



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114879358 B

(45) 授权公告日 2025. 03. 28

(21) 申请号 202210548278.7

(22) 申请日 2017.10.25

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 114879358 A

(43) 申请公布日 2022.08.09

(30) 优先权数据
62/413,288 2016.10.26 US

(62) 分案原申请数据
201780066366.0 2017.10.25

(73) 专利权人 奇跃公司
地址 美国佛罗里达州

(72) 发明人 R·D·泰克尔斯特 V·K·刘

(74) 专利代理机构 北京市中咨律师事务所
11247

专利代理师 贺月娇 于静

(51) Int.Cl.
G02B 27/00 (2006.01)
G02B 27/01 (2006.01)
G02B 5/18 (2006.01)
G02B 6/34 (2006.01)
G02B 27/42 (2006.01)
G02B 27/44 (2006.01)
G02B 6/00 (2006.01)

(56) 对比文件
CN 109891282 B, 2022.05.17

审查员 王路

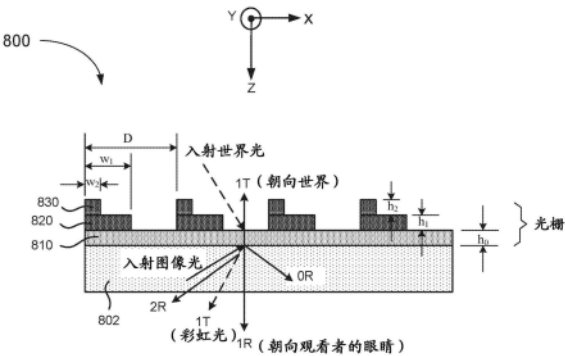
权利要求书4页 说明书11页 附图31页

(54) 发明名称

用于增强现实系统的耦出光栅

(57) 摘要

本发明涉及用于增强现实系统的耦出光栅。一种用于将图像投射到观看者眼睛的目镜,该目镜包括被配置为传播光的波导,以及光学耦合到波导的衍射光学元件。该衍射光学元件包括多个第一脊,该多个第一脊从波导的表面突出。多个第一脊中的每一者具有第一高度和第一宽度。该衍射光学元件进一步包括多个第二脊。多个第二脊中的每一者从相应的第一脊突出并且具有大于第一高度的第二高度和小于第一宽度的第二宽度。该衍射光学元件被配置为朝向眼睛衍射在波导中传播的光的第一部分,以及远离眼睛衍射在波导中传播的该光的第二部分。



1. 一种在观看者眼睛前方使用的目镜,所述目镜包括:
波导,其具有表面;以及
衍射光学元件,其光学耦合到所述波导,所述衍射光学元件包括:
多个第一脊,其从所述波导的所述表面突出并且被布置为具有周期的周期性阵列,所述多个第一脊中的每个相应第一脊在与所述波导的所述表面垂直的方向上具有第一高度以及在所述周期的方向上具有相应第一宽度;以及
多个第二脊,所述多个第二脊中的每个相应第二脊从相应的第一脊突出并且具有大于所述第一高度的第二高度和小于所述相应第一宽度的相应第二宽度;
其中,所述衍射光学元件被配置为朝向所述眼睛衍射在所述波导中传播的光束的第一部分作为一级反射,以及远离所述眼睛衍射在所述波导中传播的所述光束的第二部分作为一级透射,并且其中,在所述波导中传播的所述光束以从-40度至-60度的范围的入射角入射在所述衍射光学元件上。
2. 根据权利要求1所述的目镜,其中,所述衍射光学元件具有大于一级透射效率的一级反射效率,并且其中,所述相应第一宽度的范围为从所述周期的0.4倍至所述周期的0.6倍。
3. 根据权利要求2所述的目镜,其中,所述相应第二宽度小于所述周期的0.25倍。
4. 根据权利要求1所述的目镜,其中,所述衍射光学元件具有大于一级透射效率的一级反射效率,并且其中,所述第二高度与所述第一高度的比率的范围为从8:7至8:3。
5. 根据权利要求1所述的目镜,其中,所述衍射光学元件具有大于一级透射效率的一级反射效率,并且其中,所述第一高度的范围为从45nm至65nm,所述第二高度的范围为从70nm至80nm。
6. 根据权利要求1所述的目镜,其中,所述衍射光学元件具有大于一级透射效率的一级反射效率,并且其中,所述一级反射效率与所述一级透射效率的比率大于2。
7. 根据权利要求1所述的目镜,其中,所述衍射光学元件被配置为在与入射方向基本相反的方向上衍射在所述波导中传播的所述光束的第三部分作为二级反射,以及选择所述相应第一宽度和所述相应第二宽度,以使得所述衍射光学元件具有小于百分之一的二级反射效率。
8. 根据权利要求1所述的目镜,其中:
每个相应第一脊的所述相应第一宽度根据所述相应第一脊在所述周期的方向上的位置而改变;以及
每个相应第二脊的所述相应第二宽度根据对应第一脊在所述周期的方向上的位置而改变。
9. 根据权利要求8所述的目镜,其中,改变所述相应第一脊的每个相应第一宽度和所述相应第二脊的每个相应第二宽度,以使得所述衍射光学元件的一级反射效率根据跨所述周期的方向上的所述波导的所述表面的位置而改变。
10. 根据权利要求9所述的目镜,其中,所述衍射光学元件的所述一级反射效率从所述衍射光学元件的第一边缘到所述衍射光学元件的第二边缘增加。
11. 根据权利要求10所述的目镜,其中,所述衍射光学元件的所述一级反射效率从所述衍射光学元件的所述第一边缘到所述衍射光学元件的所述第二边缘基本上线性地增加。
12. 根据权利要求9所述的目镜,其中,所述衍射光学元件的所述一级反射效率从所述

衍射光学元件的中心部分朝向所述中心部分的任一侧上的所述衍射光学元件的边缘增加。

13. 根据权利要求1所述的目镜, 其中, 所述相应第二脊的所述相应第二宽度与对应的第一脊的所述相应第一宽度的比率根据所述对应的第一脊在所述周期的方向上的位置而改变。

14. 根据权利要求13所述的目镜, 其中, 所述相应第二脊的所述相应第二宽度与所述对应的第一脊的所述相应第一宽度的比率根据所述对应的第一脊在所述周期的方向上的位置而改变, 以使得所述衍射光学元件的一级反射效率根据跨所述周期的方向上的所述波导的所述表面的位置而改变。

15. 根据权利要求14所述的目镜, 其中, 所述衍射光学元件的所述一级反射效率从所述衍射光学元件的第一边缘到所述衍射光学元件的第二边缘增加。

16. 根据权利要求15所述的目镜, 其中, 所述衍射光学元件的所述一级反射效率从所述衍射光学元件的所述第一边缘到所述衍射光学元件的所述第二边缘基本上线性地增加。

17. 根据权利要求14所述的目镜, 其中, 所述衍射光学元件的所述一级反射效率从所述衍射光学元件的中心部分朝向所述中心部分的任一侧上的所述衍射光学元件的边缘增加。

18. 根据权利要求1所述的目镜, 其中, 所述衍射光学元件被进一步配置为朝向所述眼睛衍射入射在所述衍射光学元件上的第二光束的一部分作为一级透射。

19. 根据权利要求18所述的目镜, 其中, 所述第二光束包括在从世界朝向所述眼睛的方向上入射在所述衍射光学元件上的自然光。

20. 一种用于将图像投射到观看者眼睛的目镜, 所述目镜包括:

波导, 其具有第一表面; 以及

耦入光栅, 其光学耦合到所述波导的第一区域, 所述耦入光栅被配置成将在基本上垂直于所述第一表面的方向上入射到所述波导上的图像光衍射到所述波导中以在其中沿第一方向传播;

第一衍射光学元件DOE, 其光学耦合到所述波导的第二区域, 所述第一DOE被配置为使在所述波导中传播的所述图像光朝向与所述第一方向不同的第二方向衍射; 以及

第二DOE, 其光学耦合到所述波导的所述第二区域, 所述第二DOE包括:

多个第一脊, 其从所述波导的所述第一表面突出并且被布置为具有周期的周期性阵列, 所述多个第一脊中的每一者在与所述波导的所述第一表面垂直的方向上具有第一高度以及在所述周期的方向上具有第一宽度; 以及

多个第二脊, 所述多个第二脊中的每一者从相应的第一脊突出并且具有大于所述第一高度的第二高度和小于所述第一宽度的第二宽度;

其中, 所述第二DOE被配置为朝向所述眼睛衍射由所述第一DOE衍射的所述图像光的第一部分作为一级反射, 以及远离所述眼睛衍射由所述第一DOE衍射的所述图像光的第二部分作为一级透射。

21. 根据权利要求20所述的目镜, 其中, 所述第一DOE光学耦合到所述波导的所述第一表面。

22. 根据权利要求20所述的目镜, 其中, 所述波导具有与所述第一表面相反的第二表面, 并且所述第一DOE光学耦合到所述波导的所述第二表面。

23. 根据权利要求20所述的目镜, 其中, 所述第二高度与所述第一高度的比率的范围为

从8:7至8:3。

24. 根据权利要求20所述的目镜,其中,所述第一宽度和所述第二宽度被选择为使得所述第二DOE具有大于一级透射效率的一级反射效率。

25. 根据权利要求24所述的目镜,其中,所述一级反射效率与所述一级透射效率的比率大于2。

26. 根据权利要求20所述的目镜,其中,所述第一宽度的范围为从所述周期的0.4倍至所述周期的0.6倍,所述第二宽度小于所述周期的0.25倍。

27. 一种用于将图像投射到观看者眼睛的目镜,所述目镜包括:

波导,其具有第一表面;以及

耦合光栅,其光学耦合到所述波导的第一区域,所述耦合光栅被配置成将在基本上垂直于所述第一表面的方向上入射到所述波导上的图像光衍射到所述波导中以在其中沿第一方向传播;

第一衍射光学元件DOE,其光学耦合到所述波导的第二区域,所述第一DOE被配置为使在所述波导中传播的所述图像光朝向与所述第一方向不同的第二方向衍射;以及

第二DOE,其光学耦合到所述波导的所述第二区域,所述第二DOE包括:

多个第一脊,其从所述波导的所述第一表面突出并且被布置为具有周期的周期性阵列,每个相应第一脊在所述周期的方向上具有相应第一宽度,所述相应第一宽度根据所述相应第一脊在所述周期的方向上的位置而改变;以及

多个第二脊,每个相应第二脊从对应的第一脊突出并且具有小于所述对应的第一脊的对应的第一宽度的相应第二宽度,每个相应第二宽度根据所述对应的第一脊在所述周期的方向上的位置而改变;

其中,所述第二DOE被配置为朝向所述眼睛衍射由所述第一DOE衍射的所述图像光的第一部分作为一级反射,以及远离所述眼睛衍射由所述第一DOE衍射的所述图像光的第二部分作为一级透射。

28. 根据权利要求27所述的目镜,其中,每个第一脊具有第一高度,每个第二脊具有大于所述第一高度的第二高度。

29. 根据权利要求28所述的目镜,其中,所述第一高度的范围为从45nm至65nm,所述第二高度的范围为从70nm至80nm。

30. 根据权利要求27所述的目镜,其中,改变所述相应第一脊的每个相应第一宽度和所述相应第二脊的每个相应第二宽度,以使得所述第二DOE的一级反射效率根据跨所述周期的方向上的所述波导的所述第一表面的位置而改变。

31. 根据权利要求30所述的目镜,其中,所述第二DOE的所述一级反射效率从所述第二DOE的第一边缘到所述第二DOE的第二边缘增加。

32. 根据权利要求31所述的目镜,其中,所述第二DOE的所述一级反射效率从所述第二DOE的所述第一边缘到所述第二DOE的所述第二边缘基本上线性地增加。

33. 根据权利要求30所述的目镜,其中,所述波导具有与所述第一表面相反的第二表面,并且所述第一DOE光学耦合到所述波导的所述第一表面或所述第二表面。

34. 一种用于将图像投射到观看者眼睛的目镜,所述目镜包括:

波导,其具有第一表面;以及

耦入光栅,其光学耦合到所述波导的第一区域,所述耦入光栅被配置成将在基本上垂直于所述第一表面的方向上入射到所述波导上的图像光衍射到所述波导中以在其中沿第一方向传播;

第一衍射光学元件DOE,其光学耦合到所述波导的第二区域,所述第一DOE被配置为使在所述波导中传播的所述图像光朝向与所述第一方向不同的第二方向衍射;以及

第二DOE,其光学耦合到所述波导的所述第二区域,所述第二DOE包括:

多个第一脊,其从所述波导的所述第一表面突出并且被布置为具有周期的周期性阵列,每个相应第一脊在所述周期的方向上具有相应第一宽度;以及

多个第二脊,每个相应第二脊从对应的第一脊突出并且具有小于所述对应的第一脊的对应的第一宽度的相应第二宽度;

其中,所述相应第二脊的所述相应第二宽度与所述对应的第一脊的所述对应的第一宽度的比率根据所述对应的第一脊在所述周期的方向上的位置而改变,并且其中,所述第二DOE被配置为朝向所述眼睛衍射由所述第一DOE衍射的所述图像光的第一部分作为一级反射,以及远离所述眼睛衍射由所述第一DOE衍射的所述图像光的第二部分作为一级透射。

35. 根据权利要求34所述的目镜,其中,所述相应第二脊的所述相应第二宽度与所述对应的第一脊的所述对应的第一宽度的比率根据所述对应的第一脊在所述周期的方向上的位置而改变,以使得所述第二DOE的一级反射效率根据跨所述周期的方向上的所述波导的所述第一表面的位置而改变。

36. 根据权利要求35所述的目镜,其中,所述第二DOE的所述一级反射效率从所述第二DOE的第一边缘到所述第二DOE的第二边缘增加。

37. 根据权利要求36所述的目镜,其中,所述第二DOE的所述一级反射效率从所述第二DOE的所述第一边缘到所述第二DOE的所述第二边缘基本上线性地增加。

38. 根据权利要求35所述的目镜,其中,所述波导具有与所述第一表面相反的第二表面,并且所述第一DOE光学耦合到所述波导的所述第一表面或所述第二表面。

39. 根据权利要求34所述的目镜,其中,每个第一脊具有第一高度,每个第二脊具有大于所述第一高度的第二高度。

用于增强现实系统的耦出光栅

[0001] 本申请是申请日为2017年10月25日、PCT国际申请号为PCT/US2017/058351、中国国家阶段申请号为201780066366.0、发明名称为“用于增强现实系统的耦出光栅”的申请的分案申请。

[0002] 相关申请的交叉引用

[0003] 本申请主张2016年10月26日提交的序列号为62/413,288的美国临时专利申请的优先权益,该申请的全部公开内容通过引用并入。

背景技术

[0004] 现代计算和显示技术促进了用于所谓的“虚拟现实”或“增强现实”体验的系统的开发,在这些系统中,数字再现的图像或其一部分以看起来真实或感知为真实的方式呈现给用户。虚拟现实或“VR”场景通常涉及以对其它实际的真实世界视觉输入不透明的方式呈现数字或虚拟图像信息;增强现实或“AR”场景通常涉及呈现数字或虚拟图像信息作为观看者周围实际世界的可视化增强。

[0005] 尽管这些显示技术取得了一些进展,但是本领域仍需要与增强现实系统相关的改进的方法和系统。

发明内容

[0006] 根据本发明的一些实施例,一种用于将图像投射到观看者眼睛的目镜可以包括:波导,具有表面并且被配置为在该波导中传播光;以及衍射光学元件,光学耦合到该波导。该衍射光学元件可以包括多个第一脊。多个第一脊从波导的表面突出,并且布置为具有周期的周期性阵列。多个第一脊中的每一者在与波导的表面垂直的方向中具有第一高度,在周期的方向中具有第一宽度。该衍射光学元件可以进一步包括多个第二脊。多个第二脊中的每一者从相应的第一脊突出,并且具有大于第一高度的第二高度和小于第一宽度的第二宽度。该衍射光学元件可以被配置为朝向眼睛衍射在波导中传播的光的第一部分作为一级(first order)反射,以及远离所述眼睛衍射在波导中传播的该光的第二部分作为一级透射。

[0007] 根据本发明的一些其它实施例,一种用于将图像投射到观看者眼睛的目镜可以包括:波导,该波导具有表面,并且被配置为在该波导中传播光;以及衍射光学元件,光学耦合到该波导。该衍射光学元件可以包括多个第一脊。多个第一脊从波导的表面突出,并且布置为具有周期的周期性阵列。每个相应的第一脊在周期的方向中具有相应的第一宽度,该宽度根据相应的第一脊在周期的方向中的位置而改变。该衍射光学元件可以进一步包括多个第二脊。每个相应的第二脊从对应的第一脊突出,并且具有小于对应的第一脊的对应的第一宽度的相应的第二宽度。每个相应的第二宽度可以根据对应的第一脊在周期的方向中的位置而改变。该衍射光学元件可以被配置为朝向眼睛衍射在波导中传播的光的第一部分作为一级反射,以及远离眼睛衍射在波导中传播的该光的第二部分作为一级透射。

[0008] 根据本发明的一些进一步的实施例,一种用于将图像投射到观看者眼睛的目镜可

以包括:波导,具有表面,并且被配置为在该波导中传播光;以及衍射光学元件,光学耦合到该波导。该衍射光学元件可以包括多个第一脊。该多个第一脊从波导的表面突出,并且布置为具有周期的周期性阵列。每个相应的第一脊在周期的方向中具有相应的第一宽度。该衍射光学元件可以进一步包括多个第二脊。每个相应的第二脊从对应的第一脊突出,并且具有小于对应的第一脊的对应的第一宽度的相应的第二宽度。该相应的第二脊的相应的第二宽度与对应的第一脊的对应的第一宽度的比率可以根据对应的第一脊在周期的方向中的位置而改变。该衍射光学元件可以被配置为朝向眼睛衍射在波导中传播的光的第一部分作为一级反射,以及远离眼睛衍射在波导中传播的该光的第二部分作为一级透射。

附图说明

[0009] 图1示意性地示出了根据本发明实施例的可用于向观看者呈现数字或虚拟图像的观察光学组件 (VOA) 中的光路。

[0010] 图2示出了根据本发明实施例的耦入目镜的波导中的单个光束的路径的示例。

[0011] 图3示出了根据本发明实施例的用于波导的蝴蝶结拓扑 (bowtie topology) 的示例。

[0012] 图4A示出了根据本发明实施例的具有采取单侧配置的组合OPE/EPE区域的波导的示例。

[0013] 图4B示出了根据本发明的实施例的波导内的光路的示例。

[0014] 图5示意性地示出了根据本发明实施例的可以在目镜中用于将图像光从波导耦出到观看者眼睛的两级相位光栅的截面图。

[0015] 图6示出了根据本发明的一些实施例的根据入射角 θ 的用于一级反射 (1R) 和一级透射 (1T) 以及二级 (second order) 反射 (2R) 的示例性两级光栅的衍射效率曲线。

[0016] 图7A至图7F示出了根据一些实施例的两级光栅的各级衍射效率的模拟强度图。

[0017] 图8示出了根据本发明实施例的示例性三级光栅的图像。

[0018] 图9示出了根据本发明的实施例的三级光栅的示意性截面图。

[0019] 图10示出了根据本发明的实施例的根据入射角 θ 的用于一级反射 (1R) 和一级透射 (1T) 以及二级反射 (2R) 的示例性三级光栅的模拟衍射效率曲线。

[0020] 图11A和图11B示出了根据本发明的实施例的对于s偏振光 (90度偏振,图11A) 的根据光栅深度的和对于p偏振光 (0度偏振,图11B) 的根据光栅深度的一些示例性三级光栅的模拟衍射效率曲线。

[0021] 图12A至图12F示出了根据一些实施例的三级光栅的各级衍射效率的模拟强度图。

[0022] 图13A至图13F示出了根据一些其它实施例的三级光栅的各级衍射效率的模拟强度图。

[0023] 图14A至图14F示出了根据一些另外的实施例的三级光栅的各级衍射效率的模拟强度图。

[0024] 图15示出了根据本发明的一些实施例的根据入射角的用于一级反射 (1R)、一级透射 (1T) 以及二级反射 (2R) 中的示例性三级光栅的模拟衍射效率。

[0025] 图16示出了根据本发明的实施例的三级光栅的一个周期的示意性截面图。

[0026] 图17示出了根据本发明实施例的光栅参数 h_1 、 h_2 、 w_1 和 w_2 与优化参数 α 的相关性。

[0027] 图18示出了根据本发明实施例的朝向用户的功率(P_{user})、朝向世界的功率(P_{world})和二级功率(P_2)与优化参数 α 的相关性。

[0028] 图19示出了根据本发明实施例的在波导上形成的光栅的示意性截面图。

[0029] 图20A和图20B示出了根据本发明的实施例的根据光栅效率的线性模型中的参数 a 和 b 的平均耦合功率的模拟等高线图(图20A)和相对于平均耦合功率的RMS偏差的模拟等高线图(图20B)。

[0030] 图21示出了根据本发明的实施例的对于具有参数 $a=0.5$ 且 $b=1$ 的线性模型,根据相对于光栅顶部的归一化距离 x 的归一化耦合功率 $g(x)=f(x)y(x)$ (朝向用户和世界)的模拟曲线图。

[0031] 图22A和图22B示出了根据本发明的一些实施例的位于光栅顶部(图22A)和光栅底部(图22B)的三级光栅的一个周期的示意性截面图。

具体实施方式

[0032] 本公开一般地涉及可用于虚拟现实和增强现实可视化系统的衍射光学元件。在VR或AR系统中,衍射光学元件(也可以被称为相位光栅或光栅)在目镜中用于将图像光从波导耦合到观看者的眼睛。为了清楚起见,本文使用术语“光栅”描述衍射光学元件,但是本发明不限于光栅结构,而是可以包括其它形式的衍射光学元件。

[0033] 图1示意性地示出了根据本发明实施例的可用于向观看者呈现数字或虚拟图像的观察光学组件(VOA)中的光路。VOA包括投影仪101和可以穿戴在观看者眼睛周围的目镜100。目镜100可以包括一个或多个目镜层。在一个实施例中,目镜100包括三个目镜层,一个目镜层用于三基色(红色、绿色和蓝色)中的每种颜色。在另一实施例中,目镜100可以包括六个目镜层,即,用于三基色中的每种颜色的一组目镜层被配置为在一个深度平面处形成虚拟图像,且用于三基色中的每种颜色的另一组目镜层被配置为在另一深度平面处形成虚拟图像。在其它实施例中,对于三个或更多个不同的深度平面,目镜100可以包括用于三基色中的每种颜色的三个或更多个目镜层。每个目镜层包括平面波导,并且可以包括耦合入光栅107、正交光瞳扩展器(OPE)区域108和出瞳扩展器(EPE)区域109。

[0034] 仍然参考图1,投影仪101将图像光投射到目镜层100中的耦合入光栅107上。耦合入光栅107将来自投影仪101的图像光耦合入在朝向OPE区域108的方向中传播的平面波导中。波导通过全内反射(TIR)在水平方向中传播图像光。目镜层100的OPE区域108还包括衍射元件,该衍射元件耦合在波导中传播的图像光的一部分并将该部分图像光重定向到EPE区域109。EPE区域109包括衍射元件,该衍射元件在基本垂直于目镜层100的平面的方向中耦合波导中传播的图像光的一部分并将该部分图像光引导到观看者的眼睛102。以这种方式,观看者的眼睛102可以观看由投影仪101投射的图像。

[0035] 目镜层100的EPE区域109中的衍射元件通常包括在目镜中的平面波导的表面上形成的光栅,例如周期性结构。当光束传播通过周期性结构时,它将被衍射成多个级。重复结构的周期决定了级之间的角度间隔。较小的周期会生成较大的角度间隔,而较大的周期会生成紧密间隔的输出光束。被引导到每个衍射级的相对功率由单个光栅周期内的表面轮廓的形状和特性决定。

[0036] 图2示出了根据本发明实施例的耦合入目镜200的波导212中的单个小光束的路径的

示例。波导212可以包括ICG 220、OPE 230和EPE 240,上述每一者设置在基板202上或基板202内,基板202包括能够通过全内反射引导光波的材料(通常是具有高介电常数的介电材料)。在一些实施例中,目镜200可以包括三个波导212、214和216,每个波导与特定波长的光对应。附加的或更少的波导是可能的。与波导212类似,波导214和216中的每一者可以包括ICG、OPE和EPE。在一些实施例中,注入光222可以在与图2的图示正交的z方向中在ICG 220处进入目镜200。注入光222可以进入ICG 220,其中ICG 220内的光栅可以衍射耦合入光222内的某些波长的光,其它波长的耦合入光222继续通过到目镜210的后续波导层。在一些实施例中,ICG 220是专用于特定波长的多个单独光栅。

[0037] 耦合入光222可以在某些方向中通过ICG 220在波导内衍射,跨越诸如一般在+x方向中的由朝向OPE 230的扇形图案224所示的范围,但是也在跨越一般在-x方向中远离OPE 230的扇形图案226的范围。跨越其它扇形图案的其它光路当然是可能的并且取决于投影光学器件,以及由ICG 220配置的特定光栅和衍射图案。也就是说,光不作为发散光束衍射到波导中,但是在一些实施例中,图像光的一部分的渐进分布式采样可以在整个目镜上创建逐渐扩展的小光束分布图案。在所示的扇形图案224内衍射的耦合入光222可以通常沿着光路228进入OPE 230,并且在+x方向中横穿,当其照射构成OPE 230的衍射光栅时,伴随分布式采样通过OPE 230,这些采样的一部分定期地被向下引导到EPE 240并且在-z方向中耦合到用户的眼睛之前在-y方向中横穿。

[0038] 如图2所示,由于诸如衍射到扇形图案226的光之类的方向性损耗或由于捕获扇形图案224内所有光的OPE 230未能适当地定位或调整大小的捕获损耗,与波导212对应的波长中的许多光可能丢失。有关目镜的更多细节在美国专利申请NO.15/683,624中进行了描述,该申请的内容处于所有目的通过引用并入。

[0039] 图3示出了根据本发明另一实施例的用于波导300的蝴蝶结拓扑的示例。波导300可以通过利用通常从光瞳扩展器衍射出去的光来减轻其它波导设计中的损耗。通过将ICG 320定向以使得所得到的扇形图案与y轴和x轴对齐(如图3所示),波导300可以包括捕获更多的衍射耦合入光的第一光瞳扩展器330A和第二光瞳扩展器330B。在一些实施例中,第一光瞳扩展器330A和第二光瞳扩展器330B可以是OPE。在一些实施例中,波导300还可以包括第三光瞳扩展器340,例如EPE。

[0040] 波导300可以减小单个OPE(诸如上述那些)的尺寸,因为波导300可以包括两个较小的光瞳扩展器(例如,第一光瞳扩展器330A和第二光瞳扩展器330B)。在一些实施例中,第一光瞳扩展器330A和第二光瞳扩展器330B可以与移除了一部分(例如,移除区域332A和332B)的如上所述的OPE类似。第一光瞳扩展器330A和第二光瞳扩展器330B可以使接收的光倍增并将光引导到第三光瞳扩展器340(与上述类似)。在一些实施例中,第一光瞳扩展器330A和第二光瞳扩展器330B可以在x-y平面中以一定角度引导光,而不是如上所述的在大致x方向中引导光。该角度可以使第一光瞳扩展器330A和330B按照光路328所示将光发送到第三光瞳扩展器340。在一些实施例中,与本文描述的其它波导相比,波导300的效率可以大约翻倍。

[0041] 在一些实施例中,波导300还可以包括一个或多个扩散器(例如,扩散器332A和扩散器332B)。一个或多个扩散器可以捕获从ICG 320直接透射到第三光瞳扩展器340的中心的光。一个或多个扩散器可以包括与本文描述的一个或多个OPE类似的光栅。在一些实施例

中,一个或多个扩散器的光栅可以类似地使光阶梯式地步进到第三光瞳扩展器340。

[0042] 图4A示出了根据本发明另一实施例的具有采取单侧配置的组合OPE/EPE区域450的波导400的示例。组合OPE/EPE区域450包括与在x方向和y方向中空间重叠的OPE和EPE两者对应的光栅。在一些实施例中,与OPE和EPE对应的光栅位于基板402的同一侧,以使得OPE光栅叠加在EPE光栅上或者EPE光栅叠加在OPE光栅上(或两种情况都存在)。在其它实施例中,OPE光栅位于基板402上与EPE光栅相反的一侧,以使得光栅在x方向和y方向中空间重叠,但在z方向中彼此分离(即,位于不同平面)。因此,组合OPE/EPE区域450可以以单侧配置或双侧配置实现。

[0043] 图4B示出了根据本发明实施例的波导400内的光路428的示例。光路428包括入射光(表示为428A),该入射光在ICG 420处耦入基板402中。耦入光(表示为428B)通过全内反射朝向光栅451、452和453传播。当这些光线遇到第一OPE光栅451时,光在+y方向中衍射(表示为428C),随后通过EPE光栅453在-z方向中朝向用户的眼睛衍射出波导400(表示为428D)。类似地,耦入光(表示为428B)可以替代地遇到第二OPE光栅452并且在-y方向中衍射(表示为428E)。在-y方向中衍射的光可以通过EPE光栅453朝向用户的眼睛衍射出波导400。无论光在+y方向中衍射(通过第一OPE光栅451)还是在-y方向中衍射(通过第二OPE光栅452)是概率性的,由光栅结构控制。通常,当耦入光(表示为428B)在+y方向或-y方向中衍射的几率均为50%时,组合OPE/EPE区域450的性能得到改善。在一些情况下,在第一OPE光栅451和第二OPE光栅452彼此垂直时实现此目的。

[0044] 虽然波导400被示出为仅具有单个ICG 420,但是在一些实施例中,波导400可以优选地在组合OPE/EPE区域450的相反一侧(与ICG 420相对的一侧)包括第二ICG。第二ICG可以在形式和功能上与ICG 420相同,并且可以是ICG 420的镜像版本。例如,当ICG 420被配置为将与投影图像有关的耦入光衍射到基板402中时,第二ICG 420可以被配置为衍射与投影图像的镜像版本相关的耦入光(例如,在x方向中翻转)。与ICG 420的关联光路428相反,与第二ICG相关联的光路可以包括在第二ICG处耦入基板402中的入射光。耦入光通过全内反射朝向光栅451、452和453传播。当这些光线遇到第一OPE光栅451时,光在-y方向中衍射,随后通过EPE光栅453朝向用户的眼睛在-z方向中衍射出波导400。类似地,耦入光可以替代地遇到第二OPE光栅452并且在+y方向中衍射。在+y方向中衍射的光可以通过EPE光栅453朝向用户的眼睛衍射出波导400b。

[0045] 有关其它波导拓扑的更多细节在美国专利申请NO.15/683,624中进行了描述,该申请的内容处于所有目的通过引用并入。

[0046] 图5示意性地示出了根据本发明实施例的可以在目镜中用于将图像光从波导502(位于XY平面中)耦出到观看者眼睛的两级相位光栅500的截面图。两级光栅500可以包括沿着Y轴(即,在垂直于纸张的方向中)延伸并且从波导502(沿着负Z方向)突出的脊阵列510。脊阵列510可以沿着X方向周期性地布置。每个脊210可以在Z方向中具有高度h,并且在X方向中具有宽度w。对于在光栅500处从光波导502入射的图像光,两级光栅500可以生成朝向观看者眼睛的一级反射(1R)、朝向世界的一级透射(1T)和在基本与入射方向相反的方向中的二级反射(2R),如图5所示。不同衍射级之间的相对衍射效率可取决于占空比,即特征宽度w与周期D之间的比率。它们还可取决于光栅的深度,即脊的高度h。

[0047] 当光栅500用于在VR或AR系统中将图像光从波导502耦出到观看者眼睛时,光栅的

若干性能特征可能值得关注。第一,可能需要更多的图像光被导向观看者而不是导向世界,因为导向世界的图像光基本上被浪费并且还可能允许其他人观看观看者正在观看的内容。第二,目镜内的光反弹(bounce)可以经由二级衍射向回衍射,然后朝向观看者衍射出来。如果波导并不完全平坦或者如果存在内置于光栅中的透镜功能,则该光可能导致角度误差,这会降低调制传递函数(MTF)和对比度。因此,可能需要最小化二级反射。此外,来自世界(例如,顶灯)的光可能朝向观看者衍射,从而创建可能遮挡场景并分散观众注意力的彩虹效应。

[0048] 图6示出了根据入射角 θ 的用于一级反射(1R)和一级透射(1T)以及二级反射(2R)的示例性两级光栅的模拟衍射效率曲线。如图所示,对于所示的入射角范围,一级透射(1T)的衍射效率与一级反射(1R)的衍射效率相当。因此,可以将大约等量的图像光到向世界和观看者。

[0049] 图7A至图7F示出了根据一些实施例的两级光栅的各级衍射效率的模拟强度图。具体而言,图7A和图7D分别示出了对于s偏振和p偏振,根据为特征高度 h (水平轴)和特征宽度 w (垂直轴)的用户侧衍射效率(1R);图7B和图7E分别示出了对于s偏振和p偏振,根据 h (水平轴)和 w (垂直轴)的世界侧衍射效率(1T);以及图7C和图7F分别示出了对于s偏振和p偏振,根据 h (水平轴)和 w (垂直轴)的二级反射(2R)。虚线表示与特征高度 $h=60\text{nm}$ 的特征宽度对应的 w 的范围,这可以在具有相当高的一级反射(1R)的同时引起相对低的二级反射(2R)。而且,与一级反射(1R)相比,一级透射(1T)相对较低。

[0050] 根据本发明的一些实施例,可以通过使用多级光栅结构来实现改进耦出光栅性能特性。图8示出了根据本发明的实施例的示例性三级光栅800的图像。图9示出了光栅800的示意性截面图。光栅800可以包括在波导802上形成的基层810。基层810具有厚度(RLT) h_0 。在一些实施例中,光栅800可以不具有基层810。光栅800包括沿着Y轴(即,在垂直于纸张的方向中)延伸并以第一高度 h_1 从基层810突出(在负Z方向中)的多个第一脊820。多个第一脊820被布置为具有在X方向中限定的周期D的周期性阵列。每个第一脊820在X方向中具有第一宽度 w_1 。光栅800还包括多个第二脊830。每个第二脊830从相应的第一脊820以第二高度 h_2 突出(在负Z方向中),并且在X方向中具有第二宽度 w_2 。

[0051] 参考图9,图像光从波导802入射到光栅800上。光栅800可以以基本上等于入射角的角度生成零级反射光束(0R)。光栅800还可以在基本垂直于波导802朝向观看者眼睛的方向中生成一级反射光束(1R),并且在基本垂直于波导朝向世界的方向中生成一级透射光束(1T)。光栅800还可以在入射光束方向基本相反的方向中生成二级反射光束(2R)。另外,诸如来自吸顶灯的光之类的世界光从世界侧入射到光栅800上,这可导致通过光栅800一级透射光束(1T)朝向观看者的眼睛,从而导致彩虹效应。

[0052] 与两级光栅相比,图8和图9所示的三级光栅可以具有若干优势。图10示出了p偏振光(0度偏振)的根据-40度至-60度之间的范围(通常用于图像光的范围)内的入射角 θ 的示例性三级光栅的模拟衍射效率曲线。三级光栅具有以下光栅参数: $h_0=30\text{nm}$, $h_1=54\text{nm}$, $w_1=0.5D$, $h_2=0.0875\mu\text{m}$, $w_2=0.25D$ 。如图所示,这里对于所示的整个入射角范围,一级反射(1R)明显大于一级透射(1T)。因此,较大部分图像光可朝向观看者衍射而不是朝向世界衍射。一级反射(1R)与一级透射(1T)的比率可以高达2:1,并且在一些入射角处可以接近3:1。另外,与图6所示的两级光栅相比,二级反射(2R)也已被减小。在一些情况下,二级反射(2R)中

的衍射效率被降低到远低于1%。在一些情况下,二级反射(2R)的衍射效率低于0.5%。因此,根据本发明的一些实施例,可以减少可导致沿着与凹槽线正交的方向中的图像眩光的不期望的二级光。

[0053] 图11A和图11B示出了对于s偏振光(90度偏振,图11A)和p偏振光(0度偏振,图11B),根据光栅深度(即, h_1 与 h_2 之和)的一些示例性三级光栅的模拟衍射效率曲线。如图所示,对于两种偏振的图8所示的整个光栅深度范围,一级反射(1R)大于一级透射(1T)。还应注意,二级反射(2R)显示出明显的偏振相关性。例如,p偏振光的二级反射(2R)明显低于s偏振光的二级反射(2R)。因此,可通过使用偏振器来抑制二级反射(2R)是可行的。

[0054] 表1总结了根据一些实施例的对于520nm波长光的,针对p偏振光(0度偏振)和s偏振光(90度偏振)两者的,-50度至-30度入射角(θ)的示例性两级光栅的二级反射(2R)、一级反射(1R)、零级反射(0R)和一级透射(1T)中的模拟衍射效率。表2总结了根据一些实施例的,针对p偏振光(0度偏振)和s偏振光(90度偏振)两者的,-30度至-50度入射角(θ)的示例性三级光栅的二级反射(2R)、一级反射(1R)、零级反射(0R)和一级透射(1T)中的模拟衍射效率。如图所示,对于p偏振光,与在-30入射角处两级光栅的一级透射(1T)为11%相比,在-30入射角处的三级光栅的一级透射(1T)仅为6.6%。而且,对于s偏振光,与在-30入射角处两级光栅的一级透射(1T)为1.7%相比,在-30入射角处的三级光栅的一级透射(1T)仅为0.3%。因此,根据一些实施例,本文描述的三级光栅可以显著减少不期望的彩虹效应。

[0055] 表1

[0056]

偏振	2R	1R	0R	1T	θ
0.0000	0.0063315115	0.042606835	0.889826498	0.061251511	-50
90.000	0.012548442	0.024650098	0.931271532	0.031529927	-50
0.0000	0	0.050533856	0.004828623	0.109664217	-30
90.000	0	0.029522560	0.035912803	0.016903517	-30

[0057] 表2

[0058]

偏振	2R	1R	0R	1T	θ
0.0000	0.000594872	0.050695651	0.928987394	0.019722082	-50
90.000	0.008069904	0.018196041	0.965302811	0.008431243	-50
0.0000		0.080741167	0.022736306	0.065726994	-30
90.000		0.042537267	0.020530137	0.002793524	-30

[0059] 已经证明,具有更优选的特性(诸如更高的一级反射(1R)与一级透射(1T)的比率和更低的二级反射(2R))的光栅可以遵循某些参数模式。参考图9,通常,每个第一脊820的第一宽度 w_1 可以有利地选择为约 $0.5D \pm 0.1D$ 。每个第二脊830的第二宽度 w_2 可以有利地选择为小于或等于约 $0.25D$ 。每个第一脊820的第一高度 h_1 可以有利地选择为小于每个第二脊830的第二高度 h_2 。在一些实施例中,第二高度 h_2 与第一高度 h_1 的比率可以有利地选择为约8:5。在一些实施例中,可以有利地选择三级光栅的以下光栅参数: $h_0=0.03\mu\text{m}$, $h_1=0.054\mu\text{m}$, $w_1=0.5D$, $h_2=0.0875\mu\text{m}$,以及 $w_2=0.2D$ 。

[0060] 就三级横截面形状可以被视为近似三角锯齿形而言,图9所示的三级光栅可以被视为闪耀光栅。对于以接近于与闪耀表面垂直的入射角入射的光(如图9中示意性地示出的),光栅可以被称为“闪耀的”。对于以接近于与闪耀表面平行的入射角(即,与图9所示的

入射角相反)入射的光,光栅可以被称为“防闪耀的(anti-blazed)”。表3比较了根据本发明的一些实施例的示例性两级光栅、示例性三级闪耀光栅和示例性三级防闪耀光栅的衍射效率。如图所示,两级光栅对于观看者(一级反射1R)和世界(一级透射1T)具有相当的衍射效率。三级闪耀光栅可以具有比对于世界的衍射效率高的对于观看者的衍射效率。另一方面,三级防闪光光栅可以具有比对于观看者的衍射效率高的对于世界的衍射效率。因此,三级闪耀光栅可优于两级光栅(binary grating)和三级防闪耀光栅。

[0061] 表3

[0062]		效率 (%) 面向观看者 的 EPE	效率 (%) 面向世界的 EPE
	两级光栅	1.53	1.48
	三级闪耀光栅	2.08	1.36
	三级防闪光光栅	0.93	2.56

[0063] 参考图9,优化算法可以允许对每个第一脊820的第一高度 h_1 和第一宽度 w_1 ,每个第二脊830的第二高度 h_2 和第二宽度 w_2 进行改变并优化,以获得较高的用户侧衍射效率(1R)、较低的世界侧衍射效率(1T)和较低的二级反射(2R)。在一些实施例中,可以假设光栅周期D具有 $D=380\text{nm}$ 的值,可以假设 h_1 和 h_2 具有 $h_1=50\text{nm}$ 和 $h_1=75\text{nm}$ 的值,以及假设 w_1 和 w_2 的标称值为 $w_1=210\text{nm}$ 和 $w_2=170\text{nm}$ 。然后可以改变并优化 w_1 和 w_2 以获得较高的一级反射(1R)。

[0064] 在示例性优化模拟中,假设入射角为50度,基层810的厚度为 $h_0=20\text{nm}$,并且 h_1 和 h_2 具有 $h_1=50\text{nm}$ 和 $h_1=75\text{nm}$ 的值。进一步假设光栅具有 $n_1=1.54$ 的折射率,并且波导802具有 $n_2=1.8$ 的折射率。 w_1 从 $2m$ 变化到 $D-m$,其中, m 是最小特征尺寸, D 是光栅周期。在一个实施例中,假设 $D=380\text{nm}$, $m=30\text{nm}$ (电子束光刻的特征尺寸)。 w_2 从 m 变化到 w_1-m 。在一些情况下, w_2 可以等于 w_1 ,或者 w_2 可以等于零(这与没有第二脊的两级光栅对应)。

[0065] 图12A至图12F示出了根据一些实施例的三级光栅的各级衍射效率的模拟强度图。具体而言,图12A和图12D分别示出了对于s偏振和p偏振,根据 w_1 (水平轴)和 w_2 (竖直轴)的用户侧衍射效率(1R);图12B和图12E分别示出了对于s偏振和p偏振,根据 w_1 (水平轴)和 w_2 (竖直轴)的世界侧衍射效率(1T);以及图12C和图12F分别示出了对于s偏振和p偏振,根据 w_1 (水平轴)和 w_2 (竖直轴)的二级反射(2R)。如图12C和图12F所示,对于虚线椭圆区域内的 w_1 和 w_2 的参数空间,二级反射(2R)可以相对较低。如图12A和图12D所示,在虚线椭圆区域内的 w_1 和 w_2 的同一参数空间中,用户侧衍射效率(1R)相当高。

[0066] 图13A至图13F示出了根据一些其它实施例的三级光栅的各级衍射效率的模拟强度图。假设 $h_1=60\text{nm}$, $h_2=75\text{nm}$,以及 $h_0=20\text{nm}$ 。具体而言,图13A和图13D分别示出了对于s偏振和p偏振,根据 w_1 (水平轴)和 w_2 (竖直轴)的用户侧衍射效率(1R);图13B和13E分别示出了对于s偏振和p偏振,根据 w_1 (水平轴)和 w_2 (竖直轴)的世界侧衍射效率(1T);图13C和图13F分别示出了对于s偏振和p偏振,根据 w_1 (水平轴)和 w_2 (竖直轴)的二级反射(2R)。

[0067] 图14A至图14F示出了根据一些另外的实施例的三级光栅的各级衍射效率的模拟

强度图。假设 $h_1=60\text{nm}$, $h_2=75\text{nm}$, 以及 $h_0=30\text{nm}$ 。具体而言, 图14A和图14D分别示出了对于s偏振和p偏振, 根据 w_1 (水平轴) 和 w_2 (垂直轴) 的用户侧衍射效率(1R); 图14B和14E分别示出了对于s偏振和p偏振, 根据 w_1 (水平轴) 和 w_2 (垂直轴) 的世界侧衍射效率(1T); 图14C和图14F分别示出了对于s偏振和p偏振, 根据 w_1 (水平轴) 和 w_2 (垂直轴) 的二级反射(2R)。

[0068] 通常, 可以观察到s偏振光的衍射效率高于p偏振光的衍射效率。因此, s偏振比p偏振泄漏得更快。因此, 可以假设波导中传播的光大部分是p偏振的。

[0069] 可能需要在目镜(例如, 图1和图2所示的目镜)的整个EPE部分上具有来自光栅的均匀光输出。当光在波导中从顶部到底部地传播时, 越来越多的光通过光栅衍射出波导。因此, 可以有利地使光栅的衍射效率随着距光栅顶部的距离的增加而增加, 这样, 当波导中的剩余的光量减少时, 越来越大百分比的光被耦出, 从而在整个EPE部分上具有相对均匀的光输出。

[0070] 在一些实施例中, 靠近波导顶部的100nm线宽光栅(即, $w_1=100\text{nm}$, $w_2=0$) 可以通过保持低耦出效率来保存波导内的光, 从而有足够的光保留在波导内, 以便在EPE末端附近发射。靠近波导底部的260/150nm线宽光栅(即, $w_1=260\text{nm}$, $w_2=150\text{nm}$) 可以将剩余的光的大部分耦出波导。

[0071] 图15示出了根据入射角的用于一级反射(1R)、一级透射(1T)和二级反射(2R)的模拟衍射效率。假设 $h_1=50\text{nm}$, $h_2=75\text{nm}$, $w_1=200\text{nm}$, 以及 $w_2=120\text{nm}$ 。如图所示, 对于减小入射角, 一级反射(1R)和一级透射(1T)都增加。因此, 一级反射(1R)在较低入射角(与视场底部对应)处具有比其在较高入射角处(与视场顶部对应)处的值大的值。因此, 视场(FOV)底部处的光(具有最短反弹间隔)被最快地耦出。

[0072] 防闪耀光栅可能更适于场均匀性。然而, 如上所述, 闪耀光栅具有更佳的用户侧效率。在一些实施例中, 两级光栅可以达到更好的平衡。在一个实施例中, 可以配置两级光栅, 使其占空比(即, 特征宽度与周期的比率 w/D)随着距光栅顶部的距离 x 的增加而增加, 这样, 光栅效率随着距离 x 的增加而增加。

[0073] 在一些实施例中, 可以使用优值函数作为优化的目标来执行优化。假设朝向用户衍射的功率是 P_{user} , 朝向世界衍射的功率是 P_{world} , 二级的功率是 P_2 , 并且零级的功率是 P_0 , 如图16中所示意性地示出的。在一个实施例中, 优值函数可表示为:

$$[0074] \quad J = \alpha (P_2 + P_{\text{world}}) - P_{\text{user}},$$

[0075] 其中, α 是与项 P_{user} 相比的赋予项 $(P_2 + P_{\text{world}})$ 的权重。在一个实施例中, 允许 h_1 、 h_2 、 w_1 和 w_2 变化以最小化优值函数 J 。因此, 优化的目标可以是最小化 P_2 和 P_{world} , 并且最大化 P_{user} 。参数 α 确定赋予两个目标的相对权重。图17示出了变量 h_1 、 h_2 、 w_1 和 w_2 中的每一项与权重 α 的相关性。图18示出了 P_{user} 、 P_{world} 和 P_2 与权重 α 的相关性。

[0076] 如上所述, 可以有利地使光栅的衍射效率随着距光栅顶部的距离的增加而增加, 以便实现来自在目镜的整个EPE部分上的光栅的相对均匀的光输出。图19示意性地示出了在波导1902上形成的光栅1900。设 x 是距光栅顶部的归一化距离(即, 在光栅顶部处, $x=0$, 在光栅底部处, $x=1$)。设 $f(x)$ 是位置 x 处的光栅1900的归一化衍射效率。 $f(x)$ 可表示为:

$$[0077] \quad f(x) = u(x) + w(x),$$

[0078] 其中, $u(x)$ 和 $w(x)$ 分别是射向用户的光(即, 一级反射1R)和射向世界的光(即, 一级透射1T)。注意, $f(x)$ 表示用于将光耦出光栅1900的光栅1900的效率。由于二级反射(2R)

中的光留在波导1902中,因此二级反射(2R)不包括在 $f(x)$ 中。在一些实施例中, $f(x)$ 可以归一化为预定常数。

[0079] 设 $y(x)$ 为位置 x 处的波导1902内的归一化光强度,并且设 $y(0) = 1$ 。位置 x 处的耦出功率(即,从波导1902耦出的光的无量纲分数)可以表示为:

$$[0080] \quad y'(x) = -f(x)y(x),$$

[0081] 该微分方程的解可以表示为:

$$[0082] \quad y(x) = e^{-\int_0^x f(z)dz},$$

[0083] 使用简单的线性模型,我们假设归一化的衍射效率 $f(x)$ 可以表示为:

$$[0084] \quad f(x) = a + bx,$$

[0085] 其中, a 和 b 是常数。通过光栅1900的平均耦出功率可表示为:

$$[0086] \quad \int_0^1 f(x)y(x)dx,$$

[0087] 相对于平均耦出功率的均方根(RMS)偏差可表示为:

$$[0088] \quad \int_0^1 [f(x)y(x) - \int_0^1 f(z)y(z)dz]^2 dx,$$

[0089] RMS偏差表示相对于平均耦出功率的平均偏差。较低的RMS偏差值意味着根据 x 耦出功率的更高的均匀性。

[0090] 图20A示出了根据 a 和 b 的平均耦出功率的模拟等高线图。图20B示出了相对于根据 a 和 b 的平均耦出功率的RMS偏差的模拟等高线图。如图20B所示,虚线椭圆内的区域可以表示 a 和 b 的参数空间,其在整个光栅上形成相对均匀的耦出功率。在一些实施例中, a 可以有利地选择在约0.5至0.7的范围内, b 可以有利地选择在约1.0至约1.5的范围内。

[0091] 作为示例,假设 $a = 0.5$ 且 $b = 1.0$,因此 $f(x) = 0.5 + x$ 。假设光在波导1902中从顶部到底部反弹 N 次。假设 $f(x)$ 被归一化为 $1/N$,则光栅1900的初始耦出速率(即,在 $x = 0$ 处)可以是 $0.5/N$ 。 N 次反弹之后的光栅1900的最终耦出速率(即,在 $x = 1$ 处)可以是 $1.5/N$ 。作为示例,假设波导1902具有约 $325\mu\text{m}$ 的厚度。对于50度入射角,反弹间隔可以是约 0.77mm 。假设光栅1900从顶部到底部的总宽度为 $L = 21\text{mm}$ 。因此,光可以从波导1902的顶部到波导1902的底部反弹27次。光栅顶部处的光栅1900的初始耦出效率(朝向用户和世界)可以是约1.8%,光栅底部处的光栅1900的最终耦出效率(朝向用户和世界)可以是约5.4%。

[0092] 图21示出了根据本发明的实施例的对于具有参数 $a = 0.5$ 且 $b = 1$ 的线性模型,根据距光栅1900顶部的归一化距离 x 的归一化耦出功率 $g(x) = f(x)y(x)$ (朝向用户和世界)的曲线图。如图所示,归一化耦出功率在整个光栅1900上相对均匀。

[0093] 通常,为了在整个光栅上具有更均匀的耦出功率,光栅的衍射效率可以从顶部到底部以从约2倍到约3倍的范围内的因子变化。较高的因子可导致更多的光输出,但可能终止较低的均匀性。在光栅底部可实现的最高衍射效率可以确定总耦出效率。对于用户侧衍射效率(即,1R)和世界侧衍射效率(即,1T)彼此大致成比例的光栅,上述情况是成立的。对于深光栅情况可能并非如此。

[0094] 应当理解,尽管上面讨论了具有随位置线性变化的衍射效率的光栅,但这种变化并非必需的,其它变化模式也是可能的。根据一些其它实施例,可以将光栅设计为具有随二次函数或其它非线性函数变化的衍射效率。在一些其它实施例中,可以将光栅设计为具有从光栅的一个边缘到另一边缘非单调性变化的衍射效率光栅。例如,对于具有图3所示的蝴

蝶结拓扑的目镜(其中,光在波导的中间部分处被注入波导),可以将光栅设计为使得该光栅的衍射效率在光栅中间部分中较低,而在中间部分的任一侧的光栅的两个边缘上较高。

[0095] 可以衍射效率随着距光栅顶部的距离的增加而增加的三级光栅执行优化。图22A和图22B示出了根据本发明的一些实施例的位于光栅顶部(图22A)和光栅底部(图22B)的三级光栅的一个周期的示意性截面图。每个第一脊的第一高度 h_1 和每个第二脊的第二高度 h_2 固定在 $h_1=50\text{nm}$ 和 $h_2=75\text{nm}$ 。在一些实施例中, w_1 和 w_2 中的每一者的值随着距光栅顶部的距离的增加而增加。例如,光栅顶部处的第一脊的第一宽度 w_1 可以具有 $w_1=180\text{nm}$ 的值,光栅底部处的第一脊的第一宽度 w_1 可以具有 $w_1=220\text{nm}$ 的值;光栅顶部处的第二脊的第二宽度 w_2 可以具有 $w_2=60\text{nm}$ 的值,光栅底部处的第二脊的第二宽度 w_2 可以具有 $w_2=180\text{nm}$ 的值,如图22A和22B所示。在一些其它实施例中,第一宽度和第二宽度的比率 w_1/w_2 可以随着距光栅顶部的距离的增加而增加。如上所述,第一宽度 w_1 、第二宽度 w_2 和/或比率 w_1/w_2 可以以其它方式在整个光栅上变化。例如,比率 w_1/w_2 可以在光栅的中间部分中较低并且朝向光栅的两个边缘变高。

[0096] 还应理解,本文描述的示例和实施例仅用于说明目的,建议本领域技术人员对本发明稍微进行各种修改或改变,这些修改或改变包括在本申请的精神和范围以及所附权利要求的范围内。

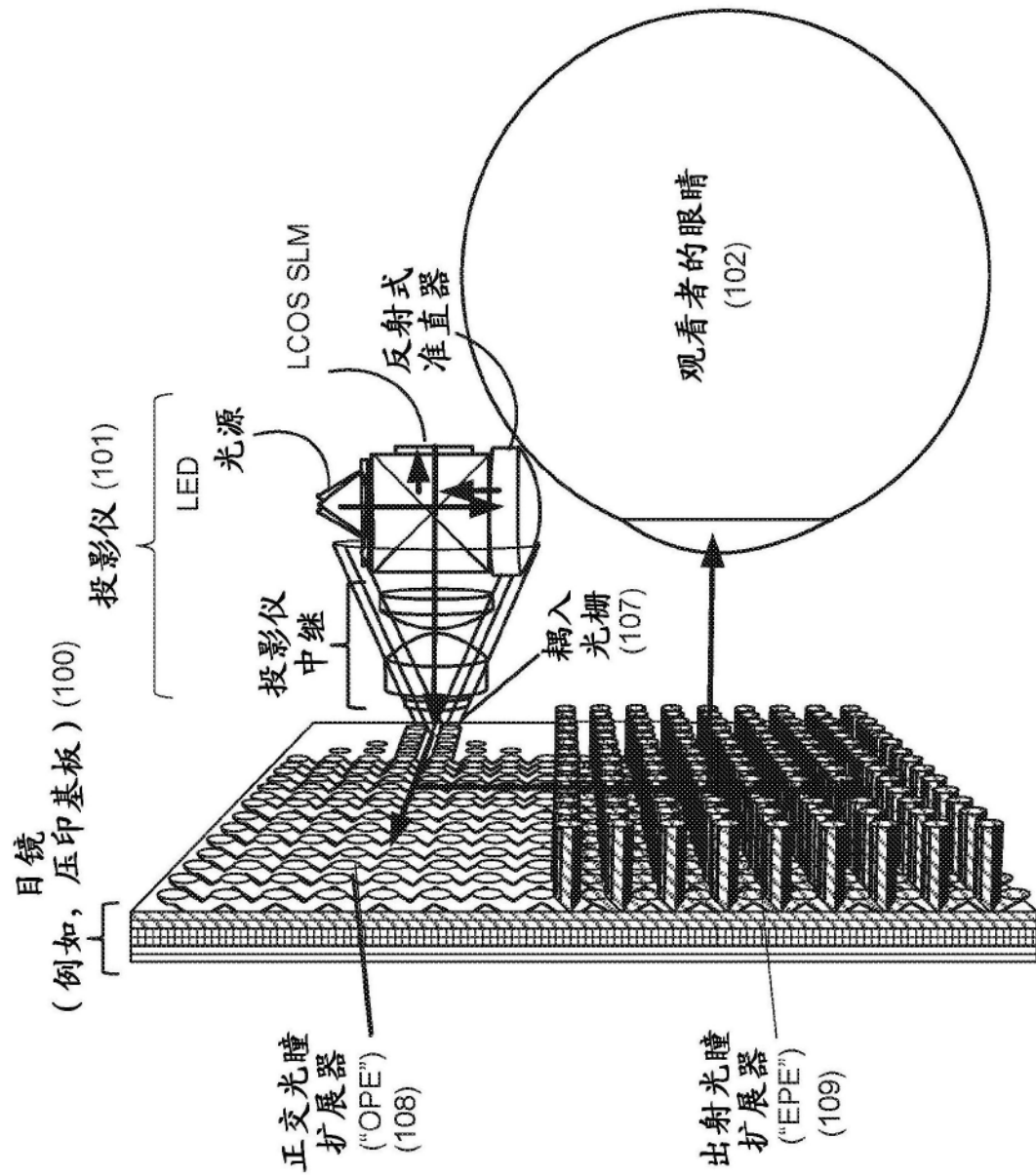


图1

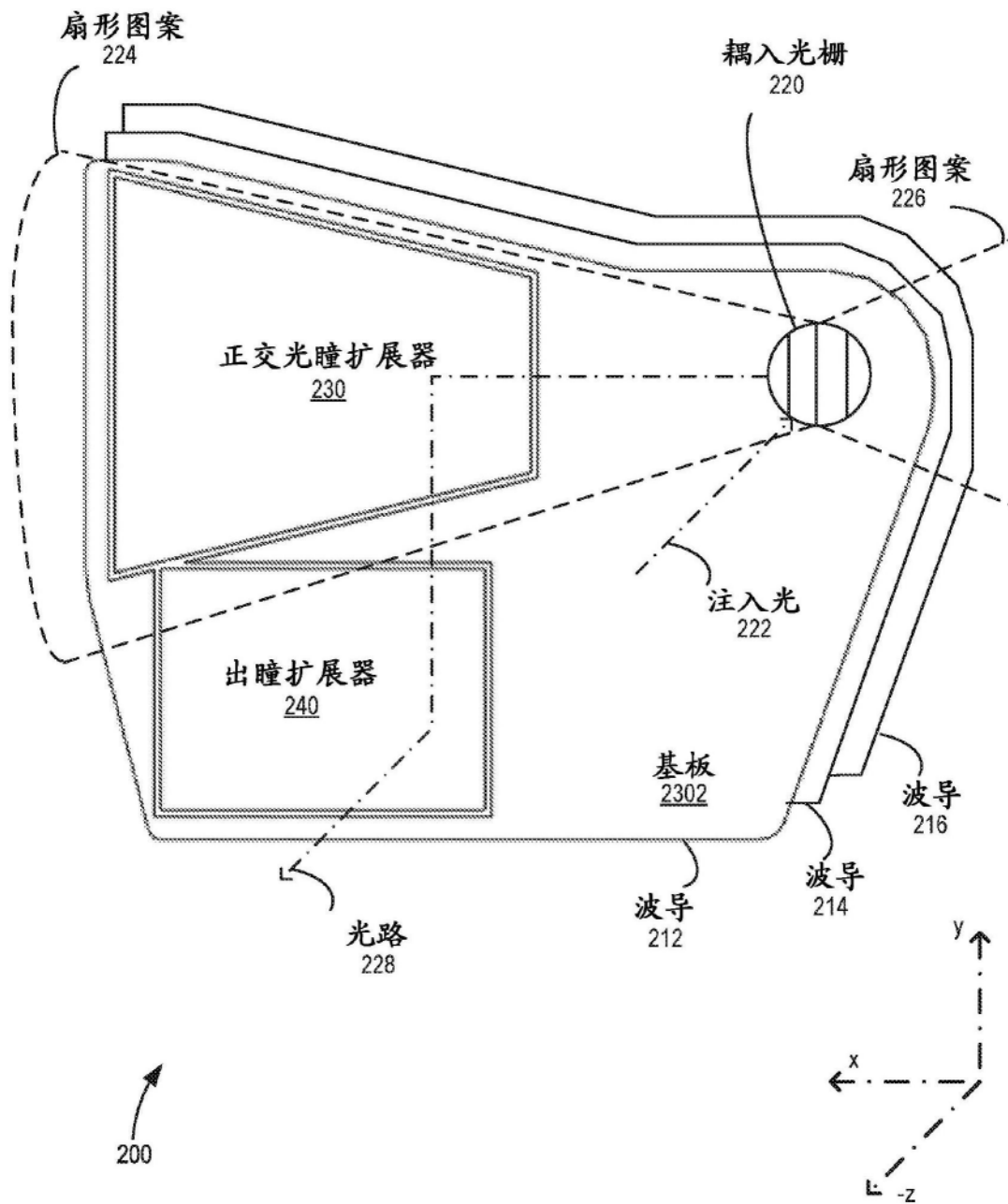


图2

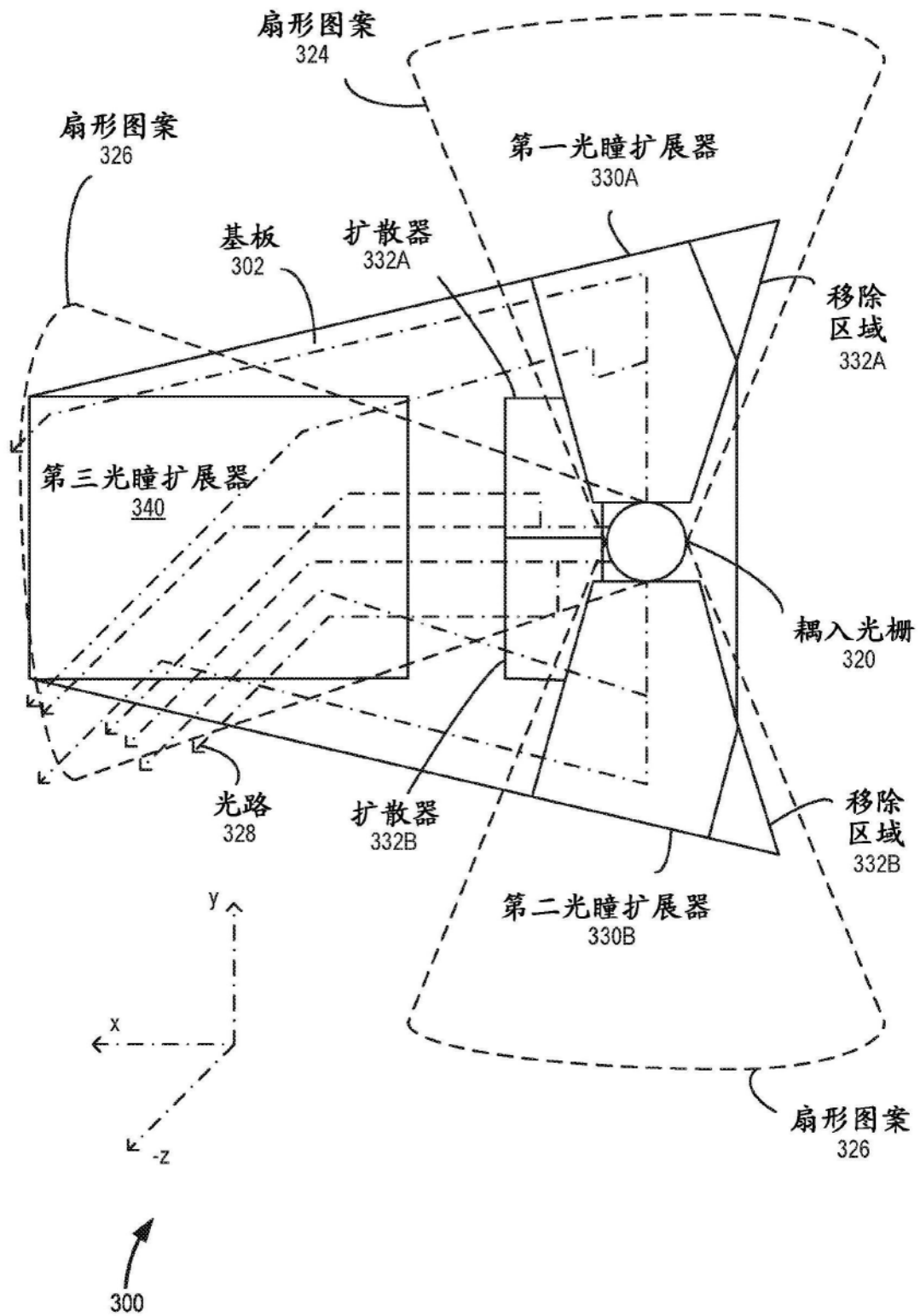


图3

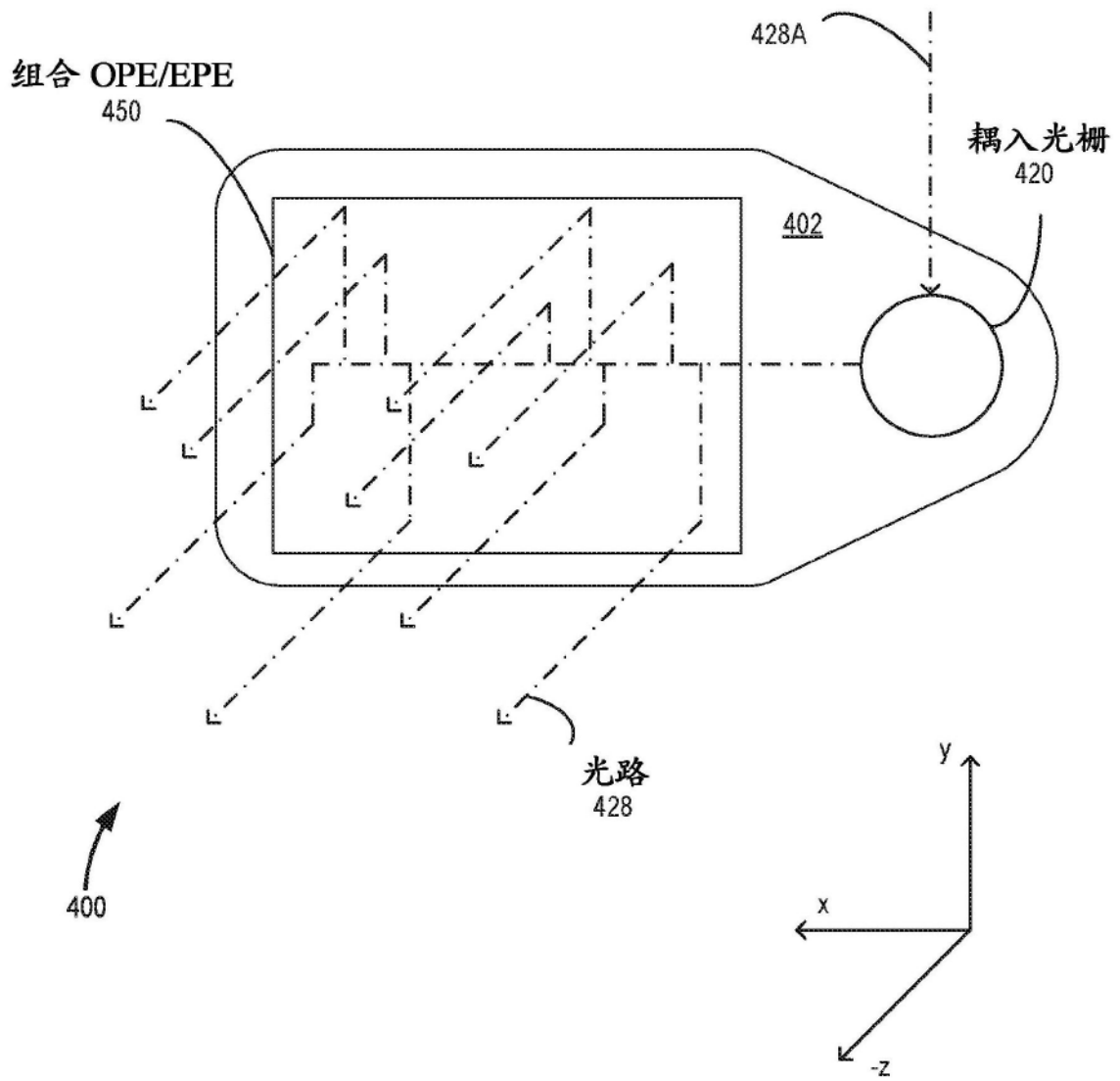


图4A

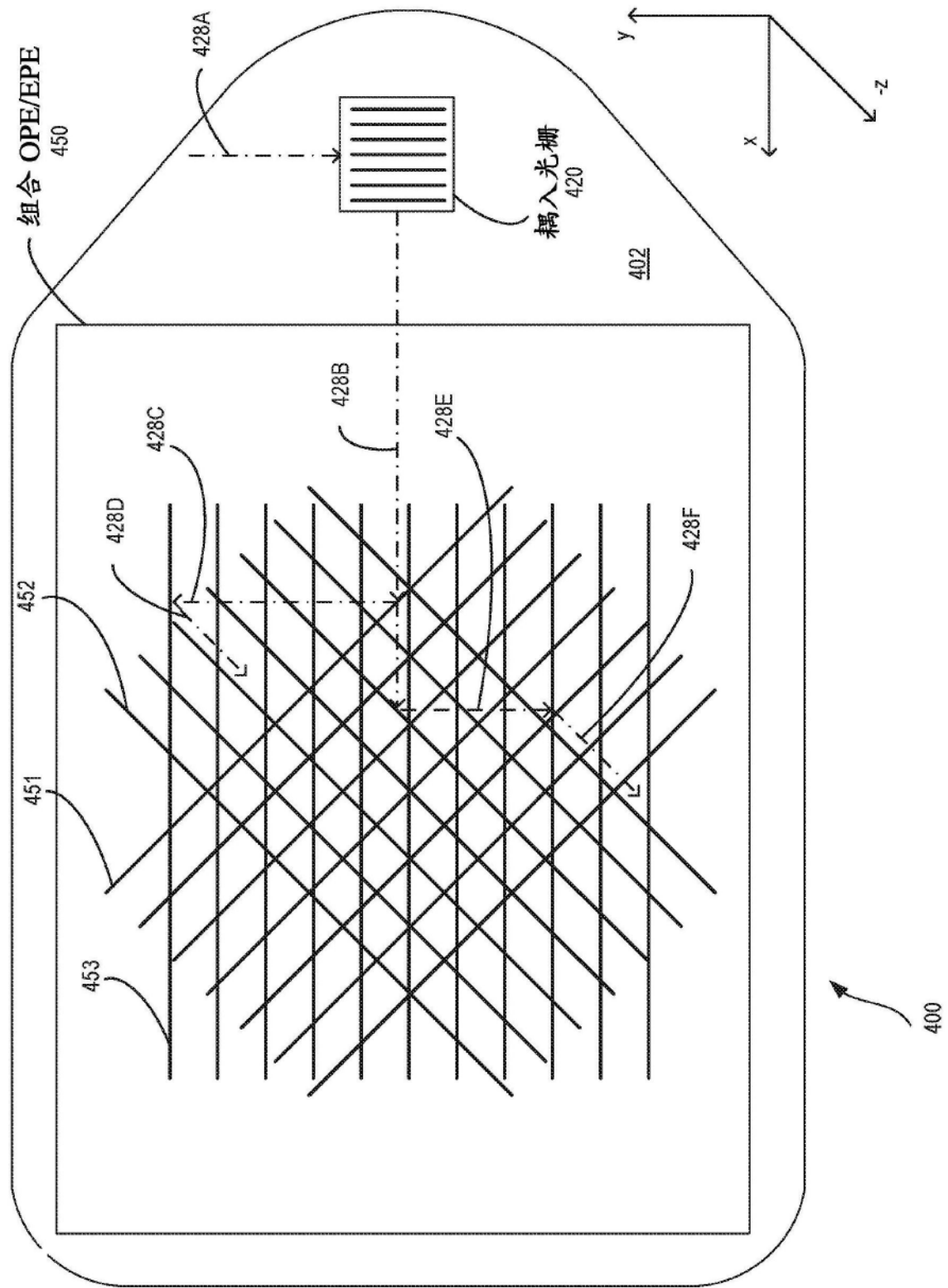


图4B

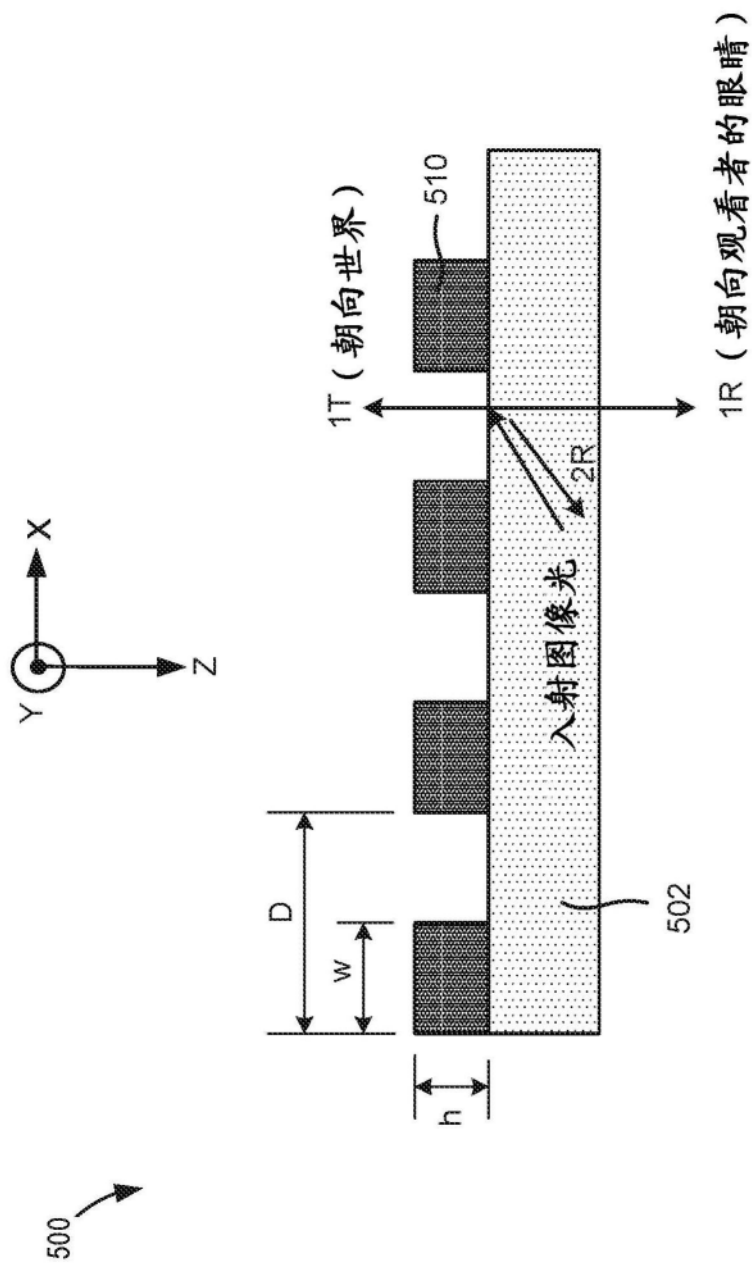


图5

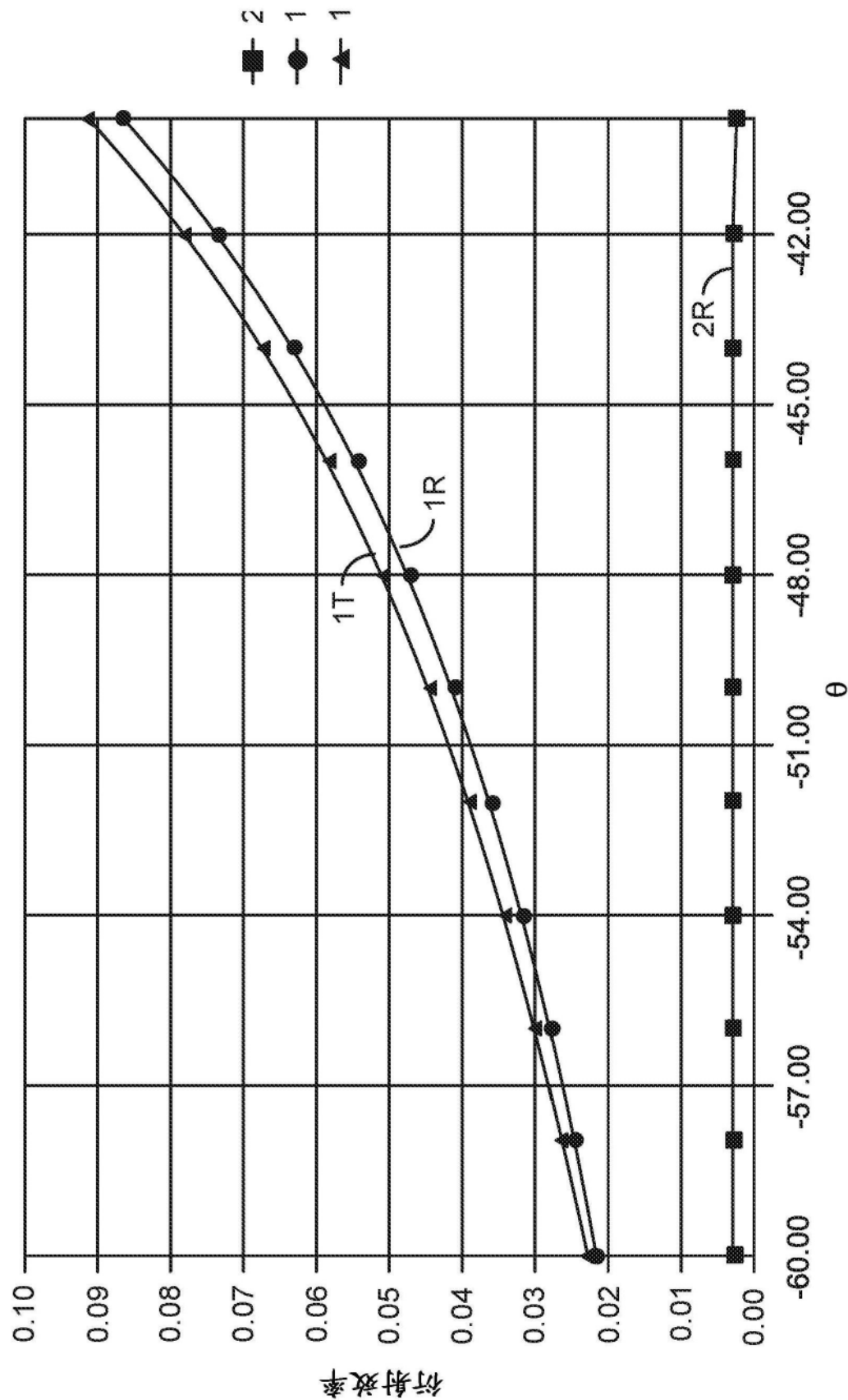


图6

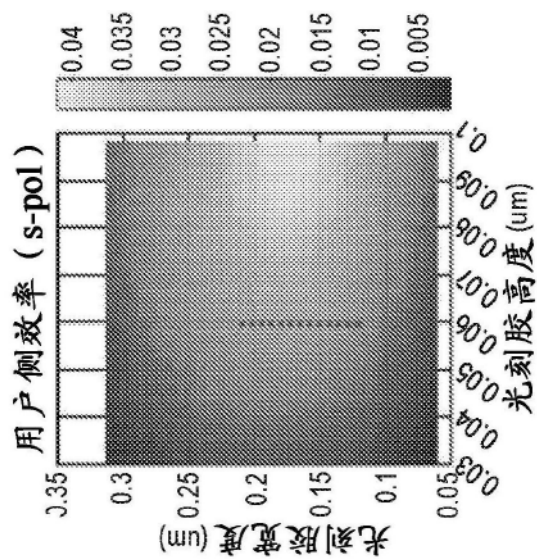


图7A

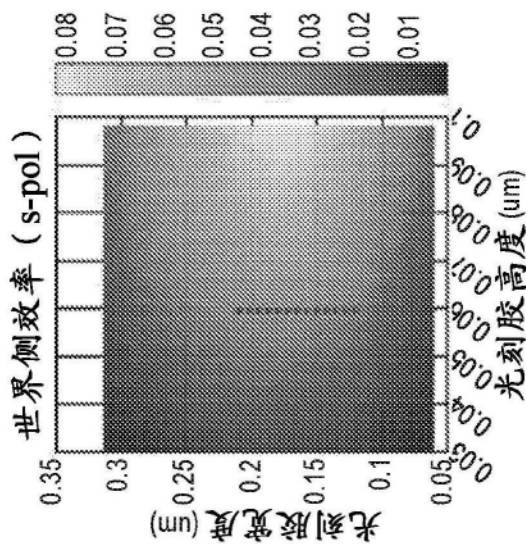


图7B

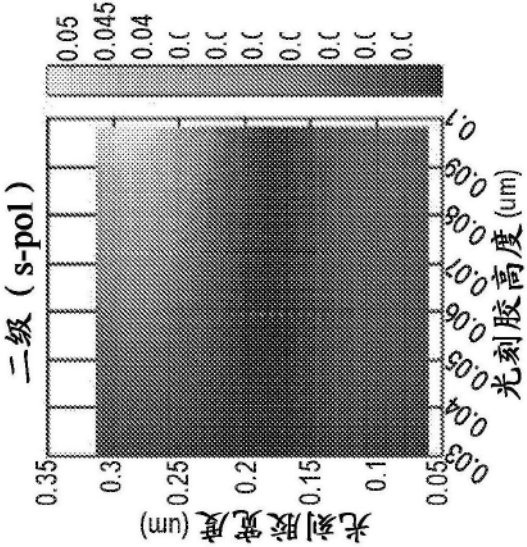


图7C

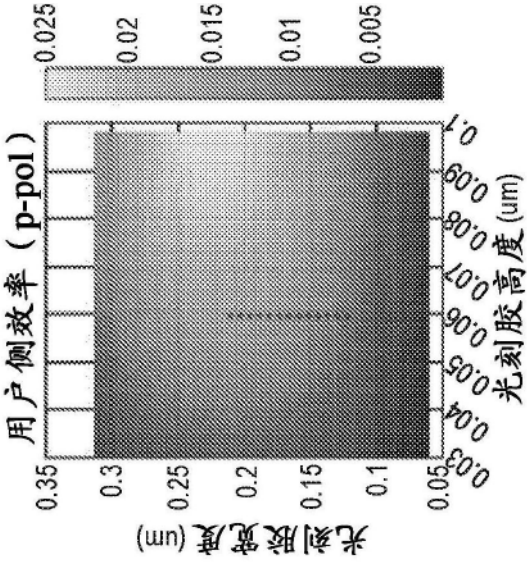


图7D

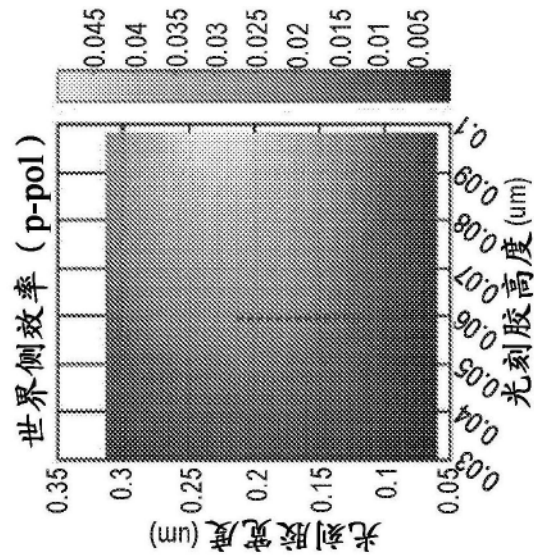


图7E

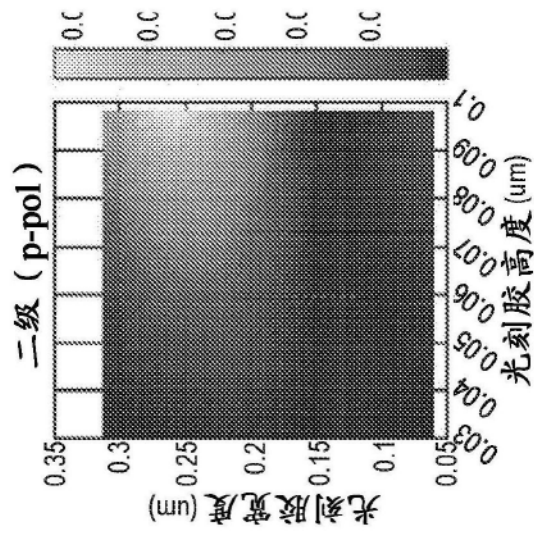


图7F

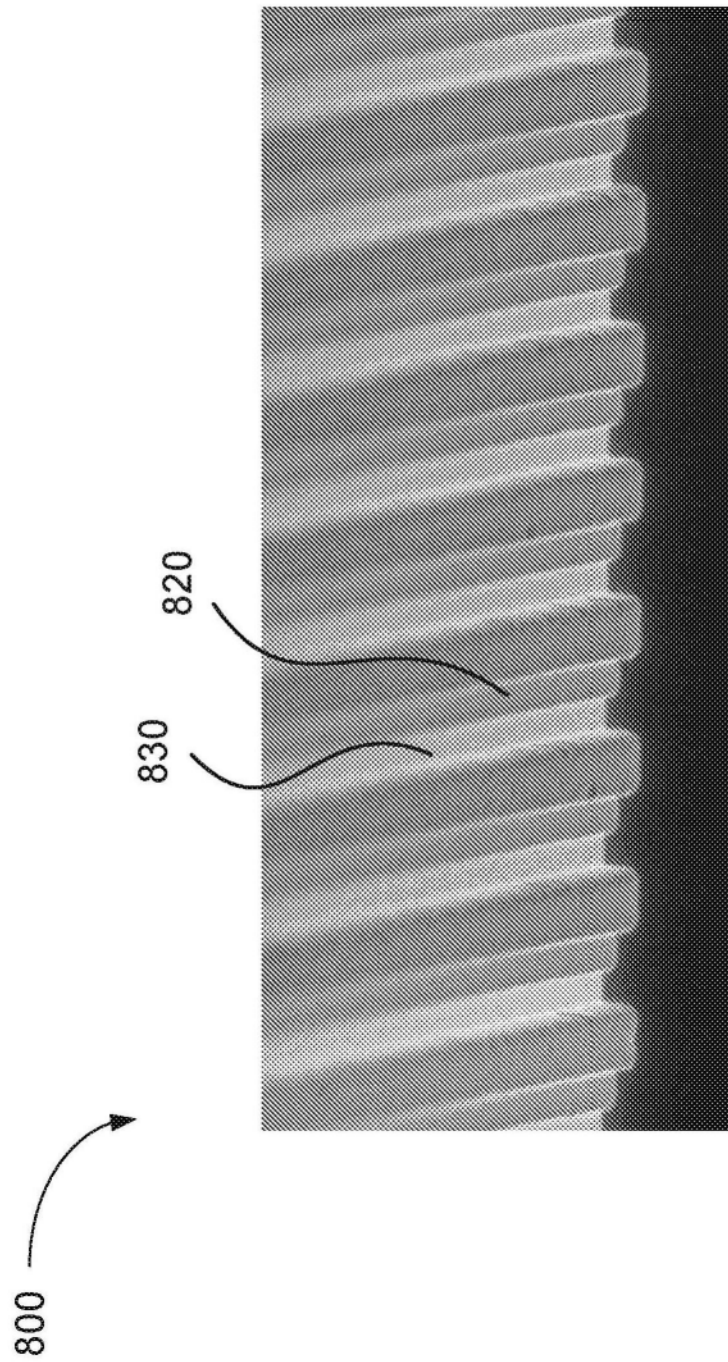


图8

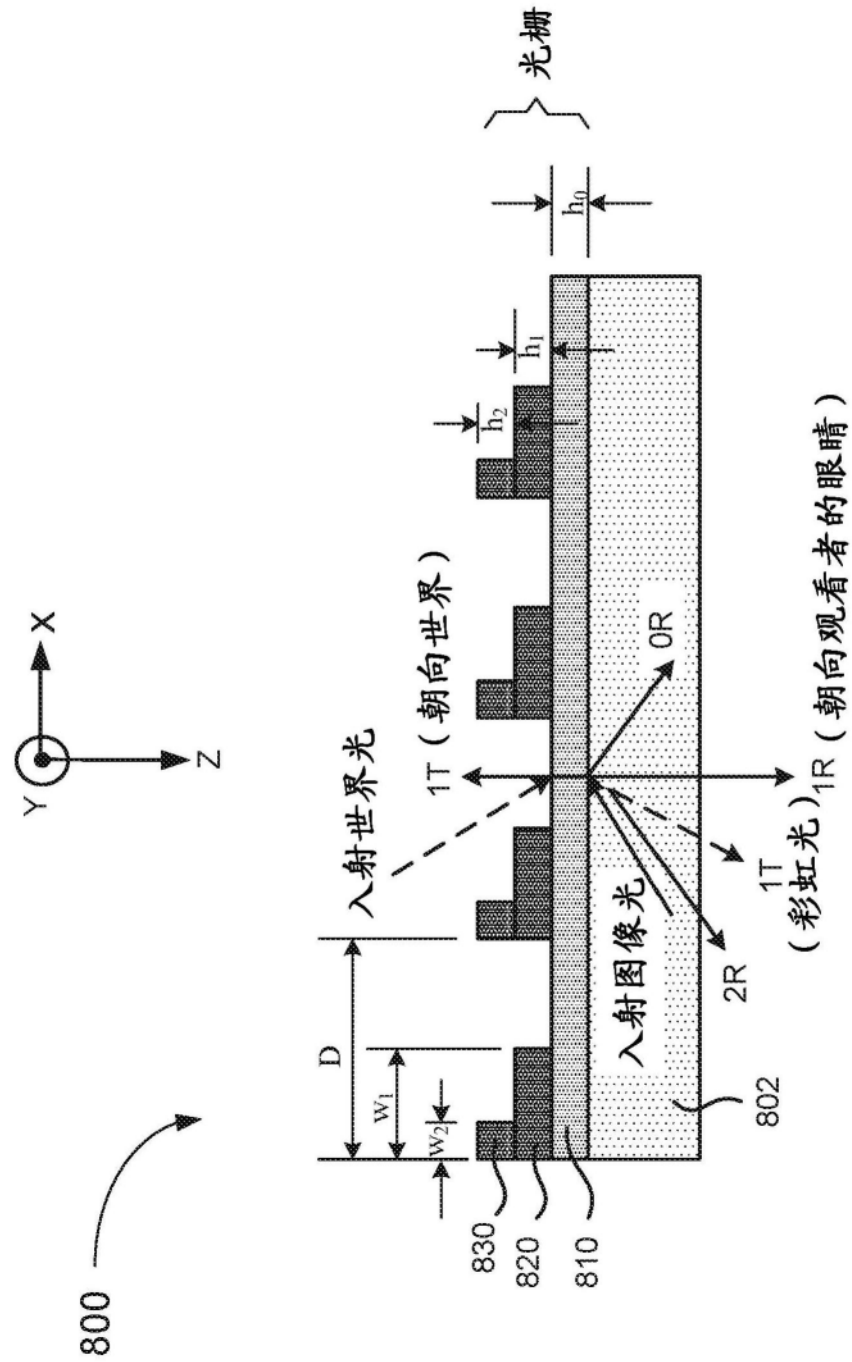


图9

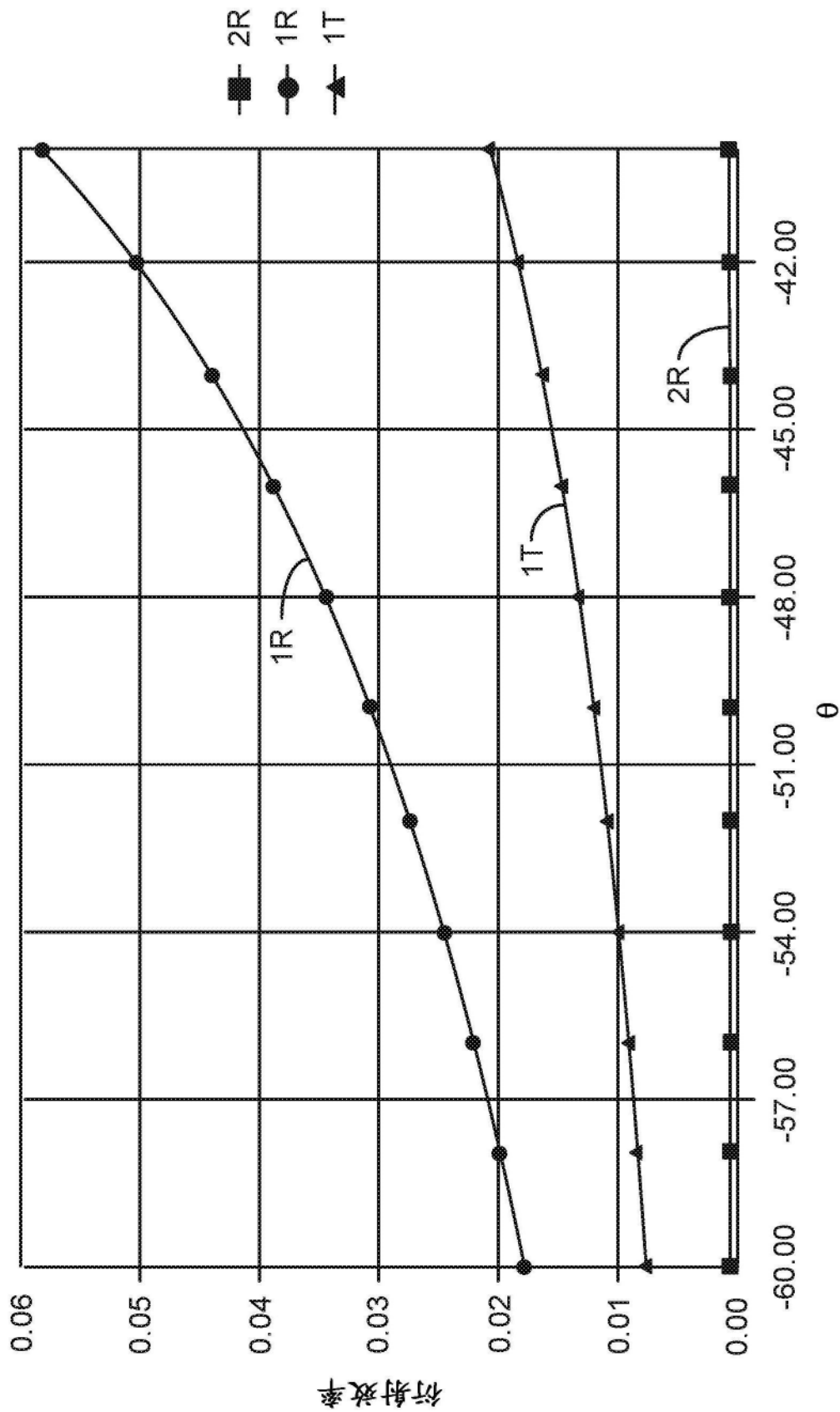


图10

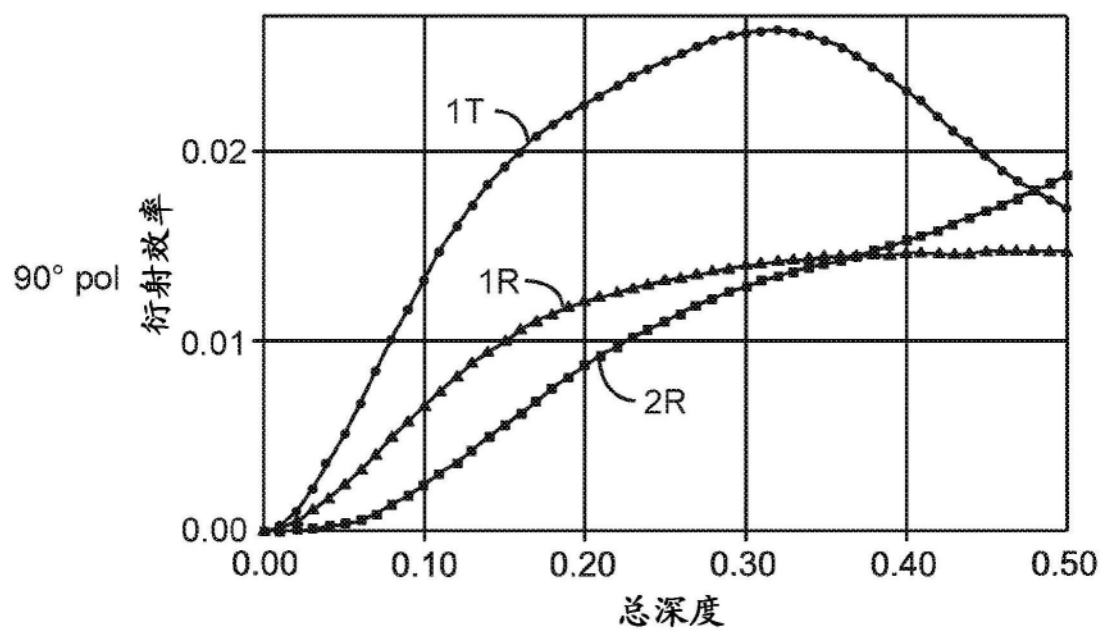


图11A

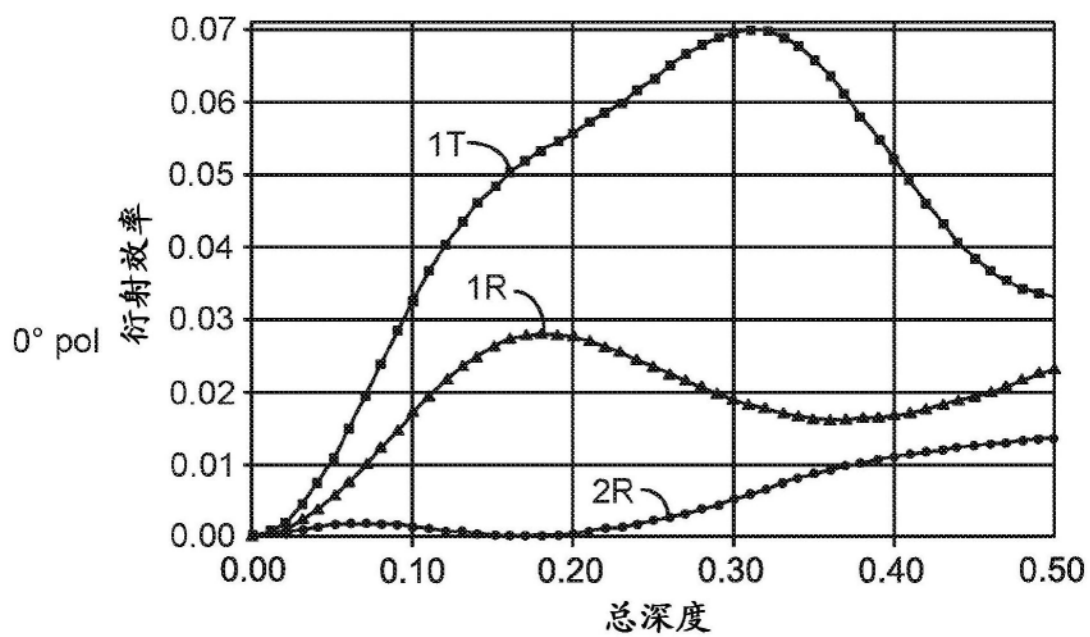


图11B

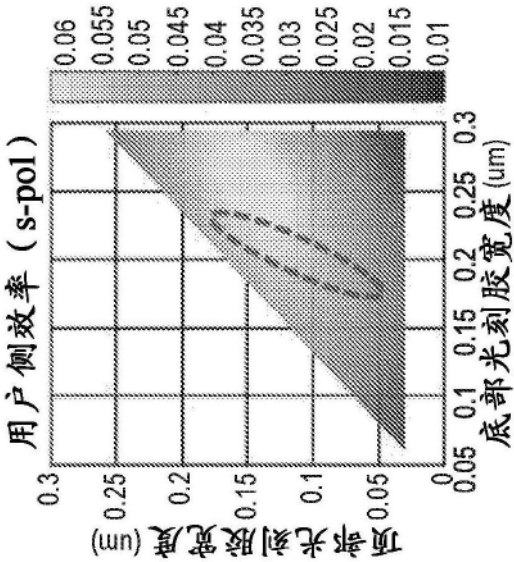


图12A

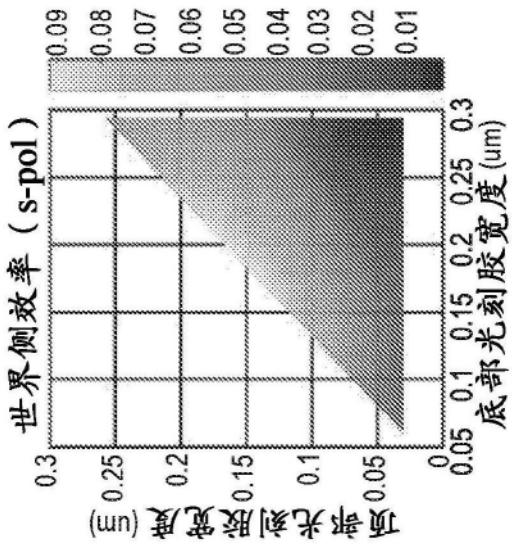


图12B

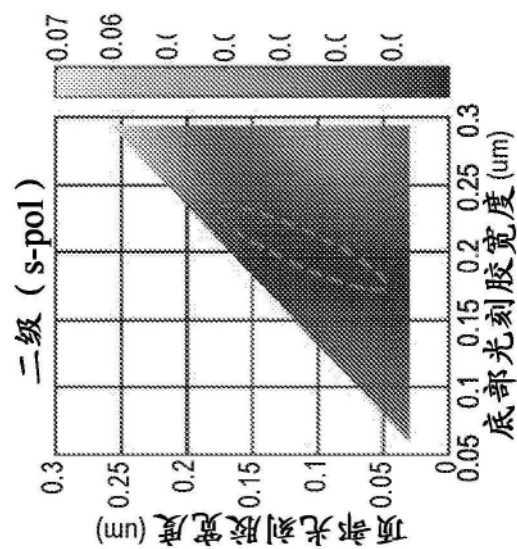


图12C

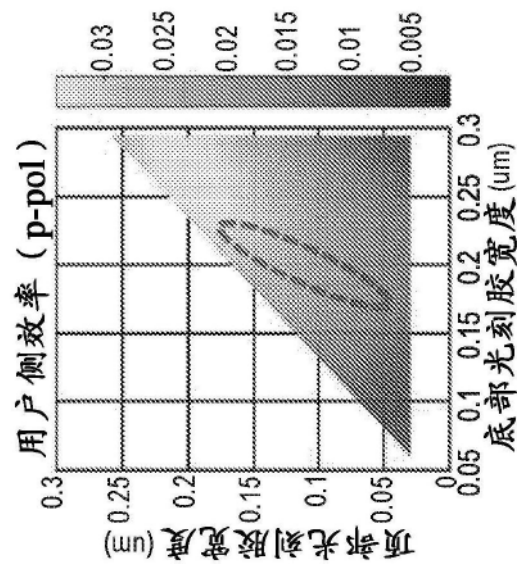


图12D

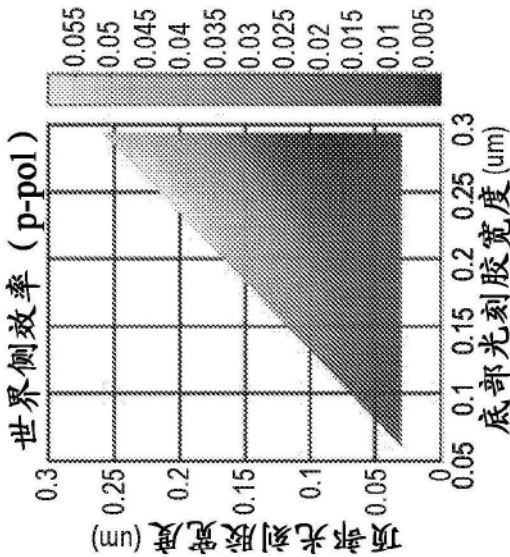


图12E

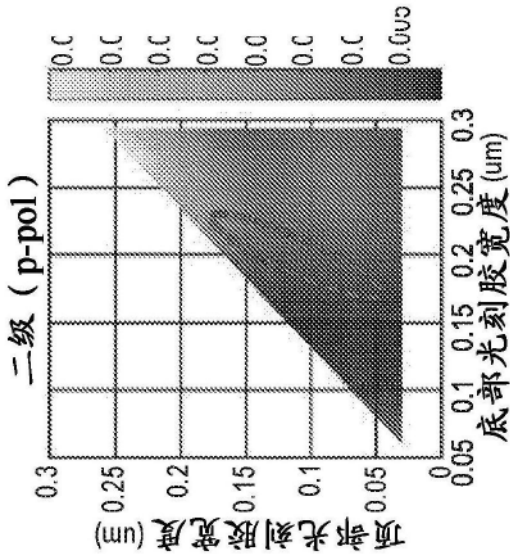


图12F

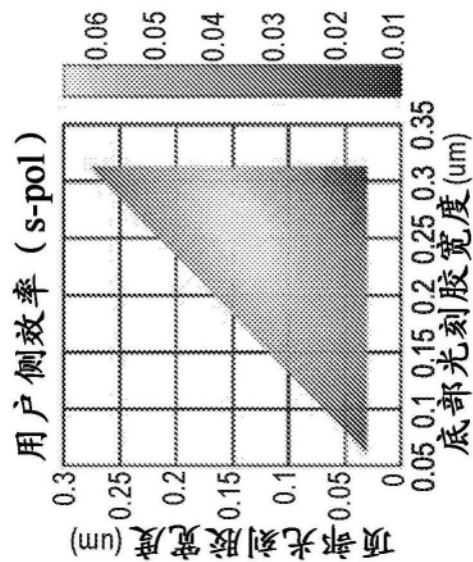


图13A

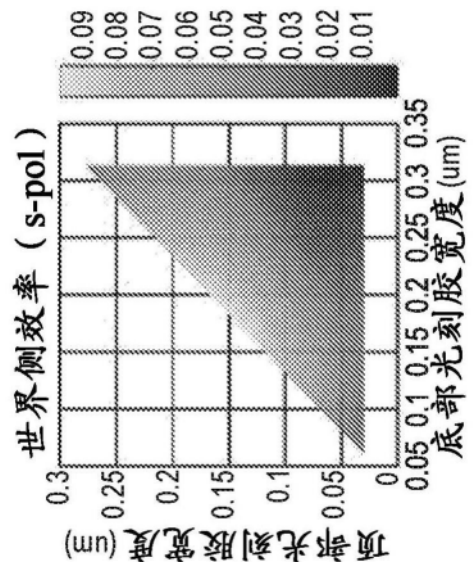


图13B

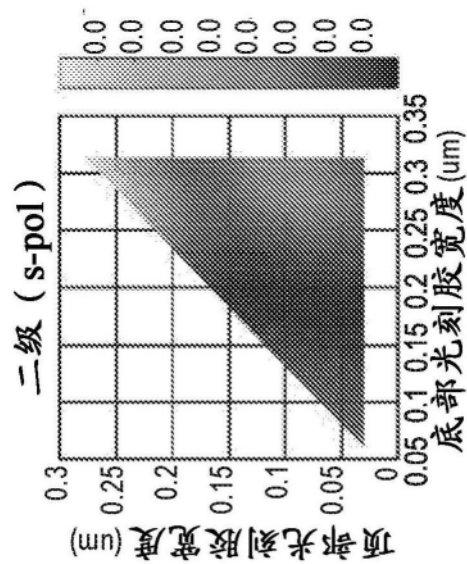


图13C

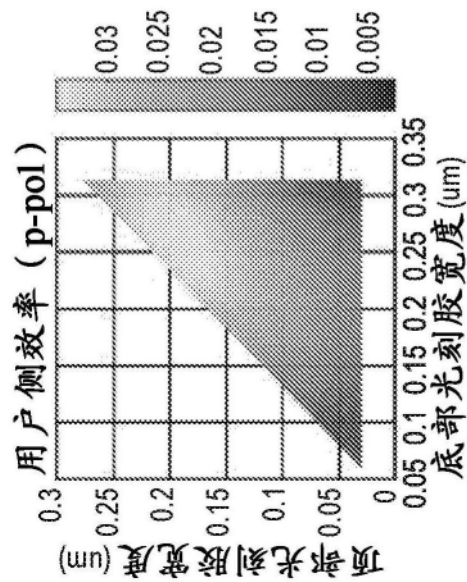


图13D

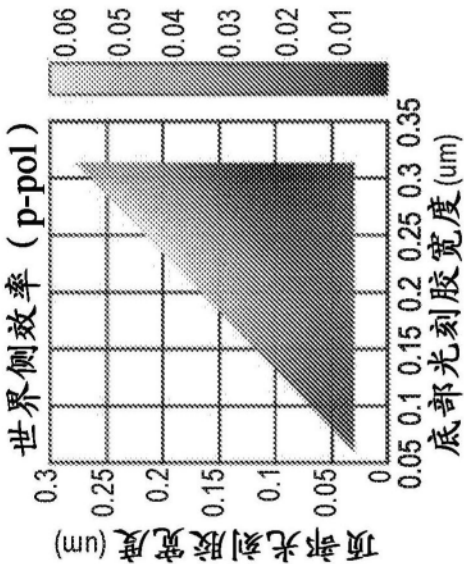


图13E

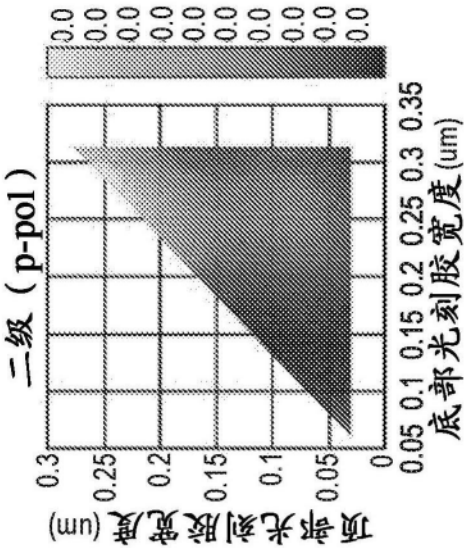


图13F

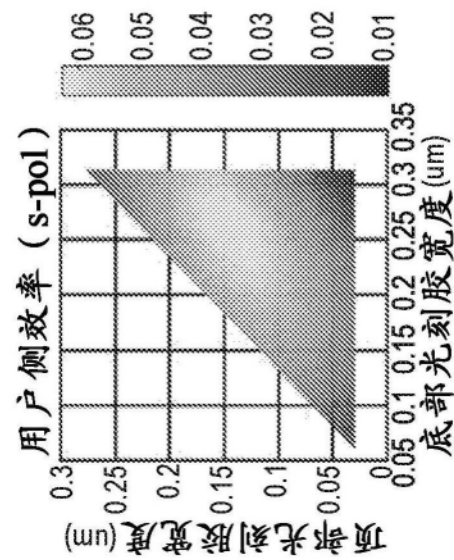


图14A

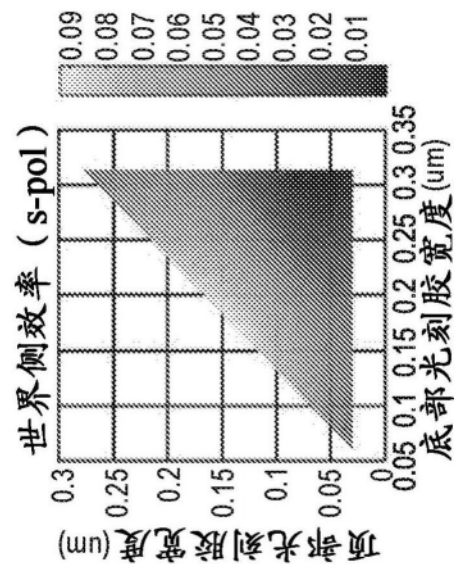


图14B

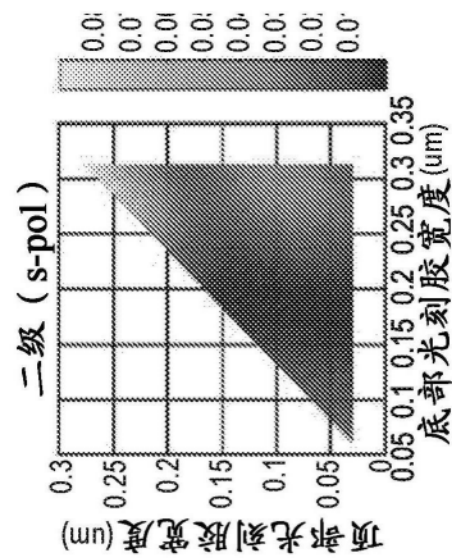


图14C

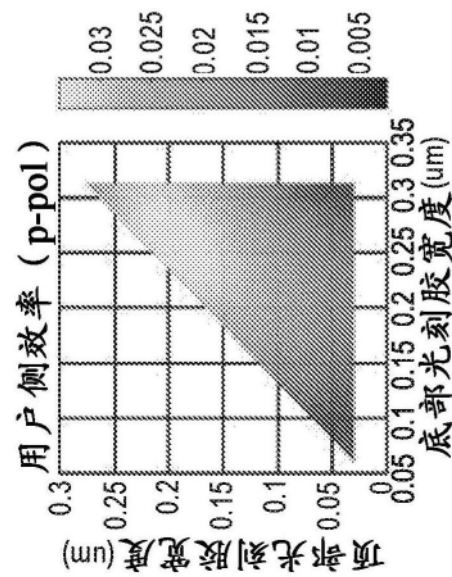


图14D

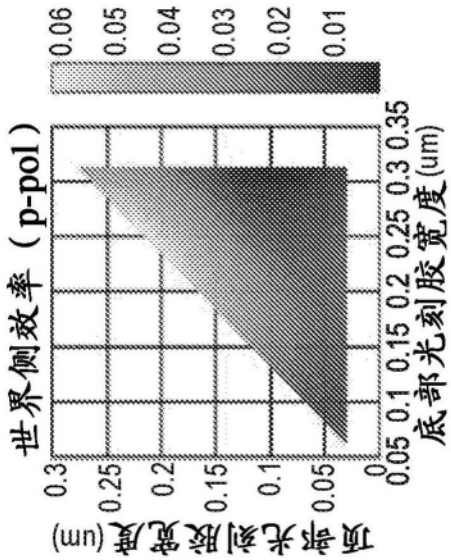


图14E

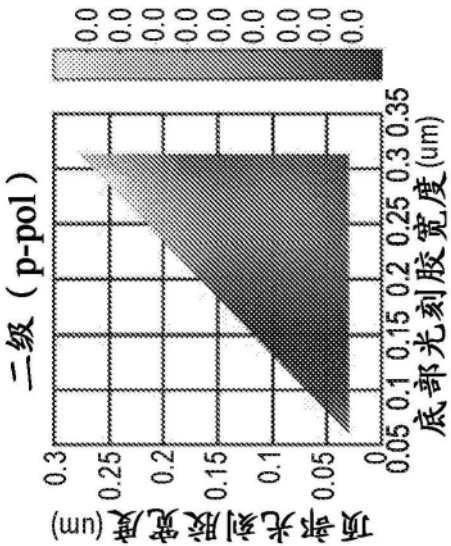


图14F

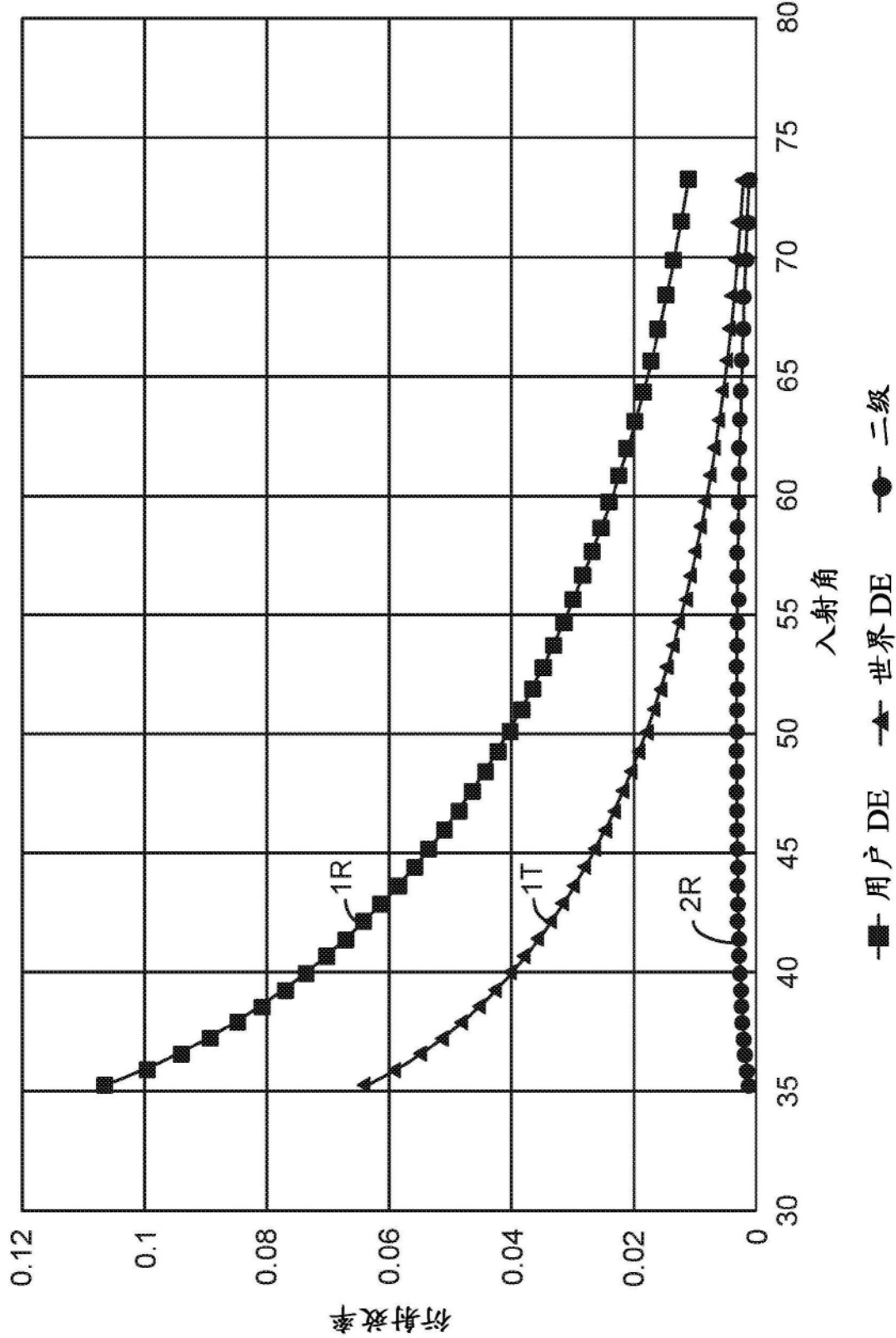


图15

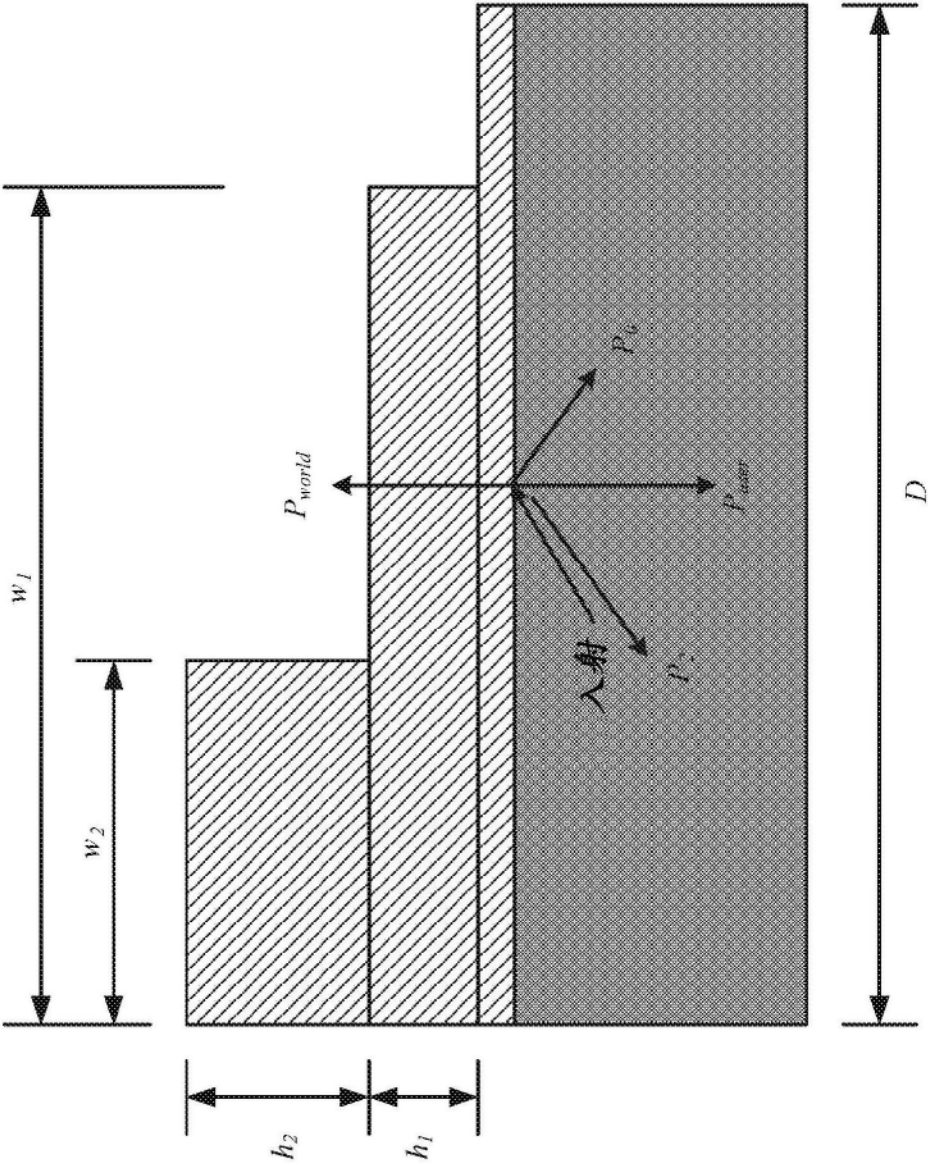


图16

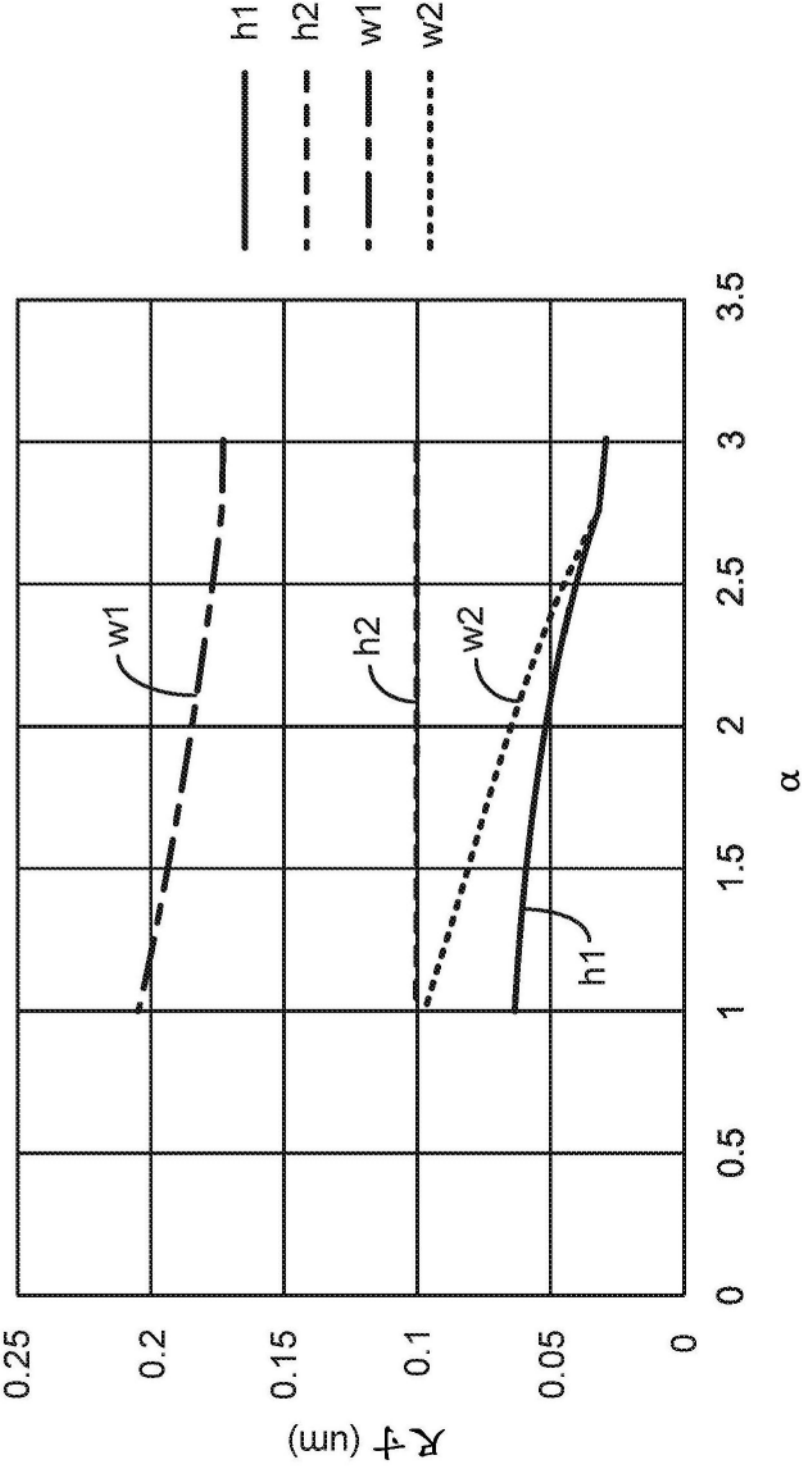


图17

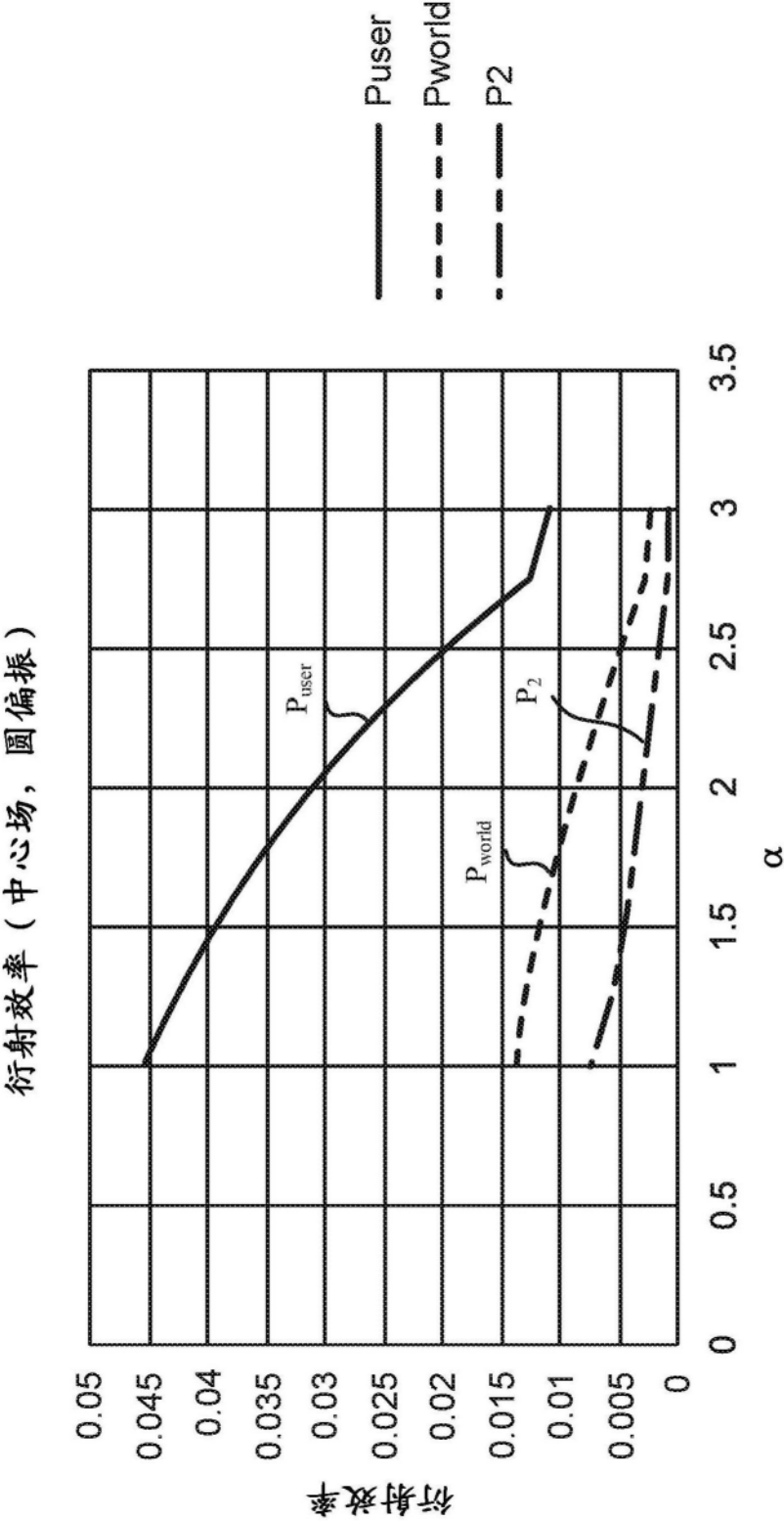


图18

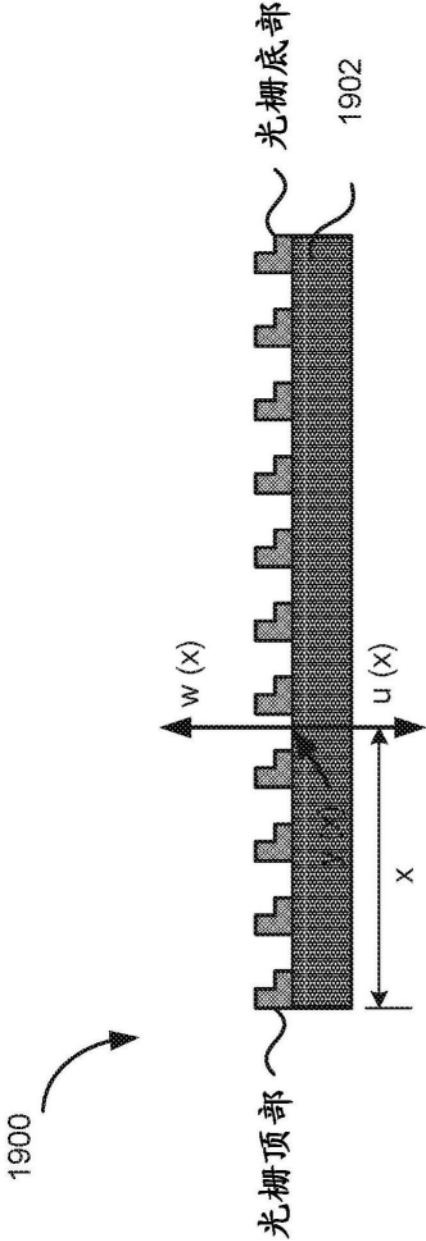


图19

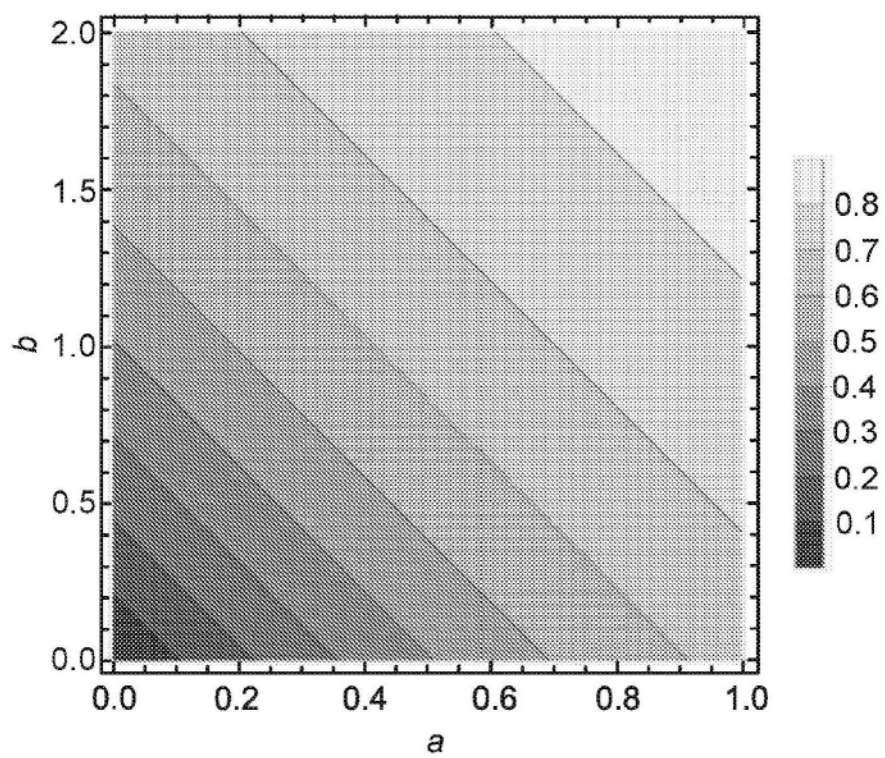


图20A

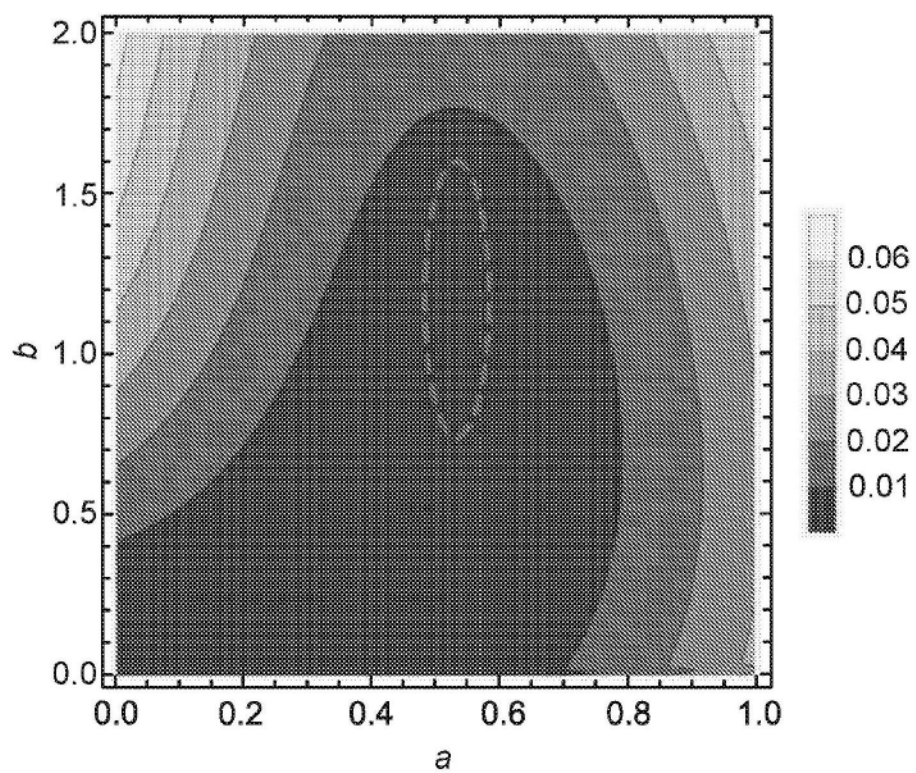


图20B

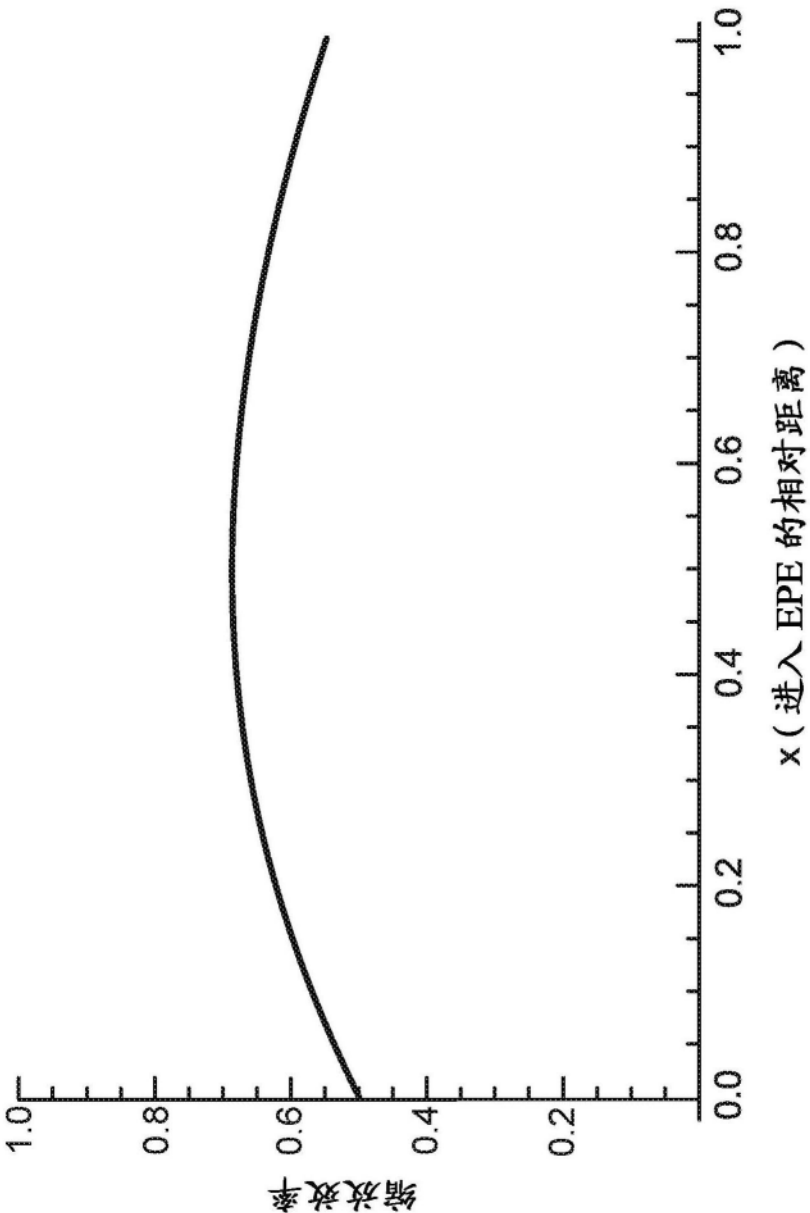


图21

