

“激光原理”中的约化厚度与光程

杜戈果

(深圳大学 电子科学与技术学院, 广东 深圳 518060)

摘 要:笔者在激光原理教学中,针对一道涉及谐振腔等效腔长的习题中存在的问题,应用光线传输矩阵,先计算了光线从一端腔镜行进到另一端腔镜时的系统的变换矩阵,给出了等效腔长的表达式;然后从矩阵光学的最基本概念出发,分析了约化厚度概念的来源,给出了合理的解释;最后分析了其与光程概念的不同,并指出了二者不同的应用场合。

关键词:约化厚度;光程;激光原理;谐振腔

中图分类号:TN241

文献标识码:A

文章编号:1008-0686(2009)02-0040-02

Reduced Thickness and Optical Path in the Curriculum Principle of Lasers

DU Ge-guo

(College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: In the course of teaching of the curriculum Principle of Laser, the problem about the effective length of the resonant cavity in which there is a laser medium caught the writer's attention because students are subject to make an error on solving it. After analysis, the author noticed the concept of reduced thickness and of optical path are always confused by students. In this paper, the transform matrix of the light from one cavity mirror to the other mirror is calculated first with the expression of the effective length being presented. Then the concept of the reduced thickness is introduced and explained. At last these two concepts of reduced thickness and of optical path are distinguished clearly and their different applied occasions are also presented.

Keywords: reduced thickness, optical path, principle of lasers, resonant cavity

1 一道习题引出的问题

“激光原理”课程教材^[1]中,第二章有一道习题为:“激光器的谐振腔由一面曲率半径为1m的凸面镜和曲率半径为2m的凹面镜组成,工作物质长度为0.5m,其折射率为1.52,求腔长 L 在什么范围内是稳定腔。”

学生在求解这道题时,最易出错的地方就是对等效腔长 L' 的计算。

实际腔长 L (腔的几何长度)等效于自由空间的腔长度。如果是自由空间的情况,等效腔长等于实际

腔长;但当腔内存在折射率不为1的介质时,等效腔长就不等于实际腔长了。也即用等效腔长处理问题时,就不需要再考虑腔内物质的折射率了。假设工作物质长度用 l 表示,折射率用 η 表示,则不少学生认为等效腔长 $L' = L - l + \eta l$ 。这实际上就是光线在腔内行进时所对应的光程。表面上看来,光从一个腔镜进入另一个腔镜所走的距离不就是光程吗?

2 分析

如果应用矩阵光学的方法来处理这个问题,结果是不同的。对近轴光线从左至右进行追踪。假设

收稿日期:2008-09-06;修回日期:2008-12-03

基金项目:2008年深圳大学项目“建立与完善电子科学与技术学院本科教育质量保障体系的研究与实践”资助。

作者简介:杜戈果(1971-),女,博士,教授,主要从事激光技术的教学和科研工作, E-mail: dugeguo@szu.edu.cn

工作物质离左腔镜的距离为 l_1 , 离右腔镜的距离为 l_2 , 则 $l_1 + l + l_2 = L$ 。光线从左腔镜行进至右腔镜时系统的变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & L' \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/\eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

对于上式已事先证明: 光线从折射率为 n_1 的介质进入折射率为 n_2 的介质时光线变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n_1/n_2 \end{bmatrix}$$

经过简单的计算变换可得

$$\begin{bmatrix} 1 & L' \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l_2 + l/\eta + l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L - l + l/\eta \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

这里, 我们发现等效腔长为 $L' = L - l + l/\eta$ 。或者说, 光线通过折射率为 η 、厚度为 d 的平行平面介质的变换矩阵为 $\begin{bmatrix} 1 & d/\eta \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 而不是 $\begin{bmatrix} 1 & \eta d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。

为什么会出现这样的结果呢? 我们该如何理解这种情况?

从矩阵光学的最基本概念出发来考虑这个问题。任一傍轴光线在某一给定的横截面内都可以由两个参数来表征: 一个是光线离轴线的距离 r , 另一个是光线与轴线的夹角 θ 。当光线通过折射率为 η 和厚度为 d 的平行平面介质后, 虽然光线在介质内由于折射发生了偏折, 但两次折射的结果, 出射后的光线与入射的光线传播的夹角保持不变; 此时 $\theta_2 = \theta_1$, 如图 1 所示。但光线到光轴的距离则发生了变化, 而且由于折射的原因, 与在真空中传播相比, 光线离轴线的距离缩短了。在真空中, 当光线通过一段距离 d 后, 出射光线离轴线的距离为 $r'_2 = r_1 + d \cdot \theta_1$; 而通过折射率为 η 、厚度为 d 的平行平面介质后, 出射光线离轴线的距离变为 $r_2 = r_1 + d \cdot \theta = r_1 + (d/\eta) \cdot \theta_1$, 相当于光线在真空中平移距离 d/η 后离轴线的距离。

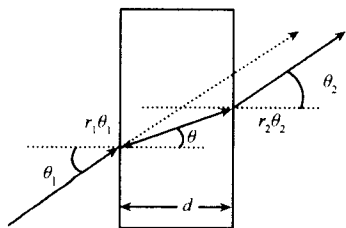


图 1 光线通过厚度为 d 的平板介质

一些教材称 d/η 为两个参考平面之间间隔的“约化厚度”^[2]。如果光线在自由空间中行进距离 d 所引起的坐标变换为

$$\begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

那么光线通过折射率为 η 、厚度为 d 的平行平面介质后所引起的坐标变换为

$$\begin{bmatrix} 1 & d/\eta \\ 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

光在媒质中通过的几何路程与该媒质的折射率的乘积称为光程, 其物理意义说明光程实际上就是光在媒质中通过的几何路程按波数相等的要求折合到真空中的路程, 因此光程又叫等效真空程^[3]。在这里, 约化厚度可以理解为光线在媒质中平移按所引起的光线到轴线的距离相等的要求折合到真空中的厚度。

掌握了这些概念之后, 针对习题中引出的问题就可以进行解答了。当腔内存在激光工作物质时(无论其位置), 等效腔长 $L' = L - l + l/\eta$ 。然后利用共轴球面腔的稳定性条件去确定 L 的取值范围。同时可以看到, 约化厚度与等效腔长是不同的概念, 但二者又有联系的, 在这个问题中工作物质对应的等效长度就是其约化厚度。

对前文提到的腔, 假如要分析其纵模间隔, 根据激光原理可知有

$$\Delta\nu_q = \nu_{q+1} - \nu_q = c/2L'$$

这里的 L' 不是上文中的等效腔长, 而是腔的光学长度, 即 $L' = L - l + \eta l$ 。实际上就是从—个腔镜到另一个腔镜的光程。

3 结语

如果笼统地把两种情况(腔的稳定性和纵模间隔)下的 L' 叫做有效腔长的话, 通过以上分析可以看到, 在腔内存在折射率大于 1 的介质时, 当分析相位差、光程及纵模间隔等问题时, 有效腔长是大于实际腔长的; 而当分析腔的稳定性、光线变换矩阵以及光学系统设计等问题时, 有效腔长是小于实际腔长的。究其原因, 都是因为腔内存在折射率大于 1 的介质。

参考文献:

- [1] 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘等. 激光原理(第 5 版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 98, 32, 27
- [2] 竺庆春, 陈时胜. 矩阵光学导论[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1991: 30
- [3] 张三慧. 工科大学物理学(第四册): 光学、近代物理[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1987: 118-120