

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
H01S 5/00 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 03121943.8

[45] 授权公告日 2006 年 1 月 25 日

[11] 授权公告号 CN 1238936C

[22] 申请日 2003.4.18 [21] 申请号 03121943.8

[71] 专利权人 清华大学

地址 100084 北京市北京 100084 - 82 信箱

[72] 发明人 许吉英 王 佳 徐铁军 田 芊

审查员 王治华

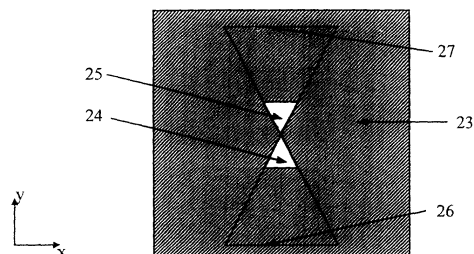
权利要求书 1 页 说明书 6 页 附图 5 页

[54] 发明名称

近场光学阶梯型纳米孔径激光器

[57] 摘要

近场光学阶梯型纳米孔径激光器，属于近场光学、纳米技术领域。为了克服已有纳米孔径激光器技术的输出功率低，不能满足实际使用要求的不足，本发明公开了一种阶梯型纳米孔径激光器，激光器出射表面镀有能形成纳米孔径的膜层，所述膜层上具有一个纳米尺寸的出射孔径，纳米出射孔径的尺寸从所述膜层的入射表面向出射表面呈阶梯型的逐渐减小，直到在所述膜层的出射表面形成一个亚波长的小孔。本发明的通光效率与输出光强极大值在具有相同近场光斑尺寸的情况下，较普通纳米孔径激光器提高了 $10 \sim 10^4$ 倍，大大提高了输出功率。本发明可作为纳米近场光学有源探针用于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。



1. 近场光学阶梯型纳米孔径激光器, 所述激光器出射表面镀有能形成纳米孔径的膜层, 所述膜层上具有一个纳米尺寸的出射孔径, 其特征在于: 所述纳米出射孔径的尺寸从所述膜层的入射表面向出射表面呈阶梯型的逐渐减小, 直到在所述膜层的出射表面形成一个亚波长的小孔。

2. 根据权利要求1所述的纳米孔径激光器, 其特征在于: 所述纳米孔径的阶梯数目为2~10个。

3. 根据权利要求1或2所述的纳米孔径激光器, 其特征在于: 所述膜层的厚度为20~300nm。

4. 根据权利要求3所述的纳米孔径激光器, 其特征在于: 所述纳米孔径的形状为方形、矩形、圆形、椭圆形、三角形、双三角形、□形、∟形、半圆环形或C形中的一种。

5. 根据权利要求3所述的纳米孔径激光器, 其特征在于: 所述纳米孔径为方形、矩形、圆形、椭圆形、三角形、双三角形、∟形、∟形、半圆环形或C形中的两种及两种以上形状相组合形成的阶梯型纳米孔径。

6. 根据权利要求1所述的纳米孔径激光器, 其特征在于: 所述阶梯型纳米孔径内是开放空间或者填充高折射率的介质材料。

7. 根据权利要求1所述的纳米孔径激光器, 其特征在于: 所述激光器是边发射型半导体激光器或面发射型半导体激光器。

8. 根据权利要求1所述的纳米孔径激光器, 其特征在于: 所述膜层的材料是金属材料

9. 根据权利要求8所述的纳米孔径激光器, 其特征在于: 所述金属膜层的材料是金、铝、银或铬中的一种。

近场光学阶梯型纳米孔径激光器

技术领域

本发明属于近场光学、纳米技术领域，特别涉及纳米孔径激光器的设计。

背景技术

纳米尺度光源是近场光学成像、探测、近场光谱仪以及近场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。近十年来具有纳米孔径的镀金属膜光纤探针已被广泛使用。但是，光纤探针的通光效率很低，通常为 $10^{-4}\sim 10^{-6}$ 。

近年提出了纳米孔径激光器，它是一种基于近场光学原理设计的具有纳米孔径的半导体固体激光器，是在现有的商用半导体固体激光器的出射表面镀金属膜层并在其上开一具有纳米尺寸的出射孔径。这种作为近场光学系统中的有源探针的纳米孔径激光器具有明显的优点，其输出光功率较具有相同小孔尺寸的镀金属膜光纤探针提高 10^4 倍，通光效率超过1/1000，从而提高了信噪比和数据传输速度。但目前实验中所采用的纳米孔径通常为方形或圆形，直径约为50~300nm，输出功率约为微瓦量级，尚不能满足实际使用的要求。

发明内容

本发明的目的在于克服已有纳米孔径激光器技术的输出功率低，不能满足实际使用要求的不足，提出一种具有特殊的纳米尺度阶梯型孔径的近场光学纳米孔径激光器，提高通光效率，实现高分辨率与高输出功率的统一。

本发明提供了一种近场光学阶梯型纳米孔径激光器，所述激光器出射表面镀有能形成纳米孔径的膜层，所述膜层上具有一个纳米尺寸的出射孔径，其特征在于：所述纳米出射孔径的尺寸从所述膜层的入射表面向出射表面呈阶梯型的逐渐减小，直到在所述膜层的出射表面形成一个亚波长的小孔。

本发明的纳米孔径的阶梯数目为2~10个。

本发明的膜层的厚度为20~300nm。

本发明所述的纳米孔径的形状为方形、矩形、圆形、椭圆形、三角形、双三角形、□形、工形、半圆环形或C形中的一种；也可以是方形、矩形、圆形、椭圆形、三角形、双三角形、□形、工形、半圆环形或C形中的两种及两种以上形状相组合形成的阶梯型纳米孔径。

本发明所述激光器是边发射型半导体激光器或面发射型半导体激光器。

本发明所述膜层的材料是金属材料，进一步说所述金属膜层的材料是金、铝、银或铬中的一种。

本发明所述的阶梯型纳米孔径内可以是开放空间，也可以填充各种折射率、尤其是高折射率的介质材料。通过填充高折射率的介质材料，还可以进一步提高通光效率。

本发明的工作原理是基于近场光学的局域场增强效应。具体表现为所设计的阶梯型纳米孔径激光器的通光效率（为全部输出功率与大于孔径范围 $600nm \times 600nm$ 方形区域内的全部入射光功率之比）大于 1，这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。这种近场光学局域场增强效应的产生主要在于：当光束传播至近场距离时，受到金属膜上纳米孔径的强烈作用，其光强分布有所改变，在孔径区域大大增强；当光束进入孔径后更是受到金属孔径边缘、孔壁的强烈增强作用，尤其是与入射光偏振方向相垂直的边缘、孔壁的作用最为突出；当光束从孔径出射时同样受到边界条件突变的作用而表现为倏逝场的增强并随距离增加而迅速衰减。这种增强效应被强烈地约束在近场范围内。这个激励增强的过程表明：在近场范围内入射光束与纳米孔径会发生很强的相互作用，无论是入射前还是出射后。这种作用通常表现为相互作用，即孔径对光的分布发生影响，局域场中产生增强效应；同时光束的能量对孔径的金属膜层产生激励形成表面等离子振荡，反过来进一步增强了局域场。另外，阶梯型纳米孔径对光具有不断地增强、收集作用。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、金属膜表面等离子效应、入射光偏振方向等因素的影响。其中，贡献最大的归结为偏振增强效应和共振增强效应。偏振增强效应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分布及通光效率，通光效率的提高强烈地依赖于与入射光偏振方向垂直的孔径尺寸。共振增强效应包括表面等离子增强效应及孔径散射场的干涉加强效应，与孔径的几何形状及孔径尺寸密切相关。

本发明的阶梯型纳米孔径激光器在制作工艺上可采取两种方式，其一是当阶梯型小孔内为开放空间时，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；其二是当阶梯型小孔内填充其它介质材料时，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该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。

本发明所述纳米孔径激光器的通光效率与输出光强极大值在具有相同近场光斑尺寸的情况下，较普通的非阶梯型的具有相同形状的纳米孔径激光器提高了 $10 \sim 10^4$ 倍，所得到的通光效率大于 1。

本发明所述的纳米孔径激光器可以作为纳米近场光学有源探针用于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。基于集成光学技术，采用纳米孔径激光器可以制成新型近场光学存储读写头或近场光学显微镜的有源光学探针。

附图说明

图 1 为一般纳米孔径激光器的结构示意图。

图 2 为无限大金属屏上的小孔的计算模型示意图。

图 3 为本发明的实施例一具有方形的阶梯型纳米孔径的截面示意图。

图 4 为本发明的实施例一具有方形的阶梯型纳米孔径的剖视示意图。

图 5a 为本实施例一的激光器出射光沿 x 方向电场分量的光强分布示意图。

图 5b 为本实施例一的激光器出射光沿 y 方向电场分量的光强分布示意图。

图 5c 为本实施例一的激光器出射光沿 z 方向电场分量的光强分布示意图。

图 5d 为本实施例一的激光器出射光总场的光强分布示意图。

图 6 为本发明的实施例二具有三角形的阶梯型纳米孔径的截面示意图。

图 7 为本发明的实施例二具有三角形的阶梯型纳米孔径的剖视示意图。

图 8a 为本实施例二的激光器出射光沿 x 方向电场分量的光强分布示意图。

图 8b 为本实施例二的激光器出射光沿 y 方向电场分量的光强分布示意图。

图 8c 为本实施例二的激光器出射光沿 z 方向电场分量的光强分布示意图。

图 8d 为本实施例二的激光器出射光总场的光强分布示意图。

图 9 为本发明的实施例三具有尖对尖的双三角形的阶梯型纳米孔径的截面示意图。

图 10a 为本实施例三的激光器出射光沿 x 方向电场分量的光强分布示意图。

图 10b 为本实施例三的激光器出射光沿 y 方向电场分量的光强分布示意图。

图 10c 为本实施例三的激光器出射光沿 z 方向电场分量的光强分布示意图。

图 10d 为本实施例三的激光器出射光总场的光强分布示意图。

具体实施方式

结合本发明的三个实施例和附图详细描述如下：

图 1 为一般纳米孔径激光器的结构示意图。纳米孔径激光器是在现有的商用半导体固体激光器（包括边发射与面发射型）的基础上制作而成的。一般纳米孔径激光器包括 p 型半导体材料层 1，激活区 2，n 型半导体材料层 3，用做电极的金属条 4，具有绝缘及相位匹配的双重作用的介质材料层 5。在该半导体固体激光器的光出射表面上镀有金属膜 7，在激活区 2 对应的金属膜 7 表面内开一个纳米尺寸小孔 6，纳米尺寸小孔的制作可采用聚焦离子束（FIB）刻蚀、化学刻蚀、光刻等方法加工。

对于纳米孔径激光器的近场光场分布，可采用图 2 所示的无限大金属屏上的小孔的计算模型，利用时域有限差分方法进行仿真计算。计算中假设激光器谐振腔中振荡的光束呈现平行光 8 特性，只有部分光束能够透过激光器的光输出端面上的金属膜微孔 10。选用金作为金属膜层 9 的材料，选用光的真空波长为 633nm 的无限大均匀偏振平面波沿小孔的轴向入射，入射面为 xoz 平面。电场的各分量分别为 $E_y = E_z = 0$ ， $E_x = 1$ V/m，即入射光为 TM 模，只有沿 x 方向的分量。因此，入射光强是均匀的，为 1，可与后面各实施例的计算结果相比较。将所计算的三维空间划分为 $N_x \times N_y \times N_z$ 个网格单元阵列，每个单元在坐标轴上的

长度分别为 Δx 、 Δy 、 Δz 。取 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 5\text{nm}$ ，计算空间为 $N_x = N_y = 200$ 、 $N_z = 80$ 。

本发明的各实施例均采用金作为膜层材料。

本发明的实施例一为方形阶梯型孔纳米孔径激光器，其孔径截面图及几何尺寸如图3、图4所示。光出射表面上的金属膜层11上有一方形阶梯型孔径16，孔径内为开放空间。激光器工作波长为633nm时，按优化设计，方形阶梯孔的几何尺寸描述如下，其孔径分为四个阶梯，每阶梯上方孔15、14、13、12的边长从金属膜层的入射表面向出射表面逐渐减小，分别为 $D_4=400\text{nm}$ 、 $D_3=300\text{nm}$ 、 $D_2=200\text{nm}$ 、 $D_1=70\text{nm}$ ，它们的中心重合，每阶梯上金属膜的厚度均为20nm。采用图2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表面35nm的平面上方形阶梯孔纳米孔径激光器输出光场的各个方向电场分量的分布分别如图5a、图5b、图5c、图5d所示。图5a、图5b、图5c、图5d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激光器的光场分布呈现出下述特征：（1） $|E_y|^2$ 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。（2） $|E_z|^2$ 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，其大小比x方向的分量稍小一些。（3）在总场 $|E_t|^2$ 中，孔径范围内的分布以 $|E_x|^2$ 为主，但 $|E_z|^2$ 也会对总场分布形状产生较大的影响。从 $z=35\text{nm}$ 平面内的分布可看出，此时总场的分布为一椭圆光斑，由于受z向增强的影响，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。得到方形孔阶梯型纳米孔径激光器在距离孔径膜层表面35nm的平面上光斑的x、y方向上光强半高宽分别为147nm、84nm，距出射面5nm平面上光强极大值为213.16，通光效率为1.3431。可以看出，方形阶梯孔的光强极大值得到了极大的增强，同时通光效率提高了很多，在具有相同近场光斑尺寸的情况下，较普通的非阶梯型方形孔或圆孔纳米孔径激光器提高了两个数量级。方形阶梯孔的通光效率大于1，这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。另外，在计算中发现，若增加阶梯数目，出射光强将有进一步的提高，但通光效率将有所降低，所以在实用中应根据具体需要优化孔径设计。

实施例二为三角形阶梯孔纳米孔径激光器，其孔径截面图如图6、图7所示。光出射表面上的金属膜层17上有一三角形阶梯孔22，孔径内为开放空间。激光器工作波长为633nm时，按优化设计，三角形阶梯孔的几何尺寸描述如下，其孔径分为四个阶梯，每阶梯上三角孔21、20、19、18的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400nm、300nm、200nm、70nm，其等腰三角形的顶角均为53度，它们的中心重合。每阶梯上金属膜的厚度均为20nm。采用图2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表面 35nm 的平面上三角形阶梯孔纳米孔径激光器光场的各个方向电场分量的分布分别如图 8a、图 8b、图 8c、图 8d 所示。图 8a、图 8b、图 8c、图 8d 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激光器的分布呈现出下述特征：(1) $|E_y|^2$ 远小于 $|E_x|^2$ ，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。(2) $|E_z|^2$ 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，其大小比 x 方向的分量稍小一些。(3) 在总场 $|E_t|^2$ 中，孔径范围内的分布以 $|E_x|^2$ 为主，但 $|E_z|^2$ 也会对总场分布形状产生较大的影响。从 $z=35\text{nm}$ 平面内的分布可看出，此时总场的分布为一类椭圆光斑，由于受 z 向增强的影响，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。得到三角形阶梯孔纳米孔径激光器在距离孔径膜层表面 35nm 的平面上光斑的 x、y 方向上光强半高宽，分别为 97nm、74nm，距出射面 5nm 平面上光强极大值为 1049.76；通光效率为 1.6700。可以看出，三角形阶梯孔的光强极大值得到了极大的增强，同时通光效率提高了很多，与方形阶梯孔一样在具有相同近场光斑尺寸的情况下较普通的非阶梯型方形孔或圆孔纳米孔径激光器提高了 $10^2\sim 10^4$ 倍，同样也较普通的非阶梯型的三角孔纳米孔径激光器有很大的提高，而光斑尺寸变化不大。三角形阶梯孔的通光效率大于 1，这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。

实施例三为尖对尖的双三角形阶梯孔纳米孔径激光器，其孔径截面图如图 9 所示。其中，光出射表面上的金属膜层 23 上有二阶梯的尖对尖双三角形阶梯孔，孔径内为开放空间。激光器工作波长为 633nm 时，按优化设计，三角形阶梯孔的几何尺寸描述如下，其孔径分为两个阶梯，每阶梯上三角孔 27、26、25、24 的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 200nm、200nm、150nm、150nm，其等腰三角形的顶角均为 53 度。每阶梯上金属膜的厚度均为 40nm。采用图 2 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表面 35nm 的平面上这种双三角形阶梯孔纳米孔径激光器光场的各个方向电场分量的分布分别如图 10a、图 10b、图 10c、图 10d 所示。图 10a、图 10b、图 10c、图 10d 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尖对尖双三角形阶梯孔纳米孔径激光器的分布呈现出下述特征：(1) $|E_y|^2$ 远小于 $|E_x|^2$ ，主要分布在尖对尖双三角形孔径的顶角处；呈现出对称的四光斑分布。(2) $|E_z|^2$ 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。 $|E_z|^2$ 分量产生于双三角形孔径上与 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，其大小比 x

方向的分量稍小一些。(3) 在总场 $|E_t|^2$ 中, 孔径范围内的分布以 $|E_x|^2$ 为主, 但 $|E_z|^2$ 也会对总场分布形状产生较大的影响。从 $z=35\text{nm}$ 平面内的分布可看出, 此时总场的分布为一类椭圆光斑, 由于受 z 向增强的影响, 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。得到尖对尖的双三角形阶梯孔纳米孔径激光器在距离孔径膜层表面 35nm 的平面上光斑的 x 、 y 方向上光强半高宽分别为 74nm 、 62nm , 距出射面 5nm 处平面上光强极大值为 1075.84 , 通光效率为 1.2282 。可以看出, 这种双三角形阶梯孔的光强极大值得到了极大的增强, 同时通光效率提高了很多, 与方形阶梯孔一样在具有相同近场光斑尺寸的情况下较普通的非阶梯型方形孔或圆孔纳米孔径激光器提高了 $10^2\sim 10^4$ 倍, 同样也较普通的非阶梯型的尖对尖的双三角孔纳米孔径激光器有很大的提高, 而光斑尺寸变化不大。尖对尖的双三角形阶梯孔的通光效率大于 1 , 这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。

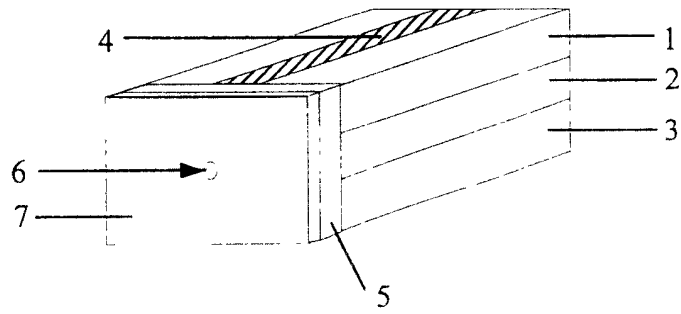


图 1

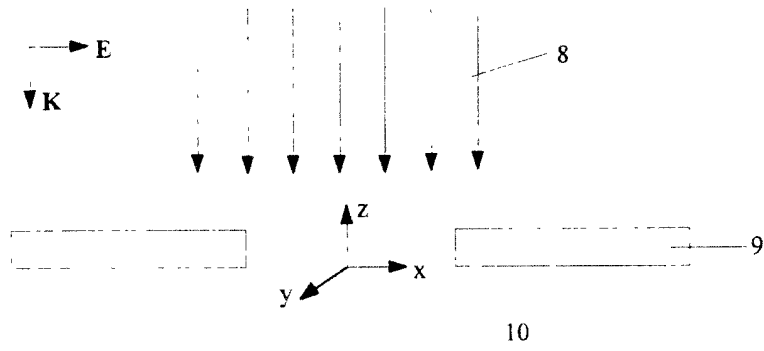


图 2

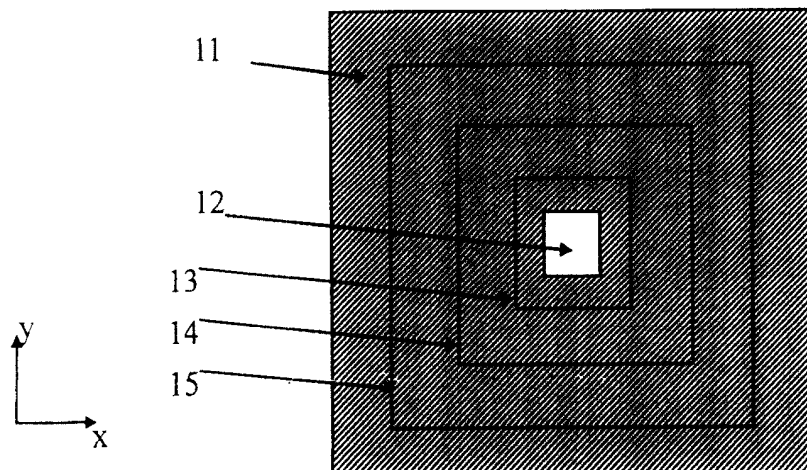


图 3

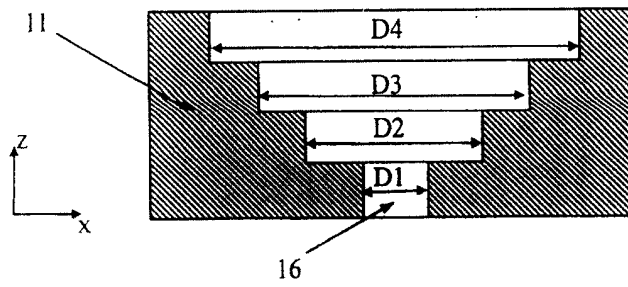


图 4

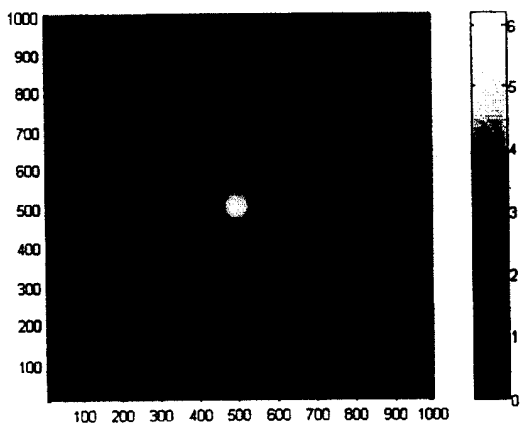


图 5a

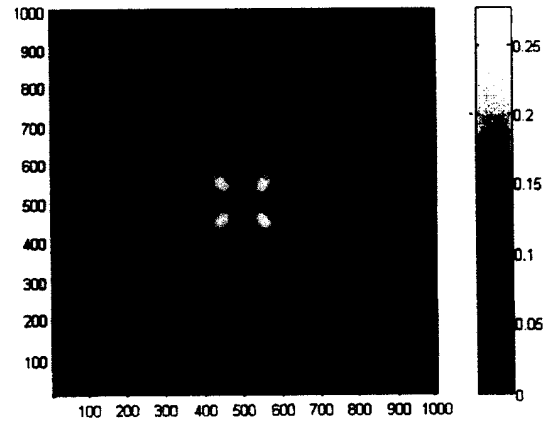


图 5b

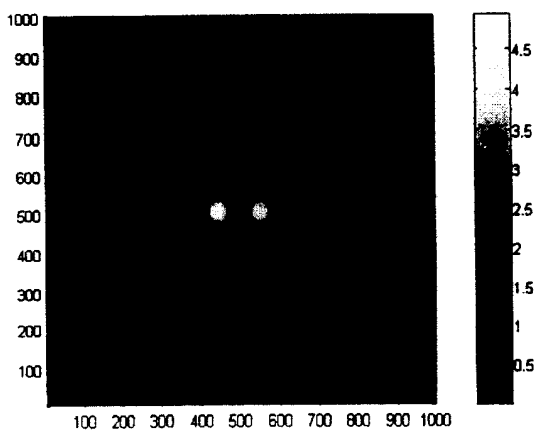


图 5c

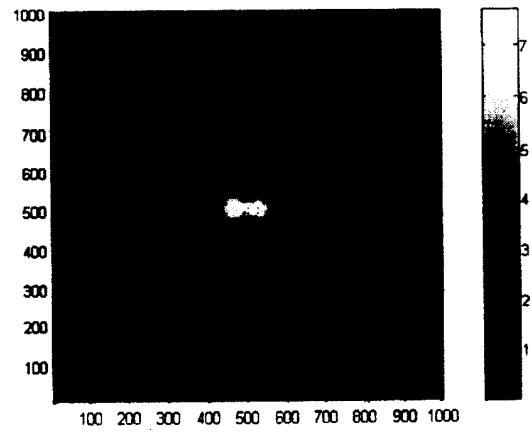


图 5d

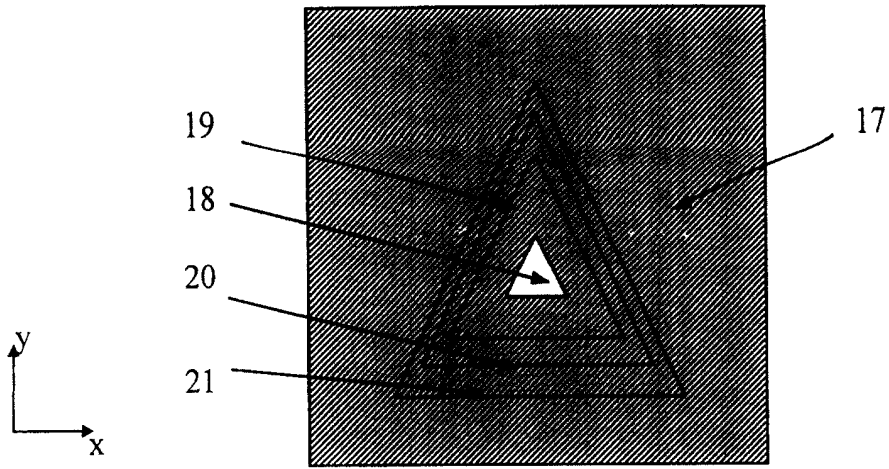


图 6

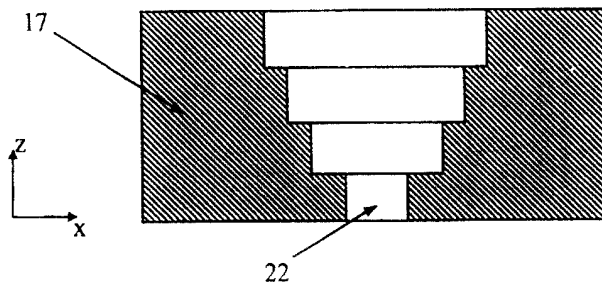


图 7

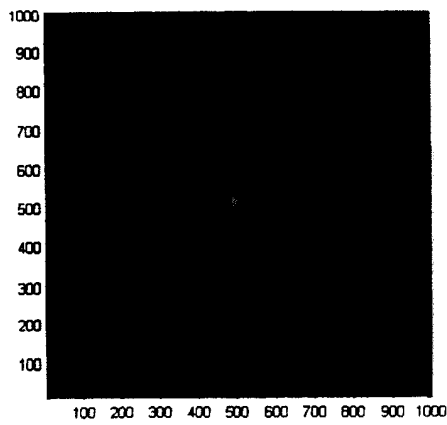


图 8a

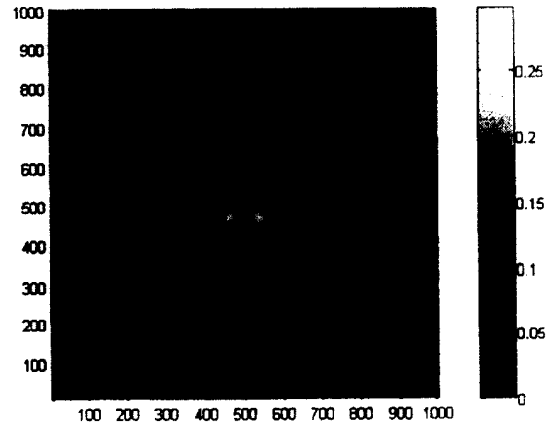


图 8b

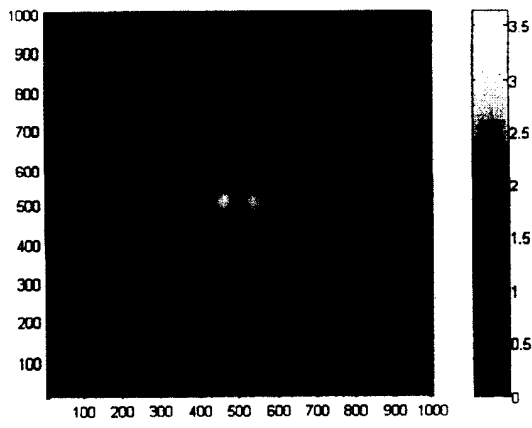


图 8c

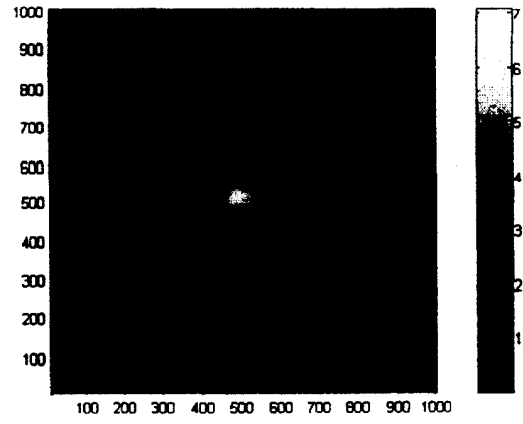


图 8d

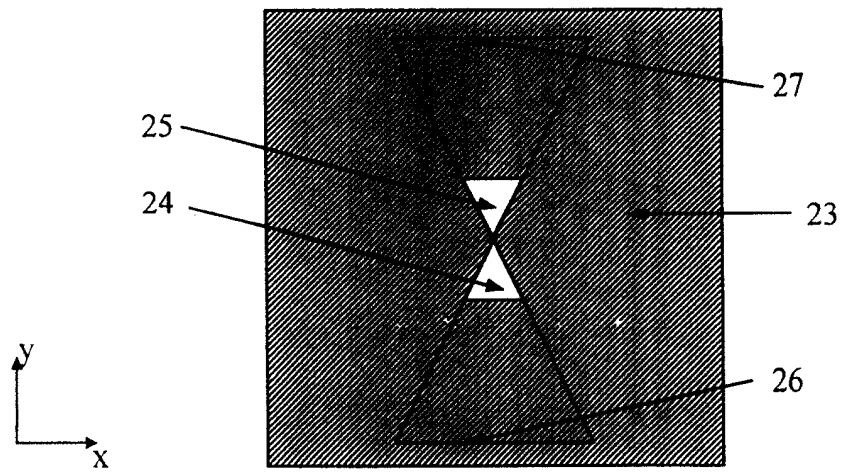


图 9

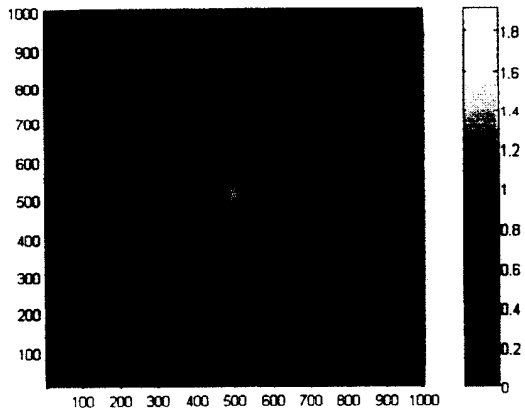


图 10a

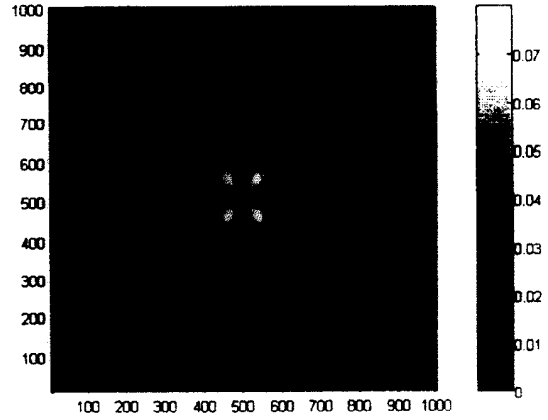


图 10b

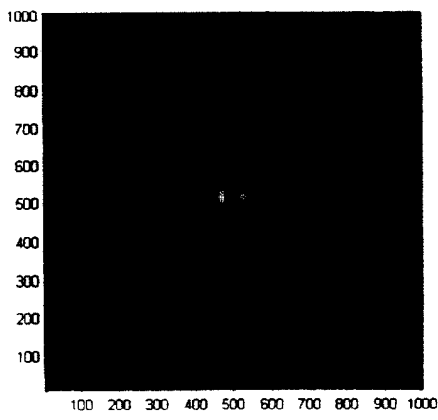


图 10c

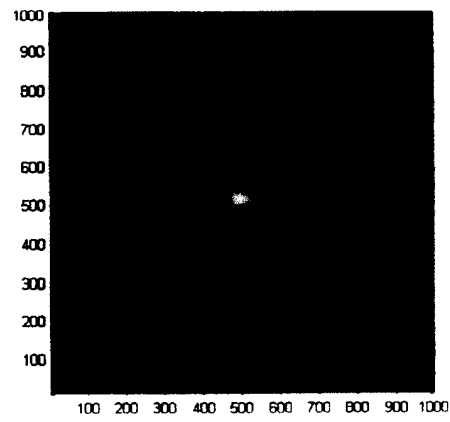


图 10d