

文章编号:1001-5078(2024)07-1164-08

· 光纤传感及光通讯技术 ·

## 基于光子晶体光纤的局部放电检测

张 海, 徐 广, 陈 明, 刘 伟, 何国斌, 李建东  
(云南电网有限责任公司大理供电局, 云南 大理 671000)

**摘 要:**局部放电检测对于保障高压电力系统的安全运行至关重要。本文提出了一种针对高压设备局部放电检测的表面等离子体共振 D 型光子晶体光纤传感器, 该方案采用一种光致变色凝胶作为敏感单元, 用于感知局部放电所产生的紫外线辐射。该凝胶的折射率会随辐射强度的变化而变化, 从而影响光纤纤芯和表面等离激元模式之间的耦合共振波长。通过全矢量有限元法对传感器的性能进行了理论和仿真分析, 并对传感器的几何参数进行了研究, 以优化传感器的灵敏度, 最后进行了实验验证。结果表明所设计传感器的灵敏度值可达  $2.4 \text{ nm/mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。该传感器结构简单、成本低廉, 为光纤局部放电传感的研究提供了参考。

**关键词:** 光纤传感器; 光子晶体光纤; 局部放电检测; 等离激元

**中图分类号:** TN247; TP212.4<sup>+</sup>4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.07.025

## Partial discharge detection based on photonic crystal fibers

ZHANG Hai, XU Guang, CHEN Ming, LIU Wei, HE Guo-bin, LI Jian-dong  
(Dali Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Dali 671000, China)

**Abstract:** Partial discharge detection is crucial to ensure the safe operation of high-power systems. In this paper, a surface plasmon resonance D-type photonic crystal fiber sensor for partial discharge detection in high-voltage equipment is proposed, and the scheme employs a photochromic gel as a sensitive unit for sensing the ultraviolet radiation generated by partial discharges. The refractive index of the gel varies with the radiation intensity, affecting the coupling resonance wavelength between the fiber core and the surface plasmon modes. The performance of the sensor is analyzed theoretically and simulated firstly by the full vector finite element method, then the geometric parameters of the sensor are studied to optimize the sensitivity of the sensor, and experimental verification is carried out finally. The results show that the sensitivity value of the designed sensor can reach up to  $2.4 \text{ nm/mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ . The simple structure and low cost of the sensor provide a reference for the study of fibre optic partial discharge sensing.

**Keywords:** fiber optic sensor; photonic crystal fiber; partial discharge detection; plasmon

### 1 引言

局部放电是高压电力系统中一个普遍发生的现象<sup>[1]</sup>。通过对局部放电的检测,可以有效预防高压设备的持续恶化,从而避免可能导致破坏性击穿和重大损失的情况发生<sup>[2]</sup>。基于局部放电发生的物

理效应,研究者们已经开发了多种用于局部放电的检测方法。基于光纤的局部放电检测方法具有高灵敏度、抗电磁干扰和体积小等优点<sup>[3-5]</sup>被广泛关注,例如法布里珀罗型<sup>[6-7]</sup>、光纤光栅型<sup>[8]</sup>、迈克尔干涉仪型<sup>[9]</sup>和荧光光纤<sup>[10]</sup>等,这些基于光纤局部放电的

**基金项目:** 中国南方电网有限责任公司科技项目(No. YNKJXM20200176)资助。

**作者简介:** 张 海(1977-)男,硕士,工程师,主要从事电力巡检及局部放电检测技术研究。E-mail: zh7765@yeah.net

**通讯作者:** 李建东(1976-)男,博士,高级工程师,主要从事光电检测,光传感技术研究。E-mail: jiangdongli@gamil.com

**收稿日期:** 2023-10-15; **修订日期:** 2023-12-11

传统检测方法在许多应用中表现出色,但是这些方法也受到一些限制,比如:光纤纤芯直径、模态截止波长限制和频率响应范围<sup>[11]</sup>,需要在纤芯和包层材质之间选择具有相似热特性的材料等。为了克服这些限制,众多学者不断研究和创新,以进一步提高光学局部放电检测技术的性能和应用范围。

与传统光纤相比,光子晶体光纤具备诸多优越性能,例如高双折射率、低损耗导波、高功率传输和低弯曲损耗等<sup>[12]</sup>。光子晶体光纤的结构和性质使其在许多应用领域都具有广泛的用途,包括通信、传感和光学器件等。D型光子晶体光纤因其高效率的传感特性引起了众多学者的研究兴趣。其结构是将光子晶体光纤的包层经过抛光以形成平坦的表面,然后将金属层和分析物放置在光子晶体光纤抛光表面的顶部。Huang Huimin 等人提出了一种光子晶体光纤磁场传感器,其磁场灵敏度达到 61.25 pm/Oe,检测范围为 50 ~ 130 Oe<sup>[13]</sup>。Osifeso 等人设计了一种多芯光子晶体光纤温度传感器,使用乙醇或苯作为温度传感介质,其对乙醇和苯的灵敏度分别为 360 pm/°C 和 23.3 nm/°C<sup>[14]</sup>。为了增强传感器性能,TiN 常被引入作为替代等离子体材料,Ag/TiN 配置下的横向电模和横向磁模的灵敏度分别达到 7000 nm/RIU 和 6900 nm/RIU<sup>[15]</sup>。

本文提出了一种用于电力系统局部放电检测的 D 型光子晶体光纤表面等离子体激元传感器。通过对光子晶体光纤进行侧面抛光,形成了一个被银膜覆盖的平坦表面,并引入一层 TiN 涂层作为保护,避免发生氧化问题。然后选用了一种对紫外线极为敏感的光致变色凝胶作为传感分析物,将分析物放置在 TiN 层上与局部放电产生的辐射紫外线直接接触,局部放电产生的电荷可以利用辐射光强度来反映,以实现即时响应和实时检测,并对传感方案进行了理论和仿真分析和实验验证。

## 2 传感器设计

图 1(a) 所示为传感方案的结构示意图,光源发出的光经单模光纤后到达 D 型光子晶体光纤,将在双金属/电介质界面处激发表面等离子体激元;发生局部放电时,伴随产生的紫外线辐射会引起传感材料的折射率变化,这将导致谐振波长的漂移,然后通过光谱分析仪和计算机进行数据处理,从而得到局部放电信息。D 型光子晶体光纤结构如图 1(b) 所

示,其中孔距  $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ ,直径  $d_h = 0.8 \Lambda$ ;纤芯直径  $d_c = 0.3 \Lambda$ ,纤芯中心与抛光面的距离  $h_c = 0.5 \Lambda$ 。另外银层的厚度为  $t_{\text{Ag}} = 30 \text{ nm}$ ,TiN 层的厚度为  $t_{\text{TiN}} = 5 \text{ nm}$ 。值得注意的是,在传感材料上使用了衰减层,以将光强度保持在较低水平,以避免传感材料的饱和。

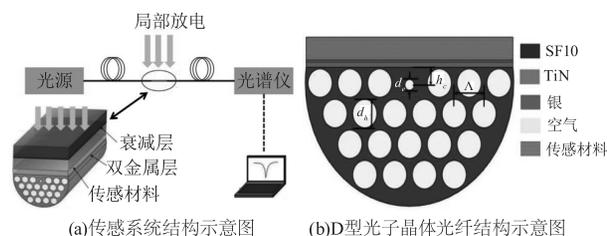


图 1 传感系统及 D 型光子晶体光纤结构图

Fig. 1 Sensing system and D-type photonic crystal optical fiber structure diagram

为了进行更精准的模拟,需要考虑材料的色散问题。实验选用的基底材料是 SF10 玻璃,其 Selmeier 方程可以表示为:

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{A_1 \lambda^2}{\lambda^2 - B_1} + \frac{A_2 \lambda^2}{\lambda^2 - B_2} + \frac{A_3 \lambda^2}{\lambda^2 - B_3} \quad (1)$$

其中, $n(\lambda)$  是 SF10 在波长  $\lambda$  下的折射率,其中  $A_1 = 1.622, A_2 = 0.256, A_3 = 1.644, B_1 = 0.012 \mu\text{m}^2, B_2 = 0.059 \mu\text{m}^2$  和  $B_3 = 147.469 \mu\text{m}^2$ 。第一种沉积在 D 型光子晶体光纤上表面的材料为银,其厚度  $t_{\text{Ag}} = 30 \text{ nm}$ 。此外银具有以下相对介电常数:

$$\varepsilon = \varepsilon_\infty + \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\omega_\tau)} \quad (2)$$

其中, $\varepsilon_\infty = 9.84, \omega_p = 1.36 \times 10^{16} \text{ rad/s}, \omega_\tau = 1.018 \times 10^{14} \text{ rad/s}$ 。与紫外敏感材料相邻的第二层等离子体材料是厚度  $t_{\text{TiN}} = 5 \text{ nm}$  的 TiN。在 500 °C 下沉积的 TiN 薄膜的介电性能可以由 Drude-Lorentz 模型表示为:

$$\varepsilon = \varepsilon_b - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma_p)} + \frac{f_1 \omega_1^2}{(\omega_1^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_1)} \quad (3)$$

其中,  $\varepsilon_b = 2.485, \omega_p = 5.853 \text{ eV}, \gamma_p = 0.5142 \text{ eV}, \omega_1 = 2.4852 \text{ eV}, \omega_1 = 3.9545 \text{ eV}$  和  $f_1 = 2.0376$ 。在紫外线的激发下,光致变色机制通过改变材料的折射率来引起吸收光谱的变化。此外,通过可见光或热照射可以使其恢复到初始状态,进行逆反应。实验

中选用的光致变色材料为 Spirooxazine dyes, 该材料被广泛应用于多个领域, 如紫外线探测器、可逆光学数据存储、多重全息光栅和非线性光学等。

### 3 仿真分析与结果

利用 COMSOL Multiphysics 全矢量有限元法对所提出的传感器进行分析。传感器的横截面用三角形单元离散化, 最大和最小单元尺寸分别为  $0.05 \mu\text{m}$  和  $4 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ , 导模有效折射率虚部  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  与波长相关的损耗可以表示为:

$$\text{Loss} = 8.686 \times \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times \frac{2\pi}{\lambda(\text{nm})} \times 10^7 [\text{dB}/\text{cm}] \quad (4)$$

图 2(a) ~ (b) 和 (c) ~ (d) 所示分别为在谐振波长  $600 \text{ nm}$  和  $688 \text{ nm}$  时, 纤芯  $y$  偏振模式与等离子激元  $y$  偏振模式场分布。从图中可以看出纤芯  $y$  偏振模式和等离子激元模式之间存在较大的能量传输。同时在谐振波长位置, 纤芯模式会表现出较大的损耗, 这个谐振波长取决于传感介质的折射率。因此, 可以通过以下公式来计算传感器的灵敏度:

$$S_I (\frac{\text{nm}}{\text{mW}} \cdot \text{cm}^{-2}) = \frac{\Delta\lambda_{\text{peak}}}{\Delta I} \quad (5)$$

其中  $\Delta\lambda_{\text{peak}}$  是共振波长漂移量,  $\Delta I$  是光强度的变化量 (单位为  $\text{mW}/\text{cm}^2$ )。在本研究中, 产生紫外辐射的光源的光功率为  $5 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 。

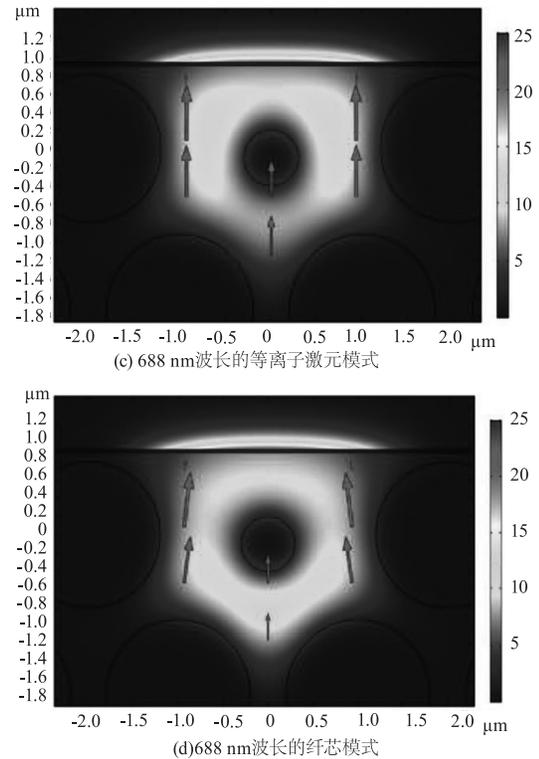
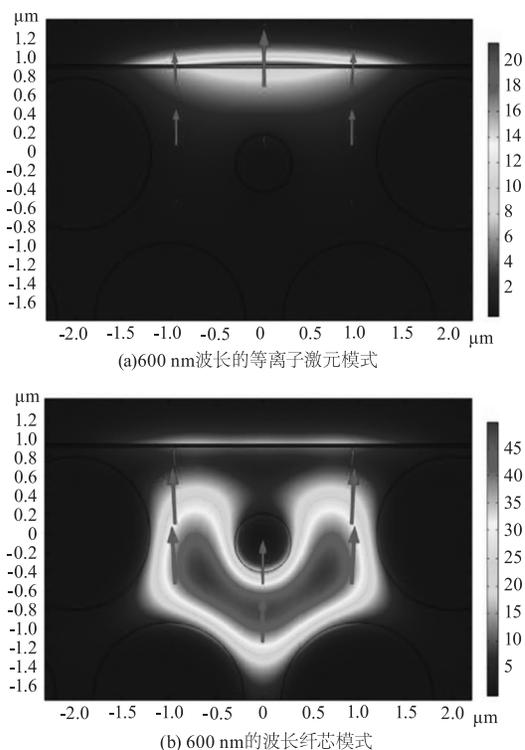


图 2 不同波长和模式下的  $y$  偏振模场图

Fig. 2 Y-polarization mode field diagrams at different wavelengths and modes

信噪比 (SNR) 是评价传感器性能的重要参数, 可以通过能效系数进行验证。能效系数可由灵敏度与半峰全宽表示为:

$$\text{FOM} (\text{mW}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}) = \frac{S_I (\text{nm}/\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2})}{\text{FWHM} (\text{nm})} \quad (6)$$

其中,  $S_I$  是计算出的传感器灵敏度; FWHM 是半宽全高。为了使传感器达到最佳的性能, 对传感器的结构参数进行了详细的分析。需要注意的是, 表面等离子体激元受金属层厚度的影响, 因此在其他参数保持不变的情况下, 首先研究了银层厚度对传感器的影响。如图 3(a) 所示为当银层厚度从  $25 \text{ nm}$  变化到  $40 \text{ nm}$  时 (步长为  $5 \text{ nm}$ ), 光谱随波长的变化情况。可以看出随着银层厚度的增加, 共振波长随之逐渐变大; 当紫外线辐射后, 峰值也随之发生了变化; 另外随着银膜厚度从  $25 \text{ nm}$  增加到  $30 \text{ nm}$ , 光谱增加并变窄; 然而当银膜厚度进一步增加到  $35$  和  $40 \text{ nm}$ , 光谱的宽度会减少。随着金属层厚度的增加, 纤芯导模将与表面等离子模发生屏蔽作用, 导致耦合效率和传感器灵敏度的降低, 如图 3(b) 所示。可以看出当银膜厚度为  $25 \text{ nm}$  时获得了最大的灵敏度, 达到了  $2.2 \text{ nm}/\text{mW} \cdot \text{cm}^2$ ; 此时损耗光谱显示出较大的半宽全高  $91 \text{ nm}$ , 而能效系数为  $0.024 \text{ mW}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ ; 这

种较大的半高宽可能会受到频谱噪声的影响,从而影响检测的准确性。当银膜厚度为 30 nm 时,实现了最高的能效系数  $0.051 \text{ mW}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ 。因此,在后续的分析中,将选取银层的厚度为 30 nm。

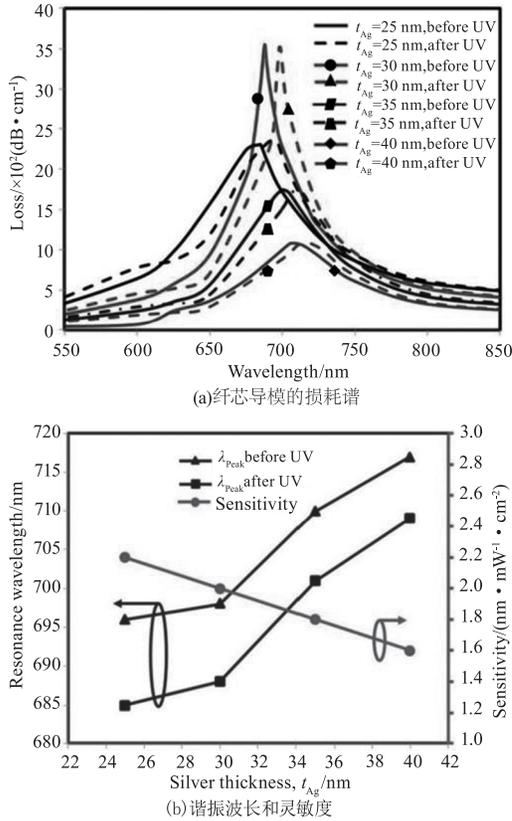


图 3 不同银膜厚度下纤芯导模的损耗谱、谐振波长和灵敏度

Fig. 3 Loss spectrum, resonant wavelength and sensitivity with different silver film thickness

传感器的光纤芯孔位置对于纤芯导模和等离子体激元模之间的耦合以及能效系数具有显著的影响。因此进一步研究了芯孔与金属层之间距离对传感器性能的影响,具体参数设置为:  $t_{\text{Ag}} = 30 \text{ nm}$ 、 $t_{\text{TiN}} = 5 \text{ nm}$ 、 $d_h = 0.8 \Lambda$  和  $d_c = 0.3 \Lambda$ , 将  $h_c$  设置为从  $0.40 \Lambda$  变化到  $0.55 \Lambda$ , 步长为  $0.05 \Lambda$ 。结果如图 4 所示,可以看出当  $h_c$  从  $0.40 \Lambda$  增加到  $0.55 \Lambda$  时,从纤芯模式到等离子体激元模的传输功率增加,因此损耗谱逐渐增加,并在  $h_c = 0.5 \Lambda$  时达到峰值。但是增加  $h_c$  会减少纤芯模式和等离子体激元模之间的耦合,从而降低损耗峰值并增加光谱的宽度,同时共振峰会发生轻微的红移,如图 5(a) 所示。另外可以看出在  $h_c = 0.4 \Lambda$  时实现了较高的灵敏度  $S_l = 2.6 \text{ nm/mW} \cdot \text{cm}^2$ , 如图 5(b) 所示。虽然  $h_c = 0.4 \Lambda$  提供了更高的灵敏度,但它具有较大的半高全宽  $89 \text{ nm}$  和较低的能效系数  $0.0295 \text{ mW}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ 。因此,选择这个值可能会降低测量的精确度。综合

考虑,选择  $h_c = 0.5 \Lambda$  作为优化值,以实现较高的能效系数  $0.051 \text{ mW}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ 。

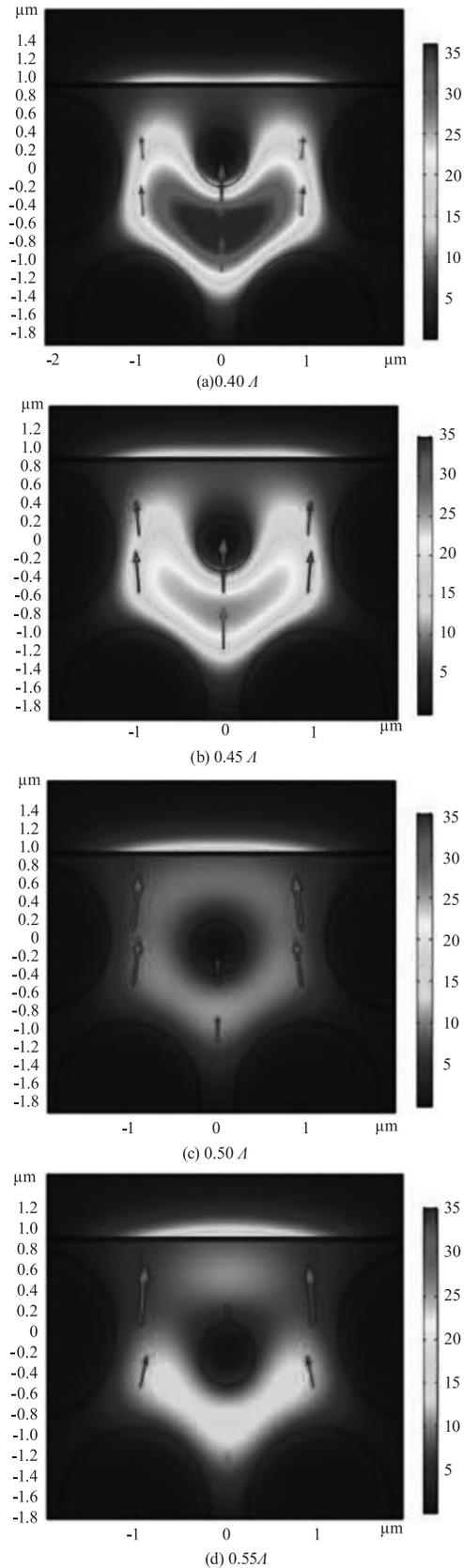


图 4 不同  $h_c$  下的模场图

Fig. 4 Mode field diagram under different  $h_c$

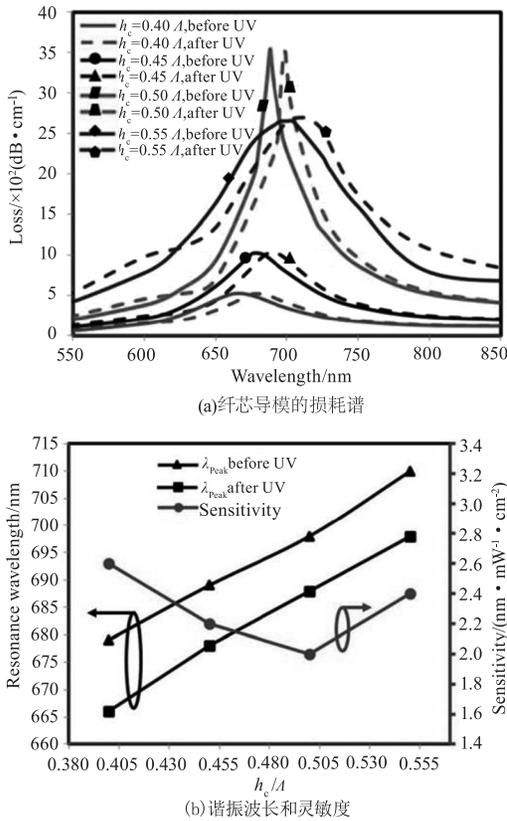


图 5 不同  $h_c$  下的纤芯导模的损耗谱、谐振波长和灵敏度  
Fig. 5 Loss spectrum, resonant wavelength and sensitivity of core guided mode under different  $h_c$

另外也对纤芯直径  $d_c$  对传感器的影响进行了研究,设置其从  $0.2 \text{ \AA}$  到  $0.5 \text{ \AA}$ ,步长为  $0.1 \text{ \AA}$ ,同时其他参数保持为  $t_{\text{Ag}} = 30 \text{ nm}$ ,  $t_{\text{TIN}} = 5 \text{ nm}$ ,  $h_c = 0.5 \text{ \AA}$ ,  $d_h = 0.8 \text{ \AA}$ 。结果如图 6 所示,可以看出当  $d_c$  分别为  $0.2 \text{ \AA}$ ,  $0.3 \text{ \AA}$  和  $0.4 \text{ \AA}$  时,纤芯导模和等离子体激元模之间的匹配波长。

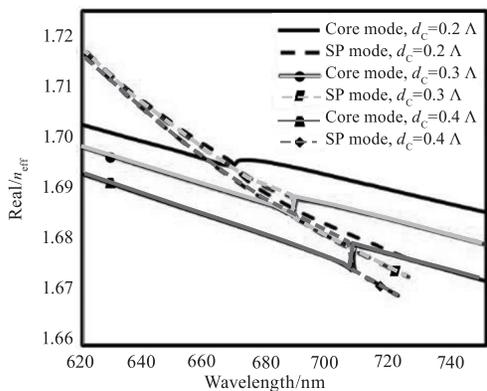


图 6 不同  $d_c$  下纤芯导模和表面等离模的有效折射率实部的波长依赖性

Fig. 7 Wavelength dependence of the real part of the effective refractive index of the core guided mode and surface plasmon mode under different  $d_c$

从图 7(a) 中可以看出随着  $d_c$  的增加,谐振波长会发生红移,同时损耗光谱逐渐减小。从图 7(b) 可以看出,当  $d_c = 0.2 \text{ \AA}$  时,传感器表现出较高的灵敏度  $S_l = 2.4 \text{ nm/mW} \cdot \text{cm}^2$ ,且损耗光谱变窄,其半高全宽为  $33 \text{ nm}$ ,能效系数为  $0.073 \text{ mW}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ 。因此在,选择了  $d_c = 0.2 \text{ \AA}$  作为纤芯孔径,以实现高灵敏度和高能效系数效果。

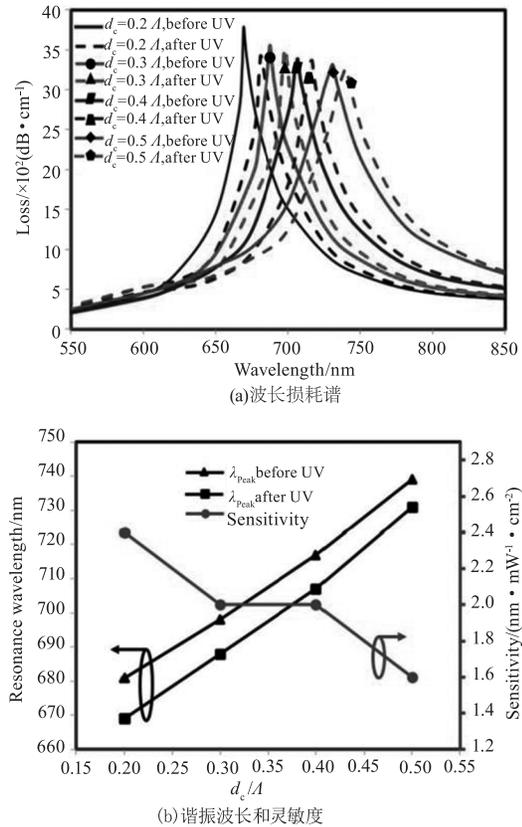


图 7 不同  $d_c$  时的波长损耗谱、谐振波长和灵敏度  
Fig. 7 Wavelength loss spectrum, resonant wavelength and sensitivity with different  $d_c$

为进一步优化能效系数,研究了包层孔  $d_h$  对损耗谱和谐振波长的影响。将包层孔  $d_h$  设置为从  $0.6 \text{ \AA}$  变化到  $0.9 \text{ \AA}$ ,步长为  $0.1 \text{ \AA}$ ,并使其他参数保持为其优化值  $t_{\text{Ag}} = 30 \text{ nm}$ ,  $t_{\text{TIN}} = 5 \text{ nm}$ ,  $h_c = 0.5 \text{ \AA}$ ,  $d_c = 0.2 \text{ \AA}$ 。从图 8(a) 可以看出,随着  $d_h$  的增加,谐振波长具有更窄的损耗谱,且逐渐向更大的波长方向偏移。此外,从图 8(b) 还可以看出,当  $d_h = 0.7 \text{ \AA}$  时,表现出最高的灵敏度,半高全宽为  $68 \text{ nm}$ ,能效系数为  $0.038$ 。但是可能会导致检测不确定性,从而影响传感器的准确性。较窄的半宽全高谐振峰能够滤除频谱中的噪声并抑制非谐振损耗,因此在传感器性能方面,选择  $0.8 \text{ \AA}$  孔径,以获得高灵敏度和高能效系数。

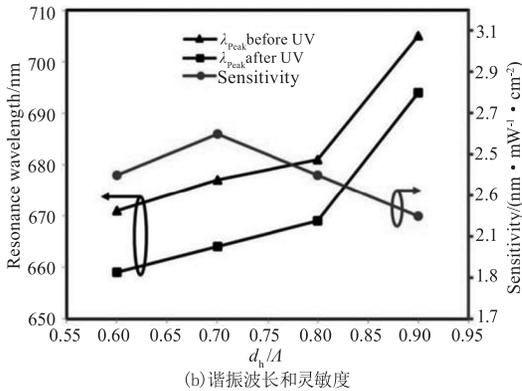
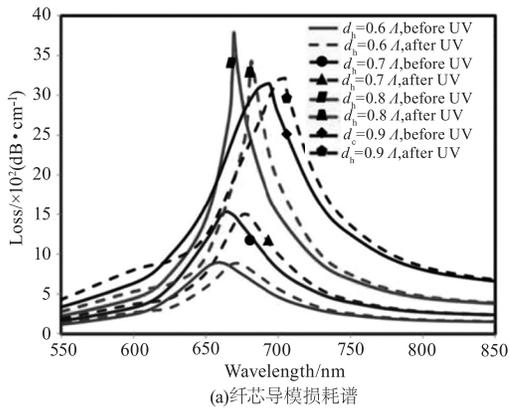


图 8 不同  $d_h$  值下纤芯导模损耗谱、谐振波长和灵敏度  
Fig. 8 Core guided mode loss spectrum, resonant wavelength and sensitivity under different  $d_h$

接下来,进行了关于 TiN 层厚度  $t_{TiN}$  的研究和优化。测试了  $t_{TiN}$  厚度为 3 nm、5 nm、7 nm 和 10 nm 的情况,其他参数保持在之前的优化参数。图 9(a)展示了不同  $t_{TiN}$  厚度值下紫外线照射前后的波长损耗情况。随着  $t_{TiN}$  的增加,损耗峰值发生红移。从图 9(a) ~ (b)中可以看出,当  $t_{TiN} = 5$  nm 时,实现了高灵敏度、窄损耗光谱和小半高全宽的效果。因此,选择  $t_{TiN}$  的最优值为 5 nm,因为此时可以获得较高灵敏度  $2.4 \text{ nm/mW} \cdot \text{cm}^2$  和能效系数  $0.073 \text{ mW}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ 。

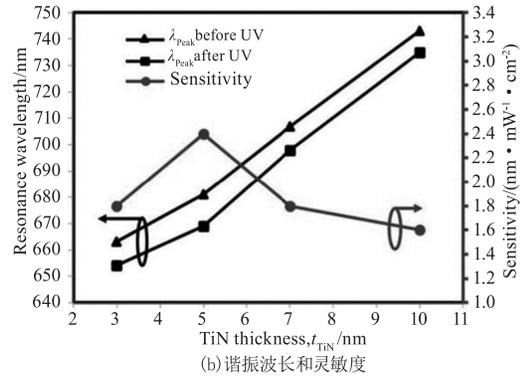
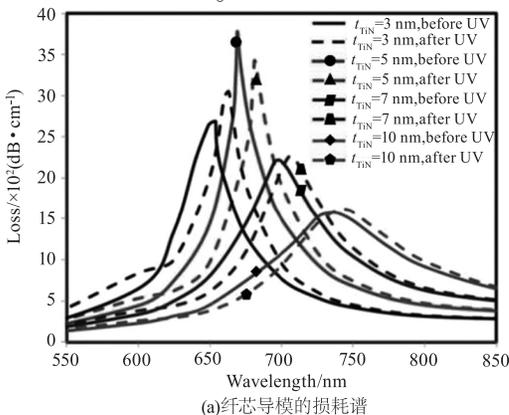


图 9 不同  $t_{TiN}$  值下纤芯导模的损耗谱、谐振波长和灵敏度  
Fig. 9 Loss spectrum, resonant wavelength and sensitivity under different  $t_{TiN}$  values

### 4 实验结果与分析

通过仿真分析的参数优化,确定了传感器的最佳配置,如表 1 所示。为验证所设计传感器的实际效能,进行了实验。D 型光子晶体光纤通过抛光技术加工而成,该过程使用的抛光系统配备一个三维机械平台,该平台可沿 X、Y、Z 轴移动。计算机程序可以精确控制抛光参数,抛光深度为 0.9 nm,此举旨在加强光纤芯中光与金属表面电子的相互作用。通过磁控溅射技术在光纤表面沉积一层 30 nm 厚的银膜,上面再镀一层 5 nm 厚的 TiN 薄膜,形成一个复金属材料。接着制备了光敏变色凝胶分析物,该材料对紫外线辐射具有高度敏感性,并使用旋涂技术将此凝胶均匀涂覆在 TiN 层上。制备完成后,我们通过两端的单模光纤将其与光子晶体光纤熔接连接,整个装置随后接入宽带光源、光谱分析仪和计算机,以分析光谱数据。实验结果如表 2 和图 10 所示。从表 2 可以看出,当传感器的几何参数在  $\pm 5\%$  误差范围内波动,所获得的灵敏度与最优几何参数条件下的灵敏度相比,仍显示出良好的一致性。图 10 中的数据则表明,在相同误差范围内,传感器灵敏度维持在  $2.2 \text{ nm/mW} \cdot \text{cm}^2$  以上。相较于传统电气传感器,本文提出的光学局部放电传感器在结构紧凑、抗电磁干扰能力、快速响应以及高灵敏度等方面具有显著优势。

表 1 传感器参数最优值

Tab. 1 Optimal values of sensor parameters

参数	$t_{Ag}/\text{nm}$	$t_{TiN}/\text{nm}$	$d_h/\mu\text{m}$	$d_c/\mu\text{m}$	$h_c/\mu\text{m}$
数值	30	5	1.6	0.4	1

表2 传感器几何参数在±5%误差内时的灵敏度与几何参数最优值时的传感器灵敏度对比

Tab.2 Comparison of the sensitivity when the geometric parameters are within ±5% error and the sensitivity when the geometric parameters are at optimal values

参数	灵敏度/(nm·mW <sup>-1</sup> ·cm <sup>-2</sup> )		
	优化后灵敏度	+5%	-5%
t <sub>Ag</sub>	2.4	2.2	2.4
t <sub>TiN</sub>	2.4	2.2	2.4
d <sub>h</sub>	2.4	2.2	2.4
d <sub>c</sub>	2.4	2.2	2.4
h <sub>c</sub>	2.4	2.2	2.4

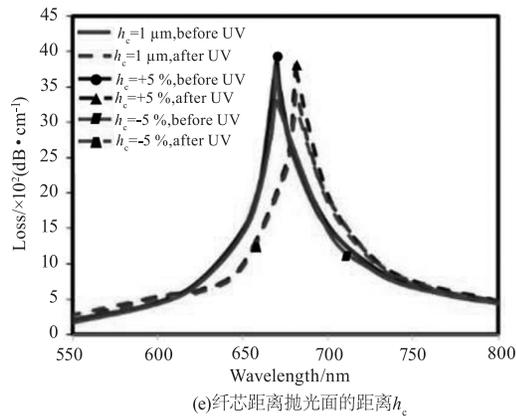
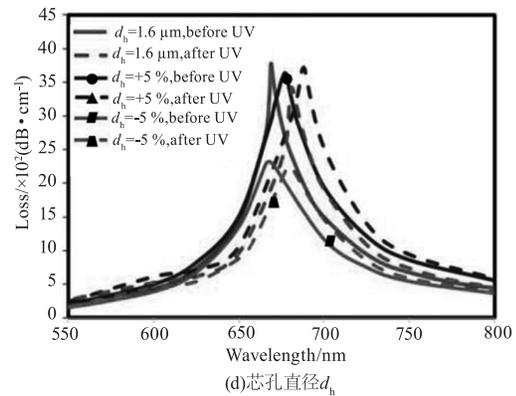
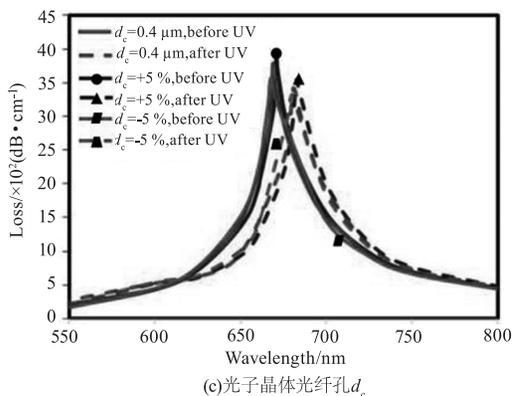
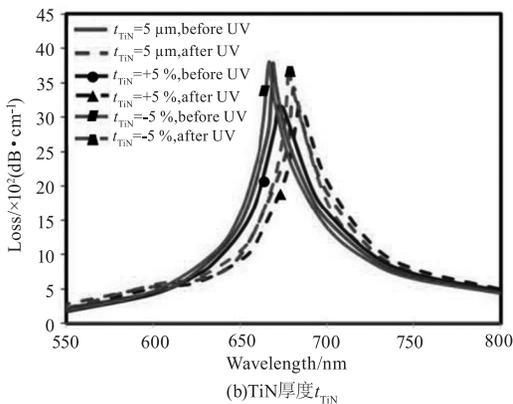
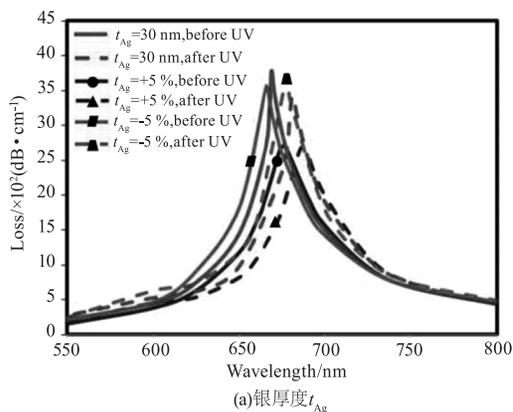


图10 实验制作传感器的不同参数的误差

Fig. 11 Errors of different parameters of experimentally produced sensors

5 结论

本本介绍了一种用于检测电力系统中的局部放电的D型表面等离子体共振光子晶体光纤传感器。该传感器基于局部放电时产生的紫外线辐射和表面等离子体共振原理。采用全矢量有限元法进行了数值设计和分析,通过调整传感器的几何参数,提高了其灵敏度和信噪比,从而最大化了能效系数,最后并进行了实验验证,所设计的传感器表现出了2.4 nm/mW·cm<sup>-2</sup>的灵敏度和0.073 mW<sup>-1</sup>·cm<sup>-2</sup>的能效系数。该传感器设计简单,成本低廉,为基于表面等离子体共振型光子晶体光纤局部放电传感的研究提供了参考。

参考文献:

[1] Niemeyer L. A generalized approach to partial discharge modeling[J]. IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(4): 510 - 528.

[2] Zargari A, Blackburn T R. Application of optical fibre sensor for partial discharge detection in high-voltage power equipment[C]//Proceedings of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena-CEIDP' 96.

- IEEE,1996,2;541-544.
- [3] Jiao Binliang, Wang Zhaohui, Zheng Shengli. Sagnac-type fiber current based on  $3 \times 3$  coupler. sensor structure[J]. Laser & Infrared,2004,34(4):298-301. (in Chinese)  
焦斌亮,王朝晖,郑绳植. 基于  $3 \times 3$  耦合器的 Sagnac 型光纤电流传感器结构[J]. 激光与红外,2004,34(4):298-301.
- [4] Luo Xianghong, He Ning, Wang Mingpeng, et al. Design and implementation of laser ultrasonic detection. system based on coherent detection[J]. Laser & Infrared,2017,47(11):4. (in Chinese)  
骆湘红,何宁,王明鹏,等. 基于相干探测的激光超声检测系统设计与实现[J]. 激光与红外,2017,47(11):4.
- [5] Huang Qiang, Sun Junqiang, Bao Yuben, et al. Advances of technologies in long-range Brillouin optical time-domain reflective optical fiber sensing [J]. Laser & Infrared, 2021,51(4):395-403. (in Chinese)  
黄强,孙军强,包宇奔,等. 长距离布里渊光时域反射光纤传感技术进展[J]. 激光与红外,2021,51(4):395-403.
- [6] Wang Yangchao, Du Jiazhen, Gao Chaofei, et al. Study on partial discharge pattern recognition in oil based on F-P fiber optic ultrasonic sensor and probabilistic neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2018,54(4):152-158. (in Chinese)  
王杨超,杜家振,高超飞,等. 基于 F-P 光纤超声传感器和概率神经网络的油中局部放电模式识别研究[J]. 高压电器,2018,54(4):152-158.
- [7] Guo Jun, Wu Guangning, Zhang Xueqin, et al. The actuality and perspective. of partial discharge detection techniques[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(2):29-35. (in Chinese)  
郭俊,吴广宁,张血琴,等. 局部放电检测技术的现状和发展[J]. 电工技术学报,2005,20(2):29-35.
- [8] Zhang P, Wang S, Jiang J, et al. A fiber-optic accelerometer based on extrinsic Fabry-Perot interference for low frequency micro-vibration measurement [J]. IEEE Photonics Journal,2022,14(4):1-6.
- [9] Yang T, Xiao Y, Ran Z, et al. Design of a weak fiber Bragg grating acoustic sensing system for pipeline leakage monitoring in a nuclear environment [J]. IEEE Sensors Journal,2021,21(20):22703-22711.
- [10] Tang J, Zhou J, Zhang X, et al. A transformer partial discharge measurement system based on fluorescent fiber [J]. Energies,2012,5(5):1490-1502.
- [11] Buczynski R. Photonic crystal fibers [J]. Acta Physica Polonica A,2004,106(2):141-167.
- [12] De M, Gangopadhyay T K, Singh V K. Prospects of photonic crystal fiber as physical sensor: An overview [J]. Sensors,2019,19(3):464.
- [13] Huang H, Zhang Z, Yu Y, et al. A highly magnetic field sensitive photonic crystal fiber based on surface plasmon resonance [J]. Sensors,2020,20(18):5193.
- [14] Osifeso S, Chu S, Prasad A, et al. Surface plasmon resonance-based temperature sensor with outer surface metal coating on multi-core photonic crystal fibre [J]. Surfaces, 2020,3(3):337-351.
- [15] Esfahani Monfared Y. Refractive index sensor based on surface plasmon resonance excitation in a D-shaped photonic crystal fiber coated by titanium nitride [J]. Plasmonics,2020,15(2):535-542.