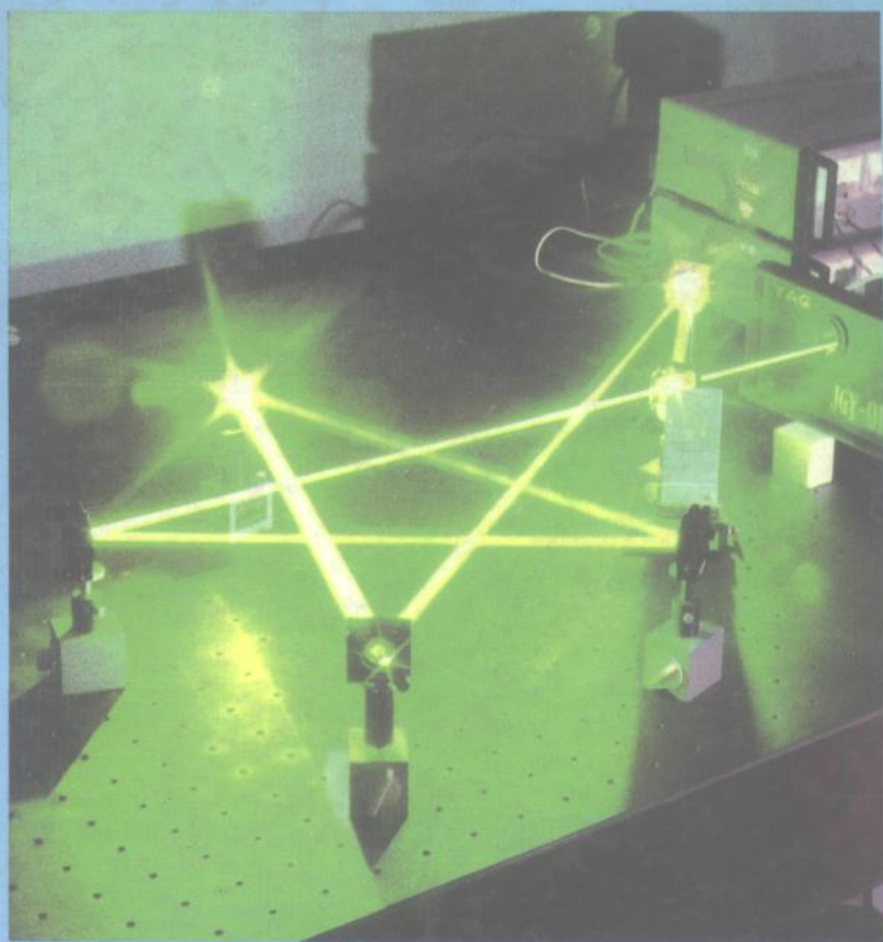


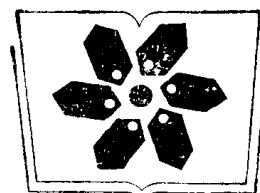
姚建铨 著

非线性光学频率变换 及激光调谐技术



科学出版社

73.771
430



中国科学院科学出版基金资助出版

非线性光学频率变换 及激光调谐技术

姚建铨 著

科学出版社

1995

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书是关于非线性光学频率变换及激光调谐技术的专著。全书共分十章,分别论述了非线性光学晶体中三波互作用的理论及计算、非线性光学混频理论、倍频激光器理论及有关技术、超短脉冲的混频、光学参量振荡器、染料可调谐激光器、染料激光调谐技术、固体可调谐激光器、掺钛蓝宝石激光调谐技术及其它激光调谐技术。

本书既有国外最新成就的介绍及理论分析,又有近十年来作者在理论及技术研究中的成果总结。本书可供激光技术的研究人员、工程技术人员阅读,也可供大专院校激光专业的师生参考。

0035/25 03

非线性光学频率变换 及激光调谐技术

姚建铨 著

责任编辑 马长芳

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1995 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

1995 年 3 月第一次印刷 印张:26 1/2 插页:2

印数:1—1400 字数:600 000

ISBN 7-03-004291-3/TN·162

定价: 37.00 元

序

自从激光问世以来,非线性光学频率变换及可调谐激光技术就一直是这一领域的研究热点之一,因为它不仅具有重要的学术意义,而且具有重要的应用价值。近年来,这一领域有了不少重要的突破,其主要表现是一批新型优质非线性光学和激光晶体的发明,以及使用这些晶体的非线性光学频率变换及可调谐激光技术的飞速发展。光学参量振荡器、掺钛蓝宝石可调谐激光器,以及各种倍频激光器的产品化和广泛应用被认为是具有代表性的例子。可以肯定地说,这些产品和技术的进一步发展,将对国民经济和国防建设产生重要的推动作用。同时也应当看到,非线性光学和激光调谐技术的实际应用潜力还远未被充分和完美地发掘出来,还有许多理论问题,特别是工程技术和工艺问题有待创造性地予以解决。而解决这些工程实际问题所需要付出的劳动和代价往往是十倍乃至百倍于完成一个原理性实验。

天津大学姚建铨教授和他领导的研究集体长期致力于这一领域的研究,在理论和实践上都很有建树,取得了许多有创造性的、高水平的重要成果。在此基础上,姚建铨教授又系统地总结了当代非线性光学频率变换及可调谐激光技术的研究成果,写出了这本理论与实践并茂的专著,确实是一件很有意义的事。这本书的鲜明特点是,理论与实践结合,取材新颖,实用性强。特别值得称道的是,这本书包含了作者近十年来在这一领域内研究成果的总结和升华,是我国这一领域内自己撰写的一本很有特色的科技专著。

相信本书的出版将会有力地促进我国激光技术在国民经济和国防建设中发挥更大的作用。

周炳琨

1994年6月于清华大学

审校者的话

《非线性光学频率变换及激光调谐技术》一书是一部理论与实验紧密结合的力作。作者在激光技术领域，特别是在固体激光及其光频变换与可调谐技术方面做了大量出色的实验工作，取得诸多具有国际先进水平的研究成果，并且还撰写出大量高水平的学术论文。现在在此基础上，作者又精心整理并归纳综合，顺理成章撰著成书，这无疑是一次有意义的举措，它将为促进激光技术的发展做出新贡献。

我有幸仔细拜读并审校了全文初稿，认为该书有如下特色：

(1) 理论与实践密切结合是该书的重要特点。全书共十章，几乎全部都是作者及其领导的课题组研究工作的升华。因此，从理论分析到设计实施，从实验方法到实验现象的诠释都给人以充实感和贴切感，特别是对该领域从事教学科研的师生和工程技术人员具有很大的吸引力，引人入胜。因此，该书有明显的实用性。

近年来，国内外有关激光技术方面的书籍日益增多，但侧重于理论方面的偏多，实验方面的内容则显得匮乏。有一些侧重于实验方面的专著，因缺少理论上的有力支撑，而又显得无说服力。因此，相对而言，《非线性光学频率变换及激光调谐技术》一书则更具新颖性和完善性，称其为力作确实是言辞由衷的。

(2) 内容新，具有先进性和创造性，这是该书的又一特色。该书所及内容大部分为激光技术领域中的热点或最新发展点，它在很大程度上反映了该领域的最新进展和新动向。书中给出的研究方法、实验方案、理论分析、实验数据都具新颖性，如超短光脉冲的混频、OPO 的新进展、染料激光的新技术、色心激光技术、掺钛蓝宝石激光技术等，其中不少工作是作者及其研究组完成的。这些内容目前只能在一些学术刊物上零零散散地分别查阅到，还没有一部书，即使是最新出版的，能全面系统地反映这些内容。现在好了，经作者深思熟虑，认真归纳综合，顺理成章，将这方面内容撰著成书，为激光技术的发展又做出了新的奉献。

(3) 该书全文条理清楚，层次分明，逻辑结构合理。从内容上看，此书涉及面相当广泛，且又有相当的深度，但阐述的条理非常清楚，前三章是本书的理论基础，后七章则为专门技术，但正如上所述，这里仍有理论与实践的密切结合，只是各有不同侧重而已。

还可以列举出此书的诸多优点。

鉴于上述，我力推此书，希望她能得到出版界的支持，尽快出版面世，以便为促进我国的激光技术作出新贡献！

董孝义 (南开大学教授、博士生导师)

1994. 5

前 言

非线性光学频率变换及激光调谐技术是激光及非线性光学领域内的两个重要分支,其目的都是得到各种波长的相干辐射,以适应各种应用的需要。在非线性光学频率变换领域内,近年来有了重大突破,一方面反映在一些新型非线性光学及激光晶体的成熟及其大量应用,如 KTP 及 KN 晶体的非线性系数很大,而 BBO, LBO, LAP 等可使频率变换的波段延伸到深紫外;另一方面反映在使用这些新型晶体的频率变换技术及固体可调谐激光技术得到飞速发展,如利用 KTP 晶体的内腔倍频 YAG 激光器,其倍频输出可达几十瓦,脉冲 YAG 激光倍频的效率可达 70—80%,利用 LBO 锁模 YAG 激光倍频输出功率可超过 5W,使用 KTP, BBO 及 LBO 的光学参量振荡器调谐范围由可见光到 4.5 μm ,并实现单纵模运转。在这些新型非线性晶体中,除 BBO 外均为双轴晶体,因此便出现了发展及完善双轴晶体的最佳相位匹配理论与参数计算,以及高转换效率下非线性混频理论的迫切需要。

本书前五章论述了非线性光学频率变换,后五章论述了激光调谐技术。第一章突出了双轴晶体的理论及计算,特别是导出了 $\mathbf{K}$ 与 $\mathbf{E}$ 不垂直时最一般情况下的有效非线性系数、允许参量及效率的计算公式等,介绍了一些新型晶体的特性及频率变换的计算结果,讨论了单轴及双轴晶体的非共线相位匹配。第二章以高转换效率下倍频理论为主线,着重讨论了 II 类匹配及聚焦高斯光束的倍频,并论述了描述混合模的类高斯分布理论,为混合模光束的倍频奠定了基础。第三章论述了基模、多模及锁模内腔倍频 YAG 激光器的理论及有关最佳运转的各种技术。为适应超短脉冲(特别是飞秒脉冲)频率变换的要求,第四章系统地讨论了超短脉冲在频率变换时的匹配条件及群速失配、群速色散的影响,超短脉冲的谐波产生。第五章论述了脉冲光参量振荡器及同步泵浦光参量振荡器的特性、光参量振荡器的转换效率及线宽,也介绍了使用一些新晶体的光参量振荡器的最新进展。第六章论述了激光调谐技术中最成熟的染料可调谐激光器的各种运转特性,着重分析我们研制的准连续泵浦的染料激光器的各种特性。第七章讨论了各种调谐技术,除了循环技术外,其余诸如象散腔的计算与设计,各种调谐元件的理论及设计均可适用于其它调谐激光器中。第八章对 $\text{Cr}:\text{BeAl}_2\text{O}_3$, $\text{Cr}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$, $\text{Cr}:\text{LiSAF}$ 和色心晶体调谐激光器作了较为详尽的讨论及分析。第九章系统地讨论了掺钛蓝宝石可调谐激光器,是全书的重点之一,该章首先介绍了 $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 晶体的结构、能级、光谱、生长,然后论述了各种运转方式(连续、准连续及脉冲)下掺钛蓝宝石激光器的特性、理论计算,分析了各种参数的影响,给出了实验的实例。本章的最后介绍了各种形式产生超短脉冲的方法(主动、被动、同步泵浦、辅助腔锁模以及自锁模),对自锁模的机理作了初步探讨,也介绍了飞秒($f_s = 10^{-15}\text{s}$) $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 激光的放大。最后一章讨论了其它激光调谐技术,如受激拉曼激光器、光纤拉曼激光器、可调谐高压红外激光器及准分子激光器。

本书总结了当代非线性光学频率变换及激光调谐技术的重要成果,既介绍了国际、国

内最新成果,又给出了大量资料、图表及数据;既有系统的理论分析、数值计算结果,又有实用器件结构、参数设计及实验例证。书中千余个公式及四百多幅图表将提供读者有关非线性光学频率变换及激光调谐技术的原理、理论模型、数值计算结果、实用器件及有关技术。

本书是近十年来研究工作的总结。书中引用了我的博士生、硕士生(薛彬、张大鹏、生卫东、王兴龙、龙晓、王长青、赵长明、王铨、杨杰、吴福顺等)论文的部分内容;还引用了西安光机所魏志义博士论文的部分内容;生卫东、王兴龙、郑义为本书初稿撰写了部分内容,在此对他们一并表示感谢。同时,感谢我的学科组全体成员及研究生们十年来艰苦而卓有成效的工作。感谢天津大学各级领导及精密仪器系同事们的支持及帮助。感谢山东大学晶体所等单位对我学科组工作的支持。

应该感谢美国斯坦福大学 A. E. Siegman 教授、南加州大学 E. Garmire 教授、宾夕法尼亚大学 E.W. Plummer 教授及 A.F. Garito 教授、普林斯顿大学 R. Miles 教授、德国柏林工业大学 H.Weber 教授、法国 CNET 的 J.Zyss 教授、英国 St. Andrews 大学 W. Sibbett 及 M. Dunn 教授、美国 Quantronix 及 XMR 公司,他们为本书的完成及书中有关的研究工作提供了条件,对本书内容进行多次有益的讨论并给以良好的建议。

特别要感谢南开大学董孝义教授(博士生导师),他精心通校全书,并提出了宝贵意见。

感谢我夫人王丽妍多年来对我研究工作的支持,她在完成本书书稿中做了大量的整理及文字工作。

在我国科学技术欣欣向荣的今天,我谨以此书奉献给我国的激光界及哺育我成长的母校:无锡胶南中学、苏州中学、天津大学;奉献给天津大学(北洋大学)100周年(1995年)校庆纪念。恳切地期望得到同行及读者们的指正和热烈的讨论。如果本书能对从事非线性光学频率变换及可调谐激光技术的研究人员和师生们有一定的参考作用,对我国激光、光电子技术及其应用有一定的推动作用的话,我将十分地欣慰。

姚建铨

1993年12月1日于天津大学

目 录

第一章 非线性光学晶体中三波互作用的理论分析及计算	1
1.1 非线性光学晶体的光学特性	1
1.1.1 非线性光学晶体的光学分类	1
1.1.2 单色平面波在非线性晶体中的传播	1
1.2 几种典型的新型非线性晶体	6
1.2.1 偏硼酸钡 (β -BaB ₂ O ₄ , BBO)	6
1.2.2 三硼酸锂 (LiB ₃ O ₆ , LBO)	11
1.2.3 钛氧磷酸钾 (KTiOPO ₄ , KTP)	15
1.3 单轴晶体中三波互作用的相位匹配及非线性系数的计算	20
1.3.1 相位匹配条件及角度相位匹配	20
1.3.2 单轴晶体中光波的走离角	24
1.3.3 单轴晶体中三波互作用角度相位匹配的允许角	25
1.3.4 单轴晶体中的非临界相位匹配	27
1.3.5 单轴晶体中三波互作用的有效非线性系数	29
1.4 双轴晶体中的三波互作用相位匹配及非线性系数的计算	32
1.4.1 双轴晶体中的三波互作用的相位匹配	32
1.4.2 双轴晶体中三波互作用的有效非线性系数 d_{eff} 的计算	35
1.4.3 典型双轴晶体中的三波互作用相位匹配及有效非线性系数的计算	40
1.5 双轴晶体中三波互作用的允许参量计算	43
1.5.1 小信号近似下双轴晶体中三波互作用允许参量的计算	44
1.5.2 相位失配下三波互作用效率及允许参量的数值计算	50
1.6 双轴晶体中光波的走离角及其对三波互作用的影响	52
1.6.1 双轴晶体中光波走离角的计算	53
1.6.2 双轴晶体中光波走离角对三波互作用的影响	55
1.7 非线性晶体中热效应及对三波互作用的影响	58
1.7.1 非线性晶体中的自热效应	58
1.7.2 双轴晶体中的温度分布计算	59
1.7.3 双轴晶体中温度分布对三波互作用的影响	63
1.8 非线性晶体中的非共线相位匹配	63
1.8.1 单轴晶体中的非共线相位匹配	63
1.8.2 双轴晶体中的非共线相位匹配下的三波互作用	67
第二章 非线性光学混频理论	69
2.1 非线性光学混频的耦合波方程	69
2.1.1 三波互作用的稳态耦合波方程	69
2.1.2 三波互作用的瞬态耦合波方程	70

2.1.3 曼莱-罗威关系	71
2.2 光学倍频及混频时的稳态小信号解	72
2.3 三波互作用的稳态耦合波方程的一般解	74
2.3.1 第 I 类相位匹配的倍频解	76
2.3.2 第 II 类相位匹配正交耦合时的倍频解	81
2.4 三维耦合波方程的倍频解	89
2.5 外腔倍频理论及实验	91
2.5.1 外腔聚焦高斯光束的倍频	91
2.5.2 外腔倍频实例	94
2.6 多模(混合模)光束倍频的理论基础——类高斯分布理论	96
2.6.1 混合模的横向分布	96
2.6.2 混合模光束的特性	101
2.6.3 类高斯光束在均匀介质中的传播及变换	101
2.6.4 混合模系数 M 的测量	103
2.7 类高斯光束的倍频	105
第三章 倍频激光器理论及有关技术	109
3.1 内腔倍频速率方程分析	109
3.1.1 速率方程的建立	109
3.1.2 速率方程的求解及结果分析	112
3.2 基模倍频 YAG 激光器的设计及实验研究	114
3.2.1 基模倍频 YAG 激光器中倍频器件的最佳运转	115
3.2.2 基模倍频 YAG 激光器中声光调制器的最佳运转	119
3.2.3 基模倍频 YAG 激光器谐振腔参数的选择	120
3.2.4 内腔倍频激光器的最佳耦合输出	122
3.2.5 基模倍频 YAG 激光器的稳定性分析	125
3.2.6 基模倍频 YAG 激光器水冷系统的设计	126
3.2.7 基模倍频 YAG 激光器的总体结构设计及实验结果	127
3.3 高功率多模内腔倍频 YAG 激光器	130
3.3.1 准连续泵浦提高倍频效率的原理	130
3.3.2 准连续泵浦的热效应分析和实验	132
3.4 主动锁模内腔倍频 YAG 激光器	135
3.4.1 主动锁模内腔倍频 YAG 激光器的自洽	135
3.4.2 主动锁模内腔倍频 CW-Nd:YAG 激光的速率方程	138
3.4.3 主动锁模内腔倍频 CW-Nd:YAG 激光器的实验	139
第四章 超短脉冲的混频	141
4.1 色散介质的群速特性	141
4.1.1 色散介质的群速	141
4.1.2 BBO 晶体的实例	143
4.2 超短脉冲的匹配条件及群速失配、群速色散的影响	144
4.2.1 超短脉冲倍频的匹配条件	144
4.2.2 超短脉冲倍频时的群速延迟	145

4.2.3	群速失配对晶体长度的限制	145
4.2.4	群速色散使脉冲的展宽	146
4.3	超短脉冲的谐波产生	146
4.3.1	超短脉冲的耦合波方程及其解	146
4.3.2	聚焦超短脉冲的谐波产生	154
4.3.3	第 II 类匹配时超短脉冲的二次谐波产生	155
4.3.4	超短脉冲混频的实例	156
4.3.5	啁啾脉冲的谐波产生及自相位调制的影响	156
4.4	超短脉冲的四波混频	159
第五章	光参量振荡器	161
5.1	脉冲光参量振荡器特性分析	162
5.1.1	光参量振荡器 (OPO) 的模型及耦合波方程	162
5.1.2	长脉冲泵浦光参量振荡器的特性分析	165
5.2	同步泵浦光参量振荡器	170
5.2.1	同步泵浦单谐振 OPO 的模型及耦合波方程	170
5.2.2	忽略脉冲走离及群速色散时的解	172
5.2.3	脉冲走离效应的影响	173
5.2.4	群速色散的影响及最后表达式	174
5.2.5	同步泵浦 OPO 的特性分析	175
5.3	光参量振荡器的转换效率及线宽特性	177
5.3.1	三波的相对相位及失谐对 OPO 效率的影响	177
5.3.2	OPO 的谱线宽度	182
5.4	几种典型晶体的光参量振荡器	187
5.4.1	BBO-OPO 的新进展	187
5.4.2	LBO-OPO 的新进展	189
5.4.3	AgGaSe ₂ 及 AgGaS ₂ -OPO 的进展	189
5.4.4	KTP 及 KTA-OPO 的进展	190
5.4.5	MgO:LiNbO ₃ -OPO 的特性分析	193
5.4.6	MgO:LiNbO ₃ 晶体温度调谐单、双谐振 OPO 的实验研究	201
5.5	光参量振荡器的发展趋向	206
第六章	染料可调谐激光器	208
6.1	有机染料的物化性能及光谱特性	208
6.1.1	有机染料的分子结构	208
6.1.2	染料分子的能级结构	209
6.1.3	染料分子的吸收与荧光光谱	210
6.1.4	染料及溶剂的物化性能	212
6.1.5	染料的能级结构和相应的时间参数	213
6.1.6	染料激光的速率方程	214
6.2	连续运转染料激光器	216
6.2.1	连续波染料激光器的增益	217
6.2.2	连续波染料激光器的腔型	217
6.2.3	连续波染料激光器的波长测量	219

6.3 脉冲染料激光器	220
6.3.1 腔结构和工作原理	220
6.3.2 脉冲染料激光器的振荡条件	221
6.4 准连续运转染料激光器	222
6.4.1 准连续染料激光的腔结构特性和输出参数	222
6.4.2 准连续泵浦染料激光的速率方程及其特性分析	223
6.4.3 染料激光谱线加宽与受激吸收截面	230
6.4.4 染料激光输出的稳定性	233
6.4.5 准连续染料激光在同位素分离方面的应用	240
6.5 闪光灯泵浦的染料激光器	241
6.6 染料激光器的锁模	243
6.6.1 关于锁模的概述	243
6.6.2 染料激光器的被动锁模	244
6.6.3 染料激光器的同步泵浦锁模	245
6.6.4 染料激光器的碰撞锁模	246
6.6.5 色散对锁模染料激光器的影响	247
第七章 染料激光技术	250
7.1 象散腔的计算与设计	250
7.1.1 象散的产生	250
7.1.2 象散的补偿	251
7.1.3 稳区及腔内光束分布	253
7.2 波长调谐元件——双折射滤光片的理论及设计	256
7.2.1 BF 单程透射公式	257
7.2.2 单片 BF 的透射曲线	260
7.2.3 组合 BF 的透射曲线	261
7.2.4 BF 的设计及其它用途	263
7.3 波长调谐元件——光栅、棱镜及其它	264
7.3.1 光栅——脉冲染料激光调谐元件	264
7.3.2 棱镜	266
7.3.3 F-P 标准具	267
7.4 染料循环技术	269
7.4.1 染料溶液的循环	270
7.4.2 染料喷嘴	270
7.4.3 染料池	271
7.5 染料激光器的选模与稳频技术	273
7.5.1 横模选定技术	273
7.5.2 纵模选定技术	273
7.5.3 稳频技术	273
第八章 固体可调谐激光技术	276
8.1 顺磁离子掺杂的固体激光材料概述	276
8.1.1 Cr^{3+} , V^{2+} 等离子掺杂的固体材料	276
8.1.2 Ni^{2+} , Co^{2+} 等离子掺杂的固体材料	277

8.1.3	Ce ³⁺ 离子掺杂的固体材料	278
8.2	可调谐紫翠宝石激光器	280
8.2.1	Cr:BeAl ₂ O ₄ 的物理特性	280
8.2.2	Cr:BeAl ₂ O ₄ 的光学特性	280
8.2.3	Cr:BeAl ₂ O ₄ 激光器	280
8.3	可调谐镁橄榄石激光器	285
8.3.1	Cr:Mg ₂ SiO ₄ 的结构及发光机理	285
8.3.2	Cr:Mg ₂ SiO ₄ 激光器脉冲泵浦下的可调谐理论分析	289
8.3.3	Cr:Mg ₂ SiO ₄ 激光器输出基本特性分析	290
8.3.4	Cr:Mg ₂ SiO ₄ 激光器的实验研究	293
8.4	可调谐 Cr:LiSAF 激光器	295
8.4.1	Cr:LiSAF 的特性	296
8.4.2	可调谐 Cr:LiSAF 激光器	296
8.5	色心激光器	297
8.5.1	概述	297
8.5.2	色心的能级结构及光学特性	300
8.5.3	几种可作为激光激活介质的 F 类心	303
8.5.4	几种较为重要的色心激光器简介	303
8.5.5	LiF:F ₂ ⁺ , LiF:F ₂ ⁺ 及 LiF:F ₂ ⁻ 色心激光器的特性及实验研究	307
第九章	掺钛蓝宝石激光调谐技术	315
9.1	掺钛蓝宝石晶体的物理化学及光谱特性	316
9.1.1	掺钛蓝宝石晶体的结构	316
9.1.2	掺钛蓝宝石晶体的能级	317
9.1.3	掺钛蓝宝石晶体的吸收光谱	318
9.1.4	掺钛蓝宝石晶体的荧光光谱	319
9.1.5	掺钛蓝宝石晶体的生长	319
9.2	连续运转的掺钛蓝宝石激光器	321
9.2.1	端泵浦连续运转 Ti:S 激光器的输出特性	321
9.2.2	连续运转 Ti:S 激光器的谐振腔设计	329
9.2.3	连续运转 Ti:S 激光器的实验实例	334
9.3	准连续运转的掺钛蓝宝石激光器	337
9.3.1	准连续运转 Ti:S 激光器的时间特性	338
9.3.2	准连续运转 Ti:S 激光器的输出功率	347
9.3.3	准连续运转 Ti:S 激光器的实验实例	350
9.3.4	铜蒸气激光泵浦的 Ti:S 激光器	353
9.4	脉冲运转的掺钛蓝宝石激光器	354
9.4.1	脉冲运转 Ti:S 激光器的类型	355
9.4.2	脉冲 Ti:S 激光器的动力学特性	356
9.5	窄线宽及稳频的掺钛蓝宝石激光器	366
9.6	全固态掺钛蓝宝石激光器	366
9.7	超短脉冲掺钛蓝宝石可调谐激光器	368
9.7.1	主动锁模 Ti:S 激光器	368

9.7.2	可饱和吸收体被动锁模 Ti:S 激光器	368
9.7.3	同步泵浦锁模 Ti:S 激光器	370
9.7.4	辅助腔锁模 Ti:S 激光器	370
9.7.5	微粒镜锁模的 Ti:S 激光器	373
9.7.6	自锁模 Ti:S 激光器	373
9.7.7	飞秒 Ti:S 激光的放大	380
第十章	其它激光调谐技术	381
10.1	受激拉曼激光器	381
10.1.1	非连续可调谐拉曼激光器	381
10.1.2	连续可调谐激光泵浦的拉曼激光器	381
10.1.3	自旋反转拉曼激光器	382
10.2	光纤拉曼激光器	383
10.2.1	光纤的拉曼光谱	383
10.2.2	光纤的损耗特性	384
10.2.3	拉曼增益和有效作用长度	384
10.2.4	拉曼增益的非均匀性	385
10.2.5	光纤的选择	385
10.2.6	长光纤中皮秒脉冲的拉曼作用及群速色散效应	386
10.2.7	光纤拉曼激光器	386
10.3	可调谐高压红外激光器	388
10.3.1	工作原理	388
10.3.2	可调谐高压红外激光器	392
10.4	准分子激光器	394
10.4.1	准分子激光器的特点及工作原理	395
10.4.2	几种主要的准分子激光器	398
参考文献		400

第一章 非线性光学晶体中三波相互作用的理论分析及计算

1.1 非线性光学晶体的光学特性

1.1.1 非线性光学晶体的光学分类

晶体,就其光学性质可分为三类。第一类晶体,从结晶轴上看三个正交方向是完全等价的,这类晶体属于立方晶系。三个等价方向与三个主介电轴重合,三个介电常数 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 相同,电位移矢量 $\mathbf{D}$ 与电场矢量 $\mathbf{E}$ 方向相同, $\mathbf{D} = \epsilon_{x,y,z} \mathbf{E}$,这类晶体是光学各向同性的。第二类晶体不同于第一类,它在同一平面内具有两个或更多个结晶学上等价的方向,属于三方、四方和六方晶系,等价方向所处的平面垂直于三重、四重或六重的对称轴,其中有一个介电主轴与这个特定的对称轴垂直。如果取这个特定方向为 z 轴,另外两个等价的方向与 z 轴垂直,并设这两个方向为 x 轴及 y 轴,则有 $\epsilon_x = \epsilon_y \neq \epsilon_z$,这类晶体称为单轴晶体。第三类晶体,没有两个结晶学上等价方向可供选择,它们属于斜方、单斜和三斜晶体。这类晶体中 $\epsilon_x \neq \epsilon_y \neq \epsilon_z$,并且介电主轴不一定能由对称性确定,不能由对称性确定的介电主轴方向一般依赖于波长,这类晶体称为双轴晶体。

表 1.1.1 清楚地描述了三类晶体的光学性质^[4]。表中“C”表示有色散的轴,“F”表示方向固定的轴,“R”表示可自由转动的或不确定的轴。

1.1.2 单色平面波在非线性晶体中的传播

光在非线性晶体中传播时的相速取决于光波在传播方向的折射率,它与光波的偏振态及传播方向有关。传播方向确定后,一般说,存在两个具有确定的特征相速和偏振方向的本征光波,且它们的偏振方向互相垂直。如果一个光的偏振方向与这两个特征方向中的任一个平行,则这个光波通过晶体时,它的偏振方向将保持不变。分析光波在非线性晶体中的传播,就是求解两个特征光波的偏振方向及相应的相速度(或折射率)。

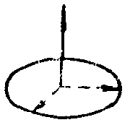
光波在非线性晶体中的传播,可由麦克斯韦方程来描述。求解麦克斯韦方程,可以直接给出非线性晶体中光波的偏振态及相应的折射率。为了直观地看出晶体中光波各个矢量间的方向关系,以及与各个传播方向相应的光速或折射率的空间取值,我们利用折射率椭球、折射率曲面和射线面等来分析光波在非线性晶体中的传播规律。

1. 单色平面波在单轴晶体中的传播^[1-4]

我们利用单轴晶体的折射率椭球来分析单色平面波在单轴晶体中的传播。选择晶体的主轴坐标系,由于 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = n_o^2, \epsilon_3 = n_e^2$,单轴晶体的折射率椭球方程为

$$\frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} = 1 \quad (1.1.1)$$

表 1.1.1 晶体的光学分类

晶 系	点 群	介电主轴	介电张量	光学分类
立方	$\bar{4}3m$ 432 $m\bar{3}$ 23 $m\bar{3}m$	RRR	$\epsilon = \epsilon_0 \begin{pmatrix} n^2 & 0 & 0 \\ 0 & n^2 & 0 \\ 0 & 0 & n^2 \end{pmatrix}$	各向同性
三方	3 $\bar{3}$ 32 3m 32/m	FRR 	$\epsilon = \epsilon_0 \begin{pmatrix} n_o^2 & 0 & 0 \\ 0 & n_o^2 & 0 \\ 0 & 0 & n_e^2 \end{pmatrix}$	单轴
四方	4 $\bar{4}$ 4/m 422 4mm $\bar{4}2m$ 4/mmm			
六方	6 $\bar{6}$ 6/m 622 6mm $\bar{6}m2$ 6/mmm			
斜方	222 mm2 mmm	FRF 	$\epsilon = \epsilon_0 \begin{pmatrix} n_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & n_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & n_z^2 \end{pmatrix}$	双轴
单斜	2 m 2/m	CCF 		
三斜	1 $\bar{1}$	CCC 		

这是一个以光轴 z 为转轴的旋转椭球面，它的形态由 n_o 和 n_e 的取值不同而分为两类。正单轴晶体 $n_e > n_o$ ，折射率椭球是一个沿光轴方向拉长的旋转椭球；负单轴晶体 $n_o > n_e$ ，椭球是沿光轴方向压扁了的旋转椭球。

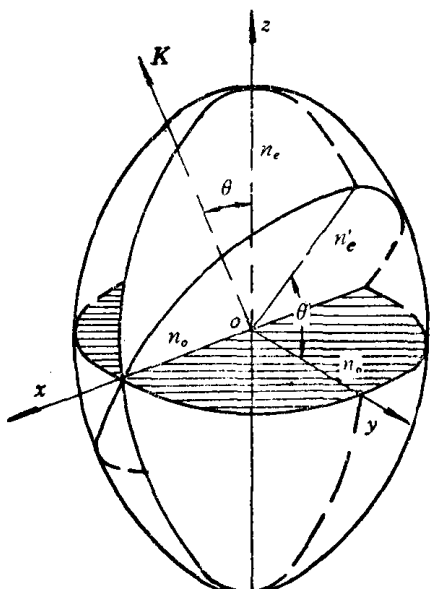


图 1.1.1 主轴坐标系内单轴晶体折射率椭球的截面

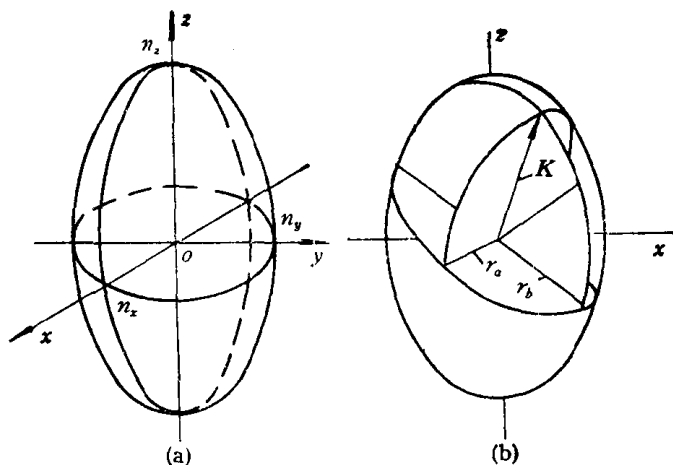


图 1.1.2 双轴晶体折射率椭球。(a) 折射率椭球；(b) 给定矢量 K 的情形

设一平面光波在晶体内传播的波矢方向 K 与 z 轴夹角为 θ ，通过椭球中心作垂直于 K 的平面，这一平面与椭球的截线是一椭圆。通过坐标变换可得截线的方程为

$$\frac{x'^2}{n_o^2} + \frac{y'^2}{n_e^2(\theta)} = 1 \quad (1.1.2)$$

$$n_e(\theta) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \sin^2 \theta + n_e^2 \cos^2 \theta}} \quad (1.1.3)$$

该椭圆的长轴和短轴方向是波法线方向为 K 的光波的 D 矢量的两个可能的振动方向，各半轴的长度等于该振动方向的折射率 n_o 和 $n_e(\theta)$ 。不论 K 的方向如何，它总允许一个偏振成分的折射率（即 n_o ）不变，其 D 矢量垂直于 K 与光轴 z 所组成的平面， n_o 为寻常光（简称 o 光）的折射率， o 光的电场矢量 E 与电位移矢量 D 平行，波法线方向 K 与代表能流方向的玻印亭矢量 S 平行，可表示为 $E \parallel D, K \parallel S$ 或 $K \perp D, E \perp S$ 。波法线为 K 的光波的另一允许偏振方向，在 K 与 z 组成的平面内，它的折射率 $n_e(\theta)$ 随 K 与 z 轴的夹角 θ 而异，这就是非常光（简称 e 光）。 e 光的 E 矢量与 D 矢量不平行， K 矢量与 S 矢量不平行（当 $\theta \approx 0^\circ$ 或 $\theta \approx 90^\circ$ 时）。

2. 单色平面波在双轴晶体中的传播^[3,4]

双轴晶体的主介电常数 $\epsilon_x \neq \epsilon_y \neq \epsilon_z$ ，即 $n_x \neq n_y \neq n_z$ ，三个主轴折射率不相等（ n_x, n_y, n_z 现简写为 n_1, n_2, n_3 ）。因此，双轴晶体的折射率椭球是一个三轴椭球（见图 1.1.2），其方程为

$$\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{y^2}{n_2^2} + \frac{z^2}{n_3^2} = 1 \quad (1.1.4)$$

由几何定理知，在三轴椭球中一定有两个过中心的平面与椭球面的交线为圆，它们的法线应和椭圆的最长和最短轴共面。我们约定 $n_3 > n_2 > n_1$ ，如两个圆形截面的法线在 $x-z$ 平面内，折射率椭球与 $x-z$ 面的交线方程为

$$\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{z^2}{n_3^2} = 1 \quad (1.1.5)$$

以 φ' 表示椭圆上任意一点的矢径 r 与 x 轴的夹角, 该矢径的长度为 n' , 则上式可写成

$$\frac{(n' \cos \varphi')^2}{n_1^2} + \frac{(n' \sin \varphi')^2}{n_3^2} = 1 \quad (1.1.6)$$

或

$$\frac{1}{n'^2} = \frac{\cos^2 \varphi'}{n_1^2} + \frac{\sin^2 \varphi'}{n_3^2} \quad (1.1.7)$$

n' 的大小随 φ' 在 n_1 和 n_3 之间变化。既然 $n_1 < n_2 < n_3$, 总能找到某个矢径 r_0 , 其长度 $n' = n_2$ 。设 r_0 与 x 轴夹角为 φ'_0 , 则有

$$\frac{1}{n_2^2} = \frac{\cos^2 \varphi'_0}{n_1^2} + \frac{\sin^2 \varphi'_0}{n_3^2} \quad (1.1.8)$$

$$\operatorname{tg} \varphi'_0 = \pm \frac{n_3}{n_1} \sqrt{\frac{n_2^2 - n_1^2}{n_3^2 - n_2^2}} \quad (1.1.9)$$

显然, r_0 与 y 轴所决定的平面与折射率椭球的截线是一个半径为 n_2 的圆。记这个圆截面为 π_0 。双轴晶体中光波的波法线方向 $\mathbf{K}$ 若垂直于 π_0 , 则电位移矢量 $\mathbf{D}$ 在 π_0 内振动, 其振动方向没有限制, 折射率为 n_2 。我们用 $\mathbf{C}$ 表示 π_0 面的法线方向的单位矢量, $\mathbf{C}$ 的方向即为光轴方向, π_0 面及其法线方向有两个, 所以双轴晶体有两个光轴方向: $\mathbf{C}_1$ 和 $\mathbf{C}_2$, 它们对称地在 z 轴的两侧, 由 $\mathbf{C}_1$ 和 $\mathbf{C}_2$ 构成的平面叫做光轴面, 显然光轴面就是 xoz 面。

设在双轴晶体中传输的平面波的波矢为 $\mathbf{K}$ (如图 1.1.3)^[9,10], OA 为双轴晶体的光轴 $\mathbf{C}_1$, OB 为光轴 $\mathbf{C}_2$, OH 为波矢 $\mathbf{K}$ 的方向。由毕奥-菲涅耳(Biot-Fresnel)定理可证明^[7], 光波的两个允许的偏振方向分别在平面 OHA 和 OHB 的内、外角平分面上, 如图中 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ 所示。 $n(\mathbf{e}_1) > n(\mathbf{e}_2)$, $\mathbf{e}_1$ 及 $\mathbf{e}_2$ 分别表示慢光和快光。

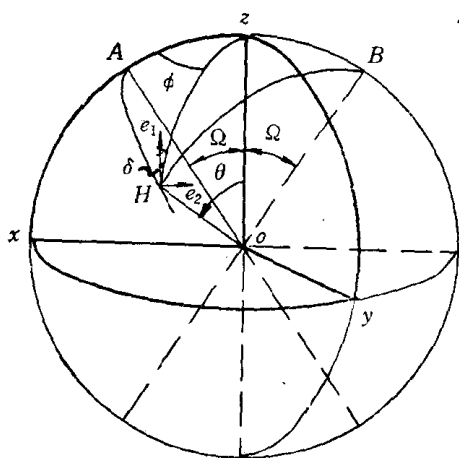


图 1.1.3 双轴晶体中光波偏振方向的传播

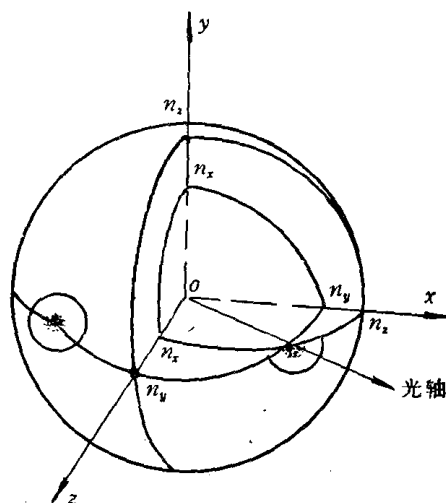


图 1.1.4 双轴晶体折射率曲面

为了形象而直观地表示每个波矢 $\mathbf{K}$ 的两个偏振方向对应的折射率, 人们引入了折射率面, 它的每个矢径 $\mathbf{r} (= n\mathbf{K})$ 方向平行于某个给定的波矢方向 $\mathbf{K}$, 其长度等于波矢方向 $\mathbf{K}$ 的两个光波的折射率。因此, 双轴晶体的折射率曲面是一个双壳层的闭曲面 (如