

激光与光电子学进展

低阈值钙钛矿光子晶体激光器

周博林, 李国辉*, 吴建红, 温荣, 皮慧慧, 郝玉英, 崔艳霞**

太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024

摘要 光子晶体激光器利用禁带效应与光局域效应, 可以进一步缩小光学模式体积及降低激光阈值, 以满足器件微型化和光电子集成的需求, 在发光二极管、传感器等方面有广阔的应用前景, 所以倍受关注。激光阈值被定义为实现激光振荡的最低能量密度, 是实现激光器件集成应用的重要指标。钙钛矿材料具有高光学增益的特性, 是实现低阈值激光器的理想增益材料, 将其与光子晶体激光器结合, 可以实现低阈值甚至无阈值泵浦激光。本文基于谐振腔和增益介质, 简述了影响激光器阈值的两大因素(增益与损耗), 并提出了降低激光阈值的方法。然后将光子晶体激光器按照光子晶体维数及结构分类, 综述钙钛矿光子晶体激光器在低阈值方面的研究进展。最后展望了钙钛矿光子晶体激光器的发展前景, 以期实现低阈值甚至零阈值、高功率、高质量激光输出, 促进半导体激光器的集成与多领域应用。

关键词 激光光学; 光子晶体; 激光器; 激光阈值; 钙钛矿

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0500005

Perovskite Photonic Crystal Laser with Low Threshold

Zhou Bolin, Li Guohui*, Wu Jianhong, Wen Rong, Pi Huihui,
Hao Yuying, Cui Yanxia**

College of Physics and Optoelectronics, Tai Yuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract Photonic crystal lasers can further reduce the optical mode volume and the lasing threshold using the band gap effect and localized effect, which can meet the needs of device miniaturization and optoelectronic integration. Photonic crystal lasers have broad application prospects in light-emitting diodes, sensors and other aspects, so they have attracted much attention. The lasing threshold is defined as the minimum energy density of lasing oscillation and is an important index for the integrated application of laser devices. Perovskite material has the characteristics of high optical gain, which makes it an ideal gain material for realizing low threshold laser. When combined with photonic crystal laser, low threshold or no threshold pumping lasing can be realized. Based on the resonator and gain medium, the two factors (gain and loss), which are the two main factors affecting the threshold of the laser, are briefly described in terms of the resonant cavity and the gain medium, and some methods to reduce the threshold is proposed. Then, photonic crystal lasers are classified according to the dimension and structure of photonic crystals. In addition, the research progress of low threshold of perovskite photonic crystal lasers is reviewed. Finally, the development prospect of perovskite photonic crystal lasers is prospected, in order to achieve low threshold or even zero threshold, high power, high quality lasing output, and promote the integration and multi-field application of semiconductor lasers

Key words laser optics; photonic crystal; laser; lasing threshold; perovskite

收稿日期: 2021-04-01; 修回日期: 2021-04-26; 录用日期: 2021-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(61922060, 61775156)、山西省自然科学基金(201701D211002, 201701D221029)

通信作者: *liguohui@tyut.edu.cn; **yanxiacui@gmail.com

1 引 言

近年来,激光科学技术的不断进步与光电子器件生产应用的要求使激光器的发展呈现小型化和微型化的趋势,随着微纳加工技术的发展,激光器已经进入微米甚至纳米量级时代。纳米激光器具有低激光阈值、高能量效率和高调制速度的优点,是实现光电集成的关键元素,在全光计算、光存储、生物医学、探测器、传感器等方面具有广阔应用前景。

激光阈值一般被定义为实现激光振荡的最低能量密度,当外界激励能量达到并高于这个值的时候,激光器中的光学增益高于光学损耗,才能实现激光发射,是评估激光器性能的重要指标。在尺寸大于光波波长的激光谐振腔中,在辐射带宽范围内只有单个谐振腔模式,但实际上大多数激发态原子都与自由空间模式耦合使激光器在发生谐振之前辐射出大量自发辐射^[1]。谐振腔模式光子数只有在泵浦能量密度高于阈值时才会由于受激辐射快速增长而显著降低激光的效率和性能可持续性。因而,寻求合适的增益材料和激光器结构将能够实现低阈值激光甚至无阈值激光,对光电子器件集成应用有重要意义^[1-2]。

近年来,以甲胺铅碘($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, MAPbI_3)为代表的杂化钙钛矿(或有机-无机)材料因其在光伏方面的巨大应用潜力而备受关注,其具有较长的载流子寿命和扩散长度^[3-6]、较高的内量子效率^[7-8]和调控化学组分可以轻松调节波长^[9]的优点,是一种理想的激光增益材料,可实现低阈值激光^[10-11]。自2014年,新加坡南洋理工大学的 Xing 等^[9]报道了钙钛矿薄膜在室温下的低阈值、稳定的放大自发辐射后,涌现出基于不同形貌钙钛矿材料的钙钛矿激光器的研究,如纳米线^[12-13]、纳米片^[14]等。将钙钛矿材料与优良的激光器结构相结合,将能够进一步降低激光阈值。

光子晶体作为一种特殊的人工微纳结构,利用它的禁带^[15]、光局域^[16]特性,在提高发光二极管光提取效率^[17-18]、传感器灵敏度^[19-21]等方面已发挥显著作用。光子晶体激光器是将光子晶体结构引入半导体激光器中构建的,具有模式体积小、阈值低的特点,在节能应用^[22]方面有广阔前景。激光器中的光子晶体可以通过参数设计实现高品质因子(Q)谐振腔^[18],能进一步压缩自发辐射模式,提高自发辐

射速率^[23-24],将更多能量用于激光发射,减少光学损耗,能有效降低激光阈值^[25],甚至实现无阈值激光器。将光子晶体激光器与钙钛矿材料相结合,可以进一步降低激光阈值,还能够减少因热效应导致的钙钛矿材料分解现象的发生。近年来,钙钛矿材料与光子晶体激光器相结合,在低阈值激光方面已经有许多进展。2017年,德国伍珀塔尔大学的 Pourdavoud 等^[26]基于 MAPbI_3 材料实现了二维光子晶体激光器的室温低阈值($3.8 \mu\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$)激光发射。2020年,中山大学的 He 等^[27]在由 $\text{CsPb}(\text{Br/I})_3$ 钙钛矿纳米晶和氮化硅纳米梁微腔组成的激光器中获得了阈值为 $5.62 \mu\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的激光发射。这些钙钛矿光子晶体激光器都表现出较低的激光阈值,在实现低功耗光子集成器件方面拥有发展潜力。

本文将综述钙钛矿光子晶体激光器在低阈值方面的研究进展。首先基于增益与损耗,从增益介质和谐振腔两方面出发,提出降低激光阈值的策略,简述光子晶体的引入对激光器阈值的影响,并对钙钛矿材料进行简单介绍。然后对钙钛矿光子晶体激光器的研究进展进行综述,最后简单介绍光子晶体激光器的现状并对其发展前景进行展望。

2 激光阈值的影响因素

激光器的三要素为谐振腔、增益介质、泵浦源,泵浦源一般为外界泵浦源,用于给激光器提供能量,在这里不作考虑,其余二者与光学增益和损耗紧密相关,本节将从谐振腔与增益介质两方面来陈述光子晶体与钙钛矿材料对激光器中光学增益、损耗及激光阈值的影响。

2.1 谐振腔

谐振腔是激光器中必不可少的部分之一,内部包含有增益介质,作用是入射到腔内的光提供光反馈,即光波可以在谐振腔内部做往返运动,能够多次通过增益介质,实现对光的多次放大直至激光发射。增益介质的自发辐射可作为激光放大的光输入,但其自发辐射光谱一般具有较宽波段范围和多个光模式,不是所有的自发辐射都能用于激光输出,谐振腔内存在模式竞争现象,只有增益最大的模式能够形成激光发射,其他光模式将以自发辐射的模式消耗^[28]。通过设计谐振腔可改变物质的自发辐射特性,使其在微腔内受到抑制或增强^[29],增强目标波长的光模式,提高自发辐射耦合因子(β),将更多的光能量用于激光发射,有助于降低激光

阈值。

谐振腔也存在光学损耗问题,其带来的光学损耗是激光器中光学损耗的重要来源之一,主要有几何偏折损耗、衍射损耗、腔镜反射不完全损耗等。几何偏折损耗是指光线在腔内往返传输时,可能从腔的侧面偏折出去造成的损耗,这是腔镜倾斜造成的,如平行平面腔等平行度。同时,与模次高低有关,同一平行平面腔内的高阶横模的传播方向与轴的夹角较大,其几何损耗高于低阶横模。衍射损耗是光在有限大小孔径的腔反射镜面上发生衍射的造成部分能量损失,与腔的菲涅耳数、腔的几何参数有关,也与振荡模式有关,不同横模的衍射损耗各不相同。腔镜反射不完全引起的损耗包括腔镜的吸收、散射和透射损耗,导致腔镜的反射率不足 100%,造成能量损耗。以上损耗均与谐振腔的制备工艺有关,是不可避免的,因此谐振腔质量成为评估激光器性能的关键,通常通过 Q 来表征谐振腔的光学损耗^[30],

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda Q}. \quad (1)$$

由此可见, Q 值与激光器损耗紧密相关,在理想情况下,微腔 Q 值定义如下^[30],

$$Q = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{2nL}{\ln(R_1 R_2)^{-1}}, \quad (2)$$

式中: L 为谐振腔长度; R_1 、 R_2 为谐振腔两端面反射镜的反射率。微型谐振腔的腔长比较短,通常通过提高腔镜的反射率来提高谐振腔 Q 值,减小光学损耗,从而达到降低激光阈值的目的。

将光子晶体结构引入半导体激光器,对提高腔镜反射率、谐振腔 Q 值及 β 值都有显著作用。光子晶体是由两种及以上介电材料周期排列构成的一种新型人工微纳结构,其根本特征为光子带隙^[15],具有禁带效应,即允许特定频率的电磁波传播,落入光子禁带的光将被禁止传播。利用该特性,对光子晶体材料及参数进行设计,其可以用作高反射镜来提供有效光反馈。在光子晶体周期结构中引入缺陷,缺陷处会出现光子局域^[16],对光有良好的限制作用,利用该特性,可构建高 Q 值微腔。二者同时作用,可提高自发辐射耦合因子 β ,将更多光能量用于激光发射,可以有效降低激光阈值,当自发辐射耦合因子提升至 1 时,全部能量都可被用于激光发射,即可以实现无阈值激光器^[28]。

2.2 增益介质

增益介质的自发辐射可作为激光放大的光输入,在谐振腔内多次往返被增益介质放大,最终实现激光输出,在这个过程中,增益介质起到了光放大的作用,也就是具有光学增益。光学增益是由电子和空穴(或激子)复合产生的与粒子数反转相关的受激辐射引起的^[31],与激光器阈值密切相关^[32],是用来衡量增益介质增加光功率能力的标准。就增益介质方面来看,选取具有较高增益系数的介质将有利于在较小泵浦能量下使谐振腔内往返的光波达到饱和,进而实现激光发射,即增益介质具有较高增益系数,激光器将具有更小的激光阈值^[33-35]。

不同材料的光学增益系数是不同的,在不同泵浦强度下,光致发光强度的增强是材料具有光学增益的直接证明,可通过条纹长度法^[36-37]、传输法^[38-39]等方法测定光学增益系数(g)来判定材料提供光学增益能力的强弱。

影响光学增益的因素有吸收系数^[40]、受激发射截面等。大吸收系数意味着对外界泵浦光的吸收和利用率更高,这与泵浦光源也有一定关系的。更大的吸收系数表明增益介质进行光放大时对入射光的利用率更高、放大能力更强。有机半导体具有强吸收系数($\sim 10^5 \text{ cm}^{-1}$)、高荧光量子效率的优点,是实现低阈值激光器的理想材料。以 MAPbI₃ 钙钛矿为例,其吸收系数远大于砷化镓(GaAs)^[41],这与其具有较大的光学增益系数相对应。

受激发射截面与增益系数呈正相关关系。具有较大的发射截面有利于实现低阈值激光。当受激发射进入腔模的速率等于腔外能量流的速率时,即为激光阈值所在的泵浦功率密度,表示为^[42]

$$n_{\text{th}} \sigma_{\text{SE}} c = \frac{1}{\tau_c}, \quad (3)$$

式中: n_{th} 是激子密度阈值; σ_{SE} 受激发射截面; c 是光速; τ_c 腔中光子寿命^[27]。这对激光器增益材料的选择提出要求,寻找受激发射截面更大的介质将有助于激光阈值的降低。

增益介质除了可以提供光学增益外,其自身存在的非激活吸收和散射也会带来一定光学损耗。介质的非激活吸收损耗也可称为自吸收损耗,是增益介质内部由于成分不均匀、粒子数密度不均匀或者有缺陷,使光产生折射、散射等现象,部分光波偏离原来的传播方向造成的。对于这一问题,研究人员已通过多种方法进行改善:1) 通过优化制备工艺(如退火、引入配体等)来提高增益介质的质量^[43]、

减少缺陷^[44]或使用纳米片^[14,45]等具有光滑表面的材料代替薄膜来减少散射造成的损耗,以达到降低激光阈值的目的。钙钛矿纳米片实现室温超低激光阈值的原因之一就在于其具有的原子级平滑表面,散射损耗小^[14]。2) 添加钝化层也是一种有效手段。浙江大学的 Li 等^[46]在甲胺铅溴钙钛矿(MAPbBr₃)多晶薄膜上涂覆聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)薄层,测试结果表明其放大自发辐射的阈值有明显降低。3) 采用单层材料、缩小增益介质尺寸等方式可以减少增益材料的自吸收,降低光损耗,进一步降低激光阈值。中国科学院大学的林杰等^[30]采用性能优异的蓝光材料——聚芴(PFO)作为激光增益介质,通过减薄聚合物层厚度的方法进一步降低增益介质的自吸收,以降低激光阈值。

3 钙钛矿光子晶体激光器

光子晶体是由两种或两种以上介质进行周期排列对光具有调制作用的一类特殊人工微纳结构。自“光子晶体”的概念于 1987 年提出以来,其独特的光学性能,如光子带隙、Purcell 效应、光子局域^[47]、小群速度等为人们操控电磁波传输提出

了新的策略。将光子晶体引入半导体激光器,具有以下作用^[28]: 1) 构造高反射率反射镜; 2) 构造高 Q 值微腔; 3) 提高自发辐射耦合因子^[48-49]; 4) 提高光模式增益,在降低激光器阈值方面有突出优势。光子晶体与半导体激光器相结合,将实现高 Q 值、小模体积、低阈值甚至零阈值的超小型或微型激光器。将钙钛矿材料引入光子晶体激光器中,利用其高光学增益特性,能有效补偿光学损耗,从而实现低阈值激光器。本节将就一维(1D)、二维(2D)、三维(3D)光子晶体激光器按照结构分类综述其在降低激光阈值方面的研究进展。

3.1 1D 光子晶体激光器

1D 光子晶体一般是由两种或多种不同介电常数的材料交替排列构成的结构,介电常数仅在一个方向上具有周期变化,通常被用作高反射镜和抗反射涂层,在激光器中可取代传统反射镜,利用其近 100% 的反射率提供强光约束作用,具有吸收损耗小、反射镜表面不易损坏的特点,而且更易于实现光子集成。具体结构可分为介电多层结构^[50]、光栅结构^[51]和空气梁结构^[52-53],如图 1 所示。

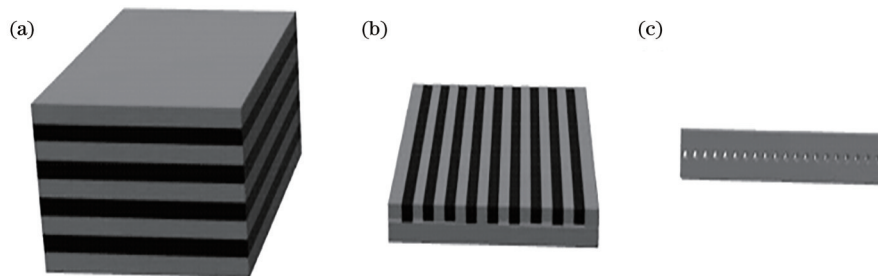


图 1 1D 光子晶体示意图。(a) 介质多层结构; (b) 光栅结构; (c) 纳米梁结构

Fig. 1 Schematic of 1D photonic crystals. (a) Multilayer dielectric structure; (b) grating structure; (c) nanobeam structure

3.1.1 介电多层结构

介电多层结构即不同介电常数的材料薄层交替排列构成的结构,介电多层结构在激光器中的应用一般有两种: 1) 将两种不同介电材料交替堆叠形成的多层分布式布拉格反射镜(DBR)视为 1D 光子晶体,用做反射镜^[54-58]; 2) 将激光染料掺杂加入折射率介质中构建光子晶体激光器。由于材料物理特性限制,介电多层结构钙钛矿光子晶体激光器仅有 DBR 结构。

多层 DBR 由于其介电常数周期性分布,可看作 1D 光子晶体,与金属镜等传统反射镜相比,其反射率较高^[57,60]、光学损耗小^[42],能有效减小谐振腔的光学损耗,在降低激光阈值^[25]方面有显著成效。

2017 年,华盛顿大学的 Huang 等^[55]将厚度为 240 nm 的 CsPbBr₃ 量子点(QD)薄膜作为增益介质,构建的 DBR 微腔激光器在脉冲激光(400 nm, 50 fs)泵浦下具有 0.39 $\mu\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的超低阈值,如图 2(a)~(b)所示。QD 由于量子限制效应具有高光致发光量子产率^[61-62],有助于提高发光器件效应,为了进行比较,该小组对纯 CsPbBr₃ QD 薄膜使用相同条件进行了实验,测得其激光阈值为 5.6 $\mu\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$,这证明添加具有高反射率的 DBR($R > 99\%$),可以有效降低激光阈值,提高激光性能,但该激光器还存在 Q 值较低的问题,其 Q 值约为 73,这与 DBR 激光器仅在一个方向产生光约束有关,这是这一类型激光器固有的问题。除了全无机钙钛矿材料,在基

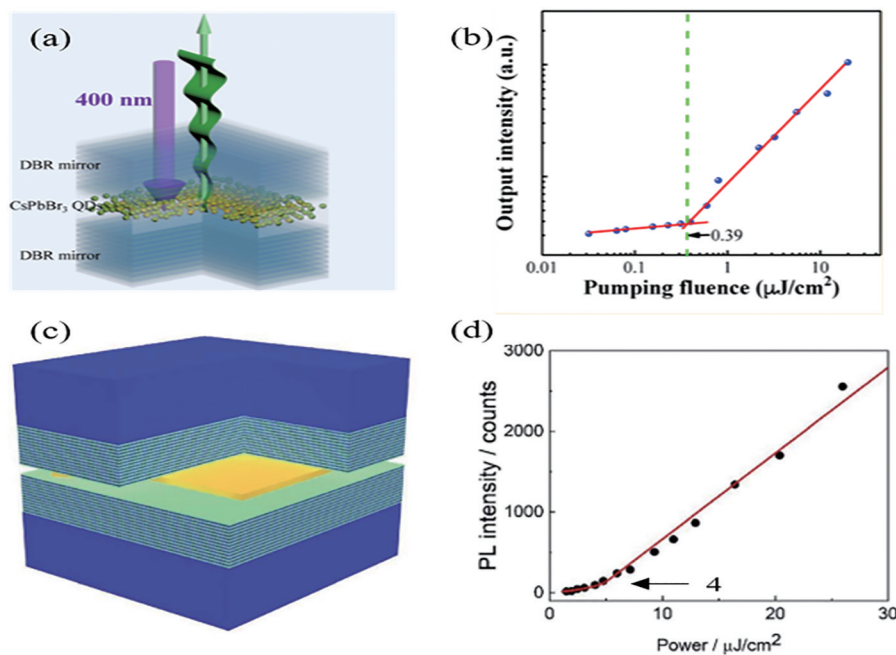


图2 不同钙钛矿材料DBR激光器结构示意图及光致发光折线图。(a)(b)DBR/CsPbBr₃ QD/DBR结构激光器结构示意图及其光致发光强度与泵浦能量的关系图^[55]; (c)(d)DBR/MAPbBr₃ SC-TF/DBR结构激光器及光致发光强度与泵浦能量关系图^[59]

Fig. 2 DBR laser structure diagrams and photoluminescence line diagrams of different perovskite materials. (a) (b) Relationship between the photoluminescence intensity and pump energy of the DBR/CsPbBr₃ QD/DBR structure laser photoluminescence intensity and pump energy of a DBR/CsPbBr₃ QD/DBR laser^[55]; (c) (d) DBR/MAPbBr₃ SC-TF/DBR structure laser, photoluminescence intensity and pump energy diagram^[59]

于DBR/有机无机杂化钙钛矿/DBR结构也观察到了室温低阈值激光,甚至实现了连续波泵浦激光发射。2019年,北京大学的Tian等^[59]报道的垂直腔面发射激光器(VCSSEs)由一对DBRs之间直接生长高质量的MAPbBr₃单晶薄膜构建,薄膜厚度为1 μm,如图2(c)所示,该DBR由13.5对TiO₂/SiO₂组成,对MAPbBr₃发光峰波长的反射率超过99.9%,比Huang等^[55]工作中使用的DBR反射率更高,使其不仅在脉冲激光泵浦条件下实现了阈值仅为4 μJ·cm⁻²的激光发射,更是在连续波泵浦下获得了激光发射,阈值为34 mW·cm⁻²。全无机钙钛矿DBR激光器阈值相对较低的原因可能在于全无机钙钛矿在大气环境中的热稳定性和水稳定性更好^[63]。Tian等^[59]的工作更为突出,原因在于其基于稳定性远不如CsPbBr₃的MAPbBr₃材料实现了室温连续波泵浦激光。基于DBR的VCSSEs虽然已经表现出较低的激光阈值,但其本质上具有表面本征发射^[64],增益介质尺寸的大小和半峰全宽(FWHM)都受到限制。此外,DBR激光器纵向尺寸较大的问题,是由增益介质薄膜厚度(>100 nm)^[59]和DBR本身的厚度导致的,该激光器仅在垂直DBR方向上对

光有限制作用,而水平方向上没有限制,光可以从该方向逸出,造成光学损耗。此外,DBR激光器利用禁带效应产生对特定波段光波的高度反射,没有引入缺陷。

3.1.2 光栅结构

光栅结构在钙钛矿光子晶体激光器中的应用为分布反馈(DFB)激光器,钙钛矿材料一般是通过旋转涂层、纳米压印等方式引入激光器结构中。在这种激光器中,仅通过控制反馈耦合和输出耦合之间的平衡就可以达到超低阈值。

2017年,复旦大学的Gong等^[65]在石英基底上制备出光栅结构的钙钛矿DFB激光器,该激光器结构如图3(a)所示。该小组首先利用纳米压印技术在石英基底上的聚合物薄膜上加工出的周期为360 nm的DFB谐振腔,然后在上面加载了厚度为80 nm的钙钛矿薄膜(CsPbBr₂-PEO)作为增益介质。如图3(b)所示,在波长为355 nm、脉冲宽度为90 ps的激光泵浦下,成功实现了激光阈值为33 μJ·cm⁻²的654 nm单模激光,该激光器表现出较低的激光阈值,除了DFB腔的作用还应归结于CsPbBr₂-PEO薄膜较高的光学增益系数

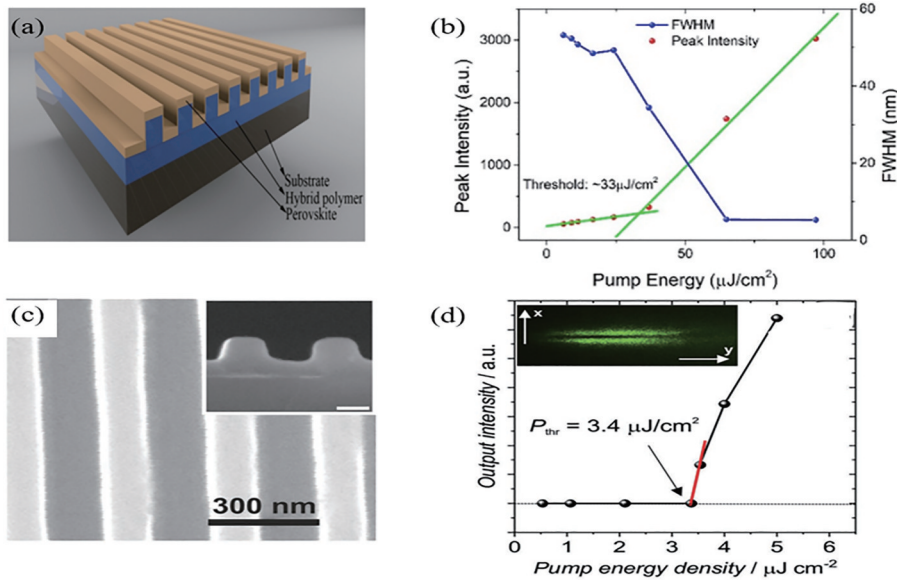


图3 钙钛矿 DFB 激光器。(a)CsPbBr₂钙钛矿 DFB 激光器结构示意图;(b)输出峰强、FWHM 与泵浦能量密度的函数关系图^[65];(c)MAPbBr₃DFB 激光器的 SEM 图像(插图:高分辨率截面,比例尺为 100 nm);(d)输出强度作为泵浦能量密度的函数^[66]

Fig. 3 Perovskite DFB laser. (a) Schematic of DFB laser based on CsPbBr₂ perovskite; (b) functional relationship of output peak strength, FWHM and pump energy density^[65]; (c) SEM image of of MAPbBr₃ DFB laser (inset: high-resolution cross section, scale is 100 nm); (d) output intensity as a function of pump energy density^[66]

(161.2 cm^{-1}), 其光致发光的荧光强度比 CsPbBr₂ 薄膜要高 1 个数量级, 这可以归功于 PEO 及热压印对 CsPbBr₂ 薄膜质量的改善, 散射损耗减小。但该小组认为其较宽的激光 (4.9 nm) 是由光栅占空比不当造成的, 激光器的 FWHM 及 Q 值有进一步优化的空间。2018 年, 德国伍珀塔尔大学的 Pourdavoud 等^[66] 提出的基于 MAPbBr₃ 薄膜的 DFB 激光器的激光阈值 ($3.4 \mu\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$) 也非常低, 比之前报道无机钙钛矿 DFB 激光器低了一个数量级^[65], 图 3(c) 是器件的扫描电镜 (SEM) 图。与 Gong 等^[65] 对钙钛矿薄膜的优化方法不同, Pourdavoud 等^[66] 没有引入其他材料, 而是使用热压方法对 MAPbBr₃ 薄膜进行优化, 使薄膜中的晶粒变大, 进而使其在空气中的稳定性得到提高^[67], 同时将其表面粗糙度降低至 0.6 nm, 相比于 Gong 等^[65] 的工作, 其表面粗糙度降低了一个数量级, 有效减少了散射损耗^[68], 激光 Q 值超过了 3900, 促使了激光阈值的降低。

由于光栅结构对光的调制是使用水平方向布拉格光栅实现的, 相比于 DBR 激光器, 其纵向尺寸要小得多, 但钙钛矿增益介质直接暴露在空气中, 这不利于器件长期稳定性, 必须进行封装保护。同时相比于 DBR 的多层膜结构, 光栅结构更加精细, 制备工艺要求更高。而且光栅结构仅能在一个方

向上对光进行限制, 对光的限制作用有限。

3.1.3 纳米梁结构

纳米梁结构是在较窄的介质长条上周期分布空气孔而构成, 在其上直接加载增益介质, 可以利用光子带隙效应, 光子带边的高密度电磁场来实现激光发射^[69]。激光器中的纳米梁结构通常以正弦分布空气孔在中心位置形成光子阱来实现对光的约束, 以有效减少从腔内到外部的纳米光束光子晶体腔 (PhC) 的散射损失^[70], 微腔两端周期空气孔由于光子带隙效应^[15,71-73] 作光子晶体镜来保证感兴趣的波长范围被高度反射, 从而提高 Q 值, 实现低阈值激光。正弦光子晶体纳米梁结构通常是通过对中心位置附近空气孔的尺寸和周期进行线性变化来构建的^[53]。

将正弦光子晶体纳米梁结构与钙钛矿材料相结合, 可以有效增强材料的自发辐射^[24], 解决钙钛矿薄膜由于多晶性导致的低量子效率问题, 提高光增益, 在器件占地面积、激光阈值和 FWHM 等方面提高激光性能。2019 年, 南洋理工大学的 Fong 等^[74] 将全无机 CsPbBr₃ 钙钛矿纳米晶与 PMMA 封装的氮化硅纳米梁光子晶体腔在室温下实现耦合, 实现了 CsPbBr₃ 钙钛矿纳米晶的光致发光增强。该激光器中优化设计的谐振腔两端布拉格反射镜

区域由 40 个周期 (a) 为 157 nm 的椭圆孔 (长轴为 202 nm, 短轴为 100 nm) 组成, 如图 4(a) 所示, 空腔由 20 个对称分布的空气孔构成, 其周期与椭圆形空气孔的长轴从中心开始规律性增大, 整个空腔呈正弦分布, 故该谐振腔称为正弦纳米梁谐振腔, 模拟得到的谐振腔 Q 值约为 9000, 模体积约为 $3(\lambda/n)^3$, 其谐振波长约为 520 nm, 与 CsPbBr₃ 钙钛矿纳米晶体光致发光波长相吻合, 调节 PMMA 层中 CsPbBr₃ 钙钛矿纳米晶体的浓度后, 经时间分辨光致发光衰减测量, 发现钙钛矿纳米晶的自发辐射增强了 1.4 倍^[74]。由此可见钙钛矿纳米晶体与 PhC 的耦合是很有前途的, 因为在小模体积腔中波的局部化可以使用于集成光子电路的光源或光子器件小型化。如图 4(d) 所示, 2020 年, 中山大学的 He 等^[27] 制备了由 CsPb(Br/I)₃ 钙钛矿纳米晶和氮化硅纳米梁微腔组成的混合激光器, 通过在

PMMA 层中分散钙钛矿纳米晶体作发射体, 获得了激光阈值为 $5.62 \mu\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$, FWHM 为 0.045 nm 和小模体积 $[2.5(\lambda/n)^3]$ 的高性能相干发射。该实验中没有引入光栅耦合器和绝热锥, 纳米梁两端构成布拉格反射镜的空气孔数量增加, 使得谐振腔 Q 值相比之前的工作提高了一个数量级^[75], 该激光器测得的 Q 值为 17000, 产生较高 Q 值的原因之一是 PMMA 层与纳米梁的有效折射率比值的提高。此外, 在固体基板上制备的光子晶体纳米空腔被证明其热稳定性和机械稳定性较传统的悬浮空腔有显著提高^[74-75], 在 SiN 的顶部添加聚 PMMA 封装层也可以显著提高空腔模式的 Q 因子^[27], 这为制备高 Q 值纳米梁微腔提供了新思路, 将光子晶体的维度降至 1D, 可以在一定程度上提高微腔 Q 值、降低激光阈值, 但其仅能在一个方向上实现光学限制。

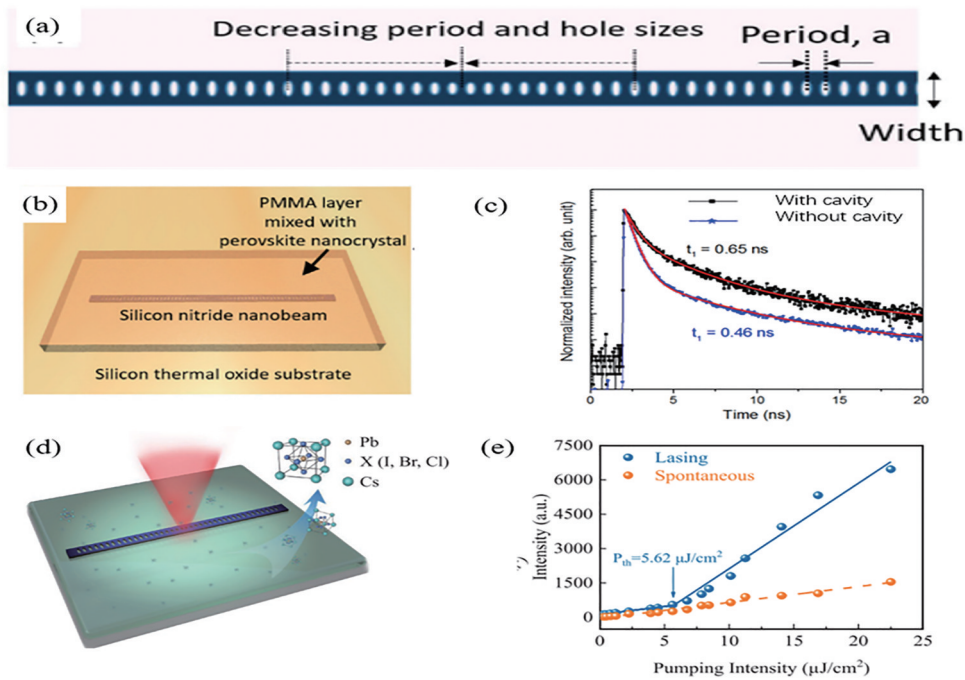


图 4 纳米梁结构。(a) SiN 纳米束示意图; (b) 耦合 SiN 纳米束光子晶体腔的 CsPbBr₃ 钙钛矿纳米晶体示意图; (c) 两种不同情况下钙钛矿纳米晶体的荧光衰减^[74]; (d) CsPb(Br/I)₃ 钙钛矿纳米晶体耦合 SiN 纳米束光子晶体腔的示意图; (e) 腔体发射显示出输出强度的非线性增加, 而背景发射显示出对泵浦强度的线性依赖性^[27]

Fig. 4 Nanobeam structure. (a) Schematic of the SiN nanobeam; (b) schematic of the CsPbBr₃ perovskite nanocrystal coupled SiN nanobeam photonic crystal cavity; (c) fluorescence decay of perovskite nanocrystals under two different conditions^[74]; (d) schematic of the CsPb(Br/I)₃ perovskite nanocrystals coupled SiN nanobeam photonic crystal cavity; (e) cavity emission shows a nonlinear increase of the output intensity, while background emission shows a linear dependence on the pump intensity^[27]

3.2 2D 光子晶体激光器

2D 光子晶体是指介电常数在平面内两个不同方向上周期排列, 与该平面垂直的方向则是均匀

的, 会出现两个方向的光子带隙, 可以从平面两个方向对光进行限制, 有助于构建高 Q 值微腔。其结构如图 5 所示, 以空气孔平板为例, 按照晶格分类可

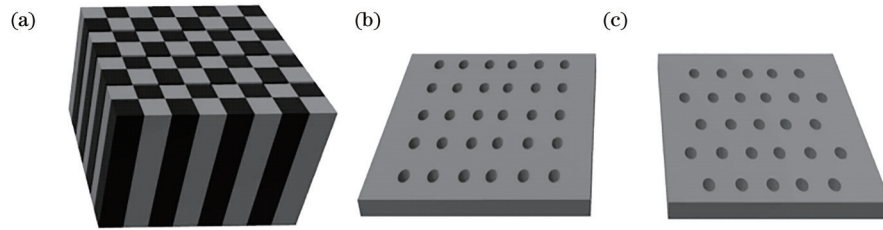


图 5 (a)2D 光子晶体结构示意图;(b)矩形晶格空气孔平板;(c)三角晶格空气孔平板

Fig. 5 (a) 2D photonic crystal structure diagram; (b) rectangular lattice air hole slab; (c) triangular lattice air hole slab

分为矩形晶格、三角晶格等。

2D 光子晶体在激光器有两种工作方式:1) 直接在光子晶体上加载增益介质,通过光子带隙效应压缩自发辐射模式,将更多能量用于激光发射,从而降低激光阈值^[76];2) 在光子晶体平板内引入缺陷构建微腔^[77],如移除空气孔光子晶体平板中的空气孔^[78-80]来构造微腔。该结构在平面上利用光子带隙及高折射率波导对光进行限制,在缺陷区域利用光局域效应将光限制在缺陷位置^[78,80-81],二者作用叠加,使其具有比 1D 光子晶体微腔更好的光束束缚作用。同时 2D 光子晶体的制备工艺相对简单且可重复,是实现小型化光纳米腔与波导、调制器和探测器集成的可制作图形的最有希望的技术。因此具有周期排列空气孔结构或介质柱结构的 2D 光子晶体微腔结构倍受关注。本节将对钙钛矿 2D 光子晶体激光器进行介绍。

将光子晶体直接引入激光器结构中构造的激光器称为无缺陷光子晶体激光器^[82]。该激光器是通过调节带隙,使其与增益介质的荧光波长重叠,并对其自发辐射模式进行压缩,达到提高自发辐射因子,将更多能量用于激光发射,从而达到降低激光阈值的目的^[83]。将钙钛矿材料与其相结合,由于钙钛矿材料的高光学增益特性,钙钛矿光子晶体激光器能够更快地克服光学损耗,达到激光阈值。

2016 年,首尔国立大学的 Cha 等^[76]在 SiN 方形晶格光子晶体上旋涂 MAPbI₃ 钙钛矿薄膜制备了光子晶体激光器。尽管薄膜表面粗糙度高达 45 nm,但该结构仍通过光子带隙模式实现了脉冲能量密度为 200 $\mu\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的低阈值单模激光,该激光器器件结构示意图与光谱图如图 6(a)~(b)所示。四方晶格光子晶体相比于三角晶格光子晶体,其带隙比较小,同时由其制备的半导体激光器激光阈值与发散角略大,这促使研究人员将目光放在三角晶格上。

2017 年,德国伍珀塔尔大学的 Pourdavoud 等^[26]基于 MAPbI₃ 材料实现了 2D 光子晶体激光器的室温低阈值激光发射,激光波长为 787.6 nm,FWHM 为 0.13 nm,阈值为 3.8 $\mu\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$,图 6(c)~(d)为该激光器的 SEM 图和光致发光强度与泵浦能量依赖关系图。与之前报道的 2D 钙钛矿光子晶体激光器不同,该激光器并不是采用 2D 光子晶体结构加载钙钛矿增益介质薄膜的方式实现激光发射,而是将钙钛矿材料通过热压印的方式制备成 2D 钙钛矿光子晶体,薄膜厚度为 150~200 μm 。此外,在热压印过程中,多晶钙钛矿出现重结晶到四方相,没有发生残余分解的迹象,晶粒尺寸变大,消除了造成大量复合和荧光淬灭导致的表面缺陷,形成平滑的 MAPbI₃ 层,因此光波导模式在钙钛矿层中传播损耗较低,这是其激光阈值较低的原因之一,另一个原因是钙钛矿光子晶体层与空气的高折射率比对使得光波在垂直方向因全内反射被限制在光子晶体层,对光的限制作用更强。

以上 2D 钙钛矿光子晶体激光器为垂直腔面发射激光器,其结构中没有出现谐振腔,而是通过布拉格衍射使特定光波谐振,并获得垂直方向的激光发射^[84]。缺陷型微腔激光器当前已利用 InGaAsP、InAs 等增益材料实现激光发射^[78,85-86],而基于钙钛矿材料的缺陷型微腔光子晶体激光器有待进一步研究。

2D 光子晶体可对光的两个方向进行限制,即将光限制在平面的内,将其与钙钛矿材料相结合,可实现低阈值激光器。但对于垂直于平面方向的光损耗,只能通过与 1D 光子晶体相结合的方法来实现准三维的光限制,但这无疑会增加器件尺寸,不利于集成应用。

3.3 3D 光子晶体激光器

3D 光子晶体是指其在三个方向上都具有周期性介电常数分布结构,可以出现全方位的光子带

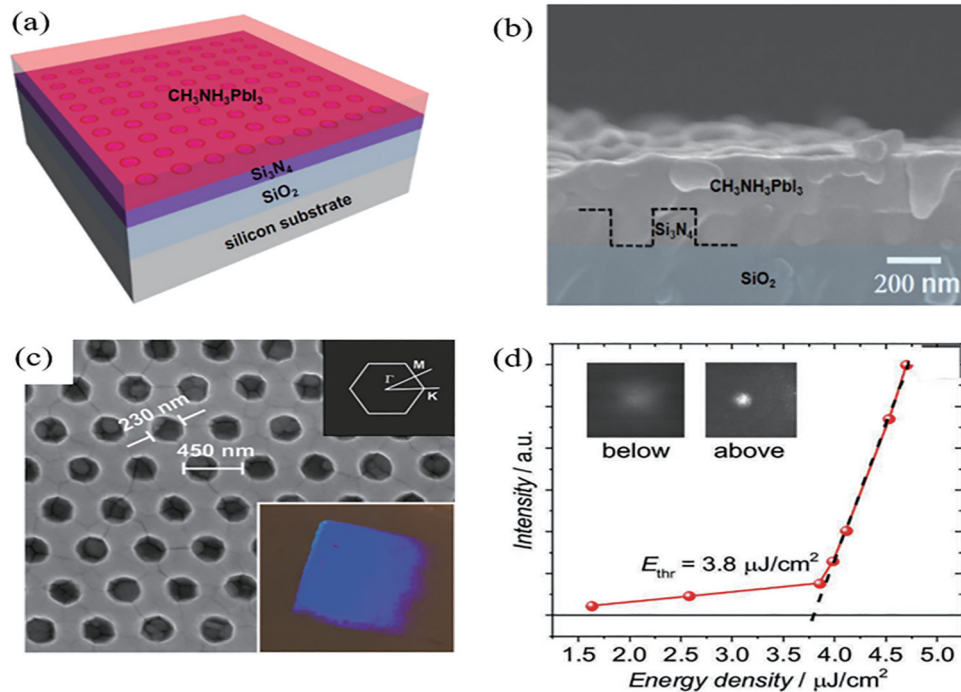


图6 结构示意图与光谱图。(a) MAPbI₃光子晶体带边激光结构示意图;(b)器件横截面^[76];(c)二维光子晶体的SEM图像,其晶格为三角形[插图(下):样品在斜光照射下的照片。插图(上):具有高对称性标记点的二维光子晶体的第一个布里渊区];(d)略低于或高于阈值的激光输出特性及远场图案^[26]

Fig. 6 Structure diagram and spectrum. (a) Schematic of the MAPbI₃ Photonic crystal band-edge laser structure; (b) cross-section of the device^[76]; (c) SEM image of the 2D Photonic crystal with dimensions of the triangular grating [inset (bottom): photograph of the sample under oblique white-light illumination. Inset (top): first Brillouin zone of the 2D photonic crystal with labelled points of high symmetry]; (d) lasing output characteristics along with the far field patterns slightly below and above threshold^[26]

隙,特定频率的光进入光子晶体后将在各个方向都禁止传播。这对光子晶体来说是一个最重要的特性,将进一步提高 Q/V 值,对实现低阈值激光有重要作用。在3D光子晶体中存在许多独立的激光微腔,这些微腔支持其向不同方向发射多波长的激光,易形成光子带隙,在激光反馈方面是非常有效的。迄今为止,基于3D光子晶体腔的激光器的研究相对较少。其主要原因是大多数3D光子晶体很难通过微纳米制造技术实现^[87]。3D光子晶体的制备方法可分为自上而下、自下而上以及模板辅助三类,前面二者制备方法复杂且对仪器精度要求高,具有高成本、制备时间长的缺点,蛋白石、反蛋白石结构光子晶体往往通过胶体自组装或模板辅助法制备,方法简单、成本低廉^[88]。近年来在蛋白石^[89]、反蛋白石^[90-91]、堆栈^[92]等结构中已经观察到3D光子晶体激光,下面对其分类介绍。

蛋白石是自然界中在数百纳米尺度有规整排列的含水非晶质二氧化硅^[93],是一种3D光子晶体,

在不同角度可显示不同颜色^[15]。当前人工蛋白石主要采用胶体晶体(CC)自组方法制备。将表面带同种电荷的胶体颗粒(如聚苯乙烯微球)分散于溶剂中,随着溶剂的蒸发,胶体粒子由于表面电荷相互作用,自动呈现六方堆积结构。微球直径与光波长相当时,六方堆积结构在三个方向具有光子带隙,被视为3D光子晶体。此外,还可以通过全息光刻等方法制备。蛋白石结构激光器通常有两种形式,一种是在蛋白石结构中填充激光染料或其他增益材料实现^[89]。另一种则是将增益介质置于两层蛋白石结构薄膜中实现激光发射^[94]。对于钙钛矿材料,2018年,中国科学院大学的Zhou等^[95]在聚苯乙烯微球植被的蛋白石结构中加载MAPbBr₃材料,实现了自发辐射的显著增强,并测量得出其放大自发辐射的阈值($35 \mu\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$),比之前的报道低一个数量级^[46,96]。

反蛋白石(FCC)结构是通过在蛋白石空隙中填充介质材料后,去除蛋白石模板得到的微孔

结构,该类结构由于可调的介质折射率易于实现光子晶体激光器。2016年,德国马克斯-普朗克研究所的 Schünemann 等^[90]使用模板法制备出钙钛矿光子晶体薄膜。该研究中,通过滴涂的方式制备聚苯乙烯微球胶体模板,随后旋涂钙钛矿薄膜,并进行退火处理,通过甲苯去除模板后得到具有反蛋白石结构的3D钙钛矿光子晶体薄膜。次年,

基于该方法制备了钙钛矿薄膜,测试了其激光性能^[90]。制备的MAPbBr₃薄膜呈反蛋白石形态[图7(c)],在大气环境下,在高于1.6 mJ·cm⁻²激光阈值的脉冲激光激发下,产生了FWHM最大值为0.15 nm的激光发射[图7(d)],这与3D光子晶体强光子带隙效应有关^[95],同时具有长期稳定性好的优点。

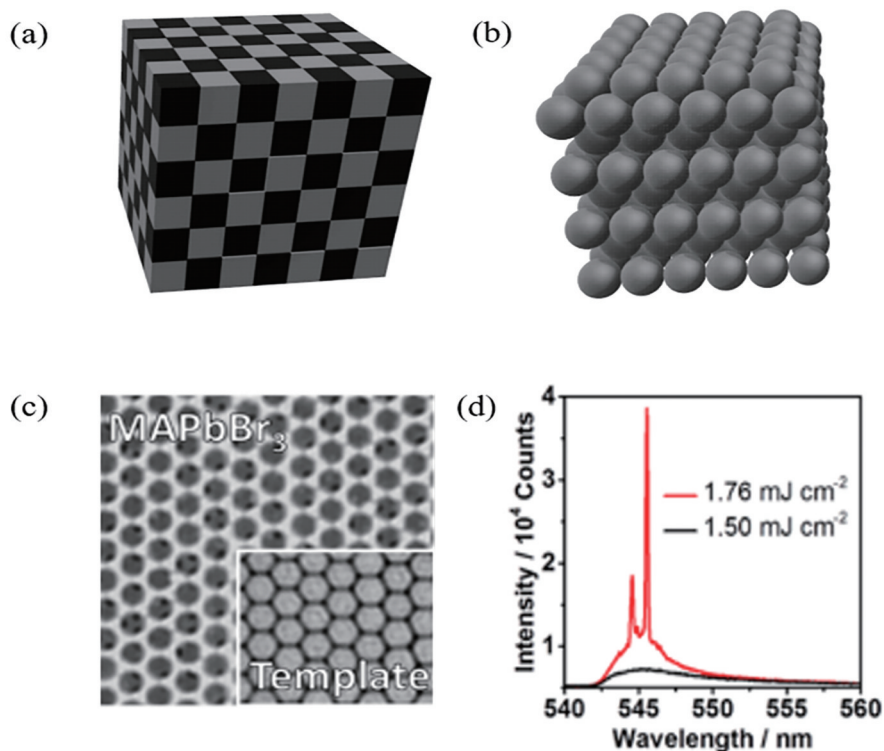


图7 (a)3D PhC结构示意图;(b)胶体晶体结构示意图;(c)MAPbBr₃薄膜呈反蛋白石形态,插图为胶体模板图;(d)不同入射能量密度下反蛋白石形MAPbBr₃薄膜的光谱图^[90]

Fig. 7 (a) 3D PhC structure diagram; (b) schematic of colloidal crystal structure; (c) MAPbBr₃ film is in the form of reverse opal, and the illustration is colloidal template; (d) spectra of inverted opal MAPbBr₃ films at different incident energy densities^[90]

表1 不同材料光子晶体激光器阈值及测试条件

Table 1 Thresholds and test conditions for photonics crystal laser with different materials

Structure	Material	Pump source	Threshold	T /K	Reference
1D photonic crystal	InGaN fQW	380 nm, 200 ps	9.10 μJ·cm ⁻²	RT	[69]
	ZnO NW	355 nm, 1 ns	3.63 μJ·cm ⁻²	10	[57]
	CsPbBr ₃ QD	400 nm, 50 fs	0.39 μJ·cm ⁻²	RT	[55]
	CdS NRs	450 nm, 100 fs	8.00 μJ·cm ⁻²	RT	[25]
	MAPbI ₃ TF	532 nm, 0.34 ns	7.60 μJ·cm ⁻²	RT	[97]
	MAPbBr ₃ SC-TF	355 nm, 8 ns	4.00 μJ·cm ⁻²	RT	[59]
	MAPbCl ₃ TF	405 nm, continuous wave	34 mW·cm ⁻²	RT	[59]
	MAPbCl ₃ TF	355 nm, 8 ns	211.00 μJ·cm ⁻²	RT	[98]
	MAPbBr ₃ flim	532 nm, 0.3 ns	3.40 μJ·cm ⁻²	—	[66]
	CsPbBrI ₂ -PEO	355 nm, 90 ps	33.00 μJ·cm ⁻²	—	[65]
MAPbBr ₃ SC microplate	400 nm, 100 fs	2.30 μJ·cm ⁻²	RT	[99]	

续表

Structure	Material	Pump source	Threshold	T /K	Reference
2D photonic crystal	MAPbI ₃ TF	355 nm, continuous wave	13.00 W·cm ⁻²	RT	[68]
	CsPb(Br/I) ₃ NC	532 nm, 5 ps	5.62 μJ·cm ⁻²	RT	[27]
	InGaAsP QW	980 nm, 10 ns	0.97 μJ·cm ⁻²	80	[100]
	MAPbI ₃ TF	532 nm, 400 ps	200.00 μJ·cm ⁻²	RT	[76]
	MAPbI ₃	532 nm, 300 ps	3.80 μJ·cm ⁻²	RT	[26]
	MAPbBr ₃ flim	532 nm, 0.5 ns	16.00 μJ·cm ⁻²	RT	[90]
3D photonic crystal	ZnO	355 nm, 6 ns	0.38 MW·cm ⁻²	RT	[91]
	MAPbBr ₃ flim	532 nm, 0.5 ns	1.6 mJ·cm ⁻²	RT	[90]

(Note: QW stands for quantum well, fQW stands for three fragmented quantum wells, QD stands for quantum dot, T stands for temperature, NW stands for nanowire, SC-TF stands for single crystal thin film, RT stands for room temperature)

3D 光子晶体在三个方向上都具有光子禁带,可实现全光子带隙,对光波实现三维约束。在 3D 光子晶体中引入缺陷能够构建具有高 Q 值、小体积的微腔,有助于进一步提高 Q/V 值,实现低阈值激光。

为统计不同材料光子晶体激光器阈值及测试条件,按照维数分类对其进行分析,钙钛矿光子晶体激光器当前已表现出较低阈值,1D 结构中,与 InGaN fQW、ZnO NW 为增益材料的光子晶体激光器相比,二者激光阈值已经处于同一数量级。2D 与 3D 结构中,钙钛矿光子晶体激光器较少,有待进一步研究。

4 结束语

钙钛矿光子晶体激光器利用钙钛矿材料的高光学增益特性和光子晶体的光子带隙、光局域效应,可以构建高 Q 值微腔,在缩小模式体积的同时有望实现低阈值甚至无阈值泵浦激光^[1-2,31],在实现片上光互连领域有广阔发展前景。钙钛矿光子晶体激光器近年来的研究进展表明,钙钛矿材料与光子晶体结构应用在激光器中对降低激光阈值有积极作用。通过选取高光学增益的钙钛矿材料,合理设计光子晶体微腔,将光子晶体微腔的共振与激光有源区产生的光致发光匹配,适当减小增益介质厚度、减小增益介质体积更容易克服光腔损耗,有利于低阈值激光发射^[30]。

钙钛矿 DBR 激光器制备工艺简单,利用 DBR 的高反射率可以实现有效腔反馈,但增益介质厚度一般在几百纳米甚至微米量级^[55,98,101],以保证在反射率大于 99% 的 DBR 结构中实现激光。同时由于其 DBR 本身厚度影响,整体器件尺寸较大,“三明治”结构有效延缓了钙钛矿材料分解,但空气中的水、氧还会从侧边与钙钛矿接触,造成分解现象的

发生,对该类型器件侧边进行封装能有效改善器件稳定性。钙钛矿光栅结构激光器在纵向尺寸上相比于 DBR 激光器有明显减小,器件面积取决于光栅面积。与该结构类似,2D 无缺陷激光器及 3D 胶体晶体激光器的器件体积都与增益介质厚度与光子晶体薄膜面积有关,由于器件制备的影响,其面积通常比较大。

纳米梁激光器具有结构简单、体积小、高 Q 值、小模式体积及易于外部耦合器直接集成的优点受到人们青睐^[70,102]。本文中提到的钙钛矿光子晶体纳米梁激光器 Q 值 (~10⁴) 和模式体积 [2.5~3(λ/n)³],相比于其他已报道的纳米梁激光器还有进一步提高的空间,可通过改变制备工艺提高空气孔侧壁垂直度^[79,103]或提高增益介质与纳米梁折射率比对^[74]来提高微腔 Q 值,对于小模式体积,可将纳米梁结构与表面等离子激元技术相结合来实现^[104]。

与 1D 光子晶体相比,2D 光子晶体在平面内两个方向上对光波进行限制,在构造更高 Q 值微腔方面更有优势^[80,105]。已报道 2D 光子晶体微腔通常是在光子晶体平板内引入缺陷构建的^[77],如移除空气孔光子晶体平板中的空气孔^[78-80],该结构在平面上利用光子带隙及高折射率波导对光进行限制,在缺陷区域利用光局域效应将光限制在缺陷位置^[78,80-81],二者作用叠加,具有比 1D 光子晶体微腔更好的光束束缚作用。当前,基于点缺陷^[78]、线缺陷^[21,85]、圆缺陷^[86,106]的 2D 光子晶体微腔已基于其他增益材料 (WSe₂^[85]、石墨烯^[78]) 实现,谐振模式为法布里-珀罗 (F-P) 模式或回音壁 (WGM) 模式,能有效减少能量泄漏,可实现低阈值激光。对于 2D 光子晶体微腔 Q 值得提高,除了制备工艺与材料选取外,通常是通过优化缺陷周围空气孔尺寸与位置来实现的^[80],其实是拓宽腔模空间分布,压缩波矢空间分布,减

少波矢在泄漏区域的分布。此外,2D光子晶体的制备工艺相对简单且可重复,是实现小型化纳米谐振腔与波导、调制器和探测器集成的可制作图形的最有希望的技术,因此将钙钛矿激光与2D光子晶体微腔相结合,在实现小模体积、低阈值激光方面发展方面起重要推进作用。3D光子晶体由于强光子带隙作用,对非期望激光模式的自发辐射的抑制作用强的多^[1],但制备困难,这限制了它的发展。实现对光波的三维限制,如通过2D光子晶体微腔与二维波导材料相结合的方法来实现,如纳米片等,前者用于平面约束、后者用于垂直约束,从而实现使激光器具有更小的模式体积,这是一种实现准三维光波限制的可行途径。

就钙钛矿材料而言,其具有较高的光学增益,大吸收系数、长载流子寿命等优点,是实现低阈值激光器的优良增益材料,钙钛矿材料与光子晶体的缺陷微腔的结合,可使激光阈值得到进一步降低。然而,实际应用中的激光器还必须满足高稳定、能长时间工作的要求,因此关于钙钛矿激光稳定性的问题引起了人们关注^[107]。对于这一问题,可从以下三个方面进行改善:1)选取高稳定的立方相钙钛矿,采用退火处理^[108]、反溶剂法^[109]、添加有机配体^[110]等方法提高薄膜结晶质量,进而提高其稳定性;2)对钙钛矿进行封装处理,添加疏水聚合物薄层^[111]以隔绝空气中水、氧,阻止水分解和光氧化的发生;3)采用六方氮化硼^[112]等高本征热导率和高稳定性材料对钙钛矿器件进行热管理。通过以上方法提高钙钛矿激光稳定性,并将其与光子晶体相结合,实现高稳定、低阈值的钙钛矿光子晶体激光器,对其在光电子器件集成领域的发展将有重要促进作用。

参 考 文 献

- [1] Noda S. Seeking the ultimate nanolaser[J]. *Science*, 2006, 314(5797): 260-261.
- [2] Yokoyama H. Physics and device applications of optical microcavities[J]. *Science*, 1992, 256(3): 66-70.
- [3] Gao R, Li G H, Han Y, et al. Carrier lifetime exceeding 81 ns in single crystalline perovskite nanowires enable large on-off ratio photodetectors[J]. *Organic Electronics*, 2020, 83: 105744.
- [4] Wehrenfennig C, Eperon G E, Johnston M B, et al. High charge carrier mobilities and lifetimes in organolead trihalide perovskites[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(10): 1584-1589.
- [5] Xing G C, Mathews N, Sun S Y, et al. Long-range balanced electron- and hole-transport lengths in organic-inorganic $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ [J]. *Science*, 2013, 342(6156): 344-347.
- [6] Stranks S D, Eperon G E, Grancini G, et al. Electron-hole diffusion lengths exceeding 1 micrometer in an organometal trihalide perovskite absorber[J]. *Science*, 2013, 342(6156): 341-344.
- [7] Deschler F, Price M, Pathak S, et al. High photoluminescence efficiency and optically pumped lasing in solution-processed mixed halide perovskite semiconductors[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2014, 5(8): 1421-1426.
- [8] Tan Z K, Moghaddam R S, Lai M L, et al. Bright light-emitting diodes based on organometal halide perovskite[J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(9): 687-692.
- [9] Xing G C, Mathews N, Lim S S, et al. Low-temperature solution-processed wavelength-tunable perovskites for lasing[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(5): 476-480.
- [10] Arumugam G M, Xu C X, Karunakaran S K, et al. Low threshold lasing from novel thulium-incorporated $\text{C}(\text{NH}_2)_3\text{PbI}_3$ perovskite thin films in Fabry-Pérot resonator[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(46): 12537-12546.
- [11] Huang S H, Liu Z Z, Du J, et al. Review of perovskite micro- and nano-lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(7): 071602.
黄斯豪, 刘征征, 杜鹃, 等. 钙钛矿微纳激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(7): 071602.
- [12] Markina D I, Pushkarev A P, Shishkin I I, et al. Perovskite nanowire lasers on low-refractive-index conductive substrate for high-Q and low-threshold operation[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(12): 3977-3984.
- [13] Li G H, Gao R, Han Y, et al. High detectivity photodetectors based on perovskite nanowires with suppressed surface defects[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(12): 1862-1874.
- [14] Li G H, Che T, Li X, et al. Record-low-threshold lasers based on atomically smooth triangular nanoplatelet perovskite[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(2): 1805553.
- [15] Yablonoitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [16] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Physical Review*

- Letters, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [17] Shin W, Pandey A, Liu X H, et al. Photonic crystal tunnel junction deep ultraviolet light emitting diodes with enhanced light extraction efficiency[J]. Optics Express, 2019, 27(26): 38413-38420.
- [18] Feng L S, Zhang N, Wang J X, et al. Effect of photonic crystals on the light extraction of GaN-based LED for different polarization modes of spontaneous radiation[J]. Results in Physics, 2019, 15: 102632.
- [19] Aly A H, Zaky Z A. Ultra-sensitive photonic crystal cancer cells sensor with a high-quality factor[J]. Cryogenics, 2019, 104: 102991.
- [20] Zhou L, Cui T, Feng S, et al. A high-Q, high-sensitivity refractive index sensor based on abundant defective modes of a 12-fold quasiperiodic photonic crystal[J]. Laser Physics Letters, 2019, 16(12): 126205.
- [21] Siraji A A, Zhao Y. High-sensitivity and high-Q-factor glass photonic crystal cavity and its applications as sensors[J]. Optics Letters, 2015, 40(7): 1508-1511.
- [22] Ning C Z. Semiconductor nanolasers and the size-energy-efficiency challenge: a review[J]. Advanced Photonics, 2019, 1(1): 014002.
- [23] Englund D, Fattal D, Waks E, et al. Controlling the spontaneous emission rate of single quantum dots in a two-dimensional photonic crystal[J]. Physical Review Letters, 2005, 95: 013904.
- [24] Yang Z L, Pelton M, Bodnarchuk M I, et al. Spontaneous emission enhancement of colloidal perovskite nanocrystals by a photonic crystal cavity[J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(22): 221104.
- [25] Zhang Q L, Wang S W, Liu X X, et al. Low threshold, single-mode laser based on individual CdS nanoribbons in dielectric DBR microcavity[J]. Nano Energy, 2016, 30: 481-487.
- [26] Pourdavoud N, Wang S, Mayer A, et al. Photonic nanostructures: Photonic nanostructures patterned by thermal nanoimprint directly into organo-metal halide perovskites[J]. Advanced Materials, 2017, 29(12): 201770082.
- [27] He Z, Chen B, Hua Y, et al. CMOS compatible high-performance nanolasing based on perovskite-SiN hybrid integration[J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(15): 2000453.
- [28] Tang H X, Wang Q M. Research progress of semiconductor photonic crystal lasers[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2005, 26(3): 165-171, 192.
唐海侠,王启明.半导体光子晶体激光器的研究进展[J].半导体光电, 2005, 26(3): 165-171, 192.
- [29] Wu G Z, Zhang B S, Qu Y, et al. Analysis on threshold characteristics in semiconductor microcavity lasers[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2000, 21(5): 325-327.
吴根柱,张宝顺,曲轶,等.半导体微腔激光器阈值特性分析[J].半导体光电, 2000, 21(5): 325-327.
- [30] Lin J, Liu X Y, Qu S N. Low threshold polymer lasers under optical pumping[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2019, 40(11): 1434-1438.
林杰,刘星元,曲松楠.光泵浦低阈值聚合物激光器[J].发光学报, 2019, 40(11): 1434-1438.
- [31] Wei Q, Li X J, Liang C, et al. Recent progress in metal halide perovskite micro- and nanolasers[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(17): 1900080.
- [32] Yang G B, Liu X X, Li H H, et al. Record-low continuous wavelength-pumped lasing thresholds using quantum wells via single-exciton optical gain mechanism[J]. Acta Chimica Sinica, 2018, 76(8): 633-638.
- [33] Liu C F, Lu T T, Wang J B, et al. Low threshold amplified spontaneous emission from efficient energy transfer in blends of conjugated polymers[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2020, 124(16): 8576-8583.
- [34] Vogelbacher F, Sagmeister M, Kraft J, et al. Slot-waveguide silicon nitride organic hybrid distributed feedback laser[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 18438.
- [35] Zuo Z Y, Ou C J, Ding Y J, et al. Spiro-substitution effect of terfluorenes on amplified spontaneous emission and lasing behaviors[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6(16): 4501-4507.
- [36] Hvam J M. Direct recording of optical-gain spectra from ZnO[J]. Journal of Applied Physics, 1978, 49(6): 3124-3126.
- [37] Shaklee K L, Nahory R E, Leheny R F. Optical gain in semiconductors[J]. Journal of Luminescence, 1973, 7: 284-309.
- [38] Ellmers C, Girndt A, Hofmann M, et al. Measurement and calculation of gain spectra for (GaIn)As/(AlGa)As single quantum well lasers[J]. Applied Physics Letters, 1998, 72(13): 1647-1649.
- [39] Klimov V I, Mikhailovsky A A, Xu S, et al. Optical gain and stimulated emission in nanocrystal quantum dots[J]. Science, 2000, 290(5490): 314-317.
- [40] Sarzała R P, Śpiewak P, Wasiak M. Influence of resonator length on performance of nitride TJ VCSEL[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2019, 55(6): 1-9.
- [41] Yin W J, Shi T, Yan Y. Unique properties of halide

- perovskites as possible origins of the superior solar cell performance[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(27): 4653-4658.
- [42] Akselrod G M, Young E R, Stone K W, et al. Reduced lasing threshold from organic dye microcavities[J]. *Physical Review B*, 2014, 90(3): 035209.
- [43] Shi Y Q, Li R X, Yu J H, et al. Synthesis and stability of CsPbBr₃ perovskite nanorods with high optical gain[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0701024.
时月晴,李如雪,余佳豪,等.高增益 CsPbBr₃ 钙钛矿纳米棒的研制及其稳定性研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 0701024.
- [44] Vu T K O, Cho I W, Oh J, et al. Defect suppression and photoresponsivity enhancement in methylammonium lead halide perovskites by CdSe/ZnS quantum dots[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 590: 19-27.
- [45] Li Q Y, Liu Q L, Schaller R D, et al. Reducing the optical gain threshold in two-dimensional CdSe nanoplatelets by the giant oscillator strength transition effect[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2019, 10(7): 1624-1632.
- [46] Li J, Si J J, Gan L, et al. Simple approach to improving the amplified spontaneous emission properties of perovskite films[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(48): 32978-32983.
- [47] Chen K, Sheng Q Q, Han J, et al. Study on photonic crystal and its application[J]. *Optoelectronic Technology*, 2003, 23(1): 16-23.
陈凯,盛秋琴,韩军,等.光子晶体及其应用研究[J]. *光电子技术*, 2003, 23(1): 16-23.
- [48] Liu X Y, Li H B, Song C Y, et al. Microcavity organic laser device under electrical pumping[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(4): 503-505.
- [49] Sreekanth K V, Krishna K H, De Luca A, et al. Large spontaneous emission rate enhancement in grating coupled hyperbolic metamaterials[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 6340.
- [50] Dowling J P, Scalora M, Bloemer M J, et al. The photonic band edge laser: a new approach to gain enhancement[J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 75(4): 1896-1899.
- [51] Zhai T R, Zhang X P, Dou F. Microscopic excavation into the optically pumped polymer lasers based on distributed feedback. *Chinese Physics Letters*, 2012, 29(10): 104204.
- [52] Ahn B H, Kang J H, Kim M K, et al. One-dimensional parabolic-beam photonic crystal laser[J]. *Optics Express*, 2010, 18(6): 5654-5660.
- [53] Li Y Z, Zhang J X, Huang D D, et al. Room-temperature continuous-wave lasing from monolayer molybdenum ditelluride integrated with a silicon nanobeam cavity[J]. *Nature Nanotechnology*, 2017, 12(10): 987-992.
- [54] Lin J, Hu Y S, Lü Y, et al. Light gain amplification in microcavity organic semiconductor laser diodes under electrical pumping[J]. *Science Bulletin*, 2017, 62(24): 1637-1638.
- [55] Huang C Y, Zou C, Mao C Y, et al. CsPbBr₃ perovskite quantum dot vertical cavity lasers with low threshold and high stability[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(9): 2281-2289.
- [56] Chang T C, Hashemi E, Hong K B, et al. Electrically injected GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with TiO₂ high-index-contrast grating reflectors[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(4): 861-866.
- [57] Kong J Y, Chu S, Huang J, et al. Use of distributed Bragg reflectors to enhance Fabry-Pérot lasing in vertically aligned ZnO nanowires[J]. *Applied Physics A*, 2013, 110(1): 23-28.
- [58] Han Y, Ng W K, Xue Y, et al. Room temperature III-V nanolasers with distributed Bragg reflectors epitaxially grown on (001) silicon-on-insulators[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(9): 1081-1086.
- [59] Tian C, Guo T, Zhao S Q, et al. Low-threshold room-temperature continuous-wave optical lasing of single-crystalline perovskite in a distributed reflector microcavity[J]. *RSC Advances*, 2019, 9(62): 35984-35989.
- [60] Lee S M, Gong S H, Kang J H, et al. Optically pumped GaN vertical cavity surface emitting laser with high index-contrast nanoporous distributed Bragg reflector[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11023-11030.
- [61] Wang Y, Li X, Song J, et al. All-inorganic colloidal perovskite quantum dots: a new class of lasing materials with favorable characteristics[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(44): 7101-7108.
- [62] Wang Y, Li X, Zhao X, et al. Nonlinear absorption and low-threshold multiphoton pumped stimulated emission from all-inorganic perovskite nanocrystals[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(1): 448-453.
- [63] Ling Y, Tian Y, Wang X, et al. Enhanced optical and electrical properties of polymer-assisted all-inorganic perovskites for light-emitting diodes[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(40): 8983-8989.

- [64] Shang J, Cong C, Wang Z, et al. Room-temperature 2D semiconductor activated vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Nature Communications*, 2017, 8 (1): 543.
- [65] Gong J, Wang Y, Liu S, et al. All-inorganic perovskite-based distributed feedback resonator[J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): A1154-A1161.
- [66] Pourdavoud N, Mayer A, Buchmüller M, et al. Distributed feedback lasers based on MAPbBr₃[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 3(4): 1700253.
- [67] Yen H J, Liang P W, Chueh C C, et al. Large grained perovskite solar cells derived from single-crystal perovskite powders with enhanced ambient stability[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(23): 14513-14520.
- [68] Li Z T, Moon J, Gharajeh A, et al. Room-temperature continuous-wave operation of organometal halide perovskite lasers[J]. *ACS Nano*, 2018, 12 (11): 10968-10976.
- [69] Niu N, Woolf A, Wang D Q, et al. Ultra-low threshold gallium nitride photonic crystal nanobeam laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(23): 231104.
- [70] Karnadi I, Son J, Kim J Y, et al. A printed nanobeam laser on a SiO₂/Si substrate for low-threshold continuous-wave operation[J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 12115-12121.
- [71] Huang Z, Cui K, Li Y, et al. Strong optomechanical coupling in nanobeam cavities based on hetero optomechanical crystals[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15964.
- [72] Notomi M, Kuramochi E, Taniyama H. Ultrahigh-Q nanocavity with 1D photonic gap[J]. *Optics Express*, 2008, 16(15): 11095-11102.
- [73] Jagsch S T, Trivino N V, Lohof F, et al. A quantum optical study of thresholdless lasing features in high- β nitride nanobeam cavities[J]. *Nature Communications*, 2018, 9 (1): 564.
- [74] Fong C F, Yin Y, Chen Y, et al. Silicon nitride nanobeam enhanced emission from all-inorganic perovskite nanocrystals[J]. *Optics Express*, 2019, 27 (13): 18673-18682.
- [75] Chen Y, Ryou A, Friedfeld M R, et al. Deterministic positioning of colloidal quantum dots on silicon nitride nanobeam cavities[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(10): 6404-6410.
- [76] Cha H, Bae S, Lee M, et al. Two-dimensional photonic crystal bandedge laser with hybrid perovskite thin film for optical gain[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(18): 181104.
- [77] Ryu H Y, Kim S H, Park H G, et al. Two-dimensional square lattice photonic-bandgap single-cell laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4655: 173-180.
- [78] Hwang M S, Kim H R, Kim K H, et al. Switching of photonic crystal lasers by graphene[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(3): 1892-1898.
- [79] Peng Y S, Ye X L, Xu B, et al. Fabrication and luminescence characterization of two-dimensional GaAs-based photonic crystal nanocavities[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59 (10): 7073-7077.
彭银生,叶小玲,徐波,等.二维GaAs基光子晶体微腔的制作与光谱特性分析[J]. *物理学报*, 2010, 59 (10): 7073-7077.
- [80] Akahane Y, Asano T, Song B S, et al. High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal[J]. *Nature*, 2003, 425(6961): 944-947.
- [81] Park H G, Kim S H, Kwon S H, et al. Electrically driven single-cell photonic crystal laser[J]. *Science*, 2004, 305(5689): 1444-1447.
- [82] Goldys E M, Deng W, Calander N P, et al. Nanoscale plasmonic resonators with high Purcell factor: spontaneous and stimulated emission[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7909: 79090H.
- [83] Harbers R, Strasser P, Caimi D, et al. Enhanced feedback in organic photonic-crystal lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(15): 151121.
- [84] Lu H Y, Tong C Z, Wang Z Y, et al. Research advancement on band-edge mode photonic crystal surface-emitting semiconductor laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0701014.
陆寰宇,佟存柱,王子焯,等.带边模式光子晶体面发射半导体激光器研究进展[J]. *中国激光*, 2020, 47 (7): 0701014.
- [85] Wu S F, Buckley S, Schaibley J R, et al. Monolayer semiconductor nanocavity lasers with ultralow thresholds [J]. *Nature*, 2015, 520(7545): 69-72.
- [86] Xiong Y F, Umeda T, Zhang X Y, et al. Photonic crystal circular-defect microcavity laser designed for wavelength division multiplexing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24 (6): 1-7.
- [87] Fu Y L, Zhai T R. Distributed feedback organic lasing in photonic crystals[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2020, 13(1): 18-34.
- [88] Ding T, Liu Z F, Song K. Preparation of 3D photonic crystals[J]. *Progress in Chemistry*, 2008, 20 (9): 1283-1293.

- 丁涛, 刘占芳, 宋恺. 三维光子晶体的制备[J]. 化学进展, 2008, 20(9): 1283-1293.
- [89] Shkunov M N, Vardeny Z V, DeLong M C, et al. Tunable, gap-state lasing in switchable directions for opal photonic crystals[J]. *Advanced Functional Materials*, 2002, 12(1): 21-26.
- [90] Schünemann S, Brittman S, Chen K, et al. Halide perovskite 3D photonic crystals for distributed feedback lasers[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(10): 2522-2528.
- [91] Teh L K, Wong C C, Yang H Y, et al. Lasing in electrodeposited ZnO inverse opal[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(16): 161116.
- [92] Strauf S. Lasing woodpiles[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(2): 72-74.
- [93] Sanders J V. Colour of precious opal[J]. *Nature*, 1964, 204(4964): 1151-1153.
- [94] Shi L T, Jin F, Zheng M L, et al. Low threshold photonic crystal laser based on a Rhodamine dye doped high gain polymer[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2016, 18(7): 5306-5315.
- [95] Zhou X, Li M, Wang K, et al. Strong photonic-band-gap effect on the spontaneous emission in 3D lead halide perovskite photonic crystals[J]. *Chemphyschem*, 2018, 19(16): 2101-2106.
- [96] Stranks S D, Wood S M, Wojciechowski K, et al. Enhanced amplified spontaneous emission in perovskites using a flexible cholesteric liquid crystal reflector[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(8): 4935-4941.
- [97] Chen S, Zhang C, Lee J, et al. High-Q, low-threshold monolithic perovskite thin-film vertical-cavity lasers[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(16): 1604781.
- [98] Tian C, Zhao S Q, Guo T, et al. Deep-blue DBR laser at room temperature from single-crystalline perovskite thin film[J]. *Optical Materials*, 2020, 107: 110130.
- [99] Sun S, Xiao S M, Song Q H. Distributed feedback laser based on single crystal perovskite[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 844: 012022.
- [100] Ryu H Y, Kwon S H, Lee Y J, et al. Very-low-threshold photonic band-edge lasers from free-standing triangular photonic crystal slabs[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(19): 3476-3478.
- [101] Chen S T, Nurmikko A. Stable green perovskite vertical-cavity surface-emitting lasers on rigid and flexible substrates[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(10): 2486-2494.
- [102] Jeong K Y, No Y S, Hwang Y, et al. Electrically driven nanobeam laser[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2822.
- [103] Reilly K J, Kalapala A, Yeom S, et al. Epitaxial regrowth and hole shape engineering for photonic crystal surface emitting lasers (PCSELS)[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2020, 535: 125531.
- [104] Xu P P, Shi Y C. High Q/V hybrid plasmonic photonic crystal nanobeam cavity: towards low threshold nanolasers application[J]. *Optics Communications*, 2013, 311: 234-238.
- [105] Banihashemi M, Ahmadi V. Effects of air hole numbers around nanocavity in photonic crystal quantum dot lasers[C]//2014 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), May 20-22, 2014, Tehran, Iran. New York: IEEE Press, 2014: 181-184.
- [106] Xiong Y F, Ye H Q, Umeda T, et al. Photonic crystal circular defect (CirD) laser[J]. *Photonics*, 2019, 6(2): 54.
- [107] Li G H, Chen K Q, Cui Y X, et al. Stability of perovskite light sources: status and challenges[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(6): 1902012.
- [108] Yu J C, Kim D W, Kim D B, et al. Improving the stability and performance of perovskite light-emitting diodes by thermal annealing treatment[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(32): 6906-6913.
- [109] Wu C, Zou Y T, Wu T, et al. Improved performance and stability of all-inorganic perovskite light-emitting diodes by antisolvent vapor treatment[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(28): 1700338.
- [110] Xiao Z G, Kerner R A, Zhao L F, et al. Efficient perovskite light-emitting diodes featuring nanometre-sized crystallites[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(2): 108-115.
- [111] Hwang I, Jeong I, Lee J, et al. Enhancing stability of perovskite solar cells to moisture by the facile hydrophobic passivation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(31): 17330-17336.
- [112] Yu H R, Cheng X, Wang Y L, et al. Waterproof perovskite-hexagonal boron nitride hybrid nanolasers with low lasing thresholds and high operating temperature[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(11): 4520-4528.