

激光与光电子学进展

介质阻挡放电不同填充比环形等离子体光子晶体

刘怡宁, 范伟丽*, 侯笑含, 吴志成, 贺亚峰, 刘富成**

河北大学物理科学与技术学院, 河北 保定 071002

摘要 采用液体电极介质阻挡放电装置, 对不同填充比环形等离子体光子晶体 (APPCs) 进行了系统研究。实现了等离子体柱半径动态可调、时空高度对称的 APPCs, 并能有效调控其基元微结构。基于实验结果, 利用二维有限元计算, 研究了不同 APPCs 的色散关系, 分析了等离子体柱半径对能带位置和带隙宽度的影响。结果表明, 随等离子体柱半径增大, 能带结构由不完全带隙转化为完全带隙, 带隙宽度随之增大。环形结构基元的设计使等离子体光子晶体 (PPCs) 具有易于实现宽带隙能带结构的优异特性, 其形成完全带隙的等离子体柱半径阈值显著低于常规 PPCs。在相同等离子体柱半径下, APPCs 的带隙宽度明显大于常规 PPCs。提出的等离子体填充比可调的 APPCs, 为能带结构的优化设计提供了更多可能, 同时为设计新型可调谐光子晶体以及开发宽带隙、高度集成光子器件带来启示。

关键词 光学器件; 介质阻挡放电; 环形等离子体光子晶体; 能带结构; 填充比

中图分类号 0531; 0539

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1323002

Annular Plasma Photonic Crystals with Different Filling Ratios in Dielectric Barrier Discharge

Liu Yining, Fan Weili*, Hou Xiaohan, Wu Zhicheng, He Yafeng, Liu Fucheng**

College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, Hebei, China

Abstract Herein, we present a systematic study on annular plasma photonic crystals (APPCs) with different filling ratios in dielectric barrier discharge using the water electrodes. In this study, the APPCs with dynamically adjustable plasma columns and high spatiotemporal symmetry have been realized, providing possibilities for modulating the microstructures of elements in APPCs. Based on the experimental results, the dispersion relation of different APPCs are studied using the finite element method. Furthermore, the influences of the radius of plasma columns on the positions and sizes of band gaps are analyzed. The results show that band gaps change from unidirectional to omnidirectional with increasing plasma column radius and the widths of omnidirectional band gaps increase considerably. Compared with conventional plasma photonic crystals (PPCs), APPCs can easily produce large omnidirectional band gaps with lower threshold values of the plasma column radius. Additionally, for a given radius, the sizes of band gaps in APPCs are larger than those in conventional PPCs. The novel APPCs with tunable filling ratios proposed here provide more possibilities for engineering the band gaps and offer enlightenment for designing new types of tunable photonic crystals and developing wide band gaps, highly-integrated photonic devices.

Key words optical devices; dielectric barrier discharge; annular plasma photonic crystal; band structure; filling ratio

1 引言

光子晶体是由两种或两种以上不同介电常数材料周期性排列构成的人工微结构^[1-5]。自 1987 年被提出以来, 光子晶体以其独特的性能和巨大的应用前景, 成为国际上最具影响力的十大重要科学进展之一。目前, 开发可调谐光子晶体以及增大光子带隙宽度是光

子晶体研究的两大重要问题, 同时也是拓展光子晶体应用领域、发展新型光子器件的基础。最常见的光子晶体是在空气背景中空间周期性排列的圆形介质棒, 或者介质背景中设计周期性排列的空气孔^[1-5]。近年来, 环形光子晶体以其带隙范围宽、色散效应独特、结构多维可调等众多优势受到国内外学者的广泛关注^[6-15]。基于其结构的独特性, 环形等离子体结合了介

收稿日期: 2021-08-16; 修回日期: 2021-09-01; 录用日期: 2021-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(11875014, 11975089)、河北省自然科学基金(A2021201010, A2021201003, A2017201099)。

通信作者: *fanweili@hbu.edu.cn; **hdlfc@hbu.edu.cn

质棒光子晶体和空气孔光子晶体的双重特点,易于在 TE、TM 模式下形成完全带隙^[6-7],在低折射率比介电材料下实现了显著的光子带隙,为提高光子器件性能、拓展其广泛应用提供了重要途径^[8]。此外,环形光子晶体具有特殊的色散效应,在偏振无关负折射、偏振无关自准直、慢光效应等方面具有显著优势,在光子集成电路^[9-10]、超透镜^[11-12]、偏振分束器^[11-12]、光二极管^[13]、波导^[14-15]、耦合器^[10]等领域具有重要应用。由于每个环形单元内,中心内柱的几何形状、半径、材料等均可进行人为调整,与传统均匀棒状或空穴型光子晶体相比,环形设计从多重维度实现了光子晶体结构的可调谐控制^[14,16]。目前,环形光子晶体的制备方法有多种,包括电子束光刻法、反应离子刻蚀法^[17]、原子层沉积法以及更通用的牺牲层刻蚀法等^[18]。然而,不可回避的是,一旦光子晶体制备完成,其结构参数即已确定,光子带隙的位置与宽度很难进行动态调整。人们迫切希望获得可调谐、宽带隙的环形光子晶体,并对其色散特性以及随结构参数的变化规律进行深入研究,推动新型光子晶体器件的广泛应用与发展。

等离子体光子晶体(PPCs)是由等离子体自身密度的周期性分布或者同其他介电材料交错排列形成的周期性结构^[19]。作为一种新型电磁超材料,PPCs 同时具有色散、各向异性和非线性的电磁特性^[19-43],不仅保留了常规光子晶体光子带隙的特点,还在时空可调、负折射率以及微波控制等方面具有突出优势,有望被应用于滤波器^[20-21]、等离子体透镜^[22]、光开关^[20-21]以及等离子体隐身^[23]等众多应用领域。目前,PPCs 的制备方法通常包括以下 4 种^[23-42]:1) 最常见的是利用气体放电管在空气中阵列形成不同对称性周期性结构,实现不同维度 PPCs^[23-28];2) 利用微放电阵列形成丰富构型 PPCs,实现高频段光子带隙^[29-38];3) 在均匀等离子体背景中插入空间周期性固体棒或平板阵列实现 PPCs^[39-40];4) 通过两束高频率超强激光对撞实现

PPCs^[41-42]。上述工作对深入认识 PPCs 内在机制、开拓其广泛应用具有重要意义。然而以往大部分研究中,构成 PPCs 最基本的单元(结构基元)一般为均匀等离子体柱或者均匀条状结构,PPCs 可调谐性通过改变等离子体密度、晶格常数或晶格对称性来实现。具有环状结构基元的 PPCs 相关研究至今鲜有报道。此外,如何保持环形等离子体光子晶体(APPCs)对称性、晶格常数等结构参数高度稳定情况下,实现对环形单元内等离子体微结构的可控性调谐仍是一项困难。可以相信,可调式 APPCs 的实现无疑将带来更有趣的光学性质和更广阔的应用空间。

本文利用双水电极介质阻挡放电装置实现了一系列高度时空对称的 APPCs。在保持晶体对称性和晶格常数稳定不变的基础上,实现了环形单元内等离子体填充比的动态可调,进而有效调控 PPCs 基元微结构。基于实验现象,利用二维有限元计算,在 Lorentz-Drude 模型下,获得了不同 APPCs 在 TM 极化下的能带结构,分析了等离子体填充比对能带位置和带隙宽度的影响。结果表明,APPCs 具有易于实现宽光子带隙的显著优势,带隙宽度随等离子体填充比的增大而增大。可调谐 APPCs 的提出为开发宽带隙、高度集成光子器件提供一定启示,并有望应用于微波、太赫兹波的传播控制。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,介质阻挡放电系统由两个水电极和一个具有三角晶格空气孔阵列的石英玻璃模版构成。其中,两个水电极由内径为 75 mm 装满水的圆柱形容器构成,两端用厚度为 1.5 mm 的玻璃介质板封住。左侧水电极内环形金属丝与高压电源相连,作为阳极;右侧水电极内环形金属丝接地,作为阴极。两个水电极之间放置一个具有三角晶格空气孔阵列的石英玻璃模版。该阵列模板与其两侧相邻的水电极玻璃

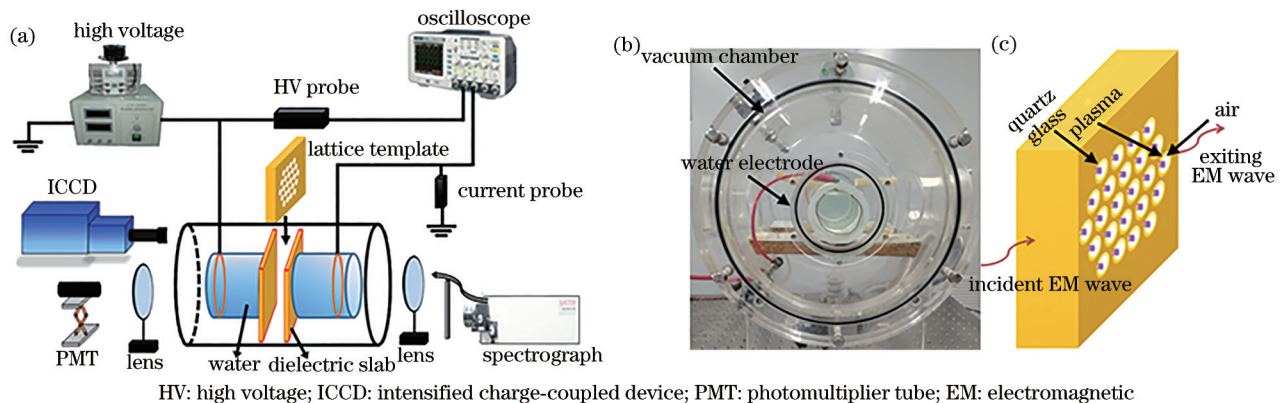


图 1 双水电极介质阻挡放电产生 APPCs 的实验装置。(a) 实验装置示意图;(b) 实验装置实物图;(c) APPCs 形成示意图

Fig. 1 Experimental setup of APPCs formation using dielectric barrier discharge system with two water electrodes. (a) Schematic diagram of experimental setup; (b) picture from real device; (c) schematic diagram of APPCs formation

介质板紧密接触,用绝缘夹固定位置。石英玻璃模版厚度为 1.5 mm,空气孔直径为 4.2 mm,相邻两个孔中心距离的晶格常数 $a = 6$ mm。由于该模版为空气孔与石英玻璃的二维周期性排列,故可看作一种常规的固体光子晶体,为等离子体的产生提供了空间周期性势场。将整个介质阻挡放电系统固定在一个密闭的气室中。气室可充比例可调的空气和氩气,气压在 101.3 kPa 之内可调。当外加电压足够高时,放电在阵列模板的空气孔中心位置产生,形成石英玻璃、等离子体柱以及空气环 3 种材料的空间周期性分布[如图 1(c)所示]。基于空气环的存在,称之为 APPCs。通过改变外加电压幅值以及密闭气室内气压大小,等离子体柱半径随之变化,实现环形单元内等离子体填充比的动态可调,进而有效调控 PPCs 基元微结构。其放电电压波形和电流波形分别用高压探针(Tektronix P6015A 1000×)和电流探针(Tektronix TCP0030A)检测,输入到数字示波器(Tektronix TDS3054B)内进行记录。气室两侧开有观察窗,用照相机(Cannon EOS 6D)拍照,用高速照相机(Andor DH334T)进行时空分辨测量。放电光信号由光电倍增管(RCA7265)采集。用光谱仪(Acton Advanced SP 2750 A, CCD:1340 pixel×400 pixel)探测等离子体发

光光谱,利用 Stark 展宽光谱法测量等离子体电子密度。若有一束微波从 PPCs 一侧入射时,如图 1(c)所示,PPCs 将对处于光子带隙位置的光波进行有效控制^[30-33],影响其传输特性。

3 分析与讨论

图 2 给出了随电压升高所获得的不同等离子体填充比的 APPCs。当电压 $U = 3.2$ kV,气体放电被击穿,每个空气孔单元中心处产生明亮的放电丝,放电丝半径 $R_1 = 0.5$ mm。该放电丝周期性排列形成十分规则的三角晶格等离子体结构,如图 2(a₁)所示。保持其他放电参量不变,缓慢降低电压至 $U = 3.0$ kV [图 2(b₁)],放电丝半径显著增大至 $R_2 = 1.0$ mm,但位置几乎保持不变。进一步降低电压和气压[图 2(c₁)],放电丝半径增大至 $R_3 = 1.2$ mm。图 2(a₂)、2(b₂)、2(c₂)分别给出了不同 PPCs 结构示意图。每个结构单元中包括一个空气环(ϵ_0)、处于中心的等离子体柱(ϵ_p)以及石英玻璃背景材料(ϵ_1),为 3 种介电常数材料交替周期性排列构成的三角晶格 APPCs。从群论角度,该晶体属于 D_{6h} 点群,具有高度空间稳定性。随电压和气压改变,这 3 种 APPCs 对称性和晶格常数保持不变,与预置三角晶格石英模板保持一致,而中心等离子

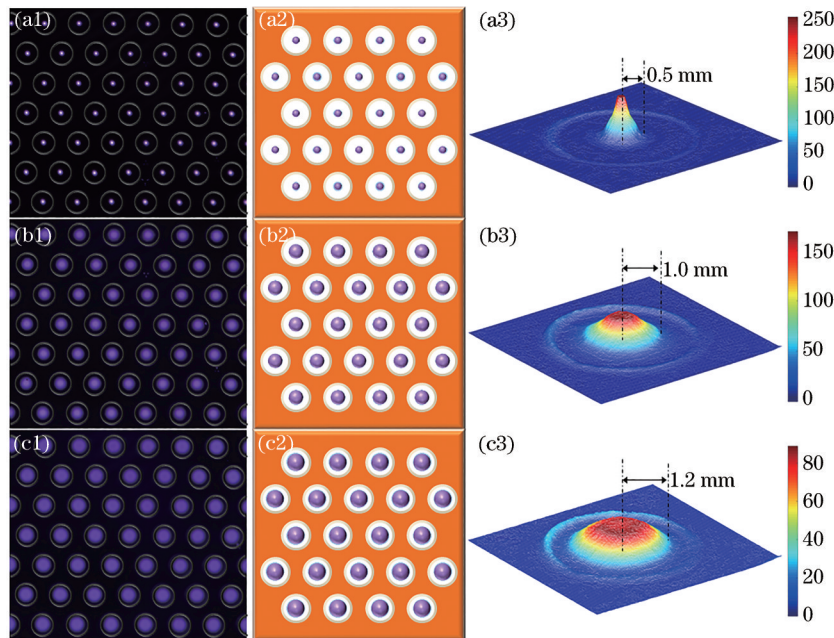


图 2 随电压和气压改变,不同填充比 APPCs 的相互转化。(a₁), (b₁), (c₁) 实验获得的 APPCs 快照;(a₂), (b₂), (c₂) APPCs 示意图,其中,中心圆形区域表示等离子体柱,白色环形区域表示空气环,背景表征石英玻璃;(a₃), (b₃), (c₃) APPCs 结构基元内等离子体亮度分布。实验参数:(a₁) 电压 $U = 3.2$ kV, 气压 $P = 25.3$ kPa; (b₁) 电压 $U = 3.0$ kV, 气压 $P = 25.3$ kPa; (c₁) 电压 $U = 2.6$ kV, 气压 $P = 20.3$ kPa。其他实验参数:背景气体比值 Air:Ar=2:1, 输入外加电压频率 $f = 48.5$ kHz

Fig. 2 Reconfiguration of APPCs with different filling ratios by varying supply voltage and gas pressures. (a₁), (b₁), (c₁) Snapshots of APPCs obtained in experiment; (a₂), (b₂), (c₂) schematic diagrams of APPCs, in which circular areas in center denote plasma columns, white rings denote air and backgrounds represent quartz glass; (a₃), (b₃), (c₃) light intensity distribution of plasmas in each annular cell. Experimental parameters: (a₁) $U = 3.2$ kV, $P = 25.3$ kPa; (b₁) $U = 3.0$ kV, $P = 25.3$ kPa; (c₁) $U = 2.6$ kV, $P = 20.3$ kPa. Ratio of working gas Air:Ar=2:1, frequency of supply voltage $f = 48.5$ kHz

体柱半径发生改变。与之对应的是,空气环尺度随之改变,实现了对 PPCs 基元微结构的调控。由于放电丝发光强度正相关于电流密度,图 2 右栏给出了等离子体分布亮度图,表征每个结构基元内微放电的空间分布。可以预料,当环形单元内等离子体柱半径改变后,PPCs 能带位置将随之改变,实现对不同波段电磁波的控制。上述 APPCs 随放电参数重构过程极其迅速,能够在几秒内完成,这为制作高度集成、快速调制的光学器件供了可能。此外,该过程具有高度可重复性,能够随参数变化实现稳定正向、逆向重构。同时所获得的晶体结构十分稳定,当放电参数保持不变的情况下,可以持续数十分钟甚至更长时间,这为实际应用中设备的高度稳定性和长时间检测提供了必要条件。为进一步搞清 APPCs 微放电时空行为,分别采用光电倍增管和高速相机对其进行了时空分辨测量。图 3 左

栏给出了利用光电倍增管对单个放电丝光信号的多周期测量结果。从图中可见,放电在每半个外加电压周期内仅出现一次,其时间窗口分别为 380、875、910 ns,放电持续时间随等离子体柱半径增大而增大。3 种晶体结构中,相邻两个电流脉冲之间时间间隔基本相等,约为 10.3 μs 。因此,该放电具有良好的时间周期性和稳定性,与外加电压保持谐振关系(注:放电过程中的光发射与外加电压的极性无关,将半个电压周期定义为一个驱动周期)。为进一步验证放电丝之间的时空同步性,利用高速增强型电荷耦合器 (ICCD) 成像技术对单个电流脉冲时间内瞬时放电图像进行了探测,如图 3 右栏所示。可以看到,所有放电丝几乎同步产生,具有高度时空协同性,这为 APPCs 的实际应用以及对电磁波的瞬时控制提供了必要基础。

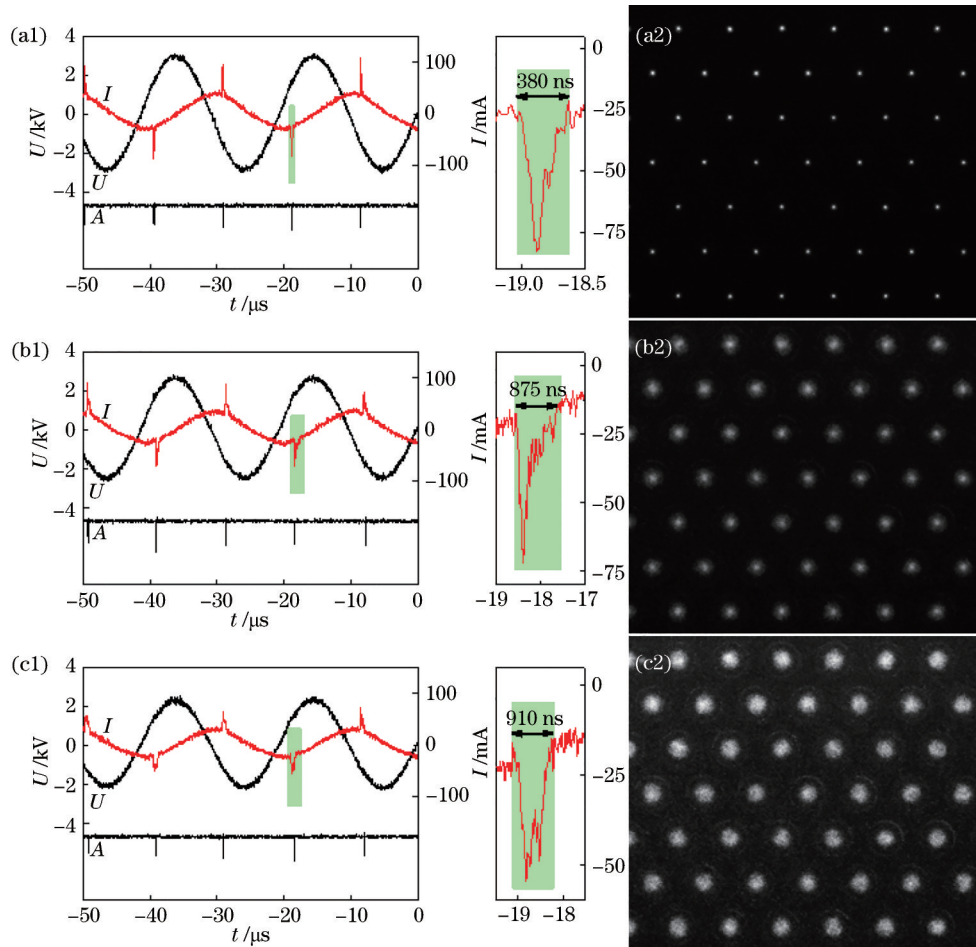


图 3 不同填充比 APPCs 放电时空分辨测量。(a1), (b1), (c1) 电流曲线 I 、电压曲线 U 以及放电光信号 A , 中间矩形框内给出了电流曲线单个电流脉冲的放大图;(a2), (b2), (c2) 单个电流脉冲内高速照相机拍摄的瞬时放电图像。为了提高图像亮度和清晰度,图像对 30 个电压周期内进行了叠加

Fig. 3 Spatio-temporally resolved measurements of discharge of APPCs with different filling ratios. (a1), (b1), (c1) Oscillogram of discharge current I , supply voltage U and light signal of one single filament A , closeups of single current pulses, denoted by strips in current waveforms, are presented in middle column; (a2), (b2), (c2) instantaneous images of discharges occurring during one single current pulse, obtained using fast camera diagnostics. Images are integrated over 30 voltage cycles to improve brightness and clarity

可调谐光子带隙是 PPCs 最根本的性质,亦是其被广泛应用的基础。基于此,利用 COMSOL 多物理场耦合软件,在 Lorentz-Drude 模型下,对不同等离子体柱半径下 APPCs 色散关系开展了理论计算。对于电磁波,其电场表达式为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}(\mathbf{r}) \exp[i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})], \quad (1)$$

式中: $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 为位置 \mathbf{r} 处的电场; \mathbf{k} 为波矢量; ω 为角频率。从 Maxwell 方程组出发,电磁波在非均匀介质中传播时电场强度可表示为 Helmholtz 形式:

$$\nabla \times \mu_r^{-1}(\mathbf{r}) [\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r})] - k_0^2 [\epsilon_r(\mathbf{r}) - j\sigma/\omega\epsilon_0] \mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0, \quad (2)$$

式中: ϵ_0 为真空介电常数; $\mu_r(\mathbf{r})$ 为介质磁导率; 电导率 $\sigma = 0$ 。波矢量大小 k_0 为

$$k_0 = \omega/c; \quad (3)$$

$\epsilon_r(\mathbf{r})$ 为介质介电常数,等离子体相对介电常数为

$$\epsilon_p = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_i(\omega_i - j\nu_m)}, \quad (4)$$

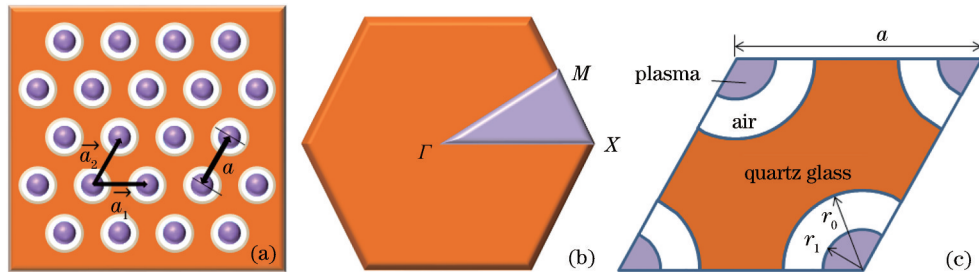


图 4 APPCs 结构示意图。(a) 晶格结构图,其中 \vec{a}_1 和 \vec{a}_2 表示三角晶格向量;(b) 不可约布里渊区;(c) 晶胞单元示意图,其中 r_0 表示空气孔半径, r_1 表示中心等离子体柱半径

Fig. 4 Schematic diagram of APPCs. (a) Lattice diagram, in which \vec{a}_1 and \vec{a}_2 are lattice vectors of triangular lattices; (b) irreducible Brillouin zone; (c) schematic diagram of primitive cell, in which r_0 denotes radius of air ring and r_1 denotes radius of central plasma column

$$R_c(\epsilon_p) = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_i}. \quad (5)$$

与上述实验结果图 2 相对应,图 5 给出了 APPCs 能带结构随等离子体柱半径增大的变化规律。图中可见:随等离子体柱半径增大,能带结构由不完全带隙转化为具有完全带隙,且完全带隙数目增加。图 5(a) 给出了等离子体介质柱半径 $R_1 = 0.5 \text{ mm}$ 时 APPCs 的能带图,在 $M-\Gamma$ 和 $X-M$ 两个方向上观察到多个不完全带隙,未发现完全带隙的存在。当等离子体柱半径增大到 $R_2 = 1.0 \text{ mm}$ 时[图 5(b)], $M-\Gamma$ 和 $X-M$ 方向上不完全带隙数目增多,并在 $30.8 \sim 31.2 \text{ GHz}$ 位置处出现了一条完全带隙,带隙宽度约为 0.4 GHz 。下文将该完全带隙定义为 APPCs 第一光子带隙(记为 APPC PBG1)。改变放电电压和气压,等离子体柱半径增大至 $R_3 = 1.2 \text{ mm}$ [图 5(c)],第一光子带隙宽度继续增大,位于 $30.9 \sim 32.2 \text{ GHz}$ 之间,带隙宽度约为 1.3 GHz 。为进一步揭示 APPCs 能带结构随中心等离子体柱半径 R 变化的规律,在模拟中继续增大等离

子体柱半径至 $R_4 = 1.5 \text{ mm}$ [如图 5(d)]。可以看到,第一完全带隙宽度进一步增大,位于 $31.3 \sim 34.0 \text{ GHz}$,带隙宽度约为 2.7 GHz 。有趣的是,此时在 $50.4 \sim 52.9 \text{ GHz}$ 之间出现了第二完全带隙(记为 APPC PBG2),带隙宽度约为 2.5 GHz 。因此,随着等离子体柱半径的增大,APPCs 能带结构由不完全带隙转化为具有完全带隙结构,且完全带隙的宽度和数目随之增加,这为 PPCs 结构的设计优化和性能提高提供了重要途径。

为进一步验证环状构型易于实现宽光子带隙的优异特性,对等离子体柱半径 R 在 $0.9 \sim 2.1 \text{ mm}$ 范围内的 APPCs 和常规 PPCs 色散关系进行了对比和分析(如图 6 所示)。这里,常规 PPCs 是由处于中心的等离子体柱(ϵ_p)和石英玻璃背景材料(ϵ_s)两种介电常数材料交替周期性排列构成的三角晶格。为更清楚地对比,令环形晶体和常规晶体中等离子体柱半径保持相等,并保证两种晶体的晶格常数、电子密度、介电常数等其他结构参数均相同。结果显示,两种晶体在该 R 值范

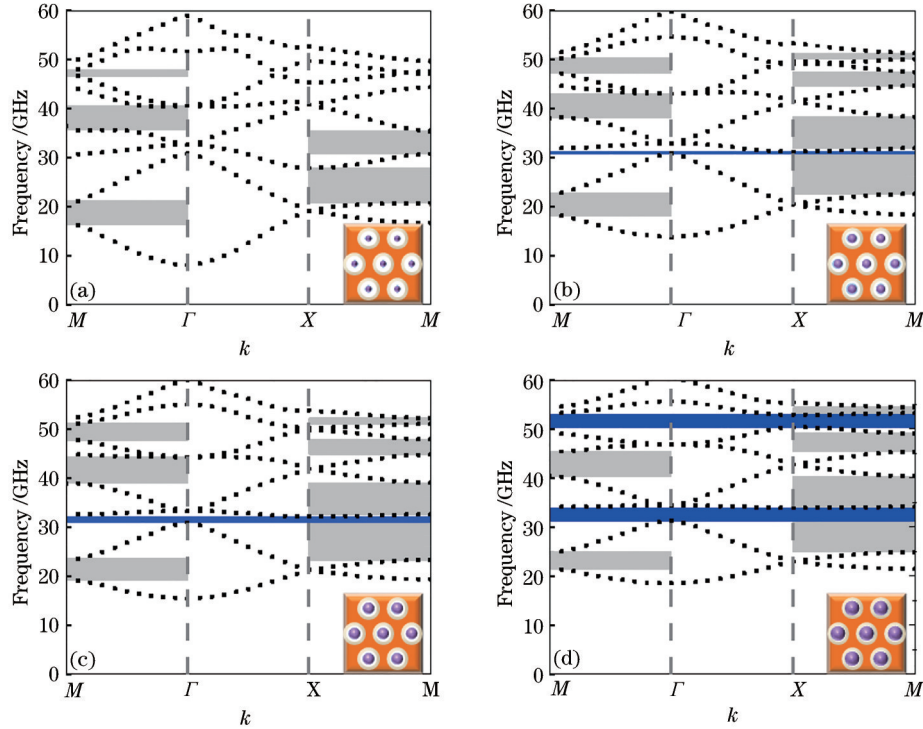


图 5 不同等离子体填充比 APPCs 的能带结构。(a)~(d) 环形单元中心等离子体柱半径分别为 0.5、1.0、1.2、1.5 mm。其中,(a)~(c) 分别对应图 2(a1)~2(c1) 中实验获得的 APPCs。灰色区域表示单一方向的不完全带隙,深色区域表示完全带隙

Fig. 5 Diagrams of band structures of APPCs with different filling ratios of plasmas. (a)~(d) Radii of plasma columns are 0.5, 1.0, 1.2, 1.5 mm, respectively. Structures in (a)~(c) are accordance with APPCs obtained in experiment as shown in Fig. 2(a1)~2(c1). Gray stripes and dark stripes denote unidirectional and omnidirectional band gaps, respectively

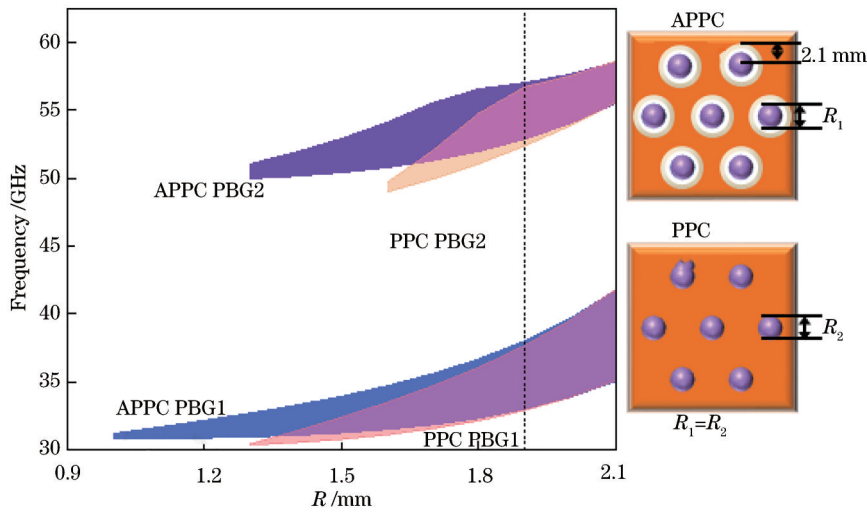


图 6 环形三角晶格 APPCs 和常规柱状三角晶格 PPCs 第一带隙与第二带隙随等离子体柱半径 R 增大的变化规律。APPC PBG1 和 APPC PBG2 分别表示 APPCs 第一完全带隙和第二完全带隙;PPC PBG1 和 PPC PBG2 分别表示 PPCs 第一完全带隙和第二完全带隙

Fig. 6 Variation of the first and second band gaps with increase of plasma column radius R for APPCs and conventional triangular PPCs. APPC PBG1, APPC PBG2 denote the first and second omnidirectional band gaps for APPCs, and PPC PBG1, PPC PBG2 represent the first and second omnidirectional band gaps for conventional triangular PPCs

围内均出现了两条完全带隙。其中, APPCs 在 $R=1.0$ mm 时开始出现第一完全带隙 APPC PBG1, 当 $R=1.3$ mm 时, 出现第二完全带隙 APPC PBG2。带隙宽度随中心等离子体柱半径 R 的增大而增大, 这与

上述计算结果相符合。反观常规 PPCs, 当 $R=1.3$ mm 时才出第一完全带隙 PPC PBG1, $R=1.6$ mm 时出现第二完全带隙 PPC PBG2。显然, 对于 APPCs, 在较小等离子体填充比下即可获得完全带

隙,具有较宽的带隙产生范围,而常规柱状 PPCs 则需要更高的等离子体填充阈值。此外,对于某一确定 R 值,特别是 $R \leq 1.9$ mm 范围内(如图 6 虚线标识),APPCs 的完全带隙宽度显著大于常规 PPCs,更易于获得更宽的光子带隙,这为实现高性能光子器件的设计和开发提供了重要启示和方案。

4 结 论

利用自行设计的液体电极介质阻挡放电装置,获得了一种结构单元包含空气环、等离子体柱以及石英玻璃背景材料 3 种介电常数材料周期性排列构成的 APPCs。在保持晶体对称性和晶格常数稳定不变基础上,通过方便地调节电压和气压,实现了环形单元内等离子体填充比的动态可调,有效调控 PPCs 基元微结构。在 Lorentz-Drude 模型下,利用二维有限元计算,研究了环形单元内中心等离子体柱半径对能带位置和带隙宽度的影响。结果表明:随等离子体柱半径的增大,能带结构由不完全带隙转化为完全带隙,带隙宽度和数目随之增大。相比于常规 PPCs,APPCs 具有易于实现宽带隙能带结构的优异特性,在 $R=1.0$ mm 低阈值等离子体柱半径下即可形成完全带隙,显著低于常规 PPCs 的阈值半径。此外,在相同等离子体柱半径下,APPCs 的带隙宽度明显大于常规 PPCs,实现对更大范围内微波传播的有效控制。所提出的 APPCs 为开发可调谐、宽带隙光子晶体提供了一种重要参考方案,并为设计新型集成化、高性能光子器件提供了一定启示。为了满足实际应用需要,下一步工作中将开展大间距放电间隙下 APPCs 的特性研究,并对其能带位置进行微波实验诊断。

参 考 文 献

- [1] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [2] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [3] 梁文耀, 杨佳琪, 李志远. 多光束全息干涉法制作复式光子晶体的数值仿真研究[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1116002.
Liang W Y, Yang J Q, Li Z Y. Numerical simulation on fabricating compound photonic crystals by multi-beam holographic interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1116002.
- [4] 吴蓉, 马岩岩, 李龙飞. 具有宽带宽和高归一化延迟带宽积的光子晶体波导慢光传输[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0723002.
Wu R, Ma Y Y, Li L F. Slow light transmission of photonic crystal waveguide with wide bandwidth and large normalized delay bandwidth product[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0723002.
- [5] 刘雪, 陈鹤鸣, 胡宇宸. 光子晶体电光调制和粗波分复用集成器件研究[J]. 中国激光, 2021, 48(3): 0306002.
- [6] Liu X, Chen H M, Hu Y C. An integrated device for photonic-crystal electro-optic modulation and coarse wavelength-division multiplexing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(3): 0306002.
- [7] Kurt H, Citrin D S. Annular photonic crystals[J]. Optics Express, 2005, 13(25): 10316-10326.
- [8] Shi P, Huang K, Kang X L, et al. Creation of large band gap with anisotropic annular photonic crystal slab structure[J]. Optics Express, 2010, 18(5): 5221-5228.
- [9] Bendib S, Zegadi A, Djeflal N. Improved sensitivity of 2D annular photonic crystal biosensor working at THz frequency range[J]. Optical and Quantum Electronics, 2016, 48(12): 528.
- [10] Khalkhali T F, Alipour-Beyraghi M, Lalenejad M, et al. Polarization-independent and super broadband flat lens composed of graded index annular photonic crystals[J]. Optics Communications, 2019, 435: 202-211.
- [11] Xia F, Li S X, Zhang K, et al. Negative Luneburg lens based on the graded annular photonic crystals[J]. Physica B: Condensed Matter, 2018, 545: 233-236.
- [12] Wu H, Li F. Negative-refraction effect for both TE and TM polarizations in two-dimensional annular photonic crystals[J]. Current Optics and Photonics, 2018, 2(1): 47-52.
- [13] Jiang L Y, Wu H, Li X Y. Polarization-insensitive self-collimation and beam splitter based on triangular-lattice annular photonic crystals[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2013, 30(5): 1248-1255.
- [14] Liu D, Gao Y H. Polarization-independent one-way transmission of silicon annular photonic crystal heterojunctions[J]. AIP Advances, 2018, 8(9): 095011.
- [15] Hou J, Gao D S, Wu H M, et al. Polarization insensitive self-collimation waveguide in square lattice annular photonic crystals[J]. Optics Communications, 2009, 282(15): 3172-3176.
- [16] Cicek A, Ulug B. Polarization-independent waveguiding with annular photonic crystals[J]. Optics Express, 2009, 17(20): 18381-18386.
- [17] Jiang L Y, Wu H, Jia W, et al. Polarization-independent negative refraction effect in SiO₂-GaAs annular photonic crystals[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(2): 023508.
- [18] Säynätjoki A, Mulot M, Vynck K, et al. Properties, applications and fabrication of photonic crystals with ring-shaped holes in silicon-on-insulator[J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2008, 6(1): 42-46.
- [19] Feng J B, Chen Y, Blair J, et al. Fabrication of annular photonic crystals by atomic layer deposition and sacrificial etching[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2009, 27(2): 568-572.
- [20] Hojo H, Mase A. Dispersion relation of electromagnetic waves in one-dimensional plasma photonic crystals[J]. Journal of Plasma and Fusion Research, 2004, 80(2): 89-90.
- [21] Zhang H F, Zhang H. The extraordinary mode in the

- three-dimensional magnetized plasma photonic crystals with layer-by-layer lattices containing the function dielectric [J]. *The European Physical Journal D*, 2019, 73(7): 143.
- [21] Elsayed H A, Abadla M M. Transmission investigation of one-dimensional Fibonacci-based quasi-periodic photonic crystals including nanocomposite material and plasma[J]. *Physica Scripta*, 2020, 95(3): 035504.
- [22] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(18): 3966-3969.
- [23] Tan H Y, Jin C G, Zhuge L J, et al. The SLR-dependent negative PBG in 1-D plasma photonic crystal [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(8): 3986-3990.
- [24] Zhang L, Ouyang J T. Experiment and simulation on one-dimensional plasma photonic crystals[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21(10): 103514.
- [25] Wang B, Cappelli M A. A plasma photonic crystal bandgap device[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(16): 161101.
- [26] Wang B, Rodríguez J A, Cappelli M A. 3D woodpile structure tunable plasma photonic crystal[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2019, 28(2): 02LT01.
- [27] Wang B, Rodríguez J A, Miller O, et al. Reconfigurable plasma-dielectric hybrid photonic crystal as a platform for electromagnetic wave manipulation and computing[J]. *Physics of Plasmas*, 2021, 28(4): 043502.
- [28] Zhang W D, Wang H T, Zhao X L, et al. Bandgap-tunable device realized by ternary plasma photonic crystals arrays[J]. *Physics of Plasmas*, 2020, 27(6): 063508.
- [29] Faith J, Kuo S P, Huang J. Frequency downshifting and trapping of an electromagnetic wave by a rapidly created spatially periodic plasma[J]. *Physical Review E*, 1997, 55(2): 1843-1851.
- [30] Sakai O, Sakaguchi T, Tachibana K. Verification of a plasma photonic crystal for microwaves of millimeter wavelength range using two-dimensional array of columnar microplasmas[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(24): 241505.
- [31] Lee D S, Sakai O, Tachibana K. Microplasma-induced deformation of an anomalous response spectrum of electromagnetic waves propagating along periodically perforated metal plates[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2009, 48(6): 062004.
- [32] Yang H J, Park S J, Eden J G. Narrowband attenuation at 157 GHz by a plasma photonic crystal[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(43): 43LT05.
- [33] Matlis E H, Corke T C, Neiswander B, et al. Electromagnetic wave transmittance control using self-organized plasma lattice metamaterial[J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124(9): 093104.
- [34] Wu S Q, Chen Y X, Liu M G, et al. Numerical study on the modulation of THz wave propagation by collisional microplasma photonic crystal[J]. *Plasma Science and Technology*, 2020, 22(11): 115402.
- [35] Fan W L, Dong L F, Zhao H T, et al. A potential tunable plasma photonic crystal: applications of atmospheric patterned gas discharge[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2009, 37(6): 1016-1020.
- [36] Fan W L, Dong L F. Tunable one-dimensional plasma photonic crystals in dielectric barrier discharge[J]. *Physics of Plasmas*, 2010, 17(7): 073506.
- [37] Fan W L, Zhang X C, Dong L F. Two-dimensional plasma photonic crystals in dielectric barrier discharge[J]. *Physics of Plasmas*, 2010, 17(11): 113501.
- [38] Gao K Y, Liang Y Q, Liu C Y, et al. Structural tunable plasma photonic crystals in dielectric barrier discharge[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(16): 5572.
- [39] Chaudhari M K, Chaudhari S. Tuning photonic bands in plasma metallic photonic crystals[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23(11): 112118.
- [40] Yao J F, Yuan C X, Li H, et al. 1D photonic crystal filled with low-temperature plasma for controlling broadband microwave transmission[J]. *AIP Advances*, 2019, 9(6): 065302.
- [41] Sheng Z M, Zhang J, Umstadter D. Plasma density gratings induced by intersecting laser pulses in underdense plasmas[J]. *Applied Physics B*, 2003, 77(6/7): 673-680.
- [42] Lehmann G, Spatschek K H. Transient plasma photonic crystals for high-power lasers[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(22): 225002.
- [43] Dong L F, Qi Y Y, Liu W Y, et al. Measurement of the electron density in a subatmospheric dielectric barrier discharge by spectral line shape[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(1): 013301.