



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115437045 B

(45) 授权公告日 2023.08.15

(21) 申请号 202211263574.9

G02B 6/26 (2006.01)

(22) 申请日 2022.10.10

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 115437045 A

CN 113568076 A, 2021.10.29

US 2004027682 A1, 2004.02.12

US 2013121016 A1, 2013.05.16

(43) 申请公布日 2022.12.06

CN 104238020 A, 2014.12.24

CN 114966981 A, 2022.08.30

(73) 专利权人 香港理工大学深圳研究院

地址 518057 广东省深圳市南山区高新园

南区粤兴一道18号香港理工大学学

研大楼205室

CN 113141493 A, 2021.07.20

CN 113406738 A, 2021.09.17

CN 1385713 A, 2002.12.18

(72) 发明人 张需明 姜衡 蔡智聪

TW 200848820 A, 2008.12.16

US 2008096468 A1, 2008.04.24

US 4380365 A, 1983.04.19

(74) 专利代理机构 长沙星耀专利事务所(普通

合伙) 43205

专利代理师 宁冈

刘骁; 陈于武; 杨璠. 锥形微透镜保偏光纤与超辐射发光二极管的耦合. 半导体光电. 2006, (第03期), 全文.

审查员 孙世宁

(51) Int. Cl.

G02B 3/00 (2006.01)

G02B 3/02 (2006.01)

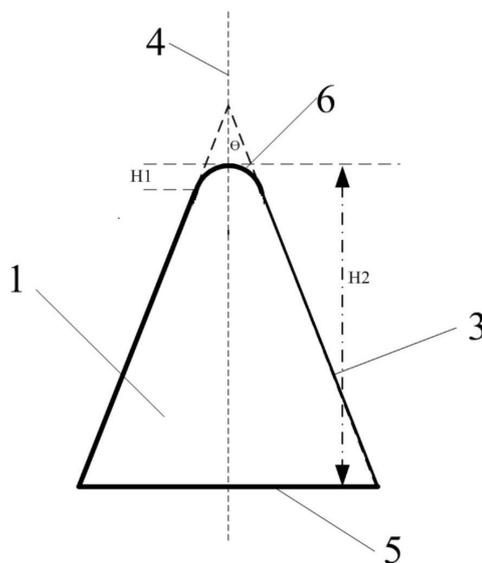
权利要求书1页 说明书8页 附图16页

(54) 发明名称

一种微透镜

(57) 摘要

本发明公开了一种微透镜,所述微透镜连接光纤,所述微透镜呈圆锥型,所述圆锥的侧面母线为直线,所述圆锥具有轴线,所述侧面母线与所述轴线之间的夹角为半顶角 $\theta$ ,所述圆锥具有底面,从所述圆锥的底面至所述圆锥的顶点所述圆锥的横截面尺寸连续减小,所述半顶角 $\theta$ 为 $30^\circ \sim 45^\circ$ 。本发明提高了光纤传递的有效信息量。



1. 一种微透镜,其特征在于,所述微透镜连接光纤,所述微透镜呈圆锥型,所述圆锥的侧面母线为直线,所述圆锥具有轴线,所述侧面母线与所述轴线之间的夹角为半顶角 $\theta$ ,所述圆锥具有底面,从所述圆锥的底面至所述圆锥的顶点所述圆锥的横截面尺寸连续减小,所述半顶角 $\theta$ 为 $30^\circ \sim 45^\circ$ ;所述圆锥型微透镜的锥型顶部由圆弧型球顶形成,所述侧面母线与所述球顶相切形成切点。

2. 根据权利要求1所述的微透镜,其特征在于,所述半顶角 $\theta$ 为 $32^\circ \sim 43^\circ$ 。

3. 根据权利要求1所述的微透镜,其特征在于,所述半顶角 $\theta$ 为 $35^\circ$ 。

4. 根据权利要求1所述的微透镜,其特征在于,所述球顶的顶点与所述切点间的高度为 $H_1$ ,所述球顶的顶点与所述底面间的高度为 $H_2$ , $H_1:H_2$ 为 $1:10-1:2$ 之间。

5. 根据权利要求4所述的微透镜,其特征在于, $H_1:H_2$ 为 $1:5.5$ 。

6. 根据权利要求5所述的微透镜,其特征在于,所述球顶曲率连续变化。

7. 根据权利要求1所述的微透镜,其特征在于,所述半顶角 $\theta$ 满足下式:

$$\angle 8 = \sin^{-1}(n_1 \cdot \sin(\sin^{-1} \frac{\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}}{n_1} + (\frac{\pi}{2} - \theta))) - (\frac{\pi}{2} - \theta)$$

其中, $\angle 8 < \theta$ , $\angle 8$ 为上接触面临界角, $n_1$ 是微透镜的折射率, $n_1$ 是光纤核的折射率, $n_2$ 是光纤包层的折射率。

## 一种微透镜

### 技术领域

[0001] 本发明属于光学成像领域,特别涉及一种微透镜。

### 背景技术

[0002] 光纤作为一种光导材料,具有可弯折的特性。因此利用光纤阵列实现平面或曲面成像具有独特的优势。由于石英光纤抗弯性较差,即容易被折断,因此光纤成像更青睐于塑料光纤。但是塑料光纤的数值孔径通常为0.5,对应的接收角则为 $60^\circ$ 。该接收角较大,因此在光纤阵列成像时会导致相邻光纤传导的光信息重复过多,有效信息量减少。而在光纤端面处增加微透镜则是降低接收角的有效方法。

[0003] 已有的文献虽然对光纤端面的微透镜有所提及(马孟超,张翼,顾磊,等.一种重叠型复眼:中国,CN113141493A[P].2021-07-20.),但提及到的微透镜形状由其表面张力决定,通常为半球型,并未对该形状的合理性进行过验证,也并未设计过最优尺寸。

### 发明内容

[0004] 针对现有技术的缺陷,本发明提供了一种微透镜。

[0005] 一种微透镜,所述微透镜连接光纤,所述微透镜呈圆锥型,所述圆锥的侧面母线为直线,所述圆锥具有轴线,所述侧面母线与所述轴线之间的夹角为半顶角 $\theta$ ,所述圆锥具有底面,从所述圆锥的底面至所述圆锥的顶点所述圆锥的横截面尺寸连续减小,所述半顶角 $\theta$ 为 $30^\circ \sim 45^\circ$ 。

[0006] 进一步的,所述半顶角 $\theta$ 为 $32^\circ \sim 43^\circ$ 。所述半顶角 $\theta$ 为 $35^\circ$ 。

[0007] 可选的,所述圆锥型微透镜的锥型顶部由圆弧型球顶形成,所述侧面母线与所述球顶相切形成切点;所述球顶的顶点与所述切点间的高度为 $H_1$ ,所述球顶的顶点与所述底面间的高度为 $H_2$ , $H_1:H_2$ 为1:10-1:2之间, $H_1$ 过大则微透镜接收角远大于设计接收角, $H_1$ 过小则微透镜接收区域中间信息丢失;所述球顶曲率连续变化。

[0008] 其中,所述半顶角 $\theta$ 满足下式:

$$[0009] \quad \angle 8 = \sin^{-1}(n_1 \cdot \sin(\sin^{-1} \frac{\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}}{n_1} + (\frac{\pi}{2} - \theta))) - (\frac{\pi}{2} - \theta)$$

[0010] 其中, $\angle 8$ 为上接触面临界角(当 $\angle 8 < \theta$ 时), $n_1$ 是微透镜的折射率, $n_1$ 是光纤核的折射率, $n_2$ 是光纤包层的折射率。

[0011] 本发明的有益效果是:本发明将对光纤端面的微透镜形状进行分析对比,在此基础上对其尺寸进行合理选择。合理设计光纤端面的微透镜形状及尺寸对光纤阵列成像时有效信息量的提高具有重要意义。本发明确定了最优的光纤端面微透镜形状;确定了合适的光纤端面微透镜尺寸;提高了光纤传递的有效信息量。

### 附图说明

[0012] 图1为光纤上接触面光线传入球型微透镜光路图;

- [0013] 图2为球型微透镜不同半径的上接触面临界角与射出点位置关系图；
- [0014] 图3为光纤下接触面光线传入球型微透镜光路图；
- [0015] 图4为球型微透镜不同半径的下接触面临界角与射出点位置关系图；
- [0016] 图5为球型微透镜不同半径的上下接触面临界角之差与射出点位置关系图；
- [0017] 图6为微透镜的结构示意图；
- [0018] 图7为光纤上接触面光线传入圆锥型微透镜且无微透镜内部的反射光路图；
- [0019] 图8为光纤下接触面光线传入圆锥型微透镜且无微透镜内部的反射光路图；
- [0020] 图9为圆锥型微透镜内部光线直接折射时各角度与半顶角关系；
- [0021] 图10为来自于光纤上接触面的光线在微透镜内部的反射；
- [0022] 图11为来自于光纤下接触面的光线在微透镜内部的反射；
- [0023] 图12为圆锥型微透镜内部光线反射时各角度与半顶角关系；
- [0024] 图13为光线从微透镜中射出的情况一；
- [0025] 图14为光线从微透镜中射出的情况二；
- [0026] 图15为圆弧型球顶修饰的圆锥型微透镜透镜示意图；
- [0027] 图16为半顶角等于 $85^{\circ}$ 时,接收面的光照结果；
- [0028] 图17为半顶角等于 $80^{\circ}$ 时,接收面的光照结果；
- [0029] 图18为半顶角等于 $75^{\circ}$ 时,接收面的光照结果；
- [0030] 图19为半顶角等于 $70^{\circ}$ 时,接收面的光照结果；
- [0031] 图20为半顶角等于 $68^{\circ}$ 时,接收面的光照结果；
- [0032] 图21为半顶角等于 $65^{\circ}$ 时,接收面的光照结果；
- [0033] 图22为半顶角等于 $60^{\circ}$ 时,接收面的光照结果；
- [0034] 图23为半顶角等于 $55^{\circ}$ 时,接收面的光照结果；
- [0035] 图24为半顶角等于 $50^{\circ}$ 时,接收面的光照结果；
- [0036] 图25为半顶角等于 $45^{\circ}$ 时,接收面的光照结果；
- [0037] 图26为半顶角等于 $43^{\circ}$ 时,接收面的光照结果；
- [0038] 图27为半顶角等于 $40^{\circ}$ 时,接收面的光照结果；
- [0039] 图28为半顶角等于 $35^{\circ}$ 时,接收面的光照结果；
- [0040] 图29为半顶角等于 $30^{\circ}$ 时,接收面的光照结果；
- [0041] 对于图中标号的说明:A代表接收面,B代表微透镜,C代表光纤。

### 具体实施方式

[0042] 为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂,下面结合附图对本发明的具体实施方式做详细的说明,使本发明的上述及其它目的、特征和优势将更加清晰。在全部附图中相同的附图标记指示相同的部分。并未刻意按比例绘制附图,重点在于示出本发明的主旨。

[0043] 由于微透镜及光纤均轴对称,因此如图1,图3,图7,图8,图10,图11所示,本发明以微透镜的光轴的一侧为例进行分析。定义微透镜的接收角逆时针为正。同时根据光线可逆原理,微透镜的接收角等于其发散角,因此本发明通过计算发散角来分析接收角。

[0044] 球型微透镜不同位置处的接收角分析

[0045] 由于球型微透镜是最常见也最易加工的微透镜,因此首先对球型微透镜进行分析。

[0046] (1) 上接触面临界角分析

[0047] 如图1所示,当光线从光纤核和光纤包层的上接触面反射后,会被折射进入微透镜,最终折射进入空气。如果最终折射进入空气的所有光线与光纤光轴平行线的夹角均小于球面微透镜在该点的切线角(即微透镜内未发生全反射现象),则有:当光线在上接触面的反射角 $\angle 1$ 等于光纤的全反射角时,光线最终折射进入空气的 $\angle 8$ 为上接触面临界角。此时 $\angle 8$ 满足公式:

$$[0048] \quad \angle 8 = \sin^{-1} \left( n_1 \cdot \cos \left( \sin^{-1} \frac{\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}}{n_1} - \cos^{-1} \frac{d}{R} \right) \right) - \sin^{-1} \frac{d}{R} \quad (1)$$

[0049] 其中, $n_1$ 是微透镜的折射率, $n_1$ 是光纤核的折射率, $n_2$ 是光纤包层的折射率, $n_0$ 是空气的折射率, $d$ 是光线于微透镜上的出射位置与光纤轴线的距离, $R$ 是球型微透镜的半径。

[0050] 如果上述 $\angle 8$ 大于球面微透镜在该点的切线角,则上接触面临界角为该点的切线角:

$$[0051] \quad \text{Angle of contigence} = \cos^{-1} \frac{d}{R} \quad (2)$$

[0052] 根据公式(1)及公式(2)可得到球型微透镜不同位置处的上接触面临界角,如图2所示。

[0053] (2) 下接触面临界角分析

[0054] 根据光纤的光传导原理,光线在光纤内部反射时,反射角 $\angle 1$ 必须大于全反射角。随着 $\angle 1$ 的增大, $\angle 8$ 逐渐减小。当 $\angle 1 = 90^\circ$ 后,如要继续减小 $\angle 8$ ,则光线应从光纤下接触面反射。如图3所示,当光线于光纤下接触面的反射角等于全反射角时,光线最终折射进入空气的发散角 $\angle 8$ 达到临界。此时 $\angle 8$ 满足公式:

$$[0055] \quad \angle 8 = \sin^{-1} \left( n_1 \cdot \cos \left( \cos^{-1} \frac{d}{R} + \sin^{-1} \frac{\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}}{n_1} \right) \right) - \sin^{-1} \frac{d}{R} \quad (3)$$

[0056] 根据公式(3)可得到球型微透镜不同位置处的下接触面临界角,如图4所示。

[0057] (3) 接收角分析

[0058] 根据光纤全反射原理,如果光从光纤上接触面反射,最终经球型微透镜射出,则光在光纤上接触面的反射角均应大于等于临界全反射角,对应的, $\angle 8$ 则应小于等于上接触面临界角。如果光从光纤下接触面发射,对应的, $\angle 8$ 则应大于等于下接触面临界角。

[0059] 当下临界角小于等于0时,半发散角(半接收角)等于上临界角,当下临界角大于0时,半发散角(半接收角)等于上临界角与下临界角之差(如图5所示),且此时光接收面会出现中空区域(类似原因将在下文解释)。

[0060] 根据该结论,可得到球型微透镜不同位置处的发散角,同时也是接收角。根据图3-5,对球型微透镜的接收角进行分析,可以得出球型微透镜的两点缺点:1.不同位置处的接收角大小不一,增加了微透镜设计及分析难度;2.球型微透镜大部分位置的接收角大于 $60^\circ$ ,即大于塑料光纤自身的接收角,并未实现增加微透镜以降低接收角的目的。

[0061] 因此最常见的球型微透镜并不适合用于光纤端面微透镜。

[0062] 圆锥型微透镜接收角分析

[0063] 球型微透镜不同位置处的接收角大小不一的主要原因在于球型透镜截面为曲线，而圆锥型微透镜截面则为直线，可以解决以上问题。

[0064] 参阅图6，本发明的微透镜1连接光纤2，微透镜1呈圆锥型，圆锥的侧面母线3为直线，圆锥具有轴线4，侧面母线3与轴线4之间的夹角为半顶角 $\theta$ ，圆锥具有底面5，从圆锥的底面5至圆锥的顶点圆锥的横截面尺寸连续减小。

[0065] 对于圆锥型透镜，当光线射到微透镜与空气的界面时，部分光线会折射进入空气，部分光线会反射到微透镜另一侧后再折射进入空气。本发明将对两种情况均进行分析。

[0066] (1) 直接折射时接收角分析

[0067] 根据光路可逆原理，对圆锥型微透镜的发散角进行了分析。如图7所示，当光线从光纤核和光纤包层的上接触面反射，且 $\angle 1$ 等于光纤的全反射角时， $\angle 8$ 满足公式：

$$[0068] \quad \angle 8 = \sin^{-1} \left( n_1 \cdot \sin \left( \sin^{-1} \frac{\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}}{n_1} + \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) \right) - \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) \right) \quad (4)$$

[0069] 其中 $\theta$ 为圆锥角的一半(半顶角)，根据几何关系，切线角为：

$$[0070] \quad \text{Angle of contingence} = \theta \quad (5)$$

[0071] 上接触面临界角为上述两个角度的最小值。

[0072] 如图8所示，当光线从光纤核和光纤包层的下接触面反射，且 $\angle 1$ 等于光纤的全反射角时， $\angle 8$ 满足公式：

$$[0073] \quad \angle 8 = \sin^{-1} \left( n_1 \cdot \sin \left( \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) - \sin^{-1} \frac{\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}}{n_1} \right) - \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) \right) \quad (6)$$

[0074] 切线角仍然为 $\theta$ ，下接触面临界角为上述两个角度的最小值。

[0075] 类似的，当下临界角小于等于0时，半发散角(半接收角)等于上临界角，当下临界角大于0时，半发散角(半接收角)等于上临界角与下临界角之差。(原因将在下文提到)。

[0076] 图9为上述各角度与半顶角之间的关系，因此圆锥型微透镜的接收角与微透镜各点位置无关，只与微透镜圆锥顶角有关。

[0077] (2) 微透镜内部一次反射时接收角分析

[0078] 当光从微透镜折射进入空气时，也会在界面处产生反射，反射后的光会在微透镜另一侧射出。如图10所示为光线来自于光纤上接触面时的微透镜反射结果。如果 $\angle 1$ 等于光纤的全反射角，则 $\angle 15$ 满足：

$$[0079] \quad \angle 15 = \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) - \sin^{-1} \left( n_1 \cdot \sin \left( \frac{\pi}{2} - 3\theta + \sin^{-1} \frac{\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}}{n_1} \right) \right) \quad (7)$$

[0080] 切线角为 $-\theta$ ，此时临界角为 $\angle 15$ 与切线角之间的最大值。

[0081] 如图11所示为光线来自于光纤下接触面时的微透镜反射结果。

[0082] 如果 $\angle 1$ 等于光纤的全反射角，则 $\angle 15$ 满足：

$$[0083] \quad \angle 15 = \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) - \sin^{-1} \left( -n_1 \cdot \sin \left( \frac{3\pi}{2} - 3\theta - \sin^{-1} \frac{\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}}{n_1} \right) \right) \quad (8)$$

[0084] 切线角为 $-\theta$ ,此时临界角为 $\angle 15$ 与切线角之间的最大值。

[0085] 图12为上述各角度与半顶角之间的关系。

[0086] (3)接收角分析

[0087] 由图9及图12可知,当半顶角大于 $32^\circ$ 时微透镜内部光线反射对接收角(发散角)的影响基本可忽略,因此本发明将忽略微透镜内光线的反射影响。同时圆锥型微透镜不同位置处的光接收角相同,即光接收角只与半顶角 $\theta$ 有关。

[0088] 图13和图14是光从微透镜射出时的两种情况。由于接收面与微透镜之间的距离远大于微透镜的尺寸,并且来自微透镜表面不同位置的临界光是平行的,因此可以忽略微透镜表面不同位置对发散角(接收角)的影响。由图9可知,上临界角始终大于 $0$ ,而下临界角有时小于 $0$ ,有时大于 $0$ ,这意味着上接触面的临界光始终向下,而下接触面的临界光有时向上,有时向下。

[0089] 当下临界角小于等于 $0$ ( $\theta \geq 43^\circ$ )时,来自下接触面的临界光方向向上,光线在接收面上的投影为图13的粗线。由于微透镜是轴对称的,其实际发散面积(接收面积)为图13的插图,因此微透镜的半接收角将由上临界角和下临界角之间较大的绝对值决定。由图9可知,此时上临界角的绝对值总是大于下临界角,因此,当下临界角小于等于 $0$ 时,圆锥型微透镜的半接收角最终由上临界角决定。当下临界角大于 $0$ ( $\theta < 43^\circ$ )时,来自下接触面的临界光方向向下,光线在接收面上的投影为图14中的粗线。由于微透镜是轴对称的,实际的发散面积(接收面积)为图14的插图。此时圆锥型微透镜的半接收角是两个临界角的差值,接收区中间会出现空心区域,导致光信息的丢失。

[0090] 为了让整个接收角更小且没有中空区域,选择 $\theta = 35^\circ$ ,对应接收角为 $45^\circ$ ,且将圆锥型微透镜顶部修改为球型,保证圆锥型向球型变化时曲率连续,将圆锥型微透镜顶部更改为曲率连续的球型,解决了圆锥型微透镜接收区域中间空白的问题。最终形成圆弧型球顶修饰的圆锥型微透镜,如图15所示,其圆锥型微透镜的锥型顶部由圆弧型球顶6形成,侧面母线3与球顶6相切形成切点,侧面母线3的延长线与轴线4之间的夹角为 $\theta$ ,球顶6的顶点与切点间的高度为 $H_1$ ,球顶6的顶点与底面5间的高度为 $H_2$ , $H_1:H_2$ 为 $1:10-1:2$ 之间, $H_1$ 过大则微透镜接收角远大于设计接收角, $H_1$ 过小则微透镜接收区域中间信息丢失, $H_1:H_2$ 最优为 $1:5.5$ ,这样可以使得保证接收角与微透镜接收区域中间信息达到最优。

[0091] 利用数值模拟软件对圆锥型微透镜的接收角进行了模拟,在每种情况下,光接收面距离与光纤耦合的锥形微透镜 $15\text{cm}$ 。光会被诱导进入另一端的光纤,然后从微透镜射出,最后分析接收面的光强分布。不同条件下半顶角不同,光强分布也不同。

[0092] 光纤C右侧光线入射角度为 $-30^\circ$ 到 $30^\circ$ (塑料光纤NA值为 $0.5$ ,对应角度为 $30^\circ$ ),接收面距离微透镜 $15\text{mm}$ (保证该距离远大于微透镜尺寸)。改变微透镜的半顶角( $85^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $68^\circ$ 、 $65^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $55^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $43^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $35^\circ$ 、 $30^\circ$ ),观察对比接收面上的光强分布,结果如图16-29所示。

[0093] 仿真结果与理论结果定量一致,即当 $\theta \geq 68^\circ$ 时接收角随半顶角的减小而增大,而当 $\theta < 68^\circ$ 时接收角随半顶角的减小而减小。当 $\theta < 43^\circ$ 时,如前文所分析的,在接收面中间出

现空心区域,当 $\theta=30^\circ$ ,接收角为零。为了获得小的接收角,减少相邻小眼之间的重叠,且不会导致中空区域, $\theta=35^\circ$ 的圆弧型球顶修饰的圆锥型微透镜是最佳选择。

[0094] 本发明降低了光纤的接收角,提高了单位面积内的有效光信息量;单根光纤有效光信息量的提升最终提高了光纤阵列成像时的成像分辨力;保证了光纤微透镜不同位置处的接收角大小相同。

[0095] 下面进一步详细说明上文所涉及到的各公式的具体推导过程。

[0096] 1. 球型微透镜上接触面临界角推导

[0097] 如图1所示,根据光纤全反射理论, $\angle 1$ 满足:

$$[0098] \quad n_1 \sin \angle 1 = n_2 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \quad (9)$$

[0099] 由于 $\angle 1$ 与 $\angle 2$ 互余,因此 $\angle 2$ 满足:

$$[0100] \quad \sin \angle 2 = \cos \angle 1 = \cos\left(\sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}\right) = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1} \quad (10)$$

[0101] 根据折射定律, $\angle 3$ 满足:

$$[0102] \quad n_1 \sin \angle 3 = n_1 \sin \angle 2 \quad (11)$$

[0103] 因此:

$$[0104] \quad \angle 3 = \sin^{-1} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1} \quad (12)$$

[0105]  $\angle 5$ 满足:

$$[0106] \quad \angle 5 = \cos^{-1} \frac{d}{R} \quad (13)$$

[0107]  $\angle 4$ 与 $\angle 5$ 互余,因此:

$$[0108] \quad \angle 4 = \frac{\pi}{2} - \angle 5 = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \frac{d}{R} \quad (14)$$

[0109] 进而:

$$[0110] \quad \angle 3 + \angle 4 = \sin^{-1} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1} - \cos^{-1} \frac{d}{R} + \frac{\pi}{2} \quad (15)$$

[0111] 根据折射定律:

$$[0112] \quad \sin(\angle 7 + \angle 8) = n_1 \sin(\angle 3 + \angle 4) = n_1 \cos\left(\sin^{-1} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1} - \cos^{-1} \frac{d}{R}\right) \quad (16)$$

[0113] 因此 $\angle 8$ 满足公式(1)。

[0114] 2. 球型微透镜下接触面临界角推导

[0115] 如图3所示, $\angle 3$ 仍满足公式(12), $\angle 5$ 仍满足公式(13),此时, $\angle 4$ 满足:

$$[0116] \quad \angle 4 = \frac{\pi}{2} - (\angle 3 + \angle 5) \quad (17)$$

[0117] 根据折射定律:

$$[0118] \quad \sin \angle 6 = n_i \sin \angle 4 = n_i \cos(\sin^{-1} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_i} + \cos^{-1} \frac{d}{R}) \quad (18)$$

[0119] 因为 $\angle 6$ 等于 $\angle 7$ 与 $\angle 8$ 之和,因此 $\angle 8$ 满足公式(3)。

[0120] 3.圆锥型微透镜直接折射时上接触面临界角推导

[0121] 如图7所示, $\angle 3$ 仍满足公式(12),此时根据三角关系, $\angle 5$ 与 $\angle 6$ 满足:

$$[0122] \quad \angle 5 = \angle 6 = \angle 7 = \frac{\pi}{2} - \theta \quad (19)$$

[0123] 根据折射定律:

$$[0124] \quad \sin \angle 9 = n_i \sin(\angle 3 + \angle 5) = n_i \sin(\sin^{-1} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_i} - \theta + \frac{\pi}{2}) \quad (20)$$

[0125] 因为 $\angle 9$ 等于 $\angle 7$ 与 $\angle 8$ 之和,因此 $\angle 8$ 满足公式(4)。

[0126] 4.圆锥型微透镜直接折射时下接触面临界角推导

[0127] 如图8所示, $\angle 3$ 仍满足公式(12),根据三角关系, $\angle 4$ 满足:

$$[0128] \quad \angle 4 = \theta \quad (21)$$

[0129] 因此 $\angle 5$ 满足:

$$[0130] \quad \angle 5 = \frac{\pi}{2} - \angle 3 - \angle 4 = \frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_i} - \theta \quad (22)$$

[0131] 根据三角关系, $\angle 7$ 满足:

$$[0132] \quad \angle 7 = \angle 3 + \angle 5 = \frac{\pi}{2} - \theta \quad (23)$$

[0133] 根据折射定律, $\angle 9$ 满足:

$$[0134] \quad \sin \angle 9 = n_i \sin \angle 5 = n_i \sin(\frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_i} - \theta) \quad (24)$$

[0135] 因为 $\angle 9$ 等于 $\angle 7$ 与 $\angle 8$ 之和,因此 $\angle 8$ 满足公式(6)。

[0136] 5.圆锥型微透镜内部一次反射时上接触面临界角推导

[0137] 如图10所示, $\angle 3$ 仍然满足公式(12),根据三角关系:

$$[0138] \quad \angle 5 = \frac{\pi}{2} - \theta + \angle 3 \quad (25)$$

$$[0139] \quad \angle 6 = \frac{\pi}{2} - \theta \quad (26)$$

[0140] 根据四边形内角之和,有:

$$[0141] \quad \angle 12 + \angle 17 = 2\pi - (\frac{\pi}{2} - \angle 3) - \angle 6 - 2\angle 5 = \frac{3\pi}{2} + \angle 3 - \angle 6 - 2\angle 5 \quad (27)$$

$$[0142] \quad \angle 13 = \frac{\pi}{2} - (\angle 12 + \angle 17) = \angle 6 + 2\angle 5 - \angle 3 - \pi \quad (28)$$

[0143] 根据折射定律:

[0144]  $\sin\angle 14 = n_1 \sin\angle 13$  (29)

[0145] 又因为:

[0146]  $\angle 16 = \angle 12 + \angle 13 = \angle 6$  (30)

[0147] 因此:

[0148]  $\angle 15 = \angle 16 - \angle 14 = \angle 6 - \angle 14$  (31)

[0149] 最终 $\angle 15$ 满足公式(7)。

[0150] 6. 圆锥型微透镜内部一次反射时下接触面临界角推导

[0151] 如图11所示, $\angle 3$ 仍然满足公式(12), $\angle 6$ 仍然满足公式(26),根据三角关系:

[0152] 
$$\angle 5 = \frac{\pi}{2} - \theta - \angle 3 \quad (32)$$

[0153] 根据四边形内角之和,有:

[0154] 
$$\angle 12 + \angle 17 = 2\pi - \left(\frac{\pi}{2} + \angle 3\right) - \angle 6 - 2\angle 5 = \frac{3\pi}{2} - \angle 3 - \angle 6 - 2\angle 5 \quad (33)$$

[0155] 
$$\angle 13 = \frac{\pi}{2} - (\angle 12 + \angle 17) = \angle 3 + \angle 6 + 2\angle 5 - \pi \quad (34)$$

[0156] 根据折射定律:

[0157]  $\sin\angle 14 = n_1 \sin\angle 13$  (35)

[0158] 又因为:

[0159]  $\angle 16 = \angle 12 + \angle 13 = \angle 6$  (36)

[0160] 因此:

[0161]  $\angle 15 = \angle 16 - \angle 14 = \angle 6 - \angle 14$  (37)

[0162] 最终 $\angle 15$ 满足公式(8)。

[0163] 在以上的描述中阐述了很多具体细节以便于充分理解本发明。但是以上描述仅是本发明的较佳实施例而已,本发明能够以很多不同于在此描述的其它方式来实施,因此本发明不受上面公开的具体实施的限制。同时任何熟悉本领域技术人员在不脱离本发明技术方案范围情况下,都可利用上述揭示的方法和技术内容对本发明技术方案做出许多可能的变动和修饰,或修改为等同变化的等效实施例。凡是未脱离本发明技术方案的内容,依据本发明的技术实质对以上实施例所做的任何简单修改、等同变化及修饰,均仍属于本发明技术方案保护的范围内。

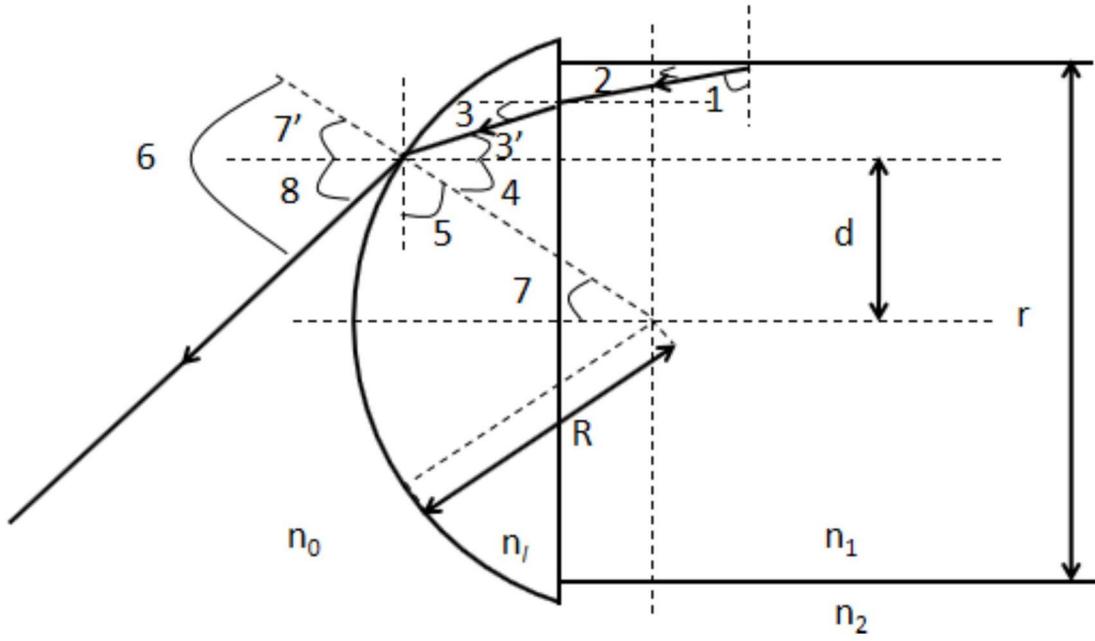


图1

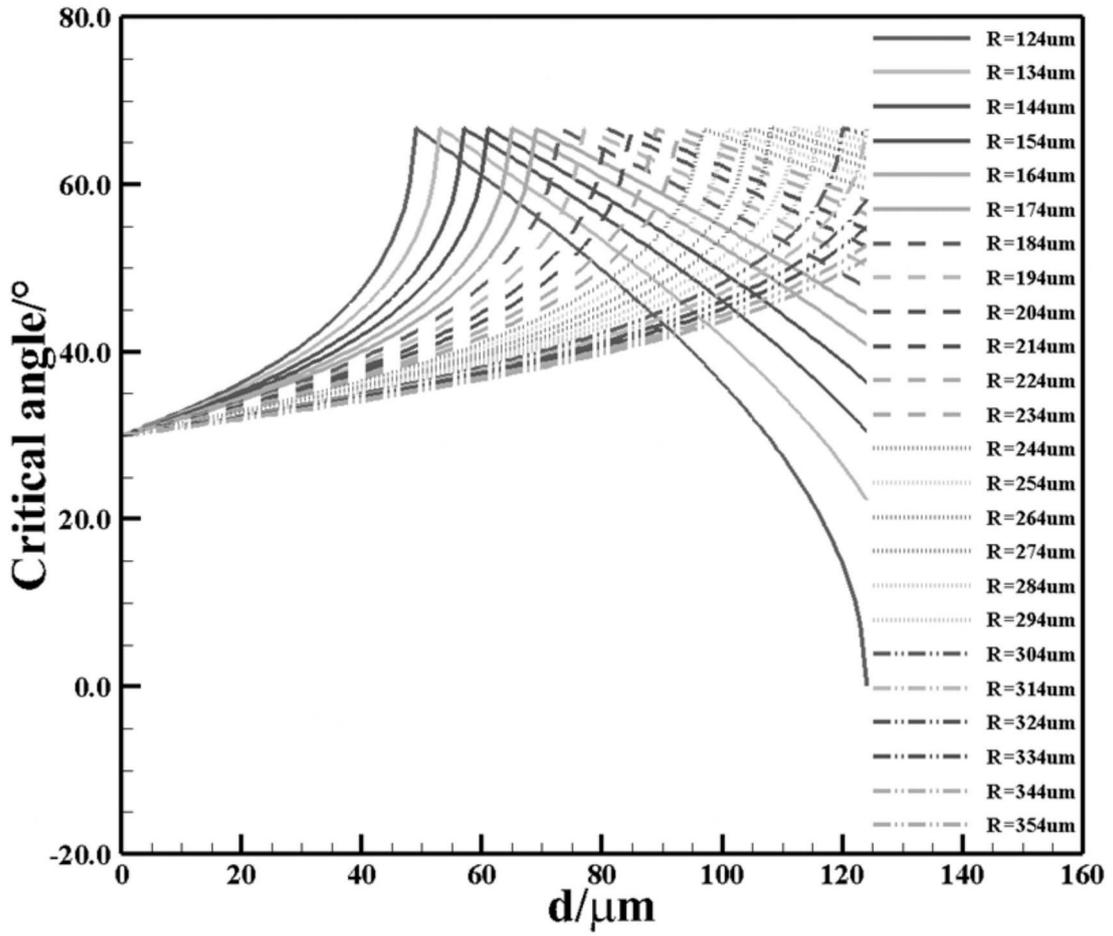


图2

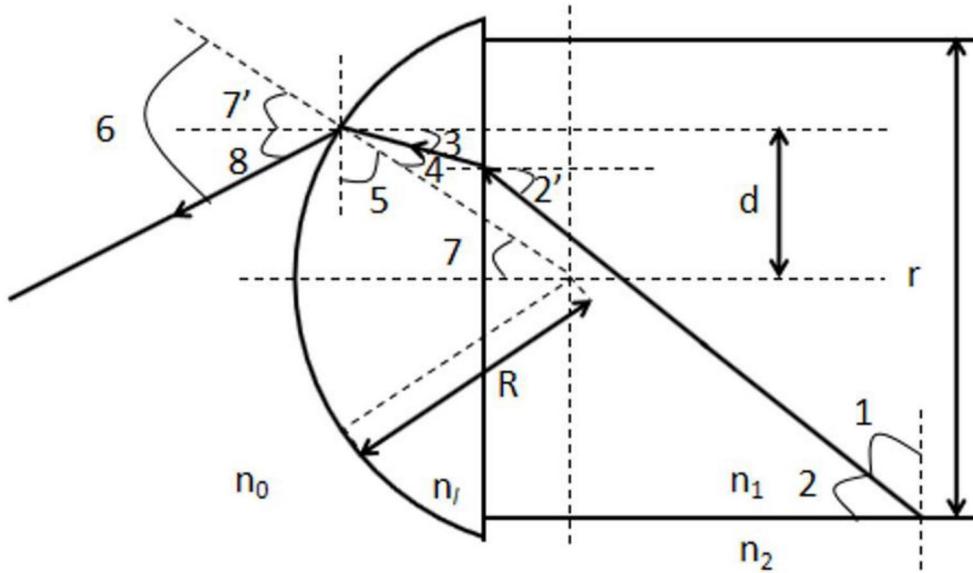


图3

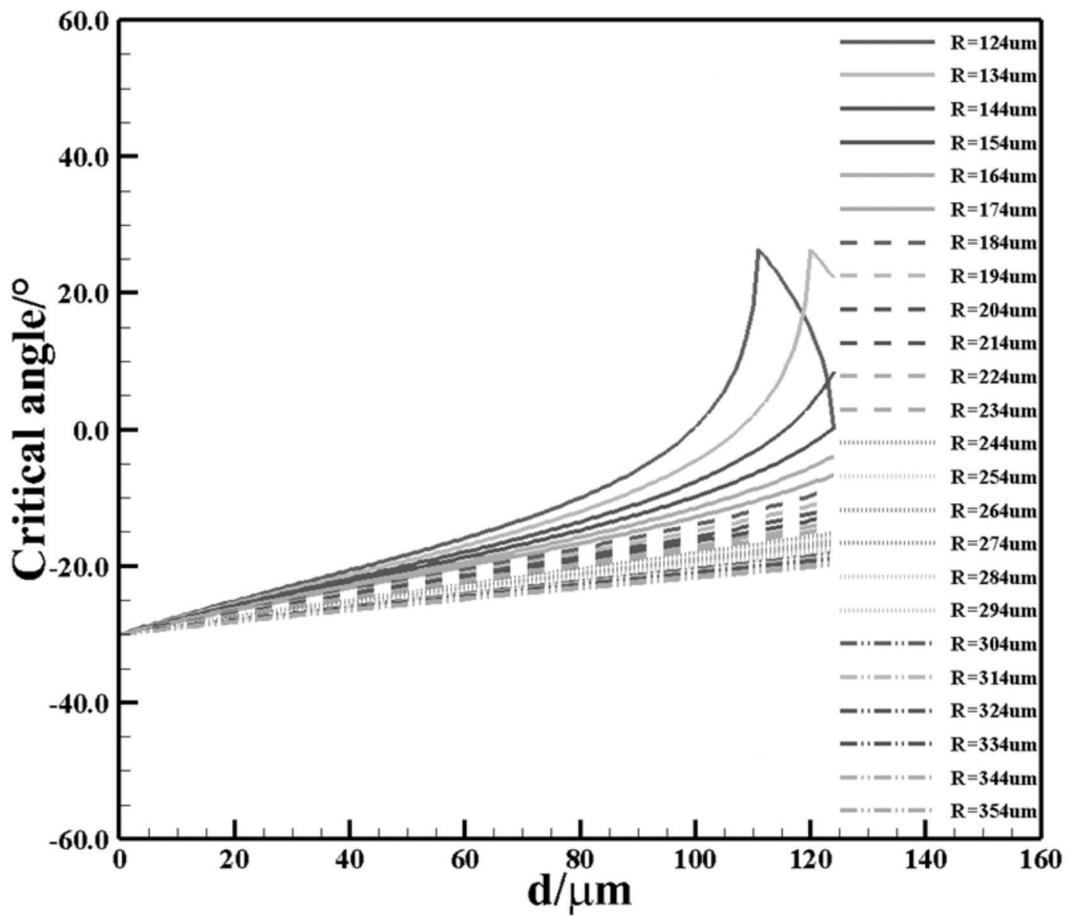


图4

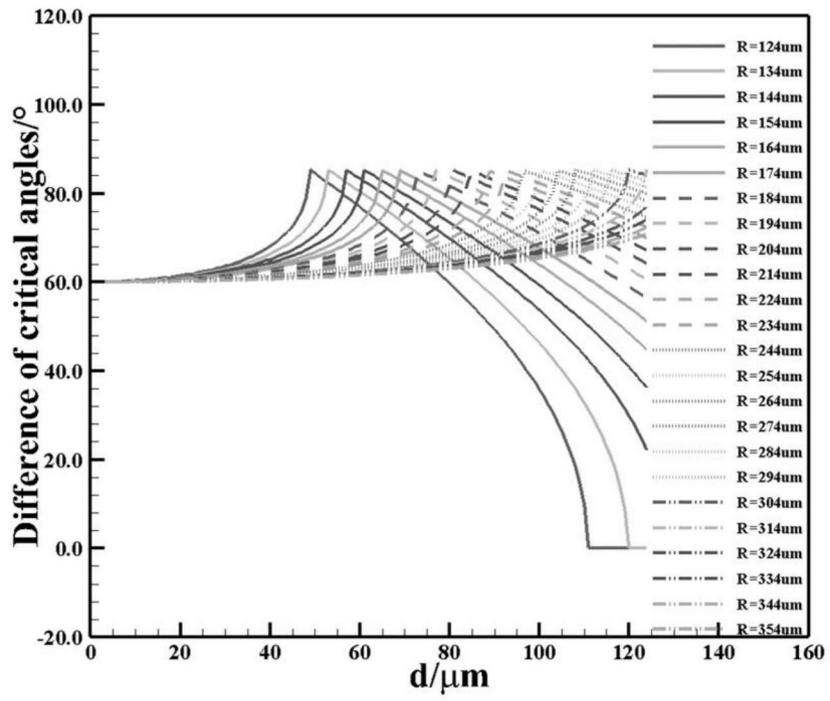


图5

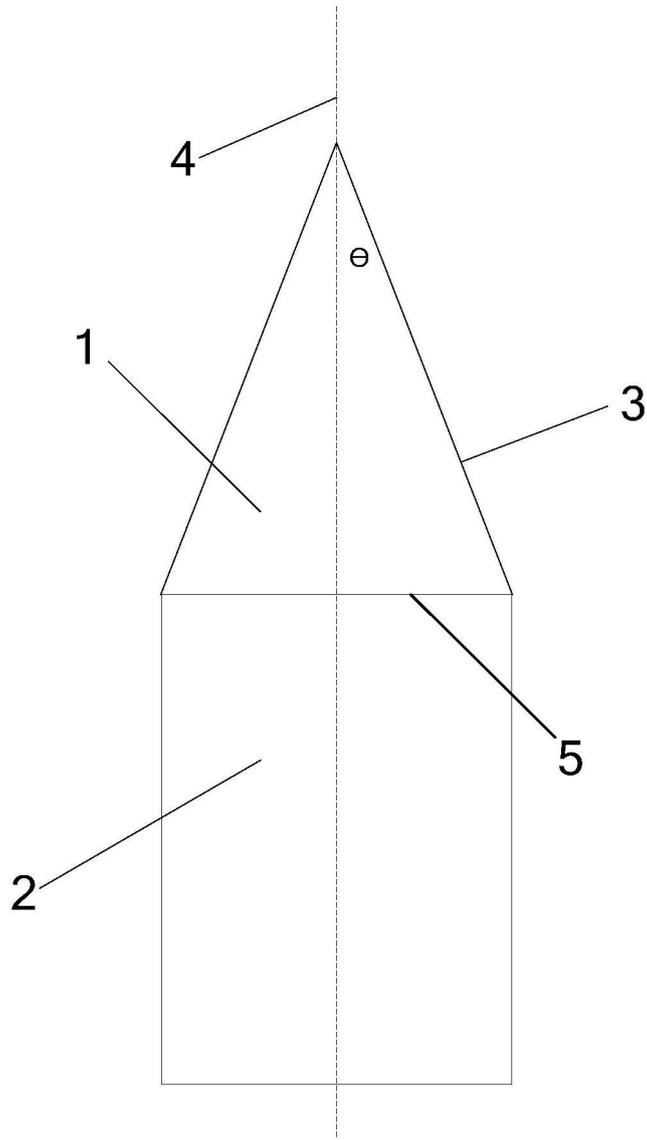


图6



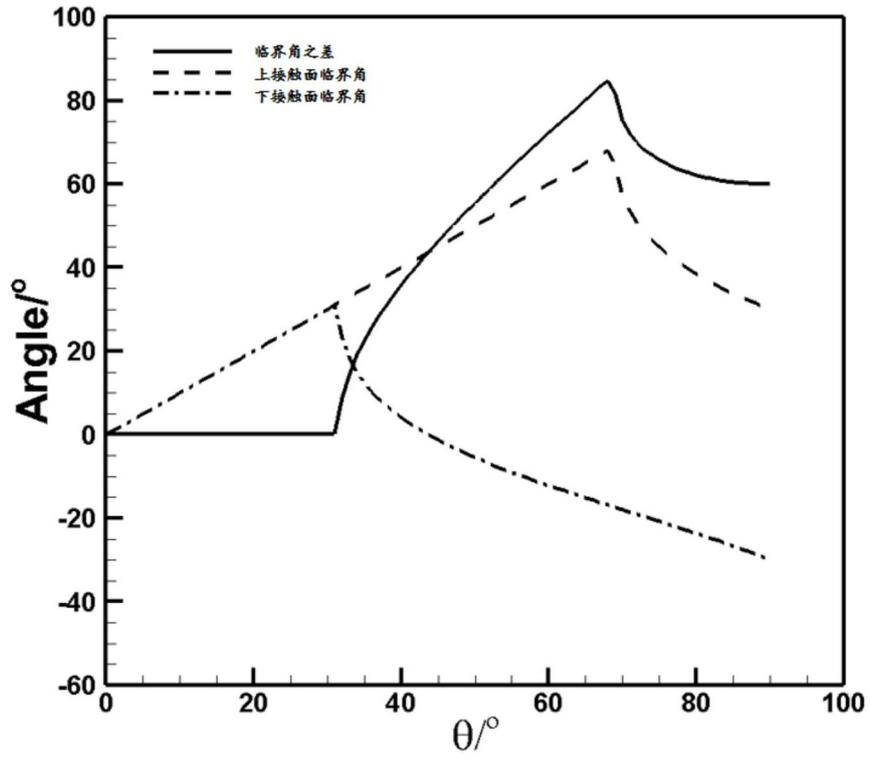


图9

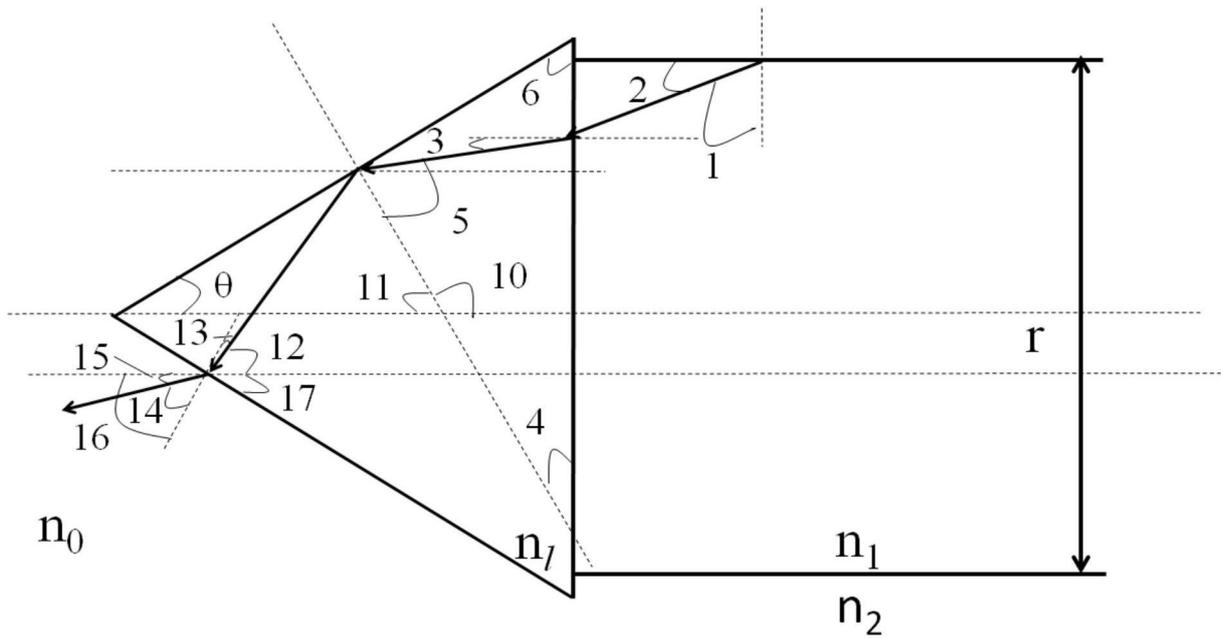


图10

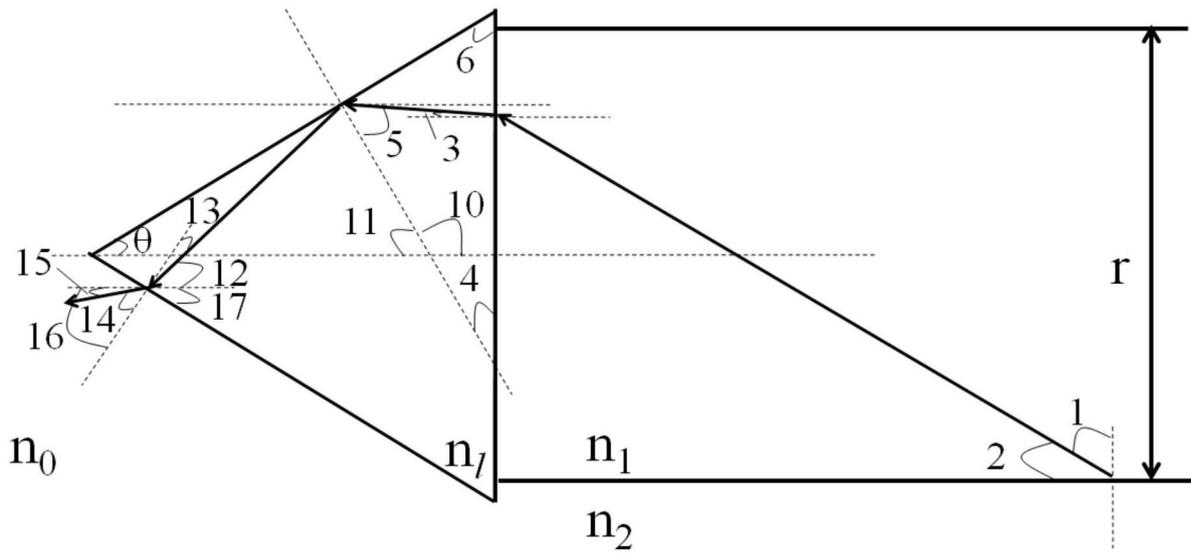


图11

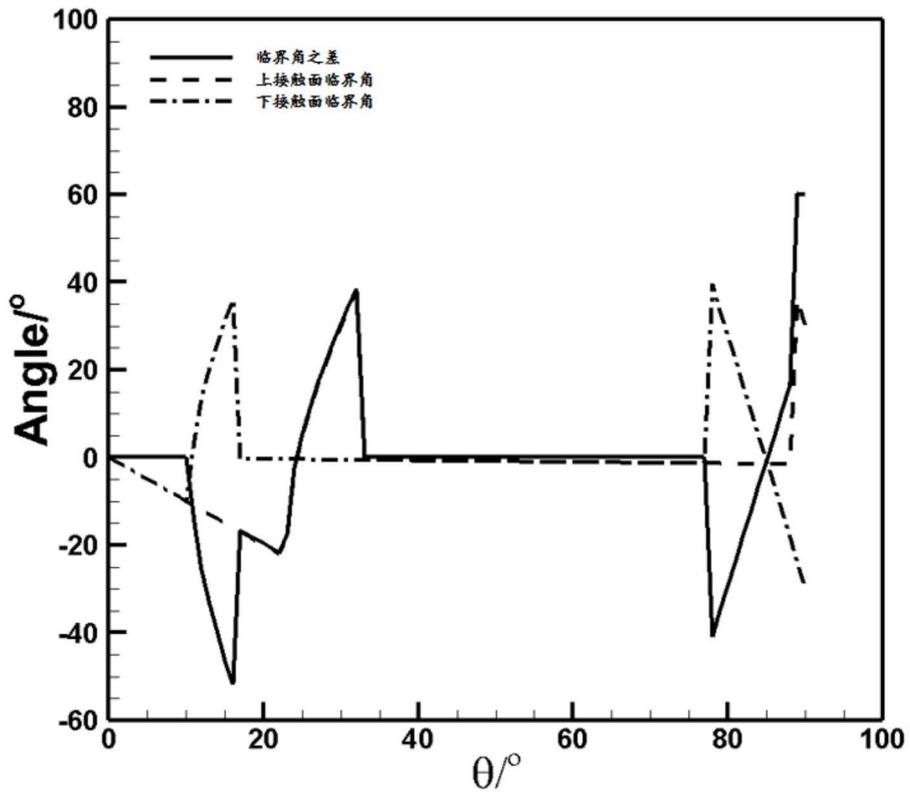


图12

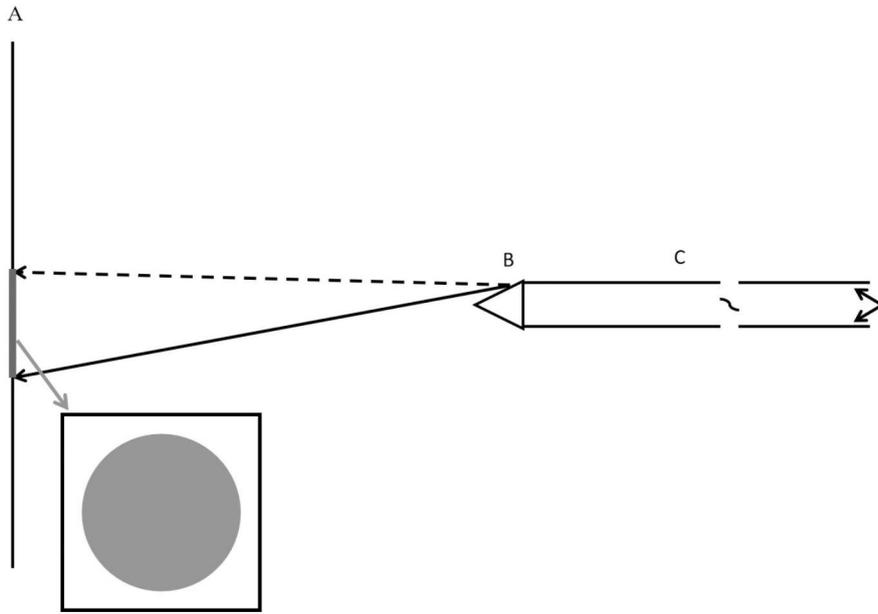


图13

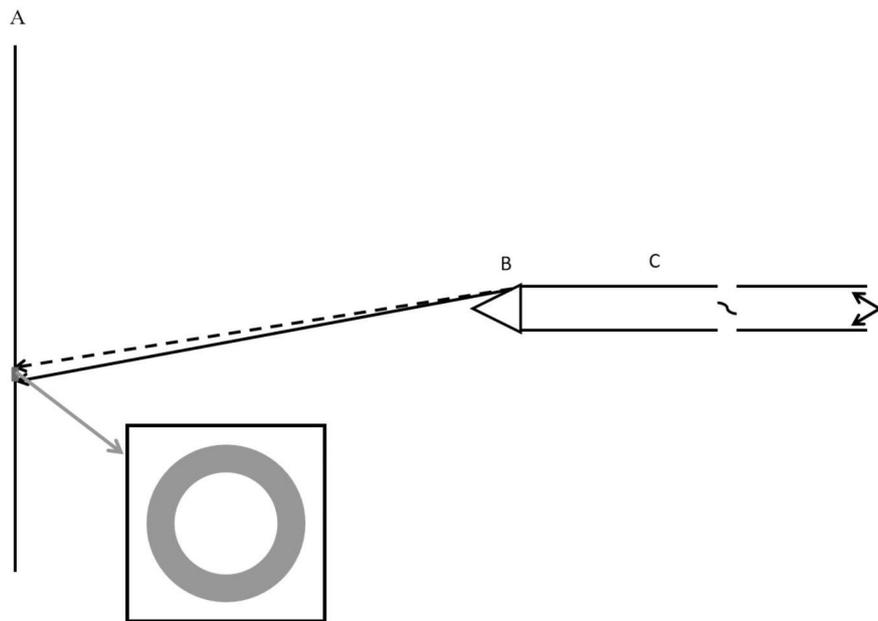


图14

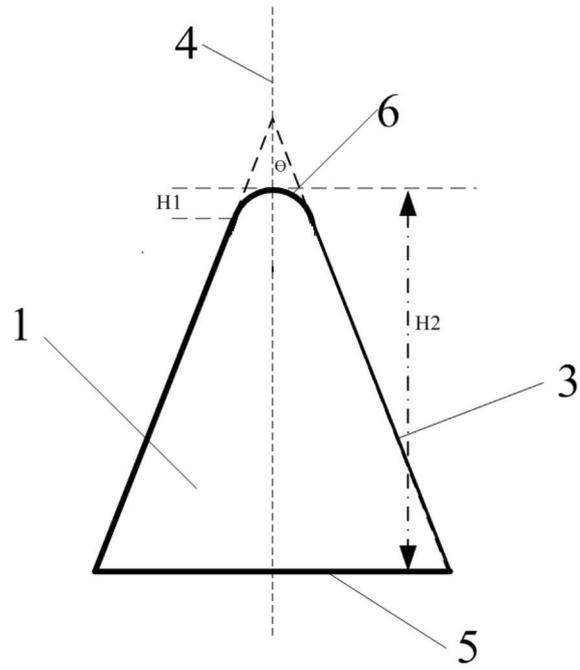


图15

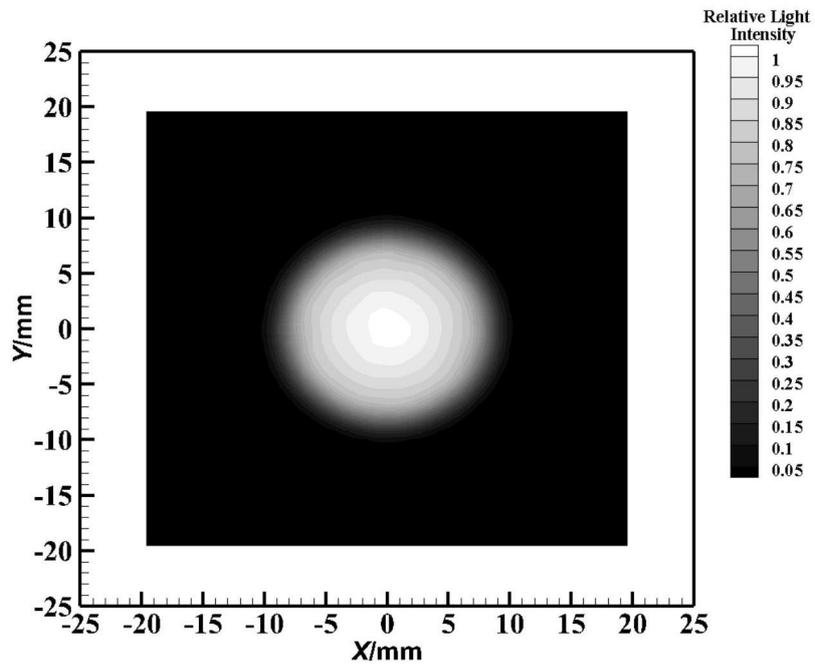


图16

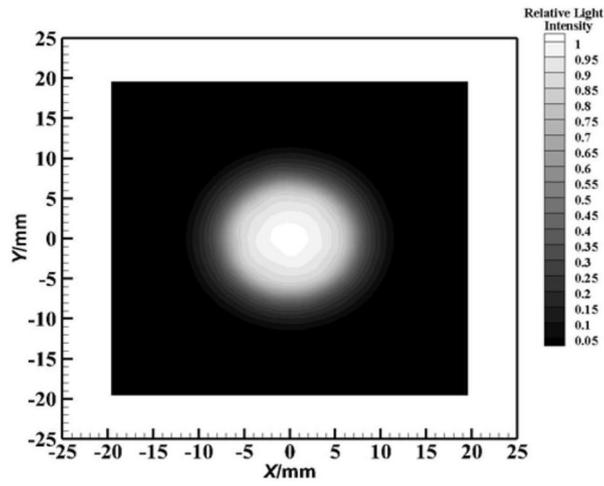


图17

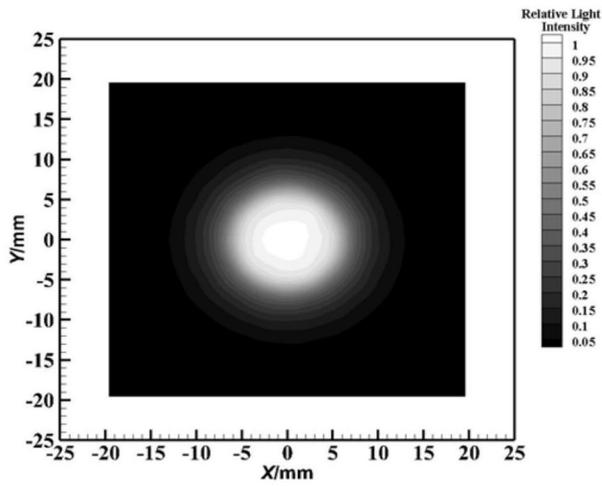


图18

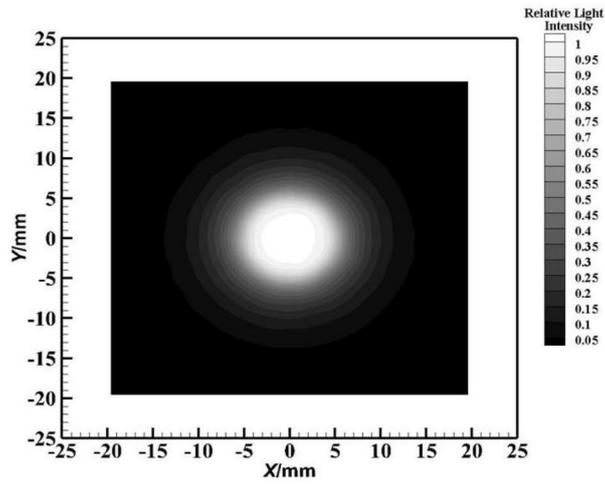


图19

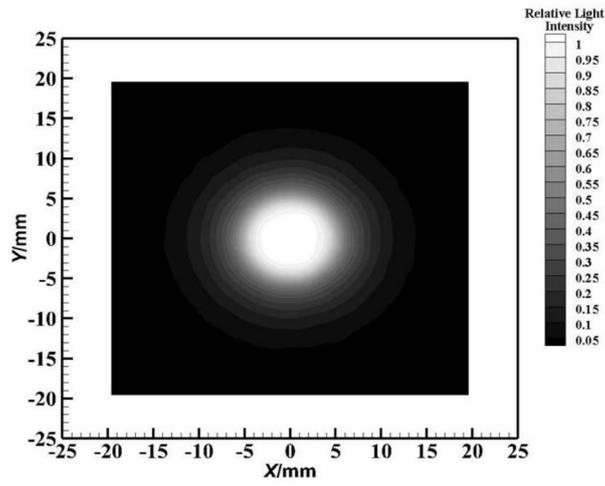


图20

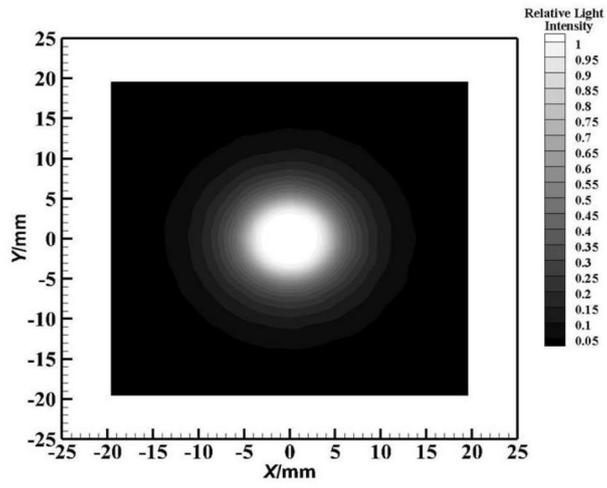


图21

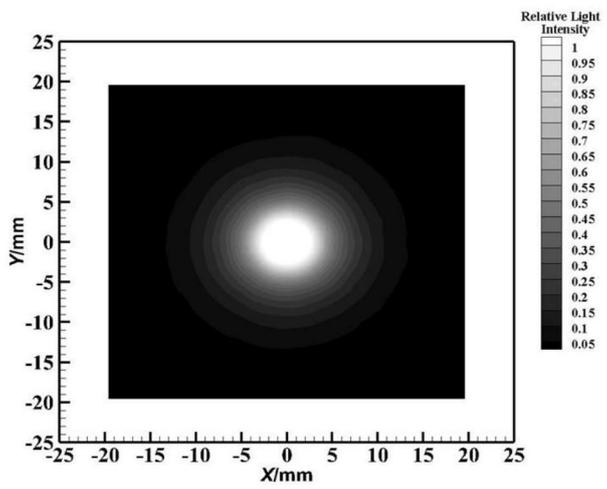


图22

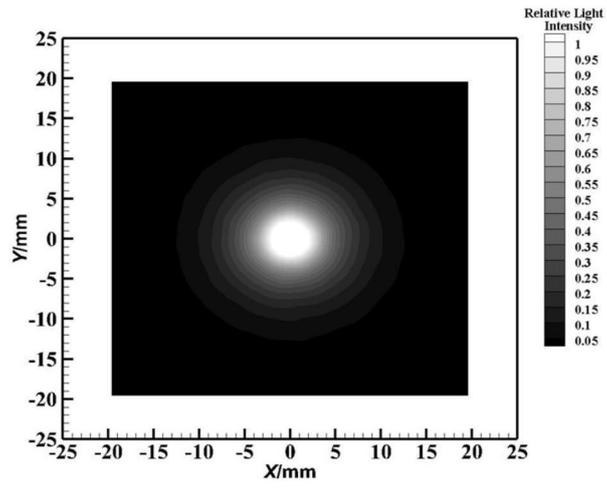


图23

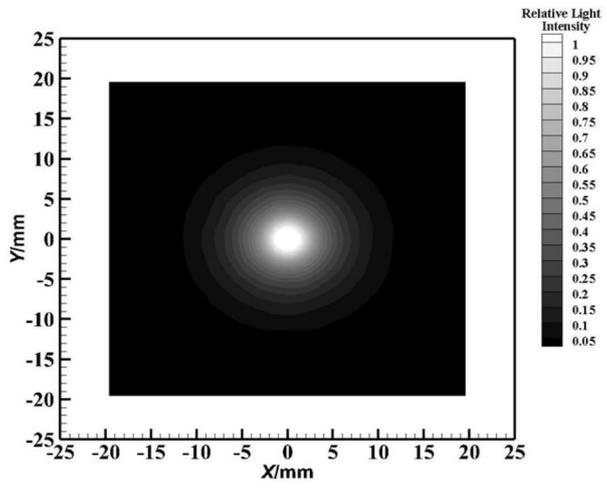


图24

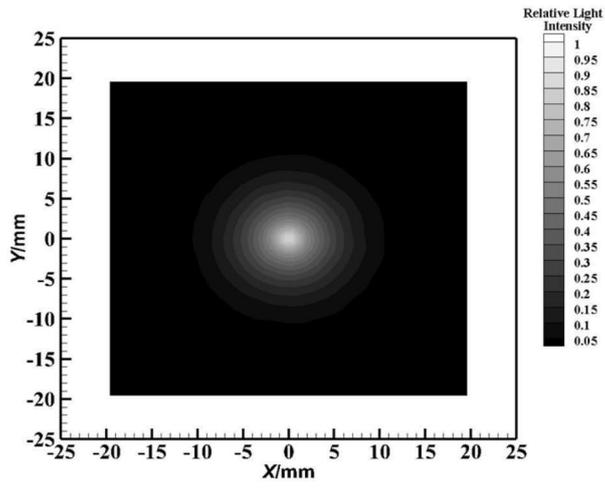


图25

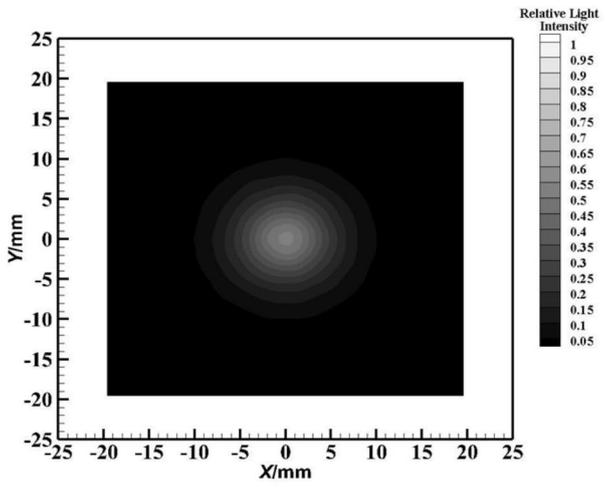


图26

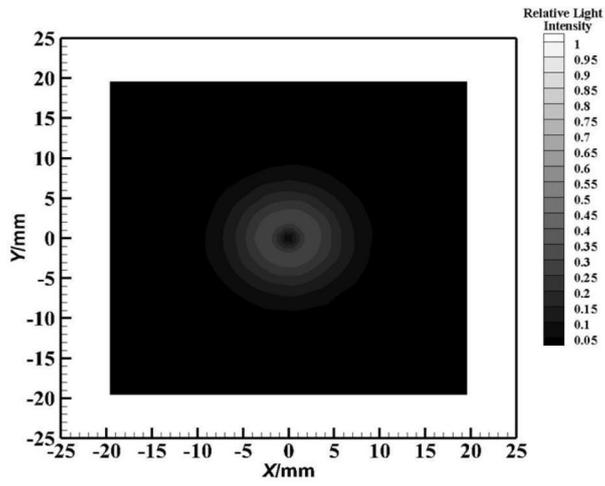


图27

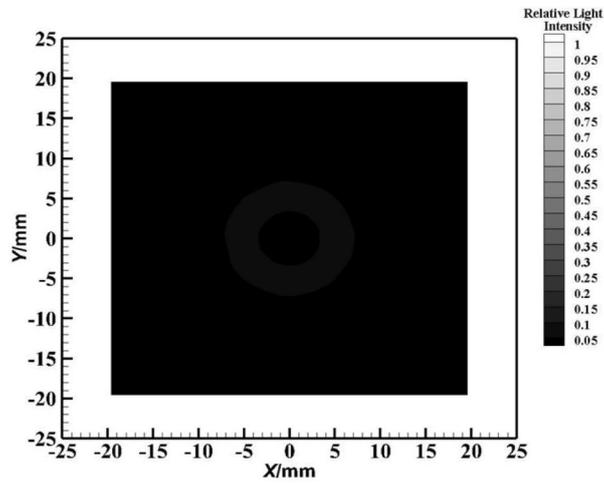


图28

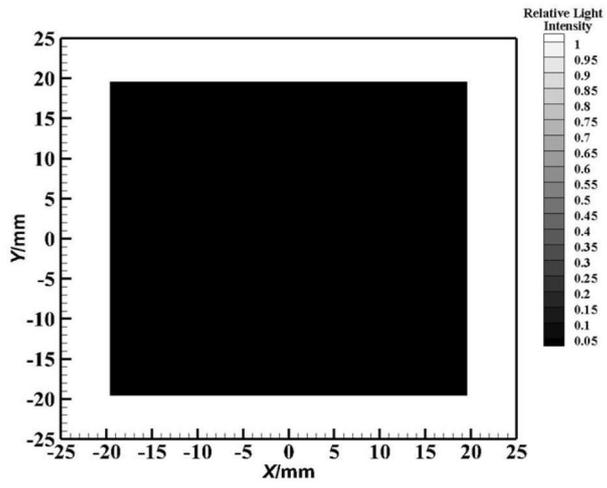


图29