

引用格式: LIU Aiping, CHEN Guangjie, CHEN Liang, et al. Advances in Integrated Photonic-atom Chips (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(5):0551302

刘爱萍,陈广杰,陈梁,等. 集成光子-原子芯片的研究进展(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(5):0551302

※封底论文※

## 集成光子-原子芯片的研究进展(特邀)

刘爱萍<sup>1</sup>, 陈广杰<sup>2</sup>, 陈梁<sup>2</sup>, 徐新标<sup>2</sup>, 张延磊<sup>2</sup>, 王琴<sup>1</sup>, 邹长铃<sup>2</sup>

(1 南京邮电大学 量子信息技术研究所, 南京 210003)

(2 中国科学技术大学 中国科学院量子信息重点实验室, 合肥 230026)

**摘 要:**近年来,微纳光学器件和集成光学芯片的研究取得了激动人心的进展,推动着光学相关的各个研究领域与集成光学技术的结合。同时,原子物理学也得到了巨大发展,并应用于传感、计时、寻找新的物理原理和新兴的量子信息科学中。得益于光学与原子物理的紧密关系,集成光子-原子芯片已逐步发展成为一个新的研究方向,既是便捷的原子系统又是可集成的量子信息处理平台,兼具两个研究领域的优势。本文综述了该方向的发展概况,主要介绍基于微纳光学结构实现对空间光场的调控,从而实现集成化的原子冷却和探测技术,以及基于微纳光学结构的近场实现增强的原子囚禁和原子与光子的相互作用。重点介绍基于集成芯片上的微纳光子结构与原子的相互作用,特别是微腔,基于其稳定的结构和增强的局域场,有望实现稳定、高效和可扩展的光子-原子混合量子芯片。

**关键词:**集成光子-原子芯片;光学偶极阱;磁光阱;倏逝场;微环腔

中图分类号:TN256

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225105.0551302

### 0 引言

原子与光子的相互作用可以实现量子比特信息的读取和存储,在量子信息处理中具有重要的应用前景。近年来围绕着单原子的囚禁、单原子阵列的排序以及原子量子比特的实验取得了一系列重要进展<sup>[1-4]</sup>,推动了原子在量子信息处理中的应用。传统的原子物理研究与光学密不可分,无论是原子的外部自由度还是内部自由度的控制和读取都需要光的参与。一方面,通过激光冷却技术和激光偶极阱技术,可以基于空间光场实现对原子的外部自由度的有效操控,进而减小原子系综的平均速度、实现原子的长时间囚禁、实现确定性原子的输运、甚至调控原子的物质波并实现原子物质波干涉等目标<sup>[5,6]</sup>;另一方面,光场与原子的相互作用是实现原子的内部自由度,即原子的轨道能级跃迁、精细结构、超精细结构、初始化、操控和读出的必要手段<sup>[7-9]</sup>。

然而,绝大部分冷原子系统都包含有激光冷却系统、原子的偶极阱系统、原子的内态操控和探测系统。这些原子系统具有体积庞大、质量大的缺点,在实际应用中面临着一系列困难。因此,原子系统的微型化和集成化成为一种趋势。随着纳米加工技术的发展,集成光学得到了迅速发展<sup>[10,11]</sup>,为芯片上集成冷原子系统,实现一种全芯片集成的光子-原子实验平台提供了技术支撑。通过芯片上的微纳结构可以构筑多样化的空间光场分布<sup>[12-14]</sup>,还可以与传统光电子器件结合,实现多通道、高速和并行的光场调控并用于原子的内外态操控。这种基于集成光学微结构的光子-原子芯片不仅具有尺寸小、功耗低、束缚强、势阱形状多样等优势,还能够极大的增强光与原子的相互作用。利用芯片上微纳光学结构对光场的强束缚作用,可以降低激发和操控原子所需的激光功率,还可以有效地调控真空光场的态密度,进而实现更高效的光子-原子量子纠缠、量子存储和读取<sup>[15]</sup>。因此,光学芯片与原子的结合提供了一种独特而新颖的实验平台,可以实现对原子物质波、原子内部量

**基金项目:**科技部重点研发计划(No.2021YFF0603701),中国博士后科学基金(No.2019M651911),国家自然科学基金(Nos.11922411, U21A6006, U21A20433)

**第一作者:**刘爱萍(1986—),女,副教授,博士,主要研究方向为集成光学。Email: apliu@njupt.edu.cn

**通讯作者:**邹长铃(1989—),男,教授,博士,主要研究方向为集成光子芯片、量子光学与量子信息。Email: clzou321@ustc.edu.cn

**收稿日期:**2022-05-10; **录用日期:**2022-05-20

<http://www.photon.ac.cn>

子态、原子-光子量子纠缠等量子资源的高效制备和调控,从而有望用于量子计算、量子传感等领域。

集成光子-原子芯片的发展起源于20世纪90年代,OVCHINNIKOV Y B等提出和验证了利用表面倏逝场囚禁原子,为集成微纳结构束缚原子提供理论和实验基础<sup>[16-17]</sup>。原子冷却系统的微型化和集成化使得原子能够囚禁在波导表面附近以及实现与波导模式的耦合<sup>[18]</sup>。光子-原子芯片作为一个完整的系统,除了原子之外,还需要具备光源、探测器、控制器等功能器件。尽管这些功能器件已经在各种集成光学芯片平台上得到了充分的发展,如何将这些功能器件系统地集成到光子-原子芯片上还处于早期研究阶段<sup>[19]</sup>。近年来发展的基于蓝宝石基底微腔的光子-原子芯片,由于其可以与冷却激光、片上激光器、放大器、分束器和超导探测器等集成,有望成为实用型光子-原子芯片。

本文将对集成光子-原子芯片的技术进行综述和展望。光子-原子芯片的研究可以划分为两个研究方向,如图1。首先通过芯片集成磁光阱(Magneto-optical Trap, MOT)系统对原子进行冷却和束缚<sup>[18]</sup>,第一个方向为利用芯片上的微纳光学结构实现片内波导模式与自由空间光场的转换,从而基于片外自由空间光场对原子进行囚禁、态操控和读出<sup>[20]</sup>。第二个方向为全片上的集成,通过原子传送带将原子从自由空间转移到芯片表面,再借助芯片上微纳结构的倏逝场实现对原子的近场囚禁、激发和探测<sup>[21]</sup>,以及实现高效的单光子-单原子界面用于潜在的量子信息处理器件。在过去的十几年,这两个研究方向取得了一系列重要进展,如图2。按照这两个研究方向,首先介绍基于片上自由空间光场的光子-原子芯片技术,包括集成MOT

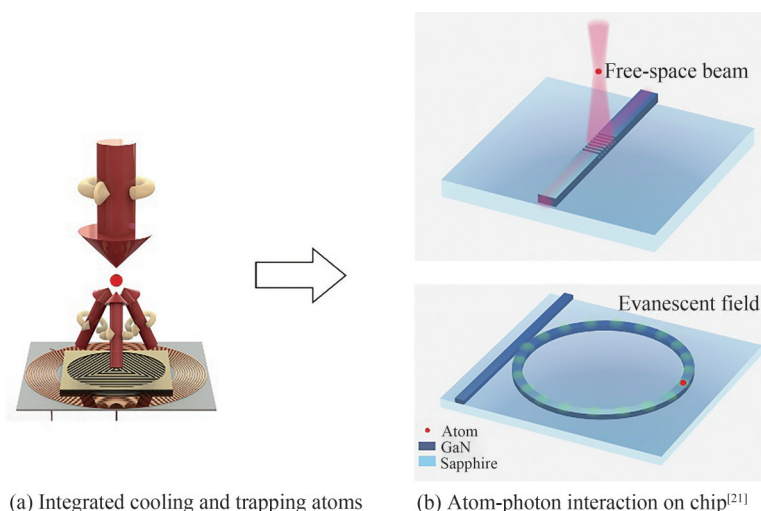


图1 集成光子-原子芯片技术结构示意图

Fig. 1 The illustration of integrated photon-atom chip

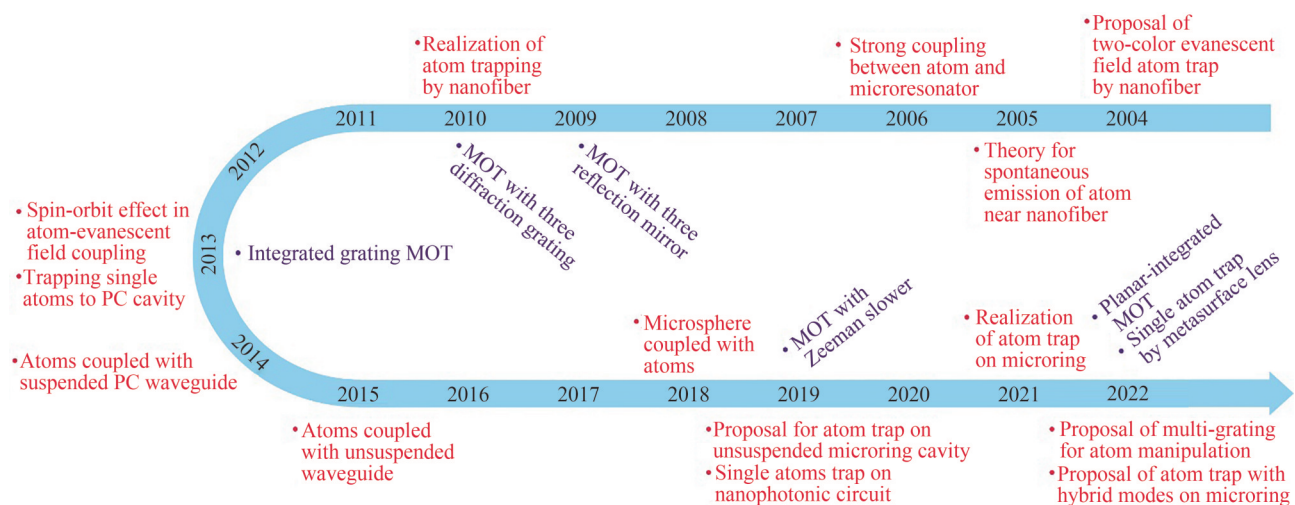


图2 光子-原子芯片的重要发展历程

Fig. 2 The key demonstrations in photon-atom chip

系统对原子的冷却和自由空间光场对原子的囚禁与运输,接着介绍基于近场的光子-原子芯片技术,包括不同微结构表面近场捕获原子和近场与原子态的相互耦合作用,并重点介绍微腔与原子的相互作用,最后进行总结和展望。

## 1 基于自由空间光场的光子-原子芯片

基于自由空间光场的光子-原子芯片主要是基于光学芯片实现 MOT 所需的特定偏振和方向的空间光场分布,从而实现对距离芯片表面几十微米到几毫米位置的原子团的激光冷却,进一步基于空间聚焦光场实现对原子的精细操控。如图 1(b)所示,自由空间光场的光子-原子芯片的研究途径主要分为两步:首先通过芯片上集成微纳结构和自由空间入射激光光束实现冷原子团,然后利用片内模场转换器实现波导模场与芯片附近聚焦光场的转换,从而形成光学偶极阱对原子进行囚禁,并通过聚焦光束实现高效的原子内态操控和读出。基于自由空间光场的光子-原子芯片在自由空间中囚禁原子,不仅可以更好地与传统原子冷却系统兼容,提高系统的稳定性和集成度,而且还可以将原子态信息与集成波导模式进行对接。此外,对原子的寻址可以通过衍射光束进行灵活控制,具有很好的空间自由度,有利于开展多个单原子和可调控原子的实验。

### 1.1 集成原子冷却系统

将 MOT 系统小型化的尝试自冷原子领域早期就开始了。其中,韩国 LEE K I 等于 1996 年提出基于空心锥反射镜的 MOT 微系统<sup>[22]</sup>,如图 3(a)所示,空心锥结构的四个三角形反射镜的两组反射光和正入射反射的一组光形成相互垂直的三对冷却激光,可以将原子冷却和束缚在中心交叉点。该结构可以置于真空腔中,与反亥姆霍兹线圈组合,可以实现对原子的冷却和束缚。随后数十年中,基于空心锥反射镜的磁光阱结构被不断改进和优化。2009 年,英国的 ARNOLD A S 等首次证明了四面体构型的光场同样可以产生有效的三维束缚和冷却,并利用三反射镜的空心锥结构成功抓到了冷原子团<sup>[23]</sup>。如图 3(b)所示,由三个反射镜

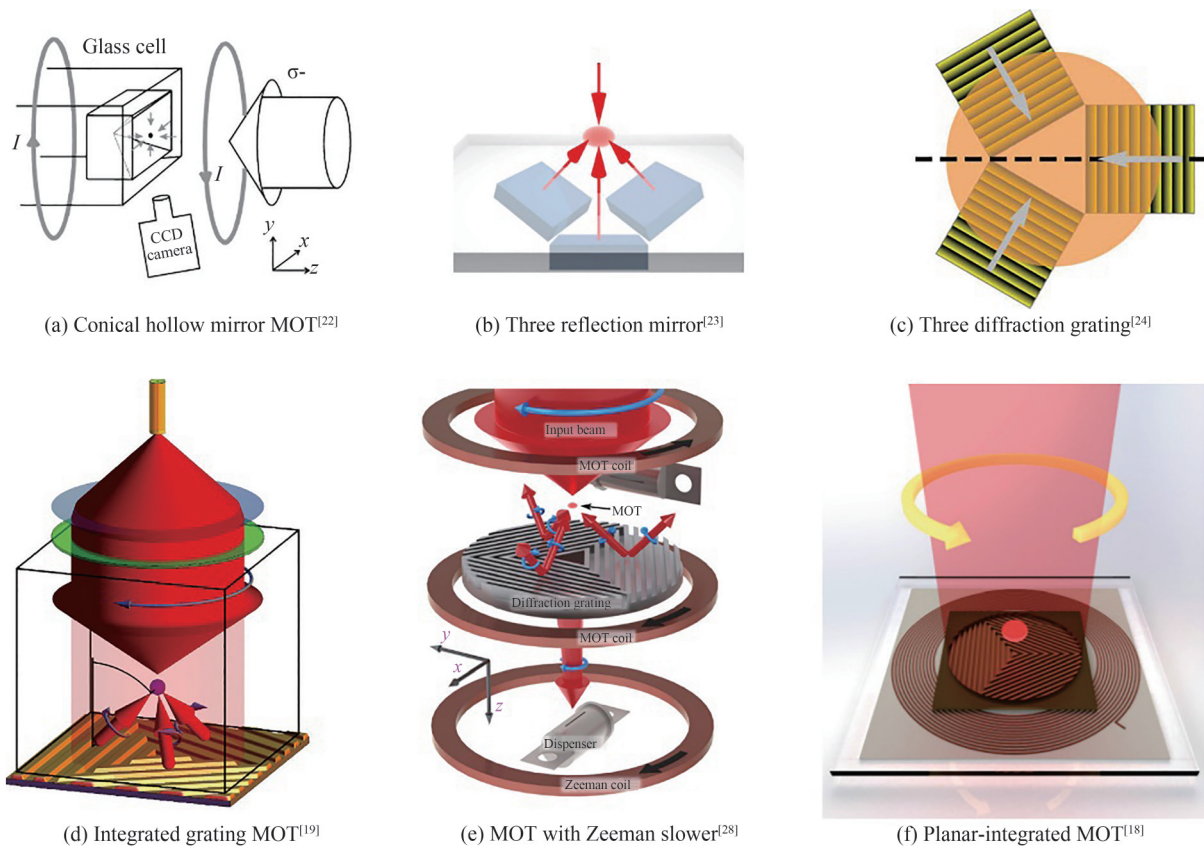


图 3 集成 MOT 系统图  
Fig. 3 The illustration of MOT system

的反射光与入射光形成冷却光场,一定程度上简化了系统结构。2010年他们将该微系统的光路部分平面化为三块拼接的衍射光栅<sup>[24]</sup>,如图3(c)所示,并于2013年和英国HINDS E A等合作,将三块衍射光栅加工在一块完整的硅基光栅芯片上,实现了基于光栅芯片的磁光阱<sup>[19]</sup>,如图3(d)。

此后,基于光栅磁光阱的研究和应用逐渐展开<sup>[18, 24-27]</sup>。例如,美国国家标准与技术研究院的BARKER D S等将光栅磁光阱与塞曼减速器结合,实现了Li原子的光栅磁光阱<sup>[28]</sup>,如图3(e)。中国计量院也开展了相关的研究,实现了Rb原子的光栅磁光阱<sup>[29]</sup>。最近,中国科学技术大学ZOU C L研究组则首次突破了磁场线圈的平面化,实现了基于双芯片平面集成的磁光阱系统<sup>[18]</sup>。如图3(f)所示,线圈芯片被加工在一块平面芯片上,并与光栅芯片一同放置于真空系统之外。将一束包含有冷却和回泵光的光束垂直入射到光栅芯片后,产生MOT所需的人射光和三束衍射光,结合下方磁场芯片产生的四极磁场共同作用,将原子冷却并束缚于真空腔内位于芯片上方的位置。

## 1.2 片上自由空间光场束缚原子

在利用多普勒冷却获得芯片附近的冷原子团后,还可以进一步通过光偶极阱囚禁原子系综或者单原子,实现对原子的长时间俘获,从而实现具备更长相干时间的原子外态或内态。同时,还需要在光子-原子芯片上建立原子与集成光学波导的有效相互作用接口,来实现波导的光场模式与自由空间聚焦光场之间的有效转换,借助集成芯片上可扩展的光学器件实现对原子外态和内态的有效操控和探测。

首先,光栅是一类被芯片广泛采用的自由空间到波导模式转换的器件。图4(a)是理论提出的一种光子-原子芯片架构,其基于四个波导光栅结构囚禁和探测单原子<sup>[20]</sup>。其中对角线上的两个光栅的衍射光束干涉形成光学偶极阱可以对单个中性冷原子进行囚禁,另两个光栅可以用于对囚禁的原子态进行泵浦和探测,从而在单个芯片上同时实现单原子的囚禁、泵浦和探测。类似地,WANG M等通过光纤端面的表面等离子体光栅衍射产生的光束在表面上方几十微米处干涉产生光学偶极阱阵列,可以对原子产生很好的束缚作用<sup>[30]</sup>。同样的器件也已经在离子阱的研究中发挥了重要的作用。美国的MEHTA K K等通过集成光栅的衍射光束与离子的相互作用做了一系列工作,通过两两并联的光栅演示离子比特的寻址<sup>[31]</sup>。2020年,该

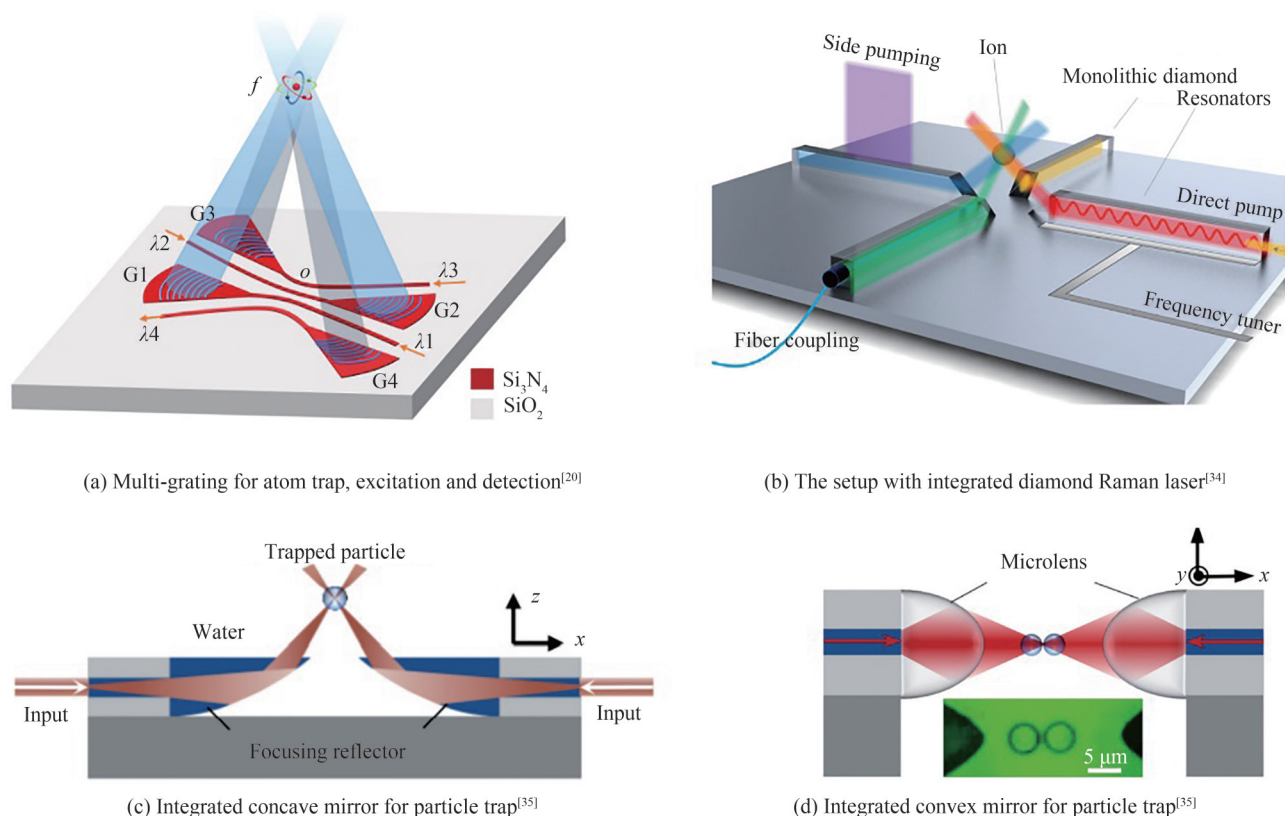


图4 集成光学芯片上产生自由空间束缚光场的装置  
Fig. 4 The generation of free space light for trapping in the integrated optical chip

研究组的 NIFFENEGGER R J 等演示了基于表面电极束缚离子的芯片,通过集成波导和光栅耦合器传递电离激光、冷却激光、相干操作和量子态制备与探测的激光<sup>[32]</sup>。这些研究进展证实了光栅衍射元件在光子-原子芯片上的应用潜力。

除了衍射光栅,还有很多微纳光学结构可以用于连接芯片与自由空间,实现波导模式到自由空间聚焦光场的转换。例如,GRANADOS E 等通过集成金刚石拉曼共振激光器在芯片中心的上方形成汇聚的激光束<sup>[33]</sup>,如图 4(b)所示,具有倾斜端面的激光器可以将激光沿着一定角度衍射到自由空间中。基于此结构,通过选择合适的激光波长,可以在芯片上方形成干涉光场产生光学偶极阱对原子进行囚禁和激发探测<sup>[34]</sup>。图 4(c)为另外一种可行的结构,YU S 等通过集成反射凹面镜将集成波导模式高效转换至自由空间,可以在芯片表面几十微米处产生双聚焦高斯光束的干涉场<sup>[35]</sup>。类似地,波导模式也可以通过集成微透镜形成自由空间的汇聚光束<sup>[35]</sup>,如图 4(d)。这两种方法均可以扩展至中性原子的各个工作波长,产生的汇聚光束可以用于实现光学偶极阱、原子内态操控和高效率原子荧光收集。最近,HSU T W 等将超表面结构应用于原子实验中,通过超表面结构在芯片上方产生聚焦光场对原子进行囚禁和探测,由于超表面结构可以产生高数值孔径的光束<sup>[36]</sup>,因此,可以提高原子辐射效率,在集成原子芯片中具有重要应用前景。

## 2 基于近场的光子-原子芯片

### 2.1 从自由空间到原子芯片上的原子传送

波导模式与原子态如果要通过倏逝场直接相互耦合,原子与波导表面之间的距离必须小于波长。现有的原子技术主要是通过磁光阱在自由空间中获冷原子团,因此在基于近场的光子-原子芯片中需要通过原子传送带将冷原子团从自由空间传送到波导表面与倏逝场耦合。原子传送带首先将原子囚禁在束缚光场形成的光学偶极阱阵列内,然后通过干涉光的频率或者相位差来移动束缚光场的位置,从而带动所囚禁原子运动。近几年在有关集成光子-原子芯片的实验中,出现了各种各样的原子传送带,将原子从自由空间 MOT 系统传送到集成芯片上。

基于电动反射镜的原子传送带是通过电动反射镜改变光束的反射角来控制束缚原子的位置实现原子的传送。该装置被 LUKIN M D 研究组应用于研究原子与光子晶体波导相互作用的实验中<sup>[37]</sup>。如图 5(a)所示,非球面透镜产生的聚焦光场形成光学偶极阱,其位置可以通过改变电动反射镜的角度进行控制。首先将聚焦光场置于 MOT 中,束缚于聚焦光场形成的光学偶极阱对冷原子进行束缚,接着改变振镜的角度将聚焦光场移动到光子晶体表面,被束缚的冷原子将随之移动到光子晶体表面,完成原子传送。

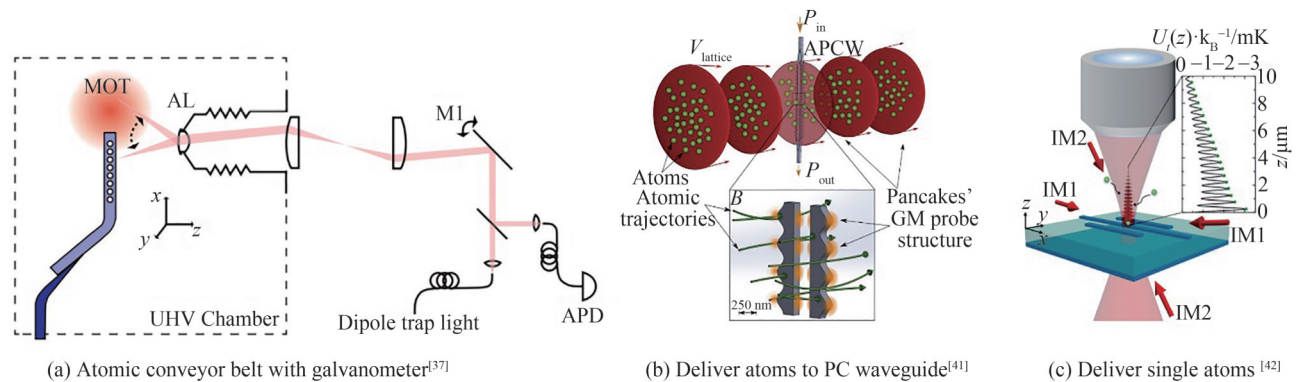


图 5 原子传送带实验示意  
Fig. 5 The illustration of the atomic conveyor belt

两束相对传输的光束干涉产生驻波场,当两束光的频率存在微小失谐时,驻波场将发生纵向移动,频率小失谐干涉光场可以用于原子传送带对原子的位置进行控制。如果干涉光束为原子的红失谐光,干涉驻波场的波腹将形成可以束缚原子的光学偶极阱。被束缚于波腹内的原子将随着驻波场运动,从而实现原子的传送<sup>[38, 39]</sup>。这种基于频率小失谐干涉光的原子传送带可以连续和自由控制原子位置,已被广泛应用于光子-原子芯片实验中<sup>[40]</sup>。BURGERS A P 等在研究原子与锯齿形光子晶体波导相互耦合的实验中采用频率小

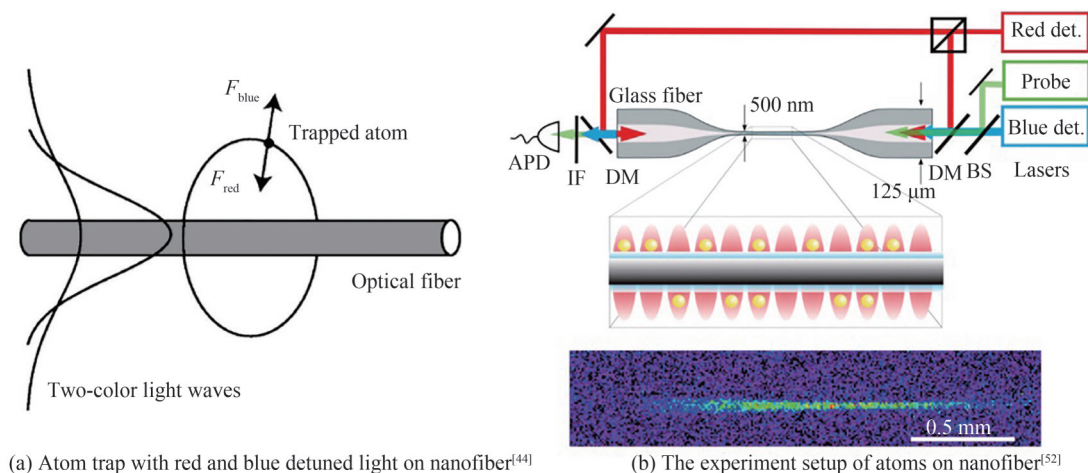
失谐的原子传送带将处于MOT中的冷原子不断传送到锯齿形光子晶体波导上<sup>[41]</sup>。如图5(b)所示,具有一定频率失谐的两束Cs原子红失谐光束干涉产生运动的驻波场,被束缚于驻波波腹内的冷原子随着波包不断运动而到达光子晶体波导。2019年美国HUNG C L研究组通过控制干涉光束的频率差将冷原子从自由空间确定性地传送到集成波导表面<sup>[42]</sup>。如图5(c)所示,垂直于波导表面的两束聚焦光束干涉产生驻波场,在每个波腹的位置形成束缚原子的光学偶极阱,当两干涉光束的频率差为小失谐时,驻波场处于运动状态,从而带动束缚于波腹内的原子从自由空间移动到波导表面,当两干涉光束的频率差为大失谐时,驻波场保持不动,被束缚的原子也随之停止移动。该方法不仅可以将单原子传送到波导表面确定的位置,还可以通过多个传送通道实现多个单原子阵列的传送,在波导表面形成单原子阵列。

## 2.2 片上近场束缚原子

### 2.2.1 波导结构

电介质表面的倏逝场强度沿着垂直于表面的方向指数衰减,作用范围小于光波长。处于波导表面的倏逝场与原子偶极矩相互作用可以对原子产生力的作用,选择合适的倏逝场波长可以克服范德瓦尔斯力形成光学偶极阱将原子束缚在电介质表面的近场范围内<sup>[43-45]</sup>。处于电介质表面近场范围内的原子可以通过倏逝场与波导模式直接相互作用,在原子态调控中具有重要优势,因此,近场束缚原子备受重视<sup>[46, 47]</sup>。OVCHINNIKOV Y B等首先于1991年提出使用表面倏逝场束缚原子<sup>[16]</sup>,并于1997年通过三角棱镜全反射产生的倏逝场将原子成功束缚于波导表面<sup>[17]</sup>,为近场束缚原子迈出了重要一步。此后,在研究近场光子-原子芯片的过程中,出现了各种结构的波导以产生特定结构分布的倏逝场,形成可以稳定束缚原子的光学偶极阱,推动着近场光子-原子芯片的发展。接下来分别介绍光纤锥、集成波导和光子晶体波导表面近场束缚原子的研究工作。

当光纤被拉得很细的时候,光纤内的光场将延伸到光纤外形成很强的倏逝场,而且光纤仍然能够保持比较好的低损耗传输特性<sup>[48]</sup>,因此,光纤锥可以很好地提供束缚原子的倏逝场。HAKUTA K研究组于2004年提出使用光纤锥的红蓝失谐光的倏逝场来束缚原子<sup>[44]</sup>。光场与原子的偶极矩相互作用对原子产生偶极力,如图6(a)所示,在光纤内同时传输红失谐和蓝失谐光,红失谐光的倏逝场对原子的偶极力起吸引到光纤表面的作用,而蓝失谐光的倏逝场对原子的偶极力起排斥作用。调整合适的红蓝失谐光比例,可以克服光纤表面对原子的范德瓦尔斯力,使原子受力达到平衡<sup>[49, 50]</sup>,从而原子被稳定囚禁在光纤锥表面。由于光纤锥表面的倏逝场模式面积很大,对原子产生很强的相互作用,光纤锥表面的倏逝场足以对原子能级进行泵浦,原子所发出的荧光也可以高效地耦合到光纤而被探测。2008年,浙江大学TONG L研究组对光纤锥表面红蓝失谐光束缚原子也进行了研究,分析了不同波导模式倏逝场束缚原子的情况<sup>[51]</sup>。2010年VETSCH E等通过光纤锥同时实现了原子的束缚、态激发和荧光探测,如图6(b)所示,用于束缚原子的红蓝失谐光和泵浦光被同时导入光纤锥,由于Purcell增强效应,原子发出的大部分荧光可以耦合到光纤锥而



(a) Atom trap with red and blue detuned light on nanofiber<sup>[44]</sup>

(b) The experiment setup of atoms on nanofiber<sup>[52]</sup>

图6 光纤锥表面倏逝场囚禁原子示意

Fig. 6 The illustration of atom trap with the evanescent field on the fiber taper

被探测器所检测<sup>[52]</sup>。随后他们还演示通过控制输入光的偏振将不同自旋态的原子囚禁在光纤锥的不同位置,实现偏振色散光接口,以用于原子数的无损测量<sup>[53]</sup>。

基于光纤锥的原子实验,原子与光纤锥模式可以通过倏逝场产生很强的相互耦合作用。但是光纤锥在光场的作用下会产生机械振动,并且随着光纤锥内光强的增大而增大,很不利于原子态的精确调控,从而很难实现量子比特。为了克服机械振动对原子的影响,固定在芯片上的集成波导被研究并应用于束缚原子,以获得稳定的光子-原子芯片。类似于光纤锥结构,波导内的传输模式可以延伸到波导表面形成倏逝场,倏逝场形成的光学偶极阱可以将原子囚禁于波导表面的近场位置处<sup>[54]</sup>。

2000年BARNETT A H等提出使用集成波导内红蓝失谐光来束缚Cs原子<sup>[55]</sup>。如图7(a)所示,矩形直波导内传输的红蓝失谐偏振模式在波导表面存在倏逝场,倏逝场与原子偶极矩相互作用产生偶极力形成光学偶极阱使得原子可以克服范德瓦尔斯力而被稳定囚禁于波导表面的近场范围内。光学偶极阱的结构决定于光场的分布,通过设计不同组合的集成波导可以实现不同结构的光学偶极阱。如图7(b)所示,不同数量和排列的波导可以产生不同空间分布的光场,以满足不同场合中囚禁原子所需的光学偶极阱<sup>[56]</sup>。2015年美国的MENG Y等设计了可以与MOT装置集成的嵌入式SiN波导装置,如图7(c)所示,该装置通过760 nm和1 064 nm光波的倏逝场将Rb原子囚禁于波导表面,再通过780 nm光波对Rb原子进行泵浦探测<sup>[57]</sup>,实现集成波导与原子的近场耦合。

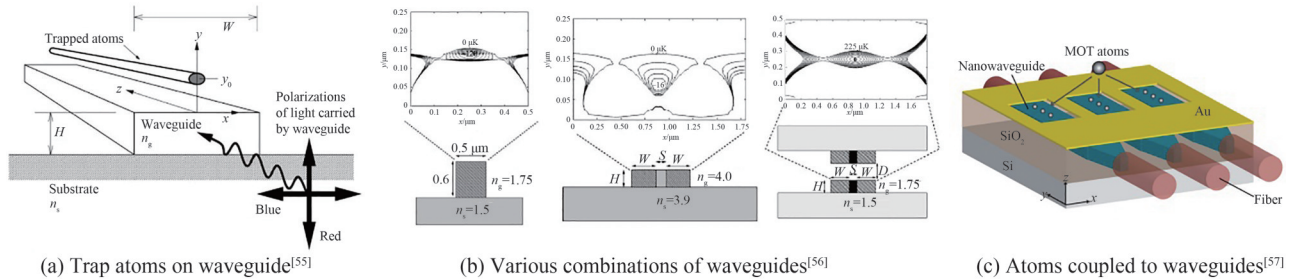


图7 波导结构束缚原子的示意

Fig. 7 The structure of the integrated waveguide for trapping atoms

### 2.2.2 光子晶体结构

集成波导原子装置要求波导内用于囚禁原子的红蓝失谐光的功率比较高,在波导表面获得百 $\mu\text{k}$ 以上的光学偶极阱,需要约几十mW的波导光功率<sup>[56]</sup>,实验中难以在芯片上的波导输入这么高的光功率,同时如此高的光功率会使得波导产生很大的热量,影响光子-原子芯片的稳定工作。为此可以利用具有周期性结构的可对光波产生反射作用的光子晶体波导微腔在波导上形成共振增强光场对原子进行束缚。

由于光子晶体的谐振腔的共振波长受限于晶体的周期,腔内很难同时存在两个相邻波长的共振模式,因此无法通过红蓝失谐光的倏逝场来囚禁原子,而需要通过设计特定结构的光子晶体波导或者借助自由空间光束将原子束缚于光子晶体波导表面的近场范围内。美国的KIMBLE H J研究组于2013年提出使用周期性圆孔的光子晶体波导内的光场形成光学偶极阱囚禁原子<sup>[58]</sup>,如图8(a)所示,设计特定的圆孔周期使蓝失谐光在晶体波导上的共振波节处于空心孔的中心位置,在空心孔中心具有最小光场,由于蓝失谐光场对原子的作用是排斥力,从而在晶体波导的空心孔内形成束缚原子的光学偶极阱。同时,让调控光束在晶体波导上的共振波腹处于空心孔的中心位置,对束缚于其中的原子产生有效调控。此外,他们还设计了平行双晶体波导,如图8(b)所示,在两晶体波导中间形成束缚原子的光学偶极阱和调控原子的光场,通过调节双晶体波导的相位可以改变光学偶极阱和调控光场的位置和大小,在调控原子的过程中具有更好的灵活性。在此基础上,该研究组制备了周期性锯齿状光子晶体波导并成功应用于原子实验中,如图8(c)所示,光子晶体波导两侧周期性分布的锯齿对光场的反射作用产生驻波场,在波导中间镂空的位置形成囚禁原子的光学偶极阱,同时,光子晶体波导模式的倏逝场可以与束缚原子产生很好的近场耦合,进行原子态的近场调控<sup>[59]</sup>。

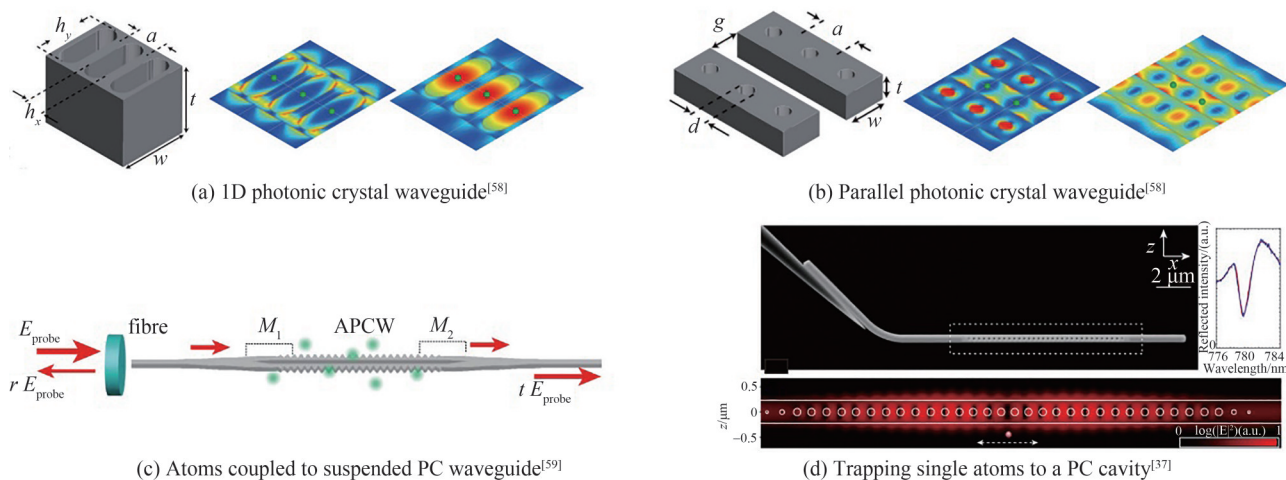


图8 一维光子晶体波导束缚原子装置  
Fig. 8 The structure of the 1D photonic crystal waveguide for trapping atoms

在一个位置同时形成光学偶极阱和调控光场,需要波长和晶体周期结构满足严格的匹配条件,给实验带来很多局限。因此,自由空间光场被用于辅助倏逝场将原子囚禁在光子晶体波导表面,降低光子晶体的结构要求,给实验带来更多操作自由度。THOMPSON J D等在研究Rb原子与光子晶体波导相互作用的实验中通过自由空间光的辅助作用将原子囚禁在波导表面。如图8(d)所示,首先通过原子传送带将冷原子从MOT系统转移到一维光子晶体波导表面,然后在倏逝场与自由空间光场的共同作用下将原子囚禁在波导表面近场范围内,进而研究Rb原子与晶体波导模式的耦合作用<sup>[37]</sup>。

除了一维光子晶体波导,二维光子晶体结构也被用于束缚原子,二维光子晶体可以产生二维光学偶极阱阵列束缚原子形成二维原子阵列。2015年KIMBLE H J研究组将束缚原子的一维孔阵光子晶体波导推向二维孔阵光子晶体结构,获得二维原子阵列,如图9(a)和(b)所示,在电介质片上分别制备周期性排列的圆孔和圆柱,在晶体结构表面形成二维周期性分布的倏逝场,结合垂直于晶体表面的自由空间光场可以形成稳定囚禁原子的光学偶极阱阵列,从而形成二维原子阵列<sup>[40, 60]</sup>。类似地,LUKIN M D研究组通过金属小球阵列产生的表面等离激元场束缚原子获得二维原子阵列,如图9(c)所示,二维周期性排列的纳米金属小球可以激发出表面等离激元,形成二维周期性分布的光学偶极阱阵列,每个光学偶极阱都可以束缚单原子,从而可以获得二维原子阵列<sup>[61]</sup>。光子晶体由于其独特的周期性结构,在二维和三维原子阵列在研究中具有重要应用。

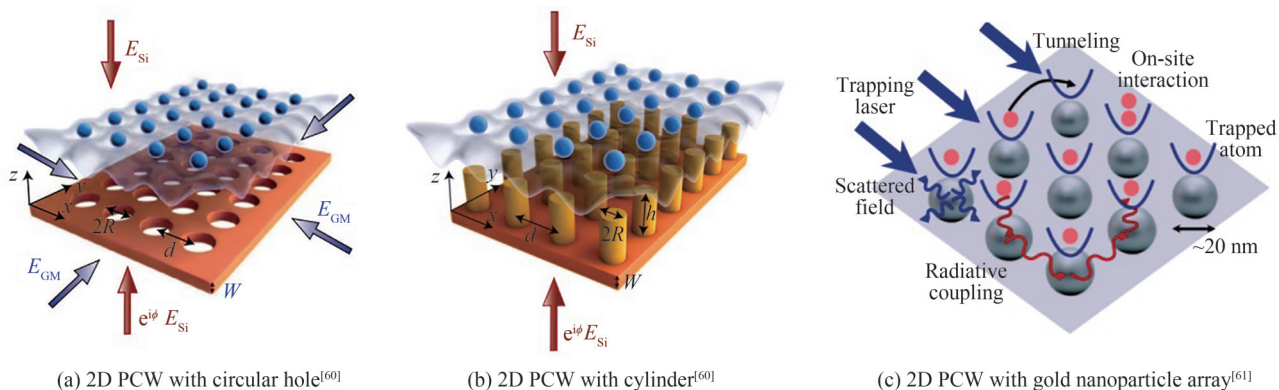


图9 二维光子晶体束缚原子示意  
Fig. 9 The structure of the 2D photonic crystal waveguide for trapping atoms

### 2.3 倏逝场与原子态的相互耦合作用

波导模式延伸到表面光场形成指数衰减分布的倏逝场,倏逝场可以作用于囚禁在近场的原子,实现原子与波导模式的直接耦合作用。波导模式可以通过倏逝场对原子态发生作用,同时原子又可以反作用于波



导模式,此外,原子与原子之间又可以通过波导模式相互影响。这部分主要介绍不同微结构的光场模式与原子态相互耦合的相关研究工作。

### 2.3.1 波导结构

光纤锥的直径越小,传输模式延伸到表面的光场越多,形成的倏逝场越强,因此,光纤锥的传输模式与其表面的原子通过倏逝场可以发生有效的相互耦合作用<sup>[46]</sup>。HAKUTA K 研究组于 2005 年通过实验观测光纤锥表面 Cs 原子的自发辐射特性,如图 10(a)所示,在光纤锥表面倏逝场的作用下,原子态发生改变,随着原子与光纤锥表面的距离减小,原子辐射到传输模式、自由空间速率呈指数增大<sup>[62]</sup>。同时,光纤锥表面的原子通过对倏逝场的散射作用而影响传输模式,如图 10(b)所示,随着原子与光纤锥表面的距离减小,处于基态(点线)和激发态(虚线)的原子对倏逝场的散射作用呈指数增大<sup>[63]</sup>。进一步的研究发现,光纤锥表面不同位置的原子之间也可以通过光纤锥传输模式的近场耦合而发生相互影响。如图 10(c)所示,双原子的相对位置发生改变时,原子的辐射速率发生相应的变化<sup>[64]</sup>。

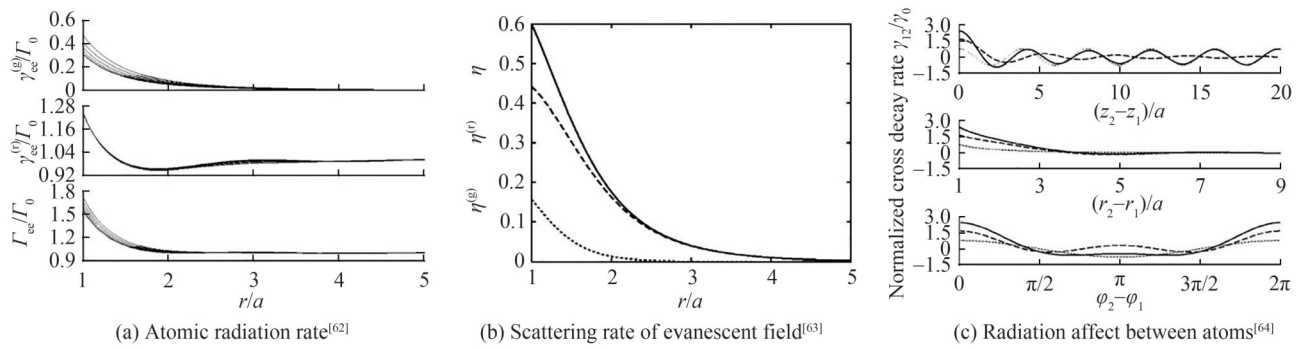


图 10 波导表面倏逝场与原子的相互作用

Fig. 10 The illustration of the coupling between the atom and the evanescent field on the waveguide

奥地利维也纳大学 RAUSCHENBEUTEL A 研究组将基于光纤锥的原子实验推向了量子领域。他们通过实验研究了光纤锥表面的 Cs 原子量子态的相干特性<sup>[65]</sup>,通过原子与光纤锥的耦合作用分别实现集成偏振隔离器和光存储<sup>[66, 67]</sup>。2020 年,该研究组实现光纤锥表面单个原子的捕获和成像,为研究原子的量子特性提供更好的实验技术<sup>[68]</sup>。接着他们利用与光纤锥弱耦合的 Cs 原子实现光纤内强关联光子态的制备<sup>[69]</sup>,通过光纤内的光场与光纤表面的原子耦合发生正交态压缩,从而使得时间能量纠缠的双光子实现解纠缠<sup>[70]</sup>。此外,他们还研究了光纤锥表面原子运动的量子效应和集体辐射效应<sup>[71, 72]</sup>,通过原子自旋来控制光纤非互易的拉曼放大<sup>[73]</sup>。这些研究展现了光纤锥表面原子独特的量子特性,并且将原子的量子效应很好的应用于集成光调控。法国的 LAURAT J 研究组通过光纤锥上的原子也进行了量子特性的研究,2016 年实验演示了光纤锥表面原子形成的布拉格原子光栅对光的布拉格反射现象<sup>[74]</sup>,接着实现光纤锥表面单原子阵列的纠缠激发,并对存储的纠缠态进行读取<sup>[75]</sup>。

由于波导模式的光场主要分布在波导内部,延伸到表面的倏逝场很少,这给集成波导囚禁原子的实验带来了困难<sup>[76, 77]</sup>。随着集成波导表面囚禁原子的技术逐渐走向成熟,可以实现波导表面的单原子囚禁,集成原子芯片的量子特性研究也得到开展。2020 年美国 KANNAN B 等通过集成波导囚禁原子的装置实现原子量子比特和波导模式的耦合,以及不同位置原子量子比特之间的耦合<sup>[78]</sup>。2021 年美国哈佛大学研究组通过集成量子波导与原子的耦合,实现波导表面上两个单原子之间的纠缠制备、快速无损原子态读取和原子比特的全量子控制<sup>[79]</sup>。

### 2.3.2 光子晶体结构

由于光子晶体内周期性的结构可以形成共振腔,共振增强场和原子之间可以发生很强的相互耦合作用<sup>[80]</sup>。因此,各种各样的光子晶体被用于与原子相互耦合,包括周期性圆孔光子晶体、周期性锯齿状光子晶体、周期性折射率分布的光子晶体以及超导光子晶体等。KIMBLE H J 研究组通过一维周期性圆孔光子晶体与原子的相互作用做了一系列研究工作,包括波导上原子的超辐射现象<sup>[81]</sup>,用波导上的原子阵列模拟量子多体<sup>[82]</sup>,原子之间在晶体能级边带发生耦合作用的现象<sup>[83]</sup>。TIECKE T G 等对光子晶体波导和原子也进

行了相关研究,通过原子与光子晶体波导模式的强耦合作用实现原子对光子相位的调控,演示了集成光子相位控制器的功能<sup>[84]</sup>。光子晶体波导与原子表现出很好的相互耦合特性和量子特性。

2020年美国SAMUTPRAPHOOT P等设计折射率周期性分布的光子晶体波导与原子耦合<sup>[85]</sup>,光子晶体波导的折射率周期性分布形成谐振腔,其共振模式的倏逝场可以与晶体表面的原子发生相互耦合作用。由于采用自由空间激光囚禁原子可以自由控制每个单原子的位置,因此观测单原子之间通过光子晶体波导腔模式的近场耦合而产生强耦合。基于此实验装置,研究了两个独立原子之间的纠缠制备、快速无损态读取和原子比特的全量子控制<sup>[79]</sup>。

### 2.3.3 回音壁微腔结构

在研究微纳结构与原子的近场相互作用过程中,不同的微结构既有其独特的优势又存在局限性。比如光纤锥可以提供很强的表面倏逝场用于原子囚禁和调控,但是存在机械振动限制了原子态的调控精度。集成波导虽然具有很好的稳定性,但是表面倏逝场强度有限,也给实验带来难度。光子晶体波导既可以提供增强的倏逝场又具有集成稳定性,但是对晶体结构要求很严格,实验灵活性受限。因此迫切需要一种微结构,既具以上各结构的优点同时又可以克服其缺点。圆形微环腔不仅支持高品质的回音壁模式,对光场模式具有共振增强作用,而且自由光谱范围小,腔内可以同时满足红蓝失谐光的共振,在腔表面形成稳定的光学偶极囚禁原子,同时腔模式通过倏逝场对原子态产生有效调控。圆形微环腔因在束缚和调控原子中的独特优势而受到广泛关注。

微球腔由于制作工艺简单,可以达到很高的Q值,在微腔表面形成很强的光场,因此最早被应用于与原子相互作用。由于微腔表面的倏逝场比较难形成稳定囚禁原子的光学偶极阱,一般通过自由空间光场辅助作用将原子囚禁在微腔表面,同时也提高了控制原子位置的自由度。美国KIMBLE H J研究组首先于1994年分析了绕微球腔运动的原子的物质波特性和<sup>[89]</sup>,接着研究了微球腔与原子的相互作用<sup>[90]</sup>。随着加工技术的发展,微环腔的Q值可以达到非常高,原子与微环腔的耦合研究也随之开展。2006年,KIMBLE H J研究组将单个Cs原子与微环腔光场模式进行耦合<sup>[86]</sup>,如图11(a)所示,在微环腔上方通过冷却激光获得冷原子,并将冷原子传送到微环腔表面与腔模式耦合,从而改变腔的透过谱。2018年以色列BECHLER O等通过Rb原子与微球腔的耦合装置,如图11(b)所示,在单光子拉曼作用下使得两个光子模式与原子双基态之间产生确定性干涉,实现单个原子态与光子态之间的量子比特转换<sup>[88]</sup>。

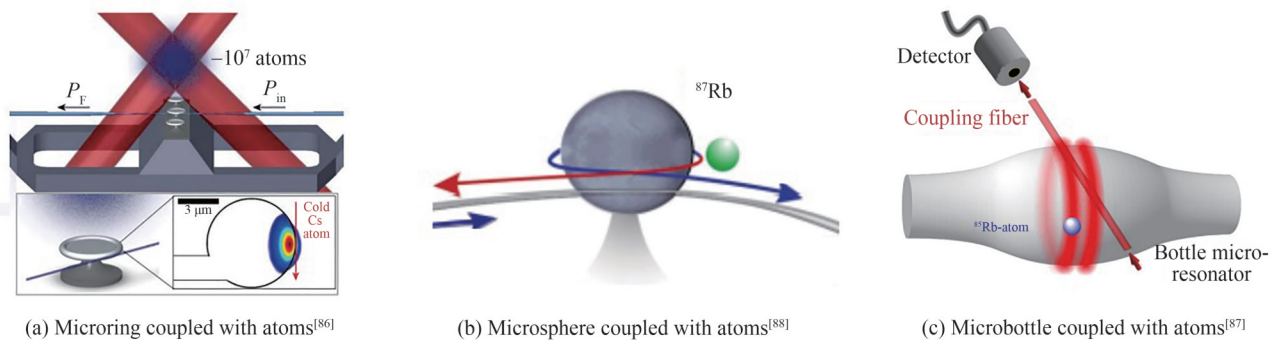


图11 各种与原子耦合的微腔结构

Fig. 11 The structure of the microcavity for coupling with the atoms

回音壁微瓶腔具有与微球腔类似的结构,如图11(c)所示,可以与原子产生相互耦合作用,而且具有更好的稳定性。2013年奥地利TAUSCHENBEUTEL A研究组通过回音壁微瓶腔与<sup>85</sup>Rb的耦合作用进行了一系列研究工作,研究了光场的纵向分量对Rb原子和微瓶腔耦合的影响<sup>[87]</sup>,通过<sup>87</sup>Rb原子与微瓶腔的强耦合作用使微瓶腔耦合的光纤内单光子之间产生非线性 $\pi$ 相移,实现高保真度纠缠光的制备<sup>[91]</sup>。2016年,该研究组通过控制Rb原子态来改变微瓶圆腔透光的方向,实现集成光纤的量子光学环形器<sup>[92]</sup>。早期的实验研究中,大多是采用自由下落的原子与回音壁腔相互作用,直至2021年,TAUSCHENBEUTEL A研究组通过腔表面反射的红失谐激光实现微球表面单个<sup>85</sup>Rb原子的囚禁,观测到了原子与微瓶腔的耦合作用产生的真空拉比劈裂现象<sup>[93]</sup>,在微腔与单原子的可控耦合作用方面迈出了重要一步。

微球、微瓶腔等结构虽然可以制备于集成芯片上,但很难与其他集成器件兼容,因此研究人员也在追求在平面芯片上的微腔上原子的囚禁和操控。根据电场的偏振方向,微环腔内共振的模式有TE和TM模,其基模的场分布如图12(a)。TM模式比TE模式具有更多的场分布在波导表面,形成的倏逝场与原子发生更强的相互作用,因此在实验中,主要考虑TM模式与原子的相互作用。由于微环腔内传输模式是圆周运动<sup>[94]</sup>,具有离心力,因此腔波导表面的倏逝场不是对称分布,这对束缚原子很不利,需要很大的腔模式强度才能够形成稳定的光纤偶极阱。在腔波导内,除了基模TM<sub>0</sub>还有高阶模式,其中TM<sub>1</sub>模式在波导表面的倏逝场分布是两边强中间弱,正好与基模的倏逝场分布(中间强两边弱)形成互补趋势。因此,在采用红蓝失谐TM<sub>0</sub>模式倏逝场囚禁腔波导表面原子的时候,通过引入高阶TM<sub>1</sub>模式来补偿TM<sub>0</sub>模式受离心力影响产生的偏移,提高有效势阱深度,从而降低囚禁原子对腔模式强度的要求<sup>[21]</sup>,为微环腔波导表面近场束缚原子提供可行的实验方案。

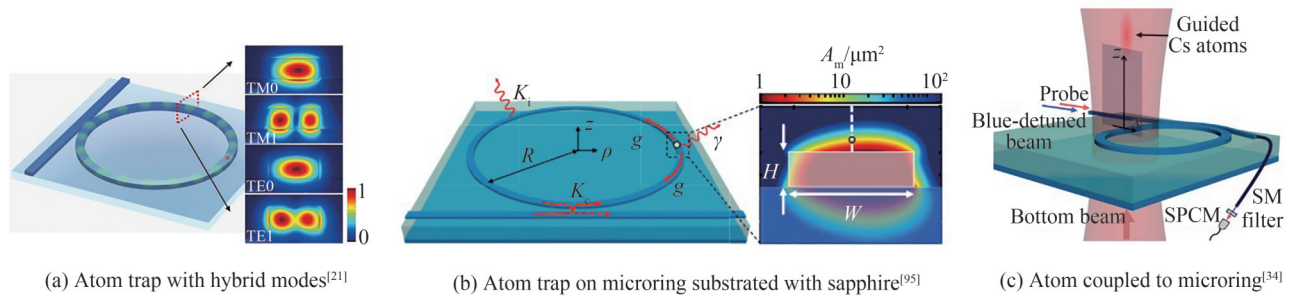


图12 集成微环腔与原子耦合示意

Fig. 12 The illustration of the coupling between the integrated microring resonator with the atoms

实验中,为了便于传送带将冷原子从MOT转移到微环腔波导表面,美国HUNG C L研究组设计了基于蓝宝石基底的SiN微环腔的原子芯片,如图12(b)。蓝宝石对可见光透明,激光可以从各个方向入射到波导表面形成原子传送带,将冷原子导入到腔波导表面。腔波导表面的红蓝失谐倏逝场对原子的共同作用力可以克服范德瓦尔斯力形成稳定的光学偶极阱,将原子囚禁于距离波导表面约100 nm的近场位置<sup>[95]</sup>。接着,实验制备了多个微环腔串联的结构,并分析了该结构与Cs原子的耦合作用<sup>[96]</sup>。2021年该课题组改进了在微环腔波导表面实现冷原子的近场囚禁的方案,如图12(c)所示,通过垂直于波导表面的红失谐光将原子传输到波导表面,再结合波导内蓝失谐光的倏逝场将原子囚禁在波导表面<sup>[34]</sup>。由于微环腔采用固体基底,具有很好的稳定性和可集成性,因此,该实验装置在原子芯片中具有很好的可扩展性和应用前景。

### 3 总结和展望

#### 3.1 亟待解决的关键科学问题

光子-原子芯片领域的研究还处于探索阶段,离在实际应用中发挥不可替代的作用还有一段距离。未来几年这一前沿研究领域亟待突破的关键科学问题包括以下几个方面。

1)单原子阵列技术。为了更好地应用于量子信息处理,稳定和高速捕获确定性单原子阵列是一个重要关键技术。实现原子量子比特的基本操控、芯片上原子与微腔的强耦合以及光子-原子纠缠是光子-原子芯片进一步应用于量子相关领域的必经之路。

2)多功能器件的集成。将芯片上的成熟光学器件,包括片上倍频频率转换、高速电光调制器、高频声光调制器与光子-原子芯片结合,开发更复杂的集成回路和更新颖的原子相关应用也是一个重要的技术发展方向。此外,结合近期蓬勃发展的Metasurface器件,可能可以进一步提升芯片上用于束缚和操控原子的空间光场的调控能力。

3)芯片上光子-原子混合波导器件的研究。可以预见集成波导上的偶极阱也可以构成原子物质波的波导,从而可以潜在实现原子物质波回路的各种器件。结合波导上光子与原子的强相互作用,这种芯片上光子-原子的混合集成回路有望用于开发原子物质波相关的应用,例如惯性传感。

此外,光子-原子芯片在技术上还有两个挑战,包括芯片与光纤的封装和芯片与真空的封装。一方面,

未来需要通过光纤实现芯片上的高效光学输入输出,能够实现多个端口多个波长的光纤到芯片的稳定耦合。而光纤与光子芯片的高效率耦合也是目前光子芯片研究领域的一个重要技术难点。另外一方面,原子系统目前对高真空的需求也制约着整个系统的进一步集成化,希望未来能够发展新的真空键合和封装技术,能够直接以芯片为基础实现冷原子系统所需真空。

### 3.2 未来展望

近十年光子-原子芯片技术得到了飞速发展,引起了光学、原子物理、量子信息等领域研究人员的关注。目前,已经在包括集成芯片上的原子冷却、单原子囚禁以及原子态探测等技术方面取得了一系列重要的实验进展。除了本文提到的冷原子相关的进展,热原子与光学芯片的封装也取得了很多进展,该系统中虽然原子与集成光学波导或微腔的相互作用时间较短,但是微纳结构增强的相互作用使热原子与芯片的结合在非线性和光谱学方面具有很大的吸引力。例如,以色列 LEVY U 研究组将 SiN 波导置于 Rb 原子气室内,研究在 Rb 原子作用下的微环腔的透过谱线<sup>[97]</sup>并用于片上频率参考<sup>[98]</sup>。现在光子-原子芯片的研究不断沿着可在常温下工作的、稳定的、高效率的方向发展,可以预期在光子-原子芯片上的高保真度的关键量子器件的研制能够推进量子精密测量、量子网络、量子计算等领域的发展。

**致谢:**感谢中国科学技术大学项国勇和徐磊、中国计量科学研究院刘小赤、山西大学张鹏飞的讨论与合作。

### 参考文献

- [1] SCHOSSER N, REYMOND G, PROTSSENKO I, et al. Sub-poissonian loading of single atoms in a microscopic dipole trap[J]. *Nature*, 2001, 411(6841): 1024-1027.
- [2] SCHRADER D, DOTSENKO I, KHUDAVERDYAN M, et al. Neutral atom quantum register[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(15): 150501.
- [3] MIROSHNYCHENKO Y, ALT W, DOTSENKO I, et al. An atom-sorting machine[J]. *Nature*, 2006, 442(7099): 151-151.
- [4] LI Mo, CHEN Feiliang, LUO Xiaojia, et al. Fundamental principles, key enabling technologies, and research progress of atom chips[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(2): 023701.  
李沫, 陈飞良, 罗小嘉, 等. 原子芯片的基本原理、关键技术及研究进展[J]. *物理学报*, 2021, 70(2): 023701.
- [5] QU Qiuzhi, XIA Wenbing, WANG Bin, et al. Integrating design of a compact optical system for space laser cooling application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0602003.  
屈求智, 夏文兵, 汪斌, 等. 空间激光冷却原子集成光学平台设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0602003.
- [6] LUAN X, BÉGUIN J B, BURGERS A P, et al. The integration of photonic crystal waveguides with atom arrays in optical tweezers[J]. *Advanced Quantum Technologies*, 2020, 3(11): 2000008.
- [7] JI Weibang, WANG Guiping, MA Jie, et al. Experimental study on fluorescence detection of cold Cs atoms using phase-lock detection technology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(5): 969-972.  
冀炜邦, 王贵平, 马杰, 等. 利用锁相探测技术探测冷铯原子荧光光谱的实验研究[J]. *光子学报*, 2008, 37(5): 969-972.
- [8] KAUFMAN A M, NI K K. Quantum science with optical tweezer arrays of ultracold atoms and molecules[J]. *Nature Physics*, 2021, 17(12): 1324-1333.
- [9] ZHANG Tiancai, WU Wei, YANG Pengfei, et al. High-finesse micro-optical Fabry-Perot cavity and its applications in strongly coupled cavity quantum electrodynamics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0127001.  
张天才, 毋伟, 杨鹏飞, 等. 高精度法布里-珀罗光学微腔及其在强耦合腔量子电动力学中的应用[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0127001.
- [10] YU Lei, YANG Shuangning, LIU Xueqing, et al. Ion beam etching assisted femtosecond laser machining to manufacture silicon carbide micro-optical components[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(12): 1214003.  
于磊, 杨双宁, 刘学青, 等. 离子束刻蚀辅助飞秒激光加工制备碳化硅微光学元件[J]. *光子学报*, 2018, 47(12): 1214003.
- [11] DONG Yuan, ZHONG Qize, ZHENG Yongjian, et al. Progress in wafer-level metasurface-based flat optics(Invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(10): 1024002.  
董渊, 钟其泽, 郑勇剑, 等. 晶圆级超构表面平面光学研究进展(特邀)[J]. *光子学报*, 2021, 50(10): 1024002.
- [12] HE Wen, LIU Aiping, WANG Qin. Detection of optical spin angular momentum with micro-nano helical groove structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(4): 0427002.  
何文, 刘爱萍, 王琴. 微纳螺旋凹槽结构检测光子自旋角动量[J]. *光子学报*, 2019, 48(4): 0427002.
- [13] LIU A, WU M, ZHUANG R, et al. On-chip generation of the reconfigurable orbital angular momentum with high order[J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 17957-17965.

- [14] HONG J, ZHOU X, ZHUANG R, et al. Nanoparticle trapping by counter-surface plasmon polariton lens[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(2): 023601.
- [15] LODAHL P, MAHMOODIAN S, STOBBE S, et al. Chiral quantum optics[J]. Nature, 2017, 541(7638): 473-480.
- [16] OVCHINNIKOV Y B, SHUL'GA S V, BALYKIN V I. An atomic trap based on evanescent light waves[J]. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 1991, 24(14): 3173.
- [17] OVCHINNIKOV Y B, MANEK I, GRIMM R. Surface trap for Cs atoms based on evanescent-wave cooling[J]. Physical Review Letters, 1997, 79(12): 2225.
- [18] CHEN L, HUANG C J, XU X B, et al. Planar-integrated magneto-optical trap[J]. Physical Review Applied, 2022, 17(3): 034031.
- [19] NSHII C C, VANGELEYN M, COTTER J P, et al. A surface-patterned chip as a strong source of ultracold atoms for quantum technologies[J]. Nature nanotechnology, 2013, 8(5): 321-324.
- [20] LIU A, LIU J, PENG W, et al. Multi-grating design for integrated single-atom trapping, manipulation, and readout[J]. Physical Review A, 2022, 105(5): 053520.
- [21] LIU A, XU L, XU X, et al. Proposal for stable atom trapping on a GaN-on-Sapphire chip[J]. arXiv preprint arXiv, 2022, 2205:12153.
- [22] LEE K I, KIM J A, NOH H R, et al. Single-beam atom trap in a pyramidal and conical hollow mirror[J]. Optics Letters, 1996, 21(15): 1177-1179.
- [23] VANGELEYN M, GRIFFIN P F, RIIS E, et al. Single-laser, one beam, tetrahedral magneto-optical trap[J]. Optics Express, 2009, 17(16): 13601-13608.
- [24] VANGELEYN M, GRIFFIN P F, RIIS E, et al. Laser cooling with a single laser beam and a planar diffractor[J]. Optics Letters, 2010, 35(20): 3453-3455.
- [25] LEE J, GROVER J A, OROZCO L A, et al. Sub-Doppler cooling of neutral atoms in a grating magneto-optical trap[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2013, 30(11): 2869-2874.
- [26] MCGILLIGAN J P, GRIFFIN P F, RIIS E, et al. Phase-space properties of magneto-optical traps utilising micro-fabricated gratings[J]. Optics Express, 2015, 23(7): 8948-8959.
- [27] COTTER J P, MCGILLIGAN J P, GRIFFIN P F, et al. Design and fabrication of diffractive atom chips for laser cooling and trapping[J]. Applied Physics B, 2016, 122(6): 1-6.
- [28] BARKER D S, NORRGARD E B, KLIMOV N N, et al. Single-beam Zeeman slower and magneto-optical trap using a nanofabricated grating[J]. Physical Review Applied, 2019, 11(6): 064023.
- [29] DUAN J, LIU X, ZHOU Y, et al. High diffraction efficiency grating atom chip for magneto-optical trap[J]. Optics Communications, 2022, 513: 128087.
- [30] WANG M, GUAN C, CHENG L, et al. Multicore fiber integrated beam shaping devices for long-range plasmonic trapping[J]. Optics Express, 2021, 29(18): 28416-28426.
- [31] MEHTA K K, BRUZEWICZ C D, MCCONNELL R, et al. Integrated optical addressing of an ion qubit[J]. Nature nanotechnology, 2016, 11(12): 1066-1070.
- [32] NIFFENEGGER R J, STUART J, SORACE-AGASKAR C, et al. Integrated multi-wavelength control of an ion qubit[J]. Nature, 2020, 586(7830): 538-542.
- [33] GRANADOS E, GRANADOS C, AHMED R, et al. Spectral synthesis of multimode lasers to the Fourier limit in integrated Fabry-Perot diamond resonators[J]. Optica, 2022, 9(3): 317-324.
- [34] ZHOU X, TAMURA H, CHANG T H, et al. Subwavelength precision optical guiding for trapped atoms coupled to a nanophotonic resonator[J]. arXiv preprint arXiv, 20212111:01119.
- [35] YU S, LU J, GINIS V, et al. On-chip optical tweezers based on freeform optics[J]. Optica, 2021, 8(3): 409-414.
- [36] HSU T W, ZHU W, THIELE T, et al. Single atom trapping in a metasurface lens optical tweezer[J]. arXiv preprint arXiv, 20212110:11559.
- [37] THOMPSON J D, TIECKE T G, DE LEON N P, et al. Coupling a single trapped atom to a nanoscale optical cavity[J]. Science, 2013, 340(6137): 1202-1205.
- [38] SCHRADER D, KUHR S, ALT W, et al. An optical conveyor belt for single neutral atoms[J]. Applied Physics B, 2001, 73(8): 819-824.
- [39] KUHR S, ALT W, SCHRADER D, et al. Deterministic delivery of a single atom[J]. Science, 2001, 293(5528): 278-280.
- [40] YU S P, MUNIZ J A, HUNG C L, et al. Two-dimensional photonic crystals for engineering atom-light interactions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116(26): 12743-12751.
- [41] BURGERS A P, PENG L S, MUNIZ J A, et al. Clocked atom delivery to a photonic crystal waveguide[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116(2): 456-465.
- [42] KIM M E, CHANG T H, FIELDS B M, et al. Trapping single atoms on a nanophotonic circuit with configurable tweezer

- lattices[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1–8.
- [43] BURES J, GHOSH R. Power density of the evanescent field in the vicinity of a tapered fiber[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1999, 16(8): 1992–1996.
- [44] LE KIEN F, BALYKIN V I, HAKUTA K. Atom trap and waveguide using a two-color evanescent light field around a subwavelength-diameter optical fiber[J]. *Physical Review A*, 2004, 70(6): 063403.
- [45] BERROIR J, BOUSCAL A, URVOY A, et al. Nanotrappy: An open-source versatile package for cold-atom trapping close to nanostructures[J]. *Physical Review Research*, 2022, 4(1): 013079.
- [46] NAYAK K P, MELENTIEV P N, MORINAGA M, et al. Optical nanofiber as an efficient tool for manipulating and probing atomic fluorescence[J]. *Optics Express*, 2007, 15(9): 5431–5438.
- [47] LE KIEN F, HAKUTA K. Spontaneous radiative decay of translational levels of an atom near a dielectric surface[J]. *Physical Review A*, 2007, 75(1): 013423.
- [48] TONG L, GATTASS R R, ASHCOM J B, et al. Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding[J]. *Nature*, 2003, 426(6968): 816–819.
- [49] BOUSTIMI M, BAUDON J, CANDORI P, et al. van der Waals interaction between an atom and a metallic nanowire[J]. *Physical Review B*, 2002, 65(15): 155402.
- [50] MCLACHLAN A D. Van der Waals forces between an atom and a surface[J]. *Molecular Physics*, 1964, 7(4): 381–388.
- [51] FU J, YIN X, LI N, et al. Atom waveguide and 1D optical lattice using a two-color evanescent light field around an optical micro/nano-fiber[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(2): 112–115.
- [52] VETSCH E, REITZ D, SAGUÉ G, et al. Optical interface created by laser-cooled atoms trapped in the evanescent field surrounding an optical nanofiber[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(20): 203603.
- [53] DAWKINS S T, MITSCH R, REITZ D, et al. Dispersive optical interface based on nanofiber-trapped atoms[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(24): 243601.
- [54] STIEVATER T H, KOZAK D A, PRUESSNER M W, et al. Modal characterization of nanophotonic waveguides for atom trapping[J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(12): 3826–3837.
- [55] BARNETT A H, SMITH S P, OLSHANII M, et al. Substrate-based atom waveguide using guided two-color evanescent light fields[J]. *Physical Review A*, 2000, 61(2): 023608.
- [56] BURKE JR J P, CHU S T, BRYANT G W, et al. Designing neutral-atom nanotraps with integrated optical waveguides[J]. *Physical Review A*, 2002, 65(4): 043411.
- [57] MENG Y, LEE J, DAGENAIS M, et al. A nanowaveguide platform for collective atom-light interaction[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(9): 091110.
- [58] HUNG C L, MEENEHAN S M, CHANG D E, et al. Trapped atoms in one-dimensional photonic crystals[J]. *New Journal of Physics*, 2013, 15(8): 083026.
- [59] GOBAN A, HUNG C L, YU S P, et al. Atom - light interactions in photonic crystals[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 1–9.
- [60] GONZÁLEZ-TUDELA A, HUNG C L, CHANG D E, et al. Subwavelength vacuum lattices and atom - atom interactions in two-dimensional photonic crystals[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(5): 320–325.
- [61] GULLANS M, TIECKE T G, CHANG D E, et al. Nanoplasmonic lattices for ultracold atoms[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(23): 235309.
- [62] LE KIEN F, GUPTA S D, BALYKIN V I, et al. Spontaneous emission of a cesium atom near a nanofiber: efficient coupling of light to guided modes[J]. *Physical Review A*, 2005, 72(3): 032509.
- [63] LE KIEN F, BALYKIN V I, HAKUTA K. Scattering of an evanescent light field by a single cesium atom near a nanofiber[J]. *Physical Review A*, 2006, 73(1): 013819.
- [64] LE KIEN F, GUPTA S D, NAYAK K P, et al. Nanofiber-mediated radiative transfer between two distant atoms[J]. *Physical Review A*, 2005, 72(6): 063815.
- [65] REITZ D, SAYRIN C, MITSCH R, et al. Coherence properties of nanofiber-trapped cesium atoms[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(24): 243603.
- [66] SAYRIN C, JUNGE C, MITSCH R, et al. Nanophotonic optical isolator controlled by the internal state of cold atoms[J]. *Physical Review X*, 2015, 5(4): 041036.
- [67] SAYRIN C, CLAUSEN C, ALBRECHT B, et al. Storage of fiber-guided light in a nanofiber-trapped ensemble of cold atoms[J]. *Optica*, 2015, 2(4): 353–356.
- [68] MENG Y, LIEDL C, PUCHER S, et al. Imaging and localizing individual atoms interfaced with a nanophotonic waveguide[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(5): 053603.
- [69] PRASAD A S, HINNEY J, MAHMOODIAN S, et al. Correlating photons using the collective nonlinear response of atoms weakly coupled to an optical mode[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(12): 719–722.
- [70] HINNEY J, PRASAD A S, MAHMOODIAN S, et al. Unraveling two-photon entanglement via the squeezing spectrum

- of light traveling through nanofiber-coupled atoms[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 127(12): 123602.
- [71] HÜMMER D, ROMERO-ISART O, RAUSCHENBEUTEL A, et al. Probing surface-bound atoms with quantum nanophotonics[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(16): 163601.
- [72] PENNETTA R, BLAHA M, JOHNSON A, et al. Collective radiative dynamics of an ensemble of cold atoms coupled to an optical waveguide[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(7): 073601.
- [73] PUCHER S, LIEDL C, JIN S, et al. Atomic spin-controlled non-reciprocal Raman amplification of fibre-guided light[J]. *Nature Photonics*, 2022: 1-4.
- [74] CORZO N V, GOURAUD B, CHANDRA A, et al. Large Bragg reflection from one-dimensional chains of trapped atoms near a nanoscale waveguide[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(13): 133603.
- [75] CORZO N V, RASKOP J, CHANDRA A, et al. Waveguide-coupled single collective excitation of atomic arrays[J]. *Nature*, 2019, 566(7744): 359-362.
- [76] WU Genzhu, WANG Xiaohua, WANG Yuxia, et al. Spontaneous emission characteristics of photonic quantum wells in slab waveguides[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(11):993-997.  
吴根柱, 王晓华, 王玉霞, 等. 平板波导光子阱中自发发射特性[J]. *光子学报*, 2000, 29(11):993-997.
- [77] ZHANG Bin, WANG Lei, JIA Yuechen, et al. Research advances of optical waveguides by light-manipulation based femtosecond laser writing(Invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(1): 0151106.  
张彬, 王磊, 贾曰辰, 等. 基于光场调控的飞秒激光直写光波导研究进展(特邀)[J]. *光子学报*, 2022, 51(1): 0151106.
- [78] KANNAN B, RUCKRIEGEL M J, CAMPBELL D L, et al. Waveguide quantum electrodynamics with superconducting artificial giant atoms[J]. *Nature*, 2020, 583(7818): 775-779.
- [79] ĐORĐEVIĆ T, SAMUTPRAPHOOT P, OCOLA P L, et al. Entanglement transport and a nanophotonic interface for atoms in optical tweezers[J]. *Science*, 2021, 373(6562): 1511-1514.
- [80] FORESI J S, VILLENEUVE P R, FERRERA J, et al. Photonic-bandgap microcavities in optical waveguides [J]. *Nature*, 1997, 390(6656): 143-145.
- [81] GOBAN A, HUNG C L, HOOD J D, et al. Superradiance for atoms trapped along a photonic crystal waveguide [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(6): 063601.
- [82] DOUGLAS J S, HABIBIAN H, HUNG C L, et al. Quantum many-body models with cold atoms coupled to photonic crystals[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(5): 326-331.
- [83] HOOD J D, GOBAN A, ASENJO GARCIA A, et al. Atom - atom interactions around the band edge of a photonic crystal waveguide[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(38): 10507-10512.
- [84] TIECKE T G, THOMPSON J D, DE LEON N P, et al. Nanophotonic quantum phase switch with a single atom[J]. *Nature*, 2014, 508(7495): 241-244.
- [85] SAMUTPRAPHOOT P, ĐORĐEVIĆ T, OCOLA P L, et al. Strong coupling of two individually controlled atoms via a nanophotonic cavity[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(6): 063602.
- [86] AOKI T, DAYAN B, WILCUT E, et al. Observation of strong coupling between one atom and a monolithic microresonator[J]. *Nature*, 2006, 443(7112): 671-674.
- [87] JUNGE C, O'SHEA D, VOLZ J, et al. Strong coupling between single atoms and nontransversal photons[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(21): 213604.
- [88] BECHLER O, BORNE A, ROSENBLUM S, et al. A passive photon - atom qubit swap operation[J]. *Nature Physics*, 2018, 14(10): 996-1000.
- [89] MABUCHI H, KIMBLE H J. Atom galleries for whispering atoms: binding atoms in stable orbits around an optical resonator[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(10): 749-751.
- [90] VERNOOY D W, KIMBLE H J. Quantum structure and dynamics for atom galleries [J]. *Physical Review A*, 1997, 55(2): 1239.
- [91] VOLZ J, SCHEUCHER M, JUNGE C, et al. Nonlinear  $\pi$  phase shift for single fibre-guided photons interacting with a single resonator-enhanced atom[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(12): 965-970.
- [92] SCHEUCHER M, HILICO A, WILL E, et al. Quantum optical circulator controlled by a single chirally coupled atom [J]. *Science*, 2016, 354(6319): 1577-1580.
- [93] WILL E, MASTERS L, RAUSCHENBEUTEL A, et al. Coupling a single trapped atom to a whispering-gallery-mode microresonator[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(23): 233602.
- [94] MA Lilong, XIE Minchao, OU Wei, et al. Fabrication and lasing properties of silicon-based GaN microcavities(Invited) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(2): 0251204.  
马立龙, 谢敏超, 欧伟, 等. 硅基 GaN 微腔制作及其激射特性(特邀)[J]. *光子学报*, 2022, 51(2): 0251204.
- [95] CHANG T H, FIELDS B M, KIM M E, et al. Microring resonators on a suspended membrane circuit for atom-light interactions[J]. *Optica*, 2019, 6(9): 1203-1210.
- [96] CHANG T H, ZHOU X, ZHU M, et al. Efficiently coupled microring circuit for on-chip cavity QED with trapped atoms[J].

- Applied Physics Letters, 2020, 117(17): 174001.
- [97] EDREI E, COHEN N, GERSTEL E, et al. Chip-scale atomic wave-meter enabled by machine learning[J]. Science Advances, 2022, 8(15): eabn3391.
- [98] ZEKTZER R, MAZURSKI N, BARASH Y. Nanoscale atomic suspended waveguides for improved vapour coherence times and optical frequency referencing[J]. Nature Photonics, 2021, 15(10): 772-779.

## Advances in Integrated Photonic-atom Chips (Invited)

LIU Aiping<sup>1</sup>, CHEN Guangjie<sup>2</sup>, CHEN Liang<sup>2</sup>, XU Xinbiao<sup>2</sup>, ZHANG Yanlei<sup>2</sup>, WANG Qin<sup>1</sup>,  
ZOU Changling<sup>2</sup>

(1 *Institute of Quantum Information and Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China*)

(2 *CAS Key Laboratory of Quantum Information, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

**Abstract:** In recent years, exciting progress are made in the research of micro-nano optical devices and integrated optical chips, which promotes the combination of various optics-related research fields and integrated optical technology. Atomic physics has also achieved great success in the last decades and had found applications in sensing, time-keeping, the search for new physics, and also the emerging quantum information sciences. Thanks to the close relationship between optics and atomic physics, the combination between the atomic physics and the integrated photonics chip allows a new research field of the photonic-atom chip, which holds the advantages of both research fields and holds the potential for portable atomic systems and also for the scalable quantum information processing platform.

In this paper, the development of this research field is reviewed. In general, the development of the photonic-atom chip could be divided into two paths. The first path is the chip-integrated magneto-optical trap and dipole traps in free space. Utilizing the compact multi-functional diffractive components and also chip-to-free space interfaces, the neutral atoms could be cooled, trapped, manipulated, and also read out by the structured optical fields in free space. Since the conventional bulky optical devices could be replaced by photonic chips, and thus the size of experimental setups for the atomic system could be greatly reduced. The second path focus on the near-field interaction between atom-photon structures. By trapping and conveying the cold atoms to the surface of the photonic chip, the single atoms could be trapped by the evanescent field of integrated waveguides and microresonators. Due to the strongly localized optical fields on the chip, the light-atom interaction could be greatly enhanced. Therefore, the photonic-atom chip could not only reduces the power consumption for atom trapping and transporting, but also allows the high-fidelity atom-photon entanglement, the manipulation, and readout of atomic quantum states, which promises the single photon-single atom quantum interfaces for potential quantum information processing units.

In the past two decades, attention has been attracted to the new research direction of the photonic atom chip, and great progress has been achieved in both theoretical and experimental aspects. In particular, this field lies at the intersections of photonics, atomic physics, and quantum information science. Now, the compact chip-integrated magneto-optics trap, single-atom trapping, and the detection of a single atom by integrated microresonators have been demonstrated. In this paper, we reviewed these exciting progress following the two distinct paths, focusing on either the free-space structural optical field or the near-field of the photonic micro-/nano-structures.

Although great efforts are dedicated to this field, only the principle of key photonic-atom chip devices are demonstrated, and we could envision that there are still several years to go to really apply these devices in applications. We want to point out the following perspective research topics. 1) The single-atom array on a photonic chip. By either confining single atoms on an array of microresonators or trapping the single atoms by the tweezer array generated by on-chip diffractive devices, a stable array of single atoms is promising. 2) The integration of multiple functional devices to form a fully-functional hybrid photonic-atomic integrated circuits. By incorporating mature photonic devices, including the high-efficient frequency



doubler, high-speed electro-optic modulator, and GHz-frequency acousto-optics modulators, into the photonic-atom chip, the more complex and novel atom-based applications could be developed. 3) The realization and manipulation of atomic matter-wave. We can imagine that the trapped atoms in the straight or bent waveguides could be treated as the matter-wave propagating along the waveguides, thus potential circuits of atom matter wave could be realized. Combining the atom-photon interaction in the same waveguide, these novel photonic and matter-wave circuits could be utilized for matter-wave applications, such as the inertial sensor.

**Key words:** Integrated photonic-atom chips; Optical dipole trap; Magnetic-optical trap; Evanescent field; Microring resonator

**OCIS Codes:** 230.3120; 130.3120; 250.5300