

河北工业大学城市学院

毕 业 论 文

作 者：刘美男 学 号：135947

系：理学系

专 业：应用物理学

题 目：响应性光子晶体在传感器领域
的研究进展

指导者：朱吉亮 副教授

评阅者：

年 月 日

毕业论文中文摘要

响应性光子晶体在传感器领域的研究进展

摘要:

近年来,科学家将刺激性智能材料作为识别基与光子晶体相结合构成传感器,我们把这类传感器叫做响应性光子晶体传感器。一方面,光子晶体具有周期性结构并且其介电常数周期变化。它具有能控制一定频率的光传播的光子带隙。因此它可以操纵光子的运动使光波产生衍射实现对光的控制。外界环境的改变可能会引起光子晶体介电常数和周期的改变进而改变光子带隙。另一方面响应性智能材料能够接收外界的刺激进而自身出现强烈的体积膨胀,收缩的性质。基于这两个原理,研究者们设计许多响应性光子晶体传感器用来感受外界环境的信息并以可见光或者光谱的形式提供给我们所需要的信息。响应性光子晶体传感器比普通的传感器更加方便快捷,准确有效,肉眼可见的光波更加明显的把人们想要的信号表现出来。本文通过大量的文献搜集,集中整理了响应性光子晶体是如何在传感器领域发挥作用的。主要分为物理传感,化学及生物传感两个部分来介绍响应性光子晶体的传感器领域应用。

关键词: 响应性光子晶体; 传感器; 物理传感器; 化学传感器; 生物传感器。

毕业论文外文摘要

Research on Progress of Response Photonic Crystals in Sensor Field

Abstract:

The combination of stimulating intelligent materials and photonic crystals is used to make sensors, and we call this kind of photonic crystals as responsive photonic crystals. On the one hand, photonic crystals are a class of materials whose dielectric constant is periodically changed. It has a photonic bandgap that can control a certain frequency of light propagation. So it can manipulate the movement of the photon so that the light generated by diffraction to achieve the control of light. Changes in the external environment may cause photonic crystal dielectric constant and periodic changes and then change the photonic band gap. On the other hand, the response of intelligent materials to receive external stimuli and then their own strong expansion of the volume, the nature of contraction. Based on these two principles, the researchers designed many responsive photonic crystal sensors to sense the information of the external environment and provide the information we need in the form of visible light or spectroscopy. Respond to the photonic crystal sensor is more convenient, accurate and effective than the ordinary sensor, the visible light is more obvious to the people want the signal shown. In this paper, through a large number of literature collection, focused on the response of the photonic crystal is how to play a role in the field of sensors. Mainly divided into physical sensing, chemical and biological sensing of the two parts to introduce the response photonic crystal sensor applications.

Keywords: Responsive photonic crystals; sensors; physical sensors; chemical sensors; biosensors.

目 录

1 绪论.....	- 1 -
1.1 响应性光子晶体简介.....	- 1 -
1.2 响应性光子晶体分类及应用.....	- 1 -
2 光子晶体物理传感器.....	- 3 -
2.1 响应性光子晶体压力传感器.....	3
2.2 响应性光子晶体温度传感器.....	4
2.3 响应性光子晶体湿度传感器.....	4
2.4 响应性光子晶体电，磁传感方面的应用.....	5
3 响应性光子晶体在化学及生物传感方面的应用.....	6
3.1 响应性光子晶体化学传感器.....	6
3.2 响应性光子晶体生物传感器.....	8
结 论.....	11
参 考 文 献.....	- 12 -
致 谢.....	- 14 -

1 绪论

1.1 响应性光子晶体简介

光子晶体(photonic crystals) 自从 1987 年被提出发现, 已经取得了很大研究进展并应用在许多领域。光子晶体和普通晶体类似具有周期性结构, 其由不同折射率的材料周期性排列而成的存在禁带的一类材料。光子晶体中由电介质构成的周期势场可以调制光的传播形成布拉格衍射, 控制一定频率的光的传播。从而形成 PBG 结构, 即光子带隙。光子带隙限定了一个频率范围, 此范围频率的光不能在光子晶体里传播, 而频率位于导带的光在光子晶体中传播不受影响。光子带隙仅允许特定频率的光通过, 就像半导体调制电子运动一样调制光波的传播。光子晶体受外界刺激会导致它的晶格发生改变进而引起衍射光的改变, 肉眼可见的光或者光谱的变化可以表达环境的改变。光子晶体的独特的孔结构和光学性能使得其在传感器领域发挥着越来越重要的作用。响应性光子晶体在传感器领域的应用越来越广泛, 其检测信息的精确度以及快速响应, 操作简单等优点是很多传统的传感器无法做到的。光子晶体在很多情况下不能完成对特定环境的响应。为此, 人们可以将水凝胶等响应性智能材料与光子晶体结合作为识别外界环境的媒介, 进而使光子晶体的表面可以作为识别基, 响应性光子晶体在接受外界刺激后其晶体结构会发生变化, 从而会引起衍射光的改变, 这就是光子晶体传感器一般的检测原理。科学家们设计了能够接收外界刺激改变自身的体积或者自身性质的响应性智能材料结合光子晶体应用于传感器。这就是本篇文章所提到的响应性光子晶体的由来。响应性光子晶体在传感器领域的应用越来越广泛, 其检测信息的精确度以及快速响应, 操作简单等优点是很多传统的传感器无法做到的。本文通过文献检索, 了解响应性光子晶体和其工作原理, 并综述其研究进展。

1.2 响应性光子晶体分类及应用

光子晶体中, 类似于传统晶体结构按照循环维数, 可分为一维、二维及三维光子晶

体如图 1。不同维数的光子晶体在传感器领域的应用有很大差异。例如一维光子晶体传感器可以用在一维 PBG 结构生物传感器, 色度传感器以及其在液体测量方面有很广泛的应用。二维光子晶体传感器的种类包括二维光纤传感器、生物传感器、光子晶体波导传感器等。三维光子晶体在传感器领域主要应用有分子印迹光子晶体传感器、反蛋白石凝胶光子晶体传感器等。不同维数的光子晶体在制备工艺以及应用在传感器方面的基本原理都有所不同, 一维光子晶体开发最多。根据响应原理的不同分为荧光传感器和色度传感器。光子晶体荧光传感器根据光子晶体荧光增强效应, 将分子印迹技术与光子晶体结合, 增强荧光信号, 放大检测信号。这种原理可以实现对多种离子, 蛋白质等的精确检测。光子晶体色度传感器根据响应性光子晶体接受外界环境刺激后改变其自身结构而产生肉眼可见的颜色改变而制成。另外我们根据刺激响应性聚合物的不同可以将响应性光子晶体大致分为^[1]①光子晶体微球②反蛋白石结构水凝胶③胶体晶体水凝胶阵列④浸润性控制的光子晶体⑤微凝胶胶体晶体。表面聚合物的种类不同其应用也不同。响应性聚合物的研究与开发直接影响了响应性光子晶体的种类及应用, 响应性光子晶体是将响应性的聚合物作为识别基与自组装形成的蛋白石结构的光子晶体组装得到。接受外界环境的刺激后, 响应性聚合物会发生体积的改变或者相转变从而导致光子晶体光子带隙的改变, 布拉格衍射峰发生位移, 宏观上可以通过肉眼可见的颜色或衍射光谱变化峰检测目标环境是否含有待检测信息。因为聚合物需要接受不同外界刺激改变自身的体积或者其他性质进而改变光子晶体的光子带隙。例如 Davidson^[2]等发明了一种全息化学传感器, 响应原理就是对分析物敏感的膜接受刺激改变光子晶体的光学结构进而衍射光变化。当分析物的识别基发生体积变化进而引起晶格改变时候传感器产生的光学信号会相当敏感的发生改变。响应性光子晶体就可以将环境变化以光学信号变化的形式表现出来, 无论是光子晶体自身颜色的变化还是衍射光变化都是可以检测到想要得到的信息。这在传感器领域是一次相当有价值的研究进展, 因为响应性光子晶体传感器在很多方面比传统传感器优越。

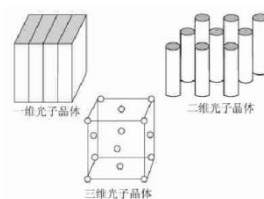


图 1 光子晶体结构

光子相较于电子,光子在其传递信息的效率及容量、能量损耗以及响应速度等

方面都相当具有优势。响应性光子晶体传感器作为一种新型的传感器,被越来越多的科学家加以研究开发。虽然现阶段响应性光子晶体得到了很好的开发但是仍然有以下的不足 (1)制备高质量的凝胶光子晶体仍存在很大技术难题;(2)很多响应性光子晶体传感器不可以重复利用,我们需要设计一些替代材料改变其重复利用的问题;(3)有待研发更多种类的响应性聚合物开发更多的传感器。

综上所述,响应性光子晶体类别很多,根据其合成方式的不同,改变它的合成条件可以更好的利用一些光学特性来应用于传感器的制作。我们需要开发研究更多的刺激响应性智能材料,改变其具体的制备数据来适应光子晶体的光子带隙能应用于更多的领域。本文将通过大量的文献检索来描述响应性光子晶体在物理传感器以及化学生物传感器方面的应用,以求对响应性光子晶体在传感器领域的应用有初步的了解,进而得到启发,研发出更多种类的响应性光子晶体材料来造福人类。

2 光子晶体物理传感器

2.1 响应性光子晶体压力传感器

许震宁课题组根据电磁场理论,通过了很多的实验和计算推导出一维光子晶体光子带隙边界与压力线性相关。这个研究为响应性光子晶体在压力传感方面的应用提供了理论支持。其研究小组设计的风压传感器非常精确并且应用面很广。Fudouzi 课题组^[3]设计了拉力响应的光子晶体橡胶薄膜。该设计将弹性 PDMS 填充到 PS 球组装光子晶体空隙中。拉伸光子晶体橡胶薄膜,PS 球的排列间距改变,导致了光子晶体的光子带隙的改变,从而产生颜色变化。我们可以通过传感器的颜色变化粗略的得到压力的大小。研究者通过二维光子晶体技术制备了衍射光谱能与压力值线性相关的压力传感器,通过计算机的公式计算,该传感器灵敏度很高测量的压力范围很大。他们在线性计算方面都遇到了很大问题,因为很难制备完全相同的光子晶体,不同的制备工艺的光子晶体由于自身结构的不同造成其线性关系很大差异,因此在大批量生产应用反面还是一个难题。科学家们制备的响应性光子晶体压力传感器比传统的压力传感器更加灵敏,很适合对一些需要十分精密检测压力的航天等领域。但是另一方面许多压力传感器不能自动恢复到原来的结构。导致材料的浪费。另外在制备上也无法保障随压力改变光子晶体的衍射光波一定是线性的,因此我们还应致力于研发更多的材料或者不

同类型的光子晶体解决这些问题。

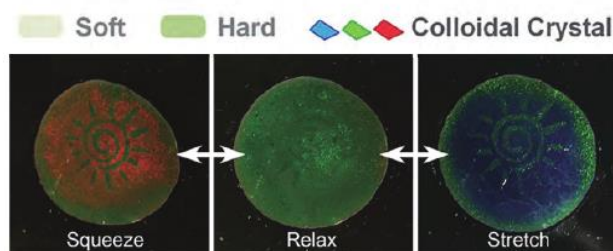


图 2 不同压力下的光子晶体颜色

2.2 响应性光子晶体温度传感器

与压力传感类似。对温度敏感的光子晶体可以接受环境温度的变化，进而引起其晶体结构以及光子晶体的带隙性能的改变。例如聚-N 异丙基丙烯酰胺是一种很好的温敏物质，其与光子晶体结合构成快速响应性温度传感器，被应用于很多的温度传感领域。Xiao 等制备一维多孔硅光子晶体传感器，得出了温度的改变可以使透射峰发生位移，也就是说可以改变其工作波段。这一工作通过大量的数据模拟实现了对温度的另一种传感。该传感器需要结合智能设备进行计算，应用范围很小。傅海威等运用平面波展开法对二维正方晶格光子晶体在 TM 模式下的能带进行具体的计算研究。制作了光子晶体微腔并对谐振特性进行数值模拟。最终计算表明温度和光子晶体微腔的谐振波长的变化是线性的，波长改变 6.7pm 则证明温度升高了 1℃。这一发现也被用于温度传感，而且灵敏度极高。响应性光子晶体温度传感器对温度的适应度高并且灵敏度很高。肉眼可见的颜色，衍射光的变化也很直观。但是在另一方面它仍存在其他光子晶体传感器具有的一些制备等技术难题。

2.3 响应性光子晶体湿度传感器

根据一种有机光子晶体薄膜对水分子具有吸附效应的研究，胡小永课题组利用其制备了可以完成对湿度检测的传感器。有机光子晶体薄膜上刻蚀有周期性分布的气孔，气孔中有疏水的高折射率介电圆柱。合理选用入射激光的波长，亲水的有机高分子聚合物接收环境中水分。入射激光透过率的变化可以体现环境相对湿度的变化。该传感器对自身条件要求比较严格，很容易产生误差。宋延林等通过研究发现湿度同丙烯酰胺光子晶体水凝胶的颜色相关，由湿度引起肉眼可见的颜色分别呈由透明到红色的变化，这种颜色的变化是可逆的。根据这一原理，我们可以设计出一种简易的湿度传感装置，虽然不能体现具体的湿度数值只能通过颜色直观判断，但是其简便的优点使

其可以应用在很多场合。这种传感器比传统的湿度传感器更加稳定。另一种比较简单的技术是基于多孔聚合物光子晶体的湿度传感器^[4]。由于 PC 的多孔区和无孔区吸收水分的不同导致其折射率不同,环境的相对湿度可以通过比较两区的折射率来测定。响应性光子晶体传感器在测量湿度变化方面有着很大的优势,首先可以重复利用,其次制备比较简单。可以广泛应用于空气湿度的检测。

2.4 响应性光子晶体电,磁传感方面的应用

磁响应性光子晶体的变色是肉眼可见的并且它的光子带隙改变是可逆的而且其响应的速度很快。因此其在显示,防伪等领域具有很好的应用价值。磁响应性的一维光子晶体的磁性组装基元对磁场敏感,磁场是通过调节粒子间距,来调控光子带隙的。Hu 等^[5]制备的光子纸能够对磁场的改变做出响应。他们将聚二甲基硅氧烷(PDMS)聚合物薄膜中均匀封装以微米液滴的形式含有超顺磁性 Fe_3O_4 @C-CNCs 的乙二醇溶液。外加磁场可以改变光子纸的结构色。掩膜光子印刷技术可以使光子纸显示出隐藏的图案信息纸币的水印就是依据此原理制成的。该发明对防伪技术的贡献很大,首先其特有的结构不容易被仿制,其次设计原理简单适合生产。Yin 课题组^[6]开发了一系列磁性响应的光子晶体并应用在传感、显示、防伪等领域。在磁场下球形的磁性纳米颗粒形成一串周期性结构,在溶液中的球形的磁性颗粒排列间距和方式都会随着磁场发生变化,进而引起光子带隙的改变,宏观上颜色改变达到响应的目的。Yin 课题组又制备了在磁场中可产生向异性的组装一种椭球形的性纳米颗粒可以对磁场角度进行测定,可以说该课题组的研究对于光子晶体在磁感应方面的研究具有巨大贡献。一些设计原理为我们提供了很好的技术支持。对于光子晶体在传感器领域的应用起到了很好的促进作用。Manners 课题组制备了电场响应的传感器。外加电场可以使光子晶体色度传感器发生形变产生颜色变化,该色度传感器光谱红移近 300nm 能够检测 0~2.6V 之间的电压变化所以它的灵敏度很高。响应性光子晶体在磁传感方面的应用被许多科学家应用在了军事,防伪等领域并且效果良好。对于电的传感我们可以更加安全的检测电路的漏电情况,直观的测量精确的电压值。许多光子晶体电磁传感方面的应用还有待进一步的开发,根据简单的设计原理设计更加实用的传感器是目前的研究方向。

本章小结:响应性光子晶体传感器在物理传感方面的应用非常广泛,而且光子晶体传感器响应更加的迅速。测定的数据的灵敏度很高,如果结合电脑等智能设备设计

出能够被人们所接受的普通传感器。将来响应性光子晶体传感器必将许多取代传统传感器应用在更多的方面。

3 响应性光子晶体在化学及生物传感方面的应用

响应性光子晶应用于化学或生物传感器的理论基础:裸眼检测技术成为化学及生物传感器技术发展的主要方向。光子晶体能够产生布拉格衍射,由布拉格方程: $m\lambda=2nd\sin\theta$ 表明: θ 一定时,光子晶体的衍射波长正比于 d ,即晶格间距的任何变化都会引起布拉格衍射峰的移动。当响应性光子晶体接受外界刺激引起晶格的改变就会产生衍射光颜色的变换,而这种颜色也是肉眼可见的。因此科学家们设计出了多种识别基结合光子晶体来感受环境的变化达到响应的目的。

3.1 响应性光子晶体化学传感器

Song 课题组^[7]在胶体光子晶体微球间的空隙中填充对 pH 具有响应的 PAA 水凝胶,随着 PH 值的改变凝胶的膨胀程度不同,传感器会产生蓝色到橙色的变化,我们可以根据色度差检测 PH 的大小.该传感器应用了比较简单的设计原理,虽然颜色变化明显,但是实用性不高。因为造价低廉的 ph 试纸也能起到一样的作用。Lee 等研制的 pH 响应性反蛋白石结构光子晶体具有一定的机械强度 pH 值响应性反蛋白石结构的光子晶体水凝胶。当把该传感器至于不同 PH 溶液中时,具有多孔性使分析物得以快速扩散,光谱上显示衍射峰移动,材料的颜色会发生可逆的变化。通过调节制备凝胶时丙烯酸在光子晶体胶体中的含量衍射峰的移动范围变得可控。通过调节材料的尺寸和组成可以设计出衍射峰移动规律方便直观的得到测量结果。该设计比较复杂不适合大规模的制备。而且它的线性关系不容易得出。Song 课题组制备了应用于油品检测领域酚醛树脂的反蛋白石结构的光子晶体,将待测有机溶剂滴入反蛋白石结构空隙中光谱中衍射峰会发生明显的变化。其颜色可从深绿到红色间变化。此项发明的难点主要是空隙和有机溶剂的匹配,可以应用于鉴别有机溶剂的种类。Aizenberg 课题组^[8]构筑了一种反蛋白石结构的光子晶体,实现了对不同的溶剂的色度传感.通过选择性的化学修饰他们将反蛋白石结构的光子晶体构筑出图案化结构,因而具有不同浸润性,不同表面张力的液体进入这种反蛋白石结构时,由于表面张力的作用,液体会进入表面张力相匹配的空隙中,浸入液体部分的折射率发生改变.从而显示出不同的图案,这种光子晶体传感器用来区分不同的溶剂或者不同浓度的乙醇。该传感器的优点是可

以根据需要制备需要检测的溶剂的光子晶体结构。基于多孔硅微腔光学特性,李志全等^[9]研制了一种气体传感器。多孔硅层有效折射率在有机物吸附于多孔硅表面时会反生变化,使得多孔硅微腔反射光谱吸收峰位移变化,可以用来检测有机物种类。这种检测还是存在一定的局限性,待检测的量及种类都是影响衍射的因素。Nakayam^[10]等制备了反蛋白石结构葡萄糖响应性传感材料。所得材料具有多孔结构,可以从颜色的变化很直观的判断葡萄糖的浓度,并且还可以快速的完成响应。Goponenko^[11]等制备的乙醇传感器,将 CCA 采用甲基丙烯酸羟乙酯(HEMA)包裹,用来检测水中的乙醇浓度,从纯水和到 40 % 乙醇的衍射光谱都能在可见光区线性对应。这种检测限虽然只有 40%,但是其颜色很明显,容易识别。另外 Gu 课题组^[12]制备了响应乙醇气体的光子晶体传感器。乙醇气体使其特殊的胶体纳米颗粒柔性的外壳会被溶胀,进而改变光子晶体的体积,改变了光子晶体晶格参数,图案的颜色发生红移,通过颜色的改变就可以检测乙醇气体的浓度。Takeoka 等采用 N-异丙基丙烯酰胺为单体,3-丙烯酰胺基苯硼酸为葡萄糖识别基,模板采用 SiO₂ 胶体小球,该传感器可以作为一种简便的检测人体内葡萄糖浓度是否处于正常的仪器。因为该光子晶体传感器在不同浓度的葡萄糖中会显示出绿、黄、红 3 个颜色,其中绿色为正常值,黄色为病理临界值。红色表明高于临界值处于不正常的水平。这为糖尿病自测提供了一种简便实用的方法。

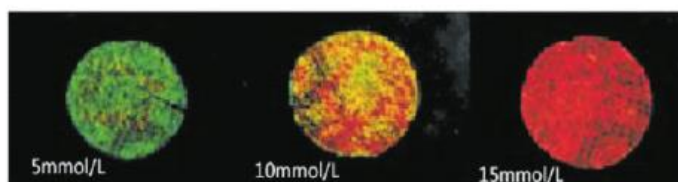


图 3 不同浓度葡萄糖下光子晶体颜色

Asher 等^[12, 13]将一些能与葡萄糖反应的功能基团共聚,利用葡萄糖氧化酶能同凝胶上的活性环氧基官能团相连接的原理来检测尿液等体液中的葡萄糖浓度。检测过程中反应分两步骤进行,第一步,葡萄糖转化为葡萄糖酸,同时酶减少。第二步,酶在氧存在下恢复为氧化形态。反应生成的离子会使凝胶溶胀,进而产生肉眼可见的衍射光波。在光子晶体上引入如硼酸、聚乙烯乙二醇或冠醚等功能基团后,能够在高离子强度环境下检测葡萄糖,经过修饰的光子晶体能对葡萄糖产生可见光区的响应。鉴于此能够完成对人体内或者尿液等体液中葡萄糖的检测。Sasmita 等^[14]用 4-氨基-3-氟苯基硼酸修饰了光子晶体,也可在人体生理 pH 条件下检测葡萄糖区别于传统的响应性聚合物,离子液体聚合物由于具有静电力,范德华力等多种相互作用,因而其响

应性和敏感程度都很优越,高灵敏光子晶体色度传感器就是将这种材料与光子晶体相结合构筑的。Li 课题组利用离子液体聚合物构筑了响应性光子晶体传感器,其宏观颜色在不同的离子液体中体积会发生膨胀或收缩后产生显著变化,实现了对离子液体的色度传感。由于离子液体聚合物对不同的离子很敏感,所以其针对性检测效果很强。另外,在气体检测方面,将形状记忆材料与光子晶体相结合,Jiang 课题组^[15]发明了一种光子晶体薄膜传感器来对丙酮气体浓度实现检测。该传感器一旦接触到丙醇气体,丙酮就会在其表面凝结,引起有效折射率的改变,从而导致宏观上颜色的变化,实现对丙酮蒸气浓度的色度检测。Kimble 等^[16]利用氨与 3-氨基酚最终生成苯醌氯亚氨的反应和光子晶体技术研制了一种对氨敏感的材料。该传感器可检测出人体血液中含有的低浓度的氨,并且通过光谱的线性蓝移检测其浓度。该研究应用在医疗检查上面,大大降低了检查难度以及费用。

响应性光子晶体的构筑不仅仅单纯的改变聚合物的种类和结构。设计研发不同结构的光子晶体也可以满足对于传感器的设计。科学家们将 MOF 材料与光子晶体结合制备出了特殊结构的响应性光子晶体。Li 课题组^[17]根据这一原理制备了可以对多种离子溶液完成色度响应的光子晶体传感器。不同的溶剂环境会使光子晶体的折射率发生改变,进而显示出不同的颜色。光子晶体引入线缺陷时,特定频率的光可完全透过禁带。利用这个原理可以制造光波导。这是一种新型的导光原理,当光穿过时光的能量几乎无损。光子晶体波导很多的路径都有很高的效率。Gu 课题组^[18]利用流动注射装置制备出了致密堆积的胶体晶体微球。从而构筑出球形光子晶体结构非常稳定,可以重复的利用,很适合工业化生产。并且角度对于它的结构色影响很小,因此这种光子晶体很适合用作响应性光子晶体传感器。将不同的响应性材料填充在胶体微球空隙处,脱出模板,就可以制备出对不同环境进行检测的响应性光子晶体传感器。进而可以实现了对于生物化学传感方面的应用。构筑结构不相同的两种不同响应性的光子晶体也能构筑出图案化的响应性光子晶体。Ge 课题组^[19]就提出了一种构筑“响应-非响应”的响应性光子晶体的新的设计思想。由具有相同光子带隙但是不同响应性的两种光子晶体组合构成新的传感器。当接受外界环境变化刺激后,具有响应性的光子晶体结构发生变化进而衍射光发生改变引起颜色变化。不具有响应的光子晶体不能改变颜色。我们可以利用这种宏观上的色度差来达到检测的目的。

3.2 响应性光子晶体生物传感器

随着分子印记技术以及响应性聚合物的开发,光子晶体被应用于生物传感器并且在医疗检测等方面具有良好的表现。Li 课题组制备了一种可以特异性检测手性分子 L-Dopa 的色度响应性光子晶体传感器。其原理是存在一种分子印迹聚合物可以于目标分子特异性结合实现对于晶格结构的间接控制。在光子晶体胶体颗粒间的空隙中填充作为模板分子待检测物与高分子单体的混合物,在聚合后脱除模板分子和胶体,就可以得到对目标分子具有特异性识别的响应性光子晶体传感器。原有原有模板留下的空隙可以特异性的结合待检测物质,将该传感器放在有目标分子存在的环境中,光子晶体体积就会产生改变,从而改变光子晶体晶格参数,如果传感器颜色发生变化就可以检测出目标分子。这个原理对于手性分子识别,药物的检测等领域的进展有很大帮助。Lee 等^[20]在绝缘硅基板(SOI)上制作二维光子晶体微腔,利用寻求近似解的方法模拟传感器,透射光谱会在微腔内表面的功能化基团与目标物质相结合后发生红移,通过数值的比较就可以测定目标物质的含量。通过大量的理论和实验基础他们设计出能识别生物分子的响应性光子晶体传感器。因为传感器内表面积小($<100\mu\text{m}^2$),所以其所需检测样品的量也很少。基于同样的原理,Zlatanovic 等^[21]制备了定量检测微量蛋白质的光子晶体微腔传感器。能够检测微量的蛋白质,结合特异性的分子识别基能够应用于更多的医疗检测。光子晶体传感器对于蛋白质的检测具有所需样品少,灵敏度准确率高,不需要对样本进行加工等优点。

有一种光子晶体由聚苯乙烯块上的一系列高度密集的空气孔有序排列而成,通过改变其中一排空气孔的直径可以形成波导。这样我们可以探究一些微小物体的折射率,将样品放在孔内然后记录光子带隙深度的变化来计算折射率。科学家们制备的响应性光子晶体传感器也被广泛应用在检测蛋白质和微生物。我们知道医疗上需要检测各种的人体生物化学数据来评判病情。分子印迹等技术的发展使得光子晶体有望取代造价很高并且不是很方便的传统医学传感器,对于检测人体中各种微量物质的变化提供了一个快速和简便的检测方法。美国 Asher 等对此进行了大量的研究制备了光子晶体传感器可定量检测血液和尿液中肌氨酸酐。人体肾脏功能的好坏可以由肌氨酸酐的浓度得到一定的了解。该传感器能很灵敏的检测人体的肌氨酸酐,。此光子晶体传感器工作原理是在聚丙烯酰胺水凝胶中聚苯乙烯小球产生规则的孔结构,衍射光通过水凝胶后会产生颜色的变化,接受刺激后水凝胶会发生相变,进而引起水凝胶晶格的改变引起衍射光的改变。凝胶上的水解酶迅速水解肌氨酸酐且释放出 OH^- ,同时水凝胶体积变大,从而使衍射光发生红移。因此,我们可以根据这一原理设计更多的能催化释放

出 H^+ 和 OH^- 的酶反应设计检测装置。

医学上很多先天疾病需要早期诊断和救治需要检测 DNA 分子。分子荧光技术是 DNA 的检测常用的分析方法, Kim 课题组构建了一个生物传感器平台, 他们利用硅胶自组装光子晶体薄膜可检测到具有荧光的 DNA 的杂化反应, 并且荧光信号有 2 个数量级以上的增强。这一变化可在胶体光子晶体薄膜的晶轴方向观察到, 该传感器对于基因疾病的检测起到了好的帮助, 比传统的检测技术灵敏度提高了上百倍, 而且设计原理简单。新一代直读式实时光学生物传感器有望应用于医疗方面, 生物分子可以作为缺陷层引入到胶体光子晶体中, 当响应性光子晶体接触目标生物分子时光子晶体的内隙缺陷模式改变, 进而显示不同的光谱。我们就可以用光学方法检测 DNA 分子的结构。相较于传统的复杂仪器, 其应用性很高。对于生物分子的 DNA 结构可以直观的获取, 在生物检测方面是一大进步。

一种植入式反射传感器对于医疗上的检测有着很大的应用前景。科学工作者研发出的植入式三维光子晶体可生物降解, 并且光子晶体的降解是否完全能通过衍射光谱的变化检测到。实验表明这种光子晶体确实可被生物降解, 我们通过设计胶体的功能基团可以研发出更多类似的光子晶体晶体。将这种传感器植入人体可以实时监控人体的一些生理指标, 并且其对人体无害。Takashi 等^[22]结合分子印迹技术, 使光子晶体响应滞后达到最低的值, 这种光子晶体传感器可以实现对多种病毒等化合物的检测, 可以广泛应用于医疗上。毒剂的检测需要做到实时监控以及现场监控, 可变色的光子晶体在这方面的应用很好的体现了它的优越性能。因为很多的毒剂具有有机磷结构, 因此将光子晶体上固载乙酰胆碱酯酶作为识别基, 能和有机磷毒剂生成带电荷的磷酸基团, 进而引起凝胶的溶胀, 衍射光波会发生可见光区的红移进而达到检测目标毒剂的目的。虽然该传感器无法检测不含有机磷的毒剂但是其对于大多输农药残留等检测能发挥出其关键作用。

本章小结: 响应性光子晶体在化学生物传感方面体现出了卓越的灵敏度, 很高的效率, 更低廉的造价, 更简便的使用方式等优点。本章比较全面的简述了一些科学家们的研究成果及部分发明的理论基础。我们可以发现响应性光子晶体传感器在医疗上, 危险品检测等方面也扮演着重要的角色。我们需要根据这些科学家们的实验基础研发出更多的疾病识别方面的分子印记型光子晶体传感器。我们还应致力于光子晶体的优化制造工艺以及减少制造成本方面的研究。

结 论

本文总结：本文通过对科学家们在响应性光子晶体在传感器领域的应用的一些研究成果做出综述，让人们对于响应性光子晶体有一些基本的了解。文章综述了响应性光子晶体的定义以及其在物理传感，化学及生物传感方面的应用原理以及目前的科研进展。概述了响应性光子晶体在传感器领域的一些优势：灵敏度高，响应速度快，造价低，容易制备，安全性高，应用广泛等。但是另一方面许多光子晶体还不能够完成大量的制备。光子带隙的调节也非常困难。我认为光子晶体传感器还应该结合手机登智能设备达到直观的显示目的。另外我们有待开发出更多的响应性聚合物以及不同结构的光子晶体用来研发更多的传感器应用在更多的方面。

参 考 文 献

- [1] 段廷蕊, 李海华, 孟子晖. 光子晶体应用于化学及生物传感器的研究进展. 化学通报, 2009, 72(4):298-306.
- [2] 李燕, 谢娟, 邓宏. 光子晶体的研究进展. 材料导报, 2005, 20(12):10-12.
- [3] 李珩, 王京霞, 王荣明. 三维胶体光子晶体对光的调控与应用研究. 化学进展, 2011, 23(6):1060-1068.
- [4] 刘兆斌, 赵祥伟, 张帅. 光子晶体薄膜的制备以及在编码载体中的应用. 化学学报, 2008, 66(2):229-233.
- [5] 张文毓. 光子晶体的研究及其在传感器中的应用. 传感器世界, 2014(9):27-33.
- [6] 王玉莲, 郭明, 郑学仿, 等. 凝胶光子晶体. 化学进展, 2007, 19(10):1475-1480.
- [7] 王丽清, 林凡燕, 余莉萍. 分子印迹凝胶光子晶体抗生素传感器研究, 有机分析与生物分析学术研讨会. 2011.
- [8] 黄荣刚. 分子印迹水凝胶光子晶体响应性的研究. 天津大学, 2009.
- [9] 李大海, 孙晓红, 刘国彬, 等. 一维光子晶体传感器在液体测量方面的应用研究. 激光与红外, 2011, 41(8):899-903.
- [11] 朱广浩, 马会茹. 基于磁组装的一维响应性光子晶体的研究进展. 济南大学学报: 自然科学版, 2016, 30(6):417-423.
- [8] 梁迪迪, 刘根起, 李莎等. 响应性水凝胶光子晶体的研究进展. 粘接, 2013(12):75-79.
- [13] 张文毓. 光子晶体的研究及其在传感器中的应用. 传感器世界, 2014(9):27-33.
- [14] 王宇飞, 邱怡申, 陈曦曜. 基于迈克耳孙干涉仪的二维光子晶体传感器. 光学学报, 2009, 29(4):1083-1087.
- [15] Wang J. Y., Zhou M., Gao J. P.. Chemical Responsive Photonic Crystals. Chinese Polymer Bulletin, 2006, 28(11):44-51.
- [16] 张立春. 水凝胶光子晶体温度特性的研究. 哈尔滨工业大学, 2016.
- [17] 孟梁, 孟品佳, 张庆庆, 等. 氯胺酮分子印迹光子晶体水凝胶传感器快速检测平

台的研究, 公共安全中的化学问题研究进展. 2013.

[18] 傅小勤, 郭明, 张晓辉, 等. 光子晶体传感器的研究进展[J]. 材料导报, 2011(3):57-62.

[19] 洪炜. 响应性光子晶体水凝胶的构筑与应用[D]. 上海交通大学, 2014.

[20] 李露. 聚合物光子晶体传感器的制备及其应用研究[D]. 西北农林科技大学, 2016.

[21] Lee M., Fauchet P. M., A two dimensional silicon-based photonic crystal microcavity biosensor-art[J]. Proc SPIE, 2006, 6322:B3220.

致 谢

作为一名普通的本科生，我的论文存在很多不严谨的地方。接下来我会记住这段操劳的日子。记住帮助我的朱老师。本次论文写作过程很是艰难，前中期报告都出现了很大问题。最终我通过老师的帮助，总算完成了本次论文。朱吉亮老师的工作很繁忙，但是依然积极督促我们修改论文，在这里说下老师您辛苦了。我今后还会继续阅读这方面的文章，丰富自己的知识。因为这个课题确实很有趣。大学要结束了。我要走向自己的生活。时光飞逝，感谢大学里我遇到的各位恩师，各位同学，大家珍重。人应该和论文一样的一丝不苟。希望本次帮助我完成论文的老师，同学们在今后的生活里有更大的收获。