

基于太赫兹波段光子晶体温度传感器

陆遥, 赵欣

天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

收稿日期: 2026年2月20日; 录用日期: 2026年3月17日; 发布日期: 2026年3月24日

摘要

本文主要在太赫兹波段研究了一种有缺陷的一维光子晶体热传感器, 它由高电阻率硅、甘油和二氧化硅构成。基于传递矩阵法, 利用MATLAB软件分析了该传感器的传输特性。通过利用一维光子晶体的光子禁带性质和甘油的热光效应来提高光子晶体对温度变化的灵敏度。为此, 我们进行了理论建模和数值模拟研究, 通过优化缺陷层的厚度, 提升传感器的灵敏度。这项工作的核心是监测传感器的透射光谱随温度变化的偏移情况, 并以此作为评估其性能的关键依据。此外, 我们还详细讨论了缺陷层的厚度和入射角对传感器灵敏度的影响。结果表明, 在入射角为 20° 时, 传感器的灵敏度高达 $78.37 \text{ nm}/^\circ\text{C}$; 而当缺陷层厚度调整为 $200 \mu\text{m}$ 时, 品质因数达到6345。

关键词

光子晶体, 温度传感器, 太赫兹波, 光子带隙

Photonic Crystal Temperature Sensors Based on the Terahertz Band

Yao Lu, Xin Zhao

School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin

Received: February 20, 2026; accepted: March 17, 2026; published: March 24, 2026

Abstract

This paper primarily studies a defective one-dimensional photonic crystal thermal sensor in the terahertz waveband, composed of high-resistivity silicon, glycerol, and silicon dioxide. Using the transfer matrix method and MATLAB software, the transmission characteristics of the sensor were analyzed. By leveraging the photonic bandgap properties of the one-dimensional photonic crystal and the thermo-optic effect of glycerol, the sensitivity of the photonic crystal to temperature changes was enhanced. To achieve this, we conducted theoretical modeling and numerical simulation studies

and optimized the thickness of the defect layer to improve the sensor's sensitivity. The core of this work is to monitor the shift of the sensor's transmission peak with temperature changes, using this as a key criterion for evaluating its performance. Additionally, the effects of defect layer thickness and incident angle on the sensor's sensitivity were discussed in detail. The results show that at an incident angle of 20° , the sensor's sensitivity reaches $78.37 \text{ nm}/^\circ\text{C}$; and when the defect layer thickness is adjusted to $200 \mu\text{m}$, the quality factor reaches 6345.

Keywords

Photonic Crystal, Temperature Sensor, Terahertz Waves, Photonic Band Gap

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

光子晶体是由具有不同介电常数的两种或两种以上的材料周期性排列而形成的材料, 光子晶体按介电材料周期性变化的空间维度可分为一维光子晶体、二维光子晶体和三维光子晶体[1]。其中一维光子晶体相较于二维和三维具有结构简单, 制备容易, 易于集成, 性能可控性强等优点[2]。光子晶体因其独特的光学性质, 尤其是结构色特性, 使其在成像显示、防伪、检测及其他领域显示出巨大的研究潜力和应用价值[1]。光学传感器是基于光学原理的经典传感器之一, 可以灵敏地监测信息, 并将检测到的信息根据一定的规律转换为光信号或其它形式的数字[3]。近年来, 基于光子晶体的光学传感器被认为是最有前途的光学传感技术之一, 它独特的物理性质, 如反射率/透射率增加的灵敏度, 是未来传感方法的重要依据[4][5]。光子带隙是光子晶体的一项重要性质之一, 光子带隙是指在一定频率范围内, 光子晶体中光的传播被禁止的现象[6]。自 1987 年 Eli Yablonovitch [7]和 Sajeev John [8]发现光子晶体以来, 光子晶体被广泛应用于各个领域, 如温度传感器[9], 化学传感器[10], 生物传感器[11]等。由于光子晶体传感器的应用潜力和传感参数变化的价值, 致使科研人员对其越来越感兴趣。2012 年 Kumar 等人提出了一种简单的温度传感器设计, 使用具有硅缺陷模式的一维光子晶体, 由硅/空气多层系统组成, 在 $100\sim 700 \text{ K}$ 温度范围内显示 $0.064 \text{ nm}/\text{K}$ 的灵敏度线性偏移[12]。2018 年 El-Amassi 等人提出了一种一维光子晶体, 在硅和二氧化硅之间有一个聚合物层, 温度每升高一度, 温度传感器的灵敏度提高 0.380 纳米。该研究发现, 聚碳酸酯和聚苯乙烯等聚合物显著改善了温度敏感的透射峰偏移, 强调了聚合物选择在温度传感中的重要性[13]。El-Naggar 等人在 2020 年对圆柱形光子晶体(CPhCs)中缺陷模式的温度依赖性的研究中发现: 由具有单个缺陷层的 TiO_2 和 Al_2O_3 壳组成的结构显示出灵敏度为 $0.0056 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ [14]。Abadla 等人在 2021 年研究中利用转移矩阵法来研究一维缺陷环形光子晶体的热性质, 从而产生灵敏度为 $0.01069 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 的温度传感器[15]。2025 年, Manal A.等人研究一种有缺陷的一维光子晶体热传感器, 它由氮化镓、甘油和空气构成。基于传递矩阵法, 利用 MATLAB 软件给出了该传感器的传输特性。传感器灵敏度约为 $10 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 在入射角为 30° 时品质因数达到 35443 的高值, 而在 65° 入射角时灵敏度为 $20 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 品质因数为 14,723 [16]。

近几十年来, 科学家们对太赫兹辐射波也给予了很大的关注[17], 太赫兹波通常覆盖的频率带大致在 0.1 到 10 太赫兹之间, 填补了远红外和毫米波频段之间的光谱空白, 因其对众多材料具有独特的光谱特征, 被普遍认为是一项充满潜力的新兴技术[18]。其次, 太赫兹光谱区域的光子能量相对较低, 这意味着太赫兹辐射不会触发分析物中的光化学反应, 也不会对生物样本(如细胞)造成影响。然而, 关于在太赫兹

波段利用光子晶体进行折射率测量的研究, 在学术文献中的报道相对较少[19]。2019 年陈之厦等人使用对太赫兹波段有吸收效应的掺杂硅设计光子晶体结构, 并加上金属反射镜面将光子晶体的吸收峰和法布里-珀罗谐振吸收峰结合, 设计了一款灵敏度达到 $9084.6 \text{ nm}^\circ\text{C}$ 的温度传感器[20]。

本文的主要工作是在前人的基础上, 利用传递矩阵法探究一维光子晶体在太赫兹波段的温度传感器, 并通过改变传感器的各项参数来优化传感器的性能, 例如材料厚度, 入射角度等。

2. 传感器设计与理论

图 1 展示了含有甘油缺陷层的传感器 $(\text{Si}/\text{SiO}_2)^{5.5}$ Glycerol $(\text{Si}/\text{SiO}_2)^6$ 结构, 周期性晶胞由厚度分别为 $d_A = 80 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $d_B = 70 \text{ }\mu\text{m}$ 的高电阻率硅和二氧化硅组成。高电阻率硅和 SiO_2 被视为高和低折射率(RI)介质。高电阻率硅的折射率为 3.42 [21], SiO_2 的折射率为 1.46 [22]。高电阻率硅高电阻率不改变单晶硅的完整晶格结构, 声子传热效率高, 利于器件散热[23]。在太赫兹波段的吸收足够低, 几乎可以忽略不计, 并且折射率在太赫兹波辐射区域的整个带宽上基本上是无色散的。在室温附近, 对于电阻率 $> 1 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ 的高阻硅, 其载流子主要由残留的杂质决定, 本征激发可以忽略, 因此电学性能稳定。当温度升高到一定程度(例如 $> 100^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$), 本征激发的载流子浓度会超过杂质提供的载流子浓度。此时, 材料将不再呈现“高电阻率”特性, 其电阻率会迅速下降, 趋近于本征硅的电阻率[21]。因此, 由高电阻率硅制成的温度传感器的适用范围温度应小于 100°C 。

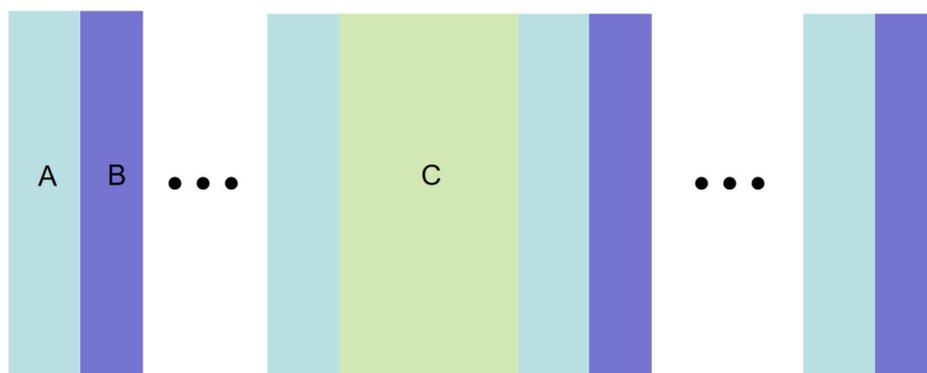


Figure 1. Photonic crystal temperature sensor with a glycerol defective layer
图 1. 含有甘油缺陷层的光子晶体温度传感器

甘油的折射率随温度的变化情况可由以下公式计算:

$$n_c = n_0 - \alpha(T - T_0) \quad (1)$$

其中 n_c 是随温度变化的甘油折射率, $\alpha = 2.95 \times 10^4$ 是甘油的温度系数, $n_0 = 1.4707$ 是参考温度 $T_0 = 20^\circ\text{C}$ 时甘油的折射率, T 是实际工作温度。设计结构在 20°C 至 95°C 范围内进行模拟, 这将实现更精确的结果[24]。因此, 我们就能计算出在不同温度下甘油的折射率如下表 1 所示。

Table 1. Change of glycerol reflective index with temperature
表 1. 甘油折射率随温度的变化

T ($^\circ\text{C}$)	n (RIU)
25	1.4692
35	1.4663

续表

45	1.4633
55	1.4604
65	1.4574
75	1.4544
85	1.4515
95	1.4486

硅的热光系数在 300~600 K 的温度范围内为 $1.8 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$, 二氧化硅的热光系数为 $1.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, 远小于甘油的热光系数 $1.9 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$, 因此 Si 和 SiO_2 的折射率变化仅为甘油的 0.95% 和 5.3%, 对缺陷模谐振的影响可忽略。

在这项工作中, 我们运用传递矩阵法(transfer matrix method TMM)来模拟光子晶体结构的光谱, TMM 是一种基于阿贝尔理论的数值方法, 可以分析多层结构的透射和反射光谱[25]。而具有缺陷层的整个结构总体特征矩阵使用切比雪夫多项式计算[26]:

$$F = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix} = (\mathbf{AB})^N (D) (\mathbf{AB})^N \quad (2)$$

其中 N 表示周期的数量。

光子晶体结构中单个周期(\mathbf{AB})的矩阵由下式给出

$$(\mathbf{AB}) = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta_1 & \frac{-i}{p_1} \sin \beta_1 \\ -ip_1 \sin \beta_1 & \cos \beta_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos \beta_2 & \frac{-i}{p_2} \sin \beta_2 \\ -ip_2 \sin \beta_2 & \cos \beta_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中:

$$\beta_j = \frac{2\pi d_j}{\lambda} n_j \cos \theta_j \quad (4)$$

是每层的相位角, $p_i = n_i \cos \theta_j, j=1, 2$; n_j 是该层的折射率, d_j 是每层的厚度, θ_j 是根据初始入射角给出的入射到层中的角度 θ_0 计算得到:

$$\cos \theta_j = \sqrt{1 - \left(\frac{n_0 \sin(\theta_0)}{n_j} \right)^2} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} f_{11} &= \cos \beta_1 \cos \beta_2 - \frac{p_2}{p_1} \sin \beta_1 \sin \beta_2 \\ f_{12} &= -i \left(\frac{1}{p_2} \cos \beta_1 \sin \beta_2 + \frac{1}{p_1} \sin \beta_1 \cos \beta_2 \right) \\ f_{21} &= -i (p_1 \sin \beta_1 \cos \beta_2 + p_2 \cos \beta_1 \sin \beta_2) \\ f_{22} &= \cos \beta_1 \cos \beta_2 - \frac{p_1}{p_2} \sin \beta_1 \sin \beta_2 \end{aligned} \quad (6)$$

对于具有 N 个周期的系统, 总特征矩阵 $\mathbf{F}(N_{AB})$ 可以如下获得:

$$\mathbf{F}(N_{AB}) = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix} \quad (7)$$

矩阵元素与上等式中的元素相关, 即:

$$\begin{aligned} F_{11} &= f_{11}U_{N-1}(\Psi) - U_{N-2}(\Psi) \\ F_{12} &= f_{12}U_{N-1}(\Psi) \\ F_{21} &= f_{21}U_{N-1}(\Psi) \\ F_{22} &= f_{22}U_{N-1}(\Psi) - U_{N-2}(\Psi) \end{aligned} \quad (8)$$

其中:

$$U_N(\Psi) = \frac{\sin((N+1)\cos^{-1}\Psi)}{\sqrt{1-\Psi^2}} \quad (9)$$

$U_N(\Psi)$ 是第二类切比雪夫多项式, 其自变量等于单周期矩阵的半迹, 即:

$$\Psi = (f_{11} + f_{22})/2 \quad (10)$$

光子晶体结构中缺陷层的矩阵是由下式给出:

$$\mathbf{G}(D_d) = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta_D & \frac{-i}{p_D} \sin \beta_D \\ -ip_D \sin \beta_D & \cos \beta_D \end{pmatrix} \quad (11)$$

其中: $\beta_D = \frac{2\pi d_D}{\lambda} n_D \cos \theta_D$ 是每层的相位角, $p_D = n_D \cos \theta_D$ 。

整个结构的透射率由下式给出:

$$T = \frac{Q_f}{Q_0} |t^2| \quad (12)$$

其中:

$$Q_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_0 \cos \theta_0, \quad Q_f = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_f \cos \theta_f, \quad t = \frac{2Q_0}{(M_{11} + Q_f M_{21})Q_0 + (M_{21} + Q_f M_{22})} \quad (13)$$

此外, 还有很多参数可用于衡量光子晶体的性能, 如品质因子(quality factor, QF)、性能值(figure of merit, FOM)、信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)、检测限度(detection limit, DL)和传感器分辨率(sensor resolution, SR)。其中, 温度传感器的品质因数使用谐振波长 λ 和透射峰的半高全宽来计算(FWHM): $QF = \lambda/\text{FWHM}$ [27]; 性能值为传感器的灵敏度 S 和透射峰的半高全宽(FWHM)的比值: $FOM = S/\text{FWHM}$ [28]; 性能值可用于衡量传感器监测温度变化的性能。信噪比是谐振峰波长的变化量和谐振峰的半高全宽的变化量比值的绝对值计算得出, $SNR = |\Delta\lambda/\Delta\text{FWHM}|$ [16]。检测限度是指一维光子晶体温度传感器能够测量的最小温度变化值, 其表达式为: $DL = \lambda 4_T/20SQF$ [29] 传感器分辨率是指传感器可以检测到的折光率(RI)的最小变化, 它由检测极限(DL)和灵敏度(S)的乘积给出 $SR = DL \times S$ [30]。

3. 研究结果与分析

为了研究甘油缺陷层对光子晶体透射特性的影响, 我们分别模拟并比较了无缺陷结构与含甘油缺陷

结构在太赫兹波段下的透射率光谱。图 2 和图 3 分别展示了这两种结构在 20°C 条件下的透射率随波长的变化情况。由图 2 从图中可以观察到, 在 630~965 μm 附近存在一个明显的光子带隙(Photonic Band Gap, PBG), 其透射率接近于零, 表明该波长范围内的电磁波无法在结构中传播, 符合光子晶体的基本特性。带隙边缘陡峭, 说明该结构具有良好的周期性调控能力, 能够有效抑制特定频段的光传输。在图 3 中, 我们在原有无缺陷结构的基础上引入了甘油作为缺陷层, 构成 $(\text{Si}/\text{SiO}_2)^{5.5}/\text{Glycerol}/(\text{Si}/\text{SiO}_2)^6$ 的对称结构。引入缺陷后, 在原本完整的光子带隙中出现了—个显著的透射峰, 其中心波长位于 8.74×10^6 nm, 即 874 μm , 透射率接近 100%。这一现象是由于缺陷层的引入破坏了光子晶体的周期性结构, 导致在禁带中形成缺陷态(Defect Mode), 从而使特定波长的波能够以极高的效率穿过结构。该透射峰的出现是光子晶体传感器实现高灵敏度探测的物理基础。

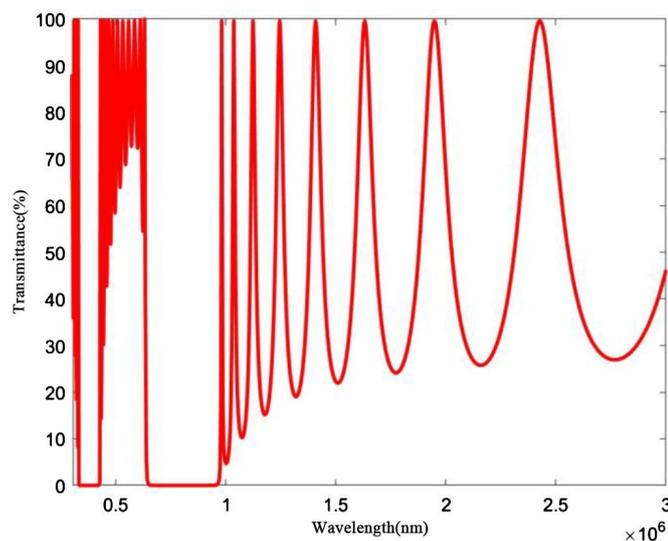


Figure 2. Photonic crystal temperature sensor without glycerol defective layer
图 2. 不含甘油缺陷层的光子晶体温度传感器

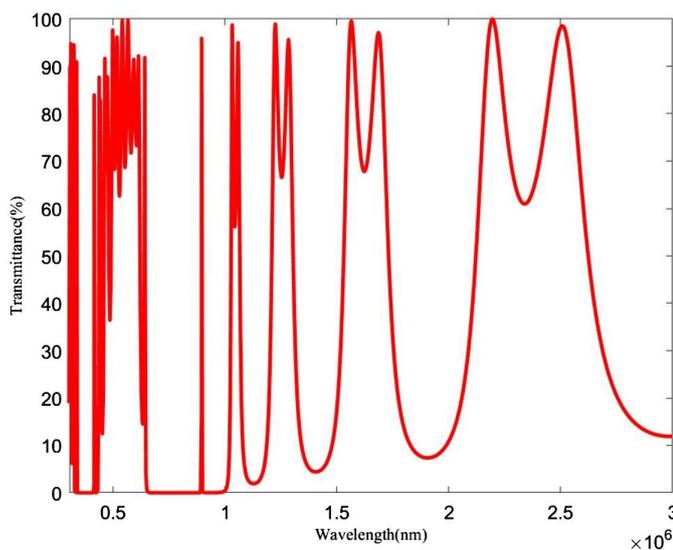


Figure 3. Photonic crystal temperature sensor with a glycerol defective layer
图 3. 含有甘油缺陷层的光子晶体温度传感器

对比图 2 与图 3 可知, 甘油缺陷层的引入显著改变了光子晶体的传输特性。无缺陷结构中仅存在完整的光子带隙, 而含缺陷结构则在带隙中形成了一个窄带、高透射率的谐振峰。该谐振峰的位置(波长)对甘油折射率的变化极为敏感, 而甘油折射率又随温度变化, 因此可通过监测透射峰位置的漂移实现对温度的高精度检测。

为了深入研究该光子晶体温度传感器的性能, 我们系统分析了其在 25°C 至 95°C 温度范围内的光谱响应特性。图 4 展示了在五个典型温度点(25°C、45°C、65°C、75°C、95°C)下, 传感器透射谱中缺陷模谐振峰的位置变化情况。从图 4 可以清晰地观察到, 随着温度的升高, 透射谱中的谐振峰发生了显著的蓝移现象, 通过提取不同温度下的精确谐振波长(λT), 我们可以对传感器的灵敏度进行定量评估。灵敏度(S)定义为谐振波长随温度的变化率, 即 $S = \Delta\lambda/\Delta T$, 单位为 $\text{nm}/^\circ\text{C}$, $\Delta\lambda$ 是透射峰所对应的波长变化量, ΔT 是温度变化量[16]。根据图 4 中的数据趋势, 谐振波长与温度之间呈现出良好的线性关系。通过对数据点进行线性拟合, 计算得出该传感器在 20°C 至 95°C 温度范围内的平均灵敏度为 $77 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。

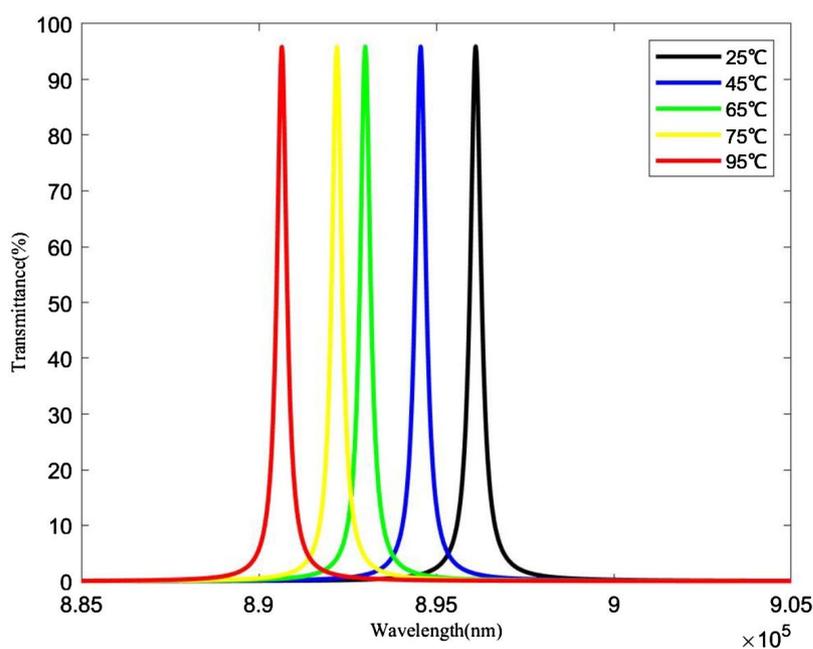


Figure 4. The wavelengths corresponding to the resonance peaks at different temperatures: 25°C (black), 45°C (blue), 65°C (green), 75°C (yellow), 95°C (red). The incident angle is 0° , and the defect layer thickness is $250 \mu\text{m}$

图 4. 不同温度下的谐振峰所对应的波长 25°C (黑色)、45°C (蓝色)、65°C (绿色)、75°C (黄色)、95°C (红色), 此时入射角为 0° , 缺陷层厚度为 $250 \mu\text{m}$

为了优化传感器性能并探究其在实际应用中的适应性, 我们系统研究了入射角(0° 、 10° 、 20° 、 30°)对传感器谐振特性与灵敏度的影响。图 5(a)~(c)分别展示了在 10° 、 20° 和 30° 入射角下, 谐振波长随温度(25°C 至 95°C)升高而蓝移的情况。通过提取并分析不同入射角下的谐振波长数据, 我们计算了对应的传感器的灵敏度(S), 并绘制了灵敏度随入射角的变化关系图(图 5(d))。

结果表明: 如图 5(d)所示, 在 0° 至 30° 的入射角范围内, 传感器的灵敏度表现出优异的稳定性。其具体数值分别为: 0° 时 $77 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 、 10° 时 $78.25 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 、 20° 时 $78.37 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 、 30° 时 $78.25 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。灵敏度值波动极小, 最大变化幅度仅为约 $1.37 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。具体参考值如表 2 所示。这证明该传感器性能对入射角的变化不敏感, 具备良好的角度容差, 有利于在实际应用中降低对准精度要求, 提高系统的鲁棒性。

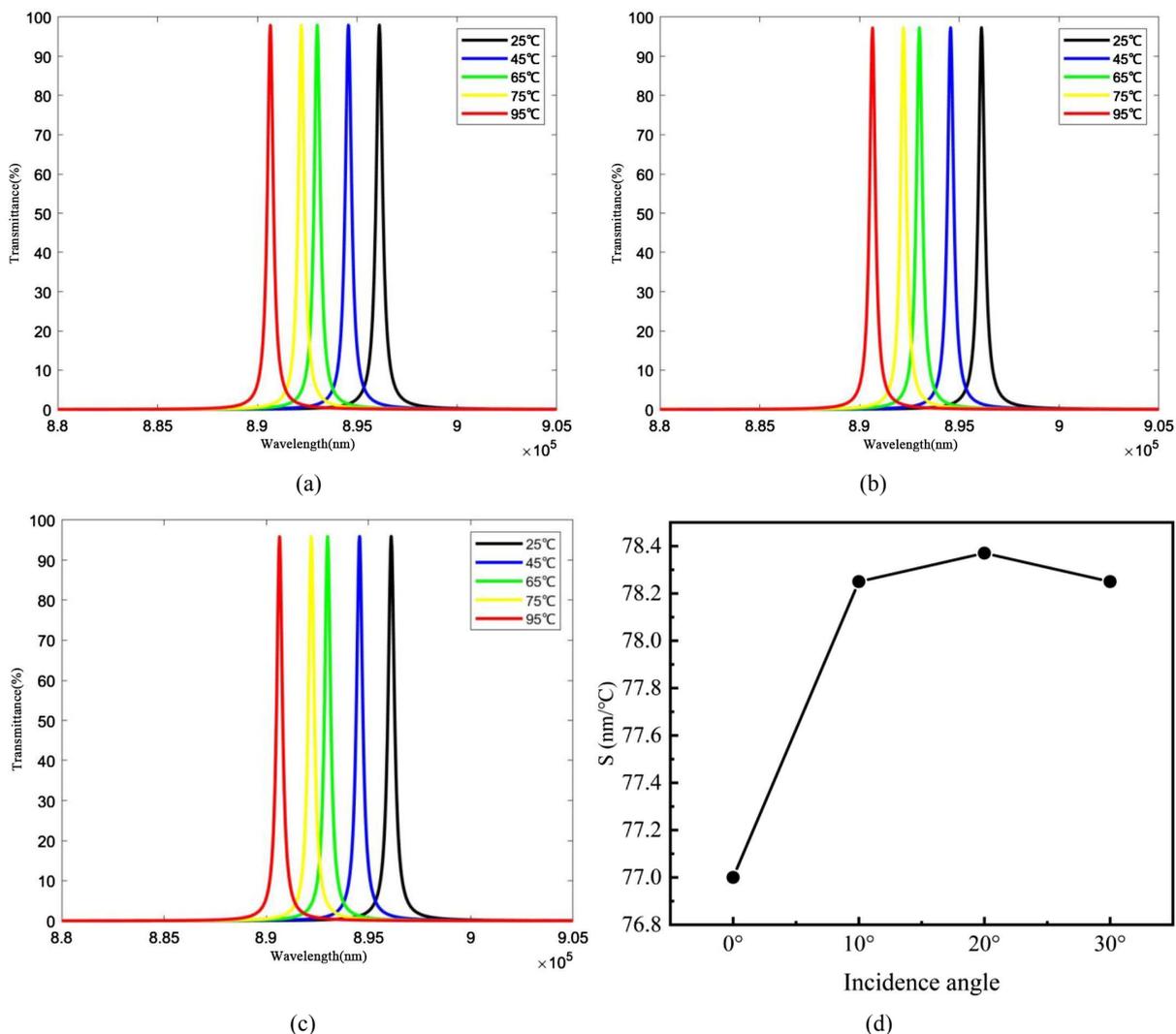


Figure 5. (a)~(c) Variation of resonant wavelength with temperature at incidence angles of 10°, 20°, 30°; (d) sensitivity variation with angle of incidence

图 5. (a)~(c) 入射角分别为 10°, 20°, 30°时谐振波长随温度的变化; (d) 灵敏度随入射角的变化

Table 2. Corresponding values of each parameter at different angles of incidence

表 2. 不同入射角下各参数的对应值

θ (°)	S (nm/°C)	QF	FOM (°C ⁻¹)	SNR	DL (°C)	SR (nm)
0	77	2358	0.20	156	0.25	19
10	78.25	2358	0.21	155	0.24	19
20	78.37	2489	0.22	153	0.23	18
30	78.25	2635	0.23	1150	0.22	17

本文所设计的太赫兹光子晶体温度传感器在 0°至 30°的入射范围内, 能够保持约 78 nm/°C的高且稳定的灵敏度。这一特性显著提升了该传感器的实用价值, 使其在需要对非垂直入射或不完全准直的光束进行探测的场景中, 具有广泛的应用潜力。

为了进一步确定缺陷层厚度对传感器性能的优化方向, 我们系统研究了在 20° 入射角下, 甘油缺陷层厚度从 $200\ \mu\text{m}$ 增加至 $260\ \mu\text{m}$ 时, 传感器的谐振特性与灵敏度的变化规律。图 6(a)~(d) 分别展示了缺陷层厚度为 $200\ \mu\text{m}$ 、 $220\ \mu\text{m}$ 、 $240\ \mu\text{m}$ 和 $260\ \mu\text{m}$ 时, 谐振峰随温度变化的响应情况。计算结果表明, 传感器的灵敏度在不同缺陷层厚度下保持了较高的数值和良好的稳定性。具体灵敏度值为: $200\ \mu\text{m}$ 时为 $74.75\ \text{nm}/^\circ\text{C}$, $220\ \mu\text{m}$ 时为 $78.25\ \text{nm}/^\circ\text{C}$, $240\ \mu\text{m}$ 时为 $78.87\ \text{nm}/^\circ\text{C}$, $260\ \mu\text{m}$ 时为 $76.87\ \text{nm}/^\circ\text{C}$ 。具体参数值由表 3 所示。灵敏度的波动范围较小, 这表明在 $200\ \mu\text{m}$ 至 $260\ \mu\text{m}$ 的范围内, 缺陷层厚度的变化并非影响传感器温度灵敏度的主导因素。传感器的灵敏度主要依赖于甘油本身的热光系数, 在该厚度区间内表现出良好的鲁棒性。尽管灵敏度保持稳定, 但从图 6(a)~(d) 可以清晰地观察到, 随着缺陷层厚度的增加, 所有温度下的谐振峰均发生了显著的红移, 即谐振波长向长波方向移动。这一现象符合光学谐振的物理机制: 缺陷层厚度的增加等效于增大了谐振腔的光学长度, 根据谐振条件, 维持特定模式振荡所需的波长也随之增加。在实际应用中, 可以通过调整缺陷层的厚度, 将传感器的工作点(即中心谐振波长)精确地设定在太赫兹源或探测器的最佳性能波段, 而无需担心其核心灵敏度指标发生显著劣化, 从而增强了传感器设计的灵活性与可定制性。

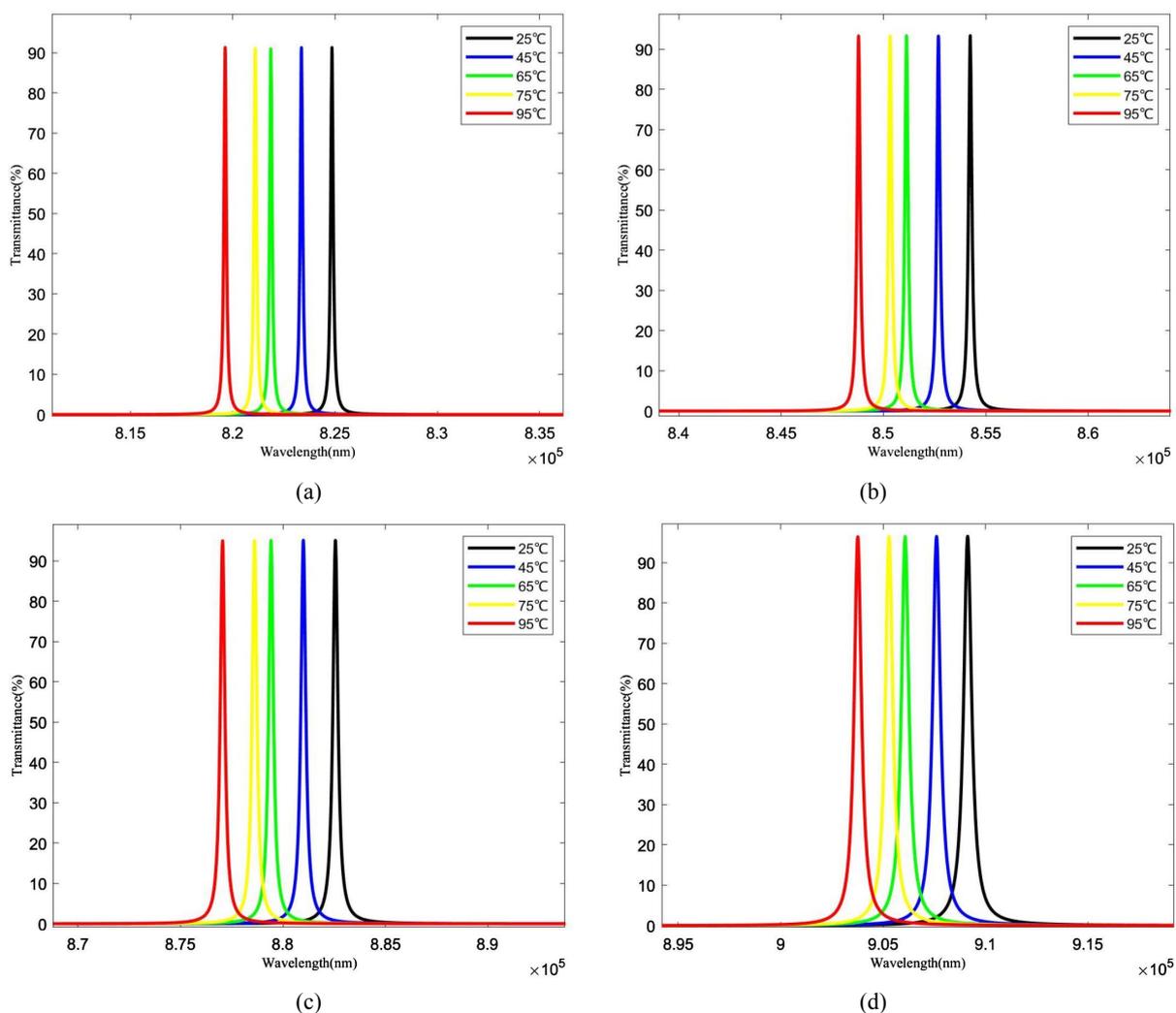


Figure 6. (a)~(d) Change of resonance peak with temperature under different defect layer thicknesses

图 6. (a)~(d) 不同缺陷层厚度下, 谐振峰随温度的变化

Table 3. Values of each parameter under different defect layer thicknesses**表 3.** 不同缺陷层厚度下各参数对应的值

Dc (μm)	S ($\text{nm}/^\circ\text{C}$)	QF	FOM ($^\circ\text{C}^{-1}$)	SNR	DL ($^\circ\text{C}$)	SR (nm)
200	74.75	6345	0.58	149	0.09	6.5
220	78.25	4490	0.41	1560	0.12	9.5
240	78.87	3043	0.27	157	0.18	14.5
260	76.87	1894	0.16	76.5	0.31	24

4. 总结

本文围绕一维缺陷型光子晶体温度传感器在太赫兹波段展开系统研究。通过将高电阻率阻硅与二氧化硅构成周期性布拉格反射镜,并在中心引入甘油缺陷层,利用甘油的热光系数(-2.95×10^{-4} RIU/ $^\circ\text{C}$),在 0.63~0.97 THz 频段内获得了窄带缺陷模透射峰。基于传输矩阵法的全参数数值模拟表明:缺陷模波长随温度升高呈线性蓝移,20 $^\circ\text{C}$ ~95 $^\circ\text{C}$ 范围内平均灵敏度达 77 nm/ $^\circ\text{C}$,优于绝大多数已报道的太赫兹光子晶体温度传感器。在 0 $^\circ$ ~30 $^\circ$ 入射角范围内,灵敏度波动 < 1.4 nm/ $^\circ\text{C}$,表现出优异的角度鲁棒性,显著降低实际对准难度。当缺陷层厚度在 200~260 μm 区间变化时,灵敏度保持 75~79 nm/ $^\circ\text{C}$ 的高水平,而品质因数 Q 在 200 μm 处达到峰值 6345;缺陷层厚度主要用来“牵引”工作波长,而不牺牲灵敏度,为系统与特定的太赫兹波源匹配提供了额外的自由度。综合评估品质因数 QF、性能值 FOM、信噪比 SNR、检测限度 DL 与分辨率 SR,传感器在 20 $^\circ$ 入射角、200 μm 缺陷层厚度的条件下实现 DL = 0.09 $^\circ\text{C}$ 、SR = 6.5 nm 的最佳指标,兼具高灵敏度与高分辨能力。上述结果证实,所提出的“高阻硅/二氧化硅/甘油缺陷层”结构可在 <100 $^\circ\text{C}$ 的温和区段实现可重复、快速且精准的温度监测,为太赫兹无损检测、文物保护、生物样品微环境监控等应用场景提供了一种结构简单、制备兼容 CMOS、无需金属图案化的全新传感方案。未来工作将围绕传感器封装、甘油替代性低挥发液体探索以及多通道阵列集成展开,以进一步提升器件的长期稳定性与成像分辨率。

此外,本文与已发表的温度传感器进行了灵敏度的对比,如表 4 所示:本文在保持高灵敏度的同时,制备工艺更简单、成本更低。

Table 4. Comparison of the results of this work with other results**表 4.** 本文工作结果与其他结果对比

	结构类型	S ($\text{nm}/^\circ\text{C}$)
This work	一维光子晶体(甘油缺陷)	77
Manal A. [16]	一维光子晶体	20
Abadla [15]	一维缺陷环形光子晶体	0.01069
El-Naggar [14]	圆柱形光子晶体	0.0056

5. 未来展望

本文所设计的高阻硅/SiO₂/甘油缺陷层一维光子晶体温度传感器,在太赫兹波段实现了高灵敏度、高角度鲁棒性和高分辨率的温度探测,为太赫兹温度传感提供了全新方案。结合当前研究现状与实际应用需求,未来的研究与开发可围绕三个方向展开:

- (1) 缺陷层材料的优化与替代:目前采用的甘油存在易挥发、高温稳定性有限的问题,未来可探索低

挥发、高热光系数的液体介质作为甘油的替代材料, 通过测试不同液体的热光系数、折射率温度稳定性、太赫兹波段吸收特性, 筛选出更适配太赫兹传感的缺陷层材料, 提升传感器的长期工作稳定性和工作温度上限。

(2) 传感器性能的进一步提升: 在现有结构基础上, 通过多层缺陷层设计、周期性结构的介电常数梯度优化, 实现多谐振峰的温度探测, 拓展传感器的波长工作范围; 结合机器学习算法, 对透射光谱的谐振峰偏移进行精准拟合与校正, 降低环境噪声、工艺偏差对探测结果的影响, 进一步减小检测限度, 提升温度探测的精度。

(3) 工程化封装与应用场景落地: 进一步优化传感器的工程化封装方案, 开发出适应不同应用环境的封装形式, 针对生物样品微环境监控, 设计生物相容性的微流控封装结构, 实现传感器与生物样品的无接触式温度探测; 针对文物保护、太赫兹无损检测, 设计耐高温、抗振动的工业级封装结构, 适配现场复杂的工作环境。

参考文献

- [1] 刘省珍, 谭琳, 左洪峰, 梁丽娟, 李莲芳, 俞朝晖. 光子晶体的制备与应用[J]. 数字印刷, 2022(6): 1-1335.
- [2] Zhu, Q., Wang, D. and Zhang, Y. (2011) Control of Photonic Band Gaps in One-Dimensional Photonic Crystals. *Optik*, **122**, 330-332. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2010.02.016>
- [3] Buerk, D.G. (1995) *Biosensors: Theory and Applications*. CRC Press.
- [4] Nair, R.V. and Vijaya, R. (2010) Photonic Crystal Sensors: An Overview. *Progress in Quantum Electronics*, **34**, 89-134. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2010.01.001>
- [5] Ayyanar, N., Sreekanth, K.V., Raja, G.T. and Rajan, M.S.M. (2021) Photonic Crystal Fiber-Based Reconfigurable Biosensor Using Phase Change Material. *IEEE Transactions on NanoBioscience*, **20**, 338-344. <https://doi.org/10.1109/tnb.2021.3065006>
- [6] Lu, T.-W., Wu, C.-C. and Lee, P.-T. (2018) 1D Photonic Crystal Strain Sensors. *ACS Photonics*, **5**, 2767-2772. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.8b00560>
- [7] Yablonovitch, E. (1987) Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. *Physical Review Letters*, **58**, 2059-2062. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.58.2059>
- [8] John, S. (1987) Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices. *Physical Review Letters*, **58**, 2486-2489. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.58.2486>
- [9] Chang, Y.-H., Jhu, Y.-Y. and Wu, C.-J. (2012) Temperature Dependence of Defect Mode in a Defective Photonic Crystal. *Optics Communications*, **285**, 1501-1504. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.10.053>
- [10] Olyae, S., Seifouri, M., Karami, R. and Mohebzadeh-Bahabady, A. (2019) Designing a High Sensitivity Hexagonal Nano-Cavity Photonic Crystal Resonator for the Purpose of Seawater Salinity Sensing. *Optical and Quantum Electronics*, **51**, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s11082-019-1778-z>
- [11] Fenzl, C., Hirsch, T. and Wolfbeis, O.S. (2014) Photonic Crystals for Chemical Sensing and Biosensing. *Angewandte Chemie International Edition*, **53**, 3318-3335. <https://doi.org/10.1002/anie.201307828>
- [12] Kumar, A., Kumar, V., Suthar, B., Bhargava, A., Singh, K.S. and Ojha, S.P. (2012) Wide Range Temperature Sensors Based on One-Dimensional Photonic Crystal with a Single Defect. *International Journal of Microwave Science and Technology*, **2012**, Article ID: 182793. <https://doi.org/10.1155/2012/182793>
- [13] El-Amassi, D.M., Taya, S.A. and Vigneswaran, D. (2018) Temperature Sensor Utilizing a Ternary Photonic Crystal with a Polymer Layer Sandwiched between Si and SiO₂ Layers. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, **12**, 293-298. <https://doi.org/10.1007/s40094-018-0308-x>
- [14] El-Naggar, S.A., Nguyen, T.K. and Dhasarathan, V. (2020) Numerical Analysis of Tunable Defect Mode in Cylindrical Photonic Crystals Configuration. *Microwave and Optical Technology Letters*, **62**, 3351-3358. <https://doi.org/10.1002/mop.32437>
- [15] Abadla, M.M., Elsayed, H.A. and Mehaney, A. (2020) Novel Design for the Temperature Sensing Using Annular Photonic Crystals. *Silicon*, **13**, 4737-4745. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00788-5>
- [16] Maher, M.A., Aly, A.H., Esmail, M.S. and El-Ghany, S.E.-A. (2025) Maximizing Temperature Sensitivity in a One-Dimensional Photonic Crystal Thermal Sensor. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 4105. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82889-4>

- [17] Zaky, Z.A. and Aly, A.H. (2020) Theoretical Study of a Tunable Low-Temperature Photonic Crystal Sensor Using Dielectric-Superconductor Nanocomposite Layers. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, **33**, 2983-2990. <https://doi.org/10.1007/s10948-020-05584-1>
- [18] Zhang, Y., Huang, M. and Xu, J. (2021) Advances in Terahertz Technology for Medical Diagnostics. *Advanced Optical Materials*, **9**, Article ID: 2002201.
- [19] Sidorov, A.I. and Ignatieva, L.A. (2021) 1D Photonic Crystal with Defect for Microfluidic Applications in near IR and Thz Spectral Ranges. *Optik*, **245**, Article ID: 167685. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167685>
- [20] Chen, Z.X., Liang, B.M. and Zhuang, S.L. (2019) Study on Photonic Crystal-Based Temperature Sensor at Terahertz Band. *Optical Instruments*, **41**, 55-59. (In Chinese)
- [21] Grischkowsky, D., Keiding, S., van Exter, M. and Fattinger, C. (1990) Far-Infrared Time-Domain Spectroscopy with Terahertz Beams of Dielectrics and Semiconductors. *Journal of the Optical Society of America B*, **7**, 2006-2015. <https://doi.org/10.1364/josab.7.002006>
- [22] Aly, A.H., Mohamed, B.A., Al-Dossari, M., *et al.* (2023) Ultra-Sensitive Temperature Sensor Based on Defective One-Dimensional Si/PS/SiO₂ Photonic Crystal. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 21560.
- [23] Slack, G.A. (1973) Nonmetallic Crystals with High Thermal Conductivity. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **34**, 321-335. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(73\)90092-9](https://doi.org/10.1016/0022-3697(73)90092-9)
- [24] Bing, P.B., Li, Z.Y., Yao, J.Q., Lu, Y. and Di, Z.G. (2012) A Photonic Crystal Fiber Based on Surface Plasmon Resonance Temperature Sensor with Liquid Core. *Modern Physics Letters B*, **26**, Article ID: 1250082. <https://doi.org/10.1142/s0217984912500820>
- [25] Abelès, F. (1950) Recherches sur la propagation des ondes électromagnétiques sinusoïdales dans les milieux stratifiés. *Annales de Physique*, **12**, 706-782. <https://doi.org/10.1051/anphys/195012050706>
- [26] Revathy, V., Boopathi, C.S., Selvakumar, K., Joseph Wilson, K.S., Taya, S.A., Aly, A.H., *et al.* (2019) Nonlinear Polarization in Metal Nanocomposite System Based Photonic Crystals. *Optik*, **176**, 78-84. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.09.038>
- [27] Elmahdy, N.A., Esmail, M.S. and El-Okr, M.M. (2018) Characterization of a Thermal Sensor Based on One-Dimensional Photonic Crystal with Central Liquid Crystal Defect. *Optik*, **170**, 444-451. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.05.117>
- [28] Qiao, Q., Xia, J., Lee, C. and Zhou, G. (2018) Applications of Photonic Crystal Nanobeam Cavities for Sensing. *Micromachines*, **9**, Article No. 541. <https://doi.org/10.3390/mi9110541>
- [29] El Beheiry, M., Liu, V., Fan, S. and Levi, O. (2010) Sensitivity Enhancement in Photonic Crystal Slab Biosensors. *Optics Express*, **18**, 22702-22714. <https://doi.org/10.1364/oe.18.022702>
- [30] Rahman-Zadeh, F., Danaie, M. and Kaatuzian, H. (2019) Design of a Highly Sensitive Photonic Crystal Refractive Index Sensor Incorporating Ring-Shaped Gaas Cavity. *Opto-Electronics Review*, **27**, 369-377. <https://doi.org/10.1016/j.opelre.2019.11.007>