



一种基于束缚态的可调等离子体光子晶体窄带滤波器

周铭杰 谭海云 周岩 诸葛兰剑 吴雪梅

A tunable narrow-band plasma photonic crystal filter based on bound state

Zhou Ming-Jie Tan Hai-Yun Zhou Yan Zhuge Lan-Jian Wu Xue-Mei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 175201 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210241

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210241>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于平行磁控的磁化等离子体光子晶体THz波调制器

Parallel magnetic-controlled THz modulator based on two-dimensional magnetized plasma photonic crystal

物理学报. 2017, 66(5): 054210 <https://doi.org/10.7498/aps.66.054210>

基于一维耦合腔光子晶体的声光可调谐平顶滤波器的研究

Acousto-optic tunable flat top filter based on one-dimensional coupled-cavity photonic crystals

物理学报. 2021, 70(5): 054208 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201461>

多铁性磁电器件研究进展

Recent progress of multiferroic magnetoelectric devices

物理学报. 2018, 67(15): 157507 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180857>

等离子体屏蔽效应对Ar¹⁶⁺基态和激发态能级的影响

Influence of plasma shielding effect on ground state and excited state energies of Ar¹⁶⁺

物理学报. 2019, 68(2): 023102 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181915>

平行轨道加速器等离子体动力学特性研究

Plasma dynamic characteristics of a parallel-rail accelerator

物理学报. 2018, 67(6): 065201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172403>

基于表面等离子体诱导透明的半封闭T形波导侧耦合圆盘腔的波导滤波器

Semi-closed T-shaped-disk waveguide filter based on surface-plasmon-induced transparency

物理学报. 2019, 68(23): 237301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191068>

一种基于束缚态的可调等离子体 光子晶体窄带滤波器*

周铭杰¹⁾²⁾ 谭海云³⁾ 周岩¹⁾²⁾ 诸葛兰剑⁴⁾ 吴雪梅^{1)2)†}

1) (苏州大学物理科学与技术学院, 苏州纳米科技协同创新中心, 苏州 215006)

2) (江苏省薄膜材料重点实验室, 苏州 215006)

3) (苏州大学光电科学与工程学院, 苏州 215006)

4) (苏州大学分析测试中心, 苏州 215123)

(2021年2月1日收到; 2021年3月23日收到修改稿)

利用一维光子晶体和二维等离子体光子晶体构建了一种基于束缚态的可调窄带滤波器, 滤波器的工作频率位于两个光子晶体的共同禁带内. 使用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件研究了一维光子晶体的几何参数和等离子体参数对滤波器性能的影响. 研究发现两个禁带的中心频率和深度越接近, 则滤波器的峰值透射率越大, 且中心频率占主导作用. 另一方面, 滤波器的工作频率与等离子体密度成正比, 与碰撞频率成反比. 滤波器品质因数和峰值透射率随等离子体密度的增大先增大后减小, 随碰撞频率的增加而减小. 最后, 随着等离子体碰撞频率的增加, 峰值透射率和品质因子没有发生显著下降, 这表明滤波器对等离子体损耗有一定抵抗力. 我们相信这项工作有助于一些新型等离子体光子晶体滤波器的研究.

关键词: 等离子体, 光子晶体, 可调滤波器, 束缚态**PACS:** 52.77.-j, 42.40.My, 84.30.Vn, 52.65.-y**DOI:** 10.7498/aps.70.20210241

1 引言

光子晶体 (photonic crystals, PCs) 自提出以来引起了人们的广泛关注^[1,2]. 人们基于 PCs 对电磁波的调控能力提出了许多应用. 例如光子晶体光纤^[3]、光子晶体滤波器^[4]、光子晶体波导^[5]和光子晶体天线^[6]等. 其中, 光子晶体滤波器^[7,8]是一种具有信号频率选择功能的器件, 其在微波通信领域得到广泛的研究^[9-12]. 一般而言, 可调光子晶体滤波器是一种波导-谐振腔-波导结构^[4]. 通过在谐振腔中填充折射率可调介质, 例如液晶^[13]和热敏材料^[14], 滤波器可以获得一定的调谐能力. 值得注意的是,

Wang 等^[15]在谐振腔中添加等离子体, 并研究了等离子体参数对滤波器的影响, 利用实验证实了等离子体光子晶体 (plasma photonic crystals, PPCs) 滤波器是一种可调滤波器.

谐振腔滤波器对腔的结构非常敏感, 在腔中引入扰动会影响滤波器性能. 对此, 基于束缚态的滤波器可能是一种解决方案. 研究表明, PCs 存在一种与光子晶体拓扑性质有关的束缚态^[16], 其对抗扰动不敏感. 严格来讲, 调节 PCs 使带结构发生反转, 带隙的拓扑性质会发生变化^[17]. 如果将两种拓扑性质不同的带隙材料拼接在一起并保证两者存在公共带隙, 则界面可能存在局域的束缚态, 透射谱的禁带区域会出现一个透射峰. 这种伴随高透

* 国家自然科学基金(批准号: 11975163)和江苏省高等院校优秀学科建设工程(PAPD)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xmwu@suda.edu.cn

射率的束缚态具有高度鲁棒性, 其电磁性质对界面附近的扰动不敏感.

基于上述研究基础, 本文设想了一种基于光子晶体束缚态的窄带滤波器, 并利用等离子体使滤波器获得动态可调能力. 本文同时研究了影响滤波器性能的因素, 讨论了等离子体参数对峰值透射率和品质因子的影响. 研究发现该滤波器对等离子体损耗不敏感, 这与填充等离子体的谐振腔滤波器不同.

2 滤波器模型及机理分析

本文所设想的滤波器模型如图 1 所示, 其由位于 xoy 平面的两块 PCs 构成, 两个 PCs 相交于红色虚线处. 左侧为氧化铝在空气中的周期堆叠, 晶格常数为 L , 周期数量为 N_1 , x 方向总长为 N_1L , 氧化铝的相对介电常数和厚度分别为 8.9 和 d . 右侧是空气中放电管的长方晶格, x 方向和 y 方向的晶格常数分别为 a_x 和 a_y , x 方向总长度为 N_2a_x , N_2 表示 x 方向的周期数量. 放电管由等离子体和石英环组成, 其中, 石英环的相对介电常数和厚度分别为 3.7 和 $(r_2 - r_1)$, r_1 表示等离子体半径, r_2 为石英柱半径. 等离子体的相对介电常数为 [18]

$$\epsilon_p = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \left(\frac{1}{1 + i(\nu_c/\omega)} \right), \quad (1)$$

其中, $\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}}$ 是等离子体频率, 其中, n_e 是电子密度, e 是电子电荷量, ϵ_0 是真空中相对介电常数, m_e 是电子质量, ν_c 是等离子体碰撞频率, ω 是入射电磁波频率. 波矢沿着 xoy 平面并且本文仅考虑 E 偏振.

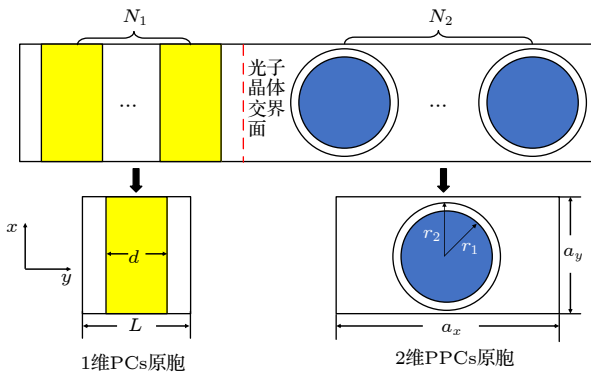


图 1 滤波器示意图, 下图展示了两种光子晶体的原胞
Fig. 1. Schematic diagram of the filter. The figure below shows the unit cells of two photonic crystals.

在带隙内, PCs 的有效折射率 $n_{\text{eff}} = \sqrt{\epsilon_{\text{eff}} \mu_{\text{eff}}}$ 为虚数, 电磁波无法传播, 其中, ϵ_{eff} 和 μ_{eff} 分别表示 PCs 的有效介电常数和有效磁导率. 特别地, 如果两种 PCs 的有效介电常数 ϵ_{eff} 异号且存在公共带隙 [19], 则电磁波可存在于两者的交界面. 这种局域在界面附近的电磁模式称为束缚态 [17], 并且束缚态与 PCs 的表面阻抗有关:

$$Z_L + Z_R = 0, \quad (2)$$

其中, Z_L 和 Z_R 分别表示左侧和右侧光子晶体的表面阻抗. PCs 的有效阻抗 Z_{eff} 可以表示为 $Z_{\text{eff}} = \sqrt{\mu_{\text{eff}}}/\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$. 在公共带隙内, 如果两种 PCs 的 ϵ_{eff} 异号, 就可能满足条件 $Z_L + Z_R = 0$. 文献 [19, 20] 则指出, 两种 PCs 的 ϵ_{eff} 异号就是指两种 PCs 带隙的拓扑性质不同. 因此, 束缚态依赖两个拓扑性质不同的光子带隙.

若要改变带隙的拓扑性质, 需要调节 PCs 参数让带隙先关闭再打开, 使得上下能带发生交换 [17,20]. 对于放电管构成的 PPCs, 可以调节等离子体密度使次序为 n (n 为大于 0 的正整数) 的带隙关闭, 然后增加等离子体密度重新打开带隙 [21]. 图 2 展示了调节过程, 其中, 2 维 (2D) PPCs 参数为 $a_x = 40 \text{ mm}$, $a_y = 12 \text{ mm}$, $r_1 = 4 \text{ mm}$, $r_2 = 5 \text{ mm}$, $N_2 = 10$, $\nu_c = 0$. 计算中取 $n = 1$. 本文利用有限元仿真软件 COMSOL 对模型进行数值计算.

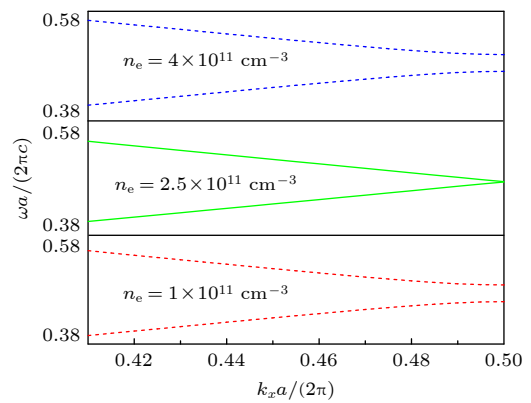


图 2 随等离子体密度增加, 2D PPC 的 1 阶带隙经历了从关闭到再打开的过程
Fig. 2. As the plasma density increases, the first-order band gap of 2D PPC undergoes a process from closing to reopening.

从图 2 中可以看出, 随等离子体密度增加, 带隙经历了从关闭到再打开的过程. 这种现象与波阻抗有关 [22]. 详细地说, 调节等离子体密度可以让石英放电管的有效阻抗和背景介质的阻抗相等, 从而

关闭带隙. 进一步增大等离子体密度会破坏阻抗匹配条件, 从而打开带隙. 带隙从关闭到重新打开的过程就是上下能带交换的过程, 带隙的拓扑性质因此发生变化.

在图 1 所示模型中, 首先调节等离子体密度 n_e 使 2D PPCs 的 1 阶带隙先消失再重新打开, 再调节 1D PCs 参数以确保两者的 1 阶带隙重合, 从而获得束缚态. 图 3 展示了调节过程, 其中, 图 3(a) 和图 3(b) 分别表示 1D PCs 和两种 2D PPCs 的能带图, 图中均以黄色区域表示公共带隙, 两者的区别在于图 3(b) 中 2D PPCs 的带隙是重新打开的带隙. 图 3(c) 表示上述两种情况下的透射谱, 图 3(d) 表示束缚态在滤波器中的场分布. 在计算中, 1D PCs 的参数为 $L = 20 \text{ mm}$, $d = 0.45L$, $N_1 = 3$. 2D PPCs 的参数为 $a_x = 40 \text{ mm}$, $a_y = 12 \text{ mm}$, $r_1 = 4 \text{ mm}$, $r_2 = 5 \text{ mm}$, $N_2 = 10$, $\nu_e = 0$. 对于图 3(a), $n_e = 0$. 对于图 3(b), $n_e = 6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$.

图 3(a) 和图 3(b) 表明两种 2D PPCs 的带隙

均和 1D PCs 的带隙有所重合. 但图 3(c) 表明, 仅当 2D PPCs 的带隙性质发生变化后, 滤波器才能进行工作. 从图中可以看出, 当 $n_e = 0$ 时, 透射谱中没有出现透射峰. 相比较而言, 当 $n_e = 6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 时, 因为 2D PPCs 的 1 阶带隙经历了先关闭再打开的过程, 带隙性质发生了变化, 所以透射谱中出现了尖锐的透射峰, 其位于约 4.078 GHz 处, 峰值透射率接近 100%. 透射峰的位置与束缚态的阻抗条件有关, 其一定位于公共带隙内. 从图 3(d) 可以看出, 束缚态集中在光子晶体交界面附近, 距离交界面的距离越远, 电场强度也越小. 有趣的是, 电场主要局域在 2D PPC 表面而非 1D PC 表面, 并且其在 PPC 内衰减得更慢.

3 影响滤波器性能的因素

根据 (2) 式, PCs 的有效阻抗可以影响滤波器性能, 而有效阻抗与 PCs 的光学参数与周期数量有关. 本节将研究这些参数对滤波器性能的影响.

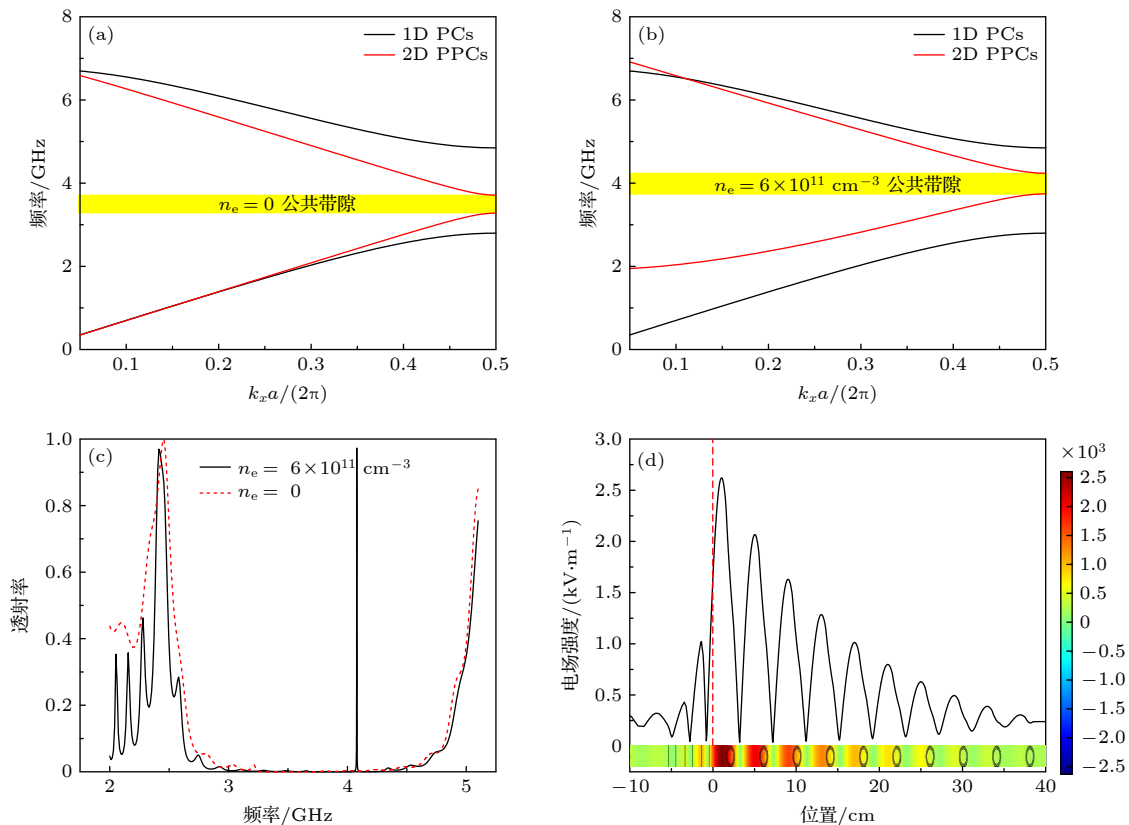


图 3 (a) $n_e = 0$ 时两种光子晶体的能带图; (b) $n_e = 6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 时两种光子晶体的能带图; (c) $n_e = 0$ 和 $n_e = 6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 时滤波器的透射谱; (d) 电场强度沿模型边界的线分布, 其中, 插图表示滤波器中的电场分布

Fig. 3. (a) Band structure of two different PCs with $n_e = 0$; (b) band structure of two different PCs with $n_e = 6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$; (c) transmission spectrum of the filter when $n_e = 0$ and $n_e = 6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$; (d) the intensity of electric field along the line of the model boundary, where the inset shows the electric field distribution in the filter.

3.1 1D PCs 参数的影响

首先研究 1D PCs 参数对滤波器性能的影响, 图 4(a) 和图 4(b) 分别表示滤波器透射谱随 1D PCs 周期数和氧化铝厚度的变化情况. 在计算中, 2D PPCs 参数不变, 即 $a_x = 40 \text{ mm}$, $a_y = 12 \text{ mm}$, $N_2 = 10$, $n_e = 6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, $\nu_e = 0$. 与此同时, 保持 1D PCs 的周期长度 $L = 20 \text{ mm}$ 不变. 在图 4(a) 中, 氧化铝厚度 d 为 $0.45L$, 在图 4(b) 中, 1D PCs 周期数 $N_1 = 3$.

从图 4(a) 可以看出, 约 4.08 GHz 附近存在一个透射峰. 随着周期数量 N_1 增大, 透射峰的中心频率有微小变化. 此外, 峰值透射率先增大后减小, 当 $N_1 = 3$ 时, 峰值透射率达到最大. 在图 4(b) 中, 随着氧化铝厚度 d 增大, 透射峰的中心频率向低频移动, 峰值透射率先增大后减小. 图 4 表明存在一个最佳 1D PCs 参数.

研究发现禁带匹配度可以衡量 1D PCs 参数对滤波器的影响. 禁带匹配度由禁带深度(以透射

率为单位)和禁带的中心频率进行表征. 定义中心频率匹配度 Δ_f 为 $\Delta_f = (1 - |f_1 - \bar{f}|/\bar{f}) \times 100\%$, 禁带深度匹配度 Δ_s 为 $\Delta_s = (1 - |s_1 - \bar{s}|/\bar{s}) \times 100\%$. 其中, f_1 和 s_1 分别是 1D PCs 的禁带中心频率和禁带深度, f_2 和 s_2 分别是 2D PPCs 的禁带中心频率和禁带深度, $\bar{f} = (f_1 + f_2)/2$, $\bar{s} = (s_1 + s_2)/2$. 图 5 展示了禁带匹配度随 1D PCs 参数的变化情况, 其中, 图 5(a) 展示了禁带匹配度与 N_1 的关系, 图 5(b) 展示了禁带匹配度与 d 的关系. 可以看到, 禁带匹配度随 1D PCs 参数不断变化, 并且当禁带匹配度最大时, 峰值透射率最高. 例如在图 5(a) 中, 当 $N_1 = 3$ 时, $\Delta_f = 98\%$, $\Delta_s = 77.6\%$, 两者均为最大值, 而在图 4(a) 中, $N_1 = 3$ 可以获得最大的峰值透射率. 因此, 匹配度越大, 峰值透射率越大, 该规律在图 5(b) 中同样存在. 有趣的是, 研究发现峰值透射率更依赖 Δ_f . 例如在图 5(b) 中, 当 d/L 分别为 0.35 和 0.55 时, 前者的 Δ_s 较小但 Δ_f 更大. 而在图 4(b) 中, $d/L = 0.35$ 可以获得更大的峰值透射率.

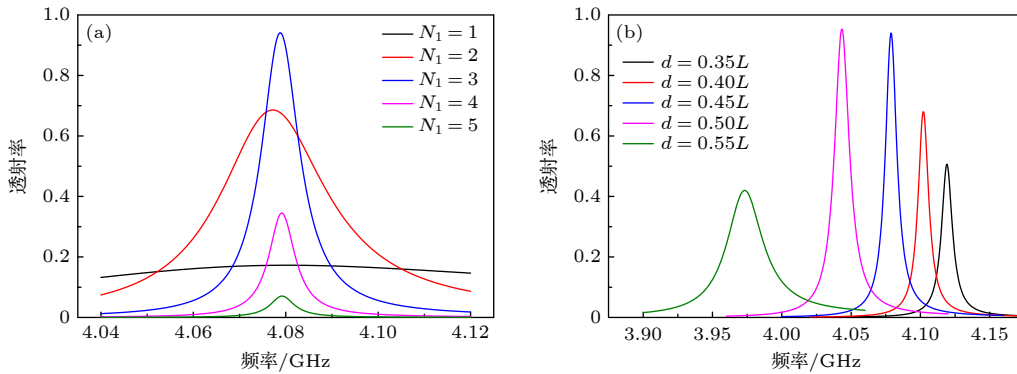


图 4 (a) 滤波器透射谱与 N_1 的关系; (b) 滤波器透射谱与 d 的关系

Fig. 4. (a) The relationship between the transmission spectrum of the filter and N_1 ; (b) the relationship between the transmission spectrum of the filter and d .

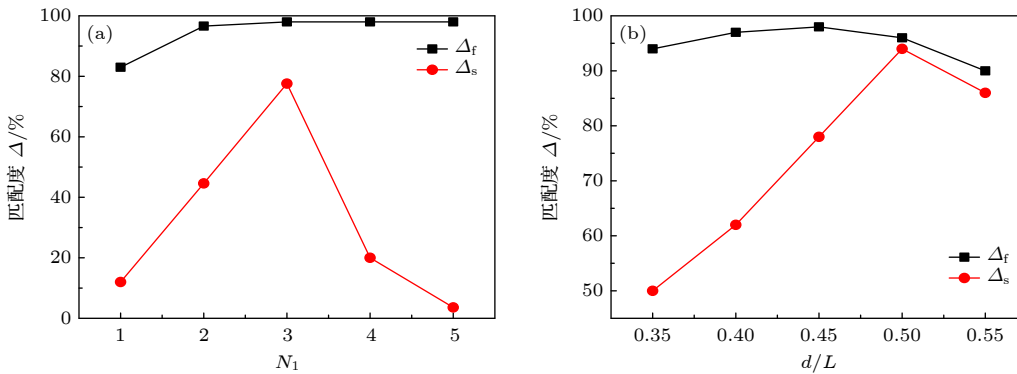


图 5 (a) 禁带匹配度与 N_1 的关系; (b) 禁带匹配度与 d 的关系

Fig. 5. (a) The relationship between the band gap matching degree and N_1 ; (b) the relationship between the band gap matching degree and d .

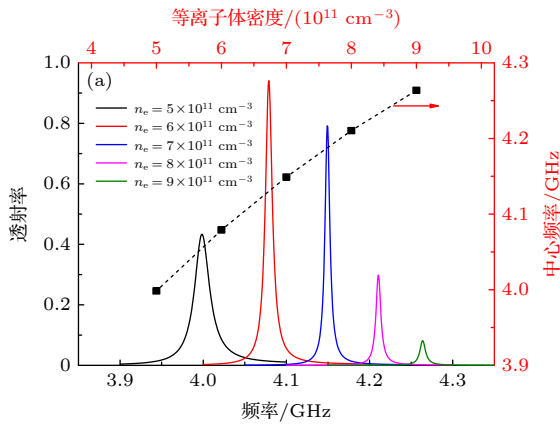
3.2 等离子体密度的影响

为了进一步研究滤波器的性能, 图 6 展示了等离子体密度 n_e 对滤波器性能的影响. 其中, 图 6(a) 表示滤波器透射谱与 n_e 的关系, 图中还以点线表示透射峰中心频率随 n_e 的变化情况. 图 6(b) 表示滤波器峰值透射率和品质因子 Q 与 n_e 的关系, 其中, 品质因子 Q 定义为^[16]:

$$Q = f_0/\text{FWHM}, \quad (3)$$

其中, f_0 表示透射峰的中心频率, FWHM 表示透射峰的半高宽. 定义 T_0 为透射峰的峰值透射率. 在计算中, 1D PCs 的参数为 $N_1 = 3$, $L = 20$ mm, $d = 0.45L$. 2D PPCs 的参数为 $N_2 = 10$, $a_x = 40$ mm, $a_y = 12$ mm, $r_1 = 4$ mm, $r_2 = 5$ mm, $\nu_e = 0$.

从图 6(a) 可以看出透射峰中心频率对 n_e 十分敏感. 随着 n_e 增加, 滤波器中心频率向高频移动.



增大 n_e 会降低等离子体的介电常数, 使禁带中心频率上升^[23]. 因此, 改变 n_e 会影响 2D PPCs 的禁带中心频率并对透射峰位置进行调制.

从图 6(b) 可以看到, 随 n_e 增加, 峰值透射率先增加再减小, 拐点出现在 $n_e = 6 \times 10^{11}$ cm⁻³ 处. 这种现象与禁带匹配度的变化有关. 另一方面, Q 值同样随 n_e 先增大后减小. 有趣的是, Q 值的拐点位置与峰值透射率的拐点位置并不相同, Q 值的拐点位置出现在 $n_e = 7 \times 10^{11}$ cm⁻³ 处. 这说明滤波器 Q 值与峰值透射率没有必然联系.

3.3 等离子体碰撞频率的影响

最后研究等离子体碰撞频率 ν_e 对滤波器性能的影响, 计算结果如图 7 所示. 其中, 图 7(a) 表示滤波器透射谱与 ν_e 的关系, 图中还以点线表示透射峰中心频率随 ν_e 的变化情况. 图 7(b) 表示滤波器

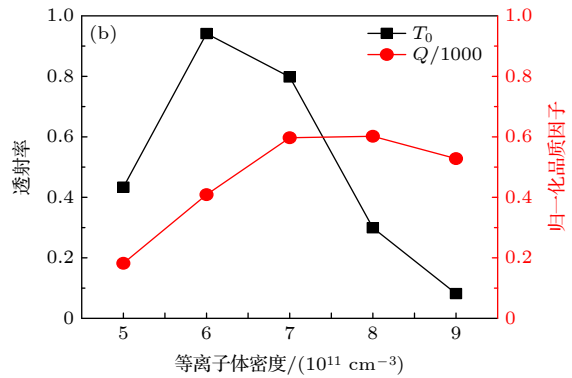


图 6 (a) 滤波器透射谱与 n_e 的关系, 点线表示滤波器的中心频率随 n_e 的变化; (b) 滤波器峰值透射率以及品质因子与 n_e 的关系
Fig. 6. (a) The relationship between the transmission spectrum of the filter and n_e , while the dotted line shows the evolution of the center frequency of the filter with n_e ; (b) the relationship between the peak transmittance of the filter as well as the quality factor and n_e .

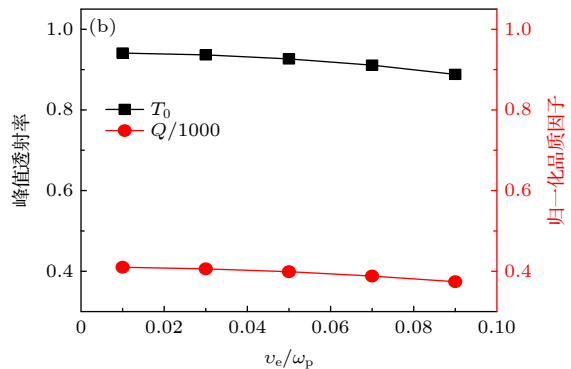
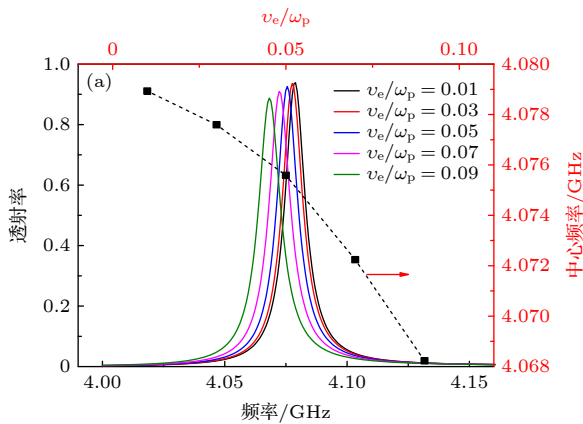


图 7 (a) 滤波器透射谱与 ν_e 的关系, 点线表示滤波器的中心频率随 ν_e 的变化; (b) 滤波器峰值透射率以及品质因子与 ν_e 的关系
Fig. 7. (a) The relationship between the transmission spectrum of the filter and ν_e , while the dotted line shows the evolution of the center frequency of the filter with ν_e ; (b) the relationship between the peak transmittance of the filter as well as the quality factor and ν_e .

峰值透射率和品质因子与 ν_c 的关系. 在计算中, $n_e = 6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, 其余参数与图 6 一致.

从图 7(a) 中可以看到, 当 ν_c 增加时, 透射峰中心频率向低频移动, 这是因为增加 ν_c 会增大等离子体介电常数的实部项, 使 2D PPCs 的禁带中心频率红移. 另一方面, 从图 7(b) 可以看出峰值透射率和品质因子 Q 随 ν_c 的增加而不断减小, 但下降幅度很低. 比如, 当 ν_c/ω_p 从 0.01 增加到 0.09 时, 峰值透射率从 0.9385 下降到 0.8875, 下降幅度约为 5.4%; 品质因子从 410 下降到 374, 下降幅度约为 8.78%. 这说明本文所提出的滤波器对碰撞频率不敏感, 其与填充等离子体的谐振腔滤波器明显不同^[24]. 这种现象与本文所提出滤波器的原理有关. 在这里, 滤波器的窄带高透射率现象依赖局域的束缚态, 其电场几乎集中在两种 PCs 之间的空气区域, 仅有一少部分“渗透”进入有损等离子体. 因此, 等离子体损耗对滤波器的性能影响较低.

4 总 结

本文提出了一种基于束缚态的光子晶体滤波器. 通过引入等离子体, 滤波器有一定的可调能力. 研究表明, 通过调节等离子体密度, 使得 2D PPCs 的禁带消失再重新打开, 再调节 1D PCs 的参数使得两个光子晶体的禁带重合, 便可以在禁带区域内获得窄带透射峰. 滤波器的性能与两个 PCs 的禁带匹配度有关, 并且禁带匹配度越好, 峰值透射率越高. 与此同时, 该滤波器对等离子体密度较为敏感. 调节等离子体密度可以调节滤波器中心频率和品质因子, 且两者均随着等离子体密度的增大先增大后减小. 最后, 本文提出的滤波器对等离子体碰撞频率不敏感, 在低温等离子体的范畴内, 增加碰撞频率对滤波器性能几乎没有影响.

参考文献

- [1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [3] Russell P 2003 *Science* **299** 358
- [4] Fan S H, Villeneuve P R, Joannopoulos J D, Haus H A 1998 *Opt. Express* **3** 4
- [5] Dinu M, Willet R L, Baldwin K, Pfeiffer L N, West K W 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 4471
- [6] Serier C, Cheype C, Chantalat R, Thevenot M, Monediere T, Reineix A, Jecko B 2001 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **29** 312
- [7] Xu J M, Chen L, Zang X F, Cai B, Peng Y, Zhu Y M 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 161116
- [8] Chen L, Liao D G, Guo X G, Zhao J Y, Zhu Y M, Zhuang S L 2019 *Front. Inform. Technol. Elect. Eng.* **20** 591
- [9] Belyaev B A, Khodenkov S A, Shabanov V F 2016 *Dokl. Phys.* **61** 155
- [10] Karakilinc O O, Dinleyici M S 2015 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **57** 1806
- [11] Upadhyay M, Awasthi S K, Shiveshwari L, Srivastava P, Ojha P 2015 *J. Supercond. Nov. Magn.* **28** 2275
- [12] Wang C C, Chen L W 2010 *Physica B* **405** 1210
- [13] Zhang H, Guo P, Chen P, Chang S J, Yuan J H 2009 *J. Opt. Soc. Am. B-Opt. Phys.* **26** 101
- [14] Suthar B, Bhargava A 2012 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **24** 338
- [15] Wang B, Cappelli M A 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 171107
- [16] John D J, Steven G J, Joshua N W, Robert D M 2008 *Photonic Crystals Molding the Flow of Light* (2nd Ed.) (New Jersey: Princeton University Press)
- [17] Xiao M, Zhang Z Q, Chan C T 2014 *Phys. Rev. X* **4** 021017
- [18] Sakai O, Tachibana K 2012 *Plasma Sources Sci. Technol.* **21** 013001
- [19] Shi X, Xue C H, Jiang H T, Chen H 2016 *Opt. Express* **24** 18580
- [20] Ling L, John D J, Marin S 2014 *Nat. Photonics* **8** 821
- [21] Tan H Y, Zhou M J, Zhuge L J, Wu X M 2019 *Phys. Plasmas* **26** 052107
- [22] Tan H Y, Zhou M J, Zhuge L J, Wu X M 2021 *J. Phys. D-Appl. Phys.* **54** 085106
- [23] Zhang H F, Liu S B, Kong X K 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 055209 (in Chinese) [章海锋, 刘少斌, 孔祥鲲 2011 物理学报 **60** 055209]
- [24] Kong X K, Liu S B, Zhang H F, Li C Z 2010 *Phys. Plasmas* **17** 103506

A tunable narrow-band plasma photonic crystal filter based on bound state*

Zhou Ming-Jie¹⁾²⁾ Tan Hai-Yun³⁾ Zhou Yan¹⁾²⁾
 Zhuge Lan-Jian⁴⁾ Wu Xue-Mei^{1)2)†}

1) (*Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China*)

2) (*Key Lab of Thin Film Materials of Jiangsu Province, Suzhou 215006, China*)

3) (*School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China*)

4) (*Analysis and Testing Center, Soochow University, Suzhou 215123, China*)

(Received 1 February 2021; revised manuscript received 23 March 2021)

Abstract

Photonic crystals are widely used in a class of narrow-band frequency selective filter due to their excellent ability to control electromagnetic waves, in which the working frequency depends on the structural parameters of the point defect resonant cavity of the photonic crystal, and the introduction of some dispersive media into the cavity makes the filter adjustable. In general, this kind of cavity-filter is very sensitive to the parameter disturbance of the cavity, and the quality factor of the filter can be reduced significantly by material loss. On the other hand, some studies have shown that there may be bound states at the interface between two different photonic crystals, and the bound state is often accompanied by narrow band and high transmittance, which implies that a narrow-band filter based on bound states is feasible. Importantly, filters based on bound states may be resistant to material loss to some degree. In this paper, a bound state related tunable narrow-band filter composed of a one-dimensional photonic crystal and a two-dimensional plasma photonic crystal is proposed, and the working frequency of the filter is located in the common band gap of the two photonic crystals. The COMSOL Multiphysics finite element simulation software is used to study the influences of geometric parameters of the one-dimensional photonic crystal and plasma parameters on the performance of the filter. It is found that the closer to each other the center frequencies and depths of the two different forbidden bands are, the greater the peak transmittance of the filter, in which the center frequency dominates, will be. On the other hand, the working frequency of the filter is directly proportional to plasma density and inversely proportional to collision frequency. The quality factor of the filter first increases and then decreases with the increase of plasma density, and decreases with the increase of collision frequency. The peak transmittance of the filter first increases and then decreases with the increase of plasma density, and decreases with the increase of plasma collision frequency. Finally, with the increase of collision frequency, both the peak transmittance and the quality factor decrease slightly, which indicates that the filter has a certain resistance to plasma loss. We believe that this work is helpful in investigating some new plasmonic photonic crystal filters.

Keywords: plasma, photonic crystal, tunable filter, bound state

PACS: 52.77.-j, 42.40.My, 84.30.Vn, 52.65.-y

DOI: 10.7498/aps.70.20210241

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11975163) and the Priority Academic Program Development of Jiangsu Province Higher Education Institutions (PAPD), China.

† Corresponding author. E-mail: xmwu@suda.edu.cn