

一维反转对称光子结构中界面态的可调控特性*

代美芹¹⁾²⁾ 张清悦¹⁾²⁾ 赵秋玲^{1)2)†} 王茂榕¹⁾²⁾ 王霞^{1)2)‡}

1) (青岛科技大学数理学院, 青岛 266061)

2) (青岛科技大学, 山东省新型光电材料与技术工程实验室, 青岛 266061)

(2022年3月4日收到; 2022年7月4日收到修改稿)

利用传输矩阵法, 计算研究了一维反转对称光子结构通过不同的组合方式产生界面态的可调控特性, 并通过电子束蒸镀技术制备样品进行了实验验证. 由两种材料构成的反转对称层状光子结构, 根据元胞的反转对称中心不同分别对应 PCI 和 PCII 两种结构. 研究表明, 对于由 PCI 和 PCII 构成的组合结构, 在满足两个结构的表面阻抗虚部之和等于零的特征频率处存在一个界面态, 该界面态频率与结构元胞数无关; 若在此基础上再增加一个 PCI, 构成 PCI + PCII + PCI 组合结构, 则在同一个带隙中会产生两个界面态; 改变组合结构中每部分或者其中一部分结构的元胞数可以对两个界面态频率实现调控, 实验研究结果充分表明调控的可行性, 这为设计满足不同应用需求的窄带滤波器、多通道滤波器等提供了更灵活的思路.

关键词: 光子带隙材料, 传输矩阵, 电子束蒸镀技术, 滤波器, 界面态

PACS: 42.70.Qs, 02.10.Yn, 81.15.-z, 84.30.Vn, 73.20.At

DOI: 10.7498/aps.71.20220383

1 引言

随着微纳光子学^[1]的研究拓展, 光子晶体、超材料等不同类型的人工电磁材料被不断提出^[2], 近几年人们又提出了超表面^[3], 超表面是一种二维超薄微纳结构, 主要在亚波长尺度引入相位调控, 可实现对光场的波前调制^[4,5]. 而早期提出的光子晶体由于具有光子带隙和光子局域特征^[6,7], 对光波的振幅和相位均可实现有效的调控, 因此其应用潜力仍然备受关注. 光子晶体的周期尺寸在波长量级, 是由不同介电常数的材料周期性排列而成的微结构^[8,9]. 光子带隙特征可使光子结构对入射光波的传播特性进行调控, 表现出带隙频率范围的光波不能在此周期性结构中传播^[10,11]; 光子局域特征表现为当光子晶体中引入某种程度的缺陷, 则与缺陷

态频率相吻合的光子有可能被局域在缺陷位置, 一旦偏离缺陷处, 光就迅速衰减^[12-15]. 另外光在不同材料或结构界面处传播时会产生界面态^[16,17], 其光场分布沿垂直于界面方向呈指数衰减^[18]. 一维光子晶体结构中出现的界面态类似于缺陷态, 其在反射光谱中表现为在带隙范围内出现透射模. 光子晶体的这些特征使其在光通信、低阈值激光器、高效反射镜等方面具有广泛地应用前景^[19-23].

本文针对元胞具备反转对称特征的一维层状光子结构, 基于传输矩阵方法研究了该类结构在产生界面态方面的可调控特性, 并进行了实验验证. 具体计算分析了一维反转对称层状结构通过不同的组合产生的界面态随结构元胞数的变化规律, 并利用电子束蒸镀技术制备了不同的结构, 实验测量结果与理论计算一致. 研究结果可以为界面态在窄带滤波器、多通道滤波器方面的实际应用提供可靠的参考.

* 国家自然科学基金 (批准号: 11874232, 61905127, 12174211) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sdqlzhao@163.com

‡ 通信作者. E-mail: phwangxia@163.com

2 研究模型与理论

传输矩阵法可以通过特征矩阵来描述光在单层介质中的传播行为, 通过传输矩阵和匹配矩阵可以逐层地描述光在一维层状结构中的传播规律^[24,25].

设光沿 z 轴正向传播, 其在厚度为 d_j 的第 j 层介质中的传输规律可用传输矩阵 \mathbf{P}_j 表示为

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} E_j^+ \\ E_j^- \end{pmatrix} &= \mathbf{P}_j(k_j, d_j) \begin{pmatrix} E_{j+1}^+ \\ E_{j+1}^- \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \exp(-ik_j d_j) & 0 \\ 0 & \exp(ik_j d_j) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{j+1}^+ \\ E_{j+1}^- \end{pmatrix}, \quad (1) \end{aligned}$$

其中 k_j 表示光在第 j 层介质内波矢的大小; E_j^+ , E_j^- 分别表示第 j 层介质内沿 z 轴正、负向传输的光波电场.

光波经过两种介质界面处的传输规律可用匹配矩阵 $\mathbf{M}_{j \rightarrow j+1}$ 表示为

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} E_j^+ \\ E_j^- \end{pmatrix} &= \mathbf{M}_{j \rightarrow j+1} \begin{pmatrix} E_{j+1}^+ \\ E_{j+1}^- \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{z_{j+1} + z_j}{2z_{j+1}} & \frac{z_{j+1} - z_j}{2z_{j+1}} \\ \frac{z_{j+1} - z_j}{2z_{j+1}} & \frac{z_{j+1} + z_j}{2z_{j+1}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{j+1}^+ \\ E_{j+1}^- \end{pmatrix}, \quad (2) \end{aligned}$$

其中 z_j 为第 j 层介质的阻抗; $z_j = \sqrt{\mu_j/\varepsilon_j}$, μ_j , ε_j

分别为该介质的磁导率和介电常数.

考虑由两种材料构成的二元层状光子结构 PCI 和 PCII 的组合结构, 如图 1(a) 所示. 根据元胞反转对称中心不同, 将反转对称结构分别定义为 PCI 和 PCII 两种类型, 其中红色方框对应 PCI 的一个元胞, 由 $0.5d_a-d_b-0.5d_a$ 构成; 蓝色方框对应 PCII 的一个元胞, 由 $0.5d_b-d_a-0.5d_b$ 构成. 两种结构都具备反转对称性, 但对称中心分别位于介质 B 和介质 A 中. 在上述组合的基础上再加上一个 PCI, 可构成图 1(b) 所示的组合结构, 即 PCI + PCII + PCI. 考虑实际应用, 在本文的计算中, A 介质选用二氧化硅 (SiO_2), B 介质为二氧化钛 (TiO_2). 在计算中考虑介质的色散, 两种氧化物的折射率分别取^[26]

$$n_{\text{SiO}_2} = 1.435 + 7.49 \times 10^{-3}/\lambda^2 - 5.07 \times 10^{-4}/\lambda^4;$$

$$n_{\text{TiO}_2} = 2.068 + 1.25 \times 10^{-2}/\lambda^2 + 4.90 \times 10^{-4}/\lambda^4,$$

其中 λ 为波长, 单位取 μm .

利用传输矩阵和匹配矩阵, PCI 结构中一个元胞的传输矩阵 \mathbf{T}_{ABA} 可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{\text{ABA}} &= \mathbf{P}(k_a, d_a/2) \cdot \mathbf{M}_{a \rightarrow b} \\ &\quad \times \mathbf{P}(k_b, d_b) \cdot \mathbf{M}_{b \rightarrow a} \cdot \mathbf{P}(k_a, d_a/2), \quad (3) \end{aligned}$$

则光从空气中垂直入射 PCI 结构后再透射进入空气, 总的传输矩阵为

$$\mathbf{T}_{\text{PCI}} = \mathbf{M}_{v \rightarrow a} \cdot \mathbf{T}_{\text{ABA}}^N \cdot \mathbf{M}_{a \rightarrow v}, \quad (4)$$

式中, 下标 v 表示空气; N 为 PCI 结构的元胞数.

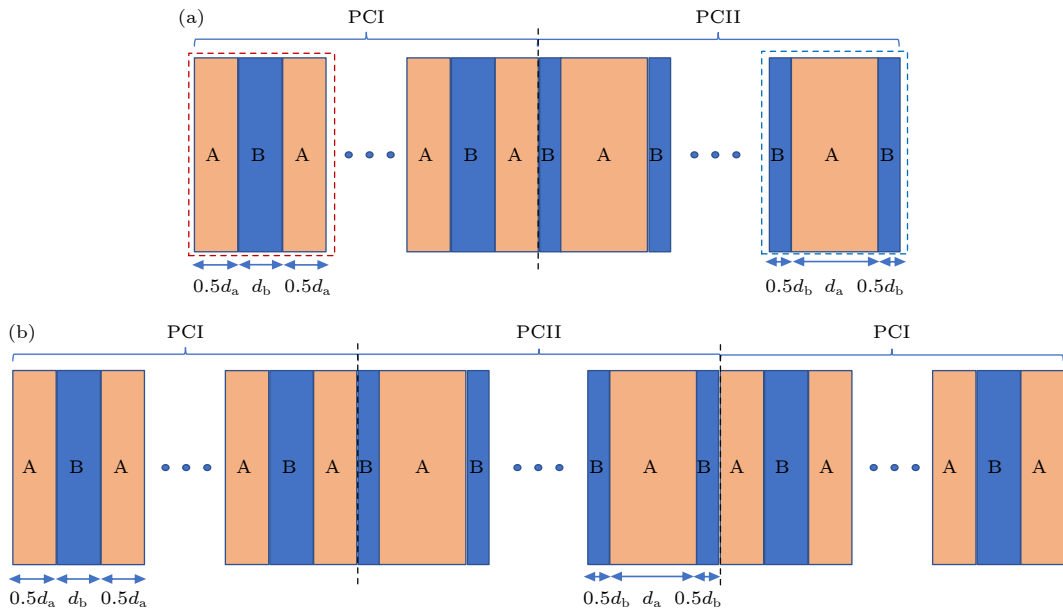


图 1 由二元反转对称光子结构 PCI 和 PCII 构成的两种组合结构示意图 (a) PCI + PCII; (b) PCI + PCII + PCI

Fig. 1. Schematic diagram of two combined structures composed of binary inversion symmetric photonic structures: (a) PCI + PCII; (b) PCI + PCII + PCI.

同理, 对于 PCII 结构, 有

$$\mathbf{T}_{\text{BAB}} = \mathbf{P}(k_b, d_b/2) \cdot \mathbf{M}_{b \rightarrow a} \times \mathbf{P}(k_a, d_a) \cdot \mathbf{M}_{a \rightarrow b} \cdot \mathbf{P}(k_b, d_b/2), \quad (5)$$

$$\mathbf{T}_{\text{PCII}} = \mathbf{M}_{v \rightarrow b} \cdot \mathbf{T}_{\text{BAB}}^N \cdot \mathbf{M}_{b \rightarrow v}. \quad (6)$$

组合光子结构 PCI + PCII 和 PCI + PCII + PCI 在空气中的传输矩阵分别为

$$\mathbf{T}_{\text{PCI+PCII}} = \mathbf{M}_{v \rightarrow a} \cdot \mathbf{T}_{\text{ABA}}^N \cdot \mathbf{M}_{a \rightarrow b} \cdot \mathbf{T}_{\text{BAB}}^N \cdot \mathbf{M}_{b \rightarrow v}, \quad (7)$$

$$\mathbf{T}_{\text{PCI+PCII+PCI}} = \mathbf{M}_{v \rightarrow a} \cdot \mathbf{T}_{\text{ABA}}^N \cdot \mathbf{M}_{a \rightarrow b} \times \mathbf{T}_{\text{BAB}}^N \cdot \mathbf{M}_{b \rightarrow a} \cdot \mathbf{T}_{\text{ABA}}^N \cdot \mathbf{M}_{a \rightarrow v}. \quad (8)$$

当单位振幅的光波正入射时, 经过不同结构的传输规律均可表示为

$$\begin{pmatrix} 1 \\ r \end{pmatrix} = \mathbf{T}_{\text{PC}} \cdot \begin{pmatrix} t \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

式中, r 为反射系数; t 为透射系数. 由此可得到光子结构的反射系数 $r_{\text{PC}} = H_{21}/H_{11}$ 和透射系数 $t_{\text{PC}} = 1/H_{11}$ 以及反射率 $R_{\text{PC}} = |r_{\text{PC}}|^2$.

3 一维光子结构产生界面态的理论计算

基于上述传输矩阵理论, 对由 PCI 和 PCII 构成的组合结构分别进行了计算分析, 并根据得到的反射系数进一步计算了结构的表面阻抗^[25], 表面阻抗可表示为 $Z = \frac{1+r}{1-r}Z_0$, 其中 $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ 为真空阻抗, 对真空阻抗进行归一化后, 表面阻抗的实部和虚部可分别表示为

$$(Z/Z_0)_{\text{real}} = \frac{1 - (r_{\text{R}}^2 + r_{\text{I}}^2)}{(1 - r_{\text{R}})^2 + r_{\text{I}}^2} = \frac{1 - R}{(1 - r_{\text{R}})^2 + r_{\text{I}}^2},$$

$$(Z/Z_0)_{\text{imag}} = \frac{2r_{\text{I}}}{(1 - r_{\text{R}})^2 + r_{\text{I}}^2}.$$

图 2 分别给出组合结构 PCI + PCII, PCI + PCII + PCI 的反射光谱以及表面阻抗虚部的分布曲线, 其中结构参数取 $d_a = 135 \text{ nm}$, $d_b = 40 \text{ nm}$, PCI, PCII 的元胞数目均为 $N = 5$. 从图 2(a) 和图 2(c) 可以看到, 在结构带隙范围内 $\lambda_0 = 577.90 \text{ nm}$ 处出现了一个界面态, 在该特征波长处刚好对应

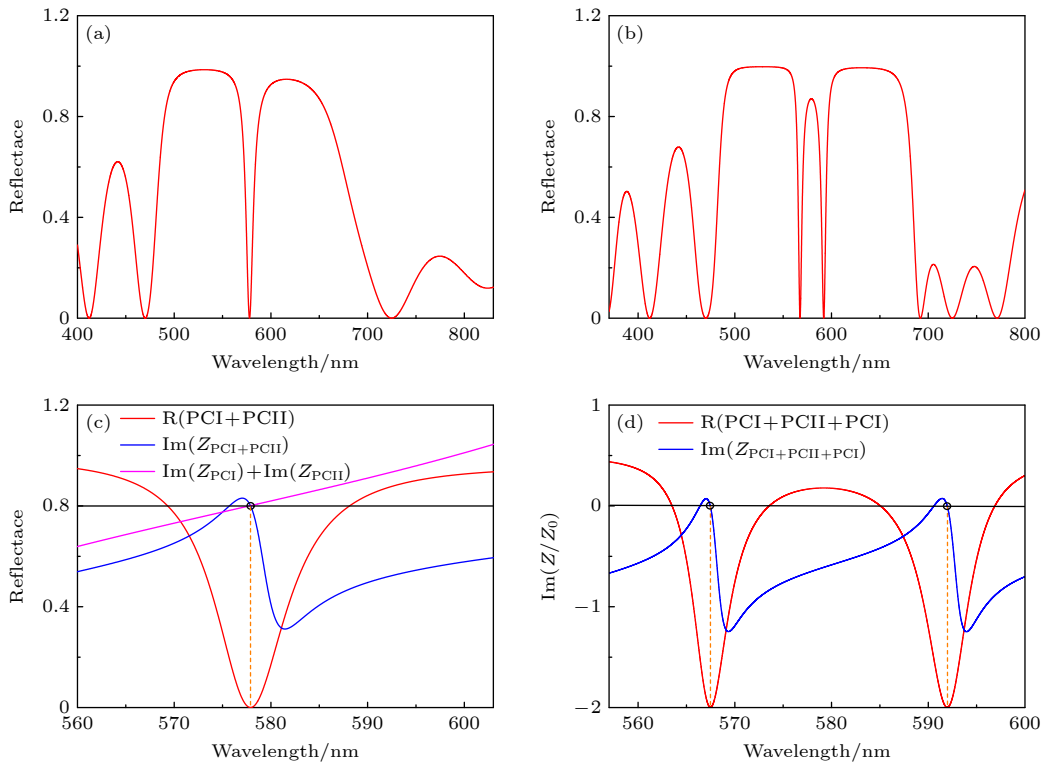


图 2 由 PCI 和 PCII 构成的组合结构 (a) 组合结构 PCI + PCII 的反射谱; (b) 组合结构 PCI + PCII + PCI 的反射谱; (c) 组合结构 PCI + PCII 的反射谱和表面阻抗虚部; (d) 组合结构 PCI + PCII + PCI 的反射谱和表面阻抗虚部

Fig. 2. Combined structures composed of PCI and PCII: (a) Reflection spectrum of combined structure PCI + PCII; (b) reflection spectrum of combined structure PCI + PCII + PCI; (c) reflection spectra and imaginary part of surface impedance of combined structure PCI + PCII; (d) reflection spectrum and imaginary part of surface impedance of combined structure PCI + PCII + PCI.

$\text{Im}(Z_{\text{PCI}}) + \text{Im}(Z_{\text{PCII}}) = 0$, 同时 PCI + PCII 组合结构的表面阻抗虚部 $\text{Im}(Z_{\text{PCI+PCII}})$ 也等于零. 由图 2(b) 和图 2(d) 可知, 组合结构 PCI + PCII + PCI 在同一带隙中出现两个界面态, 分别位于波长 $\lambda_1 = 567.47 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 591.96 \text{ nm}$ 处, 并且在这两个特征波长处, 整个组合结构的表面阻抗虚部 $\text{Im}(Z_{\text{PCI+PCII+PCI}})$ 都等于零. 因此组合结构的表面阻抗虚部等于零可视为界面态存在的特征条件^[25].

3.1 元胞数 N 对组合结构 PCI(N) + PCII(N) + PCI(N) 中的界面态的调控

在实际应用中, 对于一维层状结构而言, 元胞数对结构制备成本至关重要, 对于普通的带隙结构, 元胞数越多, 带隙特征越接近理想光子晶体, 制备成本也会大幅增加. 但对于一维组合结构而言, 元胞数目除了影响结构制备成本和带隙锐度外, 通过计算发现, 元胞数对界面态的位置还具有调控作用.

图 3(a) 给出组合结构 PCI + PCII + PCI 随元胞数变化的反射光谱, 在该模型中, 每一部分的结构元胞数相同, 均为 N , 即整个结构总的元胞数为 $3N$; 结构参数保持不变. 从图 3(a) 可以看到, 随元胞数 N 的增加, 两个界面态的波长间隔逐渐减小, 当 $N = 2, 3, 4, 5$ 时, 两个界面态的间隔分别为 93.18, 54.1, 35.50 和 24.49 nm. 同时界面态的谱线宽度也随之变窄. 若继续增大元胞数 N , 则会得到图 3(b) 所示的结果. 从图 3(b) 可以看到, 随着元胞数的增加, 两个界面态位置 λ_1, λ_2 逐渐靠

近, 且趋于理想的单色光 (图中嵌入曲线分别给出 $N = 15$ 和 $N = 20$ 的结果). 可以断定当元胞数足够大时, 两个界面态位置趋于重合, 均接近 λ_0 .

3.2 元胞数 M 对组合结构 PCI(N) + PCII(M) + PCI(N) 中的界面态的调控

在组合结构中, 若令两侧的 PCI 结构的元胞数 N 保持不变, 只改变中间 PCII 结构的元胞数 M , 计算表明随着 M 的变化, 界面态表现出不同的变化规律.

图 4(a) 给出了 $N = 3$, M 取不同值的光谱结果, 两种介质的结构参数与前述相同. 从图 4(a) 可以看到, 当 PCII 的元胞数 M 小于 6, 即小于 PCI 元胞数的 2 倍时, 随着 M 的增加, 两个界面态的波长间隔不断减小, 当 $M = 2, 4, 6$ 时, 两个界面态的间隔分别为 82.79, 35.39 和 9.96 nm; 在此基础上继续增大 M , 两个界面态演变成一个极小值, 且该极小值对应的反射率会随 M 的增加而增大; 当 M 足够大时, 带隙内不再表现出界面态特征, 如图中 $M = 20$ 对应的曲线所示. 可见当 $M = 6$, 即满足 $M = 2N$ 时, 两个界面态的间隔达到最小值, 为了确定这种情况下两个界面态是否会重合, 我们保持 $M = 2N$ 的条件不变, 计算了增大元胞数 N 的结果, 如图 4(b) 所示. 计算结果表明, 随着 N 的增大, 第一个界面态的位置 λ_1 保持不变, 第二个界面态位置 λ_2 逐渐与第一个界面态 λ_1 重合.

对于该组合结构中保持不动的界面态 λ_1 , 与组合结构 PCI + PCII 产生的界面态 λ_0 进行比较,

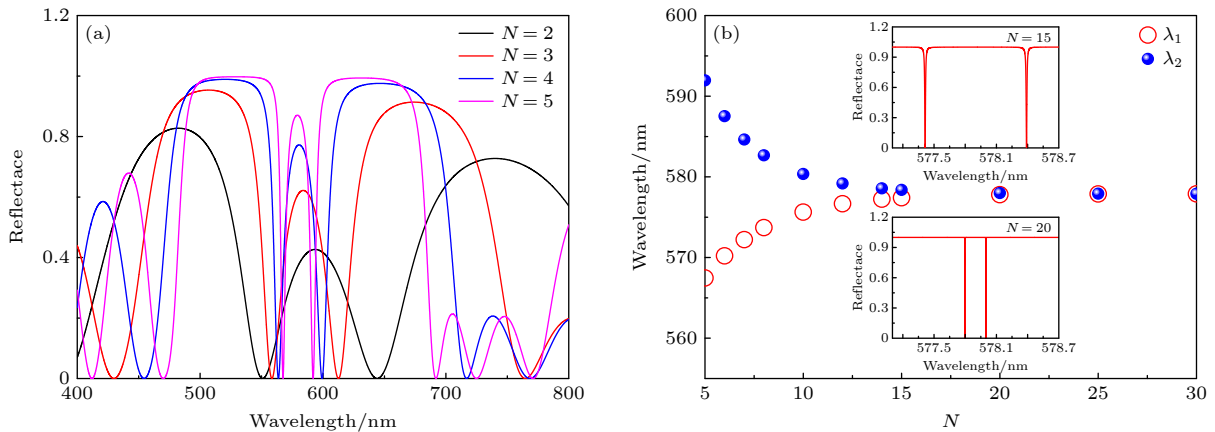


图 3 组合结构 PCI(N) + PCII(N) + PCI(N) 随元胞数改变的计算结果 (a) 组合结构随元胞数 N 变化的光谱; (b) 两个界面态位置 λ_1, λ_2 随元胞数 N 改变的计算结果

Fig. 3. Calculation results of combined structure PCI (N) + PCII (N) + PCI (N) with changing of the unit cell numbers N : (a) The spectra of the combined structure with the different N ; (b) two interface states of the combined structures with different N .

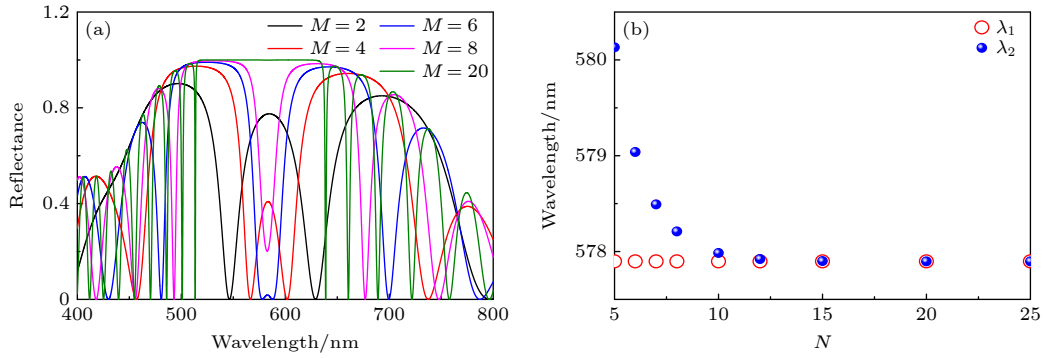


图 4 组合结构 PCI(N) + PCII(M) + PCI(N) 随元胞数改变的計算結果 (a) 组合结构随 PCII 元胞数 M 变化的光谱 (保持 $N = 3$ 不变); (b) 保持 $M = 2N$ 的条件不变, 组合结构的两个界面态 λ_1, λ_2 随元胞数 N 改变的計算結果

Fig. 4. Calculation results of combined structures PCI (N) + PCII (M) + PCI (N) with changing of the unit cell numbers M : (a) The spectra of the combined structures with different M (keep $N = 3$ unchanged); (b) keeping the condition of $M = 2N$ unchanged, the two interface states of the composite structures with different N .

可知两者完全相同, 都与结构元胞数无关, 如图 5 所示. 这表明满足 $M = 2N$ 条件时, 组合结构 PCI(N) + PCII(M) + PCI(N) 可视为 PCI(N) + PCII(N) + PCII(N) + PCI(N) 结构, 即两个 PCI + PCII 结构, 界面态 λ_1 , 是由 PCI + PCII 产生的, 该界面态由于对称性的保护, 其对结构元胞数具有鲁棒性.

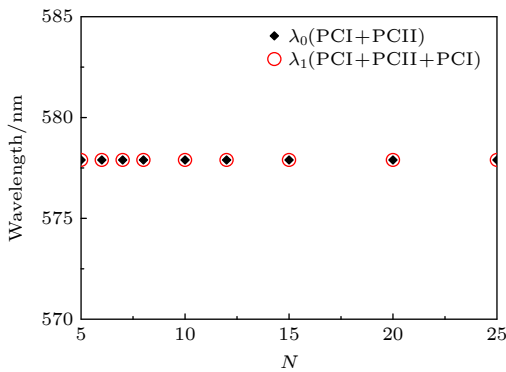


图 5 组合结构 PCI + PCII 的界面态 λ_0 与组合结构 PCI(N) + PCII(M) + PCI(N) (满足 $M = 2N$) 的第一个界面态 λ_1 随元胞数 N 改变的計算結果

Fig. 5. The interface state of combined structures PCI + PCII λ_0 and the first interface state of combined structures PCI (N) + PCII (M) + PCI (N) (keep $M = 2N$) λ_1 with different N .

综上, 在由 PCI 和 PCII 反转对称光子结构按照交替排列顺序构成的组合结构中, 每一部分光子结构的元胞数会影响在同一带隙中出现的界面态的频率. 在组合结构 PCI + PCII + PCI 中, 当 PCI 和 PCII 的元胞数均为 N 时, 随着元胞数的增加, 两个界面态的间隔会减小, 界面态的谱线宽度减小. N 足够大时, 两个界面态位置均趋于组合结

构 PCI + PCII 中的界面态所在的位置 λ_0 . 当 PCI 元胞数 N 保持不变, 中间光子结构 PCII 的元胞数 M 增大时, 两个界面态的间隔不断减小至变为一个, M 足够大时, 不再表现出界面态特征. 特别地, 当中间光子结构 PCII 的元胞数 M 是 PCI 元胞数 N 的 2 倍时, 表现出随着 N 的增大, 两个界面态中, 第一个界面态位置 λ_1 保持不动, 且恰好与 PCI + PCII 组合结构产生的界面态 λ_0 相同. 因此可以通过改变组合结构的元胞数来调控两个界面态的位置.

4 实验制备与测量

为证实结构元胞数对界面态调控的可行性, 我们利用电子束蒸镀系统 (Torr International, EB-4P4C) 制备了不同的样品结构, 并进行了测试分析. 实验制备时, 根据理论计算的参数设定膜层厚度逐层蒸镀, 即 SiO_2 膜层厚度为 135 nm, TiO_2 膜层厚度为 40 nm.

图 6 给出组合结构 PCI + PCII 以及 PCI + PCII + PCI 样品的实验测量结果 (图中嵌入的照片为制备的样品), 其中 PCI, PCII 的元胞数均为 5. 为了对比分析, 在图中同时给出了理论计算结果, 如图 6 中虚线所示. 考虑到实验制备中不可避免的厚度误差, 结合我们对所用电子束蒸镀系统的膜厚定标结果, 在理论计算中对两种氧化物的层厚进行了修正, 图 6(a) 给出的理论计算中 SiO_2 膜层厚度调整为 139 nm, TiO_2 的膜层厚度调整为 42 nm; 考虑含有两个界面态的组合结构实验制备层数

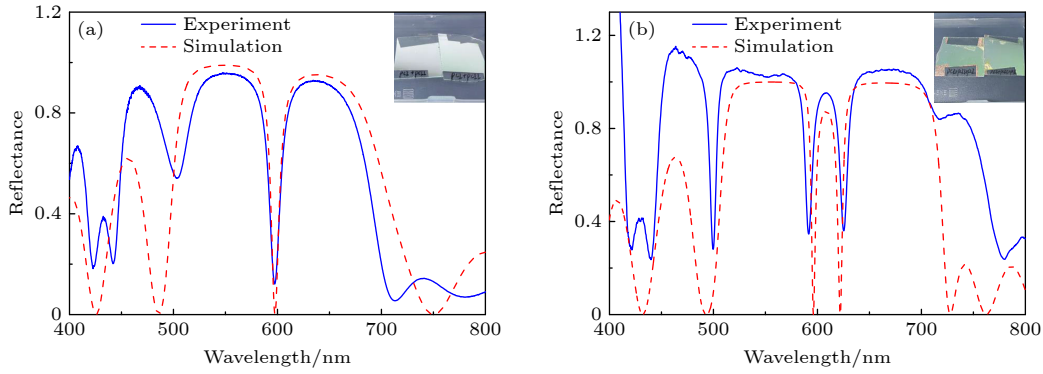


图 6 制备的组合结构样品的反射光谱 ($N = 5$) (a) PCI + PCII 结构; (b) PCI + PCII + PCI 结构
Fig. 6. Reflection spectra of the fabricated samples ($N = 5$): (a) PCI + PCII; (b) PCI + PCII + PCI.

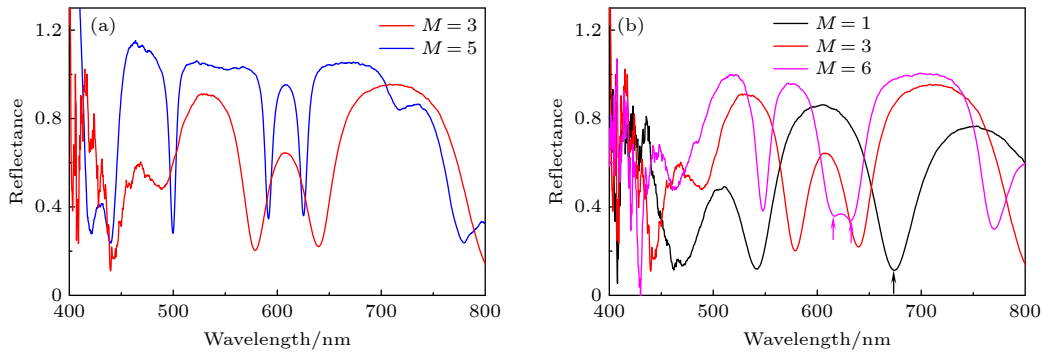


图 7 元胞数对界面态调控的实验测量结果 (a) 含不同元胞数 N 的组合结构 PCI(N) + PCII(N) + PCI(N) 的反射光谱测量结果; (b) 含不同元胞数 M 的组合结构 PCI(N) + PCII(M) + PCI(N) 的反射光谱测量结果 ($N = 3$)
Fig. 7. Experiment results of unit cell numbers regulation on the interface states: (a) Reflection spectrum of the fabricated structures PCI (N) + PCII (N) + PCI (N) with different N ; (b) reflection spectrum of the fabricated structures PCI (N) + PCII (M) + PCI (N) with different M (keep $N = 3$).

较多, 导致实验误差进一步增大, 因此图 6(b) 给出的理论计算中 SiO₂ 膜层厚度调整为 141 nm, TiO₂ 的膜层厚度调整为 43 nm. 由图 6 中曲线可知, 实验制备的 PCI + PCII 组合结构的界面态位于 597.59 nm 处; PCI + PCII + PCI 组合结构中的两个界面态位置分别位于 591.33 nm 和 625.49 nm 处; 且实验测量结果同理论计算结果在界面态位置和结构带隙方面均符合的非常好.

图 7(a) 给出元胞数 N 对组合结构 PCI(N) + PCII(N) + PCI(N) 中界面态的调控实验结果, 图中两条光谱曲线分别对应 $N = 3$ 和 $N = 5$ 的样品. 从图 7(a) 可以看到, 当 $N = 3$ 时, 两个界面态分别位于 578.33 nm 和 640.03 nm 处, 其间隔为 61.7 nm; 而当 $N = 5$ 时, 两个界面态的间隔是 34.16 nm.

图 7(b) 给出元胞数 M 对组合结构 PCI(N) + PCII(M) + PCI(N) 中界面态的调控结果. 由图 7(b) 可见, 当 $M = 1$ 时, PCII 的这一个元胞相当于整个 PCI 结构中的缺陷层, 故在带隙中只出现了一

个界面态 (在图中用黑色箭头示出); 当 $M = 6$ 时, 两个界面态趋于重合 (在图中用两个粉色箭头标记), 与图 4 给出的理论计算结果具有相同的特征. 另外从图 7(b) 中可看到各反射光谱在短波长处表现出较多噪声, 这主要是由两方面的原因造成的. 一方面是因为表征用的光谱仪在 400—450 nm 的短波长端信噪比较低; 另一方面是结构元胞数的影响, 元胞数越少, 结构的带隙特征越不明显, 考虑介质的色散, 波长越短的位置, 带隙光谱就越不稳定, 在图 7 给出的实验结果中, $N = 5$ 的样品总元胞数最多, 所以其对应的曲线较为平滑. 综上所述, 通过控制结构元胞数对两个界面态的位置可以实现有效调控, 实验结果充分表明这种调控的可行性.

5 结论

基于传输矩阵法, 计算了一维反转对称光子结构的反射光谱, 研究了由反转对称光子结构构成的

组合结构中界面态的可调控性. 组合结构 PCI + PCII 的带隙内可以产生一个界面态 λ_0 , 在此基础上增加一个 PCI 结构, 构成 PCI + PCII + PCI 结构, 其在一带隙内会产生两个界面态 λ_1, λ_2 . 对于组合结构 PCI + PCII + PCI, 当 PCI, PCII 的元胞数均为 N 时, 随着 N 增加, 两个界面态位置逐渐靠近并趋于 λ_0 , 单个界面态的谱线宽度减小; 若保持两侧 PCI 的元胞数均为 N 不变, 中间 PCII 的元胞数为 M , 随着 M 增加, 两个界面态位置逐渐靠近, 当 $M = 2N$ 时, 两个界面态的距离最近, 在此基础上继续增加 PCII 的元胞数, 两个界面态变为一个, 且界面态的反射率增加, M 足够大时, 带隙内不再表现出界面态特征; 若保持 $M = 2N$, 随着元胞数 N 的增加, 该组合结构第一个界面态位置 λ_1 保持不动, 第二个界面态的位置 λ_2 趋于同第一个界面态位置重合, 且 λ_1 同 PCI + PCII 结构的界面态 λ_0 位置重合. 同时, 实验制备与测试结果充分表明实验结果与理论计算一致, 通过改变一维反转对称组合光子结构的元胞数, 可以对光子结构带隙内界面态的位置实现有效调控. 一维层状组合结构易于制备, 研究结果可以为一维反转对称光子结构中产生界面态的实际应用提供可靠的参考.

参考文献

- [1] Duan X K, Ren J J, Hao H, Zhang Q, Gong Q H, Gu Y 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 144201 (in Chinese) [段雪珂, 任娟娟, 郝赫, 张淇, 龚旗煌, 古英 2019 物理学报 **68** 144201]
- [2] Li L, Cheng Y, Zhu S N 2021 *Physics* **50** 308 (in Chinese) [李林, 程亚, 祝世宁 2021 物理 **50** 308]
- [3] Zhang Y B, Liu H, Cheng H, Tian J G, Chen S Q 2020 *Opto-Electron. Adv.* **3** 200002
- [4] Zhu Y Z 2020 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University) (in Chinese) [朱韵至 2020 博士学位论文 (南京: 南京大学)]
- [5] Deng Z L, Tu Q A, Wang Y J, Wang Z Q, Shi T, Feng Z W, Qiao X C, Wang G P, Xiao S M, Li X P 2021 *Adv. Mater.* **33** 2103472
- [6] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [7] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [8] Gu G C, Li H Q, Chen H T, Chen H, Wu X 2000 *Acta Opt. Sin.* **20** 728 (in Chinese) [顾国昌, 李宏强, 陈洪涛, 陈鸿, 吴翔 2000 光学学报 **20** 728]
- [9] Du G Q, Liu N H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1095 (in Chinese) [杜桂强, 刘念华 2004 物理学报 **53** 1095]
- [10] Biswal A, Kumar R, Nayak C, Dhanalakshmi S 2021 *Optik* **234** 166597
- [11] Liu X J, Ren M L, Pan Q, Zhang X R, Ma J, Wu X Y 2020 *Physica E* **126** 114415
- [12] Taya S A, Doghmosh N, Upadhyay A 2021 *Opt. Quantum Electron.* **53** 35
- [13] Zhang Z R, Long Z W, Yuan Y Q, Diao X F 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 587 (in Chinese) [张正仁, 隆正文, 袁玉群, 刁心峰 2010 物理学报 **59** 587]
- [14] Xu X F, Huang J Y, Zhang H, Guo X Y, Mu S S, Liu Y Q, Zhai N 2021 *Opt. Commun.* **498** 127262
- [15] Tan H Y, Zhou M J, Zhuge L J, Wu X M 2021 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **54** 085106
- [16] Kalozoumis P A, Theocharis G, Achilleos V, Félix S, Richoux O, Pagneux V 2018 *Phys. Rev. A* **98** 023838
- [17] Xiao M, Zhang Z Q, Chan C T 2014 *Phys. Rev. X* **4** 021017
- [18] Gao H F, Zhou X F, Huang X Q 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 044301 (in Chinese) [高慧芬, 周小芳, 黄学勤 2022 物理学报 **71** 044301]
- [19] Liu Q, Sun J D, Sun Y D, Ren Z H, Liu C, Lv J W, Wang F M, Wang L Y, Liu W, Sun T, Chu P K 2020 *Opt. Mater.* **102** 109800
- [20] Feng S, Ren C, Wang W Z, Wang Y Q 2013 *Opt. Commun.* **289** 144
- [21] Liu B W, Hu M L, Song Y J, Chai L, Wang Q Y 2008 *Chin. J. Lasers* **03** 479 (in Chinese) [刘博文, 胡明列, 宋有建, 柴路, 王清月 2008 中国激光 **03** 479]
- [22] Zaghoudi J, Kanzari M 2018 *Optik* **160** 189
- [23] Elshahat S, Abood I, Esmail M S M, Ouyang Z B, Lu C C 2021 *Nanomaterials-Basel* **11** 194
- [24] Gao D 2019 *M. S. Thesis* (Qingdao: Qingdao University of science and technology) (in Chinese) [高冬 2019 硕士学位论文 (青岛: 青岛科技大学)]
- [25] Mao W T, Li Y, Zhao Q L, Teng L H, Wang X 2020 *Chin. J. Lasers* **47** 292 (in Chinese) [毛维涛, 李杨, 赵秋玲, 滕利华, 王霞 2020 中国激光 **47** 292]
- [26] Gao W S, Xiao M, Chan C T, Tam W Y 2015 *Opt. Lett.* **40** 5259

Controllable characteristics of interface states in one-dimensional inverted symmetric photonic structures*

Dai Mei-Qin¹⁾²⁾ Zhang Qing-Yue¹⁾²⁾ Zhao Qiu-Ling¹⁾²⁾†
Wang Mao-Rong¹⁾²⁾ Wang Xia¹⁾²⁾‡

1) (*College of Mathematics and Physics, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China*)

2) (*Shandong Advanced Optoelectronic Materials and Technologies Engineering Laboratory, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China*)

(Received 4 March 2022; revised manuscript received 4 July 2022)

Abstract

Using the transfer matrix method, the tunable characteristics of the interface state generated by one-dimensional photonic structure with inversion symmetry are studied, and the samples are prepared by electron beam evaporation technology for experimental verification. According to the different inversion symmetry centers of unit cell, the inverted symmetric layered photonic structures are divided into two types i.e. PCI and PCII. The calculation results show that for the combined structure composed of PCI and PCII, there is an interface state at a characteristic frequency where the sum of the imaginary parts of the surface impedance of PCI and PCII is equal to zero, and this frequency of the interface state is independent of the number of unit cells. On this basis, if a PCI structure is added to form PCI + PCII + PCI photonic structure, two interface states will be generated in the same band gap, and changing the unit cell number in each or part of individual PCI and PCII structures, the frequencies of two interface states can be regulated. The experimental results show that the regulation of interface state by controlling unit cell number is feasible, which provides a more flexible idea for designing the extremely narrow-band filters and multi-channel filters to meet different application requirements.

Keywords: photonic bandgap material, transfer matrix, electron beam evaporation technology, filter, interface state

PACS: 42.70.Qs, 02.10.Yn, 81.15.-z, 84.30.Vn, 73.20.At

DOI: [10.7498/aps.71.20220383](https://doi.org/10.7498/aps.71.20220383)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11874232, 61905127, 12174211).

† Corresponding author. E-mail: sdqlzhao@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: phwangxia@163.com



一维反转对称光子结构中界面态的可调控特性

代美芹 张清悦 赵秋玲 王茂榕 王霞

Controllable characteristics of interface states in one-dimensional inverted symmetric photonic structures

Dai Mei-Qin Zhang Qing-Yue Zhao Qiu-Ling Wang Mao-Rong Wang Xia

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 204205 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220383

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220383>

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

二维声子晶体中Zak相位诱导的界面态

Zak phase induced interface states in two-dimensional phononic crystals

物理学报. 2022, 71(4): 044301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211642>

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>

预加温处理对双极晶体管过剩基极电流理想因子的影响机制

Effects of pre-irradiated thermal treatment on ideal factor of excess base current in bipolar transistors

物理学报. 2020, 69(1): 018502 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191151>

La施主掺杂SrTiO₃单晶的阻变性能研究

Resistance switching of La doped SrTiO₃ single crystals

物理学报. 2018, 67(18): 187303 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180904>

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>

一种基于束缚态的可调等离子体光子晶体窄带滤波器

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

物理学报. 2021, 70(17): 175201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210241>