

自由电子激光器

[美] T. C. 马歇尔 著

科学出版社



73.7718
468
1

自由电子激光器

〔美〕T. C. 马歇尔 著

尹元昭 译

科学出版社

1993

9310001

9310001

(京)新登字 092 号

038/30
内 容 简 介

本书是关于自由电子激光器的第一本专著,系统而全面地介绍了自由电子激光器的基本知识、主要理论和实验结果以及可能的应用。

本书既可供从事激光、等离子体、高能加速器、电磁场和微波器件等专业的科技工作者参考,也可供高等院校有关专业的教师和高年级学生阅读。

THOMAS C. MARSHALL
FREE-ELECTRON LASERS
Macmillan Publishing Company, 1985

自由电子激光器

[美] T. C. 马歇尔 著

尹元昭 译

责任编辑 杨家福 李 红

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100707

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

*

1993 年 3 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/32

1993 年 3 月第一次印刷 印张: 7 3/8

字数: 1-1 100 字数: 156 000

ISBN 7-03-003073-7/TB · 99

定价: 7.50 元

1000188

前 言

何时将一个新发展的研究领域总结成书,以向世人介绍,并无成规可循。人们常常年复一年地等下去,直到该领域稳定下来,或是待关键性实验有了结果。对于我们这些在大学工作的人来说,这种决定很简单,或者在休假年*中写,或者根本不写。本书就是这种抉择的产物。

回忆上一休假年以前,作者正进行现在称为拉曼自由电子激光器以及切连科夫自由电子激光器的早期研究。当时,斯坦福大学有关实验成功的第一批报告正开始在科技界流传。7年过去了,自由电子激光器的研制不仅取得巨大进展,而且充裕的时间使人得以筛选出那些重要的、经得起时间检验的结果。看来撰写一本关于自由电子激光器基础的书,现在正是时候。在下一个7年中,首次熟悉本领域的读者当中也许有人会对本书第二版的内容作出补充。

现在撰写本书一个更重要的原因是科技界有越来越多的人想更多地了解自由电子激光器,他们需要介乎新闻和专业论文,甚至评述文章之类的读物。我相信,从事自由电子激光器的研究人员也同样需要这类书。它不必将所有的内容全部纳入一篇简洁的论文(本书就不是这样),而是以较为简单的方式介绍有关信息,以便吸引新人参加自由电子激光器的研究或应用。我们的目的是向目前从事有关研究,但却不能方便地跟踪技术文献的科研人员介绍自由电子激光器。读者将

* 美国大学教授每工作7年可有一年休假。——译者注

会弄清自由电子激光器之所以引起人们的兴趣，不仅是它能作为未来的一种军事武器，而且在频谱的所有波段对科学都将有许多贡献。

本书不是自由电子激光器知识的全面论著或百科全书，其目的也不是使读者读过本书就能制造自由电子激光器。我们把本书内容压缩在受过物理学或相关学科受过学士水平以上教育的人在较短的时间内就可以读完的范围内。涉及较为深奥的问题时，我们主要进行物理内容的讨论，而避开冗长的数学推导。因为我们相信，即使没有足够的篇幅但以统一严格的方式进行数学证明，仍然能使读者了解事情的本质。书末有全书引用的文献目录，可供读者了解详情，它还粗略地勾画出有关作者的工作。本书部分内容取自1983年春作者在哥伦比亚大学讲授“高能密度物理学”的讲义。

每年一度的自由电子激光器研讨会对促进这一领域的发展具有重要意义，我曾参加过其中的几次。我们非常感谢这些会议的发起者，会议论文集对本书的写作也极有帮助。作者对许多同事为本书提供插图、表格、启发和建议表示感谢。对于那些曾经推动自由电子激光器研制和发展的人们，本书则可能是关于他们的工作报道的一本有趣的“剪贴”。

全书均采用GS单位制*。

* 本书在附录中给出GS单位制与SI单位制换算表。——译者注

符 号 表

A	磁矢势
$a_{\parallel}$	$e E_{\parallel} / k_{\parallel} m c^2$
$a_{\perp}$	$e B_{\perp} / k_{\perp} m c^2$
B_0	导引磁场(轴向)
$B_w, B_{\perp}$	波荡器场振幅
B_s	散射电磁波的磁场
b_w	$e B_{\perp} / m c^2$
c	光速
d	间距, 二极管间距
e	电子电荷
$e_{\parallel}$	$e E_{\parallel} / m c^2$
E_s	散射电磁波的电场
f	充填因子
g, G	自由电子激光器增益(G , 二波功率增益; g , 增长率)
h	普朗克常量
I_b	电子束电流
J	电流密度
k_0	波荡器波数, $2\pi/l_0$
k_s	散射波波数, $2\pi/\lambda_s$
k_r	惰波波数
l_0	波荡器周期

l_b	电子群聚长度
L	波荡器长度
L_s	谐振腔长度
L_b	群聚团间的距离
L_R	瑞利长度
m	电子质量
M	电磁波在谐振腔中来回反射的次数
n	电子密度
N	波荡器周期数
p	整数
P	正则动量或正则角动量
q	整数
Q	谐振腔品质因数
r_0	经典电子半径, e^2/mc^2
r_b	电子束半径
r_c	电子的回旋半径
R	几何半径(例如镜子, 漂移管)
s	滑移因子
t	时间
T	周期
u	速度分量
v	速度分量
$v_{\perp}$	抖动速度振幅; $v_{\perp 0}$ 稳态横向速度分量
v_T	热速度
V	电位
w_0	光束腰
x, y	横向坐标

z	纵向或轴向坐标
β	v/c
$\beta_{\parallel}$	沿轴运动, $v_{\parallel}/c$
$\beta_{\perp}$	垂直于轴运动, $v_{\perp}/c$
γ	$(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$
β_r	谐振速度参量
γ_r	谐振能量因子
$\Delta\gamma/\gamma$	电子能量的相对变化
$\delta\gamma/\gamma$	归一化的电子能量或动量分散
Γ	空间增长率
ε	发射度
η	效率
θ	对于自由电子激光器轴的夹角
Θ	无量纲自由电子激光器参量(第四章)
λ	波长
λ_D	德拜波长
$\nu_{l,i}$	电磁波或静电波能量的损耗率
ν	巴克尔参量
μ	折射率
τ	时间参量
ϕ	光波的相位角
ψ	电子在波荡器中运动的相位角
ω	角频率
ω_0	波荡器频率, $k_0\beta c$ 或 $\omega_0 = \gamma k_0\beta c$
ω_{p0}	等离子体频率, $(4\pi ne^2/m)^{1/2}$
ω_b	弹跳频率
ω_p	不变等离子体频率, $(4\pi ne^2/\gamma m)^{1/2}$

- Ω_i 弹跳距离的倒数
 Ω_0 导引场中的回旋频率, eB_0/mc
 $\Omega_{\perp}$ 波荡器场的回旋频率, $eB_{\perp}/mc$

目 录

前言	iii
符号表	vii
第一章 自由电子激光器概述	1
1.1 定义和对比	1
1.2 技术	5
1.3 组成部分	7
1.4 应用	12
1.5 工作范围和分类	17
1.6 历史回顾(1950—1980)	18
第二章 基本概念	23
2.1 引言	23
2.2 简单波荡器中单电子的轨道运动	24
2.3 相对论多普勒频移	26
2.4 自发辐射	32
2.5 受激散射	35
2.6 电子空间电荷效应	39
第三章 二波自由电子激光器理论	46
3.1 引言	46
3.2 直线加速器模型	47
3.3 自由电子激光器中的波-电子相互作用	49
3.4 不均匀波荡器效应	64
3.5 瞬态效应: 衰减和起动	71
第四章 稠密电子束效应理论	77
4.1 引言	77

4.2	参量放大器模型	78
4.3	行波流体模型	89
4.4	电子速度分散效应	96
4.5	广义单摆方程	100
第五章	电子轨道运动及其作用	104
5.1	引言	104
5.2	电子束平衡	105
5.3	双线螺旋波荡器	108
5.4	其它类型的波荡器	114
5.5	非均匀展宽根源	118
第六章	电子运动和慢波自由电子激光器理论	129
6.1	引言	129
6.2	作为行波放大器的自由电子激光器	130
6.3	自由电子激光器和电子回旋的结合	137
6.4	慢波自由电子激光器	140
第七章	长波长自由电子激光器实验	147
7.1	引言	147
7.2	加速器	148
7.3	拉曼自由电子激光器	151
7.4	混合型自由电子激光器	167
第八章	二波自由电子激光器实验	172
8.1	引言	172
8.2	加速器	173
8.3	采用均匀波荡器的实验	180
8.4	存储环自由电子激光器	185
8.5	二级自由电子激光器	191
8.6	用不均匀波荡器提高效率	195
8.7	采用电子回旋加速器的自由电子激光器	202
后记		204

附录.....	206
文献目录.....	207
汉英名词对照索引.....	216

第一章 自由电子激光器概述

1.1 定义和对比

用相对论电子束产生从厘米波到可见光相干辐射的研究正日益深入。这种研究可理解为是从磁控管开始，经过发明速调管和行波管等器件的过程的延伸。这个发展过程在各类激光器蓬勃出现的时期(1960—1970年)曾经中断，但现在已经恢复。在过去的10年中，电子回旋微波激射器($\lambda = 1\text{cm} - 1\text{mm}$)发展迅速，而最近自由电子激光器(λ 为1mm到小于 $0.5\mu\text{m}$ 之间)也飞快地发展起来。本书的目的就是对自由电子激光器作一系统性介绍，并对其物理内容作一综合评述。

自由电子激光器(Free Electron Laser)是用相对论电子束经受激发射放大短波长辐射的器件。我们将以解释本定义作为本书的开端。

严格地说，自由电子激光器中的电子并不“自由”，因为电子处在使其产生辐射的磁力作用下。然而此电子又是“自由”的，因为它不像在常规激光器中那样被束缚在原子中。自由电子激光辐射通常在电子经过称为“波荡器”或“摆动器”的磁场装置时发生。在波荡器中，电子被迫沿周期振荡的空间轨道运动。波荡器可以是双线螺旋绕组产生的螺旋磁场，该场引导电子沿近似螺旋的轨道行进；也可以是由一组极性交替的磁体产生的“线极化”磁场。另一方面，波荡器也可以是静

电场装置,甚至是一种高强度的光波。自由电子激光器通常在真空中工作,但当附近有介质时,切连柯夫效应(电子通过介质的速度大于光在该介质中的速度)可能起重要作用。有些器件,如利用史密斯-珀塞尔效应(电子在光栅前通过时产生辐射)的 Orotron 管和利用电子的螺旋运动但没有波荡器的器件(回旋管或回旋微波激射器之类)则是自由电子激光器的近亲。在所有自由电子激光器中,我们不仅研究自发辐射或噪声辐射,而且研究能释放大功率的感应发射过程。

图 1.1 是美国斯坦福大学的 Madey 及其同事在 1977 年运转的典范自由电子激光器的结构示意图。这是一台振荡器,由一对镜子组成法布里-珀罗谐振腔。波荡器有 N 个周期,每个周期长 l_0 cm,总长度为 $L = Nl_0$ cm,置于两镜之间。对于选定的束能和腔长等,该器件产生的相干辐射波长按下列近似关系取决于电子能量和波荡器周期:

$$\lambda_r = \frac{l_0}{2\gamma_H^2} \quad (1.1)$$

式中 λ_r 是辐射波长, $\gamma_H = (1 - v_H^2/c^2)^{-1/2}$ 是相对论因子, v_H 是电子沿自由电子激光器轴的速度。总因子 $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ 和电子动能 W 的关系为 $\gamma = (0.51 + W)/0.51$, 这里 W 的单位是 MV。方程(1.1)是自由电子激光器的关系式,有时称为“谐振关系”。如果该器件是自由电子激光器,其辐射频率通常和 $2\gamma_H^2$ 成正比, $2\gamma_H^2$ 则近似等于 $(1 - v_H/c)^{-1}$ 。因为波荡器周期一般约为 1cm,如 γ_H 约为 10,即电子能量约为 5—10MV,辐射波长则处在红外波段。所以我们在与相对论情况打交道。

“激光器”一词和利用原子或分子中某些受激能级的器件有关,也可普遍地理解为任何短波长或光波的相干辐射源。是

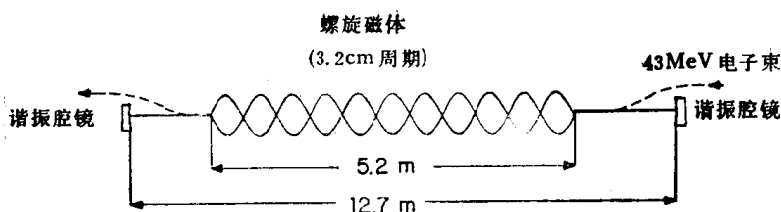


图 1.1 Deacon 等人的自由电子激光振荡器(1977). 除波荡器外,还用导引磁场使电子束按规定路线绕过镜子

采用光学或准光学技术, 还是采用适于微波或微波激射器件的导波或谐振结构, 可作为“短”波长和“长”波长之间的界线。如用整数表示, 该界线的波长约为 $1000\mu\text{m}$, 这将是本书讨论的自由电子激光器技术的长波限。自由电子激光波长范围超过可见光区, 也许还能进入软 X 射线波段。任何自由电子激光器的可调谐范围都受到电子加速器可调范围的制约, 但可以预期, 大约在今后 10 年内, 自由电子激光器能在波长方面继续开拓而设计无需重大改变。从图 1.2 可见, 不同类

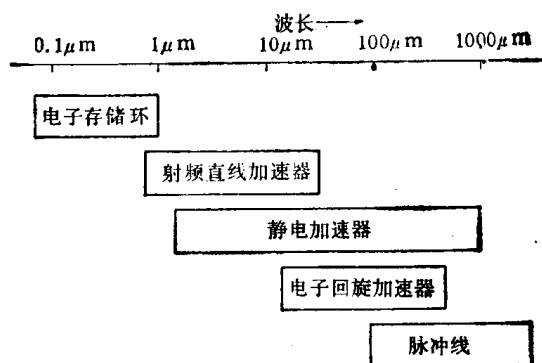


图 1.2 自由电子激光波长范围和加速器技术的应用范围

型的加速器如何用于在不同频段工作的自由电子激光器，以及自由电子激光技术如何从加速器在过去 50 年的发展中受益。

自由电子激光器内部的相互作用性质不是局部的。在常规激光器中，如果密度和泵浦源是均匀的，则媒质的增益和原子所在的位置无关。而在自由电子激光器中，电子沿系统移动，发生群聚，还可能被波俘获。换句话说，其相互作用方式与上游的条件有关。因此其增益也和被放大电磁波的方向有关。

自由电子激光波长取决于外部参量——波荡器周期和电子束能量——而不是原子中确定的内部跃迁。这种调谐特点意味着自由电子激光器不适于做频率标准。自由电子激光系统有一定程度的相干性是由于电子在波荡器中进行 N 个周期的振荡运动。利用法布里-珀罗谐振腔的光反馈使自由电子激光器产生激光振荡可进一步改善其相干性。然而，自由电子激光辐射的相干性不如气体激光。

可用经典物理的方程和定律来描述自由电子激光器。因为自由电子激光器的波长使 $\hbar\omega/mc^2 \ll 1$ ，我们总是碰到每个电磁模中有许多光子的情况。这些情况对普通激光器也存在。然而后者的辐射来自量子力学过程，但自由电子激光器的辐射则可看作经典过程。和受激原子不同，电子不发生衰减，甚至当激励很弱时，电子也能进行多光子跃迁。迄今为止，因所述的问题中遇到的光子和电子数目极大，故自由电子激光器的量子力学描述还不重要，但利用量子模型能将问题阐述得更加清楚时，我们照例还是要采用。当自由电子激光器的工作扩展到紫外或软 X 射线波段时，这种情况会发生某些改变。

采用“激光器”一词不应误解为所有的激光器都一样，以致认为自由电子激光器并没有什么特别的新内容，不过是利用了一种独特的物质状态。尽管两者受激发射（对自由电子激光器则是受激散射）的机理相同，但其间却存在许多重大差异。改进自由电子激光器理论，并为作为我们思考基础的模型提供实验依据就花了好几年时间。本书并不想写下一组完整的方程，然后对每种情况导出特定的结果；这样做只有通过大量数值模拟才有可能。我们将从最简单的模型出发，随后依次完善，建立起这一主题的基本概念。

1.2 技 术

自由电子激光器为量子电子学（高强度相干光）技术和高能电子束及加速器技术提供连结的纽带。自由电子激光器是在激光器和加速器物理高度发展的时候应运而生的。现在已发展了 50 年的加速器技术可用来产生相干辐射，而经过 25 年左右发展的先进光学技术则可用来加速带电粒子。我们将介绍工作情况相反（受激吸收）的自由电子激光器如何把相干光能转变为电子动能。这表明可将自由电子激光器和与之相关的加速器紧密结合，用一台加速器激励波荡器中的相干辐射，又用这个辐射来加速另一电子束（图 1.3）。为了提高系统的总效率，还可利用一减速系统回收“用过的”电子能量。

加速器物理、等离子体物理和量子电子学等领域的一些理论有助于对自由电子激光器的基本了解。在某些加速器中，能量从射频场转移到电子运动的物理过程和自由电子激光器的波荡器中电子释放动能给电磁波的物理过程密切相关。

最近的实验表明，回收高能电子束的能量不仅切实可行，