

· 研究进展 ·

人工微纳结构中光学新效应的研究进展

李 涛 祝世宁*

(南京大学固体微结构物理国家重点实验室, 南京 210093)

[摘 要] 本文基于“人工微纳结构中光学新效应”国家自然科学基金创新研究群体的研究成果, 介绍了人工微纳结构在光子芯片集成、微纳光场调控、量子受限特性相干过程、新型能源光子材料与器件等方面取得的最新研究进展, 并对基于人工微结构的光学超晶格研制的新型全固体激光器作了简要介绍, 展示了人工微纳结构丰富的科学内涵和重要的应用前景。

[关键词] 人工微纳结构; 光学新效应; 经典与量子; 光子集成

当前社会正处在信息爆炸的时代, 人们对信息容量、信息处理和传输速度的要求日益增长, 大规模集成电路、无线通信及光互联技术已成为目前信息技术的基础。随着电子元件的进一步减小和芯片集成度的进一步提高, 信息处理过程中量子效应开始出现, 以经典电子电路为基础的信息技术面临着原理层面的挑战。基于此, 人们开始积极探索新的原理, 发展面向后摩尔时代的新型信息技术。以光子作为信息处理的载体, 在响应速度、运行功耗、容量带宽等方面具有天然的优势, 这为开发新的信息技术提供了新途径。但由于光波长较长, 光子器件在集成度上远不如电子器件。然而, 21 世纪以来, 微纳光子学蓬勃兴起, 人们通过先进的加工手段能够制备出调控光子的人工微纳结构, 使得发展微纳尺度下的光子集成技术成为可能。同时, 微纳尺度下光增强效应还催生了如光伏、光热等新型光子能源技术。微纳尺度下光与物质相互作用表现出与宏观尺度下不同的特点, 其中蕴含着丰富的光学新效应, 值得去探索和研究。“人工微纳结构中光学新效应”创新研究群体针对上述背景, 从经典和量子两个层面对不同材料体系的不同微纳尺度下的光/光子的行为、与物质相互作用规律, 以及功能特性的调控开展了深入而系统的研究。经过 6 年的探索, 取得如下主要成果: (1) 发展了基于微纳结构的光子芯片及集成技术与器件; (2) 实现了微纳光场的多维调

控及光学模拟; (3) 揭示了量子受限体系中的相干光学过程; (4) 开发了基于微纳结构的能源光子学材料与器件; (5) 研制基于光学超晶格全固体激光器并进行应用开发。

1 基于微纳结构的光子芯片及集成技术与器件

量子信息技术是突破当前“电子瓶颈”的有效途径之一。基于量子纠缠和叠加原理的量子信息技术可以大大提升计算、编码、信息处理和传输的性能。我们关注了基于铌酸锂光学超晶格的光量子集成技术和器件, 同时也研究了基于金属纳米结构的超小型量子逻辑器件。此外, 在经典光子集成中具有单向传播的光学隔离器扮演着重要角色, 我们通过几种方案构建了片上光子隔离器。

1.1 基于光学超晶格的铌酸锂的有源光量子芯片

铌酸锂具有较大的二阶非线性系数和可调控铁电畴。Gisin 小组在 2001 年首先将光学超晶格引入量子光学领域, 他们使用周期极化铌酸锂 (PPLN) 波导实现了高亮度通信波段纠缠双光子的产生以及纠缠转移^[1,2]。随后, 人们利用 PPKTP 和 PPLN 晶体实现了高亮度的偏振纠缠态^[3]、time-bin 纠缠态^[4]、频率关联和反关联的纠缠态^[5,6]、超宽带及窄带纠缠光子源^[7,8], 时间能量纠缠光子源^[9,10]等。南京大学研究团队在光学超晶格中纠缠态制备方面做

收稿日期: 2017-05-11; 修回日期: 2017-07-02

* 通信作者, Email: zhusn@nju.edu.cn

出了系统性工作^[11-24],尤其是利用光学超晶格中多重准相位匹配过程实现纠缠光子的主动分束^[11]、自聚焦^[20]、亚波长干涉^[24]等,揭示光学超晶格本身具有一定的集成功能。在此基础上,我们在2014年研制出国际上首块基于光学超晶格的铌酸锂的有源光量子芯片,该芯片能够将纠缠光子源、电光调制器、光子干涉仪等功能单元进行有效集成,实现纠缠光子产生和调控的一体化设计,完成纠缠光子对聚束态和分离态的快速切换^[25]。图1是芯片的内部结构示意图和外观照片。在芯片上,先对抽运激光进行分束和相位调制,再在畴反转超晶格区中将抽运光转化为简并的纠缠光子对,得到一个路径聚束态,然后利用波导耦合器实现反向 Hong-Ou-Mandel (HOM)干涉。片上的相位控制可以将干涉的结果调控为分离态、聚束态或者二者的叠加。该铌酸锂芯片可在室温下稳定工作,工作电压仅为0—3.55 V,调控速率可达40 GHz,当入射功率为40 μ W时探测得到的有效光子对约为400对/s,光学超晶格区光子对产率为 1.1×10^7 Hz \cdot nm⁻¹ \cdot mW⁻¹,是一个明亮的、可调控的芯片化量子光源^[25]。值得说明的是,在2014年国际上有研究组实现了基于硅波导的三阶非线性量子光源和量子干涉光路的结合,同样也制备了可调控量子态^[26],然而它在量子产率、激发功率、调控速率、调谐带宽等参数上较之我们的芯片有量级上的差距。本工作演示了铌酸锂芯片上基本量子态的构建和调控,为该系列研究打下很好的工艺基础,揭示了铌酸锂光子芯片在量子计算、量子通信方面具有很高的研究价值和广泛的应用前景。

1.2 微米尺度等离子激元量子逻辑门

在信息处理方面,基于量子力学的信息处理技术使用量子位叠加原理突破了经典信息处理仅用0和1的编码方式,在根本原理上较之于经典计算有着无与伦比的优势。光子作为一个很好的量子信息处理的载体具有很好的相干性和单比特操作特性。

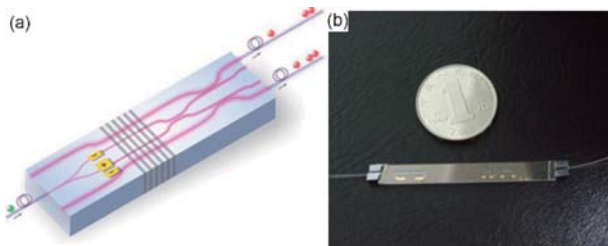


图1 铌酸锂路径纠缠光子芯片的(a)内部结构示意图和(b)外观照片^[25]

近年来,量子信息处理系统已经广泛应用于量子通信、量子测量和量子计算等领域。然而,为了应对大规模信息处理和计算的要求,如何将光子处理系统的尺寸进一步压缩已经成为近期研究者们关注的重点。量子控制-非(CNOT)门是量子信息处理的一个非常基本的控制单元,是构建量子回路的基础^[27]。人们常用的已实现的CNOT门是基于路径纠缠的量子比特,通过多个分束器来完成^[28,29]。它首先由O'Brien等人在空间光路中实现^[30],随后也在集成的波导中实现了^[31]。然而,人们也提出了利用偏振进行量子比特编码,这样在构建量子逻辑门时可以减少分束器的数目,比如利用三个偏振敏感的分束器就可以实现CNOT门^[32]。2011年,Crespi等人就通过飞秒激光直写波导构建了精确的偏振依赖的定向耦合器,实现了更为简洁集成的量子CNOT门^[33]。不过这种定向耦合构建的分束器必须依赖一定长度的耦合距离,从而该CNOT门的尺寸仍然需要毫米量级大小。如何进一步缩减器件的尺寸仍然是一个挑战。我们巧妙地利用介质加载金属表面等离子激元波导成功实现了TE和TM两种偏振模式的操控,仅仅使用一个偏振依赖分束器(图2)就实现了偏振编码的二个量子比特的CNOT门^[34]。它可以在微米尺度范围内对TM模式进行1/3和2/3能量比的透反分束,而对TE模式达到无反射且透射率可控制在1/3,以达到CNOT门的设计要求。实验成功的器件尺寸只有14 μ m \times 14 μ m(比之前他人的结果减小了4个量级),是目前世界上最小的光子量子逻辑门。实验给出的该控制非门的逻辑功能真值表显示该逻辑门具有高的保真度

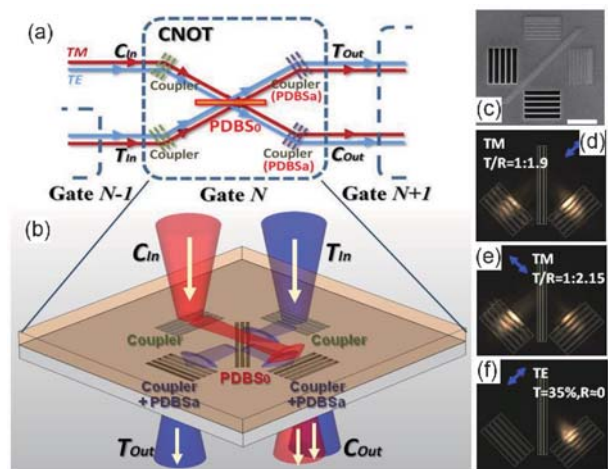


图2 偏振编码的控制非门的(a, b)设计图以及(c)样品结构和(d-f)光学表征结果^[34]

($63.7\% \leq F_{\text{process}} \leq 80.3\%$) 和很好的纠缠产生能力^[34]。这种基于表面等离激元构建的光量子逻辑门体积小,因而可大幅度提高光量子芯片集成度,减少芯片的尺寸。该量子逻辑门的研制成功促使光量子计算目标的实现又前进了一步。

1.3 基于耦合光学微腔的宇称-时间对称与光学隔离

近年来,宇称-时间对称量子力学在基础理论研究上取得了很大的进展,然而,在真实的物理系统中观察这一有趣的物理现象仍然具有很大的挑战性^[35]。直到 2007 年,美国中佛罗里达大学(UCF)的 Christodoulides 教授指出宇称-时间对称现象可以在具有平衡增益和损耗的耦合光学系统中实现^[36]。到目前为止,宇称-时间对称系统已经在理论上预言了很多新奇的光学现象,但实验进展则相对较慢,且主要以耦合光波导为主^[37-39]。我们利用直接耦合的两个光学微腔,通过平衡其中一个光学微腔中的增益与另一个微腔中的损耗,在芯片上实现了宇称-时间对称,并观测到了宇称-时间对称到对称破缺的演化过程,从实验上确定了宇称-时间对称到其破缺的临界点^[40](图 3)。伴随着光子集成技术的发展,需要将传统的光学器件全部集成在光学芯片上。光学隔离器则是其中的一种重要元件。利用该耦合微腔系统我们还实现了一种基于增益饱和和非线性效应的片上非互易光学传输。在实验上实现的对纳瓦量级光功率的超灵敏隔离是当时在芯片上实现的最低功率的非互易光学传输(图 4)。另外,我们还进一步指出宇称-时间对称与光的非互易传

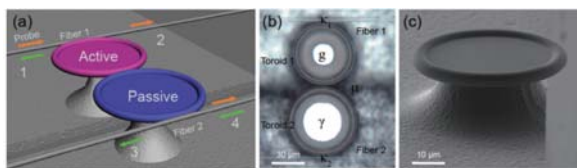


图 3 有源-无源光学微腔耦合系统:(a) 耦合微腔的示意图, (b) 耦合微腔样品图, (c) 单个微腔样品图^[40]

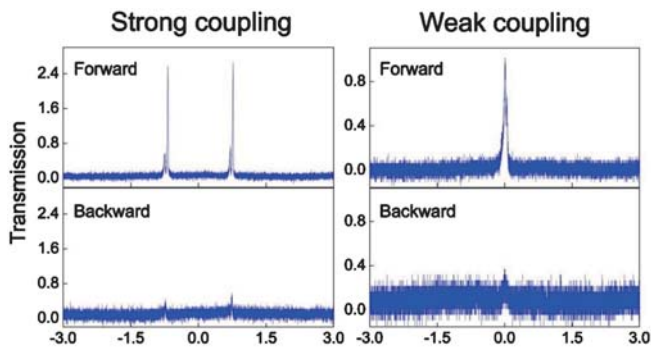


图 4 超灵敏的光学隔离特性^[40]

输无直接关系,从而解决了这一争议问题^[40]。

1.4 基于光学微腔中非线性参量放大过程的片上光学隔离器

目前,能很好打破光传输互易特性的方法是利用特定材料的法拉第磁光效应,实现光的二极管功能,用于隔离光的反向传输。但集成的光子芯片,却难以利用这种传统的磁光效应来隔离光(尺寸和损耗较大,外在磁场很难小型化和局部化等)^[41-43]。因而发展新型的(非磁)光学隔离器对于全光集成处理系统变得至关重要。近年来,科学家尝试采用各种物理机制去实现芯片集成的非互易光学传输,其中一种方法是利用光学非线性。然而,由于光的动力学互易性(2015 年由美国斯坦福大学 Shanhui Fan 教授等人提出),绝大部分基于非线性过程的非互易光学传输不能用于实际的光学隔离(即当一定强度的光从正反方向同时输入时,光的传输变成了互易)^[44]。这一非线性过程的光动力学互易原理从理论上限制了一般非线性系统在光学隔离中的应用。我们利用芯片集成的高品质因子光学微腔,从实验上验证了一种基于单个光学微腔中非线性参量放大过程的光学隔离器,首次在实验上实现了在不同强度正反方向光同时输入时的光学隔离^[45]。这一器件的工作原理是基于信号光在微腔中正向传播与反向传播时所满足的不同动量匹配条件,使得只有一个方向(正向)的光能满足参量放大条件,从而导致光的非互易传输。该隔离器的原理和隔离性能如图 5 所示,可以在维持低插入损耗的条件下(约 4 dB),获得较高的光学隔离度(大于 15 dB)。这种基于片上非磁光学隔离器的演示,为光学二极管在集成芯片中的应用打开了一扇新的大门。

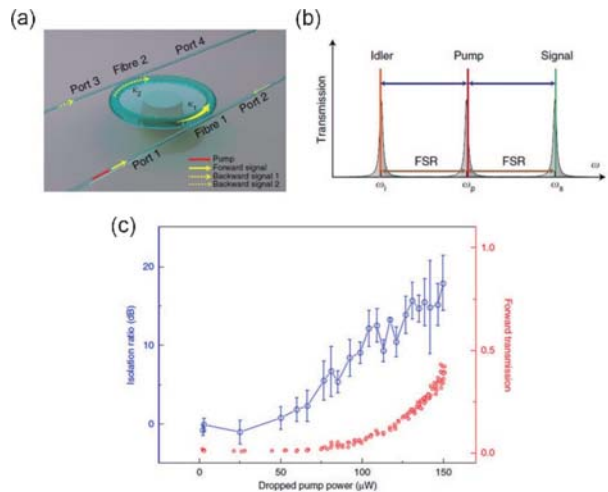


图 5 (a) 实验原理图, (b) 泵浦光、信号光和闲频光的谱线特性, (c) 光学隔离特性^[45]

2 微纳光场的多维调控及引力场光学模拟

表面等离子激元(SPP)是存在于金属与介质界面的表面电磁模式,具有局域场增强和亚波长传播特性,被人们看作在微纳尺度下进行光子操纵和集成的优良载体。随着人们对这种二维特性的电磁场认识的不断深入以及对微纳光子器件应用需求的增加,如何在近场范围内精确地调控 SPP 传播及特定场强分布成为人们关注的热点。同时,通过 SPP 来操纵空间光束,实现光束整形、偏振调控、全息成像等功能,也取得了一系列进展。另一方面,人们基于超构材料和变化光学的设计思想来控制光的传播并获得了长足的进步,而光场在不同折射率材料中的演化方程与引力场方程有相似之处,这给人们提供了一个利用芯片上光场演化来模拟引力场中光传播的性质的平台。

2.1 表面等离子激元传播及辐射调控

早期对 SPP 场的操纵主要集中在聚焦上,人们通过构建各类耦合或散射结构实现亚波长分辨的 SPP 聚焦^[46-48]。不过更为吸引大家兴趣的是,2007年中佛罗里达大学 Christodoulides 研究组在自由空间实现了具有无衍射、无发散、自弯曲、自加速的艾里光束^[49]。此后,他们也理论预言了 SPP 艾里波束的存在^[50]。2011年,美国加州大学伯克利分校的张翔研究组和澳大利亚国立大学 Kivshar 研究组分别通过光栅耦合空间艾里光束^[51]以及设计特殊光栅并在耦合过程进行相位调制^[52]实现了 SPP 艾里波束。不过这些结果跟之前很多 SPP 聚焦的研究类似,SPP 的波形及场分布调控都依赖耦合结构,这使得这些调控功能的独立性和集成度受到一定程度的限制。我们于 2011 年发展出了一套基于非严格布拉格衍射的波前调控方法,并用于 SPP 的波束调控上。我们设计出 3/2 次型相位调制,实现了无衍射自弯曲的 SPP 艾里波束^[53],见图 6(a)。该方法还被成功用于设计二次型相位分布,实现 SPP 的宽带聚焦和波分复用功能^[54],并拓展到介质加载波导中以实现多模聚焦与解复用^[55]。同时,我们还通过对称相位设计进行波束强度调控,实现一定区域内“无损耗”的 SPP 准直波束^[56]。近期,我们还将此方法与全息技术结合,通过面内衍射实现了振荡弯曲的 SPP 波束^[57]。这些工作都是基于 SPP 的传播衍射的面内调控,它不依赖于空间光场到 SPP 的耦合结构,因而具有很好的独立性和可扩展性,为操纵 SPP 场提供了强有力的手段。

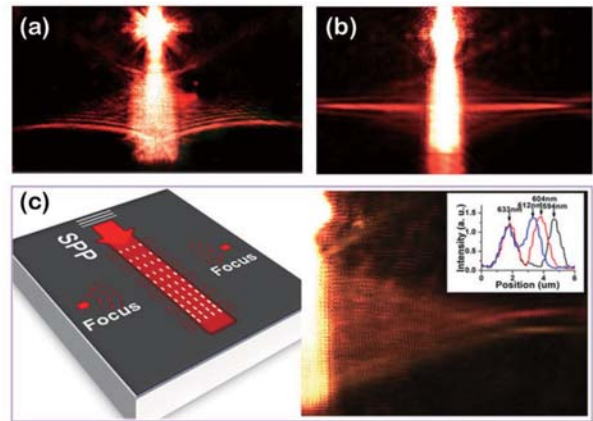


图 6 SPP 面内衍射实现的 (a) Airy 波束^[53], (b) 准直“无损耗”波束^[56], (c) SPP 宽带聚焦与波分复用^[54]

近年来,基于人工微纳结构调控的光子自旋-轨道耦合导致的众多新颖光学效应(如光子自旋霍尔效应、拓扑光子学、超表面成像等)引起人们的特别关注^[58-60]。利用相关的微纳光子调控原理有望实现基于多维光场调控的新效应和新功能。我们与伯明翰大学合作实现了一种等离子激元自旋霍尔效应的相干调控,用一种以金属纳米孔为结构单元的超构表面,通过连续改变纳米孔的旋转角度分布,调节纳米孔对不同自旋光子态之间的共振散射的 Berry 相位,实现了金属表面等离子激元的传播场的相干调控^[61]。

除了对 SPP 波面内传播进行调控外,我们还将之前发展的等离子激元波面内衍射调控相位的方法应用于空间散射光束的调控。我们根据 SPP 与空间光束之间的波矢转换与相位要求,设计出了满足空间艾里光束的散射光栅,实现空间无衍射自弯曲的艾里光束与聚焦等^[62]。此后,我们又设计利用两束互相正交传播的 SPP 波的纵向分量的干涉效应,合成出不同类型面内矢量偏振态,然后在平面内合适的位置加工散射单元,将需要的偏振态和相位取出,实现具有多种偏振的多光束出射^[63]。实验结果成功演示了具有 8 种偏振态的多聚焦光束(图 7),这为光子信息处理技术开拓了新的途径。我们还将微纳结构调控光场偏振的方法成功应用于太赫兹波段,设计和制备出三层金属结构,将宽带太赫兹波的偏振高效(90%以上透射率)旋转到任意方向,这在信息处理、材料分析、太赫兹成像等方面可有重要的应用^[64]。在精密测量方面,利用等离子激元纳米结构的近场耦合现象,我们还实现了超高精度(3 pm)的距离测量,把非相干光测距的精度提高了两个数量级^[65]。

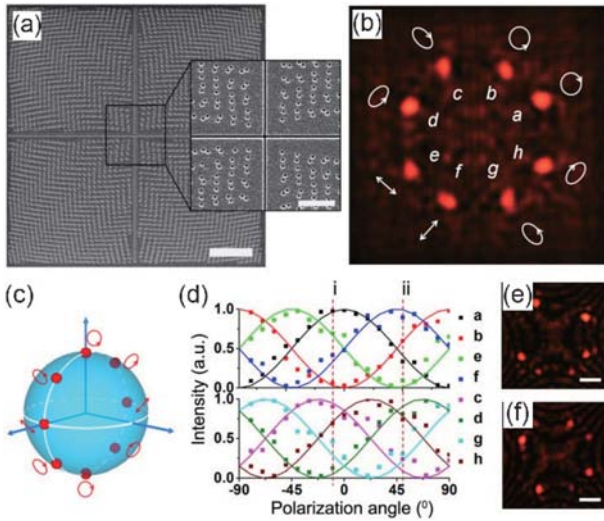


图 7 表面等离子体相位与偏振的同时调控以实现空间多偏振聚焦：(a) 构建偏振聚焦的纳米孔阵样品图(中间的十字狭缝用于耦合 SPP 波)，(b) 距样品面 $40\ \mu\text{m}$ 处实验测量得到具有不同偏振态的八个聚焦点，(c—f) 根据庞加莱球偏振定义进行的实验检测和验证^[63]

2.2 变换光学的相对论模拟

爱因斯坦的广义相对论对于人类认识宇宙起源和天体的运动起了巨大的作用。根据理论，光在引力场中可以沿着曲线传播，如果我们能够控制时空的弯曲结构，就能够控制光子的传播。但是控制宇宙时空的弯曲远远超出了目前人类科学技术的发展水平。理论学家发现光在不均匀材料中的传播与光在弯曲时空中的传播之间有很好的等效性。因此，人们想到可以用不均匀材料来模拟引力场的弯曲时空。近年来，人们提出了变换光学方法，利用材料电磁参数与时空度规的等价性，在超构材料中控制折射率的不均匀分布来模拟弯曲时空，从而在实验室的环境下模拟有关广义相对论的现象^[66-72]，尤其是在微小的光学芯片上“以小见大”。群体成员成功利用聚合物介质波导模拟中心势引力场的强引力透镜效应，在光学芯片上构造出人工黑洞(图 8)。实验上观察到类似于黑洞的引力势场所导致的“视界”。当光子的传播路径在临界半径区域之外时，光子不会被捕获；当光子的传播路径在临界半径周围的区域时，光子被捕获并在临界半径的周围上做不稳定的轨道运动^[73]。

与黑洞类似，爱因斯坦环是广义相对论所预言的另一种时空弯曲现象，它的形成原因是点光源发出的发散光由于引力透镜效应重新聚焦，远方观测者在合适的观测位置上能在产生引力透镜效应的大

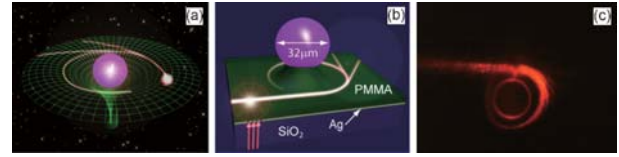


图 8 引力黑洞的光学模拟：(a) 天体黑洞示意图，(b) 模拟黑洞的样品示意图，(c) 光学实验结果图^[73]

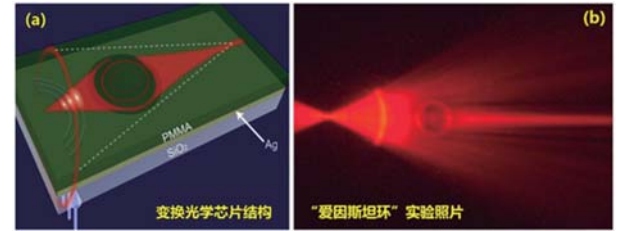


图 9 爱因斯坦环的光学模拟 (a) 设计示意图，(b) 实验结果图^[74]

质量天体周围观察到一系列点光源的像。在 PMMA/金属波导体系中，我们同样模拟了点光源发出的散射光经过液滴“天体”形成球面波前，最终实现聚焦的过程。实验显示“天体”越大，光束收敛的越厉害，但是最终收敛光束的宽度也较宽。这些都说明较大的“天体”，点源发射出来的发散光束由于引力透镜效应重新聚焦后有较大的光束宽度。深入的研究证实了实验结果与爱因斯坦给出的引力透镜效应所成虚像光环的角尺寸公式 $\beta = \sqrt{\alpha_0 R_0 / z}$ 一致，证明了本光学体系对广义相对论的模拟是适用的(图 9)^[74]。

3 受限量子体系中的相干光学过程

超快激光技术为人们研究光与物质相互作用提供了强大的工具。我们关注了胶体量子点、钙钛矿量子点、分子系统等受限量子体系中多激子的产生及相干光学过程，揭示了在高时间分辨尺度下光子-激子能量转移的动力学行为，为开发新的光电子材料与器件提供了指导。

3.1 单个胶体量子点的载流子倍增效应

半导体量子点在吸收一个能量大于其两倍带隙的光子时，有可能产生两个以上的电子-空穴对(单激子+高阶激子)。作为一个独特的光电效应，这个载流子倍增效应(CM)不仅引起了学术界在基础研究方面的广泛兴趣，而且极大地提高了光探测和太阳能电池等器件的光电转换效率^[75]。由于量子受限效应导致的增强载流子间相互作用，量子点中的高阶激子会在纳米时间尺度内通过非荧光发射 Auger 过程被消耗掉，因此对 CM 过程所产生的高阶激

子只能通过超快光学手段来进行测量。另一方面, 在 高能光子激发下, 量子点中的光生载流子容易被缺陷态捕获而产生带电现象, 而带电激子和 CM 产生的高阶激子在目前普遍采用的系综瞬态吸收和荧光测量中会产生类似的 Auger 衰减信号, 这个带电激子伪信号使得学术界在 CM 效应的存在以及其产生高阶激子的效率评估方面存在极大的争议^[76,77]。

我们分别采用波长为 400 nm 和 266 nm 的脉冲激光对荧光峰值为 655 nm 的同一个单 CdSe 量子点进行激发。其中, 400 nm 光子能量为量子点带隙的 1.64 倍, 可作为参考; 而 266 nm 光子能量为量子点带隙的 2.46 倍, 可触发 CM 效应。实验过程中, 首先得到两个波长激发下相同样品区域内多个单量子点的空间荧光图像(图 10a), 然后, 隔离一个单量子点并对其荧光强度随时间变化进行测量(图 10b), 其中的“明”和“暗”强度分别来自于中性和单电激子的贡献。最后, 通过时间分辨、时间标签技术只选择对“明”强度光子进行荧光衰减曲线分析, 可以完全屏蔽掉来自“暗”强度的带电激子所发射的光子, 在 400 nm 激发下得到了来自于单激子荧光复合的单指数衰减曲线, 而在 266 nm 激发下额外观察到一个纳秒尺度的超快衰减信号(图 10c)。由于 400 nm 和 266 nm 的激光功率使每个脉冲在单量子点中最多产生 0.1 个激子, 从而消除了单个量子点同时吸收两个光子的可能性, 因此可以明确 266 nm 激发下所得到的超快衰减信号来自于 CM 过程产生的高阶激子。通过对大量单量子点在 266 nm 进行激发, 对所获得的超快荧光衰减成分进行幅度和寿命分析, 得到了光子能量在 2.46 倍量子点带隙时通过 CM 过程产生双激子的效率为 20.2%^[78]。

3.2 分子系统中的多激子产生

我们研究了多激子产生的另一种形式, 借助于自旋多样性, 特定有机半导体中的单线态分裂过程可将一个光子激发产生的自旋单线态激子转变成一对自旋三线态激子, 最高可实现 200% 的光电转换量子效率^[79,80]。当前, 在自旋相互作用引起的三线

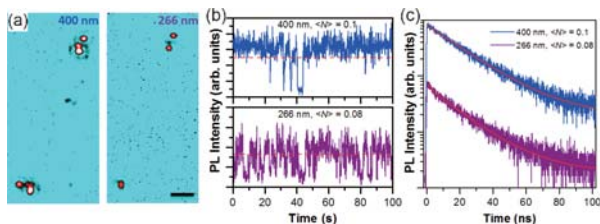


图 10 400 nm 和 266 nm 激发下单纳米晶的 (a) 荧光图像, (b) 荧光强度随时间变化, 和 (c) 荧光衰减寿命^[78]

态激子对之间的量子关联和单线态分裂的传统模型上遇到一些困境; 理论上, 在相邻分子间单线态分裂产生的三线态激子对之间应存在较强的磁相互作用, 但实验上, 这却从未被观测到; 双分子模型预测的并四苯二聚体中的有效单线态分裂, 也未能被检测到。我们为了解决这一难题, 创新性的结合变磁场和超快量子拍频光谱方法, 通过塞曼效应, 利用外磁场调控三线态能级, 巧妙利用量子光学理论中共振条件下耦合作用引起的能级分裂效应, 将探测精度提高了两个数量级。实验结果证明并四苯晶体中单线态分裂产生的关联三激子态较远。在此实验基础上, 提出了晶体中单线态分裂过程的新理论模型, 指出多分子系统中非局域性的单线态激子与三线态激子对之间的相干耦合起到决定性作用(图 11)^[81]。在此基础上, 我们还成功实现了单线态分裂全光开关, 赋予有机单线态分裂材料新的应用可能^[82], 得到业界的广泛关注^[83]。

3.3 钙钛矿量子点中双激子态光学增益

微纳激光器在生物光子学中有美好的应用前景, 利用近红外双光子吸收来激发实现频率上转换的微纳激光器, 可深入生物组织内部, 实现载体应用^[84]。群体成员研究了钙钛矿量子点中的双激子态, 发现 CsPbBr₃ 量子点材料在双激子态中能形成光学增益, 而且由于极强的光和物质相互作用^[85], 可利用单光子和双光子吸收来激发产生。我们发现新型钙钛矿结构的半导体 CsPbBr₃ 量子点的双光子吸收截面极大, 比传统 CdSe 量子点高出两个量级, 且这一材料的发光性能很好, 容易产生光学增益。在此基础上, 将双光子激发的光学增益耦合到回音壁模式微腔中, 我们成功实现了双光子激发的

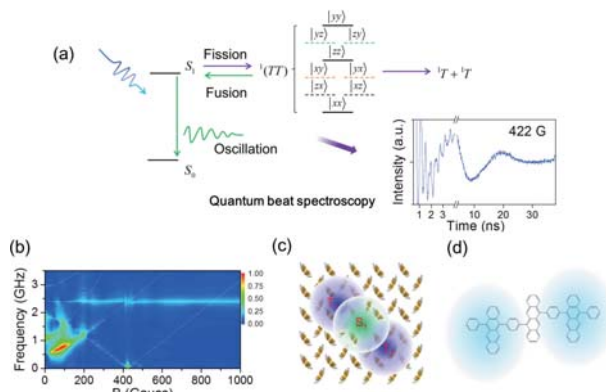


图 11 单线态分裂双激子态的非局域性: (a) 零场下并四苯晶体中与多激子能级相关的量子拍频场景示意图, (b) 量子拍的相对振幅(作为拍频)和场强的函数随外磁场变化分布图。 (c, d) 并四苯晶体分子的空间组态示意图^[81]

CsPbBr₃量子点(图12),并利用瞬态吸收光谱揭示其产生增益机理,激发阈值降低超过一个量级^[86],这一新的量子点优异的光电性能有助于极大地提升其在光电器件中的表现^[87]。

4 基于微纳结构的能源光子学材料与器件

太阳能转换(包括光热转换、光电转换)是新能源领域的重要科学前沿,研究基于微纳光子结构的太阳能转换的有效调控,探索其中的能量转换新机制,发展面向太阳能转换的大面积、低成本的新型能源光子学材料和高效率的能量转换器件,对于太阳能高效利用具有重要的意义。

4.1 基于微纳结构的太阳能光热转换材料与器件

太阳能光热转换是目前太阳能利用(特别是发展中国家)的主要形式之一,如太阳能生活热水系统、太阳能海水淡化等。然而由于传统材料对于宽太阳光谱的光子捕获效率低、体积光热加热过程损耗大,传统太阳能光热利用的能量转换效率一直停留在较低的水平(30%—50%),人们对太阳能光热转换的研究和利用也远远不够。近年来,美国莱斯大学 N. J. Halas 教授组将等离子体金属纳米颗粒引入光热转换的流体之中,由于分散在流体中的纳米颗粒吸收带宽窄,且本质上与传统的体积加热效应无异,1000个太阳辐射下的系统光热转换效率仅为24%^[88]。美国麻省理工学院的 G. Chen 教授组提出双层碳结构加热薄层(厚度约为1cm)液体太阳能光-热(蒸汽)转换的概念,使体积加热热损耗显著降低,实现了10个太阳下85%的光热转换效率^[89]。围绕薄层甚至界面型光热转换,国内外研究者在材料设计、表面改性和器件制备方面取得了许多重要进展^[90-93],然而在对基本物理过程的研究方面却相对缺乏。群体成员从太阳能光-热(蒸汽)转换的光物理能量转换过程出发,认为优异的光热转

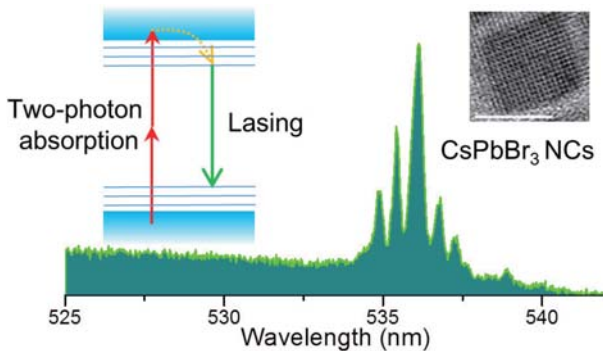


图12 双光子激发的钙钛矿量子点激光器^[86]

换微纳光子学材料对光谱特性至少有两个方面要求:宽带(宽太阳光谱)高效率的光热吸收和低的红外热辐射损耗。基于光热转换光吸收的可控裁剪,我们提出基于三维密排金属纳米颗粒结构的太阳能光热转换材料,实现了世界上最宽带、高效的等离子体吸收体材料^[94],并首次研制出基于等离子体增强效应的低成本、高效率太阳能海水淡化器件^[95]。

(1) 超宽带、超高吸收效率的等离子体光吸收体材料。具有大的吸收截面的紧密排列的三维金属纳米颗粒结构具有强的局域等离子体共振效应,是实现高效光吸收体的理想备选结构。基于对贵金属纳米结构光吸收机制的深入解析,我们提出理想的金属基纳米光吸收体的三要素:有效防反射、高密度光学模式、有效模式耦合,并以此设计了理想等离子体吸收体的结构,如图13a。

实验上,我们选择基于多孔结构作为衬底的金属颗粒自组装制备技术,成功实现了紧密排列的金属纳米颗粒三维结构。研究表明,该结构可通过等离子体杂化效应获得极高的光子密度,理论上可将吸收从可见光有效地扩展到中红外波段;多孔衬底和颗粒间的多重散射可大大提高整体的吸收效率;多孔结构的低填充率保证了整个体系具有低的有效折射率,在可宽谱范围内降低反射,提高整体吸收效率。基于以上设计的金纳米颗粒光吸收体材料(图13c)表现出优异的光吸收性能:在200nm—10μm波段高达99%的吸收效率^[94]。样品的三维结构示意图和扫描电镜(SEM)照片如图14所示。这种等

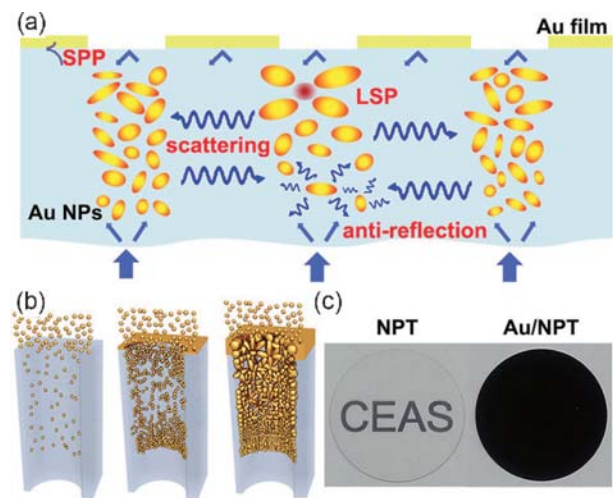


图13 (a)宽太阳光谱等离子体黑体设计原理示意图,(b)金属等离子体黑体的自组装机制示意图,(c)多孔衬底在金属颗粒自组装前后的光学照片对比图^[94]

离激元光吸收黑体无论吸收带宽还是吸收效率都超过目前已报道的金属基元的光吸收体材料(图 15),而有效金属厚度(约 90 nm)相比传统的碳基吸波材料降低了三个数量级。

(2) 低成本微纳光学结构光热转换器件的设计与实现。探索了基于三维金属铝纳米结构的等离激元增强效应机制,通过等离激元杂化效应,实现了基于金属铝的宽光谱吸收;并首次实现了基于等离激元增强效应的海水淡化器件,其光-热转换效率高于 90%。金属铝是低成本等离激元金属的首选,然而由于铝的等离激元光学响应主要在紫外波段,低成本的宽光谱吸收材料设计成为主要瓶颈。基于金属纳米颗粒的局域等离激元共振杂化效应、金属铝特有的氧化自限效应,以及背景介质环境散射机理的系统分析,我们设计了氧化铝多孔衬底支撑的三维铝纳米颗粒薄膜材料。基于以上三种效应的综合优化设计,成功设计出具有优异的宽光谱吸收性能(200—2 500 nm 太阳光谱范围平均吸收效率 >96%)的低成本金属铝纳米结构黑体材料。同时,由于整个吸收体为高孔隙率多孔结构,质量密度低、有效热导低,且具有优异的局域加热效应和毛细效应,该结构在理论上很好地满足了高效率光热转换对光学、热学和泵水的综合要求,成为高效率海水淡化材料的理想备选(图 16)。

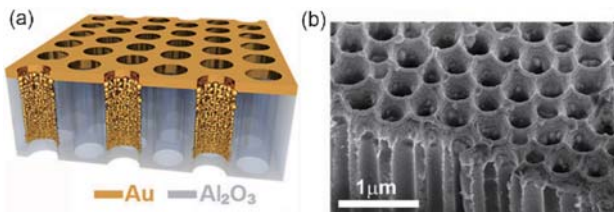


图 14 (a) 自组装的三维等离激元黑体示意图, (b) 样品的高分辨 SEM 三维图^[94]

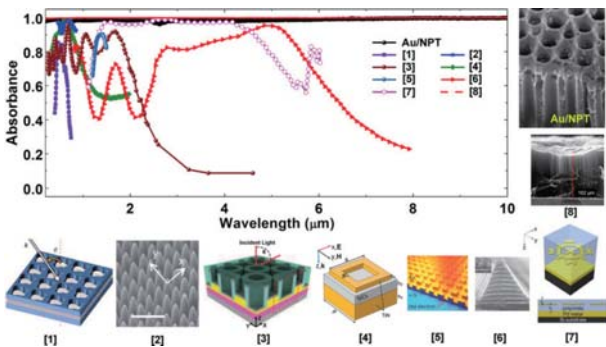


图 15 金纳米颗粒光吸收体与已有文献报导的光吸收体的吸收光谱对比图^[94]

实验上,我们选择金属铝为唯一原料,制备工艺则选用了已经商业化的阳极氧化和半导体物理沉积工艺,在多孔氧化铝模板上沉积铝金属颗粒自组装结构,实现了铝基的低成本等离激元吸波材料的制备。进一步将低成本的金属纳米结构黑体材料引入光蒸馏系统,巧妙地实现了宽谱高效率的光吸收、极低的热损耗和低成本材料与制备的统一。利用这种吸波材料在国际上首次实现了基于等离激元增强效应的太阳能海水淡化,能量转化效率高于 90%,淡水盐度平均有 4 个数量级的降低^[95],优于传统的反渗透膜和蒸馏型海水淡化(图 17)。

4.2 基于微纳结构的太阳能光电转换材料与器件

光伏电池将最丰富的太阳能转化为最方便使用的电能,是太阳能利用的重要形式之一。随着半导体单晶制备技术和外延薄膜制备技术的发展,20 世纪 70 年代以来,太阳能光伏电池的发展呈现出百花齐放的态势,从单晶硅太阳能电池,到多晶硅、非晶硅电池,到 GaAs、CuInGaSe、CdTe 薄膜太阳能电池,再到第三代的染料敏化电池、多激子电池、热电子电池和近年快速崛起的钙钛矿太阳能电池等等^[96,99]。从光电转换的物理过程出发,高效率的太阳能电池要求半导体材料具有宽带、高效率的光吸收和有效的光生载流子分离与收集。因此,在太阳能电池的发展历程中,如何实现超薄、低成本、高效率的太阳能电池一直是学术界和工业界长期追求的方向。近年来,基于微纳光学结构的太阳能光电转换引起了人们的广泛兴趣。斯坦福大学 Yi Cui 和

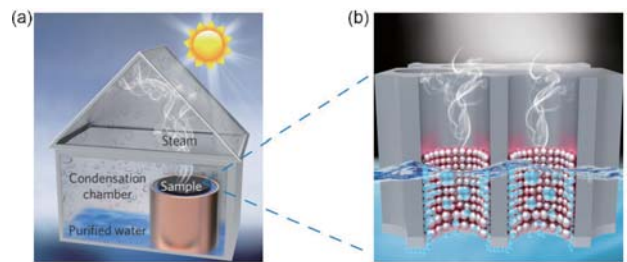


图 16 等离激元铝纳米结构增强太阳能海水淡化原理示意图^[95]

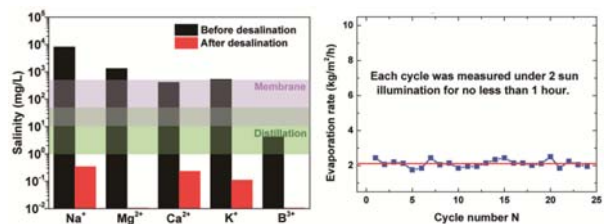


图 17 海水淡化性能表征(海水样本取自中国渤海海域,平均盐度为 2.75%)^[95]

Shanhui Fan 教授合作利用硅纳米光子结构的抗反射、光子捕获等效应,在数百纳米厚度的微纳结构硅电池体系中实现了较高的光电转换效率^[100,101]。加州理工学院的 Harry Atwater 教授提出的半导体-金属复合纳米结构的近场增强效应、散射效应和光学共振模式增强效应对增强太阳能光电转换具有重要的作用^[102,103]。群体成员从半导体微纳光学结构出发,在超薄、宽带吸收硅光电转换材料设计^[104]、低成本光电转换材料硅的实验制备^[105-107]和新型钙钛矿光电转换材料和探测器^[108]等方面开展了有特色的研究工作。

(1) 超薄硅太阳能光电转换材料设计。晶体硅为最重要的光电转换材料之一,但由于吸收效率低且需要百微米量级厚度的原材料才能实现有效的太阳光子捕获,极大地增加了太阳能光伏器件的材料成本,而厚度的增加也对载流子的分离和收集提出了极高的材料制备要求。群体成员从理论上将半导体-金属复合纳米结构的等离激元光子学设计思想和纳米锥结构宽带响应特点相结合,成功设计了金属-半导体复合纳米锥结构,揭示了纳米光学共振效应对实现硅太阳能电池宽谱的太阳光增强吸收具有重要的作用,吸收增强因子接近 Yablonovitch 极限^[104],为超薄硅太阳能光电转换提供了新的设计思路。

(2) 低成本纳米硅纯化技术的实现。单晶硅太阳能光电转换材料的高成本主要源于昂贵的原材料和高能耗的制备方法。群体成员创新性地提出一种低成本的纳米硅光电材料的纯化技术,并发展了纳米硅纯化技术,将低成本硅纯度从 82% 进一步提高到 99.999%;同时立足粗硅等原料,通过球磨、硝酸银刻蚀等方法得到尺寸可控和珊瑚状的纳米结构硅颗粒,并应用到锂电池负极中,获得了很好的循环及倍率性能。这些设计及工艺方法为大规模生产高纯度纳米硅提供了新思路^[105-107]。

(3) 低成本柔性光电探测器件的实现。在新型光电材料制备方面,我们实现了钙钛矿薄膜到纳米线的低成本可控转换^[108]。探索出一种获得钙钛矿纳米线的简易方法:利用不良溶剂和良溶剂的混合溶液(如异丙醇和二甲基甲酰胺),再加上简单的旋涂操作,可以将易于制备的钙钛矿薄膜转变为钙钛矿纳米线。同时,通过调节不良溶剂与良溶剂的比例和旋涂时的转速,还可对纳米线直径大小以及尺寸分布进行良好的控制。形成的纳米线相较薄膜具有良好的吸光特性,将其运用在光探测器上可提升

光电转化效率。同时,因为纳米线卓越的机械性能,制成的光探测器可以经过多次折叠而继续保持优越的光电转化效率。

5 基于光学超晶格全固体激光器的研制及应用

除了以上在微结构光学效应研究上的创新与突破外,在 2006 年度国家自然科学基金一等奖“介电体超晶格的设计、制备、性能与应用”原创成果基础上,我们对光学超晶格样品的制备工艺进行工程化改进,提高样品结构均匀性、通光口径、抗光损伤等关键指标,并以此为核心材料开展了高功率可调谐激光器的应用开发。研制出多台基于介电体超晶格的高功率可调谐激光器,波长调谐范围从 600—5 000 nm,平均输出功率达到 1—30 W,工作方式为连续、纳秒和皮秒,平均无故障工作时间(MTBF)达到 1 000 h 以上,与多家应用单位合作,在多个领域开展了应用研究,并取得良好结果,填补我国在这一类型激光器领域的技术空白。其中,红光波长可调谐激光器可输出 600—1 600 nm 波长激光,波长可以 1 nm 精度进行精密调节,输出功率达到瓦级,满足光动力肿瘤治疗疗法的应用需求,可实现对多种光敏剂的精准激发,有助于研发自主知识产权的新型光敏剂药物,引起了南京鼓楼医院、南京市雨花肿瘤防治研究所和众多医疗器械厂家的关注,有望研发成功国产化的新型光动力肿瘤治疗仪器;皮秒中红外激光器在 3 μm 输出功率达到 3 W,脉冲长度 30 ps,可用于进行超快反应动力学、高速光谱测量等领域研究;纳秒中红外激光器服务于中国科学院上海技术物理研究所、北京空间机电研究所、洛阳光电设备研究所、中国科学院光电技术研究所等多家单位,输出波长覆盖 1 500—5 000 nm,最高输出功率达到 30 W,输出功率稳定可靠,可用于地面中波红外电荷耦合元件(CCD)器件的标定和研发,促进了航空航天领域中红外技术的提升和新型器件的研发;连续波中红外激光器输出线宽达到兆赫量级,可对中红外光谱进行精密分析,在此基础上研制成功中红外波段的远程气体探测装置,与中国科学院安徽光学精密机械研究所(简称安徽光机所)、南京先进激光技术研究院等单位合作开展了 500—1 000 m 甲烷、二氧化硫等多种污染、易燃、有毒有害气体探测实验,探测精度达到 ppm 量级,为环保、安防、原子分子研究等领域提供了远程气体监控的技术方案(图 18)。



图 18 基于介电体超晶格的红外可调谐激光器,功率:
30 W@2 μm ,可调谐范围:1.5—5 μm ,脉冲长度:
50 ns,光束质量: $M^2 < 2$

6 总结与展望

人工微纳结构光学新效应研究涵盖了量子光学、微纳光学、信息光学与能源光学等诸多方面,涉及的材料体系也包括了介电体、半导体、金属等微纳结构体系。其不断涌现的新颖物理现象和效应丰富了人们对光与物质相互作用的认知和理解,由此人们对光在不同时空尺度下的操控能力得到了极大的提高。群体人员着重从经典和量子两个层面,研究了光/光子在人工微纳结构中的耦合与传播特性,光子态产生与调控,光子与电子、激子的相互作用及其能量转换等基本规律和效应。同时,我们还针对光子所具有的信息和能源两大属性,开展了光子集成芯片、超晶格红外激光器、增强太阳能吸收及海水淡化等应用开发,并在某些器件原型和原理验证上取得了突破。在后续的研究中,我们将继续在集成光量子芯片,多物理场的光学模拟,以及微纳结构光场调控的新原理、新材料与新器件等方向开展前沿研究。我们将特别注重已有研究基础的新型光子器件和技术的开发,如:基于半导体量子点的高效光电探测器,基于钙钛矿晶体的新型宽频、窄线宽单光子源,基于纳米等离子共振的高效光热转换材料与器件,基于超构表面的平板透镜与高密度像元的大视场成像芯片,以及新型超晶格激光器等。

对于微纳光学的研究,在经过近十余年的迅猛发展后,研究的重点已经逐渐从光学新现象、新效应的探索向功能调控及器件应用过渡。当前,微纳光学的研究更加注重光子作为信息和能源的载体在高速率、高效率、高密度集成和低能耗的新型信息和能源技术中的应用。当然,对微纳尺度下光子与物质相互作用的基础物理效应的模拟,以及利用光学体系的类比性质对一些特定物理系统的模拟还有广阔的空间。其发展方向可作如下展望:

(1) 微纳光学体系中物理效应的光学模拟(包括经典和量子两个层面)。根据光子系统与其他物

理系统的对应关系,人们开始关注利用相对简便的光学系统来模拟复杂或难以企及的广域空间的物理效应。在凝聚态模拟方面,人们已用光学系统模拟了电子布洛赫振荡、狄拉克费米子及超导库伯对和超流等效应,目前人们还在关注对应于光的马约纳拉准粒子和外尔态。而利用折射率与引力对光的类比效性,可以研究弯曲时空中光量子态的演化行为,为大尺寸空间的光的量子效应和量子信息技术提供模拟和指导。此外,光子拓扑态和宇称-时间对称等物理学前沿问题也有待进一步探索和开展应用研究。

(2) 基于超构材料设计的功能应用研究。超构材料概念的诞生因其新颖灵活的设计思想掀起了近十余年的研究热潮。在揭示、演示了众多新颖效应之后,该领域研究经历了从微波到光波、从体块到表面、从金属到全介质的过程,人们为解决其工作波段、损耗、带宽等问题进行着不懈的努力。目前来说,人们正进一步将光学原理设计与器件物理结合,围绕超构材料、超构表面的特殊优点开展新型超分辨成像、大视角全息、平板透镜、多维信息复用等应用研究。

(3) 微纳光子集成和高灵敏探测研究。多种材料的混合集成将成为今后微纳光学发展的趋势。如何将金属等离激元和硅基波导对光的高局域效应与铟磷基有源结构,以及铈酸锂基高的电光和非线性效应等优势集合,实现材料与功能的综合集成,将是微纳光子集成领域面临的主要任务。等离激元光场增强效应已经在增强拉曼、增强荧光、太阳能吸收、单分子探测等方面获得巨大成功。进一步的研究将重点针对材料结构体系的稳定性、探测信号的可重复性、设计器件的规模化和拓展性等方面开展。

人工微纳结构光学新效应研究正如火如荼,方兴未艾。

致谢 感谢全体创新群体成员的出色工作。本研究得到国家自然科学基金创新研究群体(批准号“11021403”)及第一次延续(批准号“11321063”)、第二次延续(批准号“11621091”)的连续支持。

参 考 文 献

- [1] Tanzilli S, De Riedmatten H, Tittel H, et al. Highly efficient photon-pair source using periodically poled lithium niobate waveguide. *Electron Lett*, 2001, 37: 26—28.
- [2] Tanzilli S, Tittel W, Halder M, et al. A photonic quantum information interface. *Nature*, 2005, 437: 116—120.

- [3] Kuklewicz CE, Fiorentino M, Messin G, et al. High-flux source of polarization-entangled photons from a periodically poled KTiOPO 4 parametric down-converter. *Phys Rev A*, 2004, 69: 013807.
- [4] Kuklewicz CE, Wong FNC, Shapiro JH. Time-bin-modulated biphotons from cavity-enhanced down-conversion. *Phys Rev Lett*, 2006, 97: 223601.
- [5] Kuzucu O, Fiorentino M, Albot MA, et al. Two-photon coincident-frequency entanglement via extended phase matching. *Phys Rev Lett*, 2005, 94: 083601.
- [6] Giovannetti V, Maccone L, Shapiro JH, et al. Generating entangled two-photon states with coincident frequencies. *Phys Rev Lett*, 2002, 88: 183602.
- [7] Nasr MB, Carrasco S, Saleh BEA, et al. Ultrabroadband biphotons generated via chirped quasi-phase-matched optical parametric down-conversion. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 183601.
- [8] Bao XH, Qian Y, Yang J, et al. Generation of narrow-band polarization-entangled photon pairs for atomic quantum memories. *Phys Rev Lett*, 2008, 101: 190501.
- [9] Ji LL, Wu LA. 光学超晶格中串联参量过程制备纠缠光子对. *物理学报*, 2005, 54: 736—741.
- [10] Huang D, She W. High-flux photon-pair source from electrically induced parametric down conversion after second-harmonic generation in single optical superlattice. *Opt Express*, 2007, 15: 8275—8283.
- [11] Jin H, Xu P, Luo XW, et al. Compact engineering of path-entangled sources from a monolithic quadratic nonlinear photonic crystal. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 023603.
- [12] Shi J, Xu P, Zhong ML, et al. Heralded generation of multipartite entanglement for one photon by using a single two-dimensional nonlinear photonic crystal. *Opt Express*, 2013, 21: 7875—7881.
- [13] Xu P, Zhu SN. Quasi-phase-matching engineering of entangled photons. *AIP Adv*, 2012, 2: 041401.
- [14] Jin H, Xu P, Zhao JS, et al. Observation of quantum Talbot effect from a domain-engineered nonlinear photonic crystal. *Appl Phys Lett*, 2012, 101: 211115.
- [15] Gong YX, Xu P, Shi J, et al. Generation of polarization-entangled photon pairs via concurrent spontaneous parametric downconversions in a single $\chi(2)$ nonlinear photonic crystal. *Opt Lett*, 2012, 37: 4374—4376.
- [16] Gong YX, Xu P, Bai YF, et al. Multiphoton path-entanglement generation by concurrent parametric down-conversion in a single $\chi(2)$ nonlinear photonic crystal. *Phys Rev A*, 2012, 86: 023835.
- [17] Yun S, Xu P, Zhao JS, et al. Generation of positively-momentum-correlated biphotons from spontaneous parametric down-conversion. *Phys Rev A*, 2012, 86: 023852.
- [18] Xu P, Leng HY, Zhu ZH, et al. Lensless imaging by entangled photons from quadratic nonlinear photonic crystals. *Phys Rev A*, 2012, 86: 013805.
- [19] Bai YF, Xu P, Xie ZD, et al. Mode-locked biphoton generation by concurrent quasi-phase-matching. *Phys Rev A*, 2012, 85: 053807.
- [20] Leng HY, Yu XQ, Gong YX, et al. On-chip steering of entangled photons in nonlinear photonic crystals. *Nature Commun*, 2011, 2: 429.
- [21] Gong YX, Xie ZD, Xu P, et al. Compact source of narrow-band counterpropagating polarization-entangled photon pairs using a single dual-periodically-poled crystal. *Phys Rev A*, 2011, 84: 053825.
- [22] Zhao JS, Sun L, Yu XQ, et al. Broadband continuous-variable entanglement source using a chirped poling nonlinear crystal. *Phys Rev A*, 2010, 81: 013832.
- [23] Leng HY, Wang JF, Yu YB, et al. Scheme to generate continuous-variable quadripartite entanglement by intracavity down-conversion cascaded with double sum-frequency generations. *Phys Rev A*, 2009, 79: 032337.
- [24] Yu XQ, Xu P, Xie ZD, et al. Transforming spatial entanglement using a domain-engineering technique. *Phys Rev Lett*, 2008, 101: 233601.
- [25] Jin H, Liu FM, Xu P, et al. On-chip generation and manipulation of entangled photons based on reconfigurable lithium-niobate waveguide circuits. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 103601.
- [26] Silverstone JW, Bonneau D, Ohira K, et al. On-chip quantum interference between silicon photon-pair sources. *Nature Photon*, 2014, 8: 104—108.
- [27] Nielsen MA, Chuang IL. *Quantum information and quantum computation*. (Cambridge University Press, Cambridge), 2000, 2: 23.
- [28] Ralph TC, Langford NK, Bell TB, et al. Linear optical controlled-NOT gate in the coincidence basis. *Phys Rev A*, 2002, 65: 062324.
- [29] Hofmann HF, Takeuchi S. Quantum phase gate for photonic qubits using only beam splitters and postselection. *Phys Rev A*, 2002, 66: 024308.
- [30] OBrien JL, Pryde GJ, White AG, et al. Demonstration of an all-optical quantum controlled-NOT gate. *Nature*, 2003, 426: 264—267.
- [31] Politi A, Cryan MJ, Rarity JG, et al. Silica-on-silicon waveguide quantum circuits. *Science*, 2008, 320: 646—649.
- [32] Okamoto R, Hofmann HF, Takeuchi S, et al. Demonstration of an optical quantum controlled-NOT gate without path interference. *Phys Rev Lett*, 2005, 95: 210506.
- [33] Crespi A, Ramponi R, Osellame R, et al. Integrated photonic quantum gates for polarization qubits. *Nature Commun*, 2011, 2: 566.
- [34] Wang SM, Cheng QQ, Gong YX, et al. A $14 \times 14 \mu\text{m}^2$ footprint polarization-encoded quantum controlled-NOT gate based on hybrid waveguide. *Nature Commun*, 2016, 7: 1490.
- [35] Bender CM, Boettcher S. Real spectra in non-Hermitian Hamiltonians having PT symmetry. *Phys Rev Lett*, 1998, 80: 5243.
- [36] El-Ganainy R, Makris KG, Christodoulides DN, et al. Theory of coupled optical PT-symmetric structures. *Opt Lett*, 2007, 32: 2632.
- [37] Ruter CE, Makris KG, El-Ganainy R, et al. Observation of parity-time symmetry in optics. *Nature Phys*, 2010, 6: 192—195.
- [38] Regensburger A, Bersch C, Miri MA, et al. Parity-time synthetic photonic lattices. *Nature*, 2012, 488: 167—171.
- [39] Guo A, Salamo GJ, Duchesne D, et al. Observation of P T-symmetry breaking in complex optical potentials. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 093902.
- [40] Chang L, Jiang X, Hua S, et al. Parity-time symmetry and variable optical isolation in active-passive-coupled microresonators. *Nature photon*, 2014, 8: 524—529.
- [41] Dötsch H, Bahlmann N, Zhuromskyy O, et al. Applications of magneto-optical waveguides in integrated optics; review. *J Opt Soc Am B*, 2005, 22: 240—253.

- [42] Levy M. Nanomagnetic route to bias-magnet-free, on-chip Faraday rotators. *J Opt Soc Am B*, 2005, 22: 254—260.
- [43] Bi L, Hu J, Jiang P, et al. On-chip optical isolation in monolithically integrated non-reciprocal optical resonators. *Nature Photon*, 2011, 5: 758—762.
- [44] Shi Y, Yu Z, Fan S. Limitations of nonlinear optical isolators due to dynamic reciprocity. *Nature photon*, 2015, 9: 388—392.
- [45] Hua S, Wen J, Jiang X, et al. Demonstration of a chip-based optical isolator with parametric amplification. *Nature Commun*, 2016, 7: 13657.
- [46] Yin L, Vlasko-Vlasov VK, Pearson J, et al. Subwavelength focusing and guiding of surface plasmons. *Nano Lett*, 2005, 5: 1399—1402.
- [47] Song W, Fang Z, Huang S, et al. Near-field nanofocusing through a combination of plasmonic Bragg reflector and converging lens. *Opt Express*, 2010, 18: 14762—14767.
- [48] Fang Z, Peng Q, Song W, et al. Plasmonic focusing in symmetry broken nanocorrals. *Nano Lett*, 2010, 11: 893—897.
- [49] Siviloglou GA, Broky J, Dogariu A, et al. Observation of accelerating Airy beams. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 213901.
- [50] Salandrino A, Christodoulides DN. Airy plasmon: a nondiffracting surface wave. *Opt Lett*, 2010, 35: 2082—2084.
- [51] Zhang P, Wang S, Liu Y, et al. Plasmonic Airy beams with dynamically controlled trajectories. *Opt Lett*, 2011, 36: 3191—3193.
- [52] Minovich A, Klein AE, Janunts N, et al. Generation and near-field imaging of Airy surface plasmons. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 116802.
- [53] Li L, Li T, Wang SM, et al. Plasmonic Airy beam generated by in-plane diffraction. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 126804.
- [54] Li L, Li T, Wang SM, et al. Broad band focusing and demultiplexing of in-plane propagating surface plasmons. *Nano Lett*, 2011, 11: 4357—4361.
- [55] Cheng QQ, Li T, Li L, et al. Mode division multiplexing in a polymer-loaded plasmonic planar waveguide. *Opt Lett*, 2014, 39: 3900—3902.
- [56] Li L, Li T, Wang SM, et al. Collimated plasmon beam: nondiffracting versus linearly focused. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 046807.
- [57] Chen J, Li L, Li T, et al. Indefinite Plasmonic Beam Engineering by In-plane Holography. *Sci Rep*, 2016, 6: 28926.
- [58] Shitrit N, Nechayev S, Kleiner V, et al. Spin-dependent plasmonics based on interfering topological defects. *Nano Lett*, 2012, 12: 1620—1623.
- [59] Yin X, Ye Z, Rho J, et al. Photonic spin Hall effect at metasurfaces. *Science*, 2013, 339: 1405—1407.
- [60] Li G, Kang M, Chen S, et al. Spin-enabled plasmonic metasurfaces for manipulating orbital angular momentum of light. *Nano Lett*, 2013, 13: 4148—4151.
- [61] Xiao S, Zhong F, Liu H, et al. Flexible coherent control of plasmonic spin-Hall effect. *Nature Commun*, 2015, 6: 8360.
- [62] Tang XM, Li L, Li T, et al. Converting surface plasmon to spatial Airy beam by graded grating on metal surface. *Opt Lett*, 2013, 38: 1733—1735.
- [63] Li L, Li T, Tang XM, et al. Plasmonic polarization generator in well-routed beaming. *Light Sci Appl*, 2015, 4: e330.
- [64] Fan RH, Zhou Y, Ren XP, et al. Freely tunable broadband polarization rotator for terahertz waves. *Adv Mater*, 2015, 27: 1201—1206.
- [65] Zheng Y, Bian J, Wang XL, et al. Revisiting Newton's rings with a plasmonic optical flat for high-accuracy surface inspection. *Light Sci Appl*, 2016, 5: e16156.
- [66] Unruh WG. Experimental black-hole evaporation?. *Phys Rev Lett*, 1981, 46: 1351—1353.
- [67] Leonhardt U, Philbin TG. General relativity in electrical engineering. *New J Phys*, 2006, 8: 247.
- [68] Greenleaf A, Kurylev Y, Lissas M, et al. Electromagnetic wormholes and virtual magnetic monopoles from metamaterials. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 183901.
- [69] Philbin TG, Kukulewicz C, Robertson S, et al. Fiber-optical analog of the event horizon. *Science*, 2008, 319: 1367—1370.
- [70] Genov DA, Zhang S, Zhang X. Mimicking celestial mechanics in metamaterials. *Nature Phys*, 2009, 5: 687—692.
- [71] Cheng Q, Cui TJ, Jiang WX, et al. An omnidirectional electromagnetic absorber made of metamaterials. *New J Phys*, 2010, 12: 063006.
- [72] Belgiorno F, Cacciatori SL, Clerici M, et al. Hawking radiation from ultrashort laser pulse filaments. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 203901.
- [73] Sheng C, Liu H, Wang Y, et al. Trapping light by mimicking gravitational lensing. *Nature Photonics*, 2013, 7: 902.
- [74] Sheng C, Bekenstein R, Liu H, et al. Wavefront shaping through emulated curved space in waveguide settings. *Nature Commun*, 2016, 7: 10747.
- [75] Schaller RD, Klimov VI. High efficiency carrier multiplication in PbSe nanocrystals: implications for solar energy conversion. *Phys Rev Lett*, 2004, 92: 186601.
- [76] Pijpers JJH, Ulbricht R, Tielrooij KJ, et al. Assessment of carrier-multiplication efficiency in bulk PbSe and PbS. *Nature Phys*, 2009, 5: 811—814.
- [77] McGuire JA, Sykora M, Joo J, et al. Apparent versus true carrier multiplication yields in semiconductor nanocrystals. *Nano Lett*, 2010, 10: 2049—2057.
- [78] Hu F, Lv B, Yin C, et al. Carrier multiplication in a single semiconductor nanocrystal. *Physical Rev Lett*, 2016, 116: 106404.
- [79] Smith MB, Michl J. Singlet fission. *Chem Rev*, 2010, 110: 6891—6936.
- [80] Congreve DN, Lee J, Thompson NJ, et al. External quantum efficiency above 100% in a singlet-exciton-fission-based organic photovoltaic cell. *Science*, 2013, 340: 334—337.
- [81] Wang R, Zhang C, Zhang B, et al. Magnetic dipolar interaction between correlated triplets created by singlet fission in tetracene crystals. *Nature Commun*, 2015, 6.
- [82] Liu Y, Zhang C, Wang R, et al. Large optical nonlinearity induced by singlet fission in pentacene films. *Angew Chem Int Ed Engl*, 2015, 127: 6320—6324.
- [83] Wan Y, Guo Z, Zhu T, et al. Cooperative singlet and triplet exciton transport in tetracene crystals visualized by ultrafast microscopy. *Nature Chem*, 2015, 7: 785—792.
- [84] He GS, Tan LS, Zheng Q, et al. Multiphoton absorbing materials: molecular designs, characterizations, and applications. *Chem Rev*, 2008, 108: 1245—1330.
- [85] Hu F, Zhang H, Sun C, et al. Superior optical properties of perovskite nanocrystals as single photon emitters. *ACS nano*, 2015, 9: 12410—12416.
- [86] Xu Y, Chen Q, Zhang C, et al. Two-photon-pumped perovskite semiconductor nanocrystal lasers. *J Am Chem Soc*, 2016, 138: 3761—3768.

- [87] Swarnkar A, Marshall AR, Sanhira EM, et al. Quantum dot-induced phase stabilization of α -CsPbI₃ perovskite for high-efficiency photovoltaics. *Science*, 2016, 354: 92—95.
- [88] Neumann O, Urban AS, Day J, et al. Solar vapor generation enabled by nanoparticles. *Acs Nano*, 2012, 7: 42—49.
- [89] Ghasemi H, Ni G, Marconnet AM, et al. Solar steam generation by heat localization. *Nature Commun*, 2014, 5.
- [90] Liu Y, Yu S, Feng R, et al. A Bioinspired, Reusable, Paper-Based System for High-Performance Large-Scale Evaporation. *Adv Mater*, 2015, 27: 2768—2774.
- [91] Bae K, Kang G, Cho SK, et al. Flexible thin-film black gold membranes with ultrabroadband plasmonic nanofocusing for efficient solar vapour generation. *Nature Commun*, 2015, 6.
- [92] Ito Y, Tanabe Y, Han J, et al. Multifunctional porous graphene for high-efficiency steam generation by heat localization. *Adv Mater*, 2015, 27: 4302—4307.
- [93] Zhang L, Tang B, Wu J, et al. Hydrophobic light-to-heat conversion membranes with self-healing ability for interfacial solar heating. *Adv Mater*, 2015, 27(33): 4889—4894.
- [94] Zhou L, Tan Y, Ji D, et al. Self-assembly of highly efficient, broadband plasmonic absorbers for solar steam generation. *Sci Adv*, 2016, 2: e1501227.
- [95] Zhou L, Tan Y, Wang J, et al. 3D self-assembly of aluminum nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination. *Nature Photon*, 2016, 10, 393—398.
- [96] Hochbaum AI, Yang P. Semiconductor nanowires for energy conversion. *Chem Rev*, 2009, 110: 527—546.
- [97] Li G, Zhu R, Yang Y. Polymer solar cells. *Nature photon*, 2012, 6: 153—161.
- [98] Liu C, Li F, Ma LP, et al. Advanced materials for energy storage. *Adv Mater*, 2010, 22: E28.
- [99] Zhu J, Yu Z, Burkhard GF, et al. Optical absorption enhancement in amorphous silicon nanowire and nanocone arrays. *Nano Lett*, 2008, 9: 279—282.
- [100] Zhu J, Hsu CM, Yu Z, et al. Nanodome solar cells with efficient light management and self-cleaning. *Nano Lett*, 2009, 10: 1979—1984.
- [101] Zhu J, Yu Z, Fan S, et al. Nanostructured photon management for high performance solar cells. *Mater Sci Eng R*, 2010, 70: 330—340.
- [102] Atwater HA, Polman A. Plasmonics for improved photovoltaic devices. *Nature Mater*, 2010, 9: 205—213.
- [103] Ferry VE, Munday JN, Atwater HA. Design considerations for plasmonic photovoltaics. *Adv Mater*, 2010, 22: 4794—4808.
- [104] Zhou L, Yu X, Zhu J. Metal-core/semiconductor-shell nanocones for broadband solar absorption enhancement. *Nano Lett*, 2014, 14: 1093—1098.
- [105] Zong L, Zhu B, Lu Z, et al. Nanopurification of silicon from 84% to 99.999% purity with a simple and scalable process. *Proc Natl Acad Sci*, 2015, 112: 13473—13477.
- [106] Zhu B, Jin Y, Tan Y, et al. Scalable production of Si nanoparticles directly from low grade sources for lithium-ion battery anode. *Nano Lett*, 2015, 15: 5750—5754.
- [107] Jin Y, Zhang S, Zhu B, et al. Simultaneous purification and perforation of low-grade Si sources for lithium-ion battery anode. *Nano Lett*, 2015, 15: 7742—7747.
- [108] Zhu P, Gu S, Shen X, et al. Direct conversion of perovskite thin films into nanowires with kinetic control for flexible optoelectronic devices. *Nano Lett*, 2016, 16: 871—876.

Research progresses of novel optical effects in artificial micro/nano-structures

Li Tao Zhu Shining

(National Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract Based on the achievements of NSFC Innovative Team Program-“Study on Novel Optical Effects in Artificial Micro/nano-Structures”, this article systematically reviews the progresses in the researches of photonic on-chip integration, micro/nano optical field manipulation, coherent processes in quantum confined system, and new-type energy photonic materials and devices, and briefly introduces the development of optical superlattice based solid state lasers and their applications.

Key words artificial micro/nano-structures; optical novel effect; quantum and classical; photonic integration