

激光原理与技术实验

夏 珉 主编



科学出版社

激光原理与技术实验

夏 珉 主编

科学出版社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229,010-64034315,13501151303

内 容 简 介

为了加深对激光产生、激光特性等原理和知识的理解,以及对激光传输、变换、调制、参数控制等技术的实际掌握,本书围绕“激光原理与技术”课程,精心组织了21个操作性较强的实验,构成了完善的激光原理与技术实验体系。这些实验既包含了谐振腔内自再现模式产生原理、调Q技术原理理解的数值仿真实验,又包括了观察激光光束特性、传输变换规律和自再现模式特性的观察性实验,还有对激光调Q技术、锁模技术、调制技术进行实际操作的相关实验。这些实验的开设对于加深学生们对相关知识的理解、增加对激光技术的感性认识和积累实际工程经验有积极的意义,将会为光学工程专业人才的培养提供有益的帮助。

本书适合高等学校光电电子技术、光电信息科学与技术、光学工程等本科专业实验教学使用,也可作为从事激光加工、制造等相关技术人员和研究人员的实际工程操作参考书。

图书在版编目(CIP)数据

激光原理与技术实验/夏珉主编. —北京:科学出版社,2017.8

ISBN 978-7-03-053840-6

I. ①激… II. ①夏… III. ①激光理论—高等学校—教材 ②激光技术—实验—高等学校—教材 IV. ①TN241

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第139705号

责任编辑:高 嵘 黄彩霞/责任校对:董艳辉

责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2017年8月第 一 版 印张:12 1/4

2017年8月第一次印刷 字数:290 000

定价:30.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书是在华中科技大学“激光原理与技术”课程组所开设的配套实验课程“激光原理与技术实验”所使用讲义的基础上,融合了在“激光原理与技术”课程讲授过程中进行的三个数值仿真实验内容整理、完善而成。根据近年来在“激光原理与技术实验”课程中对教学内容的调整,为了拓展知识面,增加学生对新的激光器件、技术的理解,对比原来使用的实验讲义具有如下特点:

(1) 在内容选取上精简了部分过于基础的观察类实验,调整了部分过于烦琐的实验内容;

(2) 调整了部分实验所使用仪器装置的调整方法,以反映激光技术研究领域的研究进展;

(3) 适当地补充了一些新的内容,将它们和“激光原理与技术”课程内容有机地融合为一个整体,有助于学生理论联系实际,加深对基本概念和基本理论的理解。

本书分为两部分。第一部分含第1~3章,是在“激光原理与技术”课程讲授过程中可以开展的三个数值仿真实验,可以用来在理论课程中加深学生对相关理论和物理意义的理解。第二部分含第4~9章,是“激光原理与技术实验”课程中可以开设的18个实验,其中:第4章是对激光技术相关基础实验技能的介绍,以及三个加深对激光器基本构造理解的实验;第5、6章的实验内容主要对应了“激光原理”部分高斯光束的特性、传输规律及光腔内自再现模式特性的相关知识点;第7章主要对应了“激光技术”中的调Q技术内容;第8章主要涵盖了固体激光器实际设计过程中必须考虑的热透镜效应;第9章对应了激光技术中锁模、倍频、选频技术等各个知识点。所有实验内容基本涵盖了“激光原理与技术”课程中的全部知识点,可以根据实验课程的学时和实验条件选择部分实验内容开设实验课程。

本书由夏珉主编,其中第1~3章由朱广志编写,第4~9章由周海编写,夏珉最终统一定全稿。

由于编写时间有限,书中难免存在不足之处,欢迎广大读者提出宝贵意见和建议。

作 者
2017年1月

目 录

第 1 章 基于 Fox-Li 迭代的谐振腔模式分析	1
1.1 仿真目的	1
1.2 仿真任务	1
1.3 仿真模型构建思路	1
1.4 核心代码示例及计算结果分析	4
1.4.1 核心代码示例	4
1.4.2 计算结果及分析	5
第 2 章 基于 ABCD 矩阵的激光谐振腔分析	9
2.1 仿真目的	9
2.2 仿真任务	9
2.3 仿真模型构建思路	9
2.3.1 ABCD 光线矩阵的概述	9
2.3.2 光学谐振腔概述	11
2.4 核心代码示例及计算结果分析	20
2.4.1 核心代码	20
2.4.2 计算结果及分析	23
第 3 章 声光调 Q 技术的数值仿真	27
3.1 仿真目的	27
3.2 仿真任务	27
3.3 仿真模型构建思路	27
3.3.1 Nd:YAG 激光晶体材料	27
3.3.2 声光调 Q	29
3.3.3 四能级系统的调 Q 速率方程建模	31
3.4 核心代码示例及计算结果分析	32
3.4.1 核心代码	32
3.4.2 调 Q 过程中反转粒子数密度变化	38
3.4.3 不同参数对激光器调 Q 特性的影响	40

第 4 章 激光器基础实验	44
4.1 激光实验基本技能	44
4.1.1 光学调整架	44
4.1.2 激光谐振腔的调试方法	47
4.1.3 光学元件的清洁	54
4.2 实验一:灯泵浦脉冲固体激光器的调试与输出特性测量实验	57
4.3 实验二:He-Ne 激光器调试与输出特性测量实验	63
4.4 实验三:端面泵浦 Nd:YVO ₄ 固体激光器的调试与输出特性的测量实验	69
第 5 章 高斯光束特性实验	75
5.1 实验四:基模高斯光束的参数测量及透镜变换	75
5.2 实验五:二阶矩法测量氦氖激光器光束质量	85
5.3 实验六:连续氦氖激光纵横模间距测量	93
第 6 章 小信号增益与增益饱和实验	100
6.1 实验七:固体工作物质小信号增益与增益饱和实验	100
6.2 实验八:氦氖激光器小信号增益系数的测量实验	108
6.3 实验九:脉冲固体激光行波放大实验	115
第 7 章 激光调 Q 技术实验	124
7.1 实验十:电光调 Q 技术实验	124
7.2 实验十一:声光调 Q 技术实验	133
7.3 实验十二:被动调 Q 技术实验	139
第 8 章 激光器热焦距测量技术实验	145
8.1 固体激光工作物质的热透镜效应	145
8.2 实验十三:探测光束法测量热焦距实验	148
8.3 实验十四:临界腔法测量热焦距实验	153
8.4 实验十五:高斯光束变换法测量热焦距实验	159
第 9 章 其他激光实验	165
9.1 实验十六:氦氖锁模激光器调试实验	165
9.2 实验十七:激光倍频和三倍频实验	175
9.3 实验十八:选频技术和频率分裂综合实验	183

第1章 基于 Fox-Li 数值迭代法的谐振腔模式分析

1.1 仿真目的

(1) 通过 Fox-Li 数值迭代方法求解菲涅耳-基尔霍夫衍射积分方程,加深对开腔中自再现模式形成过程的认识,以及对衍射在自再现模式形成过程中所起作用的理解。

(2) 对稳定腔、临界腔等开放式光学谐振腔中的自再现模式在镜面上的光场分布特性有直观的认识,加深对高斯光束特性的理解。

(3) 熟悉运用 Fox-Li 数值方法求解一般开放式光学谐振腔中自再现模式的基本方法,了解该方法在实际运用中的优、缺点及适用范围。

1.2 仿真任务

(1) 构建仿真模型和核心算法,实现对菲涅耳-基尔霍夫衍射积分方程的迭代求解。

(2) 利用均匀平面波近似作为初始条件进行迭代计算,观察镜面上光场分布的变化。

(3) 求解出菲涅耳-基尔霍夫衍射积分方程的特征解及相应的特征值。

1.3 仿真模型构建思路

激光产生的三要素为工作物质、泵浦源和谐振腔。在产生激光的过程中,谐振腔不仅作为提供光放大的必要条件,而且还决定了激光在谐振腔中振荡的具体模式。基于不同的需求,激光谐振腔的结构和设计方法也不尽相同。其中,最简单的谐振腔,是由两个球面镜作为腔镜构成的,中间没有其他光学元件的开放式光学谐振腔。当光波在开腔的两个腔镜之间往返传播时,一方面会受到增益介质的放大作用,另一方面在传播过程中也会经受各种损耗。

由于腔镜的尺寸有限,在分析谐振腔中的振荡模式时,将主要考虑衍射损耗。因为根据光波传输理论,衍射在决定开腔中激光振荡能量的空间分布方面起主要作用。为简化分析,现主要考虑理想的开腔模型:两块反射镜作为腔镜,增益介质充满整个谐振腔所占据的空间,且分布均匀、各向同性。这样衍射效应就只由反射镜的边缘所决定,而且这种简化可以有效地消去衍射之外的其他损耗,便于数值分析。

现在我们考虑在上述理想的激光谐振

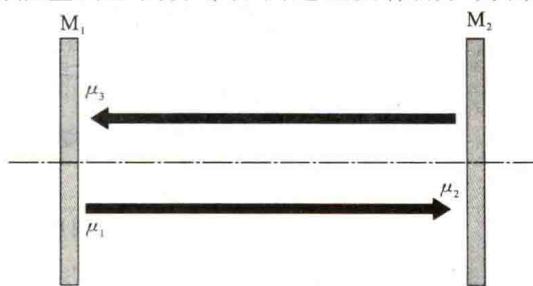


图 1.1 谐振腔内光波的传输示意图

腔中，一列光波的往返传输情况，如图 1.1 所示。设初始时刻在腔镜 M_1 上存在一光场分布 μ_1 ，在谐振腔中经过第一次传输之后，光波将到达腔镜 M_2 ，在腔镜 M_2 上形成一个新的光场分布 μ_2 ，光场 μ_2 经过第二次传输之后又将到达腔镜 M_1 ，在腔镜 M_1 上又会形成一个新的光场分布 μ_3 。

由于在腔镜边缘处存在衍射损耗，光波在每一次传输时都会损失一部分能量，而且衍射损耗还会影响光场的能量分布。因此，光波在谐振腔中往返传输一次之后所形成的光场 μ_3 ，不仅振幅会比 μ_1 小，而且能量分布可能也会不同于 μ_1 。接着光波继续在谐振腔内往返传输，形成 $\mu_1, \mu_3, \mu_5, \dots$ ，这样一次又一次地继续。无论初始光场 μ_1 如何分布，在腔内经过足够多次的传输之后，最终形成的光场分布都会是衍射损耗影响的结果。由于衍射主要发生在腔镜的边缘附近，所以光波在往返传输的过程中，腔镜边缘附近的光场损耗更大，经过多次衍射之后，其振幅分布通常会小于位于镜面中部的光场的振幅分布。反之，具有这种特性的光场受到衍射损耗的影响也会较小。因此，在经过足够多次的传输之后，将会形成这样一种稳定场：在腔内往返传输一次后，镜面上各点光场的振幅按同样的比例衰减，相位按同样的大小滞后，激光能量的空间分布不再发生变化。尤其是当谐振腔为对称开腔时，这种稳定场在一次往返传输后能实现“再现”。

在进行定量讨论时，我们首先采用菲涅耳-基尔霍夫衍射积分公式，来分析空间中处于有限距离上的两个点(或表面)之间的光场分布的关系；然后采用 Fox-Li 数值迭代的方法计算相应的积分方程；最后直观地、形象地展示平行平面腔中自再现模式的形成过程。

在如图 1.2 所示的谐振腔内，设有一束光从镜面 S_1 传播到镜面 S_2 。已知，在镜面 S_1 上光场的振幅和相位分布函数为 $u_1(x', y')$ ，在衍射作用的影响下，传播到镜面 S_2 上的光场振幅和相位分布函数为 $u_2(x, y)$ ，这里 (x', y') ， (x, y) 分别表示两镜面上某观察点的坐标。根据菲涅耳-基尔霍夫衍射积分公式，有

$$u_2(x, y) = \frac{ik}{4\pi} \iint_{S_1} u_1(x', y') \frac{e^{-ik\rho}}{\rho} (1 + \cos\theta) ds' \tag{1.1}$$

其中， S_1 面为镜面 S_1 对应的面； ρ 为源点 (x', y') 与观察点 (x, y) 之间连线的长度； θ 为 S_1 面上点 (x', y') 处的法线 \mathbf{n} 与上述连线之间的夹角； ds' 为 S_1 面上的点 (x', y') 处的面积元； $k=2\pi/\lambda$ 为波矢的模。因此，根据菲涅耳-基尔霍夫衍射积分公式，如果已知 $u_1(x', y')$ 的场分布函数，就可求出在受衍射影响的条件下，光束传输一次后在镜面 S_2 上形成的场。

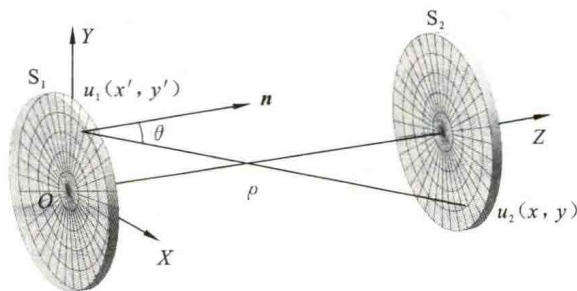


图 1.2 圆形镜平面腔等效示意图

由于光束在谐振腔的两个腔镜之间不断的振荡，所以经过 j 次传播后所形成的场 u_{j+1} 与经过 $j-1$ 次所形成的场 u_j 之间应满足的迭代关系为

$$u_{j+1}(x, y) = \frac{ik}{4\pi} \iint_S u_j(x', y') \frac{e^{-ik\rho}}{\rho} (1 + \cos\theta) ds' \quad (1.2)$$

当 j 足够大时,按照模式“再现”的概念,可以得出如下数学表达式

$$\begin{cases} u_{j+1}(x, y) = \gamma \frac{ik}{4\pi} \iint_S u_j(x', y') \frac{e^{-ik\rho}}{\rho} (1 + \cos\theta) ds' \\ u_{j+2}(x, y) = \gamma \frac{ik}{4\pi} \iint_S u_{j+1}(x', y') \frac{e^{-ik\rho}}{\rho} (1 + \cos\theta) ds' \\ \dots\dots \end{cases} \quad (1.3)$$

其中, γ 为与坐标无关的复常数。进一步地,用 $u(x, y)$ 表示不再受衍射影响的稳定场分布函数,就可以得到开腔中的自再现模的积分方程

$$u(x, y) = \gamma \iint_S G(x, y, x', y') u(x', y') ds' \quad (1.4)$$

其中,

$$G(x, y, x', y') = \frac{ik}{4\pi} \frac{e^{-ik\rho(x, y, x', y')}}{\rho(x, y, x', y')} (1 + \cos\theta) \quad (1.5)$$

称为积分方程的积分核; ρ, θ 均为两观察点坐标的函数。所以任意一个满足积分方程(1.4)的光场分布函数 $u(x, y)$, 都可以是谐振腔中的一个自再现模。通常来讲, $u(x, y)$ 为一个复函数, 它的模 $|u(x, y)|$ 描述的是腔镜上光场的振幅分布, 辐角 $\arg u(x, y)$ 则描述光场的相位分布。

一般地,开腔的腔长 L 与腔镜的半径 R 满足以下关系

$$L \gg a, \quad R \gg a$$

这样式(1.5)中的因子 $(1 + \cos\theta)/\rho$ 可以近似为 $2/L$, 当腔长 L 确定后,应为一常数,从而式(1.4)、式(1.5)可简化为

$$\begin{cases} u(x, y) = \gamma \iint_S G(x, y, x', y') u(x', y') ds' \\ G(x, y, x', y') = \frac{i}{\lambda L} e^{-ik\rho(x, y, x', y')} \end{cases} \quad (1.6)$$

需要注意的是,虽然 $a \gg \lambda$, 但是 $e^{-ik\rho}$ 不可直接替代为 e^{-ikL} , 因为 ρ 在式中与相位有关, 只能根据具体的腔面结构来取合理近似。

下面以条形腔和圆形镜平面腔为例,通过 Fox-Li 数值迭代的方法求解相应的积分方程,来观察平行平面腔中自再现模的形成。

如图 1.1 所示的条形腔,其菲涅耳数 $N = a^2/(L\lambda) = 7.8$, 具体参数见表 1.1。条形腔中自再现模的积分方程应为

$$u_2(x) = \sqrt{\frac{i}{\lambda L}} e^{-ikL} \int_{-a}^a e^{-ik\frac{(x-x')^2}{2L}} u_1(x') dx' \quad (1.7)$$

表 1.1 条形腔参数

仿真参数	仿真数值
波长 λ/nm	1030
腔镜尺寸 $2a/\text{mm}$	2×2
谐振腔长度 L/m	1

1.4 核心代码示例及计算结果分析

1.4.1 核心代码示例

本书中所有核心代码都是在数值仿真计算过程中需要用到的最核心的算法部分的MATLAB代码实现,在代码实现过程中未经过优化,仅考虑了满足功能性要求,后续章节不再赘述。读者可以根据自己所掌握的编程语言和相关工具,自行编制仿真代码。

```

%Fox-Li 迭代算法
clear
a=-2:0.01:2; %设置条形腔镜的尺寸(mm)
dx=a(2)-a(1);
L=1000; %设置谐振腔长度(m)
lamda=1030e-6; %激光波长(mm)
k=2*pi/lamda;
input(1:length(a))=1; %设置初始光场为均匀平面波
u=input;
const=sqrt(1i*exp(-1i*k*L)/lamda/L); %积分常数项
con(1:30)=0;
times=300; %设置渡越次数
loopnum=2*times;
for i=1:loopnum
u2(1:length(a))=0;
for j=1:length(a)
inter=(exp(-1i*k*(a-a(j)).^2/2/L).*u(j))*dx;
u2=u2+inter;
end %迭代求解积分方程
u2=const*u2;
loop=i
u2=u2./max(abs(u2)); %归一化处理
if (rem(i,30)==0)
con(30)=u2(fix(length(a)/4));
else
con(rem(i,30))=u2(fix(length(a)/4));
end
if ((max(abs(con))-min(abs(con)))<0.0000000001) %判定自再现模是否形成
u=u2;
break;
end
u=u2;
if (i==2)
u_2=u;
end %渡越1次后的光场分布

```

```

end
figure(1)
plot(a,abs(u),'-.',a,abs(input),a,abs(u_2),'-'); %相对振幅分布
axis([-2 2 0 1.2]);
figure(2)
plot(a,(angle(u)-angle(u(fix(length(a)/2)+1))),'-.',a,...
      (angle(input)-angle(input(fix(length(a)/2)+1))),...
      a,(angle(u_2)-angle(u_2(fix(length(a)/2)+1))),'-'); %相对相位分布
axis([-2 2 -1 0.3]);

```

1.4.2 计算结果及分析

首先,我们选取初始条件 $u_1 \equiv 1$, 表示光场的振幅为常数 1, 相位为常数 0, 即初始入射光波为一列均匀平面波。在计算的过程中, 将每一次迭代过后的光场分布都做归一化处理, 并通过观察某具体位置上的光场振幅的变化来判断自再现模是否已形成。数值迭代的具体流程如图 1.3 所示。最终可得如图 1.4 所示的计算结果。

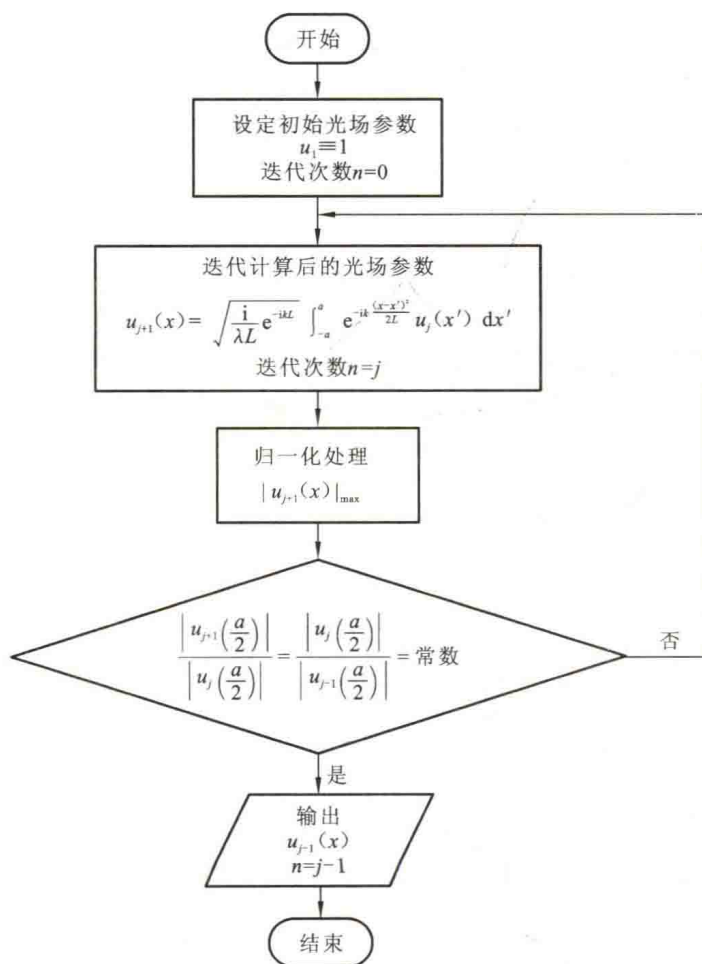


图 1.3 数值迭代流程图

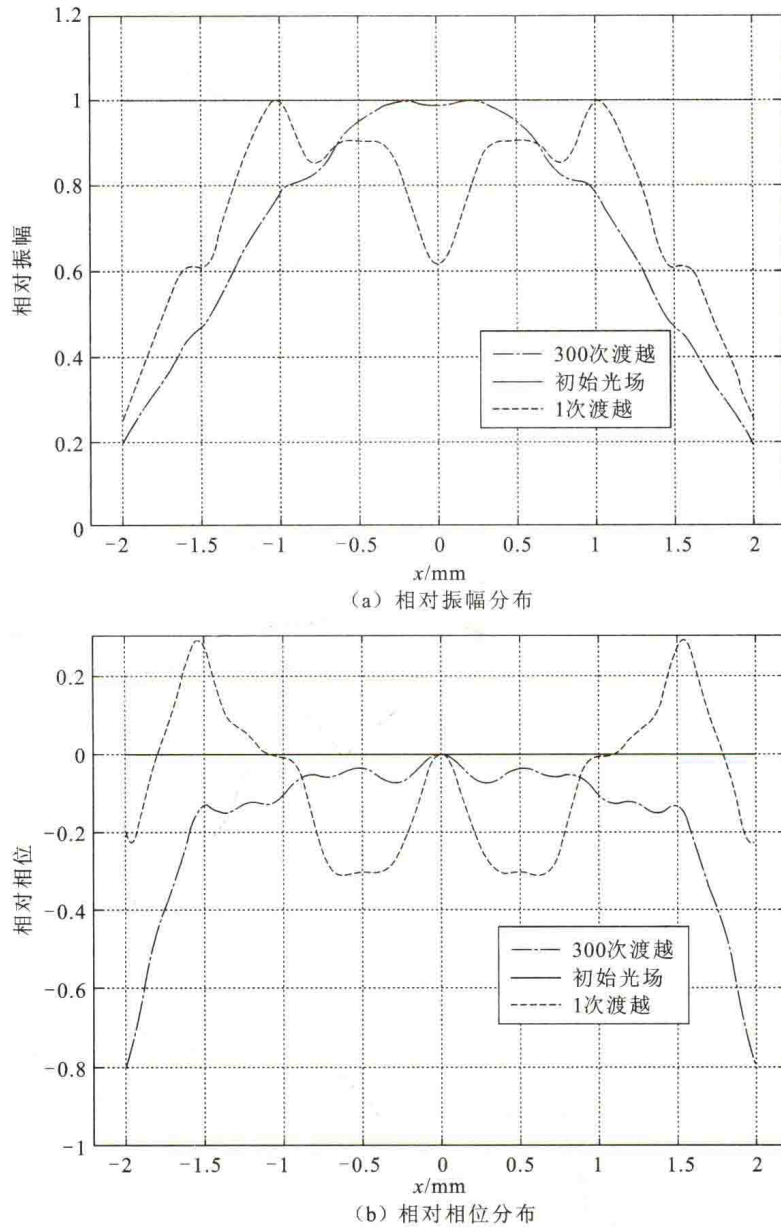


图 1.4 条形腔中的自再现模

图 1.4(a), (b) 分别表示初始光场从平面波出发, 在条形腔内经过 1 次和 300 次传输之后, 所得到的光场的相对振幅分布和相对相位分布。

从图中可以清楚地看到, 平面波在腔内经过 1 次传输之后, 振幅和相位都发生了很大的变化, 且在计算的过程中得知, 随后的几次传输中, 振幅和相位的变化也十分显著。但是随着传输次数的增加, 每一次传输之后, 光场的相对振幅和相对相位的变化会越来越小, 最终在经过 300 次传输之后, 归一化的光场振幅分布和相位分布已经不再发生变化, 这样我们就得到了条形腔中的自再现模。

接下来, 考虑如图 1.2 所示的圆形镜平面腔, 光束在镜面 S_1 和镜面 S_2 之间进行传

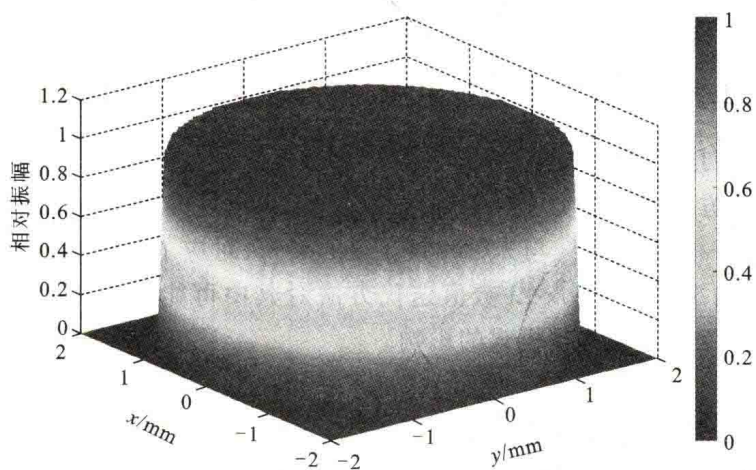
输,其具体参数见表 1.2。同理,设定初始光波为一平面波,其分布函数为

$$u_0 = \begin{cases} 1, & r \leq R \\ 0, & r > R \end{cases} \quad (1.8)$$

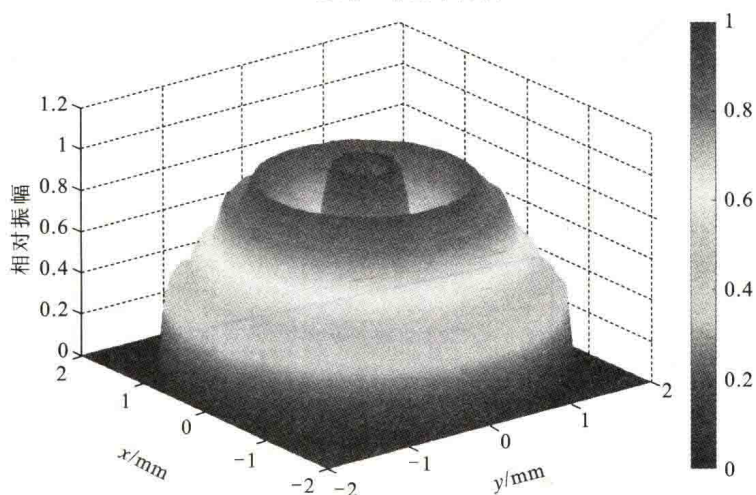
其中, r 为镜面 S_1 上某点到光束中心的距离; a 为腔镜的半径。然后通过 Fox-Li 数值迭代计算,并同样将每一次迭代后的光场分布都做归一化处理,最终可得到如图 1.5 所示的模拟结果。

表 1.2 圆形镜平面腔结构参数

项目	参数
波长 λ/nm	1 030
腔镜半径 a/mm	2
谐振腔长度 L/m	1

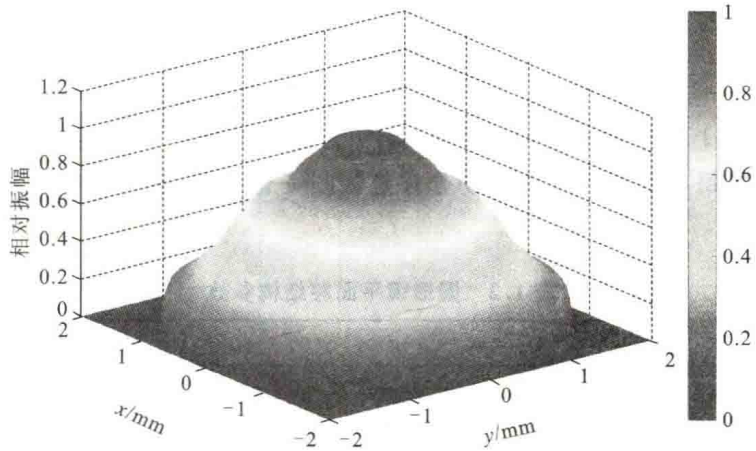


(a) 初始入射的平面波



(b) 1次传输后的光场分布

图 1.5 仿真过程中镜面上的光场分布



(c) 300次传输后的光场分布

图 1.5 仿真过程中镜面上的光场分布(续)

【思考题】

1. 如何设置初始条件,才能在条形腔中产生最低阶奇对称的 TEM_1 模式?
2. 如何构建仿真模型以实现对于对称共焦腔中自再现模式的迭代求解?
3. 平平腔中一腔镜的法线与光轴出现了 θ 的夹角,对应了实际工程中光学谐振腔未能完全调整好的情况,试用 Fox-Li 数值迭代方法对其中可能产生的自再现模式进行分析,并讨论夹角的变化对自再现模式的影响。

第 2 章 基于 ABCD 矩阵的激光谐振腔分析

2.1 仿真目的

通过本章所设定的仿真任务,掌握光学谐振腔的 ABCD 矩阵分析方法,掌握固体激光器光学谐振腔中产生的热透镜效应等各种复杂工作特性的分析方法,以及复杂构成方式的光学谐振腔的传输矩阵计算方法。

2.2 仿真任务

已知实验室碟片激光器的泵浦光斑为 $2.8 \text{ mm} \times 2.8 \text{ mm}$ 的方形光斑,在泵浦功率范围内,碟片光焦度的变化范围为 $(-0.1 \text{ m}^{-1}, 0)$,要求设计一个 V 形平凹腔,输出光束质量尽可能好。

2.3 仿真模型构建思路

2.3.1 ABCD 光线矩阵的概述

在近轴光线的条件下,忽略由波长引起的衍射损耗,引入矩阵方法,可以简便而有效地处理光线在各种光学元件、透镜波导、光学谐振腔以及其他光学系统中的传播问题。

光线矩阵是一种用矩阵的形式来表示光线传播和变换的方法。它以几何光学为基础,主要用于描述几何光线通过光学元件和透镜波导的传播和变换。图 2.1 给出的是在笛卡儿坐标系内光线通过一段距离为 L 的自由空间时的传播情况。其中, OZ 为介质的光轴,表示纵向;在横向上, OX 表示 X 方向; Y 方向为垂直于纸面向外。

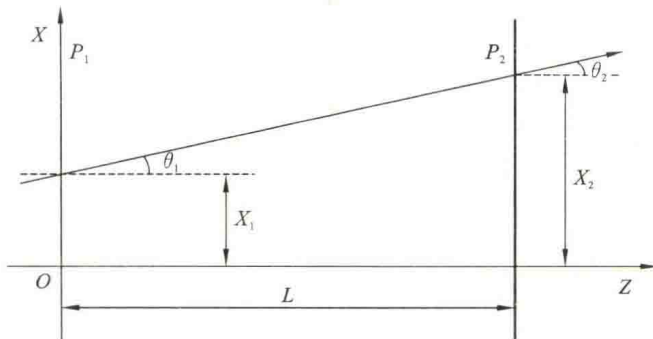


图 2.1 傍轴光线通过距离为 L 的自由空间的传播

假设一条光线在自由空间或光学系统中传播,如果预先任意选择一个与 OZ 轴垂直的平面(即当 z 为某一个常数时),由于系统是关于 OZ 轴旋转对称的,因此,只需要考虑 X 和 Y 方向中的其中一个即可(下面只考虑 X 方向)。于是,这条光线在给定平面上的特性就可以用两个参数来表示:光线离光轴的距离 $x(z)$ 以及光线传播方向与光轴的夹角 θ 。在近轴光线的条件下,光线传播方向与光轴的夹角 θ 是很小的,则 $\sin\theta \approx \tan\theta \approx \theta$ 的小角度近似总是成立的。所以, θ 近似地等于光线的斜率。我们将任意 z 位置上的光线参数可以写为如下的列矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} x(z) \\ \theta(z) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

在这里,我们规定:光线落在光轴的上方时 x 为正,反之为负; θ 只取锐角值,当从光轴的方向逆时针旋转 θ 而得到光线传播方向时, $\theta > 0$,反之为负。

如图 2.1 所示,在参考平面 P_1 和 P_2 之间是一段距离为 L 的自由空间,假定光线从参考平面 P_1 (亦即 XOY 面)入射,其初始光线的特征参数为 x_1 和 θ_1 ,经过自由空间传播到出射参考面 P_2 上,其光线特征参数为 x_2 和 θ_2 。显然,它们之间满足如下关系:

$$\begin{cases} x_2 = x_1 + L\theta_1 \\ \theta_2 = \theta_1 \end{cases} \quad (2.2)$$

写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

依此类推,近轴光线通过其他不同的光学系统所受到的变换作用,都可以表示成以下的矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

一些常见光学系统的光线传输变换矩阵见表 2.1:

表 2.1 常见光学系统的变换矩阵

光学系统	变换矩阵
距离为 L 的自由空间 $n=1$	$\begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
界面折射(折射率分别为 n_1, n_2)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}$
折射率为 n ,长为 L 的均匀介质	$\begin{bmatrix} 1 & \frac{L}{n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
薄透镜(焦距为 f)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$

续表

光学系统	变换矩阵
球面反射镜(曲率半径为 R)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{bmatrix}$
球面折射	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - n_1}{n_2 R} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}$
平面反射镜	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
直角全反射棱镜(折射率为 n , 高为 d)	$\begin{bmatrix} -1 & -\frac{2d}{n} \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$

2.3.2 光学谐振腔概述

光学谐振腔是激光器的核心部件之一,不同类型的腔型结构,对激光输出的特性具有直接的影响。例如,激光器的能量提取效率主要由光腔参数决定,选择几何结构合适和优化设计的光腔,可以提高能量的提取效率,进而有利于提高激光器的总效率。同时,激光器的输出光束质量也与光腔有关,而输出光束质量的好坏与输出功率的高低又常常是互相矛盾的,因此针对不同种类、具有不同几何结构的激光介质,以及对激光输出功率的要求,选择合适的光腔,可获得满足实际应用需要的高光束质量或高功率的激光输出。另一方面,在某些实际应用中,工作环境不是很理想,要求激光器对机械振动、热扰动等因素引起的光腔失调不敏感,需研究对失调不敏感的光腔;由于固体激光器中热效应的存在,还需要研究含热透镜光腔的动态工作特性和稳定性,以及应力双折射和退偏补偿等问题。

针对上述问题,在激光谐振腔(尤其是固体激光器谐振腔)的研究过程中,发展了多种技术以满足应用的要求。表 2.2 为此作了相关的总结。

表 2.2 固体激光谐振腔的元件和技术

名称	分类
介质几何结构	棒状,板状,管状,片状,光纤
腔镜	球面镜,柱面镜,棱镜,非均匀反射镜和梯度相位镜
光阑	硬边光阑,软边光阑
光腔类型	约束稳定腔,非稳腔,临界腔,非轴对称像散腔,线性腔,环形腔,离轴腔,多元件腔,多棒串接腔
改进技术	基模动态稳定腔,热致双折射,退偏补偿,相位共轭,可调望远镜,自适应镜