

全光开关原理

THE PRINCIPLES OF
ALL-OPTICAL SWITCHING

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>

北京佳信达版艺术印刷有限公司印刷

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.

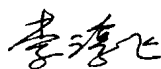
其实“开关”的概念很广泛, 不仅包含强度开关, 还有空间开关、时间开关、波长(频率)开关、相位开关、偏振开关等. 广义地说, 把任何物理的、化学的, 甚至生物的一个状态不连续地、可逆地转变成另一个状态的过程就是开关. 众所周知, 电子开关在现代电子技术中有着极其广泛的应用. 很多电子应用技术与系统都实现了数字化, 如数字通信、数字计算机、数字化音响和数字化影像技术等. 只要实现数字化就要用开关. 同样, 光开关在光子技术中也有着重要应用前景, 如光通信的光交换机、光计算的光子芯片、光传感的全光网络、三维数字光存储, 以及脉冲激光光源技术等都要用到光开关.

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 光学双稳性概论	47
3.1.1 光学双稳性	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 光学双稳性的稳定性理论	84
3.4.1 光学双稳性的稳定性	84
3.4.2 光学双稳性的不稳定性	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 光致变色性全光开关	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 $10^{11} \sim 10^{16}\text{Hz}$,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。

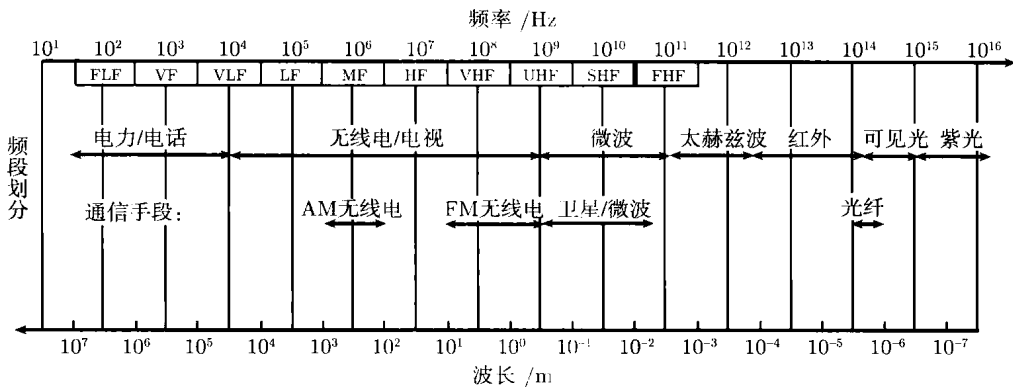


图 1.1.1 电磁波的波段划分与相应的通信手段

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]。

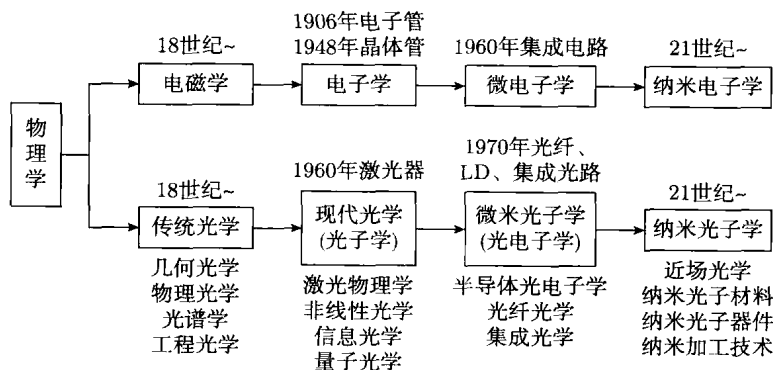


图 1.1.2 光子学与电子学的发展路线图比较

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带的领头羊, 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 ($1\sim 1000\text{nm}$)
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 电子计算机 + 光外设 光传感器 + 电子解调	全光通信系统 光计算机系统 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赛中,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光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)的领头羊。回顾信息技术的发展, 经历了以下几个阶段: