

损耗模式共振光学传感器的发展与应用

全文超¹, 张玉洁², 张一卓^{2*}

¹昌河飞机工业集团有限责任公司, 江西 景德镇

²中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳

收稿日期: 2024年2月9日; 录用日期: 2024年5月24日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

基于损耗模式共振(Lossy Mode Resonance, LMR)原理的新型光学传感器利用损耗模和导模之间的周期性耦合来激发共振峰, 从而实现快速无损的高灵敏度传感检测。LMR已被证明能够克服传统表面等离子体共振(Surface Plasmon Resonance, SPR)传感器制备和功能上的局限性, 于各种工作环境中都能提供更优秀的传感性能, 在国外开始获得广泛的关注和研究。本文详细阐述了LMR传感器的起源、发展、器件结构组成与传感机理, 展示了LMR传感技术在生命科学、环境监测、医学诊断、工业和制造业等领域的应用场景。这可以帮助国内科研人员深入了解LMR传感器的发展历程、基本原理和功能特性, 为工程技术人员提供数据参考和文献支撑, 促进各领域对LMR传感技术的探索与研究。

关键词

损耗模式共振, 光波导, 光学传感, 棱镜耦合

Development and Application of Lossy Mode Resonance Optical Sensors

Wenchao Tong¹, Yujie Zhang², Yizhuo Zhang^{2*}

¹Changhe Aircraft Industry Group Corporation Ltd., Jingdezhen Jiangxi

²Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang Henan

Received: Feb. 9th, 2024; accepted: May 24th, 2024; published: May 31st, 2024

Abstract

A new type of optical sensor based on the principle of Lossy Mode Resonance (LMR) utilizes the periodic coupling between the lossy mode and the guiding mode to excite the resonance dips, thus realizing fast and non-destructive high-sensitivity sensing and detection. LMR has been proved to

*通讯作者。

文章引用: 全文超, 张玉洁, 张一卓. 损耗模式共振光学传感器的发展与应用[J]. 传感器技术与应用, 2024, 12(3): 504-520. DOI: 10.12677/jsta.2024.123055

be able to overcome the limitations of conventional Surface Plasmon Resonance (SPR) sensors in terms of preparation and function, and to provide better sensing performance in various working environments, and it has begun to gain wide attention and research abroad. This paper elaborates the origin, development, device structure composition and sensing mechanism of LMR sensors, and shows the application of LMR sensing technology in the fields of life sciences, environmental monitoring, medical diagnosis, industry and manufacturing, etc. This can help domestic researchers to deeply understand the development history, basic principles and functional characteristics of LMR sensors, provide data reference and literature support for engineers and technicians, and promote the exploration and research of LMR sensing technology in various fields.

Keywords

Lossy Mode Resonance, Optical Waveguide, Optical Sensing, Prism Coupling

Copyright © 2024 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

传感器的种类和应用范围随着现代科学技术的飞速发展日益丰富，其中光学传感器一直是传感领域的研究热点之一。作为检测、测量和分析物理、化学和生物现象的关键工具，光学传感器具有许多独特的优势，例如高灵敏度、高分辨率、快速响应、非侵入式测量等。这些优势使得光学传感器在科学研究和工业应用中扮演着不可或缺的角色。基于表面等离子体共振(Surface Plasmon Resonance, SPR)的光学传感器是一种被广泛研究使用的光学传感器，其基本原理是通过监测表面等离子体共振峰的变化来实现对温度、湿度、溶液浓度、生物样本的实时监测和定量分析[1]-[8]。第一款 SPR 传感器于 1982 年被提出并用于气体和生物分子检测，随后被迅速地产品化和商业化[9]。然而随着技术的不断发展和应用的不断扩展，光学传感器面临着越来越多的挑战和需求，传统 SPR 光学传感器在性能和功能方面逐渐接近极限，且存在着很多局限性[10]。因此，基于损耗模式共振(Lossy Mode Resonance, LMR)原理的新型光学传感器开始引起越来越多的关注和研究[11] [12] [13]。LMR 光学传感器利用损耗介质的吸收效应来激发共振峰，从而实现快速无损的高灵敏度光学传感检测。它已被证明能够克服传统 SPR 传感器在制备和功能上的局限性，在各种工作环境中都能提供更优秀的传感性能[14]。

SPR 和 LMR 都是利用光的共振特性来测量样品折射率变化的分析检测技术。由于 SPR 传感器依赖于金属表面的等离子体共振，而表面等离子体共振是通过电场和金属表面的自由电子相互作用而激发的，因此 SPR 传感器只能在 TM 偏振光下工作[15] [16]。相比之下，LMR 传感器基于光波导耦合原理，通过特定的传感器结构设计和损耗介质的光学特性来激发光波共振，因此 LMR 传感器不受入射光的偏振限制，可以在 TM 和 TE 偏振光下运作，并拥有比 SPR 传感器更高的灵敏度和分辨率。此外，LMR 传感器可以使用半导体、透明金属氧化物和聚合物等成本效益高的损耗介质制造[17] [18] [19]，比使用金属薄膜的 SPR 传感器更经济[20] [21]。

相比于 SPR 传感器，LMR 传感器仍然是一个相对较新的研究领域，正处于实验室探索阶段。但在国外关于 LMR 传感器的研究已经开始起步，并取得了一定进展。基于 LMR 原理的光纤传感器于 2010 年被提出[22]，因其高灵敏度、低成本和能够在不同偏振光下工作的特性而引起了许多研究人员的关注。目前，LMR 传感技术已经在生命科学、食品安全、环境监测、医学诊断、工业和制造业等领域中逐渐显

示出了潜力[23] [24] [25] [26] [27], 这表明它有可能成为其他传统的光学传感平台(如 SPR、长周期光纤光栅或微环共振器)的竞争对手。随着未来微纳制造技术的不断发展和 LMR 方向研究的持续推进, LMR 传感器将会在越来越多的领域得到广泛应用。

作为一种新型的光学传感器, LMR 传感器在国外获得了较为广泛的关注和研究。在过去的十年中, 已经有 100 多项 LMR 方向的研究在各种 SCI 期刊上发表, 这些研究涵盖了棱镜[11] [28]、光纤[29] [30]、平面波导[31]等不同类型的传感器结构。但令人惊讶的是, 国内关于这一方向的研究论文却寥寥无几。因此, 本文以 LMR 传感器的发展和应用为主题, 介绍了 LMR 传感器的起源、发展、器件结构、传感机理和应用场景。这可以帮助科研人员深入了解 LMR 传感器的发展历程、基本原理和功能特性, 为国内工程技术人员提供参考依据和支撑, 从而推动具有我国自主知识产权的光学传感器的研发, 促进 LMR 技术在各个领域的实际应用。

2. 光波导与损耗模式

损耗模式共振作为一种独特的光学现象, 最早是由半导体包层所支持的损耗模(具有复传播常数的光学模式)与光波导的导模之间的周期性耦合产生[32]。这种能量传递能够使波导对特定波段的光产生吸收效应, 利用这种耦合效应可以在光谱中激发共振峰, 从而实现高灵敏度和高分辨率的传感检测, 这也是 LMR 传感器的工作机理。因此可以说, 损耗模式共振和光波导之间存在密切联系[33]。

光波导是一种引导光信号沿特定路径传输的介质装置, 通常是由光透明介质(如石英玻璃)构成, 如图 1 所示。光波导的传输衰减小、抗电磁干扰能力强且成本低廉, 可以通过调节光的传输路径和特性来实现对光信号的处理与控制。基础的光波导通常由覆盖层、导波层和衬底三部分组成。光在导波层传播, 覆盖层和衬底的厚度远大于导波层, 而折射率则小于导波层, 因此能够起到约束电磁场分布的作用。由于电磁波的全反射现象, 光能够在导波层中向前传输而不损失能量。1974 年, Marcuse 发表了以“Theory of dielectric optical waveguides”为题的著作[34], 推导了电介质波导中模式传播方程, 讨论了不同模式之间的耦合、波导缺陷的影响以及特定应用的波导设计。该著作作为理解介质平板光波导中的模式奠定了基础, 并为设计和分析光波导器件提供了一个理论框架。随后导波光学迅速发展成为一门综合性很强的学科, 经过几十年发展, 特别是近些年来随着微纳加工技术和薄膜沉积技术的进步, 不少制约光波导器件发展的障碍被扫除, 一系列具有新原理和新结构的光波导功能器件和系统开始得到了广泛的研究[35] [36] [37] [38] [39]。

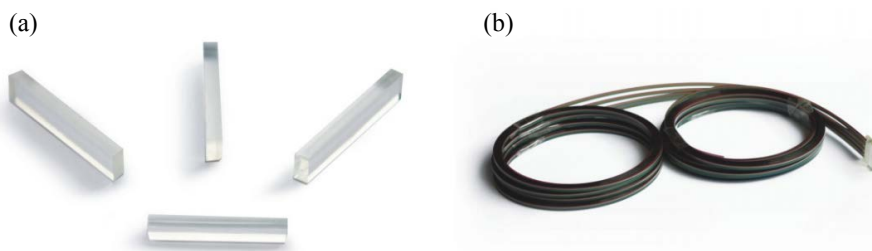


Figure 1. Common optical waveguide structures. (a) Planar optical waveguide (b) Optical fiber

图 1. 常见的光波导结构。(a) 平面光波导; (b) 光纤

波导模式是在波导中传播的电磁波的麦克斯韦方程的解。根据电磁场分布形式的不同, 一般认为光在无损介质波导中主要存在导模(Guided Mode)、辐射模(Radiation Mode)、泄漏模(Leaky Mode)三种模式[40]。其中最常见的模式是导模(束缚模)和辐射模(非束缚模), 这两种模式的传播常数均为实数[41]。而泄漏模则比较特殊, 传播常数为复数[42] [43]。

不同于上述三种模式, 损耗模式(Lossy Mode)存在于由损耗介质组成的光波导中[44]。能够激发损耗模式共振的损耗介质以半导体、金属氧化物、二维薄膜为代表, 其折射率 n 和介电常数 ε 为复数, 且满足介电常数的实部 ε_r 为正, 实部的绝对值要大于虚部 ε_i , 即:

$$\varepsilon = \varepsilon_r + j\varepsilon_i, \varepsilon_r > 0, |\varepsilon_r| > \varepsilon_i \quad (1)$$

图 2 展示了一个基于损耗介质的光波导模型。当光波导的覆盖层由损耗介质组成, 而导波层由无损介质组成时, 波导中传播的光场将会变得较为复杂, 可以看作波导中同时存在着导模和损耗模。

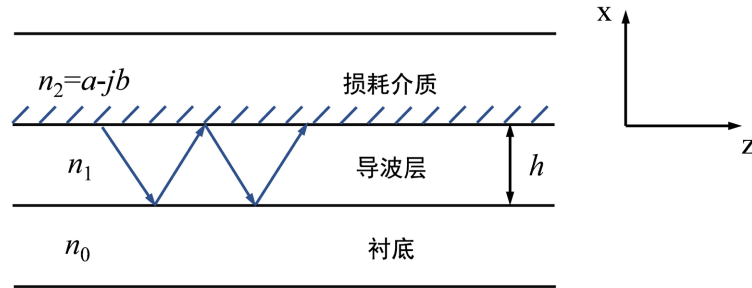


Figure 2. Cross-section of optical waveguide with lossy media as cover layer
图 2. 覆盖层为损耗介质的光波导横截面

损耗模的传播常数 k_z 表示为:

$$k_z = \beta - j\alpha \quad (2)$$

此处 β 为相位常数, α 为衰减常数, 且有 $\beta > 0$, $\alpha > 0$ 。假设在 y 方向上, 该波导的折射率没有发生变化, 则第 i 层中独立于 y 坐标的损耗模式本征模可以表示为:

$$\phi_i(x, z) = \phi_i(x) e^{-jk_z z} \quad (3)$$

其中 $\phi_i(x)$ 表示对应层的场分布, 在 TE 偏振光下为 E_x , TM 偏振光下则为 H_x 。代入波动方程后, 推得亥姆霍兹方程表示如下:

$$\frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2} + k_{xi}^2 \phi_i = 0 \quad (4)$$

波矢之间的关系满足:

$$\begin{cases} k_z^2 + k_{xi}^2 = k_i^2 \\ k_{xi} = u_i - jv_i \end{cases} \quad (5)$$

其中 k_{xi} 是第 i 层波矢在 x 方向上的分量。 u_i 和 v_i 是对应层的相位常数和衰减常数, 在此只取 $v_i > 0$ 的值。第 i 层和第 j 层之间界面处的模态场必须满足以下边界条件:

$$\begin{cases} \phi_i = \phi_j \\ \phi_i' = w_{ij} \phi_j' \end{cases} \quad (6)$$

式中, i 和 j 均为整数且可以推广到任意层。 ϕ_i' 和 ϕ_j' 表示对应层的场分布关于 x 的导数。 w_{ij} 在不同偏振光下有:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{TE 偏振光} \\ \left(\frac{n_i}{n_j} \right)^2 & \text{TM 偏振光} \end{cases} \quad (7)$$

根据波矢分量关系, 结合各界面处模态场的边界条件, 易知该结构下损耗本征模为离散值。无损介质中的导模与损耗介质中的损耗模式之间将会产生周期性的能量耦合, 在特定条件下这种能量耦合达到最大, 入射光能量将全部转移至损耗介质中。这会导致接收端的光谱图中形成一个急剧下降的共振倾角, 如图 3 所示, 共振倾角对外界环境的折射率变化非常敏感, 可以用于传感检测。这与表面等离子体共振的传感机理非常相似, 损耗模式共振因此得名。此前也有一些研究人员使用导模共振(Guide Mode Resonance, GMR)来描述该现象[45], 但鉴于损耗模式并不是传统意义上的导模, 近年来“损耗模式共振”这个术语逐渐成为了主流[46] [47] [48], 并得到了诸多研究人员的认可。因此, 为了更准确地描述该现象, 本文也将使用损耗模式共振这个术语。

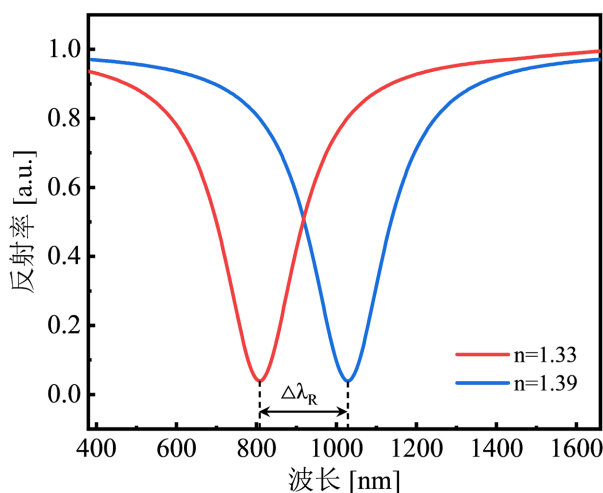


Figure 3. LMR signal output by wavelength interrogation system

图 3. 波长调制系统输出的损耗模式共振峰信号

基于光波导中损耗模式的理论基础, 可以根据特定应用场景来设计光波导各层结构参数, 从而对波导中传输的电磁场进行调控, 达到优化光波导性能的效果。因此, 基于损耗模式共振原理的光波导可以被用于制作各种有源和无源的光学元器件, 例如传感器、耦合器、分路器、衰减器、偏振器、光学开关等[13] [31] [49] [50] [51]。这些光学元器件在光通信和传感检测等领域有着广泛的应用。

3. 损耗模式共振传感器的起源与发展

在 20 世纪 80 年代, 一些经典论文观察并讨论了半导体平板波导中导模和损耗模式的耦合效应。当时, 这种现象主要被用于制作高效率的偏振器和光学开关。直到 2005 年, 才有基于这种耦合效应的传感器结构被提出。2010 年, LMR 传感器才正式成为一个体系走进科研人员的视野。因此, 损耗模式共振传感器的起源要比损耗模式更晚一些。本节按照时间顺序, 依次介绍损耗模式和损耗模式共振传感器的起源与发展。

在 20 世纪 60 年代到 70 年代期间, 波导模式的概念被提出, 研究人员开始研究光波导的基本属性和各种光学模式。随着薄膜沉积技术的发展, 人们能够制造出厚度和成分可控的高质量薄膜, 光与薄膜之间的相互作用成为了光学领域的研究热点。薄膜的关键优势之一是能够支持各种光学模式, 允许入射光被限制在薄膜层内并沿其表面传播。20 世纪 70 年代开始, 该领域的研究重点转向涂覆有吸收薄膜的光波导与入射光之间的相互作用上。吸收薄膜可以支持不同类型的模式, 由这些模式引起的最重要的共振现象是 SPR。SPR 由倏逝波和表面等离子体激元之间的耦合产生。1972 年, Batchman 和 Rashleigh 计算了金属包层介质

板波导的衰减和相位常数,表明波导的传播模式是包层材料和介质的函数[52]。同年, Takano 和 Hamasaki 计算了对称结构的金属包层介质平板波导的传播模式,并讨论了该波导模式相比于传统介质波导的特殊性与相似性[53]。1974年, Polky 和 Mitchell 介绍了一种基于金属包层的四层光波导的衰减特性,计算出导波损耗为隔离层厚度、金属类型和隔离层折射率的函数[54]。同年, Kaminow 从理论和实验上研究了由薄介质膜和金属包层组成的平面光波导,并设计了一个计算机程序来进行对称和非对称波导中 TE 和 TM 模式下的相位常数、衰减常数以及波函数的计算[55]。1975年, Yamamoto 团队研究了部分金属包层光波导的传播特性,报道了耦合角和衰减常数的实验结果[56]。1976年, Rashleigh 团队对非对称四层金属包层光波导支持的低阶模进行了研究,展示了波导的衰减特性和场分布[57]。同年, Fink 等人介绍了一种简便地求得传播波相位常数的图解方法,并以覆盖各种介质和金属包层的光波导的若干解为例加以说明[58]。

由此可见,这一时期的研究对象主要是光在涂有金属薄膜的平面介质波导中的传播特性。这些经典论文使科研人员认识到在波导上涂覆吸收薄膜可以激发不同类型的模式并能够产生共振现象,为后续 SPR 传感器和涂覆损耗薄膜光波导的研究提供了理论和实验基础。

实际上,除了表面模式以外,吸收薄膜还支持另一类型的模式,就是本文所提到的损耗模式。1980年之后,有研究人员开始关注以半导体、金属氧化物为代表的损耗薄膜。1982年, Batchman 发表了题为“介质和半导体平面波导之间的模式耦合”的文章[51],提出了损耗模式的概念。他研究分析了硅包层平面介质波导中的衰减效应,并将其解释为无损结构的导模和高折射率硅支持的损耗模之间的周期性耦合。1987年, Carson 研究了包层厚度、折射率和吸收特性对波导模式耦合的影响,并指出这种模式耦合是半导体包层厚度的函数[32]。1990年, Carson 和 Batchman 建立了耦合系数模型,讨论并分析了硅包层波导中模式特性对波导参数的依赖性,并提出基于包层波导技术的新型调制和开关器件的设计理念[33]。1992年, Hulse 介绍了多层平面波导中具有复传播常数的光学模式的计算方法[59]。1993年, Marciniak 的团队通过波长扫描观察了损耗模式共振,分析了半导体波导中损耗模式的截止条件(波导模型见图 4),并给出了半导体层截止厚度的解析表达式[44]。



Figure 4. Optical waveguide model based on semiconductor cladding [44]

图 4. 基于半导体包层的光波导模型[44]

总的来说,损耗模式的理论研究可以看作是波导模式和包层薄膜相互作用研究的进一步延伸。由于半导体包层波导对不同偏振光呈现出不同程度的吸收效应,因此损耗模式一开始主要被用于设计高效的偏振器和光学开关,在传感领域的应用较少。但是,这一阶段的研究奠定了损耗模式的理论基础,为未来损耗模式共振传感器的设计和开发铺平了道路。

2004年, Andreev 等人在论文中介绍了由单模光纤和硅薄膜组成的折射率传感器设计思路[60]。虽然作者在论文中用了“*in situ control*”这个术语解释传感器的工作原理,但用现在的标准去看,这其实就是一种基于损耗模式共振的波长调制传感检测系统。2005年, Razansky 团队提出了一种利用宽带光源和棱镜耦合波导测量氧化铝薄膜吸收光谱的方法(如图 5 所示),并认为这种方法可以用于实现折射率检测[61]。2008年, Andreev 研究了由氧化锌薄膜覆盖的侧面抛光的单模光纤组成的折射率传感器元件[62],该器件灵敏度范围为 3000~6700 nm/RIU。可以看出,这个时期各位研究人员对于传感器原理解释不同,但基于

损耗模式共振实现传感测量的理念已经逐渐开始成型，并有一些实际可行的传感器结构被提出。

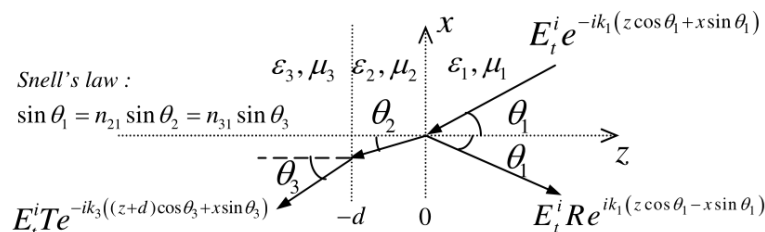


Figure 5. Physical model of a plane monochromatic wave obliquely incident into absorbing film [61]

图 5. 平面单色波斜入射进吸收薄膜的物理模型[61]

2010 年, Del Villar 的团队正式提出了用“损耗模式共振”一词作为该现象的命名, 给出了基于氧化铟锡(ITO)涂层的光纤传感器的设计优化规则, 并指出了 LMR 传感器相对于 SPR 传感器的潜在优势[12][22][29]。Del Villar 的这项研究这引起了科研工作者的兴趣和关注, 此后基于 LMR 的光学传感器得到了广泛研究。同年, Hernandez 等人介绍了基于二氧化钛(TiO₂)和聚(4-苯乙烯磺酸钠) (PSS)涂层的 LMR 光纤传感器的制备方法[30]。2011 年, Zamarreno 团队介绍了基于 TiO₂ 和 PSS 涂层的 LMR 传感器在湿度检测领域的应用[63]。2015 年, Del Villar 团队首次通过侧面抛光并涂覆 ITO 的 BK7 棱镜同时观测到了 SPR 和 LMR 现象[11]。同年, Davinder 等人研究了棱镜折射率对于可见光区 LMR 传感器灵敏度的影响[64]。2017 年, Zubiate 的团队研制了一种基于 LMR 的光纤生物传感器, 用于检测 C 反应蛋白, 检测限低至 0.0625 mg/L [65]。2018 年, Dreyer 团队首次提出利用 LMR 光纤传感器进行气体检测的思路, 在包层去除的多模光纤(MMF)芯上制备了 SnO₂ 薄膜, 对 NH₃、NO、CO₂ 和 O₂ 四种不同气体的时间响应进行了监测[66]。同年, Hernaez 团队研究了氧化石墨烯(GO)对 LMR 光纤乙醇传感器特性的影响[67]。2019 年, Rakesh 团队通过实验验证了用 ZnO 和 LiF 制作 LMR 传感器的可行性[68]。

国内关于 LMR 传感器的研究起步稍晚, 但从 2018 年开始也逐渐有相关的 SCI 论文发表。Dai Xiaoyu 团队测试了多导模结构对于 LMR 传感器性能的影响[69]。Zhao Yuting 等人将石墨烯用于 LMR 传感器的设计[70], 获得了 410 RIU⁻¹ 的品质因数。Qiu Chunyan 等人测试了基于 PtSe₂ 的 LMR 传感器性能[48], 角度调制下灵敏度最高为 37.57°/RIU。Liu Na 将过渡金属二硫化物(Transition Metal Dichalcogenides, TMDs)用于 LMR 传感器的设计, 成功提升了传感器的品质因数[47]。Wang Qi 等人利用 SnO₂ 纳米颗粒提高了 LMR 光纤传感器的灵敏度[13]。

综上所述, 现阶段 LMR 光学传感器的研究主要围绕着以下两个方面展开: 一是 LMR 光学传感器机理研究和结构设计优化, 二是探索 LMR 光学传感器在不同领域的应用。其中, 光纤波导结构的 LMR 传感器发展迅速, 已有大量研究论文发表。相比之下, 棱镜结构的 LMR 传感器研究较少, 而且存在共振峰角度过高、共振信号衰减、量程和灵敏度不佳等问题, 需要进一步解决。

4. 损耗模式共振传感器的结构

一个完整的损耗模式共振传感系统主要由光源、偏振片、LMR 传感器以及接收设备组成。LMR 传感器能够对待测量进行检测和调制, 并将其变化转化为光学信号。这种光学信号的变化最终由 CDD 或光谱仪等设备接收、解调并加以分析, 从而实现实时传感检测。现阶段的损耗模式共振光学传感器从结构上可以主要分为两大类, 一类是波导型传感器, 另一类是棱镜型传感器。广义的波导型传感器包括平板波导和光纤, 因为光纤可以视作对称的圆柱型波导。根据传感机理的不同, 波导型传感器又可以进一步划分为透射型传感器和反射型传感器, 为了获得较高的灵敏度, 这两种传感器的制备过程中通常需要对

包层表面进行切割处理。

图 6 和图 7 分别展示了两种类型的波导传感器模型，传感区域主要由导波层和覆盖在导波层表面的损耗薄膜组成。不同之处在于透射式波导 LMR 传感器的传感区位于中间，光源从一端发出的光经过传感区激发 LMR 后从另一端出射，如图 6 所示。而反射式波导 LMR 传感器的传感区位于末端，器件末端覆盖有一层反射膜，光源发出的光进入传感区，发生 LMR 后被反射膜反射，再次激发 LMR 后返回入射端，如图 7 所示。在实际测试中，这种光纤 LMR 传感器需要搭配光纤耦合器或者光纤环形器使用，虽然稍稍增加了复杂度，但探针式结构使其操作更加方便，具有更广泛的应用前景。

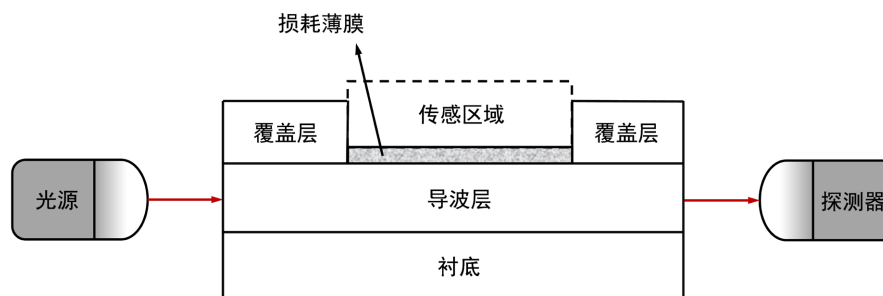


Figure 6. Transmissive LMR waveguide sensor

图 6. 透射型 LMR 波导传感器

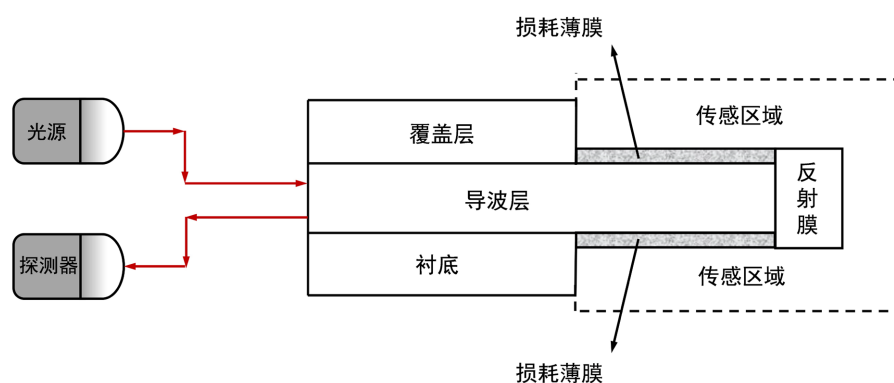


Figure 7. Reflective LMR waveguide sensor

图 7. 反射型 LMR 波导传感器

1968 年，奥拓(Otto)、克里斯彻曼(Kretschmann)分别提出了棱镜耦合传感器模型[71] [72]。如图 8 所示，这两种配置结构不同，但均利用棱镜作为耦合工具，引导自由空间中的光与涂敷在棱镜上的薄膜发生相互作用。Otto 提出的模型中空气狭缝的厚度难以控制，因此该结构无法稳定地产生共振现象。相比之下，Kretschmann 结构则是直接将薄膜沉积在棱镜上，降低了器件的制备难度，极大地推动了光学传感器的发展和应用。因此，现阶段的 LMR 棱镜传感器多采用 Kretschmann 配置，传感器主体为一个表面沉积了损耗薄膜的棱镜，棱镜可以促使入射光和损耗模式之间产生能量交换，在特定入射角度下能够激发强烈的损耗模式共振现象。

损耗模式共振峰通常在 $80^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 处产生，这种高角度限制了 LMR 在棱镜结构传感器的操作实践，因此此前的研究多采用基于波长调制的波导传感器来激发损耗模式共振。波导结构传感器的优点是抗干扰能力强，系统体积较小且支持多路复用，但其制备过程往往需要涉及研磨、切割、拼接以及化学处理等操作，结构比较脆弱，不适合大规模生产或应用。

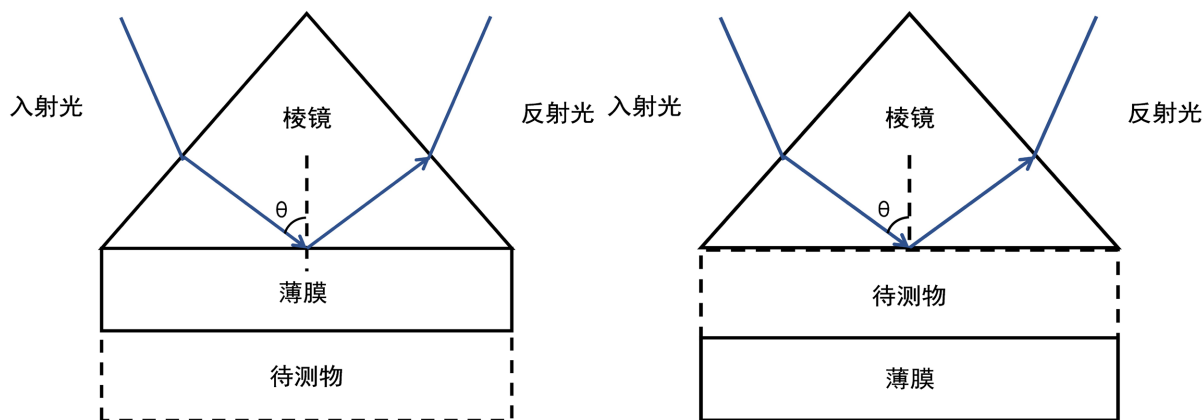


Figure 8. Two prism-coupling sensor structure models
图 8. 两种棱镜耦合传感器结构模型

5. 损耗模式共振与表面等离子体共振的对比

Kretschmann 提出的耦合模型奠定了光学棱镜传感器的基础。该结构下的传感器主体是一块耦合棱镜，如图 9 所示，棱镜底部沉积一层对应的光学薄膜。设计传感器的第一步就是选择合适的光学薄膜，SPR 传感器的棱镜底部需要沉积金属薄膜，LMR 传感器的棱镜底部则需要沉积损耗薄膜。由于 LMR 和 SPR 现象均可以采用 Kretschmann 配置的棱镜传感器激发，且两种共振峰在光谱中的形状非常相似，这曾经导致 LMR 被错误的识别为 SPR，实际上这是两种完全不同的物理现象。

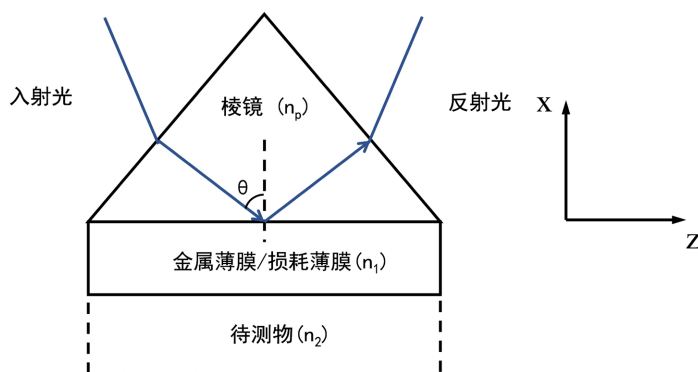


Figure 9. Prism-coupled optical sensor based on Kretschmann configuration
图 9. 基于 Kretschmann 配置的棱镜耦合型光学传感器

用于激发 SPR 和 LMR 的薄膜介电常数均为复数形式。想要激发对应的共振现象，薄膜的介电常数需要分别满足如下条件：

$$\text{SPR} \begin{cases} \varepsilon_1 = \varepsilon_r + j\varepsilon_i \\ \varepsilon_r < 0 \\ |\varepsilon_r| > \varepsilon_i \\ |\varepsilon_r| > \varepsilon_s \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{LMR} \begin{cases} \varepsilon_1 = \varepsilon_r + j\varepsilon_i \\ \varepsilon_r > 0 \\ |\varepsilon_r| > \varepsilon_i \\ |\varepsilon_r| > \varepsilon_s \end{cases} \quad (9)$$

ε_r 和 ε_i 分别是薄膜介电常数 ε_1 的实部和虚部, ε_s 是薄膜周围介质的介电常数。当金属薄膜介电常数实部为负, 在幅值上高于其自身虚部和周围介质的介电常数时, 该薄膜满足 SPR 的激发条件。当损耗薄膜介电常数的实部为正, 且幅值高于其自身虚部和周围介质的介电常数时, 薄膜满足 LMR 的激发条件。

共振激发条件也可以写成与薄膜折射率 n_1 有关的函数。假设薄膜周围介质分别为棱镜(折射率为 1.45)和空气(折射率为 1), n_r 和 n_i 分别为 n_1 的实部和虚部。当满足式(10)中的条件时, 可以激发 SPR。

$$\text{SPR} \begin{cases} n_1 = n_r + jn_i \\ n_i > (\sqrt{2} + 1)n_r \\ n_i^2 - n_r^2 > 1.45^2 \end{cases} \quad (10)$$

当满足式(11)中的条件时, 可以激发 LMR。

$$\text{LMR} \begin{cases} n_1 = n_r + jn_i \\ n_i < (\sqrt{2} - 1)n_r \\ n_r^2 - n_i^2 > 1.45^2 \end{cases} \quad (11)$$

图 10 是根据以上函数所绘制的域图, 从图中可以清晰的看出两种共振所对应的光学薄膜参数。只要薄膜折射率的实部为正, 且吸收系数(虚部)较低, 除纯金属之外的许多介质都可以用来激发 LMR 现象。

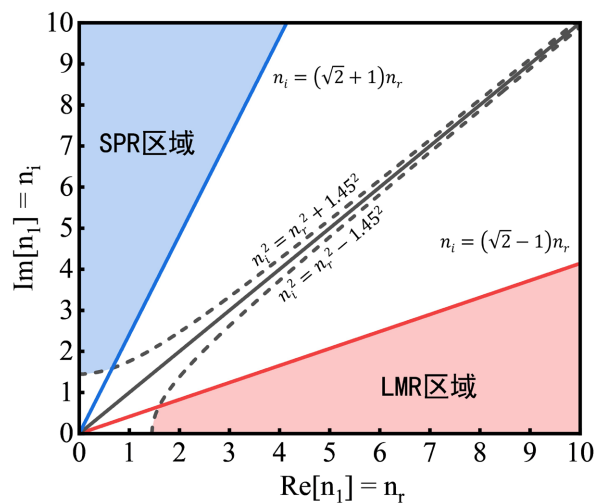


Figure 10. Excitation conditions for LMR and SPR

图 10. LMR 和 SPR 的激发条件

此外, 存在一些特殊的光学薄膜能够同时激发 SPR 和 LMR 两种类型的共振。比如 ITO (氧化铟锡), 该材料的折射率色散曲线随波长会发生较大变化。在长波区域, ITO 折射率的虚部为金属数量级, 满足 SPR 的激发条件。然而在短波区域, ITO 折射率的虚部较低, 能满足 LMR 的激发条件。这使得以 ITO 薄膜为涂层的光学传感器得到了较为广泛的研究与发展。使用者可以通过调节工作波长的方式进行谐振调控, 从而实现传感器的功能特性调节。

6. 损耗模式共振传感器在不同领域的应用

由于 LMR 传感器传感层的折射率变化会引起损耗模式共振峰的变化, 因此现阶段用于折射率检测的

LMR 传感器的出版物最多[12] [30] [62] [73] [74], 这是对 LMR 特性的直接应用。在折射率传感器的研究工作中, 通常使用金属氧化物和聚合物作为损耗涂层以激发 LMR 现象, 其中 ITO 和 TiO_2 是出现频率较高的两种材料。ITO 属于透明导电氧化物, 具备良好的电化学稳定性以及可见光谱范围内的高透射率, 由于其色散曲线的独特性, 可以同时激发 LMR 和 SPR。 TiO_2 为半导体氧化物, 具有较低成本和较好的光稳定性, 是常见的光学传感器的制备材料之一。通过对这些光学薄膜采用逐层生长法或溶胶浸渍法, 使其沉积在包层切割处理过的光纤传感器上, 如图 11 所示, 这一段经过处理的区域即为传感区域。光纤传感器与跳线进行拼接, 跳线两端分别连接光谱仪和工作光源。得益于光纤传感器体积小、重量轻、抗干扰能力强等优势, 其可以作为探针工作在不同环境。以液体环境为例, 当光纤传感器沉浸在液体中时, 光谱图的可见光或红外波段区域将会形成共振峰。当液体折射率升高时, 共振峰会随之发生红移。通过检测共振峰的移动便可以进行实时的传感检测。

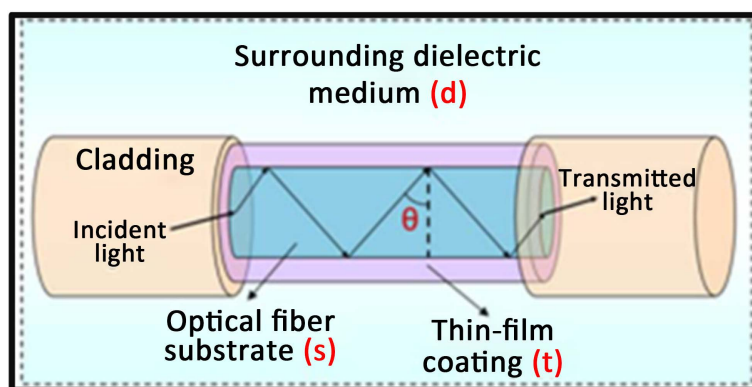


Figure 11. Optical fiber refractometers based on lossy modes resonances supported by TiO_2 coatings [30]

图 11. 采用 TiO_2 涂层的 LMR 光纤折射计[30]

在折射率检测功能的基础上, 通过使用特定的敏感涂层, LMR 传感器还可以实现对温度、湿度、电压、PH 值、气体、生物分子浓度及种类等参数的高灵敏度检测。根据传感器的应用场景, 可以将这些 LMR 传感器分为工作在液体环境和非液体环境中两大类。当传感器工作在液体环境时, 折射率工作起点为 1.33, 当传感器工作在非液体环境时, 其折射率工作起点为 1 (空气)。

工作在非液体环境下的 LMR 传感器可以细分为温度传感器、湿度传感器、气体传感器、电压传感器几种类型。一些聚合物(诸如 PDMS)具有较高的热敏系数, 因此可以作为 LMR 温度传感器的敏感材料。当环境温度发生变化时, 薄膜介电常数改变, 从而导致损耗模式截止条件发生变化, 引起共振峰的偏移[75]。但由于电子传感器在温度检测领域更为简单有效, 相比之下 LMR 温度传感器在成本和性能上并无显著优势, 因此现阶段 LMR 温度传感器仅仅是停留在理论研究上, 应用价值有限[76]。

LMR 湿度传感器通常采用双涂层结构。内层为 LMR 的激发材料, 外层为高度亲水材料。在变化的湿度条件下, 亲水材料的光学参数会发生变化, 从而引起共振峰的移动。例如, Hernández 团队提出了一种基于琼脂糖的光纤湿度传感器[77], 结构如图 12 所示。该传感器利用了琼脂糖材料的吸湿性, 传感器周围的湿度变化将导致琼脂糖材料的折射率发生变化, 从而引起共振峰的移动。在 20%~80%相对湿度之间, 共振峰的动态移动范围为 45 nm, 响应时间仅为几秒钟。在另一篇 LMR 湿度传感器的文章中[78]采用了类似的器件结构。作者研究了采用逐层法沉积的聚合物(PAH/PAA)作为亲水材料的可能性, 获得了 5.4 nm/RH%的响应灵敏度。LMR 湿度传感器具有结构简单, 重量轻, 体积小, 抗电磁场和易于复用等优点, 可以作为电子传感器的良好替代品。

在 LMR 气体传感器的应用研究中, 通常采用金属氧化物或有机金属化合物作为传感层薄膜, 通过传感层与特定气体的化学反应引发共振峰的移动, 从而实现了对特定气体的检测。例如, Dikovska 等人利用脉冲激光沉积法在侧面抛光的单模光纤上制备了 ZnO 薄膜。如图 13 所示, 通过将单模光纤和平面波导进行组合的方式, 得到了简单高效的 LMR 气体传感器。该光学传感器通过单模光纤与平面光波导之间模式耦合实现了室温下氨气的检测, 最低检测限为 50 ppm, 且具有较高的选择性和重复性[79]。

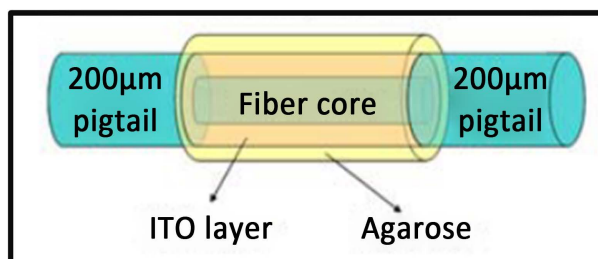


Figure 12. Agarose optical fibre humidity sensor based on LMR [77]

图 12. 基于损耗模式共振原理的琼脂糖光纤湿度传感器[77]

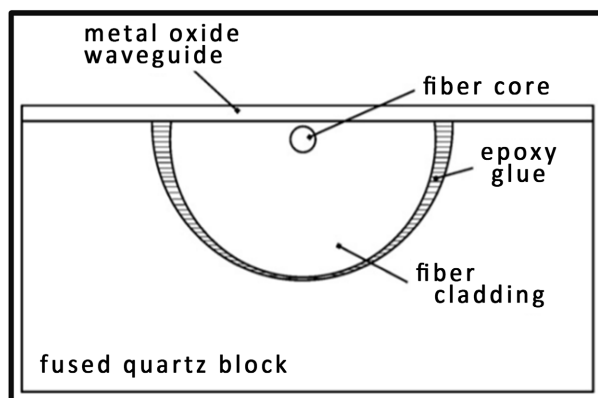


Figure 13. Optical sensing of ammonia using ZnO grown on a side-polished optical-fiber [79]

图 13. 通过沉积 ZnO 的侧面抛光光纤实现对氨的光学传感 [79]

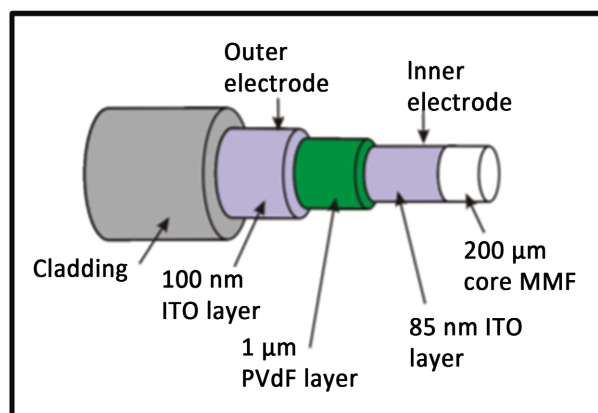


Figure 14. Tunable electro-optic wavelength filter based on lossy mode resonances [27]

图 14. 基于损耗模式共振的可调谐电光波长滤波器[27]

LMR 传感器另一种有趣的应用是电压检测。Corres 团队介绍了一种基于 LMR 原理的可调谐电光波长滤波器[27]。如图 14 所示,该器件通过使用嵌入两层 ITO 薄膜中的 PVdF 层构成的多层涂层作为电极。ITO 用于激发 LMR 现象, PVdF 则为敏感材料。外加电压会引起 PVdF 层折射率的改变,从而引起损耗模式共振峰的偏移。器件最高灵敏度为 0.4 nm/V。这证明了 LMR 传感器在电光领域的应用潜力,可以作为电信号传感器使用,以实现光电网络的信号检测与主动控制。

工作在液体环境下的 LMR 传感器可以分为浓度传感器、生物传感器、PH 传感器几种类型。LMR 浓度传感器其实就是折射率检测应用的另一种表现。对于单一液体来说,其折射率和浓度之间存在着对应关系。以蔗糖溶液为例,当其浓度从 1%增加到 70%时,溶液室温下的折射率从 1.334 变化到 1.465,因此通过检测折射率便可以实现对液体浓度的检测。

但对于混合溶液,上述方法不再适用。如何定位某生物分子并检测其浓度,是 LMR 生物传感器要解决的首要问题。现阶段的研究工作中多采用特异性反应的思路,即使用某种抗体或者特定的适配体作为传感器的敏感层,以在溶液中实现对特定生物分子的检测。适配体是一种短单链低聚物,具有与蛋白质、多肽、氨基酸、药物、金属离子和整个细胞等广泛靶标紧密特异性结合的能力,因此只会与待测分子产生生化反应从而诱发共振峰的偏移。例如, Razquin 团队利用逐层静电自组装技术制造了一款 LMR 光纤传感器。该传感器的内层激发材料为 ITO, 外层敏感涂层由适配体聚合物(PDDA/PSS/TA)组成,从而实现了对凝血酶的特异性识别。该传感器能够检测的凝血酶浓度范围为 100 nM~1 μ M, 并在 1 μ M 浓度下实现了 43 nm 的最大波长偏移[80]。类似的, Zamarreño 等人提出了一种能够检测 C-反应蛋白(CRP)的低成本 LMR 生物传感器,用于败血症的诊断[81],该传感器能够在 15 分钟内区分 CRP 的非病理浓度(2 mg/L)和病理浓度(20 mg/L),最大波长偏移为 5 nm,且传感器具有较好的重复利用性。

在对溶液 PH 值的传感研究中,Zamarreño 团队提出了一种基于 ITO 的光纤 pH 传感器的制作方法[17]。如图 15 所示,这种传感器的敏感涂层为 PAH/PAA 聚合物,聚合物涂层的厚度随环境 pH 值发生改变(又称作溶胀效应),从而导致模式有效折射率的变化,并引起共振峰的偏移。该传感器能够在 pH 3~pH 6 的范围内实现精度 ± 0.001 ,灵敏度 0.027 pH/nm 的传感监测。

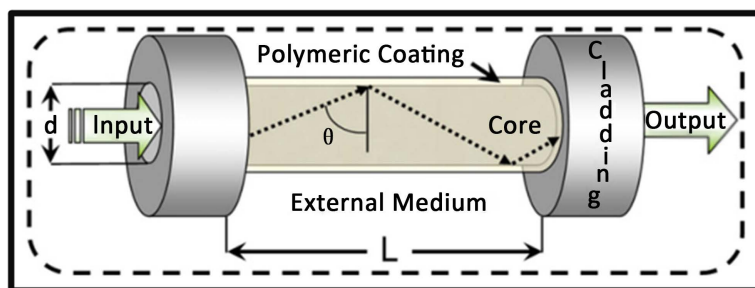


Figure 15. Optical fiber pH sensor based on lossy-mode resonances by means of thinpolymeric coatings [17]

图 15. 基于薄聚合物涂层的 LMR 光纤 pH 传感器[17]

综上所述, LMR 传感器本质上是一种对环境折射率敏感的器件,传感层的折射率变化会引起损耗模式共振峰的变化,通过检测共振峰的偏移便可以实现实时的传感检测。由于折射率响应是设备对化学和生物分子敏感程度最基本的指标,因此可以通过特定的敏感涂层,将化学、生物或物理量的变化转化为表层折射率的变化,从而实现不同场景下的传感检测。

7. 结束语

本文全面介绍了损耗模式和 LMR 传感器的起源、发展、器件结构与传感机理,并结合国内外研究现

状, 分析了不同应用场景下 LMR 传感器的设计思路与传感检测潜力。作为一种重要的传感技术, LMR 传感器已在生物医学、环境监测、食品工业、工业和制造业等领域得到广泛研究和应用, 随着科学技术的不断进步, LMR 传感器的灵敏度和分辨率将会得到更进一步的提高, 其应用前景也将更加广阔。

参考文献

- [1] Boruah, R., Mohanta, D., Choudhury, A., Nath, P. and Ahmed, G.A. (2015) Surface Plasmon Resonance-Based Protein Bio-Sensing Using a Kretschmann Configured Double Prism Arrangement. *IEEE Sensors Journal*, **15**, 6791-6796. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2464675>
- [2] Geng, Z., Li, Q., Wang, W. and Li, Z. (2010) PDMS Prism-Glass Optical Coupling for Surface Plasmon Resonance Sensors Based on MEMS Technology. *Science China Information Sciences*, **53**, 2144-2158. <https://doi.org/10.1007/s11432-010-4072-z>
- [3] Luo, W., Wang, R., Li, H., Kou, J., Zeng, X., Huang, H., Hu, X. and Huang, W. (2019) Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature for Prism-Based Surface Plasmon Resonance Sensors. *Optics Express*, **27**, 576-589. <https://doi.org/10.1364/OE.27.000576>
- [4] Ozdemir, S.K. and Turhan-Sayan, G. (2003) Temperature Effects on Surface Plasmon Resonance: Design Considerations for an Optical Temperature Sensor. *Journal of Lightwave Technology*, **21**, 805-814. <https://doi.org/10.1109/JLT.2003.809552>
- [5] Saha, S., Mehan, N., Sreenivas, K. and Gupta, V. (2009) Temperature Dependent Optical Properties of (002) Oriented ZnO Thin Film Using Surface Plasmon Resonance. *Applied Physics Letters*, **95**, Article ID: 071106. <https://doi.org/10.1063/1.3206954>
- [6] Shibayama, J., Mitsutake, K., Yamauchi, J. and Nakano, H. (2020) Kretschmann- and Otto-Type Surface Plasmon Resonance Waveguide Sensors in the Terahertz Regime. *Microwave and Optical Technology Letters*, **63**, 103-106. <https://doi.org/10.1002/mop.32581>
- [7] Verma, A., Prakash, A. and Tripathi, R. (2016) Sensitivity Improvement of Graphene Based Surface Plasmon Resonance Biosensors with Chalcogenide Prism. *Optik*, **127**, 1787-1791. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.11.083>
- [8] Zhu, J. and Li, N. (2020) Novel High Sensitivity SPR Sensor Based on Surface Plasmon Resonance Technology and IMI Waveguide Structure. *Results in Physics*, **17**, Article ID: 103049. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103049>
- [9] Nylander, C., Bo, L. and Lind, T. (1983) Gas Detection by Means of Surface Plasmon Resonance. *Sensors & Actuators*, **3**, 79-88. [https://doi.org/10.1016/0250-6874\(82\)80008-5](https://doi.org/10.1016/0250-6874(82)80008-5)
- [10] Piliarik, M. and Homola, J. (2009) Surface Plasmon Resonance (SPR) Sensors: Approaching Their Limits? *Optics Express*, **17**, 16505-16517. <https://doi.org/10.1364/OE.17.016505>
- [11] Del Villar, I., Torres, V. and Beruete, M. (2015) Experimental Demonstration of Lossy Mode and Surface Plasmon Resonance Generation with Kretschmann Configuration. *Optics Letters*, **40**, 4739-4742. <https://doi.org/10.1364/OL.40.004739>
- [12] Del Villar, I., Zamarreno, C.R., Hernaez, M., Arregui, F.J. and Matias, I.R. (2010) Lossy Mode Resonance Generation with Indium-Tin-Oxide-Coated Optical Fibers for Sensing Applications. *Journal of Lightwave Technology*, **28**, 111-117. <https://doi.org/10.1109/JLT.2009.2036580>
- [13] Wang, Q., Li, X., Zhao, W.-M. and Jin, S. (2019) Lossy Mode Resonance-Based Fiber Optic Sensor Using Layer-by-Layer SnO₂ Thin Film and SnO₂ Nanoparticles. *Applied Surface Science*, **492**, 374-381. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.06.168>
- [14] Usha, S.P., Mishra, S.K. and Gupta, B.D. (2015) Fiber Optic Hydrogen Sulfide Gas Sensors Utilizing ZnO Thin Film/ZnO Nanoparticles: A Comparison of Surface Plasmon Resonance and Lossy Mode Resonance. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **218**, 196-204. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.04.108>
- [15] Homola, J. (2010) Surface Plasmon Resonance Sensors for Detection of Chemical and Biological Species. *Chemical Reviews*, **108**, 462-493.
- [16] Wolfbeis, O.S. (2008) Fiber-Optic Chemical Sensors and Biosensors. *Analytical Chemistry*, **74**, 2663-2678. <https://doi.org/10.1021/ac800473b>
- [17] Zamarreño, C.R., Hernaez, M., Villar, I.D., Matias, I.R. and Arregui, F.J. (2011) Optical Fiber pH Sensor Based on Lossy-Mode Resonances by Means of Thin Polymeric Coatings. *Sensors and Actuators B*, **155**, 290-297. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2010.12.037>
- [18] Sanchez, P., Zamarreno, C.R., Hernaez, M., Villar, I.D., Matias, I.R. and Arregui, F.J. (2013) Considerations for Lossy-Mode Resonance-Based Optical Fiber Sensor. *IEEE Sensors Journal*, **13**, 1167-1171.

- <https://doi.org/10.1109/JSEN.2012.2227717>
- [19] Socorro, A.B., Del Villar, I., Corres, J.M., Arregui, F.J. and Matias, I.R. (2011) Influence of Waist Length in Lossy Mode Resonances Generated with Coated Tapered Single-Mode Optical Fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*, **23**, 1579-1581. <https://doi.org/10.1109/LPT.2011.2164520>
- [20] Zhao, M., Wang, J., Zhang, Y., Ge, M., Zhang, P., Shen, J. and Li, C. (2022) Self-Referenced Refractive Index Sensor Based on Double-Dips Method with Bimetal-Dielectric and Double-Groove Grating. *Optics Express*, **30**, 8376-8390. <https://doi.org/10.1364/OE.454344>
- [21] Wang, Y., Yu, J., Mao, Y, F., Chen, J. and Zhu, J. (2020) Stable, High-Performance Sodium-Based Plasmonic Devices in the Near Infrared. *Nature*, **581**, 401-405. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2306-9>
- [22] Del Villar, I., Zamarreño, C.R., Hernaez, M., Arregui, F.J. and Matias, I.R. (2010) Generation of Lossy Mode Resonances with Absorbing Thin-Films. *Journal of Lightwave Technology*, **28**, 3351-3357. <https://doi.org/10.1109/JLT.2010.2082492>
- [23] Ozcariz, A., Dominik, M., Smietana, M., Zamarreño, C.R., Del Villar, I. and Arregui, F.J. (2019) Lossy Mode Resonance Optical Sensors Based on Indium-Gallium-Zinc Oxide Thin Film. *Sensors and Actuators A: Physical*, **290**, 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.03.010>
- [24] Chiavaioli, F., Zubiato, P., Villar, I.D., Zamarreno, C.R. and Baldini, F. (2019) Lossy Mode Resonance Fiber-Optic Biosensing Allowing Ultra-Low Detection Limit. *Proceedings of the 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*, Munich, 23-27 June 2019, 1. <https://doi.org/10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8872284>
- [25] Bohorquez, D., Del Villar, I., Corres, J.M. and Matias, I.R. (2021) Wavelength and Intensity Based Lossy Mode Resonance Breathing Sensor. *Optics & Laser Technology*, **140**, Article ID: 107063. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107063>
- [26] Zubiato, P., Zamarreño, C.R., Del Villar, I., Matias, I.R. and Arregui, F.J. (2016) Tunable Optical Fiber pH Sensors Based on TE and TM Lossy Mode Resonances (LMRs). *Sensors and Actuators B: Chemical*, **231**, 484-490. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.03.024>
- [27] Corres, J.M., Ascorbe, J., Arregui, F.J. and Matias, I.R. (2013) Tunable Electro-Optic Wavelength Filter Based on Lossy-Guided Mode Resonances. *Optics Express*, **21**, 31668-31677. <https://doi.org/10.1364/OE.21.031668>
- [28] Torres, V., Beruete, M., Sánchez, P. and Del Villar, I. (2016) Indium Tin Oxide Refractometer in the Visible and near Infrared via Lossy Mode and Surface Plasmon Resonances with Kretschmann Configuration. *Applied Physics Letters*, **108**, Article ID: 043507. <https://doi.org/10.1063/1.4941077>
- [29] Del Villar, I., Zamarreño, C.R., Sanchez, P., Hernaez, M., Valdivielso, C.F., Arregui, F.J. and Matias, I.R. (2010) Generation of Lossy Mode Resonances by Deposition of High-Refractive-Index Coatings on Uncladded Multimode Optical Fibers. *Journal of Optics*, **12**, Article ID: 095503. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/12/9/095503>
- [30] Hernández, M., Villar, I.D., Zamarreo, C.R., Arregui, F.J. and Matias, I.R. (2010) Optical Fiber Refractometers Based on Lossy Mode Resonances Supported by TiO₂ Coatings. *Applied Optics*, **49**, 3980-3985. <https://doi.org/10.1364/AO.49.003980>
- [31] Lin, Y.-C. and Chen, L.-Y. (2021) Development of a Temperature-Controlled Optical Planar Waveguide Sensor with Lossy Mode Resonance for Refractive Index Measurement. *Photonics*, **8**, Article No. 199. <https://doi.org/10.3390/photonics8060199>
- [32] Carson, R.F. and Batchman, T.E. (1988) Coupling and Absorption Phenomena in Semiconductor-Clad Dielectric Optical Waveguides. *Proceedings of the Integrated Optical Circuit Engineering V*, Cambridge, MA. <https://doi.org/10.1117/12.942309>
- [33] Carson, R.F. and Batchman, T.E. (1990) Multimode Phenomena in Semiconductor-Clad Dielectric Optical Waveguide Structures. *Applied Optics*, **29**, 2769-2780. <https://doi.org/10.1364/AO.29.002769>
- [34] Marcuse, D.M. (1974) *Theory of Dielectric Optical Wave Guides*. Academic Press, London.
- [35] Samaras, S., Diamantidou, E., Ataloglou, D., Sakellariou, N., Vafeiadis, A., Magoulitanis, V., Lalas, A., Dimou, A., Zarpalas, D., Votis, K., Daras, P. and Tzovaras, D. (2019) Deep Learning on Multi Sensor Data for Counter UAV Applications—A Systematic Review. *Sensors (Basel)*, **19**, Article No. 4837. <https://doi.org/10.3390/s19224837>
- [36] Xu, D., Gao, H., Hou, Z., Zhang, Y., Tong, X., Zhang, Y., Zhang, P., Shen, J. and Li, C. (2022) A High-Sensitivity Fiber-Optic Fabry-Perot Gas Pressure Sensor with Epoxy Resin Adhesive. *IEEE Sensors Journal*, **22**, 10551-10558. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3168290>
- [37] Gao, H., Xu, D., Ye, Y., Zhang, Y., Shen, J. and Li, C. (2022) Fiber-Tip Polymer Filled Probe for High-Sensitivity Temperature Sensing and Polymer Refractometers. *Optics Express*, **30**, 8104-8114. <https://doi.org/10.1364/OE.449852>
- [38] Gao, H., Wang, J., Shen, J., Zhang, S., Xu, D., Zhang, Y. and Li, C. (2021) Study of the Vernier Effect Based on the

- Fabry-Perot Interferometer: Methodology and Application. *Photonics*, **8**, Article No. 304. <https://doi.org/10.3390/photonics8080304>
- [39] Bozzi, M., Georgiadis, A. and Wu, K. (2011) Review of Substrate-Integrated Waveguide Circuits and Antennas. *IET Microwaves Antennas & Propagation*, **5**, 909-920. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2010.0463>
- [40] Hu, J. and Menyuk, C.R. (2009) Understanding Leaky Modes: Slab Waveguide Revisited. *Advances in Optics and Photonics*, **1**, 58-106. <https://doi.org/10.1364/AOP.1.000058>
- [41] 曹庄琪. 导波光学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [42] Ding, Y. and Magnusson, R. (2004) Resonant Leaky-Mode Spectral-Band Engineering and Device Applications. *Optics Express*, **12**, 5661-5674. <https://doi.org/10.1364/OPEX.12.005661>
- [43] 刘嘉玲. 基于泄漏模波导的模式分辨器[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [44] Marciniak, M., Grzegorzewski, J. and Szustakowski, M. (1993) Analysis of Lossy Mode Cut-Off Conditions in Planar Waveguides with Semiconductor Guiding Layer. *IEEE Proceedings Journal (Optoelectronics)*, **140**, 247-252. <https://doi.org/10.1049/ip-j.1993.0040>
- [45] Yang, F. and Sambles, J.R. (1997) Determination of the Optical Permittivity and Thickness of Absorbing Films Using Long Range Modes. *Journal of Modern Optics*, **44**, 1155-1163. <https://doi.org/10.1080/09500349708230726>
- [46] Kaur, D., Sharma, V.K. and Kapoor, A. (2014) High Sensitivity Lossy Mode Resonance Sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **198**, 366-376. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.03.058>
- [47] Liu, N., Wang, S., Cheng, Q., Pang, B. and Lv, J. (2021) Two-Dimensional Transition Metal Dichalcogenides-Based High Sensitivity Lossy Mode Refractive Index Sensor. *IEEE Sensors Journal*, **21**, 6043-6049. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3042470>
- [48] Qiu, C., Gan, S., Xiang, Y. and Dai, X. (2020) High Figure of Merit in Lossy Mode Resonance Sensors with PtSe₂ Thin Film. *Plasmonics*, **16**, 729-735. <https://doi.org/10.1007/s11468-020-01337-x>
- [49] Letko, E., Bundulis, A. and Mozolevskis, G. (2022) Theoretical Development of Polymer-Based Integrated Lossy-Mode Resonance Sensor for Photonic Integrated Circuits. *Photonics*, **9**, Article No. 764. <https://doi.org/10.3390/photonics9100764>
- [50] Kumar, A., Sharma, V.K., Kumar, D. and Kapoor, A. (2013) Integrated Optic TE/TM Pass Polarizers Using Resonant Coupling between ITO Thin Film Lossy Modes and Dielectric Waveguide Modes. *Optics Communications*, **291**, 247-252. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2012.10.022>
- [51] Batchman, T.E. and Mcwright, G.M. (1982) Mode Coupling between Dielectric and Semiconductor Planar Waveguides. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **18**, 628-634. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1982.1131108>
- [52] Batchman, T. and Rashleigh, S. (1972) Mode-Selective Properties of a Metal-Clad-Dielectric-Slab Waveguide for Integrated Optics. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **8**, 848-850. <https://doi.org/10.1109/JQE.1972.1076873>
- [53] Takano, T. and Hamasaki, J. (1972) Propagating Modes of a Metal-Clad-Dielectric-Slab Waveguide for Integrated Optics. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **8**, 206-212. <https://doi.org/10.1109/JQE.1972.1076923>
- [54] Polky, J.N. and Mitchell, G.L. (1974) Metal-Clad Planar Dielectric Waveguide for Integrated Optics. *Journal of the Optical Society of America*, **64**, 274-279. <https://doi.org/10.1364/JOSA.64.000274>
- [55] Kaminow, I.P., Mammel, W.L. and Weber, H.P. (1974) Metal-Clad Optical Waveguides: Analytical and Experimental Study. *Applied Optics*, **13**, 396-405. <https://doi.org/10.1364/AO.13.000396>
- [56] Yamamoto, Y., Kamiya, T. and Yanai, H. (1975) Propagation Characteristics of a Partially Metal-Clad Optical Guide: Metal-Clad Optical Strip Line. *Applied Optics*, **14**, 322-326. <https://doi.org/10.1364/AO.14.000322>
- [57] Rashleigh, S.C. (1976) Four-Layer Metal-Clad Thin Film Optical Waveguides. *Optical & Quantum Electronics*, **8**, 49-60. <https://doi.org/10.1007/BF00620440>
- [58] Fink, H.J. (1976) Propagation of Waves in Optical Waveguides with Various Dielectric and Metallic Claddings. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **12**, 365-367. <https://doi.org/10.1109/JQE.1976.1069165>
- [59] Hulse, C.A. and Knoesen, A. (1992) Iterative Calculation of Complex Propagation Constants of Modes in Multilayer Planar Waveguides. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **28**, 2682-2684. <https://doi.org/10.1109/3.166459>
- [60] Andreev, A., Pantchev, B., Danesh, P., Zafirova, B., Karakoleva, E., Vlaikova, E. and Alipieva, E. (2005) A Refractive Index-Sensitive Mode Resonance between Single-Mode Fiber and Thin Film Amorphous Silicon Waveguide. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **106**, 484-488. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2004.09.002>
- [61] Razansky, D., Einziger, P.D. and Adam, D.R. (2005) Broadband Absorption Spectroscopy via Excitation of Lossy Resonance Modes in Thin Films. *Physical Review Letters*, **95**, Article ID: 018101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.018101>
- [62] Andreev, A.T., Zafirova, B.S., Karakoleva, E.I., Dikovska, A.O. and Atanasov, P.A. (2008) Highly Sensitive Refrac-

- tometers Based on a Side-Polished Single-Mode Fibre Coupled with a Metal Oxide Thin-Film Planar Waveguide. *Journal of Optics A Pure & Applied Optics*, **10**, Article ID: 035303. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/10/3/035303>
- [63] Zamarreo, C.R., Hernaez, M., Sánchez, P., Villar, I.D. and Arregui, F.J. (2011) Optical Fiber Humidity Sensor Based on Lossy Mode Resonances Supported by TiO₂/PSS Coatings. *Procedia Engineering*, **25**, 1385-1388. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.12.342>
- [64] Kaur, D., Sharma, V.K. and Kapoor, A. (2015) Effect of Prism Index on Sensitivity of Lossy Mode Resonance Sensors Operating in Visible Region. *Journal of Nanophotonics*, **9**, Article ID: 093042. <https://doi.org/10.1117/1.JNP.9.093042>
- [65] Zubiate, P., Zamarreño, C.R., Sánchez, P., Matias, I.R. and Arregui, F.J. (2017) High Sensitive and Selective C-Reactive Protein Detection by Means of Lossy Mode Resonance Based Optical Fiber Devices. *Biosensors & Bioelectronics*, **93**, 176-181. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2016.09.020>
- [66] Dreyer, U.J., Ozcariz, A., Ascorbe, J., Zubiate, P., Vitoria, I., Martelli, C., Da Silva, J.C.C. and Zamarreño, C.R. (2018) Gas Detection Using LMR-Based Optical Fiber Sensors. *Proceedings*, **2**, Article No. 890. <https://doi.org/10.3390/proceedings2130890>
- [67] Hernaez, M., Mayes, A.G. and Melendi-Espina, S. (2018) Graphene Oxide in Lossy Mode Resonance-Based Optical Fiber Sensors for Ethanol Detection. *Sensors*, **18**, Article No. 58. <https://doi.org/10.3390/s18010058>
- [68] Saini, R., Kumar, A., Bhatt, G., Kapoor, A., Paliwal, A., Tomar, M. and Gupta, V. (2019) Lossy Mode Resonance-Based Refractive Index Sensor for Sucrose Concentration Measurement. *IEEE Sensors Journal*, **20**, 1217-1222. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2946760>
- [69] Dai, X., Chen, H., Qiu, C., Wu, L. and Xiang, Y. (2020) Ultrasensitive Multiple Guided-Mode Biosensor with Few-Layer Black Phosphorus. *Journal of Lightwave Technology*, **38**, 1564-1571. <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2954168>
- [70] Zhao, Y., Wu, L., Gan, S., Ruan, B., Zhu, J., Dai, X. and Xiang, Y. (2018) High Figure of Merit Lossy Mode Resonance Sensor with Graphene. *Plasmonics*, **14**, 929-934. <https://doi.org/10.1007/s11468-018-0876-2>
- [71] Otto, A. (1968) Excitation of Nonradiative Surface Plasma Waves in Silver by the Method of Frustrated Total Reflection. *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei*, **216**, 398-410. <https://doi.org/10.1007/BF01391532>
- [72] Kretschmann, E. and Raether, H. (1968) Notizen: Radiative Decay of Non Radiative Surface Plasmons Excited by Light. *Zeitschrift für Naturforschung A*, **23**, 2135-2136. <https://doi.org/10.1515/zna-1968-1247>
- [73] Villar, I.D., Zamarreo, C.R., Sánchez, P., Hernaez, M. and Matias, I.R. (2010) Generation of Lossy Mode Resonances by Deposition of High-Refractive-Index Coatings on Uncladded Multimode Optical Fibers. *Journal of Instrumentation*, **12**, Article ID: 095503. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/12/9/095503>
- [74] Zamarreno, C.R., Hernaez, M., Villar, I.D., Matias, I.R. and Arregui, F.J. (2009) ITO Coated Optical Fiber Refractometers Based on Resonances in the Infrared Region. *IEEE Sensors Journal*, **10**, 365-366. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2009.2034628>
- [75] Zhang, Y., Zhang, P., Zhao, M., Xu, D., Wang, J., Li, Z., Tang, T., Shen, J. and Li, C. (2022) A High Sensitivity Lossy Mode Resonance Refractive Index Sensor Based on SBS Structure. *Results in Physics*, **36**, Article ID: 105454. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2022.105454>
- [76] Paliwal, N. and John, J. (2014) Theoretical Modelling of Lossy Mode Resonance (LMR)Based Fiber Optic Temperature Sensor Utilizing TiO₂ Sensing Layer. *12th International Conference on Fiber Optics and Photonics*, Kharagpur, 13-16 December 2014, M4A.22. <https://doi.org/10.1364/PHOTONICS.2014.M4A.22>
- [77] Hernaez, M., Zamarreno, C.R., Fernandez-Valdivielso, C., Villar, I.D., Arregui, F.J. and Matias, I.R. (2010) Agarose Optical Fibre Humidity Sensor Based on Electromagnetic Resonance in the Infra-Red Region. *Physica Status Solidi*, **7**, 2767-2769. <https://doi.org/10.1002/pssc.200983815>
- [78] Zamarreno, C.R., Hernaez, M., Del Villar, I., Matias, I.R. and Arregui, F.J. (2010) Tunable Humidity Sensor Based on ITO-Coated Optical Fiber. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **146**, 414-417. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2010.02.029>
- [79] Dikovska, A.O., et al. (2010) Optical Sensing of Ammonia Using ZnO Nanostructure Grown on a Side-Polished Optical-Fiber. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **146**, 331-336. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2010.02.018>
- [80] Razquin, L., Zamarreno, C.R., Munoz, F.J., Matias, I.R. and Arregui, F.J. (2012) Thrombin Detection by Means of an Aptamer Based Sensitive Coating Fabricated onto LMR-Based Optical Fiber Refractometer. *Proceedings of the Sensors*, Taipei, 28-31 October 2012, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2012.6411186>
- [81] Zamarreno, C.R., Ardaiz, I., Ruete, L., Munoz, F.J. and Arregui, F.J. (2013) C-Reactive Protein Aptasensor for Early Sepsis Diagnosis by Means of an Optical Fiber Device. *Proceedings of the Sensors*, Baltimore, 3-6 November 2013, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2013.6688222>