

文章编号: 0253-2239(2004)10-1381-7

## 阶梯型纳米孔径的近场光学局域增强特性研究\*

许吉英 王佳田 芊

(清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 提出一种高分辨力与高通光效率兼备的阶梯型纳米孔径设计方法,孔径的尺寸从膜层的入射表面向出射表面呈阶梯型逐渐减小,直到在膜层的出射表面形成一个亚波长的小孔。采用三维时域有限差分(FDTD)方法对方形阶梯型纳米孔径及三角形阶梯型纳米孔径进行了数值模拟计算。结果表明,由于近场光学很强的局域场增强效应,其通光效率与输出光强极大值在具有相同近场光斑尺寸情况下,较普通的非阶梯型纳米孔径提高了两个数量级,甚至更高,有效地提高了输出光功率。采用四台阶三角形阶梯型纳米孔径,当光斑半峰全宽为  $97\text{ nm} \times 74\text{ nm}$  时,出射光强极大值达到 1049.76,较入射光增强了 1000 倍,而通光效率大于 1,达到 1.67。这种阶梯型纳米孔径可以直接作为纳米孔径激光器的出射孔径提高其输出光功率,也可以作为独立的光学屏对入射光进行整形得到具有高输出功率的亚波长尺度光源,在纳米尺度光学成像、光谱探测、数据存储、光刻、光学操作等近场光学应用领域具有潜在的应用前景。

**关键词:** 光学器件; 阶梯型纳米孔径; 时域有限差分方法; 近场光学; 纳米孔径激光器

中图分类号: TN242 文献标识码: A

## Research on Near-Field Local Enhancement Properties of Step-Shaped Nano-Aperture

Xu Jiying Wang Jia Tian Qian

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,  
Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 21 August 2003; Revised 26 December 2003)

**Abstract:** A novel kind of step-shaped nano-aperture with high resolution and high power throughput is proposed. The step-shaped nano-aperture's size is gradually reduced from the incident surface to the exit surface until a sub-wavelength aperture is formed on the exit surface. The step-shaped square aperture and the step-shaped triangle aperture have been numerically simulated by the method of 3-D finite-difference time-domain (FDTD). The calculation results reveal that the light intensity peak and the power throughput of the step-shaped aperture are increased by about 100 times or more in comparison with those of the ordinary non-step-shaped nano-aperture with a comparable light spot size due to the near-field optical local enhancement effect. For step-shaped triangle aperture with four steps, when the full-width at half-maximum (FWHM) of light spot is  $97\text{ nm} \times 74\text{ nm}$ , the peak intensity reaches 1049.76 (1000 times of the incident light intensity) and the power throughput is 1.67. This kind of step-shaped nano-aperture can be directly used as an exit aperture of nano-aperture semiconductor lasers or as an unattached shield, to produce a sub-wavelength light source with high transmission. It is possible to be used in near-field optical applications such as near-field super-resolution imaging, high-density optical data storage, nano-photolithography, manipulation, and so on.

**Key words:** optical devices; step-shaped nano-aperture; finite-difference time-domain method; near-field optics; nano-aperture laser

\* 国家 863 计划(2003AA311132)、清华大学校重点基础基金(JE2002008)资助课题。

E-mail: xjy01@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期:2003-08-21;收到修改稿日期:2003-12-26

## 1 引 言

基于近场光学技术的光学分辨力可以达到纳米量级<sup>[1]</sup>,突破了传统光学的分辨力衍射极限,这将为科学研究的诸多领域,尤其是纳米科技的发展提供有力的操作、测量方法和仪器系统。纳米尺度光源是近场光学成像、探测、光谱仪以及光存储系统等基于近场光学原理的仪器、系统中的关键元件之一,因此成为近场光学应用领域中重要的研究课题之一。

近十年来具有纳米孔径的镀金属膜渐细锥形光纤探针<sup>[2]</sup>已被广泛使用。但是,光纤探针的低通光效率(一般为透过光纤探针的输出光功率与耦合进渐细区域的光功率之比,通常为 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ ),以及易损坏等缺点限制了其应用范围。后来提出的纳米孔径激光器作为有源探针成为纳米尺度光源的重要研究方向。大津元一<sup>[3]</sup>在1991年就提出了有源探针的概念,并提出发展反射谐振型近场光学系统的设想。1999年Partovi等<sup>[4]</sup>首次提出使用纳米孔径激光器作为近场光存储光源,并指出在小孔直径相当的情况下,其输出光功率与渐细锥形镀膜光纤探针相比能够提高 $10^4$ 倍,提高了信噪比和数据传输速度。Shinada等<sup>[5]</sup>提出纳米孔径垂直腔表面发射激光器(NA-VCSEL),采用聚焦离子束方法在100 nm厚的Au膜上制作了100 nm的微孔,但得到的出射功率偏低。为进一步提高光存储密度和数据传输速度,Goto<sup>[6]</sup>提出采用NA-VCSEL阵列作为近场光存储光源,实现多光束并行读写。

目前的纳米孔径激光器实验采用的纳米孔径通常为方形或圆形,当小孔尺寸比输入光波长 $\lambda$ 小得多时,小孔的通光效率迅速下降。如圆孔的半径为 $r$ ,当 $r \ll \lambda$ 时,研究表明其通光效率随 $r^4$ 变化<sup>[7]</sup>。随之而来,光功率与信噪比也将随着小孔直径的减小迅速下降。因此进一步改善纳米孔径,尤其是远小于入射光波长的纳米孔径的通光效率及输出功率仍然是其进入应用阶段的关键问题。最近,Shi Xiaolei<sup>[8,9]</sup>提出了C形平面结构纳米孔径激光器方案,理论计算表明输出功率提高了几个数量级,并对其光学原理和光学特性做了一些深入的讨论。Chen Fang<sup>[10]</sup>则制作了这种C形纳米孔径激光器,并采用无孔径近场扫描光学显微镜对其输出光场进行了探测。Ebbesen, Thio等<sup>[11,12]</sup>提出在小孔周围制作纳米尺度的周期性结构,在某些频率处将会出现显著的透射增强。另外,在国内也有对C形纳米孔径的讨论<sup>[13]</sup>并提出了一种基于近场光学隐失场

干涉原理的虚拟光探针<sup>[14]</sup>。

本文基于近场光学原理提出一种特殊的纳米尺度阶梯型孔径。纳米孔径的尺寸从膜层的入射表面向出射表面方向呈阶梯型逐渐减小,直到在膜层的出射表面形成一个亚波长的小孔。出射光斑的大小由出射表面的亚波长小孔的尺寸决定。计算表明,这种阶梯型纳米孔径具有强烈的增强作用,提高了通光效率,从而实现高分辨力与高输出功率的统一。这种阶梯型纳米孔径可以作为独立的光学屏对入射光进行整形得到具有高输出功率的亚波长尺度的光斑。另外,考虑到阶梯型纳米孔径的物理面积与半导体激光器的激活区面积相比很小,而且前述的Partovi<sup>[4]</sup>, Shinada<sup>[5]</sup>, Chen Fang<sup>[10]</sup>已经成功制作了方形、圆形以及C形孔纳米孔径激光器,因此可以推断这种阶梯型纳米孔径也可以直接作为纳米孔径激光器的出射孔径提高其输出光功率。

## 2 数值计算模型

本文采用三维时域有限差分方法(Finite-difference time-domain method, FDTD)进行数值模拟计算,所用软件为美国RECOM公司的XFDTD5.1。

对于纳米孔径的近场光场分布,可采用图1所示的无限大金属屏上的小孔的计算模型进行仿真计算。计算中采用无限大均匀偏振平面波沿小孔的轴向入射,只有部分光束能够透过光输出端面上的金属膜微孔。考虑到金属的光学特性,选用金( $\epsilon_{Au} = -10.57 + i1.84$ )作为金属膜层的材料。入射光的真空波长为633 nm,电场的各分量分别为 $E_y = E_z = 0, E_x = 1 \text{ V/m}$ 。将所计算的三维空间划分为 $N_x \times N_y \times N_z = 200 \times 200 \times 80$ 个网格单元阵列,每个单元在坐标轴上的长度 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 均为5 nm。

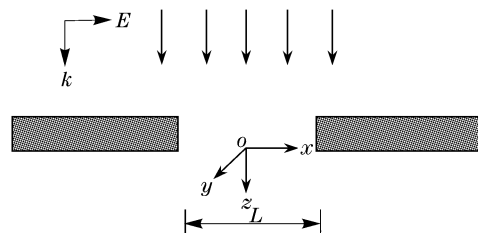


Fig. 1 Simulation model: aperture in an infinite plane

采用上述的数值计算模型,对阶梯型纳米孔径进行模拟计算。着重讨论了我们感兴趣的光强信号与通光效率,给出了出射光强极大值,光强的分布以及光斑尺寸。在本文中,通光效率被定义为全部输

出光功率与以孔径为中心、大于孔径范围的方形区域( $600\text{ nm} \times 600\text{ nm}$ )内的全部入射光功率之比。光斑尺寸由光强极值的半峰全宽(FWHM)确定,在 $x, y$ 方向上的尺寸分别为 $dx, dy$ 。

### 3 数值计算结果与分析

以方形阶梯型纳米孔径和三角形阶梯型纳米孔径为例,用上述数值计算模型,利用时域有限差分方法对出射光场的分布进行计算,并对近场区域内的光场分布、光强极大值与通光效率进行了计算与分析。

#### 3.1 方形阶梯型纳米孔径出射光场的计算结果与分析

方形阶梯型纳米孔径的方形孔径尺寸从膜层的人射表面向出射表面呈阶梯型逐渐减小,直到在膜层的出射表面形成一个亚波长小孔。以四台阶方形

阶梯型纳米孔径为例,其几何模型如图 2 所示。图 2(a)、图 2(b)分别为俯视图和截面剖视图。在金属膜上开有一方形阶梯型孔径,其孔径分为四个台阶,每台阶上方孔的边长 $D_4, D_3, D_2, D_1$ 从金属膜层的人射表面向出射表面逐渐减小,最后在出射端面形成亚波长小孔。各台阶上方孔的中心重合,并且金属膜的厚度相同。孔内为自由空间。当金膜总的厚度为 $80\text{ nm}$ ,入射光波长为 $633\text{ nm}$ 时,采用图 1 所示的计算模型,利用时域有限差分方法分别对一个台阶,即普通的非阶梯型方孔,两个、四个、八个、十六个台阶的方形阶梯型纳米孔径进行计算。令各台阶的金属膜厚度相同,对各台阶上的方孔孔径尺寸进行优化,得到优化后的方形阶梯孔的几何尺寸及出射光强极大值、通光效率如表 1 所示。场强极大值及通光效率与台阶数的关系曲线如图 3 所示。

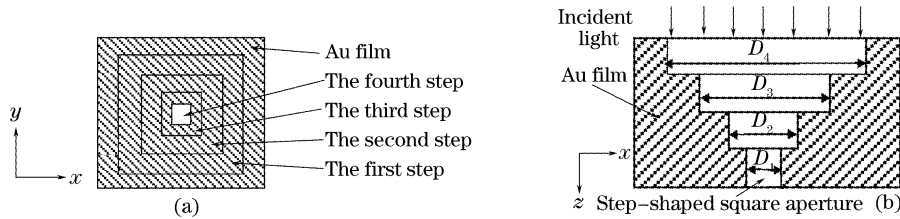


Fig. 2 Schematic geometry of the step-shaped square aperture. (a) Top view, (b) Cross section view

Table 1 Comparison of performance of the optimum step-shaped square aperture with various step numbers

The number of steps	1	2	4	8	16
Film thickness /nm	$1 \times 80$	$2 \times 40$	$4 \times 20$	$8 \times 10$	$16 \times 5$
Aperture size /nm	70	250-70	400-300 -250-70	350-310-270-230 -190-150-110-70	370-350-330-310-290-270-250-230 -210-190-170-150-130-110-90-70
Throughput	0.0746	0.2734	1.3640	2.6766	3.0874
Peak intensity / (a. u.)	4.41	41.34	213.16	400.0	561.69

从图 3 可以看出,通光效率与光强极大值均随台阶数的增加而增加,从一个台阶到四个台阶迅速增加,提高了两个数量级,继续增加台阶数,曲线趋于渐增的平稳趋势。似乎是越接近渐细锥形结构效

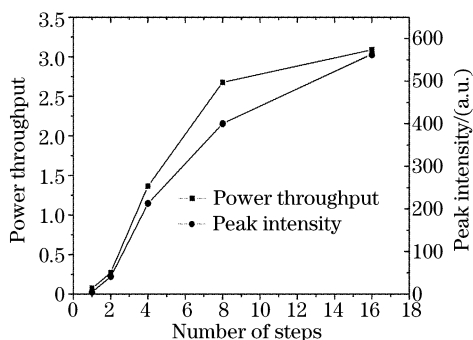


Fig. 3 Power throughput and peak intensity versus number of steps

果越好,但这并不是严格的,如四台阶结构,其各台阶上的孔径尺寸并未构成一个严格的渐细锥形结构。但是对于渐细锥形结构,由于渐细波导的光波模式截止效应<sup>[15]</sup>,其通光效率将不可能大于 1。而阶梯型纳米孔径由于各阶梯上棱边或棱角的场增强效应,如图 4 所示,使得通光效率增强并大于 1。阶梯孔各台阶上的孔径尺寸间是密切相关、相互影响的,决定了总的场增强效应。图 5 为四个、八个、十六个台阶的方形阶梯孔的出射电场极大值随传播距离的变化曲线。可以看到随传播距离的增加,出射电场极大值按指数规律迅速衰减,被强烈地局域在近场区域。因此,为获得高强度输出光,必须保证在近场间距内。

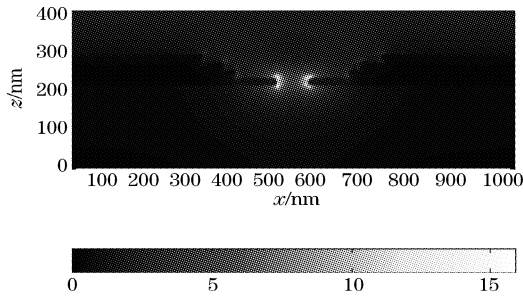


Fig. 4 The total electric field distribution in  $xz(y=0)$  plane

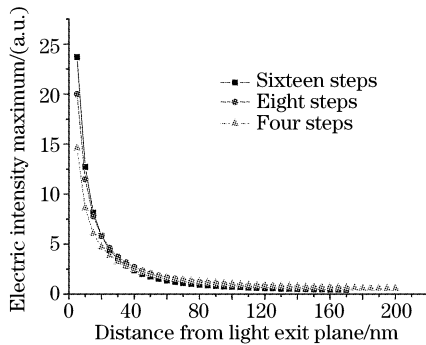


Fig. 5 Electric intensity versus distance from light exit plane

图 6 为四、八、十六台阶的光斑半峰全宽尺寸  $dx$ 、 $dy$  随传播距离的变化曲线,可以看出,各光斑的半峰全宽均随传播距离的增加而增加。沿偏振方向的  $dx$  的尺寸要比  $dy$  大些。而在相同距离处,台阶数多的纳米孔径的光斑尺寸要小些。距离光出射面 60 nm 处的一、四、八、十六台阶纳米孔径的光强分布及  $x$ 、 $y$  方向截线图如图 7 所示。光斑尺寸  $dx \times dy$  分别为 170 nm  $\times$  145 nm、225 nm  $\times$  125 nm、185 nm  $\times$  115 nm、180 nm  $\times$  105 nm。

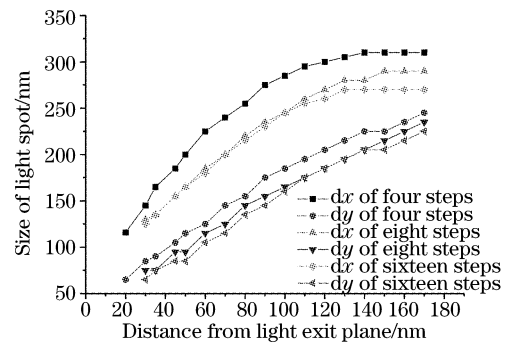


Fig. 6 Size of light spot versus distance from light exit plane

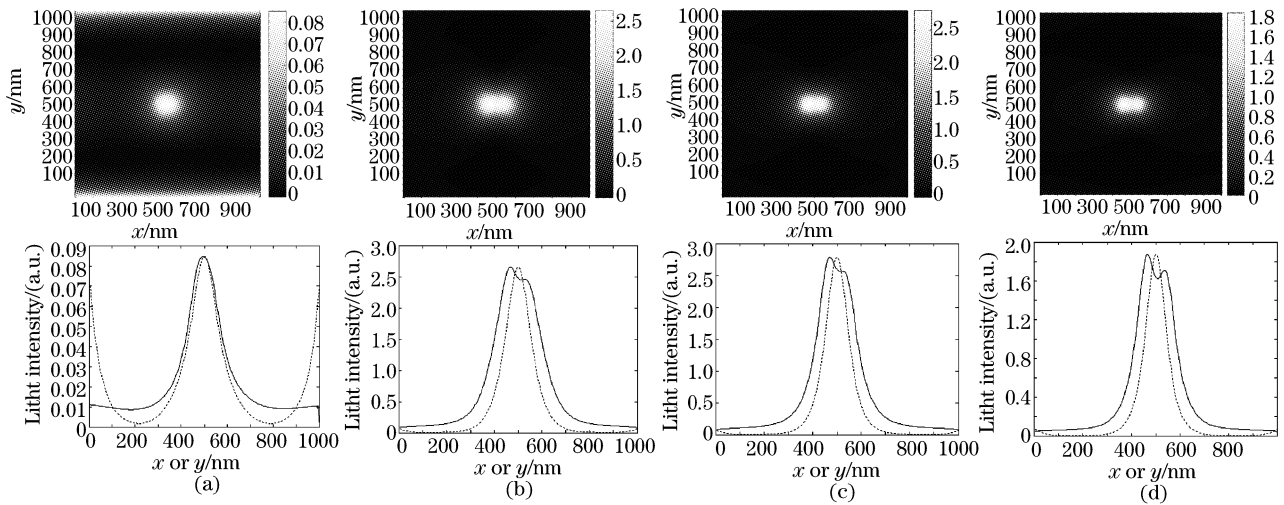


Fig. 7 Intensity distribution and transversal in  $x$  (solid line) and  $y$  (dotted line) direction of step-shaped square aperture with different step-shaped number. (a) One step, (b) Four steps, (c) Eight steps, (d) Sixteen steps

图 8 为四台阶方形阶梯孔纳米孔径在距离孔径膜层输出表面 35 nm 平面上的输出光场各个方向电场分量的分布。每幅图的尺寸均为 1000 nm  $\times$  1000 nm。图 8(a)~图 8(d)分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向分量  $|E_x|^2$ 、 $|E_y|^2$ 、 $|E_z|^2$  以及总场  $|E_t|^2$  的分布。从这几幅图可以很明显的看出在近场区域内方形阶梯孔纳米孔径的光场分布呈现出下述特征:1)发生了退极化效应,入射光仅存在  $E_x$  分量,经过纳米孔径后,透射光中产生了  $E_y$ 、 $E_z$  分量;2)  $|E_y|^2$  远小于

$|E_x|^2$ , 主要分布在出射端面上方形孔径的四个角上;呈现出对称的四光斑分布;3)  $|E_z|^2$  分量导致了总电场在测量平面内出现边缘增强的场分布特性。 $|E_z|^2$  分量产生于方形孔径上与  $x$  方向(即入射光偏振方向)垂直的边沿,在横截面内  $|E_z|^2$  形成两个独立的对称于  $y$  轴的光斑,在孔径边缘表现出很明显的场增强效应,表现出很强的局域场特征,其大小比  $x$  方向分量稍小一些。4) 在总场  $|E_t|^2$  中,孔径范围内的分布以  $|E_x|^2$  为主,但  $|E_z|^2$  对总场

分布形状也会产生较大的影响。从  $z=35$  nm 平面内的分布可看出,此时总场的分布形成一椭圆光斑,由于  $z$  向增强的贡献,不仅总强度有所提高,而且总

场的分布与  $|E_x|^2$  的分布相比,虽然在  $x$  方向展宽一些,但基本保持了  $|E_x|^2$  的尺寸量级。

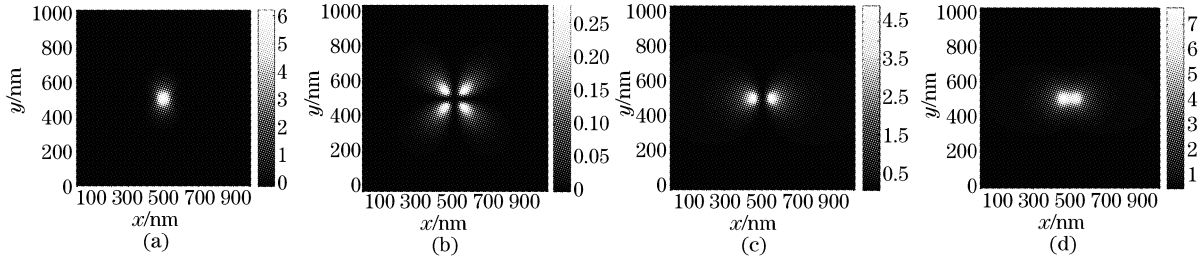


Fig. 8 Light field distributions of the step-shaped square aperture. (a)  $|E_x|^2$ , (b)  $|E_y|^2$ , (c)  $|E_z|^2$ , (d)  $|E_t|^2$

由表 1 的数据可以看出,对于四、八、十六台阶方形阶梯孔,透光效率大于 1,表明透过小孔的全部光功率超出小孔物理面积内的全部入射光功率,说明小孔物理边界以外区域的光能量也能透过小孔,产生了局域场增强效应。对于在  $x$  方向稍宽一些的椭圆状光斑,可以通过调整出射表面上的方形亚

波长小孔为  $x$  方向稍短一些的矩形亚波长小孔使其圆化。如图 9 所示,出射表面上的亚波长小孔分别为  $70\text{ nm} \times 70\text{ nm}$ ,  $50\text{ nm} \times 70\text{ nm}$ ,  $40\text{ nm} \times 70\text{ nm}$  的四台阶方形阶梯孔纳米孔径的距出射面  $35\text{ nm}$  平面上光场分布图。光斑尺寸分别为  $165\text{ nm} \times 90\text{ nm}$ ,  $135\text{ nm} \times 85\text{ nm}$ ,  $125\text{ nm} \times 85\text{ nm}$ 。

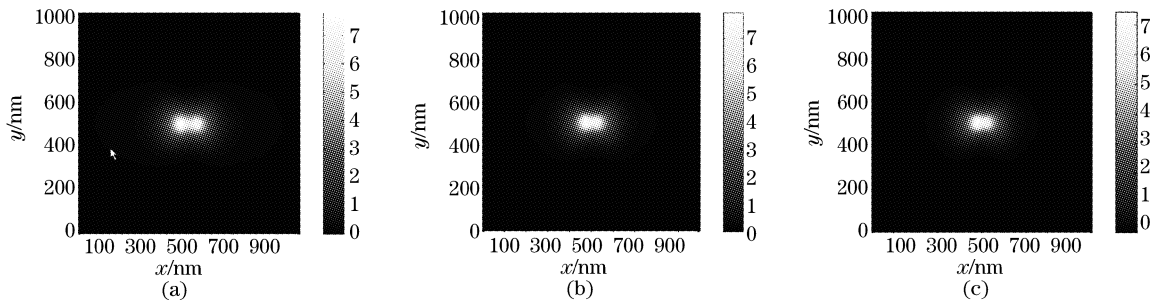


Fig. 9 Light field distributions of the step-shaped square aperture. (a)  $70\text{ nm} \times 70\text{ nm}$ , (b)  $50\text{ nm} \times 70\text{ nm}$ , (c)  $40\text{ nm} \times 70\text{ nm}$

#### 4 三角形阶梯型纳米孔径出射光场的计算结果与分析

三角形阶梯型纳米孔径的俯视图、截面剖视图如图 10 所示。在金膜层上开有三角形阶梯孔,孔径内为自由空间。当入射光波长为  $633\text{ nm}$  时,四台阶三角形阶梯孔的几何尺寸描述如下,其孔径分为四个台阶,每台阶上等腰三角形的顶角均为  $53^\circ$ ,中心重合,底边长从金属膜层的入射表面向出射表面逐渐减小,分别为  $400\text{ nm}$ 、 $300\text{ nm}$ 、 $200\text{ nm}$ 、 $70\text{ nm}$ 。每

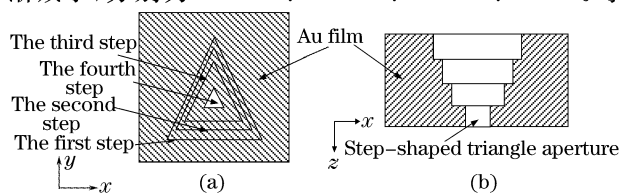


Fig. 10 Schematic geometry of the step-shaped triangle aperture. (a) Top view, (b) cross section view

台阶上金属膜的厚度均为  $20\text{ nm}$ 。采用图 1 所示的计算模型,利用时域有限差分方法进行仿真计算,可获得在距离孔径膜层输出表面  $35\text{ nm}$  的平面上三角形阶梯型纳米孔径的输出光场各个方向电场分量的分布如图 11 所示。图 11(a)~图 11(d)分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向分量  $|E_x|^2$ 、 $|E_y|^2$ 、 $|E_z|^2$  以及总场  $|E_t|^2$  的分布。从这几幅图可以很明显的看出在近场区域内三角形阶梯孔纳米孔径的分布呈现出下述特征:1) 发生了退极化效应,入射光仅存在  $E_x$  分量,经过纳米孔径后,透射光中产生了  $E_y$ 、 $E_z$  分量。2)  $|E_y|^2$  远小于  $|E_t|^2$ ,主要分布在三角形孔径的顶角处,呈现出对称于  $y$  轴的四光斑分布。3)  $|E_z|^2$  分量导致了总电场在测量平面内出现边缘增强的场分布特性。 $|E_z|^2$  分量产生于三角形孔径上与  $x$  方向,即入射光偏振方向垂直(近似)的边沿,在横截面内  $|E_z|^2$  形成两个独立的对称于  $y$  轴的光斑,在孔径边缘表现出很

明显的场增强效应,表现出很强的局域场特征,其大小比  $x$  方向的分量稍小一些。4) 在总场  $|E_t|^2$  中,孔径范围内的分布以  $|E_x|^2$  为主,但  $|E_z|^2$  也会对总场分布产生较大的贡献。从  $z=35$  nm 平面内的分布可看出,此时总场的分布为一类椭圆光斑,由于  $z$  向电磁场增强的贡献,不仅总强度有所提高,而且总场的分布与  $|E_x|^2$  的分布相比,在  $x$  方向稍宽一些。表 2 显示了三角形阶梯孔纳米孔径在距离孔径膜层表面 35 nm 的平面上光斑的光强半高宽,距出射面 5 nm 平面上的光强极大值,通光效率。同时给出了

相同条件下 80 nm 金膜上仅开一个普通的底边长为 70 nm 三角孔的各项指标以便做比较。可以看出,三角形阶梯孔的光强极大值与通光效率提高了很多,在近场光斑尺寸变化不大的情况下较普通的非阶梯型三角孔纳米孔径提高两个数量级。三角形阶梯孔的通光效率大于 1,同样表明透过小孔的全部光功率超出小孔物理面积内的全部入射光功率,说明小孔物理边界以外区域的光能量也能透过小孔,这是局域场增强效应产生的结果。

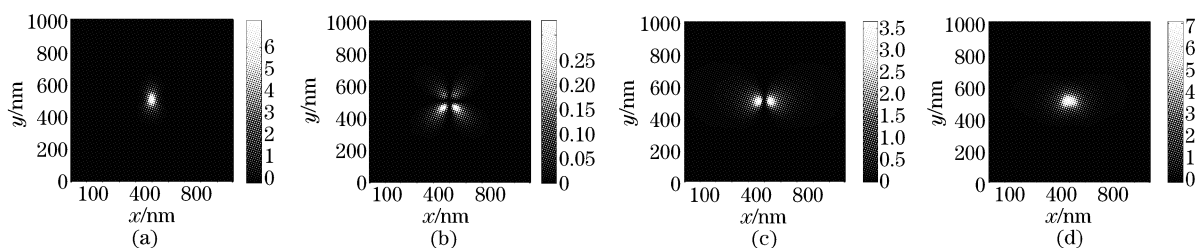


Fig. 11 Light field distributions of the step-shaped triangle aperture. (a)  $|E_x|^2$ , (b)  $|E_y|^2$ , (c)  $|E_z|^2$ , (d)  $|E_t|^2$

Table 2 Comparison of the performance of step-shaped triangle aperture and ordinary triangle aperture

Aperture shape	Size of light spot / nm		Intensity peak	Throughput
	$dx$	$dy$		
Step-shaped triangle aperture	97	74	1049.76	1.6700
Ordinary triangle aperture	88	78	34.5744	0.1189

从上述两例可以看出,采用阶梯型纳米孔径后,其透射光的通光效率及输出光功率均会有数量级的提高,这不仅仅限于方形、三角形阶梯型纳米孔径,其纳米孔径形状可以为方形、矩形、圆形、椭圆形、三角形、双三角形等形状中的任何一种,也可以是其中的两种或两种以上形状组合构成。结果显示所设计的阶梯型纳米孔径的通光效率大于 1,表明一定有孔径几何尺寸之外的能量通过了孔径,增强了输出功率。这是基于近场光学的局域场增强效应。近场光学局域场增强效应的产生可以分为三方面:其一,当光束传播至近场距离时,在近场区域入射光束与金属膜上的纳米孔径,尤其是边缘发生很强的相互作用<sup>[16]</sup>,具有纳米孔径结构的金属膜受到入射光子的激发,其电荷密度分布及运动状态发生变化,反过来这种变化对入射光产生影响与作用,光强分布改变,在孔径区域大大增强,局域场中产生增强效应,并产生近场隐失波,如:  $E_z$  分量。此时的近场光实际上是一种包含光子与物质激发的混合状态。这种局域场增强效应及光强的重新分布与入射光的偏振方向有关;其二,光在纳米孔径中传播及入射、出射时均会激发隐失波,当隐失波波矢的实分量与表面

等离子模式匹配,即满足表面等离子共振条件时,激发金属膜层表面等离子极化,形成表面等离子振荡,反过来进一步增强了局域场;其三,光传播时受到孔径边沿、孔壁的反射、散射,有可能产生共振干涉加强。上述的场增强效应受金属膜层的光学特性及厚度、孔径的几何形状及尺寸、入射光偏振方向等因素的影响。另外,阶梯型纳米孔径对光具有不断地增强、收集作用。

在纳米孔径的设计中,还需要考虑的是电磁场的边界条件及截止波长限制。偏振效应的影响与边界条件密切相关,实际上是一种边界效应,其表现为不同的偏振模式将会影响近场光斑的形状及通光效率。波长大于纳米孔径截止波长的入射光在传播时由传播场变为隐失场,通过在孔径形状及尺寸上的调整,可以有效地提高截止波长,增加通光效率。

**结论** 本文提出了一种具有强烈的局域场增强效应的纳米尺度阶梯型孔径。以方形阶梯型纳米孔径和三角形阶梯型纳米孔径为例的计算表明,在具有相同近场光斑尺寸的情况下,其通光效率与输出光强极大值较普通的非阶梯型纳米孔径提高了两个数量

级,甚至更高,通光效率大于1,实现了高分辨力与高输出功率的统一。

这种阶梯型纳米孔径可以直接作为纳米孔径激光器的出射孔径提高其输出光功率,也可以作为独立的光学屏对入射光整形得到具有高输出功率的亚波长尺度光斑。因此它有可能用于基于近场光学原理的各种应用领域诸如纳米尺度近场光学成像、光谱探测、数据存储、光刻、光学操作等。

作为纳米孔径激光器的出射孔径时,在制作工艺上可采取两种方式,其一是当阶梯型小孔内为自由空间时,可以先将附着在衬底上的金属膜逐步加工出阶梯型的孔径,再将其与纳米孔径激光器出射端面结合在一起,最后除去附着金属膜的衬底层;其二是考虑在阶梯型小孔内填充折射率匹配的透光材料,可在半导体激光器的出射端面先蒸镀该介质材料,再采用离子束刻蚀等方法将介质材料制作成阶梯孔的形状,最后再蒸镀金属膜到与介质孔相平。

对于纳米尺度阶梯型孔径的局域场增强效应的物理机制尚需进一步的研究。实际应用中还需考虑光通过金属膜的泄漏、光在金属膜层表面的反射等因素的影响。在以后的研究中将继续探讨这些问题。

### 参 考 文 献

- Pohl D W, Denk W, Lanz M. Optical stethoscopy: Image recording with resolution  $\lambda/20$ . *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **44**(7): 651~653
- Liu Xiumei, Wang Jia. Research on characterization of the near-field distribution of optical fiber probe by FDTD. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(10): 1234~1238 (in Chinese)
- Ohtsu M, Jiang S, Ohsawa H. Photon scanning tunneling microscope. *Review of Laser Engineering* (レーザー研究), 1991, **19**(8): 839~848 (in Japanese)
- Partovi A, Peale D, Wuttig M *et al.*. High-power laser light source for near-field optics and its application to high-density optical data storage. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(11): 1515~1517
- Shinada S, Koyama F, Nishiyama N *et al.*. Fabrication of micro-aperture surface emitting laser for near field optical data storage. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1999, **38**(11B, Part2): 1327~1329
- Young-Joo Kim, Kazuma Kurihara, Kazuhiro Suzuki *et al.*. The fabrication and characterization of nano-aperture VCSEL array head for high density near-field optical storage. *Optical Data Storage 2000*, 14~17 May 2000, Whistler, British Columbia, Canada, Conference Digest 42~44
- Bethe H A. Theory of diffraction by small holes. *The Phys. Rev.*, 1944, **66**(7): 163~182
- Shi Xiaolei, Thornton R L *et al.*. Nano-aperture with ultra-high power throughput for VSAL. *Optical Data Storage Topical Meeting 2001*, 22~25 April 2001, Sante Fe, New Mexico, Postdeadline papers, WC7
- Shi Xiaolei, Hesselink L. Mechanisms for enhancing power throughput from planar nano-apertures for near field optical data storage. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2002, **41**(3B, Part1): 1632~1635
- Chen F, Itagi A, Bain J A *et al.*. Imaging of optical field confinement in ridge waveguides fabricated on very-small-aperture laser. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(16): 3245~3247
- Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F *et al.*. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays. *Nature*, 1998, **391**(6668): 667~669
- Thio T, Lezec H J, Ebbesen T W. Strongly enhanced optical transmission through subwavelength holes in metal film. *Physica (B)*, 2000, **279**(1~3): 90~93
- Xu Tiejun, Wang Jia, Sun Liqun *et al.*. Aperture design of nano-aperture semiconductor laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(12): 1421~1425 (in Chinese)
- Hong Tao, Wang Jia, Sun Liqun *et al.*. Numerical simulation analysis of near-field optical virtual probe. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(12): 1415~1420 (in Chinese)
- Hecht B, Sick B, Wild U P *et al.*. Scanning near-field optical microscopy with aperture probes; fundamentals and applications. *J. Chem. Phys.*, 2000, **112**(18): 7761~7773
- Sangu S, Kobayashi K, Ohtsu M. Optical near fields as photon-matter interacting systems. *J. Microscopy*, 2001, **202**(part 2): 279~285