

可调谐激光技术

TUNABLE LASERS

张国威 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

可调谐激光技术/张国威著. —北京:国防工业出版社, 2002. 1

ISBN 7-118-02692-1

I. 可... II. 张... III. 可调谐激光器 IV. TN248

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 077072 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 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 14 360 千字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—2500 册 定价:28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第四届评审委员会组成人员

名 誉 主 任 委 员	陈达植			
顾 问	黄 宁			
主 任 委 员	殷鹤龄			
副 主 任 委 员	王 峰	张涵信	张又栋	
秘 书 长	张又栋			
副 秘 书 长	崔士义	蔡 镛		
委 员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成
(按姓名笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同
	张鸿元	陈火旺	候正明	常显奇
	崔尔杰	彭华良	韩祖南	舒长胜

前 言

自 1960 年发明红宝石激光器以来,人们就开始探索可调谐激光介质,20 世纪 60 年代中 P.P.Sorokin 和 F.P.Schafer 发明了染料激光器,实现了由近紫外到近红外光谱区连续可调谐激光运转。此后近 20 年,液态染料激光器在可调谐激光器领域,一直占据着绝对的垄断地位。直到 20 世纪 80 年代初,P.F.Moulton 发明了固态掺钛蓝宝石激光器,才开始打破染料激光器对可调谐激光一统天下的局面,它标志着可调谐激光器技术进入了一个新的发展阶段,向固体化和全固化发展的新阶段。

染料激光器早期的发展为可调谐激光技术发展奠定了坚实基础,可调谐激光的基础理论和主要技术都已基本成熟。因此,固体可调谐激光器一登上舞台,就能获得迅猛发展,并出现了以固体可调谐激光器取代液态染料激光器的趋势。目前,固态可调谐激光介质,主要是各种掺过渡金属离子激光晶体,除掺钛晶体外,还有掺铬、掺钴等过渡金属离子晶体,以及铈等少数稀土离子激光晶体,同时也推动了染料激光的固态化研究。20 世纪 80 年代末,激光二极管泵浦技术引入可调谐激光器,从此可调谐激光技术进入了全固态化发展大趋势中。今日固体可调谐激光器技术,已成为当今激光高新技术领域发展的热点之一。

可调谐激光技术,在科学技术和国防建设上具有十分重要的意义。可调谐激光器是各种激光光谱技术研究的主要技术设备,也是光学、光电子学、医学、生物学等研究的重要光源。在军事上,可调谐激光器将是未来光电子对抗的重要激光光源之一,如激光雷达,激光通信,激光水下探测和通信,激光遥感,激光致盲等。

本书内容包括可调谐激光器理论和技术两大部分。将系统阐

述可调谐激光器的主要理论问题,如宽带激光能级特性,可调谐激光动力学特性等;以及可调谐激光器主要技术问题,如调谐技术,带宽压窄技术,泵浦技术,多频运转技术等。并介绍各种常用的、典型的可调谐激光器的工作原理和基本组成。理论与技术,以基本技术为主,以技术应用为主。理论上,尽可能与“激光原理”和“激光技术”等基础知识相衔接,避免重复,并力求保持本书的系统性和完整性。技术问题,以讲清物理本质和概念为目的,避免不必要的数学推演,突出实用性和先进性,结合典型实例进行分析、阐述。深度与广度上,既要适当,又应有重点,有自己的成果。内容选择上,总的原则是以固体为主,但许多原理和技术都源于液体染料,有的还需从“源”出发讲。时间上,应总结 20 世纪八九十年代的主要成果,适当反映 20 世纪末的新进展。

本书对章节设置作了有益探索,突破了这类著作以激光器种类设章的传统方法,而将可调谐激光的基本单元技术,如泵浦技术、调谐技术、线宽压窄技术、调谐腔技术和时间特性等,相对独立成章,集中系统阐述,利于达到一定的深度。章节编排上,除考虑先易后难、循序渐进、前后衔接外,并适当分散难点、重点,以便于初次接触此项技术的读者阅读。

全书共八章,由三部分组成。第一、二章为第一部分,讲解可调谐激光器的基本理论——宽带二能级激光系统,介绍可调谐激光工作物质,概略介绍可调谐激光器基本构成和工作原理,这部分内容既是理论基础,也是入门引导,以对这一技术有粗略的总体了解。第二部分,包括第三章~第七章,讲解各种可调谐激光的基本技术,包括泵浦技术、调谐和线宽压窄技术、激光选频腔技术和时间特性等主要可调谐激光技术,以及激光放大、偏振运转、分布反馈和混合染料等技术,这部分是本书的重点,包括相关技术的原理、分析和实际应用。第三部分(第八章)是根据一定广度要求,对先进可调谐激光器内容的补充。考虑到讲解有关技术时,激光器是作为联系实际的典型实例,不便过多展开,因此选择部分先进的典型可调谐激光器集中于此,以供参考。

还必须指出,可调谐激光技术还有一重要的分支,即光参量激光器技术,其调谐范围极宽,可从紫外到中红外,而且性能好,效率高,也能实现超短脉冲运转和窄线宽输出,是当前先进固体激光器的重要发展方向之一,内容十分丰富,本打算收入本书。但该技术的理论基础是“非线性光学”,它是又一专门学科领域,实难在一本书中包罗,还是留待这一领域专家出版专著为好,本书只在第八章对此作简略介绍。

本书是作者在统编教材《激光器件》、《激光器件与技术》中有关“可调谐激光器”篇章和讲授研究生“近代光学”课相关内容基础上发展起来的,与我的《激光光谱学原理与技术》一书,可说是两本姐妹书,一是基础技术,一是基本应用。

可调谐激光技术是 20 世纪七八十年代发展起来的高新技术之一,在我国“科教兴国”战略实施中,在“科技创新”工程中,必将发挥其重要的作用。在这新世纪之初,为迎接我国新一届科学春天的到来,出版此书以尽个人微薄之力。对书中的不足与错误,殷切期望批评指正。

在本书出版之际,特别怀念已故 R. Winkler 教授,20 世纪 70 年代末我访问柏林工业大学期间,是他引导我进入可调谐激光技术这一神奇新领域。书中也包括我们课题组同仁和研究生们 20 多年来的许多成果,再次感谢他们的辛劳和合作。还要感谢杨扬为本书提供了大量宝贵的资料和许多有益的讨论。

最后,谨以此书献给我的母校,北京理工大学 60 周年校庆。

2001 年 4 月于北京

张国威

目 录

第一章 可调谐激光器的基本原理	1
1.1 受激光放大的基本概念	1
1.2 可调谐激光器的种类和基本组成	7
1.2.1 脉冲可调谐激光器	9
1.2.2 连续波可调谐激光器	19
1.3 宽带二能级系统的激光速率方程	21
1.4 宽带二能级激光系统阈值与增益	30
1.4.1 脉冲可调谐激光器阈值与增益	30
1.4.2 连续波可调谐激光器阈值与增益	37
参考文献	45
第二章 可调谐激光材料的性能	47
2.1 激光染料特性	47
2.1.1 激光染料分子结构及其性质	48
2.1.2 染料分子能级与光谱特性	51
2.1.3 染料溶剂性质、溶液温度对激光性能的影响	56
2.1.4 固体激光染料材料	58
2.2 过渡金属离子晶体及其激光特性	62
2.3 掺钛离子激光晶体	67
2.3.1 掺钛蓝宝石的晶体结构与其物理化学性质	67
2.3.2 掺钛蓝宝石晶体能级结构与其光谱特性	68
2.3.3 $Ti^{3+}:Al_2O_3$ 的品质因数	73
2.3.4 其它掺钛激光晶体	78
2.4 掺三价铬离子激光晶体	79
2.4.1 掺铬紫翠宝石晶体(Alexandrite, $Cr^{3+}:BeAl_2O_4$)	80

2.4.2 掺铬六氟化物晶体(Colquiriite 晶体结构)	85
2.4.3 其它掺 Cr^{3+} 晶体	90
2.5 掺四价铬离子激光晶体	92
2.5.1 掺铬镁橄榄石激光晶体($\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$)	93
2.5.2 掺铬钇铝石榴石晶体($\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$)	98
2.5.3 其它掺铬离子激光晶体	103
2.6 掺其它过渡金属离子激光晶体	104
2.7 掺镧系稀土离子可调谐激光晶体	106
参考文献	109
第三章 可调谐激光器泵浦技术	114
3.1 激光泵浦技术	115
3.1.1 激光泵浦源的技术要求	116
3.1.2 激光泵浦的增益波导效应	118
3.2 闪光灯泵浦技术	128
3.2.1 快放电闪光灯的时间特性	129
3.2.2 闪光灯高功率放电的光谱特性	136
3.2.3 低感放电电路和预燃技术	139
3.2.4 快放电闪光灯的寿命	144
3.2.5 会聚器的优化设计	146
3.2.6 提高泵浦转换效率的途径	149
3.3 激光二极管泵浦技术	150
3.3.1 激光二极管特性与种类	152
3.3.2 激光二极管泵浦与耦合	158
3.3.3 激光二极管寿命和优缺点	165
参考文献	167
第四章 调谐与线宽压窄技术	169
4.1 色散型调谐和线宽压窄	170
4.1.1 棱镜变束与色散放大	170
4.1.2 多棱镜变束与色散放大	174
4.1.3 光栅调谐与线宽压窄	180

4.2 干涉型调谐和线宽压窄	186
4.2.1 法布里-珀罗干涉仪技术	186
4.2.2 短光脉冲脉宽加宽和线宽展宽	189
4.2.3 超短光脉冲实现相干滤波条件	195
4.2.4 双折射滤波器技术	197
4.3 同步调谐原理	201
4.3.1 标准具与色散元件同步调谐	202
4.3.2 多标准具同步调谐	204
4.3.3 气压同步精确调谐	207
4.4 干涉仪测定波长和线宽	210
4.4.1 测定激光波长	212
4.4.2 测定激光线宽	215
参考文献	217
第五章 可调谐激光器的谐振腔	218
5.1 可调谐激光器的色散腔	218
5.1.1 色散腔的结构形式及其特性	218
5.1.2 色散腔的色散补偿	224
5.2 连续波可调谐激光器的消像散腔	228
5.2.1 三镜折叠腔与像散补偿	229
5.2.2 四镜环形腔	232
5.2.3 准连续可调谐激光器的腔型选择	235
5.3 可调谐多频输出腔	236
5.3.1 共增益区多频可调谐激光器	237
5.3.2 共增益区相关调谐原理	241
5.4 注入种子锁频腔	248
5.4.1 外注入锁频和内注入锁频	249
5.4.2 注入锁频理论	250
5.4.3 自注入锁频技术	259
5.4.4 注入锁频钛宝石可调谐激光器	263
5.5 复合腔	264

5.5.1 调频复合腔	265
5.5.2 双调 Q 复合腔	269
参考文献	271
第六章 可调谐激光器的时间特性	273
6.1 增益开关技术的时间特性	273
6.1.1 稳定腔增益开关激光技术	275
6.1.2 非稳腔增益开关激光技术	278
6.1.3 全固化增益开关激光技术	281
6.2 增益开关技术的理论分析	282
6.2.1 数值法分析增益开关时间特性	283
6.2.2 近似法分析增益开关时间特性	285
6.3 准 CW 可调谐激光器时间特性	297
6.3.1 准 CW 过渡金属离子激光器时间特性	298
6.3.2 准 CW 染料激光器时间特性	303
参考文献	308
第七章 其它相关技术	310
7.1 脉冲染料激光放大	310
7.1.1 光放大的增益	311
7.1.2 光放大的最小输入信号	312
7.1.3 染料激光放大的滤波	315
7.1.4 激光放大系统稳定性	316
7.2 固体可调谐激光放大	320
7.2.1 调 Q 脉冲放大技术	321
7.2.2 脉冲激光多级放大	329
7.2.3 脉冲激光多通放大	331
7.2.4 放大器的稳定性	333
7.2.5 稳态激光放大技术	334
7.3 染料激光偏振运转技术	336
7.3.1 染料激光自偏振原理	336
7.3.2 染料激光自偏振实验	340

7.4 混合染料激光技术	343
7.4.1 混合染料能量转移原理	343
7.4.2 混合染料展宽调谐范围	346
7.4.3 混合染料多频调谐特性	350
7.5 分布反馈激光技术	356
7.5.1 激光感应光栅原理	356
7.5.2 分布反馈激光器原理	357
7.5.3 分布反馈激光的数值解	360
7.5.4 可调谐 DFDL 的结构	364
参考文献	365
第八章 典型先进可调谐激光器	367
8.1 灯泵固体可调谐激光器	367
8.2 各种性能的掺钛蓝宝石激光器	374
8.3 全固化可调谐激光器	377
8.4 短脉冲可调谐激光器	380
8.5 固体多频激光器	394
8.6 紫外可调谐激光器	400
8.7 红外可调谐激光器	404
8.8 固体染料激光器	407
8.9 光参量激光器	412
8.10 其它可调谐激光器	414
8.10.1 半导体可调谐激光器	414
8.10.2 色心激光器	414
8.10.3 气体可调谐激光器	415
参考文献	416
附录 1 激光染料 伊斯曼 (Eastman) 公司部分常用激光染料	419
附录 2 激光染料 Exciton 公司部分常用激光染料	421
附录 3 常用激光染料溶剂	425

Contents

Chapter1 Basic principle of tunable lasers	1
1.1 Concept about optical amplification	1
1.2 Class and units of tunable lasers	7
1.2.1 Pulsed tunable lasers	9
1.2.2 CW tunable lasers	19
1.3 Laser rate equations for wideband two-level system	21
1.4 Threshold and gain of wideband two-level system	30
1.4.1 Threshold and gain of Pulsed tunable lasers	30
1.4.2 Threshold and gain of CW tunable lasers	37
Reference	45
Chapter2 Properties of tunable laser materials	47
2.1 Characters of laser dye	47
2.1.1 Molecule structure and characters of dye	48
2.1.2 Level and spectrum of dye molecule	51
2.1.3 Effect of solvent and temperature on laser	56
2.1.4 Solid laser dye materials	58
2.2 Transition-metal ion crystals and laser nature	62
2.3 Titanium-doped crystals	67
2.3.1 Crystal structure and characters of Ti:sapphire	67
2.3.2 Level structure and spectrum of Ti:sapphire	68
2.3.3 Figure of Merit for Ti:sapphire	73

2.3.4	Other Ti-doped crystals	78
2.4	Cr³⁺-doped crystals	79
2.4.1	Cr ³⁺ -doped Alexandrite	80
2.4.2	Cr ³⁺ -doped Colquiriite	85
2.4.3	Other Cr ³⁺ -doped crystals	90
2.5	Cr⁴⁺-doped crystals	92
2.5.1	Cr ⁴⁺ -doped Forsterite	93
2.5.2	Cr ⁴⁺ -doped YAG	98
2.5.3	Other Cr ⁴⁺ -doped crystals	103
2.6	Other transition-metal ion crystals	104
2.7	Rare-Earth tunable crystals	106
	Reference	109
Chapter3	Pump of tunable lasers	114
3.1	Laser pump	115
3.1.1	Technical requirements for laser pump	116
3.1.2	Gain guiding of laser pump	118
3.2	Flashlamp pump	128
3.2.1	Time-characters of fast-discharge	129
3.2.2	Spectral characteristic of high-power discharge	136
3.2.3	Low inductance discharge and simmer	139
3.2.4	Life of fast-discharge flashlamp	144
3.2.5	Design of convergent mirror	146
3.2.6	Pump conversion efficiency	149
3.3	Laser diode pump	150
3.3.1	Characters and class	152
3.3.2	Pump and coupling	158
3.3.3	Life and advantage	165
	Reference	167
Chapter4	Tuning and linewidth compression	169

4.1 Dispersion-type of tuning and linewidth	
compression	170
4.1.1 Prism beam transform and dispersion amplification	170
4.1.2 Multi-prism beam transform and dispersion amplification	174
4.1.3 Grating tuning and linewidth compression	180
4.2 Interfere-type of tuning and linewidth	
compression	186
4.2.1 Fabry-Perot interferometer	186
4.2.2 Pulse-and linewidth stretching for short pulse ...	189
4.2.3 Coherent filtering of extra-short pulse	195
4.2.4 Birefringent filter	197
4.3 Principle of synchronous tuning	201
4.3.1 Synchronous tuning of etalon and dispersion elements	202
4.3.2 Synchronous tuning of multi-etalon	204
4.3.3 Fine synchronous tuning with gas	207
4.4 Wavelength and linewidth measurement	210
4.4.1 Laser wavelength measurement	212
4.4.2 Laser linewidth measurement	215
Reference	217
Chapter5 Cavity of tunable lasers	218
5.1 Dispersion cavity of tunable lasers	218
5.1.1 Structure and character of dispersion cavity	218
5.1.2 Dispersion compensation of dispersion cavity	224
5.2 Anastigmatic cavity for CW tunable lasers	228
5.2.1 Three-mirror fold-cavity and astigmatism compensation	229
5.2.2 Four-mirror ring-cavity	232

5.2.3	Cavity-type for quasi-CW tunable laser	235
5.3	Tunable multiwavelength cavity	236
5.3.1	Multiwavelength lasers with common-active region	237
5.3.2	Correlation tuning principle of multi-wavelength	241
5.4	Injection-locked cavity	248
5.4.1	External and internal injection locking	249
5.4.2	Injection locking theory	250
5.4.3	Self-injection locking	259
5.4.4	Injection locked Ti:sapphire lasers	263
5.5	Compound cavity	264
5.5.1	Tuning compound cavity	265
5.5.2	Dual Q switching compound cavity	269
Reference		271
Chapter6	Time characters of tunable lasers	273
6.1	Time characters of gain-switched lasers	273
6.1.1	Gain-switching of stable resonator	275
6.1.2	Gain-switching of unstable resonator	278
6.1.3	Gain-switching of all solid state lasers	281
6.2	Analysis of gain-switching	282
6.2.1	Numerical analysis	283
6.2.2	Approximate analysis	285
6.3	Time-characters of quasi-CW tunable lasers	297
6.3.1	Quasi-CW transition-metal ion lasers	298
6.3.2	Quasi-CW dye lasers	303
Reference		308
Chapter7	Other correlation techniques	310
7.1	Amplification of pulsed dye laser	310
7.1.1	Gain of amplification	311