

◆◆◆◆
「十二五」国家重点图书出版规划项目
当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书

聚合物光开关 器件物理

郑传涛

马春生

◆ 著



中国科学技术大学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目
当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书



聚合物光开关 器件物理



郑传涛 马春生

著

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书主要阐述了光开关的波导和电极的分析及设计理论,优化设计了一般结构的电光开关、改进结构的电光开关、宽光谱电光开关、波长选择性电光开关、高速电光开关、有机/无机混合波导热开关,同时给出了电光开关的时频域分析理论和模拟方法等。

本书可作为导波光学、集成光学、光电子学、物理电子学等专业科研工作者和工程技术人员的参考用书,同时也可作为相关专业研究生的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

聚合物光开关器件物理/郑传涛,马春生著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2015. 1

(当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-312-03565-4

I. 聚… II. ① 郑… ② 马… III. 聚合物—电光器件—开关—物理学 IV. TN15

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 286196 号

出版 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路 96 号,230026
<http://press.ustc.edu.cn>
印刷 合肥市宏基印刷有限公司
发行 中国科学技术大学出版社
经销 全国新华书店
开本 710 mm×1000 mm 1/16
印张 25.25
字数 418 千
版次 2015 年 1 月第 1 版
印次 2015 年 1 月第 1 次印刷
定价 78.00 元



序 言

20世纪中期以来,光电子学理论逐步发展和完善,各种新型光学材料不断涌现,器件结构不断改进,集成光电子、微电子加工工艺日益进步和成熟,这些都为新型光通信器件的制作及性能改善提供了理论基础和工艺条件,也为大容量、高速度的光纤通信网络、光信息处理系统及光计算机的出现和发展提供了可能性。在信息通信领域,传统的电子通信和电交换已经无法满足人们的要求。随着信息传输容量的日益增大,信息传输媒介由电缆转向光缆,交换方式由电交换转向光交换,传输方式由粗波分复用转向密集波分复用,信息处理器件由电子器件转为光子器件,并最终实现全光通信,成为互联网发展的必然趋势。

光开关与光开关阵列是光纤通信系统中重要的光学器件,随着数据通信和密集波分复用系统的逐步应用,复杂的网络拓扑需要更为可靠和灵活的网络管理。在城域网和接入网应用中,密集波分复用技术对具有插/分和交换功能的光开关的需求更加迫切。近年来,从机械光开关、微光机电系统光开关、磁光开关、声光开关、热光开关、电光开关到全光开关,从无机电光晶体材料光开关到新型极化聚合物电光材料光开关,从马赫—曾德尔干涉仪(MZI)型、微环谐振(MRR)型、定向耦合器(DC)型、数字(DOS)型、多模干涉(MMI)型到交叉全内反射(TIR)型,光开关在开关机理、制作材料和器件结构等方面日益发展和完善。

作者数年来一直从事聚合物光开关方面的理论和实验研究工作,作者所在的吉林大学聚合物光子技术实验室,多年来一直从事聚合物光波导器件的设计和制备工作,具有较好的工作积累。作者以多年来的研究

工作为基础,编著了本书。书中所阐述的光开关器件,主要是以聚合物材料为制备材料、以热光效应和电光效应为主要机理。本书主要阐述了光开关的波导和电极的分析及设计理论,优化设计了一般结构的电光开关、改进结构的电光开关、宽光谱电光开关、波长选择性电光开关、高速电光开关、有机/无机混合波导热光开关,同时给出了电光开关的时频域分析理论和模拟方法等。本书对每种结构的光开关器件均做了详细的结构设计、理论分析、参数优化和性能模拟,对相关公式均做了详细的推导和证明。书中的相关结论为实验室加工和制作该类器件提供了一定的理论基础和相关设计数据,为改进现有器件结构上的不足、改善其性能提供了方法依据,所给出的新型分析理论、相关公式、设计方法和优化过程在设计和制作同类器件方面也具有一定的参考意义和借鉴价值。

全书共有8章。

第1章为光开关技术基础。首先介绍光开关技术的主要应用、技术种类和特点,然后详细介绍电光以及热光机制下的光开关技术及研究现状,使读者能够更好地了解光开关技术,并为以后运用光波导模式理论和微带电极理论设计和分析光开关器件打好基础。

第2章为光开关的波导结构及模式分析。针对光开关设计中所涉及的介质吸收型和金属包层型波导结构,运用微扰法或者微分法求解其传播常数及振幅衰减系数,简化波导结构,并分析其耦合、偏折、弯曲等特性。本章还给出了其他几种波导的分析方法,如多模干涉波导、狭缝波导等,为设计和制备新型光开关器件提供了理论依据。

第3章为行波电极结构及其分析理论。首先介绍了含掺杂生色团聚合物的两种极化方法——电晕极化和接触极化,并依据电光调制理论分析了极化聚合物的折射率变化与外加电场的关系。其次,针对所设计的电光开关,给出了经常用到的几种共面或微带行波电极结构及其电场分布的计算方法,包括保角变换法、镜像法、点匹配法、扩展点匹配法等。最后,讨论了行波电极的等效模型、阻抗匹配和动态场分布等问题。

第4章为传统结构极化聚合物电光开关。主要针对传统的定向耦合结构、MZI结构、Y型耦合器结构、多节反相电极结构的电光开关,给出了各器件详细的结构模型、分析理论、相关公式和性能模拟结果。另外,通过在波导或电极方面提出一些改进或优化的结构,来增大电光耦

合效率、降低开关电压、增大工艺容差、减小器件尺寸、降低插入损耗和串扰。本章给出的一些分析理论、设计方法和优化过程,可为实验室制作和加工该类以及同类器件提供一定的理论依据和数据参考。

第5章为聚合物宽光谱电光开关。为了拓宽电光开关的输出光谱,使之能应用于非波长选择性光片上网络(ONoC)系统,本章主要针对MZI结构,通过分析波长变化时MZI电光区相移的色散特性,设计了新型相位补偿单元,并利用其产生的非线性相位对MZI电光区的相移漂移进行补偿,有效消除了波长变化导致的功率变化,从而拓宽了器件的输出光谱范围。本章以相位发生器(PGC)为相移补偿单元并以MZI为基本器件结构,优化设计并模拟了多种硅基聚合物宽光谱MZI电光开关,分别给出了器件的结构和光谱拓展原理,应用非线性最小均方优化算法对器件结构做了优化,对其光谱性能做了模拟分析和讨论。

第6章为周期化波长选择性光开关。本章使用两个串行级联的PGC补偿MZI区域产生的相移漂移,并通过对PGC结构的优化,实现相位补偿和消光比补偿,使器件的输出端口呈现周期性输出光谱。本章首先阐述非对称MZI的一般光谱周期化理论并给出相关公式。接着,设计两种光谱周期化的非对称MZI波长选择性开关,对其开关性能和光谱性能做具体模拟和分析讨论。

第7章为行波电极高速电光开关及其时频域分析。为了提高电光开关的开关频率和开关速度,首先设计和优化了阻抗匹配型定向耦合电光开关、阻抗匹配型MMI-MZI电光开关、屏蔽电极定向耦合电光开关、屏蔽电极Y型耦合器电光开关和余弦级联反相CPWG行波电极定向耦合电光开关。其次,针对前两种器件,给出了微元近似分析法,理论模拟了器件的低频和高速开关响应特性;针对第三、四种器件,给出了趋肤效应特性分析法,理论模拟了趋肤效应对器件性能的影响;针对第五种器件,给出了傅里叶分析方法,该方法可更为准确地分析器件的时频域特性。

第8章为聚合物热光开关。本章优化设计并制备了两种有机/无机混合结构的MZI热光开关,分别测试了器件的静态和动态特性。另外,利用自主制作的含噪驱动源,实验研究了器件的容噪特性,并对相关结果做了分析和讨论。

本书的大多内容是作者历年发表的SCI、EI等学术论文的内容总

结,具有较高的学术价值和学术水平。书中对光开关的研究工作得到了国家自然科学基金、教育部博士点基金、中国博士后科学基金等多个项目的资助。

本书由以下科研项目经费支持出版:

1. 国家自然科学基金:“聚合物电光开关阵列的S+C+L超宽波段光谱平坦化及失效模式研究”(项目负责人:郑传涛;批准号:61107021;起止年月:2012.01.01—2014.12.31)。

2. 高等学校博士学科点专项科研基金(新教师类):“聚合物电光开关阵列的S+C+L超宽波段带宽平坦化研究”(项目负责人:郑传涛;批准号:20110061120052;起止年月:2012.01.01—2014.12.31)。

3. 高等学校博士学科点专项科研基金(优先发展领域课题):“聚合物超宽波段电光路由/开关阵列及其可扩拓扑机制研究”(项目负责人:王一丁;批准号:20120061130008;起止年月:2013.01.01—2015.12.31)。

4. 吉林省科技发展计划——青年科研基金项目:“聚合物电光路由/开关阵列及拓扑机制研究”(项目负责人:郑传涛;批准号:20130522161JH;起止年月:2013.01.01—2015.12.31)。

本书可作为导波光学、集成光学、光电子学、物理电子学等专业科研工作者和工程技术人员的参考用书,同时也可作为相关专业研究生的教学用书。

在本书编写及修改过程中,参阅了国内外的一些著作和学术论文,均列于参考文献中,在此向原作者们表示由衷谢意!

本书的主要工作也得到了吉林大学聚合物光子技术实验室全体老师和同学的支持,向他们表示衷心的感谢。本书出版过程中得到了中国科学技术大学出版社的大力支持和热情协助,在此表示诚挚的谢意!

书中难免存在一些差错和不当之处,敬请广大读者批评指正,并提出宝贵意见。

作者

2014年5月

目 录

序言	(i)
绪言	(1)
第 1 章 光开关技术	(2)
1.1 光开关技术应用	(2)
1.2 光开关技术基础	(7)
1.3 光开关技术分类	(9)
1.4 基于无机电光晶体材料的光开关技术	(14)
1.4.1 电光晶体光开关	(15)
1.4.2 电光晶体光开关阵列	(16)
1.4.3 制备工艺	(17)
1.4.4 关键技术	(18)
1.4.5 基本开关单元的性能指标	(18)
1.4.6 光开关阵列的设计关键	(19)
1.5 基于化合物半导体材料的光开关技术	(20)
1.6 基于光折变效应的光开关技术	(24)
1.7 光开关设计理论与模拟方法	(25)
1.8 基于极化聚合物材料的波导电光开关技术	(26)
1.8.1 极化聚合物电光材料	(26)
1.8.2 极化聚合物电光材料的研究进展	(29)
1.8.3 极化聚合物波导电光开关	(30)
1.9 热控光机制下的光开关技术	(35)

1.9.1	SOI 热光开关	(35)
1.9.2	聚合物热光开关	(37)
1.10	光开关的发展趋势	(40)
第 2 章	光开关的波导结构及模式分析	(42)
2.1	光波导材料的损耗表征	(42)
2.1.1	非金属介质材料的损耗表征	(42)
2.1.2	金属介质的复介电常数和光频特性	(43)
2.2	光开关的波导结构及参数	(45)
2.2.1	波导结构	(45)
2.2.2	传输模式	(46)
2.2.3	分析方法	(46)
2.3	高折射率衬底上的非对称五层平板波导	(48)
2.3.1	TM 模式的特征方程	(48)
2.3.2	衬底的泄露损耗	(51)
2.4	介质吸收型脊形波导	(53)
2.4.1	零级近似求实传播常数	(54)
2.4.2	一级近似求振幅衰减系数	(54)
2.5	单金属包层型非对称六层平板波导	(55)
2.5.1	零级近似求解 TM 模传播常数	(56)
2.5.2	一级近似求解 TM 模振幅衰减系数	(59)
2.5.3	TE 模式的特性分析	(62)
2.6	双金属包层型非对称七层平板波导	(63)
2.6.1	零级近似求解 TM 模传播常数	(64)
2.6.2	一级近似求解 TM 模振幅衰减系数	(67)
2.6.3	TE 模式的特性分析	(70)
2.7	金属包层型脊形波导	(71)
2.7.1	单金属包层型脊形波导的 E_{mn}^y 模式分析	(71)
2.7.2	单金属包层型脊形波导的 E_{mn}^x 模式分析	(72)
2.7.3	双金属包层型脊形波导的 E_{mn}^y 及 E_{mn}^x 模式分析	(73)
2.8	脊形波导的等效分析	(73)
2.8.1	脊形波导的等效折射率分析法	(73)
2.8.2	脊形波导的近似等效光波电场分布	(74)

2.9 脊形波导的耦合、偏折与弯曲	(75)
2.9.1 脊形波导的耦合	(75)
2.9.2 脊形波导的偏折	(77)
2.9.3 脊形波导的弯曲	(78)
2.10 多模干涉波导	(79)
2.11 二维狭缝波导	(81)
2.11.1 TE 模	(82)
2.11.2 TM 模	(85)
2.11.3 计算示例	(87)
2.12 三维狭缝波导	(89)
2.12.1 模式分析理论	(89)
2.12.2 计算示例	(92)
2.13 本章小结	(93)
第3章 行波电极结构及其分析理论	(94)
3.1 极化聚合物薄膜及电光调制特性	(94)
3.1.1 聚合物薄膜的极化	(95)
3.1.2 电光调制理论	(96)
3.1.3 极化聚合物的电光特性	(98)
3.2 非均匀电场作用下的电光重叠积分因子	(100)
3.3 行波电极结构与特性参数	(102)
3.3.1 行波电极结构	(102)
3.3.2 行波电极的特性参数	(104)
3.4 电极静态场的解析分析法——保角变换法	(105)
3.4.1 保角变换原理	(106)
3.4.2 电量平衡原理	(107)
3.4.3 电场分布	(108)
3.5 共面波导电极的保角变换分析	(109)
3.5.1 施瓦兹变换	(109)
3.5.2 共面波导电极的施瓦兹变换	(111)
3.5.3 电场分布	(112)
3.6 共面波导电极的镜像分析法	(113)
3.7 电极静态场的数值分析法——点匹配法	(116)

3.7.1	一般求解模型	(116)
3.7.2	边界条件	(118)
3.7.3	电场分布	(119)
3.8	电极静态场的数值分析法——扩展点匹配法	(120)
3.8.1	单电极	(120)
3.8.2	推挽异性对称双电极	(121)
3.8.3	推挽同性对称双电极	(123)
3.9	屏蔽电极静态场的数值分析	(123)
3.10	行波电极的等效模型与阻抗匹配	(125)
3.10.1	低开关频率的阻抗匹配	(125)
3.10.2	高开关频率的阻抗匹配	(126)
3.10.3	不同电极结构下的特征阻抗要求	(126)
3.11	行波电极的动态分析	(128)
3.12	本章小结	(130)
第4章	传统结构极化聚合物电光开关	(132)
4.1	共面波导电极定向耦合电光开关	(132)
4.1.1	器件结构	(133)
4.1.2	理论分析	(134)
4.1.3	参数优化	(136)
4.1.4	性能模拟	(140)
4.1.5	小结	(142)
4.2	推挽微带行波电极定向耦合电光开关	(143)
4.2.1	器件结构	(143)
4.2.2	理论分析	(144)
4.2.3	参数优化	(144)
4.2.4	性能模拟	(148)
4.2.5	小结	(150)
4.3	推挽电极 MZI 电光开关	(151)
4.3.1	器件结构	(151)
4.3.2	理论分析	(152)
4.3.3	参数优化	(153)
4.3.4	性能模拟	(155)

4.3.5 小结	(157)
4.4 两节交替反相电极定向耦合电光开关	(158)
4.4.1 器件结构	(158)
4.4.2 理论分析	(159)
4.4.3 参数优化	(162)
4.4.4 性能模拟	(164)
4.4.5 方法验证	(166)
4.4.6 小结	(166)
4.5 三节交替反相电极定向耦合电光开关	(167)
4.5.1 器件结构	(167)
4.5.2 理论分析	(168)
4.5.3 参数优化	(171)
4.5.4 性能模拟	(173)
4.5.5 方法验证	(176)
4.5.6 小结	(176)
4.6 单节电极 Y 型耦合器电光开关	(177)
4.6.1 器件结构	(178)
4.6.2 理论分析	(178)
4.6.3 参数优化	(181)
4.6.4 性能模拟	(181)
4.6.5 方法验证	(182)
4.6.6 小结	(183)
4.7 两节反相电极 Y 型耦合器电光开关	(183)
4.7.1 器件结构	(184)
4.7.2 理论分析	(184)
4.7.3 参数优化	(189)
4.7.4 性能模拟	(190)
4.7.5 方法验证	(191)
4.7.6 小结	(192)
4.8 本章小结	(193)
第 5 章 聚合物宽光谱电光开关	(194)
5.1 MZI 电光开关的一般光谱拓展原理	(195)

5.2 基于一阶相位发生器的宽光谱非对称 MZI 电光开关	(196)
5.2.1 器件结构	(197)
5.2.2 理论分析	(198)
5.2.3 参数优化	(200)
5.2.4 性能模拟	(202)
5.2.5 方法验证	(203)
5.2.6 小结	(204)
5.3 基于一阶相位发生器的宽光谱对称 MZI 电光开关	(204)
5.3.1 器件结构	(205)
5.3.2 理论分析	(206)
5.3.3 设计与优化	(208)
5.3.4 光谱特性及对比分析	(211)
5.3.5 小结	(213)
5.4 基于 N 阶相位发生器的宽光谱对称 MZI 电光开关	(213)
5.4.1 器件结构和理论分析	(213)
5.4.2 参数优化	(217)
5.4.3 光谱特性模拟	(219)
5.4.4 对比分析	(224)
5.4.5 小结	(225)
5.5 基于一阶相位发生器和双对称 MZI 的宽光谱电光开关	(225)
5.5.1 结构和分析	(225)
5.5.2 优化设计	(231)
5.5.3 光谱特性	(236)
5.5.4 小结	(240)
5.6 基于一阶相位发生器和双非对称 MZI 的宽光谱电光开关	(240)
5.6.1 材料和波导的波长色散特性	(241)
5.6.2 器件结构和理论分析	(242)
5.6.3 设计和优化	(247)
5.6.4 光谱特性和对比	(250)
5.6.5 小结	(253)
5.7 本章小结	(253)

第 6 章 周期化波长选择性光开关	(255)
6.1 AMZI 的光谱周期化理论	(256)
6.2 周期化弧形 MZI 波长选择性光开关	(257)
6.2.1 材料及其波长色散特性	(258)
6.2.2 器件结构及分析	(259)
6.2.3 器件优化设计和性能模拟	(263)
6.2.4 比较和讨论	(267)
6.2.5 小结	(270)
6.3 周期化 AMZI 波长选择性电光开关	(270)
6.3.1 结构设计和理论分析	(271)
6.3.2 结构参数优化	(275)
6.3.3 滤波和开关性能	(279)
6.3.4 小结	(282)
6.4 本章小结	(283)
第 7 章 行波电极高速电光开关及其时频域分析	(285)
7.1 微带行波电极高速定向耦合电光开关	(286)
7.1.1 结构与优化	(286)
7.1.2 理论分析	(287)
7.1.3 结果与讨论	(294)
7.1.4 误差分析	(297)
7.1.5 小结	(297)
7.2 行波电极高速 MMI-MZI 电光开关	(298)
7.2.1 结构与优化	(298)
7.2.2 时频响应特性	(303)
7.2.3 方法验证	(308)
7.2.4 小结	(309)
7.3 屏蔽行波电极高速定向耦合电光开关	(309)
7.3.1 结构与优化	(309)
7.3.2 趋肤效应分析	(315)
7.3.3 方法验证	(321)
7.3.4 小结	(323)
7.4 屏蔽行波电极高速 Y 型耦合器电光开关	(323)

7.4.1	结构和优化	(323)
7.4.2	趋肤效应分析	(328)
7.4.3	方法验证	(332)
7.4.4	小结	(333)
7.5	级联反相 CPWG 行波电极电光开关	(333)
7.5.1	器件结构和波导设计	(334)
7.5.2	电极分析和优化	(336)
7.5.3	傅里叶分析	(340)
7.5.4	结果与讨论	(345)
7.5.5	对比分析	(348)
7.5.6	小结	(351)
7.6	本章小结	(352)
第 8 章	聚合物热光开关	(353)
8.1	波导材料的热光效应及模式有效折射率变化	(354)
8.1.1	热光效应	(354)
8.1.2	模式有效折射率变化	(355)
8.2	聚合物/二氧化硅矩形波导热光开关	(357)
8.2.1	器件结构及优化	(357)
8.2.2	器件制备与表征	(359)
8.2.3	器件性能测试	(361)
8.2.4	小结	(363)
8.3	聚合物/二氧化硅脊形波导热光开关	(364)
8.3.1	器件结构及光谱分析	(364)
8.3.2	器件制备与表征	(369)
8.3.3	器件性能测试	(369)
8.3.4	小结	(372)
8.4	热光开关的噪声容限特性	(372)
8.5	本章小结	(376)
	参考文献	(377)

绪 言

随着社会的进步与发展以及人们物质与文化需求的日益增长,通信向大容量、长距离的方向发展已经成为必然趋势。因为光波具有极高的频率即具有极高的通信带宽(大约 3 亿 MHz),从而可容纳巨大的通信信息,所以用光波作为载体进行通信一直是人们几百年来追求的目标。以光波作为载波、光纤作为传输介质的通信系统称为光纤通信系统。从 20 世纪 60 年代到 90 年代的短短几十年中,光纤通信技术取得了极其惊人的进展,用带宽极宽的光波作为传送信息的载体进行通信成为了现实。然而,就目前的光纤通信而言,其实际应用仅仅发挥了其潜在能力的 2% 左右,尚有巨大的潜力等待人们去开发利用。因此,光纤通信技术必将向更高水平、更高阶段的方向迈进。

同光放大器、光滤波器、光隔离器等器件一样,光开关是光通信系统的核心器件。与无机材料相比,聚合物材料具有价格低廉、处理工艺简单、折射率易调整、成膜性能好等诸多优点,因此,人们对聚合物光开关的研究逐渐发展起来。设计和制作出低电压、低串扰、高消光比、宽光谱、低损耗和高稳定性的聚合物光开关已成为光纤通信系统性能的重要保证。

本书在阐述波导型聚合物光开关机理、波导和电极设计理论的基础上,给出了传统型、改进型、宽光谱型、波长选择型、热光型等不同种类光开关的结构模型和分析理论,对各种器件的波导结构和电极结构进行了详细的特性分析和参数优化,对各器件的开关特性进行了模拟,对给出的分析理论和设计方法进行了验证,对各结构器件的优缺点进行了对比讨论,为实验室制备相关器件提供了必要的的数据参考和理论依据。

第 1 章 光开关技术

本章首先介绍光开关技术的主要应用、技术种类和特点,然后详细介绍电光以及热光机制下的光开关技术及研究现状,使读者能够更好地了解光开关技术,并为以后运用光波导模式理论和行波传输线电极理论设计和分析光开关器件打好基础。

1.1 光开关技术应用

目前,光纤通信已从第一代 850 nm 多模光纤系统、第二代 1300 nm 多模光纤系统过渡到第三代 1300 nm 单模光纤系统。第四代 1550 nm 单模光纤系统也已广泛投入使用。随着光电子器件、光纤技术以及系统技术的不断改善和更新,超高速、超大容量和超长距离的光纤通信系统乃至全光光纤通信系统已从实验室研发阶段逐步进入工程实施阶段。与其他通信技术相比,光纤通信技术的主要优点是:

① 光波频率相对较高,光纤传输频带很宽,故传输容量很大,理论上可通上亿门话路或上万套电视,可满足图像、数据、传真、控制、打印等多种业务需求。

② 抗电磁干扰,保密性好,不怕雷击,可利用高压电缆架空敷设,可用于国防、铁路、防爆等。

③ 耐高温、高压,抗腐蚀,不受潮,可靠性高。

④ 光纤材料来源丰富,可节约有色金属(如铜、铝),且直径小、重量轻、可缠绕性好。