



国际信息工程先进技术译丛

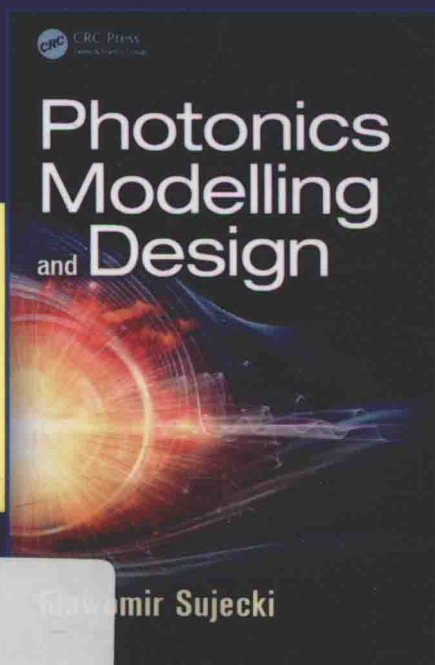
CRC Press  
Taylor & Francis Group

# 光通信系统中的 光子学建模与设计

Photonics Modelling and Design

[波兰] 斯瓦沃米尔·苏耶茨基 (Sławomir Sujecki) 著

武冀 译



- ◎通过MATLAB 代码、思路提示等形式，介绍了对光子器件进行建模和设计的方法
- ◎分析光在电介质中传播及热扩散和载流子输运；开发光纤和半导体激光器模型；推导光纤中光短脉冲的传播；以实际或开发中的器件为实例，将所有模型用于实践



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

国际信息工程先进技术译丛

# 光通信系统中的 光子学建模与设计

Photonics Modelling and Design

[波兰] 斯瓦沃米尔·苏耶茨基 (Sławomir Sujecki) 著  
武冀译



机械工业出版社

本书着重介绍如何使用工程或应用物理学,对光子器件进行建模和设计。内容涵盖了绝缘介质中的光传播分析、热扩散和载流子输运以及光纤和半导体激光器的建模,并讨论了光纤中的光短脉冲传播。本书基础教学和研究并重,其内容既适合本科学生和研究生,也对博士生和关注光子器件建模和设计的研究者有诸多益处。

Photonics Modelling and Design/by Sławomir Sujecki/ISBN: 9781466561267

Copyright © 2015 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved; 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下, CRC 出版公司出版,并经其授权翻译出版。版权所有,侵权必究

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. 本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2015-3494 号。

## 图书在版编目(CIP)数据

光通信系统中的光子学建模与设计/(波)苏耶茨基著;武冀译. —北京:机械工业出版社,2016.5

(国际信息工程先进技术译丛)

书名原文: Photonics Modelling and Design

ISBN 978-7-111-53220-0

I. ①光… II. ①苏…②武… III. ①光通信系统-研究  
IV. ①TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 051741 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:吕潇 责任编辑:吕潇

责任校对:肖琳 封面设计:马精明

责任印制:常天培

北京京丰印刷厂印刷

2016 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·20 印张·412 千字

0 001—2 500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-53220-0

定价:99.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294 机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

# 原书前言

本书着重介绍如何使用工程或应用物理学，对光子器件进行建模和设计。本书基础教学和研究并重，其内容既适合本科学生和研究生，也对博士生和关注光子器件建模和设计的研究者有诸多益处。

作者试图避免使用深奥的数学和量子力学语言，以使更多的读者可以明了本书的内容。不仅如此，本书还包含了众多实践性内容，它们基于一系列相对简单的实例，并通过 MATLAB 环境进行软件仿真。

本书由如下几个方面构成：第 1 章为引论；第 2~4 章为绝缘介质中的光传播分析；第 5、6 章会针对热扩散和载流子输运进行讨论；在第 7、8 章中，我们根据第 2~6 章研究的理论，对光纤和半导体激光器进行建模。最后，在第 9 章中，我们会对光纤中的光短脉冲传播进行讨论。

很大程度上，本书是自成体系的。不过，倘若对光子学有一般程度的认知，对光纤以及半导体激光器工作原理有足够的了解，那么这些背景知识可以帮助读者更好地理解本书内容。在涉及基础问题的相关章节，我们在引论部分推荐了部分文献，以帮助读者进行预习。

EU 项目给予了本书极大的帮助，在此特别鸣谢：Ultrabright、Bright. EU、Brighter. EU、FastAccess、Copernicus 和 MINERVA。同时鸣谢 NUSOD 和 ICTON 会议对本书的巨大贡献。我特别感谢 J. Piprek 博士（NUSOD 学会）和 M. Marciniak 教授（国家通信研究院，波兰华沙），他们分别为 NUSOD 和 ICTON 学会的发起人和组织者。我同时感谢在 EU 项目中一起工作过的研究者们，他们是西班牙马德里理工大学的 I. Esquivias 教授和 L. Borrueal 博士；德国费迪南博朗高频技术研究所的 B. Sumpf 博士，H. Wenzel 博士和 G. Erbert 博士；法国 Thales 集团，III - V 实验室的 N. Michel 博士和 M. Krakowski 博士；瑞典查尔姆斯理工大学的 A. Larsson 教授；芬兰 Modulight 集团的 P. Uusimaa 博士；法国光学研究院查理法布希实验室的 N. Dubreuil 博士和 G. Pauliat 博士；芬兰坦佩雷理工大学的 M. Dumitrescu 博士和 M. Pessa 教授；丹麦技术大学的 Birgitte Thestrup 博士、Paul Michael Petersen 博士和 O. Bang 教授；以及德国 LISA 激光器产品公司的 S. Lamrini 博士和 P. Fürberg 博士。我也要感谢我的同事们：A. B. Seddon 博士，E. C. Larkins 博士，P. Sewell 博士，A. Vukovic 博士，D. Furniss 博士，Z. Tang 博士，R. Mackenzie 博士。特别感谢 T. M. Benson 教授对本书草稿的阅读指导。最后，我还要感谢我的博士生 L. Sójka 对

本书第7章的贡献。

本书使用 MathWorks 公司的 MATLAB 软件。关于此产品信息，可与以下地址联系：

The Mathworks, Inc.

3 Apple Hill Drive

Natick, MA 01760 - 2098 USA

Tel: 508 - 647 - 7000

Fax: 508 - 647 - 7001

Email: [info@mathworks.com](mailto:info@mathworks.com)

Web: [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)

## 作者简介

斯瓦沃米尔·苏耶茨基 (Sławomir Sujecki) 于 1993 年毕业于波兰华沙科技大学电子信息技术学院, 在光子器件建模和设计方向, 于 1997 年和 2010 年分别获得华沙科技大学的哲学博士 (PhD) 和理学博士 (DSc) 学位。1998 年, 他受聘为波兰基尔科技大学讲师, 并于 1999 年成为波兰华沙国立通信研究院的研究员。在 2000 年, 苏耶茨基博士成为英国诺丁汉大学的研究助理, 并于 2002 年受聘为该大学讲师。在 2012 年他被推选为诺丁汉大学副教授。苏耶茨基博士主要研究方向是激光器设计, 特别是激光器二极管和光纤激光器。他参与了诸如 Ultrabright、Bright. EU、Brighter. EU、FastAccess, Copernicus 和 MINERVA 等欧洲学术组织相关研究项目, 从事光子器件建模和设计领域的研究。

苏耶茨基博士曾荣获德国学术交流学会、英国议会、英国皇家学会和沃尔森基金会的嘉奖。他同时还是 IEEE 的资深会员、OSA 终身会员以及 NUSOD (光电器件数值仿真) 学会的项目委员会成员。

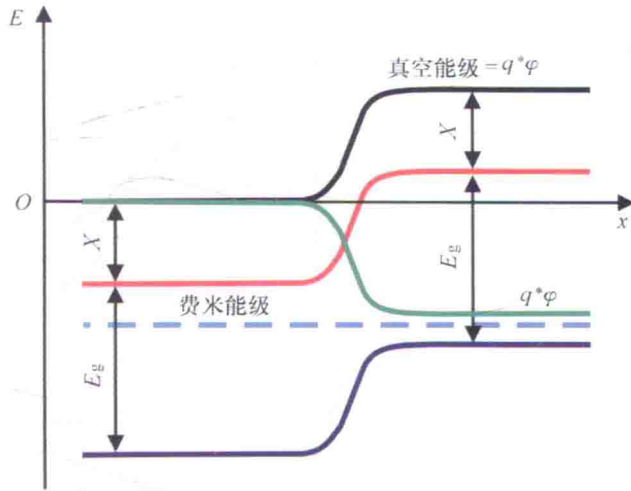


图6.2 p-n同质结的能级示意图，电势参考能为n型半导体的真空能级

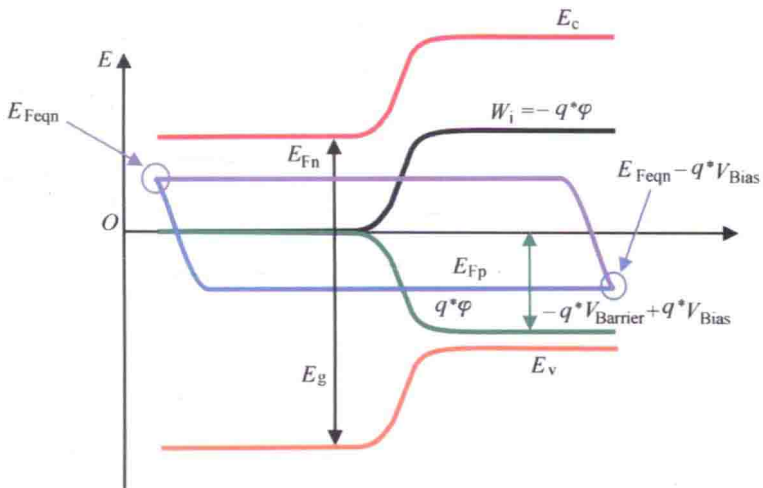


图6.6 偏置的p-n半导体同质结的能带示意图

# 目 录

原书前言

作者简介

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第1章 引论 .....                | 1  |
| 1.1 光学模型 .....              | 2  |
| 1.2 激发介质模型 .....            | 3  |
| 1.3 热扩散和应力应变模型 .....        | 4  |
| 1.4 光子器件模型 .....            | 5  |
| 参考文献 .....                  | 7  |
| 第2章 光在同性介质中的传播 .....        | 8  |
| 2.1 傅里叶分析法 .....            | 8  |
| 2.2 光束反射和折射 .....           | 21 |
| 2.3 近轴和大角度近似 .....          | 29 |
| 2.4 薄光学元件内的传播 .....         | 37 |
| 参考文献 .....                  | 42 |
| 第3章 光波导 .....               | 43 |
| 3.1 光波导理论简介 .....           | 43 |
| 3.2 平面光波导 .....             | 50 |
| 3.2.1 平面光波导中的导引 .....       | 50 |
| 3.2.2 平面光波导实例 .....         | 54 |
| 3.2.3 平板光波导 .....           | 56 |
| 3.2.4 有效折射率法 .....          | 64 |
| 3.2.5 平面光波导的传播常数计算 .....    | 66 |
| 3.2.6 极化、标量化和有效折射率的比较 ..... | 69 |
| 3.3 光纤 .....                | 73 |
| 3.3.1 光纤中的导引 .....          | 73 |
| 3.3.2 光纤实例 .....            | 75 |
| 3.3.3 阶梯折射率圆光纤 .....        | 76 |
| 3.3.4 用“穷人法”建模 MOF .....    | 85 |



|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 3.3.5 MOF的传播常数计算 .....         | 91         |
| 参考文献 .....                     | 94         |
| <b>第4章 光束传播法 .....</b>         | <b>104</b> |
| 4.1 引言 .....                   | 105        |
| 4.2 BPM 算法 .....               | 109        |
| 4.2.1 分步算子 BPM .....           | 109        |
| 4.2.2 本征模展开 BPM .....          | 111        |
| 4.2.3 矩阵展开 BPM .....           | 112        |
| 4.3 双方向 BPM .....              | 114        |
| 4.3.1 对突变不连续的处理 .....          | 114        |
| 4.3.2 对多次反射波的处理 .....          | 117        |
| 4.4 BPM 的数值实现 .....            | 119        |
| 4.4.1 边界条件 .....               | 124        |
| 4.4.2 色散特性 .....               | 125        |
| 4.4.3 阶梯化近似 .....              | 131        |
| 4.5 BPM 应用实例 .....             | 135        |
| 4.5.1 光锥 .....                 | 135        |
| 4.5.2 斜波导和弯曲波导 .....           | 137        |
| 4.5.3 Y形分叉波导 .....             | 140        |
| 4.6 时域分析 .....                 | 142        |
| 4.6.1 时域 BPM .....             | 143        |
| 4.6.2 行波法 .....                | 144        |
| 参考文献 .....                     | 144        |
| <b>第5章 光子器件的热力学建模 .....</b>    | <b>155</b> |
| 5.1 热流 .....                   | 155        |
| 5.2 光子器件中的热流 .....             | 157        |
| 5.3 均匀介质中热流的有限差分分析 .....       | 162        |
| 5.4 非均匀介质中热流的有限差分分析 .....      | 179        |
| 5.5 热源、边界条件和边界热阻 .....         | 186        |
| 参考文献 .....                     | 187        |
| <b>第6章 半导体光子器件中的电流 .....</b>   | <b>189</b> |
| 6.1 引言 .....                   | 189        |
| 6.2 无偏置 p-n 结中的电势分布 .....      | 192        |
| 6.3 偏置 p-n 结中的电势和准费米能级分布 ..... | 200        |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 6.4 光子半导体器件中的电流建模 .....    | 216        |
| 参考文献 .....                 | 218        |
| <b>第7章 光纤放大器和激光器 .....</b> | <b>222</b> |
| 7.1 光子和原子 .....            | 222        |
| 7.2 掺铒离子硅玻璃光纤 .....        | 225        |
| 7.3 光纤放大器建模 .....          | 228        |
| 7.3.1 同向和相向泵浦光放大器模型 .....  | 228        |
| 7.3.2 放大自发辐射 .....         | 240        |
| 7.4 光纤激光器建模 .....          | 241        |
| 7.5 时域模型 .....             | 247        |
| 7.6 模型参数的提取 .....          | 248        |
| 7.6.1 镧系离子的相互作用效应 .....    | 255        |
| 参考文献 .....                 | 257        |
| <b>第8章 激光器二极管建模 .....</b>  | <b>260</b> |
| 8.1 引言 .....               | 260        |
| 8.2 0D LD 模型 .....         | 262        |
| 8.2.1 0D CW 模型 .....       | 266        |
| 8.2.2 0D 时域模型 .....        | 272        |
| 8.2.3 0D 光谱模型 .....        | 275        |
| 8.2.4 1D 激光器二极管模型 .....    | 281        |
| 8.3 多维 LD 模型 .....         | 288        |
| 参考文献 .....                 | 295        |
| <b>第9章 光纤中的光脉冲传播 .....</b> | <b>300</b> |
| 9.1 引言 .....               | 300        |
| 9.2 光纤中的光脉冲传播 .....        | 300        |
| 9.3 分步傅里叶法 .....           | 305        |
| 参考文献 .....                 | 311        |

# 第 1 章 引 论

建模和设计在光子学中发挥着重要的作用。随着计算机科学和技术的进步，建模设计工具越来越强大，在现代光子学器件开发中得到广泛应用。为了讨论特定的有典型意义的实例，我们考虑一个市面上随处可见的 C 衬底封装半导体激光器二极管 (Laser Diode, LD) (如图 1.1 所示)。在其正常工作时，LD 在电流源泵浦下，会发射出相干光束 (如图 1.2 所示)。因此，LD 的阴极和阳极，通常会使用金线键合与电导线相连。这样，电流源就可以方便地对 LD 驱动。LD 的表面通常会镀高透膜，光会从这个表面射出。LD 中电流注入和光射出的过程，同时会伴有发热和应力应变。因此，LD 芯片会焊接在衬底上，然后衬底会焊接在一个热沉 (heat sink) 上。通过合适的焊接工艺，热沉可以发挥散热的作用，而衬底则可减小应力应变。以上简单的介绍性质的讨论告诉我们，通常，LD 模型应该包括一个光学模型——其精确描述了器件内的载流子输运以及泵浦电流转换为光的过程，一个热力学模型——其可推导出器

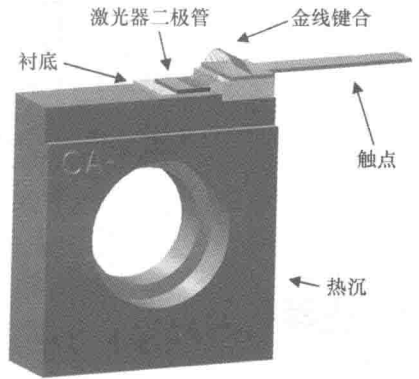


图 1.1 C 衬底激光器二极管示例

件内的载流子输运以及泵浦电流转换为光的过程，一个热力学模型——其可推导出器

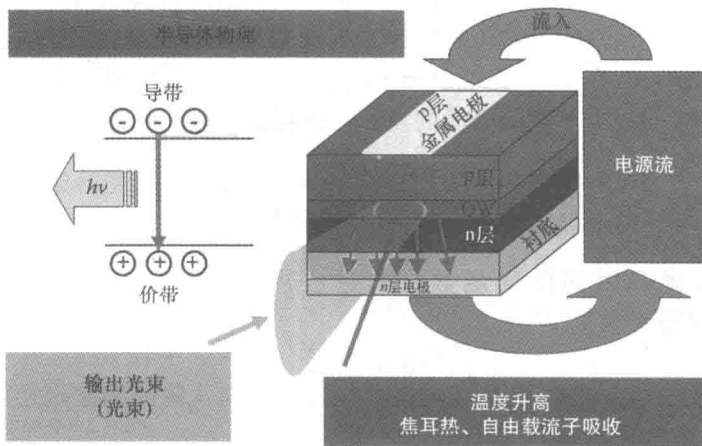


图 1.2 激光器二极管发光的物理过程

件工作温度以及最优的散热途径（如图 1.3 所示）。除此以外，LD 模型中还应包含应力应变模型，以计算应力应变张量场的分布。更通俗地讲，这个 LD 的实例告诉我们，光子学器件的建模和设计，原则上，涉及多个学科领域，需要熟知以下四个物理学分支，它们分别为：光传播理论、固体物理学（量子力学）、热扩散理论和弹性力学理论。

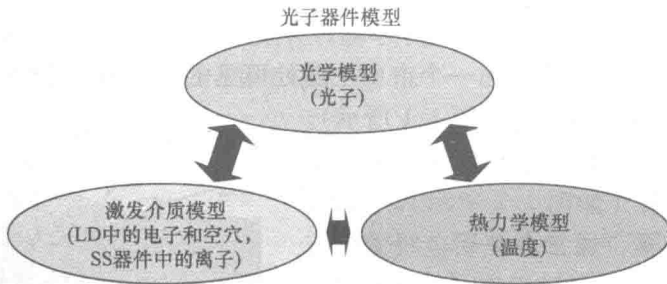


图 1.3 光子器件模型示意图

## 1.1 光学模型

现代光子学设计工具中的光学模型建模，基于麦克斯韦电磁场理论。电磁场理论得出，光可近似看作是一种电磁波。实际上，光是一种波的思想最早源于一个世纪以前的托马斯·杨。有趣的是，当代第一个光学理论称为几何光学，它认为光并不是一种波，而是排成一串小球构成。这一假说在 16 世纪和 17 世纪得到众多实验支持。虽然该假说受到惠更斯的强烈质疑，但几何光学还是在 18 世纪成为了一种成体系的光学理论。几何光学可以解释光的反射和折射现象，并在 17 世纪成功指导了望远镜的设计。在 18 世纪晚期和 19 世纪早期，越来越多的实验表明了光具有波动性。这些实验推动了波动光学的发展。该假说指出，光是一种波，且可由波动方程解出的标量函数描述：

$$\Delta u - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (1.1)$$

式中， $u$  为位置和时间的实函数； $\Delta$  是拉普拉斯算子，它在笛卡儿坐标系  $(x, y, z)$  中可表示成：

$$\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

常数  $c$  表示介质中的光速。

波动光学可以解释光的散射和干涉现象。但是它无法解释双折射现象——该现象最早发现于 17 世纪。这一问题随后催生了光的电磁波假说。即，光波可由四个矢量场完全描述，它们分别为：电场、磁场、电通量和磁感强度。这四个矢量场可

由麦克斯韦方程求得，对均匀介质，有

$$\begin{aligned}\nabla \times H &= \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t}\end{aligned}\quad (1.2)$$

在无自由空间电荷情况下，方程 (1.2) 有以下条件约束，以消除奇异解：

$$\begin{aligned}\nabla \cdot D &= 0 \\ \nabla \cdot H &= 0\end{aligned}$$

方程 (1.2) 中各种未知场可由以下材料本构方程描述：

$$\begin{aligned}D &= \varepsilon E \\ B &= \mu_0 H\end{aligned}\quad (1.3)$$

式中， $\varepsilon$  为介电常数； $\mu_0$  表示自由空间磁导率。

虽然电磁波理论无法解释光的量子性现象，但是，在当今，它是在光子学设计中最完备的光学理论和建模工具。在 20 世纪，基于量子电动力学的更先进的理论得到了长足的发展。但它们因为较复杂，难以直接应用于光子学设计工具中。因此，描述主要光学特性的方法依然是传统理论。我们在第 2~4 章中，循序渐进地研究光的传播理论，并在第 7、8 章中将其应用于有源器件建模，以及在第 9 章中对非线性介质内光的传播进行建模。

## 1.2 激发介质模型

激发介质模型基于量子力学原理。换句话说，对半导体器件，我们需要考虑两种现象：电流传导以及电流中的电子与光子的相互作用。半导体晶体由相对较大的原子交织而成。比如，镓原子有 31 个电子。不过，根据半导体物理，只有电子层外层的少数电子才能形成电流，并与光场进行有效的能量交换。在一个半导体晶体中，电子层外层的电子不被某一个原子核束缚。因此，它们的能量较稠密，可以分为两个能带：导带和价带。在这两个峰值能带间的能带带隙，对确定某一半导体的光学性质起到关键作用。这是因为，电子与光子相互作用的一个主要模式，就是电子从导带掉落到价带（带间跃迁），在这一过程中将能量以光子的形式释放出去。这一过程需要满足带隙能量等于光子频率与普朗克常数的乘积这一条件。因为带隙能量是一个半导体的一种本征属性，所以这一条件决定了一个半导体材料与其组成的光器件工作波长之间的关系。例如，GaN 激光器发出蓝色波段的光，而 GaAlAs 激光器发出接近  $1\mu\text{m}$  波长的光。

如前文所述，在一个半导体中，只有导带和价带的电子会参与电流。对导带的情况，传统上用带正电的电荷（空穴）输运表示导带失去电子。因此，求解半导体内部电流最简单易懂的模型，包括一个导带电子方程和另一个独立的价带空穴方

程。因此，在半导体材料内部，电子和空穴在空间垂直方向会形成一个内建电场。因此，这个模型还应包括一个可以计算电场空间分布的方程。这三个方程完整描述了半导体材料中电子和空穴的运输，它们即我们在文献中常见的漂移-扩散方程：

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{J}_n &= qR \\ \nabla \cdot \mathbf{J}_p &= -qR\end{aligned}\quad (1.4a)$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon_w \nabla \phi) + q(p - n + N_D^+ - N_A^-) = 0 \quad (1.4b)$$

式中，向量  $\mathbf{J}_n$  和  $\mathbf{J}_p$  分别是电子和空穴电流密度； $R$  表示净复合率； $q$  为电子电荷； $\phi$  表示电势分布； $p$  和  $n$  分别是电子和空穴密度分布； $N_D^+$  和  $N_A^-$  分别为施主和受主浓度； $\varepsilon_w$  为静电电容率。

因为对 LD 建模，并不需要方程 (1.4) 的精确解，所以方程 (1.4) 有时会近似表示为一个单极扩散方程：

$$D_n \nabla^2 N - R + \frac{J}{qd} = 0 \quad (1.5)$$

式中， $D_n$  表示扩散常数； $N$  是载流子浓度； $J$  是注入电子密度； $d$  为量子阱宽度。第 6 章将讨论半导体中的电流运输，而第 8 章将研究 LD 中的电子和光子相互作用。

若干重要的光子学器件基于镧系原子电子能级与光子的相互作用工作。研究镧系原子属性是原子光谱学的范畴。B. R. Judd 和 G. S. Ofelt 在 20 世纪后半叶提出了一个完备的模型，可以表征红外和可见光与镧系原子的相互作用<sup>[1]</sup>。该理论假设光子与镧系原子的 4f 电子层电子发生相互作用。第 7 章将会讨论这种光子与镧系原子的相互作用。

### 1.3 热扩散和应力应变模型

研究固体光子学器件中的热扩散，有助于优化器件内的热管理。当前理论假设，在器件内，热扩散通过热传导过程进行。热通量以单位面积的热功率计算，单位为瓦特 (W)，它与温度梯度成正比。热传导方程包括流入单位体积的净热通量、自发产生的热和单位体积内存储的热能量，它可写为

$$\nabla \cdot \kappa \cdot \nabla T + H = c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.6)$$

式中， $T$  表示温度分布； $H$  是发热率； $c$  是容积热容； $\kappa$  是导热系数。

当所有的常数可精确测量确定且发热率可知的情况下，我们可以得到光子器件内精确的温度分布。精确估计半导体器件的发热率很重要，必须谨慎处理。另外，这个现有的模型可能无法满足能量守恒定律。我们将在第 5 章讨论热扩散的建模。

最后，我们注意，应力应变模型通常不作为器件模型的一部分。应力应变场一

般不直接影响光子器件发光的过程。但这并不意味着应力应变分布不会影响光子器件的工作。例如，应 LD 中的应变量子阱<sup>[2]</sup>，以及集成光学中重要的应变诱导光波导<sup>[3]</sup>。当我们需要在光子器件建模中考虑应力应变时，可以用相关的专业工具，如 ANSYS<sup>TM</sup>，来计算应力应变强度场分布。除此以外，也可以用一些近似分析表达式来计算应力应变<sup>[4]</sup>。我们在本书中将不会过多讨论计算应力应变强度场分布的方法，因为这个问题有非常多的相关文献<sup>[5]</sup>可供参考。

## 1.4 光子器件模型

在本章前三节的讨论中，我们看到，光子学设计和建模需要求解一组相对较复杂的偏微分方程组。一般来讲，只有通过数值方法和足够快的计算机才能求出这个解。在过去的二十年中，计算机技术突飞猛进。在今天，商用 PC 几个吉字节的内存、超过 1GHz 主频的多核处理器，足够支撑像求解偏微分方程这类的复杂问题。所以与二十年前不同，光子器件设计的相当部分工作不再需要昂贵的超级计算机。因此，在市场主导下，生产商用专业光子器件设计软件的公司，其利润和设计能力都得到了大幅提高。目前市场上有如下一些公司有相关产品用于设计半导体激光器、平面光波导、光纤和体光学器件。它们有 Optiwave、Photon Design、RSoft、Crosslight 和 TimberCad 等。建模和设计技术社区也在近二十年逐步发展起来。一些专业术语逐渐规范化以方便表示数值模型的各个属性。因为我们将在本书中使用这些术语，所以下面我们先对它们做一个简单的介绍。

光子器件模型中一个主要属性是它的维度。例如，一个三维模型（或称 3D 模型），是在三维空间中求解偏微分方程的数值解。严格意义上，一个 3D 模型就可得到偏微分方程较精确的解。更高的维度求得的解更精确，但更高的维度也会带来更大的计算开销（如图 1.4 所示）。计算效率最优是模型维度不超过三维的主要原因。高

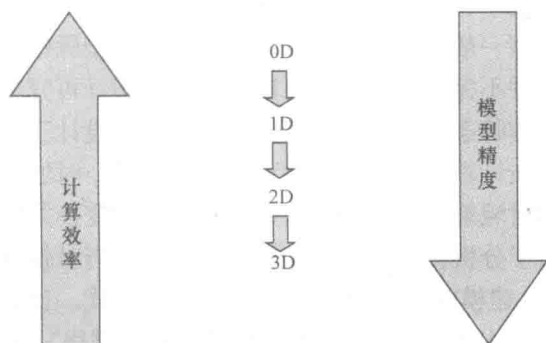


图 1.4 0D、1D、2D 和 3D 模型的取舍

计算效率模型一般用于遍历搜索设计参数空间。当设计参数空间足够窄时，速度较慢但精确的设计软件会使用完整的 3D 模型微调设计参数。我们也可以通过完整的 3D 模型更深入地理解光子器件的工作原理。这两种模型的组合可以缩短设计时间，从而缩短新光子器件的上市时间，减小设计成本（减少计算机资源和设计工时）。因此，一般在设计流程中，设计软件会支持多种维度，以兼顾减小总设计开销。

另两个光子学工程中重要的概念分别是机理模型和现象模型。机理模型基于由某一物理理论的基础方程的解构成模型。当我们研究光和物质相互作用时,最基础的物理理论是量子电动力学<sup>[6,7]</sup>。不过,这个理论过于复杂,无法直接应用于光子学设计和建模中。实际上,求解氦原子(2个电子)的薛定谔方程已经很困难,而光子学应用中的大多数原子或离子带有超过30个电子,例如,Ga(31个电子)和三价铟离子(65个电子)。这导致光子学设计直接使用机理模型几乎是不可能的。虽然如此,机理模型可以与其他模型一起使用,这意味着该模型由最基本的方程式和极少数的主观变量构成。机理模型的定义一般冗长且有些意义含糊不清,因此我们要求使用机理模型之前必须要解释清楚它的确切含义。现象模型,一般是基于实验结果直观得到的模型。现象模型存在大量的主观变量。开发一个现象模型使之可以成为一种实用设计工具并不是一件轻松的工作,它通常需要对光子学和特定的设计问题有非常深刻的理解。

光子学建模和设计中另一个重要的概念是预测模型。预测模型可以用于计算在一个参数或一组参数改变时器件特性的变化。因此,当一个预测模型中特定的参数和器件特性具有可预测性时,它非常方便于实践应用。另外,预测模型只能在一个特定的参数范围具有可预测性。例如,高功率LD模型在给出一组偏执电流的中间值的情况下,可以较准确地计算输出功率,但它无法计算出峰值输出功率(即只能在一个特定偏置电流值范围内预测光-电流特性)。预测模型是光子器件设计中最重要的一种模型。精确的(预测性)的设计工具可以显著减少产品开发时间可开销。但这不代表非预测性设计工具无法在现代光子器件开发中使用。实际上,很多情况下,从只能再现实验现象的模型中同样可以得到非常有实用价值的信息。这些模型一般在现代光子器件开发的早期步骤中发挥关键作用。因为在这一阶段,我们还并不完全清楚器件可能的工作状态。可完美再现实验结果的模型可以识别出器件工作状态的变化,从而为开发预测性设计工具提供基础。

在计算电磁学中,模型可分为两类:时域模型和频域模型。时域模型基于方程组的时域解,而频域模型则基于傅里叶变换并得到频域解。这两种类型的模型同样可用于分析光波导中的光传播。但是,当对较复杂结构的光子器件进行建模时,例如LD建模时,模型会有不同的分类方式。比如,LD设计模型分别为三种:时域模型、连续波(CW)模型和多波长(谱线)模型。CW模型假定器件特性处于稳态。时域模型则同时支持瞬态建模和稳态分析。CW谱线模型无法用于仿真瞬态,但是它可以预测(或再现)激光器光谱。实际上,谱线模型是一种频域模型,它可以在宽频谱范围内进行频谱分析。这三种模型的区别将在第8章中进行研究。

我们另外还要介绍一下分析模型和数值模型。分析模型基于器件工作方程组的分析解,而数值模型则基于方程组求解的数值方法。分析模型虽然非常重要,但是它在光子学设计中有很多局限性。光子学设计工程师遇到的大多数问题,都需要数值建模技术解决。我们将在本书中讨论这些数值建模技术。



计算机技术的发展同样推动了计算机程序开发环境的发展。最初,大多数光子学软件都是使用例如 Fortran 或 C + + 这些标准编程语言开发的。最近越来越多的光子学设计使用了如 MATLAB 这样的专业工程软件。我们将在本书中使用 MATLAB 以及 Python 开发实例。

## 参 考 文 献

1. Judd, B.R., *Operator Techniques in Atomic Spectroscopy*. 1963, New York: McGraw-Hill.
2. Erbert, G., et al., High-power tensile-strained GaAsP-AlGaAs quantum-well lasers emitting between 715 and 790 nm. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1999, 5(3): p. 780-784.
3. Saitoh, K., M. Koshihara, and Y. Tsuji, Stress analysis method for elastically anisotropic material based optical waveguides and its application to strain-induced optical waveguides. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(2): p. 255-259.
4. Chow, W.W. and S. Koch, *Semiconductor-Laser Fundamentals: Physics of the Gain Materials*. 1999, Berlin: Springer.
5. Sadd, M.H., *Elasticity, Theory, Applications and Numerics*. 2009, Oxford: Academic Press.
6. Sargent, M., M.O. Scully, and W.E. Lamb, *Laser Physics*. 1974, London: Addison-Wesley.
7. Marcuse, D., *Principles of Quantum Electronics*. 1980, London: Academic Press.