

文章编号: 1672-8785(2025)03-0047-06

蝶形太赫兹波导在微量溶液浓度检测中的性能研究

王路彬¹ 张慧睿¹ 王江涛² 武京治^{1,3} 王艳红^{1,3*}

(1. 中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;

2. 河南中光学集团有限公司, 河南 南阳 473000;

3. 山西智能微波光电创新中心, 山西 太原 030051)

摘 要: 提出了一种基于等离激元效应的蝶形太赫兹波导传感器。利用该太赫兹波导在特定频率处的谐振特性来探测溶液浓度变化。通过分析太赫兹波导传感器的 S_{11} 反射参数, 观察到在频率 53.28 GHz 处, 波导结构出现 Q 值为 82.28 的谐振谷。在波导蝶形区域设置不同浓度的分析物时, 产生了双谐振谷且发生了频率偏移; 谐振频率随着溶液浓度的增加产生蓝移, 表明溶液的介电常数影响了波导中的电磁场分布。仿真结果验证了不同浓度下乳糖溶液 S_{11} 反射参数的频移规律, 灵敏度可达 0.075 GHz/(g/L)。与传统的传感器检测方法相比, 本传感器能够提供更高的灵敏度, 可精确反映微量溶液浓度的微小变化。

关键词: 等离激元; 太赫兹; 高 Q 值; 谐振频率; 浓度检测

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.03.007

Performance Study of Butterfly-Shaped Terahertz Waveguide in Trace Solution Concentration Detection

WANG Lu-bin¹, ZHANG Hui-rui¹, WANG Jiang-tao², WU Jing-zhi^{1,3}, WANG Yan-hong^{1,3*}

(1. Institute of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Henan Costar Group Co., Ltd., Nanyang 473000, China;

3. Shanxi Innovation Center for Intelligent Microwave & Photoelectrics, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A butterfly-shaped terahertz waveguide sensor based on the plasmon effect is proposed. The resonance characteristics of the terahertz waveguide at a specific frequency are used to detect changes in solution concentration. By analyzing the S_{11} reflection parameters of the terahertz waveguide sensor, it is observed that at a frequency of 53.28 GHz, a resonance dip with a Q -value of 82.28 appears in the waveguide structure. When different concentrations of analytes are set in the butterfly-shaped region of the waveguide, dual resonance dips are generated and frequency shifts occur; the resonance frequency exhibits a blue shift with the increase of solution concentration, indicating that the dielectric constant of the solution affects the electromagnetic field distribution in the waveguide. The simulation results verify the frequency shift law of the S_{11} reflection

收稿日期: 2024-10-31

基金项目: 装备预研项目

作者简介: 王路彬(1998-), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹生物传感。

*通讯作者: E-mail: wanyanhong@nuc.edu.cn

parameters of lactose solutions at different concentrations, and the sensitivity can reach 0.075 GHz/(g/L). Compared with traditional sensor detection methods, this sensor can provide higher sensitivity, accurately reflecting small changes in the concentration of trace solutions.

Key words: plasmon; Terahertz; high Q -value; resonant frequency; concentration detection

0 引言

表面等离激元共振(Surface Plasmon Resonance, SPR)传感器具有免标记、实时动态检测、灵敏度高、监测范围广、操作简便等特点^[1-3],被广泛应用于生物学、医学、化学、药物筛选、环境监测以及食品安全等领域^[4-5]。基于麦克斯韦电磁波理论的 SPR 效应,是一种发生在电介质与金属薄层分界面上的物理光学现象^[6-9],在特定条件下由金属表面自由电子的集体振荡与光波耦合形成。等离激元共振仅在金属和介质(气体或液体)界面发生,形成局部增强的电场。其检测原理是通过电磁波与金属表面的相互作用捕获环境中的微小变化,包括生物分子吸附或溶液浓度变化。传统检测手段在检测灵敏度和操作复杂性上有所限制,因此国内外在此领域开展了一系列研究。孙青云等人研究了一种高 Q 值 SPR 传感器,其 Q 值达到 44.6~268,具备较高的灵敏度^[10]。

太赫兹技术由于具备非侵入、非破坏性以及许多物质有独特响应等特点,已在生物医学、材料检测和环境监测等领域得到广泛应用^[11-12]。太赫兹波能够穿透大多数非极性材料,在无损检测中极具潜力^[13],然而溶液对太赫兹波的吸收较强。本文提出的蝶形太赫兹波导传感器在 53.28 GHz 频率上表现出高 Q 值的谐振特性,具有较窄的带宽和较低的谐振谷,使其在检测灵敏度方面具有明显优势,有效克服了溶液对太赫兹波的吸收。除了在检测灵敏度上的优势,蝶形太赫兹波导传感器还具有尺寸小、集成度高的特点,非常适合在实验室芯片等小型化分析平台上的应用。与传统的生物检测手段相比,基于等离激元共振的太赫兹波导传感器无需荧光、化学标记等操作,能够大幅降低检测成本,并减少人为操作对检测

结果的影响。此外,太赫兹波对生物样品有良好的穿透能力,能够避免高频或低频波段可能引起的样品损伤,特别适用于活体检测等对检测过程有较高要求的应用场景。

本文利用 CST Studio Suite 有限元仿真软件分析蝶形太赫兹波导传感器的电场分布和 S_{11} 反射参数,研究了不同浓度微量溶液对该传感器谐振频率的影响。首先,研究了蝶形太赫兹波导传感器的谐振频率和电场分布;其次,计算了分析物作为谐振腔时的谐振频率以及蝶形结构对波导检测灵敏度的影响;最后,仿真了不同浓度和不同厚度乳糖溶液对谐振频率的影响。该研究对于共面波导在微量溶液浓度检测上的广泛应用具有一定参考价值。

1 模型分析

如图 1 所示,蝶形太赫兹波导传感器由底层 500 nm 厚的氧化硅、中间 30 nm 厚的氮化硅层以及金层传输线、地线组成。传输线的宽度为 120 μm ,长度为 7 mm,厚度为 30 nm。由于传输线末端断开,信号在传输至波导末端时会反射回左端入射端口^[14]。图 2 为传输线末端蝶形结构尖端电场增强分布图,其中红色区域为电场在谐振腔内的增强区。在该区域能够提高对溶液浓度检测的灵敏度。在没有分析物的情况下,该波导的 S_{11} 曲线在 53.28 GHz 处出现一个 Q 值为 82.25 的谐振谷(深度接近 -25 dB)。在此频率下反射最小,发生了强烈的谐振。品质因数 Q 的计算公式为

$$Q = f_0 / (f_1 - f_2) \quad (1)$$

式中, f_0 是谐振频率; $f_1 - f_2$ 是半功率带宽 3 dB 处的频率范围。值得注意的是,即使没有蝶形结构,波导仍会在相同频率下产生谐振谷(见图 3)。这说明谐振主要由传输线和地线的相互作用引起,而蝶形结构的作用则是增强传

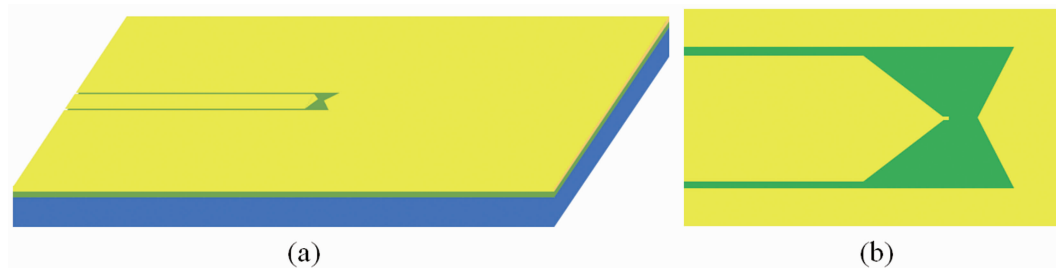


图 1 (a)共面波导中心局部图; (b)共面波导蝶形区域

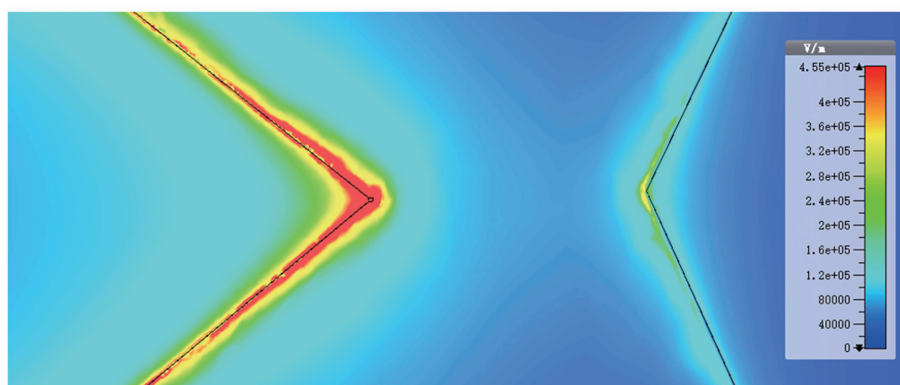


图 2 共面波导蝶形区域电场图

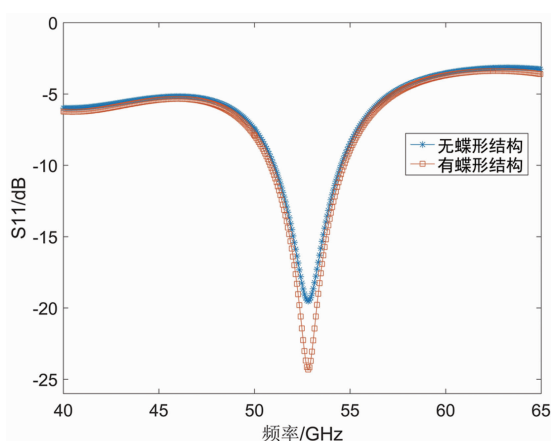


图 3 蝶形共面波导结构的谐振谷

输线末端的电场分布。

2 结果和讨论

本文对不同浓度的微量乳糖溶液进行检测分析。在共面波导中引入一个介电常数较高的分析物(如水)时, 由于局部介电材料引入该区域, 电场分布随介电常数的变化而变化, 使分析物成为一个新的谐振腔。在谐振腔中, 谐振条件需满足电磁波在该区域内的传播长度是波长的整数倍^[15]。这意味着谐振腔的几何尺寸和材料特性直接影响谐振频率。谐振频率为

$$f = \frac{c}{2\pi R \sqrt{\epsilon_{eff}}} \cdot \chi_{nm} \quad (2)$$

式中, c 是光速; χ_{nm} 是贝塞尔函数的根; ϵ_{eff} 是有效介电常数; R 是谐振腔半径。然而水的介电常数在微波和高频范围内变化显著, 可以分为静态介电常数(低频或静态时)和频率相关介电常数。水的介电常数随频率变化的关系通常可以通过 Debye 弛豫模型来描述^[16], 其计算公式为

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (3)$$

式中, $\epsilon(\omega)$ 是介电常数随频率变化的函数; ϵ_0 是水在静态(低频)下的介电常数, 约为 78; ϵ_{∞} 是高频下的介电常数, 通常为 4.9; ω 是角频率, $\omega = 2\pi f$, 其中 f 是电磁波入射频率; τ 是水的弛豫时间, 典型值为 9.35 ps。在不同频率下, 水分子对电磁场的响应不同: 在低频下, 水分子的偶极矩可以较好地跟随电场的变化, 因此介电常数较高; 而在高频下, 水分子的响应变慢, 导致介电常数逐渐下降。水的介电常数随频率的变化曲线如图 4 所示。

介电材料引入的区域内, 介质(水)的相对

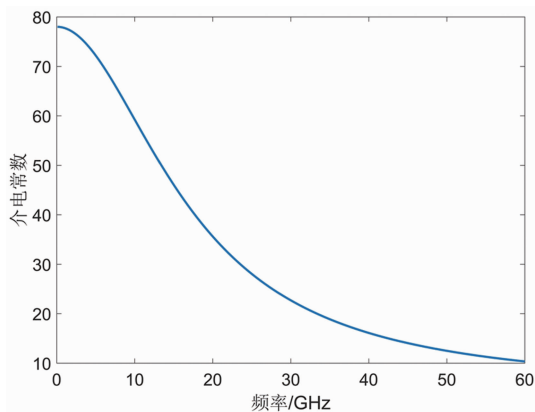


图 4 水的介电常数随频率的变化曲线

介电常数为 $\epsilon(\omega)$ ，波导基底和空气的介电常数会影响 $\epsilon(\omega)$ 。因此，可以使用加权平均法或有效介电常数模型来估算该区域的有效介电常数：

$$\epsilon_{eff} = \frac{\sum \epsilon_i \cdot d_i}{\sum d_i} \quad (4)$$

式中， ϵ_i 是第 i 层材料的介电常数； d_i 是第 i 层材料的厚度。当加入分析物(水)的结构是半径为 $500 \mu\text{m}$ 、厚度为 $250 \mu\text{m}$ 的圆柱体时，由式(2)~式(4)可计算出谐振频率 f 约为 53.8 GHz 。

本文通过 CST Studio Suite 有限元仿真软件计算，在波导传输线末端蝶形结构处设置一个厚度为 $250 \mu\text{m}$ 、半径为 $500 \mu\text{m}$ 的圆柱体(水)作为分析物时，仿真结果如图 5 所示。由于波导上加入了水，原本结构的谐振频率发生了红移。图 5 中 46 GHz 附近的谐振谷就是由此引起的频移。根据计算可知， 54 GHz 附近出现的新谐振谷源自引入的分析物，形成了新的谐振腔。当分析物作为谐振腔时，电磁波在分析物区域内的传播会激发出新的谐振模式。模式频率主要由分析物的几何尺寸以及介电常数决定。图 5 所示为传输线末端有蝶形结构和无蝶形结构时的检测结果对比情况。可以看出，设计和优化谐振腔或波导结构提高了对目标物质检测的灵敏度，能够实现更低的谐振谷值。这意味着即使在分析物浓度较低或仅有微小变化时，该传感器依然能够精确测量，进而提升检

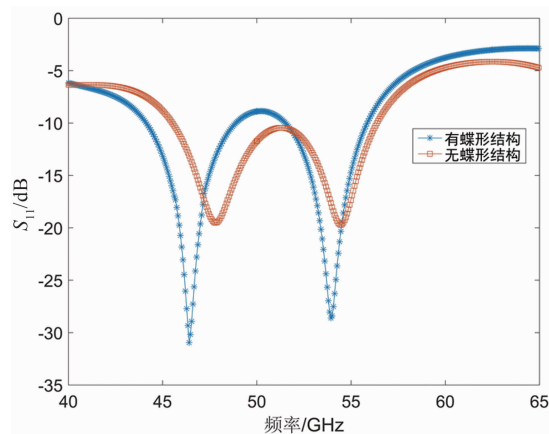


图 5 分析物为水时的双谐振谷

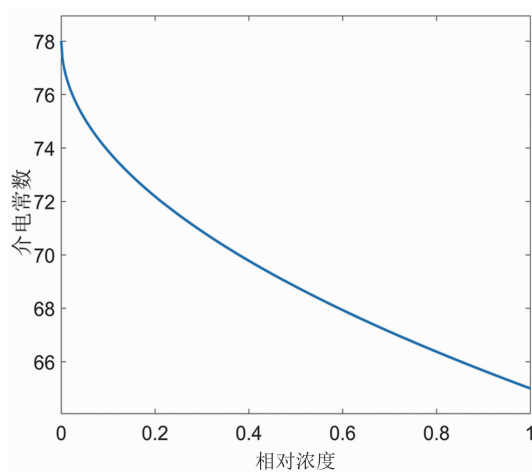


图 6 乳糖溶液的介电常数随浓度的变化曲线

测的可靠性和准确性。

根据常温(20°C)下乳糖溶液介电常数与浓度的关系^[17]，采用公式 $\epsilon(c) = \epsilon_w - Af(c)$ 模拟其曲线图(见图 6)。其中， $\epsilon(c)$ 为乳糖溶液的介电常数； ϵ_w 为水常态下的介电常数； A 是一个常数，表示乳糖对介电常数的减弱作用； c 代表浓度，0 代表水，1 代表饱和乳糖溶液；常见的非线性平方根模型为 $f(c) = \sqrt{c}$ 。

根据图 6 中的关系曲线，取介电常数为 78、69 和 65，分别代表水、半饱和乳糖溶液和饱和乳糖溶液。图 7、图 8 和图 9 所示为蝶形太赫兹波导传感器在不同乳糖浓度下的 S_{11} 参数曲线，同时通过调整谐振腔的厚度($150 \mu\text{m}$ 、 $200 \mu\text{m}$ 和 $250 \mu\text{m}$)来比较其响应特性。可以看出，随着介质厚度的增加， S_{11} 曲线的谐振谷发生了显著变化(尤其是谐振谷的

深度), 但频移的变化相对较小。具体而言, 当介质厚度为 $150\ \mu\text{m}$ 和 $200\ \mu\text{m}$ 时, 谐振频率范围大且深度低; 随着厚度增加到 $250\ \mu\text{m}$, 谐振谷的深度增加, 表明传感器对分析物检测的灵敏度在提高。对于不同浓度的乳糖溶液, 其 S_{11} 参数曲线相较于原波导结构的谐振也会表现出两个谐振谷: 低频谐振谷源于波导结构谐振谷的红移, 而高频谐振谷则源于加入检测溶液后形成的新谐振腔与结构的相互作用。在本研究中, 检测灵敏度可表示为浓度变化对频移的影响, 饱和乳糖的浓度为 $50\ \text{g/L}$, 半饱和乳糖的浓度为 $25\ \text{g/L}$ 。根据图 9 所示的频移范围, 计算出检测灵敏度为 $0.075\ \text{GHz}/(\text{g/L})$ 。由此表明该传感器能够通过不同的谐振频率和谐振深度有效区分乳糖溶液浓度。

3 结束语

本文研究了蝶形太赫兹波导传感器在不同浓度乳糖溶液检测中的高灵敏度响应特性, 揭

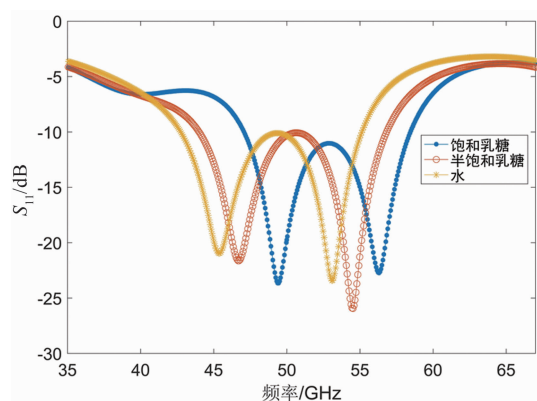


图 7 分析物厚度为 $150\ \mu\text{m}$ 时的双谐振谷

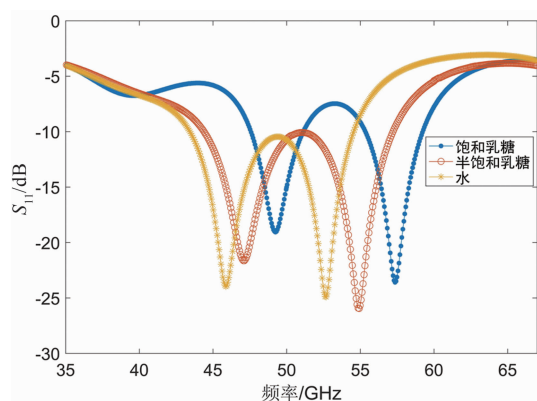


图 8 分析物厚度为 $200\ \mu\text{m}$ 时的双谐振谷

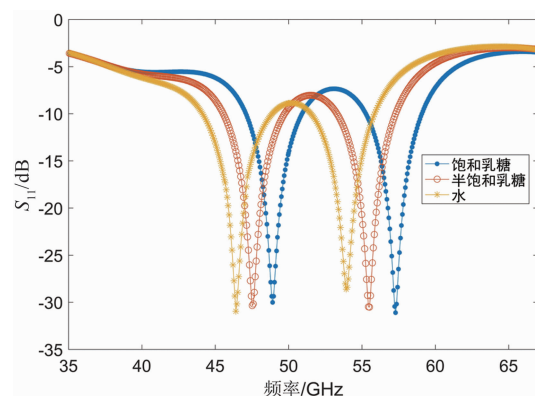


图 9 分析物厚度为 $250\ \mu\text{m}$ 时的双谐振谷

示了传感器谐振频率随溶液浓度的变化规律, 为微量溶液检测提供了新的理论支持。经研究发现, 随着乳糖溶液浓度的增加, 介电常数降低, 谐振频率会出现蓝移。而增加介质厚度可以进一步提升检测灵敏度, 使 S_{11} 反射参数的谐振谷值更深、频移范围更大。与传统传感器相比, 本文蝶形太赫兹波导传感器在低浓度分析物的检测中具有显著优势, 提高了检测精度和响应速度, 在食品安全、医疗诊断和环境监测等领域展现出良好的应用前景。未来可进一步探索复杂混合物的检测以及环境因素的影响, 以提高其在实际应用中的稳定性和适用性。

参考文献

- [1] 王弋嘉, 张崇磊, 王蓉, 等. 表面等离子体共振成像系统相位提取 [J]. 光学学报, 2013, **33** (5): 0524001.
- [2] 陈强华, 罗会甫, 王素梅, 等. 基于表面等离子体共振和双频激光干涉相位测量的空气折射率测量 [J]. 中国激光, 2013, **40**(1): 0108001.
- [3] 吴平辉, 顾菊观, 刘彬, 等. 波长检测型表面等离子体共振传感器的实验研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(2): 022501.
- [4] Li S P, Zhong J G. Simultaneous amplitude-contrast and phase-contrast surface plasmon resonance imaging by use of digital holography [J]. Biomedical Optics Express, 2012, **3**(12): 3190–3202.
- [5] Rafael A E, Nobuaki M, Michio M, et al. Interaction between the marine sponge cyclic peptide

- theonellamide A and sterols in lipid bilayers as viewed by surface plasmon resonance and solid-state ^2H nuclear magnetic resonance [J]. *Biochemistry*, 2013, **52**(14): 2410–2418.
- [6] Homola J, Lu H B, Yee S S. Dual-channel surface plasmon resonance sensor with spectral discrimination of sensing channels using dielectric overlayer [J]. *Electronics Letters*, 1999, **35**(13): 1105–1106.
- [7] Bryce P N, Timothy E G, Mark R L, et al. Surface plasmon resonance imaging measurements of DNA and RNA hybridization adsorption onto DNA microarrays [J]. *Analytical Chemistry*, 2001, **73**(1): 1–7.
- [8] Yuk J S, Kim H S, Jung J W, et al. Analysis of protein interactions on protein arrays by a novel spectral surface plasmon resonance imaging [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2006, **21**(8): 1521–1528.
- [9] Homola J, Yee S S, Ganglitz G. Surface plasmon resonance sensors: review [J]. *Sensors and Actuators B Chemical*, 1999, **54**(1–2): 3–15.
- [10] 孙青云, 朱亦鸣, 陈麟. 高 Q 值表面等离子体传感器研究 [J]. *光学仪器*, 2017, **39**(6): 51–55.
- [11] Islam M, Bhowmik B K, Dhriti K M, et al. Thin film sensing in a planar terahertz meta-waveguide [J]. *Journal of Optics*, 2022, **24**(6): 064016.
- [12] Islam M, Chowdhury D R, Ahmad A, et al. Terahertz plasmonic waveguide based thin film sensor [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, **35**(23): 5215–5221.
- [13] 孙晓荣, 张小勤, 刘翠玲, 等. 基于太赫兹反射成像技术的花生空果无损检测 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, **13**(21): 6939–6946.
- [14] Bhat A, Gwozdz P V, Seshadri A, et al. Tank circuit for ultrafast single-particle detection in micropores [J]. *Physical Review Letters*, 2018, **121**(7): 078102.
- [15] Rao R S. *Microwave Engineering* [M]. Delhi: PHI Learning Pvt Ltd, 2015.
- [16] Ellison W J. Permittivity of pure water, at standard atmospheric pressure, over the frequency range 0–25 THz and the temperature range 0–100 °C [J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2007, **36**(1): 1–18.
- [17] 陈玉娟, 卓克垒, 康磊, 等. 278.15–313.15 K 下糖-水二元体系的介电常数 [J]. *物理化学学报*, 2008, **24**(1): 91–96.