

文章编号: 0253-2239(2005)06-825-4

矩阵理论在半导体激光器耦合中的应用*

刘宏展^{1,2} 刘立人¹ 徐荣伟¹ 潘卫清¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学研究室, 上海 201800)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 傍轴近似下的光学矩阵理论, 可以简化光束传输计算过程, 使光学系统设计更为方便。将 $ABCD$ 变换矩阵方法引入到耦合光学系统的设计中, 运用高斯光束的 $ABCD$ 法则, 详尽地给出了某一耦合方式下的半导体激光器耦合入单模光纤系统的设计; 另一方面, 对系统的耦合损耗与耦合距离的关系进行了理论计算, 并把计算结果与最近的实验报道做了比较, 它们基本相吻合, 说明此方法是可行的、合理的。从整个设计及理论计算来看, $ABCD$ 矩阵方法减少了复杂的计算, 从而简化了设计过程, 与通常的衍射计算相比, 它不失为一种方便、有效的方法, 同时它对生产半导体激光耦合器也有实际指导意义。

关键词: 激光器; 半导体激光器; 耦合; $ABCD$ 矩阵

中图分类号: TN248.4; O431.1 文献标识码: A

Application of Optical Matrix in Semiconductor Laser Coupling

Liu Hongzhan^{1,2} Liu Liren¹ Xu Rongwei¹ Pan Weiqing¹

(¹ Information Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Science, Shanghai 201800
² Graduate School of The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: The optical matrix under paraxial approximation can make the calculation of optical transmission easy and convenient in designing optical system. The $ABCD$ transformation matrix method for the coupling optical system design is introduced, using the $ABCD$ law of the Gaussian beam. The design of a coupling system of semiconductor laser diode to single-mode fiber is given in detail; additionally, the changes of the coupling loss with the coupling distance of the system are calculated, and then the recently reported results are compared, they roughly agree with each other, which shows the method is feasible. From the whole design and the calculation for coupling efficiency, the $ABCD$ matrix makes the design easier and reduces the cumbersome calculation. Compared with general diffraction calculation, it is a convenient and effective method and it can give some instructional suggestion for fabricating the semiconductor laser diode coupler.

Key words: lasers; semiconductor laser; coupling; $ABCD$ matrix

1 引 言

高功率半导体激光器的高效耦合在光通信、光放大器等激光应用领域一直备受关注, 有大量的科研人员从事这方面的研究, 设计出各种不同的耦合方法^[1~6]来提高耦合效率, 已取得了很大的进步。设计耦合系统时, 必须根据系统要求达到的性能, 挑选最佳的耦合方式, 并根据选择的耦合方式得到系统的具体参量。从这个角度来说, 如何方便快捷地计算出耦合系统的参量, 对耦合的最终实现意义重

大, 但从大量发表的文献看来^[1~6], 大家关注最多的是耦合系统的具体实施, 而很少涉及如何确定系统参量。基于这一现象, 本文把傍轴近似下的光学矩阵理论引入到半导体激光耦合系统的设计当中, 利用高斯光束的 $ABCD$ 变换矩阵, 详尽地给出了根据选择好的耦合方式, 如何确定半导体激光器耦合系统的参量, 即如何确定系统的具体设计; 另一方面, 计算了系统的耦合损耗随耦合距离的变化而变化的关系, 所得结果与最近报道的实验结果基本吻合, 这

* 上海市科委重点科技项目(012261011)资助课题。

作者简介: 刘宏展(1975~), 男, 湖南衡东人, 博士, 主要从事激光通信及相关检测技术研究。E-mail: lhghan@yahoo.com.cn

收稿日期: 2004-10-09; 收到修改稿日期: 2004-11-12

说明 ABCD 矩阵是合理、可行的。从确定系统参量来看, ABCD 矩阵方法简化了设计过程, 减少了复杂的计算, 与通常的衍射计算相比, 它不失为一种方便、有效的计算方法, 同时对生产半导体激光耦合器也有实际指导意义。

2 耦合系统中的矩阵理论

通常, 一个半导体激光器耦合入单模光纤系统可以用图 1 表示, 图中耦合光学部分的不同就决定了耦合方式的不同。耦合系统的设计就是根据耦合光学部分的不同而设计出符合要求的具体参量。在图 1 中, d 表示半导体激光器(LD)到耦合光学部分的距离, n_1 表示媒介的折射率, n_2 表示耦合光学部分的折射率。

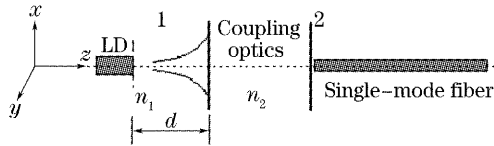


图 1 半导体激光器耦合入单模光纤示意图

Fig. 1 Schematic illustration of the common coupling scheme for semiconductor laser to a single-mode fiber

假设半导体激光器工作在单模状态, 从半导体激光器出来的光束一般是椭圆形的, 在平面 1 处, 它可以用高斯光束表示为^[7]

$$\Psi_u = \exp\left[-\left(\frac{x^2}{\omega_{1x}^2} + \frac{y^2}{\omega_{1y}^2}\right)\right] \times \exp\left[-jk_1\left(\frac{x^2}{2R_{1x}} + \frac{y^2}{2R_{1y}}\right)\right], \quad (1)$$

在这里, ω_{1x}, ω_{1y} 分别表示垂直和平行于结平面的输出光斑尺寸, R_{1x}, R_{1y} 是光束在输出面的曲率半径, $k_1 = 2\pi n_1/\lambda_0$ 是光束在媒介中的波数, λ_0 是光在自由空间的波长。当光束传播到平面 2 时, 可以表示为^[7]

$$\Psi_v = \exp\left[-\left(\frac{x^2}{\omega_{2x}^2} + \frac{y^2}{\omega_{2y}^2}\right)\right] \times \exp\left[-j\frac{k_2}{2}\left(\frac{x^2}{2R_{2x}} + \frac{y^2}{2R_{2y}}\right)\right], \quad (2)$$

式中 ω_{2x}, ω_{2y} 为经耦合单元转化后的光束束腰, R_{2x}, R_{2y} 分别为在平面 2 处 x, y 方向的波面曲率半径, $k_2 = 2\pi n_2/\lambda_0$ 是光束在耦合光学单元中的波数。

整个耦合系统, 在傍轴近似的条件下, 根据高斯光束的 ABCD 矩阵法则可以用一个变换矩阵来表示, 其关系式如下:

$$\frac{1}{q_i} = \frac{1}{R_i} - j\lambda_0 \frac{1}{\pi n_i \omega_i^2}, \quad (3)$$

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D}, \quad (4)$$

其中 q_i 表示高斯光束的复数参量, $i = 1, 2$, 分别对应平面 1 和平面 2。利用(3)式、(4)式, 则 ω_{2x}, ω_{2y} 和 R_{2x}, R_{2y} 满足如下关系:

$$\omega_{2x, 2y}^2 = \frac{(A + B/R_1)^2 \omega_{1x, 1y}^4 + (\lambda_1 B)^2}{n(AD - BC) \omega_{1x, 1y}^2}, \quad (5)$$

$$R_{2x, 2y} = \frac{(A + B/R_1)^2 \omega_{1x, 1y}^4 + (\lambda_1 B)^2}{(A + B/R_1)(C + D/R_1) \omega_{1x, 1y}^4 + \lambda_1^2 BD},$$

式中 $\lambda_1 = \lambda_0/(\pi n_1)$, $n = n_2/n_1$ 。对于不同的耦合方式, A, B, C, D 也将不同, 利用它们, 能方便地确定出系统的具体参量; 同时, 可以方便的求得系统的耦合效率及对应的损耗分贝值^[8], 它们是

$$\eta = \frac{4\omega_{2x}\omega_{2y}(\omega_f)^2}{[(\omega_f^2 + \omega_{2x}^2)^2 + (k_2^2 \omega_f^4 \omega_{2x}^4)/(4R_{2x}^2)]^{1/2} [(\omega_f^2 + \omega_{2y}^2)^2 + (k_2^2 \omega_f^4 \omega_{2y}^4)/(4R_{2y}^2)]^{1/2}}, \quad \text{Loss} = -10 \lg \eta, \quad (6)$$

其中 ω_f 表示单模光纤的本征模。当设计系统时, 理论上它的耦合效率如何, 是必须清楚的, 通常它的计算是很麻烦的, 文献[5]中, 利用了光束传输方法, 但不能避免繁琐的衍射积分, 而利用(6)式, 可以避开这一难题。下边将给出设计实例。

3 耦合系统的设计与分析

当设计耦合系统时, 选择何种耦合方式, 这本身是个值得研究的课题。在这里, 并不讨论如何确定耦

合方式, 而是针对某一选定的耦合方式, 研究如何运用矩阵理论, 来确定系统的具体参量, 并根据理论上的耦合效率与损耗来评价系统的可行性。选用图 2 所示的耦合方式。

图 2 表示半导体激光器经由端面为楔型的折射率渐变光纤 GIF₁ 和 GIF₂, 耦合进单模光纤。楔型 GIF₁ 的端面采用半圆柱体面型结构, 其半径为 R , GIF₁ 的长度为 L_1 , 它起着转换等相位面的作用, 在它的输出端, 光束将变成圆形光斑, 即 $\omega_x = \omega_y = \omega$; 而 GIF₂ 用作自聚焦透镜, 它能使单模光纤与半导体激

光器模式匹配,其长度为 L_2 。在半导体激光器和单模光纤之间,可以用光学矩阵分别表示为:空气隙的矩阵 M_0 、GIF₁ 的矩阵 M_1 以及 GIF₂ 的矩阵 M_2 :

$$M_0 = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} \cos \gamma_1 & A_{g1} \sin \gamma_1 \\ -\frac{1}{A_{g1}} \sin \gamma_1 & \cos \gamma_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{R} \frac{n_2 - 1}{n_2} & \frac{1}{n_2} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} \cos \gamma_2 & A_{g2} \sin \gamma_2 \\ -\frac{1}{A_{g2}} \sin \gamma_2 & \cos \gamma_2 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中 d 表示半导体激光器到 GIF₁ 的距离, n_2 表示 GIF₁ 和 GIF₂ 的折射率,而 γ_1, γ_2 被定义为

$$\gamma_1 = \frac{L_1}{A_{g1}}, \quad \gamma_2 = \frac{L_2}{A_{g2}}, \quad (10)$$

A_{g1} 和 A_{g2} 分别表示 GIF₁ 和 GIF₂ 的渐变折射率常数。

于是半导体激光器到 GIF₂ 前端的矩阵 M_{10} 为

$$M_{10} = M_1 M_0 = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中 A_1, B_1, C_1, D_1 分别对应(5)式中的 A、B、C、D,

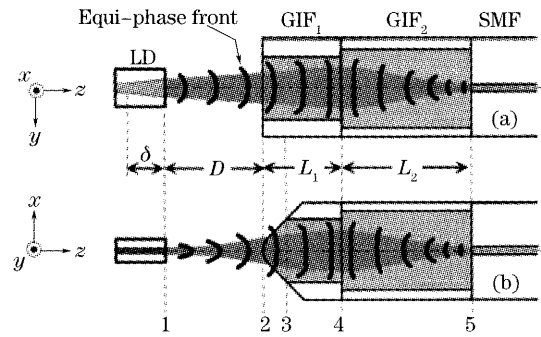


图2 半导体激光器耦合经楔形端面渐变折射率光纤耦合到单模光纤示意图。(a)从 $y-z$ 平面顶视图,(b)从 $x-z$ 平面的侧视图

Fig. 2 Schematic illustration of coupling semiconductor laser to an SMF through air and a wedge-shaped GIF. (a) Top view ($y-z$ plane), (b) side view ($x-z$ plane)

它们具体为

$$A_1 = \cos \gamma_1 + \frac{A_{g1}(1-n_2)\sin \gamma_1}{n_2}, \quad (12)$$

$$B_1 = d \cdot A_1 + \frac{A_{g1}}{n_2} \sin \gamma_1, \quad (13)$$

$$C_1 = \frac{(1-n_2)\cos \gamma_1}{n_2 R} - \frac{\sin \gamma_1}{A_{g1}}, \quad (14)$$

$$D_1 = d \cdot C_1 + \frac{1}{n_2} \cos \gamma_1, \quad (15)$$

于是(5)式变为

$$\begin{cases} \omega_{2x,2y}^2 = \frac{(A_1 + B_1/R_1)^2 \omega_{1x,1y}^4 + (\lambda_1 B_1)^2}{n \omega_{1x,1y}^2}, \\ R_{2x,2y} = \frac{(A_1 + B_1/R_1)^2 \omega_{1x,1y}^4 + (\lambda_1 B_1)^2}{(A_1 + B_1/R_1)(C_1 + D_1/R_1) \omega_{1x,1y}^4 + \lambda_1^2 B_1 D_1}, \end{cases} \quad (16)$$

采用图2的耦合方式时,要求在 GIF₁ 的输出端,光束必须平行光轴输出,即要求 D_1 为零,由此条件得到

$$L_1 = A_{g1} \arctan \left[\frac{A_{g1}}{n_2} \left(\frac{1}{d} + \frac{1-n_2}{R} \right) \right]. \quad (17)$$

接下来,确定 GIF₂ 的参量。GIF₂ 能减少光斑尺寸,使其与单模光纤 SMF 的本征模匹配,它的输入光斑尺寸为 $\omega_{2x} = \omega_{2y} = \omega$, SMF 的本征模尺寸为 ω_f ,它们之间有个简单的关系式^[9]:

$$\omega \cdot \omega_f = \frac{\lambda_0}{\pi n_2} A_{g2}, \quad (18)$$

联合(12)式~(18)式,可以得到

$$A_{g2} = n_2 \frac{\omega_f}{\omega_{x1}} \sqrt{\left(\frac{\pi}{\lambda_0} \right)^2 \omega_{x1}^4 A_1^2 + B_1^2}, \quad (19)$$

光束经过 GIF₂ 后,将聚焦到最小,则 GIF₂ 的长度为

$$L_2 = \pi A_{g2} / 2. \quad (20)$$

有了以上关系式,结合给定的初始条件就可以方便地确定 GIF₁ 和 GIF₂。在图2的耦合方式中,取 $\omega_{1x} = 0.6 \mu\text{m}$, $\omega_{1y} = 25 \mu\text{m}$, 像散 $\delta = 176 \mu\text{m}$, $\lambda_0 = 0.98 \mu\text{m}$, $n_2 = 1.45$, $R = 46 \mu\text{m}$, $d = 67 \mu\text{m}$, $\omega_f = 3.1 \mu\text{m}$, $A_{g1} = 272 \mu\text{m}$ 。利用这些条件,由(17)式得 $L_1 = 209 \mu\text{m}$;由(12)式、(14)式、(19)式、(20)式得到 $A_1 = -0.55$, $B_1 = 93.09$, $A_{g2} = 697 \mu\text{m}$, $L_2 = 1095.56 \mu\text{m}$,这样整个系统的关键参量就确定了。

按照以上方法确定的系统参量,依据(6)式,计算出了系统耦合损耗随耦合距离 d 的变化曲线。为了检验设计是否正确,把计算结果与文献5中的结果作了比较。两者的耦合方式相同,所取参量基本相同,如果各自的曲线变化趋势相同,则可以证明矩阵方法是正确的。图3(a)是利用(6)式得到的曲线,图3(b)

对应文献 5 中的情况。比较两者,可以发现,它们的变化趋势基本一致,特别是系统所能达到的理论最小损耗是相同的(1.35dB),如果忽略参量之间的细微差别,可以说,用傍轴近似下的矩阵方法来设计耦合系统是可行的,与传统的通过计算衍射来确定参量相比,它更方便。

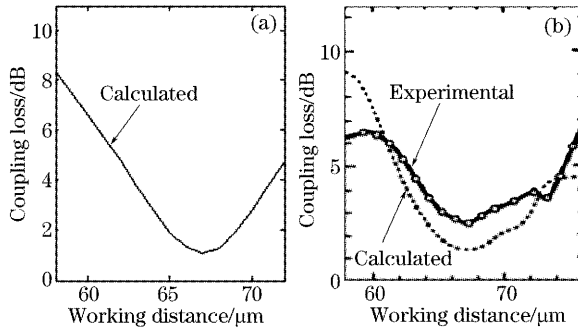


图 3 耦合损耗随耦合距离的变化关系。(a)对应用矩阵方法得到的理论曲线,(b)对应文献[5]中的图 4 的情况
Fig. 3 Coupling losses as a function of the coupling distance.
(a) the calculated result is obtained by using the matrix method; (b) the Fig. 4 of the Ref. [5]

4 结 论

本文通过一个实例,详细地阐述了傍轴近似下的矩阵理论在半导体激光耦合光学系统设计中的应用,利用它可以方便快捷地得到系统参量,并计算出系统的耦合效率,从而评价其可行性。另外,通过与相似参量条件下的已报道的相同耦合方式相比,它们的理论耦合效率基本相同,考虑到具体参量的细微差异,可以说,按矩阵方法设计耦合系统是切实可行的;不足的是,如果变换矩阵很难写出,就没有它的用武之地。所以说,对常用的耦合方式,变换矩阵的方法不

失为一种优先考虑的方法,同时,它对生产半导体激光耦合器也有实际指导意义。

参 考 文 献

- Zheng Chaosi, Hu Qiquan, Tu Yuzhen *et al.*. Study of coupling of multiple diode laser with self-focusing lenses[J]. *Chin. J. Lasers*, 1996, **A23**(11): 975~979 (in Chinese)
郑朝思,胡企铨,屠玉珍等. 半导体激光器的组合式光束耦合研究[J]. *中国激光*, 1996, **A23**(11): 975~979
- Wei Chaojiang, Zha Kaide, Wang Xinhong. Diode laser coupling to a cone-endface-fiber[J]. *Chin. J. Lasers*, 1998, **A25**(1): 46~50 (in Chinese)
韦朝灵,查开德,王新宏. 尖锥端面光纤和半导体激光器的耦合[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(1): 46~50
- Bo Baoxue, Gao Xin, Wang Ling *et al.*. 808 nm wavelength high-power fibre coupling LD[J]. *Chin. J. Lasers*, 1999, **A26**(3): 193~196 (in Chinese)
薄报学,高欣,王玲等. 808 nm 波长光纤耦合高功率半导体激光器[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(3): 193~196
- Wei Rong, Wang Yuzhu. Telescope system used to the single mode fiber coupling of the laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(8): 687~690 (in Chinese)
魏荣,王育竹. 望远镜准直系统应用于激光的单模光纤耦合[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8): 687~690
- Hidehiko Yoda, Taketo Endo, Kazuo Shiraishi. Cascaded GI-fiber chips with a wedge-shaped end for the coupling between an SMF and a high-power LD with large astigmatism[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(8): 1545~1548
- Kazuo Shiraishi, Hidehiko Yoda, Taketo Endo *et al.*. A lensed GIO with a long working distance for the coupling between laser diodes with elliptical fields and single-mode fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1104~1106
- Somenath Sarkar, K. Thyagarajan, Arun Kumar. Gaussian approximation of the fundamental mode in single mode elliptic core fibers[J]. *Opt. Commun.*, 1984, **49**(3): 178~183
- S. Gangopadhyay, S. N. Sarkar. Laser diode to single-mode fibre excitation via hyperbolic lens on the fibre tip: Formulation of ABCB matrix and efficiency computation[J]. *Opt. Commun.*, 1996, **132**(15): 55~60
- Kazuo Shiraishi, Akira Ogura, Kota Matsuura. Spotsizes contraction in standard single-mode fibers by use of a GI-fiber tip with a high focusing parameter[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(12): 1757~1759