

# 二维平板光子晶体微腔与波导的耦合

钱琛江<sup>1</sup>, 谢 昕<sup>1</sup>, 杨静南<sup>1</sup>, 赵彦辉<sup>1</sup>, 唐 静<sup>1</sup>, 许秀来<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院物理研究所光物理重点实验室, 北京 100190;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 光子晶体是介质介电常数呈周期性排布的结构, 具有光子带隙, 处于光子带隙中的电磁波无法在其中传播。二维平板光子晶体是通过在衬底上刻蚀周期性排列的空气孔柱而形成的结构, 由于其具有优良的控制光传播的特性而得到广泛的研究和应用。介绍了在二维平板光子晶体中引入缺陷形成的光子晶体微腔和波导的方法和性质。通过调整几何参数控制微腔与波导之间的耦合, 实现基于二维平板光子晶体的全光开关、光存储、单光子源等光学器件并讨论其在量子光学网络中的应用。

**关键词** 集成光学; 光子晶体; 微腔; 波导; 耦合

**中图分类号** O432      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.030001

## Coupling of Two-Dimensional Slab Photonic Crystal Micro-Cavities and Waveguides

Qian Chenjiang<sup>1</sup>, Xie Xin<sup>1</sup>, Yang Jingnan<sup>1</sup>, Zhao Yanhui<sup>1</sup>, Tang Jing<sup>1</sup>, Xu Xiulai<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Photonic crystal is a structure with periodic dielectric constant and it has photonic band gap, in which the electromagnetic wave can not propagate in the structure. Two-dimensional slab photonic crystals can be fabricated by etching periodic air holes on a slab substrate, which has been investigated and applied extensively because of their good control of light propagation. Photonic crystal micro-cavities and waveguides can be achieved by introducing defects in the two-dimensional slab photonic crystal. The coupling of micro-cavities and waveguides can be controlled by adjusting geometric parameters, so as to realize the optical devices based on two-dimensional slab photonic crystals such as optical switching, optical storage and single photon source, etc. Properties of the micro-cavities and waveguides of two-dimensional slab photonic crystals are introduced, and their coupling control and potential applications in optical quantum information processing are discussed as well.

**Key words** integrated optics; photonic crystal; micro-cavity; waveguide; coupling

**OCIS codes** 130.5296; 230.5298; 270.5585

## 1 引 言

光子晶体是介质介电常数在空间上呈周期排布的结构。由于周期性介电常数对电磁场的调制, 出现了光子能带和光子带隙。根据周期性排布的维度, 光子晶体可以分为一维、二维、三维光子晶体。1996年 Krauss 等<sup>[1]</sup>通过在二氧化硅衬底上刻蚀出周期性排列的空气柱, 在可见光区域制备出了二维平板光子晶体。由于二维平板光子晶体易于加工制备, 光子禁带可以控制在可见光区域内, 因此被广泛应用于太阳能电

**收稿日期:** 2016-10-26; **收到修改稿日期:** 2016-11-10

**基金项目:** 国家 973 计划(2013CB328706, 2014CB921003)、国家自然科学基金(91436101, 61275060, 61675228)、中国科学院先导项目(XDB07030200)

**作者简介:** 钱琛江(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事光子晶体微腔与量子体系耦合方面的研究。

E-mail: qiancj005@fastmail.com

**导师简介:** 许秀来(1975—), 男, 博士, 研究员, 主要从事量子光电子学方面的研究。E-mail: xlxu@iphy.ac.cn(通信联系人)

池<sup>[2]</sup>、激光器<sup>[3]</sup>等领域,是近年来光子晶体的热门研究方向之一。

在二维平板光子晶体中引入缺陷可以形成光子晶体微腔和波导。光子晶体微腔具有高品质因子(Q值),小模式体积(V)的特点,因此对研究腔量子电动力学、光与物质的相互作用具有重要的意义<sup>[4]</sup>。目前,对于单个光子晶体微腔的研究已经在理论以及实验上取得了大量的研究进展,近年来 Noda 等<sup>[5]</sup>制备出了 Q 值达到  $10^6$  的超高品质微腔,Yoshie 等<sup>[6]</sup>实现了光子晶体微腔与量子点的强耦合。同时,光子晶体的设计很灵活,易于实现多种微腔间的耦合。耦合的微腔可以进行能量转移,从而成为了集成光路中所需要的基本元件,如超快激光器<sup>[3]</sup>、光存储<sup>[7]</sup>、可调谐激光器<sup>[8-9]</sup>、光学逻辑门<sup>[10]</sup>的核心元件。此外,耦合的微腔可以在量子信息处理以及量子物理的应用中提供单量子态之间相互作用的平台。光子晶体还可以调控微腔与波导之间的耦合强度,引入光源和增益,集成多种器件,从而应用于探测器<sup>[11]</sup>、量子比特操控与传输<sup>[12]</sup>和量子光学网络等前沿领域。

本文主要介绍了二维平板光子晶体微腔和波导的耦合。首先描述了二维平板光子晶体的能带结构;其次分别介绍了光子晶体微腔和波导;然后介绍了多种耦合结构的实例,包括两个微腔的耦合、单个微腔和波导的耦合以及多个微腔和波导的耦合;最后,对该领域进行了总结与展望。

## 2 光子晶体微腔

### 2.1 二维平板光子晶体能带结构

与普通晶体中周期性电势形成电子能带和电子带隙类似,光子晶体中周期性介电常数对光子的调制形成了光子能带与光子带隙。二维平板光子晶体在水平方向上介电常数具有周期性的调制,通过光子带隙限制光子,而在垂直方向上通过全内反射限制光子。因此,二维光子晶体只能在满足全内反射的区域内形成光子带隙。

二维平板光子晶体的能带结构可以通过求解光学布洛赫方程的本征值和本征态得到。图 1 是三角晶格二维平板光子晶体的能带结构。图中紫色区域不能满足全内反射条件,区域内模式的能量会从垂直方向耗散出去。白色区域满足全内反射条件,区域内模式的能量在垂直方向被限制在平板内。图中一系列红线是 TE 模式,即电场沿水平方向,磁场沿垂直方向;蓝线是 TM 模式,电场沿垂直方向,磁场沿水平方向。以 TE 模式(红线)为例,第一能带和第二能带之间存在如图所示的灰色区域。该区域内的模式在水平方向上无法传播,在垂直方向上也被限制在平板内,从而形成光子晶体禁带。

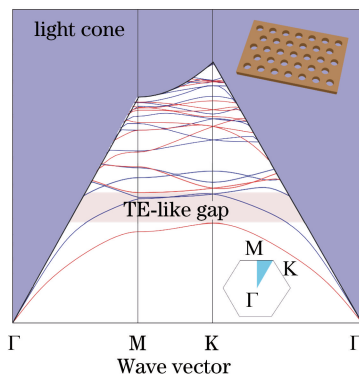


图 1 二维光子晶体能带结构<sup>[13]</sup>

Fig. 1 Band structure of a two-dimensional slab photonic crystal<sup>[13]</sup>

### 2.2 光子晶体微腔

在二维平板光子晶体中适当地引入缺陷,即可形成光子晶体微腔。微腔能够把光限制在很小的区域内,增强光与物质的相互作用。例如,在 Purcell 效应<sup>[14]</sup>中,微腔能够增强光源的自发辐射,Purcell 系数

$F_p = \frac{3}{4\pi} \left( \frac{\lambda_c}{n} \right)^3 \left( \frac{Q}{V} \right)$ , 其中,  $\lambda_c$  为腔模波长,  $n$  为折射率,  $V$  为模式体积,  $Q$  为品质因子,可见  $Q$  值越高,模式

体积越小,增益效果越强。从几何结构上划分,减小一个空气孔柱半径,可以形成 H0 型微腔;移除一个空气孔柱,可以形成 H1 型微腔;移除一排  $n$  个空气孔柱,可以形成  $L_n$  型微腔,如图 2 所示的 L3 型微腔<sup>[5]</sup>。

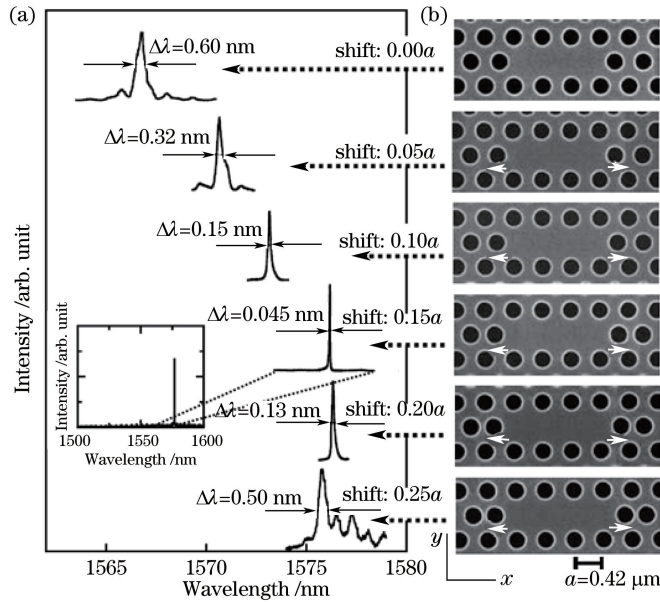


图 2 L3 型光子晶体微腔结构及其对应的腔模<sup>[5]</sup>。(a) 腔模；(b) 微腔结构

Fig. 2 L3 photonic crystal micro-cavity structures and its corresponding cavity modes<sup>[5]</sup>.

(a) Cavity modes; (b) micro-cavity structures

适当地调整微腔周围的空气孔柱,可以改变微腔的  $Q$  值和模式体积。图 2 中, Noda 等<sup>[5]</sup>通过移动 L3 型微腔左右两端两个空气孔柱的位置,极大地增大了  $Q$  值。将两个空气孔柱移动 0.15 个晶格常数之后,在模式体积 ( $7 \times 10^{-14} \text{ cm}^3$ ) 基本不变的情况下,  $Q$  值从 3000 提高到了 45000。这是第一个  $Q$  值可以达到  $10^4$  数量级的微腔。

除了品质因子与模式体积之外,偏振也是腔模的重要性质。偏振能影响腔与腔或波导的耦合,以及腔与物质的相互作用,例如腔-量子点耦合体系<sup>[4]</sup>。图 3(a) 是 L3 型光子晶体微腔非共振激发测量得到的光谱<sup>[4]</sup>, 蓝线是  $x$  方向偏振强度, 红线是  $y$  方向偏振强度。从光谱图可以看出, M1、M2、M5 模式偏振沿  $y$  方

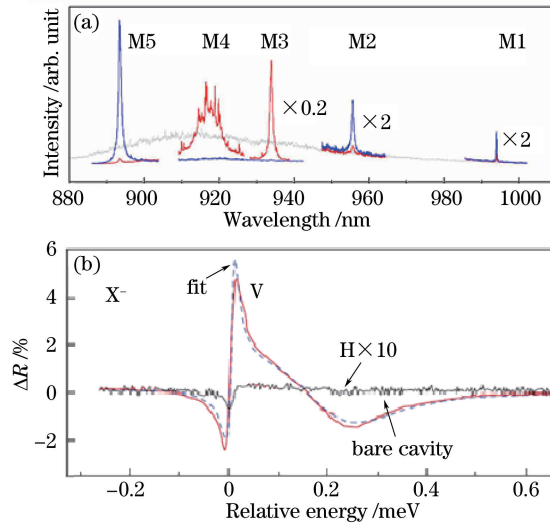


图 3 (a) 非共振激发下 L3 型光子晶体微腔腔模的光谱, 蓝线对应  $y$  方向偏振, 红线对应  $x$  方向偏振<sup>[4]</sup>;

(b) 腔-量子点体系共振激发下的差分反射谱, 红线是激发光与腔偏振垂直时的结果, 黑线是激发光与腔偏振平行时的结果<sup>[12]</sup>

Fig. 3 (a) Spectra of L3 photonic crystal micro-cavity modes with non-resonant excitation, blue lines represent  $y$ -polarization, red lines represent  $x$ -polarization<sup>[4]</sup>; (b) differential reflectance spectrum excited by cavity-quantum dot system resonance, red line represents the result when the exciting light is perpendicular to cavity polarization, black line represents the result when the exciting light is parallel to cavity polarization<sup>[12]</sup>

向, M3 模式偏振沿  $x$  方向。Carter 等<sup>[12]</sup>通过腔-量子点耦合对偏振的相关性理论实现了量子点自旋的读取和控制。图 3(b)是 Carter 等<sup>[12]</sup>在该实验中,通过不同偏振的激发光激发腔-量子点耦合体系得到的差分反射光谱。当腔模与腔内量子点能级共振时,激发光的偏振方向垂直于腔模方向导致的差分反射率  $\Delta R$  约是平行于腔模方向时的 70 倍。

为了满足不同的应用要求,人们可以设计具有不同 Q 值、不同模式体积和模式偏振的光子晶体微腔。例如 H1 型微腔具有高对称性和高简并度<sup>[15]</sup>,容易与各个方向的波导耦合。异质结腔拥有超过  $10^6$  的 Q 值<sup>[16]</sup>。波导型微腔易于调节电场的分布<sup>[17]</sup>。本文将在后面介绍一些应用于特定用途的微腔和波导之间的耦合。

### 3 光子晶体波导

在二维平板光子晶体中引入线性缺陷,即可形成波导。光子晶体波导在水平方向通过禁带束缚光子,在垂直方向通过全反射束缚光子,形成一系列波导模式。图 4(a)是在光子晶体中移除一排空气孔柱形成的波导,通过有限元计算解传输方程,得到的 TE 禁带中的波导模式<sup>[13]</sup>。图 4(a)中实线代表对称模式(磁场关于  $y$  轴对称),虚线代表反对称模式(磁场关于  $y$  轴反对称)。与传统的介质光波导相比,光子晶体波导可以任意弯折,并以极低的损耗控制光的传输。传统光纤波导通过全内反射限制光子,弯折处不容易满足全内反射条件,所以通常有很大的损耗;但是光子晶体波导在水平方向上通过禁带限制光子,利用缺陷态导波,所以在弯折处只有很小的能量损失,图 4(b)是直角弯折的光子晶体波导理论计算的传输谱<sup>[18]</sup>。光子晶体波导的极低损耗和可以任意弯曲的特点,使其适合连接光源、微腔等器件,实现光子网络集成。

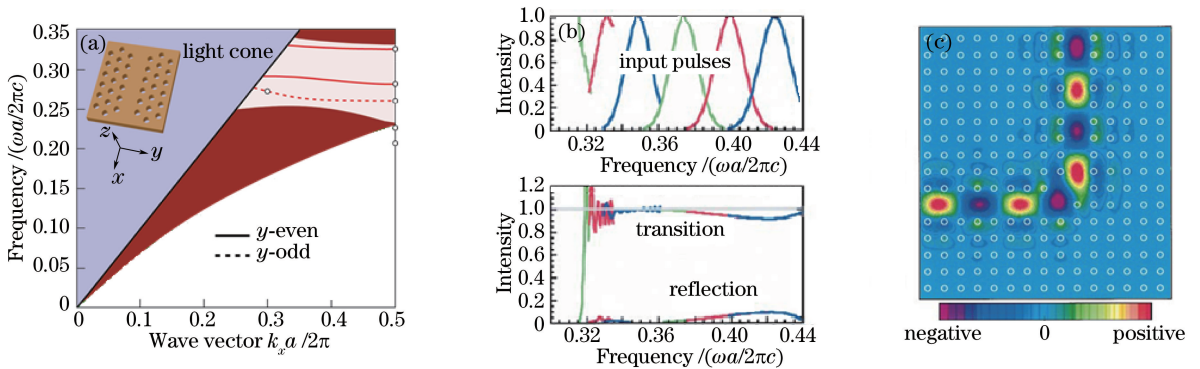


图 4 (a) 光子晶体波导 TE 禁带中的一系列传输模式<sup>[13]</sup>; (b)  $90^\circ$ 弯折的光子晶体波导入射光谱(上图)与传输谱(下图); (c)  $90^\circ$ 弯折的光子晶体波导传输模式的场分布<sup>[18]</sup>

Fig. 4 (a) Transmission modes in a photonic crystal waveguide TE band<sup>[13]</sup>; (b) incident spectra (above picture) and transmission spectrum (below picture) of a rectangular bending photonic crystal waveguide; (c) field distribution of a rectangular bending photonic crystal waveguide transmission mode<sup>[18]</sup>

## 4 光子晶体微腔的耦合

### 4.1 双微腔耦合

当两个光子晶体微腔之间满足模式频率匹配并且模式场分布存在空间上的重叠时,两个微腔之间通过倏逝场进行耦合,形成光学分子(PM)。耦合强度可以通过测量模式劈裂来表征<sup>[19-20]</sup>。目前,在实验上已经实现了同质结构(两个微腔相同)的光学分子以及异质结构(两个微腔不同)的光学分子<sup>[19]</sup>。与分子类似<sup>[21]</sup>,在同质结构的光学分子中,两个微腔的相同模式会因为耦合而劈裂成两个有着不同对称性的模式,其中对称(S)模式对应分子成键态,反对称(AS)模式对应反成键态<sup>[22]</sup>。当两个模式同时激发时,它们之间场的干涉会导致光子能量在两个微腔之间震荡<sup>[23]</sup>,从而实现能量的转移。

光学分子与双原子分子有着相似的性质,因此光学分子有很多应用。比如通过提高耦合强度抑制串扰实现波长转变的超快全光开关<sup>[24]</sup>,精确控制光学分子基态的宇称<sup>[22]</sup>以及通过控制拉比振荡产生非经典光<sup>[25]</sup>等。因此,如何控制耦合强度是实现这些应用的关键,特别是在不完全改变光学分子性质的前提下,控

制强耦合与弱耦合之间的转变。

目前,已经有多个调控耦合强度的方法,例如通过改变空气孔的半径大小、微腔的耦合距离<sup>[22]</sup>、耦合结构的几何形状<sup>[26]</sup>以及一些局部调控技术方法来控制耦合强度和模式场分布等。Chalcraft 等<sup>[26]</sup>发现两个平行 L3 型微腔之间的距离和角度会影响耦合模式劈裂的大小,其中当角度为  $30^\circ$  时,能量劈裂程度随着距离改变而变化得很缓慢,并且观察到对称模式与反对称模式的偏振角度不一样。Atlasov 等<sup>[23]</sup>研究了两个 L3 型微腔的耦合,发现两个微腔相距越近,耦合强度越大,波长的劈裂越大。除了耦合的 L3 型微腔结构, Brossard 等<sup>[27]</sup>研究了两个耦合的波导型光子晶体微腔,如图 5 所示。利用显微共焦光致发光技术证实了两个光子晶体波导微腔的强耦合,从理论计算和实验上研究了失谐对光子晶体微腔耦合强度的影响,从而为研究腔电动力学以及腔与物质的耦合特性奠定了基础。

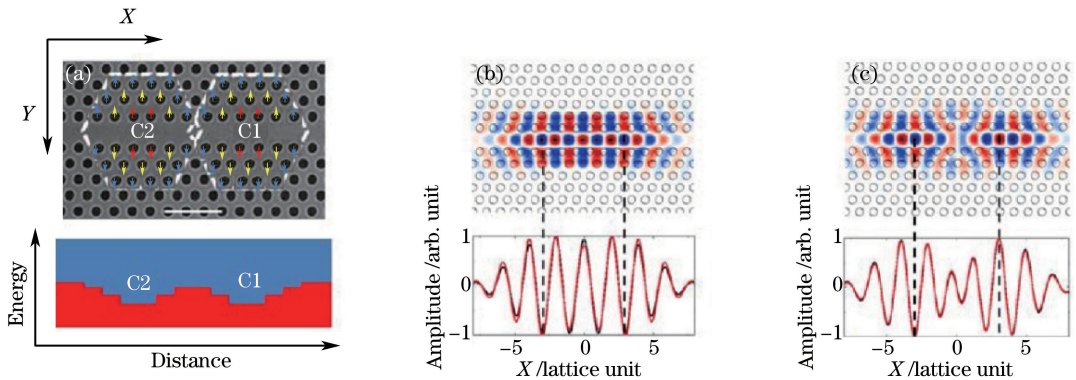


图 5 两个波导型光子晶体微腔的耦合及其模式场分布。(a)光学分子的扫描电子显微镜图(上图)及能带示意图(下图),禁带用红色标记;(b)对称态和(c)反对称态中  $E_y$  电场分量的分布情况以及沿着波导方向的振幅大小分布,虚线代表微腔的中心<sup>[27]</sup>

Fig. 5 Coupling of two photonic crystal waveguide micro-cavities and its mode distributions. (a) Scanning electron microscope image (above picture) and band schematic diagram (below picture) of a PM, while band gap is marked in red; Electric field  $E_y$  distributions and their profiles along the waveguide direction of (b) S mode and (c) AS mode, the dashed lines indicate the center of micro-cavity<sup>[27]</sup>

与同质结构相比,异质结构的光学分子拥有更多的特性。但由于异质结构光学分子中的两个微腔必须发生共振,其在设计和制备过程中比同质结构复杂。Vignolini 等已经通过大范围的调整方法<sup>[19]</sup>以及多种的局部调整手段<sup>[28-31]</sup>对其中一个微腔进行调整来满足共振条件,得到了偏振以及空间分布的不同模式,并观察到了模式杂化现象,从而为设计基于耦合共振腔的光学器件开辟了新的研究方向。此外, Brunstein 等<sup>[32]</sup>对两个耦合的光子晶体微腔进行了远场测量,发现了腔场间的一个大小为  $\pi$  的相位差,因此反对称模式可以很好地描述倏逝场耦合。

单量子体系与光子之间的强相互作用在量子信息处理领域中起着很重要的作用。其中,光学分子与量子体系的耦合是实现集成腔量子网络的关键。目前,单量子点与光学分子耦合时的腔量子电动力学已经被广泛研究。Majumdar 等<sup>[33]</sup>研究了含有量子点的光学分子中的反交叉现象以及量子点与光学分子非共振时的相互作用。此外,利用单量子点与光学分子的耦合下的真空拉比振荡实现了全光相干控制,使得对光与物质相互作用超快的控制成为可能<sup>[25]</sup>,同时利用这种耦合系统来实现量子纠缠的方法也已经被提出来<sup>[34-35]</sup>。Hamel 等<sup>[36]</sup>制备了由两个呈音叉式耦合的光子晶体微腔激光器,并观察到自发对称破缺现象。

#### 4.2 多微腔耦合

为实现光学系统的全光信号处理,光学器件必须满足两个要求:一是实现开关功能以及逻辑门的操作;二是在进行逻辑操作时,有能够存储信息的光存储器。利用多腔耦合可以避免由于色散过大而对光信号处理造成有害影响,而且还可以降低光的群速度,从而增强光与物质的相互作用<sup>[37-38]</sup>。在相似的结构中已经实现了光速的减慢以及光脉冲的存储<sup>[39]</sup>。O'Brien 等<sup>[40]</sup>制备了由 10 个不同的光子晶体微腔形成的耦合共振腔链,实现了低色散、小型的光学延迟线,如图 6 所示。该结构可以实现对大范围的光群速度的调控。

综上,耦合光子晶体微腔利用了光子晶体微腔模式体积小、Q 值高、易于集成等优点以及倏势场耦合腔

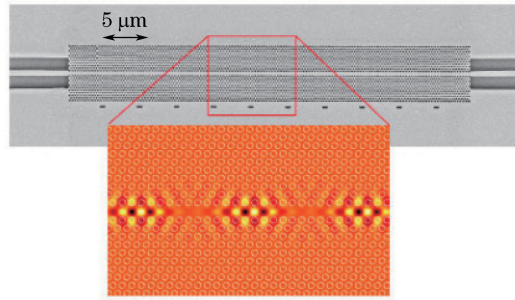


图 6 10 个耦合异质结构微腔组成的共振腔链的扫描电子显微镜图。光子晶体结构图下面的虚线标记的是微腔的位置。下图是其中 3 个微腔的电场分布图<sup>[40]</sup>

Fig. 6 Scanning electron microscope image of a chain of 10 coupled heterostructure micro-cavities. The dashed markers below the photonic crystal structure indicate the positions of micro-cavities. The electric field profile of the confined cavity modes is shown below for 3 micro-cavities<sup>[40]</sup>

的特点,在光子器件应用中具有很大的发展潜力。耦合光子晶体微腔与量子体系相互作用在量子光学研究领域中也很有广泛的应用,如纠缠光子对的产生<sup>[41]</sup>和单光子的产生<sup>[42-44]</sup>。随着微加工技术的提高和耦合微腔新结构的提出,耦合光子晶体微腔的应用将得到更快的发展。通过耦合光子晶体微腔来研究调控光的行为以及光与物质的相互作用,将会加快实现光子器件以及量子光学网络。

## 5 单个微腔与波导的耦合

光子晶体微腔具有高  $Q$  值和小模式体积,可用来增强微腔中的量子点激子的自发辐射效率(Purcell 效应)<sup>[14]</sup>。而光子晶体波导的光学传输损耗较低,可用来在半导体平面内传输光量子比特。因此,利用光子晶体微腔和波导的耦合可以实现多种应用,例如面内单光子源<sup>[45-46]</sup>、量子点自旋态读出<sup>[47]</sup>、光开关<sup>[48-49]</sup>、光存储<sup>[50]</sup>和光学捕获<sup>[51]</sup>等。

光子晶体微腔和波导通过微腔的倏逝场耦合(图 7)。要实现微腔和波导的有效耦合,需要存在与微腔共振频率相同的波导模式,并且该频率下微腔和波导的场分布相似<sup>[52]</sup>。微腔与波导耦合时,部分能量传输至波导,这导致耦合微腔  $Q$  值降低。耦合微腔的  $Q$  值可由下式表示:

$$Q^{-1} = Q_c^{-1} + Q_{wg}^{-1}, \quad (1)$$

式中  $Q_c$  为无波导时微腔的品质因子,  $1/Q_{wg}$  为能量传输至波导导致的耗散率,它正比于腔场衰减至波导的速率。微腔与波导的耦合效率可以由  $Q/Q_{wg}$  给出<sup>[53]</sup>。

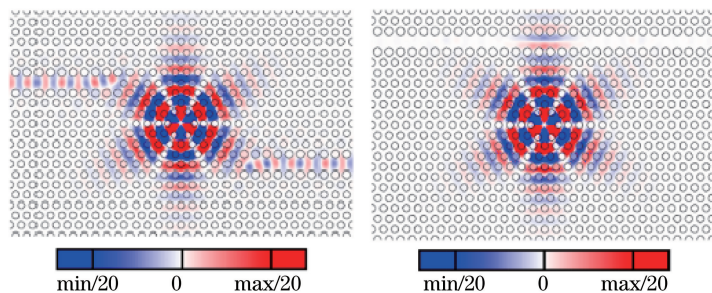


图 7 H1 型微腔与两种不同波导耦合的磁场  $z$  方向分量<sup>[54]</sup>

Fig. 7  $z$  direction component of magnetic field of the H1 micro-cavity coupled with two different kinds of waveguides<sup>[54]</sup>

要提高耦合效率,首先,可以增大波导和微腔场分布的重叠<sup>[52]</sup>。Kim 等<sup>[54]</sup>理论计算了 H1 型微腔的 6 级子模式与波导的不同耦合构型下的耦合效率。他们通过缩小 6 个近邻空气孔柱的直径并对其进行一定的位移得到了高品质因子的 H1 型微腔,发现耦合效率强烈依赖于波导和微腔场分布的重叠,重叠越大,耦合效率越高。对 L3 型微腔,其场分布具有倏逝场沿倾斜方向较强、沿微腔轴线方向较弱的特点。Faraon 等<sup>[53]</sup>利用该特

点,提出了相对波导以  $60^\circ$  倾斜微腔(图 8)可以提高微腔-波导耦合效率。其次,与微腔耦合的波导模式的色散关系也会影响耦合效率。波导的群速度越小,微腔与波导的相互作用时间越长,进而能在一定程度上提高耦合效率<sup>[52]</sup>。但是群速度越小,光学散射也会越大<sup>[55]</sup>,因此,可以通过选择合适的波导色散关系来优化设计。

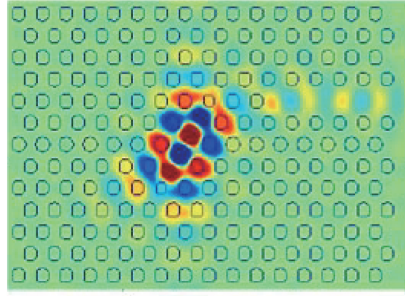


图 8 倾斜 L3 型微腔-波导耦合系统的磁场分布<sup>[53]</sup>

Fig. 8 Magnetic field distribution of a tilted L3 micro-cavity-waveguide coupler<sup>[53]</sup>

将量子点作为光源耦合进光子晶体微腔,微腔可增强量子点自发辐射效率,同时微腔与波导耦合,波导可沿平面传输光子,因此这种耦合系统可实现单光子发射和量子点自旋态读出。Shields 等<sup>[46]</sup>从理论和实验分别证明了 L3 型微腔和波导的耦合系统可以用来实现面内高效单光子源。Coles 等<sup>[47]</sup>提出了一种微腔-波导耦合结构,实现了微腔的两个正交偶极子模式可以选择性耦合进不同的波导,并通过调整波导的方向和位置使得微腔与两个波导的耦合效率相同,该设计可用来读取定位于微腔中心的量子点的自旋态或者在单光子水平上实现超快光开关。

为了进一步优化超快光开关的性能,例如提高其在开关能量、对比度和工作带宽上的表现,可引入具有不对称、陡峭线型的 Fano 共振。Fano 共振是由分离的共振模式和宽频的连续模式之间的相长相消干涉引起的<sup>[56-57]</sup>。Fan 等<sup>[58]</sup>从理论上发现,通过在二维平板光子晶体微腔-波导耦合系统中引入部分反射元,可以实现陡峭的不对称传输谱线,它类似于由离散和连续模式干涉引起的 Fano 共振。最近本课题组赵彦辉等<sup>[59-60]</sup>设计了一个二维平板光子晶体微腔-波导耦合结构,通过引入部分反射元[图 9(a)]实现了 Fano 共振,并证明了通过在微腔中引入增益介质,可以使 Fano 共振不对称线型更加陡峭,传输率可增加 6 倍,其传输谱如图 9(b)所示。此外,由于 Fano 共振具有不对称的陡峭线型,在用作光开关时,还可以降低开关能量。

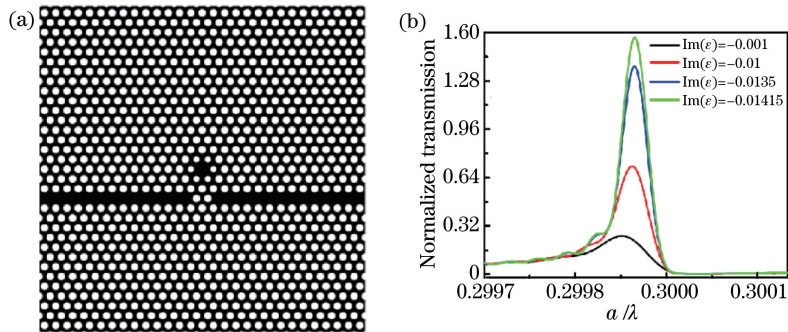


图 9 (a)在二维平板光子晶体微腔和波导耦合系统中引入部分反射元<sup>[60]</sup>; (b)不同增益大小下的传输谱<sup>[59]</sup>

Fig. 9 (a) Coupled two dimensional slab micro-cavity-waveguide structure with partially reflecting elements<sup>[60]</sup>; (b) transmission spectra with different gains<sup>[59]</sup>

除了 Fano 共振外,还有多种方法可以优化微腔-波导耦合光开关。Nozaki 等<sup>[48]</sup>从理论上提出了一个微腔-波导耦合结构可以实现几十个皮秒数量级的超快光开关,其开关能量在 3 dB 和 10 dB 时分别为 0.42 fJ 和 0.66 fJ,比传统的光开关能量低了至少两个数量级。Liu 等<sup>[49]</sup>从理论上提出了在微腔-波导耦合系统中,通过改变微腔的电导率来调制共振模式,从而实现光开关。此外,利用二维平板光子晶体微腔-波导耦合系统,还可以实现光学捕获。Descharmes 等<sup>[51]</sup>在微腔-波导耦合系统中通过光阱力实现了共振光场和纳米粒子的光力耦合,并在较低的腔内能量下( $<120 \mu\text{W}$ )实现了对 500 nm 微粒的长时间光学捕获( $>10 \text{ min}$ )。

二维平板光子晶体微腔和波导的耦合具有非常广泛的应用前景,可实现多种光学器件。由于二维平板

光子晶体易于集成的特点,除了可实现单个微腔和波导的耦合外,还可以实现两个微腔与波导的耦合,从而有更加广泛的应用。

## 6 双微腔和波导的耦合

相对于单个微腔与波导的耦合,双微腔与波导的耦合由于多引入一个微腔而呈现出多种耦合机制,使得其应用更加广泛,例如全光开关<sup>[24,61-63]</sup>、通道滤波器<sup>[64-67]</sup>、远距离微腔的强耦合<sup>[68]</sup>以及单光子水平的传输<sup>[69]</sup>等。

全光开关对于高速率的光学信息处理起着非常重要的作用。利用不同双微腔和波导的耦合结构,可分别实现 Fano 共振<sup>[62]</sup>、耦合共振腔感应反射<sup>[63]</sup>和能量完全振荡<sup>[61]</sup>,从而在一定程度上改善全光开关的性能。

Nozaki 等<sup>[62]</sup>设计并制备了基于耦合光子晶体微腔一波导的体系,如图 10 所示。在该耦合体系中,低 Q 值的微腔 1 的共振模式可看作是连续模式,而高 Q 值的微腔 2 的共振模式可看作是离散模式,微腔 1 与波导耦合,实现光的输入和输出,微腔 2 与微腔 1 耦合。路径 A 的光通过微腔 1 和 2,路径 B 的光仅通过微腔 1。当微腔 2 中的光学损耗很小时,才能发生较强的干涉<sup>[62]</sup>,微腔 1 与微腔 2 共振模式之间的相长相消干涉导致一个陡峭、不对称的 Fano 共振线型。它们首次实现了抽运能量约几 fJ、对比度超过 10 dB、开关时间达到 18 ps 的全光开关。

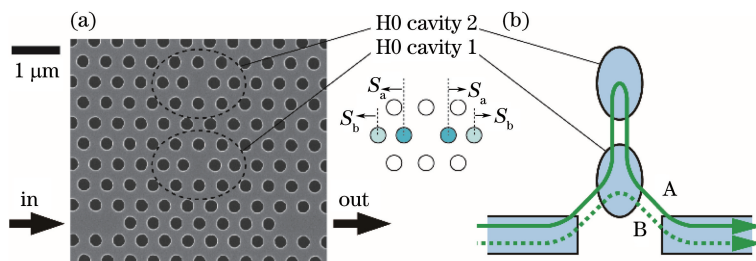


图 10 (a) Fano 体系的扫描电子显微镜图像;(b)两个路径的光之间干涉的原理图<sup>[62]</sup>

Fig. 10 (a) Scanning electron microscope image of Fano system; (b) schematic of optical interference between two paths<sup>[62]</sup>

Mingaleev 等<sup>[63]</sup>从理论上研究了在光子晶体波导与两个近似相同微腔的侧向耦合结构[图 11(a)]中光的传输特性。当两个微腔失谐较大时,它们相应的共振可以很好地分离,如图 11(b)所示;而当两个微腔仅有失谐时,该耦合构型会引起耦合共振腔感应反射效应,表现为一个陡峭的、非对称共振反射谱线,如图 11(c)所示,其反射谱线的品质因子较高且易于调节。Mingaleev 等<sup>[63]</sup>同时证明了在慢光体系中仍存在耦合共振腔感应反射效应,且由于其不对称线型,在非线性体系中可实现慢光 100% 的全光开关。

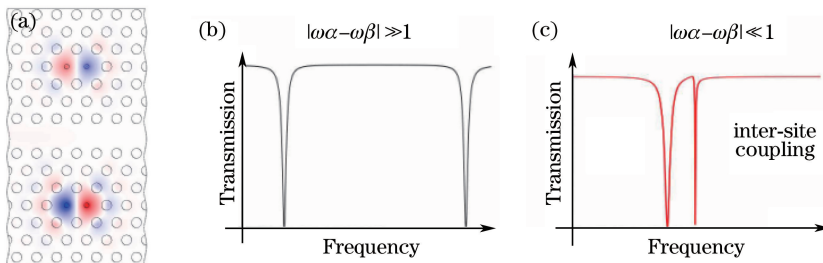


图 11 (a)波导与两个微腔耦合的原理结构图;两个侧向耦合微腔(b)大失谐时和(c)略有失谐时的传输曲线<sup>[63]</sup>

Fig. 11 (a) Schematic structure of a photonic crystal waveguide coupled to two side micro-cavities; transmission curves of two side-coupled micro-cavities with (b) large and (c) slightly detuned eigen-frequencies<sup>[63]</sup>

本课题组赵彦辉等<sup>[61]</sup>设计了一种光学分子与波导的耦合结构,该结构包含了两个波导和两个微腔,如图 12(a)所示。当对称模式和反对称模式同时被激发时,两者的干涉叠加导致一个微腔中的场相互抵消,另一个微腔中的场叠加增强,出现能量振荡,如图 12(b)所示。该结构利用一个波导激发光学分子,另一个波导读出光学分子中的能量振荡。在能量完全振荡情况下,能量最大值和最小值对比度较大,从而通过这种耦合结构可实现开关时间达 1.8 ps 的超快光开关。

双微腔和波导的耦合也可以用来制备通道滤波器。在两个波导和一个光学共振腔系统中,通过产生两



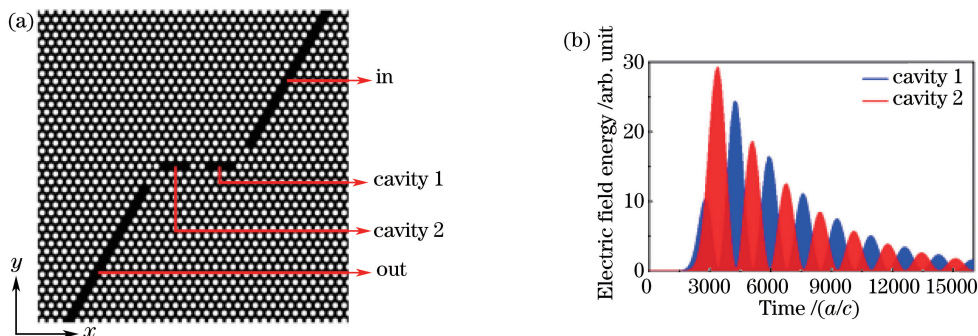


图 12 (a)两个波导与光学分子的耦合结构;(b)通过波导模式激发光学分子导致的能量振荡<sup>[61]</sup>

Fig. 12 (a) Coupled structure of two waveguides and a PM; (b) energy oscillations of two cavities when the PM is excited by waveguide modes<sup>[61]</sup>

个不同对称性的共振态,并使它们发生简并,可实现两个波导间 100% 的传输,其原理如图 13 所示。Fan 等<sup>[65]</sup>设计了二维平板光子晶体微腔和波导的耦合结构,通过调整结构使对称和反对称模式简并,理论计算结果表明这种结构具有理想的滤波特性。Min 等<sup>[64]</sup>基于双 L3 型微腔和波导的耦合体系,设计了一种通道滤波器。在共振时,传输至分支通道(DROP)及保留在总线通道(BUS)的能量比可达 61% 和 5%。

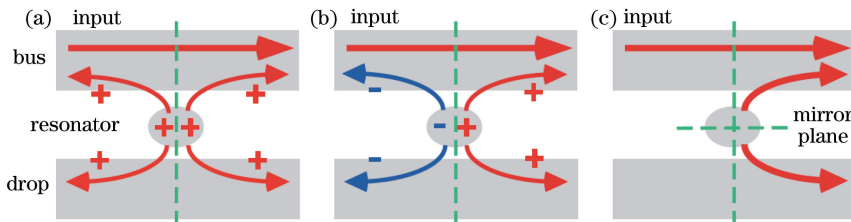


图 13 通道滤波器原理示意图。(a)对于对称模式,正向和反向的传输具有相同的相位;(b)对于反对称模式,正向和反向的传输相位相差  $\pi$ ;(c)同时存在对称和反对称模式时,反向的传输光相互抵消<sup>[65]</sup>

Fig. 13 Schematic of channel filter. (a) For S mode, the phases of forward and backward direction transmissions are the same; (b) for AS mode, the phase difference of forward and backward direction transmissions is  $\pi$ ; (c) when S mode and AS mode all exist, the transmission lights of backward direction cancel out<sup>[65]</sup>

由于微腔束缚光能力较强,其倏逝场只扩展到几个波长范围,因此无法通过倏逝场实现两个远距离微腔的耦合。Sato 等<sup>[68]</sup>利用双微腔和波导的耦合,实现了两个远距离(超过 100 个波长距离)微腔间的强耦合,其结构如图 14(a)所示。有限长的波导形成法布里-珀罗(FP)腔,具有 FP 模式。如图 14(b)所示,图中

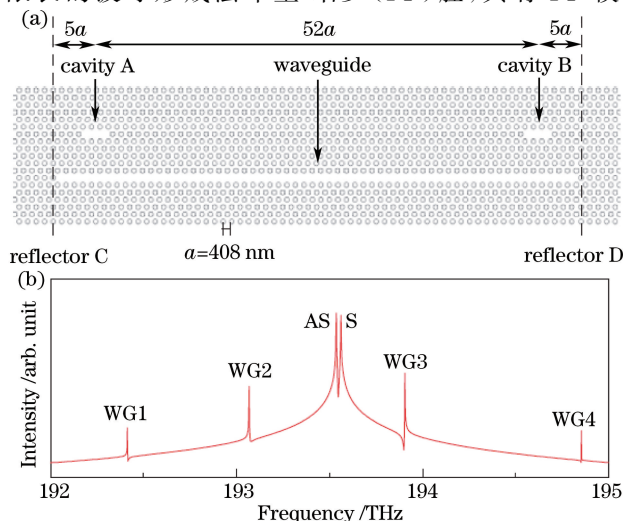


图 14 (a)两个远距离微腔和波导的耦合结构;(b)理论计算得到的光谱<sup>[68]</sup>

Fig. 14 (a) Coupled structure of a waveguide and two distant micro-cavities; (b) theoretically calculated spectra<sup>[68]</sup>

WG1~WG4 是波导的 FP 模式, S 和 AS 分别是腔模劈裂成的对称模式和反对称模式。能量从微腔泄露至波导速率小, 使得 S 和 AS 模式线宽很小, 详见(1)式, 同时腔模处在 WG2 和 WG3 中间位置, 从而 S 和 AS 模式均无法与波导 FP 模式耦合, 此时光子无法泄露至波导模式。当两个微腔的共振模式相同时, 通过波导传输可实现强耦合。

双微腔-波导耦合体系也能改善量子点单光子发射效率<sup>[70]</sup>。Englund 等<sup>[69]</sup>提出了一种微腔和波导的耦合结构, 它包含两个微腔和一个波导, 其中一个微腔与量子点耦合作为源腔产生单光子, 然后通过波导传输至另一个微腔, 即目标微腔, 目标微腔与源腔的场强度比值达到 0.12。这种微腔间单光子的传输有望成为量子信息处理系统的基本单元。

## 7 总结与展望

本文系统地介绍了二维平板光子晶体的基本原理, 光子晶体微腔、波导的特性, 以及一些基于微腔和波导的光学应用实例。光子晶体微腔具有高 Q 值和小模式体积, 可以广泛应用于腔电动力学以及光与物质相互作用的研究。双微腔耦合可以形成具有对称模式和反对称模式的光学分子。通过引入与波导的耦合使得光学分子对称模式和反对称模式简并, 实现了高效通道滤波器。通过调整微腔-波导之间的耦合可以得到陡峭线型, 实现了超快全光开关。此外通过在微腔-波导耦合体系中引入光源(如量子点等), 实现了可集成化的高效单光子源。

由于二维平板光子晶体的可扩展性和易于集成的特点, 通过微腔-波导与量子体系之间的耦合, 可以实现量子态的初始化、控制、传输、存储和读出, 在未来的光信息处理和量子信息处理等方向具有重要的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Krauss T F, Richard M, Brand S. Two-dimensional photonic-band gap structures operating at near-infrared wavelengths[J]. *Nature*, 1996, 383(6602): 699-702.
- [2] Zeng L, Yi Y, Hong C, *et al.* Efficiency enhancement in Si solar cells by textured photonic crystal back reflector[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(11): 111111.
- [3] Altug H, Englund D, Vučković J. Ultrafast photonic crystal nanocavity laser[J]. *Nature Physics*, 2006, 2(7): 484-488.
- [4] Oulton R, Jones B D, Lam S, *et al.* Polarized quantum dot emission from photonic crystal nanocavities studied under mode resonant enhanced excitation[J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 17221-17230.
- [5] Akahane Y, Asano T, Song B S, *et al.* High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal[J]. *Nature*, 2003, 425(6961): 944-947.
- [6] Yoshie T, Scherer A, Hendrickson J, *et al.* Vacuum Rabi splitting with a single quantum dot in a photonic crystal nanocavity[J]. *Nature*, 2004, 432(7014): 200-203.
- [7] Hill M T, Dorren H J S, De Vries T, *et al.* A fast low-power optical memory based on coupled micro-ring lasers[J]. *Nature*, 2004, 432(7014): 206-209.
- [8] Zhukovsky S V, Chigrin D N, Lavrinenko A V, *et al.* Switchable lasing in multimode microcavities[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(7): 073902.
- [9] Ishii S, Baba T. Bistable lasing in twin microdisk photonic molecules[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(18): 181102.
- [10] Zhang Y, Zhang Y, Li B. Optical switches and logic gates based on self-collimated beams in two-dimensional photonic crystals[J]. *Optics Express*, 2007, 15(15): 9287-9292.
- [11] Lee M R, Fauchet P M. Two-dimensional silicon photonic crystal based biosensing platform for protein detection[J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 4530-4535.
- [12] Carter S G, Sweeney T M, Kim M, *et al.* Quantum control of a spin qubit coupled to a photonic crystal cavity[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(4): 329-334.
- [13] Joannopoulos J D, Johnson S G, Winn J N, *et al.* *Photonic crystals: molding the flow of light* [M]. Princeton:

Princeton University Press, 2011.

- [14] Purcel E M. Spontaneous emission probabilities at radio frequencies[J]. *Physical Review*, 1946, 340: 839.
- [15] Tandraechanurat A, Iwamoto S, Nomura M, *et al.* Increase of Q-factor in photonic crystal H1-defect nanocavities after closing of photonic bandgap with optimal slab thickness[J]. *Optics Express*, 2008, 16(1): 448-455.
- [16] Song B S, Noda S, Asano T, *et al.* Ultra-high-Q photonic double-heterostructure nanocavity[J]. *Nature Materials*, 2005, 4(3): 207-210.
- [17] Hu J X, Fang Y T. Self-trapped band and semi-opening movable cavity[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2016, 52(7): 1-7.
- [18] Mekis A, Chen J C, Kurland I, *et al.* High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides[J]. *Physical Review Letters*, 1996, 77(18): 3787-3790.
- [19] Vignolini S, Riboli F, Intonti F, *et al.* Mode hybridization in photonic crystal molecules[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(6): 063101.
- [20] Caselli N, Intonti F, Bianchi C, *et al.* Post-fabrication control of evanescent tunnelling in photonic crystal molecules [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(21): 211108.
- [21] Doty M F, Climente J I, Korkusinski M, *et al.* Antibonding ground states in InAs quantum-dot molecules[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(4): 047401.
- [22] Caselli N, Intonti F, Riboli F, *et al.* Antibonding ground state in photonic crystal molecules[J]. *Physical Review B*, 2012, 86(3): 035133.
- [23] Atlasov K A, Karlsson K F, Rudra A, *et al.* Wavelength and loss splitting in directly coupled photonic-crystal defect microcavities[J]. *Optics Express*, 2008, 16(20): 16255-16264.
- [24] Combr e S, Lehoucq G, Junay A, *et al.* All-optical signal processing at 10 GHz using a photonic crystal molecule[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(19): 193510.
- [25] Bose R, Cai T, Choudhury K R, *et al.* All-optical coherent control of vacuum Rabi oscillations[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(11): 858-864.
- [26] Chalcraft A R A, Lam S, Jones B D, *et al.* Mode structure of coupled L3 photonic crystal cavities[J]. *Optics Express*, 2011, 19(6): 5670-5675.
- [27] Brossard F S F, Reid B P L, Chan C C S, *et al.* Confocal microphotoluminescence mapping of coupled and detuned states in photonic molecules[J]. *Optics Express*, 2013, 21(14): 16934-16945.
- [28] Intonti F, Vignolini S, T urck V, *et al.* Rewritable photonic circuits[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(21): 211117.
- [29] Vignolini S, Riboli F, Intonti F, *et al.* Local nanofluidic light sources in silicon photonic crystal microcavities[J]. *Physical Review E*, 2008, 78(4): 045603.
- [30] Intonti F, Vignolini S, Riboli F, *et al.* Tuning of photonic crystal cavities by controlled removal of locally infiltrated water[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(17): 173112.
- [31] Lee H S, Kiravittaya S, Kumar S, *et al.* Local tuning of photonic crystal nanocavity modes by laser-assisted oxidation [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(19): 191109.
- [32] Brunstein M, Karle T J, Sagnes I, *et al.* Radiation patterns from coupled photonic crystal nanocavities[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(11): 111101.
- [33] Majumdar A, Rundquist A, Bajcsy M, *et al.* Cavity quantum electrodynamics with a single quantum dot coupled to a photonic molecule[J]. *Physical Review B*, 2012, 86(4): 045315.
- [34] Li J, Yu R, Ding C, *et al.* Optical-frequency-comb generation and entanglement with low-power optical input in a photonic molecule[J]. *Physical Review A*, 2014, 90(3): 033830.
- [35] Liu S, Yu R, Li J, *et al.* Creation of quantum entanglement with two separate diamond nitrogen vacancy centers coupled to a photonic molecule[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(24): 244306.
- [36] Hamel P, Haddadi S, Raineri F, *et al.* Spontaneous mirror-symmetry breaking in coupled photonic-crystal nanolasers [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(5): 311-315.
- [37] Uesugi T, Song B S, Asano T, *et al.* Investigation of optical nonlinearities in an ultra-high-Q Si nanocavity in a two-dimensional photonic crystal slab[J]. *Optics Express*, 2006, 14(1): 377-386.

- [38] Yariv A, Xu Y, Lee R K, *et al.* Coupled-resonator optical waveguide: a proposal and analysis[J]. Optics Letters, 1999, 24(11): 711-713.
- [39] Yanik M F, Fan S. Stopping light all optically[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(8): 083901.
- [40] O'Brien D, Settle M D, Karle T, *et al.* Coupled photonic crystal heterostructure nanocavities[J]. Optics Express, 2007, 15(3): 1228-1233.
- [41] Dousse A, Suffczyński J, Beveratos A, *et al.* Ultrabright source of entangled photon pairs[J]. Nature, 2010, 466(7303): 217-220.
- [42] Liew T C H, Savona V. Single photons from coupled quantum modes[J]. Physical Review Letters, 2010, 104(18): 183601.
- [43] Bamba M, Imamoğlu A, Carusotto I, *et al.* Origin of strong photon antibunching in weakly nonlinear photonic molecules[J]. Physical Review A, 2011, 83(2): 021802.
- [44] Bamba M, Ciuti C. Counter-polarized single-photon generation from the auxiliary cavity of a weakly nonlinear photonic molecule[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(17): 171111.
- [45] Malhotra T, Ge R C, Dezfouli M K, *et al.* Quasinormal mode theory and design of on-chip single photon emitters in photonic crystal coupled-cavity waveguides[J]. Optics Express, 2016, 24(12): 13574-13583.
- [46] Schwagmann A, Kalliakos S, Ellis D J P, *et al.* In-plane single-photon emission from a L3 cavity coupled to a photonic crystal waveguide[J]. Optics Express, 2012, 20(20): 28614-28624.
- [47] Coles R J, Prtljaga N, Royall B, *et al.* Waveguide-coupled photonic crystal cavity for quantum dot spin readout[J]. Optics Express, 2014, 22(3): 2376-2385.
- [48] Nozaki K, Tanabe T, Shinya A, *et al.* Sub-femtojoule all-optical switching using a photonic-crystal nanocavity[J]. Nature Photonics, 2010, 4(7): 477-483.
- [49] Liu C Y. Electro-optical resonant switching in two-dimensional side-coupled waveguide-cavity photonic crystal systems [J]. Physics Letters A, 2011, 375(44): 3895-3898.
- [50] Fang Yuntuan, Hu Jianxia, Xu Qingsong, *et al.* Magneto-optical storage system based on the coupling of the one-way edge modes and micro cavity modes[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(11): 1106001.  
方云团, 胡坚霞, 徐青松, 等. 基于单向边界模式与磁性微腔模式耦合的磁光存储系统[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1106001.
- [51] Deschannes N, Dharanipathy U P, Diao Z, *et al.* Observation of backaction and self-induced trapping in a planar hollow photonic crystal cavity[J]. Physical Review Letters, 2013, 110(12): 123601.
- [52] Waks E, Vuckovic J. Coupled mode theory for photonic crystal cavity-waveguide interaction[J]. Optics Express, 2005, 13(13): 5064-5073.
- [53] Faraon A, Waks E, Englund D, *et al.* Efficient photonic crystal cavity-waveguide couplers[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(7): 073102.
- [54] Kim G H, Lee Y H, Shinya A, *et al.* Coupling of small, low-loss hexapole mode with photonic crystal slab waveguide mode[J]. Optics Express, 2004, 12(26): 6624-6631.
- [55] Hughes S, Ramunno L, Young J F, *et al.* Extrinsic optical scattering loss in photonic crystal waveguides: role of fabrication disorder and photon group velocity[J]. Physical Review Letters, 2005, 94(3): 033903.
- [56] Fano U. Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts[J]. Physical Review, 1961, 124(6): 1866-1978.
- [57] Ott C, Kaldun A, Raith P, *et al.* Lorentz meets Fano in spectral line shapes: a universal phase and its laser control[J]. Science, 2013, 340(6133): 716-720.
- [58] Fan S H. Sharp asymmetric line shapes in side-coupled waveguide-cavity systems[J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(6): 908-910.
- [59] Zhao Yanhui. Integrating two-dimensional photonic crystal slab cavities with waveguides[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2016.  
赵彦辉. 二维平板光子晶体微腔及其与波导的耦合[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [60] Zhao Y, Qian C, Qiu K, *et al.* Gain enhanced Fano resonance in a coupled photonic crystal cavity-waveguide structure [J]. Scientific Reports, 2016, 6.

- [61] Zhao Y, Qian C, Qiu K, *et al.* Ultrafast optical switching using photonic molecules in photonic crystal waveguides[J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 9211-9220.
- [62] Nozaki K, Shinya A, Matsuo S, *et al.* Ultralow-energy and high-contrast all-optical switch involving fano resonance based on coupled photonic crystal nanocavities[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 11877-11888.
- [63] Mingaleev S F, Miroschnichenko A E, Kivshar Y S. Coupled-resonator-induced reflection in photonic-crystal waveguide structures[J]. *Optics Express*, 2008, 16(15): 11647-11659.
- [64] Min K, Kim J E, Park H Y. Channel drop filters using resonant tunneling processes in two-dimensional triangular lattice photonic crystal slabs[J]. *Optics Communications*, 2004, 237(1-3): 59-63.
- [65] Fan S, Villeneuve P R, Joannopoulos J D, *et al.* Channel drop filters in photonic crystals[J]. *Optics Express*, 1998, 3(1): 4-11.
- [66] Zhou Xingping, Shu Jing, Lu Binjie, *et al.* Two-wavelength division demultiplexer based on triangular lattice photonic crystal resonant cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 33(1): 123001.  
周兴平, 疏 静, 卢斌杰, 等. 基于三角晶格光子晶体谐振腔的双通道解波分复用器[J]. *光学学报*, 2012, 33(1): 123001.
- [67] Gao Yongfeng, Zhou Ming, Zhou Jun, *et al.* Design of power splitter by directional coupling between photonic crystal waveguides[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(5): 0505003.  
高永锋, 周 明, 周 骏, 等. 光子晶体波导定向耦合功分器的设计[J]. *中国激光*, 2011, 38(5): 0505003.
- [68] Sato Y, Tanaka Y, Upham J, *et al.* Strong coupling between distant photonic nanocavities and its dynamic control[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(1): 56-61.
- [69] Englund D, Faraon A, Zhang B, *et al.* Generation and transfer of single photons on a photonic crystal chip[J]. *Optics Express*, 2007, 15(9): 5550-5558.
- [70] Santori C, Fattal D, Vučković J, *et al.* Indistinguishable photons from a single-photon device[J]. *Nature*, 2002, 419(6907): 594-597.