

全光开关原理

李淳飞 著



科学出版社
www.sciencep.com

全光开关原理

李淳飞 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统总结了自 20 世纪 60 年代以来国内外研究的各种光开关的物理思想和基本原理, 包含作者多年来在光开关方面的研究成果。全书分为 10 章, 主要介绍以光控光的全光开关, 内容包括非线性干涉仪型全光开关(第 4、5、7 章)、光学双稳开关(第 3 章)、光学限制开关(第 8 章)等。还介绍了近年来基于纳米光子学全光开关(第 6 章), 以及基于其他原理的全光开关(第 9 章)等。此外, 本书还扼要介绍了目前已经获得应用的电控光开关的基本原理(第 2 章), 以及光开关在光纤通信技术中的应用(第 10 章)。

本书可以作为高等院校物理学和光学专业研究生的教材, 高年级本科生的参考书, 也可作为从事光通信、光计算、光传感、光信息处理工作的科技人员和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

全光开关原理/李淳飞著。—北京：科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-027932-3

I. ①全… II. ①李… III. ①光电子技术 IV. ①TN2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010) 第 110177 号

责任编辑: 王飞龙 张 静 唐保军 / 责任校对: 赵桂芬

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 陈 敬

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 7 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010 年 7 月第一次印刷 印张: 21 1/4

印数: 1—2 500 字数: 411 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前　　言

激光的产生标志着光学有了与电学一样的相干光源。自此以后光子技术与电子技术展开了长期的竞赛，究竟谁能成为信息技术的主角？半个世纪竞赛的结果证明，电子技术与光子技术各有所长。电子技术在 20 世纪取得了辉煌的成就，计算机、互联网、移动通信的普及，使人类的生活发生了彻底变化，这是因为电子技术擅长信息处理，特别是数字化信息的处理。至于光子技术，则擅长信息传输，并具有宽带、大容量和并行处理等优点，因此近 30 年来光子技术有很大的发展。现在信息的有线传输和信息存储等电子技术领域已经被光子技术占领。例如，光纤通信代替了电缆通信；光盘存储代替了磁盘存储。在传感领域光子技术也逐渐变成了主角：光纤光栅传感器代替了电子应变传感器。甚至当今广泛使用的电子计算机，它的外部设备阵地（存储、显示、输入/输出等）也已经被光子技术占领。但是计算机的芯片仍被电子技术垄断，这是因为电子开关（或晶体管）还不能被光子开关（或光晶体管）。因此，电子技术的最后堡垒——数字化信息处理还没有被光子技术攻占。光子技术最后胜利的标志就是攻下这个电子技术的最后堡垒，即用全光开关代替现有的电子开关，实现真正的光子集成芯片和高速、海量的光子数字信息处理。

科学家的梦想之一是实现全光通信、全光网络和全光计算机。要实现这个梦想，就要研究出实用化的全光开关，即要求驱动光开关的光功率可与被控光信号的功率相比（开关功率在毫瓦以下）；开关速度比现有电子开关速度更快（开关时间在皮秒以下）。全世界的科学家耗时半个世纪，耗费大量资金，至今还没有研究出可供上市的全光开关产品。但是，人们已经历了长时间、多方面的探索，积累了丰富的经验。本书试图把人们对全光开关研究的主要物理思想和基本原理系统地介绍给读者，故本书取名为“全光开关原理”。书中也包含了作者多年来从事全光开关原理研究的主要研究成果。

全光开关是“以光控光”的基本光子器件。因为光子之间的相互作用太弱，全光开关不能像电子晶体管开关那样直接地实现，一般要采用非线性光学方法间接地实现。这就是用激光致使介质的光学参量（折射率、吸收系数、极化率、偏振态、频率等）发生非线性变化，从而控制在该介质中传输的光束，改变它的强度、方向、波长、偏振或速度。因此光开关是基于非线性光学原理的技术。读者掌握物理光学的基础知识，并且具有一定的非线性光学知识，就可以读懂这本书。

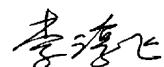
其实“开关”的概念很广泛，不仅包含强度开关，还有空间开关、时间开关、波长（频率）开关、相位开关、偏振开关等。广义地说，把任何物理的、化学的，甚至生物的一个状态不连续地、可逆地转变成另一个状态的过程就是开关。众所周知，电子开关在现代电子技术中有着极其广泛的应用。很多电子应用技术与系统都实现了数字化，如数字通信、数字计算机、数字化音响和数字化影像技术等。只要实现数字化就要用开关。同样，光开关在光子技术中也有着重要应用前景，如光通信的光交换机、光计算的光子芯片、光传感的全光网络、三维数字光存储，以及脉冲激光光源技术等都要用到光开关。

本书总结了自 20 世纪 60 年代以来所研究的各种光开关的物理思想、基本原理和主要应用。全书分为 10 章，第 1 章“光开关概论”中介绍了光开关的基本概念、光开关的分类和光开关的性能参数。以后除了在第 2 章中介绍已经有产品的电控光开关的原理之外，其他各章主要讨论光控光开关，即全光开关的基本原理，包括“非线性干涉仪全光开关”（第 4 章）、“含光放大器的全光开关”（第 5 章）、“非线性光纤光栅全光开关”（第 7 章），还有两种特殊的全光开关，即“光学双稳光开关”（第 3 章）和“光学限制全光开关”（第 8 章）。在“纳米光子学全光开关”一章（第 6 章）中，介绍了近几年来随着纳米光子学的发展涌现出来的纳米全光开关，这类光开关有着重要的应用前景。在“其他原理的全光开关”一章（第 9 章）中，介绍一些光开关的新思想和新技术的探索。最后一章介绍了“光开关在光通信中的应用”（第 10 章）。其实光开关的应用很多，除了在光通信中的应用之外，还有在光逻辑、光计算、光存储和光学计量等方面的应用等。由于本书侧重原理而不是应用，因此应用范围没有展开。

如果说在此以前的 50 年中, 光学物理研究最多的是激光光源, 那么在今后的 50 年, 人们应该着重研究对激光的控制 (或光子调控), 尤其是光开关技术. 随着科技的进步, 特别是纳米光子学的发展, 全光开关的实用化大有希望. 希望本书能够使读者们对以往的全光开关研究有比较系统的了解, 并且能够引起年轻读者们对从事光开关研究的兴趣.

作者诚挚地感谢 H. M. Gibbs 教授、L. Garmire 教授、P. W. Smith 教授、沈元让教授等对作者在研究光学双稳态和光开关的早期工作中的启发和指导; 衷心感谢王大珩院士、王之江院士、刘颂豪院士、母国光院士、王启明院士等我国光学与光电子学前辈, 对作者科研工作的一贯关心和支持; 还要感谢曾经在哈尔滨工业大学与作者合作一起从事研究工作的三十几位博士生和四十几位硕士生对本书的贡献, 在这本书中包含着他们的辛勤劳动. 在此作者还要特别感谢几位国内的新一代专家们, 他们为作者提供了他们在光开关方面的研究论文, 或进行过有益的交流与讨论, 他们是北京大学的龚旗煌教授、中国科技大学的明海教授、浙江大学的童立民教授、南开大学的袁小聪教授、中山大学的余卫龙教授、李宝军教授以及华南师范大学的郭旗教授、兰胜教授和梅霆教授等.

因为其他工作太忙, 本书拖了几年才完成, 实际撰写的时间较短, 加上作者水平有限, 书中难免有不妥之处, 恳请读者不吝指正.



2010 年 3 月 20 日

目 录

前言

第 1 章 光开关概论	1
1.1 光开关的重要性	1
1.1.1 光学发展对光开关的需求	1
1.1.2 光子技术对光开关的需求	5
1.2 光开关的分类	8
1.2.1 按光参量与工作域分类	8
1.2.2 按工作特性分类	9
1.2.3 按控制方法分类	10
1.3 光开关的性能参数	13
1.3.1 光开关的技术参数	13
1.3.2 对光开关参量的要求	14
1.3.3 光开关材料的品质因数	15
参考文献	15
第 2 章 电控光开关	17
2.1 电光开关	17
2.1.1 电光耦合器光开关	18
2.1.2 电光 M-Z 干涉仪光开关	23
2.1.3 电光数字式光开关	25
2.2 热光开关	27
2.2.1 定向耦合器型热光开关	28
2.2.2 M-Z 干涉仪型热光开关	28
2.2.3 多模干涉型热光开关	30
2.2.4 分支型热光开关	30
2.2.5 相变型热光开关	31
2.3 液晶光开关	33
2.3.1 双折射型液晶光开关	34
2.3.2 偏振分光型液晶光开关	35
2.3.3 反射型液晶光开关	36
2.4 电控机械光开关	37
2.4.1 电磁机械光开关	37

2.4.2 MEMS 光开关	38
2.5 其他电控光开关	41
2.5.1 磁光开关	41
2.5.2 声光开关	42
参考文献	45
第 3 章 光学双稳光开关	47
3.1 光学双稳定性概论	47
3.1.1 光学双稳定性	47
3.1.2 光学双稳器件	48
3.2 全光型光学双稳器件	51
3.2.1 吸收型光学双稳器件	51
3.2.2 折射型光学双稳器件	56
3.2.3 其他全光型光学双稳器件	66
3.3 电光混合型光学双稳器件	73
3.3.1 电光非线性 F-P 型光学双稳器件	74
3.3.2 电光偏振调制型光学双稳器件	77
3.3.3 电光 M-Z 干涉仪型光学双稳器件	79
3.3.4 其他电光混合型光学双稳器件	81
3.4 光学双稳定的稳定性理论	84
3.4.1 光学双稳定的稳定性	84
3.4.2 光学双稳定的不稳定性	87
参考文献	94
第 4 章 非线性干涉仪全光开关	97
4.1 非线性耦合器全光开关	98
4.1.1 线性对称光耦合器原理	98
4.1.2 对称耦合器自相位调制全光开关	100
4.1.3 非对称耦合器交叉相位调制全光开关	102
4.1.4 非线性耦合器共振非线性全光开关	105
4.2 非线性 M-Z 干涉仪全光开关	109
4.2.1 对称 MZI 与实现光开关的条件	109
4.2.2 两臂折射率不同的 MZI 全光开关	111
4.2.3 两臂长度不同的 MZI 全光开关	112
4.3 非线性环共振器全光开关	113
4.3.1 单耦合器环共振器全光开关	113
4.3.2 具环共振器 M-Z 干涉仪全光开关	116

4.3.3 双耦合器环共振器全光开关	117
4.4 非线性 Sagnac 干涉仪全光开关	120
4.4.1 对称 Sagnac 干涉仪理论	120
4.4.2 含非对称耦合器的 SI 全光开关	123
4.4.3 用不同频率泵浦光的 SI 全光开关	125
4.4.4 环中偏置光放大器的 SI 全光开关	127
4.4.5 采用非线性耦合器的 SI 全光开关	128
参考文献	132
第 5 章 含光放大器的全光开关	134
5.1 光放大器基本原理	134
5.1.1 光放大器原理	134
5.1.2 掺铒光纤放大器	137
5.1.3 半导体光放大器	140
5.2 含 EDFA 环共振器全光开关	143
5.2.1 含 EDFA 环耦合 MZI 全光开关	143
5.2.2 含 EDFA 的 DCRR 全光开关	147
5.2.3 含 EDFA 的 DCRR 光学双稳开关	150
5.3 含半导体光放大器的全光开关	155
5.3.1 SOA 的交叉增益调制	155
5.3.2 SOA 的交叉相位调制	157
5.3.3 SOA 的四波混频	161
参考文献	164
第 6 章 纳米光子学全光开关	165
6.1 纳米波导共振环全光开关	165
6.1.1 微环耦合 MZI 型纳米波导光开关	165
6.1.2 单耦合器微环型 1×1 纳米波导光开关	166
6.1.3 双耦合器微环型 1×2 纳米波导光开关	167
6.2 光子晶体全光开关	173
6.2.1 光子晶体的基本概念	173
6.2.2 二维光子晶体耦合器全光开关	175
6.2.3 二维光子晶体环共振器全光开关	176
6.2.4 二维光子晶体非线性 MCI 全光开关	177
6.2.5 一维光子晶体带隙移动双稳开关	179
6.2.6 二维光子晶体带隙移动全光开关	182
6.2.7 二维光子晶体缺陷位移全光开关	186

6.2.8 三维光子晶体全光开关	189
6.3 表面等离子体激元全光开关	191
6.3.1 表面等离子体激元及其极化子波	191
6.3.2 金属纳米结构的吸收谱及其应用	194
6.3.3 光栅耦合型 SPP 全光开关	196
6.3.4 棱镜激发型 SPP 全光开关	198
6.3.5 非线性光栅型 SPP 光学双稳开关	198
参考文献	201
第 7 章 非线性光纤光栅全光开关	204
7.1 非线性光纤布拉格光栅全光开关	204
7.1.1 光纤布拉格光栅全光开关原理	204
7.1.2 交叉相位调制 FBG 全光开关	209
7.1.3 自相位调制 FBG 全光开关	210
7.1.4 高非线性 FBG 全光开关	211
7.1.5 相移光纤光栅全光开关	212
7.2 非线性长周期光纤光栅全光开关	215
7.2.1 长周期光纤光栅全光开关原理	215
7.2.2 LPBG 自相位调制全光开关	217
7.3 非线性长周期光纤光栅对全光开关	221
7.3.1 以常规光纤连接的 LPFG 对全光开关	221
7.3.2 以非线性光纤连接的 LPFG 对全光开关	223
7.4 非线性光纤布拉格光栅对的光学双稳开关	230
7.4.1 单 FBG 的传输矩阵	230
7.4.2 非线性 FBG 对光学双稳性的调制和反馈公式	232
7.4.3 非线性 FBG 对的光学双稳特性	235
参考文献	238
第 8 章 光学限制全光开关	240
8.1 光限制器概述	240
8.1.1 光限制的概念和用途	240
8.1.2 光限制器的分类与参量	241
8.2 反饱和吸收效应	242
8.2.1 反饱和吸收物理模型	242
8.2.2 动态反饱和吸收方程	244
8.2.3 稳态反饱和吸收方程解	246
8.3 线性光限制器	247

8.3.1 多层膜反射镜光限制器 ······	247
8.3.2 衍射光栅光限制器 ······	249
8.4 非线性光限制器 ······	249
8.4.1 非线性散射光限制器 ······	249
8.4.2 双光子吸收光限制器 ······	250
8.4.3 反饱和吸收光限制器 ······	251
8.5 线性与非线性结合的光栅光限制器 ······	252
8.5.1 毛玻璃散射非线性光限制器 ······	253
8.5.2 全反射棱镜非线性光限制器 ······	253
8.5.3 光栅衍射非线性光限制器 ······	254
参考文献 ······	259
第 9 章 其他原理的全光开关 ······	261
9.1 非线性吸收型全光开关 ······	261
9.1.1 饱和吸收全光开关 ······	261
9.1.2 光致变色全光开关 ······	263
9.1.3 双光子吸收全光开关 ······	265
9.2 非线性折射型全光开关 ······	269
9.2.1 自聚焦全光开关 ······	269
9.2.2 双折射型全光开关 ······	270
9.2.3 非线性界面反射型全光开关 ······	272
9.2.4 空间光孤子全光开关 ······	276
9.3 原子气体全光开关 ······	281
9.3.1 横向光斑图样的产生及其对称性 ······	281
9.3.2 开关稳态行为的研究 ······	282
9.3.3 开关动态行为的研究 ······	283
9.4 悬浮微粒光物质相变全光开关 ······	285
9.4.1 悬浮微粒光物质的形成 ······	285
9.4.2 悬浮微粒光物质相变开关 ······	287
9.4.3 磁性纳米团簇相变开关 ······	289
参考文献 ······	292
第 10 章 光开关在光通信中的应用 ······	294
10.1 通信网络安全和器件检测 ······	294
10.1.1 通信线路的安全保护 ······	294
10.1.2 网络状态的在线监测 ······	294
10.1.3 光学器件的批量检测 ······	295

10.2 早期的光通信网络技术	296
10.2.1 广播与选择网络	296
10.2.2 波长路由网络	296
10.2.3 波导光栅路由器	297
10.3 波长转换器	299
10.3.1 光电子再生器式的波长转换器	299
10.3.2 基于 SOA 增益饱和的波长转换器	299
10.3.3 含 SOA 的 M-Z 干涉仪波长转换器	300
10.3.4 基于 SOA 四波混频的波长转换器	301
10.3.5 基于光纤干涉仪的波长转换器	302
10.4 光学分插复用器	303
10.4.1 光栅辅助耦合器型 OADM	304
10.4.2 光栅辅助 M-Z 干涉仪型 OADM	305
10.4.3 光栅辅助环行器型 OADM	306
10.4.4 微环共振器型 OADM	307
10.4.5 基于光开关的动态 OADM	307
10.5 光学交叉互连网络	308
10.5.1 波长选择交叉互连网络	308
10.5.2 波长互换交叉互连网络	310
10.6 光学时域开关与网络	313
10.6.1 光学触发器	313
10.6.2 光学时分复用器	317
10.6.3 包开关网络	321
参考文献	323

第1章 光开关概论

本章通过光子学与电子学发展历史的比较,说明光开关研究对于光学物理和光子技术发展的重要意义;论述了光开关按其功能、特性和控制的分类方法,指出全光开关研究的困难问题和解决方向;最后提出对光开关的评价指标和基本要求.

1.1 光开关的重要性

1.1.1 光学发展对光开关的需求

1. 光学与光子学发展趋势

众所周知,光波是电磁波的一部分,频率为 $10^{11} \sim 10^{16}$ Hz,包括太赫兹(THz)波、红外光、可见光、紫外光.光波与其他电磁波一样,也服从麦克斯韦方程的规律.同时光波是由光子组成的.光子是基本粒子的一种,它没有质量,不带电.它与其他基本粒子一样,也服从薛定谔方程.图1.1.1示出电磁波的波段划分,以及相应于这些波段的通信手段.

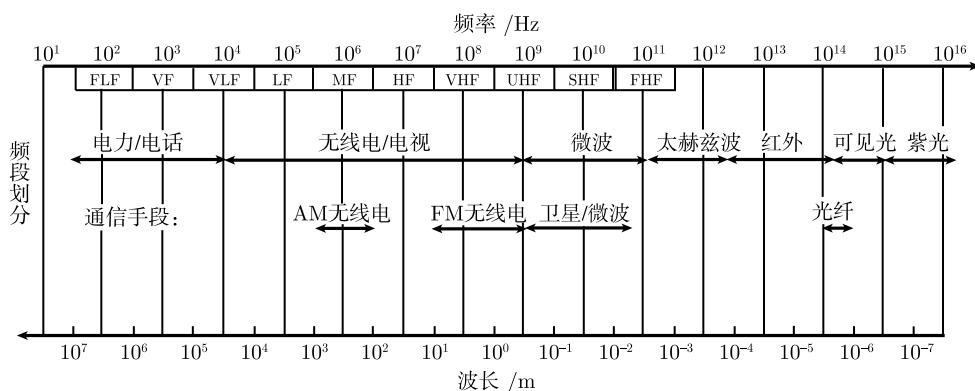


图 1.1.1 电磁波的波段划分与相应的通信手段

光学和电磁学是18世纪开始形成的物理学的两个姊妹学科.光子学发展的过程与电子学的发展过程非常相似,图1.1.2给出光子学和电子学发展的路线图,对比描述了光子学与光子技术的来龙去脉^[1].

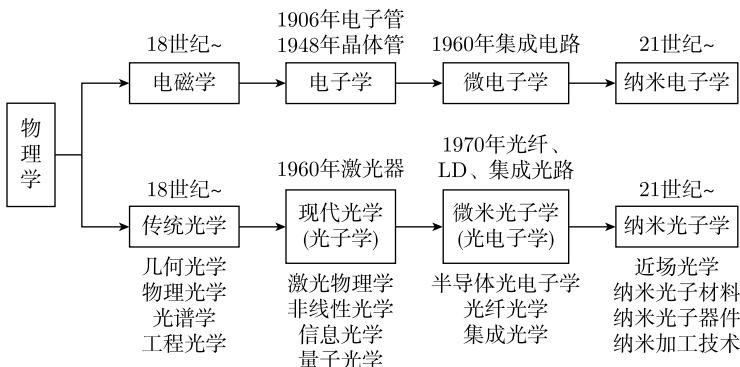


图 1.1.2 光子学与电子学的发展路线图比较

在电磁学发展的基础上, 19世纪人们发明了发电机和电动机, 把人类带入电灯、电话、电机、电车的电气时代, 同时电工技术得以迅速发展。20世纪初电子管的发明, 标志着人类学会了如何产生、探测和控制电子, 由此形成了一门新的学科——电子学。电子学的发展分为两个阶段: 1906年发明真空电子管后开始的真空管电子学阶段; 1948年发明半导体晶体管后开始的固体电子学阶段。1960年集成电路的发明标志着人们已经掌握将半导体晶体管、电阻、电容等元件集成为微米尺寸芯片的技术, 从此电子学发展为微电子学, 相应的电子技术也发展为微电子技术。从广播、电视、录音机、录像机、摄像机、雷达到无线电通信、微波通信、电子计算机, 乃至电子互联网都是微电子技术的辉煌成就, 电子技术使人类的生活发生了巨大变化, 电子信息技术成为世界经济发展的带头羊, 以至于到20世纪后期人们宣称: 人类已进入“电子时代”。但是, 现在电子学的发展遇到了瓶颈, 摩尔定律已不再适用, 这是因为电子芯片的制造不能突破光的衍射极限。近年来人们正在研究纳米尺寸的电子器件(如碳纳米管)及其集成技术, 这就是纳米电子学研究的内容。但是由于电子本身存在无法克服的弱点, 使电子学的困难不得不依靠光子学来解决。

回顾光学的发展历史: 18世纪开始形成的传统光学, 包括几何光学、物理光学和光谱学。传统光学的发展和应用, 形成了一门技术科学——工程光学, 包括光学元件、助视仪器、光学计量仪器、光谱分析仪器的设计和制造, 以及光学薄膜和光学材料的加工技术等。

在激光发明之前, 人们只能使用相干性很差的自然光源, 光学的研究和应用受到很大的限制。虽然有关受激辐射和粒子数反转的学说早在1917年爱因斯坦就作出了预言, 但是当时的科学技术不具备制造激光器的能力, 直到1954年发明了受激辐射微波放大器, 在此基础上, 1960年才发明了受激辐射光放大器, 即激光器。当时一大批激光器纷纷问世。输出激光的光谱范围覆盖紫外、可见、红外各波段。

激光的发明，实现了光能在空间、时间、光谱上的高度集中，促使光学突飞猛进地发展。围绕着激光科学技术的研究，建立起现代光学，包括激光物理学、非线性光学、傅里叶光学（信息光学）、量子光学等分支学科。与此同时，以固体、气体和液体激光的应用为主要内容的激光技术也得到了发展，包括激光器的设计与制造、激光加工、激光全息、激光测量等。激光技术在工业、农业、医疗、科学和国防等方面获得了广泛的应用。

激光是由状态相同的光子组成，因此突显了光的粒子性，如果说传统光学主要是研究光的波动性质，那么现代光学就是研究光子行为的科学，因此激光的产生标志着光子学的诞生。但是从 20 世纪 60 年代到 70 年代的光子学是以大尺寸的激光器为光源的光子学。

20 世纪 70 年代，发明了室温运转的半导体激光器和低损耗石英光纤，并诞生了集成光学，在此基础上光纤通信技术迅速发展起来。现代光通信所用的光子器件，如光纤、有源和无源器件，以及集成器件，其尺寸一般皆为微米量级。这表明光子学进入了微米光子学的发展阶段。这个阶段的理论基础是半导体光电子学、光纤光学和集成光学；这个阶段的光子器件主要是“以电控光”的器件，例如，电致发光的激光器（LD）与发光管（LED），光放大器、光调制器、电控光开关等；这个阶段的整机是光电混合的，如光纤通信是全光传输系统和电子交换系统的结合，计算机是电子芯片与光外设的结合，其中光外设包含光盘存储、激光打印、激光扫描、液晶显示等，又如传感技术是光传感器和电子解调技术的结合。正因为这个阶段具有以电控光和光电混合的特点，因此可以把微米光子学阶段称为光电子学阶段。

光子学的前沿研究方向是纳米光子学，纳米光子学研究纳米尺度下物质与光场的相互作用规律及其应用。它的研究内容包括以下几方面：

(1) 近场光学。这是通过将近场（纳米光场）转变为远场（普通光场）的方法，来探测纳米物质结构的技术，包括基于纳米探针的近场扫描光学显微镜、近场光学光谱仪，以及光镊技术等。

(2) 纳米光子材料。包括具有周期性带隙的量子限制材料；具有周期性折射率的光子晶体材料；具有金属与电介质界面等离子体激元效应的金属纳米材料，还有非周期性的纳米复合材料，纳米生物和化学材料等。

(3) 纳米光子器件。包括用纳米材料制备的有源和无源光子器件；还包括具有纳米尺寸的非纳米材料器件（如纳米石英波导器件）。纳米光子学将重点研究“以光控光”的器件，其中关键器件是全光开关，它是实现全光通信、全光计算机和全光传感系统的基础。

(4) 纳米加工技术。即纳米尺度的加工制造方法，包括激光直写法、多光子聚合、电子束刻蚀、分子、原子外延、化学外延、自组装、化学合成、纳米压印等。

纳米光子学与微米光子学有什么不同特点？见表 1.1.1 所示。

表 1.1.1 微米光子学与纳米光子学的特点比较

	微米光子学	纳米光子学
物理范畴	宏观物理学	介观物理学
空间尺度	微米 ($> 1\mu\text{m}$)	纳米 ($1\sim1000\text{nm}$)
光场特性	远场光 ($>$ 衍射极限)	近场光 ($<$ 衍射极限)
控光技术	以电控光 (光电子学)	以光控光 (纯光子学)
主要器件	半导体激光器、调制器、光电探测器、电控光开关	波分复用器、全光开关
主要系统	光纤通信 + 电子交换	全光通信系统
	电子计算机 + 光外设	光计算机系统
	光传感器 + 电子解调	全光传感系统

纵观电子学与光子学发展的历史, 光子学的发展速度比电子学的发展速度要缓慢得多。其原因有两个: ① 相干光子源 (激光器) 的发明较晚, 这使光子学的诞生比电子学的诞生晚了半个多世纪; ② 至今没有研制出实用的光晶体管, 即全光开关。在这方面光子学比电子学至少落后 100 年。但是, 就像龟兔赛跑一样, 现在电子学的发展遇到了瓶颈而发展缓慢, 光子学已经赶了上来, 电子学与光子学正在并肩前进, 一起向纳米技术进军。未来的信息技术将成为纳米光子学与纳米电子学相互补充、相互融合的纳米信息技术。

2. 光学物理研究的发展趋势

从 20 世纪 60 年代开始的半个世纪中, 光学物理主要研究激光光源。各种激光器纷纷诞生, 包括各种波段, 如 THz 波、红外光、可见光、紫外光、X 射线等; 各种输出脉宽, 如微秒、纳秒、皮秒、飞秒、阿秒等; 各种工作介质, 如气体、固体、液体、晶体、半导体、等离子体等; 各种输出功率, 如从兆瓦到微瓦, 甚至单光子输出; 以及各种尺寸, 从几十米到纳米。

用激光束已经实现了对电子、原子、分子、等离子体、半导体、光子晶体、生物细胞等物质结构的控制。但是, 激光对光本身的控制——以光控光——还没有做到实用化。因为光子不带电, 直接以光子控制光子十分困难。只能通过非线性光学的方法间接地来实现以光控光, 也就是用高功率激光的强光场致使介质的折射率(极化率实部)或吸收系数(极化率虚部)发生变化, 从而使受控光场的参数(强度、相位、频率、偏振等)变化。目前用非线性光学方法已经实现了对光的频率和光的速度(群速度)的控制。但是, 用纯光学方法实现以弱控制光(毫瓦量级)控制信号光(毫瓦量级)的技术至今尚未成熟, 也就是说全光开关至今还未获得应用。

在 20 世纪, 电子学之所以取得如此辉煌的成就, 实现了电子计算机和电子互联网的普及, 就是因为有了“以电控电”的晶体管。而光子学至今没有“以光控光”的器件, 因此它的应用受到很大的限制, 无法实现全光通信、全光计算、全光传感等, 因此在信息领域光子学与电子学的竞争中, 光子学至今无法最后取得全胜。

目前的光子学还处于以电控光的光电子学阶段。因此，21世纪光学物理的一项重要任务就是研究出全光开关，把光子学推向以光控光的高级阶段。40年来全光开关的研究经验表明，高速、低功耗的实用的全光开关，只有在纳米光子学与飞秒超快光子学相结合的条件下，也就是在空间和时间高度集中的条件下才有可能实现。

1.1.2 光子技术对光开关的需求

1. 光子技术发展的趋势

光子学的应用技术称为光子技术。光子技术主要包括两方面内容：信息光子技术和能源光子技术。信息光子技术的核心是光纤通信技术，光纤通信正在向“光纤到户”和“三网合一”(互联网、通信网和电视网)的方向发展，光纤通信技术广泛应用于巨型计算机、光纤传感系统、生物学和医学、环境和军事技术等领域。能源光子技术实质上是光子能量与其他各种能量的转换技术，如电能转变为光能的光照明与光显示；光能转变为电能的太阳能利用技术；光能转变为热能的激光加工和激光武器等。

由光子学发展的论述可见，光子技术的发展趋势主要有两方面：

(1) 光子技术将从“以电控光”的光电子技术向“以光控光”的全光技术的方向发展。而光开关是一个关键技术，光子学中光开关的作用就相当电子学的晶体管一样。

(2) 21世纪的光子技术与电子技术将实现真正的融合。二者将充分发挥各自的特长：光子技术善于并行传输；电子技术善于信息处理。电子技术的瓶颈需要靠光子技术来克服；光子技术需要靠电子技术支撑(如提供电源)。二者将最终实现在芯片上的统一，即光子器件与电子器件在同一基片上共集成。

在选择光子集成的最佳材料时，科学家们很自然地把注意力集中在硅上，因为硅是在自然界普遍存在的廉价材料；硅是电子集成的基础材料，其制备和加工技术已被人们熟练掌握；硅在光通信波段的损耗极低；而且它易于与光纤通信系统对接。但是，硅在光学应用上存在着两个基本困难：① 硅属于间接跃迁而不能发光；② 硅的分子结构的对称性使它的光学非线性太差。近年来的研究表明，在纳米尺度下这两个困难都可能克服，纳米的硅基激光器和硅基全光开关都已出现。除了纳米尺寸的硅波导微环器件之外，硅基光子晶体器件和硅与金属界面的表面等离子体激元器件都有希望提供实现光子与电子共集成的手段。

2. 信息光子技术发展的需求

信息技术，包括通信、计算、传感与遥测等技术，是关系到经济发展和实现现代化的各种关键技术(如材料技术、能源技术、环境技术、生物医学技术、军事技术等)的带头人。回顾信息技术的发展，经历了以下几个阶段：

(1) 电子管信息技术阶段. 从 1906 年发明电子管开始. 主要器件是电子管和分立电路, 主要系统是电话、电报、无线电通信, 运转方式是以电控电.

(2) 微电子信息技术阶段. 从 1948 年发明晶体管开始. 主要器件是晶体管和集成电路, 主要系统是电子计算机、有线和无线通信、雷达和电子互联网. 运转方式还是以电控电.

(3) 光电子信息技术阶段. 从 1970 年发明室温半导体激光器以后开始. 主要的器件有光纤、半导体激光器及其他光电子器件, 主要系统有光纤通信、微波通信、微型电子计算机等. 主要运转方式是以电控光.

(4) 光子信息技术阶段. 21 世纪开始的纳米光子学可能研究出纳米激光器、全光开关和其他光子集成器件; 将进一步发展全光通信系统、全光计算机和全光传感系统等系统, 主要运转方式将是以光控光.

电子计算机计算速度的提高取决于开关元件速度的提高和集成芯片尺寸的减小. 在这方面电子学已经遇到了“瓶颈”. 发展光计算机是一条可能的出路. 而光计算机可能是由快速全光开关以及芯片内外的光互连构成, 因此光开关的研究是发展光计算机的关键.

为了满足人们对通信容量不断增长的需求, 电子有线通信正逐渐被光纤通信取代. 由于掺铒光纤放大器 (EDFA) 和密集波分复用器件 (DWDM) 的应用, 目前光纤通信在信号传输方面已经实现了全光化. 图 1.1.3 是一个点对点的信号全光传输的光纤通信系统.

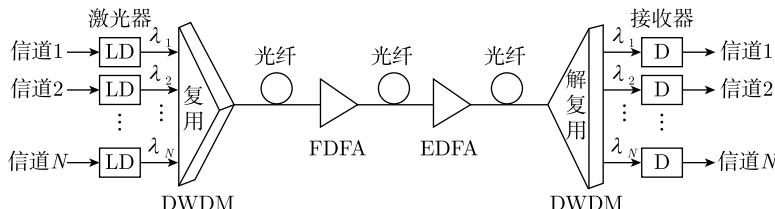


图 1.1.3 依靠 DWDM 和 EDFA 器件实现的光信号全光传输的点对点光纤通信系统

但是, 目前在光纤通信中, 光信号的交换还要靠电子学方法, 这限制了光通信速率的提高, 因此, 发展全光交换技术是十分必要的, 而全光交换技术是建立在全光开关的基础之上的. 在复杂的光纤通信网络系统中, 存在着长途网、城域网、接入网等网络, 如图 1.1.4 所示. 这些网络之间的光交换, 需要通过光学交叉连接器 (OXC) 来完成; 网络与用户之间的光交换则要靠光学分插复用器 (OADM) 来实现.

由图 1.1.5 可见, OXC 和 OADM 光交换器件都是由光开关阵列构成的, 因此光开关是全光交换技术的基础.

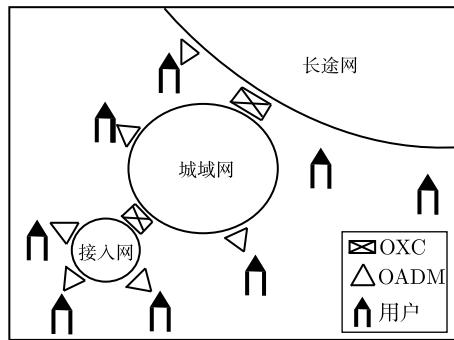


图 1.1.4 依靠 OXC 和 OADM 器件实现的光纤通信网络中的全光交换

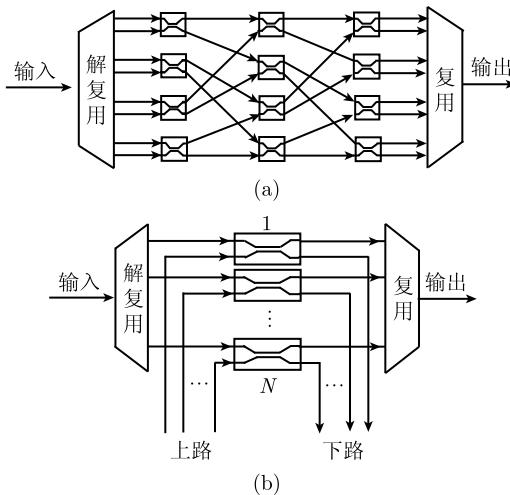


图 1.1.5 用于波分复用光通信系统的光交换器由全光开关阵列构成

(a) 由 12 个 2×2 光开关构成的 8×8 光学交叉连接器; (b) 由多个 2×2 光开关组成的分插复用器

光开关在信息光子技术中的应用很多. 例如:

- (1) 波分复用 (WDM) 和时分复用 (TDM) 全光通信系统中的光交换器;
- (2) 光通信的安全防护、监控系统中的光开关器件;
- (3) 通信网络中的多节点在线测控和批量器件产品的性能测试;
- (4) 未来光计算机芯片的基本器件, 用以组成各种光学逻辑门;
- (5) 组成光纤传感网络, 检测多个传感器的输出信号;
- (6) 数字光存储器的基础器件, 用于双光子三维光存储或纳米杆 5 维光存储;
- (7) 在精密光学计量和光学时钟发生器中的应用;
- (8) 构成超短脉冲激光器以及脉冲激光雷达 (测距与测速) 的应用.

总之, 全光开关是光子技术领域的关键技术, 是实现以光控光的基本手段. 光子信息技术的发展, 迫切需要低功耗、高速度、低吸收、小尺寸和低成本的实用化

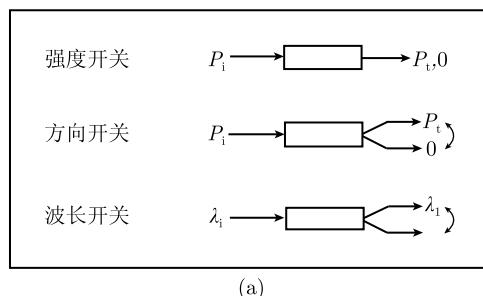
的全光开关.

1.2 光开关的分类

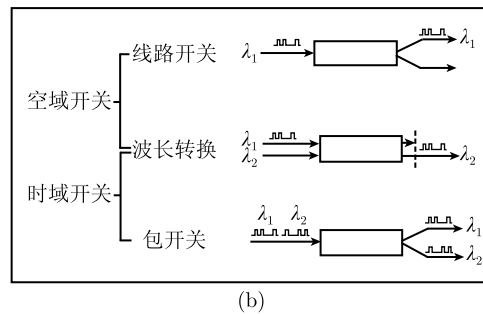
1.2.1 按光参量与工作域分类

光开关是对光信号进行开关转换的器件. 一个光波信号有许多参量, 如功率(光强)、波长(频率)、方向、相位、偏振等. 一般的光学器件是改变光波参量的器件. 例如, 光放大器是改变光强度的器件, 光参量放大器等是改变光频率的器件, 透镜、棱镜和反射镜等是改变光传播方向的器件. 但是这些器件都不是光开关, 光开关必须做到对光信号参量的改变是可逆的或可恢复性的; 而且应该做到完成开关所耗费的时间远比维持参量状态的时间短得多. 所以光开关可以定义为使光信号的参量发生快速、可逆转换的器件.

相对于光信号的各种参量, 有不同类型的光开关, 如强度开关、波长开关、方向开关、相位开关、偏振开关等. 通常用得较多的是强度开关、方向开关和波长开关, 如图 1.2.1(a) 所示. 强度开关是在同一输入光功率(或光强)下输出光功率(或光强)在“有”和“无”(或强和弱)间转换的开关, 如光学双稳器件. 许多光开关都是 3 端(1×2) 或 4 端(2×2) 的器件, 具有两个输出端口. 方向开关是在同一输入光功率下输出光功率在不同输出端口间转换的光开关, 如非线性定向耦合器. 波长



(a)



(b)

图 1.2.1 光开关分类

(a) 光开关按其光参数分类; (b) 光通信网络中的光开关按空间域和时间域分类

开关是一个有确定波长的光信号在两个不同输出端口转换的光开关, 在转换中其波长保持不变.

光开关在光子信息技术中被广泛应用, 本书第 10 章将介绍光开关在光纤通信中的应用. 在光纤通信中, 各种电子信息通过电光调制器转变为光信息, 并且以脉冲数字信号(也就是比特信号)编码的形式荷载于具有一定波长的光波上, 然后在光纤网络中进行传输和处理. 具有一定波长的、荷载比特信号的光束被称为波长信道, 波长信道以波长为标志. 在光通信网络中的光开关都属于波长开关, 它们是在波长域中工作的.

在现代光纤通信网络中, 光信号是按照波分复用和时分复用两种方式进行传输的. 也就是将波长信道按空间的和时间的顺序排列成队进行传输. 光开关的作用就是将这些波长信道经过选择后分送到不同的节点(或端口)去. 因此, 通信网络中的波长开关可以分成两类: 空域开关和时域开关^[2,3], 如图 1.2.1(b) 所示.

线路开关(circuit switching)是对同一输入波长信道, 在不同输出端口间实现空间转换, 但该波长信道所携带的比特谱在转换输出端口时保持不变. 线路开关是波长开关, 又属于空间开关. 该开关适用于 WDM 网络.

波长转换(wavelength conversion)的功能是将一个波长信道转变为另一个波长信道, 但其中的比特谱在波长转换中保持不变. 其实这是一种时域开关, 但因为变换端口而具有空域开关的特性, 常用于 WDM 网络.

包开关(packet switching)是根据时域中各包的信息头的指令发送各个包到不同的指定端口.“包”是指数据包, 包含各种比特信息. 包与空域中的波长信道的区别在于包按时间顺序排列; 包中的信号具有一个用于路由识别的信息“头”. 包开关适用于 TDM 网络, 是一种时域开关.

1.2.2 按工作特性分类

按开关工作特性分类, 光开关可分为普通光开关、光限制开关和光双稳开关三类, 如图 1.2.2 所示.

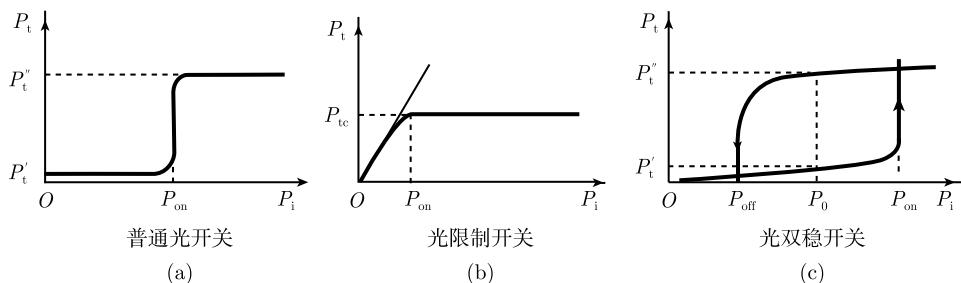


图 1.2.2 光开关按开关特性分类

(a) 普通光开关; (b) 光限制开关; (c) 光双稳开关

由图 1.2.2 可见, 普通光开关与光限制开关不同, 普通光开关在开关动作之前一直处于低透射功率状态 (P_t'), 直到入射光强达到阈值 (P_{on}), 才突然开启到高透射功率状态 (P_t''). 而光限制开关在弱光功率下其透射光功率随入射光功率的增大而线性地增大 (透射率不变), 当入射光功率达到一个阈值 (P_{on}) 时, 透射光功率被限制在一个较低的光功率 (P_{tc}) 水平 (透射率为零).

普通光开关与光限制开关属于单值型开关, 这两种光开关是靠改变作用于介质上光功率的大小来控制光开关动作; 光双稳开关对应于一个入射光功率 (维持光功率 P_0) 有两个稳定的透射光功率状态 (P_t' 和 P_t''), 若要实现这两个输出状态间的转换, 要靠另外两个控制光来开启和关闭开关, 相当于电子学的触发开关. 普通光开关抗噪声的能力较低, 如果噪声处于 P_{on} 附近, 容易产生开关的误导动作, 工作不稳定; 而对于光双稳开关, 在双稳区以内的工作点, 若噪声幅度远小于双稳区的幅度, 工作非常稳定, 不受噪声影响.

图 1.2.2 中的三种开关的共同特点是需要通过外加电场或输入泵浦光 (包括交叉泵浦或自泵浦两种方式) 来驱动信号光的开启或关闭. 图 1.2.2 中的 P_{on} 是开启光开关的最低光功率, 简称为开关功率. 对于普通光开关和光限制开关, 只要使光功率降到 P_{on} 之下就可关闭光开关. 而对于光双稳开关, 若要开启开关, 必须在维持光功率 P_0 的基础上加一个正的控制光功率, 使总功率超过 P_{on} , 就可实现开启. 若要关闭开关, 只要在维持光功率 P_0 的基础上加一个负的控制光功率, 使总光功率低于 P_{off} . (或瞬时地撤去维持光) 即可使开关关闭.

1.2.3 按控制方法分类

光开关可按其控制机理不同分为电控光开关和光控光开关 (全光型) 两类.

1. 电控光开关

表 1.2.1 电控光开关分类

开关器件类型	开关时间量级
热光效应光开关	2ms
微机械光开关	1ms
旋光液晶光开关	100μs
磁光效应光开关	30μs
声光效应光开关	100ns
电光效应光开关	1ns

目前有产品销售的光开关, 大部分是电控光开关. 这些开关成本较低, 工作可靠, 但存在着必须经过光电转换而效率较低, 开关速度较慢 (毫秒量级至纳秒), 以及噪声较大等问题. 几种常用的电控光开关及其开关时间列于表 1.2.1 中. 可见电光开关的开关速度比较快, 热光开关和电控机械光开关的开关速度比较慢.

2. 光控光开关

光控光开关是基于非线性光学原理的全光开关. 其优点是无需经过光电转换, 直接在光域中运作, 因而效率高, 噪声小, 而且开关速度较快 (纳秒或至皮秒以下).

由于光子不带电, 无法像电子学那样直接实现以光控光, 只能采用非线性光学间接方法。用一束外加的强光(交叉泵浦)或靠信号光本身的强光(自泵浦)与传播信号光的介质相互作用, 使其光学性质发生非线性变化, 如介质的吸收或折射(极化率的虚部或实部)发生依赖于光功率的变化, 从而对信号光的波矢、相位或偏振进行控制, 最后实现对信号光的强度(振幅)或传播方向的控制。全光开关基于多种不同的非线性机制, 主要的非线性机制与相应的开关原理简要列于表 1.2.2 中。

表 1.2.2 全光开关的非线性机制与工作原理

非线性机制	光开关原理
非线性折射	光克尔效应, 自聚焦和自散焦, 双光子折射效应
非线性吸收	饱和与反饱和吸收, 双光子吸收, 二相色性
非线性反射	在非线性界面, 或在夹非线性液体的两棱镜表面反射
非线性偏振	强光使液晶、手性材料等产生非线性旋光效应
非线性变频	倍频、和频、参量过程、四波混频、受激拉曼等
非线性相变	光致材料相变, 引起介质折射率或吸收系数变化
非线性光栅	单个非线性光栅, 用非线性波导连接的光栅对
非线性耦合器	强光入射非对称的光耦合器引起两臂光的相位差
非线性放大器	强光使半导体光放大器饱和而改变光的相位
非线性干涉仪	强光使干涉仪材料折射率变化导致两光束相位差 π

总之, 全光开关是通过控制光对介质的非线性光学作用来改变被控制光的强度或传播方向的器件, 它是未来光计算机系统和高速全光通信网络的一个关键技术及重要器件。

从 1965 年光学双稳态研究开始, 人们对全光开关的研究已经历约 50 年, 花费了大量科研经费, 发表了大量学术论文, 但是至今还没有实用的产品问世。

对于实用的光开关, 要求控制光的功率小于或接近信号光的功率。一般光通信的信号光功率在毫瓦以下, 因此要求光开关的阈值开关功率至少在毫瓦级水平。同时要求光开关的速度高于现有电子开关的速度, 现有电子开关的最高开关速度是皮秒量级, 用此要求光开关的开关时间达到皮秒以下。但是目前研究的全光开关还不能同时达到这两个指标。

为什么全光开关至今不能实现实用化呢? 这是因为全光开关存在着如下困难:

(1) 一般全光开关是基于材料的三阶非线性光学效应, 这种效应极其微弱, 要求驱动开关的光功率很高。但是强激光会造成材料中很强的热效应, 致使器件的工作不稳定。

(2) 光开关材料的光学非线性与材料的光吸收之间存在着矛盾。例如, 化合物

半导体的高非线性处于激子吸收峰的波长处, 而强吸收使开关无法级联运转; 强吸收还造成很强的热效应, 使器件工作不稳定。虽然石英材料在光通信波段的光吸收很低, 但是石英在该波段的光学非线性太低, 因而要求极高的开关功率来驱动。

(3) 开关器件的开关功率与开关速度之间存在着根本的矛盾。一般而言, 开关功率越低, 开关速度越慢; 开关速度越快, 开关功率越高。这种矛盾使控制光所需的功率远远超过被控制的光信号功率, 因而无法在低功耗下运转。

(4) 开关时间包括开启时间和关闭时间。开启时间取决于材料的非线性响应时间(如光克尔效应或双光子吸收的响应时间), 可以短到皮秒以下。但是关闭时间一般比开启时间要长得多, 可相差3~4个数量级。例如, 半导体的光开关器件, 其关闭时间主要受载流子复合寿命的限制, 约几十纳秒量级, 因此一般半导体光开关的开关时间很难做到比纳秒更短。

(5) 为了用光通信波段光吸收很低的石英材料做光开关, 可以采取环形共振腔结构, 以便在环行中积累光学非线性, 降低开关功率。但是, 其开关速度要受到腔场建起时间(或腔的光子寿命)的限制, 使开关时间被限制在纳秒量级。

总之, 目前光子技术的发展迫切需要低开关功率、高开关速度的全光开关器件。根据几十年研究积累的经验, 并通过理论和实验证明, 可以采取以下措施, 克服全光开关功耗大、速度低、不能实用化的困难:

(1) 寻找和研制高非线性、低功耗、快响应的优质材料。因为高非线性与快响是矛盾的, 二者需要找到一个最佳的平衡。

(2) 要求材料的光学透明度高, 即对光的吸收小, 比如处于低吸收窗口的石英材料和玻璃材料, 但是这样的材料非线性很差, 可以通过对材料的适当掺杂来解决。

(3) 利用截面积小到纳米量级的波导(纳米光纤、条形平面波导和光子晶体波导), 使光功率密度提高, 有利于降低开关能量。

(4) 采用长度大的波导, 可以降低开关功率, 但会使器件体积变大, 同时开关时间变长。因此建议采用微环结构, 相当延长波导的长度, 体积又不致太大。

(5) 半导体材料的光开关的关闭时间往往受载流子复合寿命的限制, 要设法克服这个困难, 如采用超薄材料, 或者采用两束脉冲光来控制开关的开启和关闭等。

(6) 一般现有的光开关材料和部件, 由于损耗的存在很难做到所要求的低开关功率, 为了克服损耗, 可以在光开关中加入光放大器, 不过它会给光开关的制备带来复杂性。

(7) 采用飞秒脉冲光驱动开关, 可以激发材料的双光子非线性(在弱光下以单光子非线性为主), 这样既可降低开关所需的平均功率, 又可提高开关速度。

总之, 全光开关的实用化是一个难以解决的问题。从现在的研究趋势看来, 以飞秒激光驱动的纳米尺寸的全光开关有可能解决光开关实用化的问题。

1.3 光开关的性能参数

1.3.1 光开关的技术参数

光开关的特性参数主要有插入损耗、隔离度、串扰、工作波长、消光比、开关时间、开关功率等。本节以图 1.3.1 的 1×2 光开关为例，给出以上各个参数的定义^[4]。

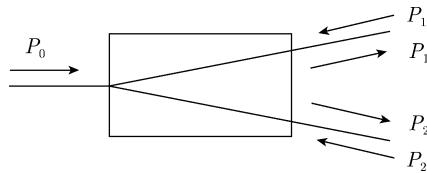


图 1.3.1 1×2 光开关特性参数示意图

1. 插入损耗

插入损耗 (insertion loss) 定义为输出光功率与输入光功率的比值，以分贝来表示。

$$\text{IL} = -10\lg \frac{P_1}{P_0}, \quad (1.3.1)$$

式中， P_0 为从输入端输入的光功率； P_1 为从某一输出端输出的光功率。

2. 回波损耗

回波损耗 (return loss) 定义为从某一输出端返回的光功率与输入端光功率的比值，以分贝来表示。

$$\text{RL} = -10\lg \frac{P_{1r}}{P_0}, \quad (1.3.2)$$

式中， P_0 为进入输入端的光功率； P_{1r} 为在输入端接收到的某一返回的光功率。

3. 隔离度

隔离度 (isolation) 定义为两个相互隔离的输出端光功率的比值，以分贝来表示。

$$I_{1,2} = -10\lg \frac{P_{i1}}{P_{i2}}, \quad (1.3.3)$$

式中，1 和 2 为开关的两个相互隔离的输出端； P_{i1} 为光从 i 输入端输入和从 1 输出端输出的光功率， P_{i2} 为光从 i 输入端输入和从 2 输出端输出的光功率。

4. 串扰

串扰 (crosstalk) 定义为串入相邻某输出端的光功率与光开关接通输出端的光功率的比值，以分贝来表示。

$$C_{12} = -10\lg \frac{P_2}{P_1}, \quad (1.3.4)$$

式中, P_1 为从开关接通的 1 输出端输出的光功率; P_2 为串入 2 输出端的光功率.

5. 消光比

消光比 (extinction ratio) 定义为输入和输出两端口处于导通 (开启) 与非导通 (关闭) 状态的插入损耗之差.

$$\text{ER}_{nm} = \text{IL}_{nm} - \text{IL}_{nm}^0, \quad (1.3.5)$$

式中, IL_{nm} 和 IL_{nm}^0 分别为当 n 、 m 两端口处于导通状态和不导通状态的插入损耗.

6. 开关功率

开关功率 (switching power) 是实现信号光开关动作所需要的最小输入功率, 对电控光开关, 是所需的外加电功率; 对光控光开关, 是所需的控制光功率, 即泵浦光功率. 在全光开关中可用自泵浦与交叉泵浦两种方式来实施光开关.

7. 开关时间

开关时间 (switching time) 是指开关的某一输出端口处, 光功率从初始态转为开启状态或关闭状态所需的时间; 开关的开启时间和关闭时间应从给开关分别施加或撤去开关能量的时刻起测量.

除此以外, 光开关还有许多性能参数, 如偏振相关损耗 (PDL)、温度相关损耗、开关寿命、开关重复性、温度稳定性等.

1.3.2 对光开关参量的要求

以上开关特性中最重要的是开关功率和开关时间. 一个新的光开关出现, 首先要考核这两个特性参数. 而这两个参数常常是相互矛盾的. 例如, 液晶和半导体的开关功率较低, 但开关速度太慢; 克尔介质和有机材料的开关速度较快, 但所需开关功率太高.

在实际应用中, 对光开关有如下基本要求:

- (1) 低开关功率 (小于等于毫瓦量级), 接近或低于光信号功率;
- (2) 高开关速度 (小于等于皮秒量级), 超过电子开关速度;
- (3) 光学性能好, 吸收小, 对工作波长透射率高;
- (4) 尺寸小 (纳米至微米量级);
- (5) 工艺简单, 制作成本低.

目前全光开关很难同时达到上述要求, 因为这些要求是相互矛盾的, 所以全光开关至今不能实际应用. 为了解决全光开关的实用问题, 需要适当选择参数, 进行最佳化设计.

1.3.3 光开关材料的品质因数

基于非线性光学效应的全光开关, 光开关的性能取决于材料的质量。基于克尔效应的光学双稳开关器件, 材料的非线性折射系数 n_2 与线性吸收系数 α_0 是重要的参量。可以证明, 器件的临界输入光强为 $I_c \propto \lambda \alpha_0 / n_2$ (λ 是波长)^[5]。也就是说 α_0 越小和 n_2 越大, 开关功率越低。所以 $n_2 / (\lambda \alpha_0)$ 是衡量光开关材料好坏的一个品质因数。必须寻找非线性折射系数大和吸收系数小的材料来做光开关, 才能获得较低的开关功率。如果再考虑材料的响应时间 τ 这个重要因素, 对于固定的工作波长, 光开关的品质因素可以写成

$$Q = \frac{n_2}{\alpha_0 \tau}. \quad (1.3.6)$$

表 1.3.1 列出四种典型的非线性光学材料的特性参数。比较这几种材料, 非线性折射系数 n_2 较大的材料有基于分子取向机制的液晶 (向列液晶、铁电液晶等), 还有基于带隙共振的半导体材料 (直接带隙的III-V 族化合物半导体 GaAs 和 InP 等, 以及IV-VI族、II-VI族化合物半导体等), 其次是基于共轭 π 电子机制的有机高分子材料 (PTS*、金属有机化合物、卟啉、偶氮及 C₆₀ 等), 但是具有对称分子结构的间接带隙半导体与玻璃材料 (Si、Ge、SiO₂ 等) 的非线性较小。也就是说, 这四类材料的非线性从强到弱的顺序是液晶–半导体–有机材料–玻璃。但是从这四类材料的响应时间 τ 来看, 次序是相反的: 玻璃–有机材料–半导体–液晶。此外, 线性吸收系数 α_0 也是重要指标, 它决定着器件的光学透明度和热损耗的大小。在这四类材料中, 半导体的光吸收最大; 其次是液晶; 有机材料的光吸收较小; 玻璃最小。如果强调器件的开关功率, 四种材料的顺序是液晶–半导体–有机材料–玻璃; 如果强调器件的开关时间, 则四种材料的顺序是玻璃–有机材料–半导体–液晶。

表 1.3.1 几种非线性光学材料的特性参数比较

非线性材料	$n_2 / (\text{cm}^2/\text{W})$	$\alpha_0 / \text{cm}^{-1}$	τ / s	$Q / [\text{cm}^3 / (\text{s} \cdot \text{W})]$
液晶 (铁电液晶等)	10^{-7}	10^3	10^{-3}	10^{-7}
半导体 (GaAs 等)	10^{-8}	10^4	10^{-8}	10^{-4}
有机材料 (PTS* 等)	10^{-16}	10^{-1}	10^{-12}	10^{-3}
玻璃 (Si、SiO ₂ 等)	10^{-20}	10^{-5}	10^{-14}	10^{-1}

* PTS 是一种一维聚合物单晶, 它的英文化学名称是: bis-(p-toluene sulphonate) of 2,4-Hexadiyne-1,6-diol, 中文是: 双 (对甲苯磺酸)-2,4-己二炔 -1,6 二醇酯

参 考 文 献

- [1] 刘颂豪, 李淳飞. 光子学的技术与应用. 广州: 广东科技出版社, 2006

- [2] Agrawal G P. Lightwave Technology: Components and Devices. New York: Wiley-Interscience, 2004
- [3] Tarek S, EL-Bawab. Optical Switching. New York: Springer, 2006
- [4] 林学煌. 光无源器件. 北京: 人民邮电出版社, 1998
- [5] Gibbs H M. Optical Bistability: Controlling Light with Light. New York: Academic Press Inc., 1985

第2章 电控光开关

本章介绍几种典型的电控光开关的基本原理，并对其优缺点进行评价。电控光开关包括电光效应开关、热光效应开关、磁光效应开关、声光效应开关、旋光效应(液晶)开关、微电机械系统开关(MEMS)等，其中电光开关、声光开关、液晶开关和MEMS开关都是用电压(或电场)控制的；磁光开关和热光开关是用电流控制的。这些电控光开关已有产品在市场上销售。现在主要研究的问题是如何提高质量和可靠性，降低功耗，减小尺寸，提高集成化程度，并要降低成本，以便满足日益增长的市场需求。

2.1 电光开关

电光开关器件一般采用平面集成光波导技术制备。波导材料常用铌酸锂、化合物半导体、硅材料、有机聚合物材料等。开关器件的工作原理基于电光效应(Pockels效应)：在外加直流电场或低频电场的作用下，介质的折射率发生与外加电场呈线性关系的变化。波导介质折射率的变化，使通过波导的光的相位也随之变化，适当调节施加电压的大小，可以使双光束在输出时发生相长干涉或相消干涉，从而实现输出光强的开启和关闭(强度开关)。如果输出光有两个通道，则可产生输出光在两通道间的开关转变(空间开关)。

设材料折射率的变化 Δn 和光束相位差的变化 $\Delta\phi$ 皆与外加电场强度 E_0 成正比，即 $\Delta n \propto E_0$, $\Delta\phi \propto E_0$ ，那么 Δn 、 $\Delta\phi$ 与 E_0 之间究竟是什么函数关系？

已知未加电场时材料的折射率为 $n = \sqrt{\varepsilon/\varepsilon_0}$ ，其中 ε_0 是真空中的介电系数， ε 是介质中的介电系数。为了推导 Δn 、 $\Delta\phi$ 与 E_0 间的关系，我们引入一个物理量——相对介电系数 η ，定义为真空中的介电系数与介质中的介电系数之比，即

$$\eta = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} = \frac{1}{n^2}. \quad (2.1.1)$$

因为折射率是电场 E_0 的函数，因此 η 也是 E_0 的函数，可在 $E_0 = 0$ 附近作泰勒级数展开，取一级线性近似，即

$$\eta(E) = \eta(0) + \Delta\eta. \quad (2.1.2)$$

定义

$$\Delta\eta = \gamma E_0, \quad (2.1.3)$$

式中, γ 为介质的电光系数. 将式 (2.1.3) 代入式 (2.1.2), 则得

$$\eta(E) = \eta(0) + \gamma E_0. \quad (2.1.4)$$

将 η 对 n 求导, 利用式 (2.1.1), 则有

$$\Delta\eta = \frac{\partial\eta}{\partial n}\Delta n = \frac{\partial}{\partial n}\left(\frac{1}{n^2}\right)\Delta n = -\frac{2}{n^3}\Delta n. \quad (2.1.5)$$

对比式 (2.1.5) 和式 (2.1.3), 可得折射率变化与电场的关系:

$$\Delta n = -\frac{n^3}{2}\gamma E_0. \quad (2.1.6)$$

可见折射率变化与外加电场成正比.

已知光波在介质中的传播常数为 $\beta = 2\pi n/\lambda_0$, 光波在介质中传播距离 L 产生的相位变化为

$$\Delta\phi = \Delta\beta L = \frac{2\pi}{\lambda_0}\Delta n L. \quad (2.1.7)$$

利用式 (2.1.6), 得到

$$\Delta\phi = -\frac{\pi n^3 \gamma L}{\lambda_0} E_0. \quad (2.1.8)$$

可见相位变化也与外加电场成正比.

研究最早、比较成熟的电光开关材料是铁电晶体材料, 如铌酸锂 (LiNbO_3). 1979 年就用铌酸锂实现了与偏振无关的光开关^[1]. 铌酸锂具有较强的电光效应、声光效应和非线性光学效应, 而且响应时间快, 开关时间可达 1ns. 一般用加电压的方法改变 LiNbO_3 的折射率. 化合物半导体材料也用来做电光开关, 如 InP 和 GaAs 系列^[2], 这类材料可以用两种方法控制折射率变化: 一是加外电压; 二是在波导层注入载流子. 但化合物半导体光开关比铌酸锂光开关的插入损耗较大, 而且由于半导体载流子复合时间的限制, 开关的关闭时间一般在 10ns 以上. 硅材料也可以做电光开关, 但它没有 Pockel 电光效应, 只能用电注入方法^[3]. 有机高分子材料可以做电光开关^[4], 但它更多用作热光开关.

与机械光开关相比, 电光开关的主要优点是: 开关速度高, 没有移动部件, 重复率较高, 寿命较长. 下面介绍几种典型的波导型电光开关的原理.

2.1.1 电光耦合器光开关

集成的电光耦合器光开关是在电光材料的衬底上制作一对彼此靠近的条形波导以及一对在波导外侧的电极构成, 两电极之间加电压 V , 其中之一接地, 如图 2.1.1 所示. 当不加电压时, 这就是一个具有两条波导和四个端口的对称的定向耦合器.