

锥形空心银波导的聚焦特性*

曾夏辉^{1)2)†} 范滇元²⁾

1) (闽江学院物理学与电子信息工程系, 福州 350108)

2) (中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(2009 年 8 月 25 日收到; 2009 年 11 月 27 日收到修改稿)

利用时域有限差分(FDTD)方法数值演示了一种能光学引导和聚焦激光的锥形空心银波导, 数值模拟结果表明这种锥形空心银波导能把激光聚焦成一个极小的、直径只有 $1 \mu\text{m}$ 、强度高度局域性的光斑. 对锥形波导能光学引导和聚焦激光的物理机理作了分析和探索, 并进一步探讨了激光倾斜入射、波导几何结构对锥形波导聚焦特性造成的影响, 这些研究结果对于锥形光学的应用、快点火或产生高能带电粒子中锥靶结构的最佳设计具有重要的参考价值.

关键词: 锥形波导, 聚焦特性, 时域有限差分

PACC: 4282, 4280L, 4260F

1. 引 言

2001 年 Kodama 等人^[1]实验上原本为给点火的短脉冲激光让出一个传输通道而引入一个锥形结构的波导, 结果却意外发现这种锥形波导具有引导和聚焦激光的功能, 自此人们越来越关注这种锥形波导的聚焦特性^[2-4]. 然而, 研究人员对锥形波导的聚焦特性以及造成这种聚焦的物理机理一直都未完全弄清楚.

本文中设计了一种锥形的空心银波导, 并利用时域有限差分(FDTD)方法^[5]数值模拟了光通过该锥形空心银波导的传输过程, 结果表明我们设计的锥形空心银波导能光学引导和聚焦激光, 它能把一束半高全宽(HWFM)为 10 个波长的激光聚焦成一个极小的、直径只有 $1 \mu\text{m}$ 高度局域性的光斑. 随后, 对其能光学引导和聚焦激光的物理机理作了分析和探索, 并进一步探讨了激光倾斜入射以及波导几何结构对锥形波导聚焦特性造成的影响.

2. 计算模型

我们首先设计的锥形空心银波导的结构是两端开口、入口和锥尖出射口直径分别为 30λ , 2λ , 锥

壁厚 2λ , 锥角为 30° , 如图 1 所示. 为进一步探讨波导几何结构对锥聚焦激光的影响, 我们还设计了锥角从 10° 变化到 90° 、锥尖出射口从 0.8λ 变化到 5λ 几个不同的空心锥结构. 图中 z 轴表示激光的传输方向, x 轴表示锥形波导的横向方向. 光波波长 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 的入射激光, 其横向 x 方向呈 $\exp[-(x-x_0)^2/w^2]$ 所表达的高斯分布, 从锥形波导的大口径入射端沿着 z 轴从左至右向小口径出射端传输, 其中 $x_0 = 20\lambda$, 对应锥形波导的中心旋转轴, $w = 5\lambda$. 二维 FDTD 数值模拟的空间为 $40\lambda \times 80\lambda$, 银材料满足 Drude 色散模型

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty - \omega_p^2 [\omega(\omega + i\Gamma)]^{-1}, \quad (1)$$

其中 $\varepsilon_\infty = 3.70$, $\omega_p = 13673 \text{ THz}$, $\Gamma = 27.35 \text{ THz}$ ^[6].

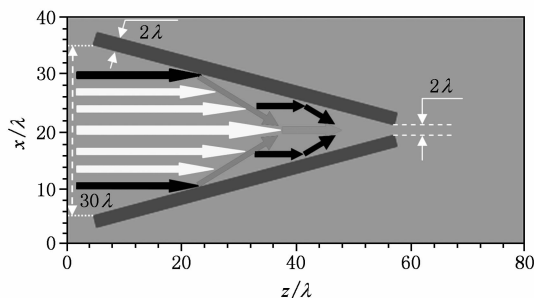


图 1 两端开口的锥形空心银波导纵向剖面图及引导和聚焦激光的光线追迹

* 国家自然科学基金(批准号:10674045, 10576012, 60538010)资助的课题.

† E-mail: xiahuz@126.com.

3. 数值模拟

图 2 (a), (b), (c) 分别显示的是横电 (TE) 波传输通过锥形空心银波导时电磁场分量 H_x , E_y 和 z 方向玻印亭矢量 S_z 的空间分布. 我们知道, 对于 TE 波, z 方向玻印亭矢量 S_z 定义为

$$S_z = \frac{1}{2} \text{Re}(E_y \cdot H_x^*). \quad (2)$$

S_z 描述的是 z 方向的能量流. 从图 2 (a), (b), (c) 所显示的数值模拟结果中我们可以很清楚地看到锥形空心银波导能够光学引导和聚焦激光. 为了更清楚地看到光在锥形波导出口端(锥尖)的聚焦特性, 我们分别放大了图 2 (a), (b), (c) 中 $z = 40 \sim 65\lambda$ 和 $x = 10 \sim 30\lambda$ 区域, 结果如图 2 (d), (e), (f) 所示.

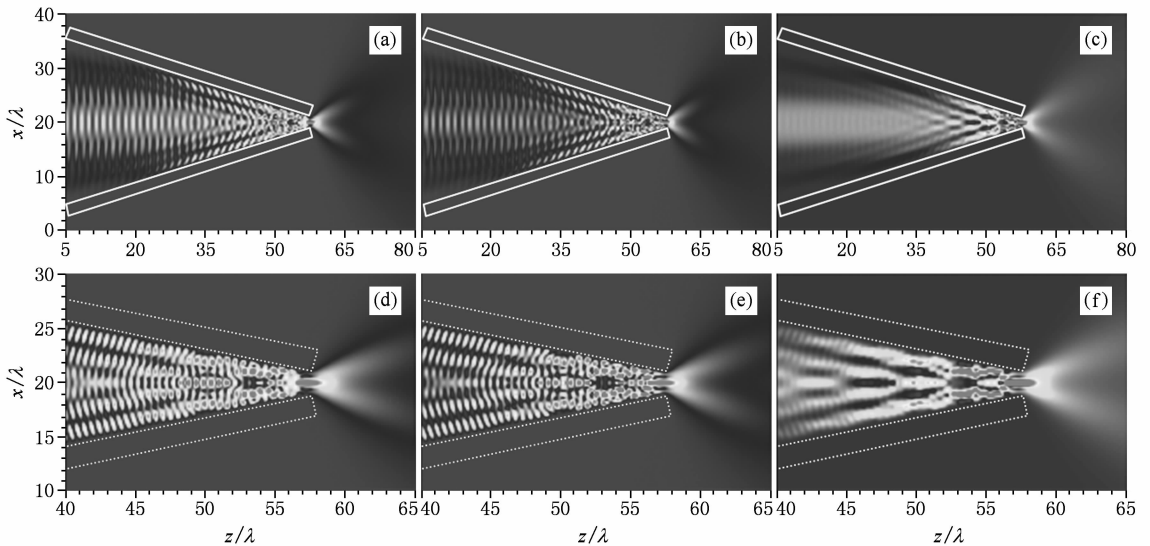


图 2 TE 波通过锥形空心银波导时各电磁场分量和 z 方向玻印亭矢量的空间分布 (a) H_x ; (b) E_y ; (c) S_z ; (d) H_x ($z = 40 \sim 65\lambda$, $x = 10 \sim 30\lambda$); (e) E_y ($z = 40 \sim 65\lambda$, $x = 10 \sim 30\lambda$); (f) S_z ($z = 40 \sim 65\lambda$, $x = 10 \sim 30\lambda$)

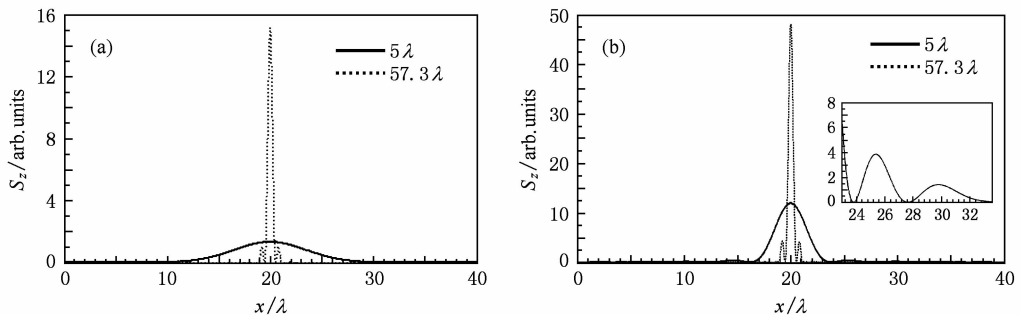


图 3 玻印亭矢量 S_z 在锥形波导出口(虚线)和入口(实线)两端附近的横向分布 (a) 一束激光入射的情况; (b) 三束激光同时入射的情况, 插图(b)中一小部分的放大图

图 3 (a) 给出了玻印亭矢量 S_z 在锥形波导出(虚线)、入(实线)两开口端附近的横向分布. 结合图 1 和图 3 (a) 所示的数值模拟结果, 我们可以很容易观察到 HWFM 初始为 10λ 的激光从锥形波导的大口径左端进入锥形空心波导后与锥壁发生作用, 光受到锥壁的不断反射, 两旁锥壁反射回来的光与沿锥形波导中心轴传输的光发生干涉, 干涉叠加后的光场的横向分布受到锥壁的压缩, 从而使得光能量进一步集中. 叠加后的光场在向前传输中继续重复上述物理过程, 直至光到达波导的右端小口径出口, 激光被锥形波导引导和聚焦. 聚焦处的光斑直径只有大约 $1 \mu\text{m}$, 此时光的能量流强度大约是入口处能量流强度的 10 倍, 这一点从图 3 (a) 中可以清楚地看到. 此后, 聚焦光保持这一极小的光斑尺寸向前传输大约一个瑞利距离, 最终由于光的衍射效应而扩散开来.

图 4 (a), (b), (c) 分别显示的是横磁(TM)波传输通过锥形空心银波导时电磁场分量 E_x , H_y 和 z 方向玻印亭矢量 S_z 的空间分布. 对于 TM 波, z 方向玻印亭矢量 S_z 定义为

$$S_z = \frac{1}{2} \text{Re}(E_x \cdot H_y^*). \quad (3)$$

为清楚地看到光在锥形波导出口端的传输特性, 我们分别放大了图 4 (a), (b), (c) 中 $z = 40-65\lambda$ 和 $x = 10-30\lambda$ 区域, 放大的结果示于图 4 (d), (e), (f) 中. 从图 4 中可以清楚地看到相当一部分激光能量被锥形空心银波导的内壁反射和吸收, 仅有很少一部分激光被锥形波导引导到达锥顶端. 与 TE 波入射相比, 这种情况聚焦传输的距离

非常短. 值得指出的是, 尽管在锥内壁和出口锥尖的端面上由 TM 波激发出表面等离子体激元波 (SPPs)^[7, 8], 但是 SPPs 在此的产生却没有增强锥形波导聚焦激光的能力, 反而使光变得更加扩散, 其原因在于强烈局域的 SPPs 是在锥内壁和锥尖出口的端面上产生的, 毋庸置疑, 锥尖出口端面产生的 SPPs 是沿着锥尖端面表面传输的, 这使得光束扩散, 而锥内壁产生的 SPPs 无疑是大量的 TM 波的激光能量耦合形成的结果, 也就是说大量的激光能量被锥内壁所吸收, 很少一部分被锥形波导引导到达锥尖, 从而使得光聚焦效应变差. 因此, 接下来的讨论我们主要在 TE 波入射的情况下展开.

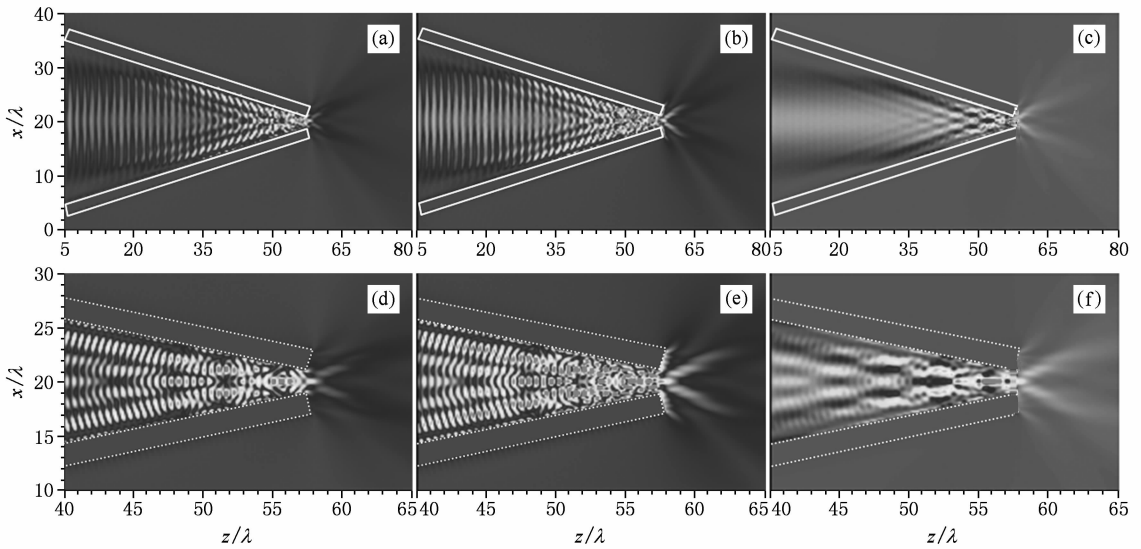


图 4 TM 波通过锥形空心银波导时各电磁场分量和 z 方向玻印亭矢量的空间分布 (a) E_x ; (b) H_y ; (c) S_z ; (d) E_x ($z = 40-65\lambda$, $x = 10-30\lambda$); (e) H_y ($z = 40-65\lambda$, $x = 10-30\lambda$); (f) S_z ($z = 40-65\lambda$, $x = 10-30\lambda$)

图 5 (a), (d) 分别显示的是 TE 波以与 z 轴逆时针方向成 5° 或 7° 入射角进入锥形波导传输时的玻印亭矢量 S_z 的空间分布. 从这些模拟结果中可以看出, 激光聚焦效果随着倾斜入射角的增大而变得越来越差, 当倾斜入射角达到大约 10° (这里没有给出模拟结果图) 后, 激光能量基本上都被锥壁反射和吸收了, 不再能被锥形波导引导和聚焦了. 然而, 很有意思的是, 当两束对称倾斜 (与 z 轴对称) 的激光同时注入锥形波导时, 激光能再次被锥形波导很好地引导和聚焦, 也就是说, 锥形波导引导和聚焦激光的能力得到了提高, 这一点我们可以从图 5 (b), (e) 中得到很好的证实. 图 5 (b), (e) 分别显示的是两束激光以与 z 轴成 5° 和 -5° 或 7° 和 -7° 同

时注入锥形波导传输时的玻印亭矢量 S_z 的空间分布. 为了能够更清楚地看到波导锥尖处的聚焦情况, 我们进一步对图 5 (b), (e) 中 $z = 40-65\lambda$ 和 $x = 10-30\lambda$ 区域的数值模拟结果进行了放大, 放大的结果分别示于图 5 (c), (f). 之所以出现这种奇异的物理现象在于当两束倾斜的光同时入射到锥形波导中时, 两束光间发生干涉, 干涉叠加形成的场在此后波导传输过程中受到锥壁的反射, 由两旁锥壁反射回来的光与沿锥形波导中心轴传输的光发生干涉, 光场的横向分布被压缩, 这样就使得光的 HWM 变小, 叠加产生的光场在向前传输中不断重复上述物理过程, 直至光到达波导的右端小口径出口, 从而使得激光被锥形波导引导和聚焦.

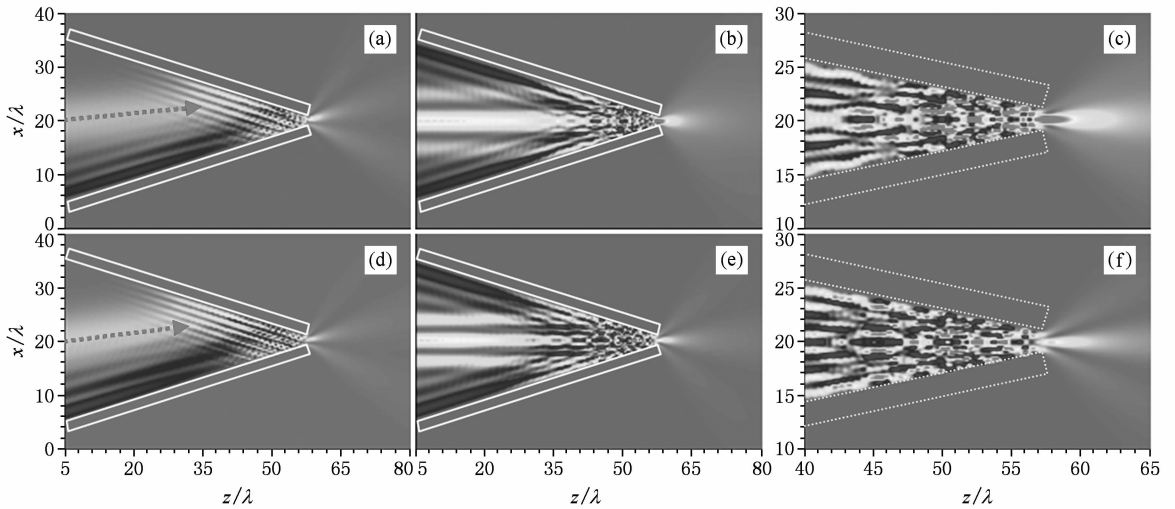


图5 一束或两束倾斜入射的 TE 波通过锥形空心银波导时坡印亭矢量 S_z 的空间分布 (a) 一束倾斜 5° 的光入射; (b) 两束分别倾斜 5° 和 -5° 的光入射; (c), (b) 中 $z=40-65\lambda, x=10-30\lambda$ 区域的放大图; (d) 一束倾斜 7° 的光入射; (e) 两束分别倾斜 7° 和 -7° 的光入射; (f), (e) 中 $z=40-65\lambda, x=10-30\lambda$ 区域的放大图

对锥形波导能光学引导和聚焦激光的物理机理已经在上述部分作了初步的分析和探索,为进一步证实我们的结论,我们模拟了三束激光分别以 $0^\circ, 5^\circ$ 和 -5° 同时入射到锥形波导中后光是如何被引导和聚焦的,模拟计算的结果示于图 6 和图 3(b). 图 6 给出了三束激光同时注入锥形波导传输时的坡印亭矢量 S_z 的空间分布,图 3(b) 给出了坡印亭矢量 S_z 在锥形波导出(虚线)、入(实线)两开口端附近的横向分布. 这些数值模拟结果蕴含着光被锥形波导引导和聚焦的物理机理. 对这种物理机理我们可以利用光线追迹模型(见图 1)作出如下阐述:一束横向呈高斯分布的激光可近似分成三部分,一部分中心光(白色实线箭头标注),两部分边缘光(黑色实线箭头标注),当光在锥形波导中传输时两个边缘部分的光首先碰到锥壁,锥壁对这些光进行反射和吸收,反射的两部分光(点线箭头标注)与向前传输

的中心光发生干涉,使横向场重新分布,光场横向分布由于受到倾斜锥壁的作用而压缩,光能量逐渐趋于集中,正如图 6(a),图 3(b)所描述的在锥形波导入口处的场景类似,干涉叠加后重新分布的场在向前传输过程中不断重复上述的物理过程,直至光到达波导的出口端,从而实现光的引导和聚焦.

值得指出的是锥形空心波导的几何结构对锥形引导和聚焦激光有着重要的影响^[10]. 图 7 显示的是激光经锥尖出射口直径是 2λ 、锥角从 6° 变化到 90° 的锥形空心银波导的坡印亭矢量 S_z 的空间分布. 从图 7 所显示的数值结果中可以很清楚地看到锥形引导和聚焦激光强烈依赖锥形空心银波导的锥角. 引导和聚焦激光的透射随着锥角的增大而变小,但由于受波导数值孔径的效应,锥角又不能太小,在锥长相同的情况下,入射光耦合进入波导的激光太少,造成激光能量损耗.

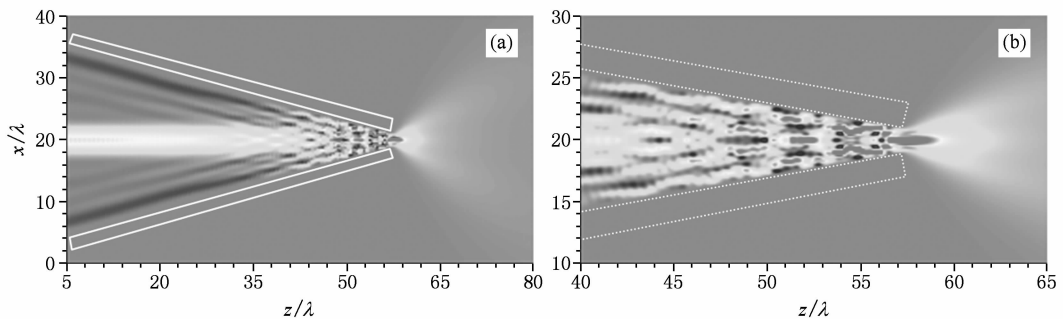


图6 三束激光分别以 $0^\circ, 5^\circ$ 和 -5° 同时注入锥形空心银波导时坡印亭矢量 S_z 的空间分布 (a) $z=5-80\lambda, x=0-40\lambda$ 区域; (b) $z=40-65\lambda, x=10-30\lambda$ 区域

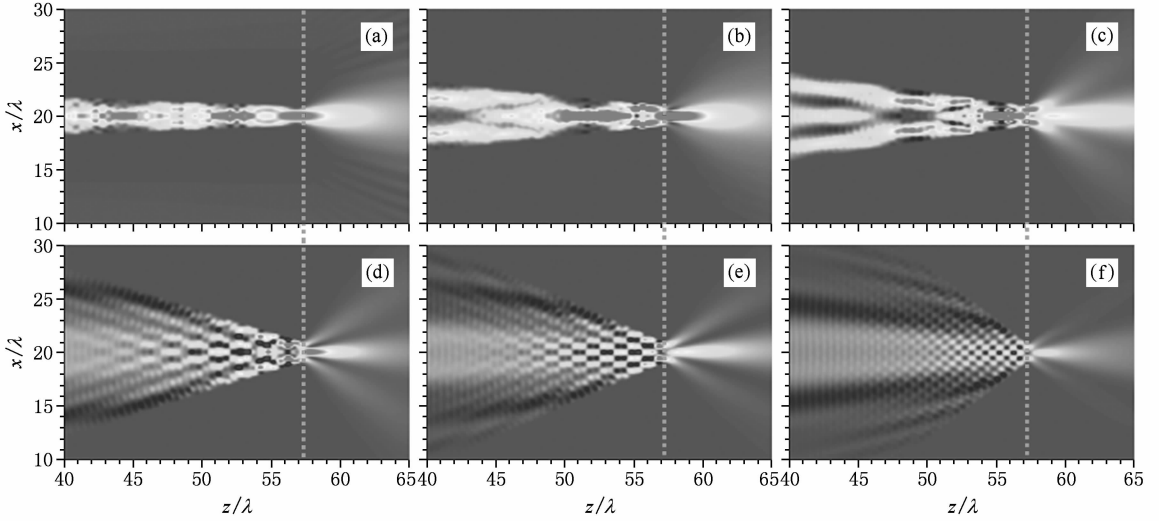


图 7 当激光通过不同锥角的锥形空心银波导时的玻印亭矢量 S_z 的空间分布 (a) 6°; (b) 16°; (c) 22°; (d) 45°; (e) 60°; (f) 90°. 虚线表示锥尖出口平面

不仅锥角能对锥引导和聚焦激光特性造成影响,而且锥形波导的锥尖尺寸的大小对这种聚焦特性也会造成很大的影响. 我们已经知道随着锥尖尺寸的减小,传输模会逐个被截止从而造成透射下降^[4],但是当锥尖尺寸增加到一定大小后再增大则会造成出射的光束发散,激光不能被锥形空心波导

引导和聚焦了. 为清楚地看到这种影响的结果,图 8 显示了激光经锥角是 30°、锥尖直径尺寸从 0.8λ 变化到 5λ 的锥形空心银波导的玻印亭矢量 S_z 的空间分布,数值模拟的结果清楚地证实了我们上述的分析.

同时还应指出的是锥形空心银波导对不同光

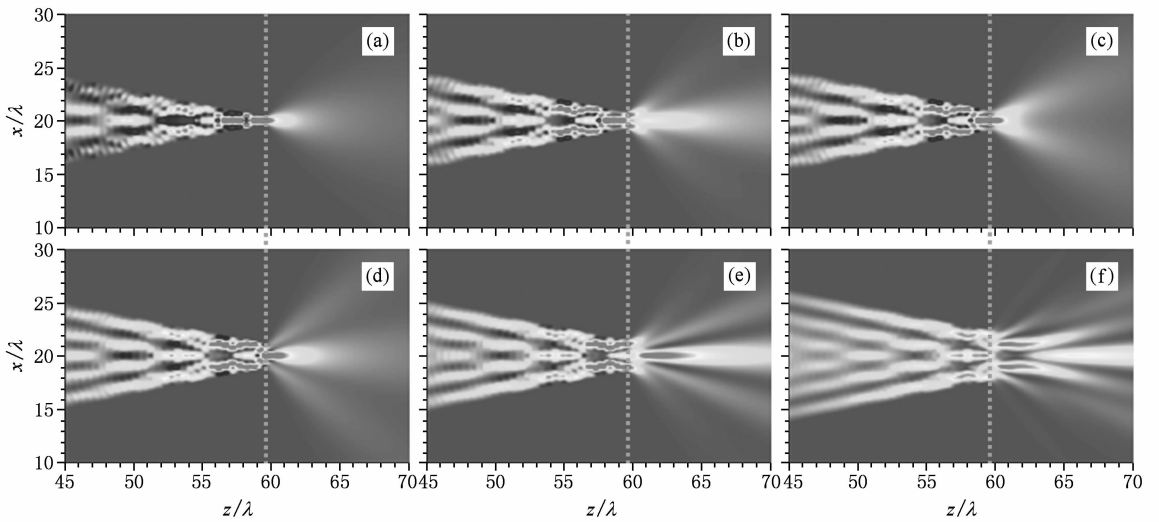


图 8 当激光通过不同锥锥尖尺寸的锥形空心银波导时的玻印亭矢量 S_z 的空间分布 (a) 0.8λ ; (b) 1.6λ ; (c) 2λ ; (d) 2.4λ ; (e) 3λ ; (f) 5λ . 虚线表示锥尖出口平面

波波长的激光聚焦情况是不相同的. 为了呈现这种不同的聚焦变化,我们数值模拟了光波波长分别为

$0.48\mu\text{m}$ 和 $0.73\mu\text{m}$ 的经锥角是 30°、锥尖尺寸是 2λ 的锥形空心锥聚焦的情况,如图 9 所示.

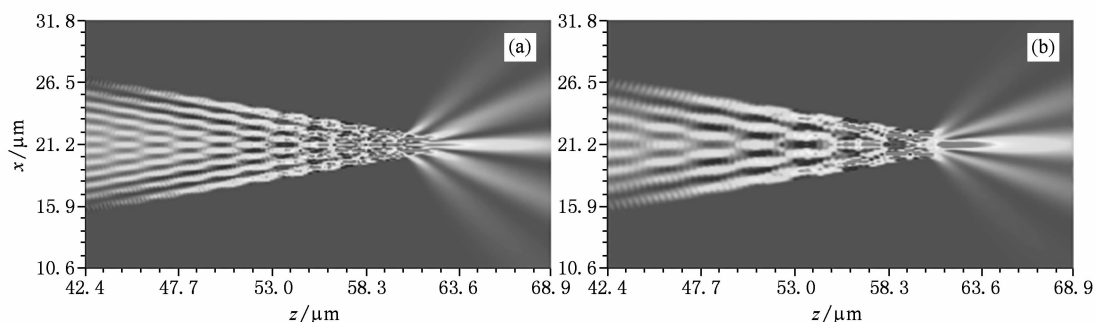


图9 当不同光波波长的激光通过锥形空心银波导时的玻印亭矢量 S_z 的空间分布 (a) $0.48 \mu\text{m}$; (b) $0.73 \mu\text{m}$

4. 结 论

提出了一种能光学引导和聚焦激光的锥形空心银波导,通过利用 FDTD 方法数值模拟了光在锥形空心波导中的传输情况,结果揭示这种锥形空心银波导能把激光聚焦成一个极小的、直径只有 1

μm 、强度高度局域性的光斑.同时分析和探索了锥形波导能光学引导和聚焦激光的物理机理,并进一步讨论了激光倾斜入射、波导几何结构对锥形波导聚焦特性造成的影响,这些研究结果对于锥形光学的应用、快点火或产生高能带电粒子中锥靶结构^[1,10]的最佳设计具有重要的参考价值.

- [1] Kodama R, Norreys P A, Mima K, Dangor A E, Evans R G, Fujita H, Kitagawa Y, Krushelnick K, Miyakoshi T, Miyanaga N, Norimatsu T, Rose S J, Shigemori T, Sunahara A, Tampo M, Tanaka K A, Toyama Y, Yamanaka T, Zepf M 2001 *Nature* **412** 798
- [2] Narita S, Matsuura Y, Miyagi M 2007 *Opt. Lett.* **32** 930
- [3] Cao L H, Yu W, Yu M Y, Xu H, He X T, Gu Y Q, Liu Z J, Li J H, Zhang C Y 2008 *Phys. Rev. E* **78** 036405
- [4] Zeng X H, Fan D Y 2009 *Opt. Express* **17** 34
- [5] Taflov A, Hagness S C 2005 3rd ed. *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*

(Boston: Artech House)

- [6] Sai W M 2005 *Opt. Express* **13** 4818
- [7] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, Thio T, Wolff P A 1998 *Nature* **391** 667
- [8] Raether H 1988 *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and Gratings* (Berlin: Springer)
- [9] Zeng X H, Fan D Y 2009 *Appl. Opt.* (submitted)
- [10] Nakamura H, Chrisman B, Tanimoto T, Borghesi M, Kondo K, Nakatsutsumi M, Norimatsu T, Tampo M, Tanaka K A, Yabuuchi T, Sentoku Y, Kodama R 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 045009

Focusing properties of a tapered hollow silver waveguide^{*}

Zeng Xia-Hui^{1)2)†} Fan Dian-Yuan²⁾

1) (*Department of Physics & Electronic Information Engineering, Minjiang University, Fuzhou 350108, China*)

2) (*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China*)

(Received 25 August 2009; revised manuscript received 27 November 2009)

Abstract

We numerically demonstrate a kind of tapered hollow silver waveguide for optically guiding and focusing of light through finite-difference time-domain (FDTD) simulations. The results of numerical simulation reveal that the tapered hollow silver waveguide can efficiently guide and focus a laser light to a tiny, highly localized beam spot of 1 μm diameter. The physical mechanism of the cone-focused laser light is explored. The influence of incident angle and waveguide geometry on the focusing properties is also discussed. The results obtained here might have important reference value for applications in tapered optics, and designing the optimum cone shape for fast ignition and generating high energy charged particles.

Keywords: tapered waveguide, focusing property, finite-difference time-domain method

PACC: 4282, 4280L, 4260F

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10674045, 10576012, 60538010).

[†] E-mail: xiahuiz@126.com