



全國高技术重点图书·激光技术领域

自由电子激光

廖钟耀 杨震华 主编

国防工业出版社

自由电子激光

惠钟锡 杨震华 主编

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

自由电子激光 / 惠钟锡, 杨震华主编. —北京: 国防工业出版社, 1995. 12

ISBN 7-118-01466-4

I. 自… II. ①惠… ②杨… III. 自由电子激光器-基本知识 IV. TN248.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 10732 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)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 14¼ 368 千字

1995 年 12 月第 1 版 1995 年 12 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1000 册 定价: 26.60 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

73.771
15

《全国高技术重点图书》

出版指导委员会

主 任:朱丽兰

副主任:刘 杲 卢鸣谷

委 员:(以姓氏笔划为序)

王大中	王为珍	王守武	牛田佳	卢鸣谷
叶培大	刘 仁	刘 杲	朱丽兰	孙宝寅
师昌绪	任新民	杨牧之	杨嘉墀	陈芳允
陈能宽	张兆祺	张钰珍	张效祥	罗见龙
周炳琨	欧阳莲	赵忠贤	顾孝诚	谈德颜
龚 刚	梁祥丰			

总干事:罗见龙 梁祥丰

《全国高技术重点图书·激光技术领域》

编审委员会

主任:陈能宽

委员:杜祥琬 余大光 于 敏 陈佳洱 刘 仁
王乃彦 史国成

《自由电子激光》编辑委员会

主 编 惠钟锡 杨震华
委 员 杨天录 周传明 梁 正 刘锡三 刘慰仁
 傅恩生 庄杰佳 吴瑞安
特约编审 周云翔

自由電子激光光彩奪目
应用研究深造造福人類

王淦昌

一九九五年
二月十五日

狠抓物理基础关键技术
发掘自由电子激光巨大
应用潜力

丁敏

一九九五.二.廿八

序

本书是激光高科技重点图书系列中的一部专著。

自由电子激光是以运动在外场中的相对论电子束为工作介质的新型相干光源。由于它在科学技术上具有诱人的诸多新颖特点和广阔的应用前景,美、欧和亚洲的不少国家十分重视对它的研究,并已取得了一系列高水平的成果,运行较好的自由电子激光器的应用演示研究上也有了实质性的进展。自由电子激光的研究在渡过了美国 SDI 计划期间的过热期之后,已进入了一个较为平稳的深化研究和发展应用的阶段。

我国科技工作从事自由电子激光研究已有了近十年的实践经验,几种类型自由电子激光的研究均取得了初步成功,对这一难度较高的研究项目的物理与技术问题有了较深切的体会。本书的撰写者正是来自全国各单位的参与国家高技术计划的自由电子激光领域的专家,本书以流畅的文字对自由电子激光的物理和技术问题作了全面的阐述,体现了理论与实验的结合,也凝结了作者自己的实践经验。因此,尽管已有几本自由电子激光的专著出版,本书却有自己的特色。它适合我国从事自由电子激光研究的科技工作者、大专院校从事激光教学的教师和研究生参考。

可以预期,本书的出版将有益于推动我国自由电子激光研究的进一步发展。

杜泽琨

一九九五年一月

前 言

自由电子激光器是一类新兴的激光器,它和常规的激光器件相比,不同之处在于前者是由相对论电子束通过摇摆器时产生的“受激辐射”;而常规的激光则是由某些原子和分子的特定能级之间产生粒子数反转时发出的受激辐射。

自由电子激光与常规的激光器相比,有它一系列的突出优点:波长连续可调,而且覆盖范围宽;输出功率高;有精细而且可塑的脉冲结构;光束质量好等。因此它在科学研究、医学、工业、军事等领域内具有广泛的潜在应用前景。自 70 年代问世以来,就受到国际上一些著名研究单位的重视,有相当一部分科技工作者致力于自由电子激光的研究工作。经过世界各国科学工作者近 20 年来的共同努力,无论是理论研究还是实验技术,都取得了一系列令世人瞩目的重要成果。自由电子激光这株激光家族中的新秀已成为当今世界高科技领域中的一部分。

但是自由电子激光的发展时间毕竟不长,有许多技术问题还需要科学家们去研究解决。在应用方面虽然潜力很大,但实际应用仍在研究发展之中。体积大造价高,也限制了它一系列优点的发挥。存在的这些问题,归根结底是由于自由电子激光技术十分复杂所引起的。自由电子激光涉及高亮度加速器技术,精密的摇摆器制造技术,复杂的光学谐振腔技术,高分辨率的诊断技术,复杂的光学谐振腔技术,高分辨率的诊断技术,以及自动控制和检测系统等等。所有的这些方面,自由电子激光都对之提出了新的挑战。例如电子加速器技术已有近 60 年的发展历史,基础理论和工程技术都已相当成熟。由于自由电子激光的崛起,对加速器又提出了新的要求:束流强度要高,能散度和发射散度要小,束流脉冲要稳定,占空

因子要大,体积要小型化等等。自由电子激光新的技术要求,促进了电子加速器技术的发展。例如光阴极微波电子枪技术,超导谐振腔技术和加速器小型化技术等,在自由电子激光的推动下有了进一步的发展。

我国自由电子激光研究起步于 80 年代中期,特别是国家高技术研究计划实施之后,重点支持和组织了基础物理问题和关键技术的研究,有力地推动了自由电子激光研究工作的开展,并取得了一系列的进展。中红外波段的北京自由电子激光装置(BFEL),于 1993 年成功地实现了饱和振荡实验,其水平处于亚洲领先地位;毫米波段曙光一号(SG-1)自由电子激光放大器输出功率也于 1994 年超过了 100MW;电磁波泵浦的自由电子激光和契伦柯夫自由电子激光取得了良好的实验结果;L 波段注入器和光阴极超导注入器的研究及数值模拟等方面也取得了较好的成绩。上述计划的实施和成绩的取得,为我国自由电子激光的研究打下了良好的基础,并培养了一大批技术人才,积累了宝贵的经验,缩短了与发达国家之间的差距,在世界自由电子激光大家庭中占有一席之地。

本书的撰写和出版,也是我国自由电子激光取得的一系列成果之一。作者们是上述各项计划的直接参与者,撰写的内容也都与各自的研究课题直接相关。通过近 10 年来的研究工作,发挥集体的力量,编写了《自由电子激光》一书。我们希望通过本书的出版,能使更多的学者、工程技术人员、研究生和有志于从事自由电子激光研究的读者,参加到自由电子激光研究的行列中来,把我们的自由电子激光事业推向一个新的高度。由于自由电子激光技术发展迅速,同时也由于编者的水平有限,因此本书中一定存在一些缺点和不足之处,请读者批评指正。

本书共分九章。第一章引论,由惠钟锡同志撰写;第二章自由电子激光的基础理论,由杨震华同志撰写;第三章自由电子激光的基本类型,由赵春农、梁正、杨震华同志撰写,最后由梁正和杨震华两同志统编;第四章电子加速器,由刘慰仁、胡克松、张寿云、陈银宝、翟兴林、赵夔、金玉明、胡玉民等同志撰写,最后由刘慰仁同志

负责统编;第五章束流传输系统,由刘锡三同志撰写;第六章摇摆器,由刘庆想、周传明同志撰写;第七章光学谐振腔,由傅恩生同志撰写;第八章电子束诊断,由刘锡三同志撰写;第九章自由电子激光应用,由周云翔、杨中海、卢波等同志撰写,最后由周云翔同志统编。全书由杨震华同志负责统编,最后由编委扩大会议审核定稿。

本书是在高技术丛书编委会领导下完成的。在编写过程中,国家高技术激光领域专家组和自由电子激光专题专家组,给予了直接的领导和帮助,编者在此表示衷心的感谢。编者十分感谢国内外著名科学家、中国科学院院士王淦昌教授和于敏教授,为本书挥毫题词。编者同时要感谢中国工程物理研究院原副院长俞大光教授,他十分认真地审阅了全部书稿,并提出了大量的修改意见。编者还要感谢国家高技术激光领域首席科学家、中国工程物理研究院副院长杜祥琬教授为本书撰写了序。本书得以及时出版与国防工业出版社的大力支持和具体帮助是分不开的,此外陈湘涛同志为本书精心绘制了部分插图,编者在此一并向他们表示感谢。

惠钟锡 杨震华

一九九五年一月

内 容 简 介

本书是介绍自由电子激光有关技术的一本科学专著,书中力图以清晰的物理概念和简洁的数学推导说明自由电子激光的一系列重要物理问题。全书内容包括:自由电子激光的发展历史、国内外研究动态、自由电子激光的基本理论和工作原理;并主要介绍了自由电子激光器的各个主要组成部件,包括电子加速器、束流传输、摇摆器和光学谐振腔等技术;同时还介绍了电子束诊断技术及自由电子激光在医学、材料科学、生物化学、物理和军事科学等方面的应用前景。

本书适用于从事自由电子激光的科学工作者、工程技术人员、教师、研究生和其他对自由电子激光感兴趣的读者。

ISBN 7-118-01466-4/T · 12

定价:26.60 元

目 录

第一章 引 论

§ 1.1 自由电子激光的新颖特性	1
1.1.1 激光输出功率高	1
1.1.2 激光波长连续可调	2
1.1.3 光束质量好	3
1.1.4 精细而稳定的时间结构	3
1.1.5 激光效率高	4
§ 1.2 自由电子激光发展简史	4
§ 1.3 自由电子激光国内外研究动态	7
1.3.1 提高电子束品质	12
1.3.2 采用电子储存环进行超短波长自由电子激光研究	16
1.3.3 改进摇摆器设计	18
1.3.4 光学谐振腔的研究	19
1.3.5 自由电子激光应用技术的研究	19
1.3.6 其它方面的研究工作	19

第二章 自由电子激光的基础理论

§ 2.1 自由电子激光的一维理论	22
2.1.1 自由电子激光的共振关系	22
2.1.2 摇摆器的能量耦合功能	26
2.1.3 电子在摇摆器中的自发辐射	29
2.1.4 在摇摆器中电子和激光的相互作用	35
2.1.5 自由电子激光的小讯号增益	41

2.1.6	自由电子激光的指数增益	48
2.1.7	自由电子激光的功率饱和现象	50
2.1.8	自由电子激光中的边带不稳定性	57
2.1.9	边带不稳定性 KMR 理论	60
§ 2.2	自由电子激光的三维理论	65
2.2.1	自由电子的回旋加速(Betatron)运动	66
2.2.2	电子束的发射度和亮度	69
2.2.3	电子束的包络方程	73
2.2.4	电子的纵向运动方程	78
2.2.5	等效能散度	80
2.2.6	旁轴波动方程	82
2.2.7	自由电子激光中的光导现象	87
2.2.8	带波导管的自由电子激光	94
§ 2.3	自由电子激光中的集体效应	97
2.3.1	集体效应的线性理论	97
2.3.2	线性理论的色散关系	100
2.3.3	不同工作区的固有效率	103

第三章 自由电子激光器的基本类型

§ 3.1	引言	107
§ 3.2	康普顿型自由电子激光	107
3.2.1	一般叙述	107
3.2.2	北京自由电子激光器	108
§ 3.3	喇曼型自由电子激光	116
3.3.1	喇曼型自由电子激光判据	116
3.3.2	电子激光装置(ELF)	117
3.3.3	ELF 的主要实验结果	120
3.3.4	曙光一号自由电子激光实验	120
§ 3.4	光学速调管的基本思想	122
§ 3.5	储存环自由电子激光	126
3.5.1	引言	126

3.5.2 储存环自由电子激光物理	127
3.5.3 储存环自由电子激光平均输出功率	131
§ 3.6 电磁波泵浦自由电子激光	133
§ 3.7 契伦柯夫自由电子激光	137
§ 3.8 其它类型自由电子激光	142
3.8.1 无摇摆器自由电子激光(CARM)	142
3.8.2 气体加载自由电子激光	143
3.8.3 史密斯-伯塞尔效应自由电子激光	145

第四章 电子加速器

§ 4.1 引言	148
§ 4.2 脉冲线型电子加速器	149
§ 4.3 感应直线加速器	155
4.3.1 感应直线加速器的原理	155
4.3.2 感应直线加速器的基本组成	157
§ 4.4 射频直线加速器	165
4.4.1 概述	165
4.4.2 直线加速器中的加速电场	168
4.4.3 射频直线加速器中粒子的相运动	170
4.4.4 强流微脉冲电子束团的获取	176
4.4.5 光阴极注入器	181
4.4.6 射频超导直线加速器	188
§ 4.5 电子储存环	193
4.5.1 电子储存环概述	193
4.5.2 电子储存环的粒子动力学	195
4.5.3 辐射阻尼	202
4.5.4 束团尺寸	203
4.5.5 束流寿命	204
4.5.6 束流不稳定性	206
§ 4.6 电子回旋加速器	208
4.6.1 电子回旋加速器	208

4.6.2 跑道式电子回旋加速器	209
4.6.3 回旋加速器在自由电子激光中的应用	210
§ 4.7 静电加速器	211

第五章 束流传输系统

§ 5.1 引言	216
§ 5.2 束流的聚焦和传输特性	218
5.2.1 束流的相空间描述	218
5.2.2 束流的传输矩阵	222
5.2.3 束流的特性矩阵	228
§ 5.3 束流的偏转和消色散	232
§ 5.4 等时性偏转系统	237
§ 5.5 四极磁透镜、二极磁铁、聚焦线圈的原理及结构	238
5.5.1 四极磁透镜	238
5.5.2 二极偏转磁铁	244
5.5.3 螺线管线圈	253
§ 5.6 传输系统中的空间电荷效应和尾场效应	259
5.6.1 线性空间电荷效应	259
5.6.2 尾场效应	263
§ 5.7 运行中的束线系统	266

第六章 摇 摆 器

§ 6.1 引言	273
§ 6.2 电磁铁摇摆器	275
6.2.1 磁感应场分布	275
6.2.2 横向磁感应场的非均性	277
6.2.3 最大磁感应场设计	279
6.2.4 电磁铁摇摆器的馈电系统	282
§ 6.3 永磁摇摆器	285

§ 6.4	混合型摇摆器	293
§ 6.5	螺旋摇摆器	299
§ 6.6	微型摇摆器	304
6.6.1	混合型微型摇摆器	305
6.6.2	脉冲式双绕螺旋线微型摇摆器	306
6.6.3	带状电子束的微型摇摆器	307
§ 6.7	摇摆器磁感应场测量	307
6.7.1	霍尔片磁测量系统	308
6.7.2	脉冲线磁感应场测量技术	310
6.7.3	脉冲线磁感应场测量技术在摇摆器中的应用	312

第七章 光学谐振腔

§ 7.1	引言	316
§ 7.2	光学腔的作用	317
§ 7.3	光学谐振腔的分类	318
§ 7.4	光学谐振腔理论基础	320
§ 7.5	数值迭代法	322
§ 7.6	稳定球面光学腔	328
7.6.1	本征模	328
7.6.2	等价共焦腔理论	330
7.6.3	近共心腔在自由电子激光器光学腔中的应用	333
§ 7.7	孔耦合光学腔	335
§ 7.8	布鲁斯特角平板耦合输出光学腔	342
§ 7.9	非稳定光学腔	344
§ 7.10	环形光学腔	347
§ 7.11	新颖的光学腔设计	352

第八章 电子束诊断

§ 8.1	引言	357
-------	----------	-----