



“十二五”国家重点出版规划项目

国家出版基金项目

NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

现代激光技术及应用丛书

激光束二元光学 变换及其应用

谭峭峰 虞钢 李少霞 著

Binary Optics in Laser Beam Transformation
and The Applications



国防工业出版社

National Defense Industry Press



“十二五”国家重点出版规划项目

/现代激光技术及应用丛书/

激光束二元光学 变换及其应用

谭峭峰 虞 钢 李少霞 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书以作者科研团队的最新研究成果为基础,结合国内外研究进展编写而成。本书共分为六章。第1章为绪论,介绍激光束的传输和变换,以及二元光学在激光束变换领域的优势。第2章介绍二元光学相关理论及其优化设计方法。第3章介绍包括等强度和非等强度分布的点阵、条形及圆环光栅及应用。第4章介绍大尺寸非等强度光斑的实现及其应用。第5章介绍双光子加工、超分辨元件的设计方法、超分辨实验等内容。第6章介绍柱矢量光束的生成方法、聚焦特性及应用。

本书可供从事二元光学的科研人员和工程技术人员参考,也可以作为光学类、光学工程类、物理类等相关学科的研究生和高年级本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

激光束二元光学变换及其应用/谭峭峰,虞钢,李少霞著. —北京:国防工业出版社,2016. 11

(现代激光技术及应用)

ISBN 978-7-118-11145-3

I. ①激… II. ①谭… ②虞… ③李… III. ①激光应用 IV. ①TN249

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 298913 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 17¼ 字数 323 千字

2016 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 78.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

丛书学术委员会 (按姓氏拼音排序)

主任	金国藩	周炳琨		
副主任	范滇元	龚知本	姜文汉	吕跃广
	桑凤亭	王立军	徐滨士	许祖彦
	赵伊君	周寿桓		
委员	何文忠	李儒新	刘泽金	唐 淳
	王清月	王英俭	张雨东	赵 卫

丛书编辑委员会 (按姓氏拼音排序)

主任	周寿桓			
副主任	何文忠	李儒新	刘泽金	王清月
	王英俭	虞 钢	张雨东	赵 卫
委员	陈卫标	冯国英	高春清	郭 弘
	陆启生	马 晶	沈德元	谭峭峰
	邢海鹰	阎吉祥	曾志男	张 凯
	赵长明			

世界上第一台激光器于1960年诞生在美国,紧接着我国也于1961年研制出第一台国产激光器。激光的重要特性(亮度高、方向性强、单色性好、相干性好)决定了它五十多年来在技术与应用方面迅猛发展,并与多个学科相结合形成多个应用技术领域,比如光电技术、激光医疗与光子生物学、激光制造技术、激光检测与计量技术、激光全息技术、激光光谱分析技术、非线性光学、超快激光学、激光化学、量子光学、激光雷达、激光制导、激光同位素分离、激光可控核聚变、激光武器等。这些交叉技术与新的学科的出现,大大推动了传统产业和新兴产业的发展。可以说,激光技术是20世纪最具革命性的科技成果之一。我国也非常重视激光技术的发展,在《国家中长期科学与技术发展规划纲要(2006—2020年)》中,激光技术被列为八大前沿技术之一。

近些年来,我国在激光技术理论创新和学科发展方面取得了很多进展,在激光技术相关前沿领域取得了丰硕的科研成果,在激光技术应用方面取得了长足的进步。为了更好地推动激光技术的进一步发展,促进激光技术的应用,国防工业出版社策划并组织编写了这套丛书。策划伊始,定位即非常明确,要“凝聚原创成果,体现国家水平”。为此,专门组织成立了丛书的编辑委员会。为确保丛书的学术质量,又成立了丛书的学术委员会。这两个委员会的成员有所交叉,一部分人是几十年在激光技术领域从事研究与教学的老专家,一部分人是长期在一线从事激光技术与应用研究的中年专家。编辑委员会成员以丛书各分册的第一作者为主。周寿桓院士为编辑委员会主任,我们两位被聘为学术委员会主任。为达到丛书的出版目的,2012年2月23日两个委员会一起在成都召开了工作会议,绝大部分委员都参加了会议。会上大家进行了充分讨论,确定丛书书目、丛书特色、丛书架构、内容选取、作者选定、写作与出版计划等等,丛书的编写工作从那时就正式地开展起来了。

历时四年至今日,丛书已大部分编写完成。其间两个委员会做了大量的工作,又召开了多次会议,对部分书目及作者进行了调整,组织两个委员会的委员对编写大纲和书稿进行了多次审查,聘请专家对每一本书稿进行了审稿。

总体来说,丛书达到了预期的目的。丛书先后被评为“十二五”国家重点出

版规划项目和国家出版基金项目。丛书本身具有鲜明特色：①丛书在内容上分三个部分，激光器、激光传输与控制、激光技术的应用，整体内容的选取侧重高功率高能激光技术及其应用；②丛书的写法注重了系统性，为方便读者阅读，采用了理论—技术—应用的编写体系；③丛书的成书基础好，是相关专家研究成果的总结和提炼，包括国家的各类基金项目，如973项目、863项目、国家自然科学基金项目、国防重点工程和预研项目等，书中介绍的很多理论成果、仪器设备、技术应用获得了国家发明奖和国家科技进步奖等众多奖项；④丛书作者均来自国内具有代表性的从事激光技术研究的科研院所和高等院校，包括国家、中科院、教育部的重点实验室以及创新团队等，这些单位承担了我国激光技术研究领域的绝大部分重大的科研项目，取得了丰硕的成果，有的成果创造了多项国际纪录，有的属国际首创，发表了大量高水平的具有国际影响力的学术论文，代表了国内激光技术研究的最高水平，特别是这些作者本身大都从事研究工作几十年，积累了丰富的研究经验，丛书中不仅有科研成果的凝练升华，还有着大量作者科研工作的方法、思路和心得体会。

综上所述，相信丛书的出版会对今后激光技术的研究和应用产生积极的重要作用。

感谢丛书两个委员会的各位委员、各位作者对丛书出版所做的奉献，同时也感谢多位院士在丛书策划、立项、审稿过程中给予的支持和帮助！

丛书起点高、内容新、覆盖面广、写作要求严，编写及组织工作难度大，作为丛书的学术委员会主任，很高兴看到丛书的出版，欣然写下这段文字，是为序，亦为总的前言。

金国藩 周如琨

2015年3月

激光的产生、传输变换和控制,以及激光和物质的相互作用构成了激光技术领域的主要研究内容。激光束的变换及其应用是当今世界激光领域研究前沿之一,二元光学是实现激光束变换的重要手段,激光束的二元光学变换及其应用是激光技术领域的一个重要分支学科。

二元光学是指基于光波的衍射理论,利用计算机辅助设计,并用超大规模集成(VLSI)电路制作工艺,在基片(或传统光学元件表面)上刻蚀产生两个或多个台阶深度浮雕结构,形成纯相位、同轴再现、具有极高衍射效率的一类衍射光学元件。二元光学是光学与微电子技术相互渗透、交叉而成的前沿学科,与传统光学元件相比在实现高功率激光束变换方面具有高效率、任意波面变换、易于复制和集成等特点。随着激光技术应用范围的扩大以及对激光束传输和控制要求的提高,二元光学技术在激光束变换领域的优势愈加突出。激光束的变换方式和目标与应用需求密切相关,本书采用二元光学变换手段实现均匀和非均匀二值相位元件、多台阶元件、衍射超分辨元件以及柱矢量光束产生元件,并介绍了各类元件在激光表面处理、激光热负荷、双光子加工、激光冲击成形等领域的应用。

近十年来,二元光学在激光束变换及其应用领域取得了一些研究成果,介绍近年来该领域最新理论和应用成果的专著的出版具有必要性和重要意义。“现代激光技术及应用丛书”围绕高功率和高亮度激光器、激光束的传输与控制以及在国防中的应用三个大领域介绍我国现代激光技术的发展与应用,着重对近年来所取得的创新性研究成果和进展进行阐述。本书是丛书的一个分册,属于激光束的传输与控制范畴,作者们是多年从事激光束二元光学变换研究的科研人员。基于作者和他们的研究团队的研究成果和应用实践,综合国内外学术新观点及研究进展,力求较全面地阐述激光束二元光学变换的基础理论、设计方法、制作方法以及主要应用等方面的最新进展。希望能为从事激光束二元光学

变换的研究人员提供比较系统、全面的参考。

本书的编写得到了清华大学精密仪器系和中国科学院力学研究所激光先进制造实验室研究团队的大力支持。周哲海博士、刘海涛博士、魏鹏博士、韦晓全硕士、程侃硕士、曲卫东博士、聂树真博士、王恒海博士、孙培培博士、葛志福博士、刘潞钊硕士,以及朱天辉、王高飞、陈茹等为本书的撰写、定稿等工作提供了多方面的帮助。在此表示由衷的感谢。

金国藩院士、周寿桓院士对二元光学研究及本书的出版给予了极大的关怀,谨致以最深切的谢意。国防工业出版社责任编辑为本书的出版付出了辛勤劳动,在此致谢。

限于作者的学识水平,必然会存在不妥之处,恳请读者不吝指正。

作者

2016年6月

第1章 绪论

1.1 激光束的传输	001
1.1.1 激光束的传输特性	001
1.1.2 激光束的应用需求	003
1.2 激光束的变换	006
1.2.1 基于折射原理的激光束变换	006
1.2.2 基于衍射原理的激光束变换	009
1.3 二元光学及其优势	010
参考文献	013

第2章 二元光学基础理论及优化算法

2.1 二元光学基础理论	015
2.1.1 亥姆霍兹-基尔霍夫积分定理	016
2.1.2 索末菲辐射条件	017
2.1.3 基尔霍夫边界条件	018
2.1.4 菲涅尔衍射	018
2.1.5 夫琅和费衍射	019
2.2 二元光学元件优化设计	020
2.2.1 几何变换法	021
2.2.2 优化算法	022
2.2.3 精细化设计	031
2.2.4 衍射超分辨元件的全局优化	035
2.2.5 非夫琅和费衍射系统的二元光学元件优化	042
2.3 光束变换性能的空间频谱分析	053
2.3.1 空间频谱	053
2.3.2 性能参数定义	054
2.3.3 滤波性能	055
参考文献	057

第3章 二值相位光栅及其应用

3.1 达曼光栅设计原理	060
3.1.1 一维达曼光栅设计原理	060
3.1.2 达曼光栅二维优化编码原理	063
3.2 点阵型准达曼光栅(Quasi-Dammann Grating)	066
3.2.1 QDG 的编码方式	067
3.2.2 QDG 的描述参数	068
3.2.3 QDG 目标函数定义	068
3.2.4 QDG 优化设计	070
3.3 圆环形达曼光栅	072
3.3.1 宽带圆环形达曼光栅	072
3.3.2 窄带圆环形达曼光栅 ^[14]	075
3.4 二值相位光栅的制作和检测	076
3.4.1 二值位相光栅的制作	076
3.4.2 二值相位光栅的检测	078
3.4.3 误差分析	080
3.5 二值相位光栅的应用	083
3.5.1 点阵型二值相位光栅的应用	083
3.5.2 点阵光斑与激光表面强化	084
3.5.3 条带达曼光栅及其应用	088
参考文献	095

第4章 多阶二元光学元件与激光束整形

4.1 多圆环二元光学整形元件	097
4.1.1 设计方法	097
4.1.2 设计实例	098
4.1.3 多台阶光束整形元件制作	102
4.2 任意二维分布二元光学激光束整形元件	104
4.2.1 不同衍射场数值计算方法的采样范围	104
4.2.2 发散球面波入射情况下的二次采样数值计算方法	108
4.2.3 折衍混合元件实现大衍射场激光束整形	110
4.3 二维精细化设计	118

4.3.1	光束整形衍射图案中的激光散斑	119
4.3.2	抑制激光散斑的光束整形优化算法	120
4.4	二元光学激光束整形元件的应用	126
4.4.1	多圆环光束整形元件的应用	129
4.4.2	非对称光束整形元件的应用	130
4.4.3	精细化设计光束整形元件的应用	134
	参考文献	139

第5章 双光子衍射超分辨率加工

5.1	双光子加工简介	141
5.1.1	双光子激发原理和技术特点	141
5.1.2	双光子微细加工研究现状	143
5.2	衍射超分辨元件设计方法	145
5.2.1	衍射超分辨性能参数	145
5.2.2	小数值孔径下衍射超分辨元件设计方法	146
5.2.3	大数值孔径下衍射超分辨元件设计	151
5.3	双光子加工的分辨率增强实验	162
5.3.1	横向超分辨仿真实验	162
5.3.2	横向超分辨实验	163
5.4	径向偏振光入射下衍射超分辨元件设计与性能	165
5.4.1	二维衍射超分辨元件设计与性能	166
5.4.2	三维衍射超分辨元件设计与性能	176
	参考文献	180

第6章 柱矢量光束及应用

6.1	柱矢量光束简介	184
6.1.1	基本概念	184
6.1.2	自由空间传播特性	185
6.2	柱矢量光束的生成方法	190
6.2.1	生成方法综述	190
6.2.2	基于亚波长金属光栅的生成方法	193
6.3	柱矢量光束的聚焦特性	207
6.3.1	相位均匀分布的柱矢量光束的聚焦特性	207

6.3.2	柱偏振涡旋光束的聚焦特性	219
6.3.3	高级次轴对称偏振光束的聚焦特性	227
6.4	柱矢量光束在材料加工中的应用	230
6.4.1	光束偏振态对材料加工效率的影响	230
6.4.2	聚焦整形技术在材料加工中的应用	231
	参考文献	234

1.1 激光束的传输

1.1.1 激光束的传输特性

1960年,美国休斯公司的梅曼发明了世界上第一台红宝石激光器。自此以后,激光器发展非常迅速,固体、气体、半导体、光纤、染料和准分子等多种激光器相继问世。激光器输出功率的不断提高和逐步实现商品化的进程,使激光器走出实验室,成为工业制造行业的设备基础^[1-3]。

激光的应用与激光的传输特性密切相关。激光发明以后,其光束传输特性得到广泛研究,以高斯光束为主,后续扩展到包括超高斯光束、像散高斯光束、部分相干光、有振幅调制和相位畸变的光束、空间-时间域中有耦合的光束和贝塞尔光束等,出现许多新奇的传输特性和聚焦特性。激光的传输特性一定程度上决定着其应用领域,同时也限制着其应用。以下简单讨论激光的基本传输特性。

1.1.1.1 激光束的聚焦特性

激光束的可聚焦性与横电磁模式(通常指TEM,或简称模式)密切相关。模式描述了在激光束中功率分布的基本方式。高斯基模(TEM_{00})的功率分布是最能被聚焦的模式,能被聚焦到理论最小值。基模提供了最集中的功率密度,然而,由于功率密度的集中,必须尽可能保证内部(谐振腔)和外部(光束传输)的光学元件的热稳定性。从光学元件设计的角度考虑,包括要合适的光学材料(反射率或透射率)、光学元件的质量(热稳定性)、光学元件的有效冷却(一般功率在1500W以上要水冷)。从维护的角度考虑,还包括保证光学元件高度的清洁和更严格的检验。

高阶模或多模光束具有光束能量从中央向四周扩展的趋势,焦斑相对于基模光束较大,降低功率密度或集中性。此外,高阶模在两个轴向上通常有不同的功率分布(非对称),这是因为在两个轴向上具有不同的模式。在给定功率下,聚焦点的大小决定了工件上的功率密度,因此研究影响聚焦点大小的因素有实用意义。

在激光加工的实际应用中,通常需要使用光学系统使光束聚焦,利用焦点附近的极高的能量密度进行切割、打孔、焊接等加工,因此聚焦光斑尺寸可以较直观地粗略评价光束质量。焦斑大小除了与激光束特性相关外,还与所用的聚焦光学系统有关,在理想情况下,焦斑尺寸为

$$D \approx \frac{\lambda f}{2a} \quad (1-1)$$

式中: f 为聚焦系统的等效焦距; $2a$ 为衍射孔径; λ 为所用激光的波长。从式(1-1)中可以看出焦斑大小与焦距和波长成正比,在相同的衍射孔径条件下,选用短焦距聚焦系统和短的激光波长可以获得更小的焦斑,但同样的激光束,焦斑尺寸越小,光束发散角就越大,同时也受到有效加工距离的限制,不可能采用非常短的聚焦系统进行激光加工。从激光加工的角度考虑,只用焦斑尺寸一个参数评价光束质量是不够的。

1.1.1.2 远场发散角

激光束远场发散角的大小决定了激光束在特定距离内的发散程度,或者说在不明显发散的条件下所能传输的距离。发散角也是激光应用中需要考虑的重要问题,发散角小有利于提高加工深度和减少对加工距离的严格要求。远场发散角的大小可以通过扩束准直来改变,但随着发散角的改变,特定距离上的光斑直径也会改变,所以当用远场发散角评价光束质量时,必须确定一个固定的激光光斑尺寸才能进行比较,单独讨论发散角或者光斑直径来评价光束质量或者光束的传输特性都是片面的。

1.1.1.3 M^2 因子

M^2 因子作为评价光束质量的参数,可以全面地描述激光光束传输特性,虽然通过聚焦或准直的办法可以缩小光斑直径或压缩远场发散角,但对于确定的高斯光束,当通过理想的无像差光学系统变换时,其 M^2 因子是一个常数,这就比仅用聚焦光斑尺寸或远场发散角描述光束质量更加完善。 M^2 因子的定义为

$$M^2 = \frac{\text{实际光束的腰斑半径} \times \text{远场发散角}}{\text{理想光束的腰斑半径} \times \text{远场发散角}} \quad (1-2)$$

在 M^2 因子的定义中,理想光束是指基模高斯光束,即基模高斯光束的 $M^2 = 1$,具有最好的光束质量。 M^2 因子越大,光束质量越差。 M^2 因子作为评价光束质量的统一标准,从1995年开始逐步形成,并得到国际标准化组织(ISO)的支持。对于多模激光束的传播, M^2 因子的引入具有重要的意义,在整个传输过程中,所有的轴向位置上的光束横向扩展,都比对应的基模高斯光束大一个常数倍因子 M ,即

$$W(z) = Mw(z) \quad (1-3)$$

式中: $W(z)$ 为多模光束的光束半径; $w(z)$ 为基模高斯光束的光束半径; z 为轴向位置。

下面是多模光束的光束半径和波前曲率半径表达式:

$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{M^2 \lambda z}{\pi W_0^2} \right)^2} \quad (1-4)$$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi W_0^2}{M^2 \lambda z} \right)^2 \right] \quad (1-5)$$

式中: W_0 为焦斑半径。

通过这两个方程,就可以用数学方法来处理多模激光束的传播。激光束的传输特性决定了其空间强度分布特性、偏振特性以及衍射特性。随着激光的应用范围越来越广泛,工业激光器直接输出的激光束特性难以满足应用需求。

1.1.2 激光束的应用需求

一般工业激光器直接输出的激光束,在任意横截面上,通常呈高斯或超高斯强度分布。激光束经过光学系统可聚焦为直径很小的光斑,激光束的这种高能量密度特性可以满足一般的激光制造过程。但随着激光技术的发展和更苛刻的应用需求,需要将工业激光器直接输出的激光束变换为具有特定空间强度分布或者偏振特性的激光束。比如大深径比聚焦光束、环状光束、平面或径向细环聚焦光束、点阵分布光束等^[4,5]。目前在激光惯性约束聚变(ICF)、X射线激光实验及激光加工制造方面,已涉及需要将强激光器的原始光束变换为具有特定光强分布的点、线、圆锥聚焦光束等。

1.1.2.1 激光表面处理对激光束空间分布的要求

激光表面处理是激光加工中的一种。激光表面处理是新兴的激光技术和历史悠久的金属表面处理技术相结合的产物,也是能长时间稳定工作的大功率激光器发展的必然结果之一。这项技术已经在生产中得到广泛的应用。其原理是在材料表面施加极高的能量密度,发生物理、化学变化,以达到强化目的。

激光表面强化技术,已成为高能束表面处理技术的一种重要手段^[6],作为激光制造技术的一个重要分支,主要应用于汽车、模具加工以及一些轻工业部门。随着工业生产中对材料表面性能、加工效率的进一步提高,对激光束特性及其有效控制提出了新的要求。激光表面强化技术包括激光淬火(相变硬化)、激光合金化、激光涂覆、激光非晶化、激光冲击硬化等多种工艺。此时的冲击硬化需要特别指出,它的硬化可以形象地称为“冷硬化”,这是因为其相互作用时间非常短,功率密度非常高,硬化机理不是通过加热后急冷的相变,而是

由于冲击的反作用使表面产生压应力,引起很大的位错密度,使表面变硬^[7-9]。

根据激光束作用方式的不同,激光表面硬化技术分为连续式激光表面硬化技术和脉冲式激光表面硬化技术,随着智能化程度和脉冲激光器的发展以及对材料表面硬化性能要求的提高,脉冲式激光硬化开始得到应用^[1,6,10]。通常高功率激光束经聚焦后形成直径很小的光斑,可以采取离焦方式增大光斑面积,但处理大、中型金属表面的加工效率仍有待进一步提高;而且由于光斑为圆形,光斑强度呈高斯或者超高斯分布,光斑的重叠不易控制,搭接率高,容易引起硬化层不均匀、搭接软化等问题,影响处理效果,难以满足应用需求。

激光强度空间分布包含两层含义:一是指光斑几何形状一定时,激光强度的空间分布形式;二是指强度空间分布形式一定时,光斑的几何形状。不同型号的激光设备输出光束的光斑形状和功率密度分布差别很大。光斑形状和光斑内部强度分布是影响表面处理的重要因素,因此通过外部光学系统的光学处理改变激光束空间强度分布,是获得良好激光表面处理效果的重要方法。因此,为满足特定的加工需求以及提高加工质量和效率,对于激光表面硬化过程中光束变换的研究主要有以下两类。其一,将激光束变换为平顶光束,包括对高斯光源进行叠加,给出了强度均布的矩形光源解^[11],对衍射元件的设计和制作进行了研究,将高斯光束变换为矩形平顶光束^[12-15]。但根据激光与材料相互作用原理,均匀分布的激光束光场不能产生均匀的温度场,更不能产生均匀的组织结构和硬化层。文献[16]提出了一种曲边矩形光斑,在激光功率密度保持均匀的前提下,越靠近边缘,光斑的长度越长,激光硬化时边缘处与工件表面的作用时间也越长,因而注入的能量越多,以此达到改善硬化层分布均匀性的目的,如图1-1所示。其二,考虑光束内部强度分布对激光表面硬化效果的影响,采用一种光强分布呈马鞍形的光斑,可以提高强化层均匀性,如图1-2所示^[17]。理论研究和实验分析表明,光束内部的非均匀强度(比如点阵分布),会造成材料表面层组织的周期性分布,而这种分布能有效提高材料的耐磨性。

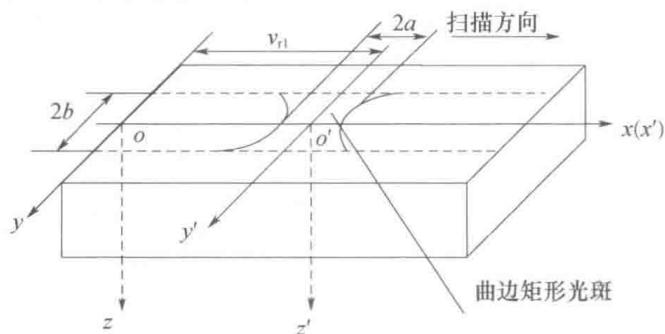


图1-1 曲边矩形光斑扫描及坐标系建立^[16]

一般来说,利用直接来自激光器的或者通过简单聚焦系统的光束,对材料进行激光表面热处理后相变硬化层的形貌为中央较深的月牙形,与通常情况下希望经过热处理后获得一个均匀硬化层的愿望有较大的距离。从准确控制激光作用区域的观点而言,具有整齐边界的光束无疑是一种较好的光束,但是很容易证实,即便是一个简单的平面边界工件,如果期望获得一个均匀的硬化层,则需要的是在作用光斑边缘有能量突起的光束,如图 1-3 所示。

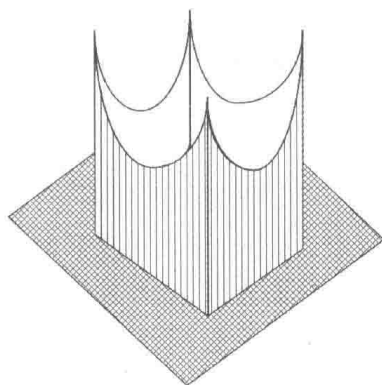


图 1-2 马鞍形功率密度分布^[17]

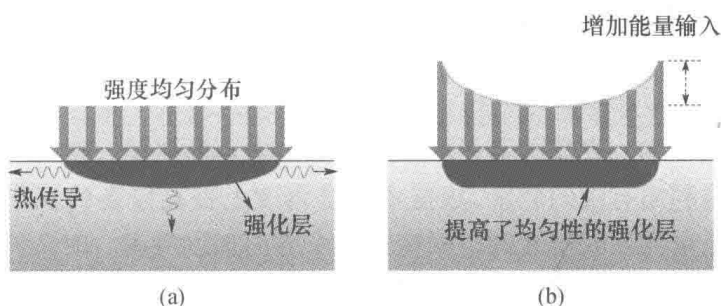


图 1-3 光斑边缘能量突起提高强化层均匀性

如果考虑到被处理工件的特殊形状,理想的矩形均匀光斑事实上可能导致很不理想的热作用结果。材料的相变与材料所经历的热循环相关,工件边界对热传导的影响必然对激光淬火的结果发生影响。因此,即使是同种材料制造的工件,要获得同样的相变硬化层,对作用光束的功率密度分布在不同的部位将有不同的要求,甚至要求光束的功率及功率密度的空间分布能在表面硬化过程中实时变化。同时,特定结构件的激光熔覆、激光修复、激光热疲劳性能测试等应用都对激光束空间强度分布提出了新要求。

1.1.2.2 工业应用对长焦深激光束的需求^[18-20]

除激光束截面光强分布对激光应用有很重要的影响外,激光束传输方向上的光强分布同样在很大程度上决定着其应用效果和领域。长焦深激光束是指焦深或瑞利长度远远大于其焦斑直径的光束,这类光束在很多领域有重要应用需求。例如在激光加工和激光医疗领域,切割厚的工件,作为治疗用的激光手术刀等都需要激光束具有长焦深和小焦斑,这样可以保证切口的均匀性,提高精度。在激光驱动的惯性约束聚变中,通常采用汤姆逊散射法来精确地测量激光等离子体的电子温度,实现这一测量的关键是激光束聚焦的焦斑尺寸要小而焦深要