

光学学报

基于半导体量子点的片上手性纳米光子器件

肖珊^{1,2}, 许秀来^{1,2,3*}

¹中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家研究中心, 北京 100190;

²中国科学院拓扑量子计算卓越创新中心中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049;

³松山湖材料实验室, 广东 东莞 523808

摘要 手性量子光学在量子信息技术研究领域中受到了广泛的关注,其主要研究光在微纳结构中自旋依赖的手性耦合及传输行为。利用手性光与物质的相互作用可以增强光子与量子发射器的耦合,赋予纳米光子器件新的功能和应用,从而推动手性量子光学在量子信息领域中的大规模应用。主要对基于半导体量子点的片上手性纳米光子器件进行了综述,重点讨论了半导体量子点的光学性质和手性光与物质相互作用的物理机制,在此基础上对近年来应用手性耦合原理实现的多功能手性光子器件进行了总结,并对手性量子光学的未来应用场景进行了展望。

关键词 量子光学; 量子点; 手性; 纳米光子器件; 集成光学

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0327009

On-Chip Chiral Nanophotonic Devices Based on Semiconductor Quantum Dots

Xiao Shan^{1,2}, Xu Xiulai^{1,2,3*}

¹Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

²CAS Center for Excellence in Topological Quantum Computation and School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan, Guangdong 523808, China

Abstract Chiral quantum optics has received extensive attention in the field of quantum information technology, which mainly studies the spin-dependent chiral coupling and transmission behavior of light in micro and nano structures. The interaction between chiral light and matter can enhance the coupling between photons and quantum emitters and endow nano-photon devices with new functions and applications, thus promoting the large-scale application of chiral quantum optics in the field of quantum information. In this paper, the on-chip chiral nanophoton devices based on semiconductor quantum dots are reviewed, with emphasis on the optical properties of semiconductor quantum dots and the physical mechanism of the interaction between chiral light and matter. On this basis, the multi-functional chiral photon devices realized by chiral coupling principle in recent years are summarized, and the future application scenes of chiral quantum optics are prospected.

Key words quantum optics; quantum dots; chirality; nanophotonic devices; integrated optics

收稿日期: 2021-08-24; 修回日期: 2021-09-12; 录用日期: 2021-09-23

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFA1400700)、国家自然科学基金(62025507, 11934019, 11721404, 11874419)、广东省重点领域研发计划(2018B030329001)、中国科学院战略性先导科技专项(XDB28000000)

通信作者: *xlxu@iphy.ac.cn

1 引言

量子信息科学是近年来物理学领域最为活跃的研究前沿之一^[1]。基于量子态的叠加原理和量子不可克隆原理,有望实现指数级增长的量子计算、高效的量子信息隐形传态、绝对安全的量子通信以及更加精确的量子测量等^[2-15]。经过近几十年来科研工作者的不懈努力,量子信息在很多物理体系中取得了重要的研究进展,包括原子^[16-18]、电子和空穴自旋^[19-22]、超导约瑟夫森结^[23-25]、光子^[2,5,26-28]和离子阱^[29-32]等。其中,光子作为飞行量子比特,具有易于操控和探测、精确度高以及退相干效应小等优点,是开展量子信息科学研究极有潜力的物理体系之一^[2,5]。光子在信息的长程传输中充当载体,其可以与作为固态比特载体的半导体量子点(QDs)连接来实现量子点-光子界面,从而构建可扩展的光量子网络^[33-35]。在这个过程中,为了开发出一个有效的光与物质相互作用量子界面,需要增强单个光子与量子点的耦合^[36],而手性量子光学为实现这种界面的强耦合提供了一种新颖的思路^[37]。

手性量子光学主要研究的是光在微纳结构中自旋依赖的手性耦合及传输行为。在微纳结构中,光场由于受到很强的束缚会产生沿着传播方向的电场分量,从而将局域光场的手性圆偏振光锁定在光的传播方向上,即光自旋-轨道耦合效应^[37-38]。因此,基于偏振偶极跃迁的量子点发射器可以实现与束缚光场的单向性耦合。利用这种手性效应可以抑制发射光子的随机性,从而实现单光子级别的手性光与物质的强耦合。近年来,随着微纳加工技术的快速发展,更多微纳尺度的高精度光子器件被制造出来。将基于手性量子光学的光场自旋操控方式应用在光子器件的设计中,可以进一步促进面向光量子芯片集成领域的小型化多功能光量子器件的蓬勃发展。本文对基于半导体量子点的片上手性纳米光子器件进行综述,主要分为三个部分,第一部分介绍自组装半导体量子点的光学性质,第二部分讨论手性光与物质相互作用的物理机制,第三部分介绍片上手性纳米光子器件的研究进展。

2 自组装半导体量子点的光学性质

半导体量子点是准零维的纳米结构,其中载流子的运动在三个空间维度上都受到了限制,故形成了具有类原子特性的分立能级结构。目前,利用外延技术和化学合成方式生长的量子点都被广泛

研究。在外延生长过程中,通过 Stranski-Krastanow 生长模式生长的自组装半导体量子点具有强发光和窄光谱等优异的光学性质,其是研究单量子态物理的理想系统。自组装半导体量子点已经在多种不同的半导体材料体系中被制备出来,包括 II-VI 族^[39-41]、III-V 族^[42-45]和 IV-VI 族^[46-47]。在这些材料体系中,在砷化镓(GaAs)材料上制备的砷化铟(InAs)量子点受到了广泛的研究。InAs 量子点可以作为理想的单光子源,它的多光子发射概率接近于零^[48-49]。通过光学方法可以实现量子点、激子和自旋相干量子比特的初始化、操控和读取^[19]。此外,基于 GaAs 工艺的单元器件的设计与制备技术已经相对成熟,可以实现各种具有单片集成单光子源的光学量子芯片^[50-53]。

2.1 自组装半导体量子点

自组装生长方法适用于晶格失配较大的材料体系。对于 InAs/GaAs 量子点体系,由于两种材料的晶格常数相差较大,晶格失配度约为 7%,InAs 会通过弹性形变来适应晶格失配。在生长的过程中,首先在 GaAs 上形成浸润层,其内部存在应力,当生长在 GaAs 上的 InAs 层达到临界厚度(约 1.7 个单原子层)时,累积的应力会随机释放并自发形成一种三维的岛状结构,这种岛状结构即为量子点,其扫描电镜透射模式(STEM)图像如图 1(a)所示。从图 1(a)可以看出量子点的直径约为 15~25 nm,而高度通常约为 5 nm^[54]。量子点的尺寸大小会影响分立的能级结构,从而改变发出荧光的谱线波长。为了避免量子点表面氧化和缺陷导致其性能的下降,在量子点上会继续生长一层 GaAs 材料,因此 InAs 量子点层的上下部分都是 GaAs 材料。

量子点在三维空间中具有量子限域效应,故其具有类似于原子的分立能级结构。对于 InAs/GaAs 量子点体系,InAs 量子点的禁带宽度比 GaAs 材料窄。InAs 中会形成一个能束缚电子和空穴的三维势阱。量子点的能级示意图如图 1(b)所示^[51]。导带中基态电子的原子轨道函数具有 s 波对称性,即自旋简并态;价带中基态空穴的原子轨道函数具有 p 波对称性,可分为重空穴、轻空穴和自旋轨道分裂带。由于轻空穴和自旋轨道分裂带的能量与重空穴的能量相差较大,因此在讨论量子点激子态的过程中,通常只考虑重空穴的影响。实验中通常采用光致荧光(PL)方法对量子点体系进行研究。通过外加能量高于 GaAs 带隙的激光可以激发材料中的电子和空穴,这些载流子会弛豫到浸润层,随后

被量子点捕获并通过声子辅助弛豫到量子点的最低能级。电子和空穴由于库仑相互作用而束缚在一起,从而形成激子。最后通过自发辐射使电子和空穴复合,从而发出一个光子。上述激发过程为非共振激发,这个过程可以形成多种不同的激子态,如图 1(c)所示^[55],其中包括中性激子 X^0 、带负电荷激子 X^- 、带正电荷激子 X^+ 和双激子 XX 等。由于不同激子态间库仑相互作用的强度不同,所以对应的荧光光子能量也不同。图 1(d)展示了 4.2 K 温度下单个 InAs/GaAs 量子点中不同激子态的荧光光谱图^[54],可以看出单个量子点的发光在荧光光谱中表现为一系列分立的尖峰,其线宽取决于光学弛豫时间以及杂质和声子散射等退相干机制。目前,在实验中已经实现了基于 InAs/GaAs 量子点的高亮度、高单光子纯度、高保真度和强不可区分性的优良单光子源^[56-57]。此外,通过光场、电场和磁场等多种方式可以实现对量子点中不同激子态的精确操控^[58-69]。因此,自组装半导体量子点是实现相干操控量子态的理想候选材料,在固态量子信息处理中具有良好的适用性。

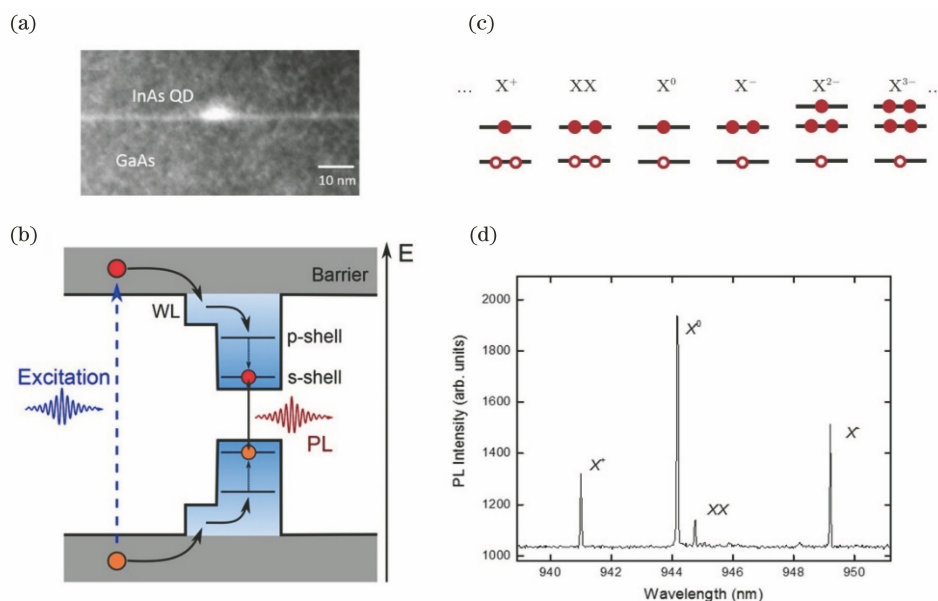


图 1 半导体量子点的光学性质。(a) InAs 量子点的 STEM 图像^[54]; (b) 量子点的能级示意图^[51];

(c) 量子点不同激子态示意图^[55]; (d) 4.2 K 温度下单个量子点的荧光光谱图^[54]

Fig. 1 Optical properties of semiconductor quantum dot. (a) STEM image of InAs quantum dot^[54]; (b) energy level diagram of quantum dot^[51]; (c) schematic of different exciton states of quantum dot^[55]; (d) fluorescence spectrum of single quantum dot at 4.2 K^[54]

2.2 量子点的磁场调控

磁场作为外场可以有效调节量子点的能级结构和操控其自旋态。例如通过塞曼分裂可以解除电子和空穴的自旋简并^[65-67],以及通过抗磁效应可以调节电子和空穴的波函数^[68-74]。此外,通过施加不同几何构型的磁场可以构建新的量子点能级结构并实现亮态和暗态的耦合^[75]。因此,研究磁场对单个量子点中激子能态及其光致发光过程的影响,在量子自旋比特操控实验中起到非常重要的作用。

当施加沿着样品生长方向的磁场(法拉第构型)时,量子点中的载流子因受到与运动方向垂直的洛伦兹力而作回旋运动。等效来看,磁场为载流子在横向上施加一个额外的束缚作用,而这种束缚作用可以通过磁场特征长度 $l_B = \sqrt{\hbar/eB}$ 来表示,其中 \hbar

为约化普朗克常数, e 为电荷, B 为磁场强度。在弱磁场中,当磁场特征长度与量子点的横向尺寸大小相当时,激子辐射复合的能量可以表示为 $E(B) = E_0 \pm g_{ex}\mu_B B + \gamma_{dia} B^2$,公式中的第二项和第三项即为激子的塞曼效应和抗磁效应。其中 E_0 为在零磁场中量子点的激子能级,反映了量子点在平面内的基态量子限制能; g_{ex} 为激子的有效朗德 g 因子,其与磁场成正比,描述了磁场作用下激子峰的分裂尺寸; γ_{dia} 为抗磁系数,其与磁场的平方成正比,反映出磁场会导致能量转移^[55]; μ_B 为玻尔磁子。

在法拉第磁场中激子存在塞曼效应,导致电子和空穴自旋能态的简并会被解除。受跃迁选择定则的限制,只有自旋量子数相差 ± 1 的电子和空穴可以束缚形成激子并辐射复合发出光子,因此产生的

为约化普朗克常数, e 为电荷, B 为磁场强度。在弱磁场中,当磁场特征长度与量子点的横向尺寸大小相当时,激子辐射复合的能量可以表示为 $E(B) = E_0 \pm g_{ex}\mu_B B + \gamma_{dia} B^2$,公式中的第二项和第三项即为激子的塞曼效应和抗磁效应。其中 E_0 为在零磁场中量子点的激子能级,反映了量子点在平面内的基态量子限制能; g_{ex} 为激子的有效朗德 g 因子,其与磁场成正比,描述了磁场作用下激子峰的分裂尺寸; γ_{dia} 为抗磁系数,其与磁场的平方成正比,反映出磁场会导致能量转移^[55]; μ_B 为玻尔磁子。

在法拉第磁场中激子存在塞曼效应,导致电子和空穴自旋能态的简并会被解除。受跃迁选择定则的限制,只有自旋量子数相差 ± 1 的电子和空穴可以束缚形成激子并辐射复合发出光子,因此产生的

两种跃迁所对应的光子具有不同的偏振特性,分别为左旋圆偏振光和右旋圆偏振光。图 2(a)展示了单激子发光峰的磁光光谱^[76],可以看出在磁场的作用下,激子的发光峰分裂两支且分别向高能侧和低能侧移动。由此可见,利用磁场可以对单量子点的能级结构进行调节并实现对自旋的精确操控,因此载流子可以在一种自旋态重复跃迁不改变自旋状态的情况下实现特定偏振光子的发射。例如利用皮秒激光脉冲可以控制外磁场实现快速且高保真的

空穴自旋初始化^[77];在外磁场中可以获得具有优良特性的偏振单光子源和纠缠光子对^[19,49];此外,将量子点集成进入光学微腔,通过调节磁场可以选择性调控自旋态与腔模的耦合强度,从而实现量子点-微腔耦合体系的弱耦合[图 2(c)]^[78]和强耦合[图 2(d)]^[79]。因此,电子自旋比特具有与环境耦合弱、相干时间长以及可以在自旋相干周期内进行多次操控等特点,在量子信息和量子计算等领域具有广泛的应用前景。

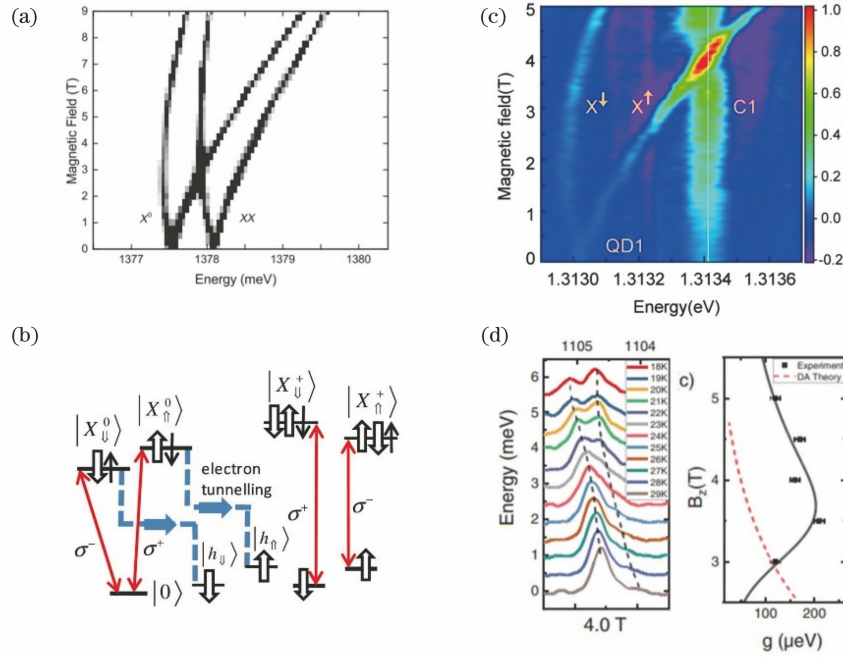


图 2 半导体量子点的磁场调控。(a)量子点的磁光光谱^[76]; (b)量子点中的空穴自旋初始化^[77]; (c)量子点与微腔的弱耦合^[78]; (d)量子点与微腔的强耦合^[79]

Fig. 2 Magnetic field regulation of semiconductor quantum dot. (a) Magneto-optical spectrum of quantum dot^[76]; (b) hole spin initialization in quantum dot^[77]; (c) weak coupling between quantum dot and microcavity^[78]; (d) strong coupling between quantum dot and microcavity^[79]

3 手性光与物质相互作用的物理机制

本节将讨论纳米光子器件中手性光场的分布情况及手性光与物质相互作用的物理机制。在很多纳米光子器件中,光场由于在与传播方向垂直的平面上受到很强的束缚而携带横向自旋角动量,故表现出光场的局部圆偏振态。这种圆偏振态可以与光的传播方向建立起一一对应的关系,从而实现光子的定向发射。因此,光与物质的相互作用是非互易的,其耦合强度依赖于光的传播方向。

下面介绍手性光耦合的物理机制。在波导中考虑一束沿着 Z 轴传播的电磁波,其电场可以表示为

$$E_{\pm}(\mathbf{r}, t) = \left[\frac{\epsilon_{\pm}(\mathbf{r})}{2} \right] \exp[-i(\omega t \mp kz)] + c. c., \quad (1)$$

式中: \mathbf{r} 为位置矢量; t 为传播时间; $\epsilon_{\pm}(\mathbf{r})$ 为复振幅; ω 为角频率; k 为波矢大小; z 为光的传播方向; $c. c.$ 为复共轭。根据高斯定律, $E_{\pm}(\mathbf{r}, t)$ 的纵向场分量和横向场分量可以简化为

$$\epsilon_{\pm, z} = \mp \frac{i}{k} \left(\frac{\partial \epsilon_{\pm, x}}{\partial x} + \frac{\partial \epsilon_{\pm, y}}{\partial y} \right), \quad (2)$$

式中: $\epsilon_{\pm, z}$ 为纵向分量; $\epsilon_{\pm, x}$ 和 $\epsilon_{\pm, y}$ 分别为 x 方向和 y 方向的横向分量; i 为纵向分量与横向分量之间具有 $\pm \pi/2$ 的相位差,该相位差的符号由光的传播方向决定,且纵向分量的强度与横向分量的强度

成正比。当电场的横向分量在长度为 $1/k$ 的范围内有大幅度变化时,纵向分量和横向分量相当。因此,局域椭圆偏振场会在平面上产生,且携带垂直于光传播方向的横向自旋角动量。当纵向分量和横向分量等振幅时,在平面上会产生圆偏振。图 3 展示了纳米光纤[图 3(a)]和光子晶体波导[图 3(b)]的局部光场分布^[37]。线偏振场位于波导结构的中心区域,而圆偏振场位于波导两侧的边缘附近,且圆偏振场的旋向沿着波导中心发生反转。由于麦克斯韦方程的时间反演对称性,横向自旋角动量的方向可以与光的传播方向建立起联系,即自旋-轨道耦合相互作用,其是实现手性光与物质相互作用的关键。因此,纳米光子结构的设计可以利用手性耦合来调控光的传播方向,从而应用于光学信息的操纵。

接下来讨论自旋-动量锁定效应对单个量子发射器与一对相反方向传播光学模式相互作用的影响。由于光与物质相互作用的基本过程,如光子发射、吸收和散射依赖于光的角动量,故光与量子发射器的手性耦合强度发生改变。这种耦合强度可以通过 β 因子来描述^[37],表示为

$$\beta_{\pm} = \frac{\gamma_{\pm}}{\gamma_{+} + \gamma_{-} + \Gamma_{\text{out}}}, \quad (3)$$

式中: $\gamma_{\pm} \propto |d^* \cdot \epsilon_{\pm}|^2$ 为发射进入向前和向后传播模式的光子衰减率,其中 d^* 为复偶极矩; Γ_{out} 为发射进入其他辐射模式的光子衰减率。当横向自旋角动量存在时, $\beta_{+} \neq \beta_{-}$,因此向前和向后传播模式的光子衰减率是不等的,即 $\gamma_{+} \neq \gamma_{-}$ 。对于实现理想的单向耦合,需要 $\beta_{\pm} \approx 1$ 。(3)式描述了自发辐射进入向前和向后传播模式的衰减率与总衰减率的比值。此外,引入手性对比度来量化非对称发射的特性,表达式为

$$C = \frac{\beta_{-} - \beta_{+}}{\beta_{-} + \beta_{+}}. \quad (4)$$

由于量子点内重空穴激子跃迁的偶极矩主要垂直于量子点的生长方向,所以通常将量子点近似为与波导耦合的电偶极子。在模拟中,采用两个相位差为 $\pm\pi/2$ 的正交偶极子源作为圆偏振光源,同样线性偏振光源也可以通过单个偶极子源来实现。理想情况下,对于量子点与纳米光子结构的手性耦合,需要同时实现 $\beta_{\pm} = 1$ 和 $C = 1$ 。因此,如何在纳米光子器件的设计和实验中实现手性相互作用的超高效率和超高方向性也是近年来手性量子光学的研究重点。

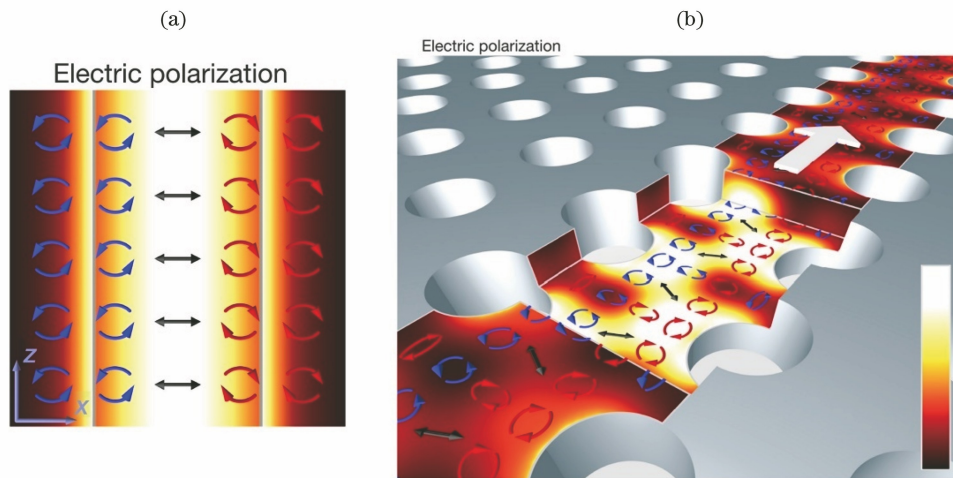


图 3 微纳结构的光场分布。(a)光纤中的光场分布^[37];(b)光子晶体波导中的光场分布^[37]

Fig. 3 Optical field distribution in nanostructure. (a) Optical field distribution in optical fiber^[37]; (b) optical field distribution in photonic crystal waveguide^[37]

4 手性量子光学在光子器件中的应用

基于自旋-动量锁定效应可以赋予传统器件新的功能和应用。目前,手性光子传输已经在手性光与物质相互作用的各种光量子器件中实现。这些手性光量子器件可以实现圆偏振光分离、单向路由、光场耦合、能量分束和输出通道转换调控等多重功能,具有

结构紧凑、易于集成、稳定性强和功能丰富等诸多优点,在信息的自旋-路径编码及可扩展的片上手性量子光学网络的研究和应用方面具有良好的潜力。

4.1 条形波导

芯片上单光子的路由通常是通过波导来实现的。波导中高于环境折射率的介质可以使光子在其中以束缚态的形式进行传输。根据手性耦合原理,

量子发射器自发辐射的光子可以大部分耦合进入波导,从而实现有效的光与物质相互作用。

图 4(a)展示了一种完全被真空环境包围的 GaAs 条形波导的结构^[80],量子点层位于波导内部的中心区域。通过合理设计波导的高宽比可以使其具有单模特性。对于实际测试来说,需要将光有效地耦合进入波导或者从波导耦合出去,从而实现光互联。例如,需要将激光引入器件中对量子点进行光学激发;或在没有片上探测器的情况下,需要将量子点自发辐射进入波导的光子耦合到片外进行测量。因此,采用端面耦合器和光栅耦合器可以实现光的耦合进出。端面耦合器具有耦合效率高和工作

带宽宽等优势,但是其只能位于芯片的边缘,无法进行在线测试^[81-84]。光栅耦合器作为表面耦合器件具有体积小、位置灵活、耦合对准容差大以及可进行在线测试等优势,但是其耦合效率相对较低^[85-89]。目前,已经提出了多种解决方法来提高光栅耦合器的耦合效率,如芯片背面镀金属反射层以及加工过程中采用浅刻蚀工艺等,使得这类耦合器更好地适用于量子光学芯片。图 4(a)的波导结构即采用光栅耦合器,利用光栅的布拉格衍射效应来改变光场的传播方向,使衍射光在垂直于芯片表面的方向上相互干涉而得到增强,从而完成光信号从波导传输模式耦合进垂直方向的自由空间光场中。

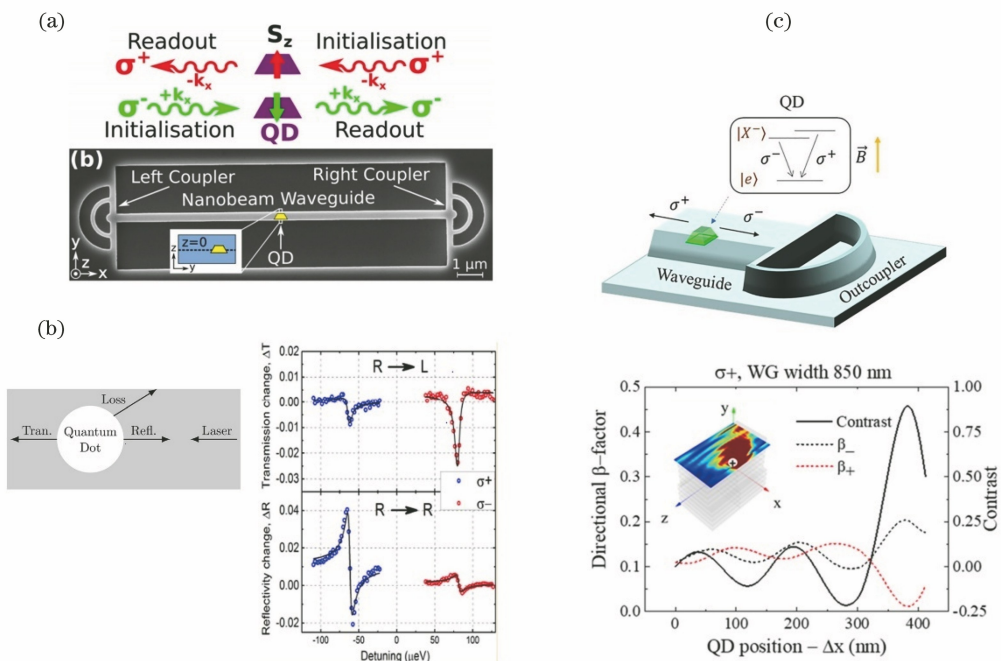


图 4 条形波导中的手性。(a)自旋态的单向传输^[80]; (b)手性耦合量子点的透射谱的单向性^[93]; (c)波导中位置依赖的手性耦合^[94]

Fig. 4 Chirality in strip waveguide. (a) Unidirectional transport of spin state^[80]; (b) unidirectionality of transmission spectrum of chiral coupled quantum dot^[93]; (c) position-dependent chiral coupling in waveguide^[94]

基于这种波导结构已经实现了共振荧光光子与波导模式的耦合,并沿着垂直于激发的方向传输^[90]。由于激发和收集位置的空间分离,故波导的几何结构可以从共振荧光中分离出杂散激发光。此后,利用外加电场对波导中的量子点进行调控,获得了近寿命线宽的光子发射,实现了高效率 and 相干的光量子-物质相互作用^[91]。尽管波导的几何形状和材料是非手性的,但仍然存在手性行为。2016 年, Coles 等^[92]对悬浮条形波导中的手性效应开展研究,在理论和实验上均实现了量子点自旋态的单向光子发射,手性对比度高,即 $95\% \pm 5\%$,此后实现

了路径所依赖的自旋高保真度的初始化和读出[图 4(a)]^[80]。2018 年, Hurst 等^[93]在共振光的激励下探索了量子点激子自旋耦合到纳米光子波导的强非互易行为,发现手性耦合量子点的透射谱与传输方向有明显的相关性[图 4(b)]。2019 年, Mrowiński 等^[94]利用原位电子束光刻技术将量子点确定性地集成到 GaAs 分布式布拉格发射器(DBR)中,如图 4(c)所示,系统地探索了手性耦合对量子点在波导中位置的依赖关系。波导结构作为一个有效的自旋-光子界面,为片上单光子的生成和操纵并实现自旋比特和飞行比特之间的转换提供了

平台。其中,自旋态可以映射到光子的传播方向上实现单向传输,相反光子的传播方向也可以映射到自旋状态,这种自旋-路径转换的可逆性在未来自旋量子光学网络的建设中起到重要的作用。

4.2 光子晶体波导

光子晶体是介质的介电常数在空间呈现周期性变化的结构^[95-96]。由于介电常数的周期性变化对电磁场的调制,结构会出现光子能带与光子带隙。在空气孔型二维光子晶体结构中引入线缺陷可以形成光子晶体波导结构,线缺陷可以通过消除一行或多行介质孔或改变介质孔的形状、尺寸或位置等几何参数来引入。光子晶体波导作为一维光子传输结构,在滤波、光存储、全光电开关与全光逻辑门等领域具有广泛的应用前景^[97-102]。

W1 型波导是由沿着三角形晶格的 Γ -K 方向设计介质孔制成的。由于线缺陷的存在,这种光子晶体波导在二维带隙内会出现局域缺陷态,因此与缺陷态对应的光子就可以通过缺陷位置来传播。这些波导的模式具有高色散性,不同波矢处对应的群速度不同。群速度在光子晶体波导中会大幅度减小,可以通过改变晶格结构来控制。2015 年,

Young 等^[103]通过对光子晶体波导中的局域态密度进行分析,证明了相位不对称对光与物质相互作用的影响并构建了一个确定的手性光子界面,如图 5(a)所示。Lang 等^[104]还证明了波导内部手性圆偏振场的出现对样品制备过程中存在的无序现象具有良好的鲁棒性。此外,通过将 W1 型波导区域一侧的光子晶格沿着波导轴向移动半个晶格常数,可以使光子晶体波导具有滑移对称性,如图 5(b)所示^[105]。这种滑移波导结构会在具有慢光增强局域态密度的区域产生局部圆偏振场,其除了可以将光的局域偏振场锁定在光的传播方向上,还可以实现对由带隙导致的量子点耦合进辐射模式的抑制,以及对由慢光特性导致的量子点耦合进入光子晶体波导模式的增强。在实验上,2015 年 Söllner 等^[105]在滑移波导结构中实现了耦合强度大于 98% 的圆偏振光子发射。因此,利用慢光效应来增加光学态的局域态密度实现对光子自旋轨道相互作用的操控是当前手性量子光学领域的研究热点之一。基于半导体量子点的慢光手性光子器件有望在量子光子比特缓存、路由和存储等方面起到巨大作用,从而促进量子信息领域的发展。

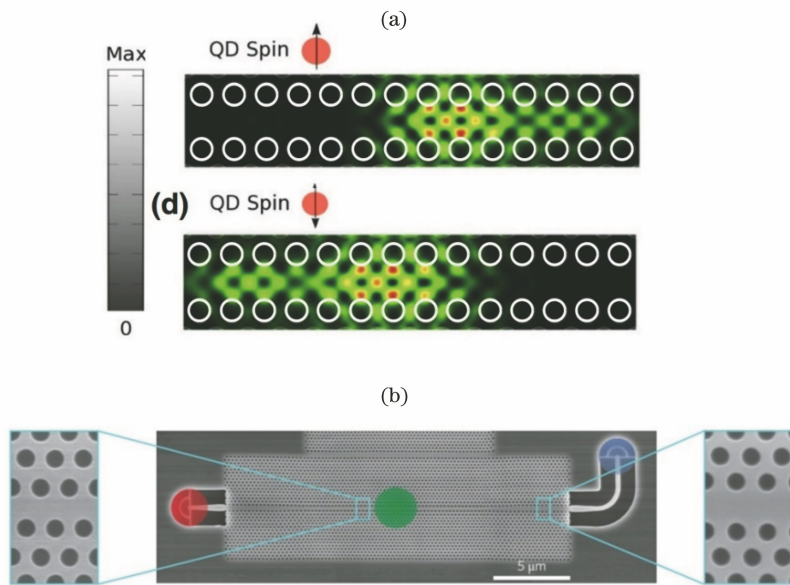


图 5 光子晶体波导中的手性。(a) W1 型光子晶体波导中的手性^[103]; (b) 滑移动波导结构^[105]

Fig. 5 Chirality in photonic crystal waveguide. (a) Chirality in W1-type photonic crystal waveguide^[103]; (b) glide-plane waveguide structure^[105]

4.3 手性光子分束器

利用波导的手性原理可以赋予纳米光子器件新的功能和应用,从而扩大手性纳米光子结构在片上集成光子芯片和片上光信息处理中的应用。不局限于一维准直传输的单向光子发射,通过设计集成量

子光源的片上手性光子器件可以实现偏振分束以及输出通道转换调控等诸多功能,从而提升器件的功能性和复杂性。

2021 年, Xiao 等^[106]在耦合单量子点的交叉波导结构中实现了位置依赖的手性耦合,如图 6(a)所

示,其中量子点被随机嵌入到两根正交放置的波导的交叉区域。他们通过计算 4 个输出端口的手性对比度随着右圆极化偶极子在交叉区域的变化,可以清晰地看出 4 个输出端口的手性对比度受位置的影响较大,而对比度的正负值取决于偶极子的位置,同时也反映了 4 个输出端口输出光的偏振情况。在实验中,他们选取分布在交叉区域不同位置的量子点来表征该器件的手性。通过改变量子点的位置,在单个波导(水平或竖直)以及两个波导中可以同时实现高方向性的单光子定向发射。因此,该器件具有偏振确定的单向波导和分束器的双重功能。此后,他们利用两个横向相邻的波导和嵌入波导耦合区内的量子点设计了一种用于实现确定性圆偏振光定向路由且具有分束功能的紧凑手性光子器件,如

图 6(b)所示^[107]。其中,量子点跃迁偶极矩所对应的偏振态与波导内束缚圆偏振光场实现了单向耦合,使得左右旋圆偏振光分离,并同时路由至不同的传播方向。此后,圆偏振光经由波导间倏逝场耦合效应分束至不同的传输路径并输出。利用空间选择性微区荧光光谱测量成功观测到了可确定且高方向性的圆偏振光子的定向发射和分束,手性对比度高达 0.84。进一步,他们通过改变量子点光源在波导中的位置,观测到了手性传输方向的改变,实现了圆偏振光输出通道的转换调控,因此实现了量子发射器在微纳结构中的不同位置对手性光输出通道的转换调控。手性光子器件的最新进展促进了光与物质相互作用的实现,为未来片上非互易量子光源、量子光学电路和可扩展的手性量子光学网络的设计提供了新的范例。

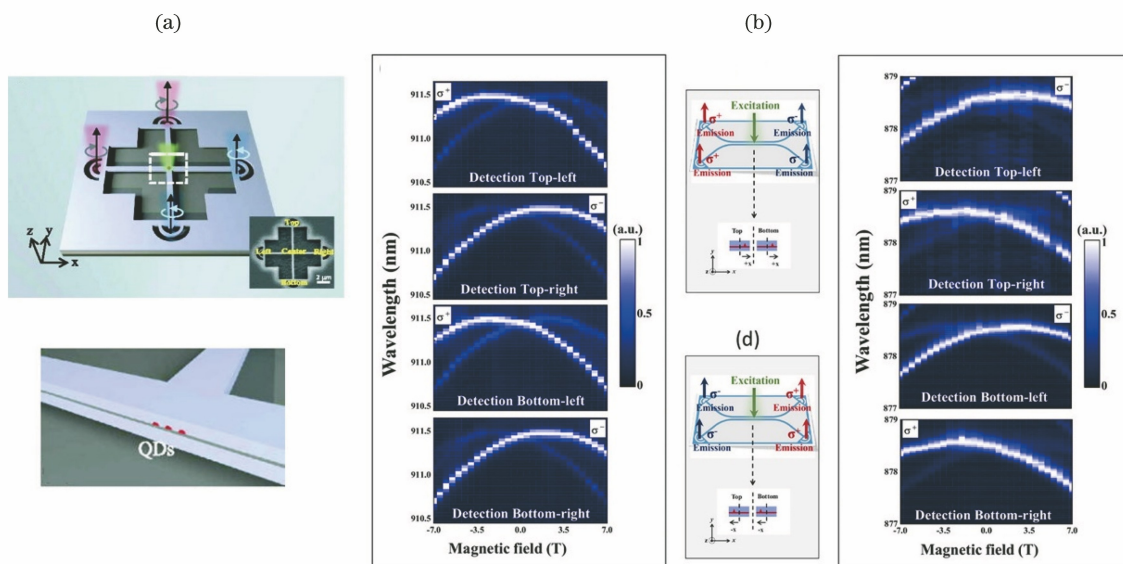


图 6 手性光子器件。(a)交叉波导中的手性传输^[106]; (b)光子器件中自旋和位置依赖的手性耦合^[107]

Fig. 6 Chiral photonic devices. (a) Schematic diagram of chiral transport in cross-waveguides^[106];

(b) spin- and position-dependent chiral coupling in chiral photonic devices^[107]

5 结 论

手性量子光学在量子信息科学领域中受到了广泛的关注。微纳光学结构中垂直于传播方向的横向自旋为光与物质的相互作用提供了一个新的自由度,可以实现对光子自发辐射方向的调控。本文对基于半导体量子点的片上手性纳米光子器件进行了综述,介绍了自组装量子点的基本光学性质,以及磁场作用下激子态的载流子自旋和外场的塞曼分裂以及抗磁效应,为后续量子点的自旋特性应用于手性微纳光学结构提供了基础。此后,介绍了微纳结构中手性光与物质相互作用的物理机制并总结了多种

类型和功能的手性光子器件的最新研究进展。基于手性耦合原理的手性纳米光子器件的实现拓宽了手性量子光学的应用场景,推动了纳米光子学与量子光学交叉研究方向的发展,对固态量子光学芯片及扩展量子光学网络的实现具有重要的意义。下一步,结合更为先进的半导体微纳加工技术实现更多高精度的集成量子光学器件和系统,突破光子操控的多物理限制,实现对量子信息载体的单光子进行高效的控制与传递。

参 考 文 献

- [1] Bennett C H, DiVincenzo D P. Quantum information and computation[J]. Nature, 2000, 404

- (6775): 247-255.
- [2] O'Brien J L, Furusawa A, Vučković J. Photonic quantum technologies[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(12): 687-695.
- [3] Wang J W, Sciarrino F, Laing A, et al. Integrated photonic quantum technologies [J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(5): 273-284.
- [4] O'Brien J L. Optical quantum computing [J]. *Science*, 2007, 318(5856): 1567-1570.
- [5] Kok P, Munro W J, Nemoto K, et al. Linear optical quantum computing with photonic qubits[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2007, 79(1): 135.
- [6] Jin X M, Ren J G, Yang B, et al. Experimental free-space quantum teleportation [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(6): 376-381.
- [7] Bouwmeester D, Pan J W, Mattle K, et al. Experimental quantum teleportation [J]. *Nature*, 1997, 390(6660): 575-579.
- [8] Pirandola S, Eisert J, Weedbrook C, et al. Advances in quantum teleportation [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(10): 641-652.
- [9] Aspuru-Guzik A, Walther P. Photonic quantum simulators[J]. *Nature Physics*, 2012, 8(4): 285-291.
- [10] Tanzilli S, Tittel W, Halder M, et al. A photonic quantum information interface [J]. *Nature*, 2005, 437(7055): 116-120.
- [11] Walls D F, Collet M J, Milburn G J. Analysis of a quantum measurement [J]. *Physical Review D*, 1985, 32(12): 3208-3215.
- [12] Chantasri A, Dressel J, Jordan A N. Action principle for continuous quantum measurement [J]. *Physical Review A*, 2013, 88(4): 042110.
- [13] Yamamoto N, Nurdin H I, James M R, et al. Avoiding entanglement sudden death via measurement feedback control in a quantum network [J]. *Physical Review A*, 2008, 78(4): 042339.
- [14] Cook R L, Martin P J, Geremia J M. Optical coherent state discrimination using a closed-loop quantum measurement [J]. *Nature*, 2007, 446(7137): 774-777.
- [15] Bose S. Quantum communication through an unmodulated spin chain [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(20): 207901.
- [16] Schrader D, Dotsenko I, Khudaverdyan M, et al. Neutral atom quantum register[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(15): 150501.
- [17] Saffman M. Quantum computing with atomic qubits and Rydberg interactions: progress and challenges [J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2016, 49(20): 202001.
- [18] Levine H, Keesling A, Omran A, et al. High-fidelity control and entanglement of Rydberg-atom qubits [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(12): 123603.
- [19] Warburton R J. Single spins in self-assembled quantum dots[J]. *Nature Materials*, 2013, 12(6): 483-493.
- [20] Greilich A, Economou S E, Spatzek S, et al. Ultrafast optical rotations of electron spins in quantum dots [J]. *Nature Physics*, 2009, 5(4): 262-266.
- [21] Hanson R, Awschalom D D. Coherent manipulation of single spins in semiconductors[J]. *Nature*, 2008, 453(7198): 1043-1049.
- [22] Neumann P, Mizuochi N, Rempp F, et al. Multipartite entanglement among single spins in diamond [J]. *Science*, 2008, 320(5881): 1326-1329.
- [23] Devoret M H, Schoelkopf R J. Superconducting circuits for quantum information: an outlook [J]. *Science*, 2013, 339(6124): 1169-1174.
- [24] Berkley A J, Xu H, Ramos R C, et al. Entangled macroscopic quantum states in two superconducting qubits[J]. *Science*, 2003, 300(5625): 1548-1550.
- [25] Bocko M F, Herr A M, Feldman M J. Prospects for quantum coherent computation using superconducting electronics [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 1997, 7(2): 3638-3641.
- [26] Bussi eres F, Clausen C, Tiranov A, et al. Quantum teleportation from a telecom-wavelength photon to a solid-state quantum memory [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(10): 775-778.
- [27] Gazzano O, de Vasconcellos S M, Arnold C, et al. Bright solid-state sources of indistinguishable single photons [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1425.
- [28] F ortsch M, F urst J U, Wittmann C, et al. A versatile source of single photons for quantum information processing [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1818.
- [29] Kielpinski D, Monroe C, Wineland D J. Architecture for a large-scale ion-trap quantum computer[J]. *Nature*, 2002, 417(6890): 709-711.
- [30] Stick D, Hensinger W K, Olmschenk S, et al. Ion trap in a semiconductor chip [J]. *Nature Physics*, 2006, 2(1): 36-39.
- [31] Monroe C, Kim J. Scaling the ion trap quantum processor [J]. *Science*, 2013, 339(6124): 1164-1169.
- [32] Home J P, Hanneke D, Jost J D, et al. Complete

- methods set for scalable ion trap quantum information processing [J]. *Science*, 2009, 325 (5945): 1227-1230.
- [33] Troiani F, Hohenester U, Molinari E. Exploiting exciton-exciton interactions in semiconductor quantum dots for quantum-information processing [J]. *Physical Review B*, 2000, 62(4): R2263.
- [34] Akopian N, Lindner N H, Poem E, et al. Entangled photon pairs from semiconductor quantum dots [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(13): 130501.
- [35] Moreau E, Robert I, Manin L, et al. Quantum cascade of photons in semiconductor quantum dots [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87 (18): 183601.
- [36] Lodahl P, Mahmoodian S, Stobbe S. Interfacing single photons and single quantum dots with photonic nanostructures [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2015, 87(2): 347.
- [37] Lodahl P, Mahmoodian S, Stobbe S, et al. Chiral quantum optics [J]. *Nature*, 2017, 541(7638): 473-480.
- [38] Abujetas D R, Sánchez-Gil J A. Spin angular momentum of guided light induced by transverse confinement and intrinsic helicity [J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(2): 534-545.
- [39] Ko H C, Park D C, Kawakami Y, et al. Self-organized CdSe quantum dots onto cleaved GaAs (110) originating from Stranski-Krastanow growth mode [J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 70(24): 3278-3280.
- [40] Schikora D, Schwedhelm S, As D J, et al. Investigations on the Stranski-Krastanow growth of CdSe quantum dots [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(4): 418-420.
- [41] Tinjod F, Robin I C, André R, et al. Key parameters for the formation of II-VI self-assembled quantum dots [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2004, 371(1/2): 63-66.
- [42] Ledentsov N N, Shchukin V A, Grundmann M E, et al. Direct formation of vertically coupled quantum dots in Stranski-Krastanow growth [J]. *Physical Review B*, 1996, 54(12): 8743-8750.
- [43] Wang L G, Kratzer P, Moll N, et al. Size, shape, and stability of InAs quantum dots on the GaAs (001) substrate [J]. *Physical Review B*, 2000, 62 (3): 1897.
- [44] Leonard D, Pond K, Petroff P M. Critical layer thickness for self-assembled InAs islands on GaAs [J]. *Physical Review B*, 1994, 50(16): 11687.
- [45] Fafard S, Wasilewski Z, McCaffrey J, et al. InAs self-assembled quantum dots on InP by molecular beam epitaxy [J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 68(7): 991-993.
- [46] Raab A, Springholz G. Oswald ripening and shape transitions of self-assembled PbSe quantum dots on PbTe (111) during annealing [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77(19): 2991-2993.
- [47] Abtin L, Springholz G, Holy V. Surface exchange and shape transitions of PbSe quantum dots during overgrowth [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97 (26): 266103.
- [48] Strauf S, Stoltz N G, Rakher M T, et al. High-frequency single-photon source with polarization control [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(12): 704-708.
- [49] Senellart P, Solomon G, White A. High-performance semiconductor quantum-dot single-photon sources [J]. *Nature Nanotechnology*, 2017, 12(11): 1026-1039.
- [50] Lodahl P. Quantum-dot based photonic quantum networks [J]. *Quantum Science and Technology*, 2018, 3(1): 013001.
- [51] Hepp S, Jetter M, Portalupi S L, et al. Semiconductor quantum dots for integrated quantum photonics [J]. *Advanced Quantum Technologies*, 2019, 2(9): 1900020.
- [52] Karabchevsky A, Katiyi A, Ang A S, et al. On-chip nanophotonics and future challenges [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(12): 3733-3753.
- [53] Iwamoto S, Ota Y, Arakawa Y. Recent progress in topological waveguides and nanocavities in a semiconductor photonic crystal platform [J]. *Optical Materials Express*, 2021, 11(2): 319-333.
- [54] Peng K. Quantum state control and detection in single quantum dots [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
彭凯. 单量子点中量子态的操控与探测 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [55] Tang J, Xu X L. Magneto optical properties of self-assembled InAs quantum dots for quantum information processing [J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(2): 027804.
- [56] Sapienza L, Davanço M, Badolato A, et al. Nanoscale optical positioning of single quantum dots for bright and pure single-photon emission [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7833.
- [57] Arakawa Y, Holmes M J. Progress in quantum-dot single photon sources for quantum information technologies: a broad spectrum overview [J]. *Applied Physics Reviews*, 2020, 7(2): 021309.
- [58] Press D, Ladd T D, Zhang B Y, et al. Complete

- quantum control of a single quantum dot spin using ultrafast optical pulses [J]. *Nature*, 2008, 456 (7219): 218-221.
- [59] Yoneda J, Takeda K, Otsuka T, et al. A quantum-dot spin qubit with coherence limited by charge noise and fidelity higher than 99.9 [J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(2): 102-106.
- [60] Gerardot B D, Brunner D, Dalgarno P A, et al. Optical pumping of a single hole spin in a quantum dot[J]. *Nature*, 2008, 451(7177): 441-444.
- [61] Berezovsky J, Mikkelsen M H, Stoltz N G, et al. Picosecond coherent optical manipulation of a single electron spin in a quantum dot[J]. *Science*, 2008, 320(5874): 349-352.
- [62] Peng K, Wu S Y, Xie X, et al. Giant photocurrent enhancement by Coulomb interaction in a single quantum dot for energy harvesting [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(2): 024015.
- [63] Brunner D, Gerardot B D, Dalgarno P A, et al. A coherent single-hole spin in a semiconductor [J]. *Science*, 2009, 325(5936): 70-72.
- [64] Ramsay A J, Boyle S J, Kolodka R S, et al. Fast optical preparation, control, and readout of a single quantum dot spin [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(19): 197401.
- [65] Mar J D, Baumberg J J, Xu X L, et al. Ultrafast high-fidelity initialization of a quantum-dot spin qubit without magnetic fields [J]. *Physical Review B*, 2014, 90(24): 241303.
- [66] Tang J, Cao S, Gao Y N, et al. Charge state control in single InAs/GaAs quantum dots by external electric and magnetic fields [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(4): 041109.
- [67] Mar J D, Xu X L, Baumberg J J, et al. Bias-controlled single-electron charging of a self-assembled quantum dot in a two-dimensional-electron-gas-based *n-i*-Schottky diode [J]. *Physical Review B*, 2011, 83(7): 075306.
- [68] Godden T M, Quilter J H, Ramsay A J, et al. Coherent optical control of the spin of a single hole in an InAs/GaAs quantum dot[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108: 017402.
- [69] de Greve K, McMahon P L, Press D, et al. Ultrafast coherent control and suppressed nuclear feedback of a single quantum dot hole qubit [J]. *Nature Physics*, 2011, 7(11): 872-878.
- [70] Högele A, Kroner M, Seidl S, et al. Spin-selective optical absorption of singly charged excitons in a quantum dot[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86 (22): 221905.
- [71] Toft I, Phillips R T. Hole *g* factors in GaAs quantum dots from the angular dependence of the spin fine structure[J]. *Physical Review B*, 2007, 76 (3): 033301.
- [72] Nakaoka T, Saito T, Tatebayashi J, et al. Size, shape, and strain dependence of the *g* factor in self-assembled In (Ga) As quantum dots [J]. *Physical Review B*, 2004, 70(23): 235337.
- [73] Schulhauser C, Haft D, Warburton R J, et al. Magneto-optical properties of charged excitons in quantum dots [J]. *Physical Review B*, 2002, 66 (19): 193303.
- [74] Tsai M F, Lin H, Lin C H, et al. Diamagnetic response of exciton complexes in semiconductor quantum dots [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(26): 267402.
- [75] van Bree J, Silov A Y, Koenraad P M, et al. *G* factors and diamagnetic coefficients of electrons, holes, and excitons in InAs/InP quantum dots [J]. *Physical Review B*, 2012, 85(16): 165323.
- [76] Wu S Y, Peng K, Xie X, et al. Electron and hole *g* tensors of neutral and charged excitons in single quantum dots by high-resolution photocurrent spectroscopy [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 14(1): 014049.
- [77] Peng K, Wu S Y, Tang J, et al. Probing the dark-exciton states of a single quantum dot using photocurrent spectroscopy in a magnetic field [J]. *Physical Review Applied*, 2017, 8(6): 064018.
- [78] Ren Q J, Lu J, Tan H H, et al. Spin-resolved Purcell effect in a quantum dot microcavity system [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(7): 3455-3459.
- [79] Qian C J, Xie X, Yang J N, et al. Enhanced strong interaction between nanocavities and *p*-shell excitons beyond the dipole approximation [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(8): 087401.
- [80] Coles R J, Price D M, Royall B, et al. Path-dependent initialization of a single quantum dot exciton spin in a nanophotonic waveguide [J]. *Physical Review B*, 2017, 95(12): 121401.
- [81] Mu X, Wu S L, Cheng L R, et al. Edge couplers in silicon photonic integrated circuits: a review [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(4): 1538.
- [82] Bakir B B, de Gyves A V, Orobtcchouk R, et al. Low-loss (< 1 dB) and polarization-insensitive edge fiber couplers fabricated on 200-mm silicon-on-insulator wafers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(11): 739-741.
- [83] Romero-García S, Marzban B, Merget F, et al. Edge couplers with relaxed alignment tolerance for pick-and-place hybrid integration of III-V lasers with SOI waveguides [J]. *IEEE Journal of Selected*

- Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(4): 369-379.
- [84] Papes M, Cheben P, Benedikovic D, et al. Fiber-chip edge coupler with large mode size for silicon photonic wire waveguides [J]. Optics Express, 2016, 24(5): 5026-5038.
- [85] Selvaraja S K, Vermeulen D, Schaekers M, et al. Highly efficient grating coupler between optical fiber and silicon photonic circuit [C]//2009 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2009 Conference on Quantum electronics and Laser Science Conference, June 2-4, 2009, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2009: 1-2.
- [86] Roelkens G, Van Thourhout D, Baets R. High efficiency grating coupler between silicon-on-insulator waveguides and perfectly vertical optical fibers [J]. Optics Letters, 2007, 32(11): 1495-1497.
- [87] Mekis A, Gloeckner S, Masini G, et al. A grating-coupler-enabled CMOS photonics platform [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(3): 597-608.
- [88] Ding Y, Peucheret C, Ou H, et al. Fully etched apodized grating coupler on the SOI platform with 0.58 dB coupling efficiency [J]. Optics Letters, 2014, 39(18): 5348-5350.
- [89] Ding Y, Ou H, Peucheret C. Ultrahigh-efficiency apodized grating coupler using fully etched photonic crystals [J]. Optics Letters, 2013, 38(15): 2732-2734.
- [90] Makhonin M N, Dixon J E, Coles R J, et al. Waveguide coupled resonance fluorescence from on-chip quantum emitter [J]. Nano Letters, 2014, 14(12): 6997-7002.
- [91] Thyrrstrup H, Kiršanské G, Le Jeannic H, et al. Quantum optics with near-lifetime-limited quantum-dot transitions in a nanophotonic waveguide [J]. Nano Letters, 2018, 18(3): 1801-1806.
- [92] Coles R J, Price D M, Dixon J E, et al. Chirality of nanophotonic waveguide with embedded quantum emitter for unidirectional spin transfer [J]. Nature Communications, 2016, 7: 11183.
- [93] Hurst D L, Price D M, Bentham C, et al. Nonreciprocal transmission and reflection of a chirally coupled quantum dot [J]. Nano Letters, 2018, 18(9): 5475-5481.
- [94] Mrowiński P, Schnauber P, Gutsche P, et al. Directional emission of a deterministically fabricated quantum dot-Bragg reflection multimode waveguide system [J]. ACS Photonics, 2019, 6(9): 2231-2237.
- [95] Joannopoulos J D, Johnson S G, Winn J N, et al. Photonic crystals [M]. Princeton: Princeton University Press, 2011.
- [96] Busch K, von Freymann G, Linden S, et al. Periodic nanostructures for photonics [J]. Physics Reports, 2007, 444: 101-202.
- [97] Costa R, Melloni A, Martinelli M. Bandpass resonant filters in photonic-crystal waveguides [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(3): 401-403.
- [98] Qiu M, Jaskorzynska B. Design of a channel drop filter in a two-dimensional triangular photonic crystal [J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(6): 1074-1076.
- [99] Umemori K I, Kanamori Y, Hane K. Photonic crystal waveguide switch with a microelectromechanical actuator [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(2): 021102.
- [100] Mingaleev S F, Miroshnichenko A E, Kivshar Y S, et al. All-optical switching, bistability, and slow-light transmission in photonic crystal waveguide-resonator structures [J]. Physical Review E, 2006, 74(4): 046603.
- [101] Fu Y L, Hu X Y, Gong Q H. Silicon photonic crystal all-optical logic gates [J]. Physics Letters A, 2013, 377(3/4): 329-333.
- [102] Rani P, Kalra Y, Sinha R K. Realization of AND gate in Y shaped photonic crystal waveguide [J]. Optics Communications, 2013, 298/299: 227-231.
- [103] Young A B, Thijssen A C T, Beggs D M, et al. Polarization engineering in photonic crystal waveguides for spin-photon entanglers [J]. Physical Review Letters, 2015, 115(15): 153901.
- [104] Lang B, Beggs D M, Young A B, et al. Stability of polarization singularities in disordered photonic crystal waveguides [J]. Physical Review A, 2015, 92(6): 063819.
- [105] Söllner I, Mahmoodian S, Hansen S L, et al. Deterministic photon-emitter coupling in chiral photonic circuits [J]. Nature Nanotechnology, 2015, 10(9): 775-778.
- [106] Xiao S, Wu S Y, Xie X, et al. Position-dependent chiral coupling between single quantum dots and cross waveguides [J]. Applied Physics Letters, 2021, 118(9): 091106.
- [107] Xiao S, Wu S Y, Xie X, et al. Chiral photonic circuits for deterministic spin transfer [J]. Laser & Photonics Reviews, 2021, 15(9): 2100009.