

光纤耦合头对行波半导体激光放大器 工作特性的影响

刘雪峰 黄德修

(华中理工大学光学系, 武汉 430074)

提 要

本文阐述了半导体激光放大器组件中, 末端带高折射率类球透镜的锥形光纤耦合头对放大器芯片的外腔反馈效应, 从理论上对这种耦合头的反馈效应进行了计算. 为了使计算结果更接近于实际情况, 在理论分析中引入了厚透镜表面的菲涅耳(Fresnel)反射及有限孔径的影响.

关键词 光纤耦合头, 行波半导体激光放大器, 外腔反馈.

1 引 言

随着光通信技术的飞速发展, 半导体光电器件与单模光纤之间的高效率耦合已成为一个重要的研究课题. 研究表明, 在多种耦合方式中, 末端带高折射率类球透镜的锥形光纤耦合头是比较可取的, 为了获得较高的耦合效率, 要求类球透镜的折射率比光纤的折射率高许多. 对于一般的半导体激光器而言, 这种光纤耦合头由于其功率反馈率远小于芯片端面反射率, 因而几乎不会对激光器的工作特性产生影响. 然而对于内增益高达25~30 dB、端面残余反射率仅为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 的行波半导体放大器而言, 这种耦合头将对放大器的工作特性产生明显的影响, 因而对它的外腔反馈特性进行研究将具有重要的意义.

2 外腔反馈的理论计算

本文的理论分析中均采用柱坐标系 (r, ϕ, z) . 如图1所示的耦合系统中, 由半导体激光放大器前端面出射的椭圆高斯光束在经历了长度为 d 的自由空间传输后, 入射到一个顶部曲率半径为 R , 长 l 、折射率为 n 的类球面厚透镜. 该厚透镜采用特殊工艺在锥形

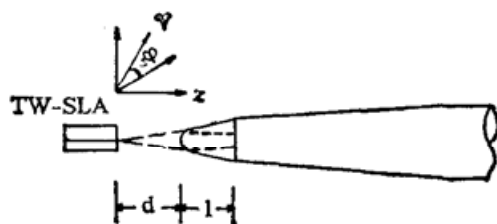


Fig. 1 The diagram of the couple structure

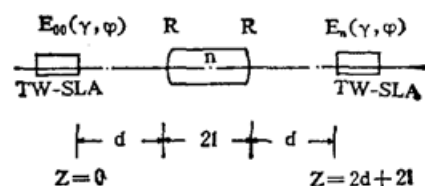


Fig. 2 The equivalent optical path of the couple structure

光纤顶部制成; 高斯光束经过类球面厚透镜变换后, 一部分光场将被耦合进单模光纤. 为了提高耦合效率 η_c , 类球透镜折射率 n 大于光纤平均折射率 n_F 因而高斯光束在此界面上将产生一定的反射, 反射光反向经过该类球透镜后, 回到放大器的前端面, 从而构成外腔反馈效应. 上述过程可用图 2 所示的等效光路表示.

2.1 耦合系统的传输矩阵

假定所讨论的光学元件均共轴, 同时采用近轴近似. 设半导体激光放大器芯片的前端面为 $z=0$ 平面, 则 $z=2d+2l$ 处的 $ABCD$ 矩阵为:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-n}{R} & n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2nl \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-n}{n \cdot R} & \frac{1}{n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

采用 q 参数法, 可得出 $z=2d+2l$ 处的高斯光束光斑半径 ω_x, ω_y 、等相位面曲率半径 R_x, R_y 和附加相位超前 $\eta(z)$ 分别为

$$\omega_i(z=2d+2l) = \left[\frac{\lambda_0 (B^2 + A^2 \cdot Q_{0i}^2)}{\pi (A \cdot D - B \cdot C) Q_{0i}} \right]^{1/2}, \quad (i=x, y) \quad (2)$$

$$R_i(z=2d+2l) = \frac{B^2 + A^2 \cdot Q_{0i}^2}{B \cdot D + A \cdot C \cdot Q_{0i}^2}, \quad (i=x, y) \quad (3)$$

$$\eta(z) = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\lambda_0 \cdot z}{\pi \omega_{0x}^2} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\lambda_0 \cdot z}{\pi \omega_{0y}^2} \right), \quad (4)$$

$$Q_{0i} = \pi \cdot \omega_{0i}^2 / \lambda_0. \quad (i=x, y) \quad (5)$$

由(2)、(3)、(4)、(5)等式可给出 $z=2d+2l$ 处的椭圆高斯光场为:

$$\begin{aligned} E(r, \phi, 2d+2l) = & \psi_0 \cdot \exp \left[- \left(\frac{r^2 \cos^2 \phi}{\omega_x^2} + \frac{r^2 \sin^2 \phi}{\omega_y^2} \right) \right] \\ & \cdot \exp \left[-j(Kz - \eta(z)) - j \cdot \frac{K}{2} \left(\frac{r^2 \cos^2 \phi}{R_x} + \frac{r^2 \sin^2 \phi}{R_y} \right) \right], \quad (6) \end{aligned}$$

式中 ψ_0 为振幅, ω_{0x}, ω_{0y} 为放大器前表面上水平和垂直两个方向上椭圆高斯光束的束腰半径, 在芯片前表面上出射的椭圆高斯光束为:

$$E_{00}(r, \phi, z=0) = \psi_0 \cdot \exp \left[- \left(\frac{r^2 \cos^2 \phi}{\omega_{0x}^2} + \frac{r^2 \sin^2 \phi}{\omega_{0y}^2} \right) \right]. \quad (7)$$

2.2 厚透镜的有限孔径和表面菲涅耳反射

由于半导体激光放大器出射的椭圆高斯光束的发散角较大, 而类球面厚透镜尺寸较小, 因而高斯光束中只有张角小于一定值的部分才能进入透镜. 令与此对应的最大半径为 r_a , 则:

$$r_a = \frac{R}{R+d} \sqrt{d^2 + 2dR}. \quad (8)$$

高斯光束发散角大的另一结果是必须考虑厚透镜表面随入射角而变化的菲涅耳反射, 如图 3 所示. 由简单的三角关系可得到:

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \arcsin \left(\frac{r_a}{R} \right) + \arcsin \left(\frac{r_a}{d+a} \right), \\ \alpha &= r_a \cdot \operatorname{tg} \left[\frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{r_a}{R} \right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

我们知道半导体激光放大器的有源区是非对称平板波导, 其输出场的主要能量集中在偏振方向平行于结平面的 TE 模上. 基于这一特性, 放大器出射场在厚透镜表面的振幅透过

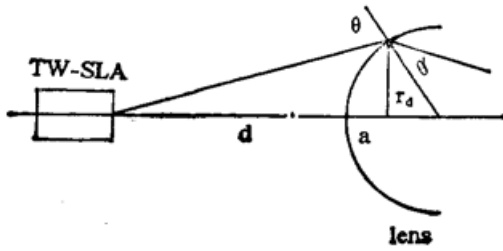


Fig. 3 The Fresnel reflection on the surface of thick lens

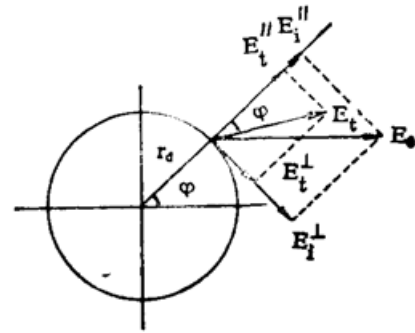


Fig. 4 The transmission of light on the surface of lens

系数 t 将不仅与入射角有关, 而且还将与极坐标分量 ϕ 有关, 然而在近轴近似下, 可以认为: 偏振方向与入射面的相对关系仅由 ϕ 决定, 图 4 给出了入射光振幅 E_0 及其两个正交分量 E_t^{\parallel} 、 E_t^{\perp} 与透射场振幅 E_t 及其两个正交分量 E_t^{\parallel} 、 E_t^{\perp} 之间的关系. 经过简单推导, 可以得出:

$$t_{\perp}(r_d) = \frac{E_t^{\perp}}{E_0^{\perp}} = \frac{2n_i \cdot \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i}, \quad t_{\parallel}(r_d) = \frac{E_t^{\parallel}}{E_0^{\parallel}} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t}, \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} t(r_d, \phi) &= \frac{E_t'}{E_0} = \sqrt{\cos^2 \phi t_{\parallel}^2 + \sin^2 \phi t_{\perp}^2} \cdot \cos(\phi - \varphi), \\ \varphi &= \arctan \left(\frac{t_{\perp} \sin \phi}{t_{\parallel} \cos \phi} \right), \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

(11)式中的 E_t' 表示透过光场 E_t 在平行结平面方向上的投影分量, φ 为 E_t 与入射面夹角. E_t' 的引入是由于反馈光场在回到放大器有源区前端面时, 只有偏振方向平行于结平面的光场分量才能与放大器出射场发生模式耦合. t_{\parallel} 、 t_{\perp} 分别为偏振方向垂直和平行于入射面的振幅透过系数, θ_i 为入射角, θ_t 为透射角, 它们由(9)式及折射定理给出, 对于光束入射厚透镜的情况, $n_i = n_0 = 1$, $n_t = n$; 对于光束由厚透镜出射的情况, $n_i = n$, $n_t = 1$, 为区别起见, 可以定义此情况下的振幅透过系数为 $t'(r_d, \phi)$.

由(11)式可以看出, $r_d = 0$, $\phi = 0$ 时, $t(r_d, \phi)$ 取得极大值 $t_0 = 2n_i / (n_i + n_t)$, 为此定义一个相对振幅透过函数 $f_t(r_d, \phi)$:

$$t(r_d, \phi) = t_0 \cdot f_t(r_d, \phi) \quad (12)$$

此外厚透镜与光纤界面处的光功率反射率为:

$$R_{L,F} = 1 - \left[\frac{4 \cdot n \cdot n_F}{(n + n_F)^2} \right] \quad (13)$$

2.3 不同平面内的坐标变换关系

前面所给出的菲涅耳反射和有限孔径都是以 $z = d$ 平面内的极坐标 (r_d, ϕ) 表示的. 由于我们最终要考虑的是对 $z = 2d + 2l$ 平面内光场的影响, 故必须用等效的方法将 $t(r_d, \phi)$ 和 r_d 变换到 $z = 2d + 2l$ 平面内. 考虑到椭圆高斯光束的传播规律, $z = d$ 平面内极坐标 r_d 与 $z = 2d + 2l$ 平面内的极坐标 r 之间的变换关系式为:

$$r_d = \left[\left(\frac{\omega_x(z=d)}{\omega_{ox}} \right)^2 r^2 \cos^2 \phi + \left(\frac{\omega_y(z=d)}{\omega_{oy}} \right)^2 r^2 \sin^2 \phi \right]^{1/2}, \quad (14)$$

将(14)式分别代入(11)、(8)即可得到经过平面变换后的透镜表面菲涅耳振幅透过系数 $t(r, \phi)$ 和有限孔径 r_{0x}, r_{0y} .

2.4 光功率反馈率 η_F 的计算

由前面的推导可以得出最终回到放大器前端面的光场分布:

$$E_n(r, \phi, z=2d+2l) = E(r, \phi, z=2d+2l) \cdot t(r, \phi) \cdot \sqrt{R_{LF}} \cdot t'(r, \phi), \quad (15)$$

$$0 \leq r \leq [r_{0x}^2 \cos^2 \phi + r_{0y}^2 \sin^2 \phi]^{1/2}$$

式中 $E(r, \phi, z=2d+2l)$ 由(6)式给出, (15)式表示了有限孔径的限制. 它表明, 由光放大器出射的椭圆高斯光场在经过图 1 所示的耦合系统后, 振幅由 ψ_0 降为 $\psi_0 \cdot t_0 \cdot t'_0 \cdot \sqrt{R_{LF}}$, 光场的分布形式发生了改变(由 f, f' 、相位变化以及有限孔径引起).

根据前面的分析, 可以得出光功率反馈率 η_F , 它表征了两个光场模式在耦合时由于幅度的改变和场分布形式的不同而引起的光功率注入损耗:

$$\eta_F = (R_{LF} \cdot t_0^2 \cdot t_0'^2) \cdot \frac{\left| \iint E_n^* \cdot E_{00} \cdot ds \right|^2}{\iint E_n \cdot E_n^* \cdot ds \cdot \iint E_{00} \cdot E_{00}^* \cdot ds} \quad (16)$$

(16)式中第一项表征了光场振幅由于传输中的反射、吸收等因素引起的功率损耗; 第二项则表征了两个光场在发生模式耦合时, 由于场分布形式的不同而产生的光功率注入损耗^[1].

图 5~图 7 分别为根据(16)式求出的 R 、 d 、 L 与光功率反馈率 η_F 的关系. 由上述三图可以看出, 透镜折射率 n 与 η_F 有着密切关系, n 的微小变化将引起 η_F 的明显变化, 这是由于 n 的大小不仅与高斯光束的传播过程密切相关, 而且与光功率的损耗直接联系. 此外, η_F

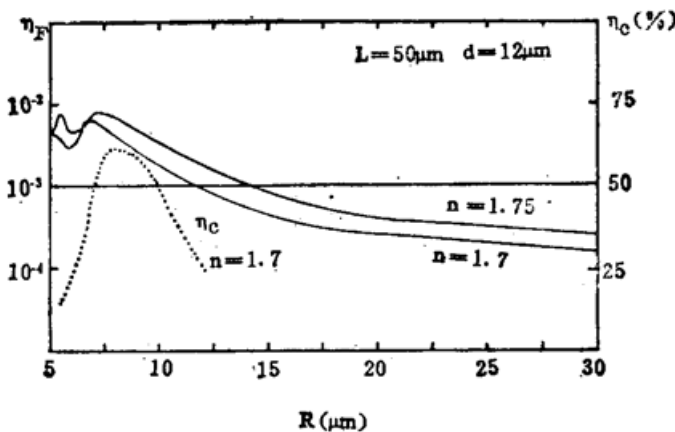


Fig. 5 The relationship between curvature radius R and outside feedback η_F

对 R 的变化最为敏感, 而对 L 的变化不敏感, 这一结果表明在制作光纤耦合头时, 对厚透镜的曲率半径须严格控制.

在制作光放大器时, 应该要求芯片与单模光纤耦合效率 η_c 尽可能高, 同时还希望光纤耦合头的光反馈尽可能低, 因为光反馈高会引起光放大器行波特性变坏. 图 5 中的虚线表示的是单模光纤耦合效率 η_c 与球透镜曲率半径 R 的关系. 由图 5 可见, 尽管可以通过选择合适的耦合头几何参数以使得 $\eta_F < 10^{-3}$, 但此时的单模光纤耦合效率也很低, 因此在制做光纤耦合头时, 应综合考虑, 既保证耦合效率较高, 又必须使光反馈较低以维持放大器的行波特性. 我们所进行的理论和实验结果表明, 具有 $n=1.7$, $R \sim 10 \mu\text{m}$, $d \sim 12 \mu\text{m}$, $L \sim 50 \mu\text{m}$ 这样一组几何结构参数的光纤耦合头具有较高的耦合效率 ($\sim 50\%$), 其光功率反馈率 η_F 的理论值为 3.81×10^{-3} . 显然这将导致半导体激光放大器的阈值下降. 通过测量阈值下降程度, 得出光纤耦合头的 η_F 测定值为 4.74×10^{-3} , 考虑到行波式放大器的软阈值特性所造成的测量误差以及理论分析中的近似误差, 作者认为理论计算值与实测

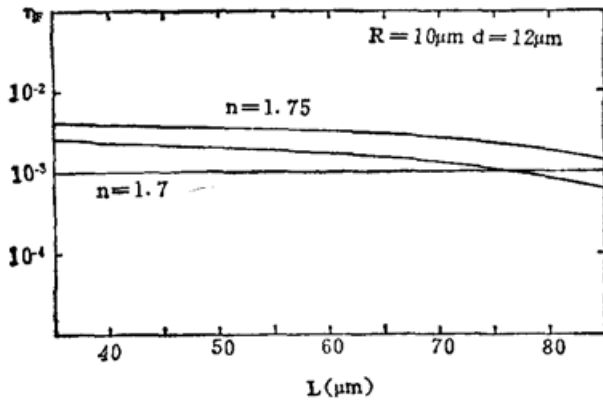


Fig. 6 The relationship between length of thick lens and outside feedback η_F

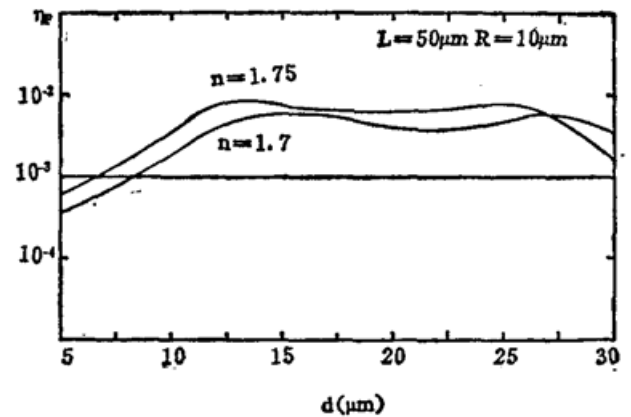


Fig. 7 The relationship between working distance d and outside feedback η_F

值是较为吻合的。实验中还发现光纤耦合头的光反馈强烈依赖于光纤耦合头与放大器芯片的准直性,其敏感程度大大超过耦合效率对准直性的敏感程度,这就为克服光反馈效应提供了另一条途径:耦合时引入一定的准直误差,以增加微小的耦合损耗来保证器件的行波特性。

3 结 论

理论分析的结果表明,末端带高折射率类球透镜的锥形光纤耦合头在作为行波半导体激光放大器的耦合结构时,有可能引入较强的光反馈,使放大器行波特性变坏。因此,在制作这种光纤耦合头时,应合理选择其几何尺寸参数并严格控制制做精度,以保证行波半导体激光放大器组件既具有较高的耦合效率,又具有良好的行波特性。

参 考 文 献

- [1] Jun-Ichi Sakai, Tatsuya Kimura, *IEEE J. Quant. Electron.*, 1980, **QE-16**(10): 1059~1065

Influence of fiber coupler on the property of travelling wave semiconductor amplifier

LIU XUEFENG HUANG DEXIU

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

(Received 11 September 1991; revised 19 December 1991)

Abstract

In this paper, the feedback effect of tapered-fiber coupler with high reflective index microlens on its top is described, which influences the property of travelling wave semiconductor laser amplifier. The theoretical analysis of the effect is presented with the Fresnel reflection on the surface of thick lens and the definite aperture introduced in the analysis to make the results agreement with the actual case.

Key words fiber coupler, travelling wave semiconductor laser amplifier, feedback.