



信息科学技术专著丛书

微纳光子器件 基础及前沿

张 天 徐 坤 编著

The Fundamentals and Frontiers of
Micro- and Nanophotonic Devices



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



信息科学技术专著丛书

微纳光子器件基础及前沿

张 天 徐 坤 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书主要内容包括微纳光子器件的基础知识及前沿应用。本书共 10 章,第 1 章介绍微纳光子器件的发展背景及本书构成;第 2~4 章介绍微纳光子器件的基础物理知识、时域有限差分方法、智能算法基础;第 5~7 章介绍目前应用较为广泛且具有代表性的三类微纳光子器件的历史、原理和应用,具体包括表面等离子激元器件及其应用、石墨烯超材料器件及其应用、光学微腔克尔光频梳技术;第 8~10 章介绍近些年的前沿微纳光子系统及相关应用,具体包括微纳光子计算成像技术、微纳光子神经网络技术、微纳光子生物计算技术。

本书可作为光学、电子与通信类专业本科生及研究生的教材,也可作为从事相关领域研究的科研人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

微纳光子器件基础及前沿 / 张天, 徐坤编著. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2021. 8

ISBN 978-7-5635-6488-0

I. ①微… II. ①张… ②徐… III. ①光电器件—研究 IV. ①TN15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 170847 号

策划编辑: 马晓仟 责任编辑: 刘春棠 封面设计: 七星博纳

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号

邮政编码: 100876

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市金木堂数码科技有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 19.25

字 数: 502 千字

版 次: 2021 年 8 月第 1 版

印 次: 2021 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-6488-0

定价: 68.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

前 言

微纳光子器件是指微纳尺寸的光子器件,其具有可与光波长比拟甚至更小的结构。研究微纳光子器件中光与物质的相互作用规律,可以利用它对光进行产生、传输、控制、放大和探测等。微纳光子学近几十年得到飞速发展,在很多领域都有广泛的应用,如信息处理、成像、加工、生命科学、医疗服务、安全和安保等。

本书旨在对当前微纳光子器件与前沿应用的各方面进行全面的描述。第1章介绍微纳光子器件的发展背景及本书构成,第2~4章分别介绍微纳光子器件的物理基础、典型电磁仿真方法——时域有限差分方法、在微纳光子器件中广泛应用的智能算法。这些基本内容将为读者进行后面章节的学习奠定基础。

光刻技术的发展及其在光子器件领域的应用,赋予了微纳光子器件独特的尺寸特征。一方面,由传统均匀材料构成的器件在微纳尺度会出现不同于光学透镜等大尺寸器件的光学效应和光输运特性,如突破衍射极限、局域场增强、定向辐射等。另一方面,利用光刻技术可以构造单元尺寸远小于工作波长的材料,即超材料,由于超材料可以同时具有负值的介电常数和磁导率,所以超材料会出现不同于传统均匀材料的光学效应,如逆斯涅耳折射、逆切连科夫、逆多普勒等效应。针对这两类材料,近几十年研究较为典型且前沿的器件包括表面等离子激元器件和基于石墨烯的超材料器件。为此,本书在第5、6章分别介绍这两种器件的发展背景、基本原理和前沿应用。除了材料特性会影响光学特性外,器件结构的影响也不容忽视,具体包括色散、非线性等,本书在第7章介绍光学微腔的基本原理及其在光频梳中的应用。

单个器件的研究是微纳光子学的起点,而由器件组成的系统及其应用才是目的和关键。现如今,大数据、物联网、自动驾驶、人工智能等新兴领域飞速发展,面对日益膨胀的数据分析与信息处理需求,进行高速、高效、智能的信息处理和计算至关重要。为此,本书在第8~10章分别介绍微纳光子器件在超快成像、超快计算和智能计算三个领域的应用,具体包括微纳光子计算成像技术、微纳光子神经网络技术、微纳光子生物计算技术三种前沿技术。

本书凝聚了作者所在研究团队多年来的科研成果,感谢戴键副教授、于振明副教授、桂丽丽研究员分别对本书第7、8、10章的撰写提供的建议和帮助,感谢刘京亮博士对本书附录B

的贡献, 特别感谢博士生于帅、来一航、杨志伟、刘辉、孟子艺、淡一航、邓寅在本书撰写过程中给予的帮助, 并感谢博士生樊泽洋、刘安妮、韩微微、吴钟涵、王传硕以及硕士生舒赢、卢晓宇、郑一臻、赵婉玉、李鑫敏、刘迪一、赵霖珂在本书撰写过程中帮助收集和整理相关资料。本书的撰写出版得到了国家杰出青年基金(编号: 61625104)的支持, 在此对国家自然科学基金委员会表示衷心的感谢。

由于书中涉及大量研究工作的调研, 并且科技一直在发展, 内容难免存在总结不充分的问题, 加之编著者水平有限, 书中不妥之处在所难免, 恳请广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 微纳光子器件的发展背景	1
1.2 微纳光子器件的发展趋势与应用	2
1.2.1 光刻技术的发展	2
1.2.2 微纳光子器件及其应用的研究	3
1.3 本书构成	5
本章参考文献	6
第 2 章 微纳光子器件物理基础	8
2.1 电介质光波导	8
2.1.1 平面电介质光波导的射线分析法	8
2.1.2 平面电介质光波导的电磁场分析法	11
2.2 表面等离激元波导	15
2.2.1 金属的光频特性	15
2.2.2 石墨烯的光频特性	18
2.2.3 表面等离子体波	20
2.2.4 金属包覆介质波导	23
2.2.5 石墨烯包覆介质波导	26
2.3 耦合模式理论	28
2.3.1 基本原理	28
2.3.2 应用举例	30
2.4 典型的非线性效应	32
2.4.1 二阶非线性效应	32
2.4.2 三阶非线性效应	33
2.5 微纳光场调控	35
2.5.1 超材料与超表面	35
2.5.2 数字微镜	38
2.5.3 空间光调制器	39
2.5.4 硅基阵列波导	41
本章参考文献	43

第 3 章 时域有限差分方法	45
3.1 FDTD 方法的发展与应用	45
3.2 FDTD 方法的基本原理	46
3.2.1 Yee 元胞及三维差分形式	46
3.2.2 介质界面的电磁参数选择	50
3.2.3 数值稳定性与数值色散	53
3.3 激励源设置	57
3.3.1 常用的激励源	58
3.3.2 激励源的引入	60
3.4 边界条件	63
3.4.1 常用的边界条件	63
3.4.2 单轴各向异性介质完全匹配层	66
3.5 仿真实例	72
3.5.1 对称金属包覆介质波导	72
3.5.2 对称介质包覆金属波导	73
3.5.3 单面金属包覆介质波导	74
本章参考文献	75
第 4 章 智能算法基础	77
4.1 梯度类算法原理	77
4.1.1 随机梯度下降法	77
4.1.2 SGD 算法的变体算法	78
4.1.3 混合拓扑优化算法	82
4.1.4 混合拓扑优化算法举例	87
4.2 非梯度类算法原理	87
4.2.1 直接二进制搜索算法	87
4.2.2 遗传算法	88
4.2.3 模拟退火算法	89
4.2.4 粒子群优化算法	90
4.2.5 多目标优化算法	91
4.3 机器学习	94
4.3.1 支持向量机	94
4.3.2 决策树	95
4.3.3 全连接神经网络	97
4.3.4 卷积神经网络	98
4.3.5 循环神经网络	99
4.3.6 储备池计算	102

4.3.7 常用软件与框架	104
本章参考文献.....	104
第 5 章 SPP 器件及其应用	108
5.1 SPP 光子器件简介	108
5.1.1 SPP 光子器件的背景与意义	108
5.1.2 SPP 光子器件的发展现状	109
5.2 SPP 的激发方式	111
5.2.1 棱镜激发法	112
5.2.2 光栅激发法	113
5.2.3 聚焦光束激发法	114
5.2.4 电子激发法	114
5.2.5 近场激发法	115
5.3 局域 SPP 的应用	115
5.3.1 可调宽频带场增强	116
5.3.2 等离激元诱导透明	119
5.4 非局域 SPP 的应用	122
5.4.1 SPP 的“彩虹捕获”	122
5.4.2 三次谐波的产生	125
5.5 SPP 器件的智能化设计与应用	128
5.5.1 应用演进类算法的 SPP 器件设计实例	128
5.5.2 应用人工神经网络的 SPP 器件设计实例	131
5.6 总结与展望	133
本章参考文献.....	134
第 6 章 石墨烯超材料器件及其应用	137
6.1 石墨烯超材料简介	137
6.1.1 超材料的背景与应用	137
6.1.2 GMM 的研究进展	138
6.2 GMM 器件对色散的调控与应用	140
6.2.1 GMM 色散调控原理	140
6.2.2 GMM 实现的远场超分辨成像	142
6.3 GMM 器件对光偏振态的调控与应用	146
6.3.1 石墨烯对硅波导中偏振态的影响	146
6.3.2 GMM 偏振调制器	147
6.3.3 GMM 偏振旋转分束器	149
6.4 GMM 器件的智能化设计	152
6.4.1 针对结构参数的设计	152

6.4.2 针对动态可调参数的设计	155
6.5 总结与展望	160
本章参考文献	160
第7章 光学微腔克尔光频梳技术	163
7.1 光频梳简介	163
7.1.1 光频梳的应用领域	164
7.1.2 光频梳的产生方式	164
7.1.3 微腔光频梳的发展	165
7.2 光学微腔简介	167
7.2.1 微腔的主要参数	167
7.2.2 微腔的形态设计	169
7.2.3 微腔的材料选择	171
7.2.4 微腔的制备方法	173
7.2.5 微腔的耦合方式	174
7.3 微腔光频梳的产生与动力学	174
7.3.1 调制不稳定性光频梳	175
7.3.2 耗散孤子光频梳	177
7.3.3 电光调制的微腔频梳	182
7.4 微腔光频梳的应用	186
7.4.1 双光梳超快测距	186
7.4.2 双光梳光谱测量	188
7.4.3 高速相干光通信	188
7.4.4 低相噪微波产生	190
7.5 总结与展望	195
本章参考文献	195
第8章 微纳光子计算成像技术	198
8.1 计算光学成像简介	198
8.1.1 计算成像	198
8.1.2 微纳光子器件与光场调控	200
8.2 编码计算成像	201
8.2.1 编码孔径压缩成像	202
8.2.2 无透镜编码成像	205
8.3 散射介质计算成像与多模光纤成像	207
8.3.1 散射介质成像	208
8.3.2 多模光纤成像	210
8.4 超表面计算成像	212

8.4.1 超表面超分辨率成像	212
8.4.2 超表面鬼成像	213
8.4.3 超表面功能性成像	214
8.5 总结与展望	215
本章参考文献.....	216
第9章 微纳光子神经网络技术.....	218
9.1 光子神经网络技术简介	218
9.1.1 人工神经网络的发展和应用	218
9.1.2 神经拟态硬件的电子平台和挑战	222
9.1.3 新型的光子手段	223
9.2 人工神经网络的光子实现	226
9.2.1 硅光子集成	227
9.2.2 光频梳	231
9.2.3 空间衍射光学系统	232
9.2.4 非线性激活实现	235
9.3 光子神经网络	237
9.3.1 全连接神经网络	237
9.3.2 卷积神经网络	241
9.3.3 储备池计算	244
9.3.4 脉冲神经网络	247
9.3.5 光子神经网络训练	250
9.4 光子神经网络展望	251
9.4.1 光电混合架构的提出	251
9.4.2 光电混合架构前瞻	252
9.4.3 未来发展方向	254
本章参考文献.....	254
第10章 微纳光子生物计算技术	258
10.1 生物计算简介.....	258
10.1.1 生物计算的意义.....	258
10.1.2 生物计算的特点.....	259
10.1.3 生物计算的国内外研究现状.....	260
10.2 光子技术助力生物计算研究.....	264
10.2.1 光遗传学.....	264
10.2.2 光学显微成像.....	266
10.2.3 钙离子成像.....	271
10.3 微纳光子技术用于生物计算研究.....	276

10.3.1	数字微镜器件	276
10.3.2	空间光调制器	277
10.3.3	微型 LED	278
10.3.4	硅基波导	279
10.3.5	光学超表面	280
10.4	总结与展望	284
	本章参考文献	285
附录 A	微腔克尔光频梳理论模型	289
附录 B	微腔中的光折变效应	291

第1章 绪 论

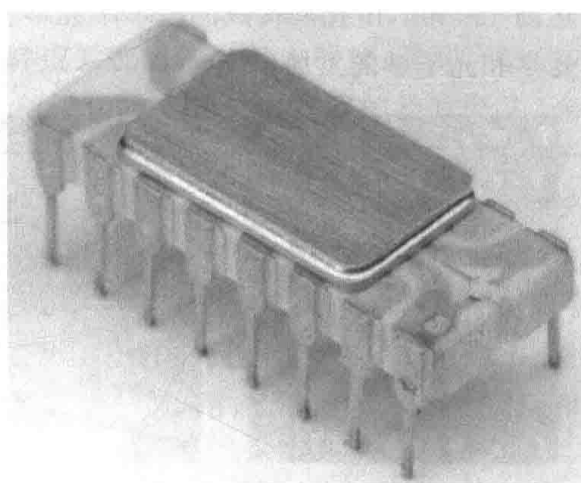
1.1 微纳光子器件的发展背景

“光子学”一词最早由法国科学家 Pierre Aigrain 于 1967 年提出,他对其给出定义:“光子学是一门利用光的学科,具体研究内容包括:光的产生,光的探测,通过传导、控制和放大对光进行管理,最重要的一点是利用光造福人类。”简言之,光子学就是一门研究光子产生、控制和探测的学科。因此,微/纳米光子学研究的就是光在微/纳米尺度的独特行为。微纳光子学近几十年得到飞速发展,相关技术已经影响甚至取代了现存的很多技术手段并被广泛应用于很多领域,如信息处理、成像、加工、生命科学和医疗服务、安全和安保等。微纳光子技术的出现得益于半导体制造工艺的到来与发展。

在 20 世纪 60 年代以前,光学器件基本上只需三个传统步骤便可制作得到,即切割、研磨和抛光,而这些技术早在古代就已经被发明出来(如图 1.1.1(a)所示)。“取 60 份沙子、180 份海洋植物的灰烬和 5 份石灰,就可以制作得到玻璃。”^[1] 玻璃作为目前仍然占据光学领域主导地位的材料,其制作过程仅需研磨和抛光两步,最终得到的玻璃形状和光学表面平整度与理想情况的误差在百纳米级别。现如今,这些工艺仍然在使用,让我们可以在宏观尺度上制作光学元件,如具有优良表面质量的透镜和棱镜。更为重要的是,半导体制造工艺开始步入人们的视野。1971 年,Hoff^[2,3] 等人利用半导体制造工艺制造出世界上第一台微处理器(如图 1.1.1(b)所示),他们将一个简单计算机的中央处理器(CPU)集成到一个芯片上,芯片尺寸仅为 $3\text{ mm} \times 4\text{ mm}$,包含 2 300 个金属-氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET),这是半导体工业上的一个重大突破。



(a) 约公元前1450年: 在埃及国王图特摩斯三世墓中发现的玻璃器皿



(b) 1971年: 第一台微处理器Intel 4004

图 1.1.1 光学器件传统制作工艺与半导体制造工艺的代表^[1,3]

半导体制造工艺的到来与发展为人类制造水平的发展带来了重大而深远的影响;一方面,为了进行大规模生产,光刻技术被发明出来,并且首先被用于电子器件的制作,使计算机的能力得到巨大提升。另一方面,计算机的进步为后来光学设计、建模和模拟提供了强大的支撑。所以,光刻技术很快被应用到光学装置的制作中,首次应用是微米尺度器件的制作,随后又被运用到纳米尺度器件的制作中。随着光学元件和系统小型化、集成度的提高,元件和系统性能大幅度提升的同时,其制作成本也降低了。

1.2 微纳光子器件的发展趋势与应用

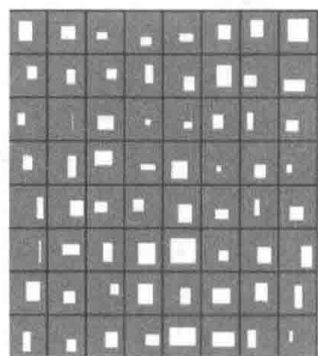
微纳光子器件的发展受到了光刻技术的极大推动,所以本节首先介绍光刻技术对于微纳光子器件的影响,然后介绍微纳光子器件与应用的发展研究。

1.2.1 光刻技术的发展

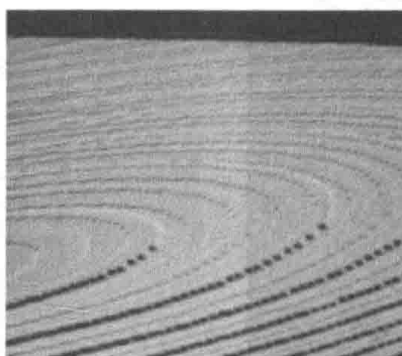
“微纳光子”指光学元件的典型特征尺寸在微米或者纳米量级。20世纪60年代,光刻的最小特征尺寸在十几微米的数量级。通常,光学元件的制作通过绘图仪进行,它会在纸或胶片上产生大尺寸的图案,并在随后采取光还原操作。这些光学元件被称为“计算机生成全息图”(图1.2.1(a)),在模拟光信号处理等领域广泛应用^[4]。

20世纪80年代,微米光子学得到了巨大的发展。当时,标准的光刻可以提供大概 $1\mu\text{m}$ 的特征尺寸。此时,干法刻蚀工艺已经被用于微米光子器件的制作,如玻璃或者硅中的衍射光学元件(图1.2.1(b))。同时,借助于新兴发展的迭代设计技术,很多新型的光学元件得以产生,如 $1\times N$ 的分束器和透镜阵列等^[5]。此时,微米光子学已是一门成熟的技术。微米光学元件有很广泛的应用,如照相机和显示器中的透镜阵列、激光器系统中的分束器和匀化器、分析中的微分光计等。

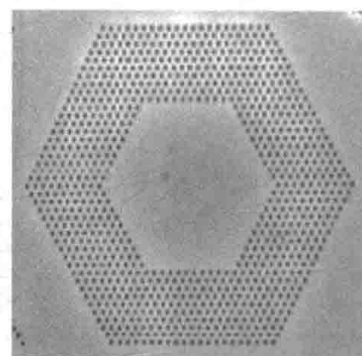
2000年左右,技术开始广泛地进入纳米尺度;芯片的处理器和存储器电子回路通常使用的最小尺寸为 65nm 或者更小,将电子回路制作的光刻工艺引入光子器件制造中,可以得到尺寸在相当量级的光子器件。如图1.2.1(c)^[6]所示,利用电子束刻蚀所制作的光子晶体晶格常数可达到 450nm ,由孔洞构成的基本单元半径可达到 135nm 。可以看出,纳米加工极大地促进了光学和光子学的发展研究。



(a) 1960年: 计算机生成全息图



(b) 1980年: 衍射元件



(c) 2000年: 电子束刻蚀制作得到的光子晶体

图 1.2.1 微/纳米尺度光子器件举例

1.2.2 微纳光子器件及其应用的研究

在亚波长尺度(正好与很多纳米尺度的光学应用重合),纳米材料和结构会产生新颖、奇特的物理现象。目前,微纳光子器件已经被应用到很多领域,如光电集成^[7]、光成像^[8]、纳米操控^[9]、量子计算^[10]等,如图 1.2.2 所示。显然,微纳光子学内容涵盖广泛,为方便读者由浅入深的学习,本书主要从三个方面对微纳光子器件及其前沿应用进行介绍:光辐射的微纳级限制、材料的微纳级限制、光信息调控的微纳级限制。

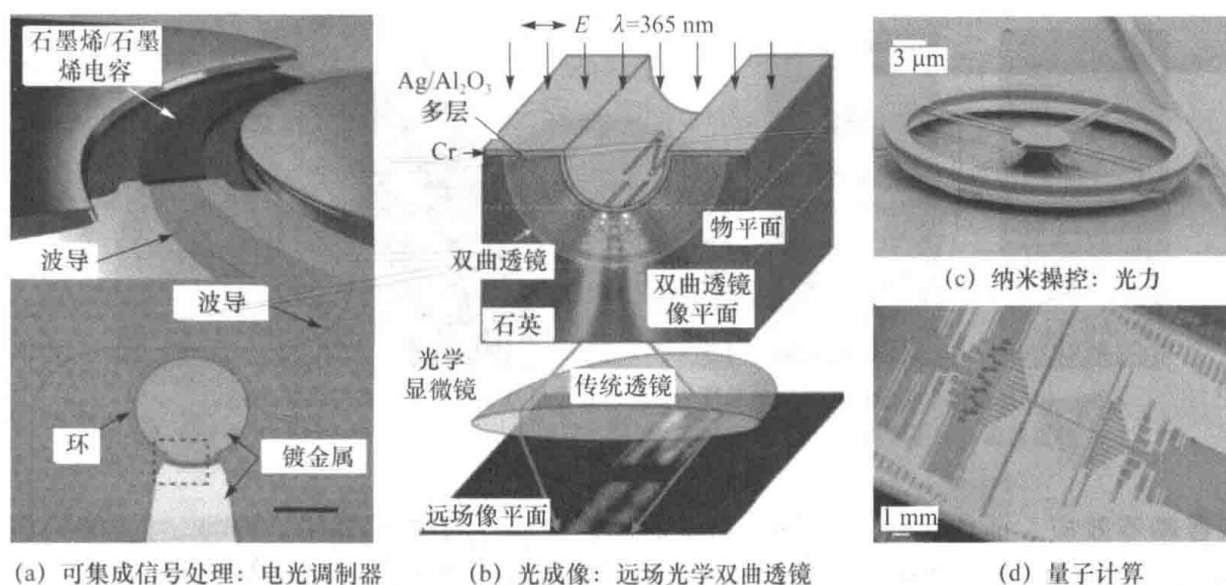


图 1.2.2 微纳光子器件的应用举例

1. 光辐射的微纳级限制

利用传统均匀材料,可以在微纳尺度上对光的辐射进行限制,此时会出现不同于光学透镜等大尺寸器件的光学效应和光输运特性,如突破衍射极限、局域场增强、量子效应、定向辐射等。

实现微纳尺度光场限制的基本结构为波导,典型波导包括集成光波导、光纤、表面等离子激元波导等。如图 1.2.3(a)所示,集成光波导由电介质组成,通过对其结构尺寸的设计,它可以将光辐射进一步限制到纳米量级,是光子集成器件或系统的核心组成部分,受到广泛的关注;1902 年,Wood 教授首次在金属光栅 TM 波的反射谱中观察到难以解释的异常突变,这一特殊现象最终于 1968 年被 Ritchie 利用表面等离子体共振模式进行了完美解释,由于基于表面等离子激元(SPP)的器件可以突破衍射极限,将光辐射限制在亚波长尺度(如图 1.2.3(b)^[11]所示),所以 SPP 在随后得到了广泛的研究与应用;此外,由纤芯和包层构成的光纤于 1966 年首次被华裔科学家高锟(Charles Kuen Kao)博士提出^[12],并于 1970 年由康宁公司成功制备,如图 1.2.3(c)所示,它实现了对微米级光辐射的限制和光信号的传播,并引发了通信传输等行业的革命。本书第 5 章重点介绍基于 SPP 的器件及其前沿应用,第 7~10 章介绍光纤和介质波导在前沿领域中的应用。

2. 材料的微纳级限制

利用光刻技术可以构造单元尺寸远小于工作波长的材料,其被称为超材料,图 1.2.4(a)所示为 2004 年 Smith 教授制作的一款超材料^[13]。由于超材料可以同时具有负值的介电常数和磁导率,所以超材料会出现不同于传统均匀材料的光学效应,如逆斯涅耳折射、逆切连科夫、

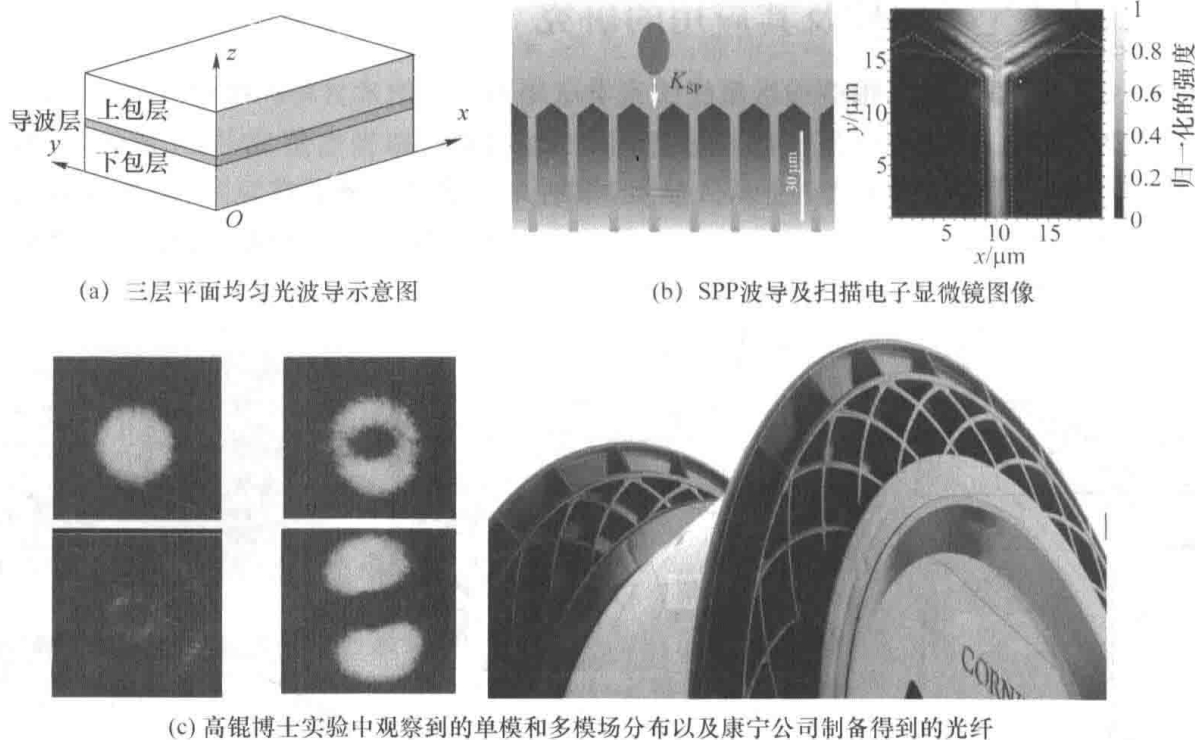


图 1.2.3 几种波导结构

逆多普勒等效效应。而将三维超材料中一维的厚度减小至亚波长量级,可实现对光波振幅、相位、偏振、传播模式等特性的灵活调控,该种超材料被称为超表面,它被广泛应用于超成像、超透镜、隐身、幻象等功能的实现。而石墨烯作为一种具有独特色散特性、宽频带电光响应能力及工作波长可调等优点的二维材料,如图 1.2.4(b)所示^[14],应用在超材料中具有独特的优势,所以本书第 6 章将介绍基于石墨烯的超材料及其应用。

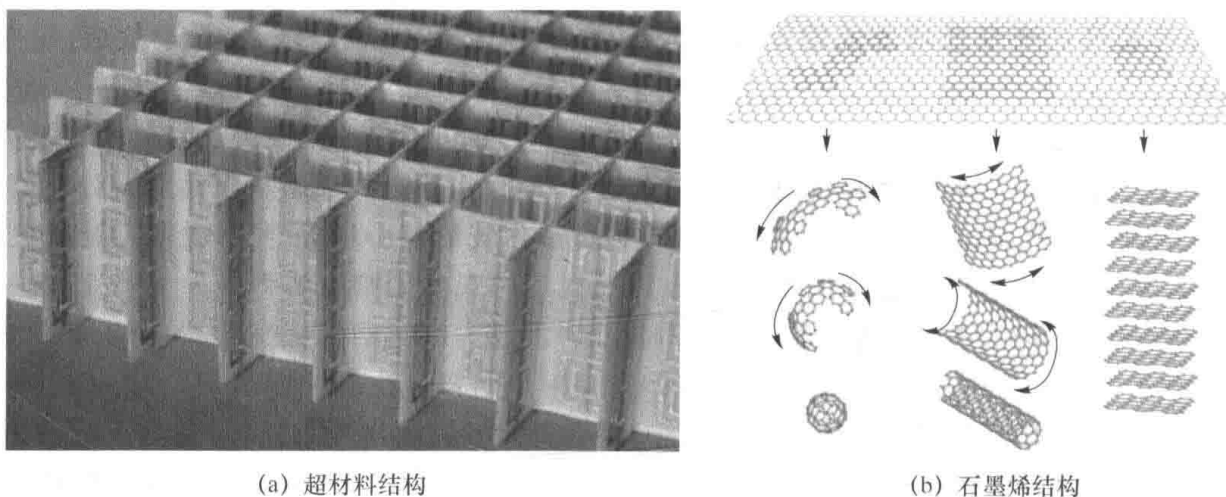


图 1.2.4 两种微纳尺寸的材料

3. 光信息调控的微纳级限制

微纳尺度的器件可以极大增强光与物质的相互作用,改变光信息的传输特性,包括色散、非线性等,从而实现对光信息的高效调控。

微腔是一种同时具备微纳尺寸的超小模式体积和超强场增强效应的新型器件,受到学术界的广泛关注。而 20 世纪 70 年代产生的光学频率梳“彻底改变了光学频率计量技术,突破了

时间与频率计量能力的极限”,对于激光技术以及计量科学领域具有重要意义,图 1.2.5(a)为一种光频梳的产生方式^[15],所以本书第 7 章将重点介绍光学微腔及其在光频梳产生上的应用。

单个器件的研究是微纳光子学的起点,而由器件组成的系统及其应用才是目的和关键。现如今,大数据、物联网、自动驾驶、人工智能等新兴领域飞速发展,面对日益膨胀的数据分析与信息处理需求,进行高速、高效、智能的信息处理和计算至关重要。为此,本书第 8~10 章将分别介绍微纳光子器件在超快成像、超快计算和智能计算三个领域的应用,具体包括微纳光子计算成像技术、微纳光子神经网络技术、微纳光子生物计算技术三种前沿技术,图 1.2.5(b)~(d)展示了几种典型系统^[16-18]。

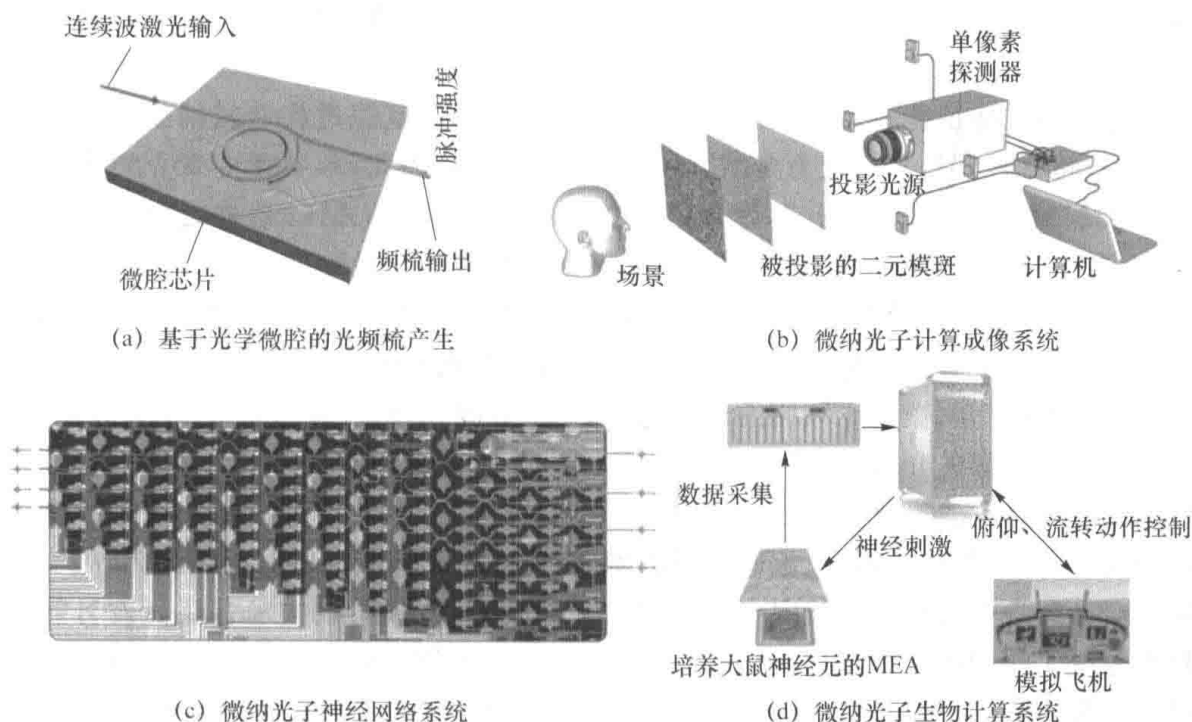


图 1.2.5 四种微纳尺度的光信息调控

1.3 本书构成

为了理解近些年国内外广泛关注的众多微纳光子器件的工作原理及相关应用技术,读者需要首先了解并掌握相关的基础知识。本书第 1 章介绍微纳光子器件的物理基础,这一部分是设计器件、理解器件以及应用器件的关键知识。在第 2 章中,2.1 节和 2.2 节介绍两种平面波导结构的分析方法及其相关特性,这是组成微纳光子器件的基础;2.3 节介绍耦合模式理论,该理论可以描述两种或者多种波导近距离放置时波导中传输电磁波发生耦合的物理过程;前面几节所介绍的知识更关注器件的线性响应,2.4 节介绍几种典型的对于光子器件响应特性亦非常重要的非线性效应;微纳光子器件除了具有传输电磁波的功能外,调控光场也是它的一个重要功能,故 2.5 节介绍目前四类研究广泛的光场调控器件。

对微纳光子器件的物理特性有了基本认识之后,读者能够对微纳光子器件开展基本的分析研究,但是实际设计的光子器件往往结构复杂,仅利用物理手段难以得到其电磁响应特性,还需要借助数值仿真方法来进行分析。第 3 章介绍一种目前在电磁仿真领域应用广泛的数值

方法——时域有限差分方法(FDTD),具体包括 FDTD 的发展与应用、FDTD 的基本原理、激励源设置、边界条件以及仿真实例。

除了 FDTD 这类电磁仿真算法以外,智能算法也被广泛地应用在微纳光子学中。其可以被用于辅助光子器件的设计,也可以利用光子器件替代电子芯片实现光计算,利用智能算法的拓扑结构指导光计算架构设计,联合生物进行计算等。除此之外,该算法还被应用于人工智能和成像领域,如图像分类、语音识别、计算成像等。作为这类研究的基础,本书第 4 章重点介绍三类智能算法,包括梯度类优化算法、非梯度类优化算法、机器学习。

在介绍了微纳光子器件的基础知识后,本书将重点介绍典型的微纳光子器件与前沿应用。第 5 章介绍一种利用传统材料来突破衍射极限的器件——SPP 器件。除了介绍其研究背景和发展现状外,还会介绍它的激发方式、局域 SPP 的应用、非局域 SPP 的应用以及 SPP 器件的智能化设计与应用。

微纳光子器件除了能在微纳级尺度限制光辐射外,还可以通过构造微纳级的材料来实现对光的操控,超材料便是其中较为典型且应用广泛的一种,为此,本书第 6 章介绍基于石墨烯的超材料(GMM)器件及其应用,具体包括石墨烯超材料简介、GMM 器件对色散的调控与应用、GMM 器件对光偏振态的调控与应用、GMM 器件的智能化设计。

此外,微纳光子器件的构建可以增强光与物质的相互作用,从而影响光信息的传输特性。本书第 7 章介绍一种典型结构——光学微腔——及其在克尔光频梳中的应用。具体包括光频梳简介、光学微腔简介、微腔光频梳的产生与动力学、微腔光频梳的应用。

通过对前面内容的介绍,读者对于单个器件的设计和应用有了认识和理解,在后面章节中,将重点介绍微纳光子器件在目前三个前沿领域的应用。第 8 章介绍微纳光子计算成像技术,具体包括计算光学成像简介、编码计算成像、散射介质计算成像、超表面计算成像。

第 9 章介绍一种超快计算技术——微纳光子神经网络技术,该技术有望突破目前基于电子计算机等电子架构的速度和功耗瓶颈,实现几个数量级的提升。本章具体内容包括光子神经网络技术简介、人工神经网络的光子实现、光子神经网络、光子神经网络展望。

第 10 章介绍一种智能计算技术——微纳光子生物计算技术,该技术旨在构建一种高能效、强智能、自进化的计算模式,可推动电子信息技术发展从基本的“制造”模式走向“智造”和“自造”模式,具有十分可观的前景。本章具体内容包括生物计算简介、光子技术助力生物计算、微纳光子技术用于生物计算、生物计算展望。

本章参考文献

- [1] Bunde A, Funke K, Ingram M D. Ionic glasses: history and challenges[J]. Solid State Ion, 1998, 105(1): 1-13.
- [2] 施敏, 梅凯瑞. 半导体制造工艺基础[M]. 陈军宁, 柯导明, 孟坚, 译. 合肥: 安徽大学出版社, 2007.
- [3] Intel[EB/OL]. www.intel.com.
- [4] Brown B R, Lohmann A W. Complex spatial filtering with binary masks[J]. Applied Optics, 1966, 5(6): 967-969.
- [5] Veldkamp W B, Mchugh T J. Binary optics[J]. Scientific American, 1992, 266(5): 92-97.