

# 基于光子晶体分光的气敏传感器研究

孔延梅<sup>†</sup> 高超群 景玉鹏 陈大鹏

(中国科学院微电子研究所集成电路先导工艺研发中心, 微电子器件与集成技术重点实验室, 北京 100029)

(2010年7月8日收到; 2010年8月17日收到修改稿)

本文利用机电系统技术实现气敏传感器的主要思想, 设计了基于超棱镜效应的光子晶体分光系统, 它能够实现高精度的分光, 使得光谱仪的分辨率有很大程度的提高, 并且为应用于许多光学系统的新型分光元件的研究提供新的思路 and 基础.

**关键词:** 气敏传感器, 光子晶体, 超棱镜, 负折射

**PACS:** 42.79.Fm, 42.65.Hw

## 1. 引言

光谱技术是化学分析的终极手段. 将光谱分析技术与机电系统 (micro-electromechanical systems, MEMS) 技术相结合是解决当前气敏传感器灵敏度低、选择性差、体积大、功耗高、不便于阵列化和高度集成, 以至于无梯度立体矢量探测能力等问题有效手段<sup>[1]</sup>. 利用气体对电磁辐射的选择性吸收来实现目标气体的检测和分析, 这将从根本上解决现有气敏传感器误报率高和选择性低等致命问题. 该技术的核心就是分光技术, 传统的分光器件有棱镜、光栅等元件, 近年来 Rajic Slobodan 和 Kong 等人提出的集成热电光谱传感器和一体化光栅光谱传感器<sup>[2,3]</sup>, 但由于波导和凹面光栅的加工难度, 其制作成本很高, 另外, 由于采用热电方式进行探测, 此传感器的灵敏度和响应速率会受到限制. 目前国内外在光谱式 MEMS 气敏传感器方面的研究还有待深入.

Kosaka 对光子晶体 (photonic crystal, PC) 和传统晶体的分光能力做了比较<sup>[4]</sup>, PC 展示了其惊人的分光能力, 即超棱镜效应. 在光谱式 MEMS 气敏传感器结构中引入 PC 作分光系统, 将使连续光谱获得在空间上更宽范围的展开, 从而提高气体检测的灵敏度和精度. 本文主要研究基于 PC 超棱镜效应的分光系统, 在其原理的基础上, 结合平面波展开法 (plane wave expansion, PWE) 和时域有限差分

(finite difference time-domain, FDTD) 法设计了元件的结构, 并进一步计算了其透过率. 经分析可知, 设计结构完全满足光谱技术的需要, 其体积小、精度高, 可作为微型气敏传感器的高精度元件使用, 为光谱技术的进步提供了新的思路和技术.

## 2. 气敏传感器原理和结构

该传感器是基于红外吸收原理的气敏传感器, 它是由两个完全相同的光学系统组成的, 其中一个红外光入射到比较槽, 槽内密封着某种气体, 另一个红外光入射到测量槽, 槽内连通待测采样气体室. 两个光学系统的光源是可调谐激光器经由光纤束/波导入, 红外连续光谱经过 MEMS 光学系统分光后, 光谱在空间展开, 使得红外探测器阵列的不同像素点接收到的红外光的波长是特定的, 读出电路输出红外探测器阵列各像素点相应的光生电信号, 就可以绘制出 MEMS 红外辐射源的红外辐射光谱; 当光路中有待测气体存在时, 待测气体分子吸收特定波长的红外光, 此时与该特定波长相对应的像素点接收到的光子数减小, 光生电信号减弱, 因此, 通过读出电路输出像素点相应的光生电信号的变化, 可以实现气体分子定性和定量的检测. 图 1 简单给出了原理图. 气敏传感器的光源采用可调谐激光器来实现光的输出, 光源经带有透镜的光纤将高斯光束耦合到气体密闭室. 本文主要介绍其核心敏感部分——分光元件的设计.

<sup>†</sup> E-mail: kongyanmei@ime.ac.cn

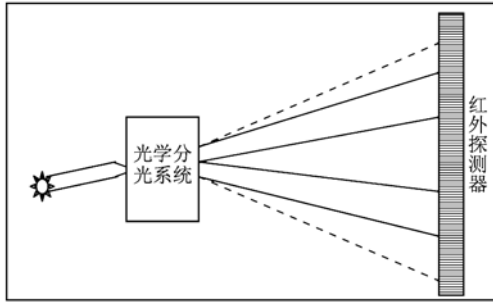


图1 光谱气敏传感器原理示意图

### 3. PC 超棱镜分光系统设计

光子晶体是一种周期性电介质,在周期性电介质材料中,光的色散曲线明显地不同于均匀电解质中光的色散曲线,在1987年Yablonovitch和John分别提出PC的概念后<sup>[5,6]</sup>,因其具有控制光子运动的能力而备受关注,在Kosaka提出PC超棱镜效应之后<sup>[4]</sup>,其在波分复用技术<sup>[7,8]</sup>、滤波器<sup>[9,10]</sup>等方面的应用也逐渐多了起来. PC的研究方法有PWE、传输矩阵法、多重散射法、FDTD等. 图2(a)给出了设计的三角格子的光子晶体的结构示意图及第一布里渊区,其中背景介质折射率为3.05,利用FDTD法计算得到该结构的TE(transverse-electric)分量的光波的透过率曲线如图2(b)所示,可以看出,在 $\omega = 0.29-0.45$ 频率范围内处于禁带,光不能通过光子晶体,在禁带邻近的频率范围 $\omega = 0.5-0.6$ 之间,在 $\omega = 0.46-0.625$ 频率范围内的TE波的透过率很高,损耗在 $-2--1$  dB范围内.

利用PWE法计算得到 $\omega = 0.50-0.55$ 的第一布里渊区内等频率线的分布(为了显示简略,这里只标注了其中部分频率值的等高线). 从图3中可以看出,各等频率线大部分区域比较平坦,在拐角处的变化比较剧烈,为了实现波长的敏感区选择,选取其拐角处圆形标注区域为光波矢的入射区域.

由平行于入射面的方向的波矢守恒定律,如图4(a)所示,可以得到波矢的守恒线与光子晶体等频率线相交于A、B两点,根据等频率线的梯度方向就是光子的群速度方向,可以排除A点,得出光的传播方向是沿B点处的等频率线的梯度方向,在入射角为 $-25^\circ$ 时,各个频率的光的折射角是不同的,以入射界面的法线为准,其中会出现正折射现象和负折射现象,图4(a)和(b)分别给出了 $\omega = 0.51$ 和 $\omega$

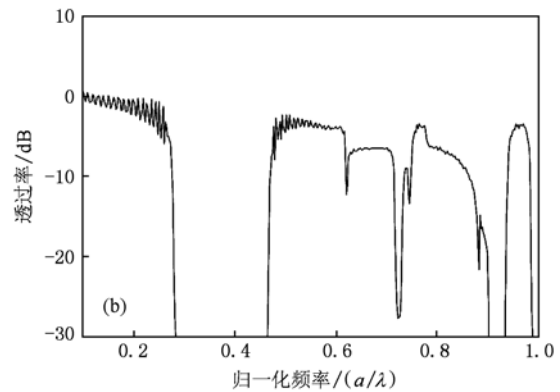
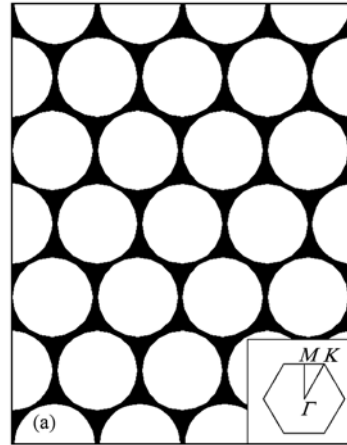


图2 (a)光子晶体结构图;(b)透过率与频率关系

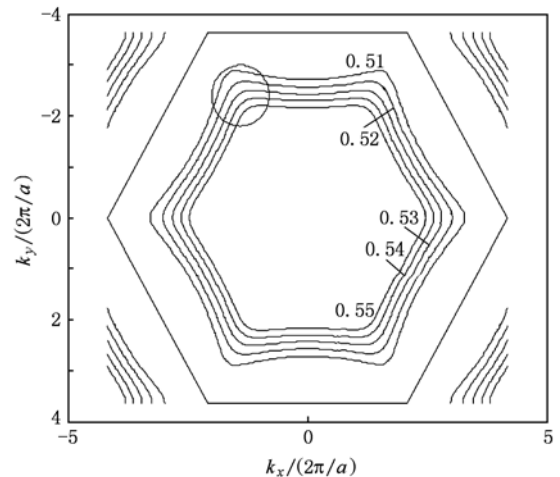


图3 第二能带在第一布里渊区内 $\omega = 0.51-0.55$ 的等频率线

$= 0.54$ 处的折射角,可以看出,在 $\omega = 0.54$ 处发生了大角度的负折射现象,即入射角与折射角在法线的同一侧. 进一步计算得出 $\omega = 0.51-0.55$ 频率范围的折射角随频率的变化关系如图5所示, $\omega \geq 0.512$ 的光会发现负折射现象.

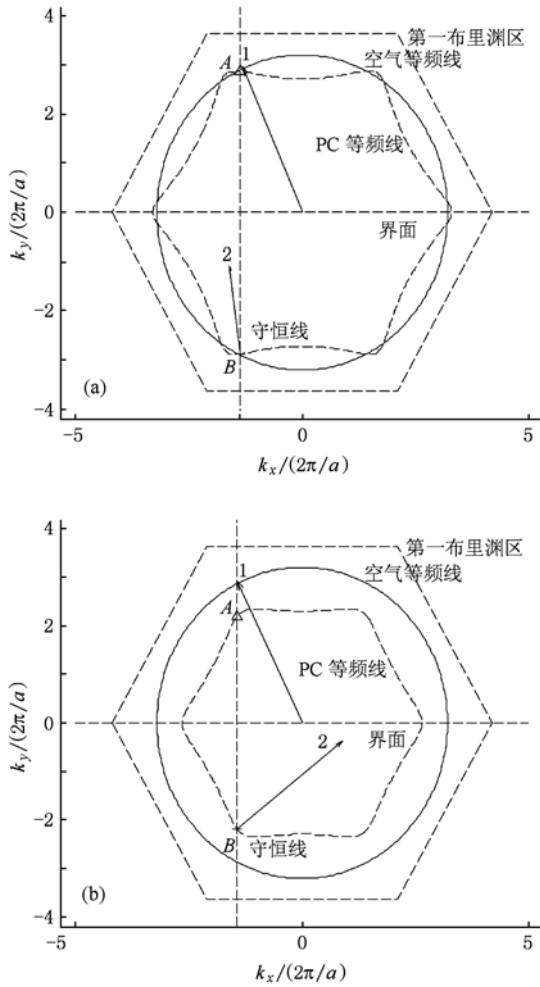


图4 (a)  $\omega = 0.51$  的入射波矢与光在晶体中的传播方向, 正折射情况(箭头 1 代表入射波矢, 箭头 2 表示光子晶体中光传播方向); (b)  $\omega = 0.54$  的入射波矢与光在晶体中的传播方向, 负折射情况(箭头 1 代表入射波矢, 箭头 2 表示光子晶体中光传播方向)

其中该角度是相对于入射面的法线, 即能量守恒线计算得出的. 以上的计算都是基于平面波展开法计算得到的, 由于该方法计算时假设光子晶体尺寸为无限大, 因此为了得到光在有限大小的光子晶体中的折射行为, 我们利用 FDTD 进行仿真. 其中, 为了减小入射界面的反射以实现空气入射波与光子晶体模式匹配, 我们借鉴了文献 [11] 的设计思想, 将入射端面设计为投影空气柱结构, 图 6(a) — (e) 分别给出了几个频率下的光传播的仿真, 利用光场强分布可进一步计算得到其折射角度不同, 表现出正折射和负折射的结果. 可以看出, 各频率光在空间分开的角度与图 5 计算的结果基本符合, 但从图上我们还可以看出, 由于界面结构没有做到最

优化, 所以没有实现整个范围内的高透过率, 目前关于光子晶体界面结构设计的研究也很多, 但尚未给出一种很好的设计结果, 随着介质与光子晶体的界面匹配问题的解决, 这一点是可以得到很好的解决的. 对其修正并进一步计算得到表 1 所给出数据.

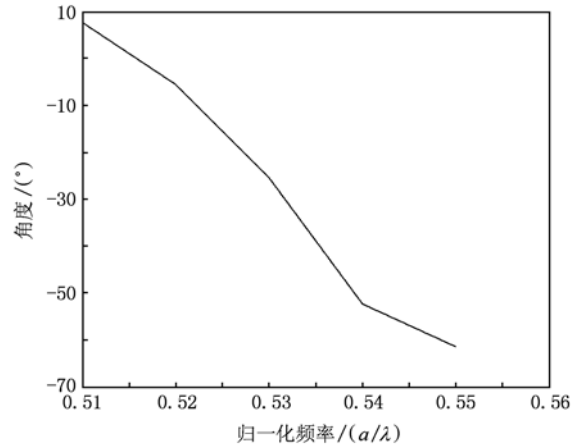


图5 光从空气入射到光子晶体中时, 折射角随归一化频率的变化关系

如果出射端面与入射端面相互平行, 那么出射角与入射角是相同的, 为了实现各个频率的光在空间的大角度分离, 就要增大光子晶体的体积来满足该要求. 为了减小光子晶体的体积, 我们进一步改进了该结构, 将出射端面做了不同角度的倾斜, 实现了出射角度的偏转, 表 1 给出了设计的结构及所能实现的角度偏转的具体数值, 由此可以看出, 各频率的光在空间分离的角度达到  $67^\circ$  左右, 与传统的光栅相比, 其分光能力得到了极大的增强.

其中,  $\theta_{\text{pian}}$  是入射到 PC 的光束折射角的大小, 是相对于入射界面法线来讲的,  $\theta_{\text{out}}$  和  $\theta_{\text{in}}$  均是相对于入射端面而言的.

在 PC 分光元件的分析中, 我们是采用归一化频率来实现的, 因此根据等比例放大的原理, 可以根据探测目标的不同而设计不同的尺寸来实现不同的波长的分析 [12]. 在我们的研究中, 以氦气为探测目标, 因其吸收峰位于  $1.5 \mu\text{m}$  左右 [13], 我们设计的光子晶体的参数为: 周期常数为  $814 \text{ nm}$ , 半径为  $350 \text{ nm}$ . 二维光子晶体的加工也有很多报道 [14—18], 为了实现高质量的 PC 制作, 拟采用 FIB 进行刻蚀, 制作方面还有很多工作需要进一步摸索, 后续会报道实验结果.

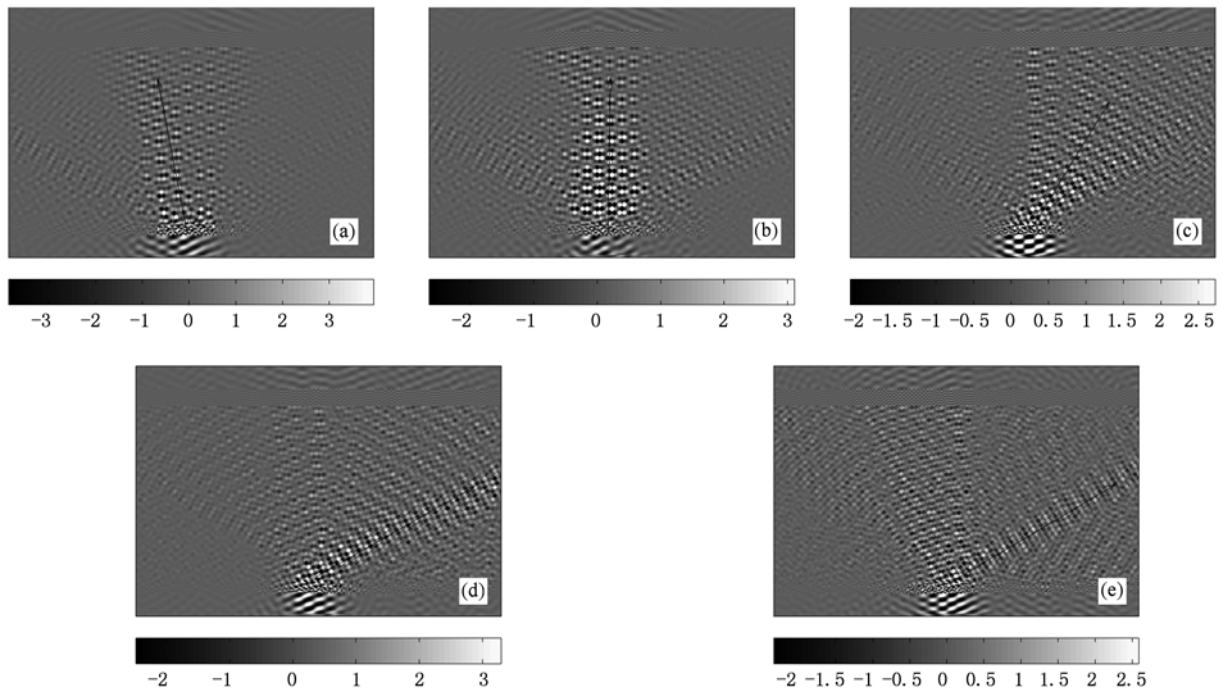


图6 光从空气入射到光子晶体的场图分布 (a)  $\omega=0.51$ ; (b)  $\omega=0.52$ ; (c)  $\omega=0.53$ ; (d)  $\omega=0.54$ ; (e)  $\omega=0.55$

表1 归一化频率值与倾斜角及光子晶体界面参数

归一化频率 $\omega$	$\theta_{\text{pian}}/(\text{°})$	$\theta_{\text{out}}/(\text{°})$	$\theta_{\text{ilt}}/(\text{°})$
0.51	7.8618	160	22.5201
0.52	-5.8497	120	2.842
0.53	-25.1787	90	-13.7488
0.54	-52.5423	65	-28.6979
0.55	-61.6547	40	-45.1435

#### 4. 信号探测和处理系统

在近红外光谱的分析中,我们采用日本滨松光子子公司 G9208-256W 型号的 InGaAs PDA 线性阵列

探测器来实现气体的分析探测,不同波长的光在不同的像素上转换成电信号输出,经过计算处理可以进一步得到气体的浓度.

#### 5. 结 论

本文介绍了一种新型的 MEMS 气敏传感器,并利用光子晶体来实现了归一化频率  $\omega=0.51-0.55$  范围的分光,该元件能够使该范围的光在空间的分开角度达到  $67^\circ$ ,分光能力比传统光栅的分光能力提高了许多从而大大提高传感器的分辨率.该系统的实验在进行中,进一步的研究成果见后续报道.

[1] Gao C Q, Jiao B B, Liu M Z, Li Q B, Yang K, Shi S L, Li Z G, Ou Y, Jing Y P, Chen D P 2008 *Journal of Semiconductors* **29** 142 (in Chinese) [高超群、焦斌斌、刘茂哲、李全宝、杨 锴、石莎莉、李志刚、欧 毅、景玉鹏、陈大鹏 2008 半导体学报 **29** 142]  
 [2] Rajic Slobodan, Datskos Panagiotis, George, EGERT, Marybeth 2000 U. S. Patent 006075

[3] Kong S H, Wijngaards D D L, Wolffenbuttel R F 2001 *Sensors and Actuators A* **92** 88  
 [4] Kosaka H, Kawashima T, Tomita A, Notomi M, Tamamura T, Sato T, Kawakami S 1998 *Phys. Rev. B* **58** R10096  
 [5] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059  
 [6] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486  
 [7] Momeni B, Adibi A 2003 *Appl. Phys. B* **77** 555

- [8] Li S G, Zhang W, Wei Z Y, Zhou G Y, Hou L T 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1996
- [9] Sun X Z, Gu P F, Ni X Y, Li M Y, Liu X, Shen W D, Zhang Y G 2008 *Opt. A: Pure Appl. Opt.* **10** 025301;1
- [10] Zhao X X, Zhu Q F, Zhang Y 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2864
- [11] Toshihiko Baba, Masanori Nakamura 2002 *IEEE Journal of Quantum Electronics* **38** 909
- [12] An H Z, Wu T, Jiang P X, Xie Y 1993 *Chinese Journal of Lasers* **20** 434 (in Chinese) [安浩哲、吴铁、蒋佩旋、谢毅 1993 *中国激光* **20** 434]
- [13] Lian C Z, Lü Z, Xu X C 2004 *Environmental Monitoring in China* **20** 17 (in Chinese) [连晨舟、吕子安、徐旭常 2004 *中国环境监测* **20** 17]
- [14] Ye J Y, Matsuo S, Mizeikis V, Misawa H 2004 *Appl. Phys.* **96** 6934
- [15] Zhang L, Zhang X Y, Zhang F J, Yao H M, Du C L, Liu Q, Pan L 2004 *Opto-Electronic Engineering* **31** 1 (in Chinese) [张磊、张晓玉、张福甲、姚汉民、杜春雷、刘强、潘莉 2004 *光电工程* **31** 1]
- [16] Zhou M, Chen X S, Xu J, Zeng Y, Wu Y R, Lu W, Wang L W, Chen Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 411 (in Chinese) [周梅、陈效双、徐靖、曾勇、吴砚瑞、陆卫、王连卫、陈瑜 2005 *物理学报* **54** 411]
- [17] Zhang W Y, Ji J R, Yuan X D, Ye W M, Zhu Z H 2005 *Journal of Semiconductors* **26** 941 (in Chinese) [张晚云、季家榕、袁晓东、叶卫民、朱志宏 2005 *半导体学报* **26** 941]
- [18] Xu X S, Xiong Z G, Jin A Z, Chen H D, Zhang D Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 916 (in Chinese) [许兴胜、熊志刚、金爱子、陈弘达、张道中 2007 *物理学报* **56** 916]

## The research of the air-sensitive sensor based on the photonic crystal beam splitter

Kong Yan-Mei<sup>†</sup> Gao Chao-Qun Jing Yu-Peng Chen Da-Peng

(Integrated Circuit Advanced Process Center, Key Lab of Microelectronics Device and Integration Technology,  
Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

(Received 8 July 2010; revised manuscript received 17 August 2010)

### Abstract

The spectroscopy is the ultimate way for chemical analysis. This paper mainly describes the idea of an air-sensitive sensor based on MEMS technology, and more over, a photonic crystal (PC) beam splitter was designed, which can achieve high resolution beam steering, and this improves the resolution of the sensor. The paper offers a new idea and lays the foundation for the novel beam splitter that applied to many optical systems.

**Keywords:** air-sensitive sensor, photonic crystal (PC), superprism, negative refraction

**PACS:** 42.79.Fm, 42.65.Hw

<sup>†</sup> E-mail: kongyanmei@ime.ac.cn