

# 基于偏振控制的硅基颗粒导向系统设计

应宙锋 焦文祥 江 敏 王光辉

(南京大学光通信工程研究中心 南京 210093)

**摘 要** 光学微操控技术已从颗粒的捕获和传输拓展到颗粒的分选和导向等更高级的逻辑操控, 硅基光镊技术因能突破衍射极限并操控亚微米量级的颗粒而成为了微操控领域中最重要的手段之一。传统的硅基光镊技术一般采用微环、定向耦合器和多模干涉仪等器件, 通过调节波长实现颗粒导向操作。文章提出了一种通过偏振调控的硅基颗粒导向操作方法, 通过时域有限差分设计和优化了系统结构参数, 并验证了该结构在颗粒导向操作中的可行性。实验装置结构简单、体积小, 且操控更加方便。

**关键词** 硅基波导; 光镊; 偏振分束器

**中图分类号** TN 256 **文献标志码** A

## Design of Polarization-Based Particle Guiding System on Silicon Platform

YING Zhoufeng JIAO Wenxiang JIANG Min WANG Guanghui

(*Institute of Optical Communication Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

**Abstract** The micro-manipulation technology has extended its function from particle trapping and transportation to particle sorting and guiding. The silicon-based optical tweezer is one of the most important means in this domain, because it can break through diffraction limit and realize the operation of particles with submicron dimension. Conventional silicon-based optical tweezer systems usually consist of micro-ring, directional coupler and multimode interferometer, and realize the guiding operation by tuning the optical wavelengths. In this paper, a polarization-based particle guiding method and system was investigated. The system parameters were optimized by the finite-difference time-domain method. And the feasibility of particle guiding operation was verified. The proposed micro-manipulation system has the advantages of compact size, simple structure and easy to operate.

**Keywords** silicon waveguide; optical tweezers; polarization beam splitter

## 1 引 言

随着生命医学和疾病诊断治疗的需求越来越

高, 高通量、低成本的生物医学探测技术变得越来越重要。因为能够有效减少探测器体积以及提高探测效率, 芯片实验室 (Lab-on-a-chip) 在近几年得到了越来越多的重视<sup>[1-5]</sup>。为了精确控制芯

收稿日期: 2016-05-09 修回日期: 2016-06-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61308118)

作者简介: 应宙锋, 硕士研究生, 研究方向为硅基波导器件; 焦文祥, 硕士研究生, 研究方向为硅基波导器件; 江敏, 博士, 研究方向为硅基波导器件; 王光辉 (通讯作者), 博士, 研究方向为微流控和微纳光子器件, E-mail: wangguanghui@nju.edu.cn.

片上的溶液和溶剂, 研究人员提出了多种方案, 如电泳<sup>[6]</sup>、离心力<sup>[7]</sup>、压力泵<sup>[8]</sup>和液流阀<sup>[8,9]</sup>等。同时, 纳米技术的发展使得操控的液流体积或者目标颗粒的体积也越来越小, 从微米量级走向了亚微米量级。

光镊是一种操控微纳颗粒的有效手段, 而且已经被成功应用于颗粒的抓捕、传输<sup>[10]</sup>和分选<sup>[11]</sup>等。光镊相对于其他的技术具有非入侵、小尺寸、可配置以及大容量可并行等特点。但因为光存在衍射极限, 所以光镊很难操控一百纳米甚至更小的颗粒。幸运的是, 2011 年发展起来的近场光镊技术可以突破这一极限, 使得纳米颗粒的抓捕和操控成为可能<sup>[12]</sup>。利用亚波长的波导、表面等离子体<sup>[13]</sup>、狭缝波导<sup>[14]</sup>、随机金属纳米岛<sup>[15]</sup>等结构, 可以有效地将倏逝波压缩到一百纳米以下。这种光场往往具有非常小的模场半径, 同时具有很陡的光场梯度, 因此可以用于抓捕纳米级别的颗粒。除了这种梯度力, 倏逝场也能提供散射力推动颗粒沿着波导向前运动<sup>[12]</sup>。基于上述结构和原理, 科研人员已经提出了多种片上光流控颗粒操控系统用于操控纳米颗粒或者生物颗粒的支路选择<sup>[10,16-19]</sup>。因为光学力的作用, 光的逻辑操控可以直接转化为颗粒的逻辑操控, 如颗粒的抓捕<sup>[20]</sup>、传输<sup>[21]</sup>、分选<sup>[22,23]</sup>和探测<sup>[24]</sup>等。Wang 等<sup>[16]</sup>提出的光学传送带结构也是利用了不同波长的激励光能够激励起不同的热区从而实现颗粒的传送。在 2004 年, Grujic 等<sup>[25]</sup>通过调节光纤耦合到波导的条件来改变 Y 型分支波导的两个分支的光强比, 从而成功将颗粒导向了不同的分支。2012 年, Lin 等<sup>[22]</sup>提出了一种利用 3 dB 的分束器实现的分选器, 可以将不同大小的颗粒导向不同的出口。基于波长选择的光学器件是用于微纳颗粒操控的常用工具。不同波长的激励光输入到波导后可以激励起不同的工作模式, 因此也可以对颗粒实现不同的操作。比如基于多模干涉的定向耦合器就可以实现微米颗粒的操控<sup>[19,26]</sup>。

但是这种多模波导使得能量相对分散, 因此限制了该结构在抓捕亚微米颗粒方面的应用。微环是波长选择器件中的最典型的结构。Yang 等<sup>[18]</sup>、Cai 等<sup>[17,27]</sup>以及 Lin 等<sup>[28]</sup>等基于微环结构提出并验证了环在颗粒抓捕和颗粒导向方面的应用。但环结构因其 Q 值较高, 对波长选择性很强, 所以对输入光提出了很高的要求, 而且谐振条件还容易随着环境温度发生改变。本文提出了利用光源的偏振状态来控制颗粒导向的方法, 并通过仿真验证了其可行性, 为光学微操控技术提供了一种新的方法。

## 2 非对称定向耦合器设计

### 2.1 定向耦合

目前已提出并实验验证了多种基于不同原理的偏振分束器, 如基于多模干涉<sup>[29]</sup>、MZ 干涉<sup>[30]</sup>、定向耦合<sup>[31-35]</sup>以及光栅结构<sup>[36]</sup>等原理或结构的器件。其中, 定向耦合方式因具有结构设计简单并且加工制作容易等优势, 被广泛应用于偏振选择器件的设计。定向耦合又分为对称式定向耦合和非对称式定向耦合两种。对称式定向耦合是指两个耦合波导的结构一致, 光学参数相同。虽然可以通过横截面大小等参数的改变使得耦合结构中两个偏振模式的有效折射率不一致, 但往往这种双折射效应是非常微弱的, 导致耦合长度较长。而且为了能够达到较理想的分束效果, 最终的长度并不是其中一个偏振的耦合长度, 而是两个偏振的耦合长度的一定倍数, 使得最终器件尺寸能够达到数百微米甚至毫米<sup>[32]</sup>。

非对称式定向耦合方式为实现较短作用长度的偏振分束器提供了可能性, 因为非对称耦合方式能够产生较大的双折射效应, 并且可以很容易使得其中一个偏振态截止, 所以在这种情况只需要考虑一个偏振态, 这给设计提供了很多方便。Dai 等<sup>[35]</sup>设计了一种尺寸较小的偏振分束器, 该

分束器由一条纳米线和一条狭缝波导组成。因为 TE (Transverse Electric) 模式对狭缝非常的敏感, 所以造成了 TE 模式在两个波导中的折射率失配, 从而无法耦合。而 TM (Transverse Magnetic) 偏振对狭缝不敏感, 通过微调波导结构参数就可以实现相位的匹配, 从而实现高效的耦合。在此基础上, 通过结合光镊技术可以完成光控到流控的映射, 从而实现光对微纳颗粒的精确操控, 为生物应用中的微操控技术提供新的可能性。

## 2.2 模式分析

基于上述的不对称耦合理论, 设计了一种小型的偏振分束器件, 如图 1 所示。该器件由两种波导组成, 分别是纳米线和狭缝波导。波导的厚度为  $h=250$  nm, 这是最常用的几类规格之一。厚度的选择考虑到了以下因素。首先, 如果厚度越小, 对于 TM 偏振会有更多的光场呈现在波导外面, 从而可大幅度增加光场和介质颗粒的相互作用, 增加光场力。其次, 如果厚度越小, 会造成 TE 和 TM 两个模式的差距较大, 但在本结构中两种模式都将用于颗粒的抓捕和传输, 所以需要权衡两个偏振情况。考虑到实际情况, 整个结构沉浸在水环境中 ( $n=1.33$ )。其他参数如下: 纳米线的宽度为  $w_1$ , 狭缝波导的单侧宽度为  $w_2$ , 狭缝的宽度为  $w_{\text{slot}}$ , 两种波导之间的距离为  $w_g$ 。整个结构采用 SOI 硅片, 上层硅波导和下层硅衬

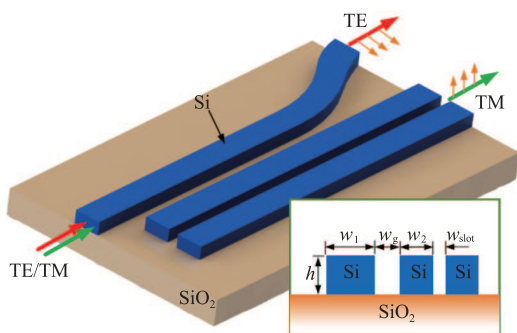


图 1 偏振分束器的 3D 图和截面图

Fig. 1 3D structure and cross-sectional view of a polarization beam splitter

底之间有二氧化硅隔离层。隔离层厚度一般有  $3 \mu\text{m}$  左右, 此时对于  $1550$  nm 波长的光, 顶层硅和基底之间不会产生耦合。

为了满足相位匹配条件, 首先采用有限元方法(此处采用 Lumerical 中的 Mode Solutions 软件)分析了两个波导在不同宽度下的有效折射率变化情况, 如图 2 所示。图中, 左侧是狭缝波导中 TE 模和 TM 模的折射率变化曲线,  $w_{\text{slot}}=100$  nm, 右侧是纳米线的两个模式的折射率变化曲线。由图可知, 因为厚度相比于宽度较小, 纳米线的两个偏振模式存在一定的差异, 这与预测相符。另一方面, 狭缝的存在对 TE 模影响更大, 即 TE 模对狭缝更加敏感。狭缝导致了 TE 模在两种波导中有较大的模式差异, 从而较难发生耦合。而 TM 对狭缝相对不敏感, 两个模式在两种波导中的特性比较接近, 可以较容易满足耦合条件。为了达到最佳的耦合效率, 我们选择  $w_1=0.4 \mu\text{m}$  和  $w_2=0.31 \mu\text{m}$ , 此时  $n_{\text{TM}}=1.82$ 、 $n_{\text{TE}_1}=2.72$  和  $n_{\text{TE}_2}=1.93$ , 模式图如图 3 所示。图为归一化的光场分布图, 下同。由图可知, TM 模的光场大部分在波导外部, 在颗粒抓捕方面相比于 TE 模式具有较大的优势。TE 模式需要较大的功率才能达到 TM 模式相同的颗粒捕获效果。另一方面, 狭缝波导的光场大部分集中在狭缝中, 和纳米线中的模式差异较大, 而 TM 模式在两种波导中的

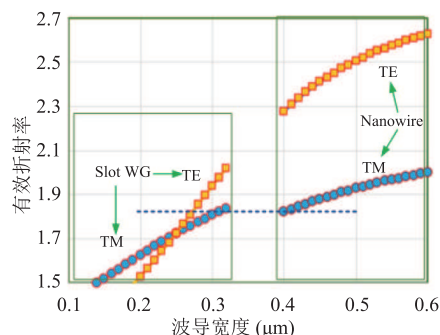


图 2 两种波导的有效折射率随波导宽度的变化情况

Fig. 2 Refractive indices of two waveguides with respect to width

差异很小，这就是狭缝能够单独调控其中一个偏振的原因。

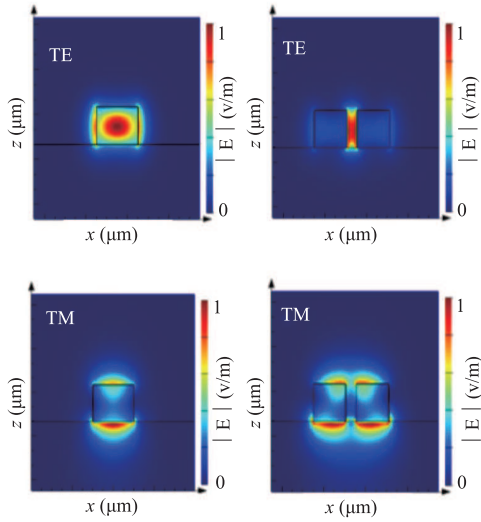


图3 纳米线和狭缝波导的模式图

Fig. 3 Mode profiles of the nanowire and slot waveguide

将两种波导以间隔  $w_g = 100 \text{ nm}$  放置得到耦合结构，该结构模式图如图4所示。由图可知，TE的两个模式  $\text{TE}_1$  和  $\text{TE}_2$  并没有形成很好的耦合，几乎属于独立的两个模式，因此当光从纳米线输入时，绝大部分都只激励起  $\text{TE}_0$ ，无法形成有效的耦合。而TM模式则相反，两根波导的模式发生强烈的耦合作用形成超模，此时两个模式分别称为奇模和偶模。当光从纳米线输入时，一部分光会激励起奇模，一部分激励起偶模。因两个模式的有效折射率不同，所以传输速度也不同，因此两个模式会沿着传播方向发生相互分离。在传播一定的距离时，这两个模式发生相干叠加，有可能使得光的能量全部集中在另一根波导上。假设此时的传播长度为  $L$ ，该值可由式(1)决定：

$$L = \frac{\lambda}{2\Delta n} \quad (1)$$

其中， $\lambda$  代表波长； $\Delta n$  是两个模式的有效折射率差。因此折射率差越大，相应的耦合长度就越短。当设计目标是制造超小型器件，就需要想

方设法把两者的折射率差调大。比如折射率达到1左右时，就有可能获得尺寸在亚微米量级的器件。

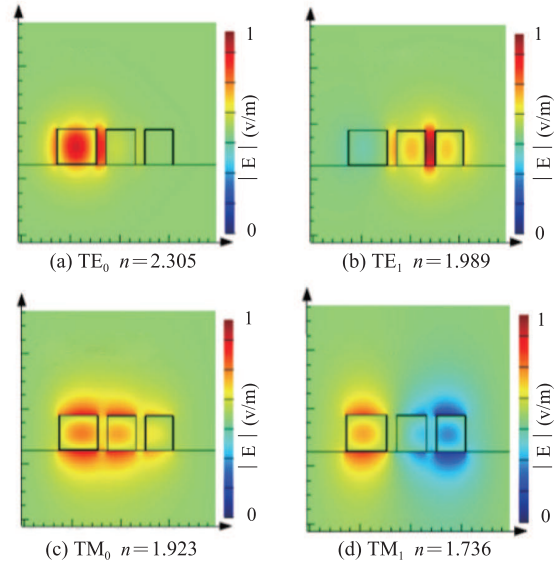


图4 耦合区域的超模

Fig. 4 Supermodes of the coupling region

### 2.3 结构设计

因  $n_{\text{TM}_0} = 1.923$ ， $n_{\text{TM}_1} = 1.736$ ，根据公式(1)计算得到  $L = 4.14 \text{ μm}$ 。在耦合区域之后我们采用简单的弯曲波导将两束光区分开来。需要注意的是，弯曲波导也会起到一部分耦合作用，所以需要进行长度方向上的参数扫描才可以得到最佳长度。为了尽量减小弯曲带来的损耗，这里弯曲半径设置为  $5 \text{ μm}$ 。通过参数扫描，可得最佳的长度为  $3.8 \text{ μm}$ 。

图5是由基于有限时域差分方法的FDTD Solutions软件计算得到的TE和TM模式的传输图。由图可知，TM模式因为奇模和偶模的相互作用能够在有效距离内很好地耦合到狭缝波导上，而TE模式因为两种波导的巨大模式差无法耦合，直接沿着左侧的弯曲波导输出。还有一点需要指出的是，TE模式仍然有很小一部分耦合到了狭缝波导中。这是因为TE模式存在很小的耦合作用，这可以通过比较图3和图4得出。



虽然这少量的耦合不影响这里的光场力的整体效果, 但在设计高消光比的偏振分束器时, 需要考虑这些细小的差异。

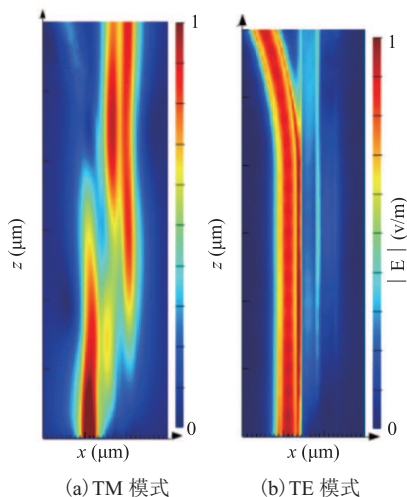


图 5 传输图

Fig. 5 Propagation profile

## 2.4 光场力分析

图 6 是颗粒的受力和势阱图。其中,  $z$  方向的力扩大了五倍显示。因为散射力比梯度力一般要小至少一个数量级, 所以前向力会比横向力小。此处颗粒的大小选为  $500\text{ nm}$ 。光场力的计算采用麦克斯韦张量法 (MST, Maxwell Stress Tensor), 同样采用了 FDTD Solutions 模块完成计算。势阱大小等于将颗粒从无穷远处移动到该

处的做功大小, 因此计算采用了无穷远处到该点过程中光学力的积分。由图可知, 当激励光是 TE 偏振时, 光场力会将颗粒牢牢束缚在波导中心, 并推动颗粒沿着波导向前运动。但对 TM 来说, 因为光耦合到了另一个波导, 颗粒所受到的光场力也将沿着光场分布变化, 从图 6(b) 可以看出, 颗粒将逐渐在光场力的作用下从纳米线波导转移到狭缝波导上。图 6(c) 是颗粒的势阱图, 同样可以看出颗粒将随着势阱形状的变化逐渐转移到狭缝波导上。因此, 通过控制输入光的偏振方向就可以控制颗粒的运动方向。

## 2.5 结果讨论与分析

仿真结果表明, 基于狭缝波导和纳米线之间选择性耦合特性的波导结构具有在颗粒微操控方面的应用可行性。该结构通过新颖的光源偏振态控制颗粒的支路选择, 拓展了传统的硅基光操控的实现方式。与传统的通过调节光纤耦合到波导的条件实现颗粒导向的 Y 型分支波导<sup>[25]</sup>相比, 该结构操控更加方便可靠, 通用性更强; 与基于微环结构<sup>[18,28]</sup>的和基于多模干涉<sup>[19,26]</sup>的导向系统相比, 该结构对光源的要求更低, 不需要线宽较窄的多波长光源, 而且结构尺寸更小 ( $<10\text{ }\mu\text{m}$ )。因此通过偏振态控制颗粒导向的硅基系统为光学微操控技术的实用化发展提供了可行性。

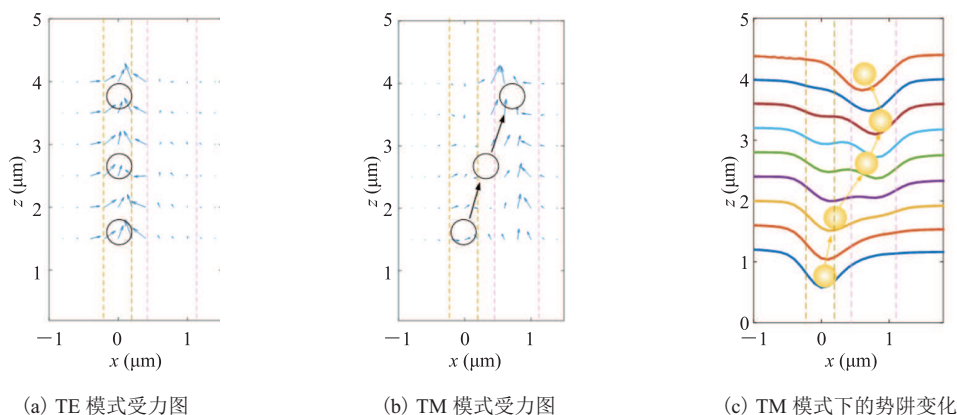


图 6 颗粒的受力图及势阱变化图

Fig. 6 Optical force and potential well for TE and TM polarization

### 3 总结

本文提出了一种通过切换输入光的偏振态实现颗粒不同路径导向的结构。首先利用狭缝波导和纳米线波导之间的偏振选择性耦合设计了结构简单、尺寸较小的偏振分束器。通过结合光镊技术,该结构能够用于微小颗粒的精确操控,实现颗粒的支路选择功能。通过仿真计算,本文验证了该方案的可行性。与传统的光学微操控技术相比,该方法结构更加小巧,操控更加方便,而且对光源的要求更低,更有利于光学微操控技术在生物领域的实用化发展。

### 参考文献

- [1] 戴永辉, 陈坦, 王战会. 一种离心式微流控生化分析芯片 [J]. 集成技术, 2015, 4(3): 86-92.
- [2] 赵亮, 申洁, 周宏伟, 等. 集成微流控芯片 [J]. 科学通报, 2011, 56(23): 1855-1870.
- [3] 陈九生, 蒋稼欢. 微流控液滴技术: 微液滴生成与操控 [J]. 分析化学, 2012, 40(8): 1293-1300.
- [4] Franke TA, Achim W. Microfluidics for miniaturized laboratories on a chip [J]. Chemphyschem, 2008, 9(15): 2140-2156.
- [5] Yeo LY, Chang HC, Chan PPY, et al. Microfluidic devices for bioapplications [J]. Small, 2011, 7(1): 12-48.
- [6] Studer V, Pepin A, Chen Y, et al. An integrated AC electrokinetic pump in a microfluidic loop for fast and tunable flow control [J]. Analyst, 2004, 129(10): 944-949.
- [7] Wang G, Ho HP, Chen Q, et al. A lab-in-a-droplet bioassay strategy for centrifugal microfluidics with density difference pumping, power to disc and bidirectional flow control [J]. Lab on A Chip, 2013, 13(18): 3698-3706.
- [8] 张何, 傅昕, 朱振军. 集成微流体驱动泵的微流控微珠阵列芯片用于基因突变检测的研究 [J]. 分析化学, 2013, 41(4): 473-480.
- [9] Hartshorne H, Backhouse CJ, Lee WE. Ferrofluid-based microchip pump and valve [J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2004, 99(2-3): 592-600.
- [10] 李宝军, 辛洪宝, 张垚, 等. 光捕获和光操控研究进展 [J]. 光学学报, 2011, 31(9): 224-233.
- [11] 周妍煌, 李婧方, 任有健, 等. 适用于微流控芯片颗粒分选的阵列光镊系统 [J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1659-1664.
- [12] Erickson D, Serey X, Chen YF, et al. Nanomanipulation using near field photonics [J]. Lab on A Chip, 2011, 11(6): 995-1009.
- [13] Grigorenko AN, Roberts NW, Dickinson MR, et al. Nanometric optical tweezers based on nanostructured substrates [J]. Nature Photonics, 2008, 2(6): 365-370.
- [14] 李璜, 王东旭, 钱如一, 等. 高折射率差纳米狭缝波导的电场分析 [J]. 光子学报, 2013, 42(12): 1464-1472.
- [15] Chen J, Kang Z, Wang G, et al. Optofluidic guiding, valving, switching and mixing based on plasmonic heating in random gold nanoisland substrate [J]. Lab on A Chip, 2015, 15(11): 2504-2512.
- [16] Wang G, Ying Z, Ho HP, et al. Nano-optical conveyor belt with waveguide-coupled excitation [J]. Optics Letters, 2016, 41(3): 528-531.
- [17] Cai H, Poon AW. Optical manipulation and transport of microparticles on silicon nitride microring-resonator-based add-drop devices [J]. Optics Letters, 2010, 35(17): 2855-2857.
- [18] Yang AH, Erickson D. Optofluidic ring resonator switch for optical particle transport [J]. Lab on A Chip, 2010, 10(6): 769-774.
- [19] Hsu LC, Chen TC, Yang YT, et al. Manipulation of micro-particles through optical interference patterns generated by integrated photonic devices [J]. Lab on A Chip, 2013, 13(6): 1151-1155.
- [20] Chen YF, Serey X, Sarkar R, et al. Controlled photonic manipulation of proteins and other nanomaterials [J]. Nano Letters, 2012, 12(3): 1633-1637.
- [21] Ahluwalia BS, Mccourt P, Huser T, et al. Optical trapping and propulsion of red blood cells on waveguide surfaces [J]. Optics Express, 2010, 18(20): 21053-21061.

- [22] Lin S, Crozier KB. An integrated microparticle sorting system based on near-field optical forces and a structural perturbation [J]. *Optics Express*, 2012, 20(4): 3367-3374.
- [23] Soltani M, Lin J, Forties RA, et al. Nanophotonic trapping for precise manipulation of biomolecular arrays [J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(6): 448-452.
- [24] Lin S, Crozier KB. Trapping-assisted sensing of particles and proteins using on-chip optical microcavities [J]. *ACS Nano*, 2013, 7(2): 1725-1730.
- [25] Grujic K, Helles OG, Hole JP, et al. Sorting of polystyrene microspheres using a Y-branched optical waveguide [J]. *Optics Express*, 2005, 13(1): 1-7.
- [26] Cai H, Poon AW. Optical manipulation of micro and nanoparticles using multimode interference power splitters [C] // The 12th IEEE Photonics Society Hong Kong Chapter Postgraduate Conference, 2011: 15.
- [27] Wang J, Poon AW. Unfolding a design rule for microparticle buffering and dropping in microring-resonator-based add-drop devices [J]. *Lab on A Chip*, 2014, 14(8): 1426-1436.
- [28] Lin S, Crozier KB. Planar silicon microrings as wavelength-multiplexed optical traps for storing and sensing particles [J]. *Lab on A Chip*, 2011, 11(23): 4047-4051.
- [29] Hosseini A, Rahimi S, Xu X, et al. Ultracompact and fabrication-tolerant integrated polarization splitter [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(20): 4047-4049.
- [30] Augustin LM, Hanfoug R, Van Der Tol JJGM, et al. A compact integrated polarization splitter/converter in InGaAsP-InP [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(17): 1286-1288.
- [31] Yamazaki T, Aono H, Yamauchi J, et al. Coupled waveguide polarization splitter with slightly different core widths [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(21): 3528-3533.
- [32] Wang J, Liang D, Tang Y, et al. Realization of an ultra-short silicon polarization beam splitter with an asymmetrical bent directional coupler [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(1): 4-6.
- [33] Guan X, Wu H, Shi Y, et al. Ultracompact and broadband polarization beam splitter utilizing the evanescent coupling between a hybrid plasmonic waveguide and a silicon nanowire [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(16): 3005-3008.
- [34] Lou F, Dai D, Wosinski L. Ultracompact polarization beam splitter based on a dielectric-hybrid plasmonic-dielectric coupler [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(16): 3372-3374.
- [35] Dai D, Wang Z, Bowers JE. Ultrashort broadband polarization beam splitter based on an asymmetrical directional coupler [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(13): 2590-2592.
- [36] Wang Z, Yongbo T, Wosinski L, et al. Experimental demonstration of a high efficiency polarization splitter based on a one-dimensional grating with a bragg reflector underneath [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(21): 1568-1570.