

# 基于悬浮 $\text{SiN}_x$ 光子晶体的单层 $\text{WS}_2$ 室温激子极化激元\*

华宇<sup>1)2)</sup> 周珈如<sup>1)2)</sup> 李浩<sup>1)</sup> 李更<sup>1)3)</sup> 樊晓峰<sup>4)</sup> 顾长志<sup>1)3)</sup> 刘宝利<sup>1)3)</sup>

1) (中国科学院物理研究所, 纳米物理与器件实验室, 北京 100190)

2) (中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049)

3) (中国科学院真空物理重点实验室, 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049)

4) (吉林大学材料科学与工程学院, 长春 130022)

## 摘要

基于激子-光子强耦合机制的激子极化激元, 在构建新型极化激元器件以及研究量子多体物理方面具有巨大潜力. 由于大部分半导体材料激子束缚能小于室温热激活能, 只能在低温 ( $\sim 4 \text{ K}$ ) 下实现激子极化激元, 限制了激子极化激元器件的应用. 本工作利用单层  $\text{WS}_2$  中激子室温稳定存在和光子晶体中连续域束缚态极高品质因子的特性, 构建了氮化硅光子晶体/单层  $\text{WS}_2$  复合器件. 利用自主建设的动量分辨光致发光光谱测量系统, 测量了复合器件的动量分辨光致发光谱, 获得了激子极化激元的色散曲线, 观察到明显的模式反交叉现象, 实现了单层  $\text{WS}_2$  激子与腔光子的强耦合, 拉比劈裂值为  $\sim 34.6 \text{ meV}$ .

**关键词:** 激子极化激元, 过渡金属二硫化物, 光子晶体, 光与物质相互作用

**PACS:** 71.36.+c

\*国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2024YFA1207700, 2021YFA1400700, 2022YFA1204100)、国家自然科学基金青年基金 (批准号: 12404042) 和中国博士后科学基金 (批准号: GZC20241892) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: blliu@iphy.ac.cn

第一作者. E-mail: hua\_yu@iphy.ac.cn

# 1 引言

激子极化激元 (Exciton-polariton) 是一种由激子和光子强耦合形成的准粒子, 其作为现代光子技术的核心组件受到了广泛关注<sup>[1-4]</sup>. 激子极化激元表现出自发辐射相干特性 (spontaneously generated coherence) 和极低的有效质量, 这为观测玻色-爱因斯坦凝聚 (Bose - Einstein condensates)<sup>[5,6]</sup>、超流<sup>[7]</sup>以及其它量子多体物理现象提供了重要的物理基础.

激子极化激元的形成来自于激子与光学微腔中光子的强耦合, 是激子态与光子态的量子叠加态. 在此过程中, 光学微腔可以实现光子与二能级或多能级系统之间的拉比振荡 (Rabi Oscillation), 促进二者快速相互转换<sup>[8]</sup>. 因此, 光学微腔的光场强局域能力在这一相互转换过程中起着至关重要的作用, 这也推动了光学微腔结构设计的发展.

光学微腔是一种在尺度与光子波长相当的微型谐振腔, 包括法布里-珀罗 (Fabry-Perot, FP) 腔、回音壁模式 (Whispering Gallery Mode, WGM) 腔和光子晶体 (Photonic Crystal, PC) 腔, 在光子芯片、传感、量子信息及其他领域得到了广泛的应用<sup>[9-12]</sup>. 在激子极化激元系统中, FP 腔是最常用的微腔, 它通常由分布式布拉格反射镜 (Distributed Bragg Reflector) 组成, 这些反射镜由两种折射率不同、亚波长尺度的介质层周期性堆叠构成, 并且材料层与发光介质之间需要满足严格的晶格常数匹配条件<sup>[13-15]</sup>. WGM 腔利用全内反射 (Total Internal Reflection, TIR), 将光限制在环形腔内形成谐振模式, 表现出相对较高的品质因子 (Quality Factor) 和较小的模式体积<sup>[16]</sup>. PC 腔是由不同折射率的介

质周期性排列形成的光学结构。与传统光学谐振腔相比，它具有超高的品质因子、极小的模式体积以及高度的可集成性<sup>[17, 18]</sup>。通过能带工程对周期性结构进行优化设计，可以自由调控光子晶体的色散关系，使其在激子极化激元器件的研究中展现出独特的优势和巨大的应用价值<sup>[19-21]</sup>。

迄今为止，激子极化激元物理和器件的研究，大多基于 III-V 族（GaAs）和 II-VI 族（CdTe）量子阱材料<sup>[22-24]</sup>。虽然针对这些材料的微腔制备技术已相当成熟，但由于其激子束缚能小于室温热激活能，通常只能在低温（~4 K）下工作，这限制了激子极化激元的广泛应用。通过选择具有高激子束缚能和高振子强度的材料体系，有望在室温下实现强耦合，形成激子极化激元，为实现激子极化激元器件奠定坚实的物理基础。

近年来，为了在室温下形成激子极化激元，研究人员开展了多种具有高激子束缚能材料的研究<sup>[25]</sup>，例如 GaN、ZnO<sup>[14, 26]</sup>、有机半导体<sup>[27]</sup>、钙钛矿半导体<sup>[28]</sup>和二维材料<sup>[29]</sup>。其中，直接带隙的单层二维过渡金属二硫化物<sup>[30]</sup>

（Transition-Metal Dichalcogenides - TMDC），激子束缚能超过~150 meV<sup>[31-33]</sup>，并且具有高的振子强度<sup>[34]</sup>，在室温激子极化激元器件的研究中展现出巨大的优势。尽管近期基于 TMDC 的激子极化激元研究引起了人们的兴趣，但提高光学微腔的  $Q$  因子以增强光限制，进一步延长光子寿命，从而增强单层 TMDC 激子与腔光子之间的强耦合，仍然是一个关键的挑战。因此，设计一种结构简单、光场局域能力强的光学微腔结构已成为该领域的研究重点。

## 2 实验系统与测试方法

本文中，我们自主构建了偏振分辨和动量分辨光谱系统。该系统能够在单

次采集中获取动量空间的光谱信息，与传统的多次角度测量相比，显著提高了测量效率。除此之外，该系统还具有独立可调的激发和探测偏振，可以根据需要选择连续波激光器、卤素灯、超连续激光器等不同激发光源<sup>[35]</sup>。

本工作中，我们主要利用该系统的动量分辨光谱测量模式：在该模式下，动量空间信息由成像光谱仪进行检测，入口狭缝与二次成像的后焦面图像共轭。进入光谱仪的光被内部的衍射光栅分开，最后由二维面阵电荷耦合探测器（Charge-Coupled Detector - CCD）采集(Symphony II 1024×256 BIDD)。CCD 的一个轴（像素的列）平行于入口狭缝，用于分辨光的面内动量 $k_{\parallel}$ ，而另一个轴（像素的行）用于分辨光的波长。利用 CCD 的成像测量模式，可以一次性地得到动量空间中沿着入口狭缝方向的色散光谱。

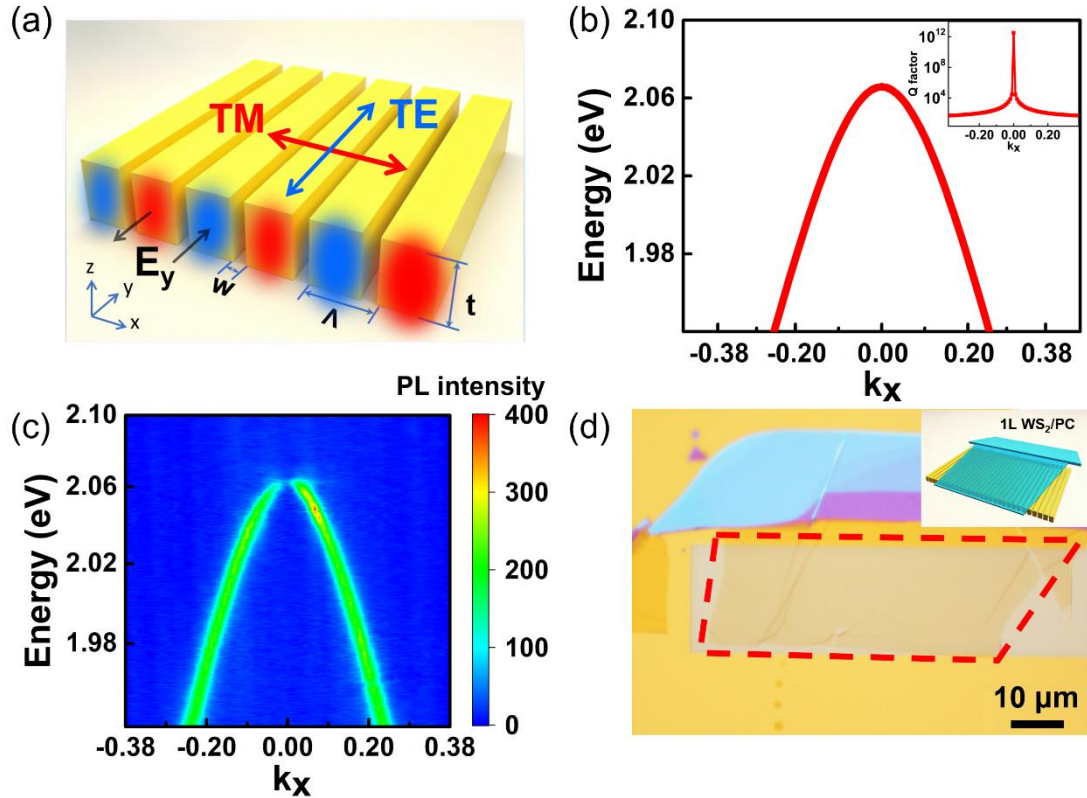
在本文的动量分辨光致发光谱测量中，采用连续波固态激光器（532 nm）对单层  $\text{WS}_2/\text{SiN}_x$  光子晶体样品进行激发，激光功率为 25  $\mu\text{W}$ ，光斑尺寸约为 2  $\mu\text{m}$ 。采集参数如下：光栅：300 gr/mm，狭缝宽度：100  $\mu\text{m}$ ，积分时间：10 s，样品温度：室温（~300 K）。收集的信号首先通过线偏振片进行偏振分辨处理，随后由配置了液氮冷却 CCD 的 Jobin-Yvon iHR 550 光谱仪进行探测。在测试过程中，样品被置于高精度旋转平台上，以精确调节探测方向。

### 3 实验结果与讨论

本文展示了一种基于悬浮  $\text{SiN}_x$  光子晶体结构的亚波长厚度的一维光学微腔，与单层  $\text{WS}_2$  结合制备出激子极化激元复合器件，从而实现室温下的激子-光子强耦合。在一个光学微腔中，品质因子被定义为一个周期结构内的存储能量与耗散能量之比<sup>[36]</sup>。在不考虑材料光学吸收的情况下，品质因子的大小取决于

腔体边界的辐射损耗<sup>[37]</sup>。高的品质因子反映了光场的限制能力，可以有效地延长腔光子寿命，进而实现激子与腔光子之间的强耦合<sup>[38]</sup>，因此设计高品质因子的光学微腔对于激子极化激元研究至关重要<sup>[25]</sup>。平板 PC 结构因其具有超小模式体积和极高品质因子而受到广泛关注，该结构利用面内光子带隙（Photonic Bandgap）和的面外 TIR 实现对光场的三维强局域<sup>[37]</sup>。然而，大多数 PC 腔被设计为直接附着在衬底上，导致衬底方向的垂直损耗增加，从而增强了谐振模式与辐射模式的耦合，最终降低了光学微腔的品质因子<sup>[39]</sup>。

我们设计并制备了一种无衬底的一维光栅光子晶体结构，材料为 SiN<sub>x</sub> 薄膜（可见光波段的折射率  $n=2.20$ ）。由于光栅结构表现出面内各向异性，此结构的光学响应对入射光偏振方向相当敏感。如图 1(a) 所示我们将垂直于光栅条的方向定义为 x 轴，沿光栅条的方向定义为 y 轴，垂直于光栅平面的方向定义为 z 轴。偏振方向平行和垂直于光栅条分别对应于横电（TE）模和横磁（TM）模。z 轴方向为空气-SiN<sub>x</sub>-空气的对称构型，使得光子晶体在垂直方向实现光场的强烈局域，并且光子晶体内光学本征模式能够更严格地解耦为 TE 和 TM 模，为光学能带的精准调控提供了基础。光栅的主要参数包括：光栅周期  $A$ 、凹槽宽度  $w$  和厚度  $t$ 。通过调整  $A$  和  $w$ ，可以自由调节 SiN<sub>x</sub> 光子晶体的共振波长<sup>[35]</sup>。在本工作中，我们利用电子束光刻（EBL）技术，采用优化后的结构参数（ $A=400\text{ nm}$ ,  $w=145\text{ nm}$ ,  $t=100\text{ nm}$ ），在 SiN<sub>x</sub> 薄膜上制备了整体尺寸为  $20\text{ }\mu\text{m} \times 100\text{ }\mu\text{m}$  的悬浮光栅结构。



**图 1:** (a) SiN<sub>x</sub> 光栅结构和 TE 模式电场分布示意图。电场  $E_y$  的方向由红色和蓝色表示，分别沿着  $y$  轴方向和  $-y$  轴方向。(b) SiN<sub>x</sub> 光栅光子晶体的光子色散和品质因子（插图）模拟结果。(c) SiN<sub>x</sub> 光栅光子晶体的光子色散测量结果。(b,c)中  $k_x$  的单位为  $\pi/\Lambda$ 。(d)100 倍显微镜下单层 WS<sub>2</sub> 转移到 SiN<sub>x</sub> 光栅表面的光学照片，以及单层 WS<sub>2</sub>/SiN<sub>x</sub> PC 复合器件示意图（插图）。

**Fig. 1.** (a) Illustration of SiN<sub>x</sub> grating and the simulated electric field distribution for the TE mode. The directions of electric field  $E_y$  are along  $y$  and  $-y$  axis represented by red and blue color. (b) Simulation results of the photonic dispersion and quality factor (inset) of SiN<sub>x</sub> grating. (c) Experimentally measured photonic dispersion of the SiN<sub>x</sub> grating. The unit of  $k_x$  is  $\pi/\Lambda$  in (b, c). (d) Optical image of 1L WS<sub>2</sub> flake transferred on SiN<sub>x</sub> gratings under 100X objective and the schematic diagram of 1L WS<sub>2</sub>/SiN<sub>x</sub> PC device (inset).

这个光栅结构中存在品质因子无限大的 BIC 态，我们利用 COMSOL 多物理场仿真软件，模拟计算了 SiN<sub>x</sub> 光子晶体的光子色散关系曲线和品质因子，如图 1(b)所示。 $\Gamma$  点 ( $k_x=0$ ) 处的 TE 模式对应于 BIC 态，品质因子高于  $10^{12}$ 。这种悬浮结构利用 SiN<sub>x</sub> 层与上下两侧空气层之间的折射率差，实现垂直方向光场强

局域。实际结构的光子色散测量结果如图 1(c)所示，与设计相符。在  $\Gamma$  点处出现的发光暗点是光栅中存在 BIC 态的直接证据<sup>[35]</sup>。

选择激子室温稳定存在的增益介质，对于实现室温激子极化激元至关重要。这里我们采用  $\text{WS}_2$  作为增益介质，其在 300K 时具有极高的激子束缚能 ( $\sim 430$  meV)，远大于室温热激活能  $\sim 25.85$  meV<sup>[19, 33]</sup>。我们采用机械剥离法<sup>[40]</sup>在块体材料中剥离出单层  $\text{WS}_2$ ，通过干法转移技术转移到 PC 表面。为了激子极化激元的形成，作为增益介质的单层  $\text{WS}_2$  必须足够大且平整，能够覆盖整个  $\text{SiN}_x$  光栅，如图 1(d)所示。

针对本工作中的单层  $\text{WS}_2/\text{SiN}_x$  光子晶体复合器件，我们分别对复合结构处、纯光栅处以及转移在光栅结构上的单层  $\text{WS}_2$  进行角分辨 PL 光谱测量。图 2(a)为单层  $\text{WS}_2/\text{SiN}_x$  PC 复合器件的角分辨光谱，与激子产生的无色散光谱不同，单层  $\text{WS}_2/\text{SiN}_x$  PC 复合器件的动量分辨光谱显示出明显的反交叉的特性，这表明单层  $\text{WS}_2$  激子与腔光子之间产生强耦合，获得的动量依赖的光谱来自于激子极化激元发射，分为下支 (lower polariton branch, LPB) 和上支 (upper polariton branch, UPB)。

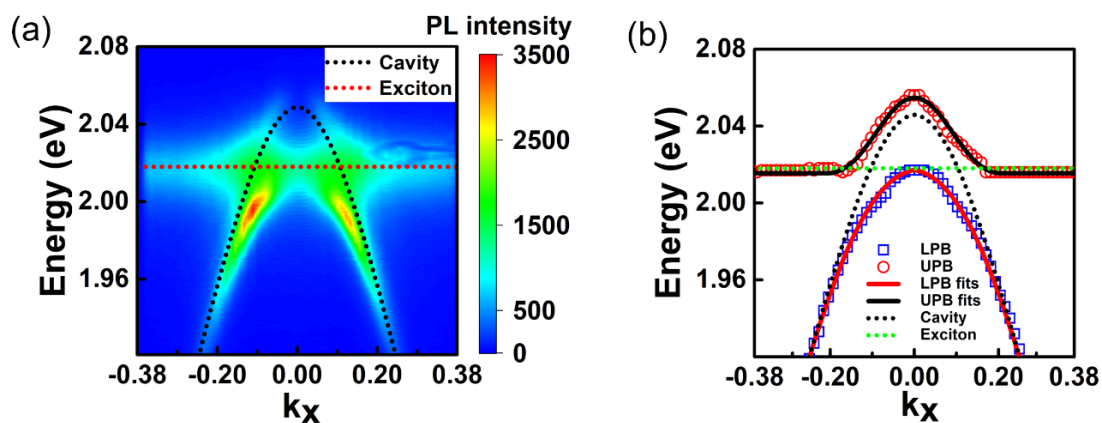


图 2: (a)单层  $\text{WS}_2$ -PC 复合器件的动量分辨 PL 谱，显示出明显的反交叉极化激元模

式。(b)激子极化激元上下两支色散曲线实验（从（a）获得）和拟合结果。

**Fig. 2.** (a) Momentum-resolved PL spectrum of 1L WS<sub>2</sub>-PC integrated device, showing the same anti-crossing polariton modes. (b) Experimental (obtained from (a)) and fitted results of the upper and lower branch dispersions of exciton-polaritons.

表征激子-光子耦合强度的重要参数为拉比劈裂值 $2\hbar\Omega$ 和耦合强度 $g$ 。我们对单层 WS<sub>2</sub>/SiN<sub>x</sub> PC 中耦合模式的光子色散进行了拟合。激子极化激元上下两支的能量 $E_{LPB}$ 、 $E_{UPB}$ 和相应的拉比劈裂值 $2\hbar\Omega$ 由下式给出<sup>[41]</sup>：

$$E_{LPB, UPB}(k_x) = \frac{1}{2} \left[ E_{exc} + E_{cav}(k_x) + i \frac{(\gamma_{cav} + \gamma_{exc})}{4} \right] \pm \sqrt{g^2 + \frac{1}{4} \left[ E_{exc} - E_{cav}(k_x) + i \frac{(\gamma_{cav} - \gamma_{exc})}{2} \right]^2} \quad (1)$$

$$2\hbar\Omega = \sqrt{4g^2 - \frac{(\gamma_{cav} - \gamma_{exc})^2}{4}} \quad (2)$$

其中 $E_{exc}$ 代表激子能量， $\gamma_{exc}$ 和 $\gamma_{cav}$ 分别是未耦合激子和腔光子辐射模式的半高宽， $g$ 为激子-光子耦合强度。为了满足激子-光子强耦合的判断标准，拉比劈裂和激子-光子耦合强度必须遵循以下条件：

$$2\hbar\Omega > \frac{\gamma_{cav} + \gamma_{exc}}{2} \quad (3)$$

$$2g > \sqrt{\frac{(\gamma_{exc}^2 + \gamma_{cav}^2)}{2}} \quad (4)$$

为了计算复合器件的拉比劈裂值以及激子-光子耦合强度，我们分别将纯光栅、转移在光栅结构外部的单层 WS<sub>2</sub> 以及单层 WS<sub>2</sub>/SiN<sub>x</sub> 光子晶体复合结构的角分辨 PL 光谱进行归一化处理，如图 3 所示。首先，从图 3(a)和 3(b)的光谱中提取出腔光子和激子辐射模式的半高宽，分别为 $\gamma_{cav} \approx 20.3$  meV 和 $\gamma_{exc} \approx 37.5$  meV。通过拟合图 3(c)中测得的激子极化激元的 PL 谱，获得了激子极化激元模式能量值 $E_{LPB, UPB}(k_x)$ ，如图 2(b)所示。用公式(1)拟合图 2(b)中的数据，获得激

子-光子耦合强度  $g \approx 17.8 \text{ meV}$ 。根据公式(2)，计算出拉比劈裂值  $2\hbar\Omega \approx 34.6 \text{ meV}$ 。这些参数完全满足公式(3)和(4)中提到的激子-光子强耦合条件。因此，在单层  $\text{WS}_2/\text{PC}$  复合器件中，实现了室温下的激子与腔光子之间的强耦合。

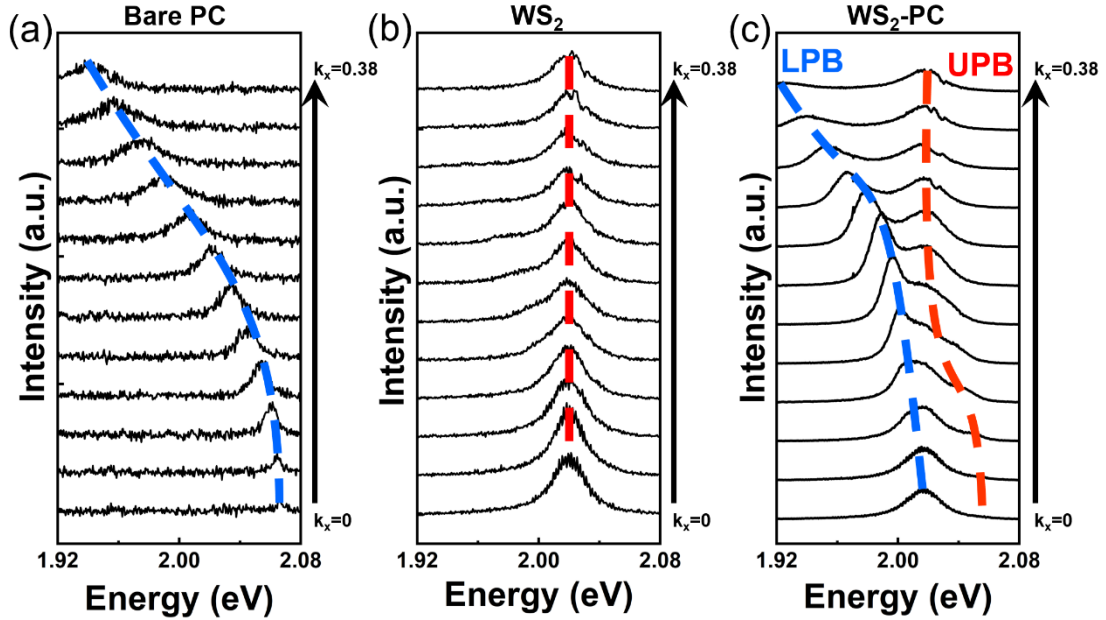


图 3: (a) 纯 PC (左), (b) 单层  $\text{WS}_2$  (中), (c)  $\text{WS}_2/\text{PC}$  器件 (右) 归一化 PL 谱, 动量从  $k_x = 0$  (底部) 到  $k_x = 0.38$  (顶部)。图 3 中的数据提取自相应的光谱, (c)蓝色虚线为激子极化激元下支, 红色虚线为激子极化激元上支。

**Fig. 3.** Normalized PL spectra of (a) bare PC (left), (b) 1L  $\text{WS}_2$  (middle), (c)  $\text{WS}_2/\text{PC}$  device (right) from  $k_x = 0$  (bottom) to  $k_x = 0.38$  (top). The data are extracted from corresponding spectra in Fig. 3, in which the blue dash is LPB, the red dash is UPB for eye guide.

本工作中的悬浮  $\text{SiN}_x$  光子晶体形成了一个具有高品质因子和极小模式体积的光学微腔, 单层  $\text{WS}_2/\text{SiN}_x$  复合器件在室温下产生  $\sim 34.6 \text{ meV}$  的拉比劈裂, 可与基于 FP 腔和其它光子晶体的激子极化激元体系中获得的结果相媲美<sup>[19, 21, 42-46]</sup>。

## 4 结 论

我们设计并制备了一种由  $\text{SiN}_x$  制成的悬浮光子晶体结构, 首次将悬浮光子晶体 BIC 微腔与单层  $\text{WS}_2$  结合, 成功制备了单层  $\text{WS}_2/\text{SiN}_x$  复合器件, 实现室

温下与单层 WS<sub>2</sub> 中激子的强耦合，拉比劈裂达到~34.6 meV。这种实现单层 TMDC 激子和腔光子强耦合的新型 PC 微腔的设计，为将范德瓦尔斯材料应用于激子极化激元物理及相关器件提供了新的思路，并且为室温量子器件的研制与应用奠定了重要基础。

## 参考文献

- [1] Hopfield J J 1958 *Phys. Rev.* **112** 1555
- [2] Weisbuch C, Nishioka M, Ishikawa A, Arakawa Y 1992 *Phys. Rev. Lett.* **69** 3314
- [3] Ma S Q, Deng A L, Lv B S, Hu C, Shi Z W 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 127104 (in Chinese)  
[马赛群, 邓奥林, 吕博赛, 胡成, 史志文 2022 物理学报 **71** 127104]
- [4] Duan J H, Chen J N 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 110701 (in Chinese) [段嘉华, 陈佳宁 2019 物理学报 **68** 110701]
- [5] Deng H, Haug H, Yamamoto Y 2010 *Rev. Mod. Phys.* **82** 1489
- [6] Amo A, Lefrère J, Pigeon S, Adrados C, Ciuti C, Carusotto I, Houdré R, Giacobino E, Bramati A 2009 *Nat. Phys.* **5** 805
- [7] Carusotto I, Ciuti C 2013 *Rev. Mod. Phys.* **85** 299
- [8] Qian C J, Wu S Y, Song F L, Peng K, Xie X, Yang J N, Xiao S, Steer M J, Thayne I G, Tang C C, Zuo Z C, Jin K J, Gu C Z, Xu X L 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 213901
- [9] Kudelin I, Groman W, Ji Q X, Guo J, Kelleher M L, Lee D, Nakamura T, McLemore C A, Shirmohammadi P, Hanifi S, Cheng H T, Jin N J, Wu L, Halladay S, Luo Y Z, Dai Z W, Jin W, Bai J W, Liu Y F, Zhang W, Xiang C, Chang L, Iltchenko V, Miller O, Matsko A, Bowers S M, Rakich P T, Campbell J C, Bowers J E, Vahala K J, Quinlan F, Diddams S A 2024 *Nature* **627** 534
- [10] Park G C, Park K 2021 *Sci. Rep.* **11** 19575
- [11] Brekenfeld M, Niemietz D, Christesen J D, Rempe G 2020 *Nat. Phys.* **16** 647
- [12] Zhou Y X, Li Z P, Chen J N 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 080701 (in Chinese) [周怡汐, 李志鹏, 陈佳宁 2024 物理学报 **73** 080701]
- [13] Christopoulos S, von Högersthal G B H, Grundy A J D, Lagoudakis P G, Kavokin A V,

- Baumberg J J, Christmann G, Butté R, Feltin E, Carlin J F, Grandjean N 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 126405
- [14] Li F, Orosz L, Kamoun O, Bouchoule S, Brimont C, Disseix P, Guillet T, Lafosse X, Leroux M, Leymarie J, Mexis M, Mihailovic M, Patriarche G, Réveret F, Solnyshkov D, Zuniga-Perez J, Malpuech G 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 196406
- [15] Kéna-Cohen S, Davanço M, Forrest S R 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 116401
- [16] Chen F, Zhou H, Li H, Cao J H, Luo S, Sun Z, Zhang Z, Shao Z Q, Sun F H, Zhou B E, Dong H X, Xu H L, Xu H X, Kavokin A, Chen Z H, Wu J 2022 *Nano Lett.* **22** 2023
- [17] Song B S, Noda S, Asano T, Akahane Y 2005 *Nat. Mater.* **4** 207
- [18] Kosaka H, Kawashima T, Tomita A, Notomi M, Tamamura T, Sato T, Kawakami S 1998 *Phys. Rev. B* **58** R10096
- [19] Zhang L, Gogna R, Burg W, Tutuc E, Deng H 2018 *Nat. Commun.* **9** 713
- [20] Maggolini E, Polimeno L, Todisco F, Di Renzo A, Han B, De Giorgi M, Ardizzone V, Schneider C, Mastria R, Cannavale A, Pugliese M, De Marco L, Rizzo A, Maiorano V, Gigli G, Gerace D, Sanvitto D, Ballarini D 2023 *Nat. Mater.* **22** 964
- [21] Liu W J, Ji Z R, Wang Y H, Modi G, Hwang M, Zheng B Y, Sorger V J, Pan A L, Agarwal R 2020 *Science* **370** 600
- [22] Ardizzone V, Riminucci F, Zanotti S, Gianfrate A, Efthymiou-Tsironi M, Suárez-Forero D G, Todisco F, De Giorgi M, Trypogeorgos D, Gigli G, Baldwin K, Pfeiffer L, Ballarini D, Nguyen H S, Gerace D, Sanvitto D 2022 *Nature* **605** 447
- [23] Riminucci F, Ardizzone V, Francaviglia L, Lorenzon M, Stavrakas C, Dhuey S, Schwartzberg A, Zanotti S, Gerace D, Baldwin K, Pfeiffer L N, Gigli G, Ogletree D F, Weber-Bargioni A, Cabrini S, Sanvitto D 2022 *Phys. Rev. Appl* **18** 024039
- [24] Kasprzak J, Richard M, Kundermann S, Baas A, Jeambrun P, Keeling J M J, Marchetti F M, Szymańska M H, André R, Staehli J L, Savona V, Littlewood P B, Deveaud B, Dang L S 2006 *Nature* **443** 409
- [25] Zhu T Y, Chen Z L, Wang X Y, Huang Z M, Zhao H B, Wang J 2025 *Chin. Phys. B* **34** 94202
- [26] Xie W, Dong H X, Zhang S F, Sun L X, Zhou W H, Ling Y J, Lu J, Shen X C, Chen Z H 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 166401

- [27] Kéna-Cohen S, Forrest S R 2010 *Nat. Photonics* **4** 371
- [28] Su R, Diederichs C, Wang J, Liew T C H, Zhao J X, Liu S, Xu W G, Chen Z H, Xiong Q H 2017 *Nano Lett.* **17** 3982
- [29] Zhao J X, Su R, Fieramosca A, Zhao W J, Du W, Liu X, Diederichs C, Sanvitto D, Liew T C H, Xiong Q H 2021 *Nano Lett.* **21** 3331
- [30] Mak K F, Lee C G, Hone J, Shan J, Heinz T F 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 136805
- [31] Ugeda M M, Bradley A J, Shi S F, da Jornada F H, Zhang Y, Qiu D Y, Ruan W, Mo S K, Hussain Z, Shen Z X, Wang F, Louie S G, Crommie M F 2014 *Nat. Mater.* **13** 1091
- [32] Wang S, Ukhtary M S, Saito R 2020 *Physical Review Research* **2** 033340
- [33] Zhu B R, Chen X, Cui X D 2015 *Sci. Rep.* **5** 9218
- [34] He K L, Kumar N, Zhao L, Wang Z F, Mak K F, Zhao H, Shan J 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 026803
- [35] Lan W, Fu P, Ji C, Wang G, Yao Y, Gu C, Liu B 2023 *Appl. Phys. Lett.* **122** 151102
- [36] Mak K F, Shan J 2016 *Nat. Photonics* **10** 216
- [37] Akahane Y, Asano T, Song B S, Noda S 2003 *Nature* **425** 944
- [38] Al-Ani I A M, As'Ham K, Huang L, Miroshnichenko A E, Lei W, Hattori H T 2022 *Adv. Opt. Mater.* **10** 2101120
- [39] Kassa-Baghdouche L, Boumaza T, Cassan E, Bouchemat M 2015 *Optik* **126** 3467
- [40] Castellanos-Gomez A, Buscema M, Molenaar R, Singh V, Janssen L, van der Zant H S J, Steele G A 2014 *2D Mater.* **1** 011002
- [41] Li Q Y, Alfrey A, Hu J Q, Lydick N, Paik E, Liu B, Sun H P, Lu Y, Wang R Y, Forrest S, Deng H 2023 *Nat. Commun.* **14** 1837
- [42] Barachati F, Fieramosca A, Hafezian S, Gu J, Chakraborty B, Ballarini D, Martinu L, Menon V, Sanvitto D, Kéna-Cohen S 2018 *Nat. Nanotechnol.* **13** 906
- [43] Dufferwiel S, Schwarz S, Withers F, Trichet A A P, Li F, Sich M, Del Pozo-Zamudio O, Clark C, Nalitov A, Solnyshkov D D, Malpuech G, Novoselov K S, Smith J M, Skolnick M S, Krizhanovskii D N, Tartakovskii A I 2015 *Nat. Commun.* **6** 8579
- [44] Zhang L, Wu F C, Hou S C, Zhang Z, Chou Y H, Watanabe K J, Taniguchi T, Forrest S R, Deng H 2021 *Nature* **591** 61
- [45] Kravtsov V, Khestanova E, Benimetskiy F A, Ivanova T, Samusev A K, Sinev I S, Pidgayko

D, Mozharov A M, Mukhin I S, Lozhkin M S, Kapitonov Y V, Brichkin A S, Kulakovskii V  
D, Shelykh I A, Tartakovskii A I, Walker P M, Skolnick M S, Krizhanovskii D N, Iorsh I V  
2020 *Light: Sci. Appl.* **9** 56

[46] Yang C, Huang L, Li Y, Zhai X, Ai Q, Xing C, Yang X, Gu Y, Li P, Li Z, Dai H, Feng L,  
Liu L, Wang X, Gao T 2025 *Chin. Phys. B* **34** 09783

录用稿件，非最终出版稿

# Room temperature exciton polaritons in monolayer WS<sub>2</sub> with suspended SiN<sub>x</sub> photonic crystal\*

HUA Yu<sup>1)2)</sup> ZHOU Jiaru<sup>1)2)</sup> LI Hao<sup>1)</sup> LI Geng<sup>1)3)</sup> FAN Xiaofeng<sup>4)</sup> GU Changzhi<sup>1)3)</sup> LIU  
Baoli<sup>1)3)</sup> †

1) (Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2) (School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3) (School of Physical Sciences, CAS Key Laboratory of Vacuum Physics, University of Chinese  
Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

4) (College of Materials, Jilin University, No. 2699 Qianjin Street, Changchun, 130022, China)

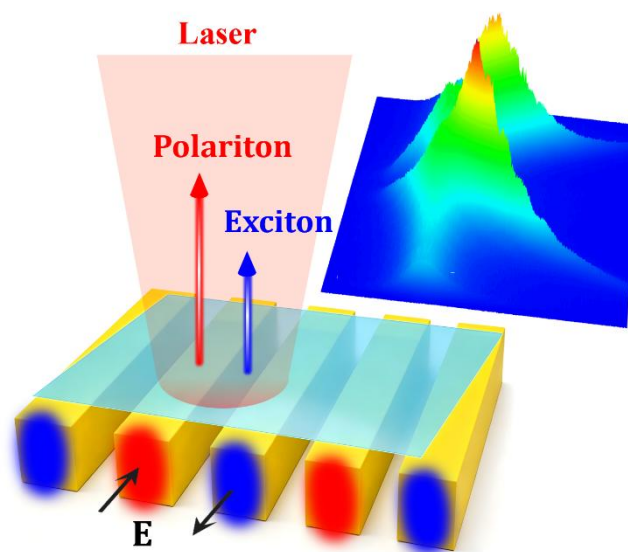
Abstract

Exciton polaritons based on strong exciton–photon coupling hold great promise for developing novel polaritonic devices and studying quantum many-body physics. However, due to the relatively small exciton binding energy of most semiconductor materials, exciton polaritons can typically only be realized at low temperatures ( $\sim 4$  K), which limits their room-temperature applications. Therefore, there is an urgent need to develop a platform capable of generating exciton polaritons at room temperature to facilitate both fundamental research and practical applications.

In this work, leveraging the room-temperature stability of excitons in monolayer WS<sub>2</sub> and the ultrahigh quality factor of bound states in the continuum (BICs) in photonic crystals, we successfully designed and fabricated a composite device consisting of a substrate-free SiN<sub>x</sub> one-dimensional grating and a monolayer WS<sub>2</sub>, demonstrating room-temperature generation of exciton polaritons. By measuring the momentum-resolved photoluminescence spectrum of the device, we obtained the exciton-polariton dispersion curve and observed a clear mode anticrossing between the dispersionless WS<sub>2</sub> excitons and the highly dispersive cavity photons. This unambiguously confirms the formation of distinct upper and lower polariton branches, evidencing strong coupling between monolayer WS<sub>2</sub> excitons and cavity photons. By applying a

coupled-oscillator model to the experimental dispersion, we extracted an exciton–photon coupling strength of  $\sim 17.8$  meV and a Rabi splitting as high as  $\sim 34.6$  meV, which rigorously satisfy the strong coupling criteria.

In conclusion, we successfully achieved room-temperature strong coupling between WS<sub>2</sub> excitons and cavity photons by harnessing the ultrahigh quality factor of bound states in the continuum within a suspended microcavity. This novel suspended microcavity design with an ultrahigh quality factor effectively eliminates substrate-induced energy dissipation, thereby fully preserving the intrinsically large oscillator strength of the excitons. Ultimately, this architecture provides a robust foundation for integrating van der Waals materials into room-temperature quantum and polaritonic devices, and paves the way for room-temperature observation of macroscopic quantum phenomena such as polariton Bose–Einstein condensation as well as the development of ultra-low-threshold coherent light sources.



**Keyword:** Exciton-polariton, transitional metal disulfides, photonic crystal, light-matter

interaction

**PACS:** 71.36.+c

---

\* Project supported by the the National Key Research and Development Program of China (Grant Nos. 2024YFA1207700, 2021YFA1400700, 2022YFA1204100), the National Natural Science Foundation for Young Scientists of China (Grant No. 12404042), and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. GZC20241892).

† Corresponding author.E-mail: blliu@iphy.ac.cn

The first author.E-mail: hua\_yu@iphy.ac.cn

录用稿件，非最终出版稿