

# 可调谐光流控装置实现微粒筛选与存储研究

汪忠明\*, 崔祥辰

(大连理工大学 光电工程与仪器科学学院, 辽宁 大连 116024)

**摘 要:** 基于在波导旁边的微环谐振和耦合波导对外倏逝波的光捕获能力, 提出了一种由硫族化合物半导体  $Sb_2Se_3$  组成的光流控装置, 可以通过  $Sb_2Se_3$  在非晶态和结晶态之间的相变对装置所实现的功能进行主动调制, 使装置能够在单波长输入条件下, 实现两种不同的工作状态。采用球形和棒状聚苯乙烯颗粒作为模型系统, 其中球形(直径为  $0.5 \mu m$ )和棒状(直径为  $0.5 \mu m$ , 长度为  $1.5 \mu m$ )的聚苯乙烯颗粒可以分别模拟金黄色葡萄球菌和杆状大肠杆菌这两种不同的细菌用于实现该装置的形状筛选功能。通过加热  $Sb_2Se_3$  到结晶温度 ( $T_c = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ), 使波导和谐振环的材料相变, 可以调节装置在存储微纳米粒子、筛选微纳米粒子两种功能之间切换。这可能会为生物分子的形状选择性筛分提供参考, 满足新一代芯片实验室技术的要求。

**关键词:** 相变材料; 存储; 筛选; 微纳米粒子; 光流控

**中图分类号:** TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2022)03-0187-06

## Study of Tunable Optofluidic Device for Particle Sorting and Storing

WANG Zhongming, Chui Hsiang-Chen

(School of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, CHN)

**Abstract:** Based on the evanescent waves of microring resonance next to the waveguide and the bus waveguide, an optofluidic device composed of the chalcogenide semiconductor  $Sb_2Se_3$  was proposed. The function of device could be actively modulated by the phase change of  $Sb_2Se_3$ , so that the device could realize two different functions under the condition of single wavelength input. Spherical and rod-shaped polystyrene particles were used as model systems, in which spherical ( $0.5 \mu m$  in diameter) and rod-shaped ( $0.5 \mu m$  in diameter and  $1.5 \mu m$  in length) polystyrene particles could simulate *Staphylococcus aureus* and rod-shaped *Escherichia coli*, respectively. These two different bacteria were used to implement the shape-sorting function of the device. By heating  $Sb_2Se_3$  to the crystallization temperature ( $T_c = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ), the materials of the waveguide and the resonant ring were phase-transformed, and the device could be tuned to switch between the two functions of storing particles and sorting particles. The protocol may provide a reference for shape-selective screening of biomolecules and meet the requirements of a new generation of lab-on-a-chip technology.

**Key words:** phase change material; storage; sorting; nanoparticle; optofluidic

收稿日期: 2022-03-14

作者简介: 汪忠明(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为集成光学器件; (E-mail: 617691929@qq.com)

崔祥辰(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为光纤通讯。

\* 通讯作者

## 引 言

片上实验室和微流控大规模集成能够使用成熟的光刻技术制造包含数百或数千个功能单元的芯片。光学元件的结合在微米级或纳米级生物材料上产生了许多有趣的操作<sup>[1-2]</sup>。光镊<sup>[3]</sup>能够使用高度聚焦的激光束的强度梯度来捕获微粒或细胞。为了提高系统集成度和捕获刚度,研究人员在随后几年探索了光子结构周围渐逝场的近场光学力<sup>[4-8]</sup>。特别是,片上操作和逻辑操作对于光流控系统至关重要。现已展示了几种结构和操作,例如切换<sup>[9-10]</sup>,排序<sup>[11]</sup>和存储<sup>[12]</sup>,其中微环谐振器起着重要作用,微环具有通过分别在开启和关闭谐振状态之间调整环的共振状态来捕获和释放纳米粒子的能力。实现这种调谐过程的最普遍的方法是依赖于波长的驱动<sup>[4,8-9]</sup>,但是想要集成几个具有不同驱动波长的环时会很棘手。为了解决这个问题,需要一种基于单一波长的调谐机制。这样,一系列功能不同的单元可以集成到一个芯片中,而每个单元都可以在同一个波长下独立工作。众所周知,一旦环和波导材料的相态发生改变,将会导致其材料折射率改变,环的共振状态就可以改变。通常,有两种方法来实现材料的调制,即电光调制和热光调制<sup>[13]</sup>。相比之下,热光调制更可行,热调谐可以提供数十微秒的响应速度,这对于粒子操纵来说已经足够快了<sup>[14]</sup>。

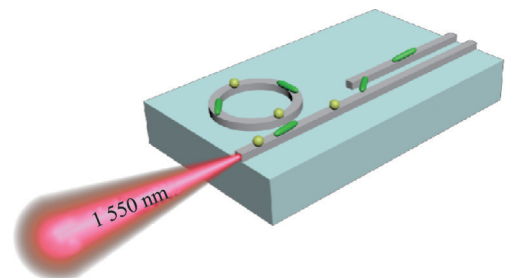
由Ovshinsky<sup>[15]</sup>首创的硫族化合物半导体材料因其快速传输速度、高循环性、出色的可扩展性和热稳定性等优点在可重写光盘和相变存储器中有广泛的应用前景<sup>[16]</sup>。特别是对于非晶态(AM)和结晶态(CR)之间的硫族化合物半导体材料<sup>[17-18]</sup>,这使其成为制作快速可调光子器件<sup>[19-20]</sup>的优秀材料。通过相变致使其介电常数发生显著变化,这可以极大地改变器件的工作频率,因此设备的功能会有所不同。硫属化合物半导体最近已被证明可用于光波导<sup>[21]</sup>、元器件<sup>[22-23]</sup>、光子晶体器件<sup>[24-25]</sup>和光纤<sup>[26]</sup>。研究将上述知识扩展到具有各种对象的操纵领域轮廓,即亚微米细菌的形状选择性分选。

## 1 光流控装置结构设计

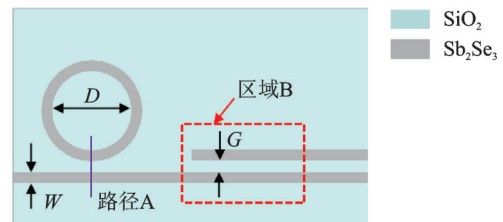
文中将波导谐振环、波导对集成到光流控装置上,通过改变微环谐振器的谐振状态,以数值方式展示了一种用于微纳粒子的可调谐光流体存储、

分选单元。然后耦合区域的俘获势阱相应变化,粒子分选临界尺寸也是可调的。研究发现捕获概率与颗粒大小、环中的场建立因子、耦合区域的长度和入射功率密切相关,这使得该设备能够对颗粒进行可调谐和可重构的分类。

文章设计了使用波导集成的微环谐振器来捕获粒子。波导和谐振器宽度 $W=400\text{ nm}$ ,波导与谐振器之间的间隙 $G=100\text{ nm}$ ,谐振器内圈直径 $D=2.9\text{ }\mu\text{m}$ ,且,波导和谐振环的厚度都为 $200\text{ nm}$ ,波长为 $1\ 550\text{ nm}$ 、光功率为 $20\text{ mW}$ 的激光从直波导一端射入。



(a) 光流控装置结构示意图



(b) 光流控装置俯视图

图 1 波导对与共振环结构示意图

Fig.1 Illustration schematic of the waveguide pair and ring resonator

图 1(a)是热调谐微环的示意图。基于掩埋氧化物平台,将微型加热器放置在距离共振环 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的预留二氧化硅层上。如果行业现有技术不可行,则可以延长这样的距离,这只是略微延长了热响应时间。覆盖在加热器上的熔融石英层将其与水环境隔离,同时形成一个容纳颗粒的腔室。当装置处于存储微粒的功能状态,被共振环捕获的微粒将会存储在该腔室内,当 $\text{Sb}_2\text{Se}_3$ 发生相变,装置从存储状态转换到分选状态,该腔室内的微粒将会被总线波导吸引,并沿着光传播的方向运动到如图 1(b)所示的区域 B,进而进行微粒的分选功能。有限差分时段(FDTD)算法用于模拟全通微环中的光传播,而施加在纳米颗粒上的力则使用麦克斯韦应力张量法计算<sup>[27]</sup>。通过调节环的工作状态,耦合区的光场分布相应改变,从而影响粒子在环与直波导之间的

运动。当环处于共振状态时,粒子被拉向环。相反,在非共振状态下,粒子将被环释放。

研究中使用硫族相变材料 $\text{Sb}_2\text{Se}_3$ <sup>[28]</sup>制作共振环和波导,在图2中,进行可变角度光谱椭圆偏振仪(VASE)测量以表征40 nm厚的 $\text{Sb}_2\text{Se}_3$ 层的光学特性,首先使用射频(RF)磁控溅射系统将40 nm厚的 $\text{Sb}_2\text{Se}_3$ 阵列沉积到200  $\mu\text{m}$ 厚的Si衬底上。在沉积之前,Si晶片已在丙酮、异丙醇和去离子水中进行超声波清洗,并通过干燥的氮气进行干燥。然后,将40 nm厚的 $\text{Sb}_2\text{Se}_3$ 层溅射到Si衬底上。如图所示, $\text{Sb}_2\text{Se}_3$ 薄膜表现出复折射率的显著变化( $N_{\text{se}} = n_{\text{se}} + i \times k_{\text{se}}$ )和非晶态和结晶态状态之间的纳秒(ns)的极快相变,其中 $n_{\text{se}}$ 和 $k_{\text{se}}$ 是实部和虚部部分。该材料通过加热相变能实现较大的折射率改变,并且 $\text{Sb}_2\text{Se}_3$ 材料在两种相态下的折射率在1 550 nm波段的虚部极低,因此对于入射光的损耗极小。

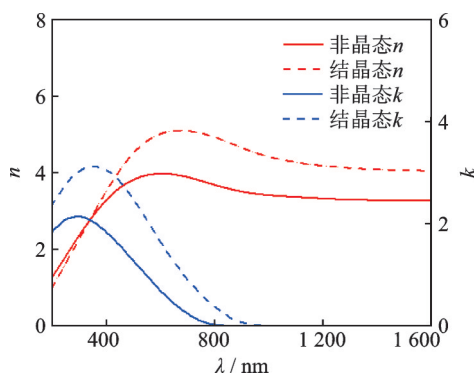


图2  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$ 在非晶态与晶态的折射率

Fig.2 Refractive index for  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  in amorphous and crystalline states

## 2 仿真结果

对波导和谐振环上表面10 nm处的电场进行仿真,结果如图3所示。图3(a)为 $\text{Se}_2\text{Sb}_3$ 处于非晶态时的电场分布。由仿真结果可知,此时共振环处于共振状态,环内的电场强度比波导处的电场强很多,因此微纳粒子将会沿着图中的白色虚线从波导上表面运动到共振环上表面,并且被限制在共振环内部<sup>[29]</sup>,此时,该光流控装置处于存储微纳粒子的状态。

然而,当加热 $\text{Se}_2\text{Sb}_3$ 到200  $^{\circ}\text{C}$ ,波导和谐振环材料发生相变,由图3(b)可知,此时共振环处于非共振状态,共振环在该状态下对于运动着的纳米微粒的影响微乎其微,此时,主要考虑的是波导对之间的耦合作用。波导上表面更强烈的电场将会把原

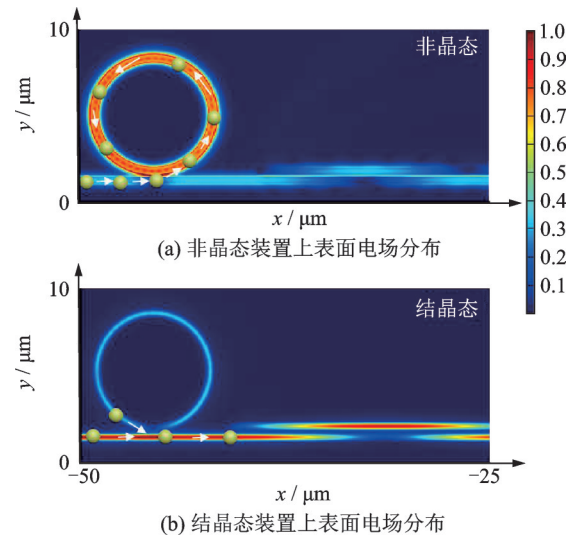


图3 光流控装置在晶态和非晶态下电场分布图

Fig.3 Electric field distribution of optofluidic device in crystalline and amorphous states

先存储在共振环内的粒子吸引到波导上表面,并且,波导之间的耦合将会产生一系列的热点<sup>[30]</sup>,基于热点对于不同尺寸微纳粒子的作用效果的不同,可以对原先存储的球状、棒状的微粒进行筛选。

仿真中采用的微纳粒子,是由聚苯乙烯所制作的直径为500 nm的球状微粒和长轴为1 500 nm、短轴为500 nm的棒状微粒,聚苯乙烯颗粒可以模仿有机和生物材料的特性。利用有限差分域(FDTD)算法模拟光在波导和共振环中的传播,而作用在微纳粒子上的力则使用麦克斯韦方法计算。通过调谐波导和共振环的相态,共振环的共振状态和波导对的耦合状态发生改变,从而影响微纳粒子在环和波导之间的运动,当波导和共振环为非晶态,环处于共振状态时,此时共振环表面的电场很强,微纳粒子被拉入环内,该装置处于储存状态。相反,当波导和共振环为结晶态时,环为非共振状态,波导对之间耦合较为强烈,此时微纳粒子从环中释放出来,在光的散射力的作用下,运动到波导对的耦合区域,进行分选,此时该装置处于分选状态。

## 3 捕获与筛选效果分析

利用耦合区域的势阱分布可以简单阐述微纳粒子的捕获和释放机制。当波导和共振环处于非晶态时,由仿真电场图3可知,微粒最可能从总线波导转移到谐振环的位置为图1路径A所示的途径,因此需要分析的是该路径上的微粒的动态,通过对该路径上微粒所受到的力进行仿真计算,继而对该

路径上的力进行积分,能得到微粒在该路径上的势阱分布。通过观察势阱对的最低点的位置、势阱的强度,就能推断出微粒是否能被捕获、最终将被捕获在哪个位置。当波导和共振环处于结晶态时,由图 3(b)所示,此时共振环和波导不产生共振效果,也就是说,共振环内的电场强度对比于总线波导内的电场强度来说较弱,共振环失去了吸引微粒的功能;同时,波导对在这个状态下会相互耦合<sup>[31]</sup>,波导之间的耦合将会在图 1 中的区域 B 中产生一系列热点,该热点将对微纳粒子产生筛选效果,因此在  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  结晶状态下,主要研究微粒在区域 B 内的动态即可。

### 3.1 共振环存储微纳粒子强度

对于共振状态下微粒在装置内的动态分析,通过将微粒表面的麦克斯韦应力张量进行积分,可以得到球状和棒状微粒在路径 A 上的受力,对于微粒受到的力在路径 A 上积分,可以得到微粒在路径上的势阱分布如图 4 所示。图 4(a)为  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  处于非晶态时,棒状(红线)、球状(蓝线)微粒在路径 A 上的势阱,其中棒状、球状微粒最深的势阱分别为  $27.33 k_B T$ 、 $18.9 k_B T$ ,大于稳定捕获的所需要的势阱深度  $10 k_B T$ ,并且,最深势阱的位置处于共振环的上方,

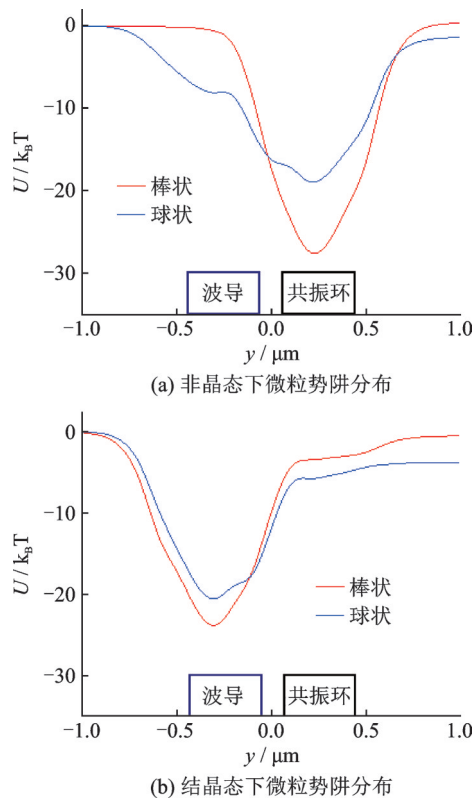


图 4 共振环捕获微纳粒子强度

Fig.4 Potential well of the ring resonator to trap particle

因此可得出结论,在  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  处于非晶态时,棒状、球状微粒都能够被稳定捕获在共振环的上方。此时满足装置存储微粒的要求。

当  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  发生相变,共振环和总线波导处于结晶态时,共振环不发生共振,此时,棒状、球状微粒最大势阱深度分别为  $23.8 k_B T$ 、 $20.6 k_B T$ ,最深势阱的位置在波导上表面,也就是说,当  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  处于结晶态时,棒状、球状微粒都将被限制在总线波导内部,并且在散射力的作用下,将在波导上表面一直沿着光照的方向运动<sup>[32]</sup>。

### 3.2 晶态下波导对筛选微纳粒子

当波导和共振环皆处于结晶态,此时共振环处于非共振状态,共振环对于光在波导内的传播的影响很微弱,因此可以将整个光流控装置看作一对波导对,当装置开始工作,微纳粒子从装置左端进入,沿着光传播的方向运动,当粒子运动到区域 B 时,棒状微粒由于尺寸比较大,能够同时受到两个热点的作用,在上波导热点的干扰下,棒状微粒从下波导被拉到上波导,而球状微粒因为其尺寸较小,只能受到下波导的作用,因此,球状微粒只能留在下波导,由此实现棒状微粒和球状微粒的分选效果。图 5 展示了球状微粒和棒状微粒在区域 B 内的势阱分

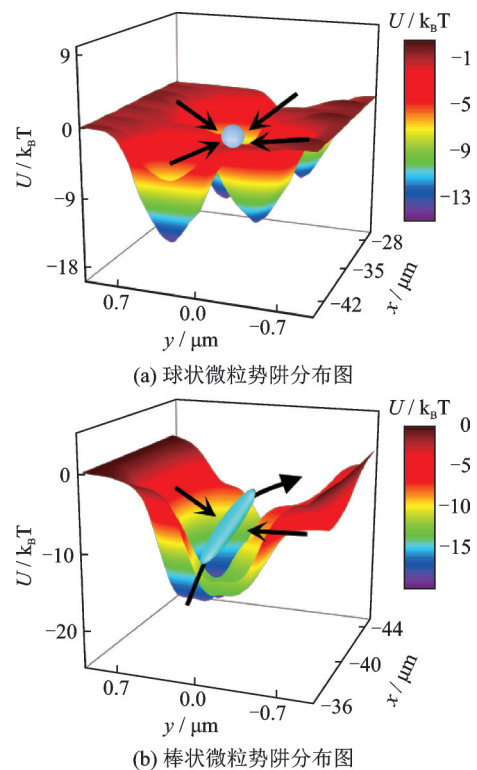


图 5 结晶状态下波导对作用于微纳粒子的捕获势阱图

Fig.5 The trapping potential of the waveguide pair acting on the micro-nano particles in the crystalline state

布,黑色箭头为球状微粒在相应位置受到的力。由此能够看出球状微粒在区域B中能受到稳定的恢复力,因此能稳定的被捕获;然而,棒状微粒只在y轴方向上受到恢复力,在x轴方向没有受到恢复力,因此棒状微粒将沿着x轴的方向运动。

## 4 结 论

综上所述,研究利用FDTD已经在数值上证明了使用热调谐光流控装置对微纳粒子进行可重构多功能分选方案。当光流控装置处于非晶态时,利用共振腔的共振作用,可以将微纳粒子吸引到共振腔上表面,以此实现存储功能。当通过热调谐使装置发生相变,处于结晶态时,共振环在结晶状态下不会产生共振,此时整个装置起作用的为一对波导对,该波导对能够实现对于球状微粒和棒状微粒的分选功能。研究提出的设计为热光流控芯片上纳米粒子的可重构和多级光流控分选提供了一种简单且超紧凑的方案。

## 参 考 文 献

- [1] Chen J, Kang Z, Wang G, et al. Optofluidic guiding, valving, switching and mixing based on plasmonic heating in a random gold nanoisland substrate[J]. *Lab on a Chip*, 2015, 15(11): 2504-2512.
- [2] Zhao H, Chin L K, Shi Y, et al. Continuous optical sorting of nanoscale biomolecules in integrated microfluidic-nanophotonic chips[J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2021, 331.
- [3] Ashkin A, Dziedzic J M, Yamane T. Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams[J]. *Nature*, 1987, 330(6150): 769-771.
- [4] Wang G, Ying Z, Ho H-P, et al. Nano-optical conveyor belt with waveguide-coupled excitation[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(3): 528-531.
- [5] Soltani M, Lin J, Forties R A, et al. Nanophotonic trapping for precise manipulation of biomolecular arrays[J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(6): 448-452.
- [6] Chen Y F, Serey X, Sarkar R, et al. Controlled photonic manipulation of proteins and other nanomaterials[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(3): 1633-1637.
- [7] Cai H, Poon A W. Optical manipulation and transport of microparticles on silicon nitride microring-resonator-based add-drop devices[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(17): 2855-2857.
- [8] Schmidt B S, Yang A H, Erickson D, et al. Optofluidic trapping and transport on solid core waveguides within a microfluidic device[J]. *Optics Express*, 2007, 15(22): 14322-14334.
- [9] Xu W, Wang Y, Jiao W, et al. Tunable optofluidic sorting and manipulation on micro-ring resonators from a statistics perspective[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(13): 3226-3229.
- [10] Jiao W, Wang G, Ying Z, et al. Switching of nanoparticles in large-scale hybrid electro-optofluidics integration[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(11): 2652-2655.
- [11] Xu X, Wang G, Jiao W, et al. Multi-level sorting of nanoparticles on multi-step optical waveguide splitter[J]. *Optics Express*, 2018, 26(22): 29262-29271.
- [12] Zhang S, Shakiba N, Chen Y, et al. Patterned optoelectronic tweezers: A new scheme for selecting, moving, and storing dielectric particles and cells[J]. *Small*, 2018, 14(45): 1803342.
- [13] Choudhari V, Dhoble A, Panchal S. Numerical analysis of different fin structures in phase change material module for battery thermal management system and its optimization[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 163: 120434.
- [14] An R, Wang G, Ji W, et al. Controllable trapping and releasing of nanoparticles by a standing wave on optical waveguides[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(16): 3901-3904.
- [15] Ovshinsky S R. Reversible electrical switching phenomena in disordered structures[J]. *Physical Review Letters*, 1968, 21(20): 1450.
- [16] Le Gallo M, Sebastian A. An overview of phase-change memory device physics[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(21): 213002.
- [17] Shportko K, Kremers S, Woda M, et al. Resonant bonding in crystalline phase-change materials[J]. *Nature Materials*, 2008, 7(8): 653-658.
- [18] Wuttig M, Yamada N. Phase-change materials for rewriteable data storage[J]. *Nature Materials*, 2007, 6(11): 824-832.
- [19] Li P, Yang X, Maß T W, et al. Reversible optical switching of highly confined phonon-polaritons with an ultrathin phase-change material[J]. *Nature Materials*, 2016, 15(8): 870-875.
- [20] Yin X, Schaferling M, Michel A K U, et al. Active chiral plasmonics[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(7): 4255-4260.
- [21] Zhang T, Mei S, Wang Q, et al. Reconfigurable optical manipulation by phase change material waveguides[J]. *Nanoscale*, 2017, 9(20): 6895-6900.
- [22] Patel S K, Parmar J, Sorathiya V, et al. Tunable infrared metamaterial-based biosensor for detection of hemoglobin and urine using phase change material[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 1-11.
- [23] Mou N, Liu X, Wei T, et al. Large-scale, low-cost, broadband and tunable perfect optical absorber based on phase-change material[J]. *Nanoscale*, 2020, 12(9): 5374-5379.
- [24] Fu H, Tsang S W. Infrared colloidal lead chalcogenide nanocrystals: Synthesis, properties, and photovoltaic applications[J]. *Nanoscale*, 2012, 4(7): 2187-2201.
- [25] Li L, Lin H, Qiao S, et al. Integrated flexible chalcogenide glass photonic devices[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(8): 643-649.
- [26] Tao G, Eberndorf-Heidepriem H, Stolyarov A M, et al. Infrared fibers[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(2):

- 379-458.
- [27] Ghosh M K, Gao Y, Dozono H, et al. Proposal of maxwell stress tensor for local force calculation in magnetic body [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, 54(11): 1-4.
- [28] Delaney M, Zeimpekis I, Lawson D, et al. A new family of ultralow loss reversible phase-change materials for photonic integrated circuits:  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  and  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(36): 2002447.
- [29] Tran M A, Huang D, Guo J, et al. Ring-resonator based widely-tunable narrow-line width si/inp integrated lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 26(2): 1-14.
- [30] Shi Y, Zhao H, Kim Truc N, et al. Nanophotonic array-induced dynamic behavior for label-free shape-selective bacteria sieving [J]. *Acs Nano*, 2019, 13(10): 12070-12080.
- [31] Huang W P. Coupled-mode theory for optical waveguides: An overview [J]. *JOSA A*, 1994, 11(3): 963-983.
- [32] Hellesø O G, Løvhaugen P, Subramanian A Z, et al. Surface transport and stable trapping of particles and cells by an optical waveguide loop [J]. *Lab on a Chip*, 2012, 12(18): 3436-3440.

### (上接第 186 页)

- [29] Wold D J, Frisbie C D. Formation of metal-molecule-metal tunnel junctions: Microcontacts to alkanethiol monolayers with a conducting AFM tip [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2000, 122(12): 2970-2971.
- [30] Cui X D, Primak A, Zarate X, et al. Reproducible measurement of single-molecule conductivity [J]. *Science*, 2001, 294(5542): 571-574.
- [31] Xu B, Tao N J. Measurement of single-molecule resistance by repeated formation of molecular junctions [J]. *Science*, 2003, 301(5637): 1221-1223.
- [32] Pla-Vilanova P, Aragones A C, Ciampi S, et al. The spontaneous formation of single-molecule junctions via terminal alkynes [J]. *Nanotechnology*, 2015, 26(38): 381001.
- [33] Zhang Y P, Chen L C, Zhang Z Q, et al. Distinguishing diketopyrrolopyrrole isomers in single-molecule junctions via reversible stimuli-responsive quantum interference [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2018, 140(21): 6531-6535.
- [34] Su T A, Neupane M, Steigerwald M L, et al. Chemical principles of single-molecule electronics [J]. *Nature Reviews Materials*, 2016, 1(3): 2058-8437.
- [35] Li X, Wu Q, Bai J, et al. Structure-independent conductance of thiophene-based single-stacking junctions [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59(8): 3280-3286.
- [36] Li Y, Wang Z, Li X, et al. Highly efficient spiro[fluorene-9, 9'-thioxanthene] core derived blue emitters and fluorescent/phosphorescent hybrid white organic light-emitting diodes [J]. *Chemistry of Materials*, 2015, 27(3): 1100-1109.
- [37] Cho M J, Jin J I, Choi D H, et al. Phosphorescent, green-emitting Ir(III) complexes with carbazolyl-substituted 2-phenylpyridine ligands: Effect of binding mode of the carbazole group on photoluminescence and electrophosphorescence [J]. *Dyes and Pigments*, 2009, 83(2): 218-224.
- [38] Huang B, Liu X, Yuan Y, et al. Controlling and observing sharp-valleyed quantum interference effect in single molecular junctions [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2018, 140(50): 17685-17690.
- [39] Mao J C, Peng L L, Li W Q, et al. Influence of molecular structure on contact interaction between thiophene anchoring group and Au electrode [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2017, 121(3): 1472-1476.
- [40] Yelin T, Korytár R, Sukenik N, et al. Conductance saturation in a series of highly transmitting molecular junctions [J]. *Nature Materials*, 2016, 15(4): 444-449.
- [41] Xiao B, Liang F, Liu S, et al. Cucurbituril mediated single molecule detection and identification via recognition tunneling [J]. *Nanotechnology*, 2018, 29(36): 365501.
- [42] Issa Y M, Hassib H, Mohamed W S. Electrical conductivity studies on some dibenzoylmethane arylhydrazones (DBMAH) [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2010, 100(1): 219-223.
- [43] Venkataraman L, Klare J E, Nuckolls C, et al. Dependence of single-molecule junction conductance on molecular conformation [J]. *Nature*, 2006, 442(7105): 904-907.
- [44] Hergué N, Mallet C, Savitha G, et al. Facile synthesis of 3-alkoxy-4-cyanothiophenes as new building blocks for donor-acceptor conjugated systems [J]. *Organic Letters*, 2011, 13(7): 1762-1765.
- [45] 李仁涵, 肖博怀, 陈晨, 等. 光电分子器件材料的研究进展 [J]. *光电子技术*, 2021, 41(3): 9.