



X射线激光

〔美〕 R.C. 埃尔顿 著

科学出版社

X 射线激光

[美]R.C. 埃尔顿 著

范品忠 译

科学出版社

1996

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书系国际 X 射线激光研究领域中第一本专著,全书共七章,分别介绍了 X 射线区激光性质,短波长激光原理,等离子体离子激发泵浦,电子俘获泵浦,原子和离子的电离泵浦,其它非等离子体介质 X 射线激光及 X 射线激光的应用和展望。

本书可供从事激光研究与应用的科研人员及高等院校有关专业师生参考。

Raymond C. Elton

X-RAY LASERS

Copyright © 1990 by Academic Press, Inc.

X 射 线 激 光

[美]R. C. 埃尔顿 著

范品忠 译

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

*

1996 年 1 月第 一 版 开本:850×1168 1/32

1996 年 1 月第一次印刷 印张:10

印数:1 000 字数:257 000

ISBN 7-03-004951-9/TN·177

定价:27.00 元

73.711
8

中文版序言

我对本书和 X 射线激光研究在中国引起很大的兴趣感到很高兴. 我希望本书对那些正投入激光科学和发展挑战性前沿的人们将是一本有用的参考书和入门书. 我特别感谢徐至展院士和范品忠教授在翻译工作中所做的努力, 也对那些孜孜不倦辛勤工作使之得以出版的人们表示感谢.

X 射线激光研究正处在蓬勃发展和激动人心的新时期. 激射波长越来越短, 已接近穿透能力强的 γ 射线区; 输出功率越来越高, 也越来越有用. 就后者而言, 正是由于 X 射线激光的低效率 (10^{-5} — 10^{-6}) 和高费用, 延缓了小型台式 X 射线激光器件的发展. 随着毛细管放电以高 10—100 倍的效率在 46.9nm 波长上给人深刻印象的增益试验, 去年在提高 X 射线激光效率方面前进了一大步 (见本书第二章 2.4.2 节中关于毛细管放电的介绍和最近 J. J. Rocca 等人的论文: *Phys. Rev. Lett.* **73**, 1994). 沿着这个方向进一步发展, 或许采用行波泵浦 (这已在本书多处介绍, 见索引) 的放电与短脉冲激光驱动器相结合, 这一新技术可望在获得更短波长和继续提高效率方面取得进展.

希望本书及其中译本对 X 射线激光研究的国际合作有所裨益.

R. C. 埃尔顿

1995 年 3 月于马里兰大学

序 言

自从激光发明以来,将其波长向 X 射线区扩展的工作已取得巨大进步. 在过去五年里,实验成果尤为突出. 但是目前还没有一本概括介绍 X 射线激光基本原理并详细论述 X 射线激光使研究人员感兴趣的参考书. 本书打算填补这一空白,希望它能成为刚涉足本领域的研究人员的入门书,又能成为熟悉本领域的激光专家的方便参考书. 本书不打算评述该领域的全部研究活动,也不包罗以前和现在所有研究资料. 有关文献综述,读者可参考内容广泛的 1976 年文章^[1]和 1984 年概述^[2]. 至于本领域一些具体情况的综述将在本书中适当的地方介绍.

以高温等离子体为工作介质而产生的 X 射线激光是本书描述的重点. 高温等离子体是迄今最为成功的 X 射线激光介质. 目前也有少量关于其它介质的研究,有些工作有实际意义,有些目前则仅仅是推测. 这些将在第六章讨论.

本书中, $12.4 \text{ \AA}$ (10^{-8} cm) 以上的波长以埃 ($\text{\AA}$) 为单位. 这不仅是 X 射线光谱区的习惯,在 X 射线激光文献中广泛使用,而且使量值简洁. 光子能量 ($h\nu$) 用于能量在 1 keV 以上的短波长区. 这里,近似的转换公式是 $\lambda[\text{\AA}] = 12400/h\nu[\text{eV}]$. 红外驱动激光的波长以 μm 为单位. 其它量则采用 cgs 单位制.

第一章回顾了 X 射线激光研究的一些重要定义和经验. 关于 X 射线激光设计、运行和诊断的基本原理在第二章中描述. 第三至第五章着重介绍等离子体 X 射线激光的具体泵浦方法. 在分析每种有希望的方案之后是有关现有实验的介绍. 第六章叙述了几种目前正在研究(不同于等离子体)的其它方法. 第七章归纳了有关材料,并将 X 射线激光与其它高亮度光源进行比较. 这一章还介绍了许多潜在的应用. 第七章之后是符号表以及每个符号首次出

现的页码.

作者感谢海军研究实验室、劳伦斯·里弗莫尔国家实验室、国家标准和技术研究所和马里兰大学以及其它单位的许多同事,感谢他们的合作与贡献;特别感谢 H. R. Griem 教授,他给予作者在等离子体光谱学方面的极好训练,并在 X 射线激光研究领域给予经常的鼓励和合作. 在此,对作者的妻子和家人在本书写作过程中的耐心、鼓励和理解表示特别的感谢.

参 考 文 献

- [1] R. W. Waynant and R. C. Elton, *Proc. IEEE* **64**, 1059(1976).
- [2] P. L. Hagelstein, in "Atomic Physics 9", R. S. Van Dyck, Jr. , and E. N. Fortson, eds. , p. 382(World Scientific Publ. Co. ,Ltd. ,Singapore,1984).

目 录

中文版序言

序言

第一章 绪论	1
1.1 X 射线区的激光	1
1.1.1 背景	1
1.1.2 数据基础	1
1.1.3 激射介质	2
1.1.4 外形结构	2
1.1.5 发展阶段	3
1.2 X 射线区的专用定义和光学特性	4
1.2.1 波长范围	4
1.2.2 窗口和滤片	6
1.2.3 反射器	8
参考文献	13
第二章 短波长激光原理	14
2.1 工作模式	14
2.1.1 Dicke 超辐射	14
2.1.2 超荧光	15
2.1.3 放大的自发发射(ASE)	15
2.2 增益表述和要求	16
2.2.1 持续时间和定义	16
2.2.2 ASE 系统的增益	18
2.2.3 损耗腔中的增益	28
2.2.4 等离子体效应	32

2.2.5	所需泵浦功率	51
2.3	等离子体 X 射线激光增益分析技术	53
2.3.1	简单的稳态解析模型	53
2.3.2	速率方程数值分析	57
2.4	泵浦模式和装置	61
2.4.1	对泵浦脉冲长度的要求	61
2.4.2	泵浦装置	61
2.5	增益测量方法	68
2.5.1	粒子数反转和低增益	68
2.5.2	激射长度变化	70
2.5.3	正交强度测量	71
2.5.4	负吸收测量	72
2.5.5	用反射器作多通放大	73
2.6	测量仪器	74
2.6.1	真空 UV 成象装置	75
2.6.2	XUV 光栅谱仪	81
2.6.3	晶体谱仪	83
2.6.4	X 射线和 XUV 探测	84
2.6.5	时间分辨	85
2.6.6	X 射线强度校正	90
	参考文献	92
第三章	等离子体离子激发泵浦	99
3.1	电子碰撞激发泵浦分析	99
3.1.1	一般关系	100
3.1.2	介稳能级的单极激发	102
3.2	电子碰撞激发泵浦实验	109
3.2.1	真空 UV 分子激光	109
3.2.2	毛细管放电真空 UV 离子激射	111
3.2.3	XUV 等离子体离子激光	111
3.3	光激发泵浦分析	124

3.3.1	类氢离子分析	125
3.3.2	增益的实际判据(和限制)	129
3.4	光激发泵浦实验	139
3.4.1	真空 UV 实验	139
3.4.2	多普勒位移	141
	参考文献	141
第四章	电子俘获泵浦	146
4.1	电子碰撞复合泵浦分析	146
4.1.1	能级结构	146
4.1.2	类氢离子分析	147
4.1.3	推广至非类氢离子	153
4.2	复合实验:碰撞电离等离子体	154
4.2.1	实验条件	154
4.2.2	短脉冲加热、膨胀、冷却,激光等离子体	155
4.2.3	约束在螺线管中的激光等离子体	158
4.3	光电离等离子体复合泵浦分析	160
4.3.1	两步泵浦	161
4.3.2	类氢等离子体光电离	162
4.3.3	类氦等离子体光电离	164
4.4	复合实验:光电离等离子体	166
4.4.1	光电离/复合泵浦类氦离子	166
4.4.2	用 C^{4+} 发射引发的 Na^{8+} 光电离/复合泵浦	168
4.5	双电子复合泵浦分析	168
4.5.1	过程	168
4.5.2	分析	170
4.6	电荷转移泵浦分析	173
4.6.1	原子-离子电荷转移	173
4.6.2	分析	175
4.6.3	离子-离子电荷转移	177
4.7	电荷转移泵浦实验	178

4.7.1	等离子体/壁垒相互作用实验	178
4.7.2	与碳靶碰撞的高能 Ar^+ 束	179
	参考文献	179
第五章	原子和离子的电离泵浦	183
5.1	电子碰撞电离泵浦分析	183
5.1.1	过程	183
5.1.2	举例:类钠离子的电离	183
5.2	离子-离子碰撞泵浦分析	185
5.3	光电离泵浦分析	186
5.3.1	有关过程	186
5.3.2	钠和类钠离子激励	187
5.3.3	其它光电离方案	192
5.4	直接光电离泵浦实验	194
5.4.1	中性钠光电离	194
5.4.2	中性氖光电离	194
5.5	俄歇衰减泵浦分析	194
5.5.1	下能级空穴的产生	195
5.5.2	上下能级粒子数和粒子数反转	195
5.5.3	上能级俄歇位移产生连续波运转	196
5.6	俄歇衰减泵浦实验	196
5.6.1	俄歇衰减泵浦原子的真空 UV 有腔激励	196
5.6.2	$\text{Cu K}\alpha$ 实验中的俄歇效应	197
	参考文献	197
第六章	其它方法	199
6.1	谐波产生和频率混合	199
6.1.1	引言	199
6.1.2	非线性极化	201
6.1.3	特殊的工作模式	201
6.1.4	X 射线参量转换	208
6.1.5	小结	208

6.2	自由电子激光(FEL)	209
6.2.1	基本原理	209
6.2.2	现状	212
6.2.3	小结	215
6.3	γ 射线激光(“Grasers”)	215
6.3.1	引言	215
6.3.2	γ 射线激光增益分析	216
6.3.3	工作模式	220
6.3.4	小结	226
6.4	其它方法	226
6.4.1	晶体 X 射线激射	226
6.4.2	自由电子受激跃迁	229
6.4.3	受激康普顿散射	230
6.4.4	相对论性离子的光泵	231
	参考文献	231
第七章	总结、应用和展望	236
7.1	等离子体激光泵浦总结	236
7.1.1	有希望的泵浦方案总结	236
7.1.2	效率	238
7.1.3	新方案的设计准则	239
7.2	X 射线激光的规划特性	240
7.2.1	结构	241
7.2.2	波长	242
7.2.3	增益介质	242
7.2.4	尺寸	242
7.2.5	准直和光束发散	242
7.2.6	输出功率	243
7.2.7	脉冲长度	243
7.2.8	线宽	243
7.2.9	相干性	243

7.3 与其它 XUV 光源的比较	245
7.3.1 电子碰撞光源	247
7.3.2 同步辐射光源	247
7.3.3 高密度等离子体 X 射线光源	250
7.4 应用	252
7.4.1 引言	252
7.4.2 科学	253
7.4.3 技术	259
7.4.4 生物学	263
7.4.5 射线医学	267
7.4.6 小结	268
7.5 展望	269
参考文献	269
符号表	273
索引	281

第一章 绪 论

1.1 X 射线区的激光

1.1.1 背景

从 60 年代初期最初的几篇关于激光的论文开始,就有人预期激射作用最终将扩展到 X 射线区.论文作者们认识到这种扩展所面临的任务非常艰巨.因为当时认为:(1)增益随波长的变短很快下降;(2)腔反射镜效率很低;(3)所需的泵浦功率很高.当时也担心激射必定以表征传统 $K\alpha$ 跃迁衰减速率的飞秒(10^{-15}s)时间标尺而自终止.那时候,如此短的脉冲实际上不可能达到.

然而,后来人们认识到,利用高离化原子外壳层“光学”跃迁能做到准连续波(CW)运行,它仅受到泵浦脉冲持续时间的限制.在这种模式中,下能态密度的迅速排空维持了粒子数反转.这一般通过到基态的辐射衰减来实现.这个概念从低电离阶原子成功的可见和近紫外激光外推发展而来.在过去 20 年中,这方面已取得了巨大的进展,有希望最终推进到用较低电离阶的离子,甚至中性原子的内壳层跃迁,获得更短的激光波长.

1.1.2 数据基础

幸运的是,早期的天体物理和等离子体研究已积累了大量关于高阶离子的原子结构和辐射特性的资料.30 年代以真空火花开始的实验室模拟实验增加了这方面的知识.磁约束受控热核聚变实验工作,特别是杂质特性和诊断的研究提供了大量这方面的数据和经验.然而,70 年代初开始的惯性约束聚变计划的发展,提供了有关理论、数据和最终使 X 射线激射实验成功所需的高功率密

度.

这种与中性原子极相似的高剥离离子属于一个特定的等电子数序,它们具有某些共同的特性.其中最易外推的是剥离到只剩一个电子的原子类氢序列,其外推公式特别简单和精确.因此这是一个在X射线激光设计中很有用的序列,本书将经常用它作举例说明.有二个、三个或更多个剩余电子的其它序列叫做类氦、类锂等电子数序,等等.

一种特定的离子通常都用剥离的电子数目来标记,如 C^{5+} 是指核电荷 $Z=6$ 的类氢碳离子.本书大部分将采用这一惯例.光谱通常用罗马数字作标记,从标记中性原子的 I 开始.这种标记在天体物理文献中用得特别多.因此,类氢碳的光谱也可记作 C VI.用它来标记高阶重离子显得有些不方便.每当需要用这种符号时,两种符号都给出,以免混乱.

1.1.3 激射介质

离子和它们被剥离的电子在局部区域形成(全中性)等离子体.有时候称它为物质的第四态.等离子体状态主要由电子和离子的温度和密度以及大小和形状确定.这些参数一般分别用 T_e, T_i, N_e 和 N_i 表示.通常 $T_e = T_i$, 但不总是 $T_e = T_i$. 对于纯单组分等离子体, N_e 和 N_i 通过离子的电荷建立关系.例如对核电荷为 Z 的类氢离子, $N_e = (Z-1)N_i$, 在第三至第五章的分析中将广泛采用这一关系.

1.1.4 外形结构

大多数可见和红外激光工作于法布里-珀罗式反射腔的轴线上.泵浦激射介质达到粒子数密度反转,受激发射形成沿轴线的放大,每次通过介质,强度按指数增加.用高效腔可得到高度的准直和相干性.

在X射线区,能获得的腔镜反射率相当低.因此,迄今的X射线激光主要基于非相干的自发发射通过介质的放大(叫做 ASE).

沿一特殊方向单次通过介质时,发生这种放大(更完整的 ASE 定义将在2.2.2节介绍).这要求介质增益系数比那些有高效谐振腔的常见激光高约100倍.有趣的是,状态合适的介质原则上在任何方向都能产生激光作用.这是关于某些天体可能正在辐射 ASE 假设的基础.

然而,如果希望有较大的增益,必须确定一个有利的方向.例如在一个球形等离子体中,可以用低功率振荡器输出的外部驱动光束来实现.有时把这称之为 MOPA(主振荡器-功率放大器)概念.然而,其它一些限制通常要求激射介质的几何形状为棒状.这些限制包括能获得的驱动功率以及与下能级抽空跃迁不透明性有关的再吸收.这些限制将在第二章详细讨论.

1.1.5 发展阶段

图1-1是描绘 X 射线激光从概念到应用合乎逻辑的多个发展阶段的流程图.数字模拟紧密地与实验工作同步进行.此种发展阶

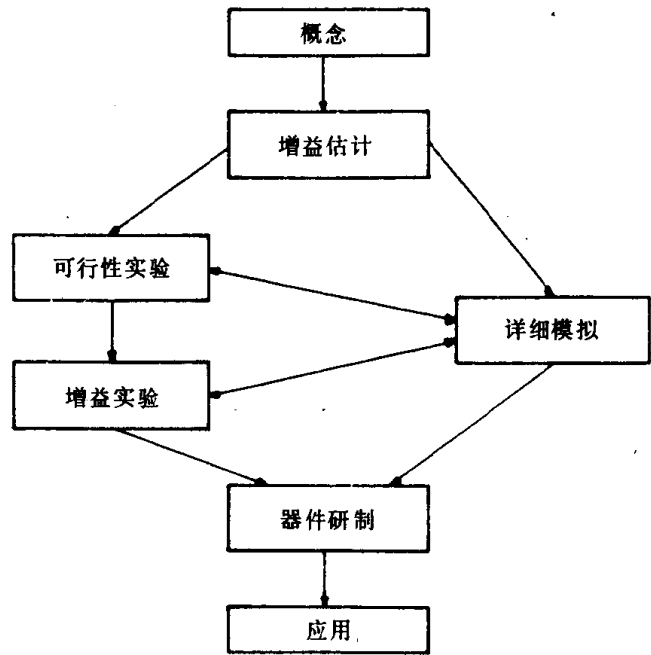


图1-1 X射线激光研究和发展流程图

段将会在全书中看到.

我们可以用一些相当普遍的例子来说明流程图的含义. 70年代出现的许多想法集中在方框图的上半部. 80年代发展到增益实验阶段, 因为当时已能获得合适的等离子体介质. 就产生有用的短波长相干辐射而言, 用长波激光产生的谐波已达到可行性实验阶段. 另一方面, 自由电子 X 射线和核 γ 射线激光目前尚处于概念阶段. 其它如固态晶体 X 射线激射、受激电子俘获和康普顿散射目前也处于概念阶段.

1.2 X 射线区的专用定义和光学特性

在叙述本书的主题以前, 弄懂感兴趣的短波长光谱区特有的某些定义和特性很重要. 这些定义对于 X 射线激光的讨论必不可少. 我们先定义波长范围, 接着讨论某些短波长光谱区材料的特有光学特性. 这些概念对于理解该光谱区有关激光所特有的复杂问题很重要. 光谱测量仪器, 如光栅和探测器, 则在 2.6 节中介绍.

1.2.1 波长范围

从 Samson^[1]某些早期建议开始, 我们可将短于 2000 Å 的紫外波长分成若干稍许重叠的小波段. 尽管这种划分边界是不严格的, 但在 X 射线激光、等离子体和天体物理学领域, 这些划分一向为大家所公认. 这些在图 1-2 中说明.

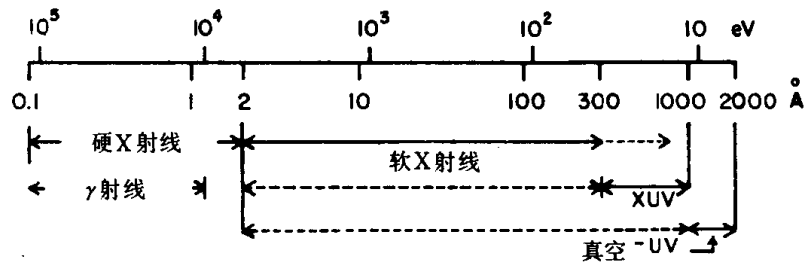


图 1-2 X 射线激光有关的波长和光子能量范围和名称

1. 真空紫外区

从2000 Å直至2 Å的宽广范围叫做真空紫外,或“真空-UV”,或“VUV”波长区. 对于这个光谱区的辐射,大气吸收十分严重. 仅在真空中,或长波端在较轻的稀有气体中,该光谱区的辐射才有可能传播. 由于短于1000 Å波长区已另有名称(见后面),“真空-UV”已成为特指1000—2000 Å光谱范围,在这光谱区可以用传统的光学元件. 这就解释了为什么在图1-2中用虚线和实线一起来表示真空-UV 波长区.

2. XUV(或 EUV)区

小于1000 Å,特别是300—1000 Å波长范围,被命名为极紫外或“XUV”波长区(或 EUV 区). XUV 似乎比 EUV 更合适,或许是因为该波长区与软 X 射线区相邻的缘故.

3. X 射线区

整个“X 射线”区包括从700 Å至0.1 Å波长范围^[2,3],但习惯上认为它从 XUV 区端部大约300 Å开始. X 射线区进一步分成波长在约2—300 Å“软”X 射线区和波长更短的“硬”X 射线区. 在软 X 射线区,波长一般用 Å 表示. 全书都沿用这一习惯,因为 X 射线激光目前都工作在这个波长范围. 通过 $\lambda = c/\nu$ 作波长-频率转换, c 为真空中的光速. 对于硬 X 射线,习惯上以更实用的 keV 为单位的 photons 能量 $h\nu$ 来标记. 若波长以 Å 为单位,其转换关系为

$$h\nu = \frac{12.4}{\lambda} \text{ keV} \quad (1-1)$$

因此在硬 X 射线区, $\lambda = 0.1—2 \text{ Å}$ 等价于光子能量 $h\nu = 6.2—120 \text{ keV}$ (如图1-2的顶部标尺所示).

4. 硬 X 射线和 γ 射线区

放射性核发射的能量在10keV 到250MeV 宽广范围里的光子