



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 108885354 B

(45) 授权公告日 2021.08.31

(21) 申请号 201780020037.2

(22) 申请日 2017.03.24

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 108885354 A

(43) 申请公布日 2018.11.23

(30) 优先权数据
16305343.2 2016.03.24 EP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2018.09.25

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/EP2017/057129 2017.03.24

(87) PCT国际申请的公布数据
W02017/162880 EN 2017.09.28

(73) 专利权人 交互数字CE专利控股公司
地址 法国巴黎

(72) 发明人 L.布隆德 A.波里斯金

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所
11105
代理人 刘茵

(51) Int.Cl.
G02B 27/56 (2006.01)
B82Y 20/00 (2006.01)

审查员 裴显

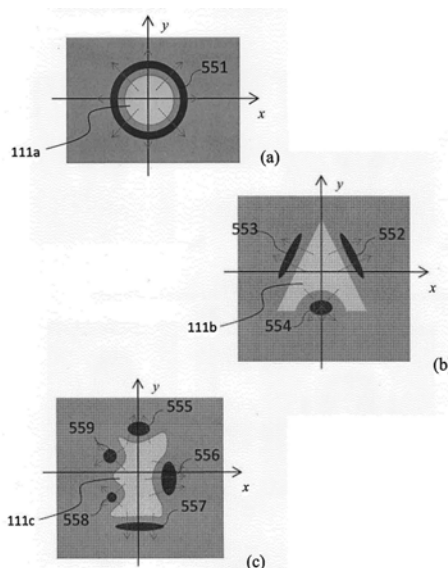
权利要求书2页 说明书17页 附图27页

(54) 发明名称

用于从入射电磁波形成近区中的场强图案的设备

(57) 摘要

本公开涉及一种用于从入射在设备上的电磁波形成近区中的场强图案的设备。尤其是,这样的设备允许将入射在设备上的电磁波局限在近区中的辐射波束中。它包括至少一个介电材料的层,其表面具有形成台阶的至少一个水平突然改变。所述表面相对于所述台阶的下方和侧向部分与具有比所述介电材料的折射指数更低的折射指数的物质接触。对于在这样的台阶附近冲击在设备上的入射电磁波,其遇到的指数的对应台阶产生复杂的电磁现象,这允许生成近区中的低色散会聚波束和特定场图案。



1. 一种用于从传播的电磁波形成近区中的场强分布的设备,所述电磁波入射在所述设备上,所述设备包括:

单层介电材料,所述单层介电材料具有第一折射指数 n_1 ,其中所述单层介电材料的表面包括形成台阶的至少一个水平突然改变,所述台阶仅在所述单层介电材料内向下延伸;

具有低于所述第一折射指数 n_1 的第二折射指数 n_2 的元件,其中所述元件与所述台阶接触,并且其中所述台阶被配置为生成与所述电磁波的传播方向相比倾斜的波束。

2. 如权利要求1所述的设备,其中所述倾斜波束具有能够从 $\frac{1}{2}\lambda_1$ 变化到几个波长的长度,其中 λ_1 为所述电磁波在所述单层介电材料中的波长。

3. 如权利要求1所述的设备,还包括沿所述倾斜波束的传播方向定位的接收元件。

4. 如权利要求3所述的设备,其中所述接收元件定位在所述倾斜波束的热斑点处。

5. 如权利要求3所述的设备,其中所述接收元件定位在距所述台阶距离 d 处,其中 d 在一个 λ_1 至 $10\lambda_1$ 之间,其中 λ_1 为所述电磁波在所述单层介电材料中的波长。

6. 如权利要求1所述的设备,其中所述倾斜波束与辐射角相关联,所述辐射角被定义为所述第一折射指数 n_1 、所述第二折射指数 n_2 、入射的所述电磁波与所述台阶相比的入射角、和台阶底角中的一个或多个的函数。

7. 如权利要求6所述的设备,其中所述辐射角约为等于 $(90^\circ - \arcsin(n_2/n_1))/2$ 的值。

8. 如权利要求7所述的设备,其中当 $n_1 = 1.49$ 且 $n_2 = 1$ 时,所述辐射角约为 23° ,并且当 $n_1 = 2$ 且 $n_2 = 1$ 时,所述辐射角约为 30° 。

9. 如权利要求1所述的设备,其中所述设备被配置为从作为单色电磁波的入射电磁波中形成波束,所述单色电磁波中的每一个具有等于约为 480nm 或 525nm 或者 650nm 的值的波长。

10. 如权利要求1所述的设备,其中所述台阶由在所述单层介电材料中制成的至少一个腔的边缘形成。

11. 如权利要求10所述的设备,其中所述至少一个腔是所述单层介电材料中的通孔。

12. 如权利要求10所述的设备,其中所述至少一个腔属于至少两个腔的至少一个集合。

13. 如权利要求10所述的设备,其中所述至少一个腔的目标为是柱形的或锥形的。

14. 如权利要求1所述的设备,其中所述台阶的高度 H 的目标为使得 $H > \frac{\lambda_1}{2}$,其中 λ_1 为所述电磁波在所述单层介电材料中的波长。

15. 如权利要求1所述的设备,其中所述设备还包括形成邻接所述单层介电材料的基板的至少一个层。

16. 如权利要求15所述的设备,其中所述设备还包括形成覆板的至少一个层,所述单层介电材料位于所述基板与所述覆板之间。

17. 如权利要求16所述的设备,其中所述基板和所述覆板由与所述单层介电材料相同的介电材料制成。

18. 如权利要求1所述的设备,其中所述介电材料是从由以下组成的组中选择的:玻璃、塑料、和聚合物材料。

19. 如权利要求16所述的设备,其中所述覆板的材料是从由以下组成的组中选择的:玻

璃、塑料、液体、和聚合物材料。

用于从入射电磁波形成近区中的场强图案的设备

技术领域

[0001] 本公开一般地涉及用于从电磁波(可见光在其中)形成场强图案的技术。更具体地但非排他地,本公开涉及用于近区中的近场聚焦和波束形成的技术。就近区而言,其在这里并且贯穿本文档意指根据本公开的设备周围的区域,该区域的尺寸可以从主体介质中的一小部分波长延伸到约十个波长。

背景技术

[0002] 电磁波的聚焦和准直(即波束形成(其当然也可以是散焦))是局部增加电场数量级的既定方式,并且以这样的方式提高其操作原理依赖于将以电磁波形式在空间中传播的能量转换成输出电压或电流的传感器(例如电光传感器)的效率。后来的传感器(例如CMOS成像传感器或光电二极管)处于几乎每个便携式电子设备(从智能电话和平板到专业光场相机)的核心。在不同波长范围内的各种其他应用中使用相同的局部场增强现象。

[0003] 在光学领域中,当今技术水平使得能够加工有具有纳米级尺寸的结构元件的高度集成组件(例如芯片和光学传感器),该纳米级尺寸接近或者甚至小于可见光的波长。以相同精度水平操纵光的可能性与现有技术相比将是巨大突破。

[0004] 然而,传统聚焦设备(诸如电介质和金属-电介质透镜)的空间分辨率受限于阿贝衍射极限,并且典型地不超过主体介质中的一个波长。同时,有许多应用需要亚波长分辨率或者可以从亚波长分辨率中受益,如A. Heifetetz 等人在“Photonic nanojets”, J. Comput. Theo. Nanosci., 第6卷, 第1979-1992 页, 2009中解释的那样。这解释了对实现亚波长分辨率的聚焦组件的增长的兴趣。

[0005] 与当今移动和可穿戴技术相关联的另一关键挑战包括对关联设备的进一步小型化的需求。传统透镜的操作原理阻止其尺寸减小超过某个极限(~ 10 个波长),这构成了该领域未来发展的瓶颈。特别地,这样的约束可能关系到光检测器的封装密度,并且因此可能妨碍图像分辨率的进一步改善。

[0006] 最后,传统透镜的操作原理需要透镜与主体介质材料之间的某个折射指数比率。指数比率越高,可以实现的透镜聚焦能力越高。因此,在大多数情况下,透镜被气隙分离,这需要额外的空间并且导致空间和对准中的透镜固定的某些困难。完全集成系统可以帮助避免这些问题。然而,由于技术困难和光学透明材料的有限范围的折射指数变化(光学范围内的典型指数值为 $n < 2$),所以具有不同折射指数的若干介电材料的组合相当困难并且并不总是可行。

[0007] 因此,存在对新的聚焦组件的需求,其将克服这些缺点。

[0008] 然而,目前,最流行的聚焦元件仍然是很久以前推出的凸介电透镜,如图1A中所示。如果透镜具有足够的孔径(aperture)大小并且其轮廓(profile)形状相对于透镜材料和主体介质的折射指数被适当定义,则这样的透镜可以有效地将光聚焦在位于距透镜表面某个距离FL的紧焦点FS中。折射介电透镜的操作原理基于斯涅尔定律,该定律预测由于两种介质中的不同相速度所导致的光射线在透镜的空气-电介质边界处的倾斜(折射)。为了

实现所需聚焦功能,透镜必须具有主体介质中的至少几个波长的孔径大小,其具有从微透镜情况下的几微米变化到相机物镜情况下的若干厘米的典型物理大小。它们的分辨率受限于阿贝衍射极限,并且典型地大于主体介质中的一个波长。

[0009] 还存在菲涅尔型衍射透镜,其操作原理依赖于通过多个同心环衍射的波的干涉,如图1B图示的那样。如果与图1A的折射透镜相比,则这样的透镜具有较小厚度,然而,它们通常遭受强色差。它们的分辨率受限于衍射极限,像折射透镜一样。

[0010] 如上面已经提到的那样,远场聚焦系统(例如折射和衍射透镜)的空间分辨率受限于通过 $\sim\lambda/2n \sin\alpha$ 设置的阿贝衍射极限,其中 λ 是真空波长, n 是主体介质折射指数,以及 α 是透镜的半孔径角(就远场聚焦系统而言,其在这里意指在大于几个波长的距离处、即在远区中创建焦斑FS的系统)。因此,可以通过增加透镜孔径大小或者通过减小聚焦距离FL来实现更高的分辨率。后者解释了对创建近区中的焦斑FS的近场聚焦系统的增长的兴趣。跨不同领域的越来越多的应用也强烈支持这种兴趣,该应用需要具有最高可能分辨率的近场光处理,诸如例如在显微镜、光谱学或计量学中。

[0011] 目前,基于亚波长孔径探针(L.Novotny等人,“Near-field optical microscopy and spectroscopy with pointed probes”,Annu.Rev.Phys.Chem.第57卷,第303-331页,2006)、平面亚波长图案化结构(美国专利文献8,003,965)和光子纳米喷射微球介电透镜,存在若干近场聚焦技术可用。如例如在专利文献US 7,394,535中描述并且在图1C中图示的那样,后者的解决方案(即纳米喷射微球)通常称为最有效的解决方案,因为微球可以同时提供亚波长分辨率和高水平的场强增强(FIE)。如图1C上所示,它们允许生成纳米喷射波束NB。该光子纳米喷射是在介电微球的阴影侧表面处引起的光强图案。专利文献US2013/0308127还描述了纳米喷射设备,其允许通过使用微球将冲击辐射局限在光子纳米喷射中来增强来自样品的拉曼发射,并且从而增加击打样品的辐射强度。可以通过配置微球的直径和折射指数连同辐射的散度(dispersion)和波长以增加光子纳米喷射中的辐射波束的强度,来改善增强的量。

[0012] 尽管它们有吸引人的性能特性,但是微球的使用与某些困难相关联,这些困难与微球的以下方面相关:(i)精确定位,(ii)与其他光学组件的集成,以及(iii)与既定平面制造技术的不兼容性。这些困难影响可行性并增加基于纳米喷射的设备的制造和组装成本。可能地,可以使用纳米级图案化结构或中空管来解决组装问题,但是这些解决方案可能与一些应用不兼容。

[0013] 最近基于固体介电立方体(SDC)提出了纳米喷射微球透镜的备选解决方案。如V.Pacheco-Pena等人在“Terajets produced by dielectric cuboids” Applied Phys.Lett.第105卷,084102,2014中证实并且由图1D图示的那样,当被平面波照射时,SDC透镜也可以产生会聚波束TB,类似于针对微球观察到的纳米喷射波束,如果立方体的大小和形状相对于入射波长和立方体材料的折射指数被适当调整,则具有亚波长尺寸。对于具有主体介质中的约一个波长的尺寸和折射指数比率 $n_2/n_1 \sim 1.5$ (其中 n_1 和 n_2 分别是主体介质和立方体材料的折射指数)的SDC,实现最佳的空间分辨率($\sim\lambda/2$,其中 λ 是主体介质中的波长)和场强增强(~ 10 的因子)。

[0014] 虽然SDC透镜的矩形形状对于一些平面制造方法(例如微机械加工或光刻)可以是有利的,但是由于以下约束,在光学范围内操作的SDC透镜的制造可能是困难的或者甚至是

不可能的：

[0015] -对立方体大小和形状强加的严格要求，

[0016] -缺少具有超过标准光学材料的范围的所需折射指数的材料(在光学范围内，可以用作主体介质的普通光学玻璃和塑料的折射指数从 $n_1 \approx 1.3$ 变化直到 2.0 ，而根据V.Pacheco-Pena等人，立方体透镜折射指数的所需值应为 $n_2 \sim 2.25$ (建议比率 $n_1/n_2 = 1.5$ ，其中对于标准玻璃 $n_1 \approx 1.5$)。

[0017] -没有提供针对设置这样的透镜在空间中的位置而提供的解决方案。

[0018] 最后，值得提到还有一个在光学范围内可用的近场增强的替选解决方案。该解决方案基于称为表面等离子极化激元(SPP)的现象。SPP现象使人能够创建具有非常高场强的亚波长热斑点。特别地，基于SPP的组件在色彩过滤和显示技术中找到应用，如Y.Gu等人在“Plasmonic structures color generation via subwavelength plasmonic nanostructures”J.Nanoscale,第7卷,第 6409-6419页,2015中描述的那样。然而，SPP场紧密耦合到金属并且远离表面以指数方式衰减，这阻止SPP设备用于需要“远程通信”或远场波束形成的光学系统。此外，只能在特定条件下激发SPP，该特定条件包括：

[0019] -金属的某些材料属性(即相对介电常数的负实部，其仅对可见光谱中的一些贵金属固有)，

[0020] -入射场中的法向电场分量，

[0021] -使用SPP发射器(例如介电棱镜或格栅)。

[0022] 这些约束并不总是可接受的。

[0023] 因此，所有现有技术的聚焦方法和组件都遭受某些限制，并且不完全满足当今和未来的微型和纳米技术的需求。所有(或至少一些)可用聚焦设备固有的一些限制与以下相关联：

[0024] -组件的物理尺寸，

[0025] -有限的空间分辨率，

[0026] -有限的介电材料选择(有限的折射指数变化范围)，

[0027] -一些制造/集成困难，

[0028] -与其操作原理有关联的设备性能特性(例如色差和/或偏振敏感响应)的某些限制。

[0029] 因此，将希望提供一种新技术用于从电磁波形成近区中的场强图案，尤其用于生成近区中的会聚低色散辐射波束，其不会呈现这些缺点中的至少一些。

发明内容

[0030] 在一个方面，公开了一种用于从入射在设备上的电磁波形成近区中的场强分布的设备。这样的设备包括至少一个介电材料的层；所述至少一个介电材料的层的表面具有形成台阶的至少一个水平突然改变，并且所述表面相对于所述台阶的至少下方和侧向部分与具有比所述介电材料的折射指数更低的折射指数的物质接触。

[0031] 因此，本公开提供了新一代的组件，其允许借助于纯介电微结构形成近区中的所需场强分布。这样的设备可以尤其用于将电磁波聚焦，并且用于从(尤其是但不排他地，从表面可以均匀的介电层的底部部分)入射在设备上的平面电磁波生成近区中的会聚的低色

散光学波束(所谓的纳米喷射)。当在反向模式下使用时,它们也可以用于校正由位于接近介电层(其表面具有水平突然改变)的顶部部分的电磁辐射源或另一波束形成元件生成的电磁波的非平面波阵面。特别地,这样的校正可以包括将非平面波阵面(典型地对于波束和球面波)变换成局部平面波阵面或波束,或另一成形波阵面。

[0032] 换句话说,当用在光学波长时,这样的设备可以产生近区中的至少一个会聚光学波束(即纳米喷射波束),从而在定义在设备的近区中的成像平面中创建至少一个高强度焦斑。这样的设备的使用当然不限于这样的波长。

[0033] 如将在本公开的以下部分中更详细地描述的那样,这样的斑点具有典型地为或多或少伸长的圆形或椭圆形的形状。这里,由围绕场强等于对应热斑点中的最大强度的一半的区域的等值线的形状来定义斑点的形状。如果台阶的多于一个凹区段有助于单个斑点的形成,则斑点也可以具有更复杂的形状。当以半功率定义时,它们的最小大小在直径上近似为波长的一半,其接近阿贝衍射极限。

[0034] 当形成多个斑点的图案时,斑点之间的间距应为至少一个波长,否则两个斑点可以合并,形成具有复杂形状的共同热斑点。

[0035] 与这样的斑点相关联的场强增强(与在相同主体介质中传播的平面波相比)从二的因子(对于具有直边界的台阶)变化到十的因子,或者甚至对于更复杂形状的台阶高达二十的因子。

[0036] 对于在介电层中的台阶附近到达设备的入射电磁波,表面中的水平突然改变引起指数的台阶。这样的指数台阶产生复杂的电磁现象,这将关于前述公开内容中的附图更详细地描述。这样的复杂电磁现象(其涉及入射波在相对于台阶的边缘的下方部分上的衍射,该衍射与衍射波在台阶的侧向部分上的折射耦合)允许产生会聚波束,并且因此产生位于近区中的成像平面中的不同场图案,这取决于台阶的特征,并且取决于介电材料与覆盖其下方表面和侧向表面的物质之间的折射指数差异。纳米喷射波束的出现由衍射/折射波和入射平面波的干涉所引起。

[0037] 与台阶的下方表面和侧向表面接触的物质可以仅为空气、另一气体、真空、液体或者具有比介电材料的折射指数更低的折射指数的任何其他材料。还必须注意,台阶的侧向部分不需要一定是垂直的,并且可以相对于介电层表面的法线示出角度。此外,它可以不一定是直线区段。

[0038] 对介电层的底表面没有限制,其可以是平面的或者不是平面的。介电层可以尤其是柔性的。

[0039] 因此,根据本公开的实施例的这样的设备允许生成近区中的低色散波束。可以通过适当地选择介电层和物质/元件的材料适当折射指数比率、台阶的边缘线长度和曲率、以及其底角来控制这样的功能,如在阅读下文时将变得更明显的那样。

[0040] 根据本公开的实施例,所述台阶由在所述至少一个介电材料的层中制成的至少一个腔的边缘形成。

[0041] 因此,与介电材料的层中的单个台阶相比,腔的所有边缘可以有助于生成近区中的场强分布,尤其有助于产生(即引起)至少一个会聚的辐射波束。取决于腔横截面的形状,可以产生从由腔生成的波束的组合中获得的不同场图案。

[0042] 根据另一实施例,所述至少一个腔是所述至少一个介电材料的层中的通孔。因此,

腔的高度对应于介电层的厚度。在腔不是通孔的情况下,其高度因此小于介电层的厚度;它可以位于相对于介电层的顶表面和底表面的任何位置。腔不需要是都相同的腔。

[0043] 根据另一实施例,所述至少一个腔属于至少两个腔的至少一个集合。

[0044] 腔可以排列成腔阵列,或者形成特殊图案的非规则排列,以便生成近区中的特定聚焦波束,或者波束阵列,这对于一些应用(如光学传感器)而言可能是感兴趣的。可以使用两个或更多个接近定位的腔的阵列,以便提供对更大区域中的场分布的控制和/或增加一些选定点处的场强。此外,腔阵列可以是平面的(其中所有腔的所有基面都在相同平面中)或者不是平面的,并且可以由相同的腔制成或者不由相同的腔制成。

[0045] 根据又一实施例,所述至少一个腔的目标为是柱形的或锥形的。

[0046] 就柱形腔而言,其在这里并且贯穿本文档意指腔的形状是广义的柱,即通过沿与曲线的平面相交的轴投影闭合的二维曲线而创建的表面。换句话说,这样的柱不限于直立的圆柱,而是覆盖任何类型的柱,尤其是但不排他地例如立方体或棱柱。腔也可以具有锥的形式。其主轴可以与腔的底部的表面正交,或者是倾斜的。由于制造容限,腔也可能具有不完美的形状,并且必须理解,例如,目标为被成形为柱的腔可能在加工处理期间变成具有S形横截面的锥形腔。

[0047] 更一般地说,这样的腔被形成为具有任意横截面的柱或锥,其可以被调整(优化)以便产生所需近场图案,即xy平面(典型地与入射波传播方向正交)中的所需场强分布。该图案可以有具有相同(或不同)场强水平的一个或多个热斑点。

[0048] 非对称腔也是可能的。例如,横截面在xy平面中为三角形的腔将创建三个斑点。其中的一个如果对应面是凹的,则可以被增强,如将关于附图更详细地解释的那样。

[0049] 根据实施例,所述台阶或所述腔的高度H的目标为使得 $H > \frac{\lambda_1}{2}$,其中 λ_1 是所述电磁波在所述介电材料中的波长。实际上,对于从主体介质(介电材料)中的约半个波长变化到几个波长的腔高度,纳米喷射现象很明显。需要最小高度来形成局部平面波阵面,其将引起纳米喷射波束。

[0050] 此外,纳米喷射波束出现在腔的底部。在大多数应用中,希望具有延伸超过腔的高度的波束,腔的高度应小于所生成的纳米喷射波束的长度,其通常约为两个至五个(在一些情况下为十个或者甚至更多)波长。

[0051] 根据实施例,这样的设备还包括形成邻接所述介电材料的层的基板的至少一个层。

[0052] 这样的基板可以有助于设备的机械刚性。

[0053] 根据另一实施例,这样的设备还包括形成覆板的至少一个层,所述至少一个介电材料的层位于所述基板与所述覆板之间。

[0054] 因此,设备可以采用平面光学透明元件的形式,包括两个玻璃或塑料板(即基板和覆板),在它们之间嵌入具有空隙或填充的中空微腔的介电材料。覆板当然可以是非平面的,并且例如遵循基板的形状。实际上,当被正交于基部入射的平面波照射时,由设备生成的场强分布的图案仅取决于腔底角(或台阶角),取决于腔横截面形状,以及取决于介电材料与填充腔的物质(或覆盖相对于台阶的表面的下方部分)之间的指数比率。

[0055] 必须注意的是,对于平面波的斜式入射,波束的辐射将改变,其中波束的形状对于约 $\pm 30^\circ$ 的入射角被良好维持,这取决于指数比率、大小、底角和腔边缘线的曲率。

- [0056] 根据实施例,基板和覆板由与所述至少一个介电材料的层相同的介电材料制成。
- [0057] 根据实施例,所述介电材料属于包括以下的组:
- [0058] -玻璃;
- [0059] -塑料;
- [0060] -聚合物材料,诸如PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)或PDMS(聚二甲基硅氧烷)。
- [0061] 必须注意的是,不认为空气是用于根据本公开的设备的候选介电材料。
- [0062] 因此,可以使用易于找到并且不昂贵的标准介电材料来制造这样的设备。
- [0063] 根据实施例,所述覆板的材料属于包括以下的组:
- [0064] -玻璃;
- [0065] -塑料;
- [0066] -聚合物材料。
- [0067] 在本公开的一个实施例中,提出了一种从传播的电磁波形成近区中的场强分布的设备,该电磁波入射在所述设备上。这样的设备包括:
- [0068] 至少一个介电材料的层,具有第一折射指数 n_1 与具有形成台阶的至少一个水平突然改变的表面;
- [0069] 具有低于所述第一折射指数 n_1 的第二折射指数 n_2 的元件,其与所述台阶接触;以及
- [0070] 所述台阶生成与所述电磁波的传播方向相比倾斜的波束。
- [0071] 在变型中,倾斜波束具有能够从 $\frac{1}{2}\lambda_1$ 变化到几个波长的长度,其中 λ_1 为所述电磁波在所述介电材料中的波长。
- [0072] 在变型中,设备包括沿所述倾斜波束的传播方向定位的接收元件。
- [0073] 在变型中,接收元件定位在所述波束的热斑点处。
- [0074] 在变型中,接收元件定位在距所述台阶距离 d 处,其中 d 在一个 λ_1 至 $10\lambda_1$ 之间,其中 λ_1 为所述电磁波在所述介电材料中的波长。
- [0075] 在变型中,倾斜波束与辐射角相关联,所述辐射角被定义为所述第一折射指数 n_1 和/或所述第二折射指数 n_2 、和/或所述入射电磁波与所述台阶相比的入射角、和/或台阶底角的函数。
- [0076] 在变型中,辐射角约为等于 $(90^\circ - \arcsin(n_2/n_1))/2$ 的值。
- [0077] 在变型中,当 $n_1=1.49$ 且 $n_2=1$ 时,所述辐射角约为 23° ,并且当 $n_1=2$ 且 $n_2=1$ 时,所述辐射角约为 30° 。
- [0078] 在变型中,设备适于针对作为单色电磁波的入射电磁波形成波束,所述单色电磁波中的每一个具有等于约为480nm或525nm或者650nm的值的波长。

附图说明

- [0079] 参考以下通过示例给出并且不限制保护范围的描述和附图可以更好地理解本公开,并且附图中:
- [0080] -图1a至图1d描绘了现有技术的传统折射(图1a)和衍射(图1b)透镜、纳米喷射微球(图1c)和terajet立方体(图1d);
- [0081] -图2是根据本公开的实施例的由具有台阶的介电层产生的纳米喷射波束的示意

图,其中图2a是侧视图并且图2b和图2c是根据两个替选实施例的顶视图;

[0082] -图3图示了图2a的替选实施例,其中台阶具有圆角顶部边缘;

[0083] -图4图示了根据本公开的实施例的在介电材料的层中形成的微腔的拓扑;

[0084] -图5a至图5e图示了当以不同波长从下方被平面波照射时由具有圆柱形状的图4的腔形成纳米喷射波束;

[0085] -图6a和图6b提供了对图5a至图5e的纳米喷射波束辐射角的分析;

[0086] -图7a和图7b图示了本公开的实施例潜在的复杂电磁现象;

[0087] -图8a至图8c图示了根据本公开的实施例的当从下方被单位振幅平面波照射时由具有不同高度的圆柱形腔产生的纳米喷射波束的近场图;

[0088] -图9a至图9d示出了在XZ平面(顶行)和XY平面中的截面(底行)中的、在单位振幅平面波的不同入射角下由中空圆柱形腔产生的纳米喷射波束;

[0089] -图10a和图10b图示了根据本公开的实施例的在XZ平面(顶行)和XY平面中的截面(底行)中的、针对具有不同折射指数的不同主体介质观察到的纳米喷射波束现象;

[0090] -图11示出了根据本公开的实施例的四个示例性柱形腔的顶视图,每个柱形腔具有不同形状的横截面边界,即:(a)圆形,(b)正方形,(c)8形,以及(d)矩形;

[0091] -图12a至图12d示出了在XZ平面(顶行)和XY平面中的截面(底行)中的、图11的每个腔的对应模拟近场图;

[0092] -图13a至图13c是具有不同横截面的三个示例性柱形腔的成像平面中的场强分布的示意图;

[0093] -图14提供了根据本公开的实施例的组件的实现方式的示意图;

[0094] -图15a至图15f图示了图14的组件的替选实施例的侧视图;

[0095] -图16图示了图14和图15的设备的典型使用场景;

[0096] -图17图示了本公开的特定实施例,根据该实施例,聚焦组件基于嵌入主体介质中的相同中空立方体形腔的 2×2 平面阵列;

[0097] -图18图示了替选实施例,其中图17的中空立方体形腔用沿平面波传播方向取向的中空圆柱代替;

[0098] -图19图示了又一实施例,其中在电介质和自由空间的边界处创建中空圆柱的 2×2 阵列;

[0099] -图20图示了由图17、图18和图19的所有三个实施例产生的纳米喷射波束的轮廓;

[0100] -图21提供了基于嵌入主体介质中的中空柱的单周期性(图21a)和双周期性(图21b)阵列的两个另外的示例性实施例;

[0101] -图22a和图22b是图示出图21a和图21b的周期性结构的可能的实现方式实施例的示意图,其中在顶行上是侧视图并且在底行上是顶视图;

[0102] -图23呈现了图21a和图21b的周期性结构的替选可能的实现方式实施例。

[0103] 附图中的组件不一定按比例绘制,而是将重点放在图示本发明的原理上。

具体实施方式

[0104] 本公开的一般原理依赖于新的介电微结构的设计,该介电微结构可以用于生成近区中的会聚低色散光学波束,也称为纳米喷射。其使用不限于光学波长。介电微结构中的折

射指数的台阶引起衍射现象,该衍射现象又与折射和干涉现象耦合,并且当介电微结构被平面波照射时允许生成近区中的会聚辐射波束,这取决于结构的形状和尺寸。

[0105] 反过来,这样的介电微结构可以用于将由位于接近台阶的侧向边缘的局部电磁辐射源或另一波束形成元件生成的电磁波的非平面波阵面转换成局部平面波阵面或波束。

[0106] 近区中一个或若干个纳米喷射波束的形成与入射在设备上的平面(或局部平面)波一起出现。当设备在反向模式(其中本地源放置在焦点上(即在纳米喷射波束区域中))下工作时,形成局部平面波,其等效于延伸到无限远的无限长波束。

[0107] 可以通过设置台阶的边缘线长度和曲率以及其底角来控制这样的纳米喷射设备的波束形成功能。

[0108] 这样的一般原理允许设计新的聚焦和波束形成组件,其可以代替密集光学和光子系统中的传统聚焦设备,如在照片/视频相机中使用的集成光学传感器,其为移动技术领域(例如智能电话、平板、增强现实(AR)和虚拟现实(VR)眼镜)中的基本组件。

[0109] 由于这样的介电微结构的超紧凑尺寸,以及可以通过使用这样的微结构产生的宽范围和多样化的场图案,本公开可以用于若干技术领域中,包括但不限于:

[0110] -眼镜电子产品,包括AR和VR眼镜;

[0111] -用于照片/视频/光场相机的光学传感器;

[0112] -光通信系统,包括量子计算机;

[0113] -生物/化学传感器,包括片上实验室传感器;

[0114] -显微镜、光谱学和计量学系统;

[0115] -用于毫米/亚毫米/红外(IR)波长范围内的应用的集成透镜天线。

[0116] 以下讨论主要集中于光学应用上,并且因此涉及与纳米级结构和波长相关的材料属性和制造方法。然而,所提出的设计概念可以容易地缩放到其他波长范围,包括微波、mm波、THz、IR、可见光和UV。

[0117] 本公开的发明人已经得出结论,当发生衍射的表面与具有比介电材料的折射指数更低的折射指数的物质(材料或气体)接触时,在介电材料的基部表面的水平突然改变(也称为台阶)附近的、平面电磁波在该表面上的衍射可以导致形成会聚的光学波束(所谓的纳米喷射)。可以通过台阶大小和与台阶的侧向表面和下方表面相邻的台阶边缘线的形状的变化来控制波束的数量和每个单独的波束的形状。与由菲涅尔理论预测的众所周知的衍射波束不同,纳米喷射波束是低色散的(它们没有示出波长依赖性或者示出小的波长依赖性)。此外,根据本公开的相同的纳米喷射聚焦组件可以产生与台阶边缘线的不同区段相关联的多个独立的波束(具有相同或不相同的形状),这对于菲涅尔衍射透镜是不可能的。这些独特的特征使得根据本公开的基于纳米喷射的聚焦组件对于许多当今和未来的应用具有吸引力。

[0118] 图2至图10允许理解对根据本公开的纳米喷射波束的形成进行解释的物理现象。

[0119] 图2图示了本公开的实施例,其中在介电层112的表面的水平中发生突然改变,从而在该层中形成台阶。图2a示出了介电层112的侧视图。图2b和图2c分别示出了具有直的(图2b)边缘线的台阶的情况下的顶视图和具有弯曲的(图2c)边缘线的台阶的情况下的顶视图。

[0120] 如图2a中所示,设备被入射波20照射,入射波20沿z轴来自设备的基部并且正交于

介电层112的基部表面。如由图2b和图2c中的虚线箭头示意性示出的那样,纳米喷射波束55源自台阶的基部边缘,该台阶包括横向部分120和侧向部分121(其也可以相对于z轴倾斜)。

[0121] 标号为22至24的斑点表示在成像平面中形成的近场分布中的对应热斑点。在图2c中观察到的具有两个热斑点23、24的特定场分布与具有负责形成两个独立的纳米喷射波束的两个凹区段的边缘线的形状相关联。

[0122] 图3图示了图2a的替选实施例,其中在介电层112中形成的台阶示出了圆角顶部边缘122。当像图2a中那样被入射波20照射时,这样的台阶还将生成纳米喷射波束55,其源自台阶的基部边缘。

[0123] 图4图示了本公开的实施例,根据该实施例,在介电材料的层的表面处形成的台阶实际上是在介电材料的层112中制成的微腔111的边缘。本公开当然不限制于这样的实施例,并且接近介电材料表面的水平和指数的任何突然改变足以生成物理现象,这将在下文中描述。这样的台阶其实可以被认为是无限大小的腔的边缘。

[0124] 必须理解的是,在台阶的情况下,聚焦功能不与整个结构相关联,而是与该台阶不连续性的基本区段相关联。台阶不连续性的其他区段将有助于形成其他纳米喷射波束,其可以一起形成(i)如一排台阶的情况下的宽的均匀“叶片状”纳米喷射波束(参见图2a和图2b),或者(ii)任意大的圆柱形腔的情况下的环(参见图12a、图13a),或者(iii)由任意形状的腔的曲线边缘产生的任意数量的不同形状的局部波束(参见图13c)。

[0125] 为简明起见,我们因此在下文中集中于在介电材料的层112中形成的微腔111的示例,如图4中图示的示例。

[0126] 如可以观察到的那样,这样的腔是柱形的,具有任意形状的横截面。就柱形腔而言,其在这里并且贯穿本文档意指形状为柱的腔,即通过沿与曲线的平面相交的轴投影闭合的二维曲线而创建的表面。换句话说,这样的柱不限于直立的圆柱,而是覆盖任何类型的柱,尤其是但不排他地例如立方体或棱柱。

[0127] 图4给出了一些标记,其在本文档中将在下文中使用。如可以观察到的那样,腔浸没在折射指数 n_1 的主体介质Media 1 112中,并且是空的或者填充有折射指数 n_2 的材料(空气、气体、液体、聚合物材料...)Media 2,使得 $n_2 < n_1$ 。

[0128] 例如,腔具有圆柱的形式,其填充有真空($n_2 \approx 1$)并且嵌入具有示例折射指数 $n_1 = 1.49$ 的同质非色散介电介质中。

[0129] 沿z轴从下方入射平面波(关于标记参见图4)。图5图示了当被该平面波照射时由这样的腔形成纳米喷射波束。更准确地说,图5a至图5e各自对应于入射电磁波的不同波长,即 $\lambda_0 = 450、500、550、600$ 和 650nm ,并且示出了对于嵌入具有折射指数 $n_1 = 1.49$ 的介质中的中空圆柱($n_2 \approx 1, L_z = 740\text{nm}, R = 370\text{nm}$)的情况,在时间平均坡印亭矢量方面绘制的XZ平面中的近场图。腔被来自下方的单位振幅 E_y 偏振平面波照射。

[0130] 如可以观察到的那样,对于低色散介电材料,纳米喷射波束的形状及其方向在宽波长范围内保持稳定(当波长变化时, n_2/n_1 接近恒定)。在图6a和图6b中报告对纳米喷射波束辐射角的详细分析。对于图5的五个不同波长,图6a图示了在定义为 $z = z_0 - L_z$ 的三个不同平面处的XZ平面中的坡印亭矢量。图6b图示了作为波长的函数、基于图6a中的最大值的位置计算的纳米喷射波束辐射角。

[0131] 从近场图提取的这些数据显示,对于从至少450到750nm的波长范围,纳米喷射波束辐射角的变化不超过 3° (在下文中,假设介电材料为同质的、各向同性的且非色散的)。如在图6a中看到的那样,对角度变化的主要贡献来自于柱上方的波束倾斜($z_0=1500\text{nm}$,其中 z_0 是相对于腔基部120定义的成像平面的相对位置,即 $z_0=z-L_z$),而($z_0=500\text{nm}$)处的波束形状对于整个波长范围保持稳定。这样的行为对于菲涅尔型衍射透镜而言并不典型,并且因此需要详细解释。

[0132] 可以通过在中空腔的基部边缘附近(或者更一般地在介电材料表面的水平突然改变附近)发生的三种电磁现象的组合来解释纳米喷射波束的起源,三种电磁现象即:

[0133] -来自与腔的基部120(或者,更一般地与在主体介质中形成的台阶的较低水平的表面)相关联的指数台阶不连续性的衍射,

[0134] -衍射波在腔的侧向边缘121处(或者更一般地在台阶的侧向部分上)的折射,以及

[0135] -折射波和入射平面波在腔外(或者更一般地在主体介质中)的干涉。

[0136] 图7a和图7b中给出了图示这三种现象的示意图。如图5和图6中那样,我们假设主体介质是光学透明的非色散介电材料,具有折射指数 $n_1=1.49$ (例如塑料或玻璃),并且腔填充有真空, $n_2=1$ 。入射平面波从图中的下方到达。

[0137] 图7a和图7b中图示的复杂电磁现象的关键元素如下:

[0138] -入射平面波在与腔基部相关联的电介质-空气边界120处(或者更一般地当达到由主体介质表面中的水平突然改变引起的主体介质中的指数台阶时)感应电流;

[0139] -将这些感应电流视为惠更斯次级源50至53;

[0140] -根据衍射理论,由惠更斯源辐射的球面波54导致朝向“阴影区域”、即朝向腔的侧向边界121的一些功率泄漏;

[0141] -根据斯涅尔-笛卡尔定律,在穿过侧向(垂直)边界时,由惠更斯源辐射的波经历折射,其导致折射波在某个角度上的倾斜。

[0142] -在图7b中,我们可以注意到在腔外,对于沿腔基线的不同惠更斯源位置,波阵面重合,从而创建局部场增强。这些阵面的平面形状证明从腔向外传播的定向波束的创建。

[0143] -最后,在腔外,折射波相长地干涉56、57从下方入射的平面波,引起纳米喷射波束55。

[0144] 因此,通过本质上非色散的现象来解释纳米喷射波束创建,该现象即(i)边缘衍射,(ii)波在两种介电介质的界面处的折射,以及(iii)干涉。这解释了为何波束的形状及其辐射角相对波长保持稳定,如可以在图5a至图5e中观察到的那样。

[0145] 此外,对于平面波在腔的基部上的法向入射的情况,纳米喷射波束辐射角通过斯涅尔定律定义,并且因此它只是两个参数的函数:

[0146] (i)主体介质的折射指数与腔材料的折射指数之间的比率,以及

[0147] (ii)棱柱形腔的底角。为简明起见,在上文中,我们仅考虑具有等于 90° 的底角从而有具有垂直边缘的柱形形状的棱柱形腔。

[0148] 最后,纳米喷射波束形成现象与腔的边缘(不是全孔径)相关联,并且发生在正交于腔横截面的2-D垂直平面中(关于标记参见图4)。

[0149] 如下根据图7b,对在腔外形成折射波的平面波阵面的主要贡献来自位于接近腔的

侧向边缘121的惠更斯源50-53。因此,向腔外辐射的波的折射角接近于从外部入射在相同边界上的波的临界角(图7a):

[0150] $q_1 \approx q_{\text{TIR}}$, 其中 $q_{\text{TIR}} = \sin^{-1}(n_2/n_1)$ 是临界角。(1)

[0151] 由于折射波与从下方入射的平面波之间的干涉,最终创建纳米喷射波束 55,通过如图7a中示意性示出的两个波的矢量和来定义纳米喷射波束的辐射角(q_B)。这些考虑使人得到纳米喷射波束的辐射角的以下近似公式:

[0152] $q_B \approx (90^\circ - q_{\text{TIR}}) / 2$ (2)

[0153] 根据等式(2),在具有指数 $n_1=1.49$ ($q_{\text{TIR}}=41.8^\circ$)的主体介质的情况下,纳米喷射波束辐射角应为 $q_B \sim 24^\circ$,其略大于在全波模拟中所观察到的(参见图6b)。通过在定性分析做出中的一些假设来解释该差异。首先,该分析没有考虑折射波和入射波的振幅差异。其次,它没有考虑由位于接近腔边缘的惠更斯源从外部发射的射线,其在腔侧向边缘上经历全内反射。由于全反射,这些射线还有助于形成纳米喷射波束。注意,这两种效果与全内反射现象有关,并且因此不能使用斯涅尔/菲涅尔模型来准确表征。然而,两种效果都(i)取决于两种介质的折射指数的比率,以及(ii)导致减小纳米喷射辐射角。因此,实际的纳米喷射辐射角可以小于通过等式(2)预测的纳米喷射辐射角。

[0154] 图8a至图8c图示了当从下方被单位振幅平面波照射时,不同高度((a) $H=L_z=370\text{nm}$, (b) $H=L_z=740\text{nm}$, (c) $H=L_z=1110\text{nm}$)的柱形腔($n_1=1.49$, $n_2=1$, $R=370\text{nm}$)产生的纳米喷射波束的近场图。如可以观察到的那样,对于从主体介质中的约一个波长到几个波长变化的腔大小,即 $1/2\lambda_1 < L_z < 3\lambda_1$,纳米喷射现象很明显。

[0155] 需要最小高度来形成图7b中图示的平面波阵面,其引起纳米喷射波束。然而,腔的高度(或者台阶的高度)与纳米喷射波束的长度相比不应太大,以便其在聚焦组件的外部有用。

[0156] 如图8a至图8c上所示,取决于腔形状和大小,纳米喷射波束的长度可以从主体介质中的几个波长变化到若干个波长。

[0157] 基于图7b的2-D射线追踪分析,形成纳米喷射波束的主要贡献来自位于接近腔侧向边缘(或者台阶的侧向部分)的馈入。将负责形成纳米喷射波束的对应“有效孔径”估计为腔内介质中的约一半波长($1/2\lambda_2$),其将从腔向内从侧向边缘计数。对于具有任意形状的腔,沿与腔横截面边界S正交的线定义该孔径(参见图4)。

[0158] 在2-D情况下(其可以对应于任何垂直横截面,例如在xz平面中),由于纳米喷射波束形成而实现的局部场强增强(FIE)与入射平面波相比约为2的因子。可以通过如将在下文更详细解释的那样修改腔横截面S的形状,或者通过组合来自若干腔的贡献,来实现更大的FIE。

[0159] 纳米喷射波束半功率全宽度(FWHP)可以从约 $1/2\lambda_1$ (即阿贝衍射极限)变化到若干个波长,并且更取决于腔的形状。

[0160] 图9a至图9d示出了在XZ平面中的、在单位振幅平面波的不同入射角下由中空柱形腔($n_1=1.49$, $n_2=1$, $L_z=740\text{nm}$, $R=370\text{nm}$)产生的纳米喷射波束,即图9a中 $\theta=0^\circ$,图9b中 $\theta=10^\circ$,图9c中 $\theta=20^\circ$,以及图9d中 $\theta=30^\circ$ 。

[0161] XY平面中的近场图案的对称性(参见图9a)证明,对于入射波的TE(横向电)和TM(横向磁)极化,波束形状和辐射角几乎保持恒定。

[0162] 此外,在斜式入射的情况下,在图9中可以观察到,波束辐射角与平面波的入射角相对应地改变。对于高达约 q_B 的入射角,波束的形状和场强增强几乎保持恒定。

[0163] 图10图示了针对不同主体介质(包括标准光学塑料和标准或掺杂玻璃)观察到的纳米喷射波束现象。由具有相同物理尺寸($n_2=1, L_z=740\text{nm}, R=370\text{nm}$)但是嵌入图10a中的折射指数 $n_1=1.49$ 以及图10b中的折射指数 $n_1=2.0$ 的主体介质中的中空圆柱形腔产生这样的纳米喷射波束。

[0164] 对通过图2至图10图示的复杂电磁现象的理解允许设计感兴趣的设备,其可以用作纳米喷射聚焦组件、波束形成组件、或者更一般地用作用于形成近区中的所需场强分布的组件。这样的组件可以用于将入射平面波变换成一个或多个独立波束,或者相反地,用于根据电磁波的对称路径属性将入射的非平面波(无论其波长如何)变换成局部平面波。

[0165] 如上面在本公开中解释的那样,纳米喷射波束的形成与介电材料的层中的台阶的侧向部分相关联,或者与腔的边缘相关联,但不与其全孔径相关联。通过优化腔的横截面S的形状,可以控制由该腔产生的纳米喷射波束的形状。

[0166] 图11示出了四个示例性柱形腔,每个具有不同形状的横截面边界,即:(a)圆形,(b)正方形,(c)8形,以及(d)矩形。虚线示意性示出了当这些腔被从图的平面沿z轴传播的平面波照射时的一些垂直切割平面,其中生成纳米喷射波束。相对于在腔横截面边界的对应点处定义的法向矢量的方向来定义这些切割平面。每个腔的对应模拟近场图示出在图12a至图12d中,其对于具有相同的高度和半径但是不同的被来自下方的单位振幅平面波照射的横截面形状((a)圆形,(b)正方形,(c)8形,(d)矩形)的中空腔($L_z=L_x=R=740\text{nm}$),图示了xz平面($y=0$)和xy平面($z=1000\text{nm}-z_0$)中的近场图案。xy平面中的斑点101至104识别纳米喷射波束,其形状和位置与图8中给出的预测很一致(这些近场图在任意选择的xy平面 $z_0=1000\text{nm}$ 处被计算)。

[0167] 特别地,图12a示出了轴对称的圆形腔产生发散的锥形波束。令人感兴趣地注意到,该锥形波束是几乎对称的(参见横向xy平面中的近场图案),这是这样的组件的偏振不敏感行为的证据。在该配置中,与在相同主体介质中传播的平面波相比,最大FIE等于 ~ 2 的因子。

[0168] 注意,图12中的近场图是在时间平均坡印亭矢量P方面绘制的。在具有折射指数n的非色散同质介电介质中传播的平面波的情况下,该基准电磁场量定义为:

$$[0169] \quad P = E_m^2/2\eta \approx 1.3 n E_m^2 \left[\frac{\text{mW}}{\text{m}^2} \right], \quad (4)$$

[0170] 其中 E_m 为电场的振幅, η 为介质中的波阻抗,以及n为折射指数。在具有折射指数 $n=1.49$ 的主体介质的情况下,由时间平均坡印亭矢量表征的功率密度的基准值为 $\sim 1.94\text{mW}/\text{m}^2$ 。

[0171] 图12b和图12c示出了腔横截面S从圆形到矩形和8形的变换如何引起分别具有四个(标号104)和两个(标号103)纳米喷射波束的多波束近场图案的形成。该波束形成效果分别与边界区段从凸形状到平面形状然后到凹形状的变换有关。在图12b和图12d中观察到的波束具有与由圆柱产生的锥形波束(图12a)的辐射角相似的辐射角。同时,波束宽度在方位角方面是不同的。腔横截面边界S的凹区段的内角越大,波束越窄并且场强越高。特别地,图12b(正方形形状)和图12c(8形)中呈现的两个腔的FIE分别等于 ~ 2.5 的因子和 ~ 2.8 的因

子。

[0172] 最后,图12d示出了由中空矩形腔生成的宽叶片状纳米喷射波束。该实施例证实形成宽波束的可能性,这对于需要均匀照射窄形区域的某些应用而言可能是感兴趣的。

[0173] 因此,腔的边界曲率是用于改变纳米喷射波束形状、位置和场强增强的工具。

[0174] 可以使用相同的方法来构建产生任意数量的相同或不同的纳米喷射波束的、具有对称或非对称横截面的更复杂的组件。

[0175] 这些示例性实施例中的一些由图13图示,其呈现了具有不同横截面的三个示例性柱形腔的成像平面中的场强分布的示意图。更准确地说,图13a 示出了具有圆形横截面的腔111a,如已经由图11a图示的那样:虚线箭头示意性示出了纳米喷射波束源自该腔111a的底部。环551表示由于这些纳米喷射波束而形成的近场分布中的热斑点。

[0176] 图13b示出了非对称腔111b,其在xy平面中的横截面以某种方式为三角形的,但是三角形的三个边缘中的一个凹的。这样的近似三角形腔111b 创建三个斑点552、553和554,其中的一个(554)由于凹面被增强。

[0177] 图13c示出了腔,其以五个直或凹的区段被任意成形。斑点555至559 表示由于源自台阶的基部边缘的纳米喷射波束而形成的近场分布中的热斑点,如由虚线箭头示意性示出的那样。在图13c中观察到的具有五个热斑点的特定场分布与具有负责形成五个独立的纳米喷射波束的五个直或凹的区段的边缘线的特定形状有关联。

[0178] 图14提供了根据本公开的实施例的这样的组件的实现方式的示意图。

[0179] 这样的设备呈现多层结构,包括:

[0180] -形成基板的第一层110,其可以例如以玻璃或塑料制成;

[0181] -邻接基板110的第二介电材料的层112;

[0182] -在介电层112的顶部上的形成覆板的第三层113。覆板可以例如以玻璃或塑料制成。在图11的实施例中,相同材料用于基板110和覆板113,但这不是强制性的。

[0183] 在介电材料的层112中形成具有任意横截面的腔111。图14提供了腔 111的3D视图,以及组件的侧视图和顶视图。

[0184] 在实施例中,图14的设备是平面光学透明(例如玻璃)板,具有嵌入的取向为与其表面正交的柱形微腔。基板110和覆板113都是玻璃板,并且介电材料的层112是以如PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)的光学透明聚合物制成的薄膜。

[0185] 这样的组件的加工处理可以包括,首先,在玻璃板110上沉积所需厚度的膜112;然后,使用任何既定微制造技术(例如光学或电子束光刻)在该膜112中创建腔111。最后,用另一玻璃板113覆盖该结构。

[0186] 因此,与现有的类似物(analog)不同,可以使用既定平面制造技术来制造这样的组件,这归功于其简单的拓扑和具有所需折射指数的介电材料的可用性。

[0187] 图15a至图15f图示了图14的组件的替选实施例的侧视图。

[0188] 在图15a中,组件由单个介电材料的层112制成。介电的层112的表面水平的突然改变形成台阶,这也引起从底部到达组件的入射波的指数的台阶,因为围绕组件的空气具有比介电材料112更低的折射指数。因此,上面关于图2至图10描述的复杂电磁现象首先通过平面入射波在表面的下方部分120 上的衍射,然后通过衍射波在台阶的侧向部分121上的折射而产生。

[0189] 组件也可以浸入除空气之外的另一材料(例如另一气体)中,或者表面的下方部分120可以与具有比介电材料112更低的折射指数的任何其他物质接触。

[0190] 图15b图示了另一实施例,根据该实施例,组件包括单个介电材料的层112,其中形成作为通孔的腔:因此腔的高度对应于介电层112的厚度。

[0191] 图15c图示了另一实施例,根据该实施例,组件包括单个介电材料的层112,其中形成腔111,腔111的高度小于介电材料的层112的厚度。腔的高度及其横截面可以任意选择,作为由组件产生的波束的函数。尤其是,腔的顶部不需要一定对应于介电层112的顶表面。

[0192] 其中腔111具有无限尺寸的特定实施例对应于图15a的实施例,台阶对应于腔111的边缘。

[0193] 图15d图示了又一实施例,根据该实施例,组件呈现双层结构,即形成基板的第一层110,在其顶部上放置第二介电材料的层112。腔111形成在介电材料的层112中。第一层110和第二层112以相同材料制成的特定实施例对应于图15c的实施例。

[0194] 图15e对应于又一实施例,其中设备呈现三层结构,如图14的实施例中那样。然而,基板110和覆板113不需要一定以相同材料制成。

[0195] 图15f图示了又一实施例,其中组件包括在介电材料的层中形成的两个或更多个腔的集合。取决于要生成的波束,腔可以以规则阵列排列,或者以任何数量和任何图案分组。可以在图15b至图15e的任何单层或多层实施例中形成这样的多个腔。

[0196] 将在关于图17至图23的后续内容中更详细地描述这样的实施例。

[0197] 图16图示了图14和图15的设备的典型使用场景。为简明起见,图16中图示的组件对应于图14的组件;然而,必须理解的是,它也可以由与图15的任何实施例相对应的任何组件代替。

[0198] 发射元件130朝向设备132的基部表面发射平面电磁波。发射元件130可以是系统的一部分(例如像AR/VR眼镜中那样),或者只是外部光源的模型(例如通过物镜准直的散射环境光,如在照片相机的情况下)。例如,发射元件130可以是:

[0199] -来自位于远处的源的环境光;

[0200] -由直接附接到纳米喷射组件132的光源(例如光电二极管或光纤)产生的光;

[0201] -由另一聚焦元件132产生的光学波束。

[0202] 它可以位于距腔111的任何距离处,并且生成定向光束或全向光发射。

[0203] 取决于设计和制造方法,设备132的结构可以包括密封在一起的两个或更多个层,如上面关于图15解释的那样。在图16的实施例中,这样的设备呈现三层结构,在密封的基板110和覆板113的一个或两个表面上具有一个或若干个微腔111。在一些实施例中,该结构的设备132可以直接附接到发射元件130和/或接收元件131。例如,它可以采用直接放置在传感器或平凸透镜上的柔性组件的形式。

[0204] 腔或多个腔111是中空的(因此填充有空气),或者填充有具有比基板110的折射指数更低的折射指数的材料。

[0205] 接收元件131必须位于距腔的某个距离内,该距离取决于由腔生成的纳米喷射波束的长度。该距离通常可以从约3个波长变化到10个波长。图16中的虚线圆圈表示到接收元件131的最大距离 R_{\max} 。对于包括多于一个腔(参见下面关于图17至图23)的腔的某个排

列,它可以更大。腔、发射元件和接收元件的可能的相对位置由纳米喷射波束55辐射角和传入波的入射角来定义。

[0206] 接收元件131可以是:

[0207] -检测器,例如相机中的光电二极管,

[0208] -目标,例如水或血溶液中的量子点、纳米粒或分子{光谱学,显微镜或片上实验室设备},

[0209] -另一聚焦、波束形成或光导元件,例如透镜、格栅、光纤、AR/VR眼镜、光通信等。

[0210] 由于可以使用根据本公开的组件132来从入射平面波生成波束55或者从入射的非平面波或波束生成局部平面波,所以接收元件131和发射元件 130可以反转。

[0211] 这样的组件132可以用作集成光学传感器和/或光导和光处理系统的构建块、以及独立式(stand-alone)聚焦设备(例如近场探针)。它们能够以亚波长分辨率和至少二的因子的场强增强(FIE)进行近场聚焦,在光学范围内进行操作。

[0212] 图17图示了本公开的特定实施例,根据该实施例,聚焦组件基于嵌入主体介质中的中空立方体的 2×2 阵列。图17a图示了这样的组件的拓扑,而图17b提供了当组件被沿z轴传播的单位振幅平面波照射时的时间平均功率分布的模拟结果($n_1=1.49, L_x=L_y=L_z=2\lambda_1, S=0.5\lambda_1$)。

[0213] 图17a的组件包括四个中空立方体($n_2=1$) 140,其嵌入具有折射指数 $n_1 > n_2$ 的光学透明主体介质112中。例如,其可以是玻璃、塑料(例如PMMA) 或聚合物(例如PDMS(聚二甲基硅氧烷))。

[0214] 在嵌入具有折射指数 $n_1=1.49$ (其为光学范围内的玻璃和塑料的典型值) 的同质介电介质112中的中空($n_2=1$) 立方体140的 2×2 阵列的轴上生成纳米喷射波束。分析表明,通过相对于主体介质折射指数和入射平面波波长优化立方体的大小、形状和相对位置,可以生成具有 $\sim \lambda/2n_1$ 的波束半功率全宽度(FWHP)和至少5的因子的FIE的纳米喷射波束。

[0215] 图18图示了替选实施例,其中用沿平面波传播方向取向的中空柱141 代替中空矩形立方体140。如图17中那样,图18a图示了这样的组件的拓扑,而图18b提供了当组件被沿z轴传播的单位振幅平面波照射时的时间平均功率分布的模拟结果($n_1=1.49, L_z=2\lambda_1, R=\lambda_1, S=0.5\lambda_1$)。

[0216] 柱形形状由于消除了立方体的尖锐垂直边缘而有利于加工过程。特别地,这样的柱形孔径可以经由光学光刻或另外的既定平面微制造技术(如纳米压印或复制成型)来制造。

[0217] 图19图示了又一实施例,其中在介电介质112和自由空间的边界处(例如在玻璃或塑料板的表面上)创建中空柱141的 2×2 阵列。当被来自介质侧的平面波照射时,这样的组件在接近板112表面的自由空间中产生纳米喷射波束。该实施例对于需要在聚焦组件与测试物体之间的间隙(其为光学数据存储、显微镜、光谱学和计量学系统的典型场景)的应用而言可能是有利的。

[0218] 如图18中那样,图19a图示了基于在介电介质和自由空间的界面处创建的中空柱的 2×2 阵列的这样的组件的拓扑,而图19b提供了当组件被沿z轴传播的单位振幅平面波照射时的时间平均功率分布的模拟结果($n_1=1.49, L_z=2\lambda_1, R=\lambda_1, S=0.5\lambda_1$)。

[0219] 由图17、图18和图19的所有三个实施例产生的纳米喷射波束的轮廓在图20中图

示。在相对于在相同的主体介质中传播的平面波的场强定义的场强增强 (FIE) 方面绘制轮廓。更准确地说,在图20a中可以看到沿z轴的波束轮廓,而图20b-图20c-图20d示出了在平面 $z=z_m$ 中的波束横截面视图,其中 z_m 是从图20a得到的具有最大场强的点。如可以观察到的那样,对于所有三个实施例,亚波长分辨率被良好维持,而FIE在约5到11a.u.的范围内变化。注意,在所有情况下,相对于在相同主体介质(即玻璃(图17和图18的实施例)和自由空间(图19的实施例))中传播的单位振幅平面波,将FIE定义为在具有和不具有根据本发明的实施例的聚焦设备的情况下给定点中的场强水平之间的比率。

[0220] 附加分析表明,可以通过使立方体(柱)之间的大小和间距变化,在一定范围内改变沿z轴的焦斑位置。改变纳米喷射波束长度和位置的可能性对于需要深度扫描或成像的应用而言可能是感兴趣的。

[0221] 图21提供了基于嵌入在主体介质112中的中空柱141的单周期性(图21a)和双周期性(图21b)阵列的两个另外的示例性实施例。在两个实施例中,中空柱形成多个规则间隔的 2×2 紧密定位的散射体的子阵列,其作用类似于图18中所示的组件。注意,在图21b的情况下,每个中空柱141同时有助于形成四个纳米喷射。

[0222] 图21的实施例对于可以受益于多点聚焦能力的系统而言可能是感兴趣的。例如,它可以是相机或光谱学系统。

[0223] 当然,在上面描述的所有实施例中,腔的形状不限于规则的柱或立方体。如关于图2至图10解释的那样,本公开的发明人强调的电磁现象将针对任何形状的腔发生,无论是锥形、棱柱还是柱(在术语的广义上,即通过沿与曲线的平面相交的轴投影闭合的二维曲线而创建的表面),以及无论其横截面如何。此外,腔的主轴可以与介电材料或基板的表面正交,或者可以相对于该表面以任何角度倾斜。

[0224] 图22是图示出图21a和图21b的周期性结构的可能的实现方式实施例的示意图。

[0225] 所提出的组件在其所有实施例中可以例如以附接到玻璃板或直接附接到另一光学组件(诸如平凸透镜)的平坦表面的、具有开孔孔径的薄膜的形式来制造。对于图17、图18、图19和图21的实施例,然后可以用另一光学透明介质的层(例如另一玻璃板)将其覆盖。

[0226] 膜可以由光学透明材料制成,如PMMA(丙烯酸),其将被直接沉积在支撑组件(例如玻璃板或透镜)的表面上。例如,这可以通过使得能够沉积具有所需厚度(几百纳米量级)的薄纳米膜的旋涂来完成。

[0227] 然后可以例如使用光学或电子束光刻技术来创建孔径(其将用作中空立方体)。

[0228] 可以使用比标准光学光刻更快且更便宜的无掩模干涉光刻来制造周期性结构。

[0229] 图23呈现了图21a和图21b的周期性结构的替选的可能的实现方式实施例。

[0230] 在该替选实现方式中,可以使用纳米压印或复制成型方法在光学透明材料(例如,诸如PDMS之类的软质有机聚合物)中制造中空立方体,并且然后附接到作为支撑的玻璃板的表面上。

[0231] 关于图22和图23描述的加工处理仅作为示例给出,以便强调使用既定微制造方法的、根据本公开的设备的制造可行性。然而,一些其他加工方法也可以存在,或者更适合于大规模生产。

[0232] 呈现了用于近场聚焦和波束成形的新方法和组件集合。

[0233] 组件具有锥形腔、棱柱形腔或柱形腔的形式,其横截面被成形以产生具有可调整

的再分割和外形的不同数量的纳米喷射波束。

[0234] 由腔横截面的形状来定义纳米喷射波束在xy平面中的形状和排列以及它们在z上的延伸。更一般地说,介电层表面中的简单台阶足以生成这样的纳米喷射波束。

[0235] 波束的长度取决于腔大小和指数比率。

[0236] 对于给定的指数比率,主要参数(即长度、宽度、辐射角和FIE)在至少±20%的波长范围内保持稳定。

[0237] 与现有技术的聚焦设备相比,这样的组件提供许多优点,其中:

[0238] -简单的拓扑,其可以是平面的或者柔性的,并且提供良好的机械刚性;

[0239] -它们基于标准材料,并且因此可以使用标准介电材料(如光学玻璃或塑料)来制造。不存在对高指数材料的需要(与现有技术SDC不同);

[0240] -简单的制造:它们可以使用既定平面微制造方法(诸如激光和电子束光刻、纳米压印、复制成型等)来加工;

[0241] -简单的集成:它们可以用作独立式组件(例如近场探针),或者附接到其他光学组件(例如平凸透镜),或者用作集成聚焦系统的构建块(例如相机传感器);

[0242] -良好的性能特性,具有 $\sim\lambda/2n_1$ 的亚波长分辨率(即主体介质中的一半波长),以及2到至少11的因子的FIE。

[0243] 应注意,在本公开的一个实施例中,本技术可以不限于非辐射(反应)区,而是还可以包括菲涅尔辐射区、过渡区和部分远场区。

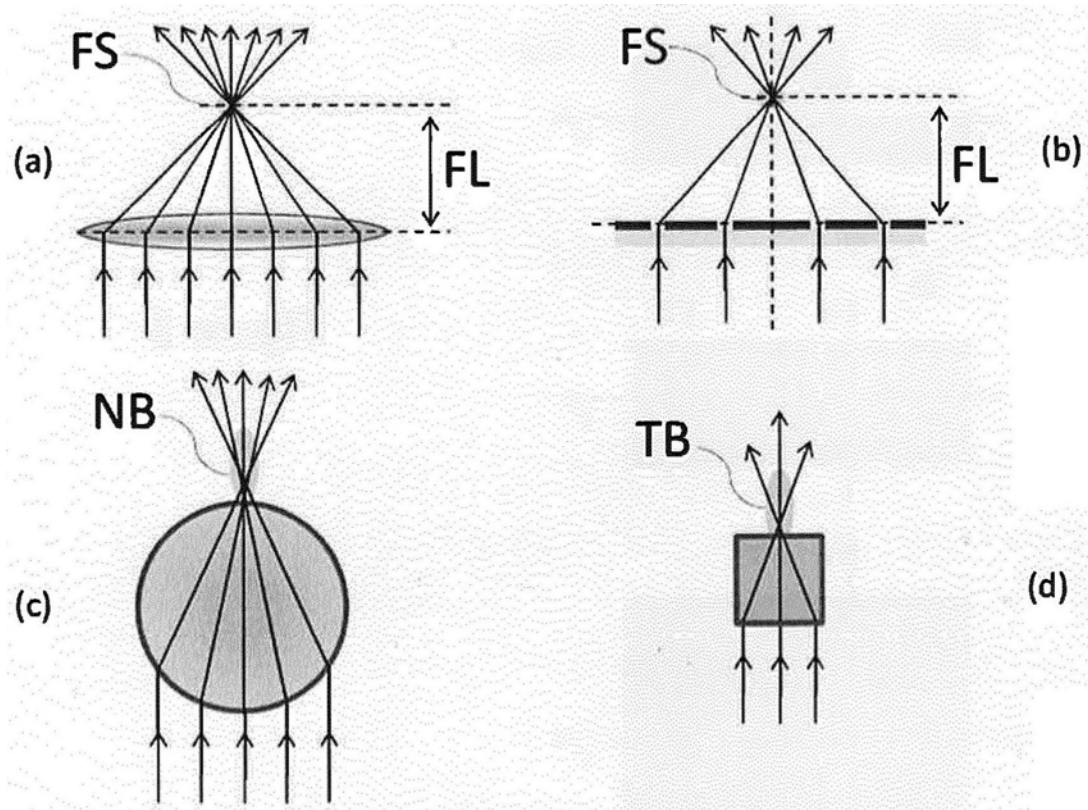


图1

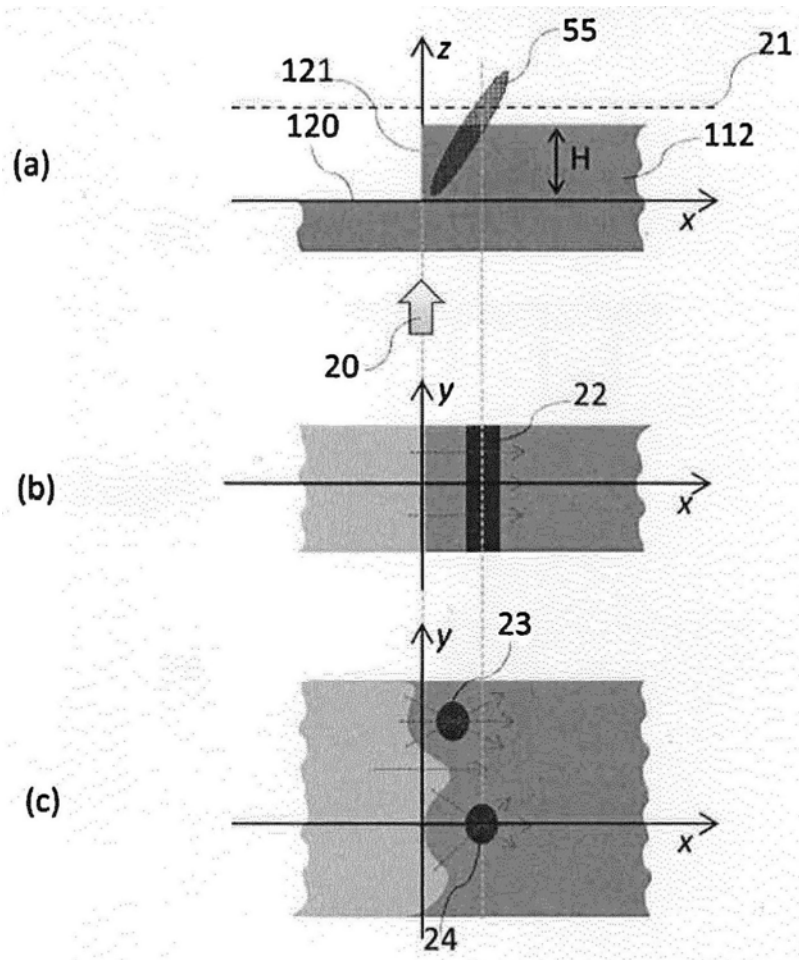


图2

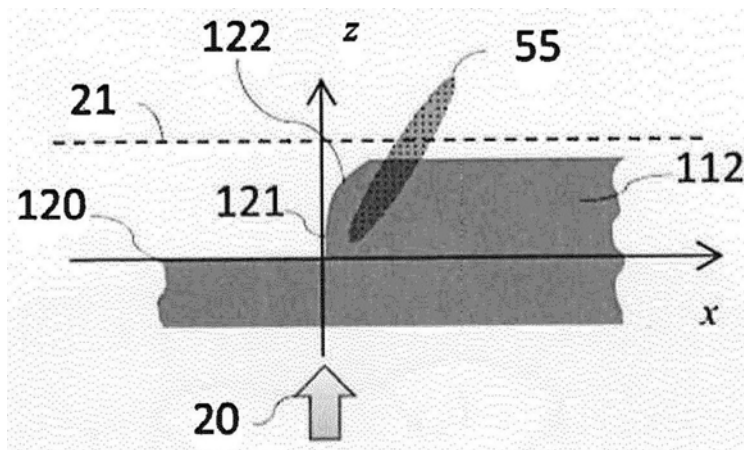


图3

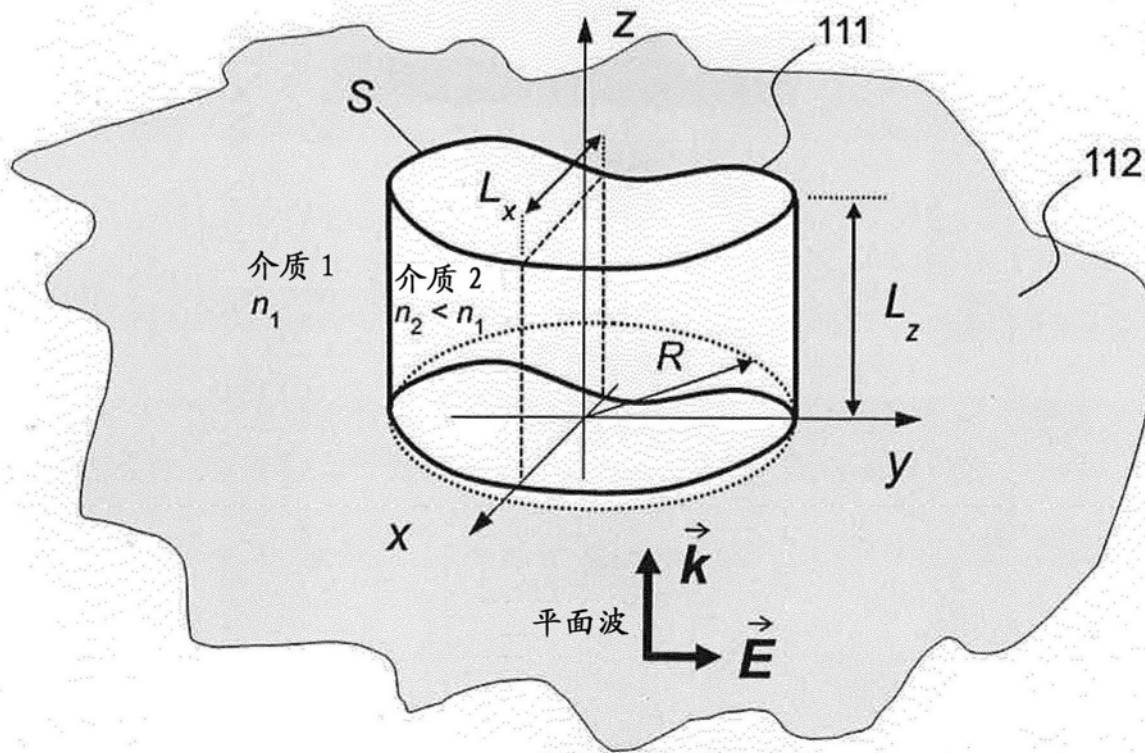
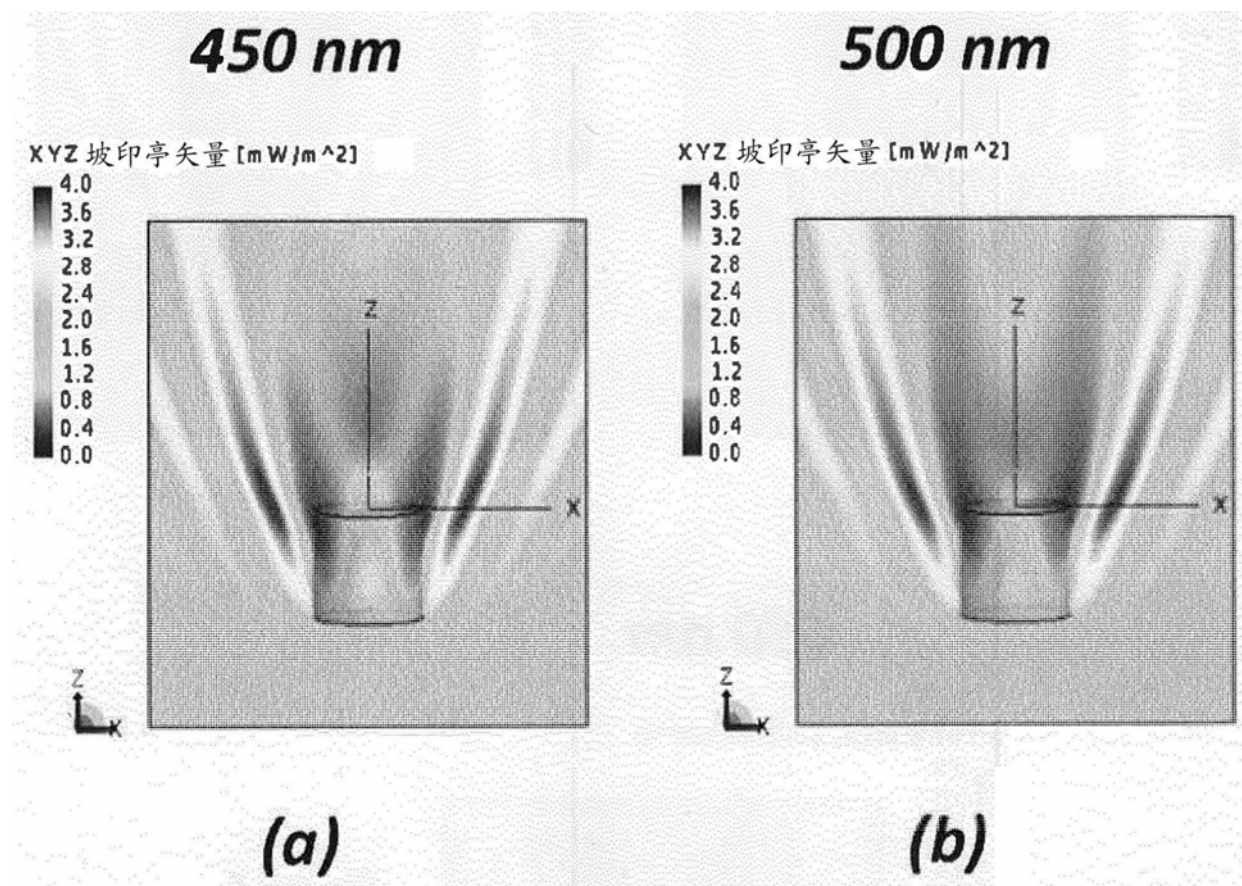


图4



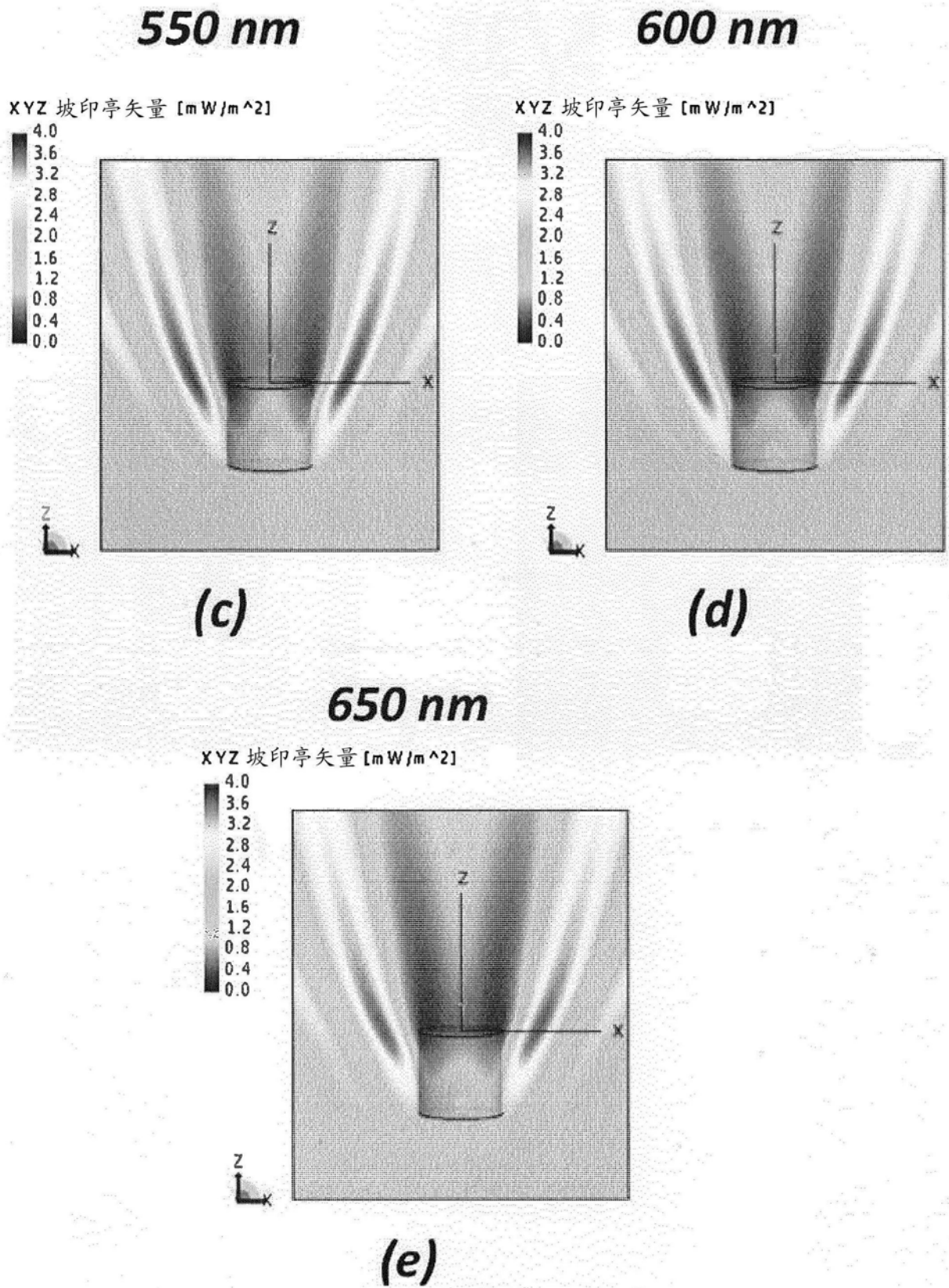


图5

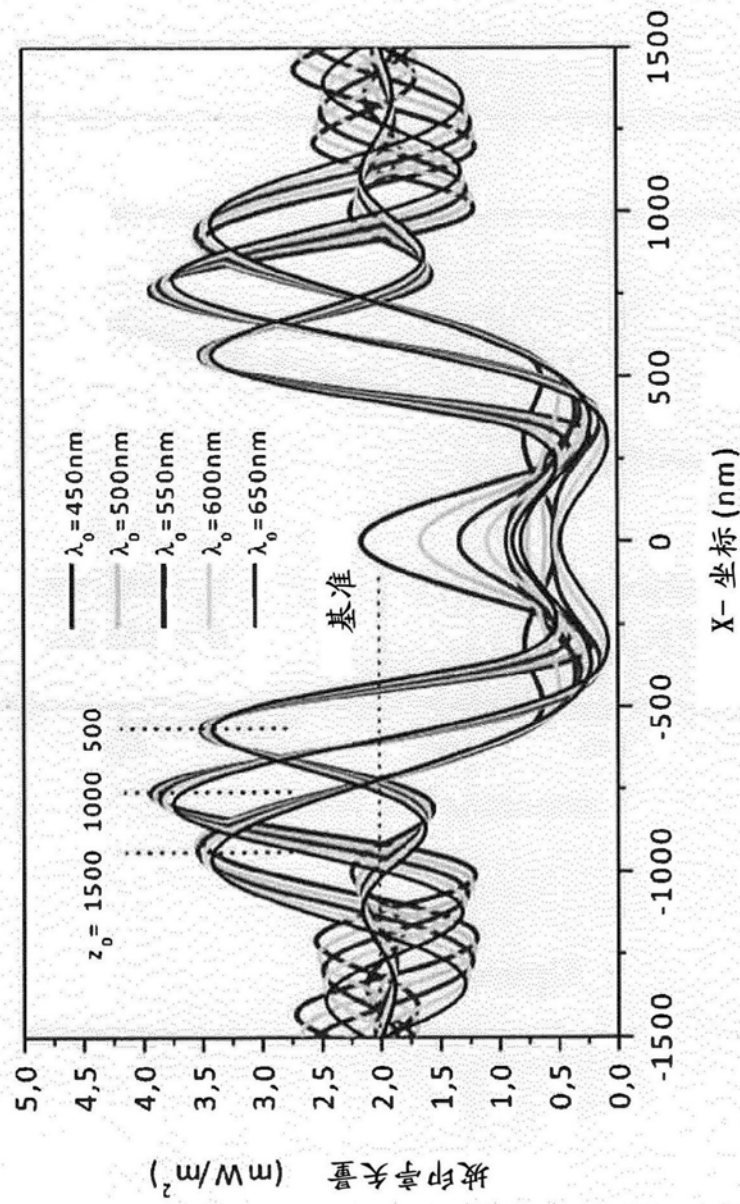


图6(a)

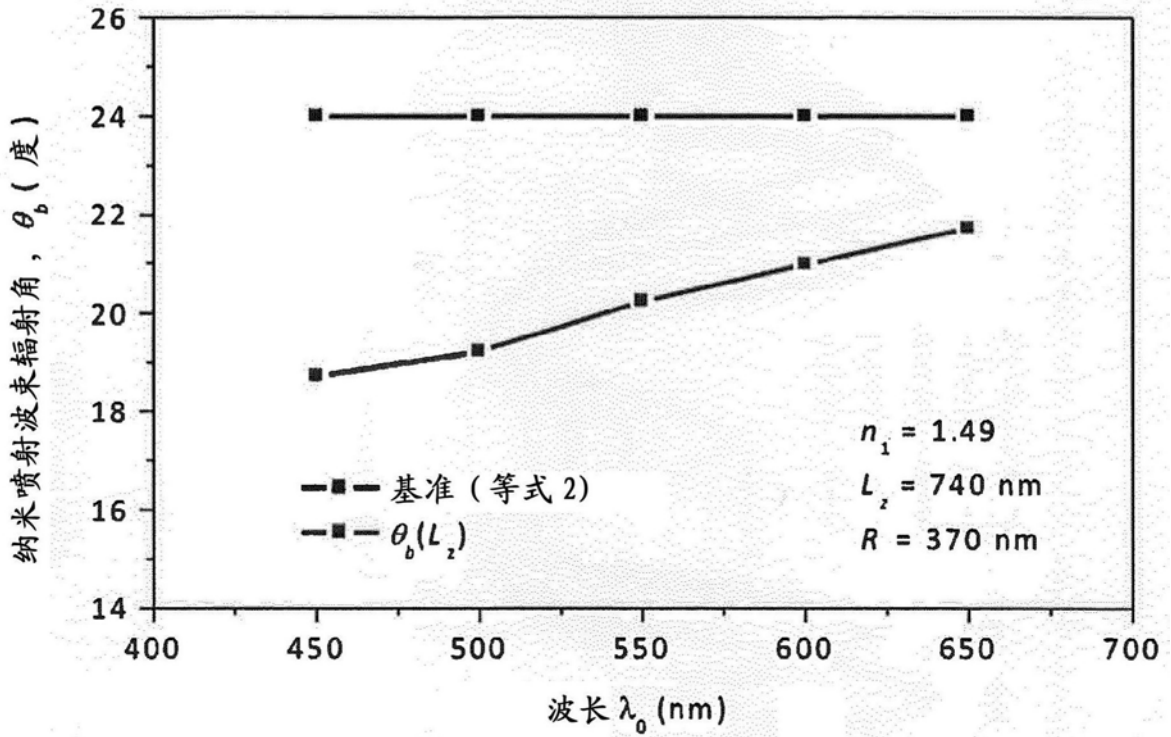


图6 (b)

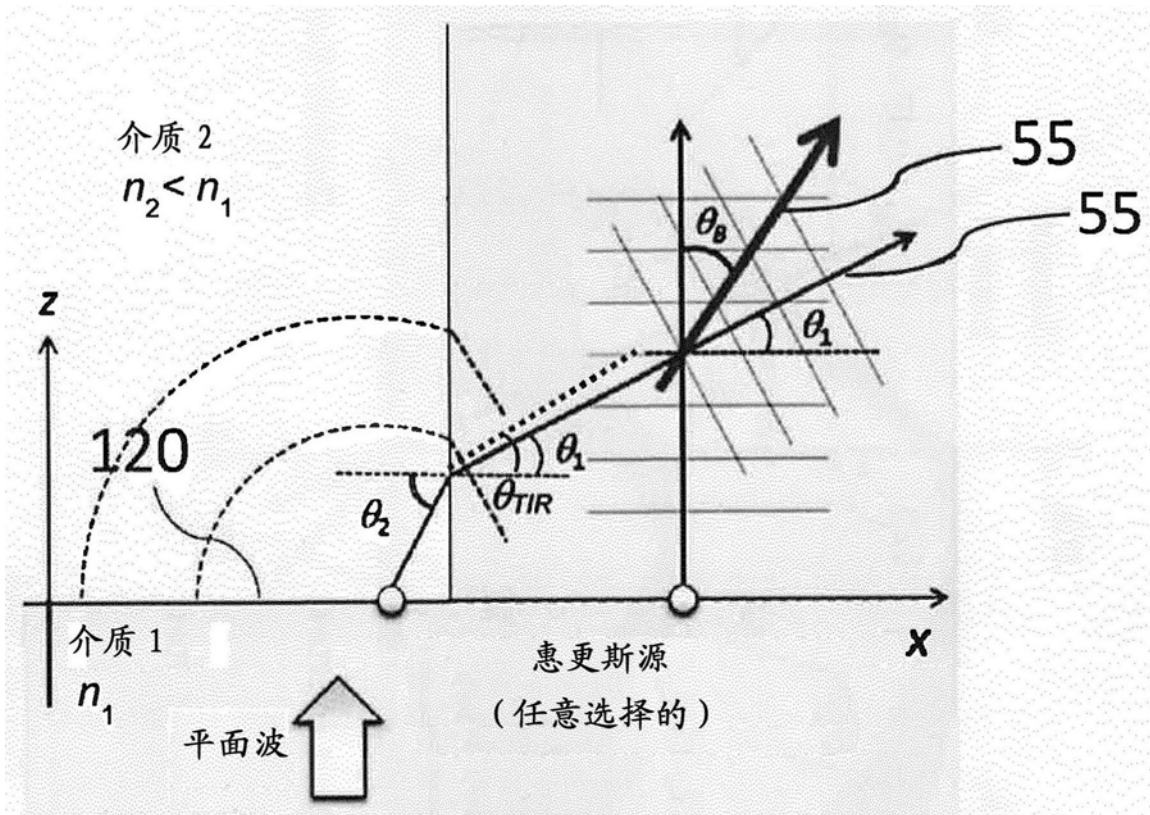


图7 (a)

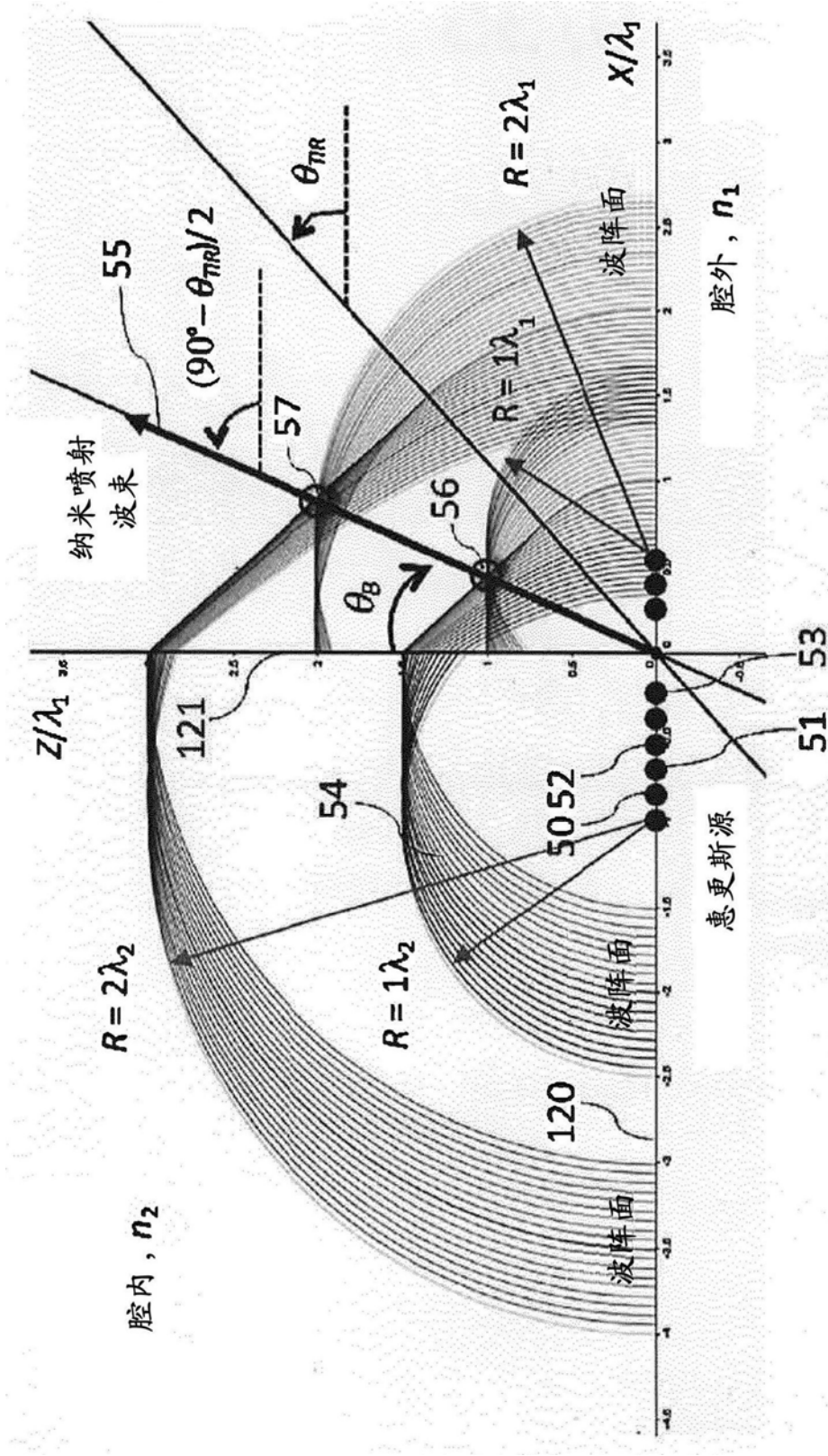
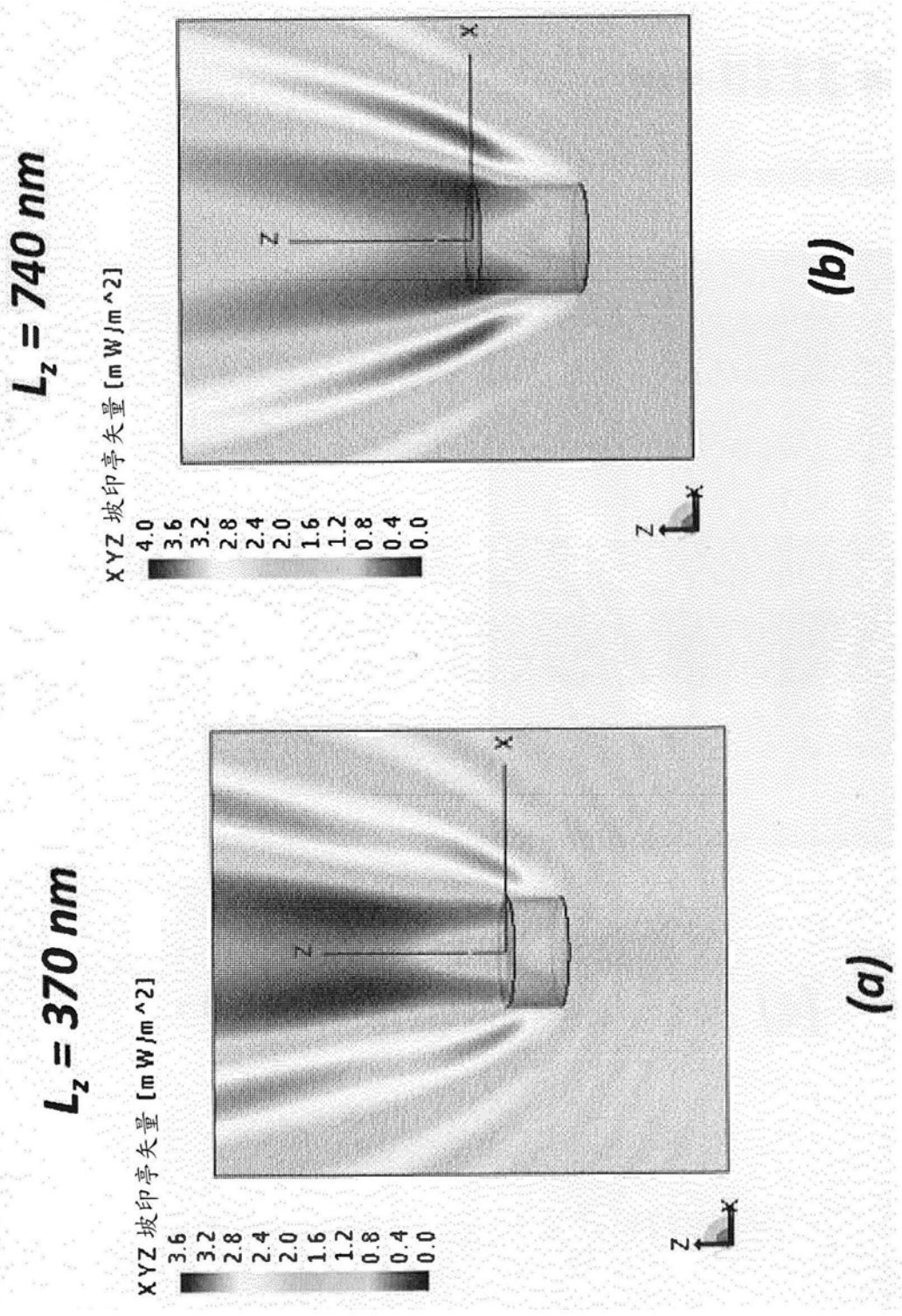


图7 (b)



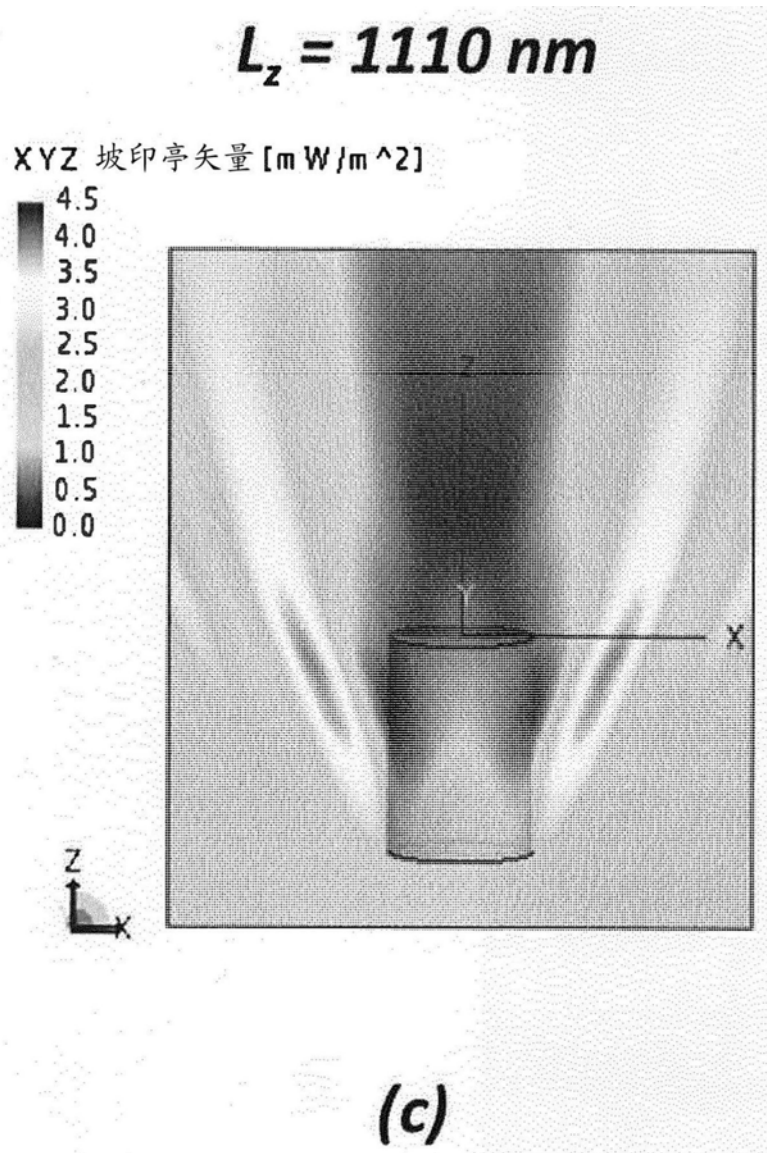


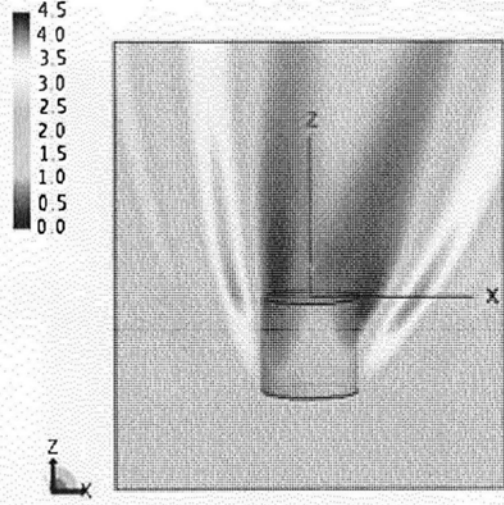
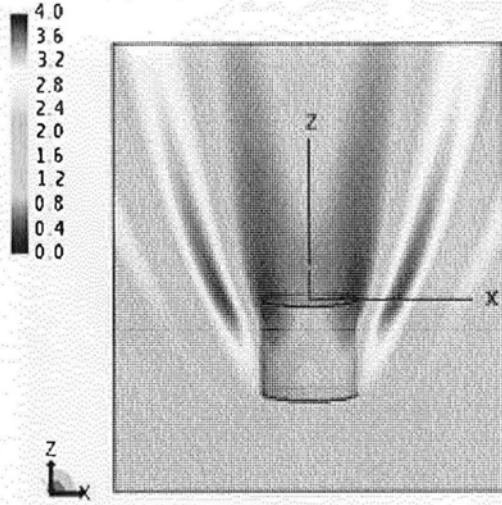
图8

$\theta = 0^\circ$

$\theta = 10^\circ$

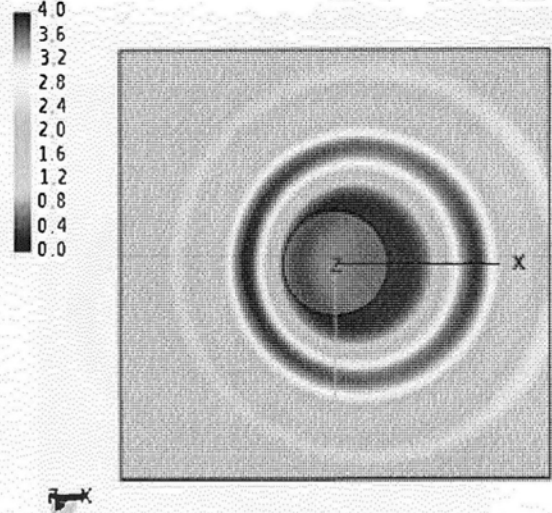
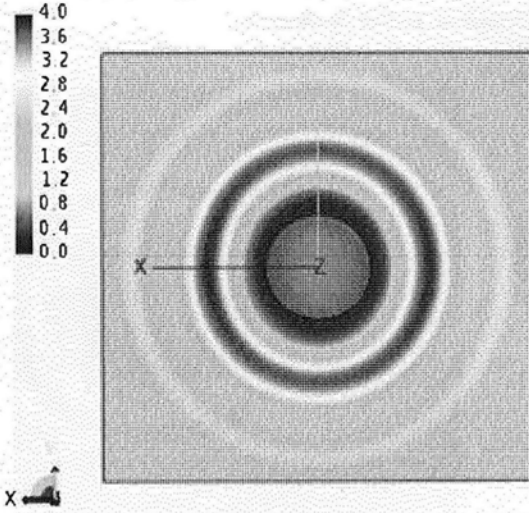
XYZ 坡印亭矢量 [mW/m^2]

XYZ 坡印亭矢量 [mW/m^2]



XYZ 坡印亭矢量 [mW/m^2]

XYZ 坡印亭矢量 [mW/m^2]



(a)

(b)

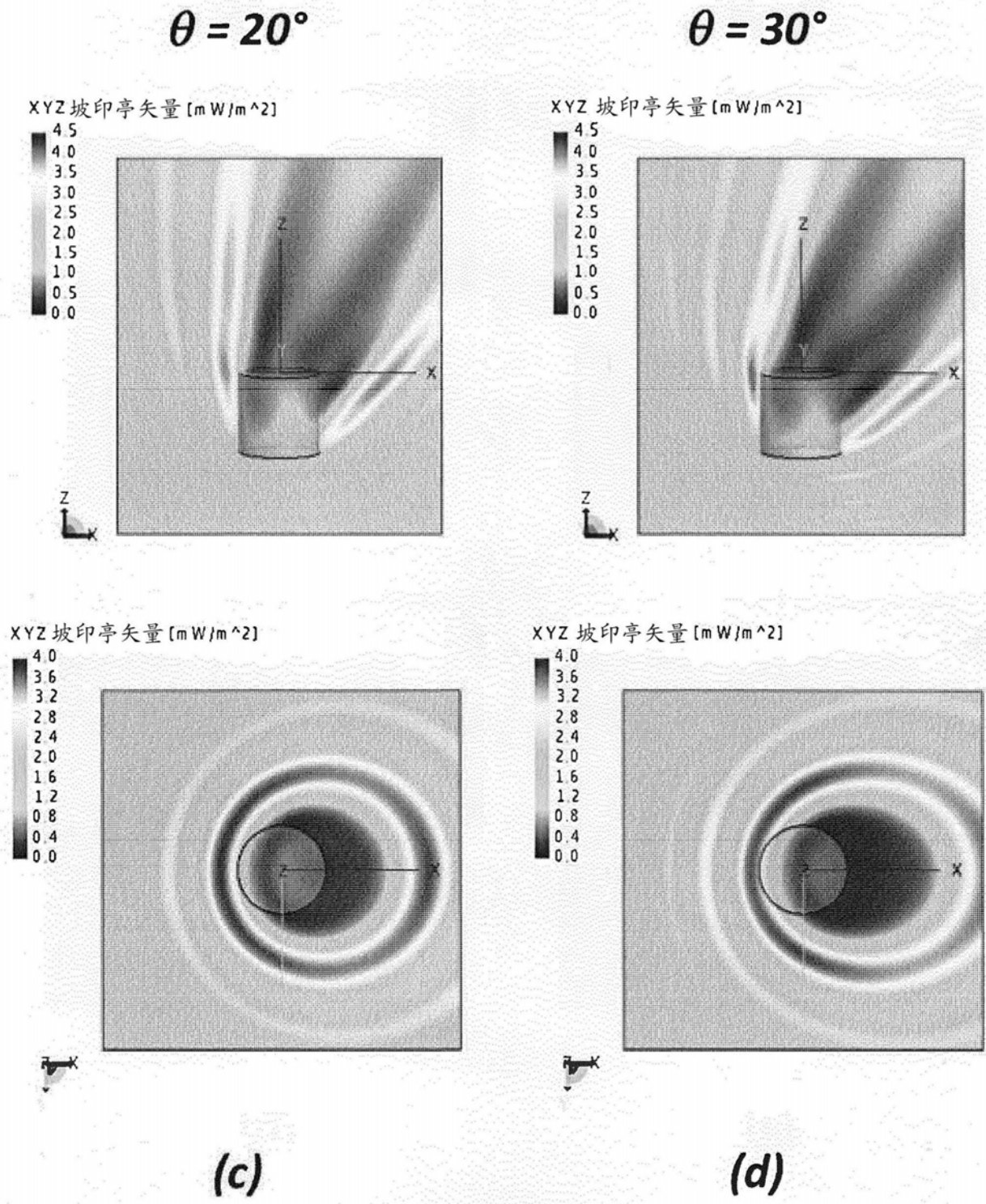
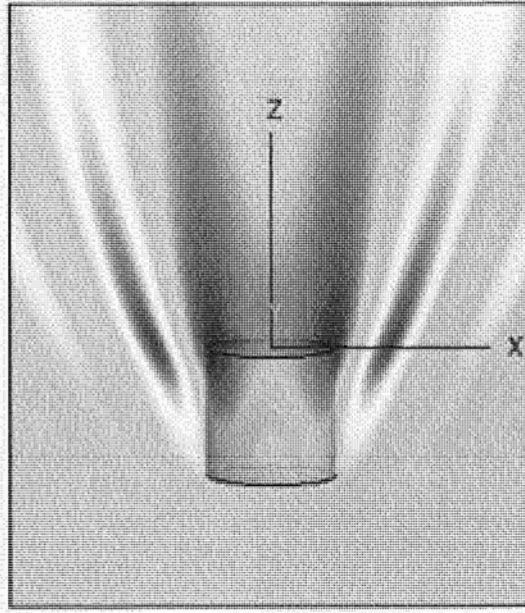
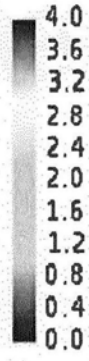
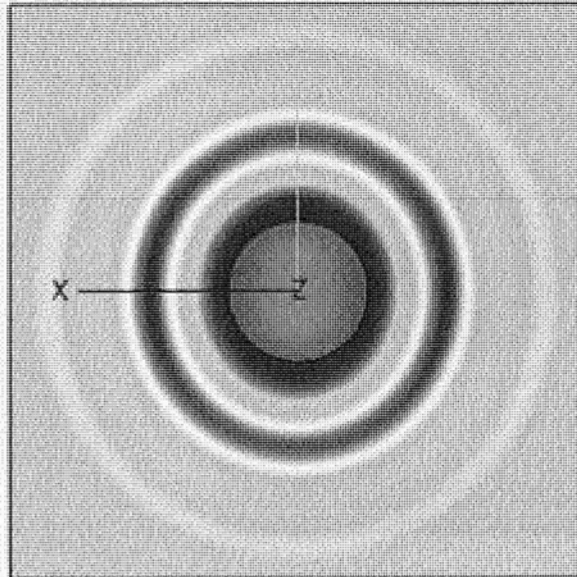
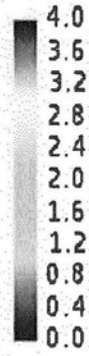


图9

XYZ 坡印亭矢量 [mW/m²]



XYZ 坡印亭矢量 [mW/m²]



(a)

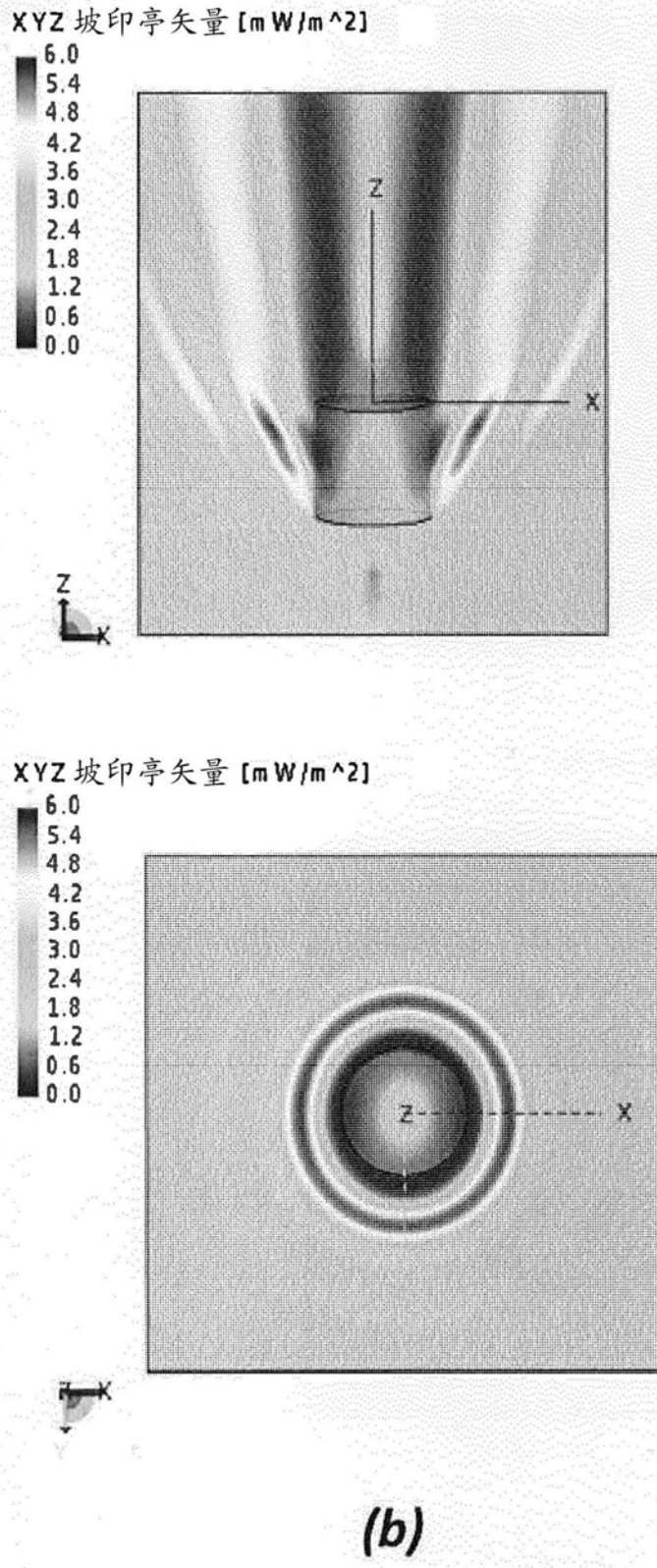


图10

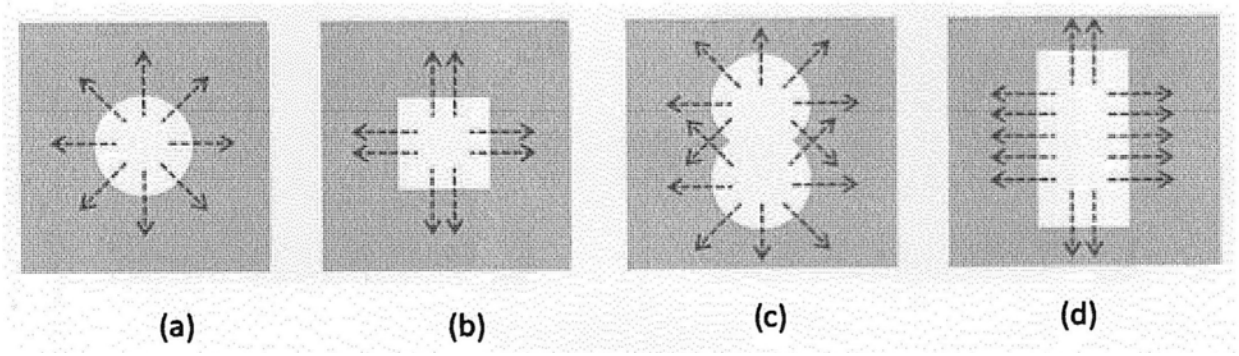
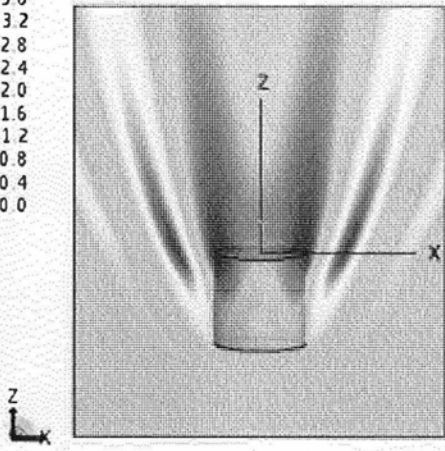
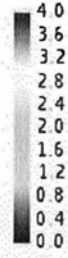


图11

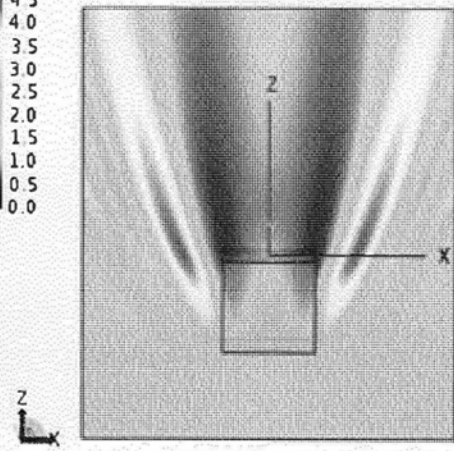
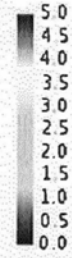
圆形

正方形

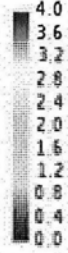
XYZ 坡印亭矢量 [mW/m²]



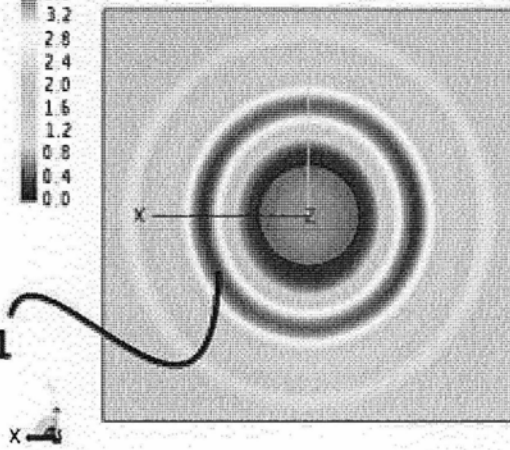
XYZ 坡印亭矢量 [mW/m²]



XYZ 坡印亭矢量 [mW/m²]



101

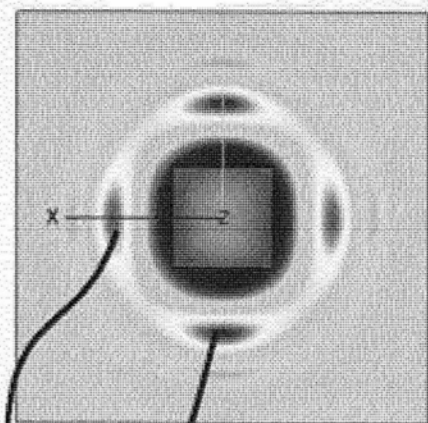


(a)

XYZ 坡印亭矢量 [mW/m²]



102



(b)

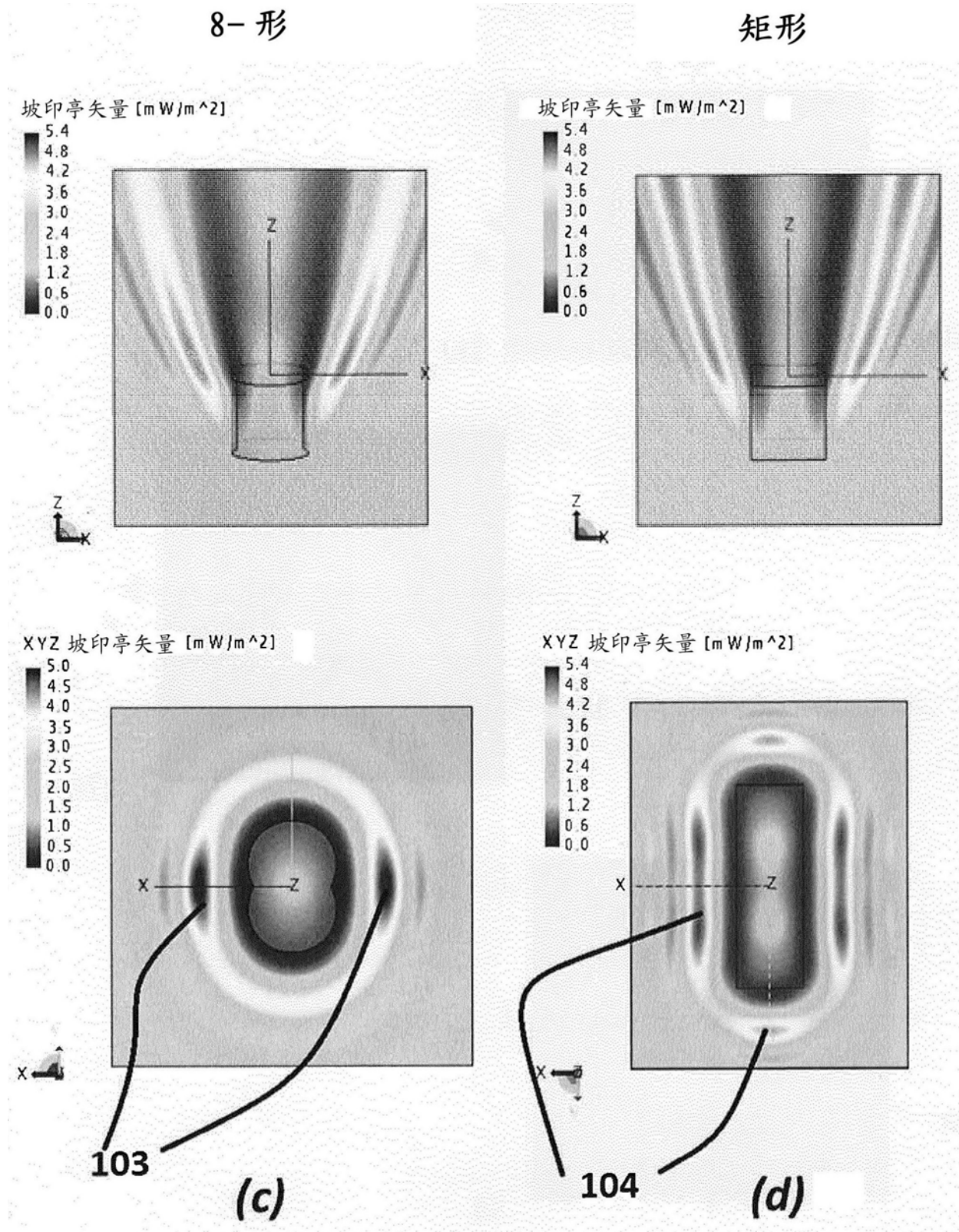


图12

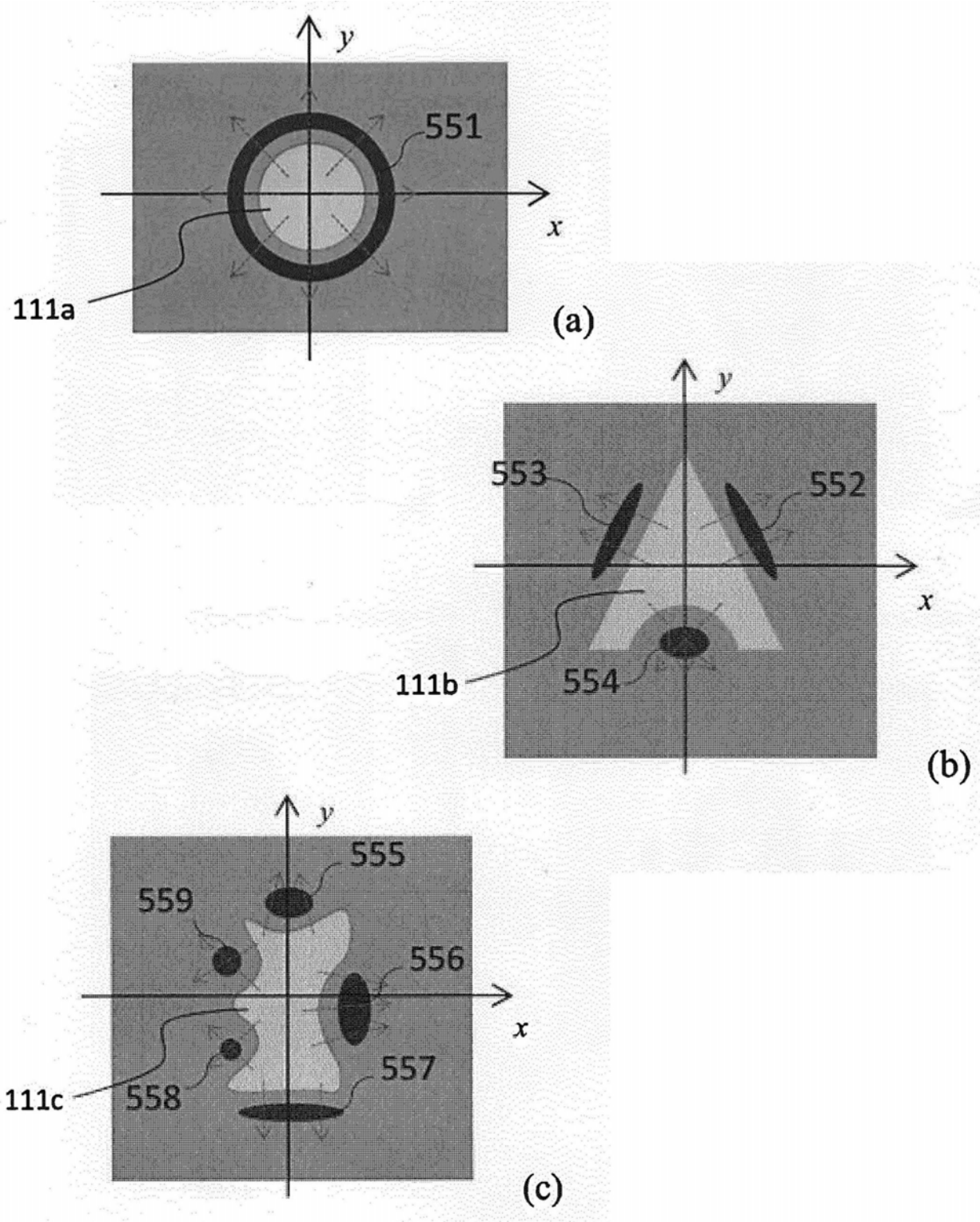


图13

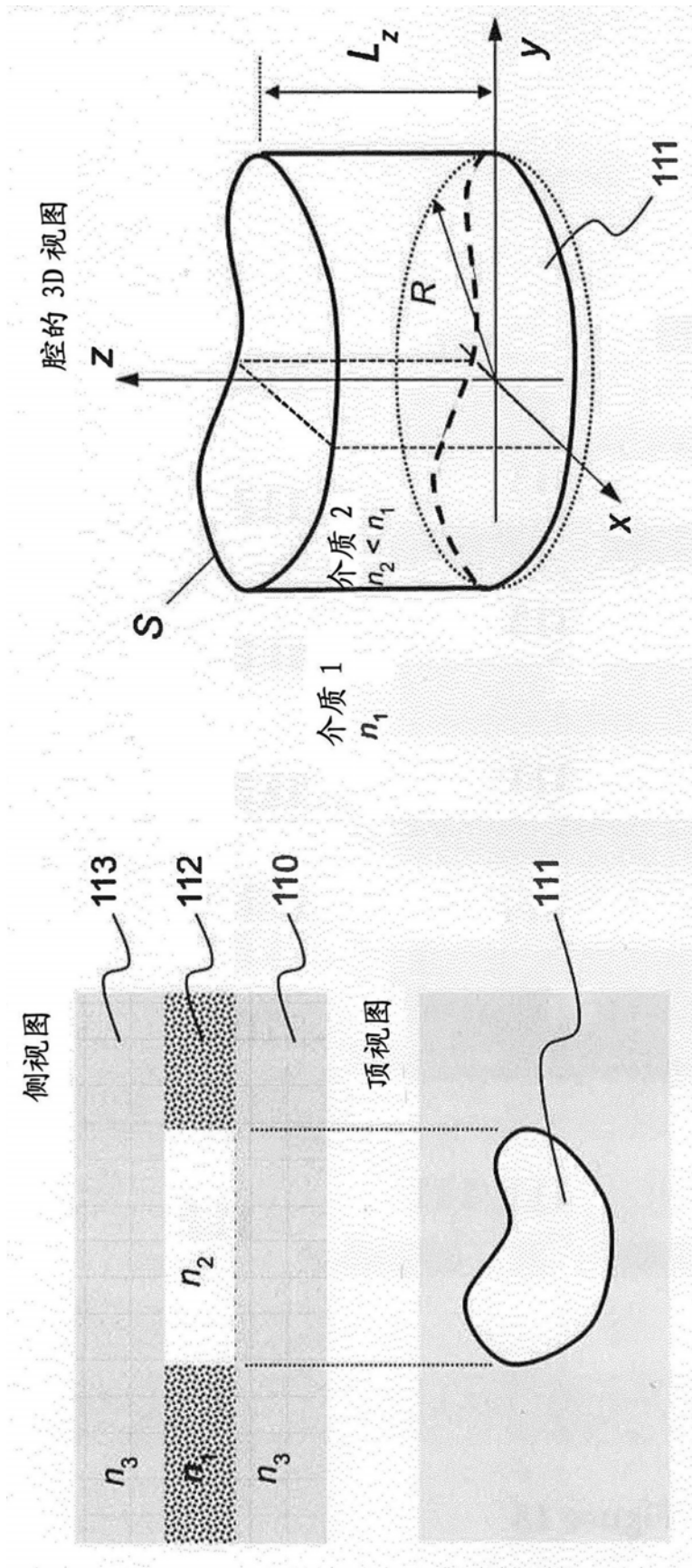


图14

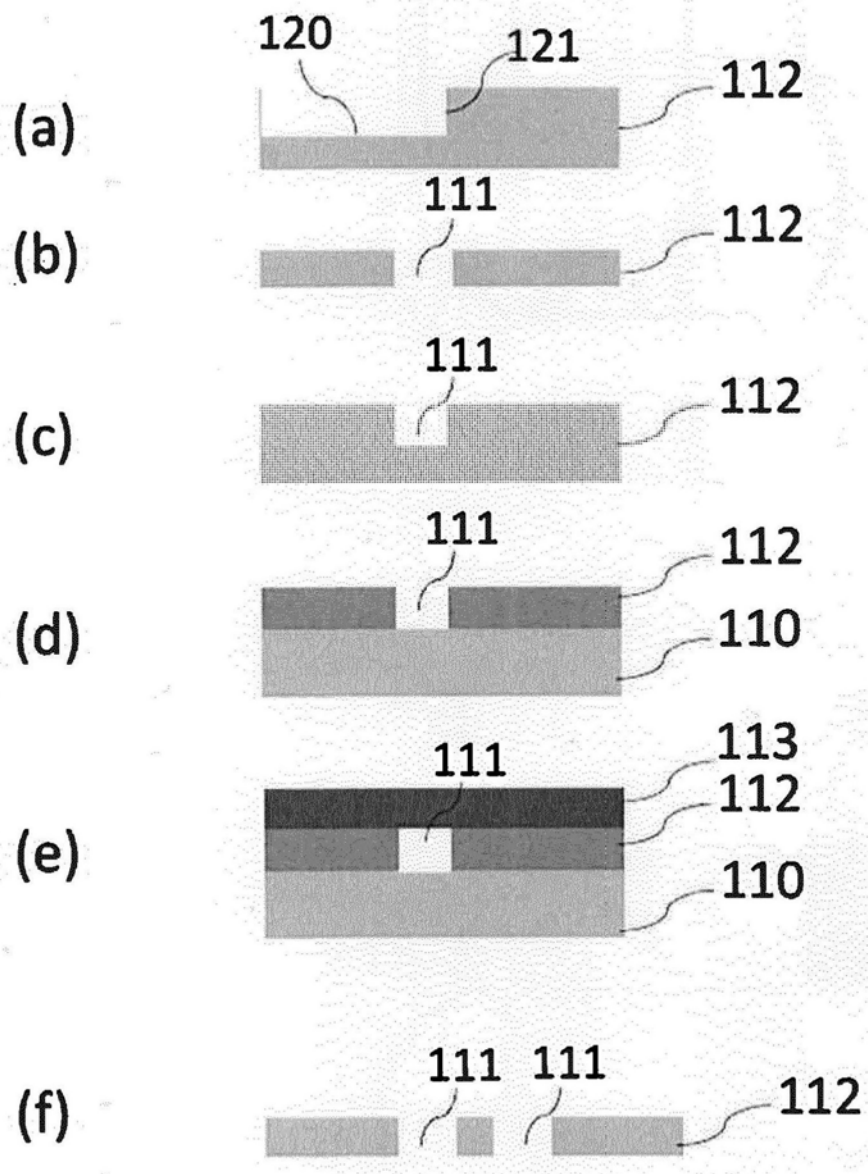


图15

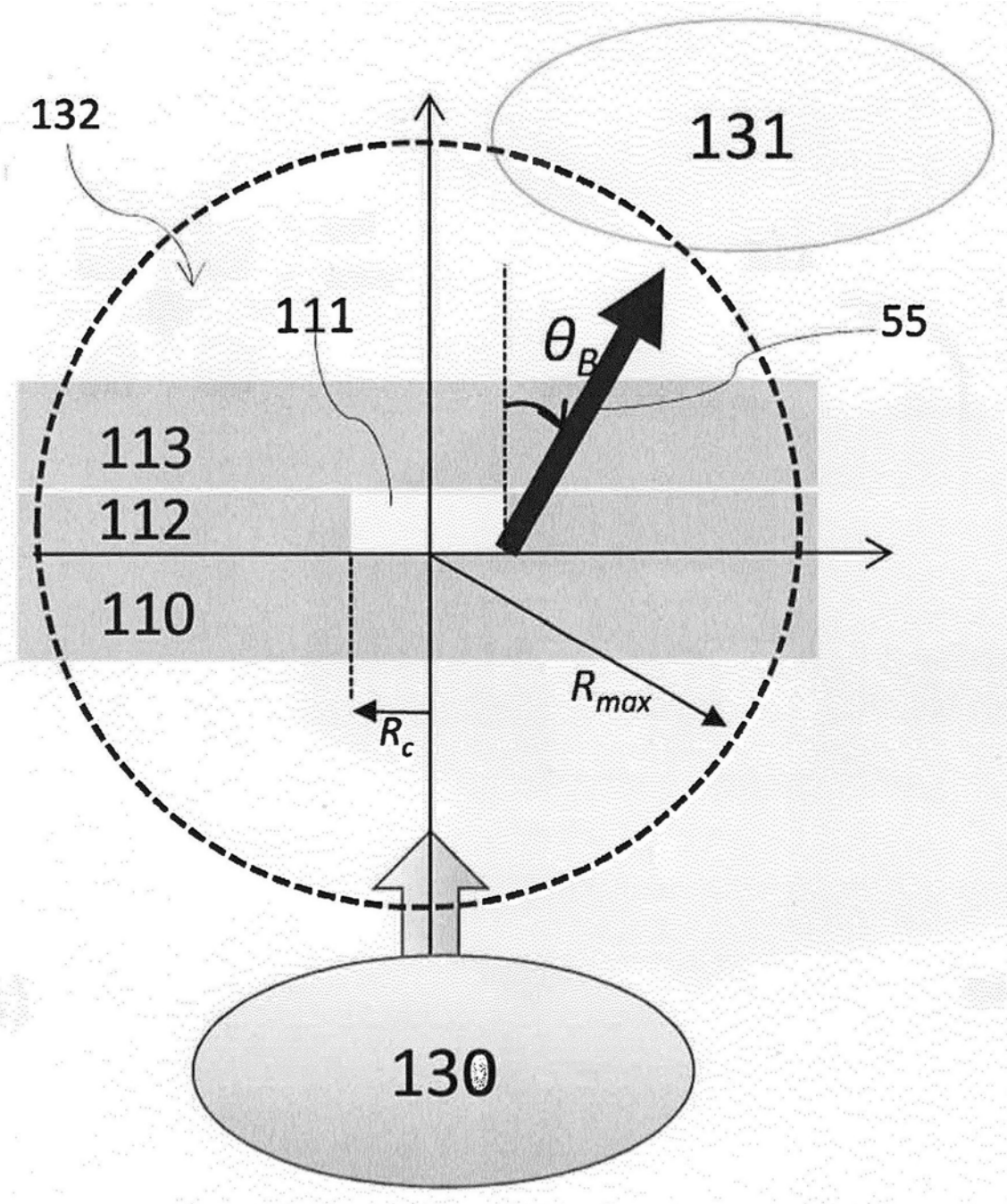
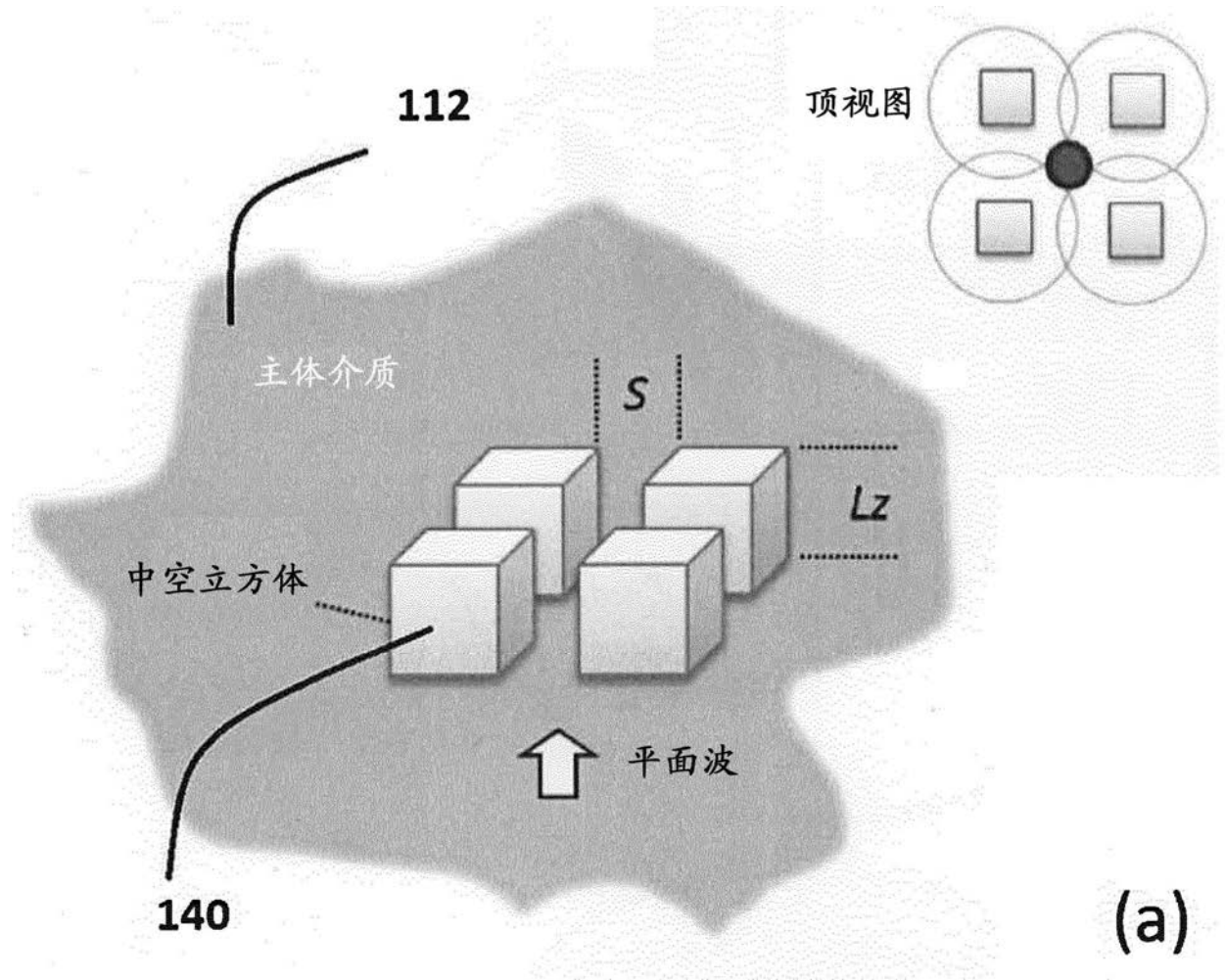


图16



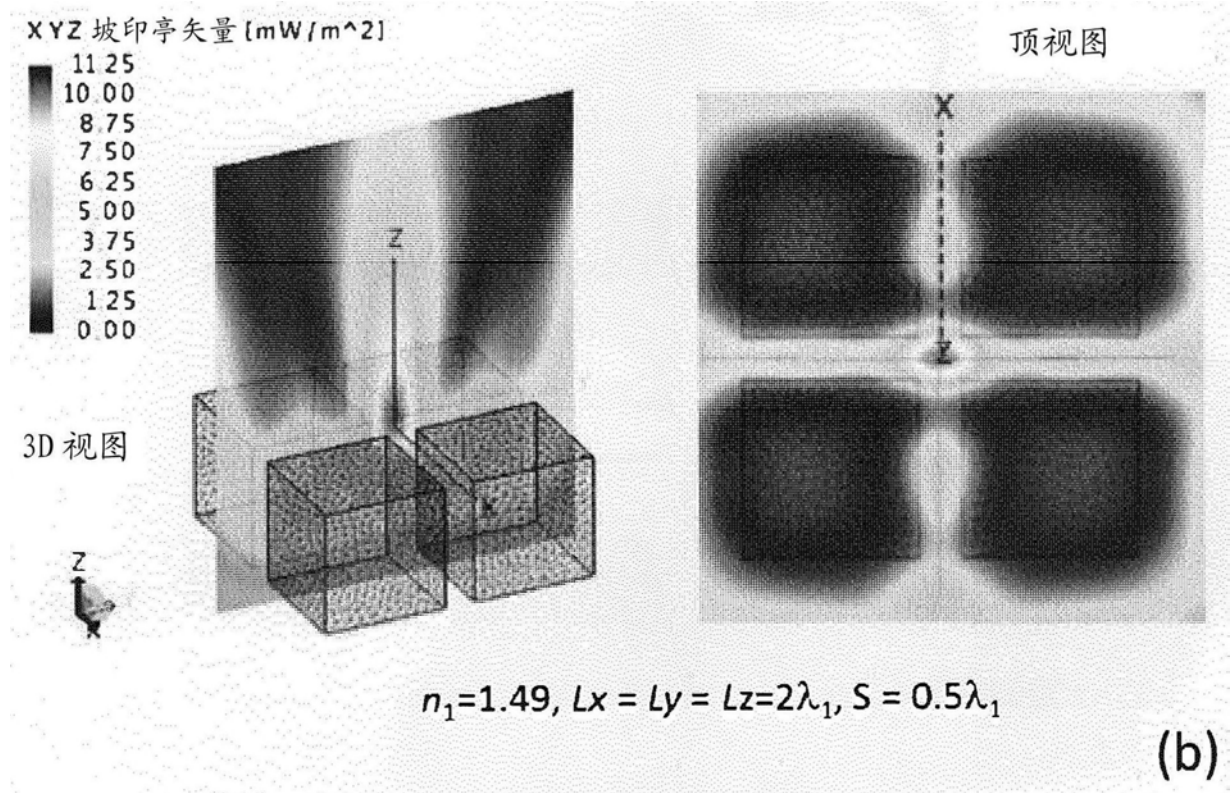
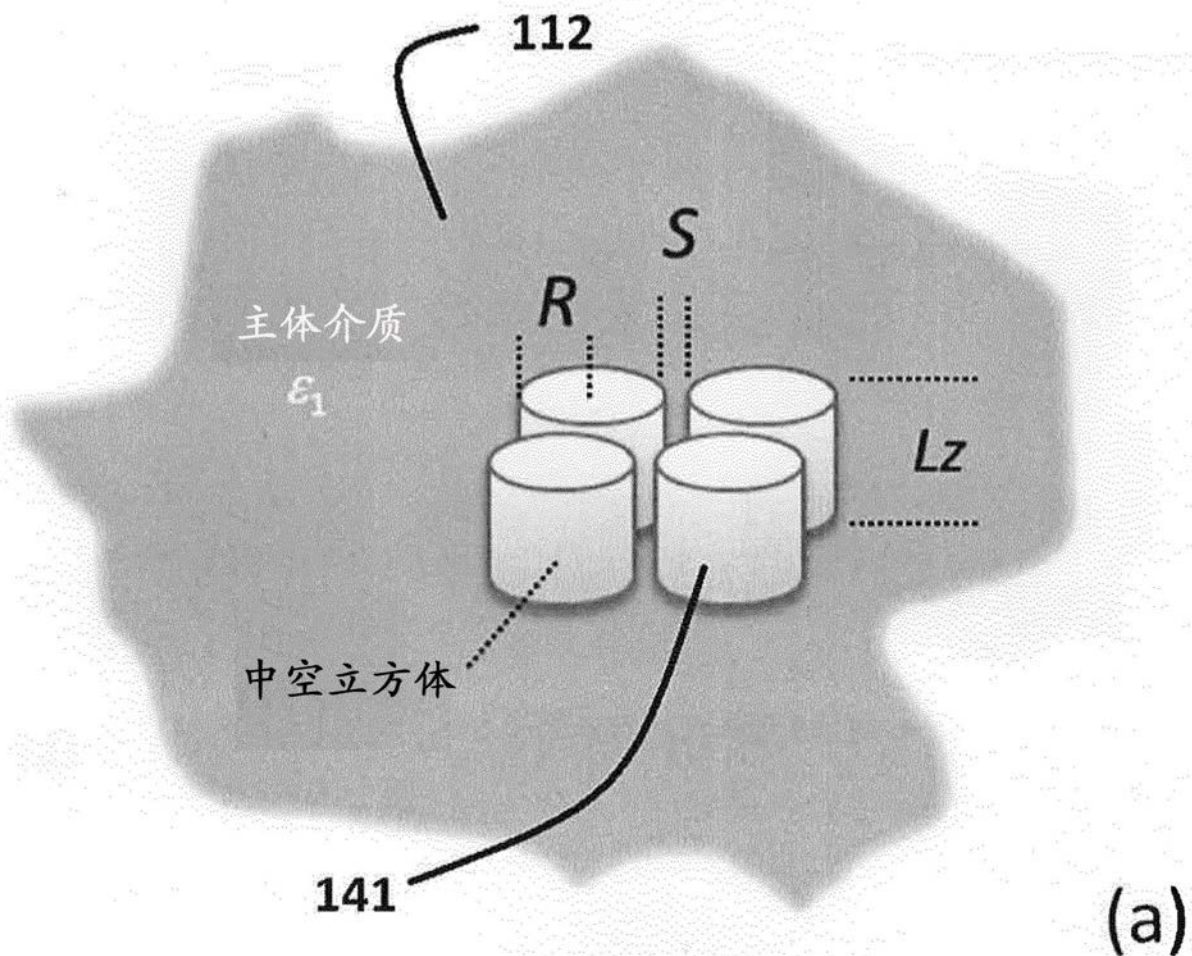
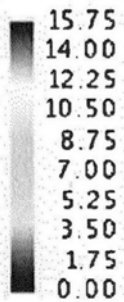


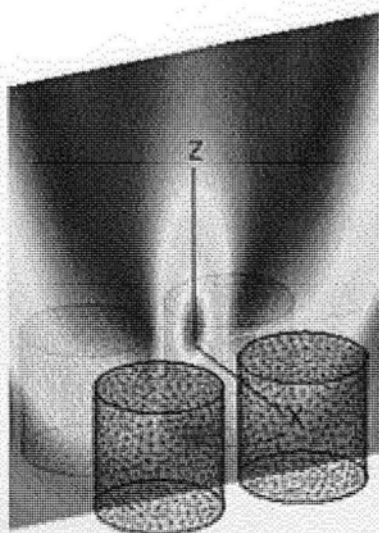
图17



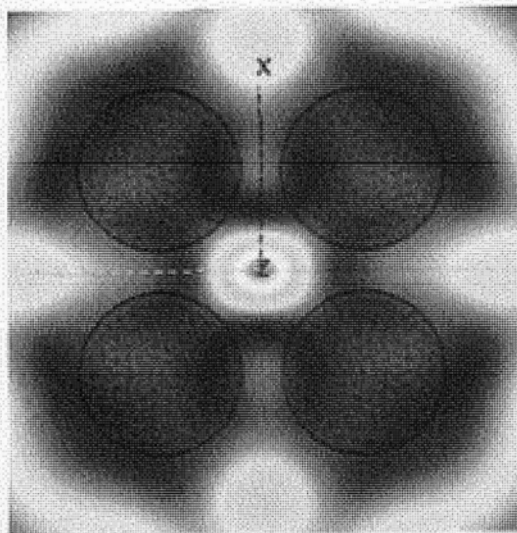
XYZ 坡印亭矢量 [mW/m²]



3D 视图



顶视图



(b)

图18

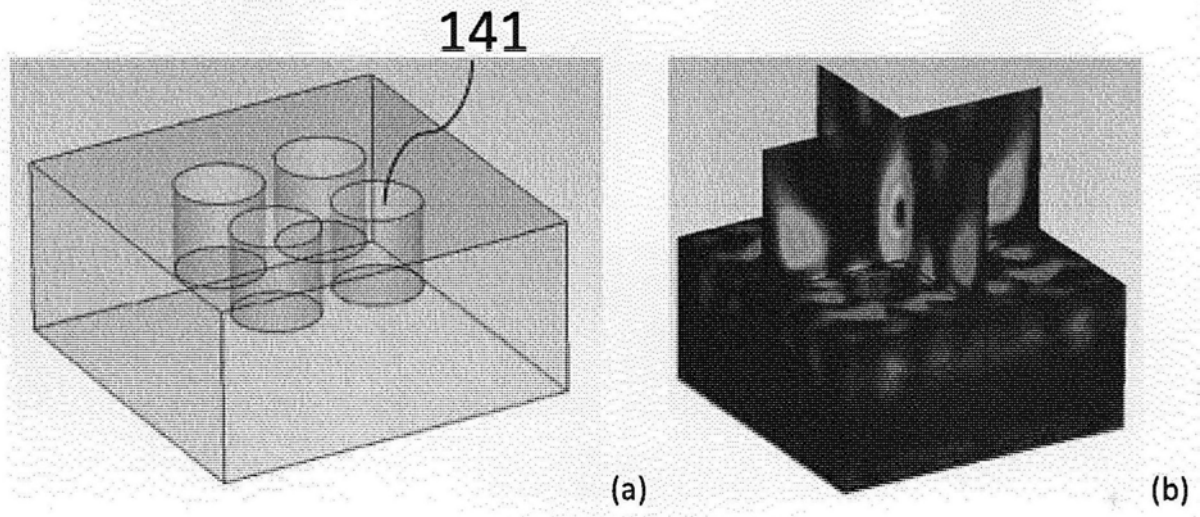
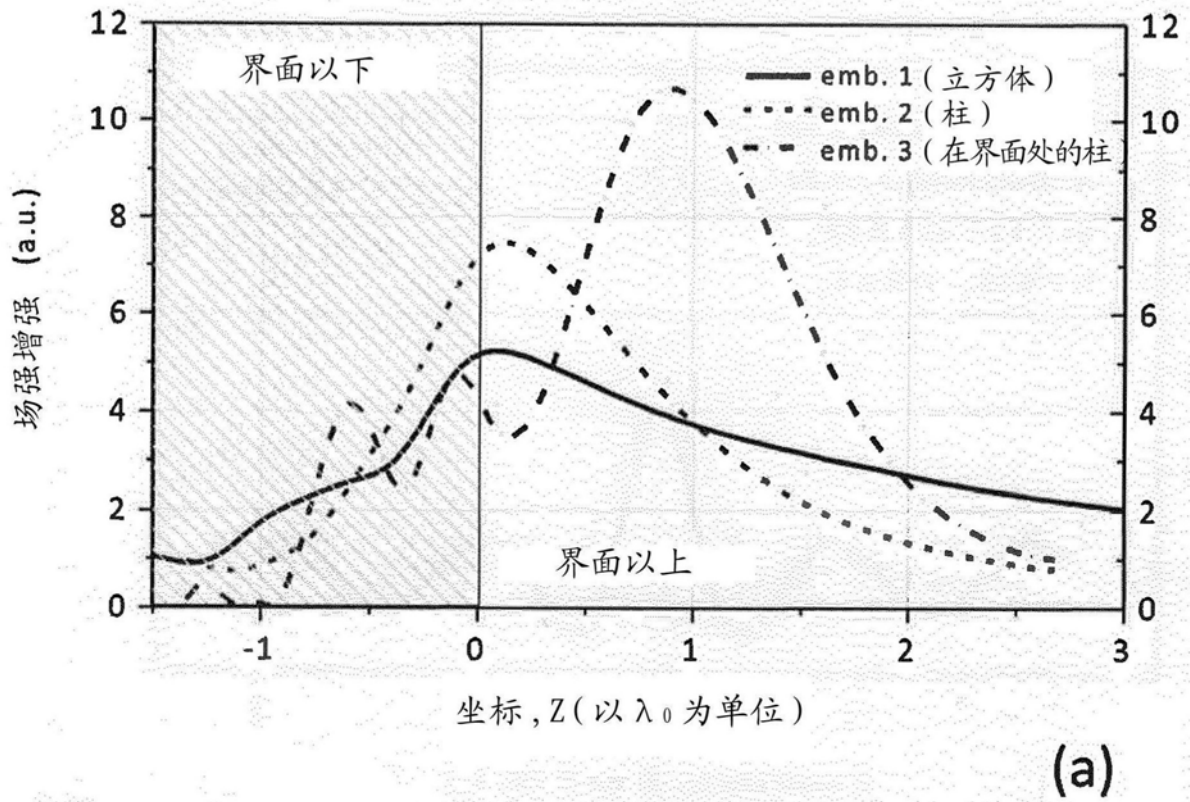
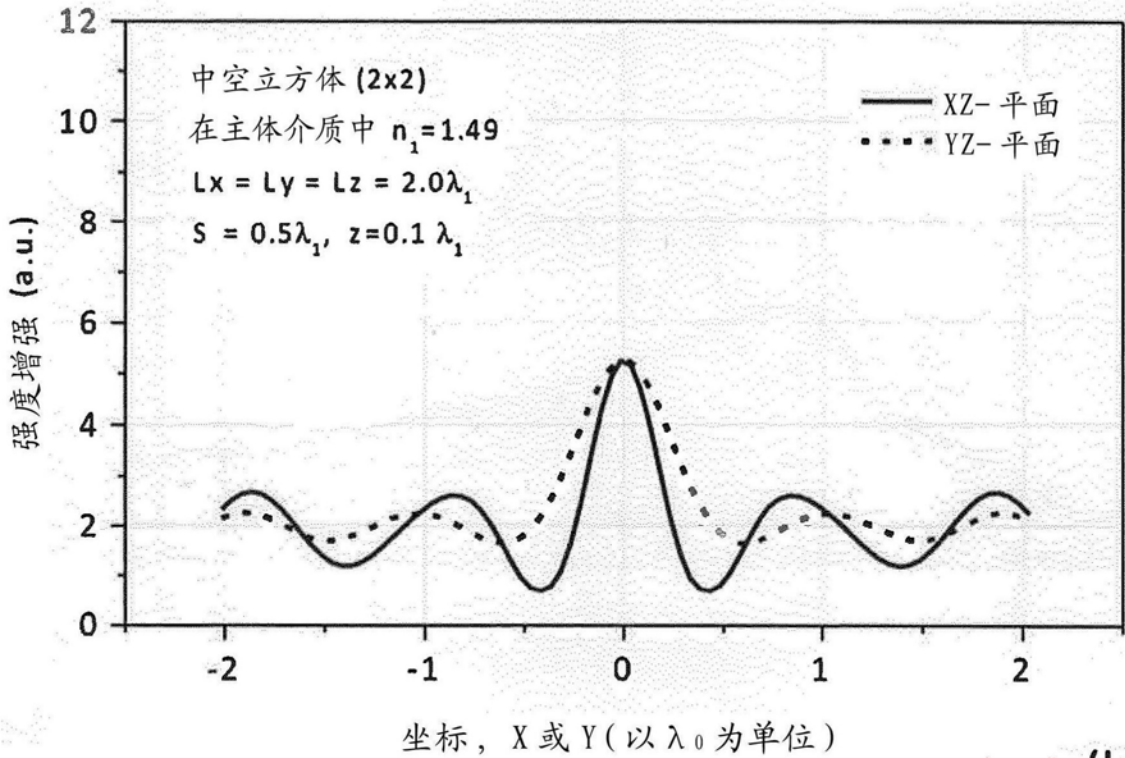
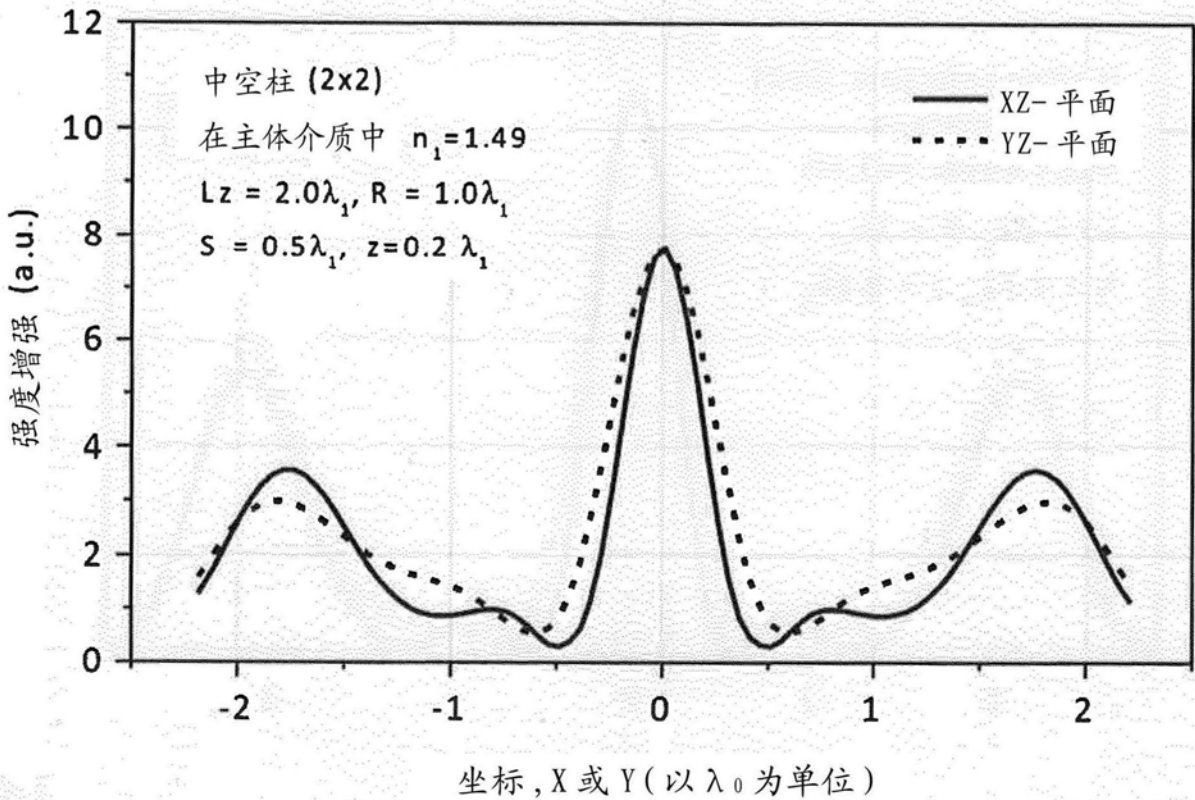


图19





(b)



(c)

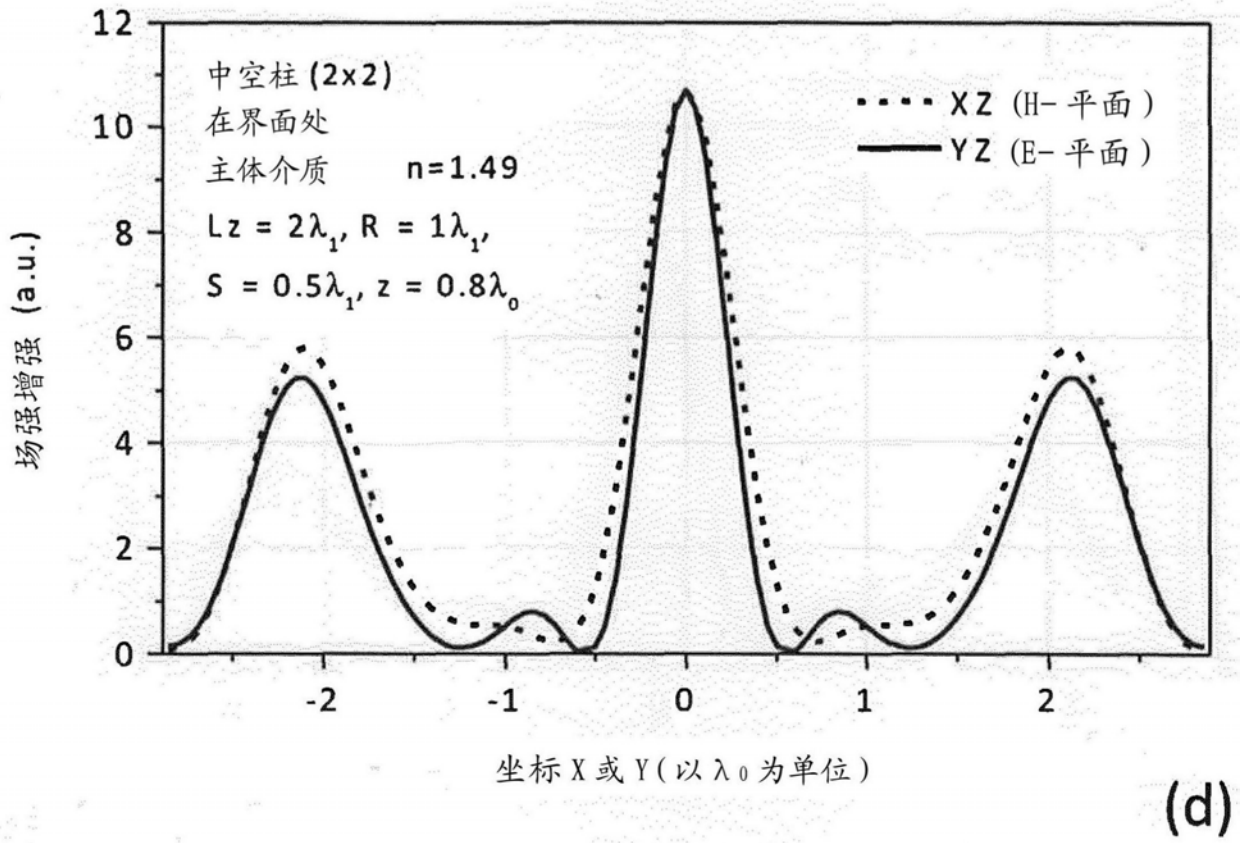


图20

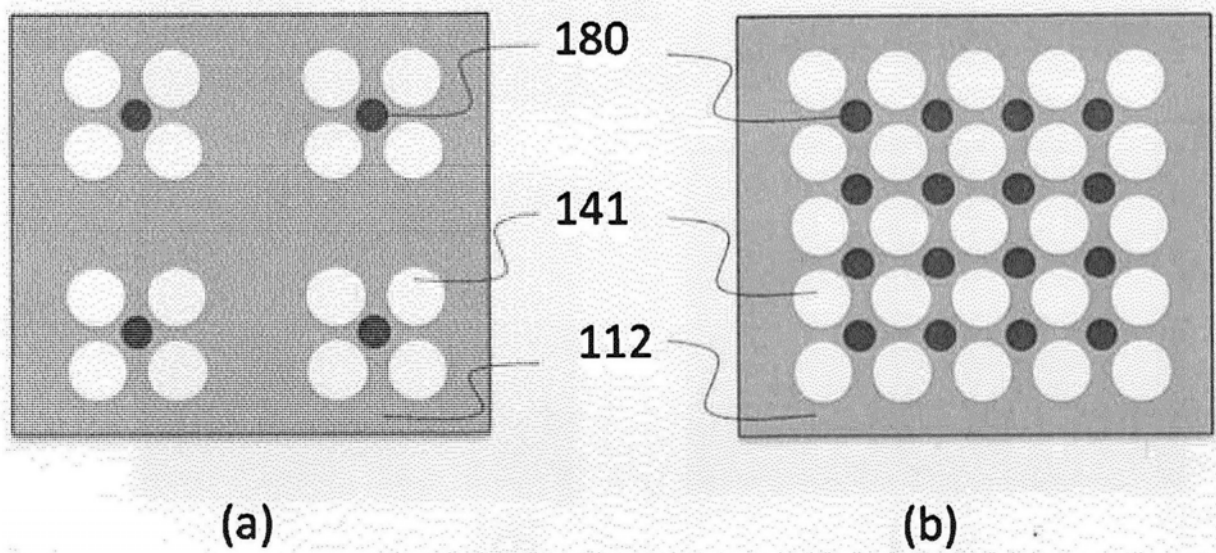


图21

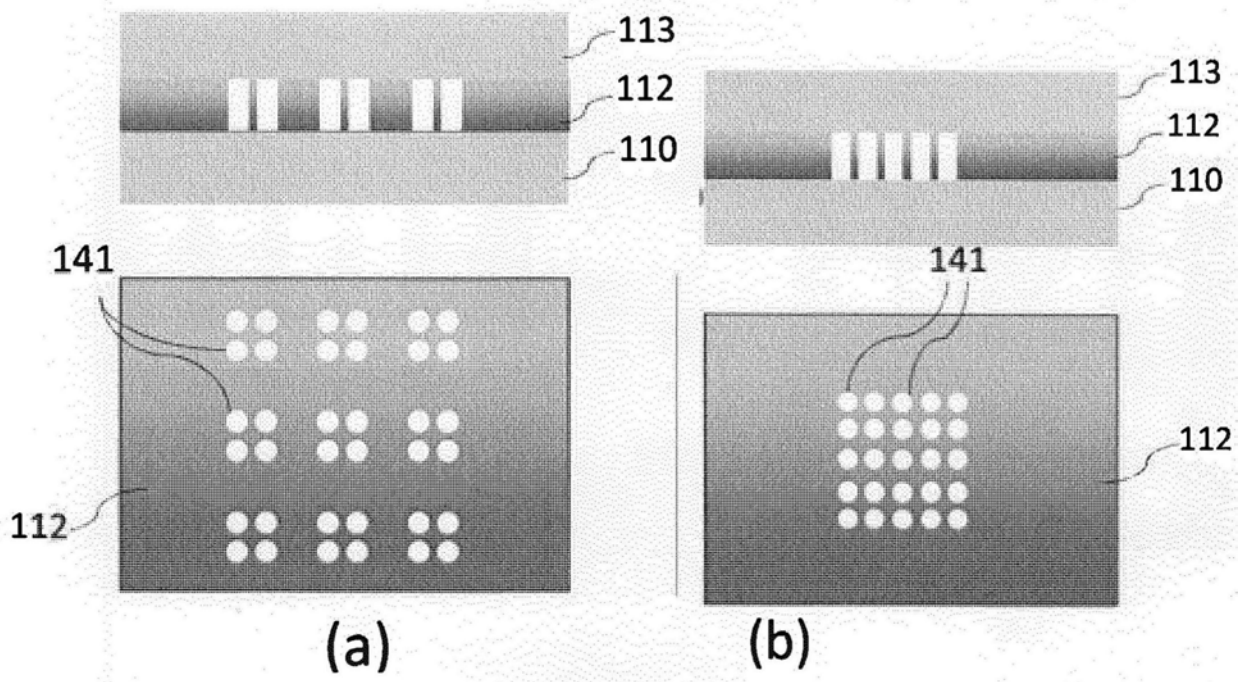


图22

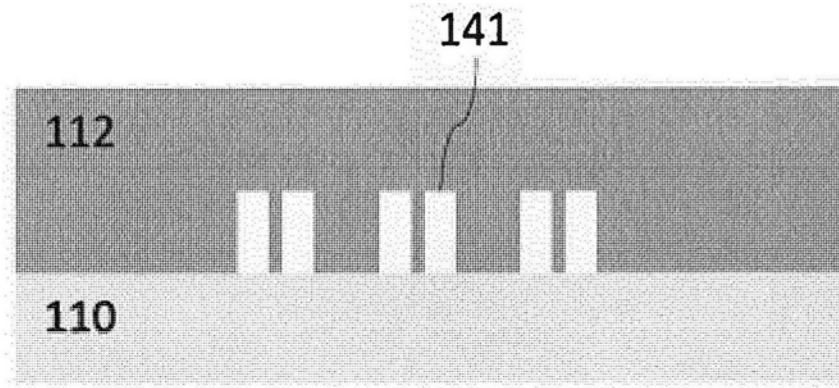


图23