

文章编号: 1001-3806(2007)05-0496-04

## 影响 VC SOA s 增益饱和特性因素分析

卢 静, 罗 斌\*, 潘 炜, 罗广军, 李建平, 蔺玉珂

(西南交通大学 信息科学与技术学院, 成都 610031)

**摘要:** 为了改善垂直腔半导体光放大器增益饱和特性, 基于其结构上的特点, 引入了增益增强因子, 修正了边界条件, 采用建立腔内光子数与输入信号光功率关系的研究方法, 分析了影响垂直腔半导体光放大器增益饱和特性因素。并进行了理论分析和实验论证, 取得了影响增益饱和特性的 4 个关键数据。结果表明, 有源区截面积、顶层镜面反射率、抽运功率、自发辐射因子影响着增益饱和特性, 优化相关参数, 可以将输入饱和功率提高到  $-2\text{dBm}$ 。这一结果对如何改善垂直腔半导体光放大器增益饱和特性是有帮助的。

**关键词:** 光通信; 垂直腔半导体光放大器; 速率方程; 增益饱和

**中图分类号:** TN248.4 **文献标识码:** A

### Analysis of influencing factors on gain saturation property of vertical-cavity semiconductor optical amplifiers

LU Jing, LUO Bin, PAN Wei, LUO Guangjun, LI Jianping, LIN Yuke

(School of Information Science & Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract** In order to improve the gain saturation property of vertical-cavity semiconductor optical amplifiers (VCSOAs), based on the structure character, applying gain enhancement factor, and modifying the boundary condition, the relation between input signal power and photon density was derived to study the gain saturation property. The calculation result was agreement with the experiment. Four factors affecting property of gain saturation were obtained. The results showed that the active region area, top mirror reflectivity, pump power, spontaneous emission factor affected the property of gain saturation. After optimizing the parameter, the input saturation power could arrive  $-2\text{dBm}$ . It is useful to improve the gain saturation property of VCSOAs.

**Key words** optical communication; VCSOAs; rate equation; gain saturation

## 引 言

近年来, 垂直腔半导体光放大器 (vertical cavity semiconductor optical amplifiers, VCSOAs) 的研究引起了人们的广泛关注。研究表明, VCSOAs 相比传统边发射半导体放大器具有与光纤耦合效率高、对光偏振不敏感、易于二维集成等优点。在新一代光纤通信网络、光信息处理、光计算等领域有着广泛的潜在应用前景<sup>[1~4]</sup>。

1994 年, TOMBLING 等人第 1 次提出了 VCSOAs 的概念, 并率先基于载流子光子速率方程和 F-P 腔方法对 VCSOAs 的性能进行了预测<sup>[1]</sup>。1995 年, KARLSSON 等人用小信号等效电路和速率方程分析了 VCSOAs 的基本特性<sup>[2]</sup>。2000 年, PIREK 等人提出了更详尽的速率方程模型<sup>[3]</sup>。但是这个模型中他将信号光输入耦合效率初步定为  $1 - R_1$  ( $R_1$  为输入端

面反射率), 这在  $R_1$  较小时是适用的。但是当  $R_1$  较大时, 由于 F-P 腔的多程放大作用, 信号光输入耦合效率的表达式变得很复杂。2002 年, 与 PIREK 同一课题组的 ROYO 等人从 Maxwell 理论分析出发, 得到了镜面损耗和放大增益有关的结论<sup>[4]</sup>, 认为之前模型镜面损耗表达式存在错误。2003 年, BJÖRLIN 等人在他的基础上修正了光子速率方程, 引入了光注入耦合效率  $\eta$ <sup>[5]</sup>。

但是在 BJÖRLIN 等人的模型中, 光注入耦合效率  $\eta$  及镜面损耗都是和放大器增益有关的变量, 使用起来不方便, 并且在推导过程中还忽略了自发辐射因子的影响。因此, 作者直接从边界条件出发, 导出腔内光子数与输入信号光功率之间的关系, 并和速率方程中的载流子方程相结合, 用另一种方法开展研究。ADAMS 等人曾针对边发射半导体光放大器, 研究过腔内光子数与输入信号光功率之间的关系<sup>[6]</sup>。而对于作者研究的 VCSOA 面发射微腔结构器件, 和边发射器件有很大的不同。需要考虑的因素有: 它通过将多量子阱堆生长在腔内驻波波峰处来增强单程增益, 驻波效应显得尤为重要, 需要引入增益增强因子  $\xi$  来反映这一效应。并且当

作者简介: 卢 静 (1981-), 女, 硕士研究生, 从事光通信与光放大器方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: b\_luo@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2006-06-12 收到修改稿日期: 2006-11-14

VC SOA s 有源区截面积较小时, 由于衍射作用, 端面等效反射率降低<sup>[7]</sup>, 必须修正 F-P 腔边界条件。在考虑前述因素的基础上, 作者研究了 VC SOA s 的有源区截面积, 顶层镜面反射率, 抽运功率, 以及自发辐射因子对增益饱和和特性的影响。理论分析结果和实验数据吻合<sup>[5]</sup>, 证明了此研究方法的可行性。

### 1 理论分析

VC SOA s 的出光方向垂直于衬底面, 基本结构如图 1 所示。VC SOA s 和边发射半导体光放大器结构的

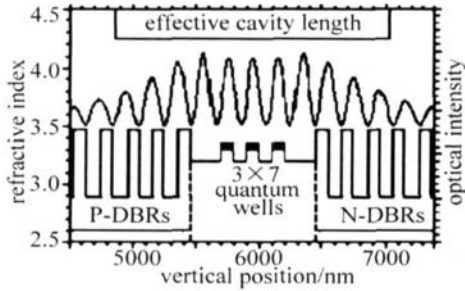


Fig 1 Effective index and standing wave

不同导致了它们主要特性的差异: (1)大部分边发射半导体光放大器具有足够大的单程增益, 可以作为行波放大器应用。而 VC SOA s 的短有源腔使其单程增益很小。为了补偿增益, VC SOA s 采用了深度反馈机制, 利用一对高反射率的分布布喇格反射器 (distribution Bragg reflector DBR) 膜堆形成谐振腔提供深度光反馈。另一方面构造多量子阱或量子阱堆结构作为有源区的增益介质, 且每个量子阱或量子阱堆都被设计生长在内部驻波的波峰位置上, 以获得理论上的最大增益。(2)VC SOA s 出射光为圆形光束, 从而克服了边发射半导体放大器对偏振较敏感、对光纤耦合效率低等缺点<sup>[8]</sup>。

根据微腔理论, VC SOA s 腔体可以看成由上下两个高反射率镜夹一个有源腔构成<sup>[9]</sup>, 见图 2 对 VC SOA s

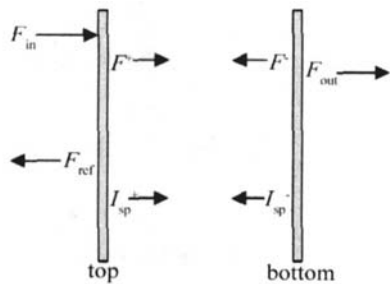


Fig 2 Schematic diagram of the VC SOA s

器件, 当有源区截面积较小时, 由于衍射作用, 入射到 DBR 端面上的光场分布与反射光场分布不再相同, 等效反射率降低<sup>[7]</sup>。R 表示直接按照正入射时计算的等

效反射率。R' 表示考虑了衍射效应后的等效反射率。对于从腔内发出的光, 入射端面等效反射率为 R'\_t (= r\_t'^2 = 1 - t\_t'^2), 反射端面等效反射率为 R'\_b (= r\_b'^2 = 1 - t\_b'^2), 而对于入射到腔内的光没有必要修正, 反射率仍为 R\_t (= r\_t^2 = 1 - t\_t^2) 和 R\_b (= r\_b^2 = 1 - t\_b^2)。r 为反射系数, t 为透射系数, 边界条件相应修正为:

$$I_{sp}^+(0) = R'_t I_{sp}^+(0) \tag{1a}$$

$$I_{sp}^-(L) = R'_b I_{sp}^-(L) \tag{1b}$$

$$F^+(0) = t_t F_{in} + r_t' F^-(0) \tag{2a}$$

$$F_{ref} = t_b F^-(0) + r_b F_{in} \tag{2b}$$

$$F_{out} = t_b F^+(L) \tag{3a}$$

$$F^-(L) = r_b' F^+(L) \tag{3b}$$

式中, F\_in 是 z = 0 处的输入场 (P\_in = |F\_in|^2 A\_in h v\_g c / λ A\_in 为光注入面积, h 为普朗克常量, λ 为信号光波长, c 为真空中光速, v\_g 为群速度), F\_out 是 z = L 处的输出场 (P\_out = |F\_out|^2 A\_out h v\_g c / λ)。F\_ref 是 z = 0 处的反射场。有源腔中, 腔内信号场 F± 和腔内所有能量的自发辐射强度 I\_sp± 服从:

$$\frac{dI_{sp}^\pm(z)}{dz} = \pm g_m(z) I_{sp}^\pm(z) \pm \frac{\beta R_{sp} E}{2} \tag{4}$$

$$\frac{dF^\pm(z)}{dz} = \pm \frac{g_m(z) F^\pm(z)}{2} \mp k F^\pm(z) \tag{5}$$

式中, 光子能量 E = hc / λ, g\_m 为模式增益, R\_sp 为自发辐射项, β 为自发辐射因子, k 为常数。

在 VC SOA s 内部, 载流子浓度 N 的分布严格来说与空间位置相关呈不均匀分布。在实际分析中, 由于其在 VC SOA s 内部量子阱堆处变化不大, 所以一般不考虑其与空间位置的相关性。本文中, 同样没有考虑 N 与空间位置的相关性。材料增益和载流子的关系为:

$$g(N) = g_0 \ln[(N + N_s) / (N_{tr} + N_s)] \tag{6}$$

式中, N\_tr 是透明载流子浓度, 即受激辐射速率等于受激吸收速率时的载流子浓度。g\_0 和 N\_s 分别为增益拟合参量和载流子拟合参量。单程增益 G\_s = exp(g\_m L\_c), 模式增益 g\_m = ξΓg - α\_c。ξ 是增益增强因子, 它反映了 F-P 腔驻波波峰与有源区量子阱的对准程度, 对得越准, 单程增益就越大 (ξ < 2)。纵向限制因子 Γ = L\_a / L\_c, L\_a 为量子阱厚度, L\_c 有效腔长, 它大于垂直腔几何长度 L\_m, 还把上、下 DBR 堆中的相位渗透深度 L\_b, L\_b 包括在内 (L\_c = L\_t + L\_m + L\_b)<sup>[3]</sup>。α\_c 为腔内平均吸收系数。

根据 F-P 腔理论, 结合修正后的边界条件, 可以得到反射模式下增益:

$$G_r = \frac{T_t^2 R_b' G_s^2 - 2T_t G_s \sqrt{R_t R_b'} (1 - \sqrt{R_t R_b'} G_s) + 4T_t \sqrt{R_t R_b'} G_s \sin^2 \phi}{(1 - \sqrt{R_t R_b'} G_s)^2 + 4 \sqrt{R_t R_b'} G_s \sin^2 \phi} + T_t \tag{7}$$

式中,  $T_r$  为入射端面透过率。  $\phi = 2\pi n_c L_c (1/\lambda - 1/\lambda_c)$ , 是单程失谐相位, 反映了信号光波长  $\lambda$  与腔谐振波长  $\lambda_c$  的偏移程度。  $n_c$  为腔内平均折射率, 即腔内所有膜层折射率的加权均值。 当  $\lambda = \lambda_c$  时, 达到峰值

$$S_{1av} = \frac{R_{sp}}{g_m v_g} \left\{ \frac{(\epsilon^{g_m L_c} - 1) [(1 - R_b') (1 + R_t' \epsilon^{g_m L_c}) + (1 - R_t') (1 + R_b' \epsilon^{g_m L_c})]}{g_m L_c (1 - R_t' R_b' \epsilon^{2g_m L_c})} - \right\} \quad (8)$$

式中, 自发辐射项  $R_{sp} = BN^2$ 。  $B$  为自发光子辐射速率。

由 (5) 式结合边界条件 (2) 式可知有源腔内由注入信号光引起的平均光子浓度  $S_{2av}$  为:

$$S_{2av} = \frac{\lambda_c}{hc A_{in} L_c v_g g_m} \times \left[ \frac{(1 - R_t) (1 + R_b' \epsilon^{g_m L_c}) (\epsilon^{g_m L_c} - 1)}{(1 - \sqrt{R_t R_b'} \epsilon^{g_m L_c})^2} \right] \quad (9)$$

式中,  $P_{in}$  为注入信号光功率,  $A_{in}$  为光注入面积。

则有源腔内平均光子浓度  $S_{av}$  为:

$$S_{av} = S_{1av} + S_{2av} \quad (10)$$

根据腔内载流子守恒可以得到:

$$\frac{j}{eL_a} = R_N + \frac{\Gamma g}{v_g} (\beta S_{1av} + S_{2av}) \quad (11)$$

式中,  $e$  表示电子量,  $R_N = AN + BN^2 + CN^3$ ,  $A$  为缺陷复合速率,  $B$  为自发光子辐射速率,  $C$  为俄歇复合速率,  $j$  为抽运电流密度, 自发辐射因子  $\beta$  就是沿放大器轴向的自发辐射光子率。

目前, 由于使用光抽运有很多优点, 载流子在量子阱中分布较均匀, 器件结构不用掺杂, 简化了生产工艺, 降低了损耗。 所以大都直接采用光抽运, 但是抽运效率  $\epsilon$  不高。 2000年, 加利福尼亚大学的 Berta Barbara 课题小组研发的第 1 代  $1.3\mu\text{m}$  光抽运 VCISOAs  $\epsilon = 0.036$ 。 第 2 代 VCISOAs 中, 在有源区刻蚀边墙以限制载流子, 提高抽运效率。 拟合的有效电流密度为<sup>[3]</sup>:

$$j = eL_a \frac{T_p P_p}{A_p} \times \frac{\lambda_p}{hc} \times \frac{1 - \exp(-\alpha_{qw} L_a)}{L_a} \times \epsilon \quad (12)$$

抽运透过率  $T_p \approx 1$ , 量子阱吸收系数  $\alpha_{qw} = 5000\text{cm}^{-1}$ , 抽运光面积  $A_p = 50\mu\text{m}^2$ ,  $P_p$  为抽运光功率,  $\lambda_p$  为抽运光波长。 目前一般采用波长  $980\text{nm}$  光进行抽运。

通过求解 (11) 式的数值解, 可以得到 VCISOAs 的增益饱和和特性等一系列特性。 对比 BJRLN 等人的速率方程模型<sup>[5]</sup> 可以知道, 这种研究方法引入了自发辐射引起的放大 (见 (8) 式), 而且 (9) 式里面已经包含了光注入耦合效率和镜面损耗, 避免了两者的单独求解。

## 2 计算结果

计算中所用到的参数为, 有源区等效折射率  $n_c = 3.2$ , 量子阱厚度  $L_a = 0.13\mu\text{m}$ , 有效腔长  $L_c = 2.2\mu\text{m}$ , 缺陷复合速率  $A = 0.7\text{s}^{-1}$ , 自发光子辐射速率  $B = 1 \times 10^{16}$

增益  $G_{\text{max}}$

由 (4) 式结合边界条件 (1) 式可知有源腔内由自发辐射引起的平均光子浓度  $S_{1av}$  为:

$\text{m}^3/\text{s}$  俄歇复合速率  $C = 2 \times 10^{-41}\text{m}^6/\text{s}$  腔内平均吸收系数  $\alpha_c = 1.5 \times 10^3\text{m}^{-1}$ , 增益系数  $g_0 = 1.58 \times 10^5\text{m}^{-1}$ , 透明载流子浓度  $N_t = 1.1 \times 10^{24}\text{m}^{-3}$ , 载流子拟合载流子参数  $N_s = -0.63 \times 10^{24}\text{m}^{-3}$ , 增益增强因子  $\xi_s = 1.75^{101}$ 。

图 3 中给出了等效反射率随有源区孔径的变化关系。 当有源区截面积小于  $20\mu\text{m}$  (有源区孔径小于

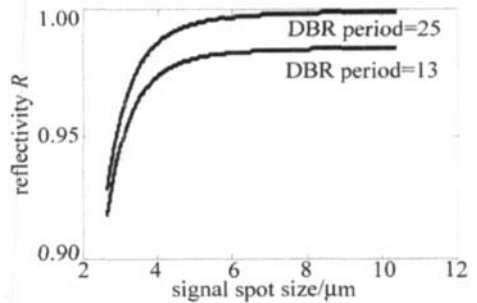


Fig 3 Reflectivity versus spot size when DBR periods are 13 and 25 respectively

$5\mu\text{m}$ ) 时, 作为小孔径出光, 考虑到衍射作用对 DBR 等效反射率的影响<sup>[7]</sup>, 等效反射率降低。 随着有源区孔径增大, 衍射作用不明显, 等效反射率和正入射时计算的等效反射率相当。 由图 3 知, 有源区孔径为  $4\mu\text{m}$  时,  $R_{13}' = 0.974$ ,  $R_{25}' = 0.987$ ; 有源区孔径为  $5\mu\text{m}$  时,  $R_{13}' = 0.981$ ,  $R_{25}' = 0.995$ 。

图 4 中给出了根据修正后等效反射率计算的增益饱和和曲线。 图中,  $j_p$  表示抽运电流密度,  $j_{th}$  表示阈值电

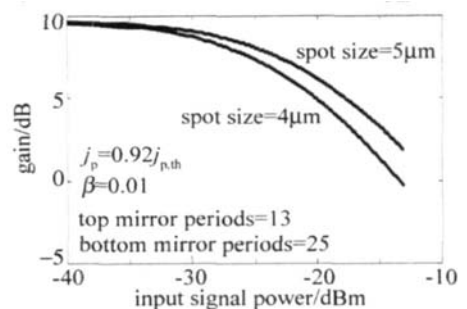


Fig 4 Gain versus input signal power

流密度。 当 VCISOAs 工作在小信号区, 即信号光输入功率  $P_{in}$  很小时 ( $P_{in} < -40\text{dBm}$  或  $0.1\mu\text{W}$ ),  $S_{2av}$  项  $R_N$  与项相比可以近似忽略, 即载流子浓度  $N$ ,  $g(N)$ ,  $G_s$  与  $G_{\text{max}}$  可视为与  $P_{in}$  无关。 然而随着  $P_{in}$  的增大,  $S_{2av}$  增大, 载流子浓度  $N$  下降, 导致  $g(N)$ ,  $G_s$  与  $G_{\text{max}}$  减小。 当  $G_{\text{max}}$  下降  $3\text{dB}$  时, 对应的  $P_{in, \text{sat}}$  称之为饱和输入功率。 由图可知, 两种有源区孔径下的饱和输入功率  $P_{in, \text{sat}}$  分

别为  $-24\text{dBm}$  和  $-21\text{dBm}$ 。由此可知, 当有源区截面积较小时, VC SOA s 饱和特性很差。

增大有源区截面积 (增大了有源区体积), 提高了 VC SOA s 有源腔的光贮备能力, 相对降低了有源腔内载流子浓度, 提高了饱和输入功率。图 5 中给出了饱和输

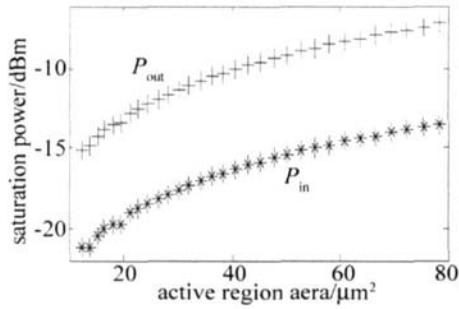


Fig 5 Saturation power versus active region area

入输出功率随有源区截面积的变化关系。自发辐射因子  $\beta = 0.01$ , 抽运功率  $P_p = 155.6\text{mW}$ , 顶层镜面反射率  $R_t = 0.985$ , 底层端面反射率  $R_b = 0.999$ 。随着有源区截面积的增大, 饱和输入输出功率逐渐变大, 而且增长速率基本相同, 说明饱和点处增益基本不变。但增大有源区截面积同时意味着要消耗更多的功率。在设计中应综合考虑两方面的因素。目前, 有源区截面积  $A_{in} = 64\mu\text{m}^2$  (孔径为  $9\mu\text{m}$ ) 的 VC SOA s 已经在实验室中实现<sup>[5]</sup>。

图 6 中给出了  $R_t$  分别为  $0.985$  和  $0.978$  两种情况下增益随输入信号功率的变化情况。此时  $R_t = 0.999$

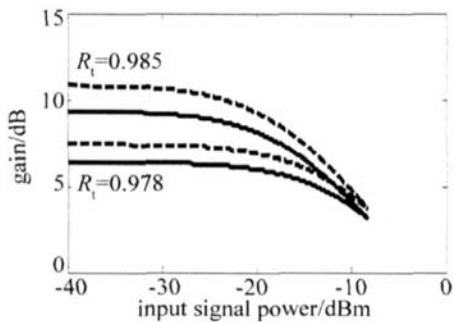


Fig 6 Gain versus input signal power at different top mirror reflection

有源区孔径  $9\mu\text{m}$ , 自发辐射因子  $\beta = 0.01$ , 实线部分的抽运功率  $P_p = 155.6\text{mW}$ 。从图中可以看出, 当顶层镜面反射率  $R_t$  分别为  $0.985$  和  $0.978$  时, 峰值增益分别为  $9.3\text{dB}$  和  $6.3\text{dB}$ , 此时的饱和输入功率  $P_{in,sat}$  分别为  $-13\text{dBm}$  和  $-8\text{dBm}$ , 饱和输出功率  $P_{out,sat}$  分别为  $-6.7\text{dBm}$  和  $-4.3\text{dBm}$ , 与实验结果吻合<sup>[5]</sup>。由此可见, 降低顶层镜面反射率 (减少 DBR 的周期数), 可以改善其饱和特性。但是降低顶层镜面反射率会使得饱和点处增益变小, 需要增大抽运功率以获得足够大的饱和增益。图中虚线部分是抽运功率  $P_p$  增大到  $158\text{mW}$  时的增益变化情况, 可以看出, 提高抽运功率增大了饱和点的增益。

除了 DBR 镜面反射率和抽运功率以及有源区截面积对 VC SOA s 的增益饱和和特性有影响外, 自发辐射因子也影响着增益饱和和特性。当 VC SOA s 工作在小信号区时, 增大自发辐射因子, 降低了载流子浓度, 改善了饱和特性。随着输入信号的增大, 自发辐射项的作用不再明显。图 7 中给出了饱和输入输出功率随自发辐射因子的变化关系。抽运功率  $P_p = 155.6\text{mW}$ , 有源

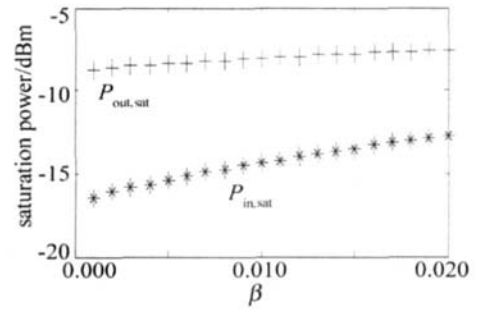


Fig 7 Saturation power vs spontaneous emission factor

区截面积  $A_{in} = 64\mu\text{m}^2$ , 顶层镜面反射率  $R_t = 0.985$ , 底层端面反射率  $R_b = 0.999$ 。从图中可以看出, 随着自发辐射因子的增大, 饱和输入和输出功率逐渐增大, 并且饱和输出功率的增长速率小于饱和输入功率。这说明增大自发辐射因子提高了饱和点处的功率, 但是降低了饱和点处的增益。由此可知, 增大自发辐射因子能有效地提高饱和输入功率, 对饱和输出功率作用不大。

### 3 结 论

导出了垂直腔半导体光放大器 (VC SOA s) 有源腔内平均光子数与输入信号光功率的关系, 分析了影响 VC SOA s 增益饱和特性的几个因素。当有源区截面积较小时 (小于  $20\mu\text{m}^2$ ), 必须考虑出光时衍射效应对 DBR 等效反射率的影响, 得到的饱和特性较差。增大有源区截面积能有效地改善放大器的饱和特性, 但不能增大饱和点处的增益。降低顶层镜面的反射率, 增大了饱和输入功率, 但是降低了饱和点处的增益, 需要更大的抽运功率以达到要求的增益。在小信号工作区, 增大自发辐射因子可以增大饱和输入功率, 但对饱和输出功率影响不大。

### 参 考 文 献

- [1] TOMBLING C, SAITOH T. Performance prediction for vertical cavity semiconductor laser amplifiers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1994, 30(11): 2491~2499.
- [2] KARLSSON A, HOIJER M. Analysis of a VC-LAD: vertical cavity laser amplifier detector [J]. IEEE Photonics Technology Letter, 1995, 5(11): 1336~1338.
- [3] PIPEK J, BERLIN S E, BOWERS E J. Design and analysis of vertical cavity semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2001, 37(1): 127~134.

(下转第 502 页)

$0.1 \text{ g/m}^3$ , 对应于左边纵坐标。图中数字为散射的阶数。可以看到, 衰减系数和光学厚度不大时 (对应虚线条), 多次散射的影响是很小的, 而当衰减系数很大 (也即含水量  $W$  很大) 时 (对应实线条), 即使光学厚度不大 ( $I_1 < 4$ ), 多次散射的影响仍然不可忽视。

### 3 结 论

对大气的多次散射的产生原因及其对激光通信的影响进行了分析, 对于后向散射干扰, 通过对收、发系统使用不同频率的信号光的办法来剔除, 即在接收端使用滤光片滤除本身发射的后向散射干扰光, 而只接收与发射端发射的频率相同的信号光。这种方法在实验中取得了非常好的效果, 大大消除了较恶劣天气下的后向散射干扰。

对于轻霾天气状态, 在衰减系数为  $0.46 \text{ km}^{-1}$  ( $2 \text{ dB/km}$  衰减, 相当于能见度约  $1.6 \text{ km}$  的霾天气)、传输距离在  $15 \text{ m}$  以内的情况下, 由于  $I_1 = 0.46 \times 15 = 6.9 \leq 25$ , 完全可以不考虑多次散射, 所以前向散射的干扰也可以不考虑。

### 参 考 文 献

[1] NETTLETON JE, BURTON JH. US army ultra light laser designator

development [OL/EB]. <http://www.dtic.mil/ndia/2004/amanents/2004amanents.htm> 2004-06-14.

- [2] WANG L, YANG Zh J, LI G P *et al*. Research of back scattered laser energy with in the energy measurement for large caliber high energy lasers [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(1): 45~48 (in Chinese).
- [3] LIU Y M, HUANG T X, YANG Z K. Study on lidar receiver field of view [J]. *Laser Technology*, 1999, 23(1): 46~50 (in Chinese).
- [4] SONG F Zh. Foundation of applied atmospheric optics [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990, 1~231 (in Chinese).
- [5] ZHANG Y X, CHIZ Y. Optical wave propagation and imaging in atmosphere [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997, 1~241 (in Chinese).
- [6] CHENG Y B, SU X Q, ZHAO M H *et al*. Analysis of the signal detection of laser scattering in the air [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(3): 277~279 (in Chinese).
- [7] TAM W G, ZARDECKIA. Multiple scattering correction to the Beer-Lambert law: open detector [J]. *Appl Opt*, 1982, 21(13): 2405~2412.
- [8] DEEPAK A, FARRUKH U Q, ZARDECKIA. Significance of higher-order multiple scattering for laser beam propagation through hazes, fogs and clouds [J]. *Appl Opt*, 1982, 21(3): 439~447.
- [9] ZARDECKIA, TAM W G. Multiple scattering correction to the Beer-Lambert law: 2<sup>nd</sup> detector with a variable field of view [J]. *Appl Opt*, 1982, 21(13): 2413~2420.
- [10] WANG H, SUN X, LIU S Sh. Advanced Mathematics [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1998, 1~292 (in Chinese).

(上接第 499 页)

- [4] ROYO P, KODA R, COLDREN A. Vertical cavity semiconductor optical amplifiers: comparison of Fabry-Pérot and rate equation approaches [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, 38(3): 279~284.
- [5] BURLIN S E. Carrier confined vertical cavity semiconductor optical amplifiers for higher gain and efficiency [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2003, 9(5): 1374~1384.
- [6] ADAM S JM, COLLINS V J, HENNING D I. Analysis of semiconductor laser optical amplifiers [J]. *IEE Proceedings*, 1985, 132(1): 58~63.
- [7] SAITOH T, MUKAIT T. Theoretical analysis and fabrication of antire-

reflection coatings on laser diode facets [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1985, 3(2): 288~293.

- [8] XU JH, LUO B, PAN W *et al*. Optical design of the gain bandwidth of vertical cavity semiconductor optical amplifiers based on the coupled cavities [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(1): 60~63 (in Chinese).
- [9] GUO Ch Zh, CHEN Sh L. On micro cavity effect in vertical cavity surface emitting quantum well laser with multilayer heterostructure reflectors [J]. *Acta Physica Sinica*, 1997, 46(9): 1731~1743 (in Chinese).
- [10] ZHAO Zh, PAN W, LUO B *et al*. Numerical analyses on gain properties of vertical cavity semiconductor optical amplifiers [J]. *Laser & Infrared*, 2004, 34(2): 116~118 (in Chinese).