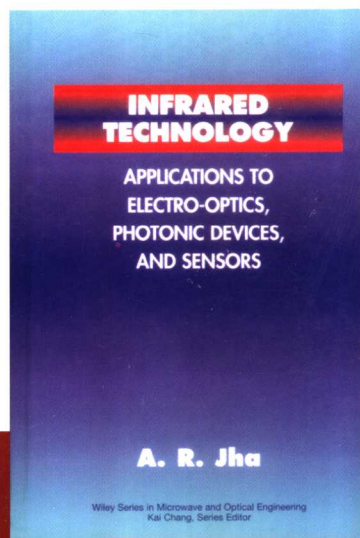


红外技术应用

——光电、光子器件及传感器

[美] A. R. 杰哈 著
张孝霖 陈世达 舒郁文 等译

Chemical Industry Press



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

红外技术应用

——光电、光子器件及传感器

[美] A. R. 杰哈 著
张孝霖 陈世达 舒郁文 等译



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

红外技术应用——光电、光子器件及传感器/[美] 杰哈(Jha, A. R.) 著; 张孝霖等译. —北京: 化学工业出版社, 2004. 8

书名原文: Infrared Technology
ISBN 7-5025-6022-X

I. 红… II. ①杰…②张… III. 红外技术-应用
IV. TN219

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 081287 号

Infrared Technology/by A. R. Jha
ISBN 0-471-35033-8

Copyright © 2000 by John Wiley & Sons, Inc., . All rights reserved.
Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.,

本书中文简体字版由 John Wiley & Sons 出版公司授权化学工业出版社独家出版发行。
未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2003-4833

红外技术应用
——光电、光子器件及传感器

[美] A. R. 杰哈 著

张孝霖 陈世达 舒郁文 等译

责任编辑: 高尚祿

文字编辑: 廉静

责任校对: 顾淑云 于慧岩

封面设计: 潘峰

化学工业出版社出版发行
材料科学与工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里3号, 邮政编码 100029)
发行电话: (010) 68982560
<http://www.cip.com.cn>

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 25 $\frac{1}{4}$ 字数 450 千字

2004 年 10 月第 1 版 2004 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6022-X/TN·12

定 价: 55.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

中国电子科技集团公司第十一研究所
对本书的翻译、出版给予了大力支持，

谨致谢意！

序 言

红外科学在现代技术领域的发展中扮演了革命性的角色。在电磁频谱中，红外的波长范围大体上从 $0.75\mu\text{m}$ 跨越到 $1000\mu\text{m}$ 。红外辐射的发现归功于英国皇家天文学家赫歇耳，他在 1800 年用棱镜将阳光色散，并用一个灵敏的温度计探测到它，从而证实了红外辐射。这一工作为红外光谱学领域奠定了基础。此后 30 多年，这种新形式辐射的巨大潜力一直未得到认识。直到更灵敏的温度计，如辐射热电偶与衍射光栅光谱计出现后，红外科学与技术的基础与应用研究才有了显著的进展。在这些发展的成就中，红外光谱学扮演了领先的角色。

整个 19 世纪与 20 世纪初期，红外研究基本上是着眼于基础性的。这些研究的实验结果导致几乎全部热辐射的基础理论与定律公式化。例如，热辐射对光谱与温度的依赖关系的研究导致普朗克量子理论、斯特芬-玻尔兹曼分布定律与维恩位移定律的确立。赫兹针对热辐射在真空中传播的实验研究证实了麦克斯韦的经典电磁辐射理论。对气相、液相与固相的分子与原子系统的红外光谱研究，洞察到它们的结构，从而建立它们的电子、振动与旋转的能级结构。红外光谱学成为化学家、生物化学家可能进行材料鉴别的重要工具。红外材料的性质，如吸收、发射、反射率、折射率、电光与非线性光学系数的研究，对于探索这些材料在激光器、探测器、光放大器、光参量振荡器、电光调制器以及许多其他器件中的应用是重要的。

应用有别于基础研究，的确，就其内容就需要列一个长长的表。红外技术的最早应用是第二次世界大战中发展用于防卫目的的红外成像系统。即使今天，红外技术在防卫应用中仍然扮演着决定性的角色。

本书为工程师、科学家与研究生提供了综合性指导与技术发展现状，以便于分析并发展红外、光子、电光器件与子系统在商业、工业、军事与空间中的应用。然而，红外技术应用的巨大推动力是由激光器的发明提供的。很有意义的是，三种最为广泛应用的激光器，即 Nd:YAG、二氧化碳与 III-V 族半导体

激光器，它们都工作在红外波段。利用激光能够观察到许多新的现象，诸如多光子过程、二次与三次谐波发生、受激拉曼散射等。激光引发了革命性的光通信，并转而提供了信息技术与互联网成长的激动人心的机遇。如果过去的成就是任何标尺的话，我们的未来将继续受到这种多才多艺技术新应用的深远的影响。

SHOBHA SINGH 博士

前 言

现代红外、光子与电光技术的成熟已经打开了一系列潜在应用的大门，这些应用包括空间监视传感器、机载侦察传感器、无人机电子学、院落安全系统、秘密通信系统、远程通信系统、数据传输系统、红外对抗设备、导弹告警系统、医疗用的红外激光器、空间遥感传感器、污染监视传感器、高分辨率成像传感器、多光谱机载传感器与一大批用于商业、工业、军事的其他系统。以上可用于空间、医疗与战场的尖端传感器应归功于现代光子、电光、光电子元件的迅速发展与有效性。一些新出现的技术，如超导体、单片微波集成电路与声光器件在某些传感器中的集成已经被验证。本书简述了红外、光子、电光元件和系统的性能，必要的地方还加以数学分析。本书旨在理论与实际应用之间取得平衡。它作了很好的组织并覆盖众多的题材与广泛的应用范围，包括商业、工业、空间与军事应用，直至涉及尖端的红外与光子技术。有关的数学表达与推导为研究生提供便利，以便扩展他们所需求的红外与光子技术领域的知识。本书内容易于为大学生与研究生理解，并含有许多数学表达的例子，这些例子可以论证红外与光子传感器的独特的性能。本书是特别为研究生、工程师、科学家、研究人员及产品发展经理准备的，他们希望或已积极参与了特定应用的现代红外与光子器件与传感器的设计与发展。它作为物理学家、研究科学家、项目经理、教育工作者与临床研究工作者的袖珍参考书也是非常有用的。简言之，本书对那些希望拓宽应用于各种器件与传感器的红外与光子技术知识领域的人将是极为有利的。作者做了极大的努力以求很好地组织材料。其中，使用了习惯的术语、固定的符号和统一的单位，以求读者迅速理解。本书提供的某些红外与光子器件与传感器的新近的性能参数是从各种参考资料里引用来的，这应归功于有关的作者与机构。参考书目中就包含了有重要意义的贡献来源。指出如下的事实是重要的：本书包括了红外与光子器件与传感器的研究、设计与发展活动中的最新数据。

本书包含 11 章。数值例子放在每章的末尾以提供重要数学表达式的分析

方式。第1章以最简单的形式表述了红外理论，以便于不熟悉红外理论的学生与读者有更好的理解。使用了通用的量、函数、符号与单位来描述光度、辐射度、光子与红外器件的性能。提供辐射出射度、相对辐射出射度、相对光子密度、光谱辐射出射度与光谱带辐射对比度作为温度与发射波长的函数的计算值，以便于清楚了解红外传感器与系统的性能及其局限性。在必要的地方对通常用于红外辐射理论的重要函数与量进行了推导。

第2章概述了光信号通过大气时作为高度、工作波长与气象条件函数的传输特性。提供了作为大气参数与发射波长函数的散射、吸收与衍射系数。描述了各种大气扰动强度下大气扰动对高功率激光束的作用。讨论了由于吸收、散射、衍射、热晕、气体击穿以及扰动导致的光束扩展对红外导弹与机载监视系统性能降低的严重影响。对可以计算大气传输特性的各种模型作了验算。在强调作用距离性能下有大气背散射时目标-背景对比度对武器投射性能的影响也作了描述。

第3章描述了各种红外源，包括人造源、天然源、实验室源、商业源与工业源的性能特性。在强调价格与复杂性下，讨论了包括相干与非相干源的性能。在特别强调可靠性、安全性与制冷要求下，描述了新近半导体激光器、二极管泵浦固体激光器、光纤激光器、光参量振荡器、掺钕放大器以及包括氧碘激光器和二氧化碳激光器在内的高功率化学与气体激光器。

第4章重点介绍了使用 CCD 与 CMOS 工艺的红外探测器与焦平面阵列 (FPA)。在强调灵敏度与光谱带宽下，概述了制冷与低温制冷探测器与 FPA 的性能参数。在强调增益与带宽乘积效率下，描述了各种应用中对雪崩光子计数 (APC) 探测器与光电倍增管 (PMT) 的性能指标要求。对于空间应用的红外探测器的抗辐射强度也做了规定。在强调内置读出器件下描述了一维与二维 FPA 的主要性能参数。至于高灵敏度红外探测器也已经被认证。

第5章描述了无源红外与电光器件新近的性能，这些器件包括光纤、非线性光学晶体、光学谐振腔、微透镜、使用光学技术的模/数转换器，如带通与可调谐滤光器、光纤链路、光延迟线、光隔离器与环行器、光开关、光学显示器以及高速红外数字相机。无源红外器件与传感器的各种可能应用已为商业、工业、空间与军事应用所证实。在恶劣工作环境下的性能降级是肯定的。

第6章描述了有源红外器件与元件的性能及其工作局限性。在强调价格与复杂性下，描述了电光调制器的主要性能参数与设计问题。验证了光学相关器，以光子学为基础的时间展宽 (PBTS) 模/数转换器 (ADC) 与光学监视接收机的性能要求。描述了恶劣电磁环境下 PBTS-ADC 器件在高分辨率机载雷达、天基侧视雷达与电子战系统中的应用。概述了光学相控阵天线的性能，包括多束成形、快响应时间、无倾斜天线方向图、密集的零位转向、真时延以

及宽带等。

第7章描述了红外与光子技术在商业、工业与军事系统中的应用。在强调可靠性、性能与费效比下，详细讨论了这些技术在高分辨率电视、二极管泵浦固体激光器、光学投影仪、商业印刷机、激光打标系统、光谱分析仪、高质量成像传感器、高分辨率红外相机、生化武器探测传感器、烟/火探测传感器、战场传感器以及无人运载器系统中的集成。在强调了可靠性与费效比下，描述了红外过程监视传感器、激光机场安全系统、汽车与飞机工业中的激光准直系统以及相控阵天线、通信和远程通信中的光学链路的主要性能参数。

第8章描述了红外与光子技术在医药、远程通信与空间监视中的可能应用。描述了红外与光子传感器的性能与主要参数，这些传感器中有用于生物技术图像分析的红外数字相机、光动力医疗（PDT）、非侵入性血管成形（TMR）、肿瘤切割、口腔医疗与眼科医疗、超光谱成像光谱仪等，还有环境研究用的红外传感器、空间监视系统以及应用波分复用与密集波分复用技术的光通信和远程通信设备等。本章更为详细地讨论了光子技术在DNA分析、战场以及环境研究中的应用。

第9章论及红外与光子传感器最有吸引力的深空研究与军事应用。本章描述的器件与传感器最适用于三维海洋监视、无人机（UAV）、红外对抗、战场侦察、目标捕获、红外搜索与跟踪以及恶劣杂波环境下的目标识别与辨别。适用于军事与空间的红外与光子传感器，包括天基反导弹系统、红外行扫描仪、激光测距机、高分辨率成像传感器与多光谱传感器。选择了广泛用于空间与军事的红外与光子传感器，并概述了它们的性能参数。

第10章重点介绍预测人造源红外特征的可能方法，并用计算机分析来估算复杂的飞机表面的红外辐射强度，这种辐射是表面发射率、温度与表面条件的函数。用一种MathCad程序对商用与军用飞机的光谱亮度、辐射强度与辐射能流密度作为排出气体温度与喷口面积的函数进行了计算。对飞机与导弹表面的蒙皮温度与辐射强度作为速度、表面面积与发射率的函数进行了计算。描述了预测一台喷气发动机的红外特征作为排出气体温度、推力、方位角与出射口面积函数的计算机模拟方法。提供了已计算的作为探测器瞬时视场角、光学尺寸、源强度、探测器灵敏度、给定探测概率的信噪比与虚警率以及目标雷达截面函数的短程、中程与洲际弹道导弹的探测距离。在强调了红外背景杂波剔除与虚警减弱技术下，讨论了被动与主动红外对抗方法。

第11章描述了红外与光子技术的未来应用，并讨论了对辅助电路与设备的性能要求。概述了对辅助电路与元件，如电子控制电路、电源、热电制冷器、温度控制器、低温制冷器和监视器等性能要求。描述了所选择的光学软件程序对红外系统、光子探测器与光电子元件进行建模与分析能力。证实了红

外与光子技术在自由空间的卫星内部通信、红外数据传递、工业过程控制、水下水雷探测以及医学诊断与治疗等的未来应用。概言之，本书提供的尖端的红外技术内容对设计与发展红外与光子的器件与传感器在商业、工业、军事与空间的应用是非常有用的。本书包含了丰富的背景与新颖的材料，以服务于研究生甚至注册级的光学工程师。

我要感谢 John Wiley & Sons 出版社的助理编辑 Cassie Craig、管理编辑 Andrew Prince 与 Ampersand Graphics 出版社的 Paul Schwartz，他们以极大的耐心容许我最后一分钟的补充并变成正式版本。未了，但不是最后，要感谢我的妻子 Urmila Jha 与女儿 Sarita Jha，她们鼓励我在一个时间紧迫的计划下完成了本书。最后，我想对我的妻子表达我诚挚的谢意，在本书准备中，她自始至终都极为耐心并给予支持。

中文版序言

本书译自美国 John Wiley & Sons 出版公司 2000 年出版发行的 “Infrared Technology” 一书。作者 A. R. Jha, Shobha. Singh 博士多年从事光电子技术领域的研究工作, 经验丰富, 知识广博。本书所叙述的内容包括了光电子技术中的广泛领域: 红外基础理论、红外材料、探测器和传感器, 激光材料、激光器和传感器, 光纤材料和器件及这些元器件和传感器在工业、科研、商业、通信、医药、空间和军事等诸多方面的具体应用和未来潜在的应用前景。书中描述了这些专业技术领域的概貌和最新发展。

当今我国社会正在经历一场巨大而深刻的变革, 正在由工业化社会逐步向信息化社会过渡。信息技术的蓬勃发展和广泛应用给社会带来巨大的活力, 深刻改变了人们的工作、学习和生活。在信息化的推动下, 作为信息技术核心组成部分的我国光电子技术近年来也获得了飞速发展, 正在源源不断地渗透到国民经济和人们生活的各个方面。各种新思路、新概念不断涌现, 新材料、新器件日新月异, 新技术、新产品层出不穷, 呈现一派繁荣景象。

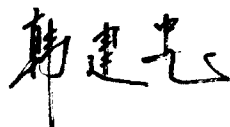
掌握和了解发达国家在这一领域的发展现状和趋势, 引进一些先进的技术思路对加速推动我国光电子技术的发展是非常必要的。但在近几年里, 较完整地叙述光电技术的专业性国外著作在国内出版物中鲜有所见, 因此本书的翻译出版对我国光电子行业来说是一件有益的事。

本书提供的内容可供我国高等院校从事光电子技术专业的教师、学生, 科学研究机构的专业技术人员, 工厂和有关公司的产品开发人员以及在光电子技术军事应用领域工作的相关人员借鉴和参考。

中国电子科技集团公司第十一研究所钟荣焕组织了本书翻译工作并审阅了全书中文稿。具体承担翻译工作的人员有: 张孝霖翻译前言, 目录, 第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 8 章; 陈世达翻译第 4 章、第 5 章、第 11 章; 舒郁文翻译第 9 章、第 10 章; 张冬燕翻译第 6 章、张莉翻译第 7 章; 王戎瑞和钟荣焕负责全书译文的校对与审阅。

本书涉及具体学科领域多，知识面极广，由于参加翻译、校对和审定人员的专业水平和外语水平的限制，译文中可能会存在一些错误和不妥之处，欢迎广大读者批评指正。

中国电子科技集团公司第十一研究所 所长

Handwritten signature in black ink, reading '韩建奇' (Han Jianqi).

2004. 5. 27

目 录

1 红外辐射理论	1
1.0 引言	1
1.1 函数、定义与单位	1
1.1.1 辐射度学	1
1.2 各种函数、定义与单位	2
1.2.1 通用的普朗克函数	6
1.3 光照度、光出射度与光亮度	6
1.4 透明度、不透明度与光学密度参数	7
1.4.1 一种参数到另一种参数的转换	8
1.5 辐射几何学	8
1.5.1 朗伯表面的通量密度与辐射分布	8
1.5.2 具有余弦辐射分布函数的辐射表面	9
1.5.3 朗伯体圆面的辐照度	9
1.5.4 光学温度与辐射温度	9
1.6 各种材料的发射率与温度、波长的关系	10
1.7 亮度温度	11
1.8 分布温度	12
1.9 色温	12
1.10 归一化色度坐标与黑体温度的关系	13
1.11 各种红外量的计算	13
1.11.1 遵从斯特芬-玻尔兹曼定律的辐射出射度	13
1.11.2 相对辐射出射度	14
1.11.3 光谱辐射出射度	14
1.11.4 单位时间单位面积单位立体角每微米的光子数	15
1.11.5 相对光子通量密度	18
1.11.6 单位 k -间隔单位体积的光子数	18
1.11.7 各种温度下特定光谱带的辐射占总辐射的百分比	19

1.11.8 光谱带亮度对比度	19
1.12 小结	20
参考文献	24
2 红外信号在大气中的传输特性	25
2.1 引言	25
2.2 用于参数计算的大气模型	26
2.2.1 散射与吸收在大气衰减中的联合效应	36
2.2.2 源于气溶胶分布的散射与吸收系数	36
2.2.3 分子分布造成的散射与吸收效应	37
2.2.4 兼有气溶胶与分子分布下的总衰减	38
2.2.5 各种大气性质对机载与空间红外传感器的影响	39
2.3 大气传输特性对高功率激光系统的影响	40
2.3.1 氟化氘 (DF) 激光的传输特性	41
2.3.2 氟化氢 (HF) 激光的传输特性	46
2.4 各大气成分的吸收与散射效应	47
2.4.1 二氧化碳 (CO ₂)	47
2.4.2 氧化氮 (N ₂ O)	47
2.4.3 一氧化碳 (CO)	48
2.4.4 甲烷 (CH ₄)	48
2.4.5 硝酸 (HNO ₃)	48
2.4.6 水蒸气 (H ₂ O)	48
2.4.7 臭氧 (O ₃)	48
2.5 在中高度与高高度工作下的主要大气参数	49
2.5.1 中高度下的大气参数	49
2.5.2 高高度下的大气参数	49
2.6 气溶胶的性质与分类	50
2.6.1 大气的气溶胶模型	51
2.6.2 最适用于各种高度范围的气溶胶模型	52
2.7 用于计算大气光学性质的模型	53
2.7.1 散射现象	53
2.7.2 大气分子散射	53
2.8 归一化粒子分布的气溶胶模型	54
2.9 均匀混合的大气气体的浓度	55
2.10 单线吸收	55
2.10.1 大气吸收的带模型	55
2.10.2 强线近似	57
2.11 计算光谱透射率的实用方法	58
2.11.1 仰角下的全程大气透射率	61

2.11.2	水平程透射率	61
2.11.3	对比度传递函数	63
2.12	武器投射的水平能见度	64
2.12.1	参数 σ_v 的修正因子与高度的关系	65
2.13	各种程长的大气透射率	66
2.14	大气散射与吸收对红外传感器性能的影响	69
2.14.1	背向散射对红外传感器影响的预测	70
2.14.2	目标背景对比度	71
2.15	小结	74
	参考文献	74
3	各种红外源	76
3.0	引言	76
3.1	红外源的分类	77
3.1.1	实验室红外源	77
3.1.2	针对特定参数标定或测量应用的红外源说明	77
3.2	商业标准红外源	79
3.3	炽热的非气体黑体源	80
3.3.1	楞斯特发光体	80
3.3.2	碳硅棒灯	80
3.3.3	气体罩	81
3.3.4	钨丝灯	81
3.3.5	碳弧灯	81
3.3.6	高压放电灯	82
3.3.7	小型弧光灯源	85
3.3.8	低压放电灯源	85
3.3.9	无电极放电灯	85
3.3.10	光谱弧光灯源	86
3.3.11	钨弧光放电灯	86
3.3.12	氢和氩弧光源	86
3.3.13	发光二极管(LED)	86
3.4	人造或人工源	88
3.4.1	飞机红外特征的估算或预测	89
3.4.2	大炮口闪光的红外辐射	91
3.5	各种红外激光源	92
3.5.1	半导体二极管激光器	92
3.5.2	使用二极管条或阵列泵浦的固体(DPSS)激光器	93
3.5.3	高功率不含铝二极管(AFD)激光器	95
3.5.4	光纤耦合激光器	95

3.5.5	垂直腔表面发射激光器 (VCSEL)	98
3.5.6	量子级联激光器	99
3.5.7	可调谐激光器	100
3.5.8	固体电子振动可调谐 (SSVT) 激光器	102
3.5.9	可调谐二极管激光器 (TDL)	102
3.5.10	远红外区的自由电子激光器 (FEL)	103
3.5.11	气体激光器	103
3.5.12	化学激光器	105
3.5.13	近衍射限光学质量输出的超高功率激光器	106
3.6	光参量振荡器	108
3.6.1	用于 OPO 的非线性光学晶体	109
3.6.2	低脉冲能量 (LPE) OPO	111
3.6.3	OPO 的主要性能参数	111
3.7	光放大器	113
3.7.1	EDFA 器件的噪声图	114
3.7.2	EDFA 的增益和功率输出	114
3.7.3	EDFA 对光纤的要求	114
3.8	小结	115
	参考文献	116
4	探测器和焦平面阵列	117
4.0	引言	117
4.1	探测器类型	117
4.1.1	时间范畴和频率范畴探测器	119
4.2	低功率、高功率和高速探测器	119
4.2.1	低功率探测器	119
4.2.2	高功率探测器	119
4.2.3	高能探测器	120
4.2.4	高速探测器	121
4.3	半导体光电池探测器	123
4.3.1	太阳聚能器设计	124
4.4	金属-半导体-金属 (MSM) 光子探测器	124
4.5	量子探测器	125
4.5.1	雪崩光子计数探测器	126
4.5.2	光电倍增管 (PMT) 探测器	126
4.5.3	像增强器	128
4.6	光探测器和准光探测器	130
4.6.1	超导热电子测辐射热计 (HEB)	130
4.7	谐振腔增强 (RCE) 探测器	130

4.7.1	RCE探测器的关键设计问题和参数	134
4.7.2	速度匹配的分布光电(VMDP)探测器的性能参数	136
4.8	焦平面阵列(FPA)探测器	136
4.8.1	引言	136
4.8.2	非制冷焦平面阵列(FPA)	138
4.8.3	双波段成像系统	139
4.8.4	潜在的探测器材料和信号处理要求	139
4.9	FPA读出器件和要求	141
4.9.1	CCD探测器读出器件	142
4.9.2	CMOS探测器读出器件	142
4.10	读出集成电路(ROIC)工艺	143
4.11	空间应用的FPA设计要求	144
4.12	小结	145
	参考文献	147
5	红外无源器件和电光元件	148
5.0	引言	148
5.1	光纤、光学材料及其性质	148
5.1.1	光纤中的插入损耗	149
5.1.2	光纤中的模色散和材料色散	152
5.2	与折射率有关的光纤参数	152
5.2.1	临界角	152
5.2.2	数值孔径	152
5.2.3	总模数	153
5.2.4	材料色散	153
5.3	光纤的结构与组成	153
5.3.1	最佳的光纤耦合形状	154
5.3.2	侧面抛光的光纤(SPOF)	155
5.3.3	高功率纤维光学光缆(HPFO)	156
5.4	红外窗与整流罩的工艺和材料	156
5.5	光学晶体	158
5.5.1	无机非线性光学晶体(NOC)	161
5.5.2	二次谐波发生器(SHG)的效率	161
5.6	小型的光学透镜或微透镜	163
5.7	光学谐振腔与支撑结构	163
5.7.1	支撑结构和光学谐振腔的材料要求	163
5.7.2	谐振腔的性能要求	164
5.8	激光指示器	164
5.9	用液晶显示器(LCD)和发光二极管(LED)技术的光学显示器	164