

文章编号: 0258-7025(2009)05-1180-04

多模干涉光波导型微流控液体折射率监测用芯片的设计

高仁喜¹ 范光华¹ 陈抱雪² 曲士良¹

(¹ 哈尔滨工业大学威海校区光电科学系, 山东 威海 264209; ² 上海理工大学光电学院, 上海 200093)

摘要 将微流控结构和光波导多模干涉(MMI)结构功能结合在一起,利用导波的多模干涉效应,对微通道中的液体变化进行实时监测。液体中成分或浓度的变化导致液体的折射率变化,通过监测 MMI 的输出波导的功率,得到液体折射率的变化,从而得到液体成分浓度的变化。计算模拟显示,对液体的折射率变化灵敏度可达到 0.0001。对不同流量的要求,提出了两种微流控结构和光波导 MMI 复合结构,有望在微流控生化分析芯片中得到应用。

关键词 测量; 微流控芯片; 多模干涉光波导; 液体; 折射率

中图分类号 TN253; TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093605.1180

Design and Simulation of Microfluidic Chips Based on Multimode Interference Waveguide for Measuring Refractive Index of Liquid

Gao Renxi¹ Fan Guanghua¹ Chen Baoxue² Qu Shiliang¹

¹ Department of Optoelectronics, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai, Shandong 264209, China
² College of Optics and Electron Information Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract A new compact microfluidic chip based on multimode interference (MMI) waveguide is designed and simulated, which can be used to measure the refractive index of liquid in micro-channel through the interference of multiple optical guide-mode waves. The change of concentrations or composition in liquid leads to different refractive index, the change of refractive index can be measured by the output power of MMI waveguide, and then the information of liquid can be determined in details, such as the composition and concentrations. The sensitivity of refractive index can reach 0.0001 according to simulation. Two pieces of chips are proposed for different flux fluids, which can be applied to the microfluidic chemical analysis chip.

Key words measurement; micro-fluidic chip; multimode interference waveguide; liquid; refractive index

1 引言

微流控芯片技术^[1]在生物检测、化学分析、药物开发等领域有着重要的应用前景。它是把整个化学实验室的功能集成在一块芯片上,如进样、混和、反应、分离、检测等功能。各功能结构通过微通道连接和控制,液体为运输介质能够在微通道中可控流动。检测技术目前有,荧光检测技术^[2]、化学发光检测技

术^[3]、紫外吸收光度检测技术^[4]、质谱检测技术^[5]、电化学检测技术^[6]等;光学检测技术由于具有灵敏度高、响应速度快等优点,成为微流控芯片主要检测手段;近年来光波导传感已发展成一种新的应用技术^[7,8],目前已有将光波导结构制备在微流控芯片上的报道^[9~11]。从光学角度来看,液体中化学成分浓度的变化或反应成分的改变体现为液体折射率的

收稿日期: 2008-08-26; 收到修改稿日期: 2008-10-15

基金项目: 哈尔滨工业大学博士启动基金(B200620)、哈尔滨工业大学优秀青年教师培养计划(HITQNJS. 2007. 040)和哈尔滨工业大学科技优秀团队资助课题。

作者简介: 高仁喜(1976-),男,讲师,博士,主要从事集成光学和光波导传感器器件研发等方面的研究。

E-mail: gaorenxi@163.com

改变,通过光波的强度或相位变化检测出液体折射率的变化,进而获知化学物质等信息。

多模干涉(MMI)波导是集成光学中一类比较重要的器件,它具有插入损耗小、制备工艺容差小、偏振度不敏感和工作带宽宽等特点,可用在光功率分配器、光开关等领域^[12~15]。本文将 MMI 光波导结构应用在微流控芯片结构中,通过输出波导光功率的变化,可对微通道液体的折射率变化进行高灵敏度监测,理论模拟计算显示,折射率变化可监测到 0.0001 量级。

2 MMI 光波导型微流控器件的工作原理

MMI 器件的工作原理是应用了多模波导中多个导波模式的电磁场相干叠加导致的自镜像效应^[16]。如图 1 所示,器件由两组分别用于输入和输出的单模波导和中间一个多模波导三部分构成。光波由某一单模输入波导输入,在多模波导区激起多个导模,这些导模相干叠加,在多模波导终端形成镜像,然后通过单模输出波导输出。

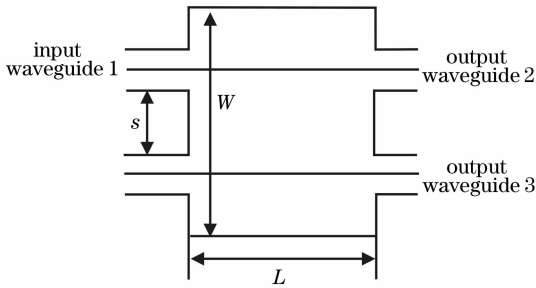


图 1 MMI 波导结构示意图

Fig. 1 Structure of MMI waveguide

由自镜像理论可知,当输入光波处于受限干涉条件时,二重像位置在 $L=L_{\pi}/2$ 处成像,式中 $L_{\pi}=\pi/(\beta_0-\beta_1)$,其中 L_{π} 是特征长度, β_0 和 β_1 分别是多模波导区的基模和一阶模的传播常数。多模波导区的长度与干涉条件有关,与一般干涉条件相比,采用受限干涉条件可使多模波导区的长度缩短 2/3。本文采用受限干涉型 2×2 MMI 器件结构。两支输入和两支输出单模波导的中心位置分别位于 $W_e/3$ 和 $2W_e/3$ 处, W_e 是多模波导的有效宽度。

假设光波从输入波导 1 输入,多模波导区长度为 L ,多模区折射率为设计值,则在两输出波导等光功率输出;当多模区折射率发生变化时,二重像的位置将发生改变,两波导的输出功率发生变化,其大小与多模区的折射率有关。因此,通过测量输出波导

的功率,即可获得多模波导区的折射率变化;本文将多模区设计在微通道区,多模区的折射率即为流过液体的折射率。根据流量的大小需要,设计了两种结构如图 2、图 3 所示,阴影区为微通道区。图 2 针对小流量液体设计,图 3 针对大流量液体设计。

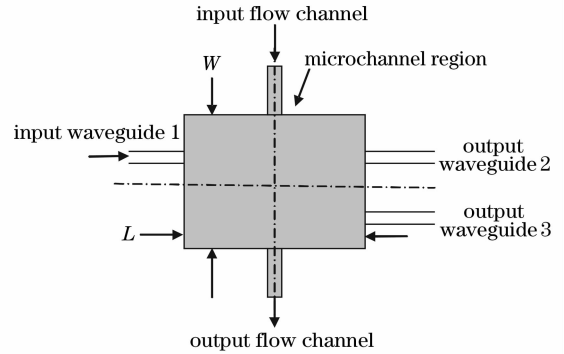


图 2 小流量型结构示意图

Fig. 2 Structure of MMI for small-flux liquid

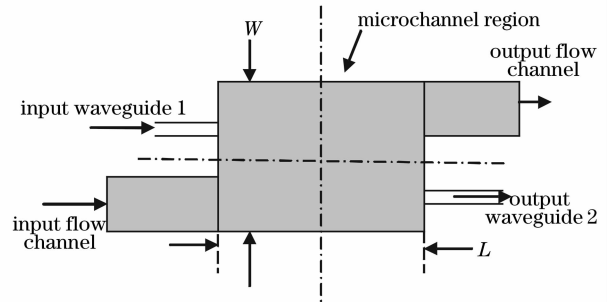


图 3 大流量型结构示意图

Fig. 3 Structure of MMI for large-flux liquid

3 器件参数的设计和液体折射率变化检测的模拟结果

设计中的参数采用聚酰亚胺有机材料参数^[15],它是一种很好的制备光波导结构的高分子材料。器件工作波长在 $1.55\ \mu\text{m}$ 处,此时包层材料的折射率 n_2 为 1.5197,相对折射率差 Δ 采用 0.6% [$\Delta=(n_1^2-n_2^2)/2n_1^2$, n_1 为波导芯的折射率],芯层折射率 n_1 为 1.5289。单模波导芯截面尺寸为 $6\ \mu\text{m}\times 6\ \mu\text{m}$,此条件下对 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长的导波为单模传输。单模输入和输出波导中心位置位于满足受限干涉情况下的多模宽波导有效宽度 W_e 的 1/3 或 2/3 处,为了防止两输出单模波导之间发生耦合,相邻两单模波导壁之间的距离 s 为 $11\ \mu\text{m}$ 。多模波导高度为 $6\ \mu\text{m}$,宽度 W 根据 s 的大小设计成 $48\ \mu\text{m}$ 。在工作波长上,多模波导的零阶模和一阶模的传播常数分别为 $\beta_0=6.187705\ \mu\text{m}^{-1}$ 和 $\beta_1=6.186793\ \mu\text{m}^{-1}$ 。

由 $L_\pi = \pi/(\beta_0 - \beta_1)$ 得到 $L_\pi = 3444.4 \mu\text{m}$ 。以 $L_\pi/2$ 为参照,按 2×2 功率均分器的模型,用光束传播算法(BPM)模拟运行调整,确定多模波导的长度 $L = 1750 \mu\text{m}$ 。图 4 是器件在 1550 nm 波长处,通过 BPM 方法模拟光波传播情况。在 1550 nm 上,两输出波导的不均匀度仅为 0.02 dB 。

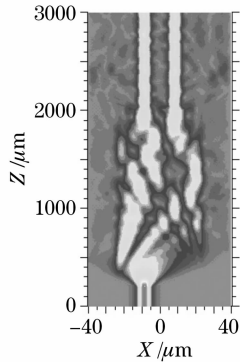


图 4 1×2 MMI 中的电磁场分布

Fig. 4 Electromagnetic field in 1×2 MMI

上述多模波导区折射率为理想设计值,当多模波导区为微通道替代时,流过液体的折射率即为多模波导区的折射率,当液体折射率为理论设计值 1.5289 时,则单根输出波导的光功率值为输入波导光功率的 0.45 倍(因为有多模区传播损耗和多模区与输出单模波导的耦合损耗等原因)。当液体折射率偏离设计值时,多模区各导波的传播常数将发生变化,相干叠加后其二重镜像的位置发生变化,则耦合到单模输出波导的光功率将发生变化。图 5 为小流量型结构下的两输出波导功率随液体折射率的变化图。可以看出,当液体折射率小于设计值时,两输出波导的功率快速下降,当折射率小于 1.5207 时,两波导的输出功率基本降为 0 ,因为此时多模区已经不能有效束缚光波而形成光波导结构,光由输入

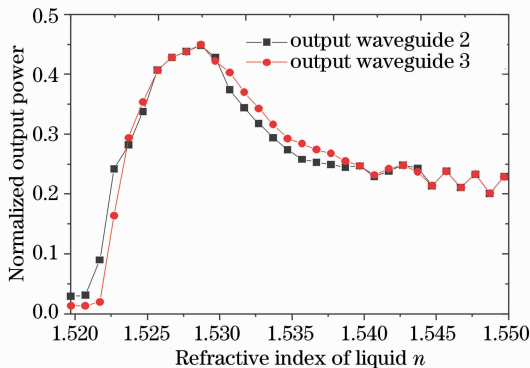


图 5 小流量型输出波导光功率与液体折射率的关系图

Fig. 5 Relation between output waveguide power and the refractive index of liquid for little volume MMI

波导输入后,即进入自由区而发散。当液体折射率大于设计值时,同理,形成二重镜像的位置将发生变化,两输出波导的功率缓慢下降,此时多模区为强限制波导结构。模拟结果显示,监测液体折射率的精度可达到 0.0001 。该结构可根据两波导的输出值来确定液体的折射率。

图 6 为大流量型结构的单输出波导功率与液体折射率变化关系图。在折射率理论设计值 1.5289 处,单模输出波导的光功率最大,当液体折射率偏离设计值时,输出功率变小。对大流量结构,由于只有一个输出波导,从图中可以看出,一个输出波导的功率对应两个液体折射率的值,即输出波导的功率与液体折射率的关系不是单调函数关系,而是以设计值为最大值向两边递减,但功率递减的斜率是不同的;一般情况下,多模波导区液体折射率变化并不是突变,这和液体的流速有关,在处理数据时,可通过与前一时刻的功率值比较,由功率变化的快慢等信息来确定液体的折射率。

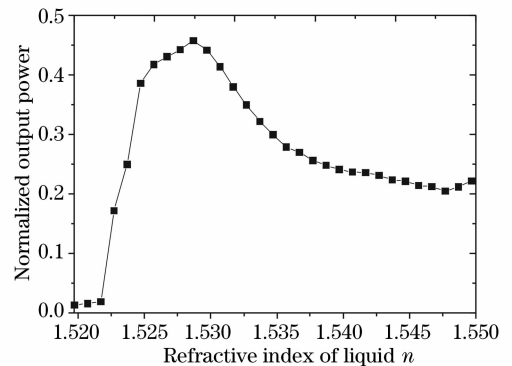


图 6 大流量型输出波导光功率与液体折射率的关系图

Fig. 6 Relation between output waveguide power and the refractive index of liquid for large volume MMI

因此,可通过测量输出波导的光功率来求得液体的折射率,其精度可达 0.0001 量级。但上述两结构的缺点是检测液体的折射率的范围有限,从图中看大约为 0.02 ,因此比较适合在线监测高纯度高稳定化学物质的情况。

4 结 论

本设计将多模干涉光波导效应应用到微流控结构中,使微流控芯片结构集成化程度提高,可快速高效地实时监测微通道中液体折射率的变化,模拟显示折射率精度可达到 0.0001 量级,为进一步获得液体化学成分浓度变化提供了信息,有望在微流控检

测技术中得到应用。

参 考 文 献

- 1 A. Manz, N. Graber, H. M. Widmer. Miniaturized total chemical analysis systems; a novel concept for chemical sensing[J]. *Sens Actuators B*, 1990, **B1**: 244~248
- 2 R. F. Renzi, J. Stamps, B. A. Horn *et al.*. Hand-held microanalytical instrument for chip-based electrophoretic separations of proteins[J]. *Anal. Chem.*, 2005, **77**(2): 435~441
- 3 S. D. Mangru, D. J. Harrison. Chemiluminescence detection in integrated post-separation reactors for microchip-based capillary electrophoresis and affinity electrophoresis[J]. *Electrophoresis*, 1998, **19**(13): 2301~2307
- 4 J. Cheng, Q. Jin, J. Zhao *et al.*. Detection methods in capillary electrophoresis and electrophoresis chips [J]. *Anal. Chem.*, 2002, **74**(2): 94~97
- 5 Q. F. Xue, F. Foret, Y. M. Dunayevskiy *et al.*. Multichannel microchip electrospray mass spectrometry [J]. *Anal. Chem.*, 1997, **69**(3): 426~430
- 6 A. T. Wooley, K. Q. Lao, A. N. Glazer *et al.*. Capillar electrophoresis chips with intergrated electro-chemical detection[J]. *Anal. Chem.*, 1998, **70**(4): 684~688
- 7 Huang Shu, Cao Zhuangqi, Liu Xuanbin *et al.*. A novel optical chemical sensor based on resonance modes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1104~1108
黄 澍,曹庄琪,刘选斌等. 一种新型的振荡场光化学传感器 [J]. 光学学报, 2002, **22**(9): 1104~1108
- 8 Wang Haihong, Chen Baoxue, Zou Renling *et al.*. Study on clad absorption spectrum characteristics and solution concentration sensing using Fermi refractive index waveguides[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1333~1337
王海虹,陈抱雪,邹任玲等. 费米折射率波导的包层吸收光谱特性和溶液浓度传感研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(7): 1333~1337
- 9 K. B. Mogensen, Y. C. Kwok *et al.*. A microfluidic device with an integrated waveguide beam splitter for velocity measurements of flowing particles by Fourier transformation[J]. *Anal. Chem.*, 2003, **75**(18): 4931~4936
- 10 Juejun Hu, Vladimir Tarasov, Anu Agarwal *et al.*. Fabrication and testing of planar chalcogenide waveguide integrated microfluidic sensor[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(5): 2307~2314
- 11 K. Bambang, Nuriman, H. Jurriaan, V. Willem. Optical sensing systems for microfluidic devices; A review [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2007, **601**(2): 141~155
- 12 L. B. Soldano, F. B. Veerman, M. K. Smit *et al.*. Planar monomode optical couplers based on multimode interference effects[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(11): 1843~1850
- 13 Jung Moo Hong, Hyun Ho Ryu, Soon Ryong Park *et al.*. Design and fabrication of a significantly shortened multimode interference coupler for polarization splitter application [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(1): 72~74
- 14 Milan L. Masanovic, Erik J. Skogen, Jonathon S. Barton *et al.*. Multimode interference-based two-stage 1×2 light splitter for compact photonic integrated circuits[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(5): 706~708
- 15 Gao Renxi, Chen Baoxue, Yuan Yifang *et al.*. Design and simulation of polyimide-based multimode interference coupler with tunable power splitting ratio[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, **27**(3): 254~256
高仁喜,陈抱雪,袁一方等. 可调谐高分子 MMI 光波导功率分配器的研究[J]. 半导体光电, 2006, **27**(3): 254~256
- 16 Lucas B. Soldano, Erik C. M. Pennings. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(4): 615~627