·综述·

胶体光子晶体的构筑及其在智能传感中的应用进展

梁 旭 田阿青 刘 帅 高 淳 王 伟 谭海英* 姜 伟* 金 晶

(武汉纺织大学材料科学与工程学院 武汉 430200)

摘 要 光子晶体是由介电常数不同的材料周期性排列而成的人工微结构，其光子带隙可产生结构色，并对外界刺激产生光学响应，在智能传感领域备受关注. 本文系统综述了胶体光子晶体的一般构筑策略、传感变色机制及其在物理、化学与生物传感中的最新进展. 首先，总结了蒸发诱导、外场诱导、聚合诱导、过饱和度诱导及模板法等构筑光子晶体的一般方法，分析了各方法的优势与局限. 其次，阐述了基于折射率变化、晶格间距变化及有序-无序转变的光子晶体的3种典型传感机制. 进一步，总结了光子晶体传感器在机械力与温度物理传感、气氛/湿度/pH/离子小分子化学传感以及免疫/适配体/酶/分子印迹生物传感中的应用实例. 最后，指出了当前面临的响应速度、长期稳定性及量产一致性等挑战，并展望了多机制协同、多模态融合及智能化集成的发展方向，为该领域从实验室走向实际应用提供参考.

关键词 光子晶体；自组装；结构色；智能传感；可视化检测

引用: 梁旭, 田阿青, 刘帅, 高淳, 王伟, 谭海英, 姜伟, 金晶. 胶体光子晶体的构筑及其在智能传感中的应用进展. 高分子学报, **2026**, 57(9), 1895−1923.

Citation: Liang, X.; Tian, A. Q.; Liu, S.; Gao, C.; Wang, W.; Tan, H. Y.; Jiang, W.; Jin, J. Colloidal photonic crystals: advances in fabrication strategies and applications in intelligent sensing. *Acta Polymerica Sinica* (in Chinese), **2026**, 57(9), 1895−1923.

1 光子晶体概述

光子晶体(photonic crystals，PCs)是由2种或2种以上具有不同介电常数的材料在空间按特定周期性排列形成的有序结构[1~5]. 当光在介电常数周期变化的结构中传播时，会因布拉格衍射产生相干干涉，从而在某些频率范围内形成光子带隙(或称光子禁带)，落在带隙内的光无法在晶体中传播并被反射，从而产生明亮的结构色. 光子晶体是产生结构色的重要途径之一，但并非唯一途径. 薄膜干涉、光栅衍射等微纳结构也能产生结构色，然而，由于其结构不完全具备空间周期性及其带来的光子带隙效应，通常不归类为严格意义上的光子晶体.

在自然界中，这种结构色普遍存在，从变色龙的皮肤[6]、蛋白石的变彩[7,8]，到翡翠斑牛心蝶的翅膀[9,10]、变脸鸟的羽毛[11]、鞘翅目昆虫的鳞片[12,13]，乃至深海栉水母的栉板[14] (图1(b)~1(l))，皆为其典型代表. 这些天然光子晶体不仅呈现绚丽色彩，更承载着丰富的生物学功能. 长期以来，各类生物体不断演化，发展出了通过色彩传递信息的能力. 许多生物能够根据自身需求和周围环境来利用其体表特征. 例如，变色龙能在数秒内实现皮肤颜色的可逆变化，当危险临近时，改变皮肤颜色以吓退天敌，待刺激解除后颜色又可恢复如初；帝王蝶翅膀上精密的鳞片随视

黄葆同/冯之榴先生诞辰105周年纪念专辑；2026-04-30收稿，2026-06-09录用，2026-08-18网络出版.

基金项目：国家自然科学基金(基金号 52433001)，湖北省教育厅项目(项目号 D20241605)，2023年湖北省重大攻关项目(项目号 (JD)2023BAA028).

* 通信联系人，E-mail: hytan@wtu.edu.cn; weijiang@wtu.edu.cn

doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26150; CSTR: 32057.14.GFZXB.2026.7661

角变化产生不同结构色，在飞行时既可吸引配偶，又可在静止时提供伪装以躲避天敌；美丽的孔雀在开屏时，则通过其羽毛上闪耀的色彩来进行繁衍. 上述现象产生的原因在于，这些生物体内拥有复杂的光子微纳结构，这些结构能与可见光相互作用，反射出明亮的色彩. 此外，部分生物还能实现体色的快速可逆变化，这主要依赖于其体内这些光子微纳结构的变化[15]. 这些结构并非仅仅是色彩的表现形式，而是融合了精密纳米构造、优异光学性能与环境适应策略的智能系统，为人工光子晶体的构筑与功能化设计提供了丰富的仿生蓝本. 向自然学习，构建能够根据目标刺激和性能需求产生响应的智能材料，关键在于对光子晶体微纳结构进行合理设计与精准组装，从而实现对其光学性能的有效调控. 正是这种结构色，特别是具备刺激响应能力的光子晶体，有望突破传统化学色的局限，成为发展新一代智能光学材料的重要路径.

根据光子晶体的周期性结构，可以将其大致分为一维(1D)[16]、二维(2D)[17]和三维(3D)[18]光子晶体(图1(a)). 其中一维光子晶体具有交替层状结构，由不同折射率的材料堆叠而成；二维光子晶体在2个方向上呈周期性排列；三维光子晶体则在3个空间方向上均具有周期性有序结构和折射率变化. 目前，胶体光子晶体的制备方法主要分为自上而下和自下而上2大类[19~22]. 自上而下方法依托传统的微纳加工技术，如等离子刻蚀[23]、光刻[24]、全息光刻[25]、电子束光刻[26]等，通过精确去除材料来构建周期性结构. 自下而上法主要通过胶体粒子的自发组装形成有序结构，从而发展出的一类重要的光子晶体——胶体光子晶体. 胶体光子晶体通常由单分散的亚微米级胶体球(如二氧化硅、聚苯乙烯等)通过自组装形成三维周期性排列，其光子带隙位于可见光波段，因而呈现明亮的结构色. 根据构筑胶体光子晶体的驱动力和操作方式的不同，可进一步细分为多种具体策略，例如过饱和驱动[27]、聚合诱导[28]、蒸发诱导[29]、剪切诱导[30]、外场诱导自组装[31]

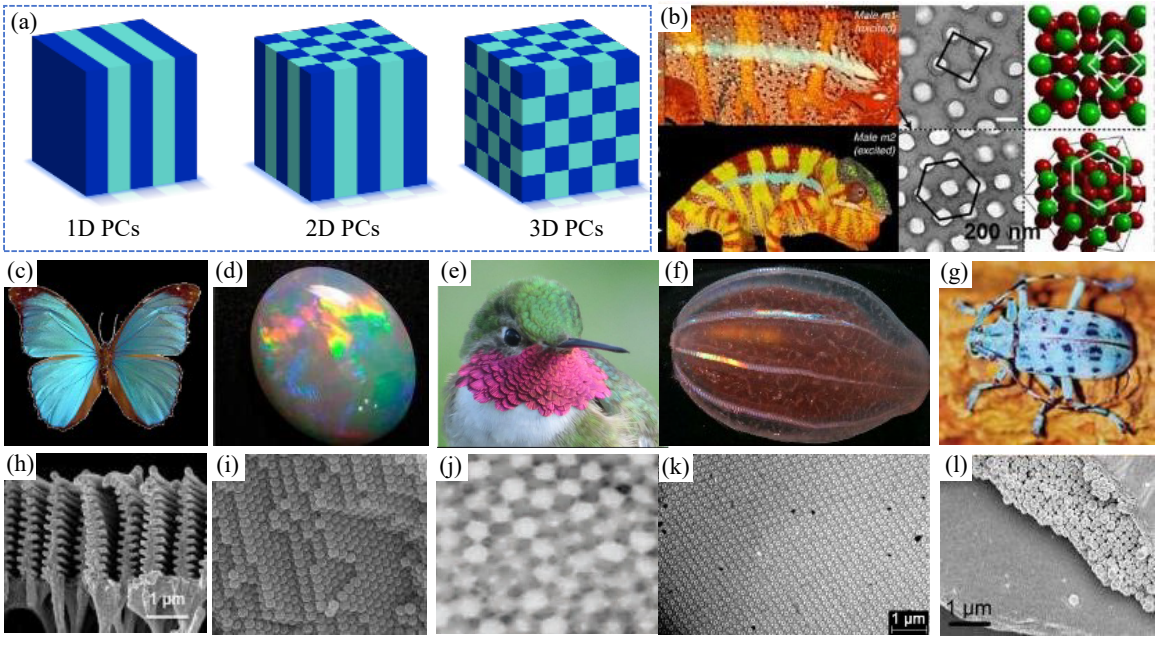


Fig. 1 Photonic crystals (PCs) and basic structures (a) Structure of the 1D, 2D and 3D PCs; (b) The skin structure and color-changing mechanism of chameleons (Reprinted with permission from Ref. [6]; Copyright (2015), Springer Nature); (c) The color of a butterfly's wings; (d) The microscopic structure of a butterfly's wings (Reprinted with permission from Ref. [10]; Copyright (2017), Springer Nature); (e) The color of opal; (f) The microscopic structure of opalite structure (Reprinted with permission from Ref. [8]; Copyright (2014), American Chemical Society); (g) The color of birds (Reprinted with permission from Ref. [11]; Copyright (2017), American Association for the Advancement of Science); (h) The microscopic structure of birds; (i) The color of the ctenophore's comb plates; (j) The microscopic structure of the ctenophore's comb plates (Reprinted with permission from Ref. [14]; Copyright (2006), American Physical Society); (k) The color of the beetle; (l) The microscopic structure of the beetle's exoskeleton (Reprinted with permission from Ref. [13]; Copyright (2012), Elsevier B. V.).

以及模板刻蚀[32]等方法. 上述构筑方法在组装效率、结构可控性和适用材料体系等方面各具特点，其优缺点将在后续章节详细讨论.

迄今为止，可用于构筑胶体光子晶体的结构单元已涵盖单分散微球[33,34]、微纤维[35,36]、纳米柱[37,38]、纳米线[39,40]、纤维素纳米晶(CNC)[41~43]和壳聚糖纳米纤维[44,45]等多种类型，其中采用单分散微球构建光子晶体传感器已被广泛接受. 这些材料通过合理设计与组合，能够对温度[46,47]、机械力[48,49]、电场/磁场[50,51]、气氛[52,53]、湿度[54,55]、pH[56,57]、离子浓度[58,59]等外部刺激产生灵敏响应. 当用作光子晶体传感器时，外界刺激会诱导材料的晶格参数或组成介质的有效折射率发生变化，从而实现光子禁带的动态调控，并直接转化为肉眼可辨的颜色变化. 这种将环境信号“翻译”为光学信号的能力，使光子晶体成为构筑无需外接电源、可裸眼识别的新型传感平台的理想材料；同时，其光学信号还可进一步与计算机连接，实现实时监测.

在构筑策略不断完善的推动下，响应型变色胶体光子晶体材料在彩色显示[60,61]、生物医学传感[62~64]、防伪加密标签[65,66]、电子皮肤[67,68]等领域展现出广阔的应用前景，正在从原理验证走向多元化应用探索. 其中，开发能够适配更具挑战性传感场景的光子晶体材料，正成为该领域的重要研究方向. 如今，传感器在技术基础设施发展中的重要性已在全球范围内得到充分认识，特别是基于光子晶体的传感器因其新发现的突出优势而备受关注：(1) 对传感信息提取设备要求低；(2) 制备方法简单且成本效益高；(3) 灵敏度高；(4) 选择性好；(5) 分析结果可靠，光学信号的变化严格遵循布拉格定律；(6) 环境友好，许多由安全且易于获取的原材料制备的光子晶体传感器可以多次循环使用. 此外，尺寸便携、稳定性优异和操作方便也是光子晶体传感器研究蓬勃发展的不可忽视的因素. 然而，面向实际应用，仍面临诸多关键挑战：灵敏度与选择性往往难以兼顾；如何实现快速、定量化的信号读取仍是亟待突破的难题；构筑过程的可控性与可重复性也有待进一步提升. 这些问题的核心，均在于如何通过材料设计与系统搭建，实现对光子晶体响应性能的精准调控与可靠检测，这也正是本文关注的重点.

基于上述背景，本文围绕胶体光子晶体的构筑及其在智能传感中的应用展开综述. 首先，我们将根据驱动力和具体操作方法，系统总结光子晶体的构筑策略，包括通过不同自组装方法制备光子晶体传感器的研究进展，并从密堆积和非密堆积纳米结构胶体阵列两个方面回顾光子晶体的结构. 其次，梳理基于布拉格定律的智能光子晶体传感器的传感机制. 进一步，根据传感目标分析物的分类，总结智能光子晶体传感器的最新应用进展. 最后，分析当前面临的挑战与未来发展方向，以期为新型光子晶体传感器的设计开发提供参考.

2 光子晶体的一般构筑策略

2.1 蒸发诱导自组装

蒸发诱导自组装需要将单分散胶体纳米粒子均匀分散于挥发性溶剂中，其基本原理在于：随着溶剂挥发，液膜逐渐变薄，粒子浓度不断升高；在挥发后期，液膜弯月面处产生的毛细力以及由温度/浓度梯度引发的对流共同作用，驱动纳米粒子向蒸发界面迁移并自调整位置，最终在基底上形成有序排列；待溶剂完全挥发后，粒子间相互作用力将其锁定在能量最低的组装结构上. 浸涂法、旋涂法、喷涂法和喷墨打印法正是基于上述原理实现光子晶体制备的典型技术方法，本文将对其基本原理进行简介.

浸涂法是将可润湿的光滑基底垂直浸入胶体分散液中，再以受控速率缓慢提拉，并借助可控温差使溶剂在液面处蒸发. 在提拉过程中，基底与液面之间形成弯液面，溶剂蒸发产生毛细流动，驱动纳米粒子向弯液面聚集并自组装为有序薄膜[69](如图2(a)). 该方法的关键控制参数包括：提拉速率(决定湿膜厚度)、溶剂挥发速率(受温度和溶剂性质影响)以及胶体分散液的体积分数. 浸涂法的核心在于弯液面处的“蒸发−对流−组装”耦合机制：蒸发导致局部过饱和，对流将粒子输送至生长前沿，毛细力则将粒子拉入晶格位置. 该方法适用于制备大面积、均匀的光子晶体薄膜，但对基底的润湿性要求较高. 此外，提拉速率与组装质量之间存在复杂的依赖关系，若速度控制不当可能会出现多层无序结构或者膜厚不均匀的情况. Martusciello 等[70]基于上述浸涂法的“蒸发−对流−组装”耦合原理，将商品化熔融沉

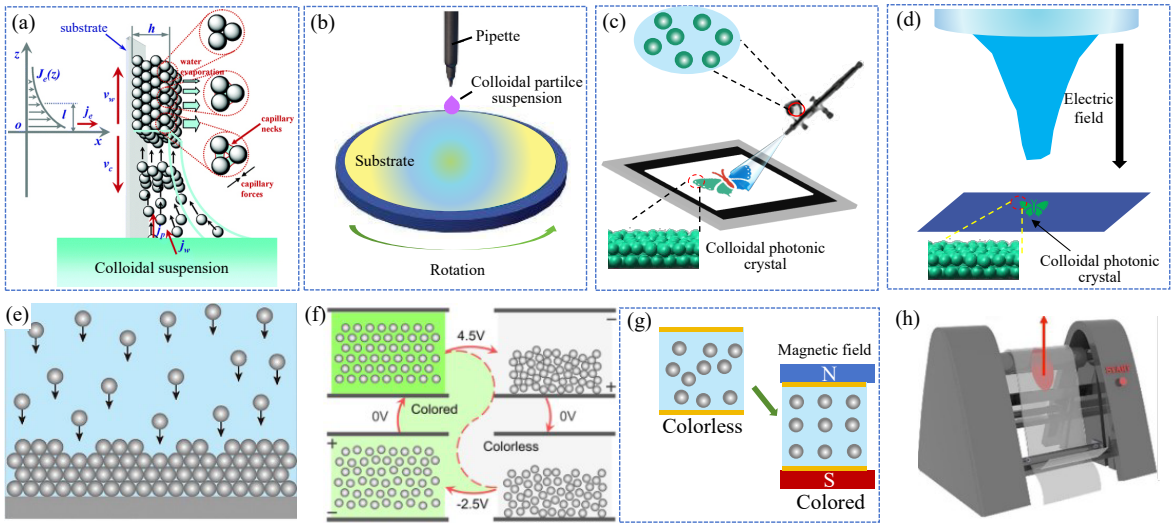


Fig. 2 Schematic diagram of the common construction process of photonic crystals: (a) Impregnation (Reprinted with permission from Ref. [107]; Copyright (2007), American Chemical Society); (b) Spin coating (Reprinted with permission from Ref. [108]; Copyright (2025), Wiley-VCH GmbH); (c) Spraying; (d) Inkjet printing; (e) Gravity sedimentation (Reprinted with permission from Ref. [109]; Copyright (2021), Wiley-VCH GmbH); (f) Electrical field-induced assembly (Reprinted with permission from Ref. [110]; Copyright (2022), Springer Nature); (g) Magnetic field-induced assembly; (h) Shear-induced assembly (Reprinted with permission from Ref. [111]; Copyright (2022), Elsevier B. V.).

积成型3D打印机改装为浸涂系统，用于制备多层有序薄膜. 具体而言，通过交替浸涂全氟聚合物和聚乙烯基咔唑溶液，在基底与液面之间形成弯液面；溶剂挥发导致局部过饱和，通过提拉速率精确调控构筑了具有周期性介电调制结构的光子晶体. Jiang团队[71]将反溶剂引入传统浸涂体系，利用溶剂与反溶剂之间的表面张力差异，在气−液界面形成表面张力梯度，从而诱导产生马兰戈尼流. 该流体动力学过程能够驱动胶体分散液中的组装基元(如有机半导体分子或胶体纳米粒子)向溶剂/反溶剂界面及弯液面处迁移并有序堆积. 通过调节浸涂提拉速率和溶剂/反溶剂比例，可以精确控制组装过程，进而获得从厘米尺度的大面积、高度取向的光子晶体薄膜.

旋涂法是利用匀胶机产生的离心力，将静止于基底中心的胶体悬浮液高速旋转铺展成均匀薄膜，可在较短时间内制备大面积二维或薄层三维有序结构(如六角密堆积单层)[72](如图2(b)). 在旋涂过程中，离心力与溶剂挥发同步作用，即高速旋转使胶体分散液迅速铺展为薄液膜的过程中溶剂快速挥发，粒子在剪切流和毛细力的共同驱动下有序堆积，从而实现光子晶体的构筑. 该方法的关键控制参数包括旋涂转速(决定膜厚与剪切力大小)、加速度、分散液黏度以及溶剂挥发性. 旋涂法的关键在于离心力驱动的径向铺展与溶剂挥发导致的厚度减薄之间的竞争过程的调控，调控不当可能难以得到目标结构. 因此，该方法仅适用于平面或轻微弯曲表面光子晶体的构筑. 例如，Zhang等[73]利用旋涂法的离心铺展与溶剂挥发协同机制，将共价有机框架(COF)纳米颗粒(高折射率)与低折射率材料交替旋涂，逐层组装成一维光子晶体布拉格反射镜. 旋涂时，离心力使胶体分散液铺展成薄液膜，溶剂快速挥发，毛细力与剪切流驱动颗粒有序堆积，形成光子晶体后可实现12种有机挥发物的快速可视化传感. Meher等[74]将钛酸四丁酯和醋酸锌前驱体混合后旋涂于叉指电极，构筑的光子晶体比表面积高，能够对丙酮蒸气快速响应并迅速恢复.

喷涂法是将胶体悬浮液通过喷枪雾化为微米级液滴，高速喷射至基底表面，利用液滴撞击后的快速铺展、溶剂挥发与颗粒自组装的协同作用成膜构筑光子晶体的过程[75](如图2(c)). 该方法采用液滴撞击基底后迅速铺展形成微区薄液膜，溶剂快速蒸发产生毛细流，驱动胶体纳米粒子向液膜边缘及生长前沿迁移并有序堆积，最终在基底上形成二维或三维有序结构(如六角密堆积排列). 该方法的最大优势在于不受基底形状限制，可在球面、纺织品、不规则曲面等三维表面上直

接成膜，且制备速度快、可大面积生产、成本低廉. 喷涂法的关键挑战在于控制液滴尺寸的均匀性与撞击动力学的调控. 此外，液滴撞击基底后产生的“咖啡环”效应也会干扰纳米粒子的有序排列，限制其在高质量光子晶体构筑中的应用. 我们团队通过喷涂法[76]以硫化锌、二氧化硅等纳米粒子为原料在普通织物(如涤纶布、棉布等)以及芳纶纤维织物表面构筑了光子晶体，并系统研究了调控织物稳定性的方法[77,78]. Liu团队[79]采用喷涂法在碳纤维上喷涂聚合物微球构筑了光子晶体碳纤维织物.

喷墨打印技术的核心是配制稳定的“光子墨水”——将胶体纳米粒子均匀分散于挥发性溶剂中，并调节表面张力与黏度以满足打印头喷射要求. 图案打印过程中打印机头按数字化图案将墨滴精准喷射到基底上，每个液滴沉积后，溶剂快速挥发，气–液界面处产生的毛细力与马兰戈尼流共同驱动纳米粒子向液滴内部或弯液面处迁移，在局部限域空间内自组装形成有序结构而显色(如图2(d)). 该方法能够实现光子晶体的数字化、图案化精准制备，无需掩模或模具，材料利用率高. 然而，喷墨打印面临“咖啡环”效应的挑战——液滴边缘蒸发速率高于中心，导致粒子向边缘迁移，形成环状沉积而非均匀组装结构. 抑制咖啡环的策略包括：调节溶剂组成[80](添加高沸点共溶剂)、控制基底温度[81]、使用表面活性剂改变马兰戈尼流方向[82]，或采用油层覆盖抑制蒸发不均匀[83]. 例如，Vinogradov等[84]以磁性胶体纳米晶簇(MCNCs)为原料制备光子墨水，通过喷墨打印沉积在涂有未固化PDMS的基底上；打印完成后施加外部磁场，MCNCs沿磁感线定向排列自组装成一维光子晶体链，最终获得具有磁控变色能力的光子晶体. Vignolini等[85]则将纤维素纳米晶(CNC)墨水通过喷墨打印穿过不混溶的油层沉积，通过油层包覆抑制水分的快速蒸发，为CNC在手性向列相中的螺旋组装得到具有结构色的光子晶体膜.

蒸发诱导自组装构筑光子晶体的优势在于操作简便、成本低廉、无需复杂设备，且适用于多种基底形状，可大面积制备. 然而，该方法普遍存在“咖啡环”效应，限制了图案分辨率和结构色饱和度的进一步提高；大尺寸或重粒子的沉降易中断组装过程；溶剂蒸发速度难以精确控制，进而得到的光子晶体材料容易产生裂纹、空位等缺陷；此外，传统蒸发诱导方法通常耗时较长，难以满足快速制备需求. 近年来，通过引入辅助外场(如磁场、电场)[86]或采用限域蒸发策略[87](如油层覆盖、微毛细管限域)[88]虽一定程度的克服了上述缺点，但蒸发诱导自组装仍是对操作条件具有比较高的要求，其规模化应用需在工艺窗口的精确控制上持续优化.

2.2 外场诱导组装法

外场诱导组装法是利用重力场、电场、磁场或剪切场驱动胶体纳米粒子从初始无序状态重新排列为平衡有序状态制备光子晶体的技术. 与依赖自发扩散和蒸发的传统溶剂挥发自组装不同，它能够提供定向、可控的能量输入，克服布朗运动的随机扰动以及重力作用下的自发沉降，引导粒子沿特定方向组装形成周期性结构. 根据外场类型的不同，该方法可分为重力场诱导、电场诱导、磁场诱导、剪切力场诱导以及丝网印刷等组装方法.

重力场诱导组装的核心驱动力是粒子自身的重力，当胶体悬浮液中纳米粒子的密度大于分散剂时，粒子在静止状态下会缓慢沉降. 当粒子浓度足够高时，沉降过程中粒子之间的相互碰撞与排列逐渐形成有序堆积结构[89~91](如图2(e)). 该方法仅需一个容器和稳定的静置环境即可完成组装. 然而，粒子的沉降速率与其直径的平方成正比，若以小尺寸粒子(<100 nm)为基元，其沉降时间长达数周至数月，效率较低；且沉降过程中粒子的热扩散与重力沉降相互竞争易形成多晶或无序结构. Lu团队[92]先用刮涂将高浓度二氧化硅粒子分散液快速铺展在基底上，随后静置利用重力驱动纳米球沉降，辅以溶剂蒸发产生的毛细管力促进其组装形成密堆积结构，经优化后仅需10 min即可获得面积为10 cm × 10 cm的高度有序光子晶体膜. 悬滴法为重力诱导组装提供了另一种实现路径，该方法本质上是对重力场中流体动力学效应的协同利用[93,94]. 将胶体悬浮液滴悬挂于疏水针尖或倒置基底的下方，液滴在重力作用下自然下垂形成弯月面. 在蒸发过程中，液滴内部同时存在重力沉降、自然对流以及由表面张力梯度驱动的马兰戈尼流[95,96]. 通过将液滴悬挂于基底下方，重力方向与蒸发界面相耦合，可有效抑制“咖啡环”效应，利用马兰戈尼流将粒子

向液滴内部输送，促进粒子在弯月面处的有序堆积. 重力场与流体对流的协同作用下，粒子沿液滴内壁自组装成曲面光子异质结构.

电场诱导组装是利用带电胶体粒子在电场中的电泳或介电泳行为实现粒子有序排列形成光子晶体的过程[97](如图2(f)). 当带负电的胶体粒子分散于低极性介电溶剂中时，施加直流电场会产生电泳力，驱动粒子向阳极定向迁移；同时，粒子之间的静电斥力可防止其过度聚集. 通过电场强度的调控实现其相互作用的调控，促使粒子在电极表面组装形成有序结构的过程. Hou等[98]利用直流电场驱动金属有机框架(MOF)纳米颗粒电泳组装，通过调节电场强度(4~16 V)可精确控制链间距，得到具有不同颜色的光子晶体. Hamad等[99]采用电泳沉积技术驱动带负电的纤维素纳米晶体(CNC)组装构筑了光子纤维素纳米晶体薄膜.

磁场诱导组装利用超顺磁性纳米粒子在外加磁场中的磁偶极相互作用驱动组装实现对胶体纳米粒子组装的远程、非接触式操控[100~102](如图2(g)). 与电场诱导组装相比，磁场可无衰减地穿透绝大多数材料，无需引入电极，操作更加灵活便捷. 当施加外部磁场时，超顺磁性粒子被瞬间磁化，沿磁场方向产生磁偶极矩，相邻粒子间的磁偶极−偶极相互作用驱动粒子沿磁感线排列，同时粒子间的静电斥力与磁偶极引力达到平衡，形成具有特定间距的一维链状结构. 随着粒子浓度和磁场强度的增加，一维链可横向合并为二维纳米片，甚至三维高度结晶结构. 例如，Ye团队[103]利用磁力诱导Fe_3O_4纳米粒子沿磁力线方向迁移并在基体内表面组装形成有序结构，当磁吸引力与粒子间静电斥力达到平衡时，粒子被锁定在特定的有序结构中得到光子晶体. Tsukruk等[104]则将磁性纳米颗粒修饰的纤维素纳米晶置于旋转磁场中，在蒸发诱导组装过程中产生方位角剪切流，驱动CNC形成高度有序的光子晶体结构.

剪切力场诱导组装通常用于制备无裂纹、大面积的光子晶体薄膜或纤维. 其基本原理是将纳米粒子限制在两个硬质或软质基底之间，通过压缩或弯曲产生剪切流，剪切力驱动粒子沿流动方向取向并有序排列形成有序结构的方法[105,106](如图2(h)). 与依赖自然扩散的自组装不同，剪切力能够克服粒子间的黏滞阻力，强制粒子进入周期性排列，因此特别适合高浓度、高黏度体系. 剪切力可通过以下方式产生：压缩诱导剪切流(如将粒子夹在两平板间单向压缩)、弯曲诱导振荡剪切(如卷对卷弯曲工艺)、以及挤出流变等. 该方法的最大优势在于无溶剂、可连续化生产，且对粒子尺寸和材料类型有很好的普适性. 然而，该方法往往需要复杂的剪切装置，且剪切力的均匀性也会直接影响组装质量. Qing团队[112]将纤维素纳米晶与聚乙二醇二丙烯酸酯前驱体注入微毛细管中，利用管壁约束剪切流场驱动成功制备了长度超过30 m的光子细丝. Wang团队[113]通过多元胶体纳米颗粒的剪切共组装，将不同粒径的胶体粒子按比例混合，在剪切流场中实现协同有序排列. 通过改变不同尺寸颗粒的混合比例，可以得到覆盖整个可见光范围的光子晶体材料.

丝网印刷法是剪切诱导组装在图案化领域的延伸，与喷墨打印技术类似，其核心在于光子晶体油墨的配制，不同的是该油墨的流变性能必须同时满足丝网印刷的触变性和自组装所需的粒子迁移率的基本要求. 印刷时刮刀施加的剪切力使油墨中的组装基元沿印刷方向预先取向，随后溶剂挥发过程中的毛细力与对流进一步驱动粒子在基底上有序排列，从而有效抑制裂纹与拓扑无序，显著提升光子带隙在印刷区域内的空间均匀性. 根据油墨材料体系的不同，可分为自组装油墨和光固化油墨2种类型. 自组装油墨通常以单分散的纳米粒子(如二氧化硅、聚苯乙烯或氧化锌等)为主要成分，辅以增稠剂、交联剂等助剂调节油墨的黏度，使其达到适于丝网印刷的触变状态. Shao团队[114]通过添加增稠剂将纳米粒子分散液黏度调节到合适的状态，以促进其组装结构. 在印刷过程中，刮刀的剪切力首先诱导微球沿印刷方向预取向，随后溶剂挥发产生的毛细力驱动纳米粒子在基底上自组装形成光子晶体. 光固化油墨则是将纳米微球分散在可光固化的丙烯酸酯、丙烯酰胺或烯烃类单体中，印刷后立即用紫外光辐照或者加热固化锁定其有序结构的方法. Ge团队[115]采用光固化油墨策略，将SiO_2胶粒与丙烯酸酯、丙烯酰胺等单体复配成可光固化油墨，通过丝网印刷在基底上构筑图案后紫外辐照得到光子晶体.

综上所述，外场诱导自组装通过引入重力、电场、磁场或剪切力等外部驱动力，突破了传统自组装在时间、尺寸和结构可控性方面的局限，

为光子晶体的快速、大面积、可图案化制备提供了多样化的技术路径. 不同外场方法各有侧重：重力场装置最简但耗时长；电场和磁场可实现动态可逆调控但依赖粒子的电/磁响应性；剪切力场适合连续化生产但需要复杂机械装置；丝网印刷则在图案化低成本制备方面独具优势. 实际应用中需根据目标材料、结构要求和产能需求选择合适的外场组装策略.

2.3 聚合诱导自组装法

聚合诱导自组装的核心在于利用聚合物或可聚合单体的物理化学变化驱动胶体纳米粒子有序排列. 与单纯依赖溶剂蒸发或重力沉降不同，聚合诱导组装借助聚合过程中的体积收缩、交联网络形成或外加聚合物的静电调控，在较短时间内将纳米粒子锁定为周期性结构，从而获得光学质量高、力学性能稳定的光子晶体材料. 其本质在于聚合反应通过多重协同机制改变了体系的化学环境和物理约束：首先，聚合反应引发单体转化为长链聚合物，导致体系自由能变化和混合熵降低，诱导发生聚合诱导相分离(PIPS)，迫使纳米粒子从均相分散状态中分离并在富集区自组装为有序结构[116]；其次，共组装单体渗入胶体粒子间隙并原位聚合形成弹性聚合物网络，该网络可降低胶体粒子收缩产生的拉应力，增强粒子间的长程相互作用，同时交联网络的形成能够锁定已组装的结构[117]. 再者，对于嵌段共聚物体系，聚合过程中生成的不溶性链段在选择性溶剂中原位自组装形成胶体纳米粒子，实现聚合物合成与自组装的一步完成[118]. 此外，聚合物的存在本身也会产生聚合物耗尽力，当两胶体粒子相互靠近时，聚合物被排出间隙产生渗透压差，将粒子推至紧密堆积. 根据聚合物参与方式的不同，该策略可拓展至低浓度组装、功能集成以及三维结构可控构筑等多个方向.

在低浓度组装方面，传统方法通常需要较高浓度的胶体粒子(通常>10 wt%)才能通过粒子间相互作用实现有序排列，因为低浓度下布朗运动占主导，粒子难以克服热扰动自发组装. Shao团队[119]提出通过“静电围栏效应”策略，将含羧酸盐的阴离子聚合物引入低浓度带负电胶体纳米球分散液中，利用胶体分散液中的静电斥力形成空间限域“围栏”，调控体系静电作用和胶体分散液浓度实现光子晶体的构筑. Fang团队[120]受变色龙皮肤变色启发，将SiO_2微球分散在聚乙二醇苯基醚丙烯酸酯橡胶前驱体中，在织物表面光聚合形成机械可调的光子晶体图案.

3D打印法作为聚合诱导自组装的重要补充，为光子晶体的结构可控构筑提供了全新路径[121]. 3D打印是一种逐层叠加材料的增材制造技术，能够根据数字模型精确构建复杂三维结构. 在光子晶体制备中，3D打印不仅可以直接成型具有光子带隙的周期性结构(如木堆结构、螺旋结构)，还可以与聚合诱导自组装策略相结合，实现从亚微米到宏观尺度的跨尺度结构控制. Gu团队[122]将可打印胶体光子晶体墨水与数字光处理3D打印相结合，利用墨水中高电荷弹性纳米颗粒在可交联预凝胶中预组装形成的非密堆积结构，通过逐层光聚合锁定有序排列，制备了宏观几何形状可编程与亚微米结构色的光子晶体超结构. Zhu团队[123]将聚乙烯亚胺(PEI)与二氧化硅胶体粒子复合，构筑了超分子胶体复合物，并采用墨水直写打印(DIW)技术直接打印出具有复杂三维结构的光子晶体材料.

聚合诱导自组装通过引入聚合反应或聚合物添加剂，突破了传统自组装对粒子浓度和溶剂体系的依赖，实现了低浓度组装、多模态传感以及三维结构化可控构筑. 其核心优势在于聚合反应提供的“冻结”机制能够快速锁定有序结构，获得力学稳定的光子晶体材料. 未来，将聚合诱导自组装与微流控、静电纺丝等先进制造技术进一步融合，有望实现光子晶体材料的多功能化与产业化应用.

2.4 过饱和度诱导自组装法

过饱和度诱导自组装的关键在于使胶体纳米粒子在悬浮液中达到过饱和状态，从而驱动其自发沉淀与有序排列. 所谓过饱和浓度，是指胶体分散液中溶质的实际浓度超过其在该条件下的平衡溶解度. 此时体系处于热力学非平衡态，具有向低自由能状态演化的趋势——纳米粒子通过扩散相互靠近，在长程引力和静电斥力的协同作用下，克服布朗运动的无序扰动，自发堆积成周期性有序结构. 这一过程涉及微观相分离：原本均匀分散的体系分离为晶态(有序堆积的纳米粒子)和非晶态(随机分散的粒子)，晶态区域不断扩展直至形成完整的胶体光子晶体. 过饱和度诱导自组装的核心在于精确控制成核与生长动力学：过

饱和度太低，驱动力不足，无法形成有序结构；过饱和度太高，快速均相成核导致大量无序团聚体，难以获得长程有序. 因此，寻找临界过饱和度并维持稳定的蒸发速率是实现高质量组装的关键. Gallucci等[124]利用二元纳米晶共组装策略实现了过饱和度驱动的光子晶体构筑. 该研究将不同尺寸的硒化镉和硫化镉纳米晶以特定摩尔比混合于挥发性溶剂中，通过缓慢蒸发溶剂使纳米晶体浓度逐渐升高. 当浓度超过临界过饱和度时，小尺寸纳米晶体优先填充大尺寸纳米晶体之间的间隙，形成类蛋白石结构的超晶格. 通过调节蒸发速率和初始混合比例对光子晶体的晶格常数和光子带隙进行系统调控. 该方法的可以实现从纳米尺度到介观尺度的结构控制；但二元体系的相变过程复杂，不同尺寸纳米粒子的混合熵与混合焓竞争可能导致相分离而非共组装，这就对纳米晶体尺寸单分散性和表面化学兼容性要求极高，也增加了其调控的难度.

2.5 模板法及其他方法

模板法指预先制备一个具有微纳周期性孔道或凸起结构的模板，然后通过填充、沉积、聚合、电化学等方法，将目标材料填入模板的空隙中，形成与模板结构互补的周期性骨架，最后移除模板，从而获得具有精确调控光子带隙的反蛋白石结构或其他有序多孔结构的光子晶体[125]. 模板法的核心是先有一个结构精确的“模板”，常用模板有胶体晶体模板(如SiO_2、聚苯乙烯)微球自组装形成的密堆积三维阵列，然后将功能材料的前驱体(如聚合物单体、溶胶-凝胶前驱体、金属盐溶液)填充到模板空隙中，并通过聚合、烧结、电沉积等方式使其固化，形成复合体. 最后再将模板移除，即通过化学蚀刻(如氢氟酸蚀刻SiO_2)、煅烧和溶解等方式，选择性移除模板，留下由目标材料构成的、具有空气孔洞的三维互连网络结构. 所得的光子晶体的周期性和对称性由初始模板决定，反蛋白石结构是其最典型的代表. Huang团队[126]采用牺牲模板法，以单分散聚苯乙烯微球自组装制备蛋白石模板，将空心介孔立方二氧化硅胶体分散液填充至模板间隙，经煅烧去除聚苯乙烯模板后，成功构建了具有菱方晶格结构的有序光子晶体.

此外，模板法有时也被归类为一种自上而下与自下而上相结合的混合策略，原因在于部分模板的制备可能是通过光刻、电子束刻蚀或激光直写等传统微纳加工技术制作的，此时模板本身的产生就是一个典型的自上而下过程，即从宏观材料开始，通过去除材料来定义微观结构. 但另一方面，其填充过程，也就是将材料前驱体(分子、纳米颗粒、单体)填入模板纳米孔洞时，本质上是这些基础单元在限域空间内自主堆积、组装的过程，因此它的核心骨架的成型属于自下而上法. 因而，鉴于其核心骨架是通过自下而上的方式组织起来的，大多时候将其归入自下而上法中.

3 光子晶体的传感变色机制

光子晶体之所以能够实现智能传感功能，核心在于其周期性介电结构所赋予的光子带隙调控能力. 当外部物理或化学刺激作用于传感体系时，会引起光子晶体的晶格常数、介电常数或材料填充比、晶格有序-无序转换、晶格结构破坏等改变了晶格原有结构参数，诱导光子带隙位置偏移，最终表现为反射峰或透射峰的移动，甚至是裸眼可辨的结构色转变.

光子晶体的传感响应本质上遵循布拉格-斯涅尔定律(Bragg-Snell law)的衍射规律[127,128]. 对于蛋白石结构的光子晶体，其衍射波长(即反射峰位置)可由修正的布拉格方程描述：

$$m\lambda = 2d\sqrt{n_{\mathrm{eff}}^2 - \sin^2\theta} \tag{1}$$

其中，λ为衍射波长，d为晶面间距，n_{eff}为材料的有效折射率，θ为入射光与晶面法线的夹角，m为衍射级数. 当光子晶体与待测物发生相互作用时，方程中的任一参数变化都可能导致衍射波长的偏移，从而实现对被测物的传感响应. 传感机制主要涉及2类参数变化：一是结构参数变化，即晶格间距d的改变，这通常由体积变化或机械形变引起；二是光学参数变化，即有效折射率n_{eff}的改变，这源于待测物填充孔隙导致的折射率差异.

3.1 利用折射率变化实现传感

基于材料折射率变化实现光子晶体结构色响应的核心在于多孔光子晶体结构中孔隙介质的有效折射率调控. 根据布拉格定律，衍射波长与有效折射率成正比. 当待测气体分子进入孔隙后，原本填充空气的孔隙被具有更高或更低折射率的分子取代，体系平均折射率发生变化，导致光子带隙位置发生红移或蓝移. 该机制仅需分子吸附

引起局部介电常数变化，无需宏观体积膨胀或收缩，因此响应速度通常可达秒级甚至更快，特别适用于气体传感和挥发性有机物检测. 其灵敏度主要取决于3个因素：孔隙率(决定分子进入的容量)、折射率差(目标分子与空气的折射率差异越大，信号越强)以及吸附材料的选择性(决定对特定分子的识别能力). 例如，Ma团队[129]利用ZIF-8的高比表面积与分子筛效应构筑一维光子晶体，苯分子选择性吸附进入孔道后使有效折射率升高，反射峰红移，结构色由绿变橙红，实现了对苯蒸气的快速可视化检测. 我们团队[130]则以聚合物膜作为基底，通过自组装在其表面构筑光子晶体后，利用聚合物受热碰撞改变纳米粒子之间的间距和有效折射率，实现了温度的实时传感.

与依赖水凝胶溶胀的晶格间距变化机制相比，折射率变化机制避免了响应滞后，更适用于实时、连续监测场景. 无论是MOF孔道选择性吸附苯分子引起的折射率升高，还是聚合物热膨胀导致的纳米粒子间距与折射率协同变化，其本质均是通过调控光子晶体孔隙介质的介电环境来调制光子禁带位置. 未来，通过设计更高孔隙率、更大折射率对比度的多孔骨架(如介孔金属有机框架、共价有机框架)，并结合分子印迹或功能化修饰策略[131~133]，有望进一步提升该机制的选择性与灵敏度，推动光子晶体传感器在复杂环境中的实际应用.

3.2 改变晶格间距实现传感

晶格间距变化机制的核心在于通过外力或化学刺激引起光子晶体周期结构发生几何形变，从而调制结构色. 根据布拉格定律，衍射波长与晶格间距成正比，因此，外力拉伸使晶面间距增大、反射峰红移；压缩使间距减小、反射峰蓝移；化学刺激引起的体积膨胀或收缩同样改变晶格间距实现光学信号转换. 在物理拉伸方面，Li团队[134]受变色龙皮肤启发，将聚苯乙烯胶体光子晶体嵌入聚丙烯酸酯弹性体基质中，制备了超拉伸结构色电子皮肤. 拉伸时弹性体形变带动晶格间距均匀增大，反射峰从480 nm红移至680 nm，结构色由蓝连续变红，覆盖整个可见光谱，且经1000次循环仍保持稳定. Shim等[135]则通过构建机械异质性实现了晶格间距的差异化调控：将硬质聚苯乙烯与软质聚丙烯酸酯胶体晶体纤维编织成正交结构，沿硬质方向拉伸时形变小、结构色不变；沿软质方向拉伸时形变显著、结构色明显红移，由此实现光子晶体传感. 在化学刺激响应方面，化学刺激通过水凝胶基质的体积相变间接改变晶格间距实现其变色传感. 例如，Wang团队[136]将尿酸分子印迹水凝胶与二维光子晶体复合，尿酸分子与印迹空腔结合后，多重氢键和静电作用引发聚合物网络协同收缩，晶格间距减小，反射峰从620 nm蓝移至540 nm，结构色由红变绿，实现了尿酸的可视化定量检测.

晶格间距变化机制通过外力或化学刺激直接调制光子晶体的周期结构，具有信号变化幅度大、裸眼可视性强、适用范围广等突出优势. 与折射率变化机制相比，晶格间距变化机制通常能产生更大的反射峰位移(可达100 nm以上)，更适合裸眼直接判读；但其响应速度受限于弹性体或水凝胶的力学弛豫过程，在高频动态监测场景中可能不及折射率机制灵敏. 未来，通过引入高弹性的形状记忆聚合物、设计梯度模量结构或开发多响应协同体系，有望在保持大信号变化的同时进一步提升响应速度和循环稳定性[137]，推动晶格间距变化型光子晶体传感器在柔性可穿戴设备、人机交互界面及即时诊断等领域的实际应用.

3.3 晶体结构有序与无序之间的转化

有序−无序转变响应机制的核心在于利用光子晶体周期结构的破坏与重建来调控光学信号. 从物理机制上看，当胶体纳米粒子呈有序排列时，体系满足布拉格衍射条件，产生特征反射峰并呈现鲜艳的结构色；当粒子排列被破坏为无序状态时，体系以非相干散射为主，通常呈现白色或弱色. 该机制的核心优势在于其“从无到有”的信号跃迁特性——反射强度从接近零跃升至峰值，这种光学信号的突变比单纯的峰位移动更易于裸眼识别，尤其适用于阈值型传感和防伪应用. 该机制的驱动方式灵活多样，主要包括溶剂蒸发诱导的毛细力重构[138]、温度触发的相变材料体积变化[139,140]、机械力打破亚稳态无序结构[141]，以及化学刺激调控晶体有序度[142]等. Zhang团队[143]基于毛细压力诱导的“冷”编程和热响应形状记忆聚合物，制备了具有光学双稳态的可重构三维光子晶体膜. 在形状记忆编程过程中，水蒸发产生的毛细压力使光子晶体膜在室温下转变为无序临时态，此时无衍射峰；通过加热

则可恢复有序永久态纳米结构，重现特征衍射峰. 在机械力驱动方面，Zhao团队[144]报道了胶体光子晶体在液态低聚物基质中的力致响应行为：按压使胶体粒子从有序排列转变为无序排列，而随后的弯曲剪切(如简单的翻页动作)又可恢复有序结构. 这种由按压产生的光学痕迹可通过剪切擦除，为可逆直写光子纸和防伪技术提供了新的可能性. Huang团队[145]利用双反蛋白石结构设计了一种热触发溶剂响应“余辉”结构色系统. 两层反蛋白石具有不同的孔隙率和表面化学性质，初始状态下均为无序、呈白色. 当滴加乙醇后，下层优先吸收溶剂并发生有序重构，产生结构色；在乙醇挥发过程中上层结构重构变为绿色；完全干燥后，下层因溶剂蒸发失序而上层保持有序，形成独特的“余辉”效果. 还可将有序与无序同时构筑于同一微球中，通过喷雾干燥法制备了具有核壳结构的光子微球：其外壳为无序的非晶光子结构，内核为有序的胶体晶体[146]. 施加剪切应力时，外壳中的粒子发生重排改变其散射特性，同时内核的有序结构被破坏，材料结构色消失进而实现可视化传感. Zhu团队[147]在Janus液滴体系中，利用温度触发内部十六烷的液−固相变，通过结晶过程破坏液滴内部光滑、有序的流体界面，实现结构色的不可逆关闭.

4 光子晶体在智能传感中的应用

光子晶体传感器将周期性介电结构与环境响应性材料相结合，能够将外部刺激转化为结构色的动态变化，实现裸眼可视的实时监测. 这种无需标记、直观显色的特性，使其在物理量感知、化学物质检测和生物分子识别、防伪显示、智能穿戴等领域展现出独特优势.

4.1 物理传感

光子晶体在物理传感领域的应用，主要源于其对外界机械力、温度等物理刺激的结构色响应机制. 将胶体光子晶体阵列嵌入弹性体或响应性聚合物基质后，外力或环境温度变化所诱发的晶格间距改变、有效折射率调制乃至有序−无序转变，均可直接转化为裸眼可辨的颜色信号. 与依赖分子识别的化学传感不同，物理传感更强调宽检测范围、快速响应及长期循环稳定性.

4.1.1 机械力传感

光子晶体机械力传感的核心原理是将外力诱导的晶格间距与有效折射率变化转化为布拉格衍射波长的移动，从而产生裸眼可辨的结构色[148~151]. 通过将胶体光子晶体嵌入柔性弹性体基质，拉伸或压缩引起的可逆变形象征着从蓝到红的连续颜色变化的可视化传感. 与传统电阻式或电容式传感器相比，该传感器不仅可以实现力学信号的直接可视化读取，支持非接触式远程监测与大面积应变分布成像；还可通过调节微球粒径和基材模量，在宽应变范围(0%~100%以上)内兼顾高灵敏度与线性度；且该类传感材料柔性轻质、易于贴合曲面，并可与自修复、多刺激响应等功能集成，可用于可穿戴设备、软体机器人及结构健康监测等领域.

近年来，光子晶体机械力传感研究在功能集成与应用拓展两个维度均取得了显著进展. 在功能集成方面，研究者致力于突破传统单电信号传感器的局限性，通过构建光电双信号协同输出机制，实现了应变信号的直观可视化与精准量化. Ma团队[152]发展了一种超快速制备策略，将二氧化硅胶体光子晶体嵌入PDMS弹性体中，经紫外光固化在数分钟内完成器件制备. 单轴拉伸时，弹性体形变带动晶格间距均匀增大，结构色由蓝色连续递变至红色，覆盖0%~100%应变范围，响应时间小于1 s；该方法还可通过模具成型制备三维复杂结构，用于水下压力监测. Zhu团队[153]基于二氧化硅纳米粒子和超分子相互作用构筑了自修复光子晶体弹性体，该弹性体在不同拉伸比下呈现不同的结构色，还兼具良好的划痕和裂纹修复功能(图3(a)). Liu等[154]将胶体粒子与银纳米粒子、MXene等共组装到PDMS中构建了仿变色龙红移响应的光子电子皮肤，在85%应变范围内反射波长红移219 nm，实现了电信号与光信号的协同输出. Hwang等[155]采用具有不同玻璃化转变温度的丙烯酸酯壳的核壳纳米颗粒制备了胶体光子晶体薄膜，从而能够系统调控弹性模量和组分依赖的色度响应. 将RGB图像数据转换为HSV颜色空间中的色相分量，实现了对胶体光子晶体薄膜力学变色行为的高精度评估，为低成本的应变监测提供了可扩展的图像处理方案. Ma等[156]设计了具有应力/水分可重构褶皱晶格的光子弹性体——外力诱导表面形成规整褶皱，改变有效折射率与衍射条件产生结构色；撤去外力后褶皱恢复、颜色复原，实现了可逆形变

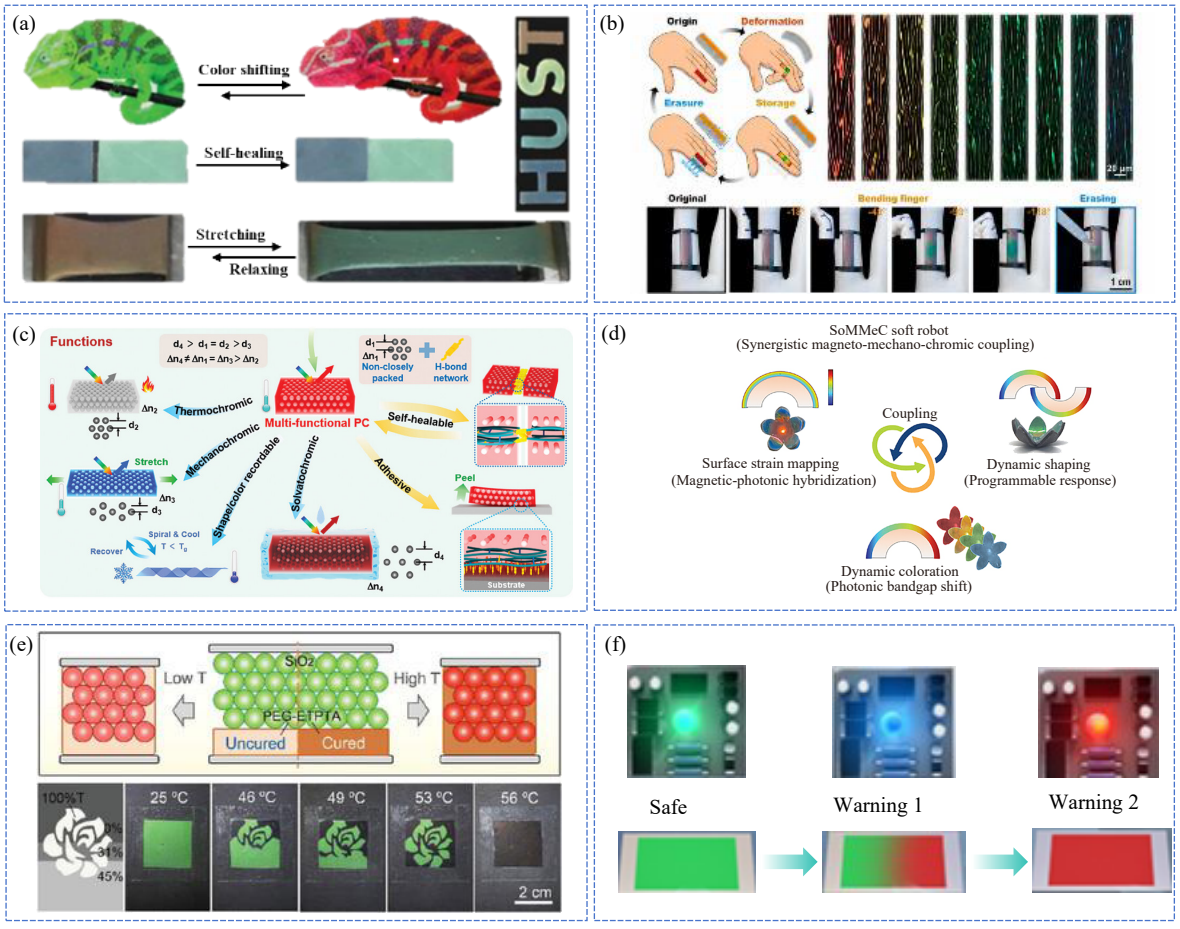


Fig. 3 (a) A supramolecular photonic elastomer combining strain-dependent chromism and self-healing capabilities (Reprinted with permission from Ref. [153]; Copyright (2019), Wiley-VCH GmbH); (b) A photonic elastomer utilizing a reconfigurable wrinkle lattice to store and erase deformation information (Reprinted with permission from Ref. [156]; Copyright (2024), American Chemical Society); (c) An all-in-one photonic crystal constructed through a dynamic covalent network, integrating multiple intelligent responsive functions including mechanochromism, thermochromism, hygrochromism, self-healing, and adhesion (Reprinted with permission from Ref. [157]; Copyright (2024), Wiley-VCH GmbH); (d) A soft robot achieving synchronous tuning of shape and color *via* magneto-mechano-chromic coupling (Reprinted with permission from Ref. [158]; Copyright (2024), Wiley-VCH GmbH); (e) A disposable heat-triggered anti-counterfeiting tag exhibiting multi-step color changes upon irreversible thermal shrinkage (Reprinted with permission from Ref. [159]; Copyright (2024), Wiley-VCH GmbH); (f) A thermochromic photonic crystal utilizing thermal expansion for traffic-light-like early fire visual warning (Reprinted with permission from Ref. [130]; Copyright (2024), Elsevier B. V.).

信息的存储与擦除(图 3(b)). Huang 团队[157]通过动态共价键网络构建了集成力致变色、热致变色、湿致变色、自修复与黏附功能的一体化光子晶体. 该光子晶体材料在拉伸时红移、加热蓝移、加湿红移，3 种刺激产生的颜色变化方向各异，通过分析变化幅度可实现刺激类型的解耦进而实现不同刺激的同时传感(图 3(c)).

在应用场景拓展方面，光子晶体机械力传感已从基础应变监测向水下环境、软体机器人和人机交互等特殊领域延伸. Ding 团队[160]系统综述了力致变色胶体光子晶体在水下传感中的应用，指出其利用可见光信号传递机械力的特性在身体动作反射、健康监测和水下通信中具有独特优势. Wang 团队[158]通过模拟变色龙鸟嘌呤纳米晶体的晶格调谐机制，设计了一种由光子晶体薄膜和磁驱动器构成的柔性磁致变形变色结构(SoMMeC). 磁-力-色的耦合机制使得 SoMMeC 机器人具有同步形态-颜色可调性，在无线驱动下能够实现快速(0.1 s)、宽色域(全可见光波段)、可动态编程的形态-颜色转换(图 3(d)). Li 团队[161]设计了光子-离子有机凝胶(PIOs)，通过磁性自组装策略在明胶-丙烯酰胺双网络凝胶基

质中实现Fe_3O_4@C光子晶体的快速自组装，并引入甘油与氯化锂盐显著提升抗冻性能，使得传感器在−50~50 °C宽温域内正常工作，同时具备光电双信号协同反馈特性——光学信号实现直观可视化监测.

4.1.2 温度传感

温度传感方面，现有研究已针对不同温区和应用场景发展了多种响应策略. 在人体体温检测等近生理温区应用中，Kanai等[162]受变色龙启发，将非密堆积胶体光子晶体固定于热敏性聚*N*-异丙基丙烯酰胺水凝胶中，并将其附着在柔性聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)基底上，实现了在约3 °C的狭窄人体体温范围内从红色到紫色的全光谱颜色变化，无需外部热源即可对人体手臂的体温变化作出响应，有望应用于仿生变色皮肤和可穿戴健康监测. 在功能集成方面，Wang团队[163]通过热敏变色微胶囊(变色温度31 °C下黑变红)与单分散纳米粒子构筑单元的协同组装，制备了最大面积为300 cm^2的热致变色光子晶体薄膜. Wu团队[164]将热致变色微胶囊与胶体光子晶体复合，构筑了可编程热致变色图案化薄膜. 温度升高时微胶囊内染料发生分子构型转变，聚合物基质收缩带动晶格间距减小，2种效应叠加产生时序性动态色彩图案用于高级防伪. Ge团队[159]设计了一次性不可逆热触发防伪标签，采用聚己内酯热响应层、聚苯乙烯光子晶体层和保护层的三层结构. 当温度超过聚合物熔点时，底层发生不可逆熔融收缩，带动光子晶体晶格间距逐级减小，结构色从红到绿再到蓝的多步变化，最终坍塌失去结构色(图3(e)). 我们团队[130]利用聚合物的热膨胀设计了一种用于早期火灾探测的高温热致变色光子晶体传感器. 将单分散硫化锌纳米粒子在基底热膨胀时的晶格间距和折射率的变化实现火灾早期的高温预警. 该传感器在260 ℃下响应时间仅需0.9 s，结合智能图像识别算法，实现了对早期火灾的非接触实时监测，可直接贴附于建筑物、变电站等设备表面(图3(f)).

光子晶体物理传感器在机械力与温度响应方面取得显著进展，前者实现了从单一应变监测到多功能高稳定传感的跨越，后者则通过多种机制覆盖了从室温至1000 °C以上的宽温区. 尽管如此，其仍面临循环稳定性不足、信号解耦困难等挑战，未来需结合智能图像识别、自修复材料及微纳结构优化以推动实际应用.

4.2 化学传感

与物理传感对外力、温度等物理刺激的响应不同，光子晶体化学传感的核心在于将待测化学物质的浓度或存在状态转化为结构色的动态变化. 其响应机制主要依赖待测物吸附引起的有效折射率调制、响应性水凝胶的体积膨胀/收缩以及有序—无序转变等过程. 由于化学传感对分子识别能力的要求更高，通常需要引入金属有机框架(MOF)、功能染料、响应性蛋白或分子印迹等特异性识别材料，以实现对气体、湿度、离子及小分子的选择性检测. 与物理传感强调宽检测范围和长期循环稳定性相比，化学传感更侧重于灵敏度、选择性和响应速度之间的平衡，其应用场景涵盖环境监测、食品安全、医疗诊断及防伪识别等多个领域. 以下将从气体传感、湿度响应及离子/小分子检测3个方面综述近年来的研究进展.

4.2.1 气氛传感

在气体传感领域，光子晶体的研究正从针对单一气体的选择性检测，向阵列化指纹识别与智能化方向快速发展. 其核心响应机制主要依赖2种途径：一是引入金属有机框架(MOF)、功能水凝胶等具有特异性识别能力的材料；二是构筑反蛋白石等具有三维大孔结构的光子晶体. 当待测气体分子被吸附后，会引起光子晶体的有效折射率或晶格间距发生变化，进而转化为结构色移动或光谱信号漂移，实现可视化或定量检测.

具体而言，MOF凭借其可调的孔道尺寸、超高比表面积和丰富的官能团，能够对特定气体分子实现尺寸筛分和富集，从而引起光子晶体有效折射率的改变，适用于小分子气体(如氯苯、氨气、氢气等)的高选择性检测[165]. 功能水凝胶则通过气体分子与聚合物网络之间的物理或化学作用(如质子化、氢键或配位反应)，诱导基质发生可逆溶胀或收缩，显著改变晶格间距，产生宽范围的结构色偏移，在CO_2、有机胺等气体的检测中表现出独特优势[166]. 反蛋白石结构光子晶体以三维有序大孔网络为特征，不仅为气体扩散提供了快速通道，还大幅增加了敏感材料与气体的接触面积；同时，其慢光子效应可有效增强荧光或拉曼信号，进一步提升检测灵敏度[167]. 三类机制各有所长，且可通过复合策略(如MOF/反蛋白石、水凝胶/反蛋白石)实现协同增强. 在气体传

感领域，光子晶体的研究正从单一气体的选择性检测向阵列化指纹识别和智能化方向发展.

在MOF−光子晶体复合传感体系中，响应机制的核心在于MOF材料对特定气体分子的选择性吸附与富集效应. 当待测气体分子进入MOF孔道后，会改变MOF层的有效折射率，进而引起光子晶体反射光谱的移动. 例如，Chen团队[168]制备了由ZIF-8、氧化石墨烯(GO)和TiO_2组装的一维光子晶体用于氯苯传感. 该传感器在0~100 ppm氯苯蒸气浓度范围内，灵敏度可达0.18 nm/ppm，响应时间最快可达500 ms. 进一步构筑的基于氧化石墨烯(GO)和有机框架结构MIL-101(Cr)一维光子晶体传感器可用于低浓度氨气检测. 在0~3 ppm浓度范围内，灵敏度为1.35 nm/ppm[169]. Yang团队[170]构建了染料掺入的光子晶体传感器阵列，由于不同染料对不同有机挥发气体的亲和性存在差异，吸附后染料的吸收或荧光特性发生改变，尤其是折射率的改变诱导光子晶体变色实现气氛传感(图4(a)).

水凝胶基光子晶体气体传感器则是利用待测气体分子与聚合物网络之间的物理或化学相互作用(如质子化、氢键或酶催化反应)，诱导水凝胶发生可逆体积变化，从而改变光子晶体的晶格间距并产生结构色偏移或反射光谱移动[171,172]. 尤其是构筑反蛋白石结构的光子晶体，利用反蛋白石内部由相互连通的大孔通道和连续骨架构成实现传感. 当气体分子进入孔道并与骨架发生吸附、溶胀或化学反应时，有效折射率或晶格常数随之改变，导致反射峰位移和结构色变化. 通过光谱分析或肉眼观察颜色变化即可实现气体浓度的检测. 同时，大孔贯穿结构有利于气体快速扩散和活性位点暴露，从而赋予传感器快速响应和高灵敏度的优势[173]. 例如针对二氧化碳气体检测，Lee等[174]以蛋白石为模板，将甲基丙烯酸羟乙酯与甲基丙烯酸*N*,*N*-二甲氨基乙酯或甲基丙烯酰胺*N*,*N*-二甲氨基丙酯的单体混合物进行光聚合，然后去除模板制备反蛋白石光子凝胶(IOPG)比色传感器，其对于二氧化碳的检测限低于1.2%(图4(b)). Meng团队[175]构筑了*κ*-卡拉胶/聚丙烯酰胺−乙二醇双网络水凝胶光子晶体传感器，传感器在−57 °C的极端低温下仍保持良好的保水防冻性能，可以实现氨气、甲苯、二甲苯、丙酮、甲醇、乙醇和1-丙醇等多种有害气体的传感.

光子晶体气体传感领域正从单一气体检测迈向阵列化指纹识别，核心机制包括MOF分子筛分、水凝胶气致溶胀及反蛋白石结构信号增强，目前已通过复合与阵列化设计实现多气体交叉响应与双信号读出. 未来，该领域将融合机器学习构建“光学电子鼻”，发展微型化、可穿戴及光纤集成平台，并探索自校准、多模态协同及绿色制备技术，推动高选择性、高通量、低成本的智能气体感知在环境、工业与医疗等场景的应用.

4.2.2 湿度传感

胶体光子晶体在湿度检测方面的应用主要依托其周期性有序结构在湿度变化时发生布拉格衍射峰偏移，从而实现光学响应. 当湿度增加时，敏感材料吸湿后体积膨胀或折射率改变，晶格常数与有效折射率随之变化，衍射峰红移；湿度降低时则恢复初始状态. 湿度响应本质上属于化学传感范畴，其驱动力来自水分子与亲水聚合物之间的氢键作用. Wang团队[176]将聚苯乙烯胶体光子晶体嵌入聚乙烯醇水凝胶中，制备了可规模化生产的湿度响应薄膜. 当环境湿度升高时，水分子与聚乙烯醇链上的羟基形成氢键，基质吸水溶胀，晶格间距增大，结构色从蓝色渐变为红色，覆盖10%~90%的相对湿度(RH)范围，响应时间小于2 s. 该薄膜可制成图案化防伪标签——呼气时湿气使标签结构色快速变化，形成动态色彩，且经过50次循环后仍保持良好的可逆性(图4(c)). Zhang团队[177]构筑了一种由聚(丙烯酰胺-*N*,*N*′-亚甲基双丙烯酰胺)纳米凝胶与二氧化钛纳米颗粒交替组装构建的简单介孔结构色一维光子晶体(1DPCs)，其作为高性能比色湿度传感器表现出优异性能. 这些色彩鲜明的传感器对相对湿度(RH)变化响应迅速，在0.5 s内即可达到传感平衡. 当相对湿度从47.0%变化至89.3%时，传感器禁带波长从426 nm迁移至668 nm (图4(d)). Chen团队[178]基于由于一维光子晶体结构中高湿度敏感性的MOF薄膜，在不同湿度下，其反射峰波长在20%~90%范围内发生移动. 且在此范围内线性光谱灵敏度超过119 pm，该传感器具有小于100 ms的快速光学响应时间，以及良好的重复性和可靠性，能够成功用于人体呼吸过程的实时监测. Dong团队[179]构筑了一种基于表面功能化可调谐光子晶体光栅的湿度传感器，该传

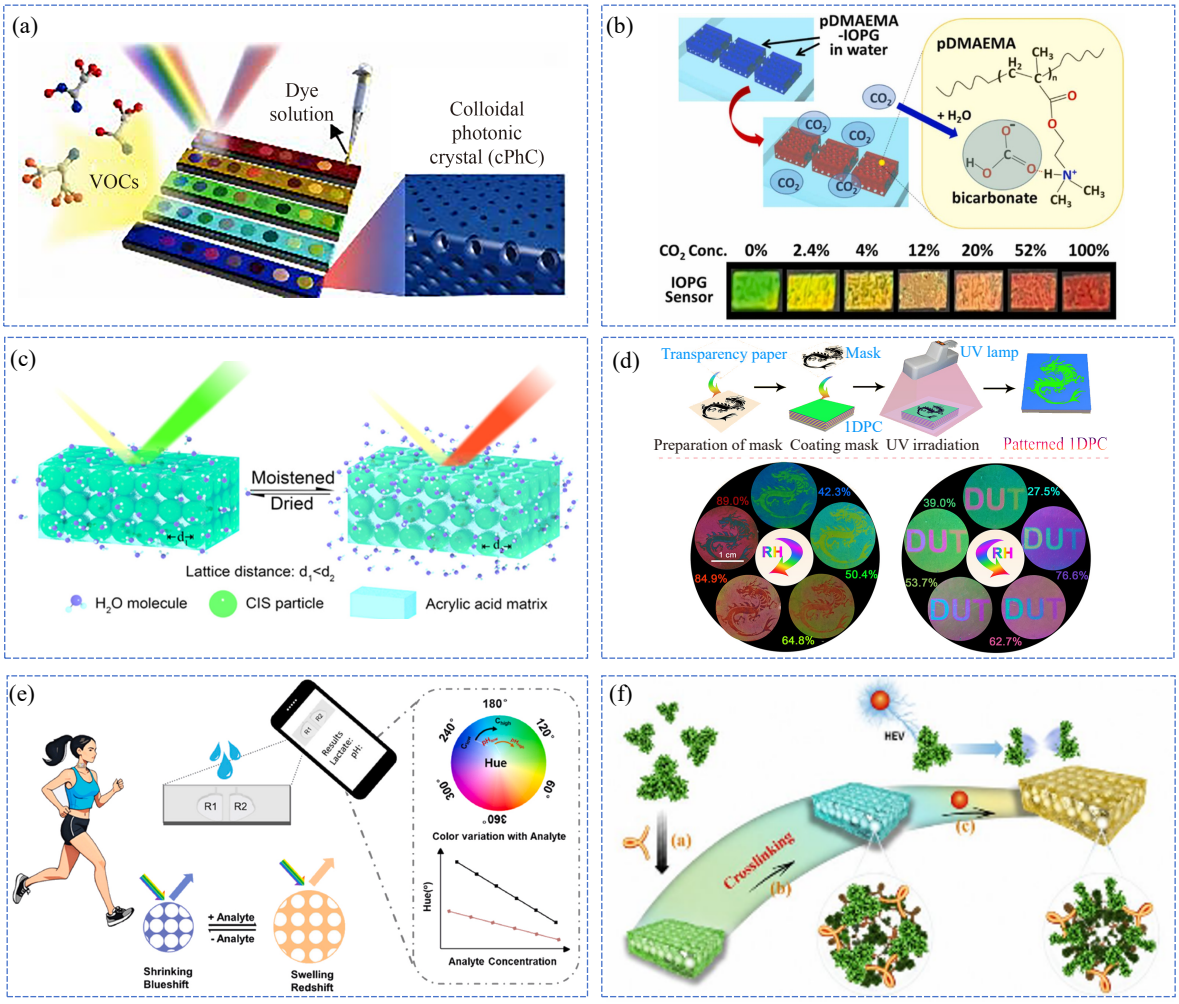


Fig. 4 (a) A dye-incorporated photonic crystal sensor array achieving atmosphere sensing of volatile organic gases *via* adsorption-induced refractive index changes (Reprinted with permission from Ref. [170]; Copyright (2024), Wiley-VCH GmbH); (b) A PDMAEMA-containing inverse opal photonic gel colorimetric sensor achieving carbon dioxide detection through gas diffusion altering the pore refractive index or lattice constant (Reprinted with permission from Ref. [174]; Copyright (2023), Elsevier B. V.); (c) A poly(vinyl alcohol) hydrogel-based photonic crystal humidity-responsive film that increases lattice spacing *via* water swelling for breath-triggered dynamic patterned anti-counterfeiting (Reprinted with permission from Ref. [176]; Copyright (2022), American Chemical Society); (d) A mesoporous one-dimensional photonic crystal alternately assembled from nanogels and titanium dioxide, serving as a high-performance colorimetric humidity sensor with rapid response (Reprinted with permission from Ref. [177]; Copyright (2018), American Chemical Society); (e) A wearable sweat analysis platform based on photonic crystal hydrogels, achieving naked-eye colorimetric detection and accurate smartphone-assisted quantification of sweat biochemical biomarkers (Reprinted with permission from Ref. [186]; Copyright (2025), Elsevier B. V.); (f) A crosslinked protein hydrogel photonic crystal sensor utilizing coordination interactions between ions and protein groups to trigger volume shrinkage for uranyl ion detection (Reprinted with permission from Ref. [187]; Copyright (2026), Elsevier B. V.).

感器由600 nm聚苯乙烯(PS)微球光子晶体和湿度敏感型水凝胶组成，该传感器能够直接将湿度变化转化为精确的光谱位移，在24%~94% RH范围内表现出强线性响应. Luo团队[180]通过蚀刻再沉积法制备出了实心-介孔二氧化硅微球，并通过喷涂技术构筑了无角度依赖光子晶体薄膜，该薄膜在吸水和脱水过程展现出更显著且易于区分的颜色变化，可用于湿度传感.

胶体光子晶体湿度传感器凭借其周期性结构对湿度的灵敏光学响应，已在宽检测范围、快速响应、高可逆性等方面取得显著进展，多种材料体系(如水凝胶嵌入、一维光子晶体、MOF薄膜、介孔微球等)均实现了结构色可调且性能优异的传感功能. 胶体光子晶体湿度传感器需进一

步提升长期稳定性与抗干扰能力，推动其在可穿戴设备、智能包装等实际场景中的应用；同时，结合微纳加工与机器学习算法，可实现低成本、智能化的多模态传感阵列，拓展健康监测与环境感知的维度.

4.2.3　pH传感

光子晶体pH传感器的核心在于将pH响应性功能材料与周期性光子结构相结合，通过外界pH变化引发功能材料的体积膨胀/收缩或折射率变化，进而改变光子晶体的晶格常数或介电常数对比度，最终表现为布拉格衍射峰的位移或结构色的变化[181]. 例如，在海水中重金属离子和pH的双参数检测方面，Guan团队[182]将一维响应性光子纳米链嵌入非响应性的琼脂糖凝胶基质中，制备了异质水凝胶薄膜传感器. 琼脂糖凝胶的多孔结构允许质子自由扩散，使响应时间显著缩短，同时解决了传统RPNCs在液体介质中需要磁场定向且易污染样品的问题. Ding团队[183]以光子晶体微球作为模板开发了DNA功能化含有羧基的光子水凝胶，通过智能手机可识别的RGB颜色变化实现了Hg^{2+}和pH的半定量可视化检测. Niu团队[184]通过原位聚合方法来制备具有超双响应光子晶体，通过Morpho蝴蝶翅膀的脱乙酰作用在其表面聚合引入聚(*N*-异丙基丙烯酰胺-共-丙烯酸)，获得了具有pH和温度可逆性的双重响应性的光子晶体. Meng团队[185]受洋葱生物特性的启发，设计了一种集成光子晶体阵列的可穿戴水凝胶带，实现了对运动人员汗液中钾离子浓度和pH水平的可视化、非侵入式原位分析. 在优化条件下，该传感器的pH响应范围涵盖3~9，钾离子响应范围为1~150 mmol/L，并通过动态循环测试验证了其在户外运动过程中有效监测电解质平衡和脱水状态的能力. Luo团队[186]则报道了一种基于光子晶体水凝胶的可穿戴汗液分析平台，该平台由蝴蝶形微流体装置构成，每个蝴蝶型翅膀中嵌入响应的光子晶体水凝胶作为传感单元，实现了汗液乳酸浓度和pH的裸眼比色检测，通过智能手机图像分析即可完成准确定量(图4(e)).

总体而言，光子晶体pH传感器的核心在于引入丙烯酸等酸碱敏感物质，通过pH变化引发的质子化与去质子化过程改变水凝胶的静电排斥力，从而驱动晶格间距变化并产生可测量的光学响应.

4.2.4　离子/小分子传感

光子晶体用于离子与小分子传感的基本原理，依赖于其周期性结构对环境变化的敏感响应. 当离子或小分子与光子晶体骨架中的特异性识别基团(如冠醚、分子印迹聚合物、DNA适配体、硼酸基团等)发生选择性结合时，会引发晶体结构变化，进而导致光子晶体的布拉格衍射峰发生波长偏移或强度衰减，从而将化学识别事件转化为可视化的结构色变化或光谱信号. 常见的传感模式包括：阳离子(如Hg^{2+}、Pb^{2+})与螯合配体结合后诱导水凝胶体积塌缩或膨胀；阴离子(如CN^-、F^-)通过氢键或脱质子作用改变局域折射率；小分子(如葡萄糖、生物硫醇)则常利用硼酸−二醇可逆共价结合或分子印迹空穴的尺寸匹配效应实现特异性响应. 这种传感机制兼具无需标记、实时可视化及高选择性等优势.

近年来研究者们基于上述原理开展了大量系统研究，例如，Shen团队[187]将周期有序的二维光子晶体阵列单层嵌入交联蛋白水凝胶中构建光子晶体传感器，利用铀离子与蛋白上羧基、磷酸基团的配位作用触发水凝胶体积收缩实现铀含量的检测(图4(f)). Zhang团队[188]将反蛋白石(IO)和双反蛋白石(DIO)与聚丙烯酸酯聚合物相结合，集成解密与验证模块的双层光子晶体(BPC)系统的构筑. 当BPC浸入乙醇或水中时，由于溶剂诱导聚苯乙烯(PS)微球发生有序重排，DIO层会显示出加密信息. 验证步骤则基于IO层图案的不同结构色来实现，这些结构色源于溶剂蒸发引起的大孔骨架变形或恢复. Li团队[189]基于尿素酶催化的高效性和pH敏感的反蛋白石聚合光子晶体(IOPPC)，实现了肉眼对汞离子的视觉半定量检测，其最低检测浓度为5×10^{-16} g/L. Lin团队[190]采用以单分散聚苯乙烯(PS)胶体为模板构筑光子晶体后，将聚(乙烯醇)和壳聚糖(PVA/CS)的离子印迹聚合物渗入其中. 然后通过溶剂辅助冻融法制备了传感器膜. 根据铜离子浓度的变化引起光子晶体膜的颜色变化，最终达到可视化传感的效果，铜离子的检测限可以达到10^{-4} mol/L.

化学传感更强调灵敏度、选择性与响应速度的平衡，并已在环境监测、医疗诊断、防伪识别等领域展现出独特优势. 目前，已经有多种策略可以实现对有毒有害气体、环境湿度、重金属离子及生物小分子的可视化检测. 展望未来，该领

域仍需着力解决以下关键问题：提升传感器在复杂实际样品中的长期稳定性和抗干扰能力；发展多通道阵列化与智能传感平台，借助机器学习实现多组分指纹式识别；推进微型化、柔性化及与可穿戴设备的集成；探索绿色制备与自校准技术，最终推动光子晶体化学传感器的商业化应用.

4.3 生物传感

生物传感是光子晶体智能传感的前沿方向，其核心挑战在于实现对复杂生物体系中特定生物分子(蛋白质、核酸、抗原抗体等)的高特异性和高灵敏度检测. 与化学传感不同，生物传感通常依赖生物识别元件(如抗体、适配体、酶、分子印迹聚合物)与目标物之间的特异性结合，通过引发光子晶体的晶格间距变化、折射率改变或结构有序度转变，将生物识别事件转化为可读的结构色或光谱信号. 近年来，研究者围绕光子晶体生物传感器在疾病标志物检测、病原体识别、药物筛选等领域的应用开展了大量工作，主要可分为以下几类典型策略.

4.3.1 基于抗体/抗原识别的光子晶体免疫传感器

抗体固有的高特异性使其成为生物传感的理想识别元件. 通过将抗体固定于光子晶体水凝胶骨架或反蛋白石孔道内，目标抗原的结合会引发交联密度或亲水性的变化，诱导水凝胶宏观体积收缩或膨胀，进而改变光子晶体的晶格常数. 在癌症标志物检测方面，Li团队[191]利用蛋白质磷酸化水平在宫颈癌发育不同阶段的动态变化特征，构筑了基于可拉伸光子晶体的磷蛋白鉴定方法. 该方法通过抗体特异性识别不同磷酸化状态的蛋白，结合光子晶体对水凝胶体积变化的信号放大效应，能够依据血清样本准确定位宫颈癌的发展阶段，实现了高达94%的诊断准确率(图5(a)). Frasco团队[192]成功开发了一种由玉米醇溶蛋白、聚多巴胺、甘油和虫胶4种组分构成的新型生物聚合物薄膜，并将其作为光子晶体的支撑基底，构建了基于微小RNA的光子晶体生物传感器. 为实时监测癌症相关细胞外囊泡中的PNA片段提供了可视化方法，且传感器在完成检测后可生物降解. Sun团队[193]基于荧光增强光子晶体水凝胶反蛋白石膜实现了肿瘤标志物的检测，以甲胎蛋白为模型其定量限可达23 pg/mL. Cheng团队[194]基于青霉素酶与青霉素G (PG)之间的酶解反应，开发了一种可用于水中PG灵敏比色检测的智能光子水凝胶生物传感器(图5(b)). 该传感器由聚(*N*-异丙基丙烯酰胺-*co*-丙烯酰胺)水凝胶、固定化青霉素酶以及Fe_3O_4@SiO_2胶体光子晶体组成，该传感器对PG具有高选择性和高灵敏度，对另外β-内酰胺类抗生素(头孢唑肟和阿莫西林)也表现出优异的检测性能(图5(c)). Song团队[195]开发了一种蛋白石光子晶体膜用于检测COVID-19抗体. 该传感器检测限低至皮克每毫升级别，且柔性膜可直接贴附于皮肤或口罩内层，实现非侵入式呼气或唾液检测.

在病原体免疫检测方面，光子晶体免疫传感器同样展现出独特的应用潜力. 例如，Jeong团队[196]将抗体固定在二氧化硅反蛋白石纳米结构中，构建了无标记光学生物传感器，在10^3~10^5 PFU浓度范围内对甲型H1N1流感病毒表现出高灵敏度和高特异性检测. Knoben团队[197]将氮化硅波导、光电二极管和发光二极管集成于光子芯片，结合微流控与分子诊断技术，实现了对鲑鱼气单胞菌等3种水产病原体的特异性识别，为水产养殖病害防控提供了一种微型化集成检测方案.

光子晶体免疫传感器的研究正朝着高通量、多靶标和智能化的方向发展. 尽管该领域已取得显著进展，但仍面临水凝胶响应速度与机械强度之间的权衡、复杂生物样品中非特异性吸附的抑制以及传感器长期储存稳定性提升等挑战. 未来的研究方向可包括：引入多孔框架材料(如金属有机框架)与抗体协同增强信号；构建阵列化传感器结合机器学习算法实现多靶标同时分析；开发柔性可穿戴器件用于体液样本的即时检测.

4.3.2 适配体功能化光子晶体传感器

适配体是通过体外筛选获得的单链DNA或RNA，具有热稳定性高、合成成本低、修饰位点可控等优势. 适配体与目标分子(如凝血酶、多巴胺、ATP、外泌体等)结合后常发生构象折叠，这一构象变化可被设计用于调控光子晶体水凝胶的交联状态或体积相变. 将在聚苯乙烯微球组装形成的光子晶体中引入2种部分碱基互补的适配体，构筑了二维光子晶体水凝胶作为适配体传感器，用于检测人血清中的凝血酶 (TB)，其检测限可达0.64 nmol/L[198]. Li团队[199]基于适配体功能化光子微球阵列开发了一种用于多重真菌毒素检测的高灵敏度表面增强拉曼光谱(SERS)

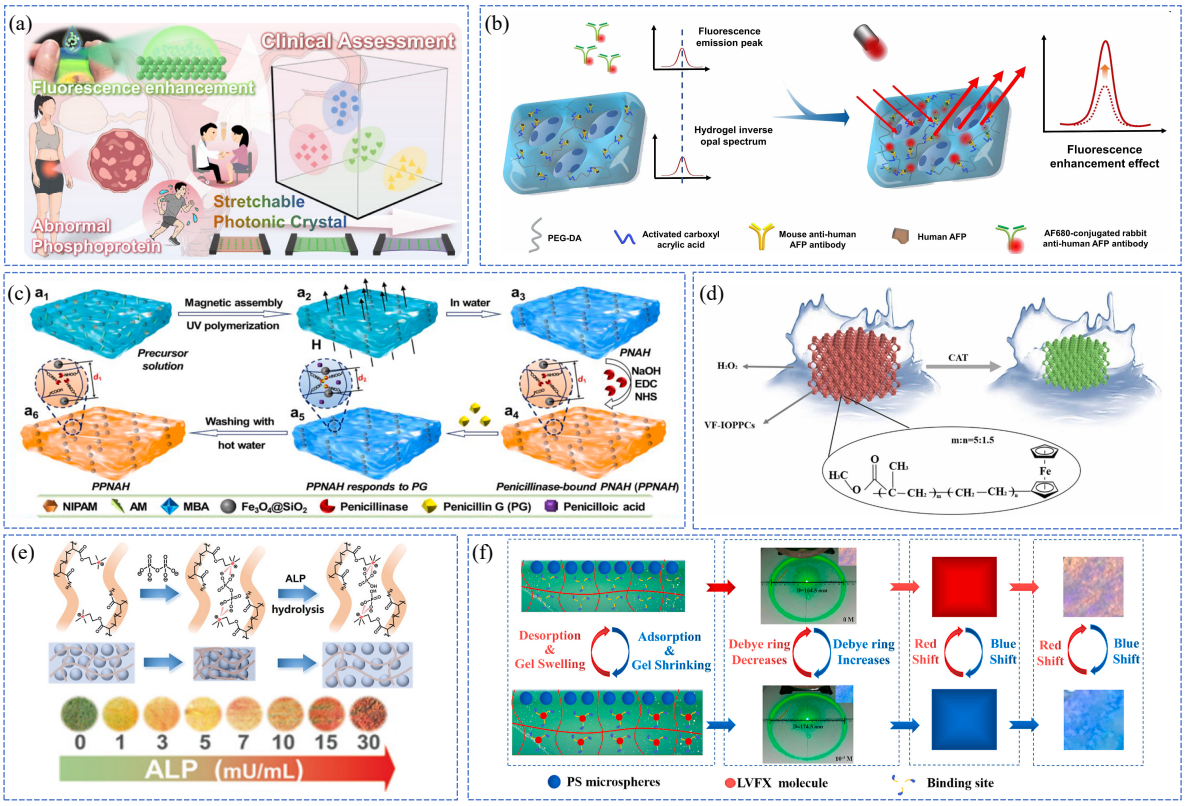


Fig. 5 (a) Stretchable photonic crystals enable serum phosphoprotein detection and precise cervical cancer staging *via* specific antibody recognition and signal amplification (Reprinted with permission from Ref. [191]; Copyright (2026), American Chemical Society); (b) Fluorescence-enhanced inverse opal hydrogel films serve as highly sensitive immunoassay platforms for detecting tumor markers like alpha-fetoprotein (Reprinted with permission from Ref. [193]; Copyright (2024), Elsevier B. V.); (c) Penicillinase-modified photonic hydrogels achieve sensitive colorimetric detection of penicillin G in water *via* enzymatic reactions (Reprinted with permission from Ref. [194]; Copyright (2024), Elsevier B. V.); (d) Redox-responsive photonic crystals alter lattice spacing *via* charge density changes, achieving broad-wavelength visual detection of hydrogen peroxide and catalase (Reprinted with permission from Ref. [200]; Copyright (2022), Elsevier B. V.); (e) Supramolecular photonic hydrogels utilize crosslink-cleavage-induced lattice expansion for high-precision colorimetric detection and point-of-care diagnosis of alkaline phosphatase (ALP) (Reprinted with permission from Ref. [201]; Copyright (2023), Wiley-VCH GmbH); (f) Molecularly imprinted 2D photonic hydrogels achieve visual sensing of levofloxacin *via* specific binding-induced volume contraction and blueshif (Reprinted with permission from Ref. [202]; Copyright (2022), Elsevier B. V.).

适配体传感器. 将金纳米粒子共价接枝到二氧化硅光子晶体微球上制备 SERS 活性基板，基于 SERS 纳米标签上的抗适体与目标真菌毒素对 SPCM 上适体的竞争反应，实现了真菌的检测. 黄曲霉毒素 B1 和赭曲霉毒素 A 的线性范围均为 0.001~10 ng/mL，且检测限分别低至 0.360 和 0.034 pg/mL.

4.3.3　酶响应光子晶体传感器

酶催化反应具有高效性和底物特异性，将其与光子晶体耦合可构建高灵敏度生物传感器. 常见设计是将酶(如葡萄糖氧化酶、脲酶、蛋白酶等)包埋于光子晶体水凝胶基质中. 当底物扩散进入水凝胶后，酶催化反应生成酸性或碱性产物，改变水凝胶内部的 pH 值，进而诱导 pH 响应性聚合物(如聚甲基丙烯酸二甲氨基乙酯、聚丙烯酸)的质子化或去质子化，引发水凝胶体积相变，最终反映为光子晶体结构色的移动. 例如，Wei 团队[200]利用氧化还原响应型光子晶体，通过引入可逆氧化还原反应，实现了对过氧化氢和过氧化氢酶的宽波长偏移检测. 该传感器利用氧化还原反应调节水凝胶内部电荷密度，驱动晶格间距变化，实现了高效视觉检测(图 5(d)). Li 团队[201]设计了一种超分子光子水凝胶，通过纳米粒子和渗透膨胀压力之间的协同排斥力导致超分子交联断裂增加晶格间距，并且可以通过智能手机实现高精度比色检测，从而能够即时感知和及时诊断相

关病理(图5(e)). Wu团队[203]构建了用于青霉素G和青霉素酶抑制剂比色检测的二维光子晶体水凝胶生物传感器. 该传感器将青霉素酶共价固定于二维光子晶体水凝胶中，青霉素G水解使水凝胶局部pH下降，网络收缩导致德拜衍射环直径增大，检测限低至0. 5 μmol/L；加入青霉素酶抑制剂后响应减弱，可用于抑制剂快速筛查.

4.3.4 分子印迹光子晶体传感器

分子印迹光子晶体(MIPC)传感器将分子印迹聚合物(MIP)的特异性识别能力与光子晶体(PhC)的光学信号转导特性相结合，其传感机制基于布拉格定律. 在分子识别过程中，当目标分子与MIPC 中的印迹位点特异性结合后，会引起材料有效折射率 或者晶格间距的变化实现“裸眼检测”. 与传统方法相比，MIPC 传感器无需荧光或放射性标记，具有响应快速、操作简便、成本低廉等优势. 例如，Jinn等[204]将亲和素印迹的二氧化硅纳米颗粒嵌入水凝胶中，并附着于人工晶状体上. 当亲和素结合后，水凝胶体积减小，导致反射光中红光比例下降，通过智能手机即可检测，最低响应浓度为 100 nmol/L. Pan团队[205]制备了反蛋白石结构分子印迹光子聚合物薄膜，用于检测乳酸杆菌表面的S层蛋白，其检测限为1 ng/mL. Wang团队[206]利用苯硼酸功能化的反蛋白石水凝胶颗粒，实现了对辣根过氧化物酶和甲胎蛋白的选择性检测，检测限为1.32 ng/mL. Frasco等[207]基于三维二氧化硅光子晶体构建了分子印迹光子晶体传感器，用于检测静脉血栓栓塞标志物纤维蛋白肽. 随着纤维蛋白肽浓度升高，反射峰强度线性下降，在人工尿液中的检测限为0.13 ng/mL. Liu团队[202]制备了左氧氟沙星分子印迹二维光子晶体水凝胶传感器. 该传感器将左氧氟沙星印迹位点引入二维光子晶体水凝胶中，当目标分子与印迹空腔特异性结合后，水凝胶网络发生协同收缩，晶格间距减小，德拜衍射环直径增大，衍射波长蓝移. 该传感器对左氧氟沙星表现出良好的选择性，检测限为0.2 μmol/L，为喹诺酮类抗生素的现场快速筛查提供了简便手段(图5(f)). 针对手性分子的高特异性识别，Guo团队[208]构建了分子印迹凝胶光子晶体传感器，用于手性氨基酸的区分检测. 该传感器以L-色氨酸为模板，在二维光子晶体水凝胶中构筑了手性印迹空腔. 当L-色氨酸与印迹位点结合时，水凝胶体积收缩，衍射环直径变化，而D-色氨酸几乎不引起响应，实现了对色氨酸对映体的选择性识别，检测限为0.5 mmol/L.

5 结论与展望

经过多年发展，胶体光子晶体的构筑已形成多条成熟且各具特色的技术路径. 蒸发诱导自组装(浸涂、旋涂、喷涂、喷墨打印)因操作简便、成本低廉、易于大面积成膜，成为实验室和工业制备光子晶体薄膜最常用的手段；外场诱导组装(重力场、电场、磁场、剪切场)通过定向能量输入克服布朗运动，实现了快速、可逆甚至图案化的构筑；聚合诱导组装利用聚合反应锁定有序结构，在低浓度组装、多模态传感及3D打印中独具优势；过饱和度诱导组装通过调控成核与生长动力学，实现了从纳米颗粒到介观超晶格的跨尺度控制；模板法则以反蛋白石结构的高比表面积和互连孔道，在传感和催化领域不可替代. 这些方法并非彼此割裂，在实际应用中常相互补充，例如模板法依赖胶体晶体的自组装作为前期步骤，3D打印可视为聚合诱导组装的空间延伸. 在传感机制层面，光子晶体的响应可归结为3种典型途径. 折射率变化机制利用多孔结构对目标分子的吸附改变有效折射率，响应速度快、无需体积膨胀，特别适合气体传感；晶格间距变化机制通过弹性体形变或水凝胶体积相变直接调制周期结构，信号变化幅度大、裸眼可视，广泛应用于柔性可穿戴传感和生物分子检测；有序−无序转变机制则通过周期结构的破坏与重建产生高对比度的光学信号，在阈值型传感和防伪领域具有独特优势. 这3种机制在实际传感器设计中常常协同作用；例如，湿度响应既涉及水分子吸附引起的折射率变化，也伴随水凝胶溶胀导致的晶格间距改变，两者叠加可显著增强响应幅度. 基于上述构筑方法与响应机制，光子晶体传感器已在物理传感(应力/应变、温度)、化学传感(挥发性有机物、湿度、重金属离子、过氧化氢)及生物传感(磷蛋白、miRNA、抗生素、抗体)等领域取得了显著进展，逐步证明了其在无需标记、裸眼可视、实时监测方面的独特价值.

尽管光子晶体传感器展现出广阔的应用前景，但走向实际应用仍面临若干关键瓶颈. 在响应速度上，基于水凝胶的传感器依赖溶胀/收缩

过程，响应时间通常为秒级甚至分钟级，难以满足快速检测需求，开发高比表面积反蛋白石结构或低黏度响应性液体是提升速度的有效途径. 在长期稳定性上，多数传感器在多次循环后存在结构退化或响应衰减，通过优化交联网络、引入自修复功能或采用无机-有机复合策略有望改善. 在量产制备上，自下而上自组装虽成本较低，但结构均匀性和批次重复性仍有待提升，开发连续化、自动化工艺是产业化的关键. 此外，缺乏统一的光学性能评价标准也制约了领域健康发展. 面向未来，光子晶体传感器将朝着多机制协同、多模态融合与智能化集成3个方向深入发展. 多机制协同可通过在同一平台中集成折射率变化与晶格间距变化，兼顾快速响应与大信号输出；多模态融合将光学响应与电学、力学等信号(如离子电阻、电容、压电)相结合，构建双模或多模传感系统，提高检测可靠性和信息丰富度；智能化集成则借助智能手机和人工智能算法，通过手机摄像头采集结构色图像并自动识别与定量分析，结合微流控芯片、柔性电子器件及无线通信模块，有望实现即时检测和远程诊断. 同时，回归自然仿生——深入挖掘蝴蝶鳞片分级结构、甲虫壳体螺旋多面体等天然蓝本，结合先进制造技术实现仿生构筑，将为高性能光子晶体传感器提供持续灵感. 可以预见，随着材料科学、微纳加工技术与智能算法的协同发展，光子晶体传感器将在食品安全、环境监测、生物医学诊断及人机交互等领域的现场快速检测中发挥越来越重要的作用.



作者简介：谭海英，2019年3月至今任武汉纺织大学材料科学与工程学院副教授、硕士生导师，高分子材料与工程系主任. 2015年于中国科学院大学获博士学位，2015~2016年任湖南工业大学讲师；2016~2019年在华中科技大学化学与化工学院从事博士后研究. 主要研究方向包括光子晶体与智能传感材料、纳米复合材料、高性能纤维与复合材料. 在*Advanced Materials*、*Macromolecules*、*Chemistry—A European Journal*、*Soft Matter*、*Journal of Physical Chemistry B*等期刊发表SCI论文40余篇；主持及参与国家自然科学基金项目、企业横向课题等20余项；申请发明专利6项.



作者简介：姜伟，武汉纺织大学材料科学与工程学院二级教授、博士生导师. 2007年获得国家杰出青年科学基金，享受国务院政府特殊津贴(2011年)，曾获朱李月华优秀教师奖(2018年). 长期从事高分子结构调控和高性能化研究，作为项目负责人承担了国家十三五重点研发计划项目、国家自然科学基金重大项目子课题、重点项目3项、面上及国际合作项目以及吉林省重大科技专项和企业委托项目等多项. 在*Journal of the American Chemical Society*、*Angewandte Chemie International Edition*、*Macromolecules*、*Physical Review E*等重要学术期刊发表论文200余篇，获国内外授权专利20余件，在包括美国化学会年会在内的国际学术会议上作邀请报告20余次.

REFERENCES

1 Kazanskiy, N. L.; Golovastikov, N. V.; Khonina, S. N. Dispersion engineering and sensitivity enhancement in photonic crystal waveguide sensors: current advances and emerging challenges. *Sensors*, **2026**, 26(6), 1872.

2 Liu, J. C.; Zhang, C. F.; Wang, R. J.; Guo, X. S.; Kou, R. W.; Jia, P.; Wu, P. P.; Yu, Z.; Yu, X. J.; Wang, J. X. Colloidal photonic crystals: advanced assembly strategies and frontier optical applications. *Laser Photon. Rev.*, **2026**, 20(5), e02259.

3 Chen, Y. K.; Tan, Q. L.; Ji, Y. Y.; Wang, D.; Dong, R. L.; Dai, B. Y. Advancing photocatalysis through efficient fabrication of morphology-engineered photonic crystals. *Inorg. Chem. Front.*, **2025**, 12(20), 5962−5988.

4 Meng, Z. P.; Miao, S. L.; Liu, Y. K.; Li, Y. L.; Ma, Y. J.; Luo, W. K.; Huang, H. F. Photonic crystal-based structural color switches. *Mater. Horiz.*, **2025**, 12(20), 8380−8408.

5 Qin, H. Y.; Su, Z. P.; Zhang, Z.; Lv, W. J.; Yang, Z. J.; Chen, W. J.; Gao, X. Y.; Wei, H.; Shi, Y. Z.; Li, B.; Zhou, J.; Fleury, R.; Qiu, C. W.; Song, Q. H. Disorder-assisted real-momentum topological photonic crystal. *Nature*, **2025**, 639(8055), 602−608.

6 Teyssier, J.; Saenko, S. V.; van der Marel, D.; Milinkovitch, M. C. Photonic crystals cause active colour change in chameleons. *Nat. Commun.*, **2015**, 6, 6368.

7 Marlow , F.; Muldarisnur, Sharifi , P.; Brinkmann , R.; Mendive , C. Opals: status and prospects. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2009**, 48(34), 6212−6233.

8 Zhao, Y. J.; Shang, L. R.; Cheng, Y.; Gu, Z. Z. Spherical colloidal photonic crystals. *Acc. Chem. Res.*, **2014**, 47(12), 3632−3642.

9 Feng, L.; Wang, F.; Luo, H. J.; Qiu, B. X. Review of recent advancements in the biomimicry of structural colors. *Dyes Pigm.*, **2023**, 210, 111019.

10 Song, B.; Johansen, V. E.; Sigmund, O.; Shin, J. H. Reproducing the hierarchy of disorder for Morpho-inspired, broad-angle color reflection. *Sci. Rep.*, **2017**, 7, 46023.

11 Cuthill, I. C.; Allen, W. L.; Arbuckle, K.; Caspers, B.; Chaplin, G.; Hauber, M. E.; Hill, G. E.; Jablonski, N. G.; Jiggins, C. D.; Kelber, A.; Mappes, J.; Marshall, J.; Merrill, R.; Osorio, D.; Prum, R.; Roberts, N. W.; Roulin, A.; Rowland, H. M.; Sherratt, T. N.; Skelhorn, J.; Speed, M. P.; Stevens, M.; Stoddard, M. C.; Stuart-Fox, D.; Talas, L.; Tibbetts, E.; Caro, T. The biology of color. *Science*, **2017**, 357(6350), eaan0221.

12 Kinoshita, S.; Yoshioka, S. Structural colors in nature: the role of regularity and irregularity in the structure. *ChemPhysChem*, **2005**, 6(8), 1442−1459.

13 Vigneron, J. P.; Simonis, P. Natural photonic crystals. *Phys. B Condens. Matter*, **2012**, 407(20), 4032−4036.

14 Welch, V.; Vigneron, J. P.; Lousse, V.; Parker, A. Optical properties of the iridescent organ of the comb-jellyfish *Beroë Cucumis* (Ctenophora). *Phys. Rev. E*, **2006**, 73(4), 041916.

15 Ge, J. P.; Yin, Y. D. Responsive photonic crystals. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2011**, 50(7), 1492−1522.

16 Sampath, D.; Narasimhan, V. Novel techniques for enhanced detection of blood components based on one-dimensional photonic crystal. *ACS Omega*, **2026**, 11(7), 12553−12564.

17 Lv, Q.; Lv, Z. J.; Feng, T. Z.; Ma, Y. X.; Xu, C. F.; Wang, B. H.; Wang, X. D. Intralayer-mediated vertical assembly of two-dimensional organic molecular crystals toward three-dimensional integration. *J. Am. Chem. Soc.*, **2026**, 148(13), 14415−14425.

18 Zhang, Y. X.; Peng, Y. C. Bulk−boundary-disclination correspondence in a three-dimensional higher-order topological photonic crystal. *ACS Photonics*, **2026**, 13(3), 688−696.

19 Li, X. Y.; Wang, X. H.; Li, Y. C.; Liu, G. J.; Shao, J. Z. Recent advances in efficient large-scale assembly and structural stabilization of colloidal photonic crystals for structural coloration of textiles. *Dyes Pigm.*, **2026**, 246, 113360.

20 Li, H.; Mumtaz, M.; Isono, T.; Satoh, T.; Liu, C. L.; Chen, W. C.; Borsali, R. Rainbow photonic crystals: self-assembly of carbohydrate bottlebrushes block copolymers. *Adv. Mater.*, **2026**, 38(17), e72667.

21 Cai, Z. Y.; Li, Z. W.; Ravaine, S.; He, M. X.; Song, Y. L.; Yin, Y. D.; Zheng, H. B.; Teng, J. H.; Zhang, A. From colloidal particles to photonic crystals: advances in self-assembly and their emerging applications. *Chem. Soc. Rev.*, **2021**, 50(10), 5898−5951.

22 Yadav, A.; Yadav, N.; Agrawal, V.; Polyutov, S. P.; Tsipotan, A. S.; Karpov, S. V.; Slabko, V. V.; Yadav, V. S.; Wu, Y. L.; Zheng, H. Y.; RamaKrishna, S. State-of-art plasmonic photonic crystals based on self-assembled nanostructures. *J. Mater. Chem. C*, **2021**, 9(10), 3368−3383.

23 Liu, H. D.; Li, Y. W.; Yang, Y. Z.; Yang, C.; Yu, Y.; Li, R. X.; Gao, Y.; Nishioka, K.; Ye, S. J. Formation of cylindrical silicon dioxide and silicon nitride nanopillars through alternating gas etching using inductively coupled plasma reactive ion etching. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **2026**, 59(11), 115102.

24 Lee, H.; Na, C. Y.; Cho, S. M. A simple fabrication method of passive-matrix organic light-emitting diode display without a photolithography process. *Solid State Electron.*, **2023**, 208, 108744.

25 Bin, F. C.; Wu, X. Y.; Liu, J.; Dong, X. Z.; Li, T.; Duan, Q.; Zhang, J. M.; Fujita, K.; Zheng, M. L. Micropattern of core-shell Ag@MCS/PEGDA nanoparticles fabricated by femtosecond laser maskless optical projection lithography. *Int. J. Extrem. Manuf.*, **2025**, 7(3), 035001.

26 He, Y.; Wang, J. Q.; Yan, Y. D.; Geng, Y. Q. Periodic nanostructures on single-crystal copper for SERS substrate fabricated by using AFM dynamic lithography. *Vacuum*, **2023**, 218, 112595.

27 Chen, P. Z.; Skirzynska, A.; Yuan, T. G.; Voznyy, O.; Gu, F. X. Asymmetric interfacet adatom migration as a mode of anisotropic nanocrystal growth. *J. Am. Chem. Soc.*, **2022**, 144(42), 19417−19429.

28 An, N. K.; Chen, X. S.; Chen, X.; Yuan, J. Y. Monodisperse and size-regulable nanoparticles by polymerization-induced self-assembly for printable colloidal photonic crystals. *Polym. Chem.*, **2025**, 16(17), 1981−1989.

29 Wang, Z. J.; Zhang, X.; Zhang, T. H.; Shao, J. P.; Li, X. Y.; Huang, Y.; Shao, J. Z.; Thang, S. H. Facile assembly of high-solid, responsive liquid photonic crystals *via* RAFT-synthesized colloidal nanospheres using rotary evaporation. *J. Mater. Chem. C*, **2026**, 14(19), 8127−8137.

30 Maire, R.; Plati, A.; Smallenburg, F.; Foffi, G. Self-assembly of quasicrystals under cyclic shear. *Soft Matter*, **2026**, 22(18), 3346−3358.

31 Wilson, J. A.; Sun, A.; Li, Z. W. Magnetic assembly approach to hierarchical photonic stripes. *J. Mater. Chem. C*, **2025**, 13(37), 19244−19251.

32 Lemago, H. H.; Szilágyi, I. M. Inverse opal photonic crystals: synthesis techniques, unique properties, and multifunctional applications. *Appl. Surf. Sci. Adv.*, **2025**, 28, 100805.

33 Fang, Y. C.; Tao, W. H.; Hu, A. W. Self-cleaning and antimicrobial structural color coating based on photonic crystal fabricated by polymer microspheres containing multifunctional groups. *Prog. Org. Coat.*, **2026**, 214, 110039.

34 Cerjan, B.; Cerjan, A. Lines of bound states in the continuum in monodisperse microsphere structures. *Laser Photonics Rev.*, **2026**, 20(7), e02179.

35 Li, D.; Luo, Q.; Liu, Q. L.; Chen, S. Y.; Zhang, X. Z.; Zhao, C. X.; Cheng, J. B.; Wu, Y. P.; Song, F. Edible cellulose-based photonic crystals with low-temperature response for food sensing. *Carbohydr. Polym.*, **2025**, 367, 124029.

36 Zhu, B. F.; Hean, K.; Wong, S.; Wang, Y. X.; Banerjee, R.; Xue, H. R.; Wang, Q.; Cerjan, A.; Wang, Q. J.; Chang, W.; Chong, Y. D. Topological photonic crystal fiber. *Sci. Adv.*, **2025**, 11(46), eady1476.

37 Xie, S. X.; Shen, A. D.; Zeng, Z. Y.; Sun, S. Y.; Zhang, M. D. Multiple bound states in the continuum of the metasurface with multiple nanopillars. *Plasmonics*, **2025**, 20(8), 5735−5747.

38 Sato, R.; Vinther Bertelsen, C.; Nikitin, M.; Lopez Aymerich, E.; Malureanu, R.; Edith Svendsen, W.; Lavrinenko, A. V.; Takayama, O. Observation of edge bound states in the continuum at truncated silicon pillar photonic crystal. *Nat. Commun.*, **2024**, 15(1), 10544.

39 Jayawardana, N.; Larson, M. T.; Tu, C. W.; Wong, W. W.; Tan, H. H.; Jagadish, C.; Schmitzer, H.; Wagner, H. P. Low-threshold InP nanowire hetero-photonic crystal surface-emitting lasers. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2026**, 18(5), 9070−9078.

40 He, X. Q.; Zhang, M. M.; Li, R. J.; Wang, D. D.; Li, P. F. Double gold nanowires photonic crystal fiber biosensor for refractive index detection. *Opt. Express*, **2025**, 33(15), 32691.

41 Zhang, F. S.; Li, Q. Y.; Qing, G. Y. Matrix-engineered cellulose nanocrystals for robust and water-stable chiral photonic devices. *Acc. Mater. Res.*, **2026**, 7(1), 72−87.

42 Jiang, Y. H.; Feng, K. Self-assembled cellulose nanocrystal: expanding structural color materials into next-generation functional applications: a review. *Int. J. Biol. Macromol.*, **2026**, 349, 150902.

43 Goyal, M.; Shi, C. R.; Hassanpour, M.; Xu, J. S.; Zhuang, X. S.; Song, X. P.; Song, A. Y.; Zhang, Z. Y. Exploring chiral photonic cellulose nanocrystal composites: from self-assembly to advanced applications. *Adv. Colloid Interface Sci.*, **2026**, 347, 103688.

44 Yan, J. J.; Cai, H. X.; Ma, S.; Wen, X.; Zhao, Z.; Wang, S. X.; Qi, Y. M.; Wu, J.; Deng, H. B. Hierarchically reinforced injectable chitosan-based hydrogels integrating mechanical-bioactive nanofibers and chondrogenic cues for articular cartilage reconstruction. *Int. J. Biol. Macromol*., **2026**, 340, 150133.

45 Wang, X. K.; Shan, C. C.; Huang, R. L.; Penkova, A.; Su, R. X. Chitosan and chitosan nanofibers in wound dressings, from material preparation to functional design: a review. *Int. J. Biol. Macromol.*, **2025**, 333, 148937.

46 Zheng, Y. W.; Chen, J. Q.; Mo, W. Q.; Hong, W. Thermo-responsive tri-state photonic crystals. *Adv. Sci.*, **2025**, 12(32), e06507.

47 Yuan, Y. T.; Guo, P. X.; Wang, K. L.; Zhang, L. The soda-lime glass-based photonic crystal optical fiber SPR sensor for refractive index and temperature measurement. *Phys. Scr.*, **2026**, 101(7), 075515.

48 Wang, C. C.; Liu, J. F.; Sheng, M. F.; Chen, H. L.; Zhang, L. P.; Fu, S. H. Continuous fabrication of a dual-mode sensing fiber based on a mechanochromic photonic crystal for information transmission. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2026**, 18(3), 6044−6054.

49 Yang, X. Y.; Ding, K. Q.; Sun, A. A dual-parameter sensor for temperature and strain measurement based on a fluorescent photonic crystal fiber structure. *Opt. Fiber Technol.*, **2026**, 100, 104649.

50 Alfeky, T.; Abdelfattah, S. S.; Ali, Z. A.; Hameed, M. F. O.; Obayya, S. S. A.; Ibrahim, M. S. S. Highly sensitive hybrid plasmonic 2D photonic crystal magnetic field sensor. *Photonics Nanostruct. Fundam. Appl.*, **2026**, 70, 101505.

51 Luo, J. Y.; Sun, J.; Chen, H. C.; Zhao, C. L.; Ye, M. P. A review of high-sensitivity SERS-active photonic crystal fiber sensors for chemical and biological detection. *Sensors*, **2025**, 25(22), 6982.

52 Nizar, S. M.; Kalpana, S.; Abinaya, S. Photonic crystal fiber-based gas sensor for HCN detection in industrial environments. *J. Comput. Electron.*, **2025**, 24(5), 152.

53 Zaky, Z. A.; Al-Dossari, M.; Zhaketov, V. D.; Aly, A. H. Defected photonic crystal as propylene glycol THz sensor using parity-time symmetry. *Sci. Rep.*, **2024**, 14, 23209.

54 Wang, H. Y.; Wu, X. H.; Lü, T.; Qi, D. M.; Pan, Y.; Wu, D. H.; Zhang, S. L.; Zhang, D.; Zhao, H. T. Construction of responsive photonic crystal patterns *via* tunable evaporation-induced assembly of soft core-shell nanospheres. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Aspects*, **2026**, 737, 139675.

55 Duan, Y. Z.; Tao, W. H.; Fang, Y. C.; Wang, X. F. Colorimetric textile sensors based on the photonic crystals structural color with fast water responsiveness and antibacterial properties. *Eur. Polym. J.*, **2025**, 239, 114281.

56 Yang, L.; Yuan, Q. Y.; Lou, C. W.; Lin, J. H. Preparation and application of pH self-controlled slow-release sensor. *Gels*, **2026**, 12(4), 308.

57 Yu, T.; Wang, B.; Yu, L. P. Dual-mode color-changing pH sensor based on fluorescent MOF embedded photonic crystal hydrogel. *J Chin. Chemical Soc*, **2022**, 69(5), 831−839.

58 Gan, Y. M.; Sun, H. L.; Hong, P. C.; Liang, W. X.; Li, S. P.; Lin, C. X. Automation assisted systematic investigation on ZIF photonic crystals: from microscopic mechanism to the detection of organophosphorus compounds. *Nano Res.*, **2026**, 19(4), 94908381.

59 Tasnim, N.; Rahman, M. A.; Rahman, M. R.; Ahmed, T. Highly sensitive photonic crystal fiber based surface plasmon resonance biosensor for detection of wide range of organic solutions. *Sens. Bio Sens. Res.*, **2024**, 43, 100623.

60 Yadav, N.; Liu, M. M.; Wu, Y. L.; Yadav, A.; Zheng, H. Y. Self-organization of photonic structures in colloidal crystals in the AI era. *Nanoscale Adv.*, **2025**, 7(20), 6373−6393.

61 Memon, H.; Yin, Z.; Yao, J. M.; Wang, Y.; Khabibulla, P.; Kayumov, J.; Zhu, G. C. Photonic crystal structural color on textiles. *Opt. Mater.*, **2025**, 165, 117142.

62 Kumar Shakya, A.; Ramola, A.; Balal, N.; Bergman, A. Evolution of photonic crystal fiber-based smart sensors with emphasis on biomedical applications: a review. *IEEE Sens. J.*, **2026**, 26(4), 5288−5301.

63 Singh, S.; Kumar, D.; Sahu, A.; Shanker Chaudhary, V.; Singh, G.; Kumar, S. Photonic crystal fiber-based sensors for various cancer detection in human body: a review. *IEEE Sens. J.*, **2025**, 25(4), 5956−5968.

64 Bhaskar, S.; Wang, W. J.; Lee, H.; Liu, L. Y.; Umrao, S.; Liu, W. N.; Bacon, A.; Tibbs, J.; Khemtonglang, K.; Tan, A. Q.; Ayupova, T.; Chen, W. C.; Wang, X.; Cunningham, B. T. Photonic crystal grating resonance and interfaces for health diagnostic technologies. *Chem. Rev.*, **2025**, 125(14), 6435−6540.

65 Sultana, A.; Mondal, H.; Das, H.; Soroosh, M.; Bhattarai, S. Recent advances in photonic crystal-based encoder and decoder designs: a comprehensive review. *Eur. Phys. J. Plus*, **2025**, 140(6), 536.

66 Wang, M.; Yang, H.; Li, X. S.; Zhang, X.; Yang, H. Self-assembled 3D blue phase liquid crystals for intelligent photonic crystals and functional devices. *Adv. Opt. Mater.*, **2025**, 13(6), 2402581.

67 Yang, W. J.; Li, J. H.; Wang, J. X.; Jiang, L. Bioinspired digital structural color patterning based on photonic paper/ink systems. *Adv. Funct. Mater.*, **2026**, 36(29), e27923.

68 Gong, Y. T.; Li, P. F.; Peng, Z. G.; Chen, S. G.; Liu, C. F.; Cheng, T.; Fan, J. Y.; Niu, J.; Lai, W. Y. Bio-inspired camouflage skin with photonic crystal structure and size-confinement effect. *Adv. Opt. Mater.*, **2024**, 12(11), 2302234.

69 Du, K.; Jiang, W. Q.; Zhou, M. H.; He, L. L.; Li, G. J. ZnO thin-film gas sensor fabricated bydip-coating method for triethylamine detection. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, **2026**, 37(9), 600.

70 Martusciello, M.; Hervieu, C.; Di Fonzo, D.; Lanfranchi, A.; Lova, P.; Comoretto, D. Dip-coating fabrication of all-polymer multilayer photonic crystals through 3D printer conversion. *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2025**, 7(8), 4779−4786.

71 Du, X. S.; Liu, T. Y.; Gu, J. H.; Wang, Y.; Jiang, Z. Y.; Mao, Z. R.; Yu, C. Y.; Kong, X. T.; Jiang, S. Fabrication of large-area organic semiconducting crystalline thin films with controlled morphology by antisolvent-assisted dip coating. *Funct. Mater. Lett.*, **2024**, 17(4), 2451024.

72 Card, M.; Alejandro, R.; Roxbury, D. Decoupling individual optical nanosensor responses using a spin-coated hydrogel platform. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2023**, 15(1), 1772−1783.

73 Gao, L.; Kou, D. H.; Lin, R. C.; Ma, W.; Zhang, S. F. Size-tunable covalent organic framework nanoparticles for assembling one-dimensional photonic crystals with visual sensing. *Small*, **2025**, 21(8), 2408201.

74 Murugesan, M.; Meher, S. R. TiO_2-ZnO composite thin films fabricated by sol-gel spin coating for room temperature impedometric acetone sensing. *Sens. Actuators A Phys.*, **2024**, 369, 115181.

75 Wu, H. F.; Li, X. L.; Wang, C. H.; Chai, X. F.; Lu, J. H.; Shen, Q.; Wang, H. S.; Wang, R. X. Advances and outlook of perovskite solar cells *via* spray coating technologies. *Sol. Energy*, **2026**, 307, 114313.

76 Pan, C.; Tian, A. Q.; Wu, M. X.; Guo, Y.; Liu, H. X.; Tan, H. Y.; Sun, J. X.; Jin, J.; Mao, C.; Jiang, W. Covalently anchored photonic crystal skins for robust structural colors on textiles. *Soft Matter*, **2026**, 22(6), 1358−1366.

77 Fu, Y.; Shi, Q. W.; Sun, J. X.; Li, X.; Pan, C.; Tang, T.; Peng, T.; Tan, H. Y. Construction of wash-resistant photonic crystal-coated fabrics based on hydrogen bonds and a dynamically cross-linking double-network structure. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2023**, 15(6), 8480−8491.

78 Fu, Y.; Deng, L. B.; Li, X.; Tan, H. Y.; Sun, J. X.; Shi, Q. W.; Zheng, G.; Wu, Y. X.; Zhu, L. B.; Hossain, Z. Construction of amorphous photonic crystal coated fabrics with wash resistance and antifouling performance. *Cellulose*, **2023**, 30(6), 4057−4070.

79 Liu, H.; Zhang, Y. X.; Jin, M. T.; Ma, W. B.; He, W. Y.; Li, Y. C.; Li, C. C.; Zhou, L.; Shao, J. Z.; Liu, G. J. Preparation of carbon fiber substrates with structural colors based on photonic crystals. *Dyes Pigm.*, **2022**, 203, 110338.

80 Langer, F. B.; Yin, S. D.; Duvigneau, J.; Vancso, G. J.; Benson, N. Suppression of the coffee ring effect in a single solvent-based silicon nanoparticle ink. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2024**, 16(3), 4242−4248.

81 Rharbi, Y.; Faure, V.; Blayo, A.; Magnin, A.; Denneulin, A. Mechanisms of coffee-ring suppression in Picoliter silver nanoparticle ink droplets: implications for printed electronics. *J. Colloid Interface Sci.*, **2026**, 707, 139703.

82 Jung, N.; Seo, H. W.; Leo, P. H.; Kim, J.; Kim, P.; Yoo, C. S. Surfactant effects on droplet dynamics and deposition patterns: a lattice gas model. *Soft Matter*, **2017**, 13(37), 6529−6541.

83 Hwang, H.; Kim, J.; Jeon, S.; Jo, S. M.; Park, S.; An, H.; Kappl, M.; Butt, H. J.; Wooh, S. Metal nanodot array *via* thin oil layer-assisted dropwise solid-state dewetting. *Small Sci.*, **2025**, 5(11), 2500311.

84 Smirnov, A.; Pogosian, T.; Povarov, S.; Gunina, E.; Milichko, V.; Morozov, M.; Vinogradov, A. Inkjet printing of magnetically responsive photonic crystals. *Adv. Opt. Mater.*, **2024**, 12(26), 2401002.

85 Williams, C. A.; Parker, R. M.; Kyriacou, A.; Murace, M.; Vignolini, S. Inkjet printed photonic cellulose nanocrystal patterns. *Adv. Mater.*, **2024**, 36, 2307563.

86 Dreyer, O.; Schneider, L.; Radjabian, M.; Abetz, V.; Müller, M. Evaporation-induced self-assembly of diblock copolymer films in an electric field: a simulation study. *Macromolecules*, **2023**, 56(17), 6880−6890.

87 Hu, Y. D.; Ardekani, A.; Zhu, J. T.; Yang, Y. J.; Pérez-Mercader, J. Droplet microfluidics, colloidal assembly and nanoscale processing: synergistic control and properties of colloid-based photonic microobjects. *Adv. Colloid Interface Sci.*, **2025**, 344, 103601.

88 Urban, D.; Rey, M.; Ciarlo, A.; Schulte, M. F.; Descrovi, E.; Volpe, G. Directional flows using capillary assembly of photo-deformable colloidal particles at water-air interfaces. *Nat. Commun.*, **2025**, 17(1), 1004.

89 Liu, Q.; Pan, X. J.; Xu, N.; Wang, Q.; Qu, S. Z.; Wang, W. H.; Fan, L.; Dong, Q. Hypergravity field induced self-assembly of 2D MXene in polyvinyl alcohol membrane matrix and its improvement of alcohol/water pervaporation. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2023**, 140(16), e53740.

90 Grega, I.; Shaikeea, A. J. D.; Wadley, H. N. G.; Deshpande, V. S. Gravity enables self-assembly. *Nat. Sci.*, **2022**, 2(3), e20220007.

91 Jia, J.; Liu, R. K.; Gu, Y. H.; Sun, Q.; Wang, J. X.; Chen, J. F. High-gravity-assisted fabrication of self-assembled colloidosomes. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2022**, 61(20), 6934−6944.

92 Rui, J. Q.; Fang, J. J.; Fang, L.; Ni, Y. R.; Lu, C. H.; Xu, Z. Z. Large-scale photonic crystal films prepared *via* coating-assisted leveling and gravity-induced assembly. *Opt. Mater.*, **2022**, 131, 112665.

93 Vialetto, J.; Gaichies, T.; Rudiuk, S.; Morel, M.; Baigl, D. Versatile deposition of complex colloidal assemblies from the evaporation of hanging drops. *Adv. Sci.*, **2024**, 11(7), 2307893.

94 Qi, C.; Ma, X. D.; Zhong, J. F.; Fang, J. Y.; Huang, Y. D.; Deng, X. K.; Kong, T. T.; Liu, Z. Facile and programmable capillary-induced assembly of prototissues *via* hanging drop arrays. *ACS Nano*, **2023**, 17(17), 16787−16797.

95 Xie, A. Q.; Li, Q.; Xi, Y. R.; Zhu, L. L.; Chen, S. Assembly of crack-free photonic crystals: fundamentals, emerging strategies, and perspectives. *Acc. Mater. Res.*, **2023**, 4(5), 403−415.

96 Sandu, I.; Fleaca, C. T.; Dumitrache, F.; Urzica, I.; Antohe, I.; Dumitru, M. Self-assembly of curved photonic heterostructures by the hanging drop method. *Polymers*, **2026**, 18(8), 924.

97 Wang, S. D.; Walker-Gibbons, R.; Watkins, B.; Lin, B. H.; Krishnan, M. Chemical control of colloidal self-assembly driven by the electrosolvation force. *Nat. Commun.*, **2025**, 16, 2872.

98 Piyus, J.; Georgiou, G. D.; Zhao, C.; Zhang, H. C.; Gao, L.; Hou, J. Electric-field-induced assembly and electrochromic properties of metal-organic framework photonic crystals. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2025**, 64(47), 22934−22938.

99 Atifi, S.; Mirvakili, M. N.; Williams, C. A.; Bay, M. M.; Vignolini, S.; Hamad, W. Y. Fast self-assembly of scalable photonic cellulose nanocrystals and hybrid films *via* electrophoresis. *Adv. Mater.*, **2022**, 34(12), 2109170.

100 Shi, W.; Huang, J.; Fang, R. C.; Liu, M. J. Imparting functionality to the hydrogel by magnetic-field-induced nano-assembly and macro-response. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2020**, 12(5), 5177−5194.

101 Al Harraq, A.; Lee, J. G.; Bharti, B. Magnetic field-driven assembly and reconfiguration of multicomponent supraparticles. *Sci. Adv.*, **2020**, 6(19), eaba5337.

102 Martínez-Pedrero, F.; González-Banciella, A.; Camino, A.; Mateos-Maroto, A.; Ortega, F.; Rubio, R. G.; Pagonabarraga, I.; Calero, C. Superparamagnetic colloids: static and dynamic self-assembly of pearl-like-chains of magnetic colloids confined at fluid interfaces. *Small*, **2021**, 17(25), 2170127.

103 Wang, X. L.; Wang, F. F.; Ye, X. Y. The new strategy for enhancing tribological properties of polyimide/Fe_3O_4 nanocomposites: magnetic forces induced internal surface self-assembly. *Tribol. Int.*, **2024**, 199, 110023.

104 Jeon, J.; Nepal, D.; McConney, M. E.; Bunning, T. J.; Tsukruk, V. V. Spatially programmable chirality in cellulose nanocrystal films *via* rotational magnetic flow. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2025**, 17(36), 51022−51031.

105 Li, Y. C.; Fan, Q. S.; Wang, X. H.; Liu, G. J.; Chai, L. Q.; Zhou, L.; Shao, J. Z.; Yin, Y. D. Shear-induced assembly of liquid colloidal crystals for large-scale structural coloration of textiles. *Adv. Funct. Mater.*, **2021**, 31(19), 2010746.

106 Zablotsky, D.; Blums, E.; Herrmann, H. J. Self-assembly and rheology of dipolar colloids in simple shear studied using multi-particle collision dynamics. *Soft Matter*, **2017**, 13(37), 6474−6489.

107 Ko, Y. G.; Shin, D. H. Effects of liquid bridge between colloidal spheres and evaporation temperature on fabrication of colloidal multilayers. *J. Phys. Chem. B*, **2007**, 111(7), 1545−1551.

108 Chen, H.; Wei, J. J.; Pan, F.; Yuan, T. Y.; Fang, Y. L.; Wang, Q. Y. Advances in photonic crystal research for structural color. *Adv. Mater. Technol.*, **2025**, 10(4), 2400865.

109 Liao, J. L.; Ye, C. Q.; Agrawal, P.; Gu, Z. Z.; Zhang, Y. S. Colloidal photonic crystals for biomedical applications. *Small Struct.*, **2021**, 2(5), 2000110.

110 Fu, Q. Q.; Yu, W. Y.; Bao, G. Y.; Ge, J. P. Electrically responsive photonic crystals with bistable states for low-power electrophoretic color displays. *Nat. Commun.*, **2022**, 13(1), 7007.

111 Huang, H. W.; Li, H. T.; Shen, X. Q.; Gu, K.; Guo, J.; Wang, C. C. Gecko-inspired smart photonic crystal films with versatile color and brightness variation for smart windows. *Chem. Eng. J.*, **2022**, 429, 132437.

112 Zhang, F. S.; Yu, J. Q.; Zhong, W.; Wang, Z. X.; Li, Q. Y.; Qing, G. Y. Responsive photonic filaments from confined self-assembly of cellulose nanocrystals. *ACS Nano*, **2025**, 19(6), 6299−6308.

113 Guo, Q. L.; Li, H. T.; Wang, X. L.; Wang, C. C. Fabrication of effect pigments with full visible photonic crystal colors *via* the shear-induced assembly of multinary colloidal nanoparticles. *J. Mater. Chem. C*, **2024**, 12(43), 17695−17703.

114 Lu, X. D.; Huang, H. D.; Wang, X. H.; Li, X. Y.; Liu, G. J.; Chai, L. Q.; Zhou, L.; Shao, J. Z. Quasi-ordered nanosphere-based photonic crystals with high-fastness structural colors *via* screen printing: implications for textile printing and dyeing. *ACS Appl. Nano Mater.*, **2022**, 5(11), 16108−16115.

115 Wang, J. Q.; Pang, F.; Fu, Q. Q.; Ge, J. P. Fabrication of anti-counterfeiting patterns with angle-dependent colors by silkscreen printing and UV-curable photonic crystal inks. *Sci. China Mater.*, **2023**, 66(4), 1623−1631.

116 Lin, D. Q.; Liu, J. A.; Zhang, H.; Qian, Y.; Yang, H.; Liu, L. H.; Ren, A.; Zhao, Y. S.; Yu, X.; Wei, Y.; Hu, S.; Li, L. J.; Li, S. F.; Sheng, C. X.; Zhang, W. H.; Chen, S. F.; Shen, J. P.; Liu, H. F.; Feng, Q. Y.; Wang, S. S.; Xie, L. H.; Huang, W. Gridization-driven mesoscale self-assembly of conjugated nanopolymers into luminescence-anisotropic photonic crystals. *Adv. Mater.*, **2022**, 34(11), 2109399.

117 Zhou, J. M.; Wang, J. X.; Huang, Y.; Liu, G. M.; Wang, L. B.; Chen, S. R.; Li, X. H.; Wang, D. J.; Song, Y. L.; Jiang, L. Large-area crack-free single-crystal photonic crystals *via* combined effects of polymerization-assisted assembly and flexible substrate. *NPG Asia Mater.*, **2012**, 4(8), e21.

118 Zhang, X.; Wang, Z. J.; Huang, Y.; Teo, N. K. S.; Mo, Y. X.; Hsia, T.; Guo, J. J.; Shao, M.; Shao, J. Z.; Thang, S. H. Synergistic hydrophilic and electrostatic induction for liquid photonic crystals of poly(acrylic acid)-*block*-polystyrene colloidal nanospheres from RAFT-mediated emulsion polymerization. *Small*, **2025**, 21(12), 2410729.

119 Guo, J. J.; Zhang, Y. L.; Li, X. Y.; Zhang, X.; Huang, Y.; Yu, M. L.; Shao, J. Z. Electrostatic fence induced assembly of low-concentration colloidal nanospheres to form liquid photonic crystals. *J. Colloid Interface Sci.*, **2025**, 679, 1084−1094.

120 Huang, Z. H.; Chu, Y. Q.; Fang, Y. Z.; Liu, Z. F. A photonic-ion wearable motion monitoring system with self-assembled photonic crystal composite prints for real-time color and electrical signal sensing. *Mater. Res. Bull.*, **2026**, 193, 113651.

121 Kang, Y. L.; Zhao, J.; Zeng, Y.; Du, X.; Gu, Z. Z. 3D printing photonic crystals: a review. *Small*, **2024**, 20(46), 2403525.
122 Liao, J. L.; Ye, C. Q.; Guo, J.; Garciamendez-Mijares, C. E.; Agrawal, P.; Kuang, X.; Japo, J. O.; Wang, Z. X.; Mu, X.; Li, W. L.; Ching, T.; Mille, L. S.; Zhu, C.; Zhang, X. C.; Gu, Z. Z.; Zhang, Y. S. 3D-printable colloidal photonic crystals. *Mater. Today*, **2022**, 56, 29−41.
123 Hu, Z.; Li, M. M.; Lyu, Q. Q.; Chen, X. D.; Zhang, X. J.; Yu, Y.; Zhang, L. B.; Zhu, J. T. Supramolecular 3D printing enabling one-step generation of healable and recyclable structurally colored objects. *Adv. Funct. Mater.*, **2024**, 34(52), 2410921.
124 Cangiano, A.; Gallucci, N.; Cowieson, N.; Paduano, L. A bottom-up route to tunable nanophotonic materials *via* binary nanocrystal co-assembly. *Mater. Today Nano*, **2026**, 34, 100803.
125 Fang, Z. X.; Wilson, J. A.; Huang, R.; Li, Z. W. Interfacial assembly and patterning of responsive tetragonal photonic crystals. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2026**, 18(11), 17180−17186.
126 Zhou, M. J.; Chen, S. X.; Wei, B. R.; Yang, D. P.; Ma, D. K.; Huang, S. M. Hollow mesoporous cubic silica self-assembling into photonic crystals with rhombohedral lattices and vivid structural colors for anti-counterfeiting. *J. Colloid Interface Sci.*, **2023**, 650, 313−321.
127 Lonergan, A.; Hu, C. Y.; O'Dwyer, C. How light passes through ordered macroporous photonic crystals immersed in solvents. *ECS Trans.*, **2020**, 98(2), 75−85.
128 Sitpathom, N.; Muangnapoh, T.; Kumnorkaew, P.; Suwanna, S.; Sinsarp, A.; Osotchan, T. Angle-dependent spectrum measurement of polystyrene opal-like structure described by Bragg-Snell diffraction and perturbed photonic band structure. *J. Phys. Conf. Ser.*, **2021**, 2145(1), 012040.
129 Gao, L.; Kou, D. H.; Ma, W.; Zhang, S. F. Biomimetic metal-organic framework-based photonic crystal sensor for highly sensitive visual detection and effective discrimination of benzene vapor. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2023**, 15(25), 30606−30618.
130 Shi, Q. W.; Liang, J. X.; Wang, X. Y.; Yao, K. X.; Tang, Y. D.; Pan, C.; Sun, J. X.; Liu, R.; Tan, H. Y.; Tang, T. Chameleon inspired high-temperature thermochromic traffic light type photonic crystal sensors toward early fire detection and visual sensing. *Chem. Eng. J.*, **2024**, 485, 149966.
131 Apostolaki, M. A.; Toumazatou, A.; Antoniadou, M.; Sakellis, E.; Xenogiannopoulou, E.; Gardelis, S.; Boukos, N.; Falaras, P.; Dimoulas, A.; Likodimos, V. Graphene quantum dot-TiO_2 photonic crystal films for photocatalytic applications. *Nanomaterials*, **2020**, 10(12), 2566.
132 Lu, M.; He, Y.; Xi, S. Y.; Zhong, P. F.; Zhang, Y.; Tian, H.; Wang, Y. M.; Lu, H. L.; Hu, J. H.; Tang, J. High-sensitivity MXene-functionalized photonic crystal fiber surface plasmon resonance sensor with dual rectangular grooves for cancer detection. *Sensors*, **2025**, 25(18), 5705.
133 Manoli, A.; Papagiorgis, P.; Sergides, M.; Bernasconi, C.; Athanasiou, M.; Pozov, S.; Choulis, S. A.; Bodnarchuk, M. I.; Kovalenko, M. V.; Othonos, A.; Itskos, G. Surface functionalization of $CsPbBr_3$ vanocrystals for photonic applications. *ACS Appl. Nano Mater.*, **2021**, 4(5), 5084−5097.
134 Shang, Y. Y.; Huang, C.; Li, Z.; Du, X. M. Bioinspired ultra-stretchable and highly sensitive structural color electronic skins. *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, 35(2), 2412703.
135 Cho, Y.; Oh, C. Y.; Son, E. J.; Kim, Y. S.; Shim, T. S. Biaxial mechanochromic behaviors of mechanically heterogeneous colloidal photonic crystal weave. *Adv. Opt. Mater.*, **2024**, 12(19), 2400135.
136 Yang, L.; Yang, H. Y.; Ju, X. J.; Wang, W.; Liu, Z.; Pan, D. W.; Xie, R.; Chu, L. Y. A photonic crystal gel for naked-eye detection of uric acid with high sensitivity and specificity. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2024**, 63(24), 10615−10626.
137 Lin, R. C.; Qi, Y.; Kou, D. H.; Ma, W.; Zhang, S. F. Bio-inspired wrinkled photonic elastomer with superior controllable and mechanically stable structure for multi-mode color display. *Adv. Funct. Mater.*, **2022**, 32(45), 2207691.
138 Zaytsev, V.; Ermatov, T. I.; Fedorov, F. S.; Balabin, N.; Kapralov, P. O.; Bondareva, J. V.; Ignatyeva, D. O.; Khlebtsov, B. N.; Kosolobov, S. S.; Belotelov, V. I.; Nasibulin, A. G.; Gorin, D. A. Design of an artificial opal/photonic crystal interface for alcohol intoxication assessment: capillary condensation in pores and photonic materials work together. *Anal. Chem.*, **2022**, 94(36), 12305−12313.
139 Wei, B. R.; Zhang, D. F.; Ma, D. K.; Qi, C. Z.; Yang, D. P.; Fu, Q. Q.; Huang, S. M. Thermochromic structural color based on pressure storage-release toward emerging applications. *Chem. Eng. J.*, **2024**, 497, 154637.
140 Liu, F. F.; Zhang, S. F.; Meng, Y.; Tang, B. T. Thermal responsive photonic crystal achieved through the control of light path guided by phase transition. *Small*, **2020**, 16(34), 2002319.
141 Li, Z. Z.; Soto, M. A.; Hamad, W. Y.; MacLachlan, M. J. From invisible to visible: pressure-responsive photonic crystals for advanced information encryption. *Adv. Opt. Mater.*, **2025**, 13(29), e01703.

142 Chen, T. X.; Lu, T.; Chen, Z. X.; Wang, W. L.; Zhang, W.; Pan, H.; Meng, X.; Jiang, X. L.; Zhu, S. M. Microstructures of responsive photonic crystals on the stimuli-responsive performance: effects and simulation. *Sens. Actuators B Chem.*, **2020**, 305, 127421.

143 Niu, W. B.; Qu, L. C.; Lyv, R.; Zhang, S. F. Reconfigurable photonic crystals with optical bistability enabled by “cold” programming and thermo-recoverable shape memory polymers. *RSC Adv.*, **2017**, 7(36), 22461−22467.

144 Gao, F.; Jiang, X. Y.; Qiu, J. J.; An, T.; Zhang, M. Y.; Song, X. K.; Shi, N.; Li, X. H.; Fan, T. X.; Zhao, Q. B. Disappearing and reappearing of structure order in colloidal photonic crystals. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2025**, 27(6), 3496−3503.

145 Liu, Y. K.; Liu, C. C.; Luo, W. K.; Miao, S. L.; Meng, Z. P.; Huang, H. F. Thermally triggered solvent-responsive “afterglow” structural coloration system based on double-inverse opal photonic crystals. *J. Colloid Interface Sci.*, **2026**, 707, 139726.

146 Wenderoth, S.; Bleyer, G.; Endres, J.; Prieschl, J.; Vogel, N.; Wintzheimer, S.; Mandel, K. Spray-dried photonic balls with a disordered/ordered hybrid structure for shear-stress indication. *Small*, **2022**, 18(48), 2203068.

147 Xu, Y. H.; Tian, M. R.; Zhang, M. M.; Hu, D. W.; Han, G. Q.; Zhu, J. T.; Xu, J. P.; Kim, S. H. Dual-responsive coloration of Janus droplets *via* total internal reflection and interference applied as single-use freezing indicators. *Nat. Commun.*, **2026**, 17, 4313.

148 Xu, J.; Li, Y. Y.; Yao, Y. G.; Ding, Y. J.; Tan, Y. Y.; Hu, G. J.; Zhang, S. M.; Zeng, L. T. A stimulus-responsive optoelectronic skin from photonic crystal. *Adv. Opt. Mater.*, **2025**, 13(17), 2500094.

149 Hu, Y.; Qi, C. Z.; Ma, D. K.; Yang, D. P.; Huang, S. M. Multicolor recordable and erasable photonic crystals based on on-off thermoswitchable mechanochromism toward inkless rewritable paper. *Nat. Commun.*, **2024**, 15, 5643.

150 Gao, F.; Qiu, J. J.; Jiang, X. Y.; An, T.; Song, X. K.; Zhang, M. Y.; Shi, N.; Yu, W.; Fan, T. X.; Zhao, Q. B. Layer-by-layer shear-printing of bulk mechanoresponsive photonic crystals. *Adv. Opt. Mater.*, **2025**, 13(9), 2402892.

151 Zheng, L. S.; Li, N.; Qi, C. Z.; Ma, D. K.; Yang, D. P.; Huang, S. M. Brilliant mechanochromic scattering structural colors. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2025**, 17(7), 11020−11026.

152 Xing, Y. X.; Fei, X.; Ma, J. H. Ultra-fast fabrication of mechanical-water-responsive color-changing photonic crystals elastomers and 3D complex devices. *Small*, **2024**, 20(50), 2405426.

153 Tan, H. Y.; Lyu, Q. Q.; Xie, Z. J.; Li, M. M.; Wang, K.; Wang, K.; Xiong, B. J.; Zhang, L. B.; Zhu, J. T. Metallosupramolecular photonic elastomers with self-healing capability and angle-independent color. *Adv. Mater.*, **2019**, 31(6), 1805496.

154 Wang, T. Q.; Chen, L.; Liu, H. G.; Zhu, H. R.; Zeng, Z. J.; Lu, Y. X.; Zhang, P.; Chen, Y. F.; Huang, Y.; Liu, G. S.; Luo, Y. H.; Chen, Z. Ultrasensitive bionic photonic-electronic skin with wide red-shift mechanochromic response. *Light Adv. Manuf.*, **2025**, 6(2), 206.

155 Lee, Y.; Lee, S.; Oh, C. Y.; Kim, Y. S.; Shim, T. S.; Hwang, H. Hue-resolved strain sensing in mechanochromic colloidal photonic crystal films. *Adv. Mater. Interfaces*, **2025**, 12(22), e00633.

156 Lin, R. C.; Kou, D. H.; Gao, L.; Li, S.; Gao, Z. Y.; Li, X. F.; Ma, W.; Zhang, S. F. Biomimetic photonic elastomer exhibiting stress/moisture reconfigurable wrinkle-lattice for reversible deformation information storage. *ACS Nano*, **2024**, 18(20), 13346−13360.

157 Yu, S. Y.; Ma, D. K.; Qi, C. Z.; Yang, D. P.; Huang, S. M. All-in-one photonic crystals with multi-stimuli-chromic, color-recordable, self-healable, and adhesive functions. *Adv. Funct. Mater.*, **2024**, 34(52), 2411670.

158 Li, X. L.; Cheng, Y.; Zhou, Y.; Shi, L. J.; Sun, J.; Ho, G. W.; Wang, R. R. Programmable robotic shape shifting and color morphing dynamics through magneto-mechano-chromic coupling. *Adv. Mater.*, **2024**, 36(50), 2406714.

159 Wang, J. Q.; Yin, T.; Ge, J. P. A disposable thermally triggered photonic crystal anti-counterfeiting tag with irreversible response and multi-step color changes. *Small*, **2024**, 20(30), 2311308.

160 Qi, F. L.; Li, Q.; Ding, C. F.; Wu, J. B. Fabrication strategies and microscale sensing functionalities of mechanochromic colloidal photonic crystals for underwater applications. *Microstructures*, **2025**, 5(1), 2025011.

161 Gong, K.; Lv, X. P.; Zhou, D.; Gao, B.; Duan, M. S.; Xu, R. P.; Liu, Y. J.; Sun, J. H.; Li, P. Anti-freezing and long-term stabilized photonic-ionic organogels for high sensitive wearable motion sensors. *Chem. Eng. J.*, **2025**, 512, 162474.

162 Kanai, T.; Sato, M.; Hirano, Y. Chameleon-inspired color-changeable colloidal photonic crystal films sensitive to human body temperature. *Mater. Interfaces*, **2025**, 2(1), 84−91.

163 Li, H. T.; Zhu, M. J.; Tian, F.; Hua, W. Q.; Guo, J.; Wang, C. C. Polychrome photonic crystal stickers with thermochromic switchable colors for anti-counterfeiting and information encryption. *Chem. Eng. J.*, **2021**, 426, 130683.

164 Wu, Y.; Sun, R. K.; Ren, J.; Zhang, S. F.; Wu, S. L. Bioinspired dynamic camouflage in programmable thermochromic-patterned photonic films for sophisticated anti-counterfeiting. *Adv. Funct. Mater.*, **2023**, 33(7), 2210047.

165 Wei, J. N.; Yi, Z. H.; Yang, L.; Zhang, L.; Yang, J. C.; Qin, M. L.; Cao, S. Y. Photonic crystal gas sensors based on metal-organic frameworks and polymers. *Anal. Methods*, **2024**, 16(29), 4901−4916.

166 Hamer, M.; Lázaro-Martínez, J. M.; Rezzano, I. N. Fluorescent responsive chlorophyllide-hydrogel for carbon dioxide detection. *Sens. Actuators B Chem.*, **2016**, 237, 905−911.

167 He, S. R.; Jia, L. M.; Wang, J. X.; Xiao, C. R.; Yang, Q.; Xu, Z. P. Solvent/temperature dual-responsive photonic crystal structural-color films through double inverse opal structure. *Chem. Commun.*, **2025**, 61(27), 5182−5185.

168 Zhang, Z. W.; Tian, Y. H.; Li, H. L.; Lu, Z. X.; Chen, Y. L.; Lu, Q. P. Highly sensitive and selective chlorobenzene vapor sensor based on ZIF-8/GO one-dimensional photonic crystal. *J. Environ. Chem. Eng.*, **2023**, 11(5), 111054.

169 Xin, S. H.; Wang, Y. R.; Wang, Z. Y.; Li, R. Q.; Yan, J.; Chen, Y. L. One-dimensional photonic crystal based GO and MIL-101(Cr) for low concentration ammonia sensing. *Phys. Lett. A*, **2025**, 535, 130277.

170 Nah, S. H.; Bin Kim, J.; Chui, H. N. T.; Suh, Y.; Yang, S. Enhanced colorimetric detection of volatile organic compounds using a dye-incorporated photonic crystal-based sensor array. *Adv. Mater.*, **2024**, 36(46), 2409297.

171 Wang, Y. J.; Liu, J. N.; Yang, M. F.; Wang, Y. X.; Jiang, L.; Wang, Y.; Hu, L. A recent review on stimuli-responsive hydrogel photonic materials. *Macromol. Rapid Commun.*, **2025**, 46(14), 2500002.

172 Geng, J. T.; Shao, K.; Zhang, P.; Chen, C.; Huang, S. Advances in photonic crystal hydrogels for biomedical research: a review. *J. Biotechnol.*, **2025**, 404, 162−174.

173 Qiao, Y. X.; Yang, L. Y.; Zhang, Y. K.; Ling, G. X.; Zhang, P. Inverse opals hydrogels: synthetic approaches and applications in medical detection and sensing. *Chem. Eng. J.*, **2025**, 515, 163679.

174 Heo, N. Y.; Park, S. G.; Kim, D.; Lee, H.; Lee, W. Real-time monitoring of CO_2 gas using inverse opal photonic gel containing Poly(2-(dimethylamino)ethylmethacrylate. *Sens. Actuators B Chem.*, **2023**, 377, 133041.

175 Zhao, J.; Cai, X. L.; Zhang, X. J.; Zhang, J. J.; Fan, J.; Ma, F.; Zhu, W.; Jia, X. Y.; Wang, S. S.; Meng, Z. H. Hazardous gases-responsive photonic crystals cryogenic sensors based on antifreezing and water retention hydrogels. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2023**, 15(35), 42046−42055.

176 He, J.; Shen, X. Q.; Li, H. T.; Yao, Y.; Guo, J.; Wang, C. C. Scalable and sensitive humidity-responsive polymer photonic crystal films for anticounterfeiting application. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2022**, 14(23), 27251−27261.

177 Kou, D. H.; Ma, W.; Zhang, S. F.; Lutkenhaus, J. L.; Tang, B. T. High-performance and multifunctional colorimetric humidity sensors based on mesoporous photonic crystals and nanogels. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2018**, 10(48), 41645−41654.

178 Zhan, K.; Zhu, Y. B.; Yan, J.; Chen, Y. L. Enhanced-performance relative humidity sensor based on MOF-801 photonic crystals. *Phys. Lett. A*, **2020**, 384(26), 126678.

179 Cui, H.; Hu, D. W.; Yang, T.; Huang, C.; Yang, Z. Y.; Dong, S. R. Humidity sensors based on surface-functionalized tunable photonic crystal grating. *Talanta*, **2026**, 296, 128521.

180 Hao, Y. R.; Han, Y. Y.; Luo, H. J.; Huang, X. Bioinspired superficially mesoporous silica amorphous photonic crystals for humidity-responsive color switching. *Opt. Mater.*, **2026**, 169, 117599.

181 Kou, D. H.; Shi, T.; Li, L.; Zhang, S. F.; Ma, W. Programmable hierarchical photonic crystal arrays activated by post-hydrolysis for highly sensitive biochemical pH sensing. *Chem. Eng. J.*, **2023**, 463, 142176.

182 Xiao, D. Y.; Ma, H. R.; Luo, W.; Guan, J. G. Agarose-based hydrogel film with embedded oriented photonic nanochains for sensing pH. *Polymers*, **2024**, 16(11), 1530.

183 Zhao, M. J.; Zhang, Z.; Ji, X. T.; Ding, C. F. Photonic crystal/DNA hydrogels for Hg(II) and pH semi-quantitative visual detection in seawater. *Chem. Commun.*, **2025**, 61(99), 19672−19675.

184 Xue, H.; Liu, F.; Wang, Z.; Liu, D. L.; Zhou, L.; Su, W. B.; Niu, S. C.; Han, Z. W.; Ren, L. Q. Bio-inspired dual-responsive photonic crystal with smart responsive hydrogel for pH and temperature detection. *Mater. Des.*, **2023**, 233, 112242.

185 Lin, B.; Muhammad, I.; Zhang, W. X.; Wang, Y. F.; Meng, Z. H. A photonic crystal-hydrogel sensor for the monitoring of potassium ions in sweat. *Anal. Methods*, **2025**, 3547−3553.

186 Wang, Y. L.; Wu, X.; Liu, Y.; Zhang, J. C.; Wang, L.; Luo, X. L. A wearable platform for biochemical sweat analysis using photonic crystal hydrogel. *Anal. Chim. Acta*, **2025**, 1338, 343590.

187 Xiao, F. B.; Liu, J.; Zhou, J.; Yang, S. Y.; Yang, F.; Wu, Z. Y.; Du, W. F.; Shen, L. Light-activated protein hydrogels with dynamic structural color modulation for specific recognition of ultratrace UO_2^{2+}. *Chem. Eng. J.*, **2026**, 528, 172626.

188 Hu, T.; Zhang, S. F.; Qi, Y. Unclonable encryption-verification strategy based on bilayer shape memory photonic crystals. *Small*, **2024**, 20(49), 2405243.

189 Li, L.; Dong, X. G.; Liu, Z. F.; Wei, J.; Li, J. R.; Zhou, H.; Zhu, J.; Shi, X. W. Visual and ultrasensitive detection of mercury ions based on urease catalysis and responsive photonic crystals. *Dyes Pigm.*, **2021**, 195, 109676.

190 Wang, X. H.; Chu, Z. R.; Huang, Y. Y.; Chen, G.; Zhao, X. L.; Zhu, Z. G.; Chen, C.; Lin, D. H. Copper ion imprinted hydrogel photonic crystal sensor film. *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2022**, 4(6), 4568−4575.

191 Pang, S. H.; Jian, X. Y.; Wei, W.; Chen, Y. H.; Li, J. D.; Li, F. Y. Phosphoproteins identification on stretchable photonic crystal for cervical cancer assessment. *Anal. Chem.*, **2026**, 98(6), 4601−4608.

192 Vaz, R.; Sales, M. G. F.; Frasco, M. F. Zein-based photonic sensor platform: application to microRNA detection. *Chem. Eng. J.*, **2025**, 525, 170018.

193 Su, W. Y.; Dai, P.; Xu, X. T.; Xian, Z. K.; Xing, D.; Zheng, C. W.; Fang, X. H.; Sun, C. M.; You, H. A novel photonic crystal hydrogel inverse opal fluorescence enhancement platform for highly sensitive immunoassay of tumor markers. *Microchem. J.*, **2024**, 202, 110756.

194 Wang, X.; Wang, Y. L.; Yu, H. R.; Lv, X. B.; Liang, T.; Cheng, C. J. A penicillinase-modified poly(*N*-isopropylacrylamide-*co*-acrylamide) smart hydrogel biosensor with superior recyclability for sensitive and colorimetric detection of penicillin G. *Biosens. Bioelectron.*, **2024**, 254, 116221.

195 Hu, S. T.; Li, Y. G.; Dong, B.; Tang, Z. X.; Zhou, B. S.; Wang, Y.; Sun, L. H.; Xu, L.; Wang, L.; Zhang, X. L.; Alifu, N.; Sun, L. K.; Song, H. W. Highly hydrostable and flexible opal photonic crystal film for enhanced up-conversion fluorescence sensor of COVID-19 antibody. *Biosens. Bioelectron.*, **2023**, 237, 115484.

196 Lee, W. S.; Kang, T.; Kim, S. H.; Jeong, J. An antibody-immobilized silica inverse opal nanostructure for label-free optical biosensors. *Sensors*, **2018**, 18(1), 307.

197 Knoben, W.; Graf, S.; Borutta, F.; Tegegne, Z.; Ningler, M.; Blom, A.; Dam, H.; Evers, K.; Schonenberg, R.; Schütz-Trilling, A.; Veerbeek, J.; Arnet, R.; Fretz, M.; Revol, V.; Valentin, T.; Bridges, C. R.; Schulz, S. K.; van Kerkhof, J.; Leenstra, A.; Orujov, F.; van Middendorp, H. An integrated photonic biosensing platform for pathogen detection in aquaculture. *Sensors*, **2024**, 24(16), 5241.

198 Shen, P. Y.; Li, M. R.; Li, R.; Han, B.; Ma, H. J.; Hou, X. Y.; Zhang, Y. Q.; Wang, J. J. Aptamer-functionalized smart photonic hydrogels: application for the detection of thrombin in human serum. *NPG Asia Mater.*, **2022**, 14, 94.

199 Song, L. C.; Li, J. L.; Li, H.; Chang, Y. W.; Dai, S. J.; Xu, R. M.; Dou, M. H.; Li, Q. J.; lv, G. P.; Zheng, T. S. Highly sensitive SERS detection for Aflatoxin B1 and Ochratoxin A based on aptamer-functionalized photonic crystal microsphere array. *Sens. Actuators B Chem.*, **2022**, 364, 131778.

200 Li, L.; Xu, J. J.; Li, J. R.; Lyu, X.; Liu, Z. F.; Wei, J. Redox responsive photonic crystals with broad wavelength shifts and their efficient detection of hydrogen peroxide and catalase. *Sens. Actuators B Chem.*, **2022**, 373, 132721.

201 Lu, D. F.; Qin, M.; Zhao, Y. H.; Li, H. X.; Luo, L. B.; Ding, C. M.; Cheng, P.; Su, M.; Li, H. Y.; Song, Y. L.; Li, J. S. Supramolecular photonic hydrogel for high-sensitivity alkaline phosphatase detection *via* synergistic driving force. *Small*, **2023**, 19(12), 2206461.

202 Zheng, B. Q.; Liu, G. Q.; Zhao, L. L.; Wang, G.; Wang, Y. Levofloxacin molecularly imprinted two dimensional photonic crystal hydrogel sensor. *Polymer*, **2022**, 239, 124448.

203 Wang, C. P.; Xiao, F. B.; Chen, Q. S.; Wang, S. H.; Zhou, J.; Wu, Z. Y. A two-dimensional photonic crystal hydrogel biosensor for colorimetric detection of penicillin G and penicillinase inhibitors. *Analyst*, **2021**, 146(2), 502−508.

204 Jinn, W. S.; Shin, M. K.; Kang, B.; Oh, S.; Moon, C. E.; Mun, B.; Ji, Y. W.; Lee, H. K.; Haam, S. A visually distinguishable light interfering bioresponsive silica nanoparticle hydrogel sensor fabricated through the molecular imprinting technique. *J. Mater. Chem. B*, **2019**, 7(45), 7120−7128.

205 Pan, D. D.; Xun, M. Y.; Lan, H. Z.; Li, J. L.; Wu, Z.; Guo, Y. X. Selective, sensitive, and fast determination of S-layer proteins by a molecularly imprinted photonic polymer coated film and a fiber-optic spectrometer. *Anal. Bioanal. Chem.*, **2019**, 411(29), 7737−7745.

206 Wang, H.; Wang, J.; Wang, Y. T.; Liu, Y. Q.; Liu, R.; Wang, X. L.; Tan, H.; Wang, T. F.; Kong, T. T. Oriented boronate affinity-imprinted inverse opal hydrogel for glycoprotein assay *via* colorimetry. *Microchim. Acta*, **2020**, 187(6), 348.

207 Resende, S.; Frasco, M. F.; Sales, M. G. F. A biomimetic photonic crystal sensor for label-free detection of urinary venous thromboembolism biomarker. *Sens. Actuators B Chem.*, **2020**, 312, 127947.

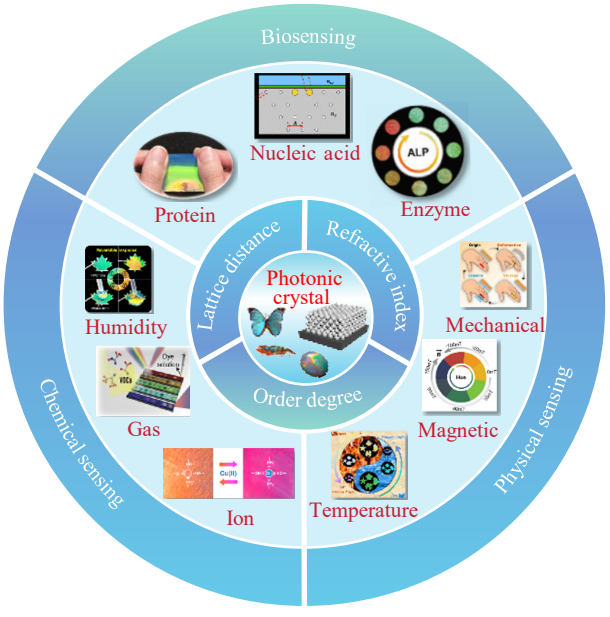
208 Qiu, X. Z.; Li, Y. Y.; hua, Y. B.; Liu, D. M.; Zhou, K. L.; Wang, Y. L.; Guo, H. S. A molecularly imprinted gel photonic crystal sensor for recognition of chiral amino acids. *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, **2022**, 283, 121719.

Review

Colloidal Photonic Crystals: Advances in Fabrication Strategies and Applications in Intelligent Sensing

Xu Liang, A-qing Tian, Shuai Liu, Chun Gao, Wei Wang, Hai-ying Tan*, Wei Jiang*, Jing Jin
(*School of Materials Science and Engineering, Wuhan Textile University, Wuhan 430200*)

Abstract Photonic crystals are artificial microstructures fabricated by periodically arranging materials with different dielectric constants. Their photonic bandgap can generate structural colors and produce optical responses to external stimuli, making them highly attractive for intelligent sensing. This review systematically summarizes general fabrication strategies, sensing mechanisms, and recent advances of colloidal photonic crystals in physical, chemical, and biological sensing. First, we introduce common fabrication methods including evaporation-induced, external-field-induced, polymerization-induced, supersaturation-induced self-assembly, as well as template methods, and analyze their advantages and limitations. Second, three typical sensing mechanisms based on refractive index change, lattice spacing variation, and order-disorder transition are described. Furthermore, we present application examples of photonic crystal sensors in mechanical force and temperature sensing (physical), atmosphere/humidity/pH/ion and small molecule detection (chemical), as well as immuno-, aptamer-, enzyme-, and molecularly imprinted polymer-based biosensing. Finally, current challenges such as response speed, long-term stability, and batch-to-batch reproducibility are discussed, and future directions toward multi-mechanism synergy, multimodal integration, and intelligent system assembly are envisioned, providing a reference for translating this field from laboratory research to practical applications.



Keywords Photonic crystals; Self-assembly; Structural color; Intelligent sensing; Visual detection

*Corresponding authors: Hai-ying Tan, E-mail: hytan@wtu.edu.cn
Wei Jiang, E-mail: weijiang@wtu.edu.cn