

基于微流控光学可调谐的渐变折射率特性研究*

孙运利 王昌辉 乐孜纯†

(浙江工业大学理学院应用物理系, 杭州 310023)

(2014年1月23日收到; 2014年3月5日收到修改稿)

本文基于层流液体的对流扩散效应, 提出了一种新型的具有渐变折射率分布特性并且可以实现调节的微腔流体透镜. 利用有限元法分析微腔中芯层与包层流体在对流扩散过程达到稳定后的浓度分布, 即混合流体的折射率分布, 结果表明, 分别调节芯层与包层流体的流速, 微腔中的流体可以实现不同的渐变折射率分布. 同时, 本文还分析了即使考虑腔壁与流体之间的黏滞阻力因素, 芯层与包层流体的流速组合依然是混合流体折射率分布的决定因素. 应用微腔流体透镜的这种调节效果, 可以实现不同要求的光束聚焦、分束、偏转等功能, 在微流控光学检测系统以及微成像系统中有重要的应用.

关键词: 集成光学, 渐变折射率, 扩散对流, 微流控光学**PACS:** 47.11.Bc, 47.55.pd, 42.65.Jx, 41.85.Ct**DOI:** 10.7498/aps.63.154701

1 引言

转换光学^[1]是一种通过调整光学介质介电常数和磁导率的不同分布来改变空间电磁场分布的新方法. 利用器件中介质的特定渐变折射率分布可以对光束实现分束、聚焦、准直、耦合^[2,3]等操控功能. 传统的渐变折射率器件由固体材料构成, 如基于渐变折射率光纤的自聚焦透镜, 是一种内部折射率分布沿着径向逐渐减小的柱状透镜, 常用于光纤通信和传感系统中. 通常固态的渐变折射率分布是利用复杂的离子交换或扩散方法来实现^[4,5], 并且一旦制作完成, 其折射率分布和结构形状均保持固定, 无法调节其成像、聚焦和准直等性质. 而由液体构成的渐变折射率透镜可以通过调节折射率分布或是调节透镜形状来实现动态光束调节功能^[6].

目前, 研究人员已经研发了多种基于微流控光学波导的器件, 例如光学隐形斗篷^[7]和光线弯曲波导^[4]等, 其原理主要是通过控制液体流动来实现对光线微观尺度的控制. 液体渐变折射率透镜的工作原理是: 由于液体的折射率与其浓度分布有关, 将

折射率不同的液体互相混合, 在扩散对流过程处于稳定状态时, 混合液体会呈现稳定的浓度分布, 通过一定的换算关系, 可以获得相应的稳定的折射率分布. 通常在基底材料上利用刻蚀技术制作微流体通道^[8], 配合以恒流液体装置, 从而实现基于扩散对流效应的微流体渐变折射率分布透镜^[9]. 已有研究报道光传播方向与液体流动方向相一致的流体渐变折射率透镜^[9-11], 此时可以最大程度地利用扩散与对流过程所形成的渐变折射率分布. 然而, 在液体扩散与对流过程中, 通道的入口和出口区域的折射率分布非常复杂, 使得对光束的操控存在极大的不确定性. 因此, 本文提出了一种新型的流体渐变折射率透镜, 其光束传播方向垂直于流体流动方向. 这种结构不仅简化了器件制作过程, 同时减少了通道入口和出口端的复杂折射率分布对入射光束操控性能的影响. 经过有限元法数值计算表明, 选择合适的液体种类和浓度, 通过控制液体流速, 可以实现特定的渐变折射率分布. 同时, 本文首次分析了通道管壁与流体之间的黏滞阻力对折射率分布的影响, 计算结果表明黏滞阻力的存在并不影响流速对流体渐变折射率透镜的决定作用.

* 国家自然科学基金(批准号: 61172081)和浙江省自然科学基金重点项目(批准号: LZ13F010001)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: lzc@zjut.edu.cn

2 微流渐变折射率理论分析

物质的非稳态扩散问题可以通过Fick第二定律求解, 即

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\nabla^2 C, \quad (1)$$

其中 C 为浓度, D 为扩散系数, t 为时间. 方程(1)解释了物质扩散浓度随时间和空间分布的变化关系, 却无法分析液体流动对物质传递的影响, 所以本文主要采用扩散对流方程^[12]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\nabla^2 C - U\nabla C, \quad (2)$$

其中 U 表示微通道中的液体流动的速度, C , D , t 分别表示浓度、扩散系数和时间. 右边的第二项代表了液体流动对物质扩散的作用. 在一个稳定浓度分布的流体中, 空间浓度不随时间发生变化, 即 $\partial C/\partial t = 0$. 如图1所示, W 和 H 分别代表微流通道宽度和高度, L 为微流通道的长度. 流体沿着 x 轴正向流动, y 轴为微流腔的宽度方向, z 轴是微流腔的高度方向.

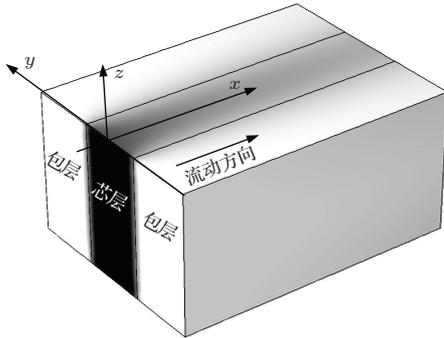


图1 直角坐标下的对流扩散模型

当扩散与对流过程保持稳定时, xy 平面上所示结构的偏微分方程可以写成

$$D(\partial^2 C/\partial x^2 + \partial^2 C/\partial y^2) - U(\partial C/\partial x + \partial C/\partial y) = 0,$$

其级数近似解可以写成^[13]

$$c'(x', y') = r + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi nr)}{n} \cos(n\pi y') \times \exp\left[\frac{1}{2}(Pe - \sqrt{Pe^2 + 4n^2\pi^2})x'\right], \quad (3)$$

其中, $x' = x/L$, $y' = y/W$ 是归一化坐标, $c' = c/C_0$ 是归一化浓度. 初始位置边界

条件为 $c'|_{x'=0, 0 \leq y' < r=1} = 1$, $c'|_{x'=0, y'=r} = r$, $c'|_{x'=0, r \leq y' \leq 1} = 0$. 扩散对流过程达到稳态后的浓度分布可以表示成 $\partial c'/\partial y'|_{x=\infty, 0 \leq y' \leq 1} = 0$, 微腔壁上的溶液浓度的分布为 $\partial c'/\partial y'|_{y'=1} = 0$. Pe 即 pecelet number, 用来评价扩散与对流作用程度, 表示为 $Pe = |U| \cdot L/D$, 其中 U 即液体流动速度. 在本文所设计的微流控光学微腔中, $U = (U_{\text{core}} + U_{\text{clad}})/WH$ 是微腔中的流动速度, 其中 U_{core} 是中心液体的流速, U_{clad} 是包层液体的流速. 变量 r 是包层和中心液体的初始归一化边界, 可以由以下方程解出^[14]:

$$\alpha\beta^2(r-1)^4 + r(r-1)[r^2 + 3r - \alpha(r-1)(r-4)]\beta - r^4 = 0, \quad (4)$$

其中, $\alpha = U_{\text{core}}/U_{\text{clad}}$, $\beta = \mu_{\text{core}}/\mu_{\text{clad}}$, μ_{core} 和 μ_{clad} 分别表示中心和包层液体的黏滞系数.

由扩散对流方程求解微腔中流体浓度的分布问题, 通常采用有限元法, 通过求解微腔边界条件下的对流扩散过程^[15,16], 得到芯层液体在微腔中的浓度分布, 进而确定折射率的分布情况.

影响混合液体扩散对流过程的因素很多, 温度、浓度、流速以及微流体种类的选定、器件结构和尺寸都对折射率分布有明显影响. 本文参考前人的工作^[11], 选择乙二醇 (ethylene glycol) 作为芯层液体, 去离子水 (de-ionized water) 作为包层液体进行模拟, 它们的折射率分别为 1.432 和 1.332, 芯层液体与包层液体的流体比率决定了充分混合后出口液体的浓度. 在有限长的微腔中, 如果流速很高, 混合流体的扩散作用有限, 对流过程占主导地位, 此时混合流体可以近似看成阶跃折射率分布 (垂直于液体流动方向). 流速较低时, 扩散效应在在流体混合过程中不足以忽略, 在微腔的横截面方向和流体流动方向都需要考虑扩散效应对浓度梯度分布的影响. 芯层液体在包层液体中的扩散过程是实现渐变折射率分布的理论基础, 选择芯层液体和包层液体的流速以及液体种类可以有效控制扩散对流过程, 从而控制液体浓度的空间分布. 当微腔的浓度分布确定后, 就可以由以下关系得出折射率的分布^[11]:

$$n(x', y') = c'_{\text{core}}(x', y')n_{\text{core}} + c'_{\text{clad}}(x', y')n_{\text{clad}}, \quad (5)$$

其中 c'_{core} 和 c'_{clad} 分别为单位体积内中心液体的归一化浓度和包层液体的归一化浓度. n_{core} 和 n_{clad}

分别代表中心液体和包层液体的折射率. 由(5)式可知, 通过混合流体的浓度分布可直接求得其折射率分布.

3 器件结构设计和性能影响分析

3.1 结构与流体性质分析

器件结构如图2所示, 扩散对流过程的微腔长度为400 μm, 深度为100 μm. 在微腔的左右两端入口处注入包层液体, 其中心入口注入芯层液体, 三入口的宽度皆为50 μm. 流速满足层流状态要求的包层和芯层液体分别注入微腔后, 芯层和包层液体在流经微腔时进行对流扩散作用.

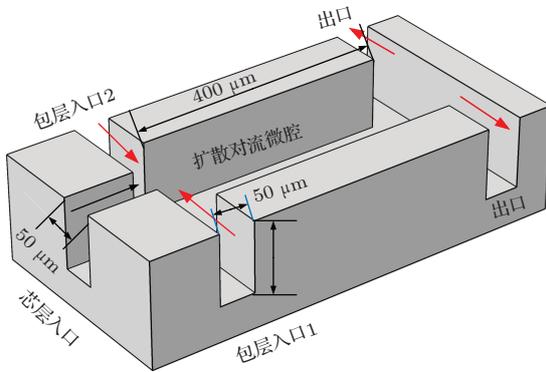


图2 器件结构与尺寸

扩散系数 D 是影响扩散对流过程的重要参数. 液体的扩散系数主要取决于液体本身的性质, 同时还受温度和浓度影响^[17]. 不同浓度下的扩散系数通常通过实验测量获得, 当乙二醇与去离子水浓度比为0.0250—0.950时, 其相应的扩散系数为 $9.28 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ — $1.67 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[18]. 同时, 扩散系数受环境温度的影响较大, 例如芯层为质量分数为0.8的乙二醇溶液, 当温度从30 °C变化到50 °C时, 扩散系数由 $3.19 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 变化为 $4.63 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[19]. 如前文所述, 采用 Pe 数来评价对流扩散的效果, 其主要决定因素包括速率流速 U 和扩散系数 D .

为了研究 D 和 U 对微腔折射率分布的作用, 本文分别计算了不同 D 和 U 条件下微腔内流体的折射率分布. 结果如图3所示, U_1 , U_2 和 U_c 分别为图3(a)所示的微流腔上包层、下包层和芯层流体的流速. 比较图3(a)和(b), 当 $D = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, $U_1 = U_2 = U_c$ 分别为5000 pL/s和500 pL/s, 计算结果显示: D 较大时, 如果 U 过小, 会使得微腔中

混合流体扩散效应过大, 充分混合后的均匀流体的折射率渐变效果会很小. 只有 U 足够大时才会出现明显的渐变折射率分布. 同理, 如图3(b)和(c), 当 $U_1 = U_2 = U_c = 500 \text{ pL/s}$, D 分别为 $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, U 较小时, 只有 D 足够小时才会出现明显的渐变折射率分布. 比较图3(a)和(c), D 分别为 $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 时, 调整流速分别为 $U_1 = U_2 = U_c = 5000 \text{ pL/s}$ 和 $U_1 = U_2 = U_c = 500 \text{ pL/s}$, 这时得到器件中的折射率分布几乎相同.

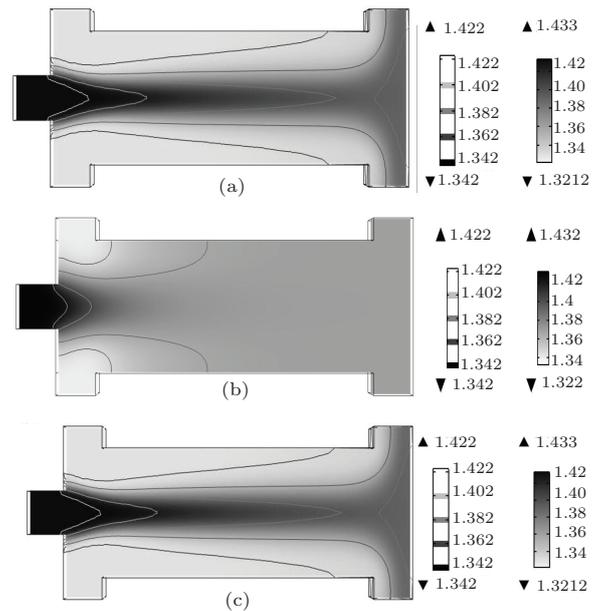


图3 不同扩散系数和流速情况下的折射率分布 (a) $D = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, $U_1 = U_2 = U_c = 5000 \text{ pL/s}$; (b) $D = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, $U_1 = U_2 = U_c = 500 \text{ pL/s}$; (c) $D = 1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $U_1 = U_2 = U_c = 500 \text{ pL/s}$

3.2 沿流体流动方向不同横截面处的折射率分布

接下来讨论流体参数确定时, 对流扩散作用对流体折射率分布所起的作用. 模拟过程中保持 $U_1 = U_2 = U_c = 2500 \text{ pL/s}$, 为了避免扩散系数受浓度变化的影响, 采用20% 乙二醇稀溶液作为芯层液体, 去离子水作为包层液体. 此时 D 可以看成常数 $D = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, 从而不影响分析的准确度, 计算结果如图4所示.

图4(a)表示扩散效果在横向与纵向都比较明显情况下的折射率分布, 图4(b)表示在距离入口不同距离处的横向折射率分布. 结果表明在顺着液体的流动方向, 流体的横向折射率渐变分布逐渐趋于平缓. 由于在不同位置存在不同的渐变折射率分

布, 因此调节光束在微腔的不同位置垂直入射, 可以实现不同的出射效果.

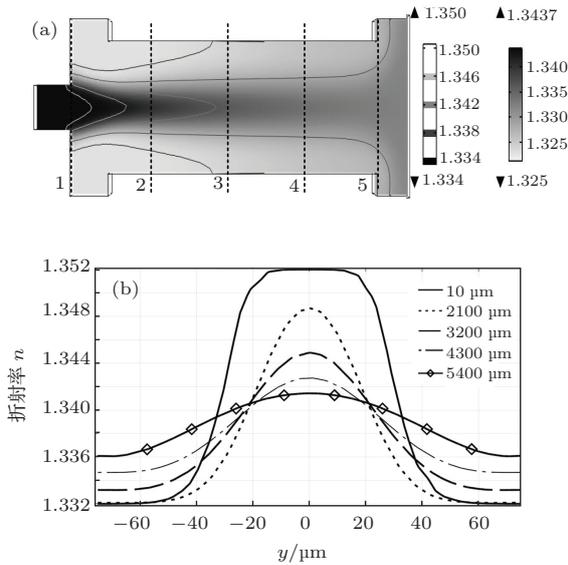


图4 流体条件为 $D = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, $U_1 = U_2 = U_c = 2500 \text{ pL/s}$ 时, (a) 器件折射率的纵向截面分布; (b) 距离流体入口不同位置的横截面折射率分布曲线

3.3 流速对折射率分布的影响

为了研究流速的对折射率分布的影响, 要保持其他参量不变. 同样选择芯层液体为浓度为20%的乙二醇水溶液, 即 $D = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, 包层液体为去离子水. 如图4(a)中曲线3所示, 选择微腔的中心位置处横截面的折射率分布作为参考. 选择不同的流速, 计算结果如图5所示.

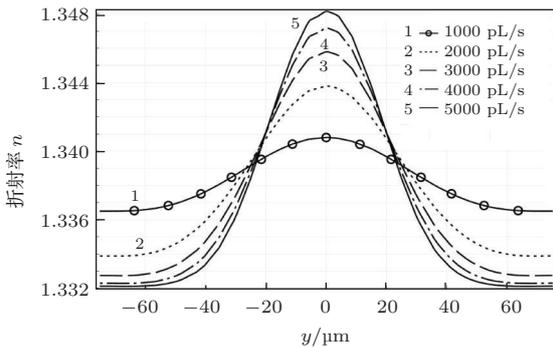


图5 不同流速条件下中心横截面的折射率分布

如图5所示, 中心截面的渐变折射率在低流速 $U_1 = U_2 = U_c = 1000 \text{ pL/s}$ 时, 分布比较平缓. 在高流速 $U_1 = U_2 = U_c = 5000 \text{ pL/s}$ 时, 其分布比较尖锐. 同时, 在流速较高时, 折射率曲线的边缘部分并没有芯层液体扩散的效果, 这时的渐变折射率分布仅限于器件的中心位置处. 由此可知, 可以通

过调节流速来调控光束轨迹. 而且图5中的折射率分布与自聚焦透镜的折射率分布相类似, 因此, 在微观尺度成像方面有很好的应用前景.

3.4 中心折射率偏移

上述内容讨论了在两侧包层具有相同流速的情况下, 渐变折射率分布关于微腔中心位置对称. 接下来讨论保持一侧的包层流速不变, 改变另一侧包层流速时, 分析微腔内流体的折射率分布的变化. 芯层液体同样选择浓度为20%的乙二醇溶液, 即 $D = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. 光束入射位置选择图4(a)中曲线3所示的微腔中心位置, 保持 $U_2 = U_c = 2500 \text{ pL/s}$, 改变 U_1 , 计算结果如图6所示.

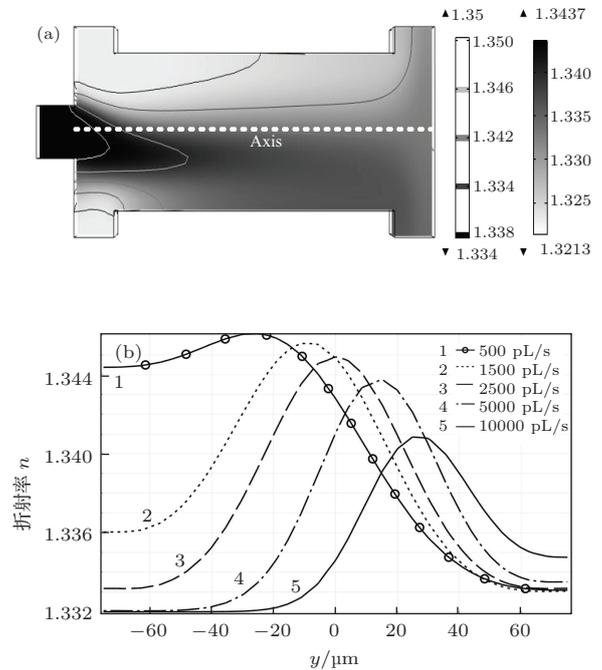


图6 不对称层流作用下的折射率分布 (a) $U_1 = 500 \text{ pL/s}$ 时的截面折射率分布; (b) 单侧包层流速改变对折射率分布的影响

如图6(a)所示, 在 $U_1 = 500 \text{ pL/s}$, $U_2 = U_c = 2500 \text{ pL/s}$ 时, 流体渐变折射率分布的中心位置向下偏移. 由图6(b)可知, 在 U_1 分别为 500 pL/s , 1500 pL/s , 2500 pL/s , 5000 pL/s 和 10000 pL/s 时, 渐变折射率分布的中心位置从 -25 μm 变化到 28 μm . 两侧包层流速差别越大, 折射率分布的中心位置偏移程度越大. 利用折射率分布的这种偏移效果可以实现光束的偏移操控. 极端情况下即一侧包层流速为0时, 折射率分布会出现单调递减(或递增)的效果, 此时可以对光束实现最大程度的偏转. 因此可以通过调节单侧包层流速, 连续动态地调节光

束的偏转效果.

3.5 中心凹陷的渐变折射率分布

如上所述, 在芯层液体折射率高于包层液体折射率时, 微腔中混合流体的渐变折射率分布由芯层向包层逐渐减小. 同理, 包层液体折射率高于芯层液体折射率时, 渐变折射率分布应由芯层向包层逐渐增加. 选择包层液体为浓度 20% 的乙二醇稀溶液, 即 $D = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, 芯层采用折射率较低的去离子水. 同时保持芯层、包层液体流速相等, 当同步调整芯层和包层流速大小时, 数值分析求得如图 7 所示的折射率分布.

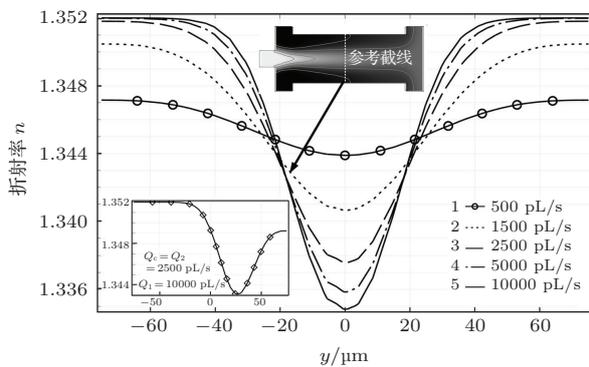


图 7 包层折射率高于芯层折射率时的折射率分布随流速的变化

由图 7 可知, 在微腔中心横截面上, 扩散对流过程达到稳定后, 流速越快扩散效果越不明显, 折射率曲线越尖锐. 流速为 1500 pL/s 时, 微腔中流体截面渐变折射率分布如图 7 中上部灰度图所示, 折射率由微腔中心轴线向两侧包层逐渐增加. 这种折射率分布效果, 可以应用于分光器件上, 同时还能够对分光束实现聚焦. 并且可以通过控制流速来调节出射光线的偏转角和焦距. 此外, 在两侧包层液体流速不同时, 流体的渐变折射率中心位置产生偏移. 如图 7 左下方曲线图所示, 折射率中心位置向右偏移了 28 μm , 此时 $U_1 = 10000 \text{ pL/s}$, $U_2 = U_c = 2500 \text{ pL/s}$. 这种偏移效果可以应用于调节光束的分光比.

3.6 黏滞阻力对扩散对流过程的影响

为了使得流体流速满足层流条件, 流速将受到限制, 管壁与流体之间的黏滞阻力是影响器件微腔中流体流速分布的重要因素. 因此在分析扩散对流过程所决定的渐变折射率分布时, 也需要考虑黏滞阻力的影响因素. 计算过程中, 为了简化问题,

统一采用去离子水的黏滞系数 $\mu = 1 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$. 考虑黏滞阻力因素后, 流体的渐变折射率分布如图 8 所示.

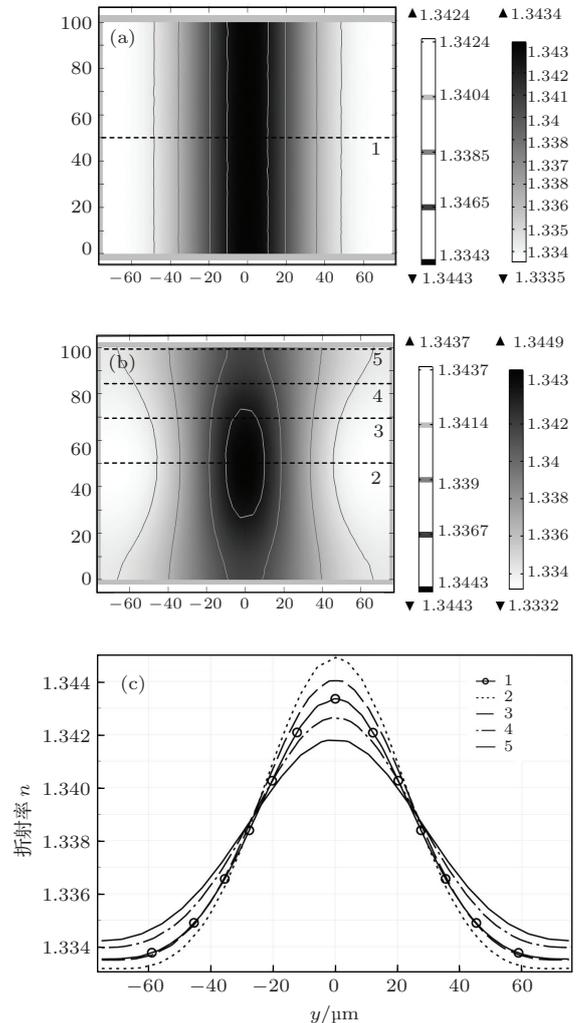


图 8 管壁与流体之间的黏滞阻力对折射率分布的影响 (a) 忽略黏滞阻力, 微腔中心横截面折射率分布; (b) 考虑黏滞阻力时的微腔中心横截面折射率分布; (c) 距离管壁不同位置处的折射率分布

图 8 表示 $U_1 = U_2 = U_c = 1500 \text{ pL/s}$ 时微腔中心位置流体的横截面折射率分布. 图 8 (a) 中忽略管壁与流体之间的黏滞阻力, 此时横向渐变折射率呈现一维分布. 图 8 (b) 表示考虑上下管壁 (z 轴方向) 与流体之间存在黏滞阻力, 由于黏滞阻力的影响, 管壁附近流体的流速会减小, 越靠近管壁, 黏滞阻力对流体减速的效果越明显. 流度的降低限制了流体的对流过程, 扩散效应得到加强. 从图 8 (b) 中的折射率等值线可知, 靠近上下两侧管壁区域流体的扩散效应明显大于中心区域的流体. 图 8 (c) 表示对应图 8 (a) 和 (b) 几条虚线位置的横向折射率分布. 由图 8 (c) 可知, 在距离管壁 0 μm , 20 μm ,

35 μm 和 50 μm 位置处, y 轴中心和边界处的芯层液体的折射率分布受黏滞阻力影响较大, 在最小折射率几乎相等的情况下, 0 μm 处的最大折射率与 50 μm 处最大折射率差大约是 0.02. 由此可知, 管壁与流体之间的黏滞阻力确实影响了低流速情况下的渐变折射率分布效果, 但黏滞阻力的存在并未改变渐变折射率的整体分布趋势. 在考虑黏滞阻力情况时, 本文所设计的一维渐变折射率透镜的实际厚度要比理想情况下大.

4 结 论

本文基于流体的对流扩散效应, 设计了一种可调节的一维渐变折射率透镜. 通过有限元方法数值计算, 保持 $U_1 = U_2 = U_c$ 且变化从 1000 pL/s 到 5000 pL/s, 微腔中心横截面的折射率分布曲线呈现出由较平滑到尖锐的变化规律. 通过控制单侧包层流速 U_1 从 500 pL/s 变化到 10000 pL/s, 同时保持 $U_2 = U_c = 2500$ pL/s, 折射率分布中心偏离微腔中轴由 $-25 \mu\text{m}$ 变化到 $28 \mu\text{m}$. 当芯层液体采用折射率较低的去离子水, 而包层液体选择折射率较高的乙二醇时, 得到中心凹陷的折射率分布曲线, 这时随着流速的增大折射率分布同样是由平滑到尖锐的变化规律. 当包层液体折射率低于芯层液体折射率时, 所形成的微流体透镜可以适用于聚焦、光束弯曲等应用中; 而当包层液体折射率高于芯层液体折射率时, 所形成的微流体透镜可以应用于分光等. 本文最后讨论了黏滞阻力对折射率分布的影响. 计算表明, 考虑黏滞阻力因素, 本文所设计的微流体透镜依然能够实现对渐变折射率分布的动态调节功能. 利用渐变折射率分布的上述调节功能, 可以对透射光束的焦距和出射方向进行动态调节. 综上所述, 基于微流控光学的可调型自聚焦透镜为微透镜的制作提供了新的思路, 在光束整形以

及微流控芯片研究与光束可调性结合的应用中有很好的前景.

参考文献

- [1] Ward A J, Pendry J B 1996 *J. Mod. Opt.* **44** 773
- [2] Yan F P, Liu P, Tan Z W, Tao P L, Li Q, Peng W J, Feng T, Tan S Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 4202 (in Chinese) [延凤平, 刘鹏, 谭中伟, 陶沛琳, 李琦, 彭万敬, 冯亭, 谭思宇 2012 物理学报 **61** 4202]
- [3] Zickar M, Noell W, Marxer C, Rooij N de 2006 *Opt. Express* **14** 4237
- [4] Valentine J, Li J, Zentgraf T, Bartal G, Zhang X 2009 *Nat. Mater.* **8** 568
- [5] Chen H Y, Chan C T, Ping S 2010 *Nat. Mater.* **9** 387
- [6] Chen T, Liang Z-C, Qian C, Xu N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7906 (in Chinese) [陈陶, 梁忠诚, 钱晨, 徐宁 2010 物理学报 **59** 7906]
- [7] Cai W, Chettiar U K, Kildishev A V, Shalaev V M 2007 *Nat. Photon.* **1** 224
- [8] Li Yan, Qu Shi-Liang 2012 *Chin. Phys. B* **21** 034208
- [9] Mao X, Lin S-C S, Lapsley M I, Shi J, Juluri B K 2009 *Lab. Chip* **9** 2050
- [10] Yang Y, Chin J M, Tsai D P, Zhenludev N I, Liu A Q 2012 *Lab. Chip* **12** 3785
- [11] Yang Y, Liu A Q, Chin L K, Zhang X M, Tsai D P, Lin C L, Lu C, Wang G P, Zheludev N I 2012 *Nat. Commun.* **3** 651
- [12] Perumal M, Ranga Raju K G 1999 *J. Hydrol. Eng.* **4** 160
- [13] Wu Z, Nguyen N T 2005 *Sens. Actuators B* **107** 965
- [14] Kapur J N, Shukla J B 1964 *Appl. Sci. Res. A* **13** 55
- [15] Hayat T, Shehzad S A, Alsaedi A, Alhothuali M S 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 114704
- [16] Rehman A, Nadeem S 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 124701
- [17] Weng Y J, Cheng Y M 2013 *Chin. Phys. B* **22** 090204
- [18] Ternstrom G, Sjostrand A; Aly G, Jernqvist A 1996 *J. Chem. Eng. Data* **41** 876
- [19] Wang M H 2001 *Ph. D. Dissertation* (Taoyuan: Chung Yuan Christian University) (in Chinese) [王明宏 2009 硕士学位论文 (桃园县: 中原大学)]

Analysis of the tunable liquid gradient index based on optofluidics*

Sun Yun-Li Wang Chang-Hui Le Zi-Chun[†]

(College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

(Received 23 January 2014; revised manuscript received 5 March 2014)

Abstract

A new type of tunable gradient-index (GRIN) microfluidic lens is proposed, which is based on the convection-diffusion process. By using the finite element method, the spatial distribution of the refractive-index (RI) determined by the concentration distribution in the microchannel is analyzed. Results show that the distribution of RI in the microchannel can be tuned by different flow rates of the core and cladding liquid streams. Furthermore, although taking into consideration the existence of the viscous resistance between the channel wall and the flowing stream, the RI distribution is still dependent on the combination of flow rates of the core and cladding streams. This microfluidic lens can be applied to dynamic adjustment of focusing, splitting or bending light beams. It therefore may have extensive applications in the optofluidic optical detecting system and microscale imaging system.

Keywords: integrated optics, gradient index, convection diffusion, optofluidics

PACS: 47.11.Bc, 47.55.pd, 42.65.Jx, 41.85.Ct

DOI: 10.7498/aps.63.154701

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61172081) and the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant No. LZ13F010001).

[†] Corresponding author. E-mail: lzc@zjut.edu.cn