doi：10.13413/j.cnki.jdxblxb.2023543

一维反转对称组合光子晶体结构界面态的可调性

刘晓静[1]，阿卜杜赛麦提·依米提[1]，赵东旭[1]，
赵若钦[1]，李 宏[2]，张斯淇[2]，马 季[3]
（1. 吉林师范大学 物理学院，吉林 四平 136000；
2. 吉林工程技术师范学院 数据科学与人工智能学院，长春 130052；
3. 辽宁石油化工大学 理学院，辽宁 抚顺 113001）

摘要：通过电磁波在介质中的传播，以及介质与介质界面处电场和磁场的切线分量的连续条件，分别给出光在介质中传播的传输矩阵以及光在介质界面处的匹配矩阵，从而得到组合结构光子晶体总的传输矩阵，并给出其反射率. 在此基础上，研究具有反转对称组合结构为 $(ABA)^N(BAB)^M$ 的光子晶体界面态，改变介质 A 的折射率系数 n_{a0}、参数 e，厚度 d_a 和周期数 N 与介质 B（葡萄糖溶液）的质量浓度、温度、厚度 d_b 和周期数 M 以及入射角的大小，给出界面态的位置和峰值大小随参数的变化曲线，并研究葡萄糖溶液质量浓度对组合结构 $PC_1+PC_2+PC_1$ 和 $PC_1+PC_2+PC_1+PC_2+PC_1$ 多个界面态的影响. 数值计算结果表明，当改变葡萄糖质量浓度时，可改变界面态的位置和峰值大小，从而实现对界面态的调节.

关键词：光子带隙材料；传输矩阵；匹配矩阵；界面态
中图分类号：O436 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5489(2024)06-1455-09

Tunability of Interfacial States of One-Dimensional Inverted Symmetric Combined Photonic Crystal Structures

LIU Xiaojing[1], ABUDUSAIMAITI Yimiti[1], ZHAO Dongxu[1],
ZHAO Ruoqin[1], LI Hong[2], ZHANG Siqi[2], MA Ji[3]
(1. *College of Physics, Jilin Normal University, Siping* 136000, *Jilin Province, China*;
2. *School of Data Science and Artificial Intelligence, Jilin Engineering Normal University, Changchun* 130052, *China*;
3. *College of Science, Liaoning Petrochemical University, Fushun* 113001, *Liaoning Province, China*)

Abstract: Through the propagation of electromagnetic waves in the medium and the continuous conditions of the tangential components of electric and magnetic fields at the interface between the medium and the medium, we gave the transmission matrix of light propagation in the medium and the matching matrix of light at the interface of the medium, respectively, so as to obtain the total transmission matrix of the combined structure photonic crystal and their reflectance. On this basis, we studied the inverted symmetric combined structures for $(ABA)^N(BAB)^M$ photonic crystal interface states. By changing the refractive index coefficient n_{a0}, parameter e, thickness d_a and period number N of the medium A, as well as the mass concentration of medium B (glucose solution), temperature, the thickness of d_b and period number M, and the size of the incident angle, we gave the location of

收稿日期：2023-12-20.

第一作者简介：刘晓静(1982—)，女，汉族，博士，副教授，从事光子晶体理论的研究，E-mail：xjliu_82@163.com. **通信作者简介**：马 季(1985—)，男，汉族，博士，副教授，从事光子晶体理论的研究，E-mail：maji531@163.com.

基金项目：国家自然科学基金(批准号：62105132)和辽宁省自然科学基金(批准号：22-BS-294).

the interface state and the peak size curve along with the change of these parameters, and studied the effects of the mass concentration of glucose solution on multiple interface states of combined structures $PC_1+PC_2+PC_1$ and $PC_1+PC_2+PC_1+PC_2+PC_1$. The numerical calculation results show that the location of the interface state and peak size can be changed when the mass concentration of glucose is changed, thereby achieving the adjustment of the interface state.

Keywords: photonic bandgap material; transmission matrix; matching matrix; interface state

光子晶体(PCs)是具有折射率、在波长量级上周期性变化的人工微结构，它控制光子的传播方式与半导体控制电子的运动方式类似. 当光在光子晶体中传播时，存在允许和禁止的频率范围，其中被禁止的频率范围称为光子晶体带隙(PBG)[1-2]，它阻止特定频率的光向某些方向传播，与半导体中的电子带隙类似. 在光子晶体中引入点缺陷[3-4]，可在缺陷处产生局域态[5-6]. 对光子晶体的研究已引起人们广泛关注[7-10]. 由光子晶体带隙和局域化特性设计出大量的光学器件，如 Bragg 散射[11]、滤波器[12]、传感器[13]和反射器[14]，光子晶体在激光应用、光通信和光电子电路等领域应用广泛[15-19]. 在光子晶体能带图中，若两条能带相交，且在相交点处色散关系为线性关系时，则该相交点称为光子晶体的 Dirac 点. Dirac 点具有拓扑传输和界面态等性质，将具有对称结构的两种光子晶体拼接在一起即可产生界面态[20-22]，该方法称为 Dirac 点方法. 界面态的特点是光场强度沿垂直于光子晶体界面方向呈指数衰减分布，一维光子晶体的界面态在光通信、低阈值激光器、高效反射镜和可调谐滤波等领域应用广泛.

本文通过电磁波在介质中的传播，以及介质与介质界面处电场和磁场切线分量的连续条件，分别给出光在介质中传播的传输矩阵，以及光在介质界面处的匹配矩阵，从而得到组合结构光子晶体总的传输矩阵，并给出其反射率. 在此基础上，研究具有反转对称组合结构为 $(ABA)^N(BAB)^M$ 的光子晶体界面态，其中介质 B 为葡萄糖溶液，其折射率是葡萄糖溶液质量浓度的函数[23]. 数值计算结果表明，当改变葡萄糖溶液质量浓度时，可改变界面态的位置和峰值大小，从而实现对界面态的调节. 此外，改变介质 A 的折射率系数 n_{a0}、参数 e、厚度 d_a 和周期数 N 与介质 B 的质量浓度 ρ、温度 t、厚度 d_b 和周期数 M 以及入射角的大小，给出界面态的位置和峰值大小随参数的变化曲线，所得结论可为光学器件的设计提供理论依据.

1 一维光子晶体中的传输

对于两种折射率不同的 A 和 B 介质层，将其交替排列组成 $(AB)^N$ 型一维光子晶体结构，当一束光通过一维光子晶体结构传输时，将光的传输分为在介质内传输和在两种不同介质界面处的传输.

对自由电磁场，其平面波一个解的形式为

$$\boldsymbol{E}=\boldsymbol{E}_0\,\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}-\omega t)}, \tag{1}$$

一维反转对称光子结构两种类型及其原胞示意图如图 1 所示. 将 $(ABA)^N$ 型结构光子晶体在 xz 平面内垂直 z 轴放置，若光束在光子晶体内传播时与法线夹角为 θ，则有

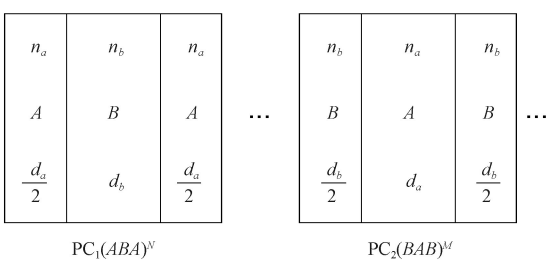


图 1 一维反转对称光子结构两种类型及其原胞示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two types of one-dimensional inverted symmetric photon structures and their primitive cells

$$\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}=k_x x+k_z z=kx\sin\theta+kz\cos\theta. \tag{2}$$

设光束在第 n 层介质层中沿 z 轴正、负方向传输，将式(2)代入式(1)中得到电磁波在第 n 层介质中沿 z 轴正、负方向传播时光波电场分别为

$$\boldsymbol{E}_n^+=\left|\boldsymbol{E}_n^+\right|\mathrm{e}^{-\mathrm{i}(\omega t-k_n z\cos\theta_n+\varphi)}, \tag{3}$$

$$\boldsymbol{E}_n^-=\left|\boldsymbol{E}_n^-\right|\mathrm{e}^{-\mathrm{i}(\omega t+k_n z\cos\theta_n+\varphi)}, \tag{4}$$

其中 ω 表示角频率，k_n 为第 n 层内光子晶体波矢的大小，在第 n 层介质中，电磁波在介质层内从入射处到出射处传输的传输矩阵为

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{E}_{n1}^{+} \\ \boldsymbol{E}_{n2}^{-} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathrm{e}^{-\mathrm{i}k_n d_n \cos\theta_n} & 0 \\ 0 & \mathrm{e}^{\mathrm{i}k_n d_n \cos\theta_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{E}_{n2}^{+} \\ \boldsymbol{E}_{n2}^{-} \end{pmatrix}, \tag{5}$$

令

$$\boldsymbol{P}(k_n, d_n) = \begin{pmatrix} \mathrm{e}^{-\mathrm{i}k_n d_n \cos\theta_n} & 0 \\ 0 & \mathrm{e}^{\mathrm{i}k_n d_n \cos\theta_n} \end{pmatrix}, \tag{6}$$

则

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{E}_{n1}^{+} \\ \boldsymbol{E}_{n1}^{-} \end{pmatrix} = \boldsymbol{P}(k_n, d_n) \begin{pmatrix} \boldsymbol{E}_{n2}^{+} \\ \boldsymbol{E}_{n2}^{-} \end{pmatrix}, \tag{7}$$

其中 $\boldsymbol{E}_{n1}^{+}$ 和 $\boldsymbol{E}_{n1}^{-}$ 分别表示在第 n 层光子晶体介质内入口处的入射电场和反射电场，$\boldsymbol{E}_{n2}^{+}$ 和 $\boldsymbol{E}_{n2}^{-}$ 为第 n 层介质内出口处的入射电场和反射电场，d_n 为第 n 层介质的厚度，则 $\boldsymbol{P}(k_n, d_n)$ 为光波在第 n 层介质的介质内部传输矩阵.

当光波在 A 和 B 两种介质之间的界面处传播时，定义第 n 层介质界面处在分界面Ⅰ左侧的表面总电场和总磁场分别为 E_n 和 H_n，第$(n+1)$层介质界面处在分界面Ⅰ左侧表面总电场和总磁场分别为 E_{n+1} 和 H_{n+1}. 分界面Ⅰ左侧入射和反射的电场和磁场分别为 $E_n^{+}, H_n^{+}, E_n^{-}, H_n^{-}$，分界面Ⅰ右侧入射和反射的电场和磁场分别为 $E_{n+1}^{+}, H_{n+1}^{+}, E_{n+1}^{-}, H_{n+1}^{-}$. 由 Maxwell 边界条件知，在横电(TE)波中，介质在界面处传输时左右表面电磁场切向分量是连续的，在分界面Ⅰ处有

$$\begin{cases} E_n = E_{n+1} = E_n^{+} + E_n^{-} = E_{n+1}^{+} + E_{n+1}^{-}, \\ H_n = H_{n+1} = H_n^{+}\cos\theta_n - H_n^{-}\cos\theta_n = H_{n+1}^{+}\cos\theta_{n+1} - H_{n+1}^{-}\cos\theta_{n+1}. \end{cases} \tag{8}$$

将 $H_i = \sqrt{\varepsilon_0/\mu_0}\, E_i n_i$ 代入式(8)可得

$$E_n^{+} n_n \cos\theta_n - E_n^{-} n_n \cos\theta_n = E_{n+1}^{+} n_{n+1} \cos\theta_{n+1} - E_{n+1}^{-} n_{n+1} \cos\theta_{n+1}, \tag{9}$$

由式(8)和式(9)解得

$$E_n^{-} = \frac{1}{2} E_{n+1}^{+} \left(1 - \frac{n_{n+1}\cos\theta_{n+1}}{n_n \cos\theta_n}\right) + \frac{1}{2} E_{n+1}^{-} \left(1 + \frac{n_{n+1}\cos\theta_{n+1}}{n_n \cos\theta_n}\right), \tag{10}$$

$$E_n^{+} = \frac{1}{2} E_{n+1}^{+} \left(1 + \frac{n_{n+1}\cos\theta_{n+1}}{n_n \cos\theta_n}\right) + \frac{1}{2} E_{n+1}^{-} \left(1 - \frac{n_{n+1}\cos\theta_{n+1}}{n_n \cos\theta_n}\right), \tag{11}$$

解得

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{E}_{n1}^{+} \\ \boldsymbol{E}_{n1}^{-} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + \dfrac{n_{n+1}\cos\theta_{n+1}}{n_n \cos\theta_n} & 1 - \dfrac{n_{n+1}\cos\theta_{n+1}}{n_n \cos\theta_n} \\ 1 - \dfrac{n_{n+1}\cos\theta_{n+1}}{n_n \cos\theta_n} & 1 + \dfrac{n_{n+1}\cos\theta_{n+1}}{n_n \cos\theta_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{E}_{n+1}^{+} \\ \boldsymbol{E}_{n+1}^{-} \end{pmatrix} = \boldsymbol{M}_{n\to n+1} \begin{pmatrix} \boldsymbol{E}_{n+1}^{+} \\ \boldsymbol{E}_{n+1}^{-} \end{pmatrix}, \tag{12}$$

则光从第 n 层介质到第$(n+1)$层介质界面处的匹配矩阵为

$$\boldsymbol{M}_{n\to n+1} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + \dfrac{n_{n+1}\cos\theta_{n+1}}{n_n \cos\theta_n} & 1 - \dfrac{n_{n+1}\cos\theta_{n+1}}{n_n \cos\theta_n} \\ 1 - \dfrac{n_{n+1}\cos\theta_{n+1}}{n_n \cos\theta_n} & 1 + \dfrac{n_{n+1}\cos\theta_{n+1}}{n_n \cos\theta_n} \end{pmatrix}, \tag{13}$$

其中 n_n 和 n_{n+1} 分别表示第 n 层和第$(n+1)$层光子晶体介质的折射率.

PC_1 结构(图 1)一维反转对称原胞的传输矩阵为

$$\boldsymbol{T}_{aba} = \boldsymbol{P}\left(k_a, \frac{d_a}{2}\right) \cdot \boldsymbol{M}_{ab} \cdot \boldsymbol{P}(k_b, d_b) \cdot \boldsymbol{M}_{ba} \cdot \boldsymbol{P}\left(k_a, \frac{d_a}{2}\right), \tag{14}$$

PC_2 结构一维反转对称原胞的传输矩阵为

$$\boldsymbol{T}_{bab} = \boldsymbol{P}\left(k_b, \frac{d_b}{2}\right) \cdot \boldsymbol{M}_{ba} \cdot \boldsymbol{P}(k_a, d_a) \cdot \boldsymbol{M}_{ab} \cdot \boldsymbol{P}\left(k_b, \frac{d_b}{2}\right). \tag{15}$$

对于分别具有 N, M 周期的 PC_1 和 PC_2 组合结构 PC_1+PC_2，其总传输矩阵为

$$\boldsymbol{H} = \boldsymbol{H}_{PC_1+PC_2} = \boldsymbol{M}_{ba} \cdot \boldsymbol{T}_{aba}^{N} \cdot \boldsymbol{M}_{ab} \cdot \boldsymbol{T}_{bab}^{M} \cdot \boldsymbol{M}_{ba}. \tag{16}$$

2 一维光子晶体中的透射率和反射率

若式(16)的总传输矩阵为

$$\boldsymbol{H}=\begin{pmatrix}\boldsymbol{H}_{11} & \boldsymbol{H}_{12}\\ \boldsymbol{H}_{21} & \boldsymbol{H}_{22}\end{pmatrix}, \tag{17}$$

则光波通过 PC_1+PC_2 组合结构光子晶体后，入射和透射光波的电场满足

$$\begin{pmatrix}\boldsymbol{E}_0^+\\ \boldsymbol{E}_0^-\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\boldsymbol{H}_{11} & \boldsymbol{H}_{12}\\ \boldsymbol{H}_{21} & \boldsymbol{H}_{22}\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}\boldsymbol{E}_{N+1}^+\\ \boldsymbol{E}_{N+1}^-\end{pmatrix}. \tag{18}$$

当入射区域和透射区域均为空气时，$E_{N+1}^-=0$，光通过该组合结构光子晶体的反射系数 r 为

$$r=\frac{E_0^-}{E_0^+}=\frac{H_{21}}{H_{11}}, \tag{19}$$

进一步得到反射率为

$$R=|r|^2=\left|\frac{H_{21}}{H_{11}}\right|^2. \tag{20}$$

3 一维组合结构光子晶体界面态的数值分析

在图1的组合结构光子晶体结构中，介质 A 为色散介质，其折射率 $n_a=n_{a0}\left(1+\frac{e}{\lambda^2}\right)$，厚度为 d_a，介质 B 为葡萄糖溶液，其折射率[23] $n_b=1.3356+(1.533\times10^{-3})\rho-(9.0\times10^{-5})\rho^2-(1.2647\times10^{-4})t-(4.0\times10^{-8})t^2$，其中 ρ 为葡萄糖溶液的质量浓度，t 为温度. 在数值计算中，初始参数取为：周期数 $N=10$，$M=10$，$\rho=30$ mg/mL，$t=20$ ℃，介质厚度 $d_a=220$ nm，$d_b=10$ nm，介质 A 折射率系数 $n_{a0}=1.35$，折射率参数 $e=0.0056$，入射角 $\theta=0$，可得到图2所示的反射谱.

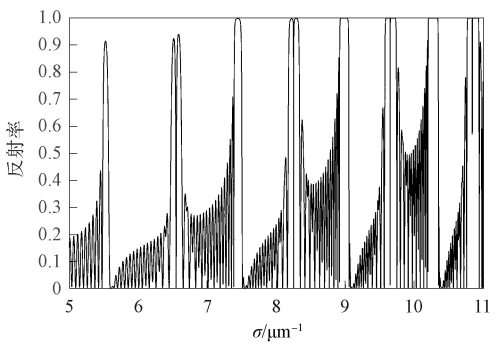


图2 一维反转对称组合结构的反射谱

Fig. 2 Reflection spectra of one-dimensional inverted symmetric combined structures

由图2可见，在第2,4,6,8带隙中出现透射峰，即界面态，在第3,5,7带隙中未出现界面态. 下面以图2中第3个界面态为例，研究各参数变化对界面态的影响.

葡萄糖溶液温度对界面态的影响如图3所示，其中(A)～(C)对应的温度分别为20,25,30 ℃，其他参数均为初始值，由图3可见，温度对界面态的位置和峰值大小影响较小.

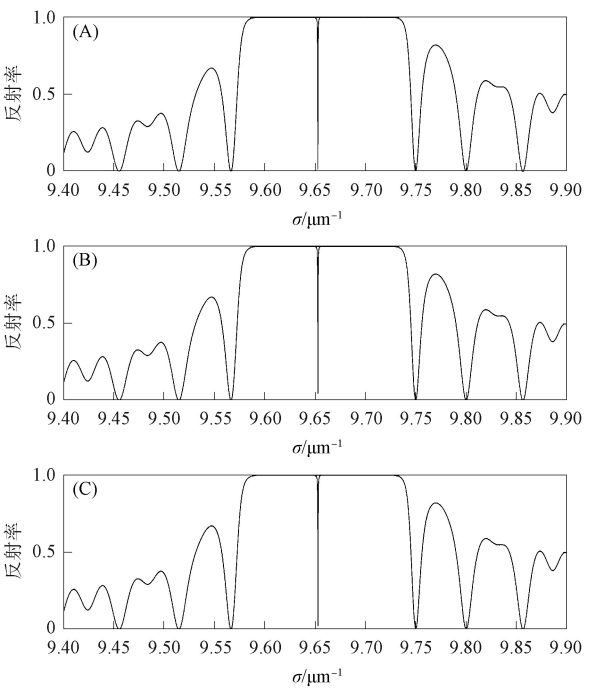


图3 葡萄糖溶液温度对界面态的影响

Fig. 3 Effect of glucose solution temperature on interface states

葡萄糖溶液质量浓度对界面的影响如图4所示，其中(A)～(F)对应的葡萄糖溶液质量浓度分别为20,30,40,50,60,70 mg/mL，其他参数均为初始值. 由图4可见，随着葡萄糖溶液质量浓度的增加，界面态的位置向右移动即蓝移，且界面态的峰值变小. 因此，通过改变葡萄糖溶液质量浓度即可

实现对界面态的调节.

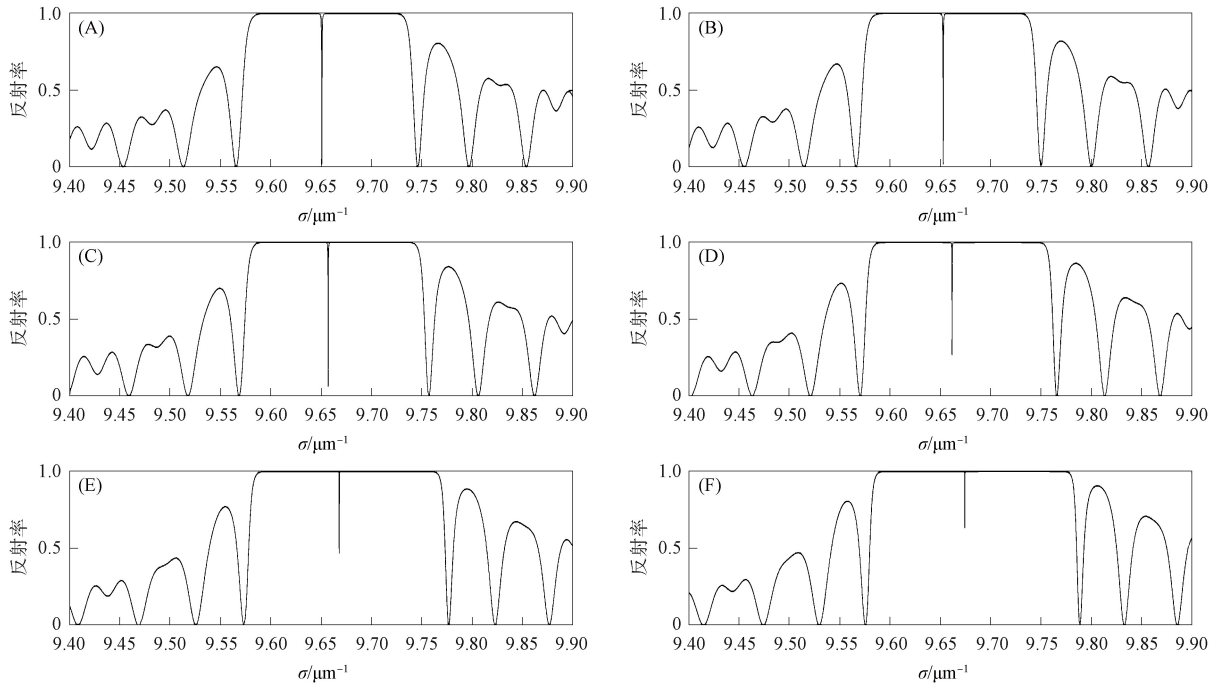


图 4　葡萄糖溶液质量浓度对界面态的影响

Fig. 4　Effect of mass concentration of glucose solution on interface states

折射率参数 e 对界面的影响如图 5 所示，其中(A)～(C)对应的参数 e 分别为 0.005 6，0.005 3，0.005 0，其他参数均为初始值. 由图 5 可见，随着 e 的变小，界面态位置向右移动，峰值基本不变. 因此，通过改变参数 e 可实现界面态位置的调整.

介质 A 折射率系数对界面态的影响如图 6 所示，其中(A)～(C)对应的 n_{a0} 分别为 1.35，1.37，1.39，其他参数均为初始值. 由图 6 可见，随着折射率系数的变大，界面态位置向左移动，峰值基本不

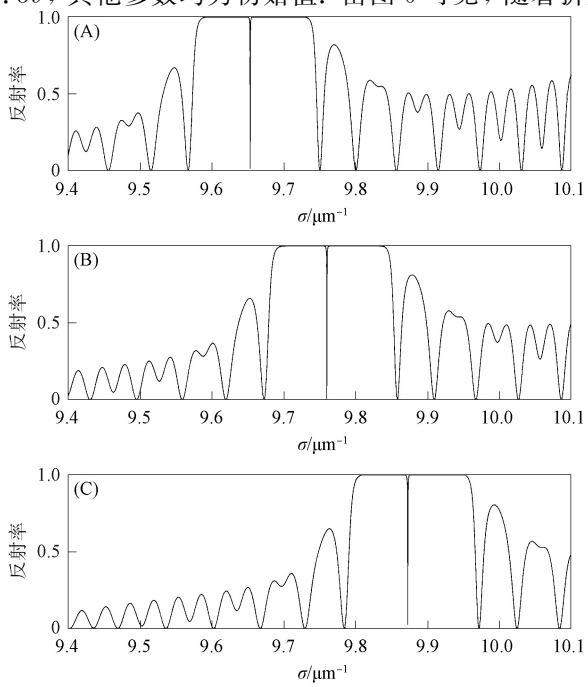


图 5　折射率参数 e 对界面态的影响

Fig. 5　Effect of refractive index parameter e on interface states

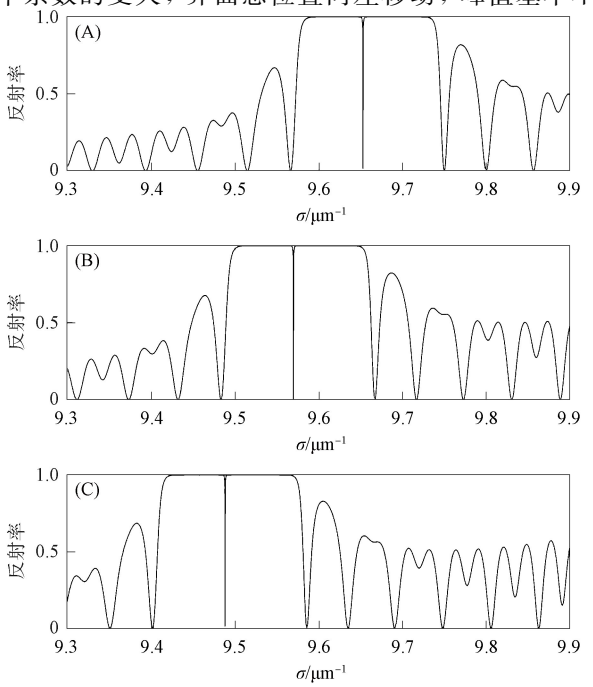


图 6　介质 A 折射率系数对界面态的影响

Fig. 6　Effect of refractive index coefficient of medium A on interface states

变. 因此，通过改变介质 A 折射率的系数变化，可实现界面态位置的调整.

介质 A 厚度对界面态的影响如图 7 所示，其中(A)～(C)对应的 d_a 值分别为 220,222,224 nm，其他参数均为初始值. 由图 7 可见，随着 d_a 的变大，界面态位置向左移动，峰值基本不变. 因此，通过改变介质 A 的厚度可实现界面态位置的调整.

介质 B 厚度对界面态的影响如图 8 所示，其中(A)～(C)对应的 d_b 值分别为 10,12,14 nm，其他参数均为初始值. 由图 8 可见，随着 d_b 的变大，界面态位置向左移动，峰值变小. 因此，通过改变介质 B 的厚度可实现界面态位置和峰值的调整.

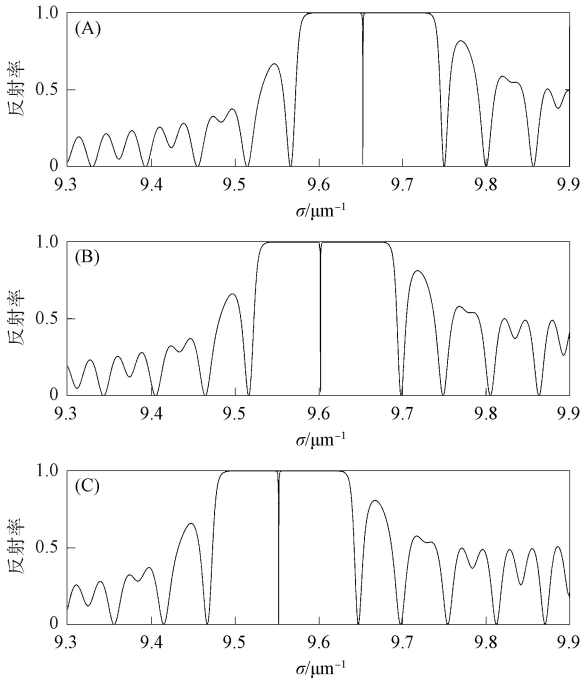


图 7 介质 *A* 厚度对界面态的影响

Fig. 7 Effect of thickness of medium *A* on interface states

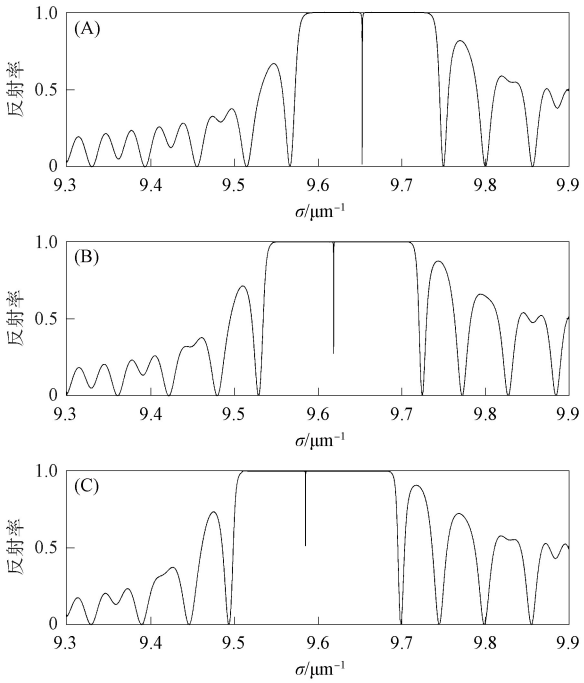


图 8 介质 *B* 厚度对界面态的影响

Fig. 8 Effect of thickness of medium *B* on interface states

周期数 M 对界面态的影响如图 9 所示，其中(A)～(C)对应的周期数 M 分别为 10,11,12，其他参数均为初始值. 由图 9 可见，随着 M 的变大，界面态位置基本不变，但峰值变小. 因此，通过改变周期数 M 可实现界面态峰值的调整.

周期数 N 对界面态的影响如图 10 所示，其中(A)～(C)对应的周期数 N 分别为 10,11,12，其他参数均为初始值，由图 10 可见，随着 N 的变大，界面态位置不变，但峰值变小. 因此，通过改变周期数 N 可实现界面态峰值的调整.

入射角对界面态的影响如图 11 所示，其中(A)～(E)对应的入射角分别为 0°,10°,20°,30°,40°，其他参数均为初始值. 由图 11 可见，随着入射角的变大，界面态向右移动，峰值变化较小. 因此，通过改变入射角可实现界面态位置的调整.

葡萄糖溶液质量浓度对组合结构为 $PC_1+PC_2+PC_1$ 多个界面态的影响如图 12 所示，其中(A)～(D)对应的葡萄糖溶液质量浓度分别为 20,50,70,80 mg/mL. 在 PC_1 光子晶体中介质 A 的厚度 $d_a/2=15$ nm，介质 B 的厚度 $d_b=20$ nm，在 PC_2 光子晶体中介质 A 的厚度 $d_a=30$ nm，介质 B 的厚度 $d_b/2=10$ nm，介质 A 折射率系数 $n_{a0}=1.55$，其他参数均为初始值. 由图 12 可见，该结构出现 2 个界面态，随着葡萄糖溶液质量浓度的增加，界面态的位置向右移动即蓝移，且界面态的峰值变小，界面态之间的距离变小. 因此通过改变葡萄糖溶液质量浓度即可实现对多个界面态的调节.

葡萄糖溶液质量浓度对组合结构为 $PC_1+PC_2+PC_1+PC_2+PC_1$ 多个界面态的影响如图 13 所示，其中(A)～(D)对应的葡萄糖溶液质量浓度分别为 20,50,70,80 mg/mL. 在 PC_1 光子晶体中介质 A 的厚度 $d_a=15$ nm，介质 B 的厚度 $d_b=20$ nm，在 PC_2 光子晶体中介质 A 的厚度 $d_a=30$ nm，介质 B 的

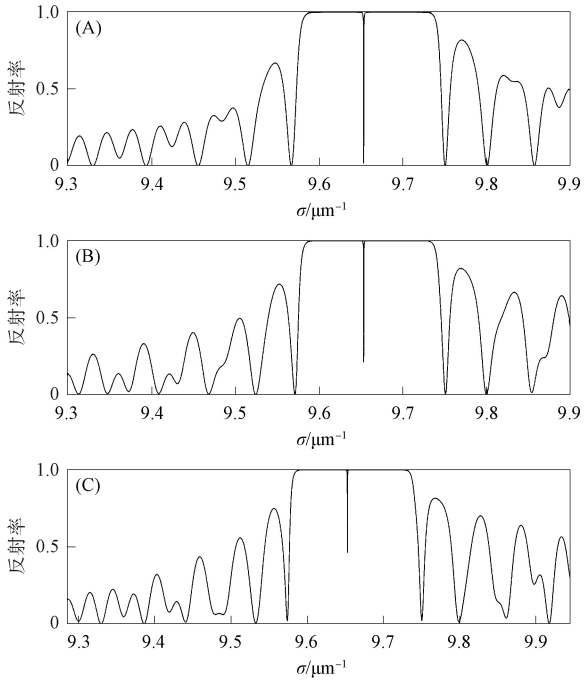


图 9　周期数 M 对界面态的影响

Fig. 9　Effect of period number M on interface states

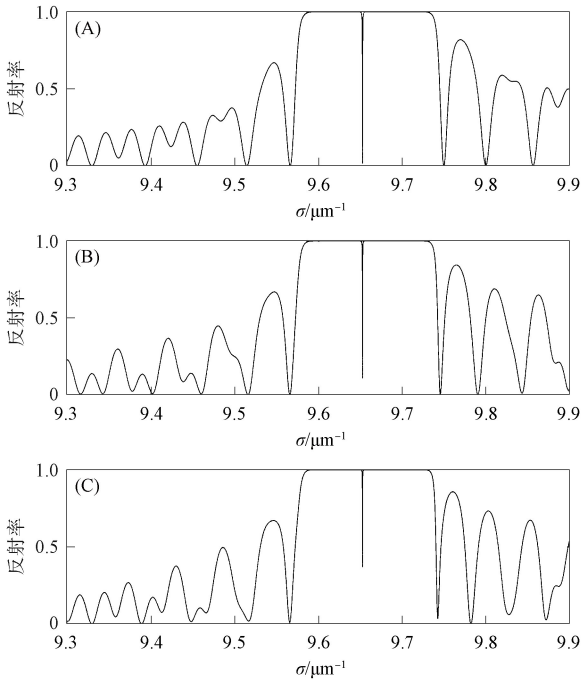


图 10　周期数 N 对界面态的影响

Fig. 10　Effect of period number N on interface states

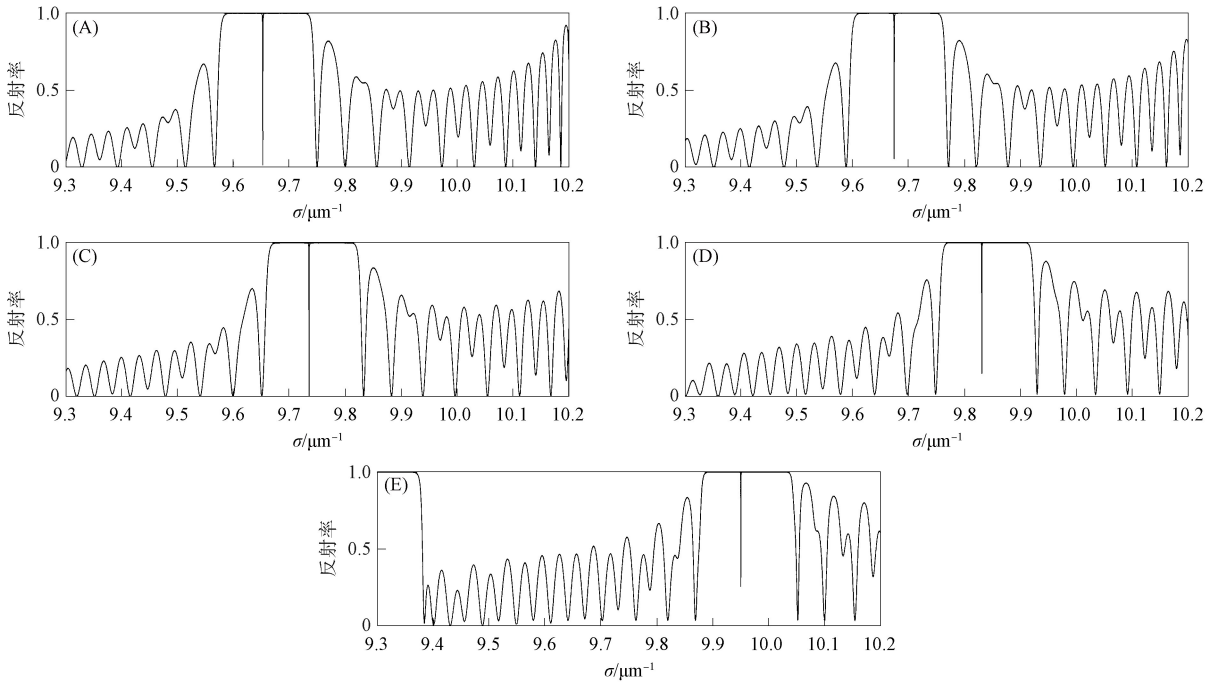


图 11　入射角对界面态的影响

Fig. 11　Effect of incident angle on interface states

厚度 $d_b=10$ nm，介质 A 折射率系数 $n_{a0}=1.55$，其他参数均为初始值. 由图 13 可见，该结构出现 4 个界面态，随着葡萄糖溶液质量浓度的增加，界面态的位置向右移动即蓝移，且界面态的峰值变小，界面态之间的距离变小. 因此，通过改变葡萄糖溶液质量浓度即可实现对多个界面态的调节.

综上，本文基于传输矩阵法计算了一维反转对称组合结构的反射率，在此基础上研究了组合结构 $(ABA)^N(BAB)^M$ 的光子晶体界面态，并研究了葡萄糖溶液质量浓度对组合结构 $PC_1+PC_2+PC_1$ 和 $PC_1+PC_2+PC_1+PC_2+PC_1$ 多个界面态的影响. 数值计算结果表明：随着葡萄糖溶液质量浓度的增加，界面态的位置向右移动即蓝移，且界面态的峰值变小，因此通过改变葡萄糖溶液质量浓度即可实

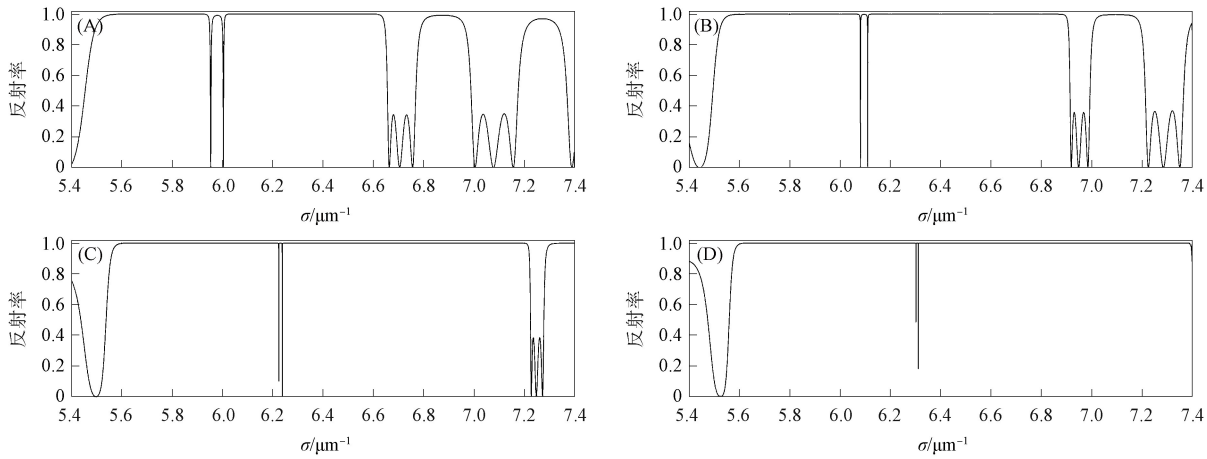


图 12 葡萄糖溶液质量浓度对组合结构为 $PC_1+PC_2+PC_1$ 多个界面态的影响

Fig. 12 Effect of mass concentration of glucose solution on multiple interface states of combined structure $PC_1+PC_2+PC_1$

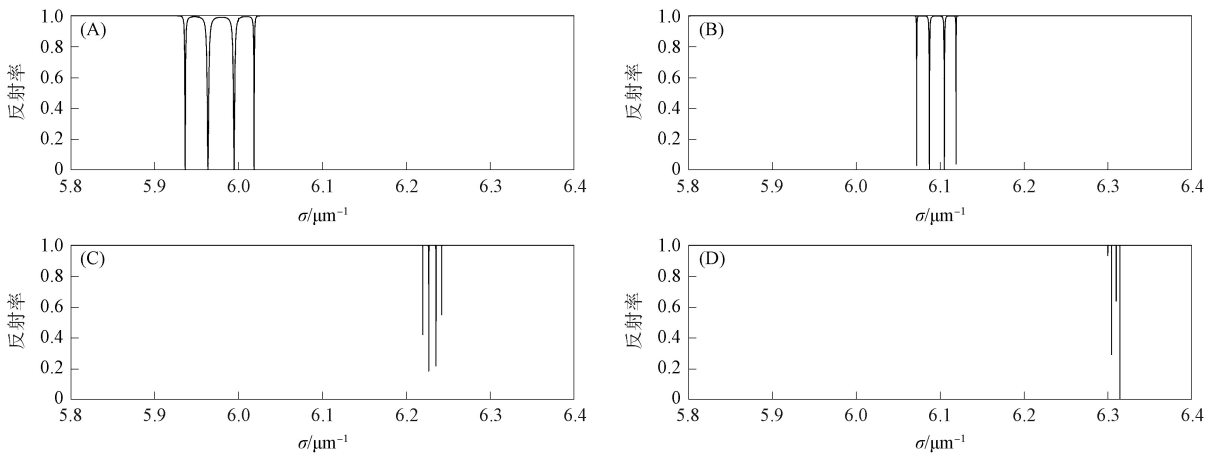


图 13 葡萄糖溶液质量浓度对组合结构为 $PC_1+PC_2+PC_1+PC_2+PC_1$ 多个界面态的影响

Fig. 13 Effect of mass concentration of glucose solution on multiple interface states of combined structure $PC_1+PC_2+PC_1+PC_2+PC_1$

现对界面态的调节；随着介质 A 折射率参数 e 的变小，界面态位置向右移动，峰值基本不变；随着折射率系数 n_{a0} 的变大，界面态位置向左移动，但峰值基本不变；随着介质 A 和 B 厚度 d_a 和 d_b 的变大，界面态位置向左移动，峰值基本不变；随着周期数 M 和 N 的变大，界面态位置不变，但峰值变小；随着入射角的变大，界面态向右移动，峰值变化较小. 因此，通过改变以上参数即可实现界面态位置和峰值的调节. 所得结论可为光学器件的设计提供理论依据.

参 考 文 献

[1] KHALKHALI T F, REZAEI B, KALAFI M. Enlargement of Absolute Photonic Band Gap in Modified 2D Anisotropic Annular Photonic Crystals [J]. Optics Communications, 2011, 284(13): 3315-3322.

[2] HO K M, CHAN C T, SOUKOULIS C M. Existence of a Photonic Gap in Periodic Dielectric Structures [J]. Physical Review Letters, 1990, 65(25): 3152-3155.

[3] BORDAS F, STEEL M J, SEASSAL C, et al. Confinement of Band-Edge Modes in a Photonic Crystal Slab [J]. Optics Express, 2007, 15(17): 10890-10902.

[4] NEDEL P, LETARTRE X, SEASSAL C, et al. Design and Investigation of Surface Addressable Photonic Crystal Cavity Confined Band Edge Modes for Quantum Photonic Devices [J]. Optics Express, 2011, 19(6): 5014-5025.

[5] RAO V S C M, HUGHES S. Single Quantum Dot Spontaneous Emission in a Finite-Size Photonic Crystal Waveguide: Proposal for an Efficient "On Chip" Single Photon Gun [J]. Physical Review Letters, 2007, 99(19): 193901-1-193901-4.

[6] LECAMP G, LALANNE P, HUGONIN J P. Very Large Spontaneous-Emission β Factors in Photonic-Crystal Waveguides [J]. Physical Review Letters, 2007, 99(2): 023902-1-023902-4.

[7] YABLONOVITCH E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics [J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059-2062.

[8] JOHN S. Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices [J]. Physical Review Letters, 1987, 58(23): 2486-2489.

[9] JOANNOPOULOS J D, VILLENEUVE P R, FAN S. Photonic Crystals: Putting a New Twist on Light [J]. Nature, 1997, 386: 143-149.

[10] ABOURADDY A F, BAYINDIR M, BENOIT G, et al. Towards Multimaterial Multifunctional Fibres That See, Hear, Sense and Communicate [J]. Nature Materials, 2007, 6(5): 336-347.

[11] ELSAYED H A, EL-NAGGAR S A, ALY A H. Thermal Properties and Two-Dimensional Photonic Band Gaps [J]. Journal of Modern Optics, 2014, 61(5): 385-389.

[12] ALY A H, SABRA W, ELSAYED H A. Cutoff Frequency in Metamaterials Photonic Crystals within Terahertz Frequencies [J]. International Journal of Modern Physics B, 2017, 31(15): 1750123-1-1750123-8.

[13] ALY A H, EL-NAGGAR S A, ELSAYED H A. Tunability of Two Dimensional N-Doped Semiconductor Photonic Crystals Based on the Faraday Effect [J]. Optics Express, 2015, 23(11): 15038-15046.

[14] KNIGHT J C, BROENG J, BIRKS T A, et al. Photonic Band Gap Guidance in Optical Fibers [J]. Science, 1998, 282: 1476-1478.

[15] CHEN Y Y, HUANG Z M, SHI J L, et al. Frequency Bands of Negative Refraction in Finite One-Dimensional Photonic Crystals [J]. Chinese Physics B, 2007, 16(1): 173-178.

[16] LIU S Y, HAO T, FANG K J. Optomechanical Crystal with Bound States in the Continuum [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 4881-1-4881-16.

[17] JIANG J Q, CHEN M K, FAN J A. Deep Neural Networks for the Evaluation and Design of Photonic Devices [J]. Nature Reviews Materials, 2021, 6(8): 679-700.

[18] LI S Y, ZHOU C B, LIU T T, et al. Symmetry-Protected Bound States in the Continuum Supported by All-Dielectric Metasurfaces [J]. Physical Review A, 2019, 100: 063803-1-063803-6.

[19] AZZAM S I, KILDISHEV A V. Photonic Bound States in the Continuum: From Basics to Applications [J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9(1): 2001469-1-2001469-13.

[20] 任明丽，韩梦，刘晓静，等. 一维光子晶体中的几率密度和拓扑相 [J]. 吉林大学学报(理学版)，2021，59(6)：1532-1538. (REN M L, HAN M, LIU X J, et al. Probability Density and Topological Phases in One-Dimensional Photonic Crystals [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2021, 59(6): 1532-1538.)

[21] 韩梦，李宏，张斯淇，等. 一维函数光子晶体的界面态 [J]. 吉林大学学报(理学版)，2023，61(3)：681-686. (HAN M, LI H, ZHANG S Q, et al. Interface States of One-Dimensional Functional Photonic Crystal [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2023, 61(3): 681-686.)

[22] KALOZOUMIS P A, THEOCHARIS G, ACHILLEOS V, et al. Finite-Size Effects on Topological Interface States in One-Dimensional Scattering Systems [J]. Physical Review A, 2018, 98(2): 023838-1-023838-7.

[23] TAN C Y, HUANG Y X. Dependence of Refractive Index on Concentration and Temperature in Electrolyte Solution, Polar Solution, Nonpolar Solution, and Protein Solution [J]. Journal of Chemical Engineering Data, 2015, 60(10): 2827-2833.

(责任编辑：王　健)