet reflectivity $R_1$	0.01%
group refractive index $N_g$	3.5	facet reflectivity $R_2$	0.01%

#### 3.1 增益饱和特性与注入、反射率的关系

用表 1 的参数计算了不同注入水平时的总增益与放大输出功率关系曲线, 如图 1(a) 和图 1(b) 所示。它们分别对应于  $J/J_{th} = 0.4$ 、 $0.6$  时, 注入电流密度  $J = 2992 \text{ A}/\text{cm}^2$ 、 $4488 \text{ A}/$

cm<sup>2</sup> 的情况。每幅图中不同曲线对应不同输入信号波长。显然在非饱和条件下, 行波放大器总增益随注入电流密度的增加而增加, 短波长的增益变化比长波长的大得多。由于能带填充效应, 在较高注入水平时, 峰值增益波长较短。图 1(b) 中, 波长为 1500 nm 的信号对应饱和功率为 7 dBm, 波长 1480 nm 的信号对应饱和功率 5 dBm, 在所有注入水平下, 长波长对应的增益-放大输出功率关系曲线都比短波长所对应的要平缓, 即长波长对应的饱和输出功率比短波长所对应的要大<sup>[4]</sup>。说明此时能带填充效应起着重要作用, 增益饱和在一定程度上抵消能带的填充, 相对补偿了长波长的增益。因此在设计和使用时, 要依据具体要求, 在峰值增益和饱和输出功率之间权衡。对同一行波放大器, 在一定范围内可以通过改变偏置大小来调节峰值增益及峰值增益波长。

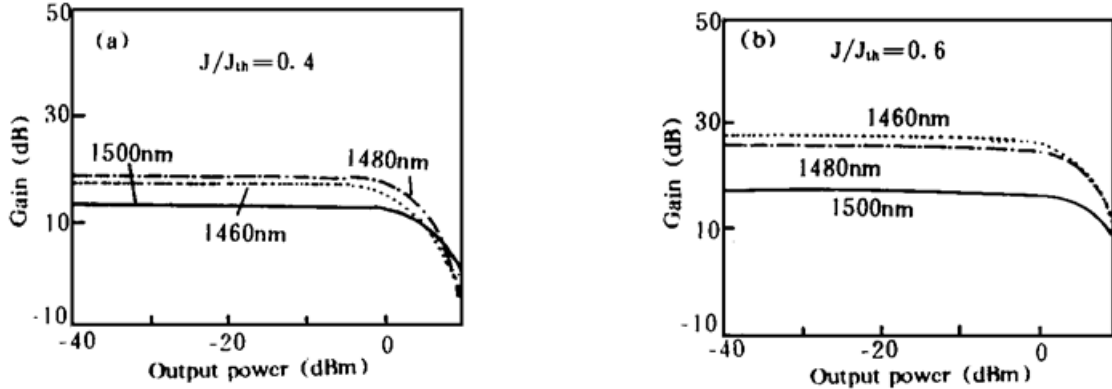


Fig. 1 The relationships between total gain and output power at different injection levels

图 2 是在其他条件不变的情况下, 注入电流密度为  $J = 3000 \text{ A/cm}^2$ , 反射率  $R_1$ 、 $R_2$  均为 0.5%、0.1%、0.05%、0.01% 时的总增益与放大输出功率关系曲线。注入电流密度一定的条件下, 腔面反射率越高, 非饱和增益越高, 但 3dB 饱和输出强度变小。这是因为腔面反射率越高, 对应的阈值电流密度越小, 器件偏置更接近阈值, 谐振效应增强, 行波放大器向法布里-珀罗放大器转化。而且当腔面反射率小于 0.1% 时, 腔面反射率对行波放大器增益特性影响很小, 说明腔面反射率主要通过谐振效应影响行波放大器的增益饱和特性, 当腔面反射率低到一定程度后, 谐振效应太弱而对行波放大器增益的影响可以忽略。

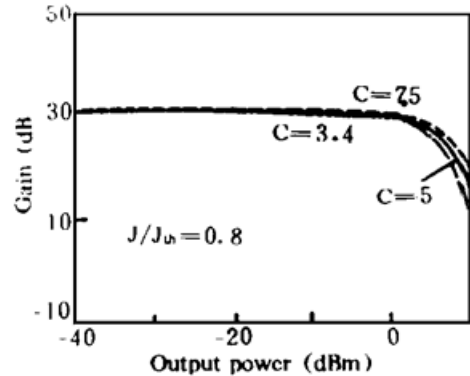
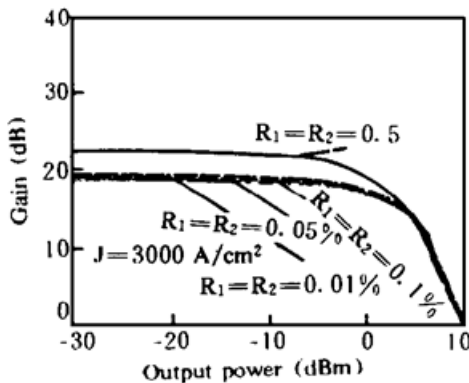


Fig. 2 The relationships between total gain and output power at different facet relectivities

Fig. 3 The relationships between total gain and output power at different Auger coefficients

### 3.2 增益饱和特性与俄歇复合系数的关系

图 3 是在  $J/J_{th} = 0.8$  不变的条件下, 俄歇复合系数  $C = 3.4, 5.0, 7.5 \times 10^{-29} \text{ cm}^6/\text{s}$ , 波长为 1480 nm 信号的总增益与输出功率关系曲线。饱和功率分别为 4 dBm、5 dBm、6 dBm, 虽然俄歇复合系数较大时, 饱和功率有所增加, 但大俄歇复合系数时得到的高饱和功率是在

高注入下得到的, 因为它们的注入电流密度分别为  $J = 4056, 4804, 5984 \text{ A/cm}^2$ , 而且饱和功率的增加也很有限。如果在注入电流密度相同的条件下, 俄歇复合系数  $C$  从  $3 \times 10^{-29} \text{ cm}^6/\text{s}$  升至  $7.5 \times 10^{-29} \text{ cm}^6/\text{s}$ , 得到的非饱和增益从 25 dB 减至小于 18 dB, 如图 4 所示, 可以看出俄歇复合系数的提高将大大降低其非饱和增益, 这是因为俄歇复合使得对光放大有贡献的载流子比例减小, 降低了行波放大器的内量子效率。图 5 是在输出功率为  $-10 \text{ dBm}$ 、注入电流密度  $J = 3000 \text{ A/cm}^2$  的条件下, 不同波长对应的行波放大器增益—俄歇复合系数曲线。随着俄歇复合的增强, 行波放大器的增益跟着降低, 波长越长, 增益对俄歇复合的依赖越小, 表明俄歇复合在这里的作用可以认为是它消耗部分有用的载流子, 抵消了注入载流子的能带填充。所以尽管俄歇复合可能提高饱和光强, 但却是以恶化器件的非饱和特性为代价的, 而且从图 3 可以认为俄歇复合对 3 dB 饱和输出功率并无多大益处。

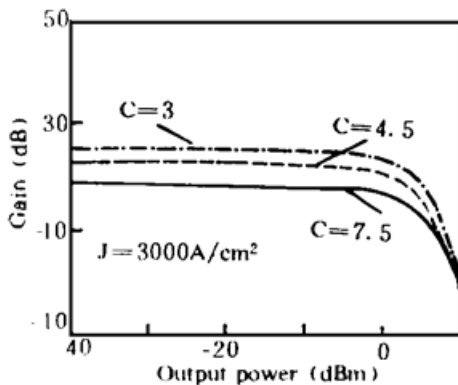


Fig. 4 The relationships between total gain and output power at different Auger coefficients

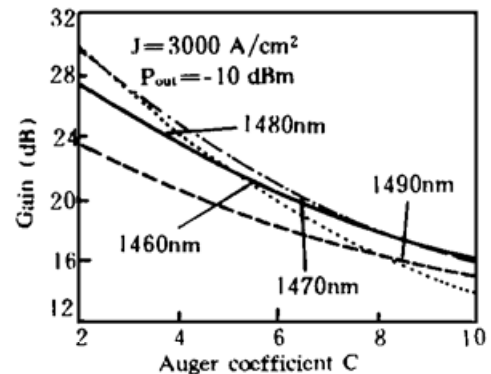


Fig. 5 The relationships between total gain and Auger coefficients

**结 论** 通过求解载流子和光子速率方程, 在非饱和条件下, 行波放大器的增益特性主要依赖于能带填充的状况。随注入电流密度的增加, 由于能带填充效应, 峰值增益波长逐渐变短, 在一定范围内可以通过改变偏置大小来调节峰值增益及峰值增益波长。腔面反射率则主要通过谐振效应对行波放大器增益特性产生影响。在注入电流密度一定的条件下, 腔面反射率越高, 谐振效应增强, 非饱和增益越高, 但增益饱和特性变差; 当腔面反射率低至一定程度后, 因谐振效应太弱对行波放大器增益特性的影响可以忽略。尽管俄歇复合可能提高饱和光强, 但却减小了内量子效率, 大大降低了非饱和增益, 对行波放大器的 3 dB 饱和输出功率并无益处。

### 参 考 文 献

- [1] M. J. O'Mahony, Semiconductor laser optical amplifiers for use in future fiber systems. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **QE-6**(4): 531~ 544
- [2] C. Y. J. Chu, H. Ghafouri-Shiraz, Analysis of gain and saturation characteristics of a semiconductor laser optical amplifier using transfer matrices. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(8): 1378~ 1386
- [3] M. J. Adams, J. V. Collins, I. D. Henning, Analysis of semiconductor laser optical amplifiers. *IEE Proc., Pt. J*, 1985, **132**(1): 58~ 63
- [4] I. D. Henning, M. J. Adams, J. V. Collins, Performance prediction from a new optical amplifier model. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1985, **QE-21**(6): 609~ 613

## Theoretical Study of Travelling Wave Amplifier Gain Saturation Properties

Zhang Zhemin<sup>a</sup>    Chen Weiyou<sup>b</sup>    Liu Shiyong<sup>b</sup>    Huang Dexiu<sup>a</sup>

*a, Department of Optoelectronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074*

*b, National Integrated Optoelectronics laboratory, Jilin University Region, Changchun 130023*

(Received 27 July 1995; revised 25 December 1995)

**Abstract** Based on rate equations of carriers and photons, using transferring matrix method method, the gain saturation properties of semiconductor laser amplifier (SLA) are analysed theoretically. The dependences of SLA's gain and gain saturation on the injected current density and facet reflectivity are discussed. Although the Auger process may increase saturation intensity, it decreases the internal quantum efficiency and unsaturated signal gain greatly, so it isn't desired in SLA.

**Key words** travelling wave amplifier. gain saturation. rate equation. transferring matrix method.