

【专题：新材料新技术下的设计研究】

基于分子传感材料的智能医疗产品设计研究

乔宇^{1,2}, 胡辰韬¹

(1.北方工业大学, 北京 100144; 2.北京理工大学, 北京 100081)

摘要: **目的** 运用光子晶体新材料作为分子传感器, 针对糖尿病患者自我监测产品进行研究再设计工作。**方法** 以智能高分子材料——光子晶体为研究对象, 从糖尿病患者自我监测需求出发, 采用以智能家居产品设计思考为导向的研究方式, 基于德拜衍射相关理论, 对光子晶体分子传感器及其设计应用进行解析研究, 将新材料技术与智能家居产品设计相结合, 解决糖尿病患者的日常居家葡萄糖监测需求。**结论** 以化学新材料特性为出发点, 将强化实用功能、提高易用程度及强调用户体验作为研究基础, 依据化学材料特性与实验技术原型相结合, 功能需求与艺术形式相统一的方式, 设计出基于光子晶体材料的糖尿病患者自我监测产品, 并最终投入生产使用。

关键词: 光子晶体; 分子传感器; 糖尿病; 产品设计

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)10-0001-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.10.001

Design of Smart Medical Products Based on Molecular Sensing Materials

QIAO Yu^{1,2}, HU Chen-tao¹

(1.North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2.Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

ABSTRACT: This research aims to study and redesign the self-monitoring products for diabetic patients using new photonic crystal materials as molecular sensors. Taking the smart polymer material-photonic crystal as the research object, starting from the self-monitoring needs of diabetic patients, adopting a research method oriented by smart home product design thinking, the photonic crystal molecular sensor and its design application are analyzed and researched based on Debye diffraction related theories. The new material technology is combined with smart home product design to solve the daily home glucose monitoring needs of diabetic patients. Starting from the characteristics of new chemical materials, the research is based on strengthening practical functions, improving ease of use, and emphasizing user experience. Based on the combination of chemical material characteristics and experimental technology prototypes, and the unification of the functional requirements and artistic forms, the product based on photonic crystal materials for self-monitoring of diabetic patients is designed, and finally put into production use.

KEY WORDS: photonic crystal; molecular sensor; diabetes; product design

糖尿病是一类以高血糖为特征的代谢性疾病, 目前还没有彻底治愈的手段, 因此糖尿病患者每日的血糖监测与血糖管理就显得尤为重要。血糖检测设备可以针对患者的血糖情况进行实时反馈, 并对其日常控糖措施有一定监督与约束的作用^[1]。市场现有的糖尿

病监测类产品种类繁多, 且不同的监测技术也各有利弊。总体上此类检测产品都在向智能化与微创的研究角度发展。本研究将会针对糖尿病患者群体的血糖监测需求展开研究分析, 结合基于物联网的智能家居产品模式, 采用一种智能高分子光子晶体传感材料,

收稿日期: 2021-02-23

基金项目: 2018 北京市社科基金项目资助 (18YTC025); 北方工业大学毓优青年基金项目资助

作者简介: 乔宇 (1987—), 男, 北京人, 博士, 北方工业大学副教授, 主要从事工业设计教学与研究。

通信作者: 胡辰韬 (1993—), 男, 陕西人, 北方工业大学硕士生, 主攻工业设计。

设计一款糖尿病患者自我监测智能产品。

1 光子晶体传感材料概述

研究发现变色生物体表可随环境刺激物产生颜色变化,主要得益于皮肤表面的光子晶体结构。因其结构的特殊性使得光子晶体材料拥有各异的“光子禁带”,实验室可通过对晶体结构位置及大小尺寸等属性的改变影响晶体的折射系数,从而使一部分频率的光无法在材料结构中予以传播^[2-4]。根据光子晶体这种光学材料,实验室会通过晶体功能化的方式令其在接触目标化合物后发生结构变化,以此产生不同的结构色。实验人员可观测结构色的改变状态了解到待测化合物的含量,这就是光子晶体传感器的设计原理^[5-6]。

1.1 高分子凝胶

在智能高分子材料中,有一类由高分子网络与溶剂组成的聚合物被称为高分子凝胶^[7-10]。高分子凝胶结构中含有的亲溶剂性基团,使其在接触外界环境刺激物时结构将产生变化,从而引发相应的体积改变^[11]。因此将光子晶体与智能凝胶结构结合的功能化新材料可以在吸收目标化合物后,产生晶体结构变化,研究者通过观察其变化程度从而得到目标化合物的含量数据,以达到检测目的。与电子相比光子结构具有响应快、低能耗、效率高及信息量大等优势,目前该材料已应用在污染物、生化物与毒剂等检测领域。本研究将利用光子晶体智能凝胶这一新材料设计一款尿糖检测设备。

1.2 光子晶体凝胶与尿糖检测

功能化的光子晶体凝胶能对尿液中的葡萄糖产生响应从而测试其相应浓度,较传统检测方式这种新材料不需要通过控制储存环境保证其活性,此外该检测方式不易受患者尿液中其他物质的影响出现假阳性,对于定量分析尿糖而言将更加便捷。

目前实验室中对于光子晶体凝胶用于尿糖检测最快捷的方式为“衍射环实验”,见图1。实验需要将已用缓冲液稀释的尿液与光子晶体凝胶玻片接触,待凝胶吸附并达到平衡后可通过“衍射环原理”进行观测。该原理是使用波长为 λ 的激光直接垂直照射已吸取待测尿液的凝胶玻片,此时在玻片下方将投射出相应的衍射环,实验人员将首先计算衍射角 β ,如式(1)。

$$\beta = \arctan R / H \quad (1)$$

其中 R 为光环半径, H 为玻片与光环之间的高度。

而后根据式(2)—(3)可知当高度和波长为固定值的设定下,衍射环的半径值将对应待测尿液中的葡萄糖浓度。这种通过测量投射半径从而计算葡萄糖浓度

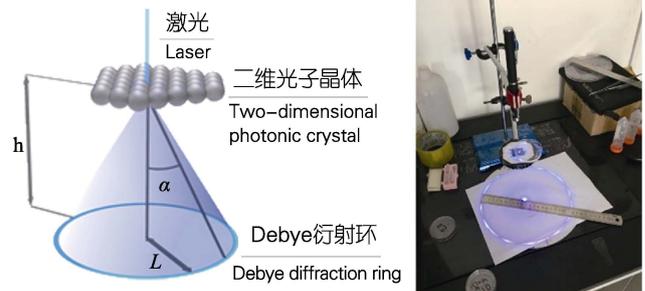


图1 二维光子晶体的德拜衍射原理与实验检测方式
Fig.1 Debye diffraction principle and phenomenon of two-dimensional photonic crystal



图2 iHealth 系列产品及 TesorTip CoG 产品
Fig.2 iHealth series products and TesorTip CoG products

的方法更加准确便捷且成本较低,但目前未在市场上见到基于该原理的相关检测产品,该技术还基本停留在实验室中。

$$\sin \beta = 2\lambda / \sqrt{3D} \quad (2)$$

$$D = 2\lambda / \sqrt{3(H/R)^2 + 1} \quad (3)$$

2 糖尿病患者智能医疗产品研究

随着智能家用监测产品的发展,市场出现了各类面向糖尿病患者的血糖检测和尿糖检测智能终端,此外一些基于新材料的新型监测产品也有所推广。

其中血糖检测是通过葡萄糖氧化酶或葡萄糖脱氢酶试纸与患者血液接触,并根据试纸的反应情况来确定血糖状况^[12]。此类试纸检测的观测方式大多为“比色法”,即通过直接观测试纸显色与色卡比对获得血糖浓度范围值。其中基于该原理的智能检测设备则是利用产品内置的电子设备自动识别试纸颜色,并将结果显示在仪器显示屏上供用户阅读。一般此类产品由采血针、血糖试纸和检测仪三部分构成,部分产品还会提供与之配套的手机应用程序以便记录血糖变化^[13]。血糖监测的产品有 ACCU-CHEK 系列产品及小米旗下的 iHealth 血糖检测仪套装系列产品等。目前 CNOGA 公司推出了根据感光设备分析指尖的光信号从而判断血糖浓度的 TesorTip CoG 系列产品,但这种新技术需要患者长时间的测试数据才能达到相对平稳的准确度,因此推广尚不广泛,见图2。

除血液监测方式外,目前还有一种技术通过监测



图 3 雅培公司出品的 FreeStyle 系列产品
Fig.3 FreeStyle series products produced by Yapei

皮下组织液中葡萄糖浓度的方式测量血糖。该类产品需要在患者的皮下组织中植入含有葡萄糖酶的传感器，产品一般由检测处理器和皮肤传感器两部分组成，见图 3。使用时用户首先将皮肤传感器贴在皮肤表面，启动检测处理器后传感器上的柔性探头将刺入皮下组织以进行检测。这种检测产品可以贴敷在皮肤上十余天，期间不影响日常活动，且可减少每日采血的痛苦。患者可通过检测仪或应用程序接收传感器信号并实时了解当前的血糖水平，目前该技术的缺点在于传感器属于一次性耗材且成本相对较高。

另一种葡萄糖检测方式是试纸检测法，该方法检测原理是：葡萄糖氧化酶与葡萄糖发生氧化过程中将释放过氧化氢，而过氧化氢再次令试纸中的显色剂氧化从而产生不同的色彩^[14]。这种试纸检测的方式相对便捷，患者只需肉眼观察即可得知大致尿糖范围，但缺点在于数据相较前两种方式而言精确度不高，而专业的尿液分析仪存在体积过大及设备价格高等问题。

3 基于光子晶体材料的尿糖智能监测产品设计

本设计研究将光子晶体凝胶新材料用以检测尿糖，基于实验室中用以葡萄糖观测的“德拜衍射环”检测法方法设计一款针对糖尿病的自我监测系统。监测终端将使用者定位为需要每天进行常规尿糖检测的患者，产品设计重点解决的问题是简化操作流程及通过产品造型正确引导用户的使用流程。

3.1 产品系统设计

尿糖智能监测系统由监测终端和应用程序两部分组成。智能监测终端可以通过尿糖检测显示检测结果并向应用程序提供信息，而应用程序则是用于接收终端提供的信息并将每日的检测数据上传到个人数据中心并进行记录与分析，此外应用程序还可以根据用户的意愿将相关检测信息上传至医疗单位，为患者提供一定医疗健康保障，见图 4。

3.2 产品理论模型

经过针对实验室内衍射环检测法的操作流程分析，课题组将其观测步骤划分为 4 个部分：(1) 将从用户处采集的尿液与预制缓冲液融合；(2) 采用固定

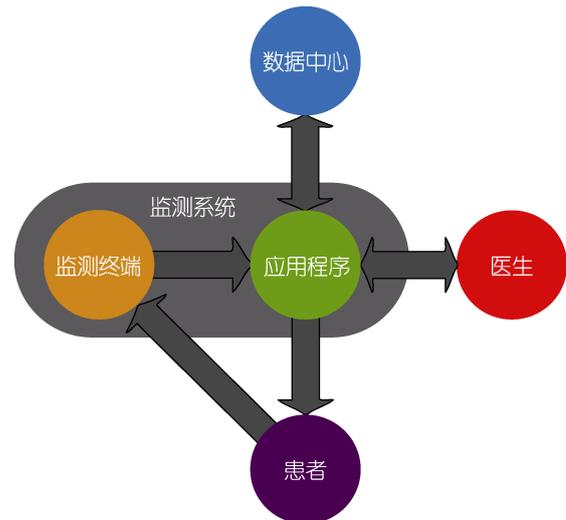


图 4 监测系统概念模型
Fig.4 Monitoring system conceptual model

在实验架上的激光笔垂直照射已吸附混合液并达到平衡的光子晶体凝胶膜并在采集平面上投射衍射环；(3) 使用投射平面上的标尺测量衍射环半径；(4) 将实验采集的相关数据带入公式进行计算，最终的计算结果就是尿液中葡萄糖的确切含量。

本设计将根据实验室中的相关步骤将产品理论模型划分为 8 个模块：集液、采样、电源、控制、激光、测量、处理、显示。其中集液模块是为用户提供收集单位时间内尿液的容器；采样模块则是用于从收集尿液中采取的部分样本；电源模块可以为设备提供电力；控制模块用于产品终端电源的开启与关闭；激光模块用于投射检测需要的激光；测量模块主要用于测量衍射环的半径数值；处理模块用于处理尿糖数据并与应用终端进行通信；显示模块用于显示检测的数据结果及产品检测中的相关状态。

为进一步将产品模型进行整合设计，将以上 8 个模块划分为两大部分，一是检测部分，其中包括集液及采样模块；二是观测部分，其中包括电源、控制、激光、测量、处理、显示模块。此外根据实际产品功能结构将观测部分划分为上部组件及下部组件，其中考虑到电源模块及处理模块的散热需要、测量模块因投射衍射环而产生的面积需要，将这 3 个模块作为观测部分的下部组件。而激光模块、显示模块和控制模块存在使用过程中的更换需求，因此将其划分为观测装置的上部组件，产品的理论模型见图 5。

3.3 观测部分设计

3.3.1 基本构型与尺寸的设定

在设计初期课题组针对产品的结构造型设计了两种方案，见图 6。

其中方案 A 在整体造型结构上与实验室中衍射环实验设备的搭建方式相近，此方案的优势在于观测较为直接且易于故障维修，但缺点在于测量模块暴露

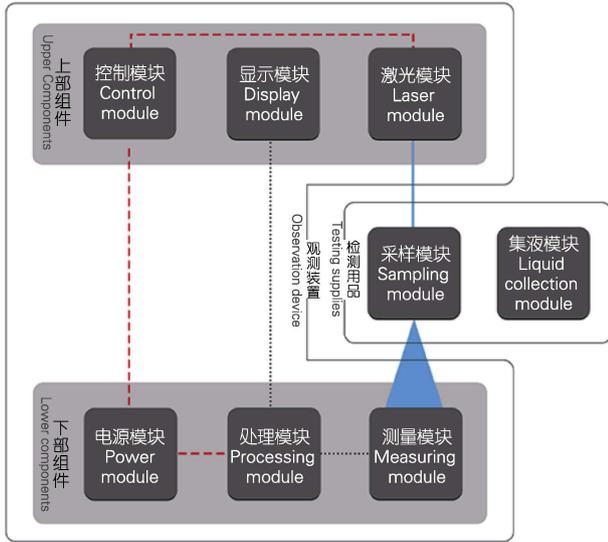


图5 监测终端理论模型
Fig.5 Monitoring terminal theoretical model

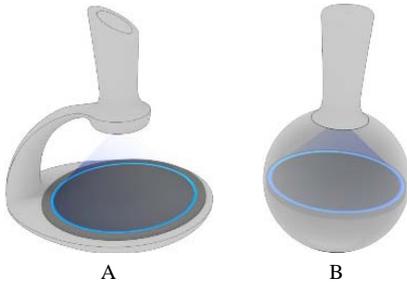


图6 两种构型方案
Fig.6 Two configuration options

在外易产生损坏,此外这种检测对于检测环境的要求较高,如测试环境亮度较高则会影响数据的准确性。方案B则是采用将测量部分全包裹的方式,这种设计的优点在于能有效避免外界光源对测量数据的影响,此外此类模块化结构也符合用户的易用性原则。因此课题组最终选定方案B作为设计方向。

对于观测部分的尺寸设计,课题组将采样模块的最大半径设为 R ,将采样模块与测量模块间的高度设定为 H ,投射最大衍射角设为 A ,计算公式如式(4),此外根据实验室的多次检测实验,将衍射角 A 设为 45° ,由此产生 $R/H=1$ 。根据实验结果可知,随着 H 与 R 数值的增加,衍射半径将随尿液中葡萄糖浓度的不同而产生变化,观测精度也将随之有所增加。为保证不同体型的用户均能够有效操控设备^[15],根据GB/T 16252-1996中的尺寸参考,选取180/80 M与170/75 F^[16]作为使用者手部尺寸范围。综合以上因素,最终设定的尺寸见图7。

$$R/H = \tan A \quad (4)$$

为达到产品智能检测衍射环的目的,课题组在测量模块的检测面板上设置了不同半径的同心圆环,并在圆环上设置一定数量的光敏电阻。当衍射光环投射在面板上时,光敏电阻将感应到光学信号并将信息传

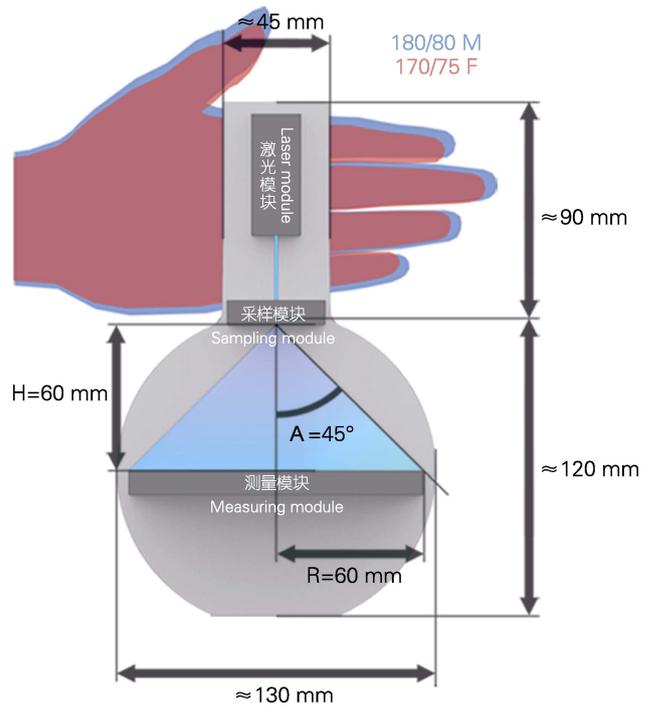


图7 观测装置尺寸设定
Fig.7 Observation device size setting



图8 相邻圆环上的光敏电阻错位 180° 布置
Fig.8 The photoresistors on adjacent rings are arranged in a 180° misalignment

输给终端处理模块,处理模块根据光敏电阻的位置判定出光环半径大小,不同的半径与相应尿糖浓度区间对应以实现测量功能。此外为提高测量模块的分辨率并保证测量的准确性,每个圆环上都将嵌入3个光敏电阻,且经过实验验证,为保证电阻之间不会发生能效干涉且保证电阻之间的距离达到最大,相邻圆环上的电阻需错位 180° 安放,综合以上条件得到的最终排列见图8。

基于设计的符号指示性原理,最终的设计参考了实验室的烧瓶造型。当需要对样本进行观测时,用户只需将含有尿液样本的采样器装入观测装置上部组件的卡槽内,然后再与下部组件重新拼合,按动顶部的控制按钮,观测装置就会开始检测,最后的检测结果将在显示屏上通过数值与色彩的方式予以显示,此外相应的数据也将传输到应用程序,程序将以可视化



图 9 外观设计和血糖值与对映色相

Fig.9 Appearance design and blood sugar level and color contrast



图 10 手机 APP 端框架图和数据可视化信息框架

Fig.10 Mobile APP frame diagram and Data visualization information framework

信息的方式予以显示，产品造型及数值显示见图 9。其中应用框架由 3 块区域组成：区域 1 为记录一天 4 个时段的检测数据；区域 2 以柱状图和趋势图的可视化信息显示用户每日的尿糖平均状态；区域 3 显示系统对用户的控糖评估，并向用户推送饮食、用药及运动等相关控糖建议，应用程序框架见图 10。

4 结语

作为一种新兴材料，可用于尿糖检测的光子晶体凝胶相较传统尿糖检测方式产生的数据结果更为准确，此外光子晶体材料的制作过程也更加环保。本研究将此前仅存在于实验室的测量方法转换为一款智能尿糖检测设备，研究以衍射环理论为核心出发到构建一套完整检测终端，其研究过程也可被应用到其他光子晶体传感器的智能产品设计转换当中，此外相关研究成果对于尿糖检测领域具有很好的借鉴作用，并提供了一种新材料创新应用的研究方向。

参考文献：

- [1] 中华医学会糖尿病学分会. 中国 2 型糖尿病防治指南 (2017 年版)[J]. 中国实用内科杂志, 2018, 38(4): 34-86. Guidelines for the Prevention and Control of Type 2 Diabetes in China (2017 Edition)[J]. Chinese Diabetes Society, 2018, 38(4): 34-86.
- [2] JOANNOPOULOS J D, JOHNSON S G, WINN J N, et al. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light[J]. Computing in Science & Engineering, 2008, 3(6): 38-47.
- [3] ASHER S A, PETEU S F, REESE C E, et al. Polymerized Crystalline Colloidal Array Chemical-sensing Materials for Detection of Lead in Body Fluids[J]. Analytical & Bioanalytical Chemistry, 2002, 373(7): 632-638.
- [4] WATANABE K, HOSHINO T, KANDA K, et al. Brilliant Blue Observation From a Morpho-butterfly-scale Quasi-structure[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2005, 44(1-7): 48-50.

(下转第 13 页)