

模折射率透镜光学特性的计算分析

叶宇煦 许政权

(上海交通大学应用物理系, 上海 200030)

提要 本文从传统几何光学原理出发,用光线追迹的方法来计算研究准直光束斜入射到模折射率透镜(MIL)上产生的像差,以及当半导体激光器与波导端射耦合以MIL作为准直透镜时,输出准直光束的发散情况,并探讨MIL在集成光学频谱分析仪(IOSA)中作为准直或会聚透镜的适用性。计算表明MIL在IOSA中作为准直或会聚均是可行的。

关键词 模折射率透镜,集成光路,光线追迹

Calculation of the optical characteristics of mode index lens

YE Yuxu, XU Zhengquan

(Department of Applied Physics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)

Abstract Based on the traditional geometric optics principles and the method of ray tracking, this paper reports the calculation of the aberration of the mode index lens (MIL) when the collimated beam incidents upon it inclinely with an angle, and the divergency of the output beam from the MIL when it works as a collimator for the end-butt coupling between the semiconductor laser and the waveguide. The results demonstrate that as a collimator and converging lens in the integrated-optic spectrum analyzer (IOSA) the MIL is suitable.

Key words mode index lens, ray tracking, integrated-optics

1 引言

波导透镜是集成光路中的重要器件,要求它完成聚焦、成像放大、准直和 Fourier 变换等功能,尤其是在集成光路的光学信号处理和光计算的应用中显得极为重要,模折射率透镜与其他波导透镜,如 lune burg 透镜、geodesic 透镜及 Fresnel 透镜相比,具有设计简单,容易制作的特点。它是利用几何光学中 Fermat 原理(即等光程原理)来设计的^[1,2],故对斜入射的准直光束同样存在着几何光学像差;而当 MIL 作为半导体激光器波导端射耦合的准直透镜时,由于光源发射层有一定宽度,出射光束必定存在发散,上述两种情况的考虑,对于作为准直和会聚透镜的 MIL 的设计都是至关重要的。

本文通过几何光学的光线追迹的方法来研究 MIL 的设计及其光学性能,并探讨 MIL 在集成光学频谱分析仪中的适用性。

2 准直光束斜入射 MIL 产生的像差的计算分析

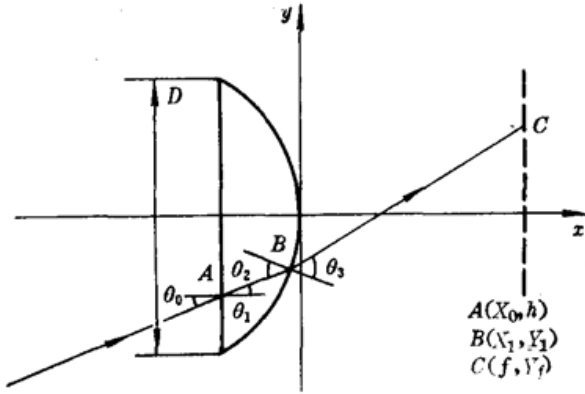


Fig. 1 The scheme of ray tracking

根据 Fermat 原理,对于图 1 所示的 MIL 由水平入射光线 ($\theta_0 = 0$) 的等光程性,可知其轮廓为

$$\begin{cases} \left(\lambda - \frac{f}{n+1} \right)^2 - \frac{Y^2}{n^2-1} = \left(\frac{f}{n+1} \right)^2 \\ X = X_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 $n = n_i/n_g$, n_i 为 MIL 折射率, n_g 为波导折射率,因此给定焦距 f 和孔径 D 即可确定 MIL 的轮廓。

利用光线追迹方法可以追踪光线在波导平面内的传播对于相同入射角 θ_0 ,不同入射高度 h 的光线,可计算其出射光线在 MIL(一维)焦面上的位置,通过这些位置的分布范围可确定斜入射平行光束所产生的像差。

下面讨论追迹的具体过程。

首先,在 $X = X_0$ 界面上,入射光线发生折射,并以 θ_1 角出射,由折射定律

$$\theta_1 = \sin^{-1}(\sin\theta_0/n) \quad (2)$$

折射光线的方程,由 A 点的坐标 (X_0, h) 可写为

$$Y = K_1(X - X_0) + h \quad (K_1 = \tan\theta_1) \quad (3)$$

考虑方程(1)和(3),可计算出折射光线在 MIL 轮廓上的出射点 B 的位置 (X_1, Y_1) 。

光线在 B 点发生第二次折射,入射角应以通过该点的 MIL 轮廓线的法线方向为参照,考虑方程(1)知 MIL 轮廓线上任意点的法线斜率

$$K = - \frac{Y}{(n^2-1)X - f(n-1)} \quad (4)$$

以及法线的方向角 $\theta_i = \tan^{-1}(K)$,则第二次折射的入射角 θ_2 为

$$\theta_2 = \theta_1 - \theta_K \quad (5)$$

折射角 θ_3 为

$$\theta_3 = \sin^{-1}(n\sin\theta_2) \quad (6)$$

第二次折射后的光线的方向角 θ_4 为

$$\theta_4 = \theta_3 + \theta_K \quad (7)$$

折射光线的方程由 B 点坐标 (X_1, Y_1) 可写为

$$Y = K_2(X - X_1) + Y_1 \quad (K_2 = \tan\theta_4) \quad (8)$$

折射光线在焦面 $X = f$ 上的位置计算可得

$$Y_f = K_2(f - X_1) + Y_1 \quad (9)$$

通过选择不同的入射高度 h 在入射光束孔径内扫描,计算 $Y_{f,\max}, Y_{f,\min}$,即可得到斜入射准直光束在 MIL 焦面上产生的像差 abe

$$abe = Y_{f,\max} - Y_{f,\min} \quad (10)$$

对于准直光束的不同入射角 θ_0 ,可以计算其像差 abe 的大小,于是得到 $abe \sim \theta_0$ 关系,一般情况

下,像差 abe 总是随着入射角 θ_0 增大而迅速增大的。

图 2 和图 3 分别给出了孔径 D 一定,不同焦距 f 的 MIL 的像差与光束入射角的关系和焦距 f 一定,不同光束入射角 $\text{ang}0$ (即 θ_0) 的 MIL 像差与其孔径 D 的关系,上述计算对应于光束宽度为 2 mm 对称入射的情况,且 n_g 取 2.183, n_t 取 2.284,分别对应于 Ti:LiNbO₃ 波导和经质子交换后透镜区在 He-Ne 激光 632.8 nm 波长下的折射率,由图可以看出,随着准直光束入射角的增大,MIL 的像差迅速增大,而且透镜的焦距对像差的影响也较为显著,像差是随着焦距的增大而减小的,而对于一定入射光束宽度,透镜的孔径对像差的影响则较小。

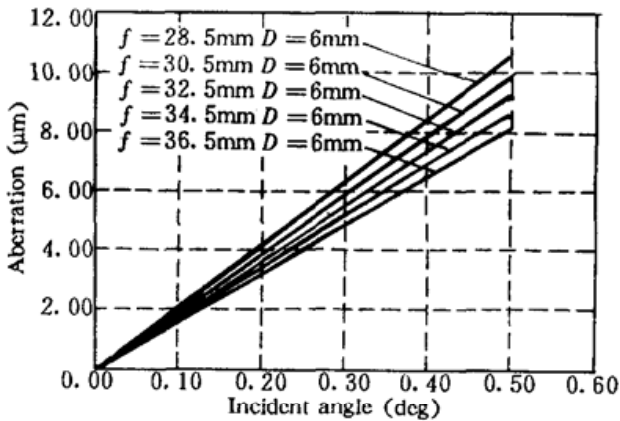


Fig. 2 The relation between the aberration and the incident angle of collimated beam

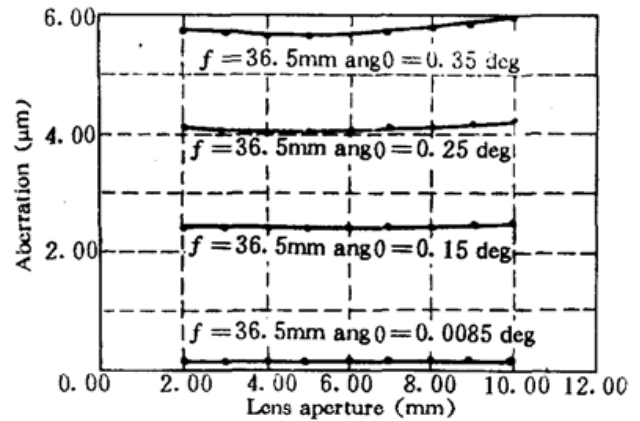


Fig. 3 The relation between the aberration and the lens aperture

3 作为波导端射耦合输入光束准直透镜 MIL 的输出光束发散情况的计算

由于半导体激光器发射的激光束准直性较差,半导体激光器与波导的耦合一般采用端接耦合。耦合进入波导的光束使用 MIL 进行准直,因此激光器和波导端接的界面即为 MIL 的焦面,由于半导体激光器光发射层具有一定的宽度 W ,经 MIL 准直后的光束将存在一定的发散角。

选用耦合进入波导的发散光束的边缘光线进行光线追迹来计算射出准直光束的发散角,同时在 MIL 的设计中,通过其厚度的选择来保证由边缘光线确定的准直输出光束的宽度 OBD 。

对于一定焦距 f 的 MIL,其轮廓线形状即确定,输入光束的边缘光线的第一次折射光线也同时确定,对于所要求的输出光束宽度 OBD ,可在折射光线上确定出射点的位置,从而同时也选取了 MIL 的出射平面的位置,即确定了 MIL 的厚度。

对于如图 4 所示的 MIL,其轮廓线的方程为

$$\left(X + \frac{f}{n+1}\right)^2 - \frac{Y^2}{n^2-1} = \left(\frac{f}{n+1}\right)^2 \quad (11)$$

由于 MIL 和激光器位置放置及光路的对称性,并且考虑到激光器宽度 W (约几个微米)远远小于透镜焦距,选取输入光束的边缘光线为

$$Y = K_0(X + f) - W/2 \quad (K_0 = \tan\theta_0) \quad (12)$$

来进行研究。

考虑方程(11)和(12),可计算出该边缘光线在 MIL 轮廓线上入射点 B 的位置 (X, Y) 。

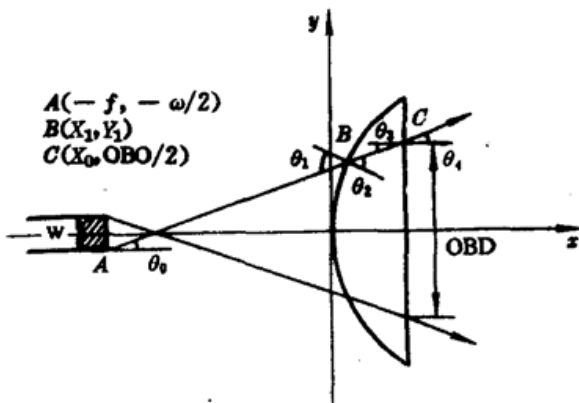


Fig. 4 MIL works as the collimator for end-butt coupling

由方程(11)可知 MIL 轮廓线上任意点的法线斜率为

$$K = -\frac{Y}{(n^2 - 1)X + (n - 1)f} \quad (13)$$

法线方向角 $\theta_K = \tan^{-1}(K)$, 因此光线的入射角为

$$\theta_1 = \theta_0 - \theta_K \quad (14)$$

经折射后折射角为

$$\theta_2 = \sin^{-1}(\sin\theta_1/n) \quad (15)$$

折射光线方向角为

$$\theta_3 = \theta_2 + \theta_K \quad (16)$$

折射光线方程为

$$Y = K_1(X - X_1) + Y_1 \quad (K_1 = \tan\theta_3) \quad (17)$$

选定出射光束宽度 OBD 之后, 由上式即可确定边缘光线出射点 $C(X_0, OBD/2)$ 的位置

$$X_0 = (OBD/2 - Y_1)/K_1 + X_1 \quad (X_0 > X_1) \quad (18)$$

从而可确定 MIL 的厚度 X_0 。

边缘光线在 MIL 边界 $X = X_0$ 处发生第二次折射, 其折射角 θ_4 对应于准直输出光束的发散角的一半。

$$\theta_4 = \sin^{-1}(n\sin\theta_3) \quad (19)$$

对于特定的激光器宽度 W 和端射耦合输入光束的发散角 θ_0 , 可以计算 MIL 取不同焦距 f 时, 在保证出射光束宽度 OBD 的情况下, 对应的准直输出光束的发散角和 MIL 的厚度, 从而选取 MIL 的最佳焦距。

我们计算了典型 LED 参数情况下 ($W = 6 \mu\text{m}$, $2\theta_0 = 6^\circ$, 这里 $2\theta_0$ 是指 LED 发出的激光束端射耦合入波导的发散角), 对应输出准直光束宽度 $OBD = 2 \text{ mm}$, 不同焦距 f 对应的准直 MIL 的厚度、孔径和准直光束发散角的情况, 计算中取 n_r 为 2.183, n_i 为 2.284。计算表明, 当准直 MIL 焦距 f 为 18.57 mm 时, 其准直输出光束的发散角 $2\theta_4 = 2 \times 0.0084^\circ$, 所得 MIL 的厚度和孔径分别为 2.135 mm 和 4.050 mm, 这种 MIL 十分小巧, 对加工非常有利。

4 MIL 在 IOSA 中的适用性

IOSA 是典型的集成光路, 在 IOSA 中使用了两块波导透镜, 一块作为准直透镜, 将半导体激光器端射耦合进入波导的发散光束进行准直, 一块作为会聚透镜, 将经过布拉格衍射的平行光束会聚到光电探测阵列上。

对于设计参数为 100 MHz 信号带宽, 2 MHz 信号分辨率探测器单元宽度为 $6 \mu\text{m}$ 在 Ti:LiNbO_3 波导上制作, 使用 He-Ne 激光的 IOSA, 考虑声光布拉格衍射效应, 知其声光衍射范围为 $2 \times 0.24^\circ$, 选择会聚透镜光轴的方向为 IOSA 信号中心频率对应的布拉格衍射方向, 衍射光束对称分布于会聚透镜光轴的两侧, 这样入射 MIL 的光束入射角范围为 -0.24° 至 0.24° , 从而降低光束斜入射造成的 MIL 像差, 进而根据探测器单元的宽度, 选择会聚透镜焦距为 36.5 mm 以满足 IOSA 信号分辨率的要求, 选择准直光束宽度为 2 mm 以满足会聚透镜衍射极限特性的要求^[9]。

由图 2, 图 3 可知, 当光束入射角为 0.24° , MIL 像差有效期明显小于 IOSA 典型探测元宽

度 $6 \mu\text{m}$, 说明 MIL 可以胜任 IOSA 中的会聚透镜, 而在上节的讨论中发现, 当 MIL 作准直透镜时, 其输出准直光束的发散角只有 $2 \times 0.0085^\circ$, 这对于会聚 MIL 的像差的影响是微不足道的 (如图 3 所示), 因此 MIL 同样也可胜任 IOSA 中的准直透镜。

参 考 文 献

- 1 许政权 等编, 介质光波导器件原理, 上海交通大学出版社, 1989, § 4.5, § 8.2
- 2 蔡伯荣 主编, 集成光学, 电子科技大学出版社, 1990, § 4.4, § 7.2
- 3 Michael K. Barnoski et al., *IEEE Transaction on Circuit and System*, CAS-26, 1113(1979)

.....

CHINESE JOURNAL OF LASERS B

Vol. B2, No. 6 (Series No. 12), December 20, 1993
(November/December)

CONTENTS

• LASER DEVICES •

- Near diffraction limit output and gain saturation of soft X-ray laser
..... Shiji Wang, Yuan Gu et al. (481)
- Tunable 5-watts Ti:Al₂O₃ laser oscillating with a quasi-continuous wave pumping
..... Xinglong Wang, Changqing Wang et al. (485)
- An investigation of coupled-cavity diode lasers Qunzhu Li, Shiqiao Zhang et al. (489)
- Characteristics of a helical axial flow CO₂ laser I-yung Fu, Chin-chiang Liu et al. (497)
- Thermal characteristics of Nd³⁺-doped fiber ring laser pumped by Ti:sapphire tunable laser
..... Hai Ming, Guangyu Xu et al. (503)

• LASER PHYSICS AND LASER CHEMISTRY •

- Enhanced ionization and population inversion with double-pulse laser heating
..... Xiaofang Wang, Shensheng Han et al. (509)
- HMO model of scalar field in vacuum Hong Guo, Guoxin Zhao et al. (517)
- Study of reflection and transmission on the moving interface of medium
..... Youfa Wang, Haining Fan et al. (521)
- 599.2 nm diffuse band radiation generated by two-photon exciting molecular and atomic potassium
..... Suotang Jia, Lijuan Qin et al. (527)

• EXPERIMENTAL TECHNOLOGY AND ELEMENT •

- A multi-purpose phase modulator for one beam ESPI F. Chen, Jie Gu (533)
- Design and properties of binary axliens Jing Zhou, Wenmin Shi et al. (543)
- Measurement of the choroidal blood flow-time curve and its applications
..... Jiexiang He, Dawei Zhang et al. (549)

• HOLOGRAPHY AND INFORMATION PROCESSING •

- Multi-functional real-time optical processor with self-pumped phase conjugator of Cu:KNSBN
..... Jingwen Zhang, Hua Zhao et al. (557)

• LASER APPLICATION •

- Studies on the quality improvement of frozen semen of bull with treatment of helium-neon laser
..... Wenbin Yue, Kelu Li et al. (565)
- Erratum (576)
- Index (569)