

CAMBRIDGE

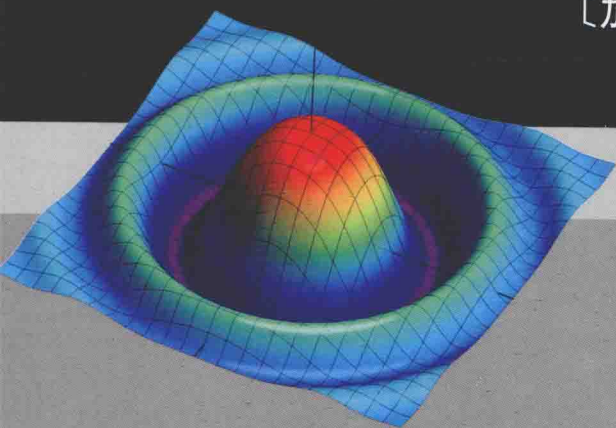
COMPUTATIONAL PHOTONICS

An Introduction With MATLAB

计算光子学 ——MATLAB导论

〔加〕 Marek S. Wartak 著

吴宗森 吴小山 译



科学出版社

**Computational Photonics: An Introduction
with MATLAB**

计算光子学
—— **MATLAB 导论**

[加] Marek S. Wartak 著
吴宗森 吴小山 译

科学出版社

北 京

图字: 01-2015-2768 号

内 容 简 介

本书是光电子学和光电器件理论系统化和计算图像化的最新专著。本书从光学和电磁场基础理论讲起,逐一讨论了激光束在光波导和线状光纤中的传播模式和特性,以及激光器、光接收器,各种光放大器以及波分多路和光链接。最后,本书论述了光孤子、太阳能光电池和最近几年才出现的超材料。本书不仅有系统的光子学的理论和计算公式,而且通过 Matlab 进行各种仿真计算,获得了激光束在波导和光纤中传播以及光放大器工作时的效果图。全书收录了 60 多个在 Matlab 中使用的编程,可供读者学习使用。

本书可用作理工科大学光电专业、光通信和微电子专业高年级本科生教科书,也可作为计算物理专业教学参考书。同时本书可为光电、通信企业科技研发人员和研究生的研究课题设计提供参考。

[*Computational Photonics(A Introduction with MATLAB)*](9781107005525) by Marek S. Wartak first published by Cambridge University Press 2013

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 & Science Press, 2015

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

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

图书在版编目(CIP)数据

计算光子学(附光盘)/马雷克·瓦塔克(M. S.)著;吴宗森,吴小山译. —北京:科学出版社,2015.5

书名原文: Computational Photonics: An Introduction with MATLAB

ISBN 978-7-03-0444406-6

I. ①计… II. ①瓦… ②吴… ③吴… III. ①光子 IV. ①O572.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 110768 号

责任编辑: 钱 俊 / 责任校对: 张凤琴

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

http://www.sciencep.com

北京信信达欣艺术印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 6 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2015 年 6 月第一次印刷 印张: 32 1/4

字数: 618 000

定价: 198.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

中文版序

我十分欣慰地获悉我撰写的、2013年由剑桥大学出版社出版的《计算光子学》在英文版出版两年后,将于2015年6月由科学出版社出版中文版。

联合国把2015年定为光和光技术国际年,旨在提高全球对光学及其应用的认知。本书恰好于2015年在中国推向市场,正好和联合国的全球倡议一致。

我非常感谢吴宗森教授和吴小山教授付出的努力把我的书翻译成为中文。

令我感到格外高兴的是,我将在2015年7月去南京大学物理学院由吴小山教授主持的物理暑期学校主讲“计算光子学”。我十分期待和这些物理学的学生见面并共同探讨光子学的有趣课题。

马利克·瓦泰克

加拿大劳瑞尔大学物理与计算机科学系主任

序

55 年前激光器发明时我正在读小学. 记得当时电话还很稀缺, 有时家中有急事要与上班的父母联系, 不得不走很远的路找电话亭. 今天这种情况已经不复存在了, 每人每天随身携带的智能手机已能在任何时间、任何地点与远在世界各地的亲友通话, 相互之间发送消息, 甚至瞬间传送图像, 这一切都归因于激光的发明和光纤通信技术的发展. 光与电都是信息和能量的载体, 但光的频率高、传输速度快, 在透明介质中传输损耗低, 用光来传输信息自然具有独特的优势. 激光的发明和利用催生了包括光子学和光电子学在内的一些新的光学分支学科和交叉学科, 光的应用研究和光子技术在过去 20 多年里发展迅猛. 光纤通信是光子学和光电子学关注的一个重要领域, 互联网的显著增长和普及在很大程度上都要归功于光子学和光电子学的进步, 今天我们在享受日益便利的通信方式的同时也见证了光子无处不在的事实.

光子学和光电子学, 是研究光的激发、传输、检测、控制以及和物质相互作用的学科, 经过 50 多年的努力, 大量新的物理效应被发现和利用, 功能各异的先进光电子材料与元器件首先出现在尖端科技中并通过产业化造福人类. 光纤、半导体激光器、光调制器、光接收器件的发明, 推动了光子学和光电子学的快速发展, 人类科技发生了翻天覆地的变化. 激光雷达、激光制导、航空/航天飞机、手机、计算机等的出现和广泛应用, 无不凝聚了光子技术发展的贡献. 在能源危机威胁人类生存和发展的今天, 利用光电效应和电光效应分别制成的太阳能光伏电池和白光发光二极管正在为解决这一危机提供行之有效的技术途径. 仅管对于光子究竟是什么, 人类经过近一个世纪的努力, 它仍然是犹抱琵琶半遮面, 但已经形成的光子学学科体系和高度成熟的光子技术正在不断改变着人类社会生活的方方面面.

这本书是作者总结多年研究成果和长期授课的基础上完成的. 作者发展出一种方法去理解光子学以及光电子器件的原理和基础, 提倡在讲授光子学基本原理的同时, 提供给读者一个独立开发的仿真程序, 为研究生或高年级本科生在计算光子学中可能遇到的问题提供了解决办法, 从而使得学生通过这些计算机仿真和编制程序代码获得完整的光子学知识.

本书从物理概念出发, 建立相应的理论模型, 针对光学器件的工作原理、工作模式, 将光子学问题归结为特征方程求根、积分求解、常微分方程求解等积分数值求解问题, 在对相应数值分析方法进行简要介绍的基础上结合 Matlab 强大的数值计算和图形显示功能, 完成光子学问题的仿真计算并给出图形化的显示结果. 本书

内容涵盖的材料和器件包括光纤、平面波导、激光二极管、检测器、光放大器 and 半导体光放大器、接收器一些波分复用器件, 光伏电池和超构材料等. 书中的习题, 研究型小课题和课堂实例可以帮助读者厘清光子学中的一些基本问题. 本书可作为本科高年级、研究生和工程师等和其他相关专业人员学习光子学和光电子学的学习用书或参考书.

祝世宁

中国科学院院士

2015年5月29日

译者序

马利克·瓦泰克 (Marek Wartak) 是加拿大劳瑞尔大学 (Wilfrid Laurier University) 物理与计算机科学系的系主任和资深教授, 他常年活跃在光子学 (photonics), 特别是半导体放大器 (AOS) 领域. 《计算光子学》(Computational Photonics) 一书是马利克根据自己的研究背景和教学经历撰写而成. 本书自 2013 年由剑桥大学出版社 (Cambridge University Press) 出版以来深受计算物理界的同行和师生的欢迎. 译者之一曾和作者是劳瑞尔大学的同事, 有机会与作者探讨书中的内容, 对其有深刻理解. 在得到作者和剑桥大学出版社的授权后, 经过一年的努力, 我们终于完成了该书的中文翻译. 本书的中文版也将在他即将来华参加南京大学组织的全国暑期理论物理学校之际与读者见面.

今年恰逢联合国确立的“光与光技术国际年 (International Year of Light and Light-based Technologies)”. 自 1000 年前阿拉伯学者海什木 (Ibn Al-Haytham) 撰写的世界上首部光学著作问世以来, 光学带给了人类文明的巨大进步. 1865 年麦克斯韦 (Maxwell) 的电磁场理论和 1905 年爱因斯坦 (Einstein) 的光电效应理论在光学和光技术上都具有划时代的意义. 从量子观点处理光学的光子学是物理学中与人类最密切相关的科学分支之一, 它是集激光学、光电子学、导波光学、非线性光学、光伏效应和隐形技术于一体的源远流长又发展迅猛的学科, 也是与人类经济 (通信, 信息, 能源, 遥感, 医疗和娱乐) 和军事最密不可分的领域.

本书的特点是: ① 完整和严谨的理论体系; ② 充分和翔实的计算机仿真; ③ 最新和诸多的技术跟踪; ④ 翔实和实用的例题和习题. 因此, 本书不失为大学计算物理和光电专业教科书的首选, 也是科技人员和工程师的必备参考书.

南京大学物理学院王康同学调试并勘正了本书中所有 Matlab 程序的代码, 南京大学刘闯同学也做了部分翻译工作. 加拿大劳瑞尔大学物理与计算机系的韦丽教授 (Dr. Li Wei) 对本书有关术语中文译法提出过有益的建议, 科学出版社的钱俊先生为本书的编辑和出版奉献良多. 我们向他 (她) 们表示由衷的感谢.

由于译者水平有限, 书中不免存在不妥和疏漏之处, 恳请广大读者和同行批评指正.

译者

于南京大学物理学院

2015 年 5 月

前 言

光子学 (也称为光电学) 是一门有关光的激发, 传输, 检测, 控制和应用的科学和技术. 光子学在科学和工程的各种领域中具有广泛的应用. 光纤通信使用光子在光纤中传递信息, 它是光子学的一个重要组成部分. 在过去的 20 年里, 我们见证了光子在我们的日常生活中无处不在以及其影响力显著增长的事实. 因为光子技术产生了巨大的进步, 光子器件的飞速发展, 光纤的明显改进, 波长多路复用 (WDM) 技术的应用, 因而使英特网和万维网的诞生和推广变得可能. 互联网的显著增长和普及在很大程度上要归功于光子学和光电设备的进步.

这本书尝试收集研究生和高年级本科生所需计算的光子相关问题. 本书的主要动机是发展出一种方法去理解光子学以及光电子器件的原理和基础.

在这本书中, 我大力提倡用仿真法来教授光子学的基本原理. 我提供了一个独立开发的仿真程序, 其中包括对基础理论的模拟, 与此同时, 针对工程实际中遇到的器件和设备, 书中也列举了诸多用 Matlab 代码实施的仿真.

我要强调, 这本非常实用的教科书有以下的特征:

- 通过计算机仿真完成学习过程;
- 通过编写和分析计算机代码更好地理解所有物理参数的意义和价值;
- 依托有限的基础知识掌握完整的理论背景;
- 始于基本的光学知识, 止于一些热门课题的讨论, 使本书具备完整地自成系统的特质.

作者相信通过商用软件或自我开发出来的程序, 人们不仅可以学习理论而且可以进行数值模拟或者说数值实验. 我们接收这样一种观点: 最好的方法是开发软件完善自己; 相反, 最坏的是所有一切来自市场. 此外, 在学习过程中还有一种来源于实际生活的实验, 不过, 这已超出本书的视野之外. 我们的目标是使学生通过我们的课程不仅学到扎实的理论基础知识而且把学到的理论知识运用在 Matlab 中去创建简单的程序. Matlab 不仅展现出理论上的概念而且让学生通过他们自身的数值经历更好地理解理论.

此外, 学生也可以利用 www.octave.org 网站对本书开发和提供的程序进行仿真实验. 渐渐地他们就能结合学到的知识和自己的思路, 开发出属于自己大型计算机程序. 到了这一步, 根据 Donald Knuth (引自 J. Grabmeier, E. Kaltofen and V. Weispfenning, eds., Springer, 2003 合写的计算机代数手册), 我要提醒这些学生, 他们将日益面对增多的困难任务是:

- ① 发表论文;
- ② 出版了一本书;
- ③ 撰写一个大的计算机程序.

本书是我在芬兰的 Oulu University 电子及电工程系, Wroclaw 大学工程技术学院物理所, 以及加拿大位于 Waterloo 市的 Wilfrid Laurier 大学物理和计算机科学系使用的讲稿演变而来. 这本书是为了满足为期 12 周的课程而设计的. 书中一些额外的章节为教师在选择他们所需要的教材时提供了更多的灵活性. 这本书的重要组成部分是向读者提供解决问题的 Matlab 代码. 学生可以修改它, 使用或改变不同的参数, 看看自己能扮演什么不同的角色, 这在学习过程中是非常有价值的. 本书还含有一些已解决的问题 (称为实例), 其意在充当对所讨论主题的实际例证. 在每章的结尾有许多习题和研究小课题用来测试的学生的理解力.

本书可作为工程师, 物理学家, 实习科学家和其他专业人士的参考书. 本书专注于光学器件的工作原理, 以及它们的工作模式和描述它们的数值方法. 涵盖的材料包括光纤, 平板波导, 激光二极管, 检测器, 光放大器和半导体光放大器, 接收器, 光束传播法, 一些波分复用设备, 时域有限差分法, 线性和非线性脉冲, 光伏电池和超材料.

本书也可以用来作为大学教科书, 因为书中附有习题, 研究型小课题和课堂实例. 它也可以用来作为物理和电工程系的本科生和研究生一学期课程的教学辅助书.

这本书包含 17 个章节和两个附录. 前两章总结光学和电磁学的基本知识和要领. 后 15 章分别阐述各个不同的领域. 书中还包含了大量的用 Matlab 软件书写的示例, 旨在提高和帮助理解我所讨论的课题. 许多新的光学设计以及新的器件和设备及其对应的 Matlab 数值方法以及仿真结果来不及在初版中呈现给读者. 这些进展将会呈现在本书的第二版中. 笔者衷心祝福祝愿阅读本书并尝试书中程序的读者和我在写作时有类似地愉悦的心情.

最后, 我欢迎读者发表各种不同的意见, 特别是有关的错误, 不准确的地方和遗漏之处. 请将您的意见发到我的邮箱: mwartak@wlu.ca.

要求

我不强调任何特定的专业知识, 因为我已经书中概括了理解本书所有的基本概念和原理. 当然, 如果读者已经接触过光学和电磁学的理论, 那么这对于学习本书应该是十分有益的.

致谢

感谢 Harri Kopola 教授和 Risto Myllyla 教授 (University of Oulu) 以及 Jan Misiewicz 教授 (Wroclaw University of Technology) 如期将讲稿交给我. 我还要感谢我以前在芬兰、波兰和加拿大的学生对我过去讲稿的各个部分发表意见. 我很感

谢我的妻子看完了整个手稿. 也感谢 Miloszewski 博士为本书准备索引和为封面提供图片.

我特别感谢在剑桥的朋友们, 尤其是 Dr. Simon Capelin 和 Mrs Antoaneta Ouzounova 的耐心和良好的建议, 以及 Lynette James 的出色工作.

感谢劳瑞尔大学的研究办公室对本书的资助. 长久以来加拿大各机构, 包括联邦 NSERC 以及安大略省支持我的研究, 我向它们表示诚挚的谢意.

我把这本书献给我的家人.

马利克·瓦泰克

加拿大劳瑞尔大学物理与计算机科学系主任

目 录

第 1 章 绪言	1
1.1 什么是光子学	1
1.2 什么是计算光子学	3
1.2.1 计算光子学和计算电磁学的方法	3
1.2.2 计算纳米光子学	3
1.2.3 光电商用软件一览	4
1.3 光纤通信	5
1.3.1 光纤通信的简介	5
1.3.2 通信简史	5
1.3.3 光纤的发展	8
1.3.4 与电传输的比较	9
1.3.5 管理标准	10
1.3.6 波分复用	10
1.3.7 孤子	11
1.4 生物和医学光子学	12
1.5 光子传感器	12
1.6 硅光子学	13
1.7 光量子信息科学	13
参考文献	13
第 2 章 光学的基本知识	17
2.1 几何光学	17
2.1.1 射线理论及其应用	17
2.1.2 临界角	18
2.1.3 透镜	19
2.1.4 折射率梯度变化系统	20
2.2 波动光学	21
2.2.1 相速度	22
2.2.2 群速度	23
2.2.3 斯托克斯关系	24
2.2.4 电介质薄膜中的干涉	26

2.2.5	平板中光束的多次干涉	28
2.2.6	法布里-珀罗干涉仪	30
2.3	习题	31
	附录 2A: 本章 Matlab 的函数清单和代码	32
	参考文献	35
第 3 章	电磁学基础	36
3.1	麦克斯韦方程组	36
3.2	边界条件	37
3.2.1	电场边界条件	38
3.2.2	磁场边界条件	39
3.3	波动方程	40
3.4	时谐场	40
3.5	偏振波	43
3.5.1	线偏振波	43
3.5.2	圆偏振和椭圆偏振波	44
3.6	菲涅耳系数和相位	45
3.6.1	TE 偏振	46
3.6.2	TM 偏振	49
3.7	电介质界面反射造成的偏振	50
3.8	抗反射涂层	52
3.9	布拉格镜	56
3.10	古斯-汉欣位移	60
3.11	坡印亭定理	62
3.12	习题	63
3.13	课题	63
	附录 3A: 本章 Matlab 的函数清单和代码	63
	参考文献	66
第 4 章	平板波导	67
4.1	平板波导的射线光学	67
4.1.1	数值孔径	67
4.1.2	导波模式	68
4.1.3	横向共振条件	69
4.1.4	横向条件-归一化形式	70
4.2	电介质波导的电磁学理论基础	72
4.2.1	一般性讨论	72

4.2.2 通用方程的简约形式	73
4.3 平面宽波导的波动方程	74
4.4 三层对称的导波结构 (TE 模式)	76
4.5 一维任意三层不对称平面波导的模式	79
4.5.1 TE 模式	79
4.5.2 TE 模式的场分布	81
4.6 一维方法处理多层平板波导	84
4.6.1 TE 模式	84
4.6.2 传播常数	87
4.6.3 电场	89
4.6.4 TM 模式	89
4.7 一维方式的实例	90
4.7.1 四层无衰减波导	90
4.7.2 六层耗散波导	90
4.7.3 维瑟结构	92
4.8 二维结构	93
4.9 习题	96
4.10 课题	96
附录 4A: 本章 Matlab 的函数清单和代码	96
参考文献	111
第 5 章 线状光纤和信号退化	112
5.1 几何光学概述	112
5.1.1 数值孔径 (NA)	113
5.1.2 多路径色散	114
5.1.3 光纤的信息运载能力	114
5.1.4 硅光纤的损耗机制	115
5.1.5 固有损耗	116
5.1.6 外在损耗	116
5.2 柱坐标中的光纤模式	116
5.2.1 柱坐标中的麦克斯韦方程	117
5.2.2 柱坐标的波动方程	118
5.2.3 柱坐标中波动方程的解	119
5.2.4 边界条件和模式方程	122
5.2.5 模式分类	123
5.2.6 $m = 0$ 时的模式	123

5.2.7	弱导波近似 (wga)	125
5.2.8	统一表达式	127
5.2.9	基本模式 HE_{11} 的通用关系	128
5.2.10	单模光纤	129
5.2.11	截止条件	130
5.3	色散	130
5.3.1	群延时的概论	131
5.3.2	材料色散: 谢米尔方程	132
5.3.3	波导色散	133
5.4	传播中的脉冲色散	133
5.5	习题	135
5.6	课题	135
	附录 5A: 贝塞尔函数的特性	136
	附录 5B: 特征行列式	137
	附录 5C: 本章 Matlab 的函数清单和代码	138
	参考文献	145
第 6 章	线性脉冲的传播	146
6.1	基本脉冲	146
6.1.1	矩形脉冲	146
6.1.2	高斯脉冲	148
6.1.3	超高斯脉冲	149
6.1.4	啁啾高斯脉冲	149
6.2	半导体激光器的调制	150
6.2.1	调制制式	151
6.2.2	波形的建立	153
6.3	存在色散时脉冲传播方程的简单推导	154
6.4	线性脉冲的数学理论	156
6.5	脉冲的传播	160
6.5.1	调频高斯脉冲传播的分析	160
6.5.2	傅里叶变换的数值方法	161
6.5.3	傅里叶分步变换法	162
6.6	习题	164
	附录 6A: 本章 Matlab 的函数清单和代码	164
	参考文献	176

第 7 章 光源	178
7.1 激光器的概论	178
7.1.1 TLS 中的跃迁	180
7.1.2 激光振荡和谐振模式	182
7.2 半导体激光器	183
7.2.1 半导体中的电子跃迁	185
7.2.2 同质 pn 结	187
7.2.3 异质结构	188
7.2.4 光学增益	190
7.2.5 确定光增益	191
7.3 速率方程	193
7.3.1 载流子	194
7.3.2 光子	194
7.3.3 速率方程参数	195
7.3.4 电场速率方程的推导	196
7.4 速率方程的分析	199
7.4.1 稳态分析	199
7.4.2 线性增益模式的小信号分析	199
7.4.3 增益饱和时的小信号分析	201
7.4.4 量子阱激光器的大信号分析	204
7.4.5 频率啁啾	204
7.4.6 等效电路模式	205
7.4.7 体激光器的等效电路	205
7.5 习题	208
7.6 课题	208
附录 7A: 本章 Matlab 的函数清单和代码	208
参考文献	215
第 8 章 光放大器和掺铒光纤放大器	217
8.1 一般特性	219
8.1.1 增益谱和带宽	219
8.1.2 增益饱和	221
8.1.3 放大器噪声	222
8.2 掺铒光纤放大器 (EDFA)	223
8.2.1 稳态分析	225
8.2.2 有效的二能级方法	225

8.3 掺铒光纤放大器的增益特性	226
8.4 习题	228
8.5 课题	229
附录 8A: 本章 Matlab 的函数清单和代码	229
参考文献	236
第 9 章 半导体光放大器 (SOA)	238
9.1 一般性讨论	238
9.1.1 具有小端面反射率的 SOA 增益公式	239
9.1.2 小端面反射率的影响	242
9.2 SOA 脉冲传播速率方程	243
9.3 SOA 的设计	246
9.4 SOA 的应用	248
9.4.1 波长转换	248
9.4.2 基于干涉原理的全光学逻辑	249
9.5 习题	250
9.6 课题	251
附录 9A: 本章 Matlab 的函数清单和代码	251
参考文献	252
第 10 章 光接收器件	254
10.1 主要特征	255
10.1.1 接收器灵敏度	255
10.1.2 动态范围	255
10.1.3 比特率透明度	255
10.1.4 比特图的独立性	255
10.2 光检测器	255
10.2.1 光检测原理	256
10.2.2 光检测器的性能参数	259
10.2.3 光检测器噪声	261
10.2.4 检测器的设计	263
10.3 接收器之分析	264
10.3.1 理想光接收器的比特误差	265
10.3.2 接收器的误差概率	266
10.3.3 比特率和高斯噪声	268
10.4 光电接收器的建模	271
10.5 习题	271

10.6 课题	271
附录 10A: 本章 Matlab 的函数清单和代码	271
参考文献	273
第 11 章 时域有限差分法	275
11.1 通用公式	275
11.1.1 三维公式	276
11.1.2 二维公式	276
11.1.3 一维模型	277
11.1.4 高斯脉冲和调制高斯脉冲	278
11.2 无色散时的一维叶氏算法	279
11.2.1 无损耗情况	279
11.2.2 确定网格尺度	281
11.2.3 色散与稳定性	282
11.2.4 稳定性判据	284
11.2.5 一维有损耗模式	284
11.3 一维边界条件	285
11.3.1 穆尔一阶吸收边界条件 (ABC)	285
11.3.2 一维二阶边界条件	287
11.4 二维无色散的叶氏算法	289
11.5 二维吸收边界条件	291
11.6 色散	293
11.7 习题	294
11.8 课题	294
附录 11A: 本章 Matlab 的函数清单和代码	295
参考文献	301
第 12 章 波束传播法 (BPM)	302
12.1 傍轴公式	303
12.1.1 引言	303
12.1.2 运算子 \hat{D} 和 \hat{W}	304
12.1.3 傅里叶变换分步法的实施	305
12.2 一般理论	307
12.2.1 绪论	307
12.2.2 慢变化包络近似 (SVEA)	309
12.2.3 半矢量 BPM	311
12.2.4 标量公式	311