



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中 外 物 理 学 精 品 书 系

引 进 系 列 · 67

同步辐射与自由电子激光 ——相干X射线产生原理

Synchrotron Radiation and Free-Electron Lasers: Principles of Coherent X-Ray Generation

[美]金光齐 (Kwang-Je Kim)

[美]黄志戎

著

[美]瑞安·林德伯格 (Ryan Lindberg)

黄森林 刘克新 译

黄志戎 审校



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

非 外 借



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中 外 物 理 学 精 品 书 系

引 进 系 列 · 6 7

同步辐射与自由电子激光 ——相干X射线产生原理

Synchrotron Radiation and Free-Electron Lasers: Principles of Coherent X-Ray Generation

[美]金光齐 (Kwang-Je Kim)

[美]黄志戎

著

[美]瑞安·林德伯格 (Ryan Lindberg)

黄森林 刘克新 译

黄志戎 审校



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

著作权合同登记号: 图字 01-2018-2307

图书在版编目 (CIP) 数据

同步辐射与自由电子激光: 相干 X 射线产生原理 / (美) 金光齐, (美) 黄志戎, (美) 瑞安·林德伯格著; 黄森林, 刘克新译. —北京: 北京大学出版社, 2018. 10

(中外物理学精品书系)

ISBN 978-7-301-29899-2

I. ①同… II. ①金… ②黄… ③瑞… ④黄… ⑤刘… III. ①X 射线 - 研究
IV. ①O434.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 210292 号

Synchrotron Radiation and Free-Electron Lasers: Principles of Coherent X-Ray Generation (ISBN 9781107162617) by Kwang-Je Kim, Zhirong Huang, Ryan Lindberg first published by Cambridge University Press 2017

All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press & Peking University Press 2018

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press and Peking University Press.

This edition is for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan Province) only.

此版本仅限在中华人民共和国 (不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区) 销售。

书 名 同步辐射与自由电子激光——相干 X 射线产生原理

TONGBU FUSHE YU ZIYOU DIANZI JIGUANG

著作责任者 [美] 金光齐 (Kwang-Je Kim) [美] 黄志戎 [美] 瑞安·林德伯格
(Ryan Lindberg) 著 黄森林 刘克新 译

责任编辑 刘啸

标准书号 ISBN 978-7-301-29899-2

出版发行 北京大学出版社

地 址 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址 <http://www.pup.cn> 新浪微博: @北京大学出版社

电子信箱 zpup@pup.cn

电 话 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62754271

印刷者 北京中科印刷有限公司

经 销 者 新华书店

730 毫米 × 980 毫米 16 开本 19.75 印张 376 千字

2018 年 10 月第 1 版 2018 年 10 月第 1 次印刷

定 价 99.00 元

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@puppkuedu.cn

图书如有印装质量问题, 请与出版部联系, 电话: 010-62756370

“中外物理学精品书系”

(二期)

编 委 会

主 任：王恩哥

副主任：夏建白

编 委：(按姓氏笔画排序，标*号者为执行编委)

丁 洪	王力军	王孝群	王 牧	王雪华
王鼎盛	石 兢	田光善	冯世平	邢定钰
朱邦芬	朱 星	向 涛	刘 川*	汤 超
许宁生	许京军	李茂枝	李建新	李新征*
李儒新	吴 飙	汪卫华	张立新	张振宇
张 酣*	张富春	陈志坚*	武向平	林海青
欧阳钟灿	罗民兴	周月梅*	郑春开	赵光达
钟建新	聂玉昕	徐仁新*	徐红星	郭 卫
资 剑	龚新高	龚旗煌	崔 田	阎守胜
谢心澄	解士杰	解思深	樊铁栓*	潘建伟

秘 书：陈小红

序 言

物理学是研究物质、能量以及它们之间相互作用的科学。她不仅是化学、生命、材料、信息、能源和环境等相关学科的基础,同时还与许多新兴学科和交叉学科的前沿紧密相关。在科技发展日新月异和国际竞争日趋激烈的今天,物理学不再囿于基础科学和技术应用研究的范畴,而是在国家发展与人类进步的历史进程中发挥着越来越关键的作用。

我们欣喜地看到,改革开放四十年来,随着中国政治、经济、科技、教育等各项事业的蓬勃发展,我国物理学取得了跨越式的进步,成长出一批具有国际影响力的学者,做出了很多为世界所瞩目的研究成果。今日的中国物理,正在经历一个历史上少有的黄金时代。

在我国物理学科快速发展的背景下,近年来物理学相关书籍也呈现百花齐放的良好态势,在知识传承、学术交流、人才培养等方面发挥着无可替代的作用。然而从另一方面看,尽管国内各出版社相继推出了一些质量很高的物理教材和图书,但系统总结物理学各门类知识和发展,深入浅出地介绍其与现代科学技术之间的渊源,并针对不同层次的读者提供有价值的学习和研究参考,仍是我国科学传播与出版领域面临的一个富有挑战性的课题。

为积极推动我国物理学研究、加快相关学科的建设与发展,特别是集中展现近年来中国物理学家的研究水平和成果,北京大学出版社在国家出版基金的支持下于2009年推出了“中外物理学精品书系”,并于2018年启动了书系的二期项目,试图对以上难题进行大胆的探索。书系编委会集结了数十位来自内地和香港顶尖高校及科研院所的知名学者。他们都是目前各领域十分活跃的知名专家,从而确保了整套丛书的权威性和前瞻性。

这套书系内容丰富、涵盖面广、可读性强,其中既有对我国物理学发展的梳理和总结,也有对国际物理学前沿的全面展示。可以说,“中外物理学精品书系”力图完整呈现近现代世界和中国物理科学发展的全貌,是一套目前国内为数不多的兼具学术价值和阅读乐趣的经典物理丛书。

“中外物理学精品书系”的另一个突出特点是,在把西方物理的精华要义“请进来”的同时,也将我国近现代物理的优秀成果“送出去”。物理学在世界范围内的重要性不言而喻。引进和翻译世界物理的经典著作和前沿动态,可以满足当前国内物理教学和科研工作的迫切需求。与此同时,我国的物理学研究数十年来取得了长足发展,一大批具有较高学术价值的著作相继问世。这套丛书首次成规模地将中国物理学者的优秀论著以英文版的形式直接推向国际相关研究的主流领域,使世界对中国物理学的过去和现状有更多、更深入的了解,不仅充分展示出中国物理学研究和积累的“硬实力”,也向世界主动传播我国科技文化领域不断创新发展的“软实力”,对全面提升中国科学教育领域的国际形象起到一定的促进作用。

习近平总书记在2018年两院院士大会开幕会上的讲话强调,“中国要强盛、要复兴,就一定要大力发展科学技术,努力成为世界主要科学中心和创新高地”。中国未来的发展在于创新,而基础研究正是一切创新的根本和源泉。我相信,在第一期的基础上,第二期“中外物理学精品书系”会努力做得更好,不仅可以使所有热爱和研究物理学的人们从中获取思想的启迪、智力的挑战和阅读的乐趣,也将进一步推动其他相关基础科学更好更快地发展,为我国的科技创新和社会进步做出应有的贡献。

“中外物理学精品书系”编委会主任

中国科学院院士,北京大学教授

王恩哥

2018年7月于燕园

内 容 提 要

在这本著作中,读者将了解到高亮度 X 射线物理与技术方面的最新进展.借助最新的理论,本领域的卓越学者将引导读者学习基于同步辐射和自由电子激光产生高亮度 X 射线的基本原理和技术.本书涉及面广,包括波荡器的高亮度同步辐射、自放大自发辐射、种子型高增益谐波放大器、超短脉冲、高功率波荡器渐变、自由电子激光振荡器、X 射线振荡器与放大器结构等.新颖的数学方法和大量辅以直观解释的图片使读者可以更容易地理解关键概念,而对 X 射线装置性能改进方法的实际考虑和对近期实验结果的讨论则为解决本领域当前的研究问题提供了工具和知识.

本书内容全面,可供研究生、研究人员和设计、管理或使用 X 射线装置的从业人员参考.

中文版序

1976 年, 美国斯坦福大学 John Madey 教授通过让电子直线加速器产生的相对论电子束在磁体中做扭摆运动, 在世界上首次实现了自由电子激光. 自由电子激光以在真空中运动的电子为介质, 具有波长大范围可调的特点, 在短波长范围更是具有独特的优势. Madey 教授开创了一个非常重要的研究方向, 世界上科技先进的国家纷纷开展相关研究, 近年来的发展更为迅速. 目前硬 X 射线自由电子激光装置已经实现了稳定运行, 在超快过程研究中发挥了不可替代的作用. 同时, 自由电子激光理论和相关技术的研究也齐头并进, 陆续提出了 HGHG, EEHG, 自种子放大等自由电子激光新机制.

我国的自由电子激光研究也经历了一个较长的发展过程. 早在 1986 年, 谢家麟先生就提出了建设北京自由电子激光装置的建议. 由于当时我们对自由电子激光的了解不多, 因此于 1988 年在北京大学召开了一个自由电子激光国际研讨会, 邀请了当时这一领域的一些专家来进行交流. 这次研讨会历时 12 天, 大家进行了充分的讨论. 此后, 国内长波长自由电子激光逐步发展起来了. 谢家麟先生领导的北京自由电子激光装置于 1993 年建成, 当时是亚洲第一台实现饱和出光的自由电子激光装置. 在短波长方面, 杨振宁先生在 1997 年提出了国内尽早建设 X 射线自由电子激光装置的建议并受到国家有关方面的重视. 在国家自然科学基金委和国家科技部支持下, 国内自由电子激光关键物理和技术问题的研究取得了可喜的进展, 先后实现了深紫外、极紫外出光. 最近国家发改委支持的软 X 射线自由电子激光试验装置已经建成, 并将很快升级成用户装置. 与此同时, 作为高重频自由电子激光基础的射频超导加速技术也得到了很好的发展. 就在今年 4 月, 我国启动了基于射频超导加速器的高重频硬 X 射线自由电子激光装置的建设, 这标志着我国将跨入国际自由电子激光领域的先进行列.

在这样的形势下, 我们更加迫切地希望更多的年轻人了解自由电子激光, 深入学习自由电子激光物理和技术, 以便更好地投身于我国的自由电子激光事业. 此时将《同步辐射与自由电子激光》一书翻译成中文, 可以说是恰逢其时. 《同步辐射与自由电子激光》原书的主要作者 Kwang-Je Kim 是我们的老朋友, 黄志戎是北京大学的校友和客座教授, 他们都是国际上自由电子激光领域的知名学者和领军人物, 在自由电子激光物理和技术方面有很深的造诣. 他们合著的这本书是一部既有深度又有广度的专业著作, 不仅系统地介绍了自由电子激光物理的主要内容, 也反映了

自由电子激光的最新发展. 这本书的译者也十分用心, 既充分尊重原著, 也考虑到国内读者的阅读习惯并对一些术语的中文翻译进行了规范.

最后, 我相信《同步辐射与自由电子激光》中译本的出版, 能够帮助更多的青年学生和相关科技工作者更好地掌握自由电子激光的基本原理和关键技术, 以更好地为我国自由电子激光事业的发展做出贡献.

陈佳洱

2018 年 5 月 28 日

原版序言

强相对论电子沿曲线轨迹运动时产生的 X 射线通常被称为同步辐射,它是研究原子与分子系统的结构及动力学的重要工具. 第一个专用的同步辐射装置 (基于电子储存环) 建于 20 世纪 70 年代.^①由于同步辐射强度高、散角小,并具有很宽的光谱范围,自那以后,对其需求稳步增长. 在过去的几十年中,同步辐射的效能得到了进一步的提升,这一方面得益于储存环设计的改进,另一方面得益于波荡器等磁铁设备的使用,前者导致了电子束相空间密度的增长,后者极大地提高了 X 射线的亮度 (与传统偏转磁铁相比). 这些进展扩大和加深了“光子科学”在世界各地的影响.

在 X 射线产生方面的另一革命性进步是 X 射线自由电子激光 (FEL) 的发展. FEL 中产生的辐射反过来作用于电子束,由此得到的 X 射线强度和相干性远远优于基于储存环的光源. X 射线 FEL 的成功得益于直线加速器技术的进步,特别是注入器 (电子源) 性能的提升.

直线加速器产生的高亮度、高能电子束目前可以驱动采用长波荡器的高增益 X 射线 FEL 放大器. FEL 放大器的增益可以足够高,从而使最初的非相干波荡器辐射演化为高强度的准相干电磁场,即自放大自发辐射 (SASE). 利用超短电子束团,可以产生超短的 SASE 脉冲. X 射线 FEL 可使传统同步辐射光源上的实验技术更为有效,同时也为材料、化学、生物学的新领域 (如超快动力学) 研究打开了大门.

X 射线 FEL 的出现并不会取代其他同步辐射光源. 对于某些应用 (包括那些要求高稳定性或高平均通量的应用), 储存环的同步辐射比 SASE 更具吸引力. 通过改进储存环的设计,未来的同步辐射装置将可提供亮度比当前“第三代”光源还要高的 X 射线. 例如,“多偏转消色散”可显著提高电子束及相应辐射的亮度. X 射线 FEL 的性能也正从多个方面得到改进,包括通过谐波产生方法获得全相干的软 X 射线、通过自种子技术提升硬 X 射线的相干性以及为用户提供多色和/或多脉冲 X 射线等等. 采用由 Bragg 晶体作为主反射镜的 X 射线光腔,全相干、高谱纯度的 X 射线 FEL 振荡器 (XFEL) 在硬 X 射线波段也已成为可能. 我们可以设想在一个大型 X 射线装置中将 XFEL 的输出作为高增益 FEL 放大器的输入,从而

^①“同步辐射”因 1947 年在同步加速器上被首次观察到而得名. 我们要避免将储存环称为“同步光源”的习惯做法,这是因为储存环中的电子处于稳态,而同步加速器中的电子在加速.

为未来的光子科学提供极致的支持。

因此, 同步辐射光源和自由电子激光中 X 射线产生的物理基础具有重要的现实意义。尽管在这些主题上已有一些优秀的专著 (本书后面列出了部分参考书目), 但我们将尝试对 X 射线的产生进行统一而有条理的介绍。重叠的论述是不可避免的, 我们希望这里提供的视角和方法可以帮助读者更全面地理解相干 X 射线的产生, 并为潜在的创新打下基础。以下简要介绍我们的理念和方法。

第一, 我们认为同步辐射和 FEL 应该作为一个统一的主题来处理, 特别是在 X 射线频谱范围内。这是因为波荡器中总是存在 FEL 反馈现象^①, 尽管在许多情况下这种反馈很弱, 不会对 X 射线辐射的特性造成明显的影响。

第二, 我们已经强调了粒子束与辐射束相空间分布的重要性。粒子束的相空间分布在加速器物理中已很熟悉, 而电磁场的相空间分布则可以在 Wigner 的基础上定义。我们因此能以合乎逻辑的方式来确定同步辐射的相空间密度 (或亮度分布)。这让电子束和辐射束处在平等的地位上, 同时也可用于回答一些在实际中很重要的问题, 例如电子束的相空间分布对其产生的 X 射线的影响何时可以忽略等。

第三, 我们通过将电子的相空间分布表示为 δ 函数之和 (标示每个组成电子的位置和动量) 来保持电子的离散特性。这种分布被称为 Klimontovich 分布函数, 通常包含我们关注的全部经典信息。我们将 Klimontovich 分布写成两个部分之和: 第一部分描述平滑的整体平均分布, 第二部分则包含电子相互作用导致的快速振荡和 δ 函数离散求和中的涨落。为了让问题可解, 我们将第二部分看作对平滑平衡态的小幅扰动。如果忽略横向维度, 这一初值问题的完整解可通过 Laplace 变换方法得到。为了处理辐射衍射和电子的横向 β 振荡, 需要采用更加复杂的方法。对于低增益情形, 可通过沿特征曲线积分的方法得到初值问题的解, 而对于高增益情形, 形式上的解可用 Van Kampen 模式表示, 由此得到的方程在初始平滑分布已知时可通过数值方法求解。

利用 FEL 产生相干 X 射线的实践是一个快速发展的前沿领域。因此, 我们并不打算详细阐述已提出的各种技术。尽管如此, 我们仍将讨论几个实用的主题, 既包括波荡器误差和尾场的影响, 也包括通过长波长激光的非线性谐波产生技术获得相干软 X 射线输出的一些方法。我们也将简要概述当前存在及计划建造的高增益放大器装置。采用 Bragg 反射镜的硬 X 射线 FEL 振荡器是产生全相干、高谱纯度硬 X 射线束的一个可能途径, 我们将对此进行详细的讨论。

本书最初是美国粒子加速器学校的课程讲稿。在过去的十五年中, 该课程每两到三年讲授一次, 讲稿的内容也逐渐成熟。学生的反馈对讲稿的改进起到了重要作用。来自我们同事的建议和鼓励太多了, 这里无法一一列举, 它们对这本书的出版

^①即辐射对电子束的影响 (译者注)。

也至关重要. X 射线 FEL 理论的建立, 以及利用这一理论来设计和解释随后的 FEL 实验及 X 射线装置, 已经成为近年来最令人兴奋、最为成功的束流动力学工作. 与学生和我们的同事分享这些进展, 同时感谢他们的贡献, 是一件令人愉快的事情.

金光齐, 阿贡, 伊利诺伊
黄志戎, 斯坦福, 加利福尼亚
瑞安·林德伯格, 阿贡, 伊利诺伊

习惯及符号

在本书中,除了能量单位为 eV 外,其他物理量均采用国际单位制 (SI). 我们分别使用标准黑体和无衬线字体来标示矢量 (如 $\mathbf{x}$) 和矩阵 (如 $\mathbf{M}$). Fourier 变换的定义沿袭经典物理学中的标准形式,这样函数 $f(x, t)$ 的时间及空间 Fourier 变换分别为

$$f(\omega, x) = f_\omega(x) = \int_{-\infty}^{\infty} dt e^{i\omega t} f(x, t),$$

$$f(k, t) = \int_{-\infty}^{\infty} dx e^{-ikx} f(x, t).$$

请注意,我们常常将 Fourier 变换的频率参数写成下标. 此外,当在 $(-\infty, \infty)$ 上积分时,积分限通常被忽略,这样 Fourier 逆变换可以写成以下形式:

$$f(x, t) = \frac{1}{2\pi} \int d\omega e^{-i\omega t} f_\omega(x),$$

$$f(x, t) = \frac{1}{2\pi} \int dk e^{ikx} f(k, t).$$

最后,介绍代表物理量的数学符号在本书中是不可避免的. 在这里我们并不打算列出本书中引入的每一个符号,而是将在不同章节中多次出现的那些符号列入表中. 请注意,我们有时采用这些变量的归一化形式 (用 “^” 标示), 例如,沿波荡器的归一化传播距离可以写成 $\hat{z}$.

符号	物理含义/物理描述
a_ν	无量纲频率 ν 上的归一化电场
α	精细结构常数, $\alpha \equiv e^2/(4\pi\epsilon_0\hbar c) \approx 1/137$
$\alpha_{x,y}$	代表相关性的 Twiss 参数, $\alpha_x = -\langle xx' \rangle/\epsilon_x$
$\mathcal{B}$	辐射亮度 (或 Wigner) 函数
B_0	波荡器轴上峰值磁场
$\beta_{x,y}$	横向 β 函数, $\beta_x = \langle x^2 \rangle/\epsilon_x$
$\bar{\beta}_x$	平均横向 β 函数

符号	物理含义/物理描述
β_n	由波荡器聚焦决定的自然 β 函数
c	真空中的光速
$\Delta\nu$	相对频率失谐, $\Delta\nu = \nu - 1 = (\omega - \omega_1)/\omega_1$
e	电子的电荷量
E_x	横向电场
E	缓变横向电场振幅
E_ν	横向电场的 Fourier 分量
$\mathcal{E}(\phi)$	横向电场的角度表象
η	与共振能量的相对偏离 $(\gamma - \gamma_r)/\gamma_r$
ϵ_0	真空介电常数
ε 或 $\varepsilon_{x,y}$	电子束横向发射度, $\varepsilon_x = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}$
$\varepsilon_{x,n}$	电子束的归一化横向发射度 $\gamma\varepsilon$
ε_r	辐射的发射度, $\varepsilon_r \geq \lambda/4\pi$
f 或 F	电子相空间分布函数
f_ν	分布函数的 Fourier 分量
γ	电子能量 (单位为 mc^2)
γ_r	共振电子能量 (单位为 mc^2)
γ_0	初始/参考电子能量 (单位为 mc^2)
h	奇次谐波阶次, $h = 1, 3, 5, \dots$
$\hbar$	Planck 常数除以 2π
I	电子束团峰值电流
I_A	Alfvén 电流, 约 17 kA
J_x	横向电流
$\mathcal{J}_{x,y}$	横向粒子作用量
J_n	n 阶 Bessel 函数 ($n = 0, 1, 2, \dots$)
[JJ]	基波波荡器 Bessel 函数因子, $[JJ]_1 = [JJ]$
$[JJ]_h$	h 次谐波波荡器 Bessel 函数因子
k_1	基波辐射波数 ω_1/c
k_β	β 振荡平均聚焦波数, $k_\beta = 1/\bar{\beta}_x$
k_u	波荡器波数
K	波荡器磁场强度参数, $K = eB_0/mck_u$
L_{G0}	单能束流的一维 FEL 功率增益长度
L_G	三维 FEL 功率增益长度
L_u	波荡器长度
λ_1	FEL 基波波长
λ_h	FEL h 次谐波波长

符号	物理含义/物理描述
λ_u	波荡器周期长度
m	电子静止质量
M	辐射脉冲中的独立模式数
$M_{T,L}$	横向模式数和纵向模式数
μ	线性 FEL 的归一化复增长率
μ_3	一维指数增长模式的增长率
$\mu_{\ell m}$	径向级次为 ℓ 、角向级次为 m 的横向模式的增长率
n_e	电子体密度
N_e	束团中的电子总数
ω_1	波荡器基波辐射频率
ν	辐射频率 ω 与基波频率 ω_1 的比值
p	电子偏轴角度, $p = (x', y')$
P	辐射功率
P_{beam}	电子束功率 $(I/e)\gamma mc^2$
P_{sat}	FEL 饱和功率
ϕ	相对于光轴的辐射角
ρ	FEL Pierce 参数
σ_η	电子束的 RMS 相对能散度
$\sigma_r, \sigma_{r'}$	辐射的 RMS 横向尺寸和散角
σ_ω	RMS 辐射带宽
$\sigma_x, \sigma_{x'}$	电子束的 RMS 横向尺寸和散角
$t_j(z)$	波荡器 z 位置处的电子到达时间
t_j	$z = 0$ 处电子到达时间的简写形式, $t_j = t_j(0)$
$\bar{t}_j(z)$	电子到达时间在波荡器周期上的平均
T	平顶电子束团的持续时间/时间长度
t_{coh}	辐射的相干时间
θ	电子束相对于辐射波的相位
U	总辐射能量
v	电子的横向速度
v_z	电子的纵向速度
$\bar{v}_z$	平面波荡器中电子的平均纵向速度
x	电子的水平和垂直位置 (x, y)
x'	电子的水平和垂直角度 (x', y')
z	从波荡器入口开始的传播距离
z_{sat}	FEL 饱和长度
Z_R	辐射的 Rayleigh 长度

目 录

第 1 章 基本概念	1
§1.1 粒子 (电子) 束	1
1.1.1 电子束相空间	2
1.1.2 束流传输与线性光学	3
1.1.3 束流发射度与包络函数	4
1.1.4 简单传输下的束流属性	6
1.1.5 相空间中的电子分布函数	9
§1.2 辐射束	12
1.2.1 傍轴束的衍射	12
1.2.2 傍轴波动方程与能量传输	15
1.2.3 波动光学中的相空间方法	17
1.2.4 横向相干性	22
1.2.5 时间相干性	25
1.2.6 群聚与强度增强	28
参考文献	30
第 2 章 同步辐射	32
§2.1 相对论电子的辐射	34
§2.2 傍轴波动方程	36
§2.3 偏转磁铁辐射	39
§2.4 波荡器辐射	41
2.4.1 电子轨迹和波荡器辐射的定性讨论	43
2.4.2 波荡器辐射的傍轴分析	47
2.4.3 频率积分功率	51
2.4.4 偏振控制	52
2.4.5 波荡器辐射亮度与电子束分布的影响	55
2.4.6 从波荡器辐射到自由电子激光	61