



全国高技术重点图书·激光技术领域

X射线激光

彭恩民 王世绩 主编
彭恩民 王世绩 邱玉波 李家明 编著
赵 勃 马国彬 王建国

国防工业出版社

73·771

656

X 射线 激 光

	彭惠民	王世绩		主编
彭惠民	王世绩	邱玉波	李家明	编著
赵 钧	马国彬	王建国		

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

X 射线激光/彭惠民等主编. —北京:国防工业出版社,
1997. 11

(全国高技术重点图书·激光技术领域)

ISBN 7-118-01814-7

I. X… II. 彭… III. X 射线-激光 N. 0434.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 17374 号

0040/21

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 18 467 千字

1997 年 11 月第 1 版 1997 年 11 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1000 册 定价: 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

《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 干福熹

刘 仁 王乃彦 史国成

探奧秘常懋奪新鍥而不舍
显成效促应用只爭朝夕

王淦昌



一九九七年六月十日

序

自 1960 年发明激光,就不断有人设想可能的物理机制尝试推向 XUV 波段 X 射线激光。X 射线激光介质是高能量密度非储能介质,需要极高的泵浦功率密度(功率密度大致与波长 3~4 次方成反比)创造条件。20 多年过去了,X 射线激光都未能在实验室实现。70 年代初以来,由于惯性束聚变研究的推动,强激光技术和激光等离子体物理持续发展,到 80 年代初,用强激光作为高功率密度泵浦源的条件已经具备,1984 年实现了实验室 X 射线激光。

X 射线波长短,穿透力较强,X 射线激光比其它 X 射线源亮度高、相干性好、频带窄、脉冲短,是具有很高应用价值的 X 射线源。它可以提供表面物理、团簇物理、高密度等离子体物理等高空间和时间分辨的精密诊断手段。特别当波长短到水窗波段(2.3~4.5nm),是活细胞动态全息照相和显微照相的唯一光源,意义尤为重大。

自 1984 年至今,十几年间,作为应用基础研究,X 射线激光取得了多方面进展。已经实现了毛细管放电泵浦的 VUV 激光;不断探索提高相对论电子束亮度的技术途径,希望拓展自由电子激光到 X 射线波段。但是这十几年来的进展主要仍然在激光泵浦等离子体 X 射线激光。探索了多种 X 射线激光机制;探索了由纳秒级到几十皮秒级,以至亚皮秒级多种脉冲泵浦方式;X 射线激光已经达到饱和输出;光束品质有了大幅度提高;已经推进到水窗波段;X 射线激光效率也有一定程度提高。在 X 射线激光光源取得进展的同时,其它 X 射线光学部件(反射镜、透镜、分光镜等)也有进展,开始了应用演示。这是蓬勃发展的高科技领域。

虽然有一些显著进展,但总体上,X 射线激光研究仍处在初级

9810028

阶段。以效率为例,一般在 10^{-6} 量级的相当低水平。高功率激光单位能量造价是高的,X射线激光发展前途是宽广的。新的激励机制有待探索发明。每种机制最佳工作状态是什么?有哪些不利物理因素需要控制?哪些有利物理因素需要发展?如何最有效地创造条件?这些内因和外因,相关的现象和规律,诸多的复杂物理因素,我们还知之不多。一般地说,实验上物理诊断还作得不够细致。理论和数值模拟和实验工作互相配合,发挥了一定作用,但是一般地说,计算中可调参数比较多,还有重要的物理因素未能抓住,许多实验现象难于解释。这些方面,比起同属强激光高温高密度等离子体领域的惯性约束聚变恐怕相差甚远。X射线激光是发现发明的广阔研究领域。

90年代,惯性约束聚变步入新的发展高潮。无论是强激光器件的性能和单位能量造价,无论是等离子体诊断技术和激光等离子体理论,无论是数值模拟计算方法和精度,都将有大发展。这些对于等离子体X射线激光研究提供了良好条件,X射线激光研究会进入富有创造性精密研究阶段。

这本书作者们大都从事多年X射线激光研究,有比较丰富的经验。这是一本比较全面论述等离子体X射线激光的书。包含了从诊断实验到理论比较系统的介绍。不但详细地论述了现有的各种X射线激光机理,而且为了方便读者,概括地介绍了原子物理有关知识、激光等离子体基础知识和一些强场物理有关基础知识。使进入这一领域的初学者掌握全貌,也是在这一研究领域工作的研究人员一本很好参考书。

于敏

1997年6月

前 言

X 射线激光是目前已经演示的波长最短的激光。目前它的工作介质是等离子体,所以也称为等离子体 X 射线激光。它的主要特点是:①属于放大的自发辐射;②需要高的泵浦功率密度;③是实验室可以得到的瞬间亮度最高、脉冲持续时间短、频带窄、波长最短的相干光源。X 射线激光具有的特点使得它可以用于需要高的时间和空间分辨的微观快过程研究领域,例如活的细胞和亚细胞结构的 X 射线全息成像,激光等离子体密度构形诊断等。

X 射线激光是一门新兴的综合学科,与它相关的研究内容包括强辐射场下高温、高密度、高离化度和高激发态的原子物理,靶的加热(主要指激光等离子体相互作用)和流体力学,电离和反转动力学,X 射线在等离子体中的传播,等离子体状态和增益过程的实验诊断,强场物理和非线性光学等。

X 射线激光是发展中的学科。自从激光问世之后,人们就立即想把它波长向短波长的 X 射线谱区推进,但是直到 1984 年软 X 射线激光才在实验室明确无误地演示成功,随后 X 射线激光得到迅速发展。这些得益于 60 年代到 80 年代的技术进步。例如 70 年代起各大国为进行激光核聚变研究相继建立一批大功率激光器,为 X 射线激光研究提供了最基本的必要的驱动(泵浦)源,用于激光聚变的激光等离子体相互作用理论和实验手段则是 X 射线激光研究的基础。同步加速器技术为 X 射线全息术和显微术及 X 射线光学部件研究提供了高亮度 X 射线源,制造 X 射线光学部件的能力则直接来自半导体电子学的微加工技术。80 年代激光技术特别是超短脉冲技术得到飞快地发展,推动 X 射线激光研究往强场短脉冲方向发展。随着短脉冲多脉冲泵浦技术的应用,毛细管

放电技术的应用, X 射线激光的能量转换效率有了提高。但是和传统的激光器相比 X 射线激光的能量转换效率仍然很低, 因此研制低价高效率的、小型台式的 X 射线激光器是推广应用前必须逐步解决的问题。

我国 X 射线激光研究在国家 863 高技术计划实施之后得到有力地支持和推动, X 射线激光专题有关研究课题是在国家高技术激光领域专家组直接支持和指导下进行的。在 90 年代取得了一系列激动人心的进展。在研究过程中理论与实验相结合, 联合攻关, 利用我国已有的中等规模激光器为驱动源, 迅速使我国 X 射线激光研究达到国际先进水平。

本书努力反映 X 射线激光研究的基本内容和进展, 并尽可能地介绍我国科学家的研究成果。本书提供了大量的参考文献, 有助于读者系统和深入地进行进一步的研究。书中的大部分插图都是引自公开发表的文献和专著。我们在此对原作者致谢。

本书共分八章。第一章引言, 由彭惠民撰写; 第二章原子物理基础, 由邱玉波撰写; 第三章强场物理与 X 射线激光, 由李家明和王建国撰写; 第四章激光产生的等离子体, 由彭惠民撰写; 第五章 X 射线激光机理, 由彭惠民撰写; 第六章 X 射线激光增益实验和诊断技术, 由王世绩和马国彬撰写; 第七章非线性光学方法在短波长相干光产生中的应用, 由赵钧撰写; 第八章 X 射线激光应用前景, 由彭惠民撰写。全书由彭惠民负责统编。

本书是在高技术丛书编委会领导下完成。在编写过程中国家高技术激光领域专家组首席专家陈能宽教授和杜祥琬教授, 专家组和 X 射线激光专题专家组, 给予了直接的领导和帮助, 激光领域专家组办公室给予大力协助。张毓泉研究员十分认真地审阅了书稿, 提出许多修改意见。编写过程中常铁强、陈式刚、张国平、张钧、方泉玉、王骐、叶春福和李敬宏等同志分别审阅部分稿件并提出了宝贵意见。编者在此向他们表示感谢。

中科院院士于敏教授是我国 X 射线激光事业的开拓者和指导者, 为本书撰写了序, 指明了 X 射线激光研究的特点和方向。编

者在此表示感谢。

中科院院士王淦昌教授是我国 863 计划的倡导者之一,十分关心 X 射线激光的研究,为本书挥毫题词。在王淦昌教授九十寿辰之际,我们仅以此书献给全身心关注我国科学技术发展的王老师。

由于有关 X 射线激光的科学技术发展迅速,加之编者的水平有限,因此本书一定存在一些缺点和不足之处,请读者批评指正。

彭惠民 王世绩

1997 年 6 月

内 容 简 介

本书是介绍有关 X 射线激光的一本学术专著。全书内容包括: X 射线激光的发展历史, 国内外研究动态, X 射线激光研究所需的原子物理基础, 激光等离子体相互作用, X 射线激光的基本原理, X 射线激光实验和诊断技术, 与 X 射线激光有关的强场物理和非线性光学, 以及 X 射线激光的应用前景等。

本书适用于高等院校理工科学生、研究生、教师、从事 X 射线激光和激光等离子体相互作用的科学工作者、工程技术人员和其他对这方面感兴趣的读者。

ISBN 7-118-01814-7/TN · 287

定价: 38.00 元

目 录

第一章 引言	(1)
第一节 X 射线激光发展概况	(1)
一、什么是 X 射线激光.....	(1)
二、发展概况	(2)
第二节 等离子体 X 射线激光的基本特性	(11)
一、放大的自发辐射	(11)
二、高的泵浦功率密度	(12)
三、准直、单色、相干和高亮度的 X 射线源.....	(13)
第三节 等离子体 X 射线激光研究的主要内容	(19)
一、高温稠密等离子体中的原子物理	(19)
二、靶的加热和流体动力学	(21)
三、电离和反转动力学-泵浦机理	(23)
四、X 射线激光实验和诊断	(26)
五、非线性光学方法与 X 射线激光.....	(28)
六、X 射线激光的应用前景	(29)
参考文献	(31)
第二章 原子物理基础	(40)
第一节 单电子原子	(41)
一、薛定谔方程	(41)
二、有心力场问题	(42)
三、径向方程的解析解	(43)
四、能级和波长	(44)
五、相对论修正	(45)
第二节 多电子原子	(47)

一、薛定谔方程	(47)
二、矩阵方法	(48)
三、有心力场模型	(48)
四、乘积波函数	(49)
五、行列式波函数, 反对称化	(50)
六、反对称波函数的耦合	(51)
七、电子组态	(52)
八、等效电子, 闭合子壳层	(53)
九、等效电子的允许 LS 项	(53)
十、有多个开壳层的组态	(54)
十一、多电子原子的能级结构	(54)
十二、关于能级结构的几个例子	(57)
第三节 电子-原子碰撞理论	(63)
一、引言	(63)
二、平面波 Born 近似(PWBA)	(64)
三、库仑波 Born 近似(CBA)	(65)
四、扭曲波 Born 近似(DWBA)	(66)
五、广义振子强度(GOS)	(67)
六、电子碰撞激发截面	(68)
七、双电子复合过程	(70)
八、电子碰撞电离	(71)
第四节 光电和辐射线跃迁简介	(76)
一、光电离和辐射俘获过程	(76)
二、自发辐射和谱线吸收过程, 即束缚 \rightleftharpoons 束缚过程	(77)
参考文献	(79)
第三章 强场中的原子物理	(81)
第一节 强场原子物理的有关现象	(81)
一、阈上电离现象	(83)
二、多次电离现象	(87)
三、高次谐波的产生	(89)
第二节 强场原子物理的非微扰理论	(93)

一、Kramers-Henneberger 非微扰理论	(93)
二、非微扰理论对强场现象的分析	(95)
三、对非微扰理论的补充	(102)
参考文献	(107)
第四章 激光产生的等离子体	(111)
第一节 激光产生的等离子体的基本物理图像	(111)
一、基本物理图像	(111)
二、靶的烧蚀和冕区物理状态	(115)
第二节 电磁波在等离子体中的传播	(118)
一、等离子体中的光波波动方程	(120)
二、等离子体中折射指数和它与吸收的关系	(124)
三、非均匀等离子体中方程的解	(125)
四、斜入射光波在非均匀等离子体中的传播	(129)
第三节 激光在等离子体中的碰撞吸收和共振吸收	(132)
一、逆韧致吸收	(133)
二、共振吸收	(143)
第四节 等离子体中的波-波相互作用	(146)
一、参量不稳定性	(146)
二、有质动力	(148)
三、参量衰变不稳定性	(151)
四、受激喇曼散射(SRS)	(153)
五、受激布里渊散射(SBS)	(156)
六、双等离子体衰变	(158)
七、成丝和自聚焦	(159)
第五节 等离子体波加热——波-粒子相互作用	(161)
一、碰撞阻尼	(161)
二、朗道阻尼	(162)
三、电子等离子体波的破碎	(163)
第六节 电子能量输运	(165)
一、经典输运	(166)
二、影响电子输运的一些物理因素	(169)

三、理论与实验问题	(171)
第七节 等离子体中辐射输运简介	(171)
一、辐射与靶相互作用的主要物理过程	(172)
二、光子的福克-普朗克方程	(174)
三、辐射输运方程	(177)
第八节 等离子体状态的理论模拟	(178)
一、描述靶流体力学运动的辐射流体力学方程组	(179)
二、平均原子模型的原子布居数速率方程组	(182)
三、多群扩散近似下的辐射输运方程组	(187)
四、入射激光能量沉积方程	(188)
五、状态方程和比热方程	(190)
六、有关数值模拟的现状和问题	(190)
参考文献	(195)
第五章 X 射线激光机理	(201)
第一节 放大的自发辐射下的增益系数	(201)
一、线形函数	(201)
二、增益系数	(202)
三、增益饱和	(205)
四、放大函数	(207)
第二节 电离平衡和反转动理学	(209)
第三节 X 射线束在等离子体中的传播	(213)
一、折射效应	(213)
二、捕获(Trapping)效应和逃逸概率	(226)
第四节 离子的电子碰撞激发	(234)
一、基本原理	(234)
二、类氦离子的电子碰撞激发	(239)
三、类镍离子的电子碰撞激发	(247)
四、0-1 反常	(250)
五、多脉冲泵浦	(250)
六、毛细管放电泵浦	(253)
第五节 离子的电子碰撞复合(三体复合)	(256)

一、基本原理	(256)
二、类氢和类锂离子的速率方程	(261)
三、能够产生 X 射线激光的等离子体状态	(264)
四、进入复合软 X 射线激光目标区的途径	(270)
第六节 共振光激发机制	(277)
一、基本原理	(277)
二、反转动力学	(280)
第七节 其它机制简介	(285)
一、离子的光电离	(285)
二、光电子泵浦	(290)
三、原子-离子电荷交换	(292)
第八节 与强场有关的 X 射线激光机理	(293)
一、强光场下复合 X 射线激光	(293)
二、强光场下电子碰撞激发机制	(308)
三、强光场下团簇 X 射线辐射放大	(315)
参考文献	(327)

第六章 X 射线激光增益实验及诊断技术 (337)

第一节 驱动源和线聚焦技术	(339)
一、驱动源概述	(339)
二、驱动源特性参数测量	(341)
三、线聚焦技术	(350)
第二节 X 射线激光实验常用诊断仪器	(360)
一、罗兰圆光栅谱仪	(360)
二、变栅距平焦场光栅谱仪	(362)
三、透射式光栅谱仪	(366)
四、空间分辨及高谱分辨光栅谱仪	(368)
五、X 射线晶体谱仪	(370)
六、针孔及双狭缝相机	(376)
七、微通道板及 X 射线扫描相机	(377)
八、菲涅耳波带板	(379)
九、探针光及诊断系统	(381)

第三节 X 射线激光增益实验	(384)
一、实验前的准备	(384)
二、增益测量及增益饱和	(393)
三、电子碰撞激发方案	(396)
四、三体复合机制	(419)
五、毛细管放电软 X 射线激光	(425)
六、强激光场驱动软 X 射线实验	(431)
七、增益区状态诊断	(436)
八、X 射线激光特性诊断	(446)
九、软 X 射线多层膜反射镜	(452)
参考文献	(466)

第七章 非线性光学方法在短波长相干光产生中的

应用	(477)
第一节 非线性光学极化率	(477)
第二节 电磁波在非线性介质中的传播	(482)
第三节 产生 VUV 及 XUV 相干光的非线性光学 方法	(485)
一、光束聚焦和相位匹配	(488)
二、非线性极化率的共振增强	(491)
三、频率变换获得短波长相干光的实验条件	(493)
四、各种竞争过程对转换效率的限制	(497)
第四节 高次谐波发生	(498)
一、实验研究	(500)
二、理论研究	(506)
三、高次谐波的控制	(510)
第五节 无粒子数反转激光	(513)
参考文献	(520)

第八章 X 射线激光的应用前景

第一节 生物细胞的 X 射线激光成像	(523)
一、成像要素	(523)