



装备科技译著出版基金

(第2版)

Second Edition

微波光子学

Microwave Photonics

[美] Chi H. Lee 编

余 岚 张道明 杜鹏飞 等译

蓝江桥 主审



国防工业出版社
National Defense Industry Press



CRC Press
Taylor & Francis Group



装备科技译著出版基金

微波光子学

(第2版)

Microwave Photonics
Second Edition

[美] Chi H. Lee 编
余岚 张道明 杜鹏飞 等译
蓝江桥 主审

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记图字:军-2015-050号

图书在版编目(CIP)数据

微波光子学 / (美)希·H·李(Chi H. Lee)编;
余岚等译. —2版. —北京:国防工业出版社, 2017. 3
书名原文: Microwave Photonics
ISBN 978-7-118-10913-9

I. ①微... II. ①希... ②余... III. ①微波理论-光
电子学 IV. ①TN201

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第287148号

Microwave Photonics

by Chi H. Lee

ISBN 978-1-4665-0286-4

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。
National Defence Industry 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国防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。

※

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100048)
北京京华虎彩印刷有限公司印刷
新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 27 字数 530 千字
2017年3月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 108.00元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

翻译组名单

组 长 余 岚
副组长 张道明 杜鹏飞
成 员 朱艳妮 杨大伟 王安乐
沃江海 张 进 王亚兰
主 审 蓝江桥

微波电子学、光子学和超快光学的快速发展催生了一个新的领域：微波光子学。微波光子学可定义为研究在微波或毫米波甚至太赫兹波段工作的光子器件及其在微波或光子系统中的应用的学科。从 20 世纪 70 年代末期微波光子学开创起，这一领域已迅速扩展并产生了许多具有重要商业性的应用。在这一多学科交叉领域，典型的研究包括超快信号测量、高速和微波信号产生、信号处理与转换、微波信号通过宽带光链路进行分布和传输等。

本书第 1 版出版至今已有 5 年。微波光子学经历了 20 世纪 80 年代的缓慢起步，最近也见证了其快速发展，例如，光纤和无线网络集成已成为商业现实，并变得越来越普遍。这一混合技术将带来很多新的应用，包括移动网络的回传解决方案、室内分布式天线系统和为用户提供非常高带宽服务的超宽带无线网络。

本次修订版回顾了微波光子学领域近 10 年的主要进展。每章中都介绍了自本书第 1 版以来的很多新进展。两个新章节取代了第 1 版的两章内容。本领域经验丰富的研究人员提供的素材既深入也覆盖了多个方面，这将为本领域的工作者提供及时的帮助，并且也会对本领域的科学家和工程师有所帮助。

由于微波光子学仍是一个新兴学科，本书不可能涵盖所有内容，章节之间不可避免存在一些重叠，不过读者也可以从不同观点的介绍中受益。

这里特别感谢所有参编人员，感谢他们的努力和协作。

MATLAB® 是 MathWorks 公司的注册商标，为得到相关产品信息，请联系：

The MathWorks, Inc.

3 Apple Hill Drive

Natick, MA 01760 - 2098 USA

Tel: 508 - 647 - 7000

Fax: 508 - 647 - 7001

E-mail: info@mathworks.com

网址: www.mathworks.com

第 1 章 微波光子学——从概念到器件和应用	1
1.1 引言	1
1.2 微波光子器件的概念	2
1.2.1 光电器件家族	3
1.2.2 行波器件	4
1.3 微波光子器件	6
1.3.1 电吸收调制器	6
1.3.2 光电探测器和混频器	8
1.3.3 电吸收收发器	10
1.3.4 微波激光二极管和发光二极管	12
1.4 光子集成和电路	12
1.5 光子微波信号产生和处理	16
1.5.1 光子微波移相器和时延控制	16
1.5.2 光子超宽带脉冲产生	16
1.5.3 射频频谱分析仪和光子滤波器	17
1.6 宽带光纤光链路	18
1.7 微波光子系统	20
1.7.1 光子本振	21
1.7.2 电场传感器	21
1.7.3 电光取样	22
1.7.4 光纤同轴电缆混合系统	24
1.7.5 光载无线通信系统	25
1.7.6 光电振荡器	28
1.7.7 建筑内网络和户内网络	30
1.7.8 数字城市	32
1.8 总结	32
致谢	33
参考文献	33

第 2 章 超快通信和信号处理中的飞秒全光器件	38
2.1 引言	38
2.2 飞秒器件的优点和需求	39
2.3 飞秒激光光源的最新进展	42
2.3.1 单片集成锁模激光器	42
2.3.2 脉冲波形控制器件	45
2.4 飞秒全光开关	48
2.4.1 具有半导体集成结构的全光开关	48
2.4.2 基于半导体中超快现象的全光开关	54
2.4.3 基于新材料的全光开关	70
2.4.4 超快全光器件的现状 & 展望	78
2.5 总结	81
致谢	81
参考文献	81
第 3 章 超宽带亚太赫兹光子无线链路	86
3.1 引言	86
3.2 毫米波和亚毫米波的光产生方法	87
3.2.1 光外差和零差技术	87
3.2.2 锁模脉冲串的光谱滤波	87
3.2.3 其他方法	90
3.3 毫米波和亚毫米波的光子发信机	91
3.3.1 高功率/高速光电探测器	91
3.3.2 基于低温生长 GaAs 的光子发信机	94
3.3.3 基于近弹道输运单行载流子光电二极管的光子发信机	97
3.4 光子毫米波无线链路	100
3.5 总结与展望	104
参考文献	104
第 4 章 光纤布拉格光栅在微波光子学中的应用	111
4.1 引言	111
4.2 光纤布拉格光栅	111
4.2.1 光纤布拉格光栅的建模	113
4.2.2 光纤布拉格光栅的合成	115
4.2.3 光纤布拉格光栅的制备	117
4.3 光纤光栅在真延时波束形成中的应用	118
4.4 光纤布拉格光栅在微波光子滤波中的应用	122
4.4.1 光纤布拉格光栅在微波光子延迟线滤波器中的应用	122

4.4.2	基于光滤波器响应到微波滤波器响应转换的 微波光子滤波器	129
4.5	光纤布拉格光栅在微波信号产生中的应用	131
4.5.1	基于外调制的光子微波信号产生	131
4.5.2	基于双波长激光器的光子微波信号产生	133
4.6	光纤布拉格光栅在微波任意波形产生中的应用	135
4.6.1	光纤布拉格光栅在基于光谱整形和频时映射的 任意波形产生技术中的应用	135
4.6.2	光纤布拉格光栅在基于傅里叶变换光脉冲整形的 任意微波波形产生技术中的应用	142
4.6.3	其他微波任意波形产生技术	144
4.7	总结与展望	146
	参考文献	147
第5章	混合光纤无线——概念与展望	154
5.1	引言	154
5.2	无线通信网的演变	154
5.3	无线与光纤网的集成	156
5.4	光载无线技术	159
5.4.1	信号传输方案	159
5.4.2	链路损伤	162
5.4.3	色散的影响	164
5.5	混合光纤无线展望	167
5.5.1	与光纤接入网融合	167
5.5.2	混合光纤无线系统中的基站技术	168
5.6	总结	171
	致谢	172
	参考文献	172
第6章	大动态范围 100km 数字光载无线链路	175
6.1	引言	175
6.2	长距离链路设计	176
6.2.1	强度调制	176
6.2.2	相位调制	184
6.2.3	色散	187
6.2.4	受激布里渊散射	189
6.2.5	其他光纤传输损伤	191
6.2.6	正交幅度调制	191

6.3	链路实例	194
6.3.1	采用 EDFA 中继器的 110km 链路	194
6.3.2	采用拉曼放大的 105km 链路	197
6.4	发展前景	202
	参考文献	204
第 7 章	光子合成超宽带任意电磁波形	211
7.1	引言	211
7.1.1	基于光脉冲整形器的任意电磁波形发生器所遵循的 一般关系	212
7.1.2	光脉冲整形架构的简要回顾	214
7.1.3	光源激光器的选择	216
7.1.4	光辅助任意波形产生与电任意波形产生对比	217
7.2	任意毫米波波形合成	217
7.2.1	基于高分辨率直接空时映射光脉冲整形的 任意毫米波波形合成	218
7.2.2	捷变毫米波波形产生	221
7.3	超宽带微波波形合成	224
7.3.1	超宽带系统、应用及挑战	224
7.3.2	实验系统	226
7.3.3	超宽带射频和微波信号合成	228
7.3.4	超宽带射频和微波波形频谱设计	230
7.3.5	基于硅光子频谱整形器的任意波形产生	237
7.3.6	采用大电流容量光电二极管增大波形幅度	240
7.4	光子合成波形的应用	243
7.4.1	宽带天线相位失真的测量和补偿	244
7.4.2	利用光子技术合成高纯度微波信号测量光电 二极管非线性	255
7.5	总结	259
	致谢	259
	参考文献	260
第 8 章	超快光电子器件和集成分布式微波光子器件的应用	267
8.1	引言	267
8.2	基于自由载流子注入的半导体微环光开关	269
8.2.1	背景	269
8.2.2	理论	269
8.2.3	实验	270

8.2.4	讨论	273
8.2.5	相位开关	274
8.2.6	载流子寿命	277
8.2.7	半导体微环光开关技术小结	277
8.3	铁电薄膜电容极化反转动力学	278
8.3.1	背景	278
8.3.2	脉冲方法及仿真	278
8.3.3	实验和结果	282
8.3.4	铁电薄膜电容器的极化反转动力学小结	286
8.4	基于聚合物光波导与分布式行波探测器集成的平衡相干探测	288
8.4.1	背景	288
8.4.2	平衡相干探测	289
8.4.3	与聚合物光波导单片集成的分布式行波光电探测器的设计与制备	290
8.4.4	平衡相干探测实验结果	301
8.4.5	平衡相干探测小结	303
8.5	总结	303
	致谢	304
	参考文献	304
第9章	太赫兹采样率时间拉伸模数转换	308
9.1	引言	308
9.2	时间-波长映射	311
9.3	离散时间-波长处理	313
9.4	时间拉伸对信噪比的影响	314
9.5	光学色散对时间拉伸电信号保真度的影响	316
9.5.1	数学模型	316
9.5.2	色散代价和谐波失真	317
9.5.3	残余相位误差	320
9.6	时宽带宽积	323
9.7	基于偏振复用机制的时宽带宽积倍增	325
9.8	色散导致的带宽受限解决方案	327
9.8.1	单边带调制	327
9.8.2	单边带调制的实际考虑	330
9.8.3	相位分集法和最大比合并算法	333
9.8.4	TS/s 的瞬态数字转换器	335
9.9	光学非线性对时间拉伸的电信号保真度的影响	337

9.10	实现高分辨率和大动态范围的失真校正技术	340
9.10.1	光源光谱非一致性的校正	340
9.10.2	谐波失真抑制技术	344
9.10.3	时间扭曲失真校正和标定	349
9.11	连续时间工作	354
9.12	总结	360
9.A	附录	361
	参考文献	362
第10章	太赫兹光子学	366
10.1	引言	366
10.2	脉冲系统	368
10.2.1	产生	369
10.2.2	探测	372
10.2.3	太赫兹波空气光子技术	373
10.3	连续波系统	377
10.3.1	产生	377
10.3.2	探测	380
10.4	感知技术和应用	381
10.4.1	时域光谱技术	381
10.4.2	炸药辨识	384
10.4.3	太赫兹光谱技术的其他应用	387
10.4.4	自参考光谱技术	388
10.5	成像技术及应用	390
10.5.1	被动和主动成像	390
10.5.2	基于 CCD 的二维成像	392
10.5.3	成像系统架构和波束导引	392
10.5.4	紧凑型连续波太赫兹成像系统	393
10.5.5	航天飞机泡沫检查	395
10.5.6	安检和内容检查	397
10.5.7	层析成像	399
10.6	展望	403
	致谢	405
	参考文献	405
	缩略词索引	413

1.1 引言

几十年来,光波、微波两者相互作用,其思想相互融合,已引起全世界的日益关注和极大兴趣。1991年,首次引入了“微波光子学”这一术语来描述新发明的基于光波行波和微波行波相互作用的光电器件^[1,2],行波这一概念在非线性光学以及射频电子学的行波管中早已为人熟知。随后,人们预见微波和光子技术融合将赢得潜在的商机,也将发展成为一些应用领域中新的技术途径。例如,在未来的相控阵雷达或者光纤无线通信系统这两个主要的应用领域,可利用微波光子技术将射频信号加载在光载波上从而可使其沿着损耗极低的玻璃光纤进行传播^[3]。从那时起,射频光电子学和微波光子学领域得到了迅速拓展。从1996年开始每年都有国际微波光子学会议,此外,定期还有亚太微波光子学会议(APMW)和各种微波光子学会议及相关特别专题。1995年,IEEE MTT第一次出版微波光子学特刊,至今一直定期出版^[4]。目前,全球微波光子学领域内每年有10多个会议可以参加。

现在,通过将不同的有益技术进行结合转化,微波光子学已成为最具创新性和商业兴趣的一个新兴多学科交叉领域^[5-8]。这意味着在光子学中可应用微波技术,也可以在微波技术中利用光子技术。最重要的是,在一些特定领域,通过将两种技术融合已经发展出了相互促进的新思想,对于光电子学领域和作为微波光波接口的光电器件尤其如此。甚至,由于频率日益提高(例如无线通信领域),现在微波这个词语在频域上不仅代表吉赫兹和毫米波,也代表太赫兹频率的电磁波,在时域上相应地代表皮秒和飞秒时间尺度的信号^[8]。

整体而言,光波微波相互作用这一研究领域最初被称为射频光电子学,主要研究工作在微波或毫米波段的高速光子器件^[2]以及在射频、微波、毫米波、太赫兹或光子系统中的应用。这一多学科领域处于微波技术、超快电子学和光子技术的结合区,其典型研究内容包括高速信号和微波信号的产生、处理和转换,通过宽带有线或无线光链路(玻璃、聚合物光纤甚至自由空间)分布和传输微波信号等。自

20 世纪 70 年代首个先驱性的思想和实验至今,微波光子学领域已得到极大发展,并且为其成为具有更多创新、更多重要商业应用的支撑性技术铺平了道路。

本章旨在运用典型实例进行综览,并介绍了微波光子学这个交叉学科领域从基本概念、器件、技术到正在研究的系统以及人们感兴趣的应用等方面一些最新的典型结果。尤其会通过一些能体现出微波光波这两种技术有机融合的典型实例进行下列专题的讲解:

- 超快光子器件,例如光调制器、光电探测器、光子混频器、发射接收器,并特别强调了利用微波行波和光信号之间分布式相互作用以避免 RC 时间常数受限的行波器件;

- 单片集成技术和封装;

- 利用光子技术进行微波信号产生和处理的思想和例子;

- 宽带和模拟光链路实现高速互联;

- 基于微波技术和光学技术融合的微波光子系统,包括无线通信技术,如蜂窝射频系统中的光链路、电场传感器和光控相控阵天线系统等例子。

最新的成果,尤其是在高速光互联领域,清楚地体现了微波光子学涉及的不同技术的有机融合及其优势。

1.1 节概述了微波光子学及其对不同微波技术的重要意义。1.2 节从光垂直式器件和光波导结构器件等基础入手,讲解微波光波相互作用器件的基本原理。此外,还讨论集总元件和行波器件。微波光子器件家族包括光电探测器、激光二极管、发光二极管等两端口元件,以及调制器、混频器等三端口元件。这些器件中利用了不同的物理相互作用。1.3 节讨论电吸收调制器、电吸收发射接收器、电吸收混频器、高速光电探测器和混频器等电吸收器件的最新进展以及一些实验结果。1.4 节讨论不同功能模块的单片光电集成、光子集成电路以及光纤-芯片耦合技术。1.5 节介绍光子微波信号产生和处理组件与模块方面一些非常有趣的例子。1.6 节着重关注微波光子链路的概况及其基本特点。1.7 节给出一些光子微波系统应用的例子。

1.2 微波光子器件的概念

高速光电器件的最新发展以及光纤的宽带、低损耗传输能力在很大程度上促进了全球宽带通信的发展壮大。尤其是当前高速光互联网无处不在,作为其关键元件的光电探测器和调制器得到了快速发展,并且从光纤到户和户内光纤等术语也能看出互联网中的光纤离用户越来越近,这些术语也为微波光子器件清晰地指明了一个成本起决定作用的巨大市场。

下文概述超快光子器件的现状,重点关注最近研发的电吸收和行波器件,并对这一新兴领域未来的趋势进行展望。

1.2.1 光电器件家族

图 1.1 为四种基本光电相互作用器件的示意图,可看出它们分属两类:①两端口器件,包括光电探测器、激光二极管或发光二极管(图 1.1(a)和图 1.1(b))等,可作为光信号(波浪线)和电信号(直线)的转换器;②三端口器件,包括光电调制器或者光控电调制器(图 1.1(c)和图 1.1(d))等。需注意,图 1.1(c)和图 1.1(d)所示的这两种三端口器件是一种光电晶体管,这意味着与图 1.1(a)和图 1.1(b)中的两端口器件相比,三端口器件可提供小信号光电增益。以信息科学的视角来看,通常情况下,图 1.1(a)和图 1.1(b)中的两端口器件分别实现光功率到电流的转换(响应度单位为 A/W)及电流到光功率的转换(响应度单位为 W/A),但对于很多特定的应用,更合适的视角是就功率转换而言的光电效率。例如,光纤射频系统中用光电探测器来产生直接由天线辐射的微波功率,这种情况下,最感兴趣的是用电输出功率除以光输入功率得到的功率转换效率,对于太阳能电池也是类似的。

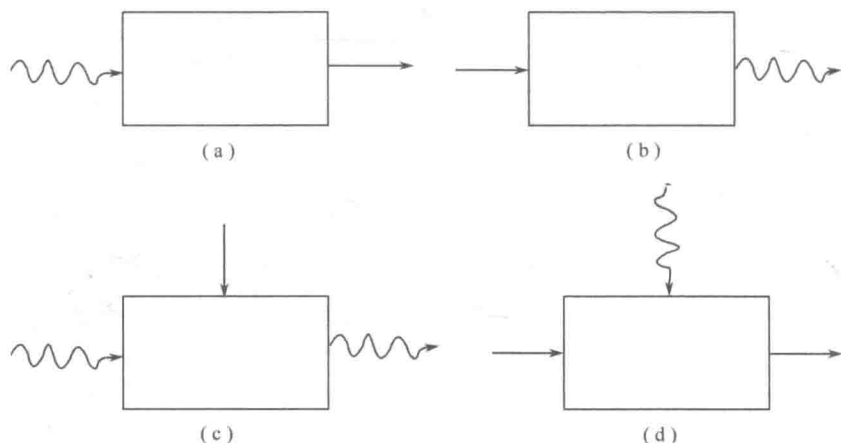


图 1.1 光电器件家族:基本的微波光波相互作用器件

- (a) 光电探测器;(b) 激光二极管或发光二极管;
(c) 电控光调制器;(d) 光控电调制器或光控器件。

这里,进一步区分微波光波相互作用的两个基本物理概念(图 1.2)。可看出,两者区别是相对于载流子移动方向,光波的传播方向不同。这里载流子移动方向对应电流方向和内部电场方向,它通常由施加到金属电极上的外部偏置电压决定。在图 1.2(a)中,光波平行于电荷流向和电流方向垂直传播到半导体表面。这种设计中,光相互作用长度尤其是吸收深度与电荷载流子流动的距离相互关联。因此,作为例子,在光电探测器中不能独立于渡越时间设计吸收长度,较大的带宽意味着较短的渡越时间,较短的渡越时间只能通过较短的吸收长度实现,但较短的吸收长度又会导致吸收较少。作为对比,图 1.2(b)给出的光电探测器中,光波平行于半

导体表面传播,所以穿透深度可以非常大,并且与决定渡越时间的垂直方向的设计相互独立。这种情况下,必须用光波导精确控制光波及其与内部电场的相互作用。当给定技术条件和规格并且开始优化器件时就会用到这些思想。另外,这种器件也可以利用其他光波导思想和金属电极。通常还存在另一个问题:与图 1.2(b)相比,图 1.2(a)所示的设计要求金属电极或者金属叉指透明,此时半导体材料的表面也要高掺杂以实现良好的欧姆接触,建立良好的表面电势。

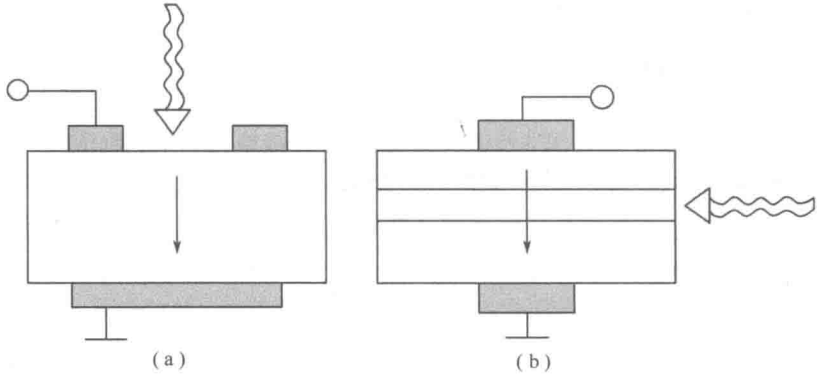


图 1.2 微波光波相互作用器件
(a)光波垂直传播; (b)光波水平传播。

1.2.2 行波器件

为实现高速工作,通常要根据电极横向尺寸将图 1.2 所示的电子器件按比例缩小以减小其电容,从而减小 RC 时间常数,提高截止频率。需要指出的是,通常(但不是必然) R 为 50Ω 。当光电探测器与天线直接相连时,光电探测器的输出电流必须转化成最大电输出功率,而电输出功率也依赖于天线的特性阻抗,其值通常并不一定是 50Ω 。由于器件越小功率也越小,尺寸缩小也受功率方面的需求所限。对于这一问题,一个很有意思且当前已广为接受的解决方法是利用电信号的传播效应,即设计电子器件时也纳入电波传播效应,这点过去已有很多介绍^[1,8-13],开发射频集成电路、单片微波集成电路等高速集成电路以及人们所熟知的行波放大器时也已经应用。

根据这些行波器件(图 1.3(a))的设计,电极可以用我们熟知的微带或者共面传输线(CPW)的形式实现,它们与光波导平行且贴近。可以看出,这些行波器件在光域、电域均利用了波传播效应。由于非线性光学中的相互作用总是发生在波传播过程中,很明显,这一思想是建立在非线性光学的物理机理之上,因此,这些器件的带宽不受通常的“RC 时间常数”限制。需注意的是,由于行波器件具有电特性阻抗,所以必须从光功率和电流之间的光电转换,以及输入/输出阻抗与传输线特性阻抗匹配以保证从最大功率传输等方面考虑来对其阻值进行优化,然而,阻抗

失配时会发生反射,从而使得相应的有效相互作用长度增大并可能产生谐振,这会导致微波幅度大大增加。这可能是可以利用的优势,也可能是需要避免的情形,具体取决于系统的应用背景。另外,由于产生自 pn 或 pin 二极管横截面的单位长度电容较大,所以电波通常是慢波。

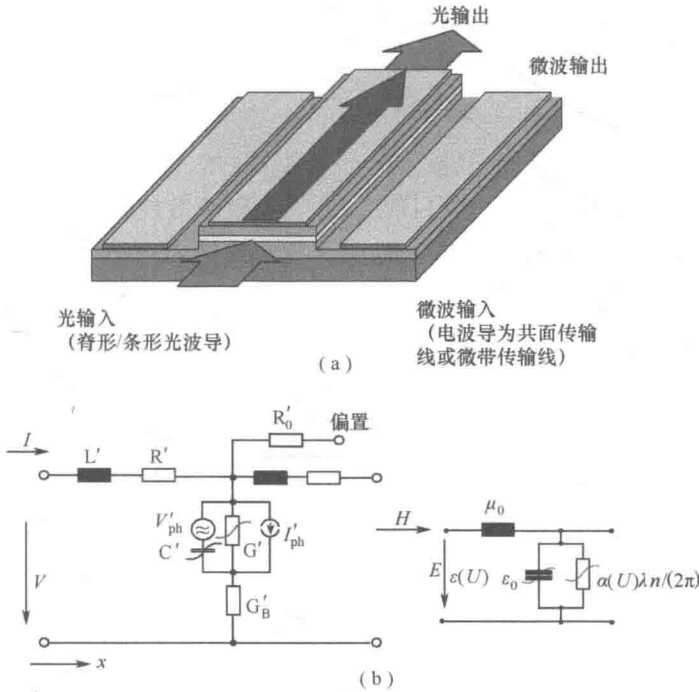


图 1.3 行波器件

(a)光波与电磁波同方向传输的器件示意图;
(b)包含相互作用机制的电域等效电路(左)和光域等效电路(右)。

图 1.3(b)所示为行波器件的等效电路,其中左图为电域等效电路,右图为光域等效电路,图中包含了相互作用机制。①电域等效电路中含有常用电路元件分层传输线^[8,9]、附加元件单位长度上的电流源和电压源以及单位长度上的光控电导,其中单位长度上的电流源和电压源产生于光吸收,单位长度上的光控电导用于等效产生电荷载流子。这里还需要指出的是,由光波导以及 pn 或 pin 结的本征层、耗尽层产生的单位长度的电容和电导取决于施加的偏置电压(电非线性)。电学上,这是一种非线性传输线,40 多年来对其已进行了大量的研究。②在光域等效电路中, E 和 H 分别对应电场和磁场, ϵ 和 μ 分别是介电常数和磁导率。它类似于横电磁模(TEM)电磁波的麦克斯韦方程组。电光效应用 $\epsilon(U)$ 描述,电吸收用吸收系数 $\alpha(U)$ 描述,而 $\alpha(U)$ 和 $\epsilon(U)$ 均与电压有关。注意在 Pockels 效应、Kerr 效应、量子限制 Strak 效应及弗朗兹 - 凯尔迪什(Franz - Keldysh)效应中, U 表示产生所需内部电场而施加的电压。

可以预见,行波这一思想将会得到进一步改进,例如,可考虑空间电荷的渡越时间和波传播效应,并且电波和光波之间的相互作用也可以是倾斜的或在不同的方向(返波传播),这有可能会产生更有趣的设计。需要进一步明确的是,慢波结构使电波导波长可以非常短(已经测到过大于 100 的减慢因子),所以即使在电极面积较小,尤其频率较高(例如在太赫兹波段)的情况下,设计光电器件时也必须考虑行波传播。

综上所述,现代微波光子器件中移动的电子、空穴、电场和光子之间会发生波性相互作用,这些可归为微波和光波的相互作用。显然,可将不同的技术有机融合来开创具有极大优势的新概念。到目前为止,其中仅少数技术和新发展得到了应用,相应的器件也已经实现,但可以预见,纳米技术和纳米光子学以及光子带隙结构、电磁带隙结构甚至包括超材料性质这些新兴领域将在未来几年引领微波光子技术取得重要进展。

1.3 微波光子器件

下面,讨论一些关键的微波光波相互作用器件的思想及其实现。

1.3.1 电吸收调制器

电吸收调制器具有工作电压低、带宽大、能与其他元件(如激光二极管)单片集成的优点^[14-17]。图 1.4 为使用 InP 半导体材料,设计波长为 $1.55\mu\text{m}$ 的宽带高速电吸收调制器。电学上,电吸收调制器像我们熟知的反向偏置下的 pin 二极管;光学上,它包含一个脊波导。对于 $1.55\mu\text{m}$ (玻璃光纤中损耗最小的波长)的设计波长,波导芯由多量子阱材料制备而成,InP 包层从上下两面将波导芯“夹”住。对于 $1.3\mu\text{m}$ (玻璃光纤中零色散波长)的设计波长,其结构相似,但对其他波长,需要不同的设计及不同的半导体材料,如 850nm 左右的波长用 GaAs。当今,有一种技术称为硅光子学,它使用绝缘体上硅结构(SOI)可将光调制器与传统 CMOS 电路集成在一起。

图 1.4 所示的器件是一个具有共面输入电极的集总元件,其行波设计(如图 1.3 所示)也已得到验证并发表^[17]。图 1.5 和图 1.6 分别为数字和模拟器件的实验结果。图 1.5 所示为两个带宽分别约为 10GHz 和 40GHz 的数字器件的特性,如果使用行波设计,则截止频率将大于 70GHz 。图 1.6 分别给出了用于传感器的集总电吸收调制器的频率特性以及无杂散动态范围(SFDR)的实测结果。可以看出,带宽的实验结果与基于等价电路模型仿真得到的结果十分吻合。