

文章编号: 1001-3806(2008)05-0505-03

## 半导体激光器矢量光场分布研究

贾文武, 汪岳峰\*, 黄峰, 张 颖

(军械工程学院 光学与电子工程系, 石家庄 050003)

**摘要:** 为了实现在利用衍射光学器件整形半导体激光器时, 得到半导体激光器各个电磁分量的分布, 且该分布能够在较近的距离上仍然适用的目的, 采用基尔霍夫衍射理论和非傍轴条件下的菲涅耳近似理论推导和 MATLAB 语言编制相应的数值计算程序的方法, 得到半导体激光器各电磁分量分布的结果。结果表明, 除在特殊方向上, 半导体激光为 TM 波和 TE 波的混合模, 数值程序实现了计算不同距离上半导体激光器各个电磁分量的分布情况的功能。这对设计和分析半导体激光器衍射整形光学器件具有重要意义。

**关键词:** 激光器; 半导体激光器; 光场分布; 非傍轴条件

**中图分类号:** TN248.4 TN302 **文献标识码:** A

## Study on vector light field of laser diodes

JIA Wen-wu, WANG Yue-feng, HUANG Feng, ZHANG Jie

(Department of Optics and Electron Ordnance Engineer College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract** In order to achieve the intensity in the vector light field applicable not far away from the laser diode when applying diffractive optics to shape the beam of laser diode, Kirchhoff diffractive theory and Fresnel approaching method under nonparaxial condition was adopted to derive out each electromagnetic component's distribution and the MATLAB language was adopted to compute the numerical result. The results show that the diode laser is a mixture of TE mode and TM mode except in some special directions and the function of computing distribution of each electromagnetic field is realized. The study should be useful for design and analysis of the diffractive optics for LD laser beam shaping.

**Key words** lasers; laser diode; optical distribution; nonparaxial condition

### 引 言

在半导体激光器的大多数应用中, 人们往往只关心其强度分布, 而很少关心其矢量光场分布。衍射光学器件由于体积小、重量轻、波面变换灵活等特点是进行半导体激光光束整形的一种很有潜力的方案<sup>[1-4]</sup>。随着衍射光学器件的特征尺寸减小到与波长相比拟, 此时对衍射光学器件的设计和分析都需要进行严格的电磁矢量分析。因此, 有必要讨论半导体激光器的矢量光场分布。由于半导体激光器的发散角较大, 这一方面使傍轴近似条件不成立, 传统的傍轴衍射理论对半导体激光器不适用; 另一方面使光斑在很短的距离上就会扩展得很大, 衍射整形器件常常放置在距离半导体激光器较近的地方, 这就要求半导体激光矢量光场分布在该距离上仍然能够适用<sup>[5-6]</sup>。由此本文中探

讨了半导体激光器的矢量光场分布, 通过对各电磁分量的单独处理得出了半导体激光器的矢量光场分布; 并开发了相应的程序包。对设计半导体激光器衍射光束整形器件具有重要意义<sup>[7-8]</sup>。

### 1 半导体激光器矢量光场

设半导体激光器的波导结构如图 1 所示, 即具有

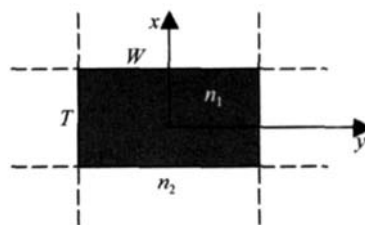


Fig 1 Rectangle wave-guide of laser diode

厚度为  $T$ 、宽度为  $W$  的矩形横截面的沟道形和阶跃形折射率分布的对称的波导, 其中芯区折射率为  $n_1$ , 包覆层折射率为  $n_2$ 。

若在波导模的电场矢量分量中, 主要是  $y$  分量  $E_y(x, y)$ , 假设半导体激光器波导模可写为分离变量的形式<sup>[9]</sup>:  $E_y(x, y) = Au(x)v(y)$  (1) 式中,  $A$  为常量,  $u(x)$ ,  $v(y)$  分别为  $E_y$  在  $x$ ,  $y$  方向上分

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10376044)

作者简介: 贾文武 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为半导体激光光束整形和衍射光学设计。

\* 通讯联系人。E-mail wfyfmai@sina.com

收稿日期: 2007-07-09; 收到修改稿日期: 2007-12-19

量变量形式。

采用有效折射率  $N$ , 则传播常数  $\beta = Nk_0$ , 并设  $\gamma = k_0 \sqrt{N^2 - n_2^2}$ ,  $K_x = k_0 \sqrt{n_1^2 - N^2}$ 。则  $u(x)$  可以写为 ( $y$  方向类似):

$$u(x) = \begin{cases} E_0 \cos\phi_x \exp[-\gamma_x(x - T/2)], & \left(x > \frac{T}{2}\right) \\ E_0 \cos(K_x x - m\pi/2), & \left(-\frac{T}{2} \leq x \leq \frac{T}{2}\right) \\ E_0 (-1)^m \cos\phi_x \exp\left[\gamma_x\left(x + \frac{T}{2}\right)\right], & \left(x < -\frac{T}{2}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $k_0$  为真空介质中的波数,  $E_0$  为常量,  $T$  为芯区厚度,  $\phi_x, \gamma_x, K_x$  的下标  $x$  表示相应物理量在  $x$  方向上分离变量的形式, 且满足:  $\phi_x = \tan^{-1}(\gamma_x/K_x)$ ,  $K_x T - 2\phi_x = m\pi$  ( $m = 0, 1, 2, \dots$ )。由于  $E_y \gg E_z \gg E_x$ , 假定  $x$  分量  $E_x = 0$  则由 Maxwell 方程式可以给出其它电磁场分量:

$$\begin{cases} E_z = (i/\beta) \partial E_y / \partial y \\ H_x = [1/(\omega\mu_0\beta)] (\partial^2 E_y / \partial y^2 - \beta^2 E_y) \\ H_y = [-1/(\omega\mu_0\beta)] \partial^2 E_y / \partial x \partial y \\ H_z = [1/(i\omega\mu_0)] \partial E_y / \partial x \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $E_x, E_y, E_z$  分别为沿  $x, y, z$  方向的电场分量;  $H_x, H_y, H_z$  分别为沿  $x, y, z$  方向的磁场分量。  $\omega$  为激光频率,  $\mu_0$  为磁导率。

波导内传播的光波在端面处被反射, 同时一部分向自由空间输出。在紧靠端面的位置能够观测到输出光波与波导横模成正比的形状。该输出波一边改变波面与强度分布, 一边向空间传播。虽然半导体激光器的有源区厚度较小, 但是半导体激光器的光场向波导层渗透, 因此, 半导体光场在向自由空间传播时满足标量传播近似条件<sup>[10]</sup>: (1) 衍射孔径远大于波长 ( $3\lambda \sim 5\lambda$ ); (2) 不要在太靠近孔径的地方观察衍射场。故半导体激光在自由空间的传播可以利用基尔霍夫衍射理论对电磁场各分量进行单独处理, 从而得到半导体激光器的矢量光场分布。

## 2 非傍轴条件下的菲涅耳近似

由于半导体激光器的发散角较大, 傍轴近似条件往往不成立。因此, 在求其衍射时必须考虑倾斜因子的影响; 同时考虑到衍射光学整形器件往往靠近半导体激光器使用的情况, 取近似时必须使之能够在较近的距离上仍然能够适用。设半导体激光器端面处一电磁分量分布为  $U(x_0, y_0)$ , 如图 2 所示, 由基尔霍夫衍射公式在距离半导体激光器  $z$  平面处该分量分布<sup>[5]</sup> 为:

$$U(x, y, z) = \frac{1}{j\lambda} \iint (x_0, y_0) \frac{\exp(jkR)}{R} \cos\theta dx_0 dy_0 \quad (4)$$

式中,  $\lambda$  为激光波长,  $k$  为波数,  $R$  是由点光源至观测

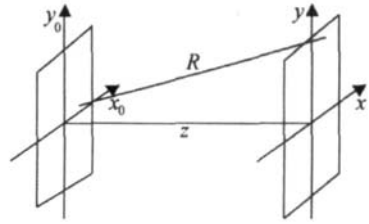


Fig 2 The transmission of electromagnetic components

点的距离,  $\theta$  是  $R$  和  $z$  轴的夹角。在实际使用中常常需要对 (4) 式进行近似处理。

(1) 对分母  $R$  的处理。将  $R$  展开得:  $R =$

$$\sqrt{r^2 + x_0^2 + y_0^2 - 2xx_0 - 2yy_0}, \text{ 其中 } r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

由于半导体激光器的口径较小, 因此可将含有  $x_0$  的项去掉, 对结果影响不大。故分母  $R$  可以简化为  $r$ 。

(2) 对分子上  $R$  的处理。与菲涅耳衍射中对分子的近似处理类似, 当距离足够大时, 分子上  $R$  可以写为:

$$R = z \sqrt{1 + \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{z^2}} \approx z + \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2z} \quad (5)$$

则  $U(x, y, z)$  可以写为:

$$U(x, y, z) = \frac{1}{j\lambda} \frac{\exp(jkz)}{r} \cos\theta \iint (x_0, y_0) \times \exp\left[jk \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2z}\right] dx_0 dy_0 \quad (6)$$

实际上, 并不需要  $z$  足够大使高阶项相位因子远小于  $1\text{rad}$ 。例如当  $z$  很小时, 指数上的系数  $\pi/(\lambda z)$  变得很大。尽管此时  $z$  不满足菲涅耳近似的条件, 但是此时可以采用稳相积分<sup>[5]</sup> 计算, 则式中高次项相位因子振荡很快, 使被积函数正负变化很快, 致使积分的主要贡献来自稳相点  $x = x_0, y = y_0$  附近, 即  $(x-x_0), (y-y_0)$  值很小, 高阶项可以完全忽略。因此, 在靠近半导体激光器的较近的范围仍然适用。

利用 (6) 式分别计算出半导体激光器的  $E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$  磁分量的复数场分布, 它们共同构成了矢量光场分布。但是式中积分为 2 维卷积, 一般情况下卷积运算十分复杂, 可以对其适当的空间离散化后进行数值计算。经过上述分析, 利用 MATLAB 语言编制了相应半导体激光器矢量光场分布计算程序包, 可以计算出在不同距离上半导体激光器的各个电磁分量的复数场分布, 其中模代表了各分量的幅值分布, 幅角代表了各分量的相位分布。图 3 是计算了电场主要分量为  $E_y$  时基模半导体激光在  $z = 50\mu\text{m}$  的平面上各个电磁分量的幅值分布情况, 由于此时  $E_y \gg E_z \gg E_x, H_x \gg H_z \gg H_y$ 。故在实际应用中常常忽略掉  $E_x$  和  $H_y$  分量的影响。

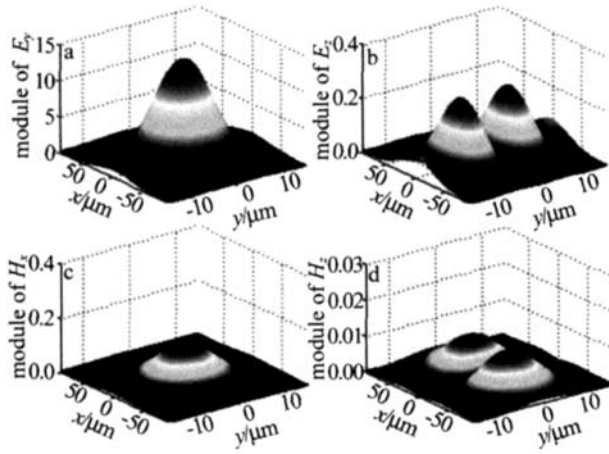


Fig 3 The amplitude distribution of electromagnetic components when  $z = 50\mu\text{m}$

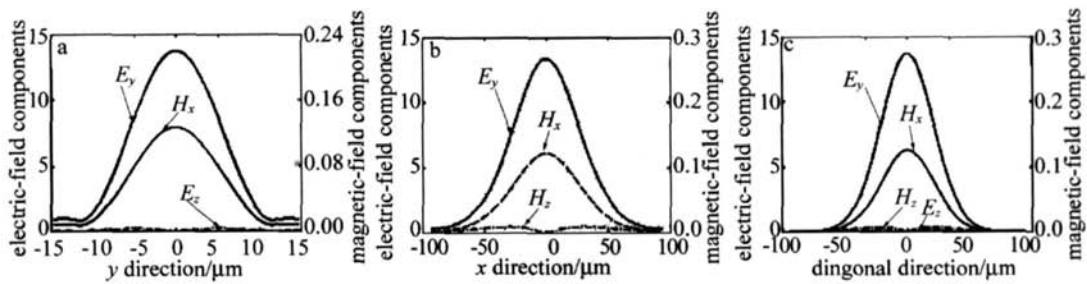


Fig 4 The electromagnetic components distribution in different direction

在的, 而是混合模。

### 3 结论

在满足衍射孔径远大于波长 ( $3\lambda \sim 5\lambda$ )、且在不太靠近孔径的地方观察衍射场的条件下可以对各电磁分量单独处理, 从而得到其矢量光场分布。本文中运用非傍轴条件下的菲涅耳近似推导出了半导体激光器的矢量光场分布, 并利用 MATLAB 语言编制了相应的数值计算程序包。实现了计算不同距离上半导体激光器各个电磁分量的分布情况的功能, 对设计和分析半导体激光器衍射整形光学器件具有重要意义。

#### 参考文献

- [1] BAO N K, CHEN Zh Y, ZHANG J J. Phase-only diffractive optical element for improving the beam quality of a vertical-cavity surface-emitting laser array [J]. *Optik*, 2004, 115(1): 23-27.
- [2] FORESI J S, LEVY J, JACKSON J E. Intensity redistribution and collimation of laser diode arrays using binary optics [J]. *SPIE*, 1990, 1211: 253-257.

由图可以看出, 半导体激光器的各电磁分量并不都如  $E_y$  分量那样均为基模高斯分布。其中  $E_z$  分量为  $\text{TE}_{01}$ , 而  $H_z$  分量为  $\text{TM}_{10}$  分布。在只考虑半导体激光器的强度分布时, 由于  $E_z \ll E_y$ , 这时可以忽略  $E_z$  分量对强度的影响。但是, 当设计衍射光学器件时, 由于各电磁分量之间的相互耦合, 不得不考虑半导体激光的各个主要电磁分量的分布情况。图 4 为不同方向上的主要电磁分量的分布。由该图可知在  $y = 0$  处 (沿  $y$  方向)  $E_y$  为基模分布时的各电磁分量的幅值分布, 其中  $E_z$  恰好为 0 而  $E_x, H_y$  非常小, 可以近似为 0 将主要电磁分量置于图 4 中, 可见,  $y = 0$  处 (沿  $x$  方向) 可以近似为 TE 波。同理在  $x = 0$  处 ( $y$  方向) 近似为 TM 波。而当  $x, y$  均不为 0 时, TE 模和 TM 模不是独立存

- [3] ASFOUR J M, TSCHUDIT. Beam-shaping of laser diodes with binary diffraction optics [J]. *SPIE*, 1994, 2041: 312-317.
- [4] DU B X. The principle of semiconductor laser [M]. Beijing Weapon Industry Press, 2004: 79-93 (in Chinese).
- [5] XUE H, ZHANG Q, LI P. The analysis of far-field light intensity characteristic of laser diode [J]. *Laser Technology*, 2004, 31(4): 661-663 (in Chinese).
- [6] LI Sh Y, YU Y G, YE H Y, et al. The estimation of the parameters in the model of the self-mixing effect in semiconductor lasers [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(5): 519-521 (in Chinese).
- [7] LI Y. Initial research on near field light beam orthopedics design for semiconductor laser [J]. *Arm Weaponry*, 2007(1): 51-52 (in Chinese).
- [8] HE X J, YANG H J, QIU Q. The collimation design of the semiconductor laser array light beams [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(6): 658-660 (in Chinese).
- [9] WU X. Beam properties and beam combining technique for semiconductor lasers [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004: 41 (in Chinese).
- [10] YANG G, SONG F J. *Advanced physical optics* [M]. Hefei: Chinese Science and Technology Press, 1989: 75-68 (in Chinese).

(上接第 504 页)

- [6] WARNOCK R E, GIESKES W C. Regional and seasonal differences in light absorption by yellow substance in the Southern Bight of the North Sea [J]. *Journal of Sea Research*, 1999, 42(3): 169-178.
- [7] ROESLER C S. Theoretical and experimental approaches to improve the accuracy of particulate absorption coefficients derived from the quantitative filter technique [J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43(7): 1649-1660.
- [8] MOREL A. Optical modelling of the upper ocean in relation to its

biogenous matter content (case 1 waters) [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1988, 93(9): 10749-10768.

- [9] GOULD R W, ARNONE R A, Jr. Spectral dependence of the scattering coefficient in case 1 and case 2 waters [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(12): 2377-2383.
- [10] HOWARD R. Diffuse reflectance of the ocean: influence of nonuniform phytoplankton pigment profile [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(12): 2116-2129.