

# 光子芯片中相对论引力透镜效应的模拟与光捕获\*

刘辉<sup>†</sup> 祝世宁

(南京大学物理学院 固体微结构国家重点实验室  
人工微结构与量子调控协同创新中心 南京 210093)

2013-10-22收到

<sup>†</sup> email: liuhui@nju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20131105

“光”是自然界中最神秘的物质之一，近代物理学的几次重要革命，都是发源于人们对“光”的探索。爱因斯坦为了描述宇宙时空的本质，建立了广义相对论，其最著名的预言是，光线在天体附近引力场中会发生弯曲(见图1(a))。1919年，天文学家爱丁顿在日食过程中，观测到了太阳引力场中光线的弯曲，直接验证了近代最伟大理论的预言。同样，由于光是世界上速度最快的信息载体，对光的捕获和操控，就像理解光的本质一样，也是人们孜孜不断追求的目标。进入21世纪以来，由于信息技术突飞猛进的发展和光子集成的应用需求，人们越来越需要在微小芯片上操控光子的行为。

一般来说，光的传播行为是由介质的折射率决定的。如果我们能够控制介质的折射率，我们就能控制光的传播。从这个基本想法出发，人们在光子芯片上设计出了各种新颖的人工微结构材料，例如光子晶体、等离激元波导、超构材料等。其中超构材料是由亚波长的微纳结构单元组成。由于这些微纳结构单元完全是人为设计和制备出来的，因此人们可以通过设计不同微纳结构单元并且让它们按一定规律排列来实现对折射率的调控，从而展示出许多具有新奇特性的超构材料，例如负折射材料<sup>[1]</sup>和超级透镜<sup>[2]</sup>。近年来，人们又尝试将爱因斯坦的弯曲时空概念与超构材料结合在一起，提出了变换光学的概念。其基本想法是：光在弯曲几何空间中沿着曲线传播，这类弯曲几何空间在物理上可以在折射率连续改变的

超构材料中实现。因此，如果能够得到折射率连续改变的超构材料，就能够连续地控制光的传播，得到一些非常奇异的性质。变换光学最典型的应用就是隐身斗篷<sup>[3, 4]</sup>，在这种材料中，折射率连续改变，使得光像水流一样，无散射地绕过一个物体。除了隐身斗篷效应之外，人们还可以模拟天体周围的引力场来实现对光子的调控<sup>[5]</sup>。虽然目前已经有很好的模拟天体引力场的理论设计<sup>[6-8]</sup>，但有报道的实验研究只是用金属谐振结构实现微波

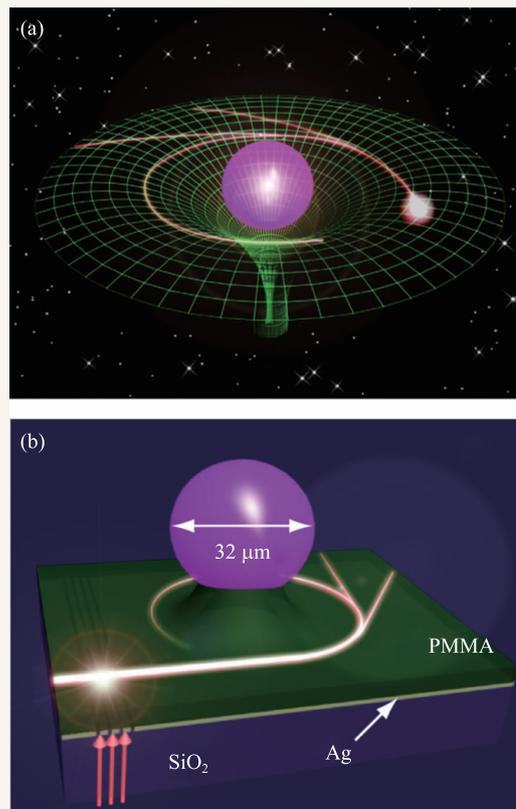


图1 光子芯片中引力透镜效应的模拟 (a) 天体周围引力场中光线弯曲；(b) 光学微腔周围光线弯曲

\* 国家自然科学基金(批准号: 11021403, 60990320)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB933501, 2012CB921500)、南京大学登峰计划B层次资助项目

段的引力场模拟<sup>[9]</sup>。在可见光和近红外波段模拟引力场，实现宽波段的光子捕获，在实验技术上是很大的挑战。

最近，我们课题组采用简单而巧妙的旋涂加热工艺，制备出了一种能够模拟天体引力透镜效应的渐变折射率光学微腔。在实验过程中，我们将直径为32 μm的聚苯乙烯微球与电子束光刻胶(PMMA)混合在一起，然后利用磁力搅拌机将微球均匀分散，再利用旋涂机将混合溶液旋涂到一个表面镀了金属膜的石英衬底表面。由于PMMA溶液与微球表面的浸润作用，在微球表面会形成弯曲的液体表面。经过加热烘干处理，这种弯曲的液体会凝固为聚合物波导。这样，我们就在一块微小的光子芯片上，制备出了一种以微球为对称中心、厚度随着半径逐渐变化的渐变波导(见图1(b))。我们采用光学等厚干涉技术(见图2(a))和原子力扫描形貌技术(见图2(b))精确测量了波导的厚度分布轮廓。两种测量方法所得的结果都表明：随着距离圆心半径的减小，波导厚度是按照半径的负四次方变化，即 $h(r) \propto r^{-4}$ 。根据平面介质波导的色散理论，波导模的等效折射率是随着厚度的增加而增加的。因此，在实验制备的渐变波导中，距离微球越近，波导等效折射率就越大。结合实验原子力扫描

数据和波导色散理论，我们直接精确计算出了渐变波导等效折射率的分布，其满足半径平方倒数关系： $n_e(r) \propto r^{-2}$ 。可以看到，我们所得到的是一种折射率具有类似中心引力场分布的光学微腔(见图2(c))。在此微腔结构中，中心处的微球可以模拟对应质量很大的天体，而微球周围的渐变波导则模拟对应着天体周围的引力场，光子在这种微腔中的传播特性可以模拟出天体引力场中光线的弯曲。

实验中，为了将激光耦合进波导，我们采用聚焦离子束技术在波导与衬底界面上制备了周期性耦合光栅，当外界激光束照射在这个光栅上面时，光就会转化为波导中传播的光束。通过精确移动入射激光光斑的位置，我们可以连续改变波导中光束与微球中心的距离。另外，为了直接观测光束在微腔中的传播路径，我们在聚合物波导中掺入了很多细小的CdSe/ZnS量子点。这些量子点具有很高的发光效率，当波导中的光束遇到量子点时，就会发出荧光，通过分析这些均匀分布的量子点发射的荧光，可以清楚地观测到光束在波导中的传播路径。通过这种间接的荧光成像技术，我们测量了不同入射距离的光束在微腔周围的传播情况。结果证明，与黑洞周围引力场“视界”类似，这种微腔也存在一种临界半径 $r_c = 39 \mu\text{m}$ ：当光子的传播路径在临界半径区域之外时，光子不会被捕获，只是路径发生弯曲；当光子的传播路径通过临界半径包围的区域时，光子就会被微腔捕获，就永远出不来了；而当光束与微球中心距离正好等于临界半径时，光子就会在具有临界半径的圆周上做稳定的轨道运动。在我们实验的样品上，由于激光在传播过程中不停地激发量子点，因此光子能量最后都以荧光的形式垂直于芯片表面辐射出来。同时，我们在计算机上模拟了不同入射光子的传播路径，模拟结果与实验结果符合得很好(见图3)。

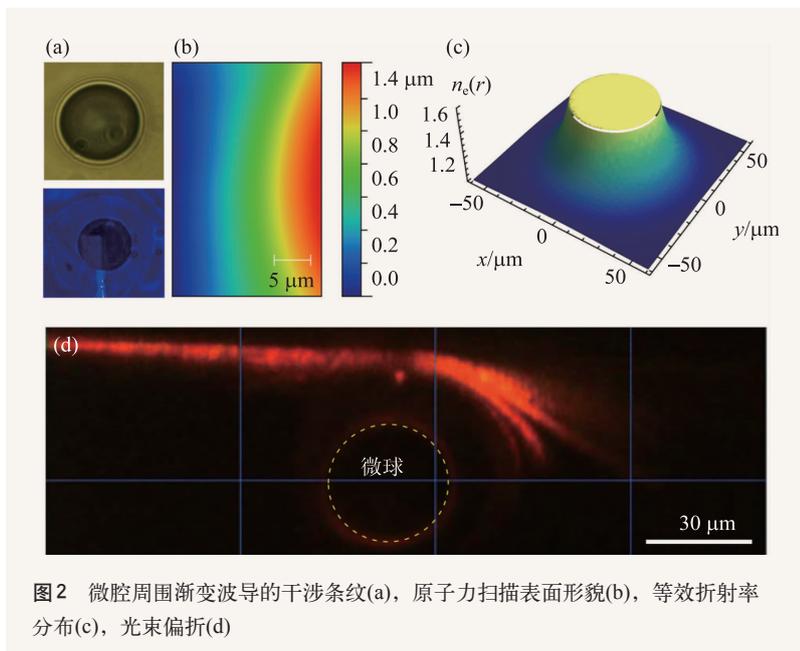


图2 微腔周围渐变波导的干涉条纹(a)，原子力扫描表面形貌(b)，等效折射率分布(c)，光束偏折(d)

为了进一步从理论上将这种芯片上的光学微腔与天体引力场进行类比,我们采用广义相对论的爱因斯坦引力方程对光束经过微腔后的偏折角进行了计算。在模型中,微腔中渐变波导完全对应着天体周围引力场所产生的弯曲空间:  $n_e(r) = \sqrt{g_{rr}/g_{00}}$ , 其中  $n_e(r)$  是渐变波导的等效折射率, 而  $g_{00}$  和  $g_{rr}$  则是时空的度规张量。图 4 中给出了理论计算结果(实线)和实验测量结果的比较(圆点)。由于波导中光束具有一定的宽度, 我们定义光束两个边缘与微球中心之间的距离分别是  $r_{11}$  和  $r_{12}$ , 偏折角是  $\theta_1$  和  $\theta_2$ 。结果表明, 当光束的传播路径与微球中心的平均距离  $\langle r \rangle = (r_{11} + r_{12})/2$  减小时, 光束的偏折角度  $\theta_1$  (红色实线) 和  $\theta_2$  (蓝色实线) 是逐渐增加的。而且当光束距离微球非常近的时候, 光束偏折角度迅速增加, 直至发散, 这说明光束已经不能逃离微腔, 完全被捕获进去了。

该工作最近发表在《自然—光子学》杂志上<sup>[10]</sup>, 《自然》杂志主页“NEWS&COMMENTS”专栏对这个工作进行了评述, 国际著名超构材料专家 Leonhardt 教授评价这个工作是“第一次在光子芯片上, 用简单的实验, 精确而漂亮地演绎了爱因斯坦广义相对论所描述的部分思想”。与以前的大多数窄带共振光学微腔相比, 我们所设计的渐变折射率微腔是一种具有宽波段特性的非共振光学微腔, 可以捕获较宽波段的光子, 这也发展了光学微腔一种新的功能, 可以应用于光子芯片上的宽波段激光器、光电探测、太阳能电池等。

**致谢** 感谢南京大学博士生盛冲、汪戈为完成本工作所做的重要贡献, 也感谢美国路易斯安娜技术大学 Genov 博士在实验结果理论分析方面所提供的帮助。

### 参考文献

[1] Pendry J B. Contemporary Physics, 2004, 45: 191  
 [2] Pendry J B. Phys. Rev. Lett., 2000, 85: 3966  
 [3] Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Science, 2006, 312: 1780

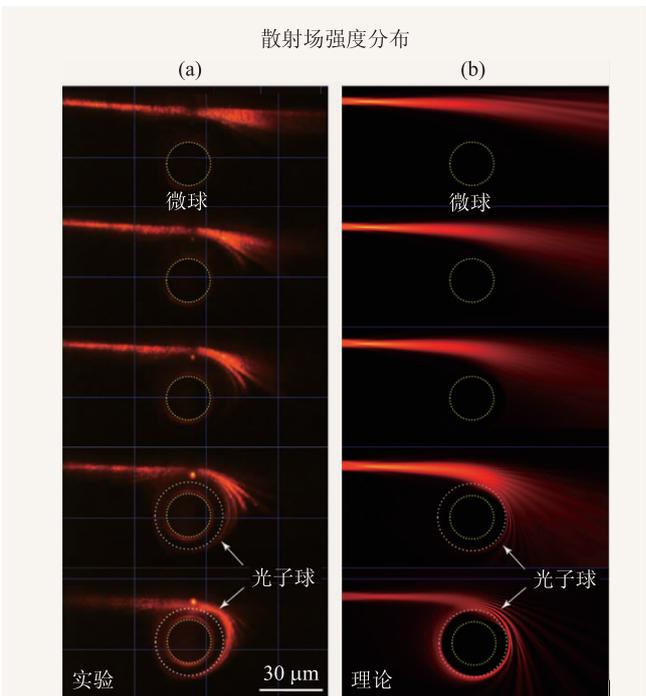


图 3 微腔中光捕获效应的实验结果(a)与计算机模拟结果(b)的比较

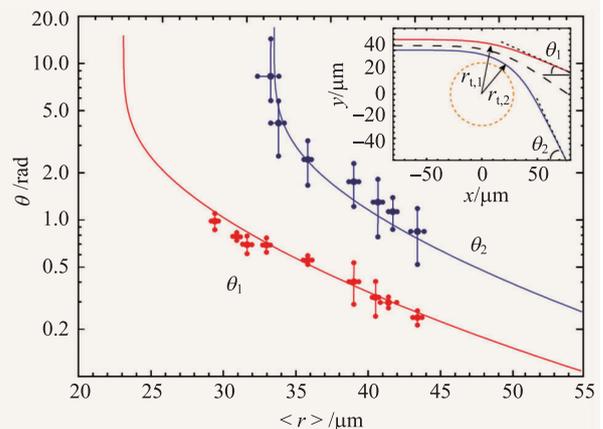


图 4 微腔中光束偏折角的实验结果(圆点)与爱因斯坦方程计算结果(实线)的比较

[4] Leonhardt U, Science, 2006, 312: 1777  
 [5] Leonhardt U, Philbin T G. New Journal of Physics, 2006, 8: 247  
 [6] Genov D A, Zhang S, Zhang X. Nature Physics, 2009, 5: 687  
 [7] Evgenii E. Narimanova E E, Kildisheva A V. Appl. Phys. Lett., 2009, 95: 041106  
 [8] Chen H Y, Miao R X, Li M. Optics Express, 2010, 18: 15183  
 [9] Cheng Q, Cui T J, Jiang W X *et al.* New Journal of Physics, 2010, 12: 063006  
 [10] Sheng C, Liu H, Wang Y *et al.* Trapping light by mimicking gravitational lensing, Nature Photonics, published online: 29 September 2013 (doi: 10.1038/nphoton.2013.247)