

光电子器件模型与 OEIC 模拟

Optoelectronic Devices Circuit Model
and The Circuit-level Simulation of OEIC

陈维友 杨树人 刘式墉 编著

国防工业出版社

责任编辑 耿新暖

ISBN 7-118-02330-2



9 787118 023305 >

ISBN 7-118-02330-2/TN·371

定价:22.00 元

光电子器件模型与 OEIC 模拟

Optoelectronic Devices Circuit Model
and The Circuit-level Simulation of
OEIC

陈维友 杨树人 刘式墉 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

光电子器件模型与 OEIC 模拟/陈维友等编著. —北京:
国防工业出版社, 2001. 1

ISBN 7-118-02330-2

I. 光… II. 陈… III. 光电器件—模拟电路
IV. TN36

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 31335 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 10 1/4 268 千字
2001 年 1 月第 1 版 2001 年 1 月北京第 1 次印刷
印数: 1—1500 册 定价: 22.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分，又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才，确保国防科技优秀图书的出版，原国防科工委于 1988 年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会，扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是：

1. 在国防科学技术领域中，学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖，内容具体、实用，对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著；密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作，负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由总装备部国防工业出版社列选出版。

1149106

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下，原国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样，才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金

第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄 宁			
副主任委员	殷鹤岭	高景德	陈芳允	曾 铎
秘 书 长	崔士义			
委 员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
(以姓氏笔划为序)	刘 仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

前 言

集成电路计算机辅助设计(CAD)已成为当今集成电路迅猛发展的支柱,是大规模集成电路(LSI)和超大规模集成电路(VLSI)设计必不可少的工具,可以预言,随着集成光电子学的不断前进,光电集成回路(OEIC)计算机辅助设计也必将成为推动 OEIC 加速发展的重要手段,它在缩短设计周期,减少资源耗费,提高器件性能,加速开发进程等方面将起着重要的作用。

无论是微电子还是光电子, CAD 的概念都是一个笼统的概念,通常包括工艺模拟,器件模拟,电路模拟,布局布线等环节,前三个环节又统称为技术 CAD (TCAD)。各个环节不是独立的,而是相互依托的,其重要性是不分主次的。当然,它们也不能相互替代,工艺模拟用于优化工艺过程和材料性能;器件模拟用于单个器件或器件非常少的结构紧凑的单片集成电路的优化设计;电路模拟用于单片或混合集成电路的优化设计;布局布线不属 TCAD 范畴,不能混为一谈。当然,这四个环节并不是 CAD 内涵的全部,还有计算机辅助测试,计算机辅助封装等。

电路级模拟作为 CAD 中的一个重要环节,是预测电路性能,检验电路设计正确性的有力工具。本书的着眼点是光电集成回路的电路级模拟。光电集成回路与微电子集成电路是不同的,因为在光电集成回路中,不仅有微电子器件,而且有光电子器件,不仅有电学信息,而且有光学信息。众所周知,电学量一般以“流”的概念来处理,而光学量一般则采用“波”的处理方法。那么,能否用微电子电路的模拟方法模拟光电集成回路呢?回答是肯定的,关键在于如何去构造光电子器件的电路模型。电路模拟方法

的本质是求解关于时间的一阶微分方程，也就是说，如果光电子器件的性能可以用关于时间的一阶微分方程（组）来描述，那么光电子器件就一定可以写成一个等效电路。无论是作为 OEIC 核心器件的半导体激光器（LD），还是其它发光和光探测器件，都可以用一组速率方程来描述其性能。

要想用微电子电路模拟分析方法对 OEIC 进行电路级模拟分析，首要问题是建立能充分反映光电子器件性能并可用纯电学元件等效的光电子器件电路模型。这是本书的重点。

对半导体器件定模通常有两种办法，一种是从器件的实际结构出发，分析器件所包含的子功能器件及其连接关系来获得电路模型的拓扑结构，如 BJT，MESFET 等。另一种方法是直接从描述器件性能的物理方程出发，通过适当的整理得到等效电路模型，光电子器件的定模大部分都是采用后一种方法。

对光电子器件定模工作始于 70 年代末期，最早被定模的光电子器件是半导体激光器，也是光电子器件定模的聚焦点，到目前为止，已有很多关于半导体激光器电路模型报道，相比之下，光探测器的电路模型的研究工作则较少。本书的宗旨是结合我们近年的工作，系统全面地给出多种光电子器件的电路模型，供理论工作者、软件开发、器件设计者参考。

微电子电路模拟软件都可用于 OEIC 电路模拟，如著名的通用电路模拟器 SPICE 和面向新器件模型开发的 iSMILE[A. T. Yang and S. M. Kang, Proc. of the 26th ACM/IEEE Design Automation Conference, 1989, 630-633]。目前，有很多关于 OEIC 的模拟分析工作都是借助微电子电路模拟软件进行的。

应当指出，本书主要以我们自己的工作为主，并且仅侧重光电子器件的电路模型。有关光电集成 CAD 的内容，J.J. Morikuni[Computer-Aided Design of Optoelectronic Integrated Circuit and Systems, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, 1997]在他的书中有较全面的论述。考虑微电子电路计算机辅助分析方面的书籍很多，本书对有关电路模拟方法方面的内容不再

赘述。

本书内容主要有三个部分,第一部分是绪论(第一章),阐述了 OEIC 与微电子电路的区别和 OEIC 模拟的特殊性。第二部分为光电子器件电路模型(第二章至第五章),系统地给出了多种光电子器件的电路模型,同时给出了 OEIC 常用的微电子器件的电路模型,并给出了多种光电子器件的 PSPICE 子电路描述。第三部分为实用部分(第六章),简单介绍了 PSPICE 的功能和子电路描述方法,并给出了 OEIC 模拟实例。本书内容由陈维友教授、杨树人教授和刘式墉教授共同策划完成,由陈维友教授统一执笔。

本书的工作得到国家“863”计划、国家自然科学基金、吉林省科技发展基金、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激发态物理开放研究实验室科学基金的支持。

承蒙中国科学院半导体研究所王启明院士和信息产业部电子十三所梁春广院士对本书的审阅和指正,在此谨向他们表示诚挚的谢意。借此机会感谢对我们工作给以支持的老师、同事、家人和朋友们。

由于作者水平有限,书中错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

作者 于吉林大学
1999年5月

内 容 简 介

本书是作者多年来在光电子器件电路模型和光电集成回路(OEIC)计算机辅助分析研究方面的工作总结。明确地指出了 OEIC 与微电子集成电路的区别及 OEIC 电路级模拟的特殊性。系统地阐述了多种光电子器件电路模型的构造方法,其中包括发光二极管,超辐射发光二极管,半导体激光器,半导体激光放大器,PIN 光探测器,PIN 雪崩光探测器,金属—半导体—金属光探测器,PINIP 结构多色光探测器,以及 HBT, MESFET, HEMT 等 OEIC 中常用的微电子器件。为体现理论与实用并重的原则,本书简单地介绍了 PSPICE 子电路模型的构造方法,给出了多种光电子器件 PSPICE 子电路描述,并给出了 OEIC 的模拟实例。

本书可供从事光电子器件模型研究人员, OEIC 计算机辅助分析软件开发人员和从事光电子器件设计研制人员参考。

This book summarizes author's research work in optoelectronic devices circuit model and the circuit-level simulation of optoelectronic integrated circuit (OEIC) in recent years. The difference between IC and OEIC and the specialty of OEIC simulation are clear indicated in the book. The book elaborates the constructing method of circuit model of several kind of optoelectronic devices, such as LED, SLD, LD, SLA, PIN-PD, PIN-APD, MSM-

PD, and PINIP-multi-color detector. In addition, the circuit models of HBT, MESFET and HEMT are briefly introduced. For the convenience of application, the describing method of subcircuit in PSPICE is outlined. Many PSPICE subcircuit codes of optoelectronic devices are given in this book.

This book is written for the peoples engaged in modeling optoelectronic devices, optimum designing, and developing OEIC simulator.

目 录

第一章 绪论	1
1.1 光电集成电路与微电子电路的区别	1
1.2 电路模型的特殊性	2
1.3 数值技术的特殊性	5
第二章 半导体发光器件电路模型(I)	9
2.1 物理基础	9
2.1.1 载流子复合与寿命	9
2.1.2 半导体结的 I-V 特性和 C-V 特性	14
2.1.3 半导体激光介质增益	27
2.1.4 半导体激光器速率方程	32
2.2 LED 电路模型	36
2.3 DH-LD 电路模型	43
2.3.1 DH-LD 电路模型	47
2.3.2 Tucker 模型	60
2.4 QW-LD 电路模型	65
2.4.1 D.S. Gao 模型	67
2.4.2 G. Rossi 模型	74
参考文献	93
第三章 半导体发光器件电路模型(II)	96
3.1 DFB-LD 电路模型	96
3.1.1 折射率光栅 DFB-LD 模型	97

3.1.2 具有内部相移的 DFB-LD 模型	113
3.1.3 吸收光栅增益耦合 DFB-LD 模型	123
3.2 多纵模 LD 与 SLD 电路模型	143
3.3 线性半导体激光放大器电路模型	160
3.3.1 驻波半导体激光放大器电路模型	161
3.3.2 行波半导体激光放大器电路模型	171
附录	176
参考文献	201
第四章 半导体光探测器电路模型	204
4.1 物理基础	204
4.1.1 载流子速场特性	204
4.1.2 碰撞离化率	207
4.2 光电导电路模型	217
4.2.1 瞬态模型	217
4.2.2 小信号模型	220
4.3 PIN-PD 和 PIN-APD 电路模型	224
4.4 MSM-PD 电路模型	243
4.5 PINIP-PD 电路模型	253
附录	270
参考文献	276
第五章 OEIC 常用的几种电子器件电路模型	279
5.1 HBT 电路模型	279
5.2 MESFET 电路模型	282
5.3 HEMT 电路模型	288
参考文献	293
第六章 OEIC PSPICE 模拟	295
6.1 PSPICE 子电路描述方法	296

6.2 OEIC 模拟实例	304
符号表	313
名词缩写	316

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1.1 The difference between IC and OEIC	1
1.2 The speciality of modeling	2
1.3 The speciality in numerical technique	5
Chapter 2 The circuit model of semiconductor light emitting devices(I)	9
2.1 Theory foundation	9
2.1.1 Recombination and lifetime of carrier	9
2.1.2 The I-V and C-V characteristics	14
2.1.3 Gain in laser medium	27
3.1. 4 Rate equations of laser	32
2.2 Circuit model of LED	36
2.3 Circuit model of DH-LD	43
2.3.1 Circuit model of DH-LD	47
2.3.2 Tucker's model	60
2.4 Circuit model of QW-LD	65
2.4.1 D.S. Gao's model	67
2.4.2 G. Rossi's model	74
References	93
Chapter 3 The circuit model of semiconductor light emitting devices (II)	96

3.1	Circuit model of DFB-LD	96
3.1.1	Circuit model of DFB-LD with refractive index grating	97
3.1.2	Circuit model of DFB-LD with internal phase-shift	113
3.1.3	Circuit model of gain-coupling DFB-LD with absorption grating	123
3.2	Circuit model of multi-longitudinal-mode LD and SLD	143
3.3	Circuit model of linear semiconductor laser amplifier ...	160
3.3.1	Circuit model of FP-SLA	161
3.3.2	Circuit model of TW-SLA	171
	Appendix	176
	References	201
Chapter 4 Circuit model of semiconductor photodetector ...		204
4.1	Theory foundation	204
4.1.1	The speed-field characteristics of carrier	204
4.1.2	Impact ionization	207
4.2	Circuit model of photoconductor	217
4.2.1	Circuit model for transient simulation	217
4.2.2	Circuit model for small-signal simulation	220
4.3	Circuit model of PIN-PD and PIN-APD	224
4.4	Circuit model of MSM-PD	243
4.5	Circuit model of PINIP-PD	253
	Appendix	270
	References	276
Chapter 5 Circuit model of several electric devices		279
5.1	Circuit model of HBT	279
5.2	Circuit model of MESFET	282
5.3	Circuit model of HEMT	288
	References	293