

硅基光波导化学传感器研究

吴远大 安俊明 李建光 王 玥 尹小杰 张家顺 王红杰 胡雄伟

(中国科学院半导体研究所光电研发中心, 北京 100083)

摘要 研究了基于硅基集成光波导的马赫-曾德干涉仪(MZI)型化学传感芯片的设计、制备及相关敏感特性的模拟和分析。传感芯片采用硅基二氧化硅光波导材料,利用与传统互补型金属氧化物半导体(CMOS)兼容的工艺技术制作。通过波导的单模设计以及对 MZI 结构的优化,获得了有效折射率分辨率达到 10^{-7} 量级的高灵敏度传感芯片。作为化学传感器,把 MZI 的其中一臂设计成传感臂,并进行适当的表面修饰,可制作出高灵敏度的干涉型光波导化学传感器。最后,对该传感器的折射率分辨率、敏感特性等进行了分析、模拟,同时,对面临的关键问题进行了分析和讨论。

关键词 光波导传感; 马赫-曾德干涉(MZI); 消逝场; 折射率; 相位差

中图分类号 TN810 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092907.1983

Silicon Based Optical Waveguides Chemical Sensors

Wu Yuanda An Junming Li Jianguang Wang Yue Yin Xiaojie Zhang Jiashun
Wang Hongjie Hu Xiongwei

(Research and Development Center for Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract The theoretical design, fabrication and characterisation of integrated optical phase-modulated Mach-Zehnder Interferometer (MZI) chemical sensing platform are presented. The sensor system, based on silica waveguide materials, is fabricated with 'silicon microelectronics technology'. The optical waveguides are designed to mono-mode behaviour and high surface sensitivity. These sensor show a effective refractive index detection limit of 10^{-7} . When the sensing waveguide is chemically modified, the sensing platform will show high sensitivity to opto-chemical reaction. Finally, the refractive index resolution and sensing properties are simulated and analyzed, also, the coming key problems are discussed.

Key words optical waveguide sensors; Mach-Zehnder interferometer (MZI); evanescent field; refractive index; phase difference

1 引 言

化学和生物传感器一直是环境监测、在线监控、生态农业、反恐反恐等领域的热点研究项目^[1,2]。在现代社会中,随着人们对健康的密切关注和生物技术的快速发展,研究开发出在宽广的动态范围内具有高分辨率的化学传感器已成为当务之急。这些传感器必须具有高灵敏度、高选择性、高响应恢复速度、体积小、价格便宜和适合于远端监控等特点。由

于集成光波导器件本身固有的抗干扰能力强、使用范围广、尺寸小、便于集成等优势而在光通讯领域获得了巨大成功。借鉴这一特性,开发集成光波导应用于生物化学传感器领域的研究将具有非常好的科学依据和应用前景^[3~6]。

在光波导化学传感器中,传输光束参数的相关变化发生在波导芯层外的表面区域,也就是消逝场区域。这些光参数一般包括折射率、吸收系数和发

收稿日期: 2008-10-18; **收到修改稿日期**: 2008-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(60707008, 60507006)和国家 863 计划(2007AA03Z420)资助项目。

作者简介: 吴远大(1974—),男,副研究员,博士,主要从事硅基集成光波导无源器件及光波导传感器等方面的研究。

光参数等。对于前两种情况,往往表现为传输光束的相速度发生变化,相速度的变化可以定量地表达为光传输模的有效折射率的变化。而有效折射率的变化可以基于模式耦合理论“读出”,如表面等离子谐振(SPR)传感器和光栅传感器等;也可以基于相位的变化“读出”,如差分干涉仪和马赫-曾德干涉仪(MZI)等^[7~9]。

目前,光波导传感器是国外研究的热点之一,包括光波导温度传感器、应力传感器以及各种光波导化学传感器。其中,光波导化学传感器的研究大多集中于表面等离子谐振(SPR)和波导光栅型传感器。这些传感器具有较高的灵敏度和响应恢复特性,但是,它们也存在选择性不好和抗干扰能力差等缺陷。MZI型光波导传感器由于具有高灵敏度、高选择性、抗干扰能力强、使用范围广、尺寸小而日益受到人们的关注^[10,11]。据报道,MZI型光波导传感平台的相差分辨率可以高达 $5 \times 10^{-5} \times 2\pi$,相应的折射率变化分辨率约为 2×10^{-8} ,对特定待测物浓度的检测可以到达 10^{-6} 以上^[12]。

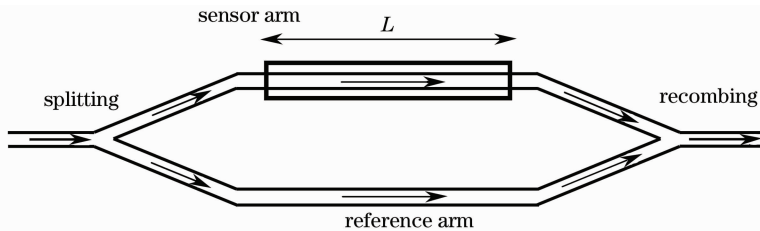


图1 基于MZI传感平台示意图

Fig. 1 Schematic of MZI sensing platform

2.2 影响灵敏度的因素

在MZI波导传感器中,传感臂渐逝场内折射率的变化会导致波导有效折射率发生变化 ΔN_{eff} ,而有效折射率的变化会导致波导内传输光的相位差发生变化 $\Delta\phi_m$,它们之间的关系可表达为:

$$\Delta\phi_m = \frac{2\pi L}{\lambda} \Delta N_{\text{eff}} \quad (1)$$

其中 λ 为光在真空中的波长, m 为导模数量, L 为传感臂窗口上包层与待测物相互作用长度。从上式可以看出,相位差 $\Delta\phi_m$ 随 L 和 ΔN_{eff} 的增大而增大,同时随着 λ 的减小而增大。

基于以上关系式,在设计时,可以把传感臂设计得很长,达到厘米数量级,这样,发生化学-光反应的面积就越大,灵敏度也会越高。当然,所采用的测试光源波长越短,灵敏度也会越高。此外,MZI的两臂靠得比较近(几十至几百微米),这样,其它的外部干扰,如振动、温度波动等,会同时作用在传感臂与

到目前为止,提高光波导型传感器的灵敏度,防止敏感性衰减,扩大探测种类和范围的研究在全球正如火如荼地深入展开。

2 MZI 敏感机制

2.1 工作原理

基于MZI的传感平台典型结构如图1所示,即把传统MZI的其中一臂设计成传感臂,而另一臂为参照臂。输入光在合束处被平均分配成同相位的两束光,分别经过相同长度的传感臂和参照臂后,在合束处相干结合。当传感臂内传输光的渐逝场受到外部干扰(如上包层的折射率发生变化),就会引起传感臂的有效折射率发生变化,从而使内部传输光产生一个相位移动(相对于参照臂),这样,两束光在合束处相干结合时就会引起输出光功率的减小。采用合适的光路就能检测出光功率的微小变化,而这个变化值就能间接反应出传感臂上包层内的变化情况,如待测物的浓度、PH值等。这也就是其敏感机制。

参照臂上,引起相同的相位差,这样就大大提高了器件的抗干扰能力。利用这一特性将会制备出高灵敏度的光波导生化传感器。

3 波导传感结构制备

采用热氧化法系统对单晶硅片进行干氧、湿氧结合的氧化方式,获得 $15 \mu\text{m}$ 的 SiO_2 薄膜作为波导下包层;采用等离子体增强化学汽相沉积(PECVD)法生长锗掺杂 $5.5 \mu\text{m}$ 厚的 SiO_2 薄膜作为波导芯层;然后,采用与传统的互补型金属氧化物半导体(CMOS)电路相兼容的光刻和反应离子刻蚀工艺在波导芯层上刻蚀出优化的MZI波导结构,并采用PECVD法覆盖二氧化硅上包层。

为了获得波导传感结构,采用光刻加湿法刻蚀技术在MZI的其中一臂上刻蚀出敏感“窗口”,并进行表面修饰,从而形成光波导传感平台。该传感平台由S-分束器、传感臂、参照臂和S-合束器组成,其

结构参数为：波导下包层 SiO_2 薄膜折射率 1.445，膜厚 $15\ \mu\text{m}$ ；芯层 SiO_2 薄膜折射率 1.458，膜厚 $5.5\ \mu\text{m}$ ；MZI 两臂间隔 $400\ \mu\text{m}$ ，臂长 $12000\ \mu\text{m}$ 。

4 敏感特性模拟与分析

图 2 是对上面传感平台光传输特性的 BPM 模拟结果，传感平台使用的测试光源波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 。该传感平台感知的是传感臂有效折射率的变化，因此，MZI 传感平台的灵敏度高低直接由对有效折射率变化的分辨率来表征。我们采用 BPM 软件模拟

了该传感平台的有效折射率变化与输出光功率之间的对应关系，如图 3 所示。从图中可以看出，在有效折射率变化值 $3\sim 8(\times 10^{-7})$ 范围内，输出光功率相对变化值与之成近似正比关系，这对于传感平台的敏感特性分析是非常有利的。并且，有效折射率变化值为 10^{-7} 数量级时，与之对应的输出光功率变化就已经达到 10^{-3} 量级，这个光功率变化值完全可以被检测出来。这也说明了该 MZI 传感平台将会具有非常高的灵敏度。

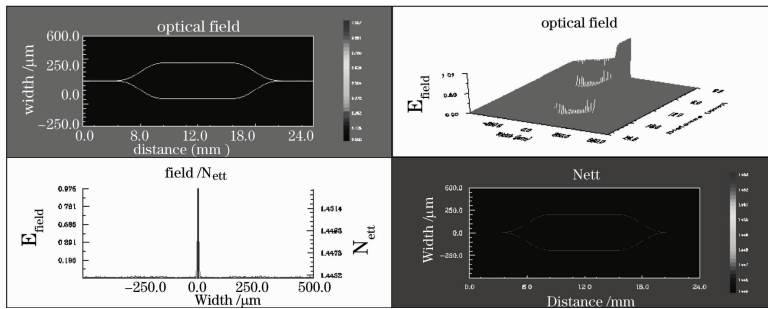


图 2 利用 BPM 软件模拟的 MZI 光传输特性

Fig. 2 Transmission of the MZI by BPM software simulation

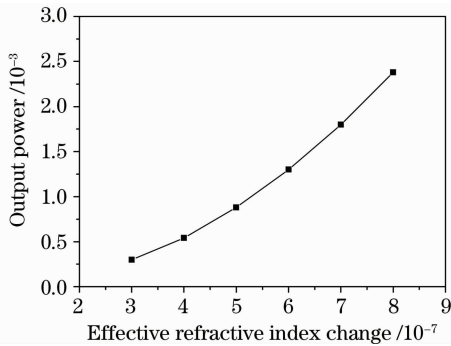


图 3 输出光功率与有效折射率变化关系

Fig. 3 The output power varies as effective refractive index change

5 问题与讨论

通过理论与模拟分析，该优化的 MZI 型光波导传感器具有非常高的灵敏度和抗干扰能力，将会在高精度生化检测领域有良好的应用前景。但是，对于 MZI 型光波导传感器的应用来说，还有许多关键问题需要解决，如传输光的相干性、敏感介质及光-化学作用、检测范围等。

5.1 传输光的相干性

在 MZI 波导传感平台中，为了保证波导中光的良好相干性，单模条件是必须的。单色光在普通单模波导中传输时仍然存在 TE_0 和 TM_0 两种模式，

它们具有不同的电磁场速度、不同的电磁场分布、不同的有效折射率值，因此，它们在波导结构中受到的影响也会不一样。为解决该问题，必须使用无偏振的激光光源，在集成光波回路中设计 TE/TM 起偏器，或者采用双模探测器分别测定 TE/TM 的光功率来解决。而这样一来，会大大增加传感平台的制作难度和测试成本。另一个可能的途径是，利用波导的偏振特性，把具有选模功能的输入光波导和 MZI 结构集成在一起，形成集成光波导生物化学传感器，就能改善信噪比，提高传感器的检测灵敏度，同时还能降低对测试光源和探测器的要求。

5.2 敏感介质选择

MZI 光波导传感平台具有非常高的检测灵敏度，但是，在通常情况下，它对某种或多种特定待测物的敏感性，也就是选择特性，是通过波导上包层敏感介质的光-化学作用提供的。在 MZI 的传感臂窗口中加上不同的敏感介质，就能检测出各种被检测对象的浓度。例如，采用抗体蛋白质作为传感分子层可以形成免疫传感器；采用半导体或有机功能薄膜材料可以形成气体传感器（如甲烷、 O_2 、 CO_2 、 H_2S 、 SO_2 等）、采用水溶液可以形成 PH 值传感器等。当然，敏感介质的选择是个关键问题，同时，待测物与敏感介质间的化学-光作用到底能引起多强的折射率变化也有待进一步研究。

5.3 检测范围

由 MZI 光波导传感平台直接检测出输出光功率 P_{out} 的变化,而光功率的变化直接反应的是传感臂与参照臂之间相位差 $\Delta\psi_m$ 的变化,它们之间的关系可描述为: $P_{\text{out}} \propto \cos(\Delta\psi_m)$ 。由此可见, P_{out} 与 $\Delta\psi_m$ 之间是周期性的函数关系。为了保证检测精度,必须把检测范围设定到余弦函数的单调四分之一周期内,这就需要对 MZI 两臂的相位进行调制和校准。因此,对 MZI 两臂传输光相位的调制是确立检测范围的关键问题。

6 结 论

本文采用硅基二氧化硅光波导材料,通过对单模波导和马赫-曾德干涉仪的优化设计,获得了高折射率分辨率的光波导传感芯片。作为化学传感器,把 MZI 的其中一臂设计成传感臂,并进行合适的表面修饰,容许它与外部化学物质相互作用,将会制作出高灵敏度的干涉型光波导化学传感器。

参 考 文 献

- 1 P. V. Lambeck. Integrated opto-chemical sensors[J]. *Sensors and Actuators B*, 1992, **8**: 103~116
- 2 Cass, T. *et al.*. Immobilized biomolecules in analysis a practical approach[M]. New York: Oxford University Press, 1998
- 3 P. J. Wiejata, P. M. Shankar, R. Mutharasan. Fluorescent sensing using biconical tapers[J]. *Sensors and Actuators B*, 2003, **96**(1-2): 315~320
- 4 S. H. Ko, S. A. Grant. A novel TRET-based optical fiber biosensor for rapid detection of Salmonella typhimurium[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2006, **21**(7): 1283~1290
- 5 Chu Fenghong, Han Xiuyou, Pang Fufei *et al.*. Research development of integrated-optical waveguide sensors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(3): 21~27
初凤红, 韩秀友, 庞拂飞等. 集成光波导传感器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(3): 21~27
- 6 Chu Fenghong, Pang Fufei, Han Xiuyou *et al.*. Sensing characteristics to volatile organic compounds of a waveguide ring resonator fabricated by sol-gel materials[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 229~233
初凤红, 庞拂飞, 韩秀友等. 溶胶-凝胶光波导环形谐振腔的挥发性有机化合物传感特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 229~233
- 7 Angela Leung, P. Mohana Shankar *et al.*. A review of fiber-optic biosensors[J]. *Sensors and Actuators B*, 2007, **125**: 688~703
- 8 X. D. Hoa, A. G. Kirk *et al.*. Towards integrated and sensitive surface plasmon resonance biosensors: A review of recent progress[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2007, **23**: 151~160
- 9 G. H. Cross, A. A. Reeves, S. Brand. A new quantitative optical biosensor for protein characterisation[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2003, **19**: 383~390
- 10 Chen Xianfeng, Zhang Lin *et al.*. Real-time detection of DNA interactions with long-period fiber-grating-based biosensor[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(17): 2541~2543
- 11 E. A. Mendez, R. R. Lagune, J. A. A. Lucio. Design and characterization of PH sensor based on sol-gel silica layer on plastic optical fiber[J]. *Sensors and Actuators B*, 2005, **106**: 518~522
- 12 R. G. Heideman, P. V. Lambeck. Remote opto-chemical sensing with extreme sensitivity: design, fabrication and performance of a pigtailed integrated optical phase-modulated mach-zehnder interferometer system[J]. *Sensors and Actuators B*, 1999, **61**: 100~127