

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G01J 3/42 (2006.01)

G01N 21/31 (2006.01)

G02B 5/04 (2006.01)



# [12] 发明专利说明书

专利号 ZL 01802767.9

[45] 授权公告日 2006年9月6日

[11] 授权公告号 CN 1273807C

[22] 申请日 2001.1.18 [21] 申请号 01802767.9

[30] 优先权

[32] 2000. 1. 20 [33] US [31] 09/488,353

[86] 国际申请 PCT/US2001/001482 2001.1.18

[87] 国际公布 WO2001/053785 英 2001.7.26

[85] 进入国家阶段日期 2001.11.5

[71] 专利权人 普林斯顿大学理事会

地址 美国新泽西州

[72] 发明人 凯文·K·莱曼 保罗·拉比诺维茨

审查员 刘文治

[74] 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

代理人 马高平 杨 梧

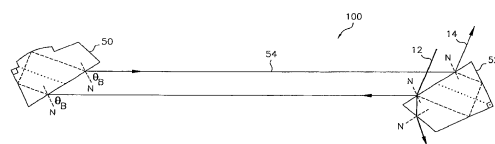
权利要求书 3 页 说明书 16 页 附图 12 页

## [54] 发明名称

基于布儒斯特角棱镜反射器回路衰减空腔光谱仪匹配模式

## [57] 摘要

一种具有一个光轴、用于回路衰减空腔光谱仪的稳定谐振器。该谐振器包括两个布儒斯特角反射棱镜，每个棱镜均有多个全内反射面，至少一个棱镜的其中一个全内反射面是一个曲面（磨砂抛光面或通过光学接触或胶合把一个平凸透镜附着于棱镜表面）。棱镜沿着谐振器光轴准直排列成一条直线。一个球面反射镜或透镜，倾斜离开光束正入射方向以产生预期的象散效果，并把光辐射匹配耦合进入谐振腔内部。一个或全部两个棱镜是可以旋转的，以便光线按相对于棱镜表面法线接近布儒斯特角的方向射入或离开棱镜的一个表面。这个特性既保持了棱镜之间的准直，又保证能够调节谐振器。



1. 一种用于回路衰减空腔光谱仪单元的谐振器，该谐振器带有一个光轴，该谐振器包括：
- 5 带有至少两个全内反射面的第一布儒斯特角反射棱镜，其中一个全内反射面为曲面；
- 带有至少两个全内反射面的第二布儒斯特角反射棱镜，该棱镜与第一反射棱镜沿着谐振器光轴准直排列成一条直线；以及
- 用来把光辐射耦合进入第一或第二棱镜两者之一中的象散光学元件。
- 10 2. 如权利要求 1 所述的谐振器，其中所述象散光学元件至少是一个透镜或一个反射镜，辐射透射在光学元件的一个表面上。
3. 如权利要求 2 所述的谐振器，其中所述象散光学元件有一个正焦距。
4. 如权利要求 1 所述的谐振器，其中所述光学元件是一个透镜或一个反射镜，具有负焦距，辐射透射在光学元件的一个表面上。
- 15 5. 如权利要求 4 所述的谐振器，其中所述光学元件设置成与所述谐振器的光轴形成一角度，以补偿模式象散。
6. 如权利要求 1 所述的谐振器，其中棱镜由以下材料之一制成：熔凝硅石、蓝宝石、金刚石、氟化钙、钇铝石榴石 (YAG)。
7. 如权利要求 1 所述的谐振器，其中所述光学元件设置成从所述光学
- 20 元件反射出来的光辐射具有一条弧矢光线和一条切向光线，从光学元件反射出来的光辐射在位置  $z_c$  处是一个圆形横截面，其中， $z_c = \pi\omega_{0s}\omega_{0t} / \lambda$ ；
- 这里  $\lambda$  为辐射波波长， $\omega_{0s}$  为弧矢光线的最小光点尺寸， $\omega_{0t}$  为切向光线的最小光点尺寸。
8. 如权利要求 1 所述的谐振器，其中每个棱镜的顶角约为  $135^\circ$  减去布儒斯特角，第二个角约为  $90^\circ$ ，第三个角约为  $180^\circ$  减去 2 倍的布儒斯特角。
- 25 9. 如权利要求 1 所述的谐振器，其中在第二布儒斯特角反射棱镜和光学元件之间，还包括一个有效输入腰点位于辐射的光轴上，该第二布儒斯特角反射棱镜包括一个光辐射谐振器进入点和一个谐振器腰点，其中，所
- 30 述谐振器进入点与谐振器腰点之间的距离和进入点与有效输入腰点之间的距离大致相等。

10. 如权利要求 9 所述的谐振器, 其中进入点与腰点之间的距离是光程, 该光程等于进入点与腰点之间的物理距离乘以第二布儒斯特角反射棱镜的折射率。

11. 如权利要求 1 所述的谐振器, 其中: 所述第一布儒斯特角反射棱镜具有两个全内反射面; 所述第二布儒斯特角反射棱镜具有两个全内反射面。

12. 一种带有一个光轴、用于回路衰减空腔光谱仪单元的谐振器, 该谐振器包括:

第一布儒斯特角反射棱镜, 包括:

- 10 (a) 至少两个全内反射面, 其中一个全内反射面为曲面;  
(b) 顶角约为  $135^\circ$  减去布儒斯特角;  
(c) 第二个角约为  $90^\circ$  ;  
(d) 第三个角约为  $180^\circ$  减去 2 倍的布儒斯特角;

15 第二布儒斯特角反射棱镜, 包括至少两个全内反射面, 该棱镜沿着谐振器光轴与第一布儒斯特角棱镜准直排列成一条直线; 和  
把光辐射耦合进入第一、二个棱镜其中之一的耦合装置, 即象散光学元件。

13. 如权利要求 12 所述的谐振器, 其中至少有一个棱镜是可以绕其轴旋转的, 所述轴垂直于所述谐振器的光轴的平面。

20 14. 如权利要求 12 所述的谐振器, 其中棱镜由以下材料之一制成: 熔凝硅石、蓝宝石、金刚石、氟化钙、钇铝石榴石 (YAG)。

15. 如权利要求 12 所述的谐振器, 其中所述耦合装置是一个聚焦透镜或一个反射镜其中之一, 位于所述第一或第二棱镜的输入表面的前面距离  $z_c$  处; 其中,  $z_c = \pi \omega_o \omega_{oi} / \lambda$ ;

25 这里  $\lambda$  为辐射波波长,  $\omega_o$  为弧矢光线的最小光点尺寸,  $\omega_{oi}$  为切向光线的最小光点尺寸。

16. 如权利要求 12 所述的谐振器, 其中所述耦合装置有用于补偿谐振器的象散的象散。

30 17. 如权利要求 16 所述的谐振器, 其中所述耦合装置至少是一个聚焦透镜或一个反射镜之一, 位于所述第一或第二棱镜的输入表面的前面距离  $z_c$  处; 其中,  $z_c = \pi \omega_o \omega_{oi} / \lambda$ ;

这里  $\lambda$  为辐射波波长,  $\omega_{0s}$  为弧矢光线的最小光点尺寸,  $\omega_{0t}$  为切向光线的最小光点尺寸。

18. 权利要求 17 所述的谐振器, 其中所述耦合装置具有一个正焦距。

19. 权利要求 16 所述的谐振器, 其中所述耦合装置为一个有负焦距的  
5 反射镜, 辐射透射在反射镜的表面上。

20. 如权利要求 19 所述的谐振器, 其中所述光学元件设置成与所述谐振器的光轴形成一角度, 以补偿模式象散。

21. 如权利要求 12 所述的谐振器, 其中所述曲面为球形曲面。

22. 如权利要求 12 所述的谐振器, 其中: 所述第一布儒斯特角反射棱  
10 镜具有两个全内反射面; 所述第二布儒斯特角反射棱镜具有两个全内反射面。

基于布儒斯特角棱镜反射器  
回路衰减空腔光谱仪匹配模式

5

本申请是于1999年10月4日在美国申请的部分继续申请，其美国专利申请号为No. 09/412,069，该申请是1997年10月21日申请的美国专利申请号为No. 08/955,126、现美国专利号为5,973,864的继续申请。

10

技术领域

本发明一般涉及吸收式光谱仪，特别是涉及使用布儒斯特角棱镜反射器的适用于回路衰减空腔光谱仪的模式。

15

背景技术

现在参照附图，其中相同的附图标记自始至终是指相同的元件，图1描述了一个位于对数尺度上的电磁波谱。光谱学研究光谱。与有关光谱学的其它研究相比，光学专门研究可见光和近可见光——一个可以获得的光谱范围中很窄的一部分，该可得的光谱的波长范围在约1毫米至1纳米之间。近可见光包括比红光更红(redder)的光(红外线)和比紫光更紫(more violet)的光(紫外线)。这个范围在可见光波段两侧都有足够远的延伸，但大部分由普通材料制成的透镜和反射镜仍对该光波段有效。必须经常考虑到材料的光学性能是依赖于光波长的。

25

吸收式光谱仪具有高光敏度，其响应时间为微秒量级，并且它具有抗破坏性，除了正在研究的物质以外其它各种种类分子的有限干扰。吸收式光谱学可以探测或识别各种不同的分子类型，尤其是简单分子类型，比如水。因此，吸收式光谱提供了一种探测重要微量物质类别的通用方法。在气体状态下，由于物质的吸收能力集中于一组尖(窄)光谱线，使得这种技术的灵敏度和选择性均发挥到最佳状态。光谱窄线可以用来区分识别大多数干扰物质。

30

在许多生产过程中，对流动气流中微量物质的浓度进行迅速、准确的测量和分析是十分必要的，因为污染物的浓度往往至关重要地影响成品的质量。例如，氮气 $N_2$ 、氧气 $O_2$ 、氢气 $H_2$ 、氩气Ar、氦气He用来制造集成电路，存在于这些气体中的杂质，比如水，即使只有十亿分之(ppb)几的含量水平也是有害的，它会减少集成电路合格品产量。因此，在需要高纯气体的半导体工业中，较高的灵敏度对生产者来说是非常重要的，借助于光谱学的高灵敏度性能能检测出水分杂质。在其它工业生产过程中，也有必要对各种各样的杂质进行检测。

光谱学可以在高纯气体中检测含量为百万分之(ppm)几的水份，在某些情况下，还能够获得十亿分之几(ppb)的检测灵敏度水平。因此，已有数种光谱学方法被用于监测气体含水量，包括：传统长通路元件[long path length cells]的吸收测定、声光光谱学、频率调制光谱学以及内腔激光吸收光谱学。但是，如莱曼(Lehmann)在美国专利号5,528,040的专利中所述，这些光谱方法具有多种特性，这使得它们在实际工业应用中是不切实际的和难以使用的。因此，它们在很大程度上仅限于实验室研究。

然而，空腔回路衰减光谱(CRDS, cavity ring-down spectroscopy)已成为一种重要的光谱技术被应用于科学研究、工业生产控制、大气微量气体监测。作为光吸收测定技术，已证实CRDS优于在低吸光度状态下灵敏度不很理想的传统方法。CRDS把高精密光学谐振腔中的光子平均寿命作为吸收灵敏度的可观测量。

一般地，谐振器由一对名义上相同的、窄带的、超高反射性介电反射镜形成，经适当配置形成一个稳定的光学谐振器。一个激光脉冲通过一个反射镜射入谐振器以经历一个平均寿命时间，该平均寿命决定于光子往返渡越时间(transit time)、谐振器长度、吸收横截面和物质的浓度数量、内部谐振器损耗因子(主要产生于当衍射损耗可忽略不计时，来自取决于频率的反射镜的反射率)。因此光吸收的测定由传统的功率比测量转化成了时间衰减测量。CRDS的最终灵敏度由谐振器内部的损耗量值决定，使用诸如精细抛光的技术生产的超低损耗光学器件可以使这个损耗值减至最小。

由于目前尚不能制造出具有足够高反射率的反射镜，因此，在应用高反射率介电反射镜的光谱领域内，CRDS的应用还有局限，这大大限制了该方法在大部分红外线、紫外线领域的使用。即使在有适当反射率的介电反

射镜的领域，每组反射镜也只能在小波长范围内有效，一般仅几个百分点的波长范围片段。而且，许多介电反射镜的制造需要使用一些材料，这些材料会随时间而变质，尤其是当暴露在化学腐蚀环境中时。这都限制或阻止了 CRDS 的许多潜在应用，很明显，目前谐振器的制造工艺急待提高。

- 5           A. 彼彼诺 (A. Pipino) 等人的文章：“带有一个全内反射微型空腔的损耗波空腔回路衰减光谱 [Evanescent wave cavity ring-down spectroscopy with a total-internal reflection minicavity]”。”  
[Rev. Sci. Instrum. 68 (8)]1997 年 8 月，阐述了一种改进的谐振器构造方法。这种方法使用了单块集成的、正多边形几何形（如正方形、八边形）的全内  
10 反射 (TIR) 回路谐振器，至少应有一个凸面以保证稳定性。一个光脉冲被邻近谐振器的外设第一棱镜全反射，产生的损耗波进入谐振器，通过光子隧道激发谐振器的稳定模式。位于谐振腔全反射表面附近的物质的吸收光谱可以从单块集成的谐振腔中的光子的平均寿命中获得，该平均寿命时间取  
15 决于检测器通过与另一个棱镜外部耦合接收到的信号的时间（还是一个设置在谐振器空腔附近的外设全反射棱镜）。因此，光辐射通过光子隧道进出谐振腔，该光子隧道对输入、输出耦合进行精确的控制。这样，CRDS 微型谐振器得以实现，TIR 环频谐振器将 CRDS 的适用概念延伸至稠密物质光谱学 [condensed matter spectroscopy]。TIR 的宽频特性克服了在传统气相 CRDS 中由非传导性反射镜造成的窄带宽的限制。但是，A. 彼彼诺 (A. Pipino)  
20 等人的工作只适用于 TIR 光谱，这从本质上就局限于短的总吸收路径 [short overall absorption path lengths]，于是也局限于大功率的吸收强度。比较而言，本发明具有长吸收路径，因而使探测微弱吸收强度成为可能。

- 同样可以由两个轴向交叉的布儒斯特角屋脊棱镜设置一个谐振腔，如高德 (Gould) 等人的文章“交叉屋脊棱镜干涉器”——  
25 [Apple. Opt., Vol. 1, 533-34 (1962)]——中所谈到的。其优点是对于棱镜的任何小的角度偏差它能保持对齐。这种谐振器的缺点在于其中一个棱镜的布儒斯特角必须由结构设定，也就是说布儒斯特角不能通过旋转棱镜对于波长调整。在一些应用中（例如在特定波长），这种谐振器的鲁棒校准是足够理想的，以至于调整布儒斯特角时能力缺陷是可容忍的。然而，布儒斯特  
30 角的不能调整性也限制了它的应用。而且，高德 (Gould) 等人描述的谐振器具有光不恒定性，且由于衍射，它不能用于低损耗谐振器。

## 发明内容

- 为克服这些公知方法的缺陷,从而改进谐振器的构造,一种适用于 CRDS 5 的新型高精密谐振器(或光学谐振器)应运而生,本发明的一个目的是:应用布儒斯特角棱镜反射器[prism retroreflectors]取代传统介电反射镜,从而使谐振器有所改进;一个相关的目的是消除在 CRDS 中使用的传统介电反射镜的窄带宽限制;另一个相关的目的是扩大 CRDS 的潜在应用类型范围。
- 10 本发明还有另一个目的是提供一种谐振器,即使放置在化学腐蚀环境中,该谐振器的制作材料也不会随时间产生显著的变质;一个附加的目的是通过棱镜的转动,能够调试或校准谐振器;本发明另外还有一个目的是提供一个革新的 CRDS 谐振器设计,能获得低的内部能量损耗,并且在光子衰减时间和吸收之间有明确定义的关系。
- 15 为实现这些及其它目的并达到预期效果,本发明提供一种稳定谐振器,具有一个光轴,用于回路衰减空腔光谱仪[a ring-down cavity spectroscopy cell]。该谐振器包括两个布儒斯特角反射棱镜,每个棱镜具体多个全内反射面。棱镜沿着谐振器的光轴排列。一个或全部两个棱镜可以独立旋转,以便于光线可以在相对于棱镜表面法线接近布儒斯特角的方向射入和射出棱镜表面。这个特性既保持了棱镜的对准,又保证能够调节谐振器。至少一个棱镜的其中一个全内反射面为曲面(或者是磨砂和抛光曲面,或者通过光学接触或胶合一个附加平凸透镜到它的表面,形成一个曲面)。或者,一个透镜中心位于谐振器的一条支路上,透镜以相对于谐振器光轴布儒斯特角倾斜。在优选实施例中,每个棱镜都有一个顶角约为 20 135° 减去布儒斯特角,第二个顶角约为 90°, 第三个顶角约为 180° 减去二倍的布儒斯特角。
- 30 本发明还提供一个用于回路衰减空腔光谱仪的谐振器,该谐振器有一条光轴,还包括一个带有一个内反射曲面的布儒斯特角反射棱镜、第二个沿着谐振器的光轴与第一个棱镜校准排列的布儒斯特反射棱镜、以及一个用于把光辐射耦合入谐振器的象散光学元件。

应当理解到对于本发明,无论前面一般性的描述还是下面的详细描述

都是举例性的，但并无局限性。

### 附图说明

- 5 当结合附图来阅读下面的详细说明时，会更好理解本发明。需要强调的是，根据惯例，附图中各种零部件并不合乎比例。相反，为使图片清晰，各零部件的尺寸还随意进行了放大或缩小。附图包括以下图面：
- 图 1 描述了一个位于对数尺度上的电磁波谱；
- 图 2 描述了一个棱镜的全内反射；
- 10 图 3 描述了光线穿过棱镜时产生的偏折；
- 图 4 描述了一个角隅反射镜[corner reflector]怎样将光线按初始入射方向准确反射回去；
- 图 5 描述了一个非偏振光束入射在一个玻璃表面上；
- 图 6 是一个透镜的侧视图，表示出子午光线，并描述了一个轴外物体
- 15 如何发生象散；
- 图 7 是图 6 透镜的俯视图，表示出弧矢光线，并描述了一个轴外物体如何发生象散；
- 图 8 是本发明所指的用于 CRDS 的改进的谐振器，该谐振器具有两个布儒斯特角反射棱镜；
- 20 图 9A 是一个图 8 所示的谐振器中所用的优选棱镜的俯视图，；
- 图 9B 是图 9A 所示棱镜的后视图；
- 图 10 描述了根据本发明，光线怎样以相对于法线接近布儒斯特角的方向射入棱镜并从棱镜的一个表面被折射出（熔融硅石玻璃制成的棱镜的角度是由计算得到的）；
- 25 图 11 描述了根据本发明，在一个曲率棱镜中的其中一个全内反射面；
- 图 12 描述了根据本发明，一个经光学接触或胶合后附着于棱镜表面的平凸透镜；
- 图 13 描述了根据本发明的另一个实施例，一个定中心于谐振器一条支路上的透镜，透镜以相对于谐振器光轴布儒斯特角倾斜；
- 30 图 14 描述了根据本发明的另一个实施例，一个耦合光辐射进入回路谐振器的轴外球面镜；

图 15 描述了根据本发明的另一个实施例，一个耦合光辐射进入回路谐振器的轴外球面透镜和一个反射面；

图 16 描述了根据本发明的另一个实施例，一个直接耦合光辐射进入回路谐振器的球面透镜。

5

## 具体实施方式

于 1997 年 10 月 21 日申请的美国专利，其美国专利申请号为 No. 08/955,126，现美国专利号为 5,973,864，在此引用作为参考。

10 下面即将给出的是与本发明有关的现代光学一般原理的综述导论。此综述将提供一个背景知识，以便对本发明有一个完整的理解。本领域技术人员可以从下一个部分开始阅读。

### I. 一般原理

15 光线从第一媒质射向光学密度更大的第二种媒质时，光线会朝靠近法线方向折射。从光密媒质射入光疏媒质的光线则朝远离法线方向折射。这里存在一个角，称为临界角 $\theta_c$ ，因此，对于所有的入射角大于这个临界角的情况，所有的光线都将反射，而不发生折射。这种效应称作全内反射(TIR)，并且这个效应发生在光学密度比界面外部大的材料内部。

20 棱镜是一种折射和反射类型的装置。如图 2 所示，棱镜 10 是一个光楔，它根据入射角的大小，可以使光线折射或全反射。图 2 所示的 45°角玻璃棱镜是很有用的，因为入射光线 12 垂直于一个表面射入，将会发生全反射并从另一个表面射出，光线方向改变了 90°。发生全反射是由于光线以 45°角投射到此光学元件的内表面上，这个角度比玻璃材料的临界角 41°大。线“N”  
25 代表表面的法线（垂直于该表面）。

如图 3 所示，以某一角度射向棱镜 10 的一个外表面光能，部分发生折射，部分被内表面反射后，如出射光线 14 所示再次折射出棱镜。这出射光线偏离了初始入射光线，以一个新的角度折射出棱镜。通常的结果是光线部分按照原来入射的方向折返回去。偏离的程度取决于棱镜折射率、入射  
30 角和棱镜的顶角。使入射光线 12 和出射光线 14 对称分布，则此时偏转角最小。越来越多的复杂棱镜采用反射来完成图像定位[image orientation]

中的复杂变换。例如，图 4 所示的角隅棱镜 10 具有这样的几何特性，它可以使光线沿入射方向返回（也就是说“回射光线”）。

就像所有的电磁辐射一样，根据电磁理论可以预言光线为横波：电场矢量和磁场矢量的振动方向垂直于传播方向（而不是像纵波那样平行于传播方向）。横波也具有一个特性：电场矢量的振动方向在波传播的各点相互平行（即，横波是定向的或偏振的）。在实际中，沿给定方向传播的非相干光（非激光）可能包括短的独立的波列，这些波列的振动平面相对于传播方向是随机定向的。这类光线虽然是横向的，但也属非偏振光。反射能够使光线部分或全部发生偏振。

10 图 5 描述了非偏振入射光线 12 在空气中投射到玻璃表面 16。玻璃的折射率  $n$  为 1.5。光线中每一个波列的电场矢量可被分解成两个分量：一个分量与图 5 入射平面垂直，另一个分量位于入射平面中。第一个分量，这里用黑点所示，为 S 偏振分量（源于德语 senkrecht，意为垂直）；第二个分量，用箭头表示，为 P（平行）偏振分量。平均来说，对于完全非偏振光线，  
15 这两个分量的振幅是相等的。

对于玻璃或其它介电材料，有一个特殊入射角，称作偏振角（由大卫·布儒斯特 David·Brewster 在实验中发现，因此也称布儒斯特角  $\theta_b$ ），这个角度对 P 偏振分量的反射系数为 0。因此，从玻璃表面反射的光线 18，尽管光强度低，但属于平面偏振光，它的振动面垂直于入射面。在偏振角处的 P  
20 偏振分量以折射角  $\theta_r$  全折射；S 偏振分量只发生部分折射。因此，高光强度的透射光线 20 是部分偏振光。

由于光线是一种波，当发生全反射时，它不会在反射界面的另一边突然消失，以阻尼非传播光波形式渗漏过界面并沿着界面出现，是一种渐隐波。如果另一个平面非常靠近界面，在光线的若干波长范围内时，这种渐  
25 隐波会转化为传播波，这个过程称作受抑全内反射。

材料往往对光是光学各向异性的。这种材料中，材料可能的三个独立方向的响应是不同的。比较而言，各向同性材料没有方向选择性。出于这种原因，认为材料在两个或三个方向具有相同的作用。第三个（唯一的）方向称作光轴。在广为熟知的单轴晶体材料中，光线以除了沿着光轴方向  
30 以外其它任何方向传播时会被分解成两个截然不同的单一偏振光；其中一个的电场方向与光轴垂直（寻常光），另一个的电场方向与光轴平行（异常

光)。这些偏振状态不同的光波在媒质中发生不同的折射，有不同的折射率，也就有不同的速度，这导致了光线的物理分离，称作双折射，或二次光折射。沿光轴传播的光线总是极化为与光轴垂直偏振，是纯寻常光波。更普遍的情况，虽然分析起来更复杂，三个空间方向（双轴系统）对光线作用不同，这就产生了类似的双折射。具有双折射性能的通常的材料有方解石、水晶石英、蓝宝石。

5 一个透镜 26（如图 6、7 所示，沿光轴 24 设置）将每一个物点 28 成像为像点 30。根据象散理论，轴外物点光线成像到不同的聚焦点。参照侧视图 6，考虑从物体顶部发出的光线 32。光线 32 位于一个子午面内，且不对称地穿过透镜 26。与此同时，如透镜 26 的俯视图 7 所示，来自同一点的另一组光线 34 位于一个弧矢面内，它们对称地投射到透镜 26 上。两个平面内光线组的聚焦点是分离的，弧矢光线组 34 的聚焦点比子午光线组 32 的聚焦点位于离透镜 26 更远距离处。

10 测试象散的一个简单方法就是使用点测试图。在子午焦面和弧矢焦面上，会出现测试点图的两组不同的像光斑。在子午焦面上，点切向模糊，而在弧矢焦面上，点成放射状模糊并形成指向光轴的小箭头（“弧矢 [sagittal]”一词的拉丁语原意为箭头）。这种象散的发生是由于使用了球面对称透镜。只有当透镜没有其它像差，如球差和彗差时，用这种方法才能看到这些效果。球差导致周边光线比傍轴光线聚焦到更接近透镜的位置；慧差是这样一种像差，它使得斜光线根据其穿过透镜部位的不同，有不同的聚焦点。

## II. 本发明的谐振器

25 本发明为 CRDS 提供了一种改进谐振器 100，它使用了两个布儒斯特角反射棱镜 50、52，棱镜由高级光学材料制成。图 8 是棱镜 50、52，光轴 54，每个棱镜 50、52 中的光路的示意图。假设棱镜 50、52 由熔融硅石材料制成，虽然（将在下面进行讨论）其它材料也能用来制作棱镜，在图 8 中画出了那个特殊角。入射光线 12 和出射光线 14 在棱镜 52 中相应地分别标示为入射箭头和出射箭头。谐振光束在棱镜 50、52 中，以  $45^\circ$  角的位置经历两个全内反射而没有损耗，这个  $45^\circ$  角大于由熔融硅石和其它别的普通光学棱镜材料制成的棱镜的临界角。

30 谐振器的光损耗原理上主要由以下原因造成：

- (1)由于棱镜 50、52 表面上的瑕疵和尘土产生的散射；  
 (2)由于棱镜基质材料的应力或棱镜光轴未准直，在光学材料中存在残留双折射；  
 (3)棱镜 50、52 的耦合面的平行误差；  
 5 (4)偏离布儒斯特角；  
 (5)由于吸收或散射导致在棱镜基质内部的光传输损耗。

棱镜 50、52 可制作成对一个宽光谱范围内有很小的损耗（即：每个行程小于 0.01%）。另外，许多用做棱镜基质的最理想材料，包括熔融硅石、蓝宝石、金刚石、钇铝石榴石 (YAG) ——但并不仅仅局限于这些材料——都  
 10 十分坚硬且具有化学惰性，适用于恶劣环境。因此，由棱镜 50、52 构成的用于 CRDS 的谐振器 100，将满足并大大扩展 CRDS 的应用范围。

### III. 本发明的棱镜设计

棱镜 50、52 的优选设计如图 9A、9B 所示。以此为例，棱镜 52 的第一面为 1，第二面为 2，第三面为 3，第四面为 4。图 9A 是棱镜 52 的俯视图，  
 15 给出了各面的优选长度，分别为面 1 (25.8mm)、面 2 (15mm)、面 3 (19mm)。图 9B 是棱镜 52 的后视图，给出了面 2、3、4 的优选高度均为 12.5mm，面 3、4 的优选宽度之和为 25.4mm。

使用相对周围媒介的折射率为  $n$ （即， $n = n_2 \div n_1$ ，这里  $n_2$  为棱镜折射率， $n_1$  为棱镜周围媒质的折射率，特别当周围媒质为空气时， $n_1 = 1$ ）的材料制成的棱镜，布儒斯特角  $\theta_B$  取决于  $n$  的反正切。例如，图 9A、9B 所示棱镜 52  
 20 中  $n$  的值约为 1.4607； $\theta_B$  约为  $55^\circ 36'$ 。棱镜 52 有一个约为  $0.532 \mu\text{m}$  的设计中心。棱镜 52 的顶角  $\theta_1 = 135^\circ - \theta_B$ ，在优选的实施例中，该角约为  $79^\circ 24'$ 。角  $\theta_2$  优选的角度约为  $90^\circ$ 。角  $\theta_3 = 180^\circ - 2\theta_B$ ，该角在优选实施例中约为  $68^\circ 48'$ 。

如图 10 所示，入射光线 12 进入棱镜 52，并以相对于面 1 法线 N 接近布儒斯特角的方向（有一个微小的偏差  $\delta$ ）从面 1 离开棱镜，如出射光线  
 25 14 所示。这造成了 P 偏振光相对布儒斯特角面的小而可控的反射损耗。例如图 10 所示棱镜 52 的  $n$  值约为 1.45047； $\theta_B$  约为  $55^\circ 25'$ 。棱镜 52 有一个  $1 \mu\text{m}$  的设计中心。任何 S 偏振光辐射由于大反射损耗而迅速衰减。符号  $\omega$  表示光束发出的光点的大小；光束的消波 [clipping] 可忽略。最低阶模式 [the  
 30 lowest order mode] 的光点大小可根据标准光学谐振器理论计算得到。如图 10 所示的棱镜 52，顶角  $\theta_1$  优选角度约为  $79^\circ 35'$ （或  $79.58^\circ$ ）。角  $\theta_2$  优选角

度约为 $90^\circ$ 。角 $\theta_3$ 约为 $69^\circ 10'$ （或 $69.17^\circ$ ）。

#### IV. 制造材料

5 如何选择棱镜 50、52 的理想制造材料取决于它们特定的应用。为了能够对表面进行抛光以达到要求的公差，就需要一种坚硬并具有化学稳定性的基质材料。另外，要求材料在一定的光谱范围内具有低吸收和低散射损耗。虽然目前有五种已知适用的基质材料：熔凝硅石、蓝宝石、氟化钙、金刚石、钇铝石榴石 (YAG)，但本发明并不限于这些特定的材料。

10 熔氧化硅是一种非常好的材料，它广泛应用于光学工业，用来制作精密光学元件。它在一个大的波长范围内有低吸收损耗。但是，作为玻璃，它在分子水平上无序凝固，这导致了显著的瑞利散射损耗，尤其是在紫外区域。

15 单晶蓝宝石基质作为一种适用材料也可用来制造精密元件。与熔凝硅石相比，蓝宝石具有一个更宽的低吸收损耗光谱范围；质量极高的实施例样品，在可见光到近紫外区域内，其散射损耗是可以忽略不记的。蓝宝石是双折射材料，用来避免由于在谐振器内部偏振光的旋转（旋光）而导致的额外损耗，唯一的光轴必须沿图 9 中平面的垂轴线设置。这样便可以达到公差的要求。蓝宝石的天然双折射性能十分有益，因为这种材料不容易受到由于应力双折射产生的损耗影响，一般地，该应力双折射是由棱镜机械安装的不完善造成的。

20 在许多实际应用中，蓝宝石都可作为适用的选择材料。金刚石在许多方面也是理想的基质材料，除却本身昂贵的价值和不菲的加工费。

#### V. 调试

25 使用屋脊反射镜，避免了棱镜光学谐振腔因棱镜绕屋脊线的微量旋转产生的准直迟钝现象，使得它更具有高的准直性。这样一个谐振器可由使用了光轴垂直交叉的布儒斯特角屋脊棱镜构成。它的优点是保证了棱镜发生任何小角度偏离时的准直性；缺点是其中一个棱镜的布儒斯特角必须经过结构来设置，也就是说布儒斯特角不能通过绕屋脊轴旋转棱镜来调制。本发明的谐振器 100 避免了这个缺点。

30 谐振器的品质因素可用  $Q$  来表示，定义为每周期存储能量除以损耗的能量。谐振腔的  $Q$  值越高，谐振器存储能量的性能就越好，于是致使空腔低频光谱仪的灵敏度就越高。根据本发明，谐振器通过倾斜棱镜 50、52 调

整反射损耗而对 Q 值和耦合进行控制。每一个玻璃表面的反射损耗取决于菲涅耳法则，损耗值约为  $10^{-4} \delta\theta^2$ ，这里的  $\delta\theta$  为偏离布儒斯特角的大小。

光线在棱镜表面 2、3 经历两次内部反射，然后在面 1 透射离开棱镜 50、52。若  $\theta_2$  设置成  $90^\circ$ ，如果限于图 9A 所示的平面中，棱镜 50、52 的入射光线 12 和出射光线 14 就是平行的，但会发生位移。入射光线 12 和出射光线 14 的入射出射角度是相同的，并且能通过绕垂直于图 9A 所示平面的轴 R 旋转棱镜来调节。在通常意义上，罗克威尔 (Rockwell) 在他的专利文献中对一种提供了用于旋转棱镜的机械结构进行了阐述，参见美国专利号 5,483,343，图 3 第 7 栏第 14—30 行。可以知道，棱镜 50、52 已经获得校准，因此，形成  $90^\circ$  夹角的屋脊线垂直于图 9A 所示的平面。当这两个棱镜 50、52 转动时，内部反射的入射角在一个平面上增大多少，在另一个平面上便相应地减少多少。要使两个棱镜的全内反射角基本相等，棱镜顶角  $\theta_1$  应当设置为等于  $135^\circ - \theta_2$ 。

由熔融硅石材料制成的棱镜，随着波长变化范围从近红外线到真空紫外线 (200nm)，棱镜布儒斯特角的变化范围是  $55.5^\circ - 57.1^\circ$ ，临界角的变化范围是  $43.4^\circ - 40.31^\circ$ 。因此，在那个波长变化范围内，将棱镜倾斜以构成布儒斯特角，这样一对棱镜 50、52 就可以设计产生全内反射。选择  $\theta_3$  的大小为  $180^\circ - 2\theta_2$ ，一束由平面 1 反射耦合进入谐振器的光束，在晶体中传播，以接近布儒斯特角从平面 4 射出棱镜。这样会减少棱镜内部反射的光能，这可能是一个不希望有的杂散光源。

#### VI. 稳定性控制

光学谐振器 100 由一对作为反射镜的棱镜 50、52 构成。为使光学谐振器 100 稳定，从而控制光束在往复反射时的衍射，至少其中一个棱镜的一个全内反射面应为曲面。参见图 11 所示棱镜 50 的面 2 上的曲面 60。

为矫正因曲面上以近  $45^\circ$  角发生的反射和布儒斯特角面而导致的象散 (astigmatism)，曲面 60 的子午曲率必须为  $2n^2\sqrt{2}f$ ，弧矢曲率 (即，垂直于图 11 纸面的平面上的曲率) 必须为  $\sqrt{2}f$ ，这里的  $f$  是曲面 60 的有效焦距。为使谐振器 100 达到接近半共焦或折叠共焦，应选择焦距  $f$  使其与棱镜 50、52 之间的距离大致相等，在优选实施例中这个距离约为 1 米。

具有象散补偿能力的谐振器 100 有稳定的谐振模式，这些谐振模式是圆柱型对称的，它简化了用于将光辐射耦合进入谐振腔 100 的模式匹配光

学设计。意识到这样一个棱镜 50 的构造比较复杂，因为它的表面要抛光，要安置一个曲率精确的散射透镜到其中一个棱镜表面的中心。安置在一个棱镜表面上的一个简单球面，如表面 2，曲率选定为它可用于稳定具有弧矢偏离谐振器光轴 54 的光线。尽管有微小的偏离光轴 54，谐振器 100 内部的  
5 聚焦元件可以补偿因制造产生的角度误差和棱镜 50、52 定位误差，并保持稳定和低损耗。在后一种情况下，谐振器的固有模式不是圆柱型对称的。

或者，如图 12 所示，棱镜 50 的制造可通过下面一个两步程序来简化：首先，棱镜 50 制成纯平面 1、2、3 和 4，然后用与棱镜 50 相同的材料制作一个平凸透镜 70，并具有适当的象散 (astigmatism)。透镜 70 的平面与一个棱镜表面 (如表面 2) 光学接触。当光学接触后，两个元件间的界面消失，  
10 既消除了损耗，又获得了相当于单块集成装置 (完整的或单片的) 的光学性能。当工作于近红外线和可见波长时，有一种比光学接触更简化的办法，即用折射系数匹配的光学胶合剂 80 将透镜 70 胶合在棱镜 50 的表面 2 上。

另一种调整方式如图 13 所示，将透镜与棱镜 50 或 52 完全分离开。在  
15 这种情况下，散射透镜 90 定中心于回路谐振器 100 的一条支路上，透镜与光轴 54 成布儒斯特角倾斜，没有反射损失。弧矢曲率和子午曲率安排用做散射补偿并选定适当的曲率以保持光学稳定。如下面所述，耦合发生在棱镜 50、52 的平面 1、2、3 其中的一个表面上。

在第一个实施例中，一对具有布儒斯特角界面的直角棱镜组成了谐振  
20 器 100 的反射光学系统。应理解，一般该谐振器模式为立体椭圆形。透射过布儒斯特角面时以及以非垂直角度从全反射曲面反射时都将引入象散 (astigmatism)，以保证谐振器光学稳定性。在图 8 所示的优选实施例中，象散曲面 60 (如图 11 所示) 经抛光成在棱镜 50 的矫正面 [corrective surface] 用做补偿象散和修正模式循环。这是为了当使用圆形激光光束时，  
25 可以提高耦合效率，减少谐振器循环衰减的不稳定性。然而，要将棱镜表面以一定的精度抛光为无象散面是昂贵的，该精度要求能将圆形激光光束匹配进谐振腔。还有一个办法，成本相对也比较昂贵，就是使用一个有象散透镜的望远镜来解决问题。

一种更有效、灵活地解决耦合问题的方法如图 14 的实施例所示。考虑  
30 谐振器 100 的实施例，将球形曲面 60 经抛光为棱镜 50 的一个内部反射面。因为当光线以  $45^\circ$  或近  $45^\circ$  的入射角投射到球形曲面上时，发生象散，切向光

线（在图示平面内）的光点最小值 $\omega_{or}$ 小于弧矢光线（垂直于图示平面的平面内）的光点最小值 $\omega_{os}$ 。切向光线光点 $\omega_{or}$ 和弧矢光线光点 $\omega_{os}$ 的准确值可利用 ABCD 矩阵来计算，参见加拿大 Sausalito 1986 年版《大学科学丛书》820 页，A. Siegmann 所著《激光》一文中的方程式 14、15。

5 因为无论进入或离开谐振器，谐振器模式的角散大于切向光线，这切向光线的光点在谐振器腰 94 小于弧矢光线的光点，所以光束在切线方向增长得更快。如图 14 所示，谐振器腰 94 是一个位于接近棱镜 52 中心的平面，棱镜 52 全部由平面组成，是谐振器 100 的光学中心。由于这种增长上的不同，在谐振器 100 外部的某个特定点处两组光线：切向光线的光点和弧矢光线的  
10 光点大小相等，光束为圆形。这个点的位置可根据谐振器参数计算得到，尤其是谐振器模式下弧矢光线和切向光线的瑞利范围。在图 14 中，对于入射光线 12，谐振器腰 94 位于表面 1 后面一定距离处，表面 1 将入射光束 12 反射进入谐振器 100。因此，在谐振器外部，有一个有效入射光线腰 96，它距表面 1 的光程与谐振器腰 94 距表面 1 的光程相等，这个腰 96  
15 是谐振器的真正的腰。

有效入射腰 96 与进入点 102 之间的距离是取决于谐振器腰 94 与进入点 102 之间的光程。这个光程是谐振器腰 94 与进入点 102 之间的物理距离，乘以棱镜 52 的折射率。在优选实施例中，谐振器腰 94 与进入点 102 之间的光程，和有效入射腰 96 与进入点 102 物理距离大致相等。这是因为谐振  
20 器 100 在空气中，空气折射率为 1。若谐振器 100 处于不同于空气的一种媒质中，有效入射腰 96 与进入点 102 之间的光程就要取决于这种媒质的折射率。在这种情况下，有效入射腰 96 与进入点 102 之间的光程，与谐振器腰 94 与进入点 102 之间的光程大致相等。

从图 14 也可以清楚地看出，适当地交换象散光学元件 92 的位置，可  
25 以将入射光线和出射光线相互交换。此外，可以使用带有曲面 60 的棱镜 50 作为耦合棱镜。这必需要将象散光学元件 92 更接近谐振器 100 放置，由于带有曲面 60 的棱镜 50 离谐振器腰更远。这样，整个装置就设计得更小巧了。

为了计算位置 96（在这一点，弧矢光线和切向光线的光点大小相等），  
30 可采用如下方程式，这些方程式描述了在傍轴近似范围内高斯光束的传播。瑞利范围 $z_0$ 已在方程式(1)中给出。

$$(1) \quad z_0 = \pi \omega_0^2 / \lambda$$

这里  $\omega_0$  为谐振器腰 94 处光点最小值 (光点的尺寸是光场降至它的最低阶模式 [the lowest order mode] 峰值的  $1/e$  时, 光束的半径),  $\lambda$  为光波的波长。传播模式中, 在其它任意位置光点尺寸的平方在方程式 (2) 中给出:

$$5 \quad (2) \quad \omega^2 = \omega_0^2 \left[ 1 + (z/z_0)^2 \right]$$

这里  $z$  为从腰起始的距离。最后, 光场在距腰距离为  $z$  处的曲率半径  $r$  的范围在方程式 (3) 中给出:

$$(3) \quad r = z_0 \left( z/z_0 + z_0/z \right)$$

若将方程式 (2) 用于弧矢光线、切向光线, 并将它们列成一个等式, 便  
10 得到方程式 (4):

$$(4) \quad \omega_{0s}^2 \left[ 1 + (z/z_{0s})^2 \right] = \omega_{0r}^2 \left[ 1 + (z/z_{0r})^2 \right]$$

将方程式 (1) 代入方程式 (4) 中的  $z_{0r}$  和  $z_{0s}$ , 得到关于距离  $z_c$  的方程式 (5),  $z_c$  给出了从腰到等尺寸光点 (圆形光束) 的距离。

$$z_c = \pi \omega_{0r} \omega_{0s} / \lambda$$

15  $z_c$  等于光束光点的瑞利范围, 光点尺寸是切向光线和弧矢光线光点大小的几何平均值。

第二步是在光点大小相等处放置一个具有光学功能的透镜或反射镜 92, 然后调节入射角  $\theta$ , 补偿模式象散。为了理解透镜或反射镜的补偿作用, 我们可以设想一个圆形光束进入谐振器, 并使它象散以便符合谐振器模式;  
20 或反过来, 考虑离开谐振器的象散 (astigmatic) 模式, 并将它转化成  
一个圆形高斯模式。为了方便起见, 我们假设光束离开谐振器, 但应该知道  
逆过来的结果也是成立的。为这个目的, 要求光学元件对出射光束中的切  
向光线和弧矢光线有相等的曲率半径。这样便可以确保从那点起, 能始终  
保持圆形模式, 假设在光路上没有其它附加的象散元件。配合不同的光点  
25 大小和曲率的进一步模式, 使用望远镜或其它相关技术, 可以很容易地借  
助圆形光束实现。非垂直入射到一个透镜上或切向光线和弧矢光线在反射  
镜中的简单方程式分别如公式 (6)、(7):

$$(6) \quad 1/r_{er} = 1/r_{ir} - 1/f \cos \theta$$

$$(7) \quad 1/r_{es} = 1/r_{is} - \cos \theta / f$$

30 这里  $r_{er}$  和  $r_{es}$  是出射切向光线和出射弧矢光线的曲率半径,  $r_{ir}$  和  $r_{is}$  是入射光线的曲率半径,  $f$  是透镜或反射镜的焦距,  $\theta$  是入射角。在聚焦透镜或反

射镜中， $f$ 为正值。传播方向中，发散光束的曲率半径为正值，会聚光束的曲率半径为负值。将方程式(3)的入射曲率半径值代入方程式(6)和(7)，再将它们列成等式，便得到计算 $f$ 和 $\theta$ 值的方程式(8)，此时光线具有相等的出射曲率半径，因此是一束圆形光束。不过，我们仅限于物理解，角 $\theta$ 的范围是 $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ ，即 $0 \leq \cos \theta \leq 1$ 。

$$(8) \quad \cos^2 \theta + f \cos \theta (\omega_{0s}^2 - \omega_{0r}^2) / [z_c (\omega_{0s}^2 + \omega_{0r}^2)] - 1 = 0$$

用 $\alpha$ 代替 $\omega_{0s} / \omega_{0r}$ ，值永远大于1，二次方程式可改写为方程式(9)：

$$(9) \quad \cos^2 \theta + f \cos \theta (\alpha^2 - 1) / z_c (\alpha^2 + 1) - 1 = 0$$

二次方程式(9)的通解如方程式(10)所示：

$$(10) \quad \cos \theta = \frac{-f(\alpha^2 - 1)}{2z_c(\alpha^2 + 1)} \pm \left[ \frac{f^2(\alpha^2 - 1)^2}{4z_c^2(\alpha^2 + 1)^2} + 1 \right]^{1/2}$$

根号里面部分的数值永远为正，因为它们都是实数的平方。关于正值 $f$ ，容易看出无论 $f$ 取何值， $\cos \theta$ 在0到+1之间只有唯一解，因此，入射角 $\theta$ 存在，这满足了方程，也产生了一条圆形光束。关于 $f$ 的负值，不存在角 $\theta$ 。但是，例如如果愿意把光线反射出平面，我们还可以将光束反射出平面，如图14所示，转动反射镜92，使光束反射出纸面，于是反射镜的弧矢焦距和切向焦距互换了，一个负焦距的反射镜便可以用来产生圆形光束了。

为避免掠入射反射或透射，以及超出傍轴近似值的情况发生，透镜或反射镜92的焦距不宜过小或过大。在优选实施例中，为满足上述要求，入射角 $\theta$ 小于约 $60^\circ$ ，透镜或反射镜92的焦距选择适宜并满足上述条件。

现在参考附图15，它描述了本发明的另一优选实施例。球形透镜200以角 $\theta$ 入射光束12，其插入入射光束中。为使入射光束12与光轴54基本平行，一个反射镜202（例如一个反射镜）在光束12穿过球形透镜200后改变它的方向，使其投射向谐振器100的棱镜52。在这个实施例中， $z_c$ 为球形透镜200到有效腰96的距离。另外，反射镜202的角度可以是任意的，只要使入射光束12投射到反射镜202的一个反射表面上。需要指出的是，反射镜202不是必备装置，可以移除。在这种情况下，球形透镜200直接放置在了入射光束12的路径上，参见附图16。

辐射可通过两种途径被耦合进入谐振器100：受抑全内反射可应用到平内反射表面2或3中的其中一个表面上——或者棱镜50、52可细微倾斜偏

离布儒斯特角——从而在表面 1 上耦合。第二种方法从技术上讲比较简单，但在已知耦合参数处损耗为原来的 2 倍。如果光线单向耦合进入谐振器 100，谐振器形成回路，而且没有驻波。因此，当棱镜的平面绕屋脊轴转动而偏离布儒斯特角以实现耦合，从同一平面出射的光线与入射光线空间分离，  
5 以便使弱出射光束与强入射光束分离。

回路谐振器 100 还有某些附加的优点，它极大地减弱了反馈回辐射源的光辐射水平。这种反馈会潜在地破坏要求使用高精度光学隔离器的激光源的稳定性，这个隔离器本身的光谱频带又有限制，并且给整体系统带来复杂性和高成本。根据本发明，谐振腔 100 首次构造成了宽带宽的 CRDS 谐  
10 振器。很明显，谐振腔 100 会拓展 CRDS 光谱仪科学及商业应用。宽光谱带宽的改进的 CRDS 谐振器将会促进多种传感器的发展。

虽然这里通过参考某一特定的实施例对本发明进行了图解说明和描述，但本发明并不仅限于所描述的这些细节。而且，在不脱离本发明实质的前提下，在权利要求的等效范围内，还可以有各种具体的细节改进措施。

15

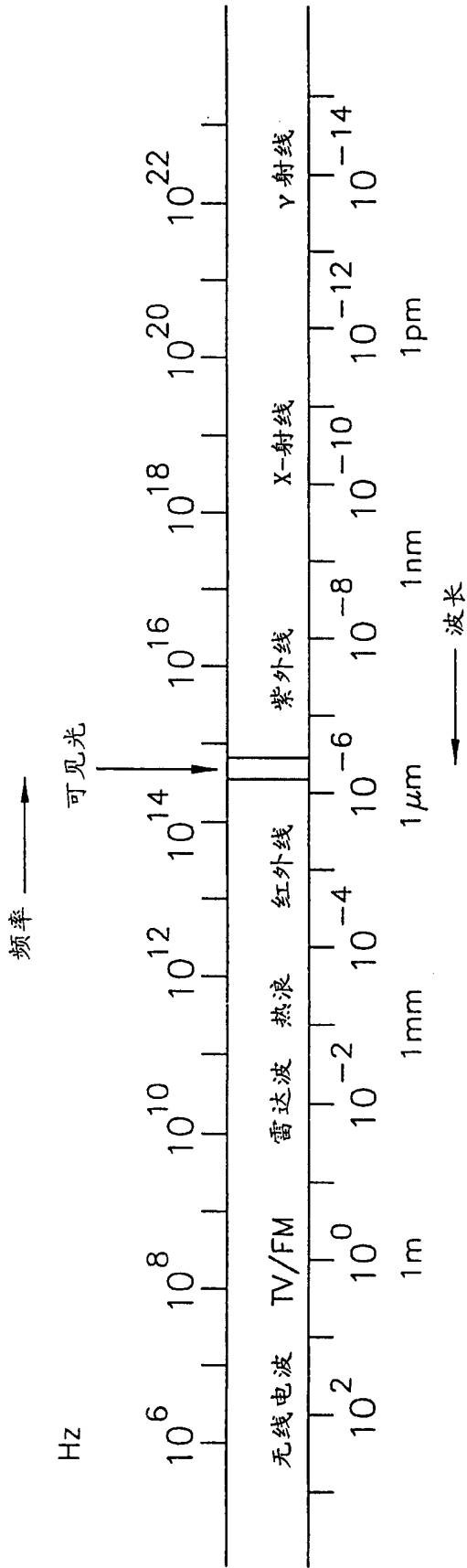


图 1

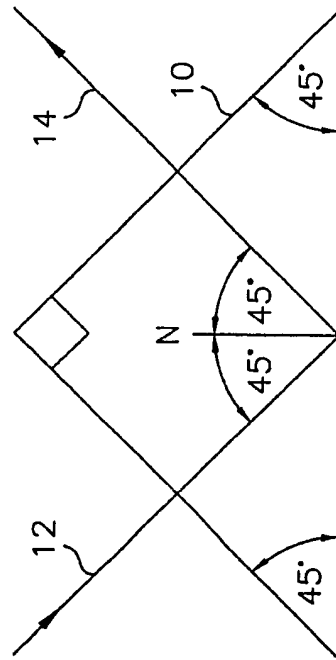


图 2

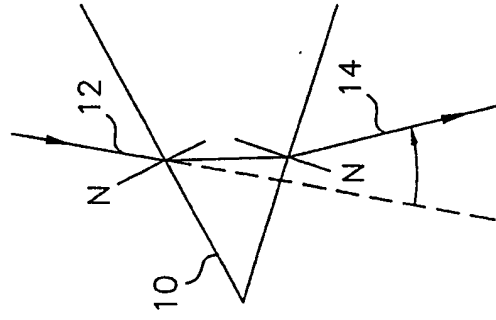


图 3

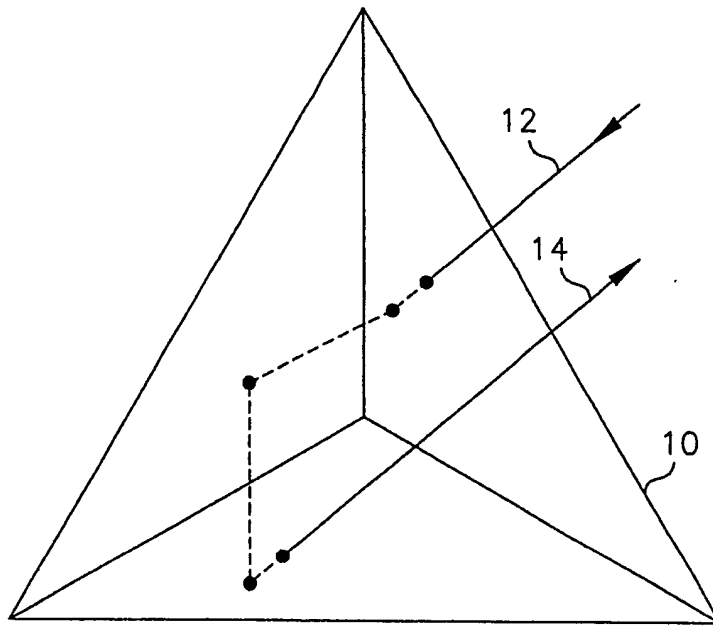


图 4

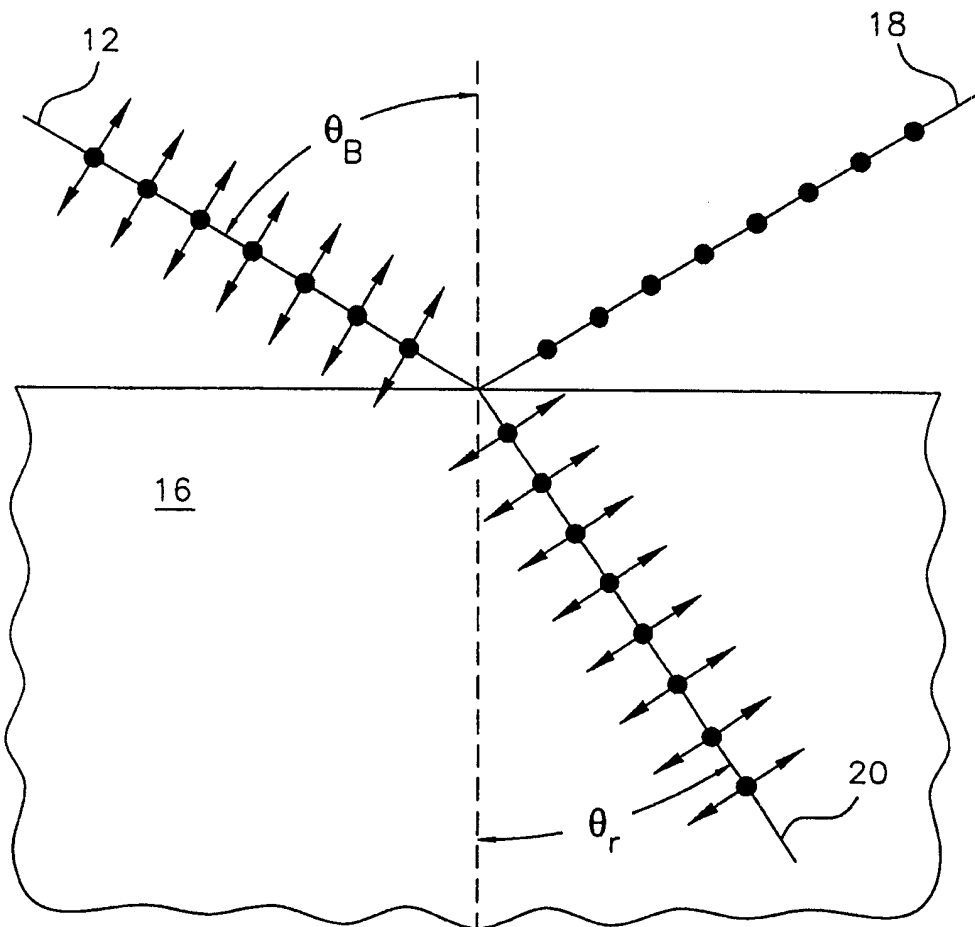


图 5

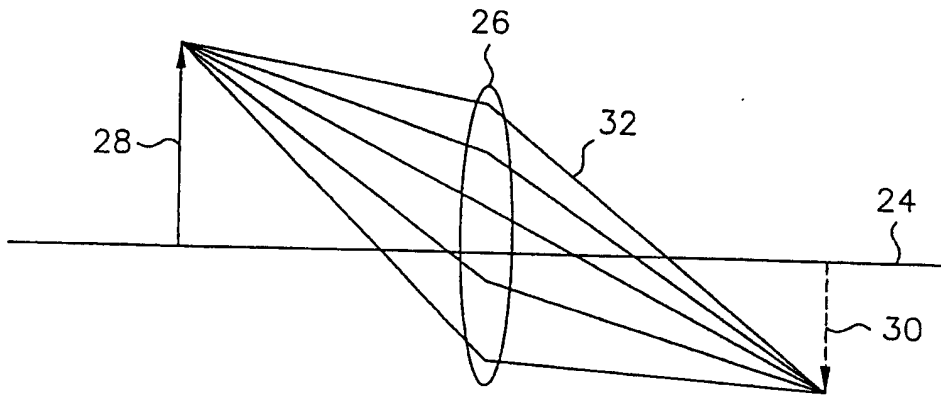


图 6

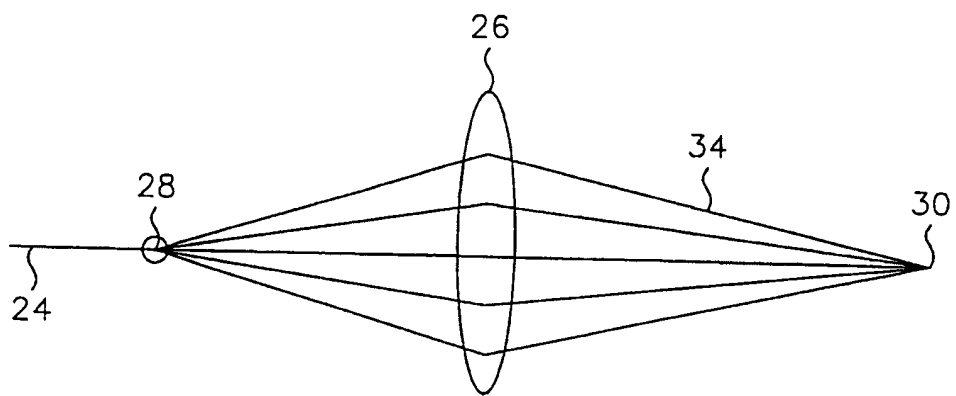


图 7

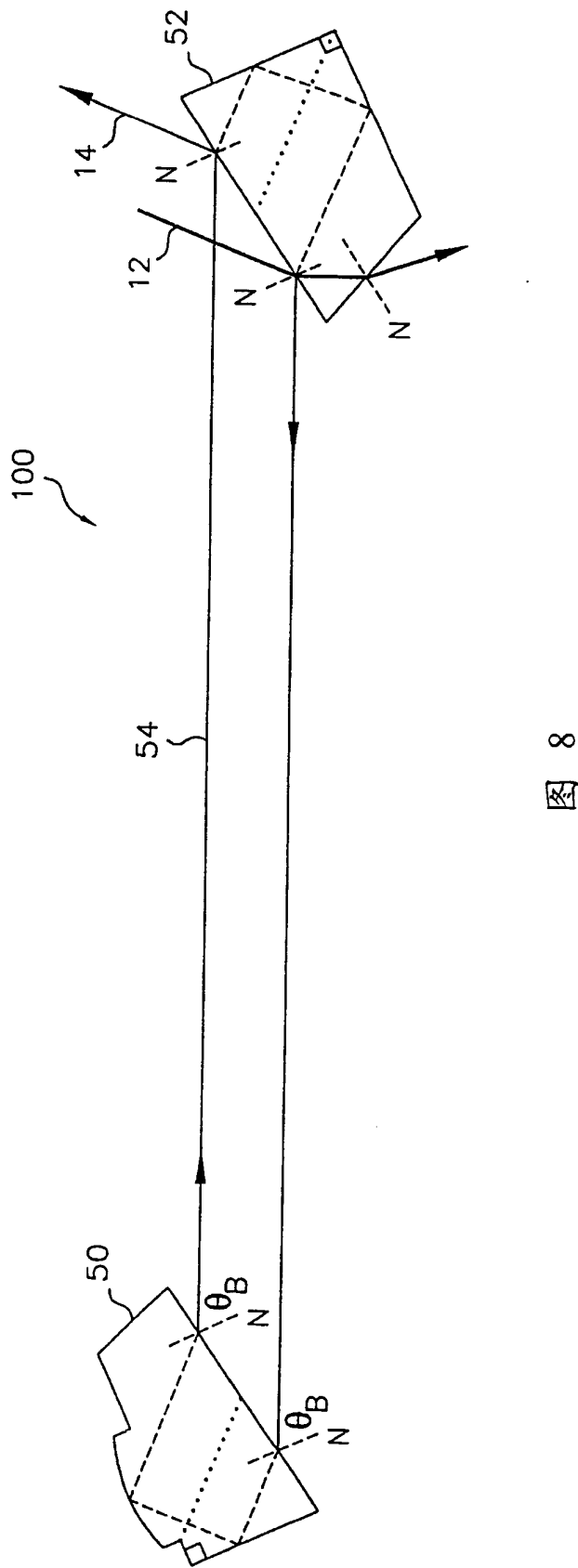


图 9A

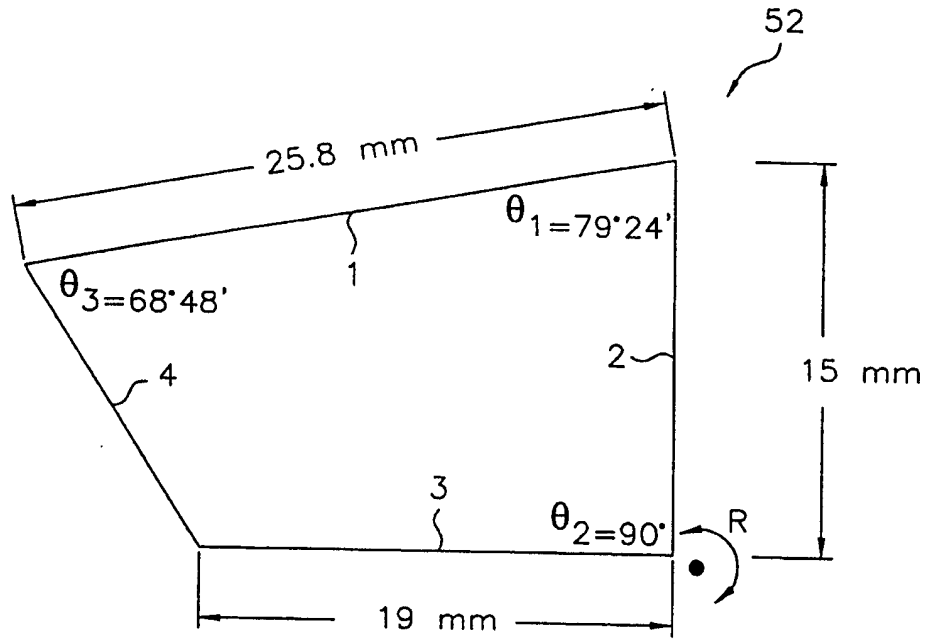
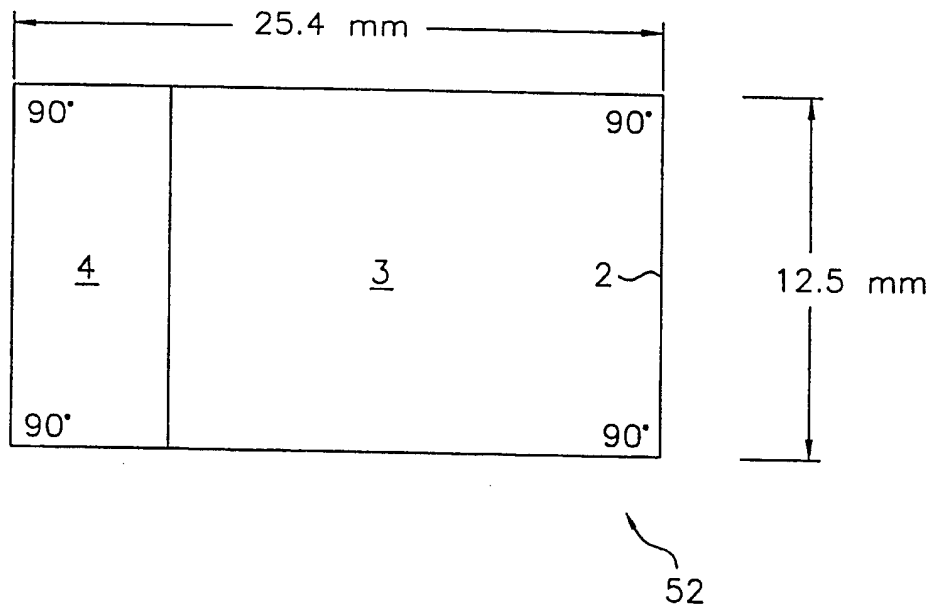


图 9B



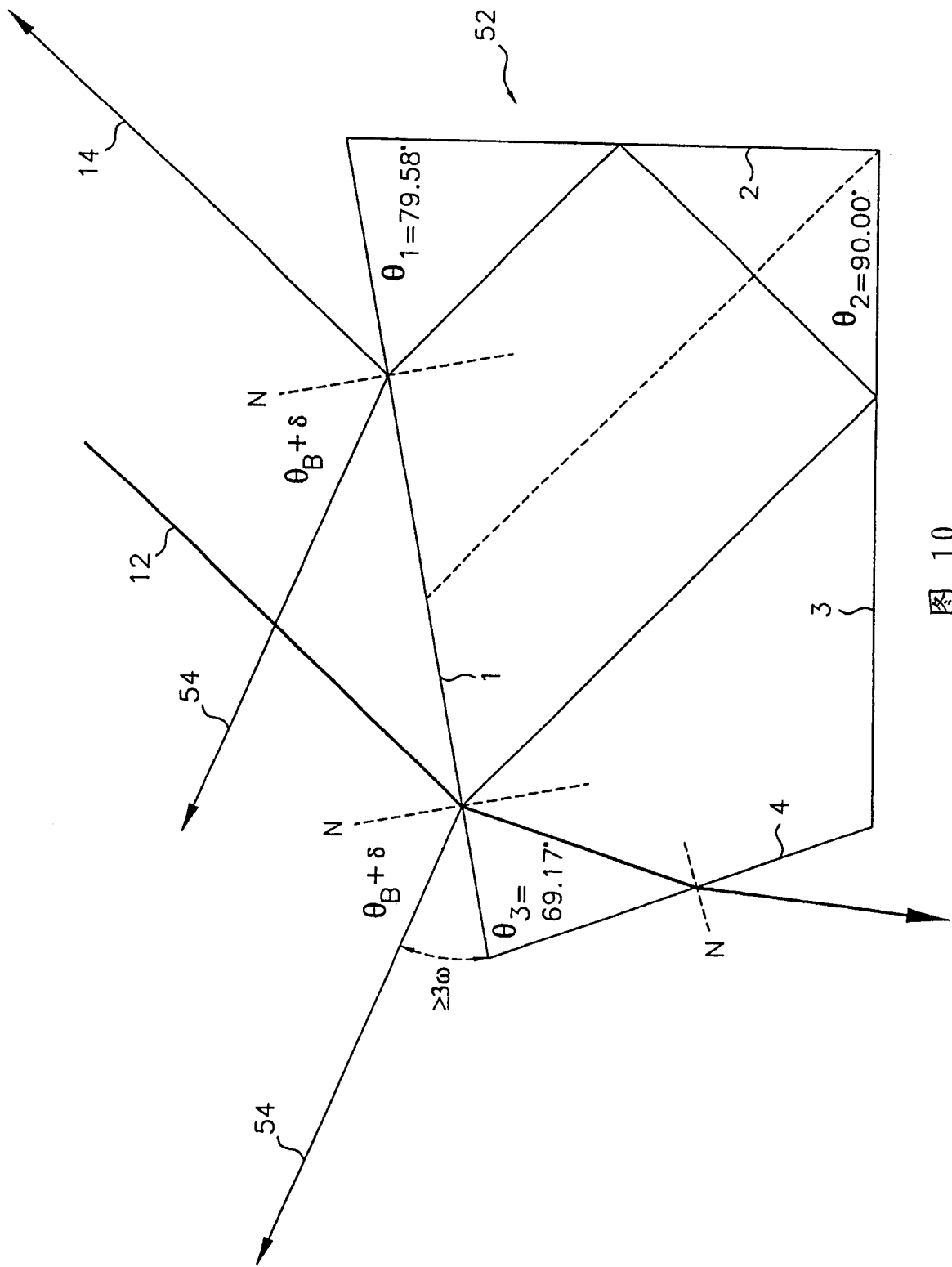


图 10

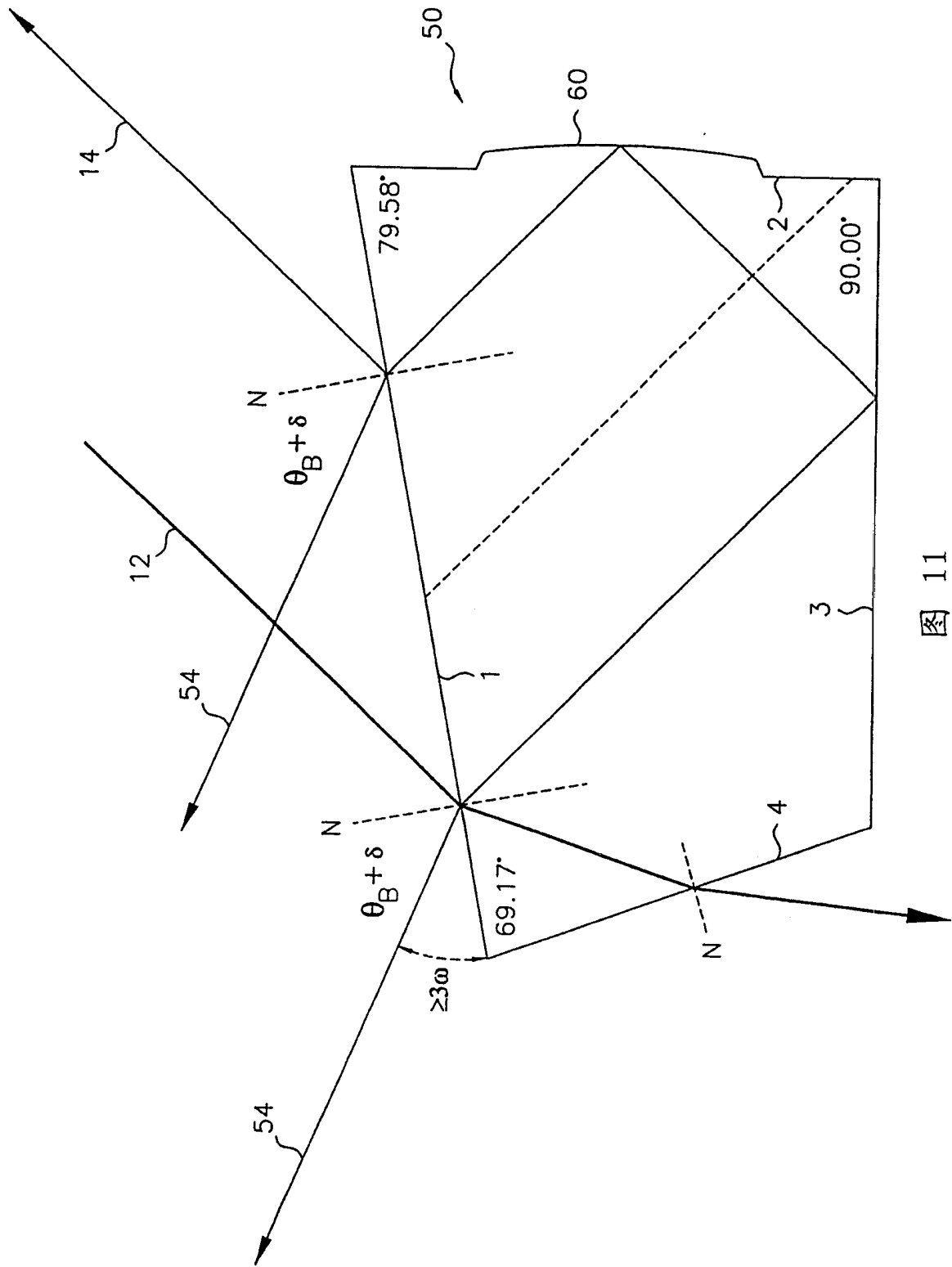


图 11

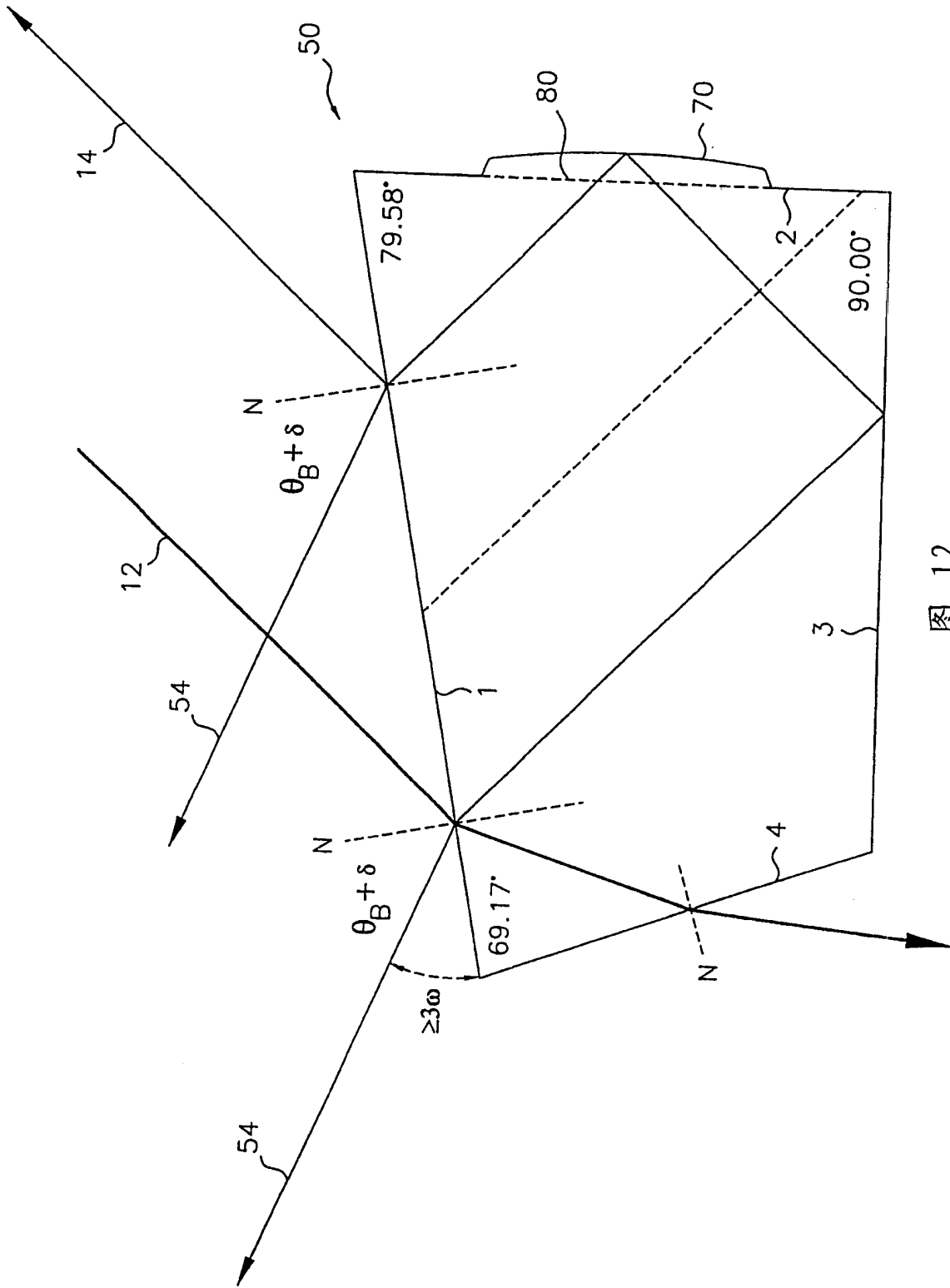


图 12

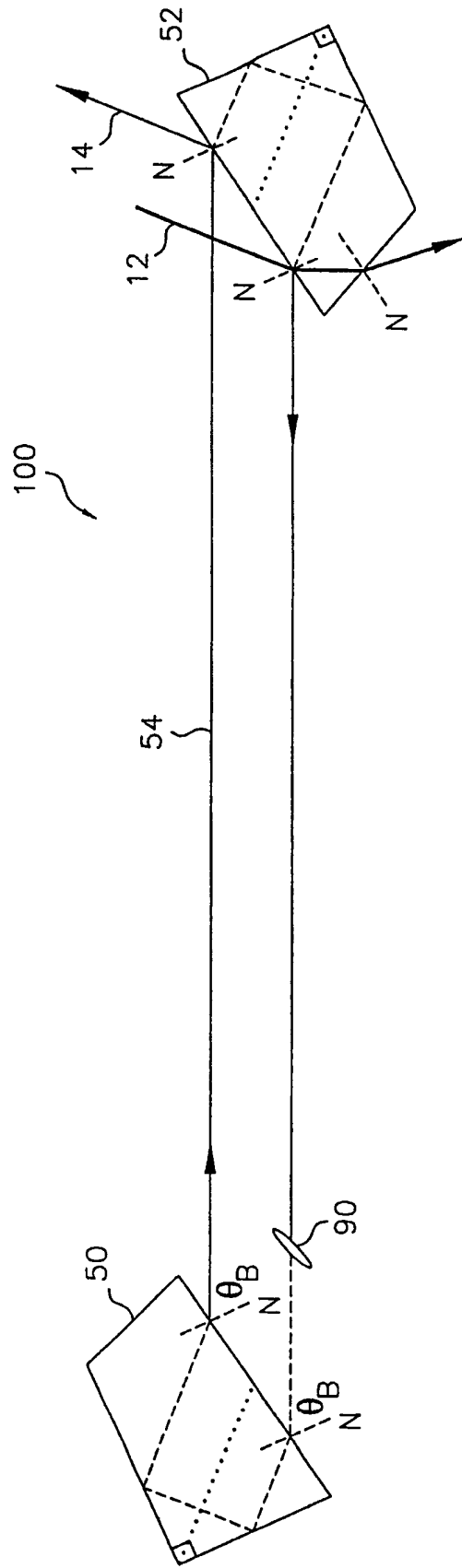


图 13

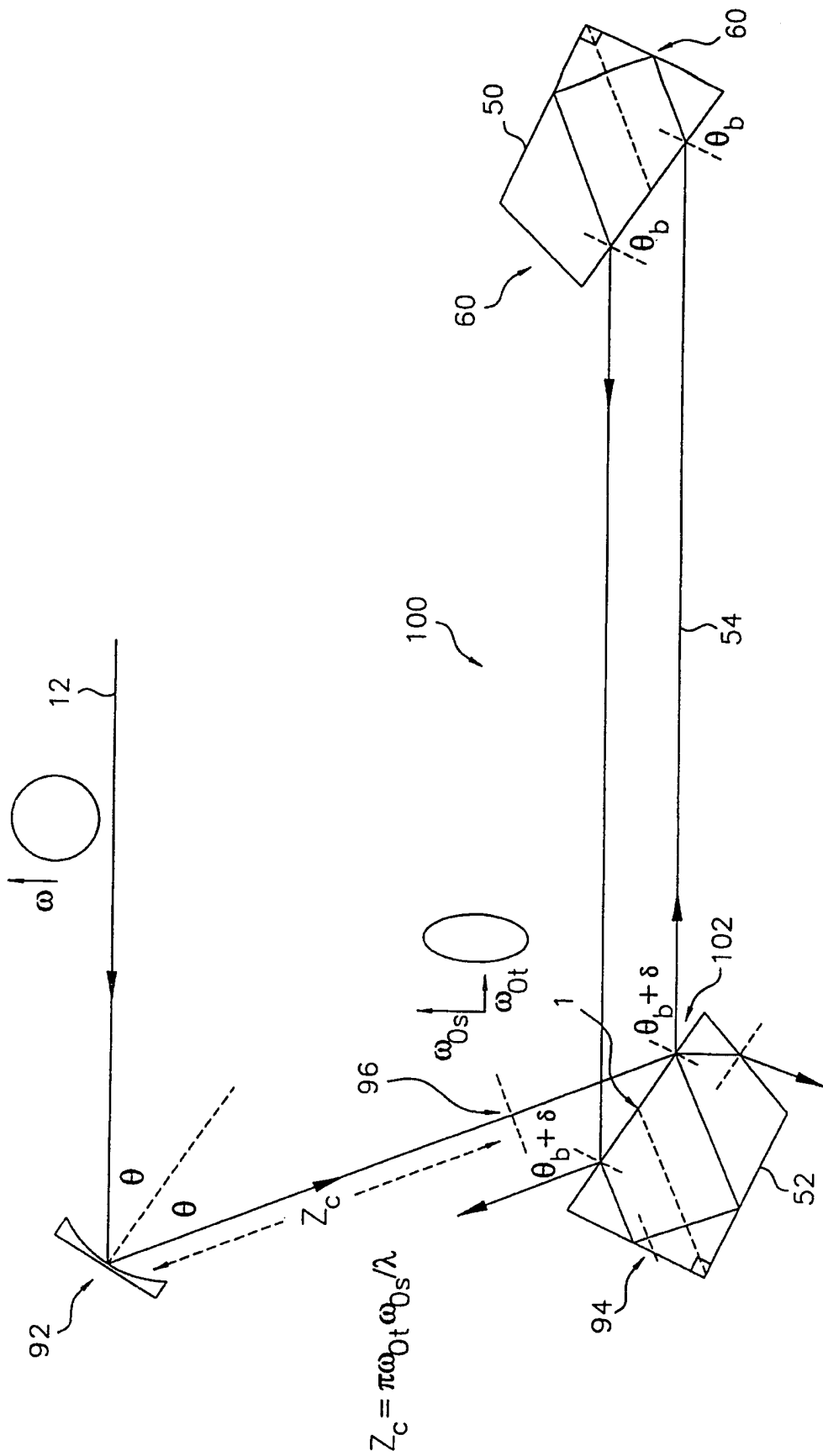


图 14



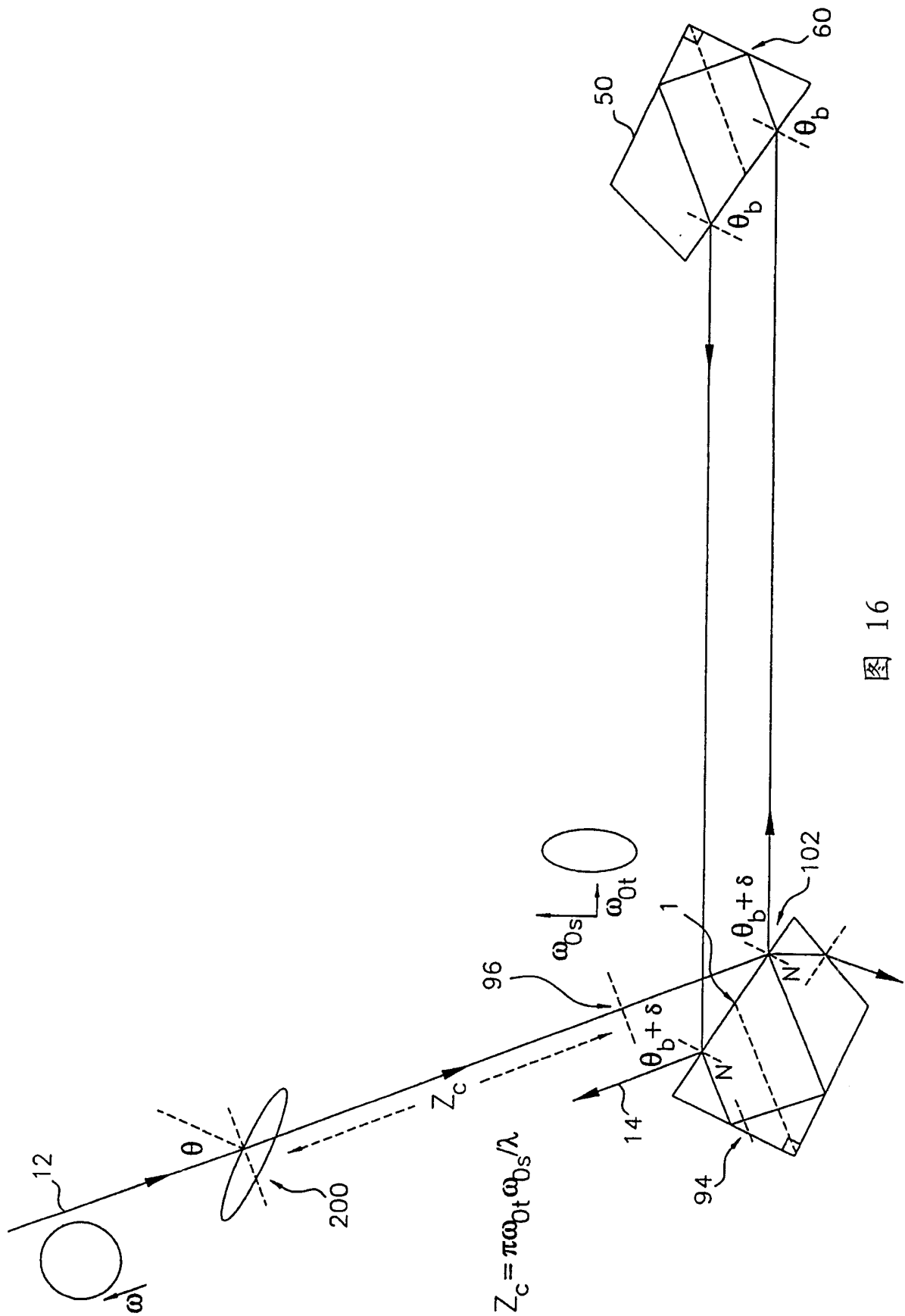


图 16