

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210089

基于光子晶体的氯化钠溶液浓度传感研究*

梅永^{1,2,3,4} 朱飞宏⁵ 庄建军⁴

(1.南京信息工程大学大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044; 2.南京信息工程大学江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室 南京 210044; 3.南京信息工程大学环境科学与工程学院 南京 210044; 4.南京信息工程大学工程训练中心 南京 210044; 5.南京信息工程大学长望学院 南京 210044)

摘要: 为了得出光子晶体缺陷透射峰位置与溶液折射率及溶液浓度的关系,本文提出一种利用氯化钠溶液构建缺陷层的一维光子晶体传感模型,采用传输矩阵法计算和分析了缺陷峰波长与氯化钠溶液浓度之间的关系。结果表明,缺陷峰波长与溶液折射率及其氯化钠浓度呈正比关系,利用该传感模型测量溶液浓度的灵敏度为 0.57 nm/%。本文提出的一维光子晶体传感模型具有灵敏度高、受温度影响小、可在线测量等特点,为实际光子晶体传感器的设计提供了理论参考。

关键词: 一维光子晶体;缺陷模;传输矩阵;溶液浓度

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.630

Study on concentration sensing of sodium chloride solution based on photonic crystal

Mei Yong^{1,2,3,4} Zhu Feihong⁵ Zhuang Jianjun⁴

(1. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control (AEMPC), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 4. Engineering Training Center, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 5. Chang Wang School of Honors, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to obtain the relationship between the position of the transmission peak of the photonic crystal defect and the refractive index (concentration) of the solution, a one-dimensional photonic crystal sensor model of defect layer constructed by sodium chloride solution is proposed. The relationship between defect peak wavelength and concentration of sodium chloride solution is calculated and analyzed by transfer matrix method. The results show that the wavelength of defect peak is proportional to the refractive index of solution and the concentration of sodium chloride. The sensitivity of solution concentration measured by the sensor model is 0.57 nm/%. The one-dimensional defect photonic crystal sensor model proposed in this paper has the advantages of high sensitivity, low temperature influence and real-time detection, which provides a theoretical reference for the design of practical photonic crystal sensors.

Keywords: one dimensional photonic crystal; defect mode; transfer matrix; solution concentration

0 引言

在海水淡化过程控制中,需要对排放水的盐浓度进行实时检测^[1-2]。因此,研究氯化钠溶液浓度的实时测量方法具有十分重要的意义和应用价值^[3-5]。

当前,测量氯化钠溶液浓度的方法主要包括物理蒸馏

法、多晶硅纳米线传感法^[6]、近红外光谱法^[7]、微波传感法^[8]等。针对物理蒸馏法,其操作过程复杂耗时,难以实现动态或在线测量;针对多晶硅纳米线传感法,Kan等^[6]采用自顶向下技术设计了用于氯化钠浓度测量的多晶硅纳米线传感器,该传感器具有一定的稳定性和高灵敏度,但其响应速度较慢,仍然不利于测量可能发生实时变化的溶液浓度;

收稿日期:2022-05-24

* 基金项目:江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室开放基金(KHK1902)、中国气象局软科学项目(2022ZZXM21) 资助

陈剑虹等^[7]利用近红外光谱技术,通过测量选定波长下氯化钠溶液吸光度值,设计了氯化钠溶液浓度检测系统,该检测方法的测量范围具有一定局限性,且在温度 $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $41\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上区域的检测稳定性不高;杨晓东等^[8]设计了一种利用开口同轴探针耦合方式的传感器,基于溶液介电常数对微波传输特性的影响,得到了溶液浓度与反射系数之间的关系。利用传输方法测得的结果受温度影响较大,因品质因数较低,从而导致灵敏度较差。

近年来,随着光纤技术^[9-12]和光电检测技术^[13-14]的发展,利用其来进行溶液浓度检测受到广泛关注。其中,利用缺陷光子晶体作为溶液浓度测量的传感器设计受到广泛关注。将待测氯化钠溶液设计为一维光子晶体的缺陷层,利用传输矩阵法^[15-16]对设计的一维缺陷光子晶体传输特性进行了计算,并建立了传输系数中的缺陷透射系数与待测浓度之间的关系,并建立了拟合函数模型。因此,通过光谱仪器测量到一维缺陷光子晶体缺陷透射系数,即可利用该函数模型反演出缺陷层待测氯化钠溶液的浓度,实现对氯化钠浓度实时、非接触和精准测量。

1 结构模型和计算方法

图1所示为设计的一维缺陷光子晶体模型,由两种不同的介电材料周期性交迭构成,中间层为缺陷层。光子的禁带带宽与两种介电材料的折射率或介电常数比值呈现正相关性。为了获得具有一定带宽的光子禁带,选择二氧化硅(SiO_2)作为低折射率组分材料,记为A,其化学和力学性质稳定,价格低廉;选择二氧化钛(TiO_2)作为高折射率组分材料,记为B,其化学性质稳定,不溶于水,适用于对氯化钠溶液的封装;选择待测氯化钠溶液作为缺陷层材料,记为C。假定设计的一维缺陷光子晶体模型为对称结构,图1所示的结构可标记为 $(\text{AB})^P\text{C}(\text{BA})^P$, P 为缺陷层前后两种介质排列的周期数。

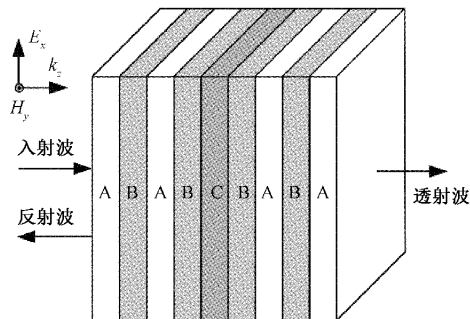


图1 一维缺陷型光子晶体结构示意图

SiO_2 层的介电常数记为 ϵ_A ,厚度记为 d_A ; TiO_2 层的介电常数记为 ϵ_B ,厚度记为 d_B ,则一维光子晶体的周期为 $d = d_A + d_B$ 。为了满足光子晶体布拉格散射条件,单组分材料层的光学厚度设计为 $\lambda_0/4$,其中, λ_0 为光子晶体的中

心工作波长,即 $\sqrt{\epsilon_A} \cdot d_A = \sqrt{\epsilon_B} \cdot d_B = \lambda_0/4$,不考虑 SiO_2 和 TiO_2 在近红外波段的色散效应^[17],二者相对介电常数分别为 $\epsilon_A = 3.3409$, $\epsilon_B = 6.2001$ 。假定待测氯化钠溶液的介电常数为 ϵ_C ,其为氯化钠溶液浓度 S 和温度 T 的函数,即 $\epsilon_C = \epsilon_C(S, T)$ 。本文采用文献[18]给出的经验方程来描述氯化钠溶液浓度与折射率关系:

$$S = a_0 + a_1 n + a_2 n^2 + a_3 n^3 + a_4 n^4 + a_5 n^5 \quad (1)$$

为了检测一维缺陷型光子晶体在近红外波段的透射频谱,将图1所示的待测传感样品与PG4000光谱仪组成如图2所示的测量装置,其主要包括红外光谱发射与接收器,PG4000光谱分析仪等。在测量过程中,将一维光子晶体的缺陷层顶部和底部进行封装,并预留一个溶液注入孔和一个流出孔,以便注入不同浓度的待测氯化钠溶液。

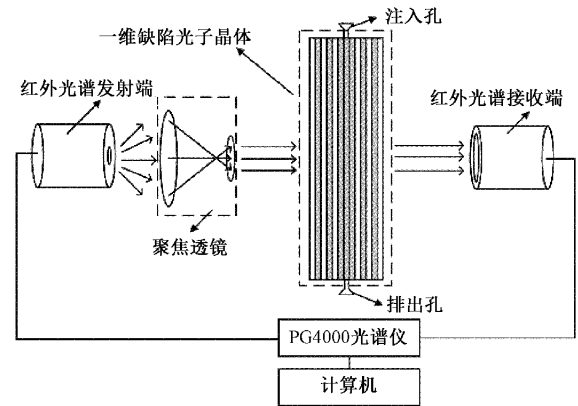


图2 氯化钠溶液浓度检测装置示意图

为了获得测量得到的透射系数与待测氯化钠水溶液浓度之间的关系,本文采用传输矩阵方法计算了一维缺陷光子晶体传感模型的缺陷峰波长随氯化钠水溶液浓度发生变化的情况。假定入射近红外光波以平面波形式垂直照射在一维缺陷光子晶体样品上,根据切向电场连续性条件,可以得到一维缺陷光子晶体传感模型的第 i 层材料入射和透射边界上的电场和磁场满足关系:

$$\begin{bmatrix} E_x(z + d_i, \omega) \\ H_y(z + d_i, \omega) \end{bmatrix} = M(d_i, \omega) \begin{bmatrix} E_x(z, \omega) \\ H_y(z, \omega) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,

$$M(d_i, \omega) = \begin{bmatrix} \cos(\hat{k}_i d_i) & -\frac{j\omega\mu_0 \sin(\hat{k}_i d_i z)}{\hat{k}_i} \\ -\frac{j\hat{k}_i \sin(\hat{k}_i d_i)}{\omega\mu_0} & \cos(\hat{k}_i d_i) \end{bmatrix}$$

为第 i 层介电材料层的特性传输矩阵,其中, $\hat{k}_i = \hat{k}_i(\omega) = k'_i(\omega) - jk''_i(\omega)$ 为第 i 层介电材料的传播常数,由材料复介电常数 $\epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega)$ 和复磁导率 $\mu'(\omega) - j\mu''(\omega)$ 确定。定义材料的复数导纳率 $\hat{y}(\omega) = j\omega[\epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega)]$ 和复数阻抗率 $\hat{z}(\omega) = j\omega[\mu'(\omega) - j\mu''(\omega)]$,则介

电材料的传播常数可表示为 $\hat{k}(\omega) = \sqrt{-\hat{y}(\omega)\hat{z}(\omega)}$ 。根据传输矩阵的级联特性,一维缺陷型光子晶体传感模型的总传输矩阵可以表示为:

$$\mathbf{X}(\omega) = \prod_{i=1}^N \mathbf{M}(d_i, \omega) \quad (3)$$

其中, $N = P \times 2 \times 2 + 1$ 为一维缺陷型光子晶体传感模型的材料层数。最后,任意一维光子晶体结构的反射系数和透射系数可以表示为:

$$r(\omega) = \frac{\mathbf{E}_x^{(-)}(0, \omega)}{\mathbf{E}_x^{(+)}(0, \omega)} =$$

$$\frac{[\mathbf{X}_{22} - \mathbf{X}_{11}] + [\mathbf{X}_{11} \frac{\omega\mu_0}{k_0} - \mathbf{X}_{12} \frac{k_0}{\omega\mu_0}]}{[\mathbf{X}_{22} + \mathbf{X}_{11}] - [\mathbf{X}_{11} \frac{\omega\mu_0}{k_0} + \mathbf{X}_{12} \frac{k_0}{\omega\mu_0}]} \quad (4)$$

$$t(\omega) = \frac{\mathbf{E}_x^{(-)}(d, \omega)}{\mathbf{E}_x^{(+)}(0, \omega)} =$$

$$\frac{2}{[\mathbf{X}_{22} + \mathbf{X}_{11}] - [\mathbf{X}_{11} \frac{\omega\mu_0}{k_0} + \mathbf{X}_{12} \frac{k_0}{\omega\mu_0}]} \quad (5)$$

最后,功率反射率和透射率分别定义为:

$$R(\omega) = |r(\omega)|^2 \quad (6)$$

$$T(\omega) = |t(\omega)|^2 \quad (7)$$

2 一维光子晶体特性仿真分析

将一维光子晶体的中心工作波长 λ_0 确定为 1 000 nm,在常温条件下 ($T=20$),缺陷层在氯化钠溶液中心浓度时所对应光学厚度为 $\lambda_0/2$,对应的物理厚度 $d_c = 365$ nm。通过测量一维缺陷型光子晶体传感模型的缺陷峰波长来反演氯化钠溶液浓度,其测量精度与缺陷峰的品质因数相关。缺陷峰的品质因数越高,即缺陷峰宽度越窄,波长检测灵敏度越高,反演出的溶液浓度值越精确。缺陷峰的品质因数或宽度受到光子晶体周期数的影响,图 3 所示为上述一维缺陷光子晶体传感模型在不同周期数 $P = 4, 5, 6, 7$ 和 8 时的带隙透射频谱。由图 3 可以看出,随着周期数 P 增加,缺陷峰宽度逐渐变窄,缺陷峰的品质因数也逐渐增大。其中,当 $P = 4$ 时,品质因数 $Q = 65$;当 $P = 6$ 时,品质因数 $Q = 731$;当 $P = 8$ 时,品质因数 $Q = 4\,000$ 。可以看到,品质因数越高,缺陷峰的频率检测灵敏度越高^[19],但是,光子晶体传感器的尺寸也增大,制备和测量校准问题变得复杂。综合考虑频率检测灵敏度和光子晶体的尺寸,选择 $P = 6$ 的一维缺陷光子晶体传感模型进行溶液浓度测量模型研究。

3 溶液浓度测量模拟仿真分析

为了分析测量环境温度对测量对果的影响,配制了 20% 的氯化钠溶液浓度作标准浓度,在不同温度条件下,将其注入一维缺陷型光子晶体传感模型的缺陷层后进行透射频谱仿真测试。当温度分别为 10 °C、20 °C、30 °C、40 °C、

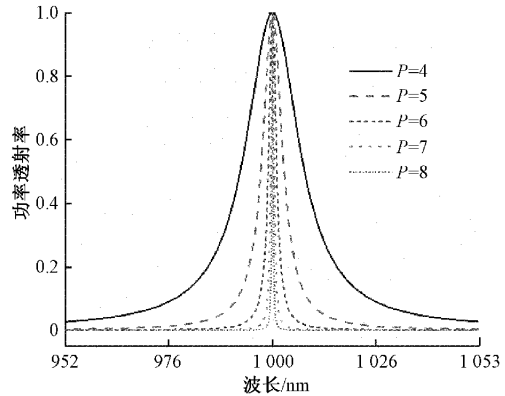


图 3 不同周期数 P 对应的一维缺陷光子晶体禁带透射频谱

50 °C 时,一维缺陷型光子晶体透射频谱如图 4 所示。可以看到,随着温度升高,一维光子晶体缺陷峰波长向短波方向移动,这归因于随着温度升高,缺陷层对应的光学厚度变小或氯化钠溶液的有效折射率变小。根据表 1 给出的经验公式,将 20% 浓度的氯化钠溶液在不同温度条件所对应的折射率和缺陷峰波长对应关系列入表 2 展示,从而更直观地反应测量温度对缺陷峰波长的影响。由表 2 数据可以得出,测量环境温度的变化会改变待测氯化钠溶液的折射率,随着温度升高,折射率减小,缺陷峰波长向短波方向偏移,定义缺陷峰波长随温度偏移的灵敏度为:

$$S_1 = \frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = \frac{1\,001.34 - 999.14}{50 - 10} = 0.055(\text{nm}/^\circ\text{C}) \quad (8)$$

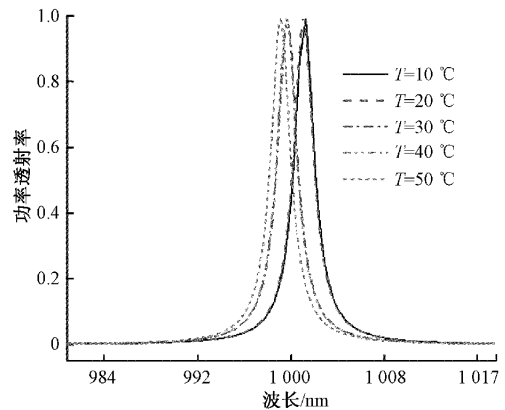


图 4 不同温度 T 对应的缺陷型光子晶体透射频谱

因此,采用一维缺陷型光子晶体传感模型来测量氯化钠溶液浓度,环境温度变化对测量结果的影响是非常微小的。在实际测量环境中,假定环境温度动态变化范围为 1 °C,其引起的最大缺陷峰波长测量误差为 0.055 nm,相比于因氯化钠溶液浓度改变引起的缺陷峰波长变化可以忽略,表明通过提出的测量方法测量氯化钠溶液浓度受环境温度变化影响较小,测量结果具有较好的稳定性。

现在假定测量环境为标准温度 20 °C,分别对注入浓度为 4%、8%、12%、16%、20%、24%、28%、32% 的氯化钠溶

表1 NaCl溶液 S - n 回归方程系数

$T/^\circ\text{C}$	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
10	8 249.740	11 555.600	-45 827.700	29 433.300	412.703	-3 146.290
20	-121 301.000	302 045.000	-218 058.000	-18 068.300	77 037.100	-22 405.200
30	65 519.700	-83 281.200	-86 019.400	197 641.000	-114 658.000	21 912.600
40	140 501.000	-361 504.000	292 556.000	-32 754.100	-57 044.700 0	18 826.400
50	2 120.720	-5 585.790	2 193.360	3 068.200	-2 481.900	474.788

表2 20%浓度下氯化钠溶液不同温度对应的折射率和缺陷模波峰位置

温度 $T/^\circ\text{C}$	溶液折射率 n/RIU	波峰位置 λ/nm
10	1.372 2	1 001.34
20	1.371 9	1 001.07
30	1.367 2	999.69
40	1.367 0	999.68
50	1.365 2	999.14

表3 20 $^\circ\text{C}$ 下氯化钠溶液不同浓度对应的折射率和缺陷模波峰位置

氯化钠溶液浓度 $S/\%$	溶液折射率 n/RIU	波峰位置 λ/nm
4	1.343 3	992.32
8	1.350 4	994.50
12	1.357 5	996.78
16	1.364 6	999.14
20	1.371 9	1 001.07
24	1.379 4	1 003.28
28	1.387 1	1 005.78
32	1.395 4	1 008.28

液的光子晶体传感模型进行仿真测量,图5给出了不同氯化钠溶液浓度所对应的透射频谱。由图5可以看出,标准温度(20 $^\circ\text{C}$)和标准浓度(20%)条件下的缺陷峰波长处于光子晶体中心工作波长位置(1 000 nm)。在标准温度条件下,随着氯化钠溶液浓度降低,其折射率下降,缺陷层对应的光学厚度减小,缺陷峰波长向短波移动;另一方面,随着氯化钠溶液浓度升高,其折射率增大,缺陷层对应的光学厚度增大,缺陷峰波长向长波移动。表3所示为不同氯化钠溶液浓度值所对应的溶液折射率和缺陷峰波长。

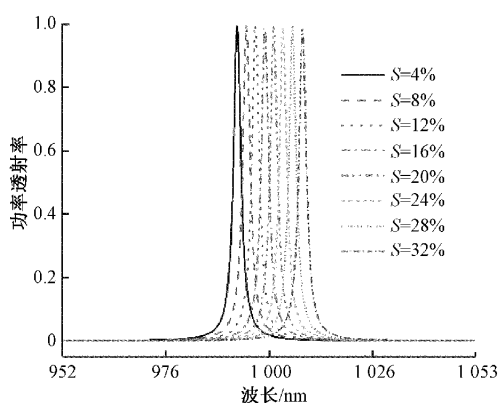


图5 不同浓度对应的一维缺陷型光子晶体透射谱

为了比较环境温度对测量结果的影响,定义了缺陷峰波长随浓度变化的灵敏度:

$$S_2 = \frac{\Delta\lambda}{\Delta S} = \frac{1\ 008.28 - 992.32}{32 - 4} = 0.57(\text{nm}/\%) \quad (9)$$

相比于现有的测量方法^[20],提出的氯化钠溶液浓度测量方法的测量灵敏度较高,即通过检测一维光子晶体传感模型的缺陷峰波长,即可获对应的浓度值,并具有较高的检测灵敏度。

最后,为了检测任意浓度值氯化钠溶液浓度,根据表3中列出的缺陷峰波长与氯化钠溶液折射率或氯化钠溶液浓度数据,分别进行了线性函数拟合,建立对应的关系函数。为了评价线性函数拟合质量,引入拟合优度 R^2 ,用于衡量回归直线对测量值的拟合程度,其计算公式如下:

$$R^2 = \frac{(k \sum_{i=1}^k \hat{Y}_i Y_i - \sum_{i=1}^k \hat{Y}_i \sum_{i=1}^k Y_i)^2}{[k \sum_{i=1}^k \hat{Y}_i^2 - (\sum_{i=1}^k \hat{Y}_i)^2][k \sum_{i=1}^k Y_i^2 - (\sum_{i=1}^k Y_i)^2]} \quad (10)$$

式中: $\hat{Y}_i (i=1, \dots, k)$ 为第 i 个样本的预测值, Y_i 为第 i 个样本的实际值, k 为样本数量。 R^2 的值越接近于 1,表明拟合质量越高。

图6所示为利用表3中氯化钠溶液折射率与缺陷模波峰波长关系进行线性拟合的结果,可以看出,缺陷峰波长与氯化钠溶液折射率成正比,通过拟合数据分析,可以建立一阶线性拟合方程:

$$n = 0.003\ 276\lambda - 1.908 \quad (11)$$

式中: n 为待测折射率, λ 为检测到的缺陷峰波长,线性拟合质量 $R^2=0.999\ 6$ 。利用式(10),可以通过图2所示装备检测到缺陷峰波长,获得待测氯化钠溶液的折射率。

为了进一步获得待测氯化钠溶液浓度与检测缺陷峰波长之间的关系,利用表3中所列出数据,给出了氯化钠溶液与缺陷峰波长的线性拟合结果,如图7所示,并建立了对应的一阶线性拟合方程:

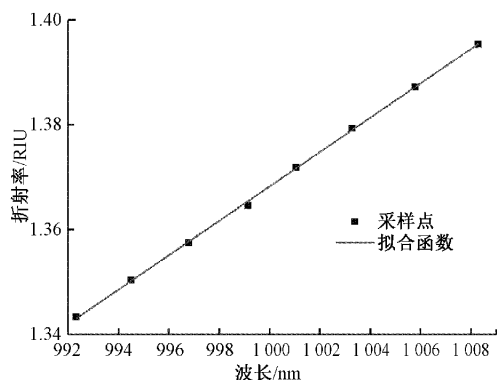


图 6 氯化钠溶液折射率与缺陷模波峰波长拟合函数曲线

$$S = \frac{1.771\lambda - 1.753}{100} \times 100\% \quad (12)$$

其中, S 为氯化钠溶液浓度, λ 为缺陷峰波长, 线性拟合质量 $R^2=0.9992$ 。在实际操作过程中, 使用红外光谱仪检测到一维光子晶体透射谱后, 利用图 7 或式(12)所描述的对对应关系, 将检测到的缺陷峰波长转化为待测氯化钠溶液浓度。从上述测量原理可以看出, 该方法也可以推广到溶液其它溶质浓度的测量。

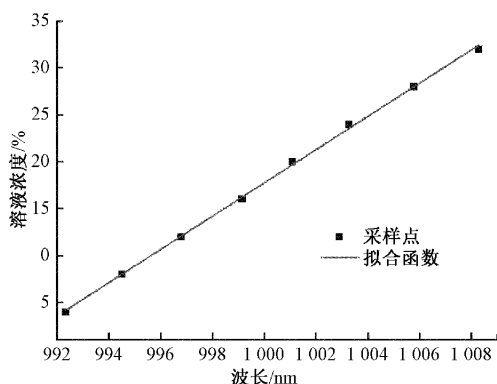


图 7 氯化钠溶液浓度与缺陷峰波峰位置的拟合函数曲线

4 结 论

提出了一种基于一维缺陷型光子晶体传感模型的氯化钠溶液浓度测量方法。采用传输矩阵法, 模拟了不同氯化钠溶液浓度条件下的一维缺陷光子晶体缺陷峰波长, 建立了缺陷峰波长与氯化钠溶液浓度之间的关系。在近红外波段, 随着氯化钠溶液浓度的增大, 一维缺陷光子晶体的缺陷峰波长向长波方向偏移, 并呈线性关系。通过检测透射峰波长, 根据所建立的一阶拟合函数, 即可快速测得对应的浓度值。提出的氯化钠溶液浓度测量方法具有较高的检测灵敏度。最后, 基于红外光谱检测方法, 提出的氯化钠溶液浓度测量方法不受电磁干扰, 并可以实现在线测量。

参考文献

[1] RUAN G, WANG M, AN Z, et al. Progress and

perspectives of desalination in China[J]. Membranes, 2021, 11(3):206.

[2] LIN S, ZHAO H, ZHU L, et al. Seawater desalination technology and engineering in China: A review[J]. Desalination, 2021, 498:114728.

[3] YOU Z, LAI Y, ZENG H, et al. Influence of water and sodium chloride content on corrosion behavior of cast iron in silty clay[J]. Construction and Building Materials, 2020, 238:117762.

[4] JIANG L, HUANG G, XU J, et al. Influence of chloride salt type on threshold level of reinforcement corrosion in simulated concrete pore solutions [J]. Construction and Building Materials, 2012, 30: 516-521.

[5] HECK N, PAYTAN A, POTTS D C, et al. Predictors of local support for a seawater desalination plant in a small coastal community[J]. Environmental Science & Policy, 2016, 66: 101-111.

[6] KAN Y C, HSU C C, HO W K, et al. Poly-silicon nanowire sensor for sodium chloride concentration measurement[C]. Frontiers in Biomedical Engineering and Biotechnology-Proceedings of the 2nd International Conference on Biomedical Engineering and Biotechnology, 11-13 October 2013, Wuhan, China, 2014: 95-99.

[7] 陈剑虹, 朱凌建, 华灯鑫. 氯化钠近红外光谱检测技术研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(4): 949-952.

[8] 杨晓东, 马闯, 邱彤, 等. 基于微波传感器的生化溶液浓度检测 [J]. 传感器与微系统, 2016, 35(11): 90-93.

[9] 王冰, 王伟, 冯嘉双, 等. 空芯光纤多模干涉型温度传感器 [J]. 电子测量技术, 2021, 44(1): 169-172.

[10] YAN Y, ZHENG H, ZHAO Z, et al. Distributed optical fiber sensing assisted by optical communication techniques [J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(12): 3654-3670.

[11] 陈恺, 祝连庆, 刘昭君, 等. 基于光纤激光频率分裂效应的折射率/厚度双参量测量研究 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 27-34.

[12] 郑来芳, 张俊生, 梁海坚, 等. 一种光纤振动传感器的改进型相位解调方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8): 184-190.

[13] ZHANG X, LI H, ZHANG S. Design and analysis of laser photoelectric detection sensor [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2021, 63(12): 3092-3099.

[14] 申浩, 赵冬娥, 张斌, 等. 激光光幕中心位置检测系统 [J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(1): 1-5.

- [15] ZAKY Z A, AHMED A M, SHALABY A S, et al. Refractive index gas sensor based on the Tamm state in a one-dimensional photonic crystal: Theoretical optimisation[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1-9.
- [16] 梅永, 庄建军, 王刚, 等. 基于微波光子晶体缺陷特性的材料介电损耗测量方法[J]. 电子测量技术, 2021, 44(6): 156-159.
- [17] 王安祥, 张晓军, 李继军. 色散效应对钝化硅太阳能电池减反射膜系设计的影响[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(6): 202-209.
- [18] 宋克辉, 张梅, 李申生. 四种太阳池工质的浓度与折射率和温度的关系[J]. 太阳能学报, 1994(3): 240-247.
- [19] 苏安, 吕琳诗, 李艳新, 等. 偏振对光子晶体量子阱滤波品质的调制[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(S1): 121-125.
- [20] CHIANG C C, CHAO J C. Whispering gallery mode based optical fiber sensor for measuring concentration of salt solution[J]. Journal of Nanomaterials, 2013, 2013:372625.

作者简介

梅永(通信作者), 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为光子晶体传感、信号处理等。

E-mail: yongmei2002@126.com