

光镊轴向阱位操控及器件安装误差对径向阱位操控的影响*

任洪亮[†] 丁攀峰 李小燕

(华侨大学信息科学与工程学院, 厦门 361021)

(2012年5月14日收到; 2012年5月29日收到修改稿)

光镊利用光学梯度力捕获和操控微小粒子, 已经成为深入研究生物分子间相互作用等微观机制的独特技术. 光镊光束操控系统一般由扩束输入镜、扩束输出镜、调焦透镜、耦合透镜和压电转镜等光学元器件组成, 以保证物镜后瞳充满的前提下实现光镊阱位操控. 光镊阱位的三维精确操控是实现光镊位钳和力钳模式的基本条件. 本文根据矩阵光学, 对基于无穷远校正显微镜的光镊操控光路进行计算, 分析扩束输入镜、调焦透镜和物镜轴向位置调整, 以及压电转镜、调焦透镜和耦合透镜安装位置误差对光镊径向阱位操控精度的影响, 得到了物镜高度调整基本不会影响光镊径向位置操控, 压电转镜和调焦透镜的安装位置误差对光镊径向阱位操控精度影响最大等结论, 提出了能够实现径向阱位精确操控的轴向阱位动态操控范围, 为光镊设计和操控提供理论和实验指导.

关键词: 光镊, 设计, 阱位操控, 误差

PACS: 07.60.-j, 87.64.M, 33.80.Gj

1 引言

光镊系统利用光学梯度力实现对纳米及微米大小样品的无损和无菌操纵, 已经成为分子生物学和胶体化学等领域不可或缺的研究工具, 特别是在测量驱动蛋白运动^[1,2]、染色体移动^[3]、RNA 折叠^[4]和转录^[5]等方面做出了独特的贡献.

光镊在捕获和定位微小粒子时, 其回复力在线性区间内表现为胡克力形式, 以 x 方向为例, 回复力 $F_x = -k_x \Delta x = -k_x(x_b - x_T)$, x_b 为捕获粒子位置, x_T 为光镊中心位置, 简称为阱位, k_x 为光镊刚度. 当装备高精度位置探测系统时, 光镊可以作为微小力传感器. 相比微针和原子力显微镜等其他测力仪器, 光镊更适用于测量小于 200 pN 的作用力和小于 150 nm 的微小位移^[6]. 结合反馈系统, 光镊系统可以实时控制光束和样品池, 从而实现光镊的位钳模式^[7-9]和力钳模式^[10-12].

由于光镊在生物单分子测力方面的独特作用, 光镊自发明后便引起了众多生命科学家的关注, 光镊建设也已经成为一个极其重要的基础工作. Fällman 和 Axner^[13] 提出了保持物镜后瞳充满度的设计方案, 这是一个极为漂亮的工作. 国内中国科技大学课题组最早开始研究光镊, 对光镊蒙特卡罗模拟^[14]、时分复用光镊^[15]和暗场照明光镊^[16]研制做出了突出贡献. 姚新程等^[17]对平移反射镜及转动反射镜实现光阱位置操纵的机理进行了详细的研究. 降雨强等^[18]研究了如何在低频响及低采样频率下, 用布朗运动法测量光阱刚度, 刘春香等^[19]研究了光镊系统中放大倍数对四象限探测器位移测量信号的幅值及其线性度的影响. 这些工作都极大地促进了光镊技术的发展.

但是上述研究并没有对光镊轴向阱位操控及各种光学元器件安装位置误差对径向阱位操控的影响进行系统分析. 本文根据矩阵光学对此问题进行理论分析, 为光镊阱位操控系统研制和实验提供

* 国家自然科学基金(批准号: 61178015)、福建省自然科学基金(批准号: 2012J05120)、中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: JB-ZR1146)和厦门市科技计划(批准号: 3502Z20113017)资助的课题.

[†] E-mail: renhongliang@ustc.edu

理论指导, 并给出合理误差范围内的阱位动态操控范围.

2 可调光镊光路

图 1 中, 扩束输入镜 L_e (焦距为 f_e) 和扩束输出镜 L_c (焦距为 f_c) 形成共焦系统, 用于激光扩束. 压电转镜 PZM 中心和扩束输出镜 L_c 像方焦点重合, 和调焦透镜 L_1 (焦距为 f_1) 物方焦点重合. 调焦透镜 L_1 和耦合透镜 L_2 (焦距为 f_2) 形成第二个共焦系统, 耦合透镜 L_2 的像方焦点和物镜 L_{ob} (焦距为 f_{ob}) 后焦点中心重合, 物镜后瞳位于物镜后焦点. DM 为双色反射镜, 用于将捕获激光耦合进入大数值孔径物镜形成强会聚光场以产生光学梯度力.

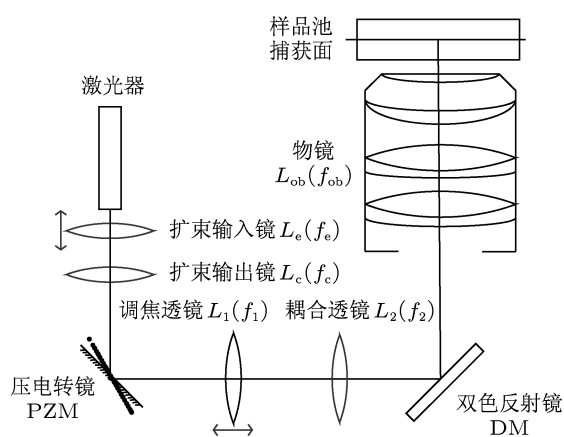


图 1 基于压电转镜、扩束输入镜和调焦透镜的光镊阱位操控示意图

光镊最基本的操控是对被捕获微粒进行定位和移动, 这是通过对光镊阱位的三维操控来实现的. 实验中一般通过对捕获光束进行操控以实现单个光镊相对样品池移动或者实现多个光镊之间相对运动, 因而是一种主动操控. 主动操控又可以分为径向操控和轴向操控. 径向操控是在光镊捕获平面内的阱位移动, 也称为横向操控, 一般通过激光束偏转扫描来实现. 轴向操控是指在光轴方向上的阱位移动, 也称为纵向操控, 一般通过调节光路中某个透镜的轴向位置从而改变光束会聚度来实现. 实际应用中, 经常需要同时实现光镊的径向操控和纵向操控, 即实现光镊的三维操作. 要满足上述操控要求的光镊基本设置如图 1 所示.

3 光镊轴向阱位操控对径向阱位操控的影响

3.1 光镊径向阱位操控

如图 1 所示, 利用压电转镜 PZM 对捕获光束的偏转就可以实现光镊在捕获面的径向操控. 压电转镜 PZM 由计算机控制的压电偏转器驱动, 操作精度高, 反射光能量损失很低.

调焦透镜 L_1 、耦合透镜 L_2 和物镜 L_{ob} 形成了共焦系统, 这里称之为 6F 系统. 物镜 L_{ob} 焦面是样品平面, 即光镊捕获面. 光线从透镜 L_1 物方焦面传到物镜 L_{ob} 焦面的变换关系为

$$\begin{pmatrix} x' \\ \theta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{f_1 f_{ob}}{f_2} \\ \frac{f_2}{f_1 f_{ob}} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \theta \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中 x 和 θ 是分别是调焦透镜 L_1 物方焦面光线位置和光线角度, x' 和 θ' 是分别是物镜 L_{ob} 焦面光线位置和光线角度. 可见, 光线在奇数个透镜物方焦面和像方焦面之间传输, 角度偏转 θ 转化为横向位移 $x' = -(f_1 f_{ob}/f_2)\theta$, 横向位移 x 转化为角度偏转 $\theta' = (f_2/f_1 f_{ob})x$. 假设各器件完全共轴安装, 压电转镜只引入捕获光线的角度偏转 θ , 而没有带来横向位移. 因此, 物镜焦平面上光线横向位移为 $x' = -(f_1 f_{ob}/f_2)\theta$. 据此, 假设定义灵敏度为 $x'/\theta = -f_1 f_{ob}/f_2$, 动态操控范围为 $x'_{\max} = -(f_1 f_{ob}/f_2)\theta_{\max}$, θ_{\max} 为压电转镜引入的光线最大扫描范围, 精度为 $x'_{\min} = -(f_1 f_{ob}/f_2)\theta_{\min}$, θ_{\min} 为压电转镜引入的光线最小扫描角. 可见, 通过压电转镜实现的光镊径向平面扫描, 其精度和范围不仅受到压电转镜本身的限制, 而且还受到光路布局的影响, 扫描精度和动态扫描范围相互制约. 以 TE2000 倒置生物显微镜 (Nikon, Japan) 为例, 显微物镜 (油浸, N. A. 1.30, 100 \times) 的有效焦距 $f_{ob} = 2$ mm. 压电转镜 S-330.30 (PI, German) 对光线的最小扫描角为 $0.1 \mu\text{rad}$, 最大偏转角度可达 4 mrad . 如果选择 $f_1/f_2 = 1$, 可得光镊径向阱位操控精度为 0.2 nm , 动态扫描范围为 $8 \mu\text{m}$, 一般能够满足单分子测力等实际应用要求. 因此可以通过选择合适的 f_1 和 f_2 , 以实现所需的光镊阱位动态操控范围和操控精度, 当然同时需要考虑将捕获光束充满物镜后瞳以及光路尽量紧凑.

3.2 光镊轴向阱位操控

光镊阱位轴向移动可以分为捕获面和物镜焦面之间的移动, 以及捕获面和样品池底面之间的移动.

光镊捕获面和物镜焦面之间的移动一般通过两个步进电机分别驱动扩束输入镜 L_e 以及调焦透镜 L_1 在光轴方向移动来实现, 当然这会导致捕获面和样品池底面之间的微小移动. 若扩束输入镜 L_e 位置改变 Δd_{L_e} , 则光镊阱位的纵向位移为

$$\Delta z = \left(\frac{f_{ob}}{f_2}\right)^2 \left(\frac{f_1}{f_c}\right)^2 \Delta d_{L_e}. \quad (2)$$

若调焦透镜 L_1 位置改变 Δd_{L_1} , 则光镊阱位的纵向位移为

$$\Delta z = \left(\frac{f_{ob}}{f_2}\right)^2 \Delta d_{L_1}. \quad (3)$$

步进电机有较大的行程, 但通常操控精度只能达到微米量级, 即 Δd_{L_e} 和 Δd_{L_1} 精度只能达到微米量级. 对于 $f_{ob} = 2 \text{ mm}$, 如果 $f_2 = 100 \text{ mm}$, 调焦透镜 L_1 移动精度为 $1 \text{ }\mu\text{m}$, 阱位轴向移动精度达

到 0.4 nm , 调焦透镜 L_1 行程一般可达 50 mm , 轴向阱位动态调节范围为 $20 \text{ }\mu\text{m}$.

捕获面和样品池底面之间的较大范围移动, 主要通过升降样品池或者通过调整物镜高度来实现, 升降物镜会导致物镜与耦合透镜 L_2 共焦失调.

3.3 光镊轴向阱位操控对径向阱位操控的影响

如图 2 所示, 光镊实验中, 通过步进电机控制光路中调焦透镜 L_1 沿光轴方向移动进行光镊轴向阱位操控会导致压电转镜 PZM 与调焦透镜 L_1 物方焦面之间产生距离 ξ , 透镜 L_1 像方焦面与透镜 L_2 物方焦面之间产生距离 δ . 调节物镜来调整光镊阱位与样品池底部的距离, 会导致耦合透镜 L_2 像方焦面与物镜后焦面产生距离 ε . 另一方面, 实际光镊搭建中, 压电转镜和透镜安装位置可能存在数毫米的误差, 因此, ξ , δ 和 ε 也可以视作光学元器件的安装轴向位置误差. 从压电转镜到物镜焦面的光线转移矩阵为

$$\begin{aligned} M &= \begin{pmatrix} 0 & f_{ob} \\ -\frac{1}{f_{ob}} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \varepsilon \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & f_2 \\ -\frac{1}{f_2} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \delta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & f_1 \\ -\frac{1}{f_1} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \xi \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{\delta f_{ob}}{f_1 f_2} & \frac{\delta \xi f_{ob} - f_1 f_{ob}}{f_1 f_2} \\ \frac{f_2}{f_{ob} f_1} - \frac{\delta \varepsilon}{f_{ob} f_1 f_2} & \frac{\xi f_2}{f_{ob} f_1} + \frac{\varepsilon f_1}{f_{ob} f_2} - \frac{\varepsilon \delta \xi}{f_{ob} f_2 f_1} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

可见, 所有器件安装位置误差为零, $\xi = \delta = \varepsilon = 0$, 则 (4) 式简化为 (1) 式. 假设各器件共轴安装, 压电转镜只引入捕获光线的角度偏转 θ , 而没有带来横向位移. 物镜焦平面上横向位移为 x' , 角度偏转为 θ' :

$$x' = \frac{\delta f_{ob}}{f_1 f_2} x + \left(\frac{\delta \xi f_{ob}}{f_1 f_2} - \frac{f_1 f_{ob}}{f_2}\right) \theta, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \theta' &= \left(\frac{f_2}{f_{ob} f_1} - \frac{\delta \varepsilon}{f_{ob} f_1 f_2}\right) x \\ &+ \left(\frac{\xi f_2}{f_{ob} f_1} + \frac{\varepsilon f_1}{f_{ob} f_2} - \frac{\varepsilon \delta \xi}{f_{ob} f_2 f_1}\right) \theta. \end{aligned} \quad (6)$$

从 (5) 式第一项可知, 共焦失调情况下, 不同横向位置的光线在物镜焦平面上并没有会聚点, 可以通过增加 f_1 和 f_2 值来减小光线不同横向位置带来的影响. 对于压电转镜反射输出的中心光线, $x = 0$, 因此, 物镜焦平面上中心光线横向位移为 x' , 角度

偏转为 θ' :

$$x' = \left(\frac{\delta \xi f_{ob}}{f_1 f_2} - \frac{f_1 f_{ob}}{f_2}\right) \theta, \quad (7)$$

$$\theta' = \left(\frac{\xi f_2}{f_{ob} f_1} + \frac{\varepsilon f_1}{f_{ob} f_2} - \frac{\varepsilon \delta \xi}{f_{ob} f_2 f_1}\right) \theta. \quad (8)$$

假定光镊设计中, $f_1 = f_2 = 100 \text{ mm}$, $f_{ob} = 2 \text{ mm}$, (7) 和 (8) 式化为

$$x' = (2 \times 10^{-4} \delta \xi - 2) \theta, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \theta' &= (5 \times 10^{-1} \xi + 5 \times 10^{-1} \varepsilon \\ &- 5 \times 10^{-4} \varepsilon \delta \xi) \theta, \end{aligned} \quad (10)$$

其中, ξ , δ 和 ε 单位取 mm . 仪器经调试后, 一般压电转镜和透镜的安装位置误差不大于 10 mm . 调焦透镜 L_1 轴向位置调整将影响物镜后瞳充满度, 因此, 其行程一般不大于 50 mm . 样品池折射率和粒子周围液体折射率的不匹配对光镊捕获力影响较

大, 物镜 L_{ob} 轴向位置调整行程一般不大于 $30 \mu\text{m}$. 当 $\xi = \delta = 10 \text{ mm}$, 从 (9) 式可知径向阱位误差偏移为 $x'_{\text{err}} = 0.02\theta$, 远远小于理想径向阱位操控值 $x'_{\text{de}} = -2\theta$, 误差为 1%. 当 $\xi = \delta = 50 \text{ mm}$, 则误差项急剧增加, 这指出了在一定误差范围内调焦透镜 L_1 轴向动态操控范围. (9) 式与 ε 无关, 可以认为物镜高度调整不会影响光镊径向位置. 由于透镜 L_1 轴向位置调整值大于物镜 L_{ob} 轴向位置调整值, 即 $\xi > \varepsilon$, (10) 式中第一项影响最大, 第三项影响最小, 即调焦透镜 L_1 轴向位置调整对捕获面光线偏转影响最大, 暗示通过透镜 L_1 轴向位置调整来进行阱位轴向操控会改变光镊性能, 因而常将压电转镜处于透镜 L_1 物方焦点上, 即 $\xi = 0$, 而通过调节扩束输入镜 L_e 轴向位置来改变光镊轴向位置,

此时, 压电转镜和调焦透镜 L_1 的安装距离误差对光镊性能影响最大.

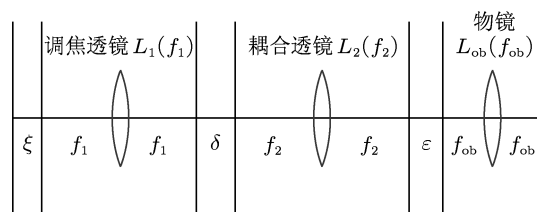


图2 光镊中调焦透镜 L_1 和物镜 L_{ob} 位置调整示意图

透镜 L_1 轴向位置调整 Δd_{L_1} , 理想捕获面轴向调整值为 $\Delta z = (f_{ob}/f_2)^2 \Delta d_{L_1}$, 因此从压电转镜到捕获面的光线转移矩阵为

$$M' = \begin{pmatrix} 1 & \left(\frac{f_{ob}}{f_2}\right)^2 \Delta d_{L_1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot M = \begin{pmatrix} \frac{\delta f_{ob}}{f_1 f_2} + \frac{\Delta d_{L_1} f_{ob}}{f_1 f_2} - \frac{\Delta d_{L_1} \delta \varepsilon f_{ob}}{f_1 f_2^3} & \frac{\delta \xi f_{ob}}{f_1 f_2} - \frac{f_1 f_{ob}}{f_2} + \frac{\Delta d_{L_1} \xi f_{ob}}{f_1 f_2} + \frac{\Delta d_{L_1} \varepsilon f_1 f_{ob}}{f_2^3} - \frac{\Delta d_{L_1} \xi \delta \varepsilon f_{ob}}{f_1 f_2^3} \\ \frac{f_2}{f_{ob} f_1} - \frac{\delta \varepsilon}{f_{ob} f_1 f_2} & \frac{\xi f_2}{f_{ob} f_1} + \frac{\varepsilon f_1}{f_{ob} f_2} - \frac{\varepsilon \delta \xi}{f_{ob} f_2 f_1} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

从 (11) 式可见, 对光镊径向阱位操控影响最大的一项仍然是 $x_{\text{de}} = -(f_1 f_{ob}/f_2)\theta$.

扩束输入镜 L_e 轴向位置改变 Δd_{L_e} , 不会引起光线横向位置变化, 但入射到压电转镜上的光线偏转角度为

$$\theta' = \frac{\Delta d_{L_e} x}{f_e f_c}. \quad (12)$$

因此, 压电转镜反射输出光偏转角度应该用 $\Delta d_{L_e} x/f_e f_c + \theta$ 表示, θ 为压电转镜引起的光线偏转角. 扩束输入镜 L_e 轴向位置改变不大时, $\Delta d_{L_e} x/f_e f_c \ll \theta$, 这项误差项可以忽略不计.

4 结论

本文根据矩阵光学, 分析了扩束输入镜 L_e 、调焦透镜 L_1 、物镜 L_{ob} 轴向位置调整, 以及压电转镜和调焦透镜 L_1 等器件安装位置误差对光镊阱位操控精度的影响, 得到了物镜高度调整基本不会影响光镊径向位置, 压电转镜和调焦透镜 L_1 的安装位置误差对光镊径向阱位操控精度影响最大等结论, 为光镊设计和调整提供理论和实验指导.

- [1] Clancy B E, Behnke-Parks W M, Andreasson J O L, Rosenfeld S S, Block S M 2011 *Nat. Struct. Mol. Biol.* **18** 1020
- [2] Guydosh N R, Block S M 2009 *Nature* **461** 125
- [3] Collin D, Ritort F, Jarzynski C, Smith S B, Tinoco I, Bustamante C 2005 *Nature* **437** 231
- [4] Woodside M T, Garcia-Garcia C, Block S M 2008 *Curr. Opin. Chem. Biol.* **12** 640
- [5] Qu X H, Wen J D, Lancaster L, Noller H F, Bustamante C, Tinoco I 2011 *Nature* **475** 118
- [6] Neuman K C, Nagy A 2008 *Nat. Methods* **5** 491
- [7] Phillips D B, Simpson S H, Grieve J A, Gibson G M, Bowman R, Padgett M J, Miles M J, Carberry D M 2011 *Opt. Express* **19** 20622
- [8] Preece D, Bowman R, Linnenberger A, Gibson G, Serati S, Padgett

- M 2009 *Opt. Express* **17** 22718
- [9] Ojala H, Korsback A, Wallin A E, Haeggstrom E 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 181104
- [10] Wallin A E, Ojala H, Ziedaite G, Haeggstrom E 2011 *Rev. Sci. Instrum.* **82** 083102
- [11] Lang M J, Asbury C L, Shaevitz J W, Block S M 2002 *Biophys. J.* **83** 491
- [12] Nambiar R, Gajraj A, Meiners J C 2004 *Biophys. J.* **87** 1972
- [13] Fällman E, Axner O 1997 *Appl. Opt.* **36** 2107
- [14] Gong Z, Chen H T, Xu S H, Li Y M, Lou L R 2006 *Opt. Commun.* **263** 229
- [15] Ren Y X, Wu J G, Chen M, Li H, Li Y M 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 028703
- [16] Zhou J H, Tao R Z, Hu Z B, Zhong M C, Wang Z Q, Cai J, Li Y M 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 068701
- [17] Yao X C, Li Z L, Guo H L, Cheng B Y, Zhang D Z 2001 *Opt. Precision Eng.* **1** 55 (in Chinese) [姚新程, 李兆霖, 郭红莲, 程丙英, 张道中 2001 光学精密工程 **1** 55]
- [18] Jiang Y Q, Guo H L, Liu C X, Li Z L, Cheng B Y, Zhang D Z, Jia S T 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1721 (in Chinese) [降雨强, 郭红莲, 刘春香, 李兆霖, 程丙英, 张道中, 贾锁堂 2004 物理学报 **53** 1721]
- [19] Liu C X, Guo H L, Jiang Y Q, Li Z L, Cheng B Y, Zhang D Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1162 (in Chinese) [刘春香, 郭红莲, 降雨强, 李兆霖, 程丙英, 张道中 2005 物理学报 **54** 1162]

Influences of axial position manipulation and misalignments of optical elements on radial trap position manipulation*

Ren Hong-Liang[†] Ding Pan-Feng Li Xiao-Yan

(College of Information Science and Engineering of Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

(Received 14 May 2012; revised manuscript received 29 May 2012)

Abstract

Optical tweezers in which a tightly focused laser beam is used to trap micron-sized or nanometer-sized particles have become indispensable tools for measuring the forces and displacements associated with molecular biomechanical events in a noninvasive manner. A complete beam manipulation system is composed of a beam expander input lens, beam expander output lens, focusing lens, piezoelectric translator mirror to control the trap position, with the overfilling degree of the objective entrance aperture retained. The accurate manipulations of trap position in three dimensions are the bases for the realization of the position clamp and force clamp. The optical path of optical tweezers based on infinity corrected conjugate microscope is calculated using matrix optics. The influences on radial trap position manipulation caused by axial position adjustment of focusing lens and objective, and by the installation location error of focusing lens and piezoelectric translator mirror are analyzed. The result shows that axial position adjustment of objective introduces a nominal error in radial trap position manipulation. The misalignments of focusing lens and piezoelectric translator mirror have a greater influence on optical tweezers performances. The theory points out the accurate dynamic axial position adjustment range, which is useful to optical tweezers design and experiments.

Keywords: optical tweezers, design, trap position manipulation, error

PACS: 07.60.-j, 87.64.M, 33.80.Gj

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61178015), the Natural Science Foundation of Fujian Province, China (Grant No. 2012J05120), the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. JB-ZR1146), and the Science and Technology Program of Xiamen, China (Grant No. 3502Z20113017).

[†] E-mail: renhongliang@ustc.edu