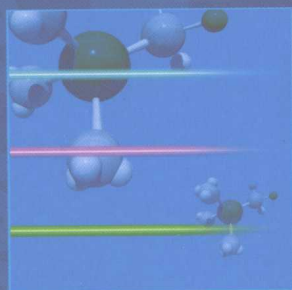


准分子激光技术及应用



Excimer Laser Technology and Applications

刘晶儒 主编
刘晶儒 易爱平 胡志云 赵学庆 等编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

准分子激光技术及应用

刘晶儒 主编

刘晶儒 易爱平 胡志云 赵学庆 等编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

准分子激光技术及应用/刘晶儒主编. —北京:国防工业出版社, 2009. 4

ISBN 978-7-118-06275-5

I. 准... II. 刘... III. 受激准分子—激光基础
IV. TN241

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 056274 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 7 $\frac{3}{4}$ 字数 178 千字

2009 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

Preface

准分子激光波长短、效率高、可定标放大和重频运行,在工业、医学、军事等领域有重要的应用价值和应用前景。

早在 1960 年, F. G. Houtermanns 就从理论上预言, 仅在激发态存在的准分子是高效激光介质的候选者。1970 年, 俄罗斯巴索夫等人成功地获得 172nm 紫外准分子 Xe_2^* 激光, 这是首次获得的准分子激光输出, 此后, 1975 年至 1976 年, 用电子束和放电泵浦的方法获得了几乎所有稀有气体卤化物准分子激光。

由于工业、医学、科研等应用的推动, 高功率、高重频放电泵浦准分子激光器得到快速发展, 目前世界上德国、美国、法国、日本等国家专门研制生产不同种类商品化准分子激光器, 其中, 工业用激光器平均功率达几百瓦, 重复频率达几百赫。电子束泵浦准分子激光的发展得益于脉冲功率技术的不断进步和惯性约束聚变(ICF)研究的牵引, 美国海军实验室于 20 世纪 80 年代中期研制了准分子激光装置 Nike, 该装置于 1995 年正式投入运行, 输出指标为 5kJ/4ns/56 束, 靶面辐照不均匀性达 0.3%。日本、英国、俄罗斯等国家也于 80 年代开始进行电子束泵浦高功率准分子激光器研究工作, 获得百焦到千焦激光能量, 并开展了各有特色的物理工

作。近几年来,由于聚变能源(IFE)研究需求的牵引,美国海军实验室和日本电子技术实验室率先进行了重复频率电子束泵浦 KrF 激光器研究,并取得重要进展。

国内,在老一辈科学家王淦昌先生的亲自指导和大力支持下,高功率准分子激光研究从 20 世纪 80 年代中期起步,1990 年,原子能科学研究院研制成功“天光”一号加速器泵浦的百焦耳级 KrF 激光器,1994 年,西北核技术研究所利用“闪光”二号加速器研制成功百焦耳级 XeCl 和 KrF 激光器。目前,都在开展高功率准分子激光系统研制和物理实验研究。此外,西北核技术研究所从 20 世纪 90 年代中期开始进行了准分子激光应用研究,目前已取得重要研究成果。

本书对准分子激光技术做了较全面、系统的总结,包括电子束泵浦、放电泵浦、光泵浦技术,准分子激光放大技术,紫外高亮度源技术等。同时,对准分子激光应用技术做了介绍,重点叙述西北核技术研究所准分子激光对燃烧流场诊断、淀积类金刚石薄膜等方面的研究结果。以利于今后对从事准分子激光及应用研究的青年科技人员的培养,并进一步推动我国在该技术领域的发展。

本书共分 9 章。绪论概述了准分子激光特点和光谱特性,以及准分子激光技术的发展,由刘晶儒撰写。第 2 章和第 3 章分别阐述放电泵浦和电子束泵浦准分子激光技术,主要由易爱平撰写,胡志云、赵学庆参加了撰写。第 4 章介绍表面放电光泵浦 XeF(C-A)蓝绿激光器技术,由刘晶儒、于力、胡志云撰写。第 5 章论述高功率准分子激光系统研制所涉及的多种技术,由赵学庆撰写。第 6 章论述高亮度准分子激光系统,由刘晶儒撰写。第 7 章至第 9 章分别介绍准分子激光在燃烧流场诊断、淀积类金刚石薄膜和特种加工中的应用技术,主要由胡志云撰写,刘晶儒参加了第 8 章撰写。全书由刘晶儒负责统稿,书中也包括博士研究生姚

东生、关小伟,硕士研究生曾敏、白婷、王晟等人的研究成果。

西北核技术研究所从20世纪80年代中期开始进行准分子激光技术研究,20多年来,得到本单位领导和专家的关心和支持;高功率准分子激光技术及应用研究还得到国家高技术“863”计划的支持。特在此深表谢意。

王德芳研究员对全书进行了审阅,并提出了许多宝贵的修改建议;国防工业出版社,蔡镭、陶喜海等同志对本书的出版给予了很大帮助和支持。叶景峰、胡云、钱航等同志对本书作了大量绘图工作。在此谨向为本书出版做出贡献的同志们表示衷心的感谢。

本书内容新颖、覆盖面广,不仅系统地阐述了准分子激光及应用相关的理论和技术,而且还包含了作者及所在课题组多年的研究成果。本书是从事准分子激光及应用研究科技人员的基础性、前沿性参考书,也可供相关专业的教师和研究生阅读。书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

刘晶儒

2009年4月

目 录

Contents

第 1 章 绪论	1
1.1 准分子和准分子激光.....	1
1.1.1 准分子	1
1.1.2 准分子激光	1
1.2 准分子激光的发现和发展	2
1.2.1 准分子激光的发现	2
1.2.2 放电泵浦准分子激光器的发展	3
1.2.3 电子束泵浦准分子激光器的发展	5
1.3 准分子能级结构和光谱特性	9
参考文献	11
 第 2 章 放电泵浦准分子激光器	13
2.1 气体放电物理基础	13
2.1.1 气体放电的形成及特点	13
2.1.2 气体放电的基本理论	16
2.2 放电泵浦源关键技术	19
2.2.1 高气压下均匀稳定的辉光放电技术	19
2.2.2 阻抗匹配技术	23
2.3 准分子激光注入锁定放大技术	24

2.3.1	注入锁定理论	25
2.3.2	注入锁定技术及应用	28
2.4	几种典型的放电泵浦准分子激光器	31
2.4.1	紫外预电离准分子激光器	31
2.4.2	X射线预电离准分子激光器	33
2.4.3	电子束控制放电准分子激光器	34
2.5	放电泵浦准分子激光动力学	35
2.5.1	等离子体动力学	35
2.5.2	化学/激光动力学	37
	参考文献	40
第3章	电子束泵浦准分子激光器	42
3.1	强流相对论电子束加速器	42
3.1.1	Marx 发生器型电子束加速器	43
3.1.2	直线变压器型电子束加速器	50
3.2	大面积均匀电子束的产生和传输	52
3.2.1	强流相对论电子束的产生	52
3.2.2	大面积均匀电子束的产生条件	54
3.2.3	电子束的传输——膨胀、箍缩、旋转和剪切	55
3.3	电子束在气体介质中的能量沉积	58
3.3.1	电子束在气体中能量沉积的基本理论	58
3.3.2	电子束能量沉积测量方法	60
3.4	横向泵浦和径向泵浦技术	61
3.4.1	横向电子束泵浦准分子激光器	62
3.4.2	径向电子束泵浦准分子激光器	64
3.5	重复频率电子束泵浦技术	66
3.5.1	重频脉冲功率源	67
3.5.2	高效率、长寿命真空二极管	69
3.5.3	气体循环与冷却	73
3.6	电子束泵浦准分子激光动力学	74

3.6.1 激发态 KrF^* 准分子的形成	75
3.6.2 激发态 KrF^* 准分子的猝灭	76
3.6.3 受激辐射的吸收	77
3.6.4 反应速率方程	77
参考文献	79

第4章 光泵浦准分子激光器	81
4.1 概述	81
4.2 XeF 分子能级及荧光光谱	82
4.3 光泵浦源技术	84
4.3.1 光泵浦源发展概述	84
4.3.2 表面放电的类型和基本原理	87
4.3.3 表面放电机理	89
4.3.4 泵浦源结构及放电特性	94
4.3.5 光泵浦源辐射能力	98
4.4 $\text{XeF}(\text{C}-\text{A})$ 激光特性实验研究	100
4.4.1 $\text{XeF}(\text{C}-\text{A})$ 激光器概述	100
4.4.2 $\text{XeF}(\text{C}-\text{A})$ 激光输出特性	101
4.4.3 双向光泵浦技术	105
4.4.4 重复频率技术	106
4.4.5 重复频率光泵浦大功率 $\text{XeF}(\text{C}-\text{A})$ 蓝绿激光器 ...	107
4.5 光泵浦 $\text{XeF}(\text{C}-\text{A})$ 准分子激光动力学	108
4.5.1 辐射输运	109
4.5.2 化学/激光反应动力学	111
参考文献	114

第5章 高功率准分子激光系统	116
5.1 高功率准分子激光 MOPA 系统	116
5.1.1 MOPA 系统的基本构成	116
5.1.2 MOPA 系统放大器的稳态理论	119

5.2	前端技术	127
5.2.1	脉冲压缩技术	127
5.2.2	改善光束质量技术	130
5.2.3	空间整形技术	132
5.3	光学角多路放大技术	133
5.3.1	光学角多路放大系统的构成	133
5.3.2	放大器	134
5.3.3	应用举例	136
5.4	准分子激光光束平滑技术	139
5.4.1	光束平滑及均匀辐照基本原理	139
5.4.2	光束平滑主要方法	140
5.5	非线性光学技术	149
5.5.1	后向喇曼脉冲压缩技术	149
5.5.2	前向多程喇曼压缩技术	151
5.5.3	喇曼组束净化技术	155
	参考文献	158
第 6 章	高亮度准分子激光系统	161
6.1	概述	161
6.2	紫外超短脉冲激光的产生	162
6.3	准分子激光超短脉冲放大技术	165
6.3.1	离轴放大技术	165
6.3.2	相干组束技术	168
6.3.3	紫外超短脉冲激光的聚焦技术	169
6.3.4	啁啾脉冲放大(CPA)技术	170
6.4	KrF 激光高亮度源技术	173
	参考文献	175
第 7 章	准分子激光在燃烧场诊断中的应用	176
7.1	概述	176

7.2 激光诱导荧光法	177
7.2.1 激光诱导荧光法基本原理	177
7.2.2 LIF 双线法测温原理	179
7.2.3 实验系统	180
7.2.4 火焰 OH 荧光谱及温度测量	182
7.3 自发喇曼散射法	184
7.3.1 自发喇曼散射基本原理	184
7.3.2 实验系统	185
7.3.3 主要组分及其浓度测量	186
7.3.4 温度测量	187
7.4 瑞利散射法	189
7.4.1 瑞利散射法测量燃烧场温度	189
7.4.2 分子过滤瑞利散射法测量燃烧场温度和密度 ...	191
7.5 相干反斯托克斯喇曼散射法	196
7.5.1 CARS 基本原理	197
7.5.2 CARS 测量系统	199
7.5.3 CARS 测温	201
参考文献	203
第 8 章 准分子激光淀积类金刚石薄膜	206
8.1 准分子激光淀积 DLC 薄膜实验装置	206
8.2 准分子激光淀积 DLC 薄膜机理	207
8.2.1 脉冲激光烧蚀淀积 DLC 薄膜主要物理过程	207
8.2.2 纳秒激光等离子体羽及其淀积 DLC 膜特性	209
8.2.3 飞秒激光等离子体羽及其淀积 DLC 膜特性	211
8.2.4 改善 DLC 薄膜性能探索研究	213
8.3 DLC 薄膜结构及光学性能	215
8.4 大面积宽波段 DLC 薄膜研制	218
8.4.1 提高 DLC 薄膜结合力技术	218
8.4.2 提高大尺寸 DLC 薄膜均匀性技术	220

参考文献	222
第 9 章 准分子激光在特种加工中的应用	223
9.1 激光的吸收与热扩散	223
9.2 准分子激光微细加工	225
9.3 准分子激光光刻	227
9.4 准分子激光打标	229
9.5 准分子激光表面清除处理	231
9.6 准分子激光眼科手术	232
参考文献	233

第 1 章

绪 论

1.1 准分子和准分子激光

1.1.1 准分子

仅在激发态存在的分子称为准分子,其英文名称 excimer 来源于 excited dimer,意为激发态的双原子分子。通常可分为稀有气体准分子(如 Ar_2^* 、 Kr_2^* 、 Xe_2^*)、卤素气体准分子(如 F_2^*)、稀有气体卤化物准分子(如 ArF^* 、 KrF^* 、 XeF^* 、 XeCl^* 、 KrCl^* 、 ArCl^*)、金属蒸气准分子(如 Na_2^* 、 Mg_2^* 、 Hg_2^*)等。另外,某些激光以激发态化合物分子(excited complex)为激光介质,也称这些三原子稀有气体卤化物分子(如 Ar_2Cl^* 、 Ar_2F^* 、 Kr_2F^* 、 Xe_2Cl^* 、 Xe_2F^* 等)为准分子。

1.1.2 准分子激光

准分子激光按介质性质分为稀有气体准分子激光、卤素气体准分子激光、稀有气体卤化物准分子激光、三原子准分子激光等;按泵浦方式分为放电泵浦准分子激光、电子束泵浦准分子激光、光

泵浦和核泵浦准分子激光等;按工作方式分为单脉冲高功率准分子激光和重复频率准分子激光等。准分子激光的辐射波长处于真空紫外到可见光波段,如图 1.1 所示。

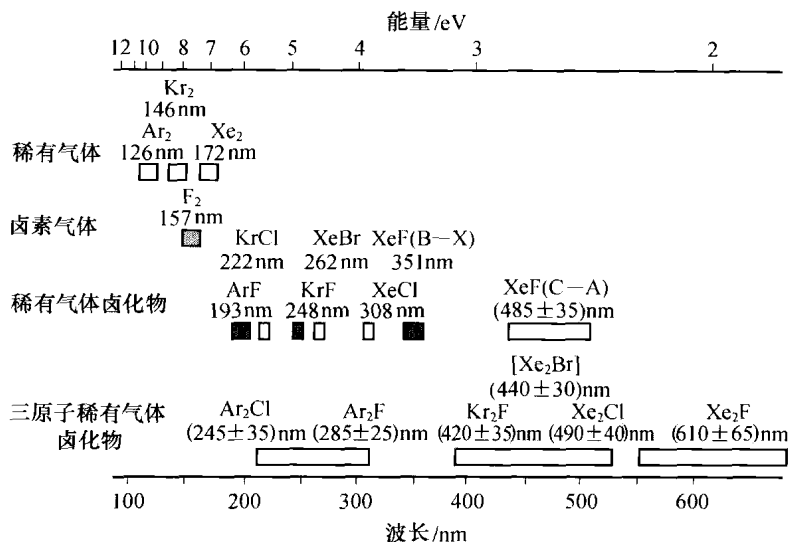


图 1.1 准分子激光辐射波长和谱宽

本书重点研究放电泵浦、电子束泵浦和光泵浦稀有气体卤化物(RGH)准分子激光等。

1.2 准分子激光的发现和发展

1.2.1 准分子激光的发现

早在 1960 年, F. G. Houtermannns 就从理论上预言, 仅在激发态存在的准分子是高效激光介质的候选者。

1970 年, 俄罗斯巴索夫等人在固体氙中成功地获得 172nm 紫外准分子 Xe₂^{*} 激光, 这是首次获得的准分子激光输出; 1972 年, 美国劳伦斯·里弗莫尔实验室用气相氙获得 Xe₂^{*} 激光振荡。

1974年,在美国圣路易斯召开的化学激光会议上,堪萨斯州 D. Setser 教授报告了氙的亚稳态和卤素反应得到 XeCl 准分子; 1975年,美国海军实验室(NRL) S. K. Seales 获得 XeBr 282nm 激光输出,美国阿符科公司的 J. J. Ewing 和 C. Bran 获得 XeF 351nm、KrF 248nm 和 XeCl 308nm 准分子激光输出。

由于军用和工业需求的牵引,以及脉冲功率技术发展的推动, 1975年—1976年,用电子束和放电泵浦的方法获得了几乎所有稀有气体卤化物准分子激光的输出,见表 1-1。

表 1-1 20 世纪 70 年代中期稀有气体卤化物
准分子激光的发现

发布时间	准分子类型	泵浦方式
1975 年 5 月 19 日	XeBr	电子束
1975 年 5 月 29 日	XeF	电子束
1975 年 6 月 17 日	KrF, XeCl	电子束
1975 年 9 月 18 日	XeF	放电
1975 年 12 月 22 日	KrF	放电
1976 年 7 月 7 日	XeCl	放电
1976 年 7 月 10 日	KrCl	放电
1976 年 7 月 26 日	ArF	放电
1976 年 11 月 22 日	ArCl	放电

1.2.2 放电泵浦准分子激光器的发展

放电泵浦准分子激光技术的发展经历了 30 多年曲折的路程。在 20 世纪 70 年代中期,人们普遍认为泵浦准分子激光需要高达 $10\text{MW}/\text{cm}^3$ 的功率密度和 10^6Pa 的气体压力,在这样的条件下产

生均匀放电很困难。为了解决这一问题,人们企图把 N_2 分子激光的高功率泵浦技术和 TEA CO_2 激光的预电离技术用于准分子激光,然而简单的结合并不奏效,在准分子激光介质中的放电仍然不均匀、不稳定和不可控。

人们从理论和实验上对预电离进行了大量研究,一开始认为,预电离所需的电子浓度为 $10^4/cm^3$,后来,考虑了放电前沿的影响、电子对卤素分子的分离附着反应、统计涨落等,直到 1991 年才从理论上得出预电离初始电子浓度应为 $10^9/cm^3$ 。于是从实验上产生了很多预电离方法,如紫外预电离(弧光放电、位垒放电、沿面放电等)、X 射线预电离、激光预电离等。

在高压气体放电中,即使有很好的预电离,也存在放电不稳定性,通常当放电电流不超过几安每平方厘米时,从阴极表面发射的电子较均匀,但典型的准分子激光放电电流超过几百安每平方厘米,导致等离子体成丝不稳定。为了达到“准稳定”,电流速率需上升至 $10^9 A/(cm^2 \cdot s)$ 。20 世纪 80 年代末,已经发展了产生高电流速率的技术,同时该技术也提高了激光器的总效率。

由于工业、医学、科研等应用的推动,高功率、高重频放电泵浦准分子激光器得到了快速发展。研制高功率放电泵浦准分子激光器的先驱者之一当属 T. S. Fahlen,他于 1978 年获得了 10W 准分子激光输出,1979 年达 55W,1980 年研制成功了 210W KrF 激光器,该激光器激活体积为 850L、重频为 1kHz,使用了 Blumlein 电路和 50m/s 的气体流动系统。20 世纪 80 年代中期,国际上许多国家竞相发展高功率准分子激光器。德国 Lambda Physik 公司在政府支持下,生产出 600Hz、215W XeCl 激光器;法国马赛流体力学所研制了重频大于 1kHz 的 XeCl 激光器,并重点研究气体激波效应的影响。80 年代后期,日本开始了千瓦级准分子激光的研制计划,欧洲尤里卡计划也支持研制输出功率达 1kW、重复率达 1kHz

的准分子激光器。目前,德国、美国、法国、日本等国家专门研制或生产不同种类商品化准分子激光器,其中,工业用激光器平均功率达几百瓦,重复频率几百赫兹。除了高重频准分子激光以外,俄罗斯、美国、加拿大、日本等国还分别研制了大能量、长脉宽的激光器,输出能量为 $10\text{J}\sim 50\text{J}$,脉宽为 $100\text{ns}\sim 200\text{ns}$ 。

1.2.3 电子束泵浦准分子激光器的发展

电子束泵浦准分子激光的发展得益于脉冲功率技术的不断进步和惯性约束聚变研究的牵引。1975年,卤化物准分子激光问世;1977年,美国 Maxwell 公司实现了 300J 的氟化氙激光输出;1981年,美国阿莫科实验室采用双向电子束泵浦实现了氟化氙激光的定标放大,获得了 5kJ 的能量输出;受到该结果的鼓舞,美国洛斯·阿拉莫斯国家实验室(LANL)从长波长 CO_2 激光驱动器转向短波长的准分子激光驱动器研究,并与西部研究公司(WRC,后改名为热电子技术公司,简称 TTC)合作,于1982年开始研制数千焦耳的 Aurora 氟化氙激光系统,其中包括预放(PA)、中放(IA)和末放(LAM)三个电子束泵浦大口径放大器,其中末放级光学口径为 $1\text{m}\times 1\text{m}$,1988年12月实现了系统集成和首次出光,输出指标为 $2.5\text{kJ}/5\text{ns}/96$ 束,成功验证了定标放大和光学角多路技术。但由于 Aurora 工作在窄带模式,在激光光束质量(特别是光束均匀性)上不太理想,从而限制了其物理应用。尽管如此,Aurora 作为准分子激光驱动器的首次尝试,所采用的定标放大、光学角多路、光束合成聚焦和光学自动准直等关键技术,为后续准分子激光驱动器研究提供了宝贵的经验和教训。

美国海军实验室(NRL)于20世纪80年代中期研制了 Nike 准分子激光装置(图1.2),以满足惯性约束聚变直接驱动靶物理研究的需要。该系统基于无阶梯诱导空间非相干光束平滑技术和光学