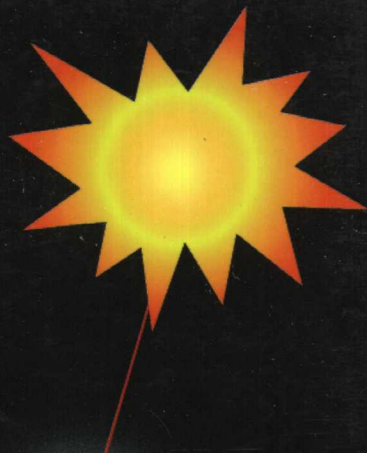


Laser—Material Interaction  
and Thermal Field Modelling

陈庆华 著

云南科技出版社



激光

与材料相互作用  
及热场模拟

# 激光与材料相互作用 及热场模拟

陈庆华 著

云南科技出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

激光与材料相互作用及热场模拟/陈庆华著. —昆明:  
云南科技出版社, 2001.5

ISBN 7 - 5416 - 1516 - 1

I . 激… II . 陈… III . ①激光 - 作用 - 材料 - 研  
究②激光 - 热力学 - 研究 IV . TN24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 026396 号

书 名: 激光与材料相互作用及热场模拟

作 者: 陈庆华

出 版 者: 云南科技出版社 (昆明市环城西路 609 号云南新  
闻出版大楼, 邮编: 650034)

责任编辑: 胡 平

封面设计: 杨 峻

印 刷 者: 云南国浩印刷有限公司

发 行 者: 云南科技出版社

开 本: 850mm × 1168mm 1/32

印 张: 6

字 数: 165 千

版 次: 2001 年 5 月第 1 版

印 次: 2001 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 0001 - 1500 册

书 号: ISBN 7 - 5416 - 1516 - 1/TB·29

定 价: 20.00 元

若发现印装错误请与承印厂联系

# 前 言

激光从 1960 年问世以来，随着有关理论研究的不断深化，各类激光器件的不断发展，激光的应用领域也不断地得到拓宽，应用规模逐渐扩大，所获得的经济效益和社会效益更加显著。如今，激光技术已在工业、农业、医学、军工、科学研究及人们的现代生活中得到了广泛应用。作为高技术重要组成部分之一的激光技术，是目前科学发展的重要标志和现代信息社会光电子技术的重要支柱之一。

从 70 年代以来，由于激光技术的长足进步，激光热处理技术得到了越来越多的应用。70 年代末期，美国通用汽车公司率先把激光技术应用于汽车汽缸壁的热处理。我国也从 80 年代初期进行了有关激光热处理研究，并获得应用。但是，激光热处理技术还是一个新兴的高新技术，人们对它的理论和应用研究都还不够，在其应用过程中还存在着不少问题，需要恰当解决，才能够使得该技术得以实际应用。总结起来应注意以下三点：

首先，激光热处理技术依赖于激光技术的发展。激光光源的不断改进，会使激光热处理技术得到不断的更新，因此，对激光光源的创新是一个先决的课题。近年来，由于国家十分重视激光和相关科技的发展，因此，国内激光器的质量和数量都有较大提高，已经达到国际上较高的水平。

其次，激光热处理是通过激光和材料的相互作用，把光能转化为热能，并通过热能激发一系列的固态或液态相变，来达到处理材料的目的。因此，过程本身涉及激光能量的有效吸收问题、传热问题、热作用下材料的非平衡相变问题等等。这些问题的相互作用和相互制约决定了激光热处理的最终结果，所以，结果往往不是显而易见的。

针对这个现实，必须进行理论研究，然后借助这些研究成果，将激光热处理问题总结成一些简单的、可以标准化的热处理标准；同时，对于一些复杂问题应该建立起一系列的计算机软件，这些软件不应该是学院式的，而应该是简单而实用的，能在生产实际中，借助于一台微机，在很短时间内（几分钟或几秒钟）提出指导性结果。

最后，激光热处理属于一种精密加工技术，对配套的自动化设备要求很高，要求人员素质较高，所以，唯有加快自动化设备的发展，同时培养大批高素质的操作人才，这些人才必须能够应用激光标准化理论结果和已有计算机软件，进行适时的过程控制，才能使激光热处理技术得到更好的推广和应用。

作者根据近十多年来在国内和国外的研究成果和经验，并且参考大量国内外文献和资料，经过去粗取精，认真整理，提炼深化，撰写而成此书，以飨读者。该书的最大特点是深入浅出，理论性和实践性并容，理论公式力求详实，用它可以直接进入计算机编程。对广大科技工作者及大学本科生和研究生都有一定的参考价值，也可以成为激光工程技术人员的速成培训教材。

该书的出版本身也是国际合作的结晶，昆明理工大学与法国里昂应用科学学院和巴黎高等机械工程学院的国际合作，使中法双方科技人员、教师和学生得以获得交流和加深理解的机会。

本书的出版得到了国家教委和原有色金属总公司回国人员启动基金的资助。也得到了中、法导师李俊昌和雅克·梅兰先生的鼓励和帮助，作者在此表示衷心的感谢！

由于该书的撰写时间紧迫，加之学科发展较快，书中难免还有不足之处，请读者批评指正。

陈庆华

# 目 录

|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| <b>第一章 激光和激光器</b> .....          | (1)  |
| 1.1 激光及其基本原理 .....               | (1)  |
| 1.1.1 激光简史 .....                 | (1)  |
| 1.1.2 激光的产生条件和基本特点 .....         | (2)  |
| 1.1.3 激光谐振腔和模式分布 .....           | (6)  |
| 1.1.4 激光模式和功率密度分布 .....          | (13) |
| 1.2 激光器的分类和基本用途 .....            | (20) |
| 1.2.1 激光器的分类 .....               | (20) |
| 1.2.2 固体激光器 .....                | (21) |
| 1.2.3 气体激光器 .....                | (28) |
| 1.2.4 液体激光器 .....                | (36) |
| 1.3 激光器的发展方向 .....               | (38) |
| 参考文献 .....                       | (39) |
| <b>第二章 激光—物质相互作用和激光的吸收</b> ..... | (41) |
| 2.1 激光在连续固态介质中的宏观吸收 .....        | (41) |
| 2.1.1 固体材料宏观光学常量间的关系 .....       | (41) |
| 2.1.2 激光的吸收与材料宏观光学常量间的关系 .....   | (44) |
| 2.2 激光在固态介质中的微观吸收机理 .....        | (45) |
| 2.2.1 激光在固态介质中吸收的洛仑兹阻尼振子模型 ..... | (45) |
| 2.2.2 激光在金属材料中的吸收 .....          | (48) |
| 2.2.3 激光在非金属材料中的吸收 .....         | (50) |
| 2.2.4 激光在半导体材料中的吸收 .....         | (51) |
| 2.2.5 激光在玻璃材料中的吸收 .....          | (52) |
| 2.2.6 激光在固态介质中的散射 .....          | (52) |
| 2.2.7 激光在固态介质中的非线性吸收 .....       | (52) |

|                                   |             |
|-----------------------------------|-------------|
| 2.3 激光在有限大小固态介质表面的吸收.....         | (53)        |
| 2.3.1 表面的反射和激光的偏振对吸收的影响.....      | (53)        |
| 2.3.2 表面处理和激光的吸收.....             | (56)        |
| 参考文献.....                         | (62)        |
| <b>第三章 激光在固态材料中产生的热场—解析解.....</b> | <b>(65)</b> |
| 3.1 光束的等效半径.....                  | (65)        |
| 3.2 光束在材料表面产生的热源.....             | (67)        |
| 3.3 激光在半无限大表面产生的温度场的通解.....       | (68)        |
| 3.4 高斯光束在半导体和绝缘体中产生的温度场.....      | (71)        |
| 3.5 椭圆高斯光束和高斯光束在金属表面产生的温度场.....   | (72)        |
| 3.6 方形光束在金属表面产生的温度场.....          | (75)        |
| 3.7 准稳态的温度场.....                  | (77)        |
| 3.7.1 运动表面点热源的准稳态温度场.....         | (77)        |
| 3.7.2 运动表面热源源的准稳态温度场.....         | (79)        |
| 3.7.3 运动热源的准稳态温度场.....            | (81)        |
| 3.8 高斯束经过光束变换装置后产生的温度场.....       | (82)        |
| 3.8.1 双束分光系统光能分布——傅立叶光学处理.....    | (82)        |
| 3.8.2 双束分光系统光能分布——几何光学处理.....     | (85)        |
| 3.8.3 双束分光系统的温度场模拟.....           | (86)        |
| 3.9 有限尺寸或复杂工件的温度场处理问题.....        | (89)        |
| 3.9.1 简单薄板的处理方法.....              | (90)        |
| 3.9.2 长方体的处理方法.....               | (91)        |
| 3.9.3 楔形物体的处理方法.....              | (92)        |
| 3.10 激光产生的温度场模拟和实验检验.....         | (93)        |
| 3.10.1 高斯激光产生的温度场模拟和实验检验.....     | (93)        |
| 3.10.2 带状高斯光束产生的准稳温度场模拟和实验检验..... | (97)        |
| 参考文献.....                         | (99)        |

|                                   |       |
|-----------------------------------|-------|
| <b>第四章 激光淬火的唯象理论</b> .....        | (103) |
| 4.1 静止高斯光束产生的表面热场极值的分析.....       | (103) |
| 4.2 运动高斯光束产生的表面热场极值的分析.....       | (105) |
| 4.3 用线性化方法处理温度随深度的变化—唯象理论的建立..... | (108) |
| 4.4 用理论计算检验唯象理论的正确性.....          | (111) |
| 4.5 唯象理论的应用.....                  | (113) |
| 4.5.1 唯象理论公式的直接应用.....            | (113) |
| 4.5.2 唯象理论在钢铁热处理中的应用.....         | (114) |
| 4.5.3 唯象理论的可能推广.....              | (117) |
| 4.5.4 唯象理论小结.....                 | (119) |
| 4.6 唯象理论的实验检验和激光—材料相互作用.....      | (119) |
| 4.6.1 样品制备和实验设计.....              | (120) |
| 4.6.2 实验结果和唯象理论分析.....            | (121) |
| 4.6.3 实验结果和格林函数热场模拟分析.....        | (126) |
| 4.6.4 唯象理论预计的结果和实验对比.....         | (127) |
| 4.6.5 唯象理论的推广和实验对比.....           | (129) |
| 4.7 小结.....                       | (130) |
| 参考文献.....                         | (132) |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| <b>第五章 激光固态相变温度场模拟—差分法</b> ..... | (133) |
| 5.1 激光在正六面体表面产生的热场—均匀网格解.....    | (133) |
| 5.1.1 差分方程的建立.....               | (133) |
| 5.1.2 差分方程的特点和解法.....            | (144) |
| 5.1.3 应用举例.....                  | (147) |
| 5.2 激光在圆柱体表面产生的温度场.....          | (160) |
| 5.2.1 微分方程的建立.....               | (160) |
| 5.2.2 两种建立差分方程的方法.....           | (163) |

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 5.2.3 激光在圆柱体上产生的热场差分方程的建立..... | (168) |
| 参考文献.....                      | (176) |
| 附表：常用符号系统.....                 | (177) |
| 作者后记.....                      | (181) |

# 第一章 激光和激光器

本章的目的首先是向读者简单介绍激光的基本原理和基本性质，简单介绍激光器的基本构成要件，讨论激光束的功率分布和其数学描述方法；其次是对激光以发光物质不同进行分类，并且在特点分析的前提下介绍各种激光的用途；最后，以作者的观点向读者介绍激光器的发展方向。

## 1.1 激光及其基本原理

### 1.1.1 激光简史

激光的发现首先要归功于1917年爱因斯坦发现了受激辐射的理论，后来的数十年内，人们通过不断的努力，在1950年发明了第一台氨分子微波放大器，人们发现可以通过原子或分子中的受激辐射来获得单色的相干电磁波，这就是激光的前身微波量子放大器，即所谓的 Maser (Microwave Amplification of Stimulated Emission of Radiation)。

1958年物理学家 Schawlow A. L. 和 Townes C. H.<sup>[1.1]</sup>发表了可以把微波放大器原理推广到光频段的设想；1960年 Maiman T. H. 首先制成世界上第一台红宝石激光器<sup>[1.2]</sup>；1961年氦氖激光器诞生；1964年二氧化碳激光器诞生。从此以后，激光器得到了飞速发展，发展出固体、气体、染料、半导体等作为发光物质的门类齐全的激光器。进入70年代后期，又提出了自由电子激光的概念，使激光器的发展更进入了一个新的发展阶段<sup>[1.3-1.6]</sup>。

现在，激光技术的应用已经越来越广，除了有很多的重要工业和国防应用外，人们在日常生活中也越来越接近和接触激光设施，如激光打印机、激光唱机、激光治疗和激光高质量照明灯

等，相信激光的进一步发展，将把我们带到一个更新更美好的激光科学世界中。

### 1.1.2 激光的产生条件和基本特点

按物理学的观点，物质世界是由原子、离子、分子等粒子组成的，按照量子力学揭示的规律，这些粒子存在着一些不同的分立的能量状态结构，称之为能级。粒子在一定的物理条件下处于某个特殊的能级，如果粒子从一个高能级  $E_2$  跃到一个低能级  $E_1$ ，它就会释放对应于这两个能级的能量差值  $\Delta E = E_2 - E_1$ ，该能量差如果以发光的方式放出，那么就将要产生光发射，这种光发射为自发发射（见图 1-1），发射出的光子能量为：

$$h\nu = \Delta E = E_2 - E_1 \tag{1-1}$$

由物理原理可知，物质是由大量的粒子组成的，在常温处于热力学平衡态时，它们的能量分布在宏观上应满足玻尔兹曼分布。假设某粒子系统中处于高能级的粒子数为  $N_2$ ，低能级的粒子数为  $N_1$ ，那么：

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-(E_2 - E_1)/kT} = e^{-h\nu/kT} \tag{1-2}$$

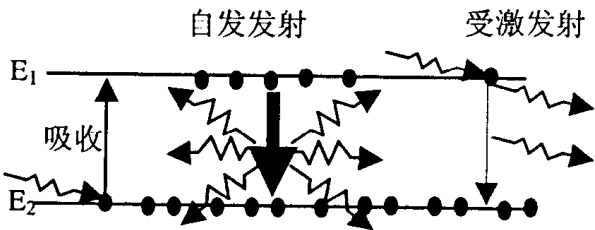


图 1-1 三种跃迁方式示意图

可见在常温粒子体系，大量的粒子处于低能态。在受到光辐射时，粒子也可能选择吸收光辐射中的适合的光子  $h\nu = E_2 - E_1$ ，从低能态  $E_1$  跃到高能态  $E_2$ 。

1917 年，爱因斯坦 (Einstein A.) 在研究黑体辐射时，发现还存在第三种跃迁<sup>[1.5-1.6]</sup>：在受到光辐射时，处在高能态  $E_2$  的粒子受到光辐射中光子  $h\nu = E_2 - E_1$  的激发，从高能态  $E_2$  跃到低能态  $E_1$ ，同时发出一个和激发光子同方向同相位的光子  $h\nu = E_2 - E_1$ ，这种光发射称为受激发射。

如果处于热力学平衡态时，要达到细致的各能态的平衡必须在三种跃迁中达到细致平衡，总结以上论述，可见：

1. 从一个高能级  $E_2$  跃到一个低能级  $E_1$  的自发跃迁数与高能级  $E_2$  的粒子占有数  $N_2$  成正比，即跃迁的粒子总数为  $A_{21}N_2$ ，其中  $A_{21}$  是自发辐射几率；
2. 从低能级  $E_1$  吸收一个光子跃到一个高能级  $E_2$  的跃迁数与辐照强度  $\rho(\nu)$  和低能级  $E_1$  的粒子占有数成正比，即跃迁的粒子总数为  $B_{12}N_1 \rho(\nu)$ ，其中  $B_{12}$  称为单位辐射能密度的受激吸收几率；
3. 从高能级  $E_2$  受辐照激发跃迁至低能级  $E_1$  的粒子数与辐照强度  $\rho(\nu)$  和高能级  $E_2$  的粒子占有数  $N_2$  成正比，即跃迁的粒子总数为  $B_{21}N_2 \rho(\nu)$ ，其中  $B_{21}$  称为单位辐射能密度的受激发射几率；

三种跃迁的细致平衡写为：

$$B_{12}N_1 \rho(\nu) = A_{21}N_2 + B_{21}N_2 \rho(\nu) \quad (1-3)$$

将 (1-1) 代入其中并解出  $\rho(\nu)$  有：

$$\rho(\nu) = \frac{A_{21}}{B_{12}e^{h\nu/kT} - B_{21}} \quad (1-4)$$

如果所处系统达到平衡，辐射能密度  $\rho(\nu)$  就是黑体的辐射能密

度, 因此

$$B_{12} = B_{21} = B \quad (1-5)$$

$$A_{21}/B = 8\pi h\nu/c^3 \quad (1-6)$$

从 (1-6) 式 和 (1-4) 式可得自发发射和受激发射的几率之比为:

$$R = A_{21}/B \rho(\nu) = \exp(h\nu/kT) - 1 \quad (1-7)$$

在室温下, 对波长为 6000 埃的光,  $\nu = 5 \times 10^{14}$  Hz, 代入上式有  $R \approx 10^{35}$ 。可见, 在室温下在可见光范围内, 受激发射几乎可以忽略。所以一般光源的发光都是自发发射, 因此, 把受激发光机制发出的光称为激光, 而把只对受激发光方式进行放大而形成激光束的器件称为激光器。

定义 1: 通过特殊放大方式对受激发射进行放大产生的光称为激光, 英文写成 Laser, 是 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的缩写。

定义 2: 通过特殊设计, 对某些物质的受激辐射进行放大而形成激光束的器件称为激光器, 英文写成 laser。

从以上的分析可见, 产生激光必须有两个重要条件:

1. 要颠倒热平衡系统中由式 (1-2) 所给出的粒子分布, 即要实现  $N_2 > N_1$ , 这可以通过在非平衡系统中实现, 该条件通常简记为粒子数倒 (反) 转;

2. 要建立一个谐振腔, 对发光物质的某个频率进行选择放大, 获得强烈的激光束, 该条件也可简记为谐振放大。

从形成激光器的技术条件分析, 激光器需要三大部件: 能量源、工作物质和谐振腔。其中, 能量源是激光运行的能量保证, 是形成粒子数倒转的前提; 工作物质提供了一系列可以成为激光发光体的粒子和形成激光必须的亚稳态上能级; 谐振腔保证了激光的频率的单一性和激光放大的有效性。任何激光器件可以有设计的不同, 但是都必须有以上三大部件。

由以上分析可以想见，要产生激光是比较困难的事，那么为什么要产生激光呢？它有那些优点呢？分析一下自发发射和受激发射的特点就不难理解这点：

1. 自发发射时，发光的粒子之间没有很强的关联，发光是各粒子的独立行为，发光的方向和相位可以是任意的，因此，光从四面八方分散到 $4\pi$ 立体角内；而激光由于发光时必须首先受到激发光的作用，并且发出的光和激发光有相同的方向和相位，因此，激光仅仅在激发光规定的方向上被衍射极限限定的小角度内发出，即**激光基本是沿一直线传播，有很好的方向性**；
2. 普通自发发光由于存在自身的衰减、碰撞衰减、外场衰减和多普勒衰减等，光谱线有较大的线宽 $\Delta\lambda/\lambda$ ；而激光由于谐振腔的选频和增益稳定效应，激光光谱线有较小的线宽 $\Delta\lambda/\lambda$ ，即**激光有较好的单色性**；举例来说，用来作为长度标准的氪 86 的光谱线 6057 埃的线宽 $\Delta\lambda/\lambda = 8 \times 10^{-7}$ ，而氦-氖激光的光谱线 6328 埃的线宽 $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-11}$ ；
3. 由于上述原因，普通自发发射光源（如钨丝灯、太阳等）发出的光都是非相干光，而激光由于和激发光有相同的相位，因此，**激光有很好的相干性**；举例来说，用来作为长度标准的氪 86 的光谱线 6057 埃的相干长度仅为数十厘米；而氦-氖激光的光谱线 6328 埃的相干长度可达数百米；
4. 普通光源发光分散于 $4\pi$ 立体角内，因此总功率虽然很大，但功率密度通常不是非常高；而激光由于有极强的方向性和很小的发散角，因此，**激光功率密度特别大**，一般

的激光（如氢-氟激光）其亮度远比太阳亮度大。

如果，用通常的比喻来说，自发发光的光子可以比作普通老百姓，那么，激光光子就可以比作训练有素的军队。激光的威力也由此可见一斑。

由于以上这些特点，从 1960 年美国人梅曼（Maiman）首先制成红宝石激光以来，激光不仅开辟了光学的一个全新的新纪元，而且在材料科学、电子科学等尖端科技领域内得到了广泛的应用。

### 1.1.3 激光谐振腔和模式分布

#### 1.1.3.1 封闭谐振腔

按照以上分析，要产生激光，必须有能量源、工作介质和选择频率的谐振腔，其中能量源可以是光辐射源、热源、化学反应或者是电激发源，在此不作详细的讨论，因为它不是本书的中心问题；工作介质是产生激光的必不可少的物质，它决定了激光器的类型，这一点将要在介绍激光器时逐一的介绍，因此，也不在此多费笔墨。

激光谐振腔的设计和性质决定了激光的模式和功率密度分布，因此，以下将进行一个简要的讨论，但是，只限于对此问题和激光模式和功率密度分布关系的一个初浅的讨论，不可能涉及所有的问题。

学过电动力学的读者都知道，光是一种电磁波，它在介质中的传播方程可以写成所谓的亥姆霍兹方程<sup>[1, 3, 1.7]</sup>：

$$\nabla^2 \vec{E} + K^2 \vec{E} = 0 \quad (1-8)$$

式中

$$K^2 = \mu \epsilon \omega^2 (1 + i\sigma/\omega \epsilon) = \mu \epsilon' \omega^2 \quad (1-9)$$

如果假定激光在长、宽、高分别为  $L$ 、 $2a$ 、 $2b$  的谐振腔中传播 (图 1-2), 在六个面上为理想导体, 且认为电场矢量的笛卡儿坐标分量为:

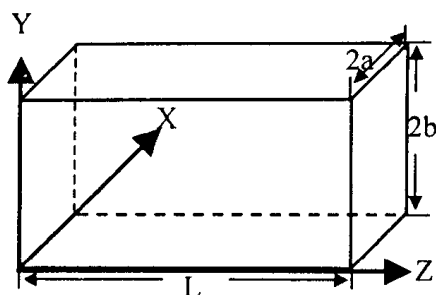


图 1-2 封闭式谐振腔示意图

$$E_i = \text{Re} [E_i(x, y, z) e^{i\omega t}] \quad (1-10)$$

其中角标  $i = x, y, z$

假定可以用分离变量的方法来解方程, 则有

$$E_i = X(x)Y(y)Z(z) \quad (1-11)$$

将 (1-11) 代入 (1-8) 式中有:

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} + \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = -K^2 \quad (1-12)$$

(1-12) 式成立的条件是左方每一项都是一个常数即:

$$\begin{cases} \frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} = -K_x^2 \\ \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} = -K_y^2 \\ \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = -K_z^2 \end{cases} \quad (1-13)$$

和

$$K^2 = K_x^2 + K_y^2 + K_z^2 \quad (1-14)$$

由此腔中任意一个笛卡儿分量可以表示为:

$$E_i = (\alpha_1 \cos K_x x + \alpha_2 \sin K_x x) (\beta_1 \cos K_y y + \beta_2 \sin K_y y) (\gamma_1 \cos K_z z + \gamma_2 \sin K_z z) \quad (1-15)$$

考虑到腔壁为理想导体因此有:

$$\vec{n} \times \vec{E} = 0 \Rightarrow \begin{cases} E_y = E_z = 0 & (x = 0, x = 2a) \\ E_z = E_x = 0 & (y = 0, y = 2b) \\ E_x = E_y = 0 & (z = 0, z = L) \end{cases} \quad (1-16)$$

又因为:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (1-17)$$

矩形腔中的电磁场的空间矢量可写为:

$$\begin{cases} E_x = E_{0x} \cos K_x x \sin K_y y \sin K_z z \\ E_y = E_{0y} \sin K_x x \cos K_y y \sin K_z z \\ E_z = E_{0z} \sin K_x x \sin K_y y \cos K_z z \end{cases} \quad (1-18)$$

式中

$$\begin{cases} K_x = \frac{m\pi}{2a}, & m = 0, 1, 2, \dots \\ K_y = \frac{n\pi}{2b}, & n = 0, 1, 2, \dots \\ K_z = \frac{q\pi}{L}, & q = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (1-19)$$

且有