

光学 材料的

激光诱导损伤

LASER-INDUCED DAMAGE OF OPTICAL MATERIALS

Roger M Wood 著

崔旭东 译

张保汉 郑万国 审

译
审



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

LASER-INDUCED DAMAGE OF OPTICAL MATERIALS

光学材料的激光诱导损伤

Roger M Wood 著
崔旭东 译
张保汉 郑万国 审

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

Laser-Induced Damage of Optical Materials 1st Edition / by Roger M Wood / ISBN: 0-7503-0845-1

Copyright@ 2003 by IOP Publishing Ltd.

Authorized translation from English language edition published by IOP Publishing Ltd, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved. 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下 IOP 出版公司出版, 并经其授权翻译出版。版权所有, 侵权必究。

Southwest Jiaotong University Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. 本书中文简体翻译版授权由西南交通大学出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

图进字 21-2011-30 号

图书在版编目 (C I P) 数据

光学材料的激光诱导损伤 / (英) 伍德 (Wood, R. M.) 著; 崔旭东译. —成都: 西南交通大学出版社, 2011.4

ISBN 978-7-5643-1120-9

I. ①光… II. ①伍…②崔… III. ①光学材料—激光聚变 IV. ①TB34②0571.44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 039241 号

光学材料的激光诱导损伤

(英) Roger M Wood 著
崔旭东 译

*

责任编辑 牛 君

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蜀通印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 13.5

字数: 272 千字

2011 年 4 月第 1 版 2011 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-1120-9

定价: 39.50 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

中译本序

自激光发明并得到广泛应用以来，激光在光学材料及其他介质中诱导的损伤问题研究日益引起人们的重视。其研究涉及物理、化学、材料、光学、数学等诸多学科的知识和方法，是国际上备受关注的多学科交叉性前沿领域之一。近 20 年来，随着高能激光科学技术与工程的发展，激光诱导损伤研究更体现出其重要的学术意义和应用价值。

本书系统论述了光学材料中的激光诱导损伤研究的知识基础、材料特性、损伤理论与模型、测量表征等方面的内容，全面回顾了过去 30 多年来的国际研究进展，总结了许多技术和方法、规律、数据、标准等研究成果的适用性，是一本知识体系完备、概念清晰、内容丰富、结构严谨的专著。全书注重研究性与知识性、基础性与实用性的结合，深入浅出的描述方式不仅对大学本科生和研究生的学习非常有益，也对从事此方面研究的科技人员具有重要的参考价值。

作者 Roger M Wood 博士长期从事光学材料的激光诱导损伤研究，积累了丰富的研究经验。他多次在 SPIE 会议上讲授有关损伤的课程，是部分激光诱导损伤国际标准的参与者和制定者。中文版译者崔旭东博士与 Roger M Wood 博士多年来一直保持着良好关系，多次组织和邀请 Roger M Wood 博士讲授有关光学材料研究前沿的课程。

作为在激光领域工作的学者，在近年来的工作中已强烈地意识到加强我们在强激光损伤领域研究的迫切性。相信该书中译本的出版将帮助感兴趣的读者以及科研人员对此领域有系统的了解并获得启迪，促进国内该领域研究工作的进步。

值此中译本出版之际，很高兴向大家推荐此书。

张保汉

2011 年 2 月于中物院激光聚变研究中心

前 言

当写作前面一本书《光学材料中的激光损伤》(Adam Hilger 1986)时,我表达了我的担忧:当我们对所知甚少的领域了解得越来越多的时候,许多事实证据被埋在大量的文书工作之下,通过艰苦工作得来的教训也被遗忘。生活在世纪之交,我发现这种现象不但是千真万确的,而且许多在高功率激光领域工作的研究人员目前已经退休或者从事了其他工作。因此,在高功率激光领域工作的新一代科研人员不得不重复我们早期的、多年前的工作。据我回忆,在年度的 **Boulder Damage Symposia** 上,激光玻璃中的激光诱导损伤专题至少三次被人提到了台面上。这就有了后来我在英国的物理研究所以及美国的 **SPiE** 会议上针对这个专题专门讲授的课程。同样我也代表英国标准研究所亲历了与 **ISO** 协商激光测量标准化有关的会议。

在撰写本书时,我尝试着通过增加更复杂、更严格的数学处理理论与支撑数据来对我前面出版的书籍进行更新。本书也扩展了在先前书中已经涵盖的如材料、元件和系统的功率/能量处理能力的领域。在此过程中,我也尝试着展示有关高功率相互作用的专题知识如何能够使我们获益。

当低强度的光通过一块透明基片,或落在一个反射表面上,或者少许光穿过吸收介质时,仅有少许或者根本就观察不到外来效应。当光束的强度增加时,部分可逆互作用开始变得明显,包括吸收、温度升高导致的变形、非线性吸收/透射以及反射。这些效应也包括电-光效应,二、三次谐波产生,参量振荡和自聚焦。这些效应中有许多在光学工程中已得到了很好的应用(如新波长的产生、光学限制等)。当光强进一步增加时,这些效应将让步给材料或元件中的不可逆变化:破裂、蚀损、熔化、蒸发以及强烈粉碎。从事激光加工技术(如钻孔、焊接、切割-加工材料和激光外科手术)、激光腔设计技术以及材料研究(如光谱学等)的研究人员有必要具备这些知识。

我是在和这个领域的许多同仁交流的情况下才完成了早期发表的书籍,并编辑了关于光学材料激光损伤的 **SPiE Milestone** 书籍。首先要感谢在 **Wembley, GEC**

Hirst 研究中心与我共事 30 多年的同事们，尤其感谢 Boulder Damage 年会组织者的鼓励，特别感谢他们坚持不懈地组织这个系列的研讨会；同时感谢参与撰写本书中后来讨论的测量标准 ISO/TC 172 的同事们；也感谢本书中采用他们数据的所有研究人员，是他们使本书的数据增色不少，尤其是那些我还未进行测量的波长、脉冲长度以及功率水平段的研究数据，所有这些数据——即使是有问题的或者完全错误的——让我可以检查和核实书中的参数，以便对这些参数中较大的差别进行修正。

Roger M Wood

目 录

1	引 言	1
2	低功率/能量水平下的光学效应	6
2.1	引 言	6
2.2	电磁理论	6
2.3	色 散	7
2.4	反射率和透射率	12
2.5	导电表面的反射和吸收	17
2.6	分子极化率	20
2.7	吸 收	20
2.8	散 射	23
2.9	R, T, A, S 测量的分析	27
3	中等功率/能量下的光学效应	35
3.1	引 言	35
3.2	吸 收	35
3.3	拉曼散射	37
3.4	布里渊散射	40
3.5	谐波产生	41
3.6	自聚焦	41
4	损伤理论	46
4.1	引 言	46
4.2	热机制	52
4.3	电介质过程	71
4.4	测试规则	77
4.5	损伤时间	79
4.6	损伤形貌	82

5 表面和亚表面	92
5.1 引 言	92
5.2 表 面	93
5.3 亚表面	109
6 镀膜/涂层	115
6.1 引 言	115
6.2 镀膜/涂层技术.....	117
6.3 涂层表面的测量和形貌.....	120
6.4 涂层设计	121
6.5 电介质涂层损伤	128
7 专 题	131
7.1 环境大气/气体.....	131
7.2 液 体	134
7.3 光电探测器	136
7.4 光纤光学	138
7.5 标度律	141
7.6 测量单位的重要性.....	145
8 测量技术	147
8.1 引 言	147
8.2 功率、功率密度、能量和能量密度的测量	148
8.3 激光诱导损伤阈值.....	159
8.4 光学特性的测量	163
8.5 表面测量和指标	173
8.6 其他光学参数的测量.....	176
附 录	178
参考文献	194
索 引	204
后 记	208

1 引言

当一束低强度光穿过透明基底或入射到反射镜上或穿过吸收介质时，我们可能几乎观察不到任何效应。然而，当光束强度增大时，大范围的可逆相互作用可能变得明显。这些效应包括温度升高、膨胀、变形、应变、非线性透射和吸收、电光效应、二次谐波产生、光学参量振荡和自聚焦等。当光束强度进一步增大，上述这些现象就转变为材料或元件的不可逆变化。不可逆变化包括表面和块体的退火、表面熔化、材料软化和弯曲、破裂、凹陷、块体熔化、汽化以及粉碎。尽管发生这些效应需要的光束强度（或者说平均能量或峰值能量或功率密度）足够高，但激光器的出现使得发生这些现象相当平常。在本书的余下部分，我们将假设辐射源为激光光源，由于激光光束通常是单色的，而且具有精确的时间和空间特征，所以计算这些效应的大小变得很容易。

在设计和使用激光时主要的局限（尤其是小型化）在于，激光腔体中产生的高能激光通量能够改变内部光学元件的光学性能。从对那些无支撑光学元件的测量结果来看，单个光学元件光学性能的改变，可能是由任意一个前述因素引起的。这些效应可能是单个的，也可能是累积的。它们可能会限制系统的传输，降低系统性能或者导致激光诱导损伤。

器件性能的改变有可能是由于下列因素引起的：

(1) 热诱导的疲劳以及光学元件的变形。由于热透镜化、熔化，尤其是电介质膜/涂层的熔化导致透射光束束发散的改变。

(2) 光学材料中吸收瑕疵斑点（如激光玻璃中的 Pt 斑点）的激光诱导损伤，光学元件中的自聚焦，由于不牢固的涂层、被污染的表面和涂层或者是在涂层和表面上的划痕或沟槽等引起的光学元件表面激光诱导损伤。

在整个激光波长范围和脉冲持续时间内这些问题都可能涉及，比如下述问题都是众所周知的：

◆ 二极管激光器——大多数二极管激光器存在发散随着输入功率变化的情况，由于内部缺陷以及杂质离子漂移引起的光学元件内表面损伤，导致激光输出特性下降。

◆ 低功率 He/Ne 激光器——这种激光器存在输出功率随时间延长逐渐减小

的情况，这是由于镜面上污染物积累从而导致窗口特性随着时间而变化。

◆ 中/高功率 Nd: YAG 激光器——双折射效应影响激光谐振腔和系统的设计。激光器的寿命和输出通常受减反涂层（增透层）和高反涂层损伤的限制。输出光束发散度通常随着输入功率和非线性输入/输出特性而变化。

◆ 光学复杂的 SHG（二次谐波产生）和染料激光系统——反射以及多光束影响这些系统的设计。

◆ 高功率脉冲和连续波（CW）CO₂ 激光器——镜面的熔化、污染以及降质、变形/双折射以及随着输入功率变化的束发散都可能受设计、建造和系统指标所影响。

◆ 超高功率、短脉冲激光器——多光子离化和自聚焦限制了单位脉冲能量。

我们知道，在激光系统中，最高的激光功率/能量出现在激光振荡器和放大器内（直到将输出功率聚焦到工件或靶上），因此，在将一个激光系统集成到最小尺寸之前，很有必要了解制作谐振腔的光学材料以及单个激光器的激光诱导损伤阈值的知识，同时也很有必要确保在激光束到达靶之前不会出现空气击穿的辐射水平。为获取这样的知识，需要可靠地测量与激光谐振腔和后续光学系统有关的光学材料的功率和能量处理能力。只有这些问题都得到解决之后，抗损伤激光/光学系统的设计才能够最后确定下来。

与激光器系统设计和部署相关的最重要方面是组成光学系统的光学元件的指标。我们希望该专题能够使装校配置和系统总体设计对单个光学元件指标影响的问题变得清晰，另外需要清楚的是，只有系统设计者明白为什么要对激光器指标设置特定限制，他们才有可能发现整个激光系统运行中的不一致现象。系统按照设计可能工作得很好，但是，正如所有高功率激光系统都会发生的，当出现激光诱导损伤或者甚至简单的输出降低问题时，操作员在获取达到原来设计指标的元件方面可能会有困难。由原始激光器制造商替换光学元件可能会使其达到名义上的指标，但是特征会下降，甚至导致激光诱导损伤的发生。这可能是由于不完全的指标或者在许多情况下我们看到的那样，有可能是元件制造商照着激光器制造商提供的指标做到很高公差的结果。这样的一个例子曾经发生在 10.6 μm CO₂ 连续波激光器的一个聚焦透镜提供商身上。原来的激光器工作得很好，但是在一年之后输出有所降低，最后决定重新整修激光器系统，当拆解完后备发现末端的聚焦透镜已经损坏，其透射性能已降低。他从一家著名元件制造商那里订购了一个替换透镜，传递过来并安装到系统当中。尽管对传输到工件上的能量密度大小仍存疑问，但传输到工件上的激光功率立刻恢复到接近原有水平，不过透镜只工作了短暂的时间后就破裂了。经过多次讨论和调研之后发现，如果元件提供商按照规格中的最小透镜直径（与自然倾向最大的想法相反）来制作透镜，透镜能够很好地工作，获得总的输出功率和最初设计的聚焦功率密度。随后的调研表明，元件装配过紧引起透镜及透镜支架局部膨胀，从而使得透镜出现应力和变形，这

直接导致透镜聚焦特性的降低(较大的聚焦光斑尺寸),稍微高的输入能量和所产生的元件应力将导致灾难性的损伤。

谐振腔中光学元件的热诱导变形可以使元件的光学性能降低。这个主题是系统设计者面临的主要问题之一,该问题由两个孪生效应组成,即窗口或透镜光学指标的变化和双折射及额外束发散的介入。为了构建更加紧凑的激光系统,必须提高光学材料功率处理能力,其必要性在于:

(1) 在军事上,装备部署往往严格依赖其适应有限空间的能力及输入功率需求。

(2) 在工业和医学领域,大型系统往往很笨重,一旦停工将是一个很严重的问题。

(3) 在极端情况下,如激光诱导聚变,需要产生非常高的功率,而且系统成本巨大,因而必须做例行检查,以便鉴别出能够处理与高峰值功率与能量有关的光学元件。

激光系统的输出特性受整个系统设计的影响,这就意味着时间和空间输出特性不仅是基本谐振腔设计的函数,而且是系统温度和输入功率水平的函数。这使得或者总是使用一个固定输入功率水平的激光系统,或者为了与应用相适应而对激光输出进行调配。为确保在其特定应用中激光器的最佳效果,任何改变激光输出的效应都很重要,这些效应包括吸收、变形和激光诱导损伤。经验表明,绝大部分激光器至少受到一种效应的影响。如果延长它们的运行周期,必须采取措施使这三种效应最小化。激光束的非均匀吸收和随之发生的非线性或元件或元件支架的局部膨胀导致波前畸变,产生无关模式,以及改变束发散、应力裂缝等。即使在低输出功率水平运行,激光谐振腔也会导致镜面和窗口污损、谐振条件改变、激光出光终止或者光学元件灾难性损伤。在高输出功率水平运行,激光器能够导致直接的单发损伤。在一个超长的周期或高重复频率运行,激光器能够导致累积的或与脉冲重复频率相关的激光诱导损伤。

撰写本书的目的在于帮助工程人员、经理等人了解在功率/能量与激光系统特性之间没有达成某种折中之前,不能期望产生越来越高的功率和能量。第一个激光系统很笨重且输出功率相当低。这些系统的尺寸和较低的输出特性约束了其在许多工业和军事方面的应用。这些激光器的限制给系统制造商施加了增加效率和减小系统尺寸的压力。多年研发已有一系列波长、功率和能量的激光器,现已有产生足够功率和能量的小型激光器系统来满足一定范围的应用,包括激光诱导聚变、切割、焊接和工程材料钻孔、医学、通讯以及军事应用(见第8章对这些应用的总结)。然而,对激光器研发进行的工程努力的空前成功导致在很多情况下一系列“黑盒子”的出现,并且值得注意的是,现在出现了新一代激光工程师,称为“who knew not Joseph”(The Bible, Exodus 1 v 8)。目前研发激光系统的工程师不得不克服这些瓶颈或者与高能激光系统的这些固有约束打交道。在很多情况

下,目前这一代人接受着工程带来的益处,却并没有理解为什么细节会这么重要。目前存在两类激光工程师,一类是了解激光系统的,另一类是使用这些系统的。本书希望能为这两类工程人员牵线搭桥。

据说人的历史开始于父亲和母亲。相似地,在光学材料中的激光诱导损伤机制和形态可以追溯到这些材料的电子和物理参数。因此本书考虑从光学和激光材料的几何和物理特性开始,包括波长相关吸收的起源和许多其他导致材料中光和热特性改变的光吸收来源。

第 3 章讨论发生在低于激光诱导损伤阈值时中等功率水平的光学非线性机制。非线性效应并不一定直接导致激光诱导损伤,然而可能会导致吸收增加和局部温度升高。如果入射功率/能量足够高,所有材料都会呈现出某种程度的吸收,并且将熔化。发生这种情况的阈值与脉冲长度和波长有关,并且与材料、激光焦斑尺寸和环境温度有关。与此有关的材料参数将会是激光波长吸收、比热、传导率以及熔化温度。如果激光脉冲很强但是持续时间短,则将发生雪崩离化以及/或多光子吸收。这些只是在短脉冲高功率条件下感受到的效应,实际上可能在比熔化所需的辐射更低水平下发生。然而,这只有在低吸收、高度透明的光学材料中才能观察得到。

第 4 章描述激光诱导损伤发生的过程以及推导能够用于计算材料的激光诱导损伤阈值(LIDT)的表达式。

第 5 章继续阐述在理论值以下使这个 LIDT 值降低的材料光学质量参数,这些参数包括块体、亚表面以及表面质量。本章涉及已经研发的用于降低这种损伤的方法和技术。

第 6 章着重强调电介质涂层在增强激光系统的透射性能方面的贡献,包括在最小化激光诱导损伤方面电介质涂层作用的评论。

第 7 章涵盖了一系列重要的主题,如气体和液体的激光诱导损伤阈值、光纤的能量处理能力、测量单位的意义以及缩比定律。

第 8 章涉及测量相关材料特性的技术以及在过去 10 多年所研发的不同国际标准。

最后一系列的附录列出了过去 30 多年来制作的一系列波长和脉冲长度范围内光学材料的激光诱导损伤阈值范围。我们希望这将对那些需要了解所使用的光学材料、元件或系统能够承受多大功率/能量的人们有用。他们也应该明白对许多材料而言,理论预测与测量得到的性能仍然存在巨大的差异。希望到时候读者通过阅读附录能理解这些差别的原因。

在这本书先前的版本中,我提到有许多海量的与激光诱导损伤相关的研究论文和会议报告。这些论文和报告,尽管其内容非常有价值,但由于其海量数据而未被注意。在很多情况下,过去的教训并没有被人们吸取,因为需要花费写一篇博士后论文的时间来总结的细节太多。与此同时,对这个主题的理解也越来越

多，我较早前的关于这个主题的书现在已慢慢过时而且也不完整。众多关于这个主题的文献可在主流科学出版物上找到，特别值得一提的是 *Proceeding of the Annual Boulder Damage Symposia*。最初几年的会议文集出版为 *NBS Special Publications* 以及不久前出版的 *SPIE Proceeding* 报告，也可以通过选择 *SPIE Milestone* 系列关于光学材料激光诱导损伤的文选来接近这个主题 (Wood 1990)。然而，尽管意志坚定的学生会发现这些出版物很珍贵，但是我认为撰写这样一本书作为过去工作的总结以及指引那些对这些关键文献感兴趣而不会让他们陷入这个主题里的细枝末节是很有意义的。

我真诚地向早年在 GEC Hirst Research Centre, Wembley, UK 与我富有成效地合作超过 30 年的同事们表示谢意，感谢 UK 国防部对该项目的支持，以及我的国际同事，尤其是 *Boulder Damage Symposia* 的组织者，以及最近参与针对激光和激光相关测量国际标准规划的 ISO TC 172 的同事们。我必须特别感谢那些我引用 (希望已经充分致谢了) 他们的结果来阐明和扩展我自己的测量结果的作者们。

2 低功率/能量水平下的 光学效应

2.1 引言

在第 1 章中提到，确定材料光学性质以及材料激光诱导损伤极化率的物理和化学参数可以追溯到材料的电子和物理结构。本章的目标是弄清材料光学特性的本质，以便为最重要的非线性效应辐射阈值以及随之而发生的不可逆效应的计算打下基础。本书的大多数读者将会发现本章节稍微与这个主题无关，可以直接阅读与激光诱导损伤机制有关的章节。然而，基于完整性考虑，我们在本章中安排了与材料的光学和激光特性有关的基本物理内容。希望读者随后将明白包含本章的原因并意识到其有用之处。

2.2 电磁理论

所有电磁现象均受 Maxwell 方程组支配。我们不打算推导这些方程组但是下面的一系列方程可以从最基本的方程推导出来 (Jenkins and White 1957, Ditchburn 1958, Born and Wolf 1975, Ghatak and Thyagarajan 1989, Olver 1992)。采用光是电磁波的基本表述，即电磁波与电场 E 以及磁场 H 的横向振动相关联。这些场服从能量守恒定律，因此允许我们预测和量化光与块材料以及材料之间的界面的相互作用。光在介质中的速度 v 与光在真空中的速度 c ，通过介质的折射率 n 联系起来

$$c = vn \quad (2.1)$$

该关系进一步通过块体介电常数 K_e ，磁介常数 K_m 与介电常数 ϵ ，磁导率 μ 以及介质的电导率 σ 相关联，如：

$$c = (\mu_0 \epsilon_0)^{-1/2}, \quad v = (\mu \epsilon)^{-1/2} \quad (2.2)$$

式中: $K_e = \epsilon / \epsilon_0$, $K_m = \mu / \mu_0$, $p^2 = K_m K_e$, p 为复折射系数且 $p = n + ik$ 。

介质的波阻抗 μ/ϵ (z^2), 为介质的一个常数, 与振荡电场 E , 磁场 H , 通过方程 (2.3) 关联起来

$$E_x/H_y = z_0 \quad (2.3)$$

以及

$$E_x H_x + E_y H_y = 0, \quad E_z H_z = 0 \quad (2.4)$$

电场分量和磁场分量解的形式为

$$E_x = A e^{i\omega(t + pz/c)} \quad (2.5)$$

式中: A 为常数。将 z 带入方程有

$$E_x \approx e^{i\omega(t - nz/c)} e^{-kz/c} \quad (2.6)$$

该方程的第一项是一个正弦波, 第二项为指数衰减项。通过进一步的替代我们发现

$$p^2 = \mu \epsilon c^2 - (\mu \sigma c^2 / \omega) = K_m K_e - I(K_m \sigma / \omega \epsilon_0) = n^2 - 2nik \quad (2.7)$$

介质的复波阻抗 z_0 可以分为电阻和电抗两个分量:

$$z_0 = \frac{E_x}{H_y} = \frac{\mu c}{p} = \frac{\mu c(n + ik)}{n^2 + k^2} = \frac{\mu c n}{n^2 + k^2} + \frac{i \mu c k}{n^2 + k^2} \quad (2.8)$$

E_x 和 H_y 之间的相位角为 $\tan \theta = k/n$ 。

对所有的绝缘体 $K_m = \mu / \mu_0 \approx 1$, 因此介电常数 $K_e \approx n^2$ 。介电常数随频率变化而变化并导致电磁波的色散。对于电介质, $\sigma = 0$, 因此 $k = 0$, $n^2 = K_m K_e$ 。对于金属, $\sigma \gg 1$, $n^2 \approx 1/2 K_m \cdot K_e \sigma / \epsilon \omega \approx k^2$ 。

2.3 色散

被原子核束缚的电子在环绕原子核的轨道上以一定的频率运行, 该频率取决于原子的电子结构。当一个外加的电磁波入射到这个原子或分子上时, 波的周期电场力使得束缚电荷以与电磁波相同的频率振荡。这种与外加电场力相关的运动的相位取决于外加频率, 并随着束缚电荷的本征频率与外加电场频率之间的差值而变化。当一束光横穿介质时, 从侧面被散射的光的量很小, 因为被散射的子波

的相位实际上是完全干涉相消的。另一方面，沿着相同方向传播的次级波和原始光束一样并没有抵消，但是被合并形成一系列沿着与原始波束平行方向移动的波。次级波的振幅必须与初级波的振幅相加，叠加后的振幅将取决于这两列波的相位差，从而改变初级波的相位，相当于其波速变化。由于波速是等相面的传播速度，可以推断，一个相位的改变将改变光透过介质的速度。由于单个波的相位振荡，因此次级波的相位取决于外加频率，通过介质辐射的速度将随着探测光频率的变化而变化。

假设一种材料介质包含由弹性力束缚的粒子，则它们被约束并以一个特定的、明确的频率 ν_0 振动，于是有可能假定色散曲线（折射率随着频率改变）的形状。通过介质的光波对粒子施加一个周期力使它们振动。如果辐射频率 ν 与 ν_0 不相同，则该振动只是被迫振动因而振幅很小。当辐射频率接近 ν_0 时粒子的响应将增大，大振幅的振动将发生在 $\nu = \nu_0$ 时。由 Sellmeier 得到的一个有关折射率 n ，波长 λ 相关联的方程为

$$n^2 = \frac{1 + A\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2} \quad (2.9)$$

在这个表达式中，常数 A 为材料参数，正比于能够在频率 ν_0 时振动的振子的数目， λ_0 与粒子的本征频率有关， $\nu_0 \lambda_0 = c$ ， c 为光的速度。

当然，也有可能介质中包含许多种不同的粒子，所有的粒子都具有各自的本征频率。Cauchy 推导出了下述一种合成介质的折射率方程：

$$N = P + \frac{Q}{\lambda^2} + \frac{R}{\lambda^4} + \dots \quad (2.10)$$

式中： P ， Q ， R 为材料常数。

尽管 Sellmeier 方程非常成功地描述了介质透射区域的色散曲线，但是在具有显著吸收的波长段并不那么成功。Sellmeier 曲线与实验测定的曲线之间的差别表明有必要考虑能量吸收机制。Helmholtz 完成了这项工作，他假设能量的吸收以及振动的摩擦阻力同时存在。与此同时，我们应该记住一种典型材料包含大量不同的分子，每种分子都有其本征频率。因此每种分子在波长 λ_i 处都有其吸收 a_i ，我们定义一个吸收常数 k_0 ， $k_0 = a_i \lambda_i / 4\pi$ ，以及摩擦力 g_i ：

$$n^2 - k_0^2 = 1 + \sum_i \frac{a_i \lambda^2}{(\lambda^2 - \lambda_i^2) + g_i \lambda^2 / (\lambda^2 - \lambda_i^2)} \quad (2.11)$$

$$2nk_0 = \sum_i \frac{a_i / g_i \lambda^3}{(\lambda^2 - \lambda_i^2)^2 + g_i \lambda^2} \quad (2.12)$$

尽管对每种不同的材料，折射率与波长的关系曲线不同，但所有光学透明介

质的曲线具有共同的特征。如图 2.1 所示为波长从 0 到几千米时一种假设物质的折射率的变化关系，在 $\lambda=0$ 时， $n=1$ 。

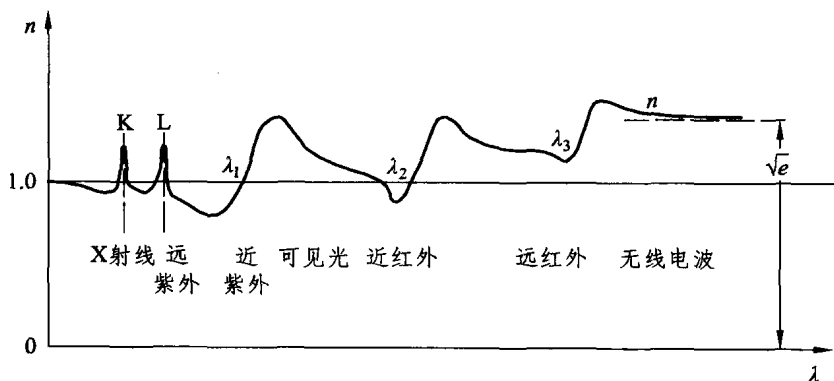


图 2.1 折射率随波长的变化

对于短波长 (γ 以及硬 X 射线), $n < 1$ 。在 X 射线区域, 特定波长的吸收取决于材料中最重元素的原子量, 折射率急剧增大然后下降 (元素的 K 吸收极限)。在较长的波长处存在其他不连续性的吸收, 如 L, M 吸收等, 以及存在于材料中的其他元素的 K, L, M 吸收极限。这些吸收可归咎于原子中的最里层电子 (K, L, M, ... 电子层), 这些电子的能量随着与原子核距离的增加而降低。这些吸收不连续性很锐利, 因为这些电子在原子深处, 它们不易受碰撞效应及相邻原子电场的影响。

折射率在整个软 X 射线区域继续下降, 直到其达到在紫外 λ_1 内一个宽的吸收区域。这是由于光与原子的外层电子以及组成材料的分子相互作用的结果。由于外层电子并未被屏蔽, 相应的吸收带很宽。对分子气体来说, 吸收带由锐利的、集体不确定的单个转动谱带所组成。在吸收峰之后, 折射率再次下降 (但是现在 $n > 1$)。紫外吸收峰越靠近可见光区域, 在这个区域色散越大 ($dn/d\lambda$)。

在近红外波段, 折射率又开始急剧下降, 直到其达到中心波长为 λ_2 的吸收波段。该波段与材料中最轻的原子的本征频率有关。由于核比电子重, 其振动频率比与电子相关的振动频率要低。在这个波段之外通常存在其他的甚至与更重分子有关的因素, 每次当光穿过这些波段时折射率增加, 因此, 在近红外区域折射率比可见光区域要高。在所有红外吸收波段之上的波长范围, 折射率缓慢下降直到到达一个长波长的极限值, 该折射率极值为 $\sqrt{\epsilon}$, 为普通介质的介电常数。

图 2.2 所示为透射谱与探测波长的函数关系。有可能采用下述论据来计算吸收边的位置。在短波长一侧, 透射受限于电子激发而在长波长一侧则受限于原子振动和旋转。透射谱范围的宽度随着电子激发能量的增加而增加, 而随着原子振动能量的增加而减小 (如较重的原子)。