



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110797743 B

(45) 授权公告日 2021.07.06

(21) 申请号 201911029361.8

约翰·费尔登

(22) 申请日 2015.06.18

(74) 专利代理机构 北京律盟知识产权代理有限

(65) 同一申请的已公布的文献号

责任公司 11287

申请公布号 CN 110797743 A

代理人 刘丽楠

(43) 申请公布日 2020.02.14

(51) Int.CI.

H01S 3/139 (2006.01)

(30) 优先权数据

H01S 3/125 (2006.01)

62/015,016 2014.06.20 US

H01S 3/105 (2006.01)

62/038,471 2014.08.18 US

14/596,738 2015.01.14 US

(62) 分案原申请数据

201580027977.5 2015.06.18

(73) 专利权人 科磊股份有限公司

(56) 对比文件

地址 美国加利福尼亚州

CN 101782723 A, 2010.07.21

(72) 发明人 勇-霍·亚历克斯·庄

US 2008267241 A1, 2008.10.30

贾斯汀·典桓·刘 陆晓旭

WO 2007141185 A2, 2007.12.13

J·约瑟夫·阿姆斯特朗 邓宇俊

US 2006126681 A1, 2006.06.08

CN 1310871 A, 2001.08.29

审查员 吴蕾蕾

权利要求书2页 说明书18页 附图32页

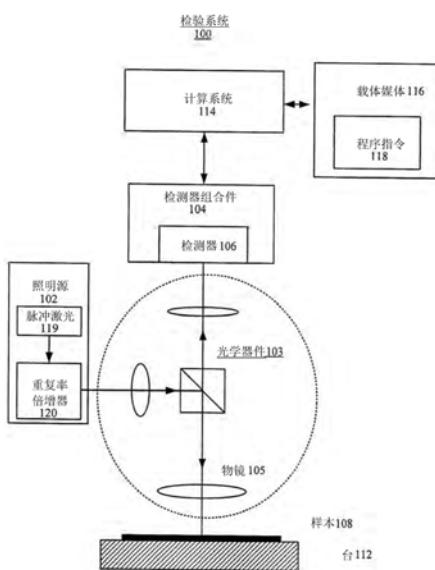
(54) 发明名称

使用面镜及/或棱镜的激光重复率倍增器及平顶射束轮廓产生器

(57) 摘要

本申请涉及一种使用面镜及/或棱镜的激光重复率倍增器及平顶射束轮廓产生器。一种重复率(脉冲)倍增器包含一或多个射束分裂器及棱镜,从而形成具有延迟每一脉冲的能量的部分的不同光学路径长度的一或多个环形腔。一系列输入激光脉冲在所述环形腔中循环且每一脉冲的所述能量的部分在横穿较短腔路径之后离开系统,而所述能量的另一部分在横穿较长腔路径及/或两个腔路径的组合之后离开所述系统。通过所述环形腔光学路径长度的适当选择,输出系列的激光脉冲的所述重复率可变为输入重复率的倍数。可通过选择所述射束分裂器的透射及反射系数来控制所述输出脉冲的相对能量。一些实施例产生基本上在一个维度上平坦的时间平均输出射束轮廓。

CN 110797743 B



1. 一种激光脉冲重复率倍增器，其用于接收输入激光脉冲且用于产生输出脉冲，所述输出脉冲具有多于两倍的所述输入激光脉冲的重复率的输出脉冲重复率，所述激光脉冲重复率倍增器包括：

赫里奥特池，其包含形成光学腔的第一曲面镜和第二曲面镜、第一射束分裂器和第二射束分裂器及至少两个折叠面镜，以及定位在所述光学腔外部的直角棱镜，所述赫里奥特池经配置以使得每一所述输入激光脉冲的部分沿所述光学腔内部的主腔回路传输，随后传递到所述直角棱镜，随后在作为所产生的所述输出脉冲中的一者离开所述光学腔之前沿所述光学腔内部的次腔回路传输，

其中所述两个曲面镜具有约等于所述输入激光脉冲之间的空间分离的四分之一的奇整数倍的曲率半径，且

其中所述两个曲面镜具有共同曲率半径，且分开实质上等于所述曲率半径的距离。

2. 根据权利要求1所述的激光脉冲重复率倍增器，其中所述赫里奥特池经配置以使得所述输出脉冲重复率是原始输入脉冲的重复率的四倍。

3. 根据权利要求1所述的激光脉冲重复率倍增器，

其中所述赫里奥特池经配置以使得每一所述输入激光脉冲的至少一部分由所述第一射束分裂器引导以使得当其在所述主腔回路上时由所述第一曲面镜和第二曲面镜的第一部分反射，且由所述第二射束分裂器引导以使得当其在所述次腔回路上时由所述第一曲面镜和第二曲面镜的第二部分反射，

其中所述赫里奥特池还包括安置于所述主腔回路中的棱镜，且

其中所述棱镜、所述至少两个折叠面镜以及所述直角棱镜中的一者经配置以将来自所述主腔回路的激光脉冲转向到所述次腔回路中。

4. 根据权利要求3所述的激光脉冲重复率倍增器，其中所述赫里奥特池经配置以使得所述主腔回路位于不同于所述次腔回路的平面中。

5. 根据权利要求4所述的激光脉冲重复率倍增器，其中所述第一射束分裂器接收所述输入激光脉冲且将每一所述输入激光脉冲的能量的约三分之二反射到所述主腔回路中。

6. 根据权利要求1所述的激光脉冲重复率倍增器，其中第二射束分裂器具有约三分之一的反射率。

7. 根据权利要求1所述的激光脉冲重复率倍增器，其中所述赫里奥特池经配置以使得：每一所述输入激光脉冲被引导到所述第一射束分裂器上；

所述第一射束分裂器经配置以引导所述每一输入激光脉冲的至少第一部分以使得当所述第一部分在所述主腔回路上时由第一平面中的所述第一曲面镜和第二曲面镜反射，且随后经引导朝向所述直角棱镜；

所述直角棱镜经配置以将所述第一部分重新引导到所述第二射束分裂器；且

所述第二射束分裂器经配置以引导每一所述第一部分的至少第二部分使得当所述第二部分在所述次腔回路上时由第二平面中的所述第一曲面镜和第二曲面镜反射，所述第二平面与所述第一平面不同。

8. 根据权利要求1所述的激光脉冲重复率倍增器，

其中所述赫里奥特池还包括与所述第一射束分裂器一起安置于第一平面中的射束补偿器和棱镜中的一者，且

其中所述第二射束分裂器和所述至少两个折叠面镜安置于第二平面内。

9. 一种重复率倍增器，其用于接收输入激光脉冲且用于产生输出脉冲，所述输出脉冲具有至少两倍于所述输入激光脉冲的重复率的输出脉冲重复率，所述激光脉冲重复率倍增器包括：

形成环形腔的至少一个射束分裂器和两个光反射元件，

其中所述至少一个射束分裂器经配置以引导每一输入激光脉冲的第一能量部分以使得所述第一能量部分在第一时间离开所述重复率倍增器，且经配置以将所述输入激光脉冲的第二能量部分引导到所述环形腔中以使得所述第二能量部分在所述两个反射元件之间反射且在第二时间离开所述重复率倍增器，

其中所述两个光反射元件包括第一曲面镜和第二曲面镜，

其中所述至少一个射束分裂器包含：

第一射束分裂器，其经配置以将所述第一能量部分和第二能量部分引导到所述环形腔中，及

第二射束分裂器，其经配置以在所述第二能量部分在第一反射元件与第二反射元件之间横穿至少一次之后，将每一所述输入激光脉冲的所述第二能量部分引导出所述重复率倍增器；

所述重复率倍增器还包括：

棱镜，其安置于所述环形腔中，

至少两个折叠面镜，其安置于所述环形腔中；以及

直角棱镜，其定位于所述环形腔外部，

其中所述第一射束分裂器和所述棱镜经配置以使得每一所述输入激光脉冲的第一能量部分在所述环形腔内沿主腔回路传输，

其中所述第二射束分裂器和所述至少两个折叠面镜经配置以使得每一所述输入激光脉冲的第二能量部分在所述环形腔内沿次腔回路传输，且

其中所述直角棱镜经配置以引导所述第一能量部分离开所述主腔回路到所述次腔回路。

10. 根据权利要求9所述的重复率倍增器，

其中所述第一射束分裂器经配置以引导所述每一输入激光脉冲的所述第一能量部分以使得当所述第一能量部分在所述主腔回路上时由第一平面中的所述第一曲面镜和第二曲面镜反射，

其中所述直角棱镜经配置以引导所述第一能量部分离开所述主腔回路到所述第二射束分裂器，且

其中所述第二射束分裂器经配置以引导所述第二能量部分以使得当所述第二能量部分在所述次腔回路上时由第二平面中的所述第一曲面镜和第二曲面镜反射，所述第二平面与所述第一平面不同。

使用面镜及/或棱镜的激光重复率倍增器及平顶射束轮廓产生器

[0001] 本申请是申请日为2015年6月18日，申请号为“201580027977.5”，而发明名称为“使用面镜及/或棱镜的激光重复率倍增器及平顶射束轮廓产生器”的发明专利申请的分案申请。

[0002] 相关申请案

[0003] 本申请案主张2014年6月20日申请的标题为“使用棱镜的激光脉冲倍增(Laser Pulse Multiplication Using Prisms)”的第62/015,01号美国临时专利申请案的优先权，且所述案以引用的方式并入本文中。

[0004] 本申请案还主张2014年8月18日申请的标题为“激光重复率倍增器及平顶射束轮廓产生器(Laser Repetition Rate Multiplier and Flat-Top Beam Profile Generators)”的第62/038,471号美国临时专利申请案的优先权，且所述案以引用的方式并入本文中。

[0005] 此申请案涉及Chuang等人在2012年6月1日申请的标题为“使用激光脉冲倍增器的半导体检验及计量系统(Semiconductor Inspection And Metrology System Using Laser Pulse Multiplier)”的第13/487,075号美国专利申请案、Chuang等人在2012年12月11日申请的标题为“使用激光脉冲倍增器的半导体检验及计量系统(Semiconductor Inspection And Metrology System Using Laser Pulse Multiplier)”的第13/711,593号美国专利申请案、Chuang等人在2014年8月8日申请的标题为“用于表面扫描系统的分裂高斯射束及多点平顶照明(Split Gaussian Beams and Multi-Spot Flat-Top Illumination for Surface Scanning Systems)”的第14/455,161号美国专利申请案。所有此类申请案以引用的方式并入本文中。

技术领域

[0006] 本发明涉及降低时间域中的激光脉冲的光学峰值功率且选用地均质化空间域中的射束功率分布。此峰值功率降低及均质化系统可使用曲面镜、射束分裂器、波板及棱镜以产生具有平顶空间功率分布轮廓的优化脉冲重复率倍增器。本发明在半导体检验及计量系统中尤其有用。

背景技术

[0007] 通常通过连续波(CW)光源最佳地满足对于检验及计量的照明需求。CW光源具有恒定功率级，此允许连续获取图像或数据。然而，在许多关注波长(尤其紫外线(UV)波长)，具有充足发光度(每一单位立体角的每一单位面积的功率)的CW光源不可用、昂贵或不可靠。如果脉冲激光是具有在关注波长的充足时间平均发光度的唯一可用或具成本效益的光源，那么最佳的是使用具有高重复率及宽脉冲宽度的激光。脉冲重复率越高，用于相同时间平均功率级的每一脉冲的瞬时峰值功率就越低。激光脉冲的较低峰值功率导致对光学器件及对被测量的样本或晶片的较少损害，此是由于大部分损害机制是非线性的且强烈取决于峰

值功率而非平均功率。

[0008] 在检验及计量应用中,增大重复率的额外优势是每一数据采集或每一像素收集更多脉冲,从而导致脉冲间变化的更好平均化及改善信噪比。此外,对于快速移动的样本,较高脉冲率可导致对随时间变化的样本位置的更好取样,此是由于在每一脉冲之间移动的距离更小。

[0009] 可通过改善激光介质、泵系统及/或其驱动电子器件而增大激光子系统的重复率。不幸地,修改已按预定重复率操作的UV激光可能需要时间及金钱的大量投资以改善其构成元件中的一或多者,且仅可少量地改善重复率。此外,增大UV激光中的基本激光的重复率降低基本激光的峰值功率。此降低频率转换的效率(其必须是非线性程序)且因此使产生高的平均UV功率级变得困难。

[0010] 在许多检验应用中,期望平坦或均匀(而非高斯(Gaussian))照明轮廓。样本上的空间均匀照明导致横跨照明区域的更均匀信噪比及相较于不均匀照明的较高动态范围。虽然相干光源相较于激光的高斯轮廓可能更容易产生均匀照明,但此类光源具有相较于激光可提供的带宽及功率密度更宽的带宽(由于色像差而复杂化光学设计)及更低的功率密度(减低信噪比)。由高斯激光束实现近似平坦轮廓的一种已知方式是裁剪高斯尾(Gaussian tail)且仅使用射束的中央区(接近于峰值)。此方法易于应用;然而,如果需要适度平坦轮廓,那么裁剪及浪费大部分的激光功率。例如,如果照明中的最大强度变化需要为约10%,那么浪费约65%的功率,且20%变化需要浪费约50%的功率。

[0011] 因此,需要对UV激光的输出操作的实用、廉价技术以改善激光的重复率。此外,如果增大重复率的光学子系统可为紧凑的,使得其可容易并入到系统中而不占据许多空间,那么其可为有利的。仍此外,存在对于可产生近似平坦输出轮廓同时几乎不添加额外组件到重复率倍增器因此节省空间且最小化光学功率损耗的重复率倍增器的需求。

发明内容

[0012] 本发明描述一种用于检验或测量样本的系统。此系统包含照明源、经配置以执行光检测的装置、经配置以将光从所述照明源引导到所述样本且将光输出、反射或透射从所述样本引导到传感器的光学器件。显著地,照明体包括发射紫外线(UV)波长(即,短于约400nm的波长)的脉冲激光及倍增来自所述脉冲激光的脉冲的重复率倍增器。所述重复率倍增器增大每一单位时间的激光脉冲数目且减小每一激光脉冲的峰值功率。所述减小峰值功率降低或消除对所述系统光学器件或被检验或测量的样本的损害,且允许针对给定损害阈值使用较高平均激光功率级,因此改善检验或测量的信噪比及/或速度。在UV谐波的产生之后倍增重复率维持UV谐波转换的效率,此是因为所述激光脉冲的所述峰值功率并不在谐波转换链中降低。

[0013] 如本文中描述的并入有重复率倍增器的检验及测量系统在深UV(DUV)波长(即,短于约300nm的波长)及真空UV(VUV)波长(即,短于约190nm的波长)尤其有用,此是由于在此类波长的高峰值功率级可快速损害许多不同类型的材料。

[0014] 所述样本可通过台支撑,所述台在所述检验或测量期间相对于所述光学器件移动所述样本。

[0015] 所述示范性检验或测量系统可包含一或多个照明路径,其从不同入射角及/或不

同方位角及/或使用不同波长及/或偏振状态照明所述样本。所述示范性检验或测量系统可包含一或多个收集路径,其在不同方向上收集由所述样本反射或散射的光及/或对不同波长及/或对不同偏振状态敏感。

[0016] 并入有重复率倍增器的检验及测量系统可经进一步配置以产生时间平均空间均匀射束轮廓(即,平顶轮廓)。本文中描述的并入有倍增器及平顶轮廓产生器的检验或测量系统使用紧凑空间中的少量光学组件提供所述激光重复率的两倍或多于两倍倍增及更均匀时间平均射束轮廓。本文中描述的所述检验及计量系统能够使用更高平均激光功率,从而实现更高处理能力、更好信号质量及激光能量的更高效使用。

[0017] 本发明描述用于倍增脉冲激光的重复率的方法及系统。此类方法及系统将输入激光脉冲分裂为在时间上分开的多个脉冲,以便倍增所述激光重复率达例如2、3或4的整数倍。输入脉冲分裂为两个,使得所述脉冲的部分继续,且所述脉冲的部分进入环形腔。在横穿所述环形腔的至少一个区段之后,所述脉冲再次分裂且所述脉冲的部分离开所述环形腔且部分继续在所述环形腔中。所述重复率倍增器可经进一步配置以产生在一个维度上近似平坦且在垂直维度上基本上高斯的时间平均输出轮廓。所述重复率倍增器可包括平面镜、曲面镜、偏振射束分裂器、波板、射束补偿器及/或透镜。

[0018] 在一项示范性实施例中,通过波板及偏振射束分裂器将输入激光脉冲分裂为两个。围绕短环形腔回路引导所述输入激光脉冲的一部分且围绕长环形腔回路引导另一部分。在其返回到输入/输出耦合器(其可包括偏振射束分裂器)的过程中,所述脉冲遭遇另一波板,所述另一波板确定脉冲能量的离开所述腔的部分。所述脉冲能量的其余部分再次横穿所述腔。

[0019] 在一项示范性实施例中,短及长腔回路长度分别设置为所述输入激光脉冲间空间分离的1/3及2/3,使得所述输出脉冲将在时间上延迟所述脉冲间周期的1/3、2/3或1/3的整数倍。此类延迟脉冲形成具有重复率(其是原始输入激光脉冲的重复率的三倍)的脉冲列。所述两个波板的定向及阻滞可经选择,使得所述输出脉冲具有基本上相等脉冲间能量。

[0020] 在也可使所述重复率增到三倍的另一示范性实施例中,两个面镜形成环形腔且两个射束分裂器放置于其间。每当脉冲经过射束分裂器时,其分裂为两个脉冲;所述脉冲中的一者直接通过而另一者被偏转。使用此两个射束分裂器,一些脉冲横穿较长腔回路而其它横穿较短腔回路。在一项示范性实施例中,所述较短回路具有约等于原始输入脉冲间分离的约1/3的路径长度,且所述较长回路路径长度是所述脉冲间分离的约2/3。在此实施例中,此类输出脉冲形成具有重复率(其是所述原始输入脉冲的重复率的三倍)的脉冲列。通过对面镜曲率、面镜分离及射束分裂器反射率的适当选择,所述输出脉冲可具有基本上相等脉冲间能量。

[0021] 在一项实施例中,包括平板的两个射束补偿器放置于所述腔中以基本上补偿由所述射束分裂器引起的所述射束路径中的位移,使得所述射束以基本上围绕腔轴对称的图案从面镜反射。在另一实施例中,一个(或两个)射束补偿器被基本上补偿一个(或两个)射束分裂器的射束路径中的位移的棱镜(或多个棱镜)所替代。在又另一实施例中,并不使用棱镜或射束补偿器,且所述射束分裂器经定位以使得各自补偿由另一者引起的射束位移。

[0022] 在又另一示范性实施例中,平面镜及棱镜插入到所述腔内的光路径中以在相同对曲面镜之间形成具有主腔回路的约一半长度的回路长度的次腔回路。如果所述主腔回路长

度设置为所述原始输入脉冲间分离的约一半,那么所述主腔回路可使所述脉冲重复率加倍。离开所述主腔回路的脉冲进入所述次腔回路,所述次腔回路具有所述主腔回路的约一半长度的长度,因此再次使所述脉冲重复率加倍,从而导致输出脉冲重复率是所述输入激光的重复率的四倍。

[0023] 一些实施例使用例如等腰三角形棱镜或杜夫(Dove)棱镜的棱镜以加倍所述射束在所述腔内进行的往返的数目。所述两个腔路线产生两个平行输出射束。此两个射束之间的偏离可经选择,使得其重叠以形成时间平均空间近似平顶射束轮廓。

[0024] 在一项实施例中,2x脉冲倍增器方案用作用于平顶轮廓产生的基础。在另一实施例中,3x脉冲倍增器用作用于平顶轮廓产生的基础。在又另一实施例中,上述4x脉冲倍增器方案用作用于平顶轮廓产生的基础。此实施例可产生四个平行射束,其间具有预定功率比。通过选择所述射束之间的所述分离及其间的所述功率比,可实现更宽更平坦时间平均射束轮廓。产生近似平顶轮廓的此类重复率倍增器中的任一者可包括射束补偿器及/或棱镜。

[0025] 在一项实施例中,所述环形腔包括直角面镜对。在另一实施例中,所述环形腔包括利用全内反射实现高反射率的棱镜。使用适当棱镜设计,使用棱镜的环形腔可实现低损耗而不需使用高反射率涂层。高反射率涂层可容易地被高强度激光脉冲损害(尤其在短波长),因此本文中描述的许多方法及系统可具有相较于其它环形腔的更长操作寿命及/或更低维护费用(尤其在用于倍增DUV及VUV激光的重复率时)。

[0026] 在一项实施例中,所述环形腔中的一或多个棱镜经设计使得所述激光束进入及离开所述棱镜的所述入射角接近于布鲁斯特角(Brewster's angle)且所述激光束基本上相对于所述棱镜入口及出口表面P偏振,使得归因于反射的损耗保持为小的而不需使用任何抗反射(AR)涂层。AR涂层可容易地被高强度激光脉冲损害(尤其在短波长),因此此实施例可具有相较于使用AR涂层的环形腔的更长操作寿命及/或更低维护费用(尤其在用于倍增DUV及VUV激光的重复率时)。

[0027] 在一项实施例中,针对位于相同环形腔平面中的射束偏振定向棱镜的布鲁斯特切割,而在另一实施例中,针对垂直于所述环形腔平面的射束偏振定向棱镜的布鲁斯特切割。

[0028] 在一项实施例中,所述射束在适当设计的单一棱镜中两次全内反射。此棱镜可替代环形腔中的两个折叠面镜,且因此降低组件的总数且简化对准所述环形腔的过程。

[0029] 在一项实施例中,直角棱镜用于所述环形腔中。其两次反射所述射束,从而在相反方向上将所述射束发送回去同时也使射束在空间中移位。所述直角棱镜的此独特特征导致通过简单旋转所述直角棱镜到特定角度而倍增有效腔长度的灵活性。例如,两个环形腔可经建构为具有类似物理长度,但其中一者具有是另一者的光学路径长度的整数倍(例如2倍)的光学路径长度,使得所述两个环形腔可串联,以便倍增所述脉冲重复率达较大因子,接着可在单一环形腔中方便地实现。

[0030] 在优选实施例中,通过选择相对于表面的入射角及偏振来控制每一输入激光脉冲的能量的经引导到所述环形腔中的部分以实现所需反射及透射系数。此具有避免对于所述表面上的任何涂层的需求的优势且因此避免由所述激光脉冲的所述峰值功率密度引起的涂层损害的可能性,所述涂层损害尤其在所述激光重复率倍增器与具有几百mW或更大的平均功率的深UV或真空UV激光一起使用时可成问题。在半导体检验及计量系统中更加需要此类激光,以便在检验或测量具有约100nm或更小尺寸的特征部时实现所需敏感度及信噪比。

[0031] 在优选实施例中，在所述环形腔内使用一或多个透镜以重新成像每一激光脉冲，使得其在每次横穿所述腔时保持约相同形状及大小。一项实施例使用不具有涂层的布鲁斯特角透镜以重新聚焦每一激光脉冲，因此避免涂层损害的风险。

[0032] 在优选实施例中，在一个激光重复率倍增器中组合上文描述的特征中的两者或多于两者。例如，在一项优选实施例中，激光重复率倍增器包括环形腔，所述环形腔包括三个未涂覆棱镜，其中所述腔内侧的所述激光束基本上相对于所述棱镜的表面p偏振。所述棱镜中的两者使用全内反射以在所述环形腔内高效循环所述激光束。第三棱镜具有表面，所述表面经定向以使得所述激光束相对于所述表面近似s偏振且所述输入脉冲在选定角度入射，使得每一输入脉冲的所需部分经引导到所述环形腔中。

[0033] 本发明描述并入有激光脉冲倍增器的晶片检验系统、图案化晶片检验系统、光掩模检验系统及计量系统。本文中描述的激光脉冲倍增器的紧凑大小使其相对容易地并入到检验及计量系统中。在所述激光脉冲倍增器中使用未涂覆光学器件允许所述检验及计量系统与高功率深UV激光一起操作，而不具有归因于涂层损害的性能降低或维护问题。

附图说明

[0034] 图1说明并入有脉冲激光及激光脉冲重复率倍增器(其还可经配置为平顶轮廓产生器)的示范性检验或测量系统。

[0035] 图2A及2B说明并入有重复率倍增器(其还可经配置为平顶轮廓产生器)的暗场检验系统。

[0036] 图3说明检验系统，其经配置以使用法向及倾斜照明射束检测样本上的粒子或缺陷，其也可受益于并入有重复率倍增器(其也可经配置为平顶轮廓产生器)。

[0037] 图4是配置为具有明场及暗场检验模式且可有利地并入有重复率倍增器(其也可经配置为平顶轮廓产生器)的检验系统的示范性反折射成像系统。

[0038] 图5说明产生具有是输入脉冲的重复率的三倍的脉冲重复率的输出脉冲列的示范性重复率倍增器。

[0039] 图6说明也产生具有是输入脉冲的重复率的三倍的重复率的输出脉冲列的另一示范性重复率倍增器实施例。

[0040] 图7A及7B说明类似于图6中示出的重复率倍增器但不使用射束补偿器的示范性重复率倍增器。

[0041] 图8说明产生具有是输入脉冲的重复率的四倍的重复率的输出脉冲列的示范性重复率倍增器。

[0042] 图9说明示范性2x脉冲重复率倍增器，其使用等腰三角形棱镜而非板状射束补偿器。

[0043] 图10A及10B说明等腰三角形棱镜的特征，包含位移射束及颠倒射束的空间序列。

[0044] 图11A说明通过位移图9中说明的输入射束产生平顶输出射束轮廓的示范性实施例。

[0045] 图11B说明通过朝向腔轴位移棱镜而产生平顶轮廓的另一示范性实施例。

[0046] 图12说明通过两个部分重叠的高斯射束形成的平顶轮廓。

[0047] 图13说明基于图6中示出的3x脉冲重复率倍增器方案的示范性平顶轮廓产生器，

其中至少一个板状补偿器被棱镜替代。

[0048] 图14A说明基于图7A中示出的3x脉冲重复率倍增器方案的示范性平顶轮廓产生器。

[0049] 图14B说明基于图7B中示出的3x脉冲重复率倍增器方案的另一示范性平顶轮廓产生器。

[0050] 图15A说明基于图8中示出的4x脉冲重复率倍增器方案的另一示范性平顶轮廓产生器。

[0051] 图15B说明通过图15A中示出的设计产生的示范性平顶轮廓。

[0052] 图16A及16B是示出根据另一实施例的基于2x脉冲重复率倍增器的产生器的正视图及侧视图。

[0053] 图16C及16D是示出根据另一实施例的基于2x/4X脉冲重复率倍增器的产生器的正视图及俯视图。

[0054] 图17说明具有2个直角棱镜及射束分裂器的示范性重复率倍增器。

[0055] 图18说明类似于图A但棱镜中的一者旋转90°以使激光脉冲在棱镜之间的给定距离内的延迟时间加倍的另一示范性重复率倍增器。

[0056] 图19A、19B及19C是说明可如何根据一项实施例通过旋转直角面镜对或棱镜中的一者而将环形腔长度改变为物理腔长度的不同整数倍的简化图。

[0057] 图20说明使用类似外部尺寸的两个腔产生具有是输入脉冲列的重复率的4倍的重复率的脉冲列的一个可能实施例。

[0058] 图21说明在脉冲重复率倍增器中使用以在每一脉冲围绕环形腔行进时维持其激光束质量的一个示范性透镜配置。

[0059] 图22说明类似于图21的透镜配置,其保持使棱镜中的一者相对于另一者旋转的环形腔中的激光束质量。

[0060] 图23说明在脉冲重复倍增器中使用以在每一脉冲围绕环形腔行进时保持其激光束质量的替代示范性透镜配置。

[0061] 图24说明在脉冲重复率倍增器中使用以保持激光束质量的另一示范性透镜配置,其使用柱面透镜,激光按约等于布鲁斯特角的角度入射于每一透镜上。

[0062] 图25A及25B说明具有将射束分裂器功能组合到棱镜中的一者中的特殊棱镜设计的两个示范性脉冲重复率倍增器。两个重复率倍增器都可使用布鲁斯特角棱镜以用于在腔中再循环光。图25B的重复率倍增器可使用所有未涂覆光学器件,从而避免由于高强度深UV激光脉冲造成涂层损害的可能性。

[0063] 图26A及26B说明类似于图25A的重复率倍增器但棱镜中的一者旋转90°以使脉冲延迟时间加倍的示范性重复率倍增器。

[0064] 图27A及27B说明使用不具有涂层且不具有分开的射束分裂器的3个棱镜的示范性重复率倍增器。如使用所有未涂覆光学器件的其它实施例,此重复率倍增器尤其适用于深UV中,此是因为其避免由于激光脉冲造成涂层损害的可能性。

[0065] 图28、28A、28B及28C说明图27A的第一棱镜的设计的细节。

[0066] 图29A及29B是针对外反射及内反射两者的说明随入射角而变的菲涅尔(Fresnel)反射的图表。示出在图27A的第一棱镜的一项实施例中使用的入射角。

- [0067] 图30、30A及30B说明图27A的第二棱镜的设计的细节。
- [0068] 图31、31A、31B及31C说明图27A的第三棱镜的设计的细节。
- [0069] 图32A及32B说明使用两个棱镜及射束分裂器或一个棱镜、一个面镜及一个射束分裂器的替代示范性重复率倍增器。
- [0070] 图33说明包括类似于图32A中示出的环形腔的两个环形腔的示范性4x重复率倍增器，其中环形腔中的一者使其棱镜旋转90°，以便使其有效腔长度加倍。

具体实施方式

[0071] 本文中描述用于半导体检验及测量系统的改善照明系统。呈现以下描述以使所属领域一般技术人员能够制作且使用如在特定应用及其要求的内容脉络中提供的本发明。所属领域技术人员将明白对所描述实施例的各种修改，且本文中定义的一般原理可应用于其它实施例。因此，本发明并不旨在限于所示出及描述的特定实施例，而应符合与本文中揭示的原理及新颖特征一致的最广泛范围。

[0072] 图1说明示范性检验系统100，其经配置以检验或测量样本108，例如晶片、光罩或光掩模。样本108放置于台112上以促进样本108的不同区在光学器件下方的移动。台112可包括X-Y台或R-θ台。在一些实施例中，台112可在检验期间调整样本108的高度以维持聚焦。在其它实施例中，物镜105可经调整以维持聚焦。

[0073] 照明源102包括如本文中描述的一或多个脉冲激光及重复率倍增器。照明源102可发射DUV及/或VUV辐射。光学器件103(包含物镜105)朝向样本108引导辐射且将其聚焦于样本108上。光学器件103还可包括面镜、透镜及/或射束分裂器(为简单起见未详细示出)。从样本108反射或散射的光由光学器件103收集、引导且聚焦于在检测器组合件104内的检测器106上。

[0074] 检测器106可包含二维阵列传感器或一维线传感器。在一项实施例中，检测器106的输出经提供到计算系统114，计算系统114分析输出。通过可存储于载体媒体116上的程序指令118配置计算系统114。

[0075] 照明源102包含脉冲激光119及重复率倍增器120。在一项实施例中，照明源102还可包含连续源，例如弧光灯、激光激发等离子体光源或CW激光。

[0076] 检验系统100的一项实施例照明样本108上的线，且将散射及/或反射光收集于一或多个暗场及/或明场收集通道中。在此实施例中，检测器106可包含线传感器或电子轰击线传感器。在此实施例中，照明源102内的重复率倍增器120可经配置以产生平顶轮廓，以便有效产生基本上均匀线照明。

[0077] 检验系统100的另一实施例照明样本108上的多个点，且将散射及/或反射光收集于一或多个暗场及/或明场收集通道中。在此实施例中，检测器106可包含二维阵列传感器或电子轰击二维阵列传感器。

[0078] 检验系统100的各种实施例的额外细节在以下各案中描述：2012年7月9日申请的标题为“晶片检验系统(Wafer inspection system)”的第13/554,954号美国专利申请案、2011年6月7日颁发的标题为“使用小型反折射物镜的分裂场检验系统(Split Field Inspection System Using Small Catadioptric Objectives)”的第7,957,066号美国专利、2008年3月18日颁发的标题为“用于反折射光学系统中的激光暗场照明的射束传递系统

(Beam Delivery System For Laser Dark-field Illumination in a Catadioptric Optical System)”的第7,345,825号美国专利、1999年12月7日颁发的标题为“具有宽范围变焦能力的超宽带UV显微镜成像系统(Ultra-Broadband UV Microscope Imaging System With Wide Range Zoom Capability)”的第5,999,31号美国专利及2009年4月28日颁发的标题为“使用具有二维成像的激光线照明的表面检验系统(Surface Inspection System Using Laser Line Illumination With Two Dimensional Imaging)”的第7,525,649号美国专利。所有此类专利以引用的方式并入本文中。

[0079] 图2A及2B说明根据本发明的其它示范性实施例的并入有本文中描述的重复率倍增器及/或重复率倍增器方法的暗场检验系统200的方面。在图2A中，照明光学器件201包括激光系统220，激光系统220产生光202，光202由面镜或透镜203聚焦到被检验的晶片或光掩模(样本)211的表面上的线205中。收集光学器件210使用透镜及/或面镜212及213将从线205散射的光引导到传感器215。收集光学器件210的光轴214并不在线205的照明平面中。在一些实施例中，光轴214约垂直于线205。传感器215包括阵列传感器，例如线性阵列传感器。激光系统220并入有本文中描述的重复率倍增器及/或重复率倍增方法中的一或者者。激光系统220可经配置以根据本发明的实施例有效产生平顶轮廓，使得沿着线205的时间平均光强度可基本上均匀。

[0080] 图2B说明多个暗场收集系统231、232及233的一项实施例，每一收集系统基本上类似于图2A的收集光学器件210。收集系统231、232及233可与基本上类似于图2A的照明光学器件201的照明光学器件组合使用。样本211支撑于台221上，台221在光学器件下方移动待检验的区域。台221可包括X-Y台或R-θ台，其优选地在检验期间基本上连续移动以检验样本的大区域而使停滞时间最小。

[0081] 根据图2A及2B中说明的实施例的检验系统的更多细节在以下案中描述：2009年4月28日颁发的标题为“使用具有二维成像的激光线照明的表面检验系统(Surface inspection system using laser line illumination with two dimensional imaging)”的美国专利7,525,649及2003年8月19日颁发的标题为“用于检测表面的异常及/或特征的系统(System for detecting anomalies and/or features of a surface)”的美国专利6,608,676。此类专利两者以引用的方式并入本文中。

[0082] 图3说明检验系统300，其经配置以使用法向及倾斜照明射束两者检测样本上的粒子或缺陷。在此配置中，激光系统330提供激光束301。激光系统330包括如本文中描述的脉冲激光及重复率倍增器。透镜302将射束301聚焦穿过空间滤光器303。透镜304校准射束且将其传送至偏振射束分裂器305。射束分裂器305使第一偏振分量通过到法向照明通道且使第二偏振分量通过到倾斜照明通道，其中第一分量与第二分量正交。在法向照明通道306中，第一偏振分量由光学器件307聚焦且由面镜308朝向样本309的表面反射。由样本309(例如晶片或光掩模)散射的辐射被抛物面镜310收集且聚焦到传感器311。

[0083] 在倾斜照明通道312中，第二偏振分量由射束分裂器305反射到面镜313，面镜313使此射束反射穿过半波板314且由光学器件315聚焦到样本309。源于倾斜通道312中的倾斜照明射束且由样本309散射的辐射被抛物面镜310收集且聚焦到传感器311。传感器311及所照明区域(来自样本309上的法向及倾斜照明通道)优选地在抛物面镜310的焦点处。

[0084] 抛物面镜310将来自样本309的散射辐射校准为准直射束316。准直射束316接着通

过物镜317聚焦且穿过分析器318到传感器311。注意,还可使用具有除抛物面形状以外的形状的曲面镜表面。仪器320可提供射束与样本309之间的相对运动,使得跨样本309的表面扫描光点。

[0085] 2001年3月13日颁发的标题为“样本检验系统 (Sample Inspection System)”的第6,201,60号美国专利及罗曼诺夫斯基 (Romanovsky) 等人在2012年7月9日申请的标题为“晶片检验系统 (WAFER INSPECTION SYSTEM)”的第13/554,954号美国专利申请案(所述案两者以引用的方式并入本文中)进一步详细描述检验系统300。

[0086] 图4说明配置为具有明场及暗场检验模式的检验系统的示范性反折射成像系统400。系统400并入有两个照明源:激光401及宽带光照明模块420。激光401包括如本文中描述的脉冲激光及重复率倍增器。在优选实施例中,激光401包括DUV或VUV激光、如本文中描述的脉冲重复率倍增器及/或平顶轮廓产生器。

[0087] 在暗场模式中,适应光学器件402控制激光照明射束大小及被检验的表面上的轮廓。机械外壳404包含孔隙及窗403以及棱镜405以沿着光轴按法向入射角将激光重定向到样本408的表面。棱镜405也将来自样本408的表面特征部的镜面反射引导出物镜406。物镜406收集通过样本408散射的光且将其聚焦于传感器409上。可以反折射物镜412、聚焦透镜组413及镜筒透镜区段414(其可选用地包含变焦能力)的一般形式提供用于物镜406的透镜。

[0088] 在明场模式中,宽带照明模块420将宽带光引导到射束分裂器410,射束分裂器410朝向聚焦透镜组413及反折射物镜412反射所述光。反折射物镜412使用宽带光照明样本408。从样本反射或散射的光通过物镜406收集且聚焦于传感器409上。宽带照明模块420包括(例如)激光激发等离子体光源或弧光灯。宽带照明模块420还可包含自动聚焦系统以提供控制样本408相对于反折射物镜412的高度的信号。

[0089] 2008年3月18日颁发且以引用的方式并入本文中的标题为“用于反折射光学系统中的激光暗场照明的射束传递系统 (Beam Delivery System For Laser Dark-Field Illumination in a Catadioptric optical system)”的第7,245,825号美国专利进一步详细描述系统400。

[0090] 图5说明示范性脉冲重复率倍增器120A,其经配置以接收输入激光脉冲(输入)且产生具有是输入激光脉冲的重复率的三倍的重复率的脉冲列(输出)。类似于上文引用的'075美国专利申请案描述的方案,偏振射束分裂器(PBS) A01用作环形腔的输入及输出耦合器。输入激光相对于PBS A01 p偏振。PBS A01经设计及定向,以便接收输入激光脉冲、使p偏振通过且反射s偏振。两个额外PBS(A02及A03)及三个折叠面镜(A04、A05、A06)形成双腔。双腔亦包含两个半波板:一者放置于A01与A02之间,而另一者放置于A03与A06之间。当激光脉冲通过PBS A01进入双腔时,其将被PBS A02分裂为两个脉冲。脉冲的部分从PBS A02反射到PBS A03,从PBS A03引导到面镜A06,接着从面镜A06反射回到PBS A01(示出为回路A)。脉冲的另一部分透射穿过PBS A02到面镜A04,从面镜A04反射到面镜A05,从面镜A05反射穿过A03到面镜A06,接着从面镜A06反射回到PBS A01(示出为回路B)。重复率倍增器120A还包含用于改变从PBS A01传递到PBS A02的输入激光脉冲部分的偏振的第一波板A07及用于改变从PBS A03传递到面镜A06的输入激光脉冲部分的偏振的第二波板A08。可通过半波板A07的主轴相对于输入激光脉冲的偏振的角度来控制回路A与回路B之间的激光脉冲能量分布。通

过选择半波板A08的主轴的角度,可控制再循环到双腔中的脉冲能量对通过PBS A01离开双腔的能量的比。

[0091] 在一项优选实施例中,回路A的光学路径长度设置为输入激光脉冲的脉冲间距离的约三分之一,且回路B的路径长度设置为回路A的路径长度的约两倍。此导致输出脉冲在输入激光脉冲之间的时间间隔的约三分之一及三分之二处且近似与输入脉冲一致,因此使激光的重复率增到三倍。在此实施例中,优选地,波板A07及A08的主轴的角度 α 及 β 分别设置为约 $\alpha=29^\circ$ 及 $\beta=16^\circ$,或分别设置为约 $\alpha=16^\circ$ 及 $\beta=29^\circ$,以便产生每一输出脉冲中的约相等能量。如果在特定应用中可接受每一脉冲的能量的小差异(例如百分之几),那么可接受与此类值相差一度或两度的角度。透镜(未示出)可并入到双腔中及/或面镜A04、A05及A06中的一或者可弯曲,使得每一脉冲的高斯射束腰及大小在脉冲返回到相同位置时重新成像为相同状况。

[0092] 使用此双腔可实现除三以外的重复率。例如,回路A可设置为具有约等于输入脉冲的分离的四分之一的光学路径长度,且回路B设置为回路A的长度的约两倍。此将导致输入激光脉冲的重复率增到四倍。然而,此方案无法产生相等输出脉冲能量且因此将仅在不需相等输出脉冲能量时有用。

[0093] 图6说明可使重复率增到三倍的另一脉冲重复率倍增器120B。类似于在上文引用的'593美国专利申请案描述的赫里奥特(Herriott)池方案,此脉冲重复率三倍器包括由一对曲面镜(B01及B02)形成的光学腔。曲面镜B01及B02优选地是球面镜。脉冲重复率三倍器120B还包括两个射束分裂器(B03、B04)及两个射束补偿器(B05、B06)。两个曲面镜B01及B02的曲率半径优选地都应基本上等于其间的距离(即,腔应为共焦的)。

[0094] 激光输入脉冲(输入)到达射束分裂器B03。每一脉冲的能量的部分从射束分裂器B03反射到曲面镜B01上的点B07,接着到曲面镜B02上的点B08,穿过射束分裂器B04到曲面镜B01上的点B09,接着到曲面镜B02上的点B10,且返回到射束分裂器B03。每一脉冲的能量的其它部分透射穿过射束分裂器B03,到射束分裂器B04,在该处所述部分反射到曲面镜B01上的点B09,接着到曲面镜B02上的点B10,且返回到射束分裂器B03。在优选实施例中,较短回路(B03-B04-B09-B10-B03)的光学路径长度是较长回路(B03-B07-B08-B04-B09-B10-B03)的光学路径长度的约一半。当两个曲面镜B01与B02之间的距离是输入激光束的原始脉冲间空间分离的约六分之一时,输出脉冲列将具有输入脉冲的三倍重复率。射束补偿器B05及B06具有选定光学厚度及定向,以便基本上补偿分别由射束分裂器B03及B04引起的激光束在腔内的移位。

[0095] 类似于在上文引用的'593申请案描述且在所述申请案的图2A及2B中说明的2x重复率倍增器的输出,脉冲重复率三倍器120B的输出由一系列脉冲列构成,每一脉冲列包括已一或多次横穿腔中的一或两者的一系列脉冲。相较于2x重复率倍增器的每一输入脉冲两个输出脉冲,脉冲重复率三倍器120B的每一输入脉冲具有三个输出脉冲列。在脉冲重复率三倍器的优选实施例中,通过将射束分裂器B03及B04的反射率设置为约等于 $\frac{1}{10}(5 - \sqrt{5})$ 及

$\frac{1}{10}(5 + \sqrt{5})$ (即,约0.28及约0.72)而使每一输出脉冲列中的总能量近似彼此相等。注意,B03可具有约0.28的反射率且B04可具有约0.72的反射率,或B04可具有约0.28的反射率且B03可具有约0.72的反射率。两个配置都产生基本上相等输出脉冲能量。由于在许多检验应用

中可接受百分之几的脉冲间能量变化,所以射束分裂器反射率可经选择以具有与0.28及0.72相差百分之几的值。如所属领域技术人员所理解,可通过射束分裂器材料、涂覆于表面上的任何一或多层的厚度及材料及射束分裂器上的入射角的选择来控制射束分裂器的反射率。

[0096] 图7A说明根据另一实施例的重复率倍增器120B-1,其以类似于图6中说明的方式利用曲面镜(B01及B02)及射束分裂器,但不同的处在于移除两个射束补偿器(B05及B06,见图6)。图7A示出在适当调整射束分裂器B03-1及B04的位置的情况下,可通过另一射束分裂器补偿由射束分裂器中的一者引起的射束移位且反之亦然。优选地,两个射束分裂器B04及B03-1具有基本上相等光学厚度。图7B说明根据另一实施例的重复率倍增器120B-2,其中射束分裂器B03-2放置成其涂覆侧翻转到相对于图7A的射束分裂器B03-1的另一方向。在任一实施例中,可存在闭合回路且不需射束补偿器。

[0097] 图8说明可使重复率增到四倍的另一重复率倍增器120D。重复率倍增器120D包括由两个曲面镜B01及B02(类似于在上文关于图6描述的曲面镜)、两个射束分裂器D01及D06以及两个折叠面镜D05及D07形成的光学腔。首先以类似于在上文引用的'593美国专利申请案描述的方式通过使用一个射束分裂器D01(优选地具有约2/3的反射率)及一个射束补偿器或棱镜D02(主腔回路)使输入激光重复率加倍。其后,输出射束D03通过直角棱镜D04及面镜D05转向回到腔。射束接着沿着示出为虚线的路径到达另一射束分裂器D06(优选地具有约1/3的反射率),且从D06开始次腔回路(虚线),到球面镜B01、球面镜B02,接着另一平面镜D07,且返回到射束分裂器D06。此次腔路径回路的长度是第一回路的长度的约一半,因此其第二次使重复率加倍且使输出脉冲列是初始输入脉冲重复率的四倍。

[0098] 此方案的特殊特征是此次腔回路(其进一步第二次倍增重复率)利用相同组曲面镜(B01及B02)作为第一腔回路。另外,平面镜D05及D07可组合为在两侧上具有高反射率(HR)涂层的一个光学元件。此类特征产生相较于包括串联在一起的两个个别2x脉冲倍增器的设置的更紧凑占据面积。注意,虽然方便,但不要求组合面镜D07与D05,且可沿着不同于所示出的路径引导射束D03以到达射束分裂器D06。替代布局是可能的且在此实施例的范围内。

[0099] 图9说明另一重复率倍增器120E,其如先前论述般使重复率加倍。重复率倍增器120E包括以类似于在上文关于图6描述的方式由曲面镜B01及B02以及射束分裂器B03形成的光学腔。等腰三角形棱镜E01在此处用于替代先前实施例的补偿器B05。

[0100] 图10A及10B说明等腰三角形棱镜E01的有用特征:(1)其位移射束且可通过横向移动棱镜来调整位移量,且(2)如果多个射束平行进入棱镜中,那么输出射束的空间序列将被颠倒。此等腰三角形棱镜还可实施为等腰梯形或杜夫棱镜。

[0101] 图11A及图11B说明根据示范性实施例的两个类似平顶射束产生器102E-1及102E-2,其分别利用重复率倍增器120E-1及120E-2将从激光119E-1及119E-2接收的输入激光脉冲(输入)分裂为两个横向移位(分开的往返光学)输出射束路径,由此产生具有时间平均平顶射束轮廓的输出激光脉冲(输出),其具有是输入激光脉冲的脉冲重复率的双倍(两倍)的脉冲重复率。重复率倍增器120E-1及120E-2包含以类似于在上文关于图9描述的实施例的方式布置的两个球面/腔(弯曲)面镜B01及B02、射束分裂器B03及等腰三角形棱镜E01。图11A将图9的标称光学路径示出为虚线。在图11A中示出的实施例中,由于输入射束的小移位

(例如,通过在由图11A的底部的粗箭头指示的方向上移位激光119E-1),腔中的射束位移到路线E02。在激光脉冲已在路径E02上完成围绕腔的一个行程之后,棱镜E01将激光脉冲横向移位到标称路线的相对侧上的路径E03。路线E03上的脉冲在其返回到达棱镜E01时再次切换到路线E02。因此,激光脉冲将在路线E02与E03之间交替。

[0102] 每当激光脉冲遭遇射束分裂器B03时,脉冲的能量的部分受到反射且离开系统。在路线E02上行进的脉冲产生出口路线E04上的脉冲,且路线E03上的脉冲产生出口路线E05上的脉冲。使用此设置,一个高斯射束空间上分裂为两个高斯射束。通过控制E04与E05之间的分离,可控制此两个激光束之间的重叠程度。在优选实施例中,输出射束轮廓拥有近似平顶时间平均强度,如在图12中说明。可通过相对于另一高斯移位一个高斯达射束腰半径(即,射束振幅是其峰值的 $1/e^2$ 处的半径,或等效地射束功率密度是其峰值的 $1/e$ 处的半径)的约0.5倍而产生近似平顶输出射束轮廓。可在需要均质化空间功率分布的许多应用中十分期望此平顶轮廓。注意,因为路线E04及E05上的激光脉冲在相较于一个别脉冲的持续时间分离更长时间的时间(例如在时间上分离输入激光脉冲之间的时间间隔的约一半)处离开腔,所以不存在一个脉冲与另一者的干扰,从而导致所需相对平顶轮廓。两个移位高斯之间的干扰(其可在不具有脉冲之间的足够长时间延迟的情况下发生)可引起轮廓的非平顶。

[0103] 图11B说明具有重复率倍增器120E-2的平顶射束产生器102E-2,其根据另一示范性实施例配置以产生具有平顶射束轮廓的激光脉冲(输出)。取代通过位移激光119E-2的位置而偏移输入射束,棱镜E01朝向腔轴(如通过图式的底部的粗箭头指示)位移且因此将脉冲从标称路线E06(实线)转向到新路线E07(虚线)。每当每一脉冲在腔往返之后行进穿过棱镜E01时,其将接着在路线E06与E07之间来回(即,横向移位)。类似于图11A的实施例,当脉冲在两个不同路线下穿过射束分裂器B03时将产生两个输出射束,且可通过适当调整射束分离形成时间平均平顶射束轮廓。

[0104] 上述重复率倍增器120E-1及120E-2(其促进图11A及图11B中示出的平顶方案)是基于使重复率加倍的方案(例如,在上文参考图9描述的布置)。因此,其优势是一个光学腔不仅延展时间域中的激光脉冲能量分布而且均质化空间域中的能量分布。

[0105] 图13说明根据另一实施例的另一平顶射束产生器102F,其利用重复率倍增器120F接收通过激光119F产生的输入激光脉冲,且使用类似于上文描述且在图6中说明的3x脉冲重复率倍增系统产生具有时间平均平顶射束轮廓的输出激光脉冲F03及F04。在此实施例中,射束分裂器B04从其标称位置(与图6比较)向下移位且等腰或杜夫棱镜F06替代射束补偿器B06而用以按上文描述的方式横向移位射束,因此产生两个射束路径。每当激光脉冲经过射束分裂器B03与B04之间的路径(垂直于腔轴)且当其通过棱镜F06时,脉冲在外路线F01(实线)与内路线F02(虚线)之间切换。当激光脉冲遭遇射束分裂器B04时,脉冲的能量的部分将离开系统。在优选实施例中,射束分裂器反射率经选择,使得F03的平均输出功率约等于F04的平均输出功率。在其中射束分裂器损耗最小的一项优选实施例中,射束分裂器反射率经选择以使得近似地 $R_{B04} = \frac{R_{B03}}{4R_{B03}-1}$, 其中 R_{B03} 及 R_{B04} 分别是射束分裂器B03及B04的反射率。优选地,两个射束分裂器及射束补偿器的厚度均相等,使得对准光学器件以实现光学腔内的两个闭合回路是简单直接的。

[0106] 替代性地,图14A及14B说明根据其它实施例的示范性平顶射束产生器102G-1及

102G-2,其分别利用具有类似于图13的配置但不使用任何射束补偿器或棱镜的重复率倍增器120G-1及120G-2,重复率倍增器120G-1及120G-2分别接收通过激光119G-1及119G-2产生的输入激光脉冲且产生具有平顶射束轮廓的输出激光脉冲(输出)。在适当布置射束分裂器位置的情况下(例如,通过将射束分裂器B04-1移动到右侧(如在图14A中指示),或通过将射束分裂器B04-2移动到左侧(如在图14B中指示)),在基于3x倍增器的方案中可在不使用任何补偿器或棱镜的情况下产生平顶射束轮廓。另外,射束分裂器的涂层可面向不同方向(图14A)或面朝向相同方向(图14B)。还可将图14A及14B中的实施例视为图7A及7B中示出的布置的衍生,其中射束分裂器中的一者在位置中偏移,此引起射束分裂为两个,且因此在适当偏移下产生时间平均平顶输出轮廓。

[0107] 图15A说明另一示范性平顶射束产生器102H,其利用具有类似于图8中示出的方案(此处称为“标称”)的4x重复率倍增器120H。此实施例可产生相较于3x重复率倍增器更宽、更平坦的输出轮廓。通过利用图11B中说明的机构,向下位移棱镜D02引起第一级输出射束D03分裂为两个(D03及H01)。此外,朝向左侧移动棱镜D04使分裂射束D03及H01位移到标称路径(虚线)的一侧。此两个射束在进入通过射束分裂器D06、面镜B01、面镜B02及面镜D07形成的第二腔之后倍增到标称的另一侧。因此,将存在四个射束(H02、H03、H04、H05)穿过射束分裂器D06离开系统。注意,图式中的虚线是仅当直角棱镜未位移时存在的标称射束路径,且其在此处仅用于参考。在此情形中并无射束实际上经过此标称路线。

[0108] 为产生平顶射束总体,三个参数需布置成适当关系。通过适当调整棱镜D02的位移距离,可调谐D03与H01之间的空间(a),及因此H02与H03之间的空间以及H04与H05之间的空间。通过调整棱镜D04的移位,可调谐H03与H04之间的空间(b)。最后,可选择射束分裂器D01反射率,使得射束D03及H01拥有具有所需比的不同功率。

[0109] 图15B说明由图15A的此设置产生的示范性输出射束轮廓。在此示范性实施例中,对于输入高斯射束半径 $w(1/e^2\text{ 定义})$,由 $a \sim 0.9w$ 、 $b \sim 0.86w$ 产生平顶输出轮廓,射束分裂器D01的反射率 R_{D01} 是 ~ 0.65 ,且射束分裂器D06的反射率 R_{D06} 是 ~ 0.33 。此实例产生具有约 $2.3w$ 宽度的基本上平顶的时间平均输出轮廓。其它组合还可取决于需要轮廓有多平坦而起作用。

[0110] 在上文引用的'075及'593申请案(其以引用的方式并入本文中)中,描述激光脉冲重复率倍增器的替代实施例。此类申请案说明如何通过使用射束分裂器将每一输入脉冲的能量的约 $2/3$ 引导到腔中同时将每一脉冲的能量的 $1/3$ 引导到输出而使用适当长度的环形腔使脉冲激光的重复率加倍。在腔光学路径长度对应于输入激光脉冲之间的时间间隔的约一半的情况下,输出脉冲列形成基本上类似能量的包络,其按原始激光脉冲的重复率的两倍的重复率重复。'593申请案还描述如何调整射束分裂器的透射率及反射率,以便维持基本上相等输出脉冲能量以补偿射束分裂器及环形腔中的损耗。'075及'593申请案中描述的原理中的任一者可适当地应用于本文中描述的脉冲重复率倍增器的各种实施例。

[0111] 在上文连同说明本发明的原理的附图提供本发明的一或多个实施例的详细描述。结合此类实施例描述本发明,但本发明不限于任何实施例。

[0112] 例如,在一实施例中,光学组件可涂覆有用于激光波长的适当涂层。任何透射元件(例如波板)的每一表面还可具有最小化在每一表面处反射的激光能量的量的抗反射涂层。面镜可涂覆有经设计以在激光波长下最大化反射且最小化散射的涂层。

[0113] 在另一实例中,在一项实施例中,赫里奥特池状腔可具有与上文给定实例不同的形状或面镜数目。

[0114] 虽然上文说明的实施例在一个平面中绘制,但替代实施例可将腔回路中的一者(例如图8或图15A中的次腔回路)放置于近似垂直于另一腔回路(例如主腔回路)的平面或相对于另一腔回路(例如主腔回路)的平面旋转的平面中,同时仍使用相同组面镜。例如,图16A及16B是示出2x脉冲重复率倍增器布置的正视图及侧视图,其中在垂直于由射束分裂器D01、射束补偿器或棱镜D02以及曲面镜B01及B02形成的腔回路的平面的平面中引导输入脉冲及输出脉冲。图16C及16D是示出4x布置的正视图及俯视图,其中一或多个面镜或棱镜可用于腔外侧以将光从棱镜D04引导或偏转到位于次回路的平面中的面镜D05。在图16D中注意,输入及输出射束、2x腔回路的平面、射束分裂器D01及射束补偿器或棱镜D02从上方可见示出为虚线以供参考。一个腔回路的光学组件经定位,使得其并不与其它腔回路交叉。将不同腔回路放置于不同平面中的优势是腔回路中的每一者可在与曲面镜(例如面镜B01及B02)的中心相距基本上类似距离处从所述面镜反射(如在图16C中示出,其中虚线示出从正面观察的输入及输出光路径以及2x回路的平面),从而允许腔回路同时处于焦点且因此最小化激光束在多次横穿腔回路时的像差。通过以类似于图15A中说明的方式在适当方向上定向及移位棱镜D02及D04,图16C及16D中示出的4x激光脉冲重复率倍增器可产生具有类似于图15A中示出的轮廓的时间平均基本上平顶轮廓的输出。

[0115] 图17说明示范性激光脉冲重复率倍增器120I,其经配置以产生具有是输入激光脉冲(其通过激光(未示出)以上文描述的方式产生)的重复率的两倍的重复率的脉冲列。类似于在上文引用的'593美国专利申请案描述的概念,射束分裂器(I01)放置于具有约等于两个连续输入激光脉冲之间的时间间隔的一半的光学路径长度的环形腔中。环形腔包括两个直角反射对光学元件,例如通过全内反射(TIR)反射激光脉冲的棱镜(I02及I03)。直角反射对光学元件I02及I03在激光重复率倍增器120I的环形腔中使用时具有优于面镜的若干优势。面镜的一个缺点是面镜需高反射率涂层,以便最小化激光脉冲在环形腔中循环时的损耗。高反射率涂层可被激光脉冲的峰值功率损害,尤其对于具有几百mW或更高的功率的深UV激光。TIR替代高反射率涂层的使用消除所述涂层在用高激光功率长期操作时受到损害的风险。使用棱镜而非面镜的第二优势是形成两个基于面镜的直角反射对元件所需的四个面镜被两个棱镜替代,从而减少光学组件的数目。使用棱镜的第三优势是一个棱镜的两个TIR表面之间的直角为固定的且可按高精度制造。棱镜的紧密角容限及减少数目的光学组件简化图17的环形腔的对准。

[0116] 如在'593申请案中说明,在激光脉冲重复率加倍器中,如果期望每一输出脉冲具有基本上相等总能量,那么射束分裂器I01应经设计以将每一输入激光脉冲的能量基本上2/3(第二)部分反射到环形腔中,且透射每一输入激光脉冲的基本上1/3(第一)部分,使得1/3部分在第一时间离开重复率倍增器120I,且使得2/3部分在反射元件I02与I03之间被反射之后在第二时间离开重复率倍增器120I。例如,此可通过使用射束分裂器I01上的适当涂层而实现。注意,如果不需基本上相等输出脉冲能量,那么射束分裂器I01可经设计以反射每一激光脉冲的除2/3以外的某部分。例如,当用于检验系统中时,可期望每一输出脉冲具有基本上相等峰值功率以允许接近于被检验的对象的损害阈值的操作。可使用将每一激光脉冲的约62%反射到环形腔中的射束分裂器而实现输出脉冲的基本上相等峰值功率。

[0117] 如在'593申请案中说明,环形腔的光学路径长度可设置为稍长于或稍短于等于输入激光脉冲之间的时间间隔的一半的距离,以便加宽输出脉冲且降低每一输出脉冲的峰值功率且因此降低对下游光学器件或对通过并入有激光重复率倍增器的系统检验或测量的物品的损害的可能性。

[0118] 例如,如果输入激光脉冲具有120MHz的重复率,那么约1.249m的环形腔光学路径长度将导致重复率加倍,其中输出脉冲在时间上具有约相等间隔。为了实现此环形腔光学路径长度,棱镜之间的物理距离将需是约0.625m。如通过所属领域技术人员所理解,由于激光脉冲在每一棱镜I01及I02内侧行进短距离且棱镜材料的折射率大于1,所以棱镜内的光学路径长度略长于激光脉冲在棱镜内侧行进的物理距离。可对棱镜之间的物理距离作出适当小调整,以便补偿此,以便实现所需环形腔光学路径长度。如果期望输出脉冲宽于输入脉冲,以便降低每一脉冲的峰值功率,那么环形腔光学路径长度可设置为略长于或略短于1.249m(例如1.25m的环形腔光学路径长度),使得已两次围绕环形腔行进的脉冲相较于下一输入脉冲晚约6ps(微微秒)到达。

[0119] 在优选实施例中,重复率倍增器120I的环形腔优选地包含光学板I04以基本上补偿由通过射束分裂器I01的激光脉冲引起的激光束位置中的偏移。光学板I04优选地应具有基本上等于射束分裂器I01的光学厚度的光学厚度。光学板I04优选地应涂覆有抗反射涂层,以便最小化激光从其表面的反射。如果光学板I04放置于环形腔的相同分支中(如示出),那么优选地光学板I04应相对于输入激光束(脉冲)定向为基本上是射束分裂器I01的相对于激光束的角度的镜像的角度,以便基本上补偿由射束分裂器I01引起的射束移位。如果光学板I04放置于环形腔的其它分支中(未示出),那么其优选地应定向为基本上平行于射束分裂器I01。

[0120] 图18说明类似于图17的激光脉冲重复率倍增器但其直角棱镜(J02)中的一者相对于另一直角棱镜(J03)旋转90°的另一激光脉冲重复率倍增器120J。与图17的配置比较,图18的激光脉冲重复率倍增器120J可实现具有基本上两个棱镜之间的物理分离的一半的相同环形腔光学路径长度,因此导致更紧凑激光脉冲重复率倍增器。射束分裂器J01及光学板J04执行相当于图17的射束分裂器I01及光学板I04的功能。注意,光学板J04可根据板的定向的适当选择放置于环形腔的四个分支中的任一者中。

[0121] 图19A、19B及19C说明示范性实施例,其中通过将所示出的直角棱镜中的一者(或等效地直角面镜对)旋转到相对于其它棱镜/面镜对的适当角度而使环形腔光学路径长度基本上等于棱镜的物理分离的两倍(图19A)、四倍(图19B)、六倍(图19C)或其它偶整数倍。围绕环形腔的回路数目(每一脉冲须在返回到其原始发射位置(例如,射束分裂器,其未在图19A到19C中示出)之前经过)是 $m=180^\circ/\theta$,其中 θ 是两个棱镜(或面镜对)之间的相对角度数。参考图19A,当 $\theta=0$ 或等效地 180° 时, $m=1$ 且射束保持于一个平面中且在返回到其原始位置之前仅完成围绕环形腔的一个回路。参考图19B,当 $\theta=90^\circ$ 时, $m=2$ 且每一激光脉冲完成围绕环形腔的两个回路,以便返回到其原始位置。参考图19C,当 $\theta=60^\circ$ 时, $m=3$ 且射束在围绕环形腔的三个回路之后返回到原始发射位置。在射束返回到其原始位置时始终保留偏振。

[0122] 此设计的关键益处是在通过简单旋转棱镜中的一者而改变环形腔光学路径长度时维持基本上相同腔占据面积。

[0123] 图20说明根据示范性实施例的另一重复率倍增器120K,其中不同光学路径长度的两个环形腔经串联以使脉冲激光的重复率增到四倍。两个环形腔具有基本上类似外尺寸,尽管一个环形腔具有另一环形腔的光学路径长度的两倍。第一环形腔包括射束分裂器K01、棱镜K03及K02以及光学板K04。第一腔通过使用围绕环形腔的两个回路而使重复率加倍以实现所需光学路径长度。第二环形腔包括射束分裂器K11、棱镜K12及K13以及光学板K14。第二环形腔使用围绕环形腔的单一回路第二次使重复率加倍。由于连续脉冲之间的空间距离在重复率加倍之后减半,所以第二环形腔优选地应具有第一环形腔的光学路径长度的基本上一半。

[0124] 可由相同光学组件制造两个环形腔。由于两个腔可具有基本上类似外部尺寸,所以多数安装硬件及机械设计可相同。相较于其中一个环形腔具有另一环形腔的物理长度的约两倍的设计,可更有效使用空间。

[0125] 图21说明根据示范性透镜配置的重复率倍增器120L的环形腔部分,示范性透镜配置插入到由棱镜L02及L03形成的环形腔中,使得激光束在围绕环形腔的一个回路之后返回到其原始位置时基本上重新聚焦(成像)回到其原始射束状况(腰位置及大小)。透镜L05及L06优选地应具有相等焦距,所述焦距经选择,以便在腔的中央处形成射束腰,且透镜优选地定位成尽可能远离腰以避免射束腰附近的高激光功率密度。激光脉冲重复率倍增器的其它组件(例如射束分裂器及光学板)为清楚起见从此图式省略。

[0126] 图22说明重复率倍增器120M的另一环形腔部分,其中插入2回路腔中的相同透镜配置(即,棱镜L02及L03以及透镜L05及L06,见图21)将使激光束在返回到其原始位置时成像回到其原始射束状况(腰位置及大小)。类似地,此透镜配置将针对围绕环形腔的任何回路数目正确地重新成像激光束。

[0127] 图23说明利用另一示范性透镜配置的重复率倍增器120N的另一环形腔部分,所述另一示范性透镜配置使用两个棱镜N02及N03以及两个透镜N05及N06,其经布置以使得激光束在返回到其原始位置时成像回到其原始射束状况(腰位置及大小)。在此实施例中,透镜N05及N06优选地应具有约等于腔长度的焦距且定位成接近于棱镜,使得射束腰形成于腔的中央附近而非过度接近于棱镜或透镜表面中的任一者。

[0128] 图24说明利用类似于图23,但每一球面透镜由一对柱面透镜替代(即,球面透镜N05由柱面透镜0051及0052替代,且球面透镜N06由柱面透镜0061及0062替代)的另一示范性透镜配置的重复率倍增器120O的另一环形腔部分。每一柱面透镜优选地相对于激光束的传播方向及偏振定向成接近于布鲁斯特角。将透镜定向在p偏振的布鲁斯特角处或附近的优势是每一透镜表面的反射率将十分低且不使用任何涂层,因此节省涂层的费用且避免由激光造成的任何涂层损害。每一对中的一个柱面透镜的曲率定向成正交于相同对中的另一柱面透镜的曲率(即,曲率是矢状及正切的),使得其共同以基本上类似于图23中示出的球面透镜中的一者的方式重新成像射束。

[0129] 图25A说明具有修改的直角棱镜对(P01及P02)的激光脉冲重复率倍增器120P的另一示范性实施例。棱镜P01用于相同于图17中的棱镜I02的功能,除了棱镜P01经切割及定位以使得对于激光束的p偏振,入射角接近于布鲁斯特角。因此,不需棱镜处的AR涂层且避免高激光功率下的潜在涂层损害。棱镜P02具有相同于棱镜P01的形状且还相对于激光束的p偏振定向成接近于布鲁斯特角。棱镜P02具有仅围绕点P(并非整个表面)的额外涂层,其充

当将光耦入及耦出腔的射束分裂器。此消除对于单独的射束分裂器组件的需求,因此减少光学组件的数目且简化环形腔的对准。如上文说明,在一项优选实施例中,涂层经设计以反射每一入射激光脉冲的能量的约2/3,以便产生每一输出激光脉冲中的基本上相等能量。

[0130] 图25B说明类似于图25A的激光脉冲重复率倍增器的激光脉冲重复率倍增器120Q的另一示范性实施例,其利用相同棱镜P01,但由具有修改形状的棱镜Q02替代图25A的棱镜P02。此形状使输入及输出射束能够平行于彼此,通常期望此情况,此是由于其使将激光脉冲重复率倍增器集成到系统中变得更简单。棱镜Q02维持棱镜的TIR面之间的直角且针对环形腔中的激光束使用接近于布鲁斯特角的入射角。如上文针对棱镜P02描述,围绕位置P需要涂层,以便棱镜执行射束分裂器功能。

[0131] 图26A及26B说明根据示范性实施例的重复率倍增器120R,其中可通过旋转两个直角棱镜R01及R02中的一者(无论是否布鲁斯特角切割)而针对给定物理环形腔长度使有效射束路径长度加倍(或三倍等等)。在此类图式中,具有布鲁斯特角切割表面的棱镜R02须相对于垂直于此布鲁斯特入射表面的轴旋转,使得射束偏振状态及入射角(即,布鲁斯特状况)在旋转之后保持相同。

[0132] 图27A及27B分别是说明根据具有三个棱镜S01、S02及S03(各自具有不同形状)使得任何表面处不需涂层的另一倍增器设计的重复率倍增器120S的俯视图及侧视图。棱镜S01执行环形腔中的反射器及按所需反射率(例如约R=1/3的反射率)将射束耦入及耦出腔的射束分裂器的双重功能。注意,在图28B中示出的侧视图中,棱镜S02隐藏于棱镜S01后。在图式中指示各种棱镜的表面之间的各种角度。

[0133] 在图28、28A、28B及28C中示出棱镜S01的几何形状。其利用如在图29A及29B中示出的菲涅尔反射率性质。对于照射熔硅石(或具有类似折射率的任何材料)的表面的S偏振光,反射率在入射角是约73°时自然地变为约33.3%。输入激光束b1及输出激光束b2相对于表面S1 S偏振。然而,当折射射束通过表面S2或S3时,其被P偏振。如果此类表面(S2及S3)上的入射角接近于布鲁斯特角,那么激光束可以最小功率损耗通过而不需使用任何涂层,且因此避免对涂层的激光损害的任何可能性。

[0134] 在图30、30A及30B中说明重复率倍增器120S(见图27A)的棱镜S02。此棱镜利用在表面S4及S5处的按布鲁斯特角的反射,同时使用在表面S6处的全内反射。

[0135] 在图31、31A、31B及31C中说明重复率倍增器120S(见图27A)的棱镜S03。其充当具有按布鲁斯特角切割的两个表面的直角棱镜。此类布鲁斯特角切割针对垂直于环形腔平面的射束偏振而定向,其不同于图25A中的棱镜设计P01,棱镜设计P01针对平行于环形腔平面的偏振而定向。

[0136] 图32A说明根据具有平行于环形腔平面的偏振的另一示范性激光脉冲重复率倍增器配置的重复率倍增器120T。此配置形成矩形布局及90°射束耦合(入/出),其可更便于并入到仪器中。此配置包括三个元件。射束分裂器T01在一个表面上具有在45°的入射角下具有选定反射率(例如R=1/3的反射率)的涂层且在另一表面上具有抗反射(AR)涂层。如在图32B中指示,在一优选实施例中,棱镜T02是彼林布罗卡(Pellin Broca)棱镜,其用作使射束偏转总共90°的面镜,输入及输出表面相对于环形腔中的射束成布鲁斯特角。棱镜T02使用棱镜内侧的全内反射。以此方式,在不使用任何涂层的情况下针对p偏振射束几乎不存在能量损耗。在替代实施例中,具有高反射率涂层的面镜用于替代棱镜T02。元件T03象征性地

绘制为直角棱镜。在优选实施例中,棱镜T03使用对于具有平行于环形腔的平面的偏振的偏振光具有布鲁斯特切割表面的几何形状(例如图25A中示出的设计P01)。

[0137] 以类似于上文说明的方式,直角棱镜T03可围绕入射表面的法向方向旋转90°,以使腔内的射束路径长度加倍。

[0138] 图33说明根据示范性实施例的重复率倍增器120U,其中类似于图32A的实施例的环形腔的两个环形腔经串联以倍增重复率达四倍。第一环形腔U01使一个棱镜旋转90°,使得此腔的光学路径长度是第二腔U02的光学路径长度的约两倍,尽管两个腔具有类似物理尺寸。此两个环形腔共同形成使重复率增到四倍的倍增器。

[0139] 在上文引用的'075及'593申请案(其以引用的方式并入本文中)中,描述激光脉冲重复率倍增器的替代实施例。此类申请案说明如何通过使用射束分裂器将每一输入脉冲的能量的约2/3引导到腔中同时将每一脉冲的能量的1/3引导到输出而使用适当长度的环形腔使脉冲激光的重复率加倍。在腔光学路径长度对应于输入激光脉冲之间的时间间隔的约一半的情况下,输出脉冲列形成基本上类似能量的包络,其按原始激光脉冲的重复率的两倍的重复率重复。'593申请案还描述如何调整射束分裂器的透射率及反射率,以便维持基本上相等输出脉冲能量以补偿射束分裂器及环形腔中的损耗。'075及'593申请案中描述的原理中的任一者可适当地应用于本文中描述的脉冲重复率倍增器的各种实施例。

[0140] 为了达到甚至更高重复率,可串联上述激光脉冲重复率倍增器中的任一者的多个单元,其中每一单元具有不同腔长度。可使输出重复率等于输入重复率的 $2x$ 、 $4x$ 、……或 $2^n x$,其中n是激光脉冲重复率倍增器腔的数目,且每一腔的光学路径长度是原始脉冲之间的距离的 $1/2$ 、 $1/4$ 、…… $1/2^n$ 。

[0141] 上文示范性实施例说明如何出于倍增脉冲激光的重复率的目的而由平面镜、曲面镜、棱镜及透镜的各种组合形成不同长度的光学腔。可由不脱离本发明的范围的其它组合构造重复率倍增器或产生具有时间平均基本上平顶轮廓的输出的重复率倍增器。例如,平面镜可由棱镜替代(或,在许多情况中,反之亦然),或曲面镜可由平面镜与一或多个透镜的组合替代(或反之亦然)。由许多实际考虑因素决定使用哪些组件的选择,实际考虑因素包含激光波长、在光学组件的位置处的激光功率密度、组件的合适光学涂层的可用性、物理空间及重量。如上文说明,在功率密度足够高以潜在损害光学涂层的情况下,具有布鲁斯特角表面的棱镜及组件通常是优选的。

[0142] 本发明的范围仅受到权利要求书限制且本发明涵盖数种替代方案、修改及等效物。在上文描述中阐述数种特定细节,以便提供对本发明的透彻理解。出于实例的目的提供此类细节且可在不具有一些或所有此类特定细节的情况下根据权利要求书来实践本发明。出于清楚的目的,并未详细描述关于本发明的技术领域中已知的技术材料及衍生物以免不必要的模糊本发明。

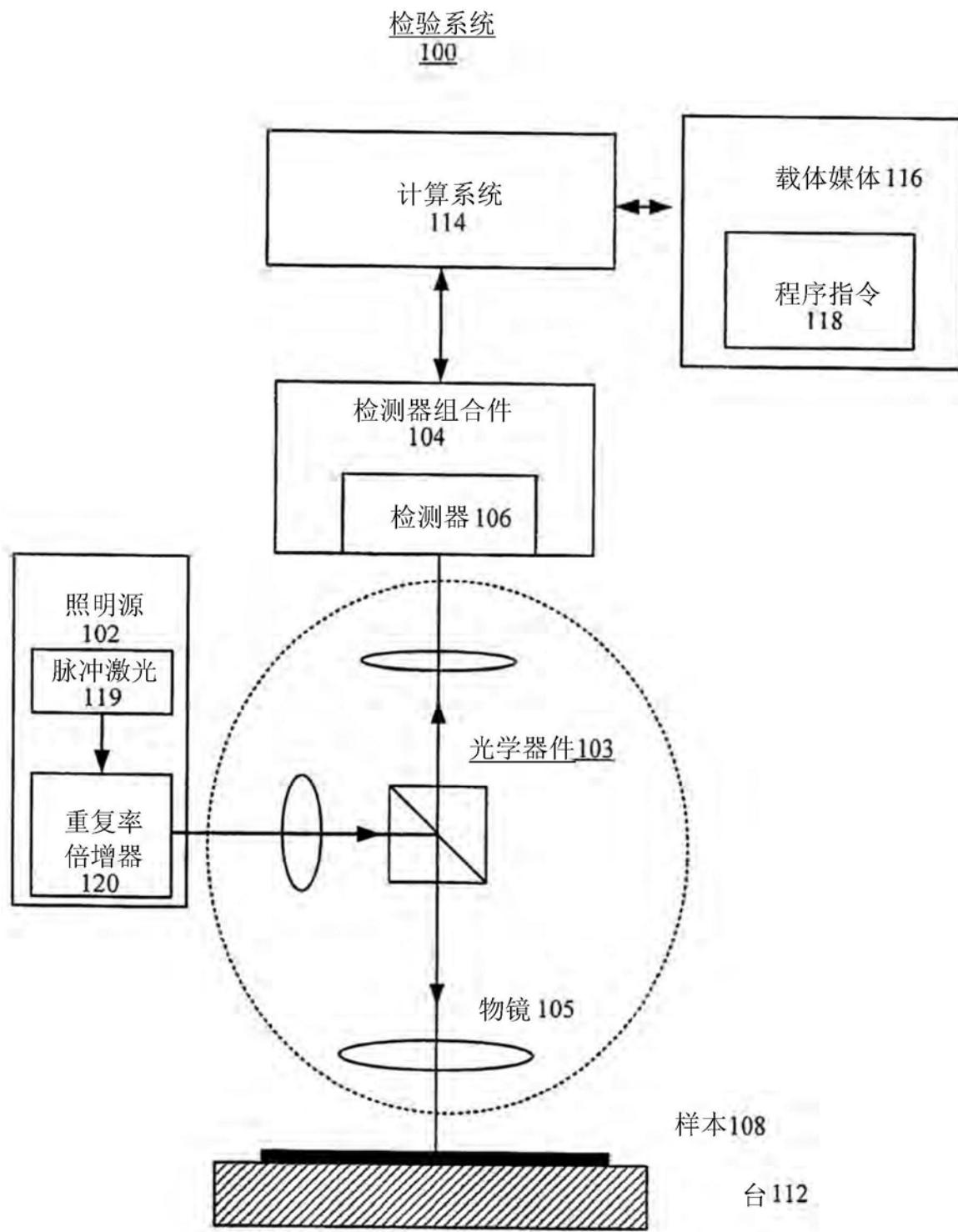


图1

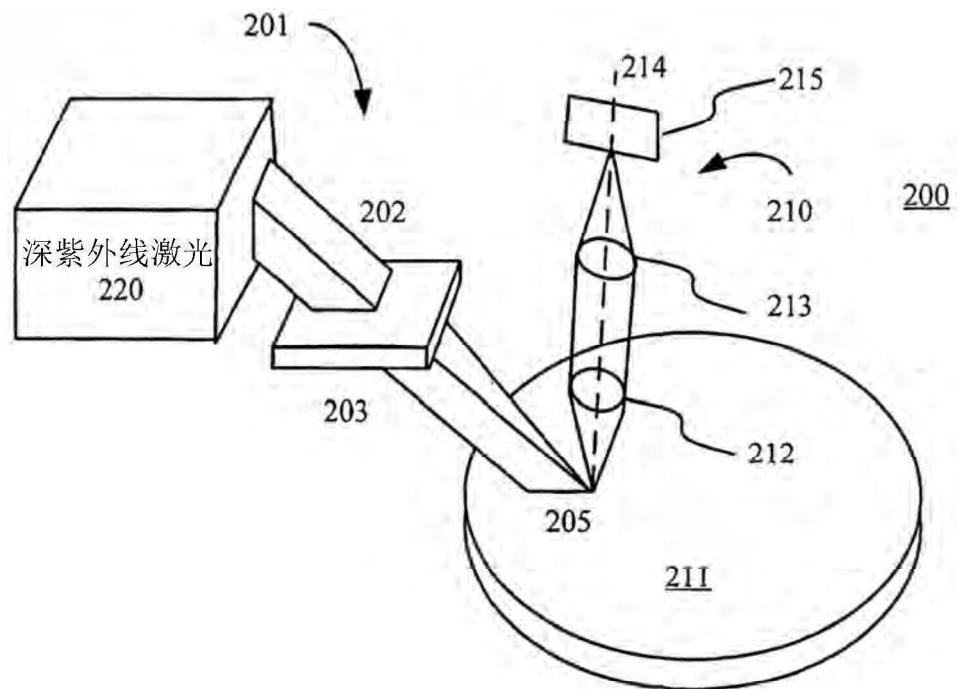


图2A

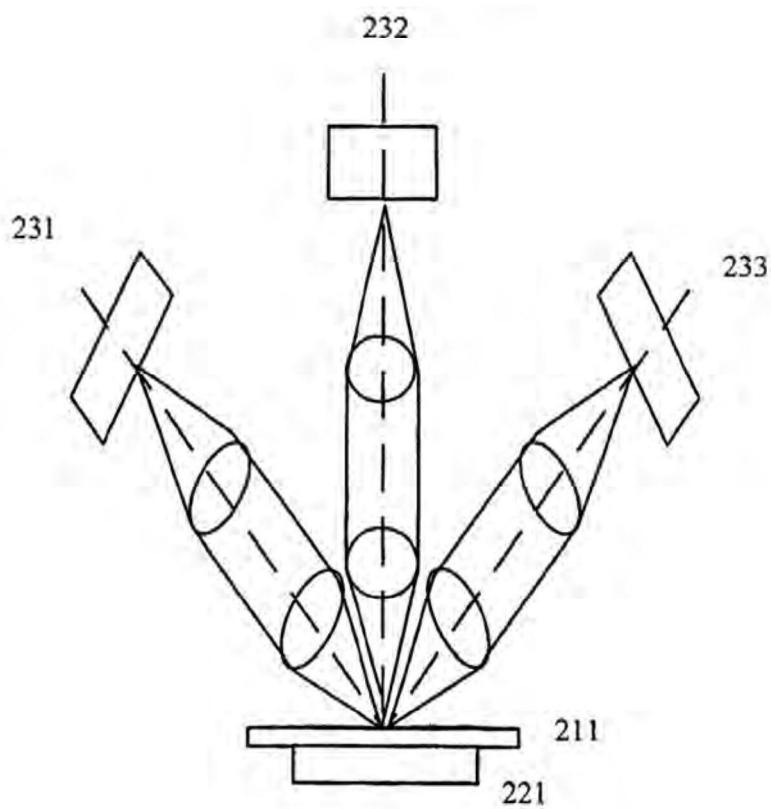


图2B

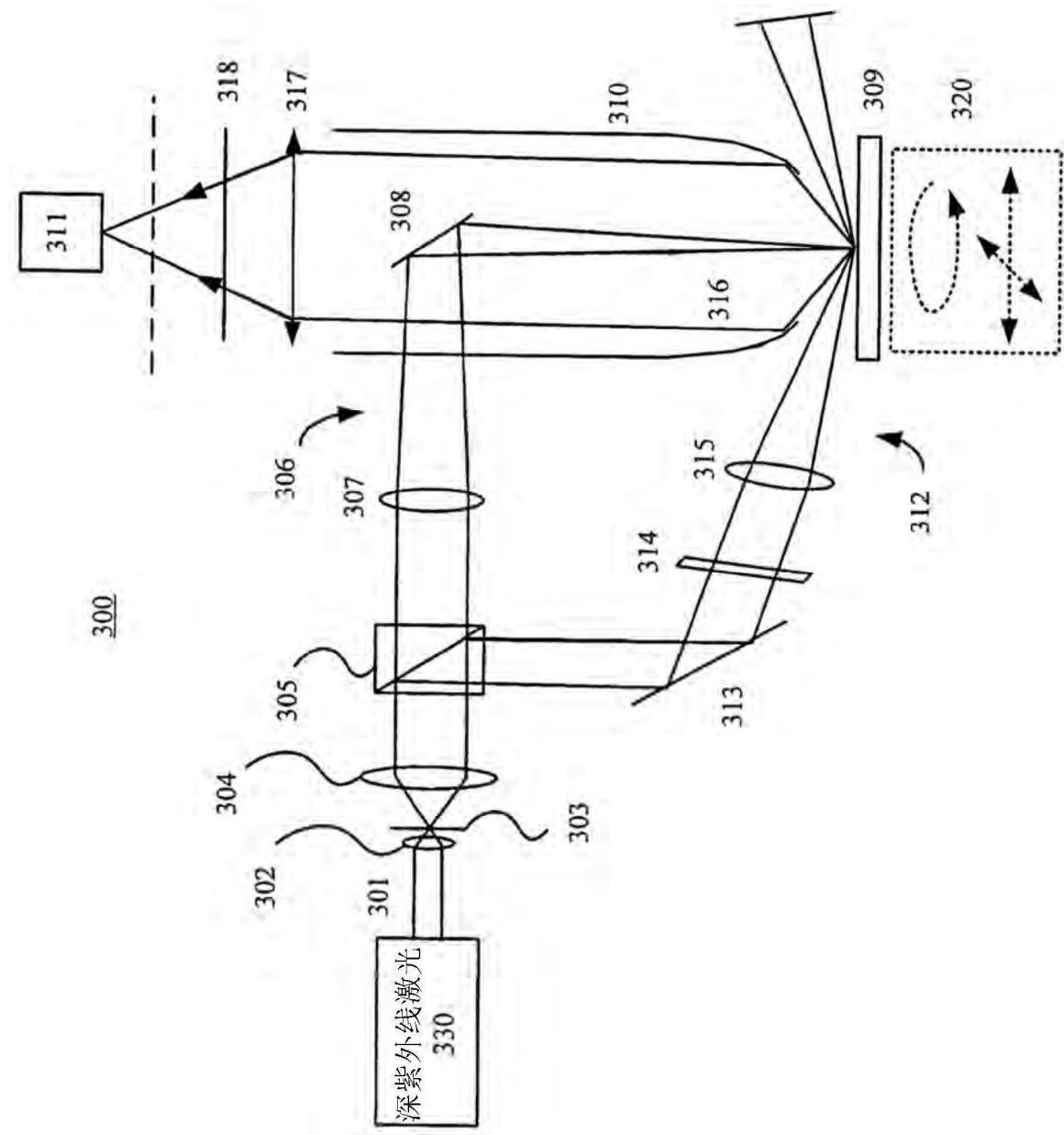


图3

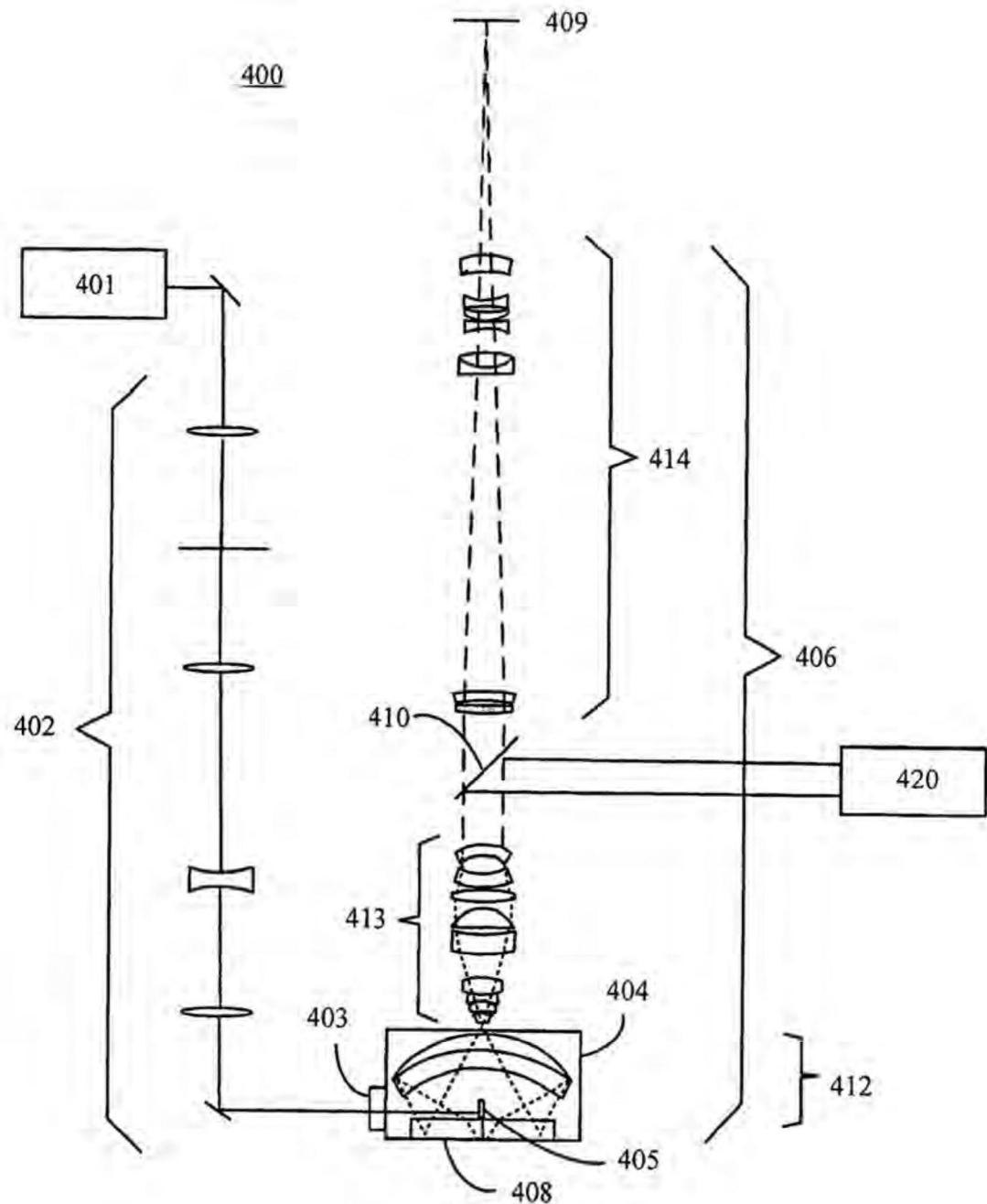


图4

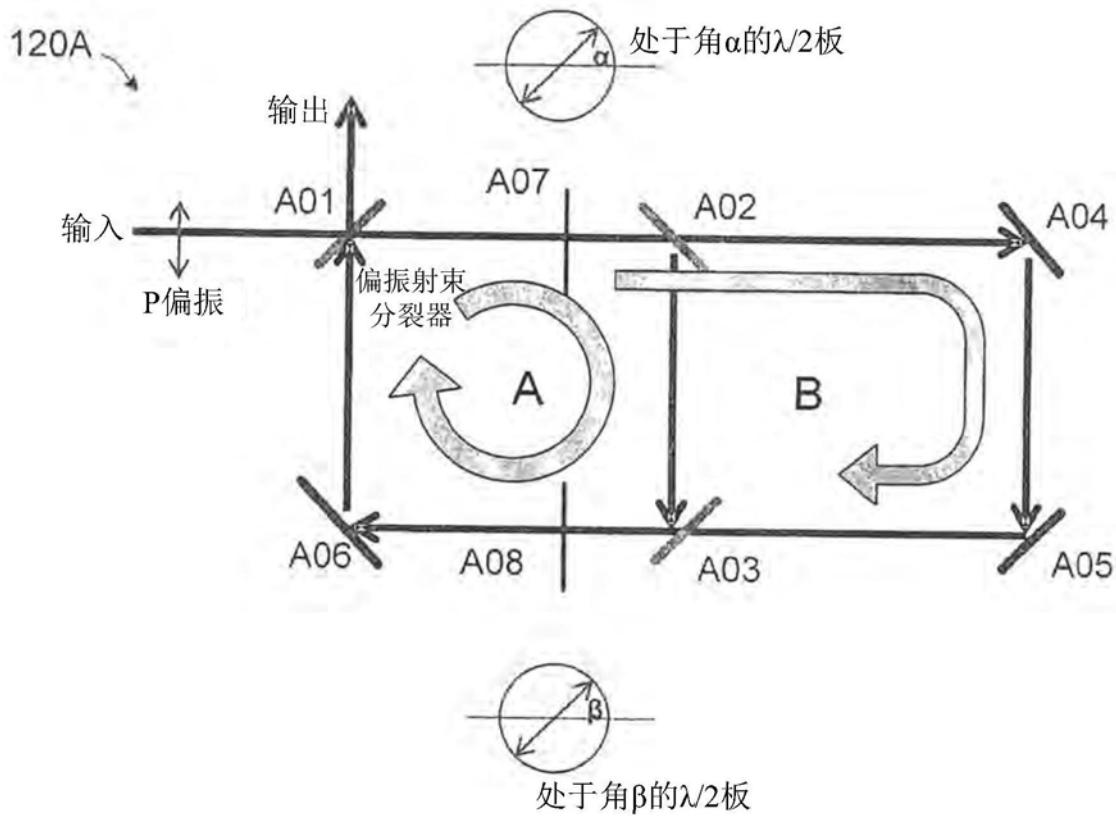


图5

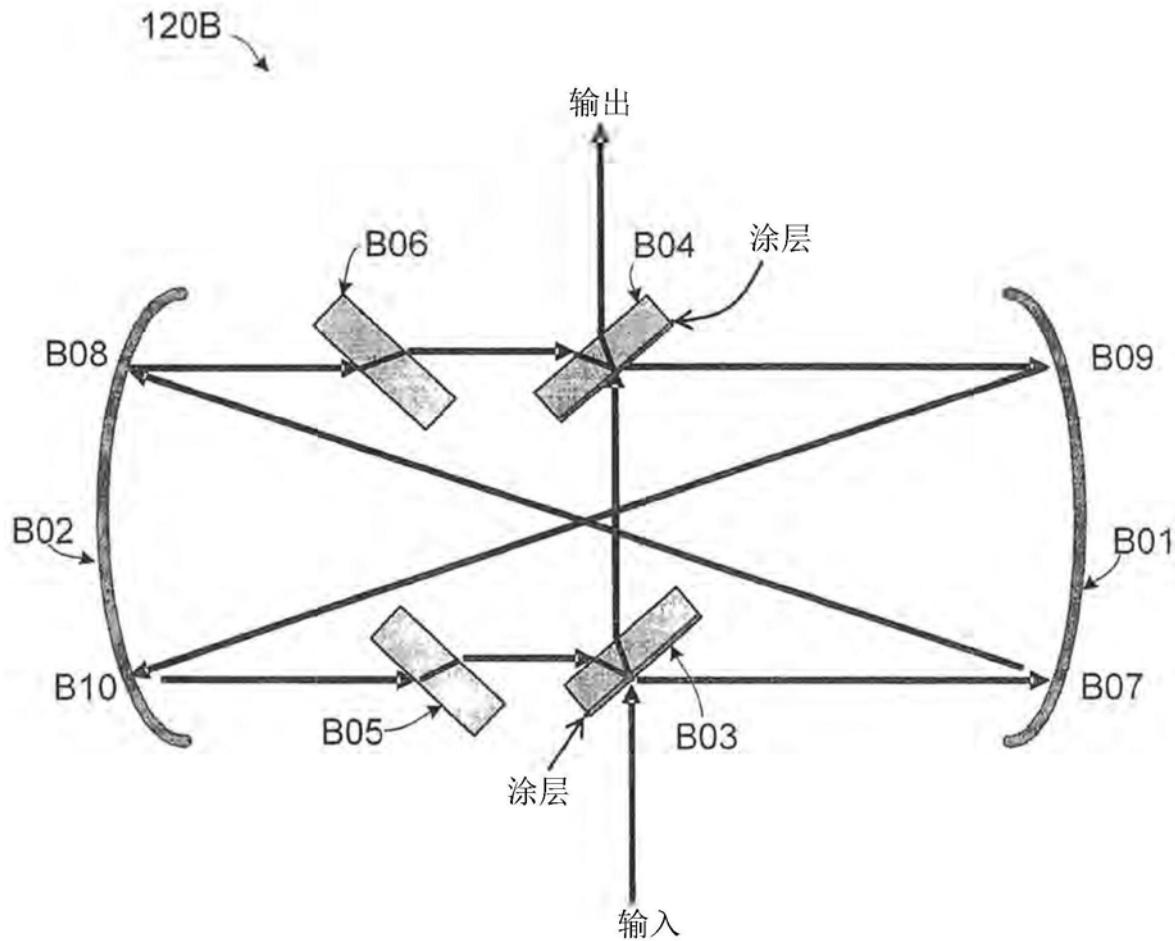


图6

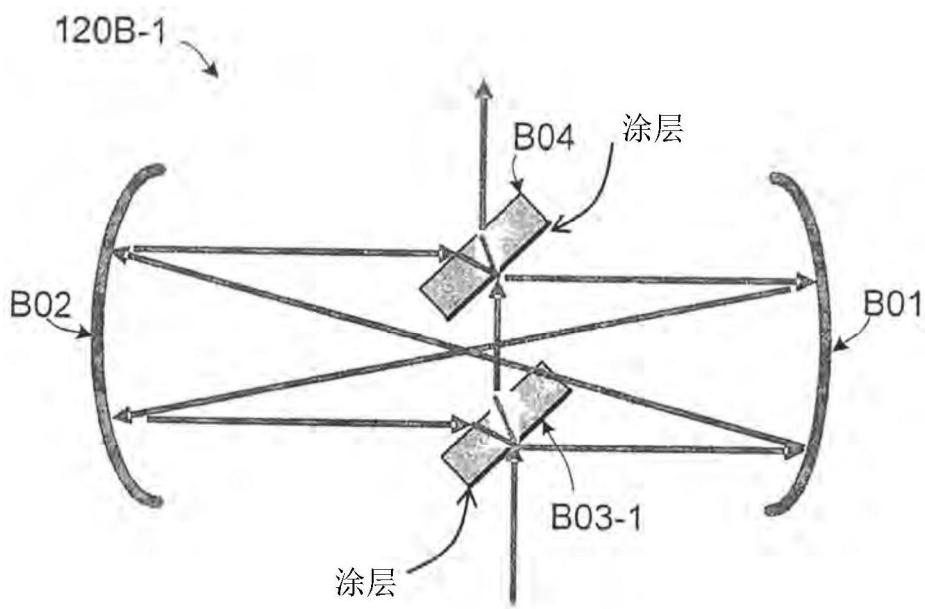


图7A

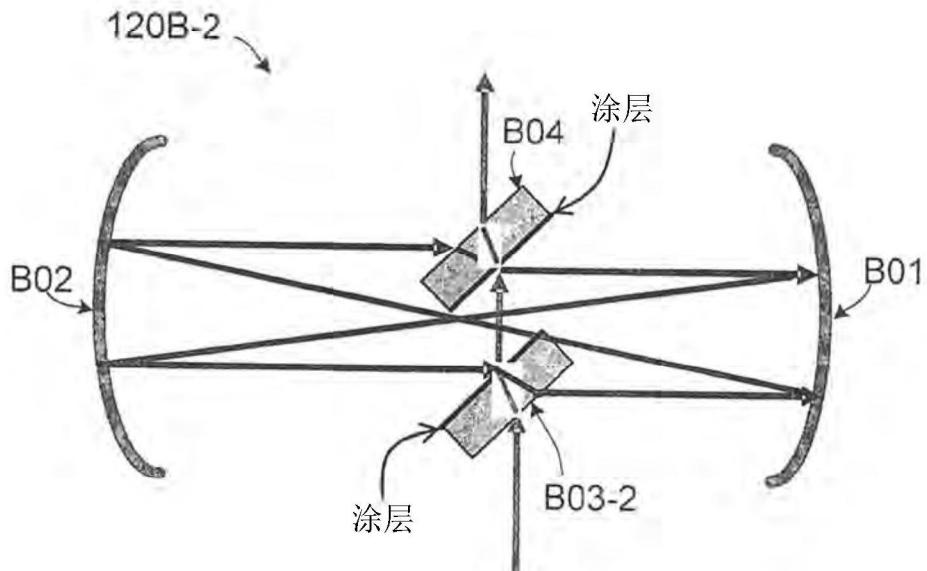


图7B

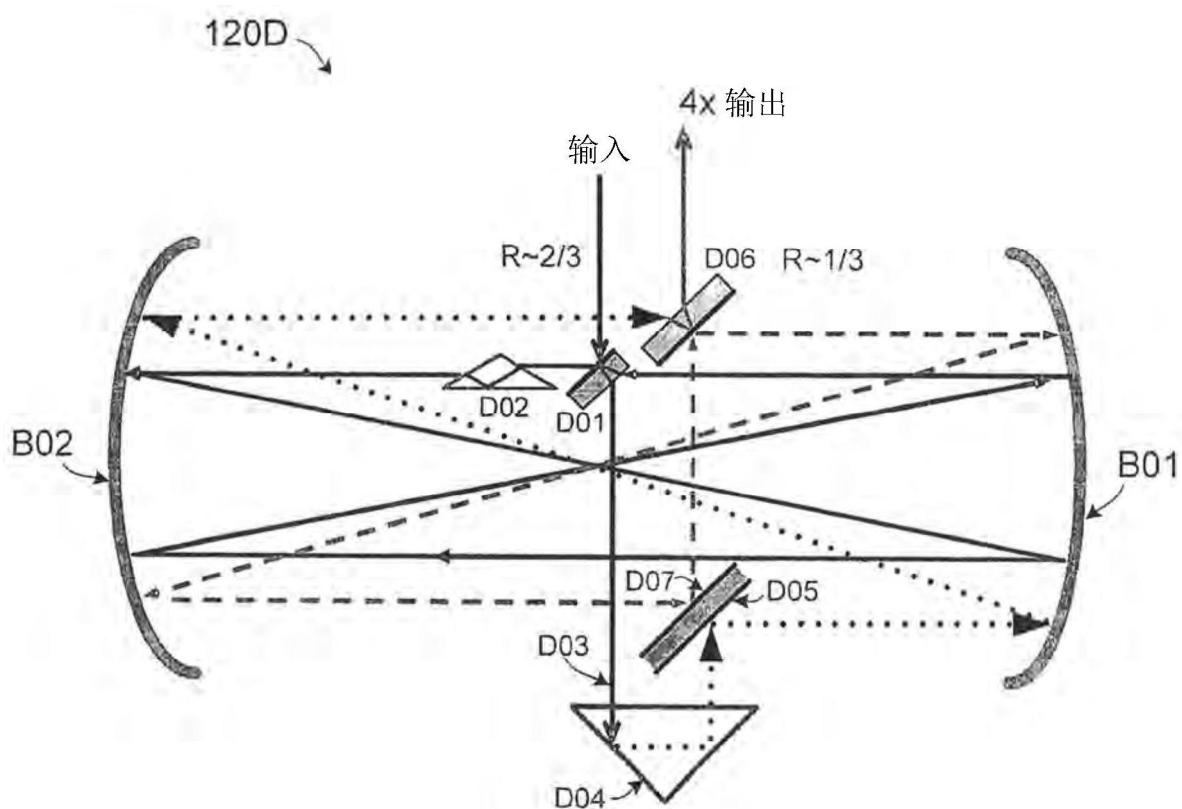


图8

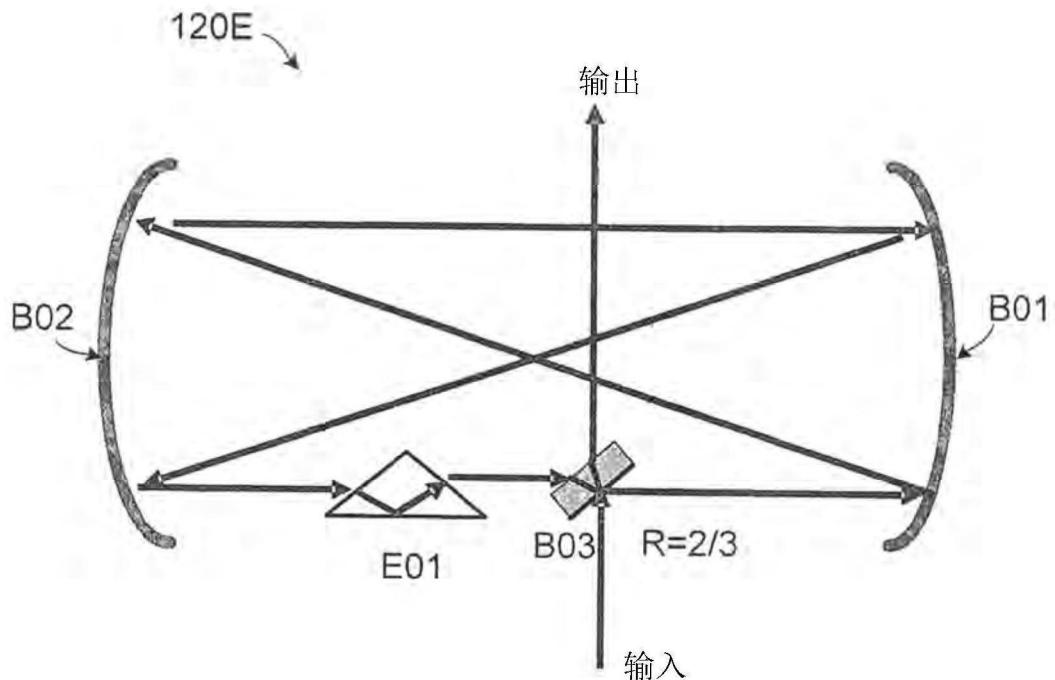


图9

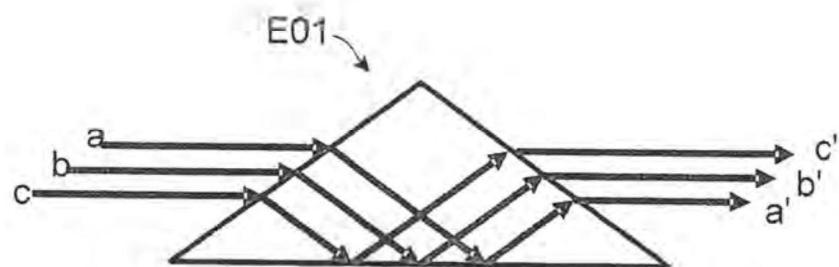


图10A

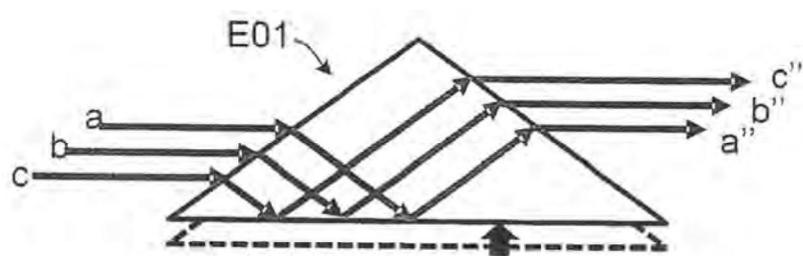


图10B

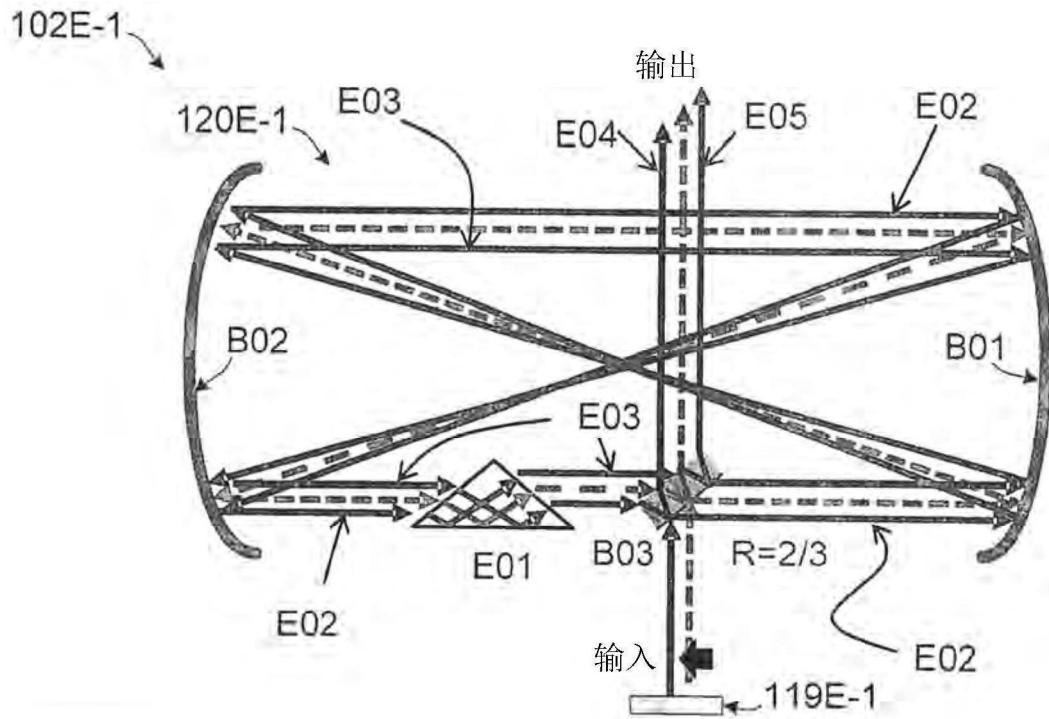


图11A

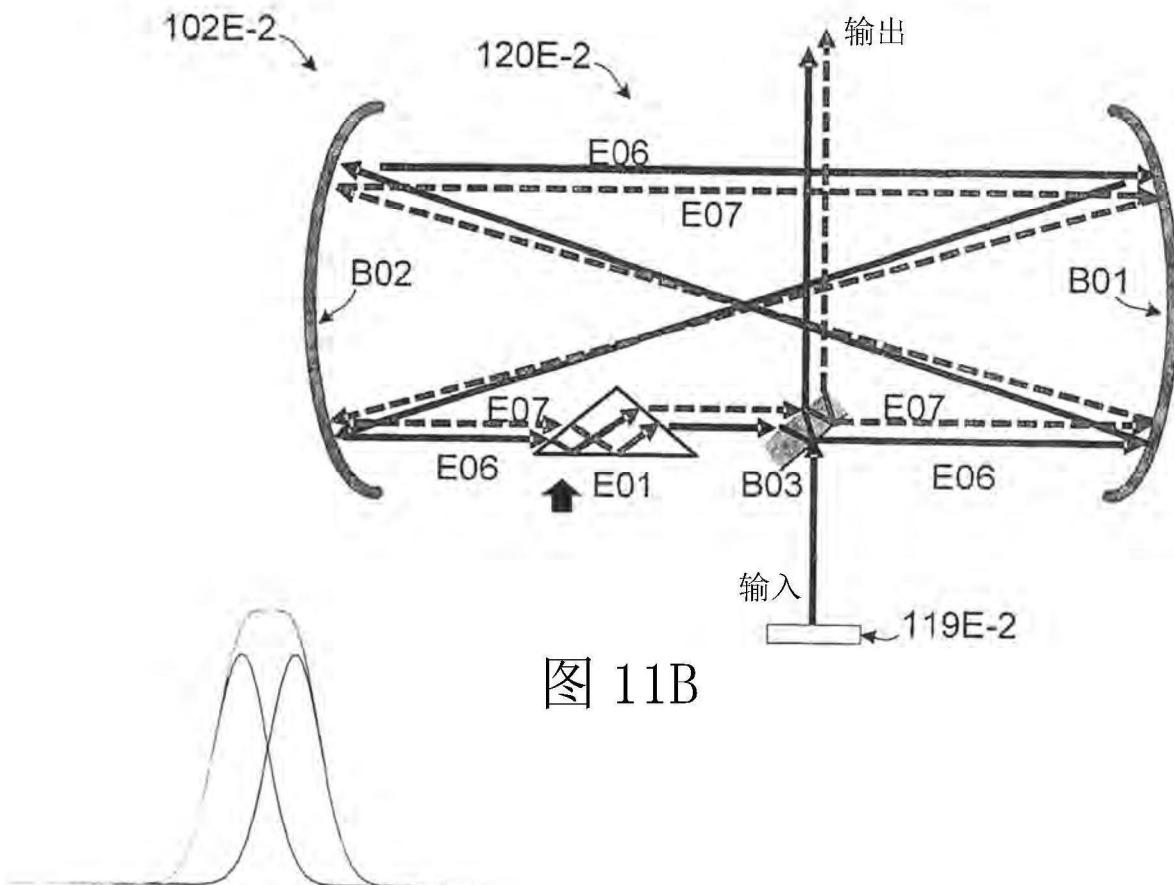


图 11B

图 12

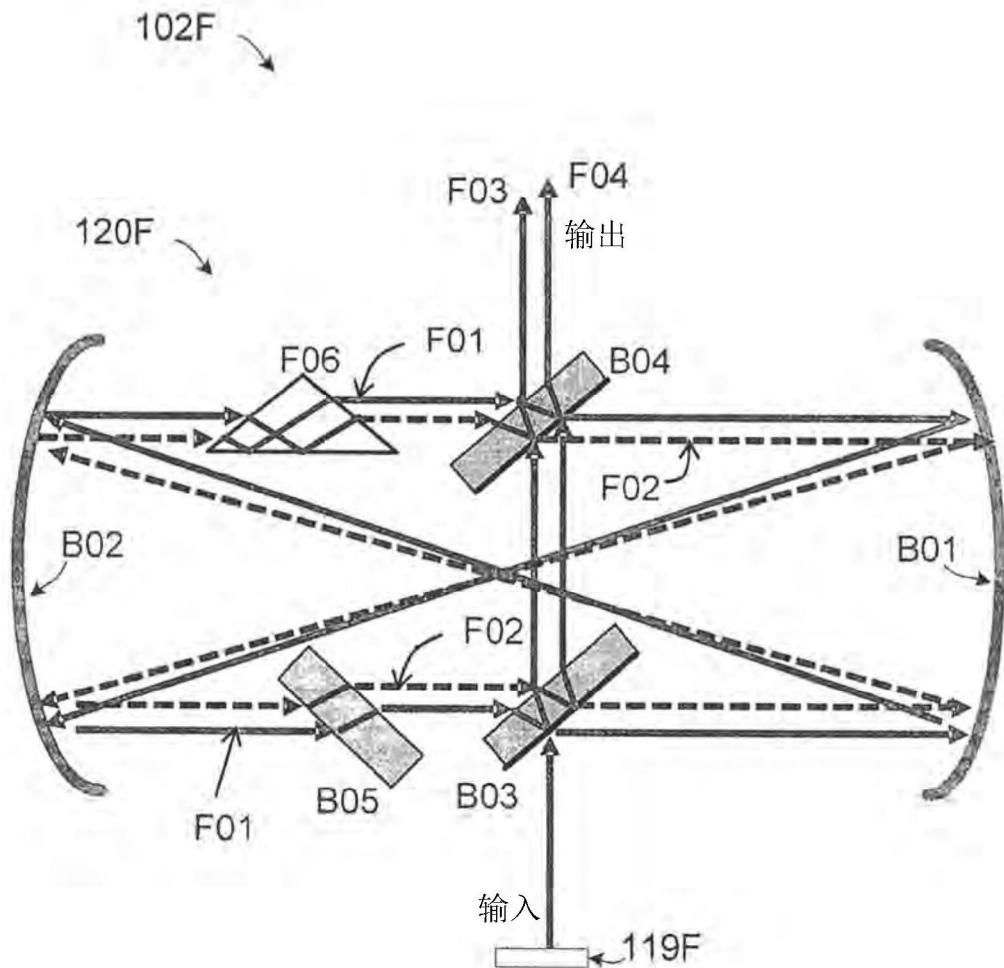


图13

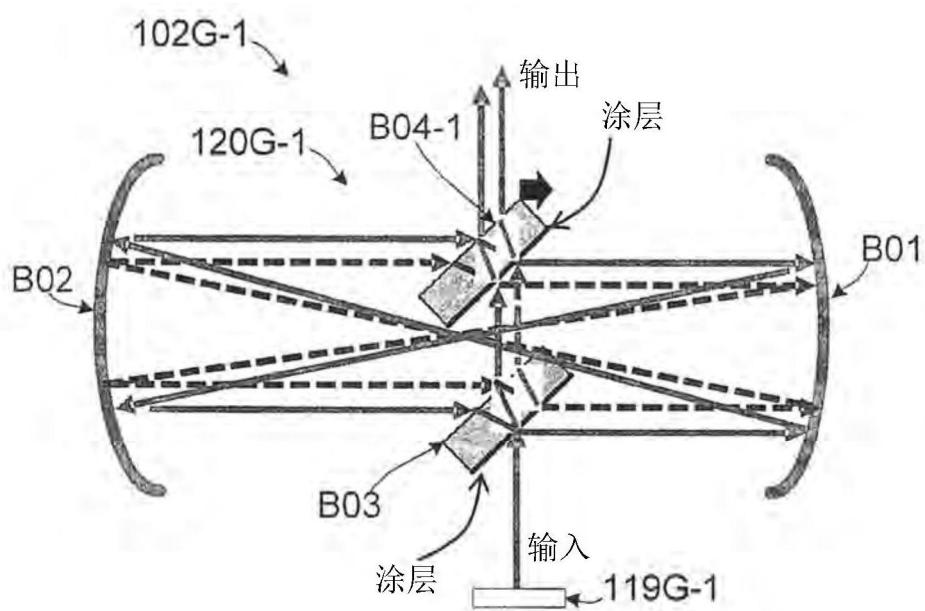


图14A

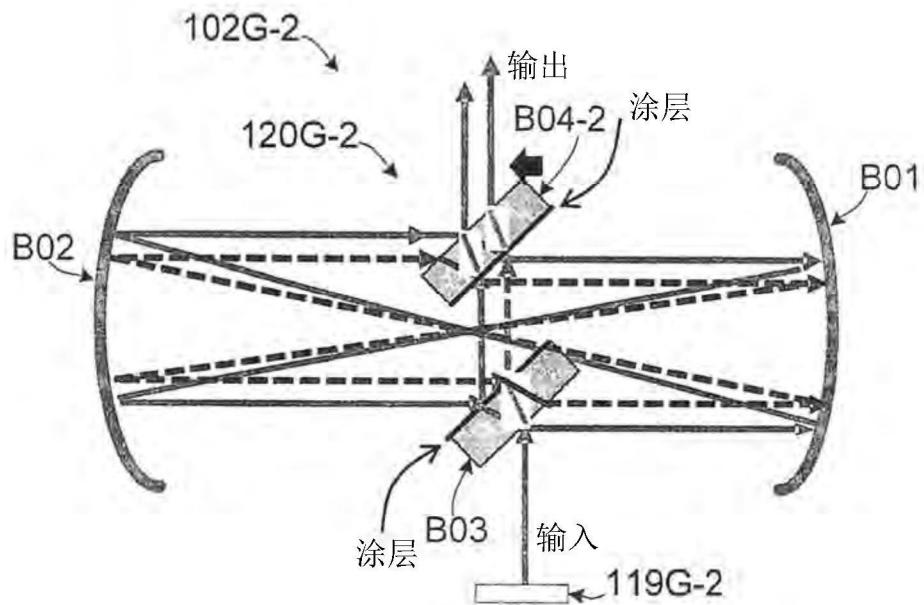


图14B

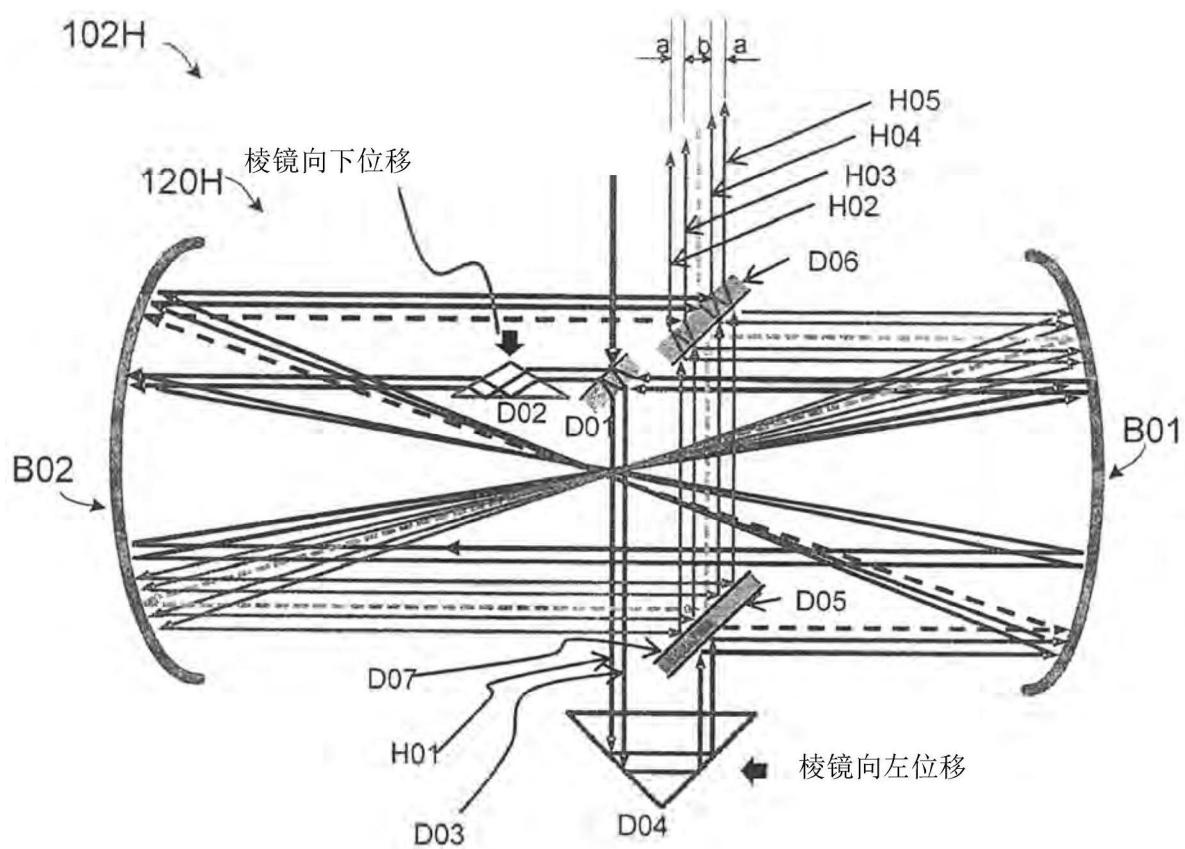


图15A

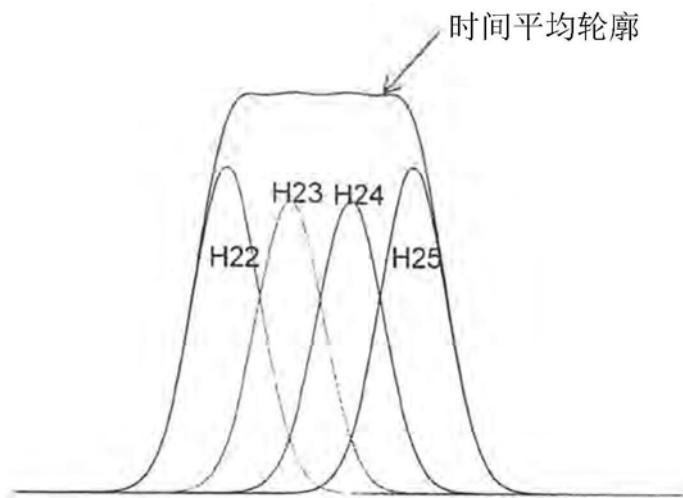


图15B

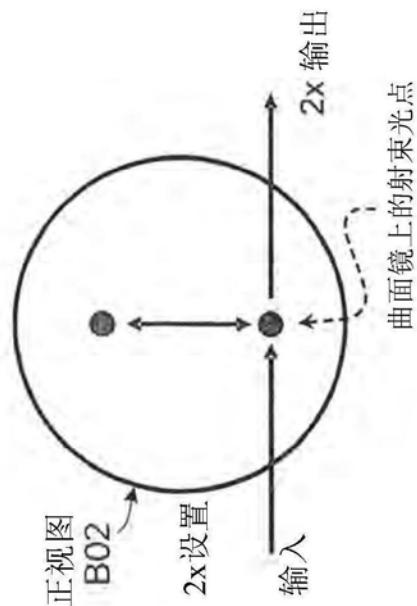


图16A

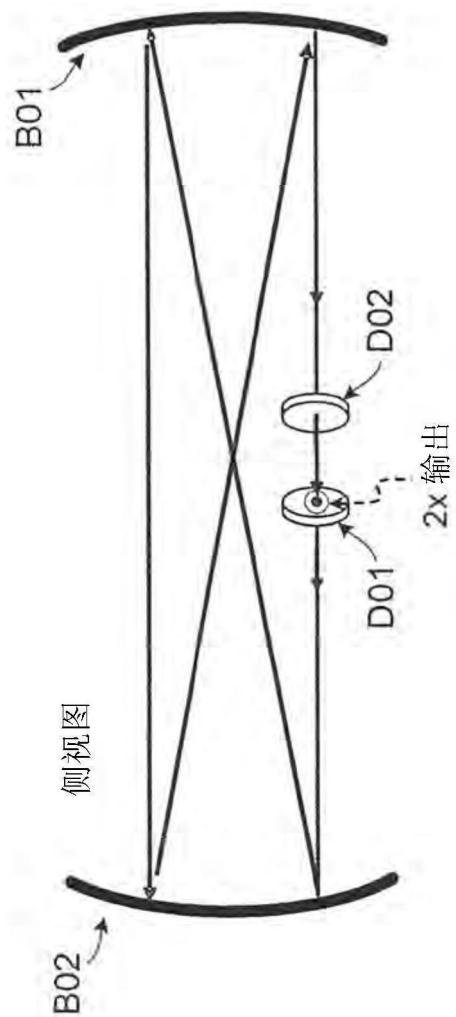


图16B

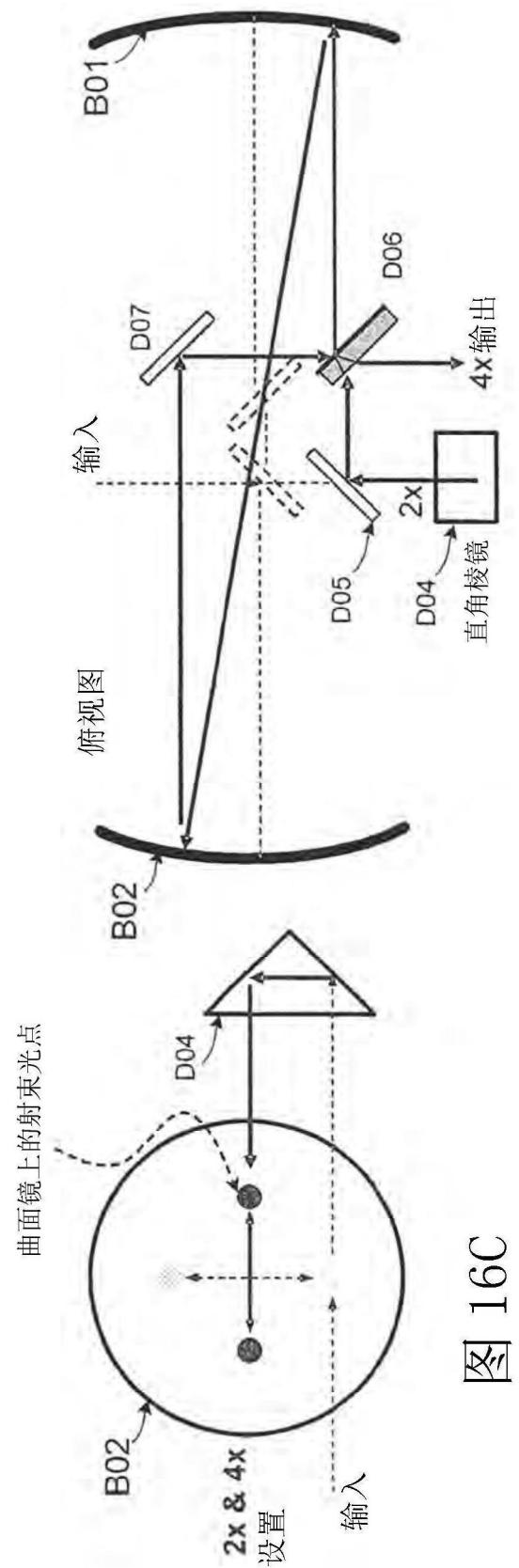


图 16C
图 16D

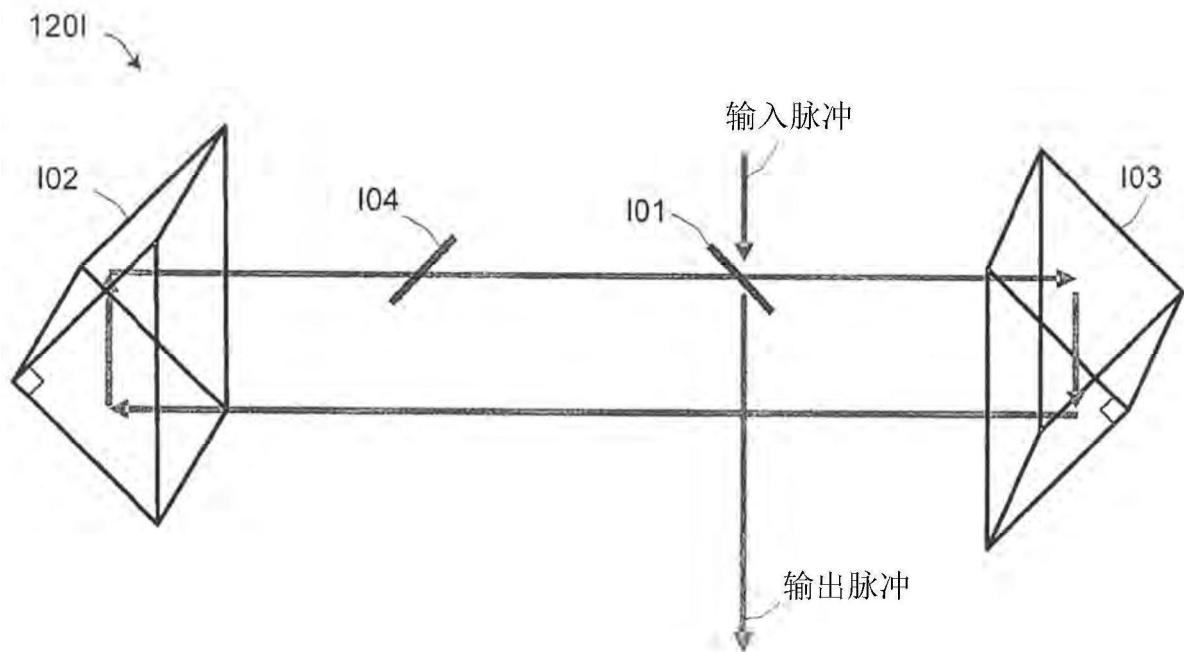


图17

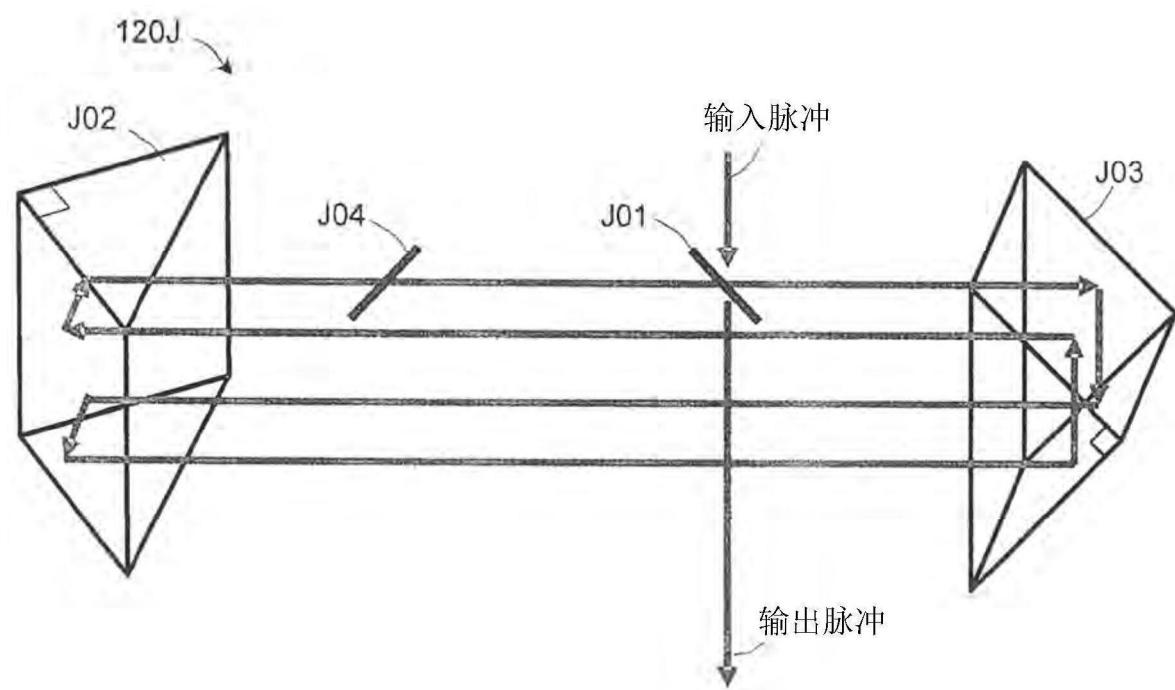


图18

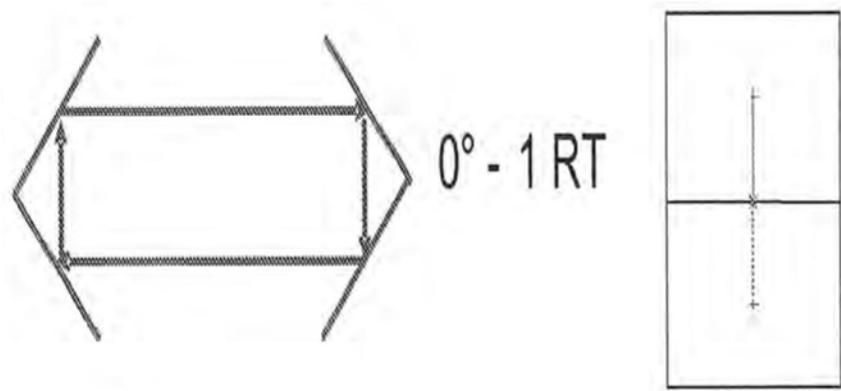


图19A

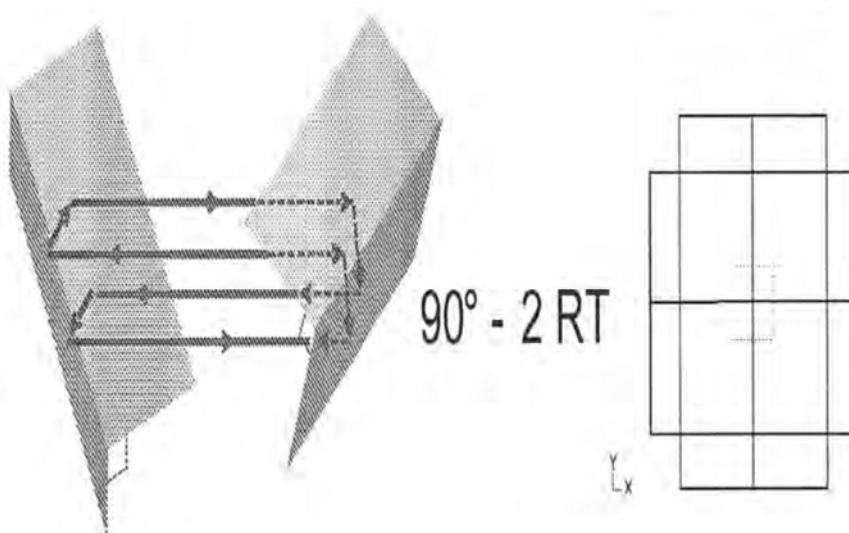


图19B

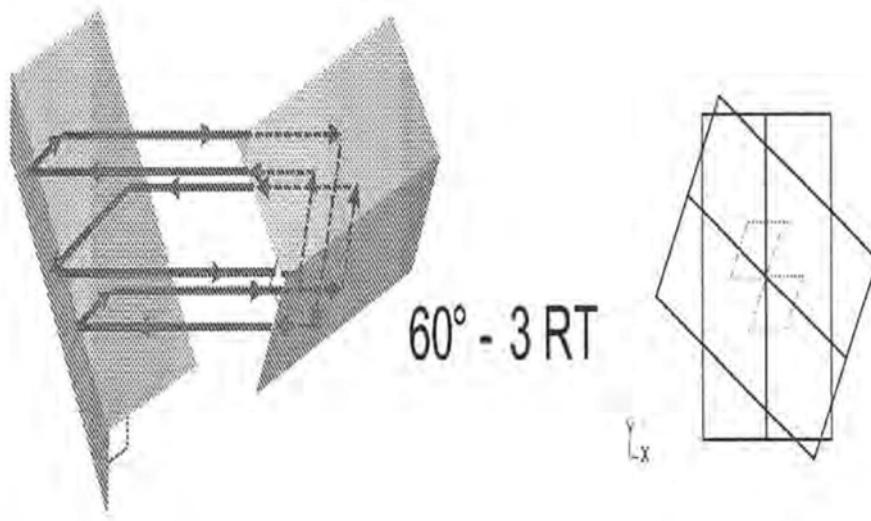


图19C

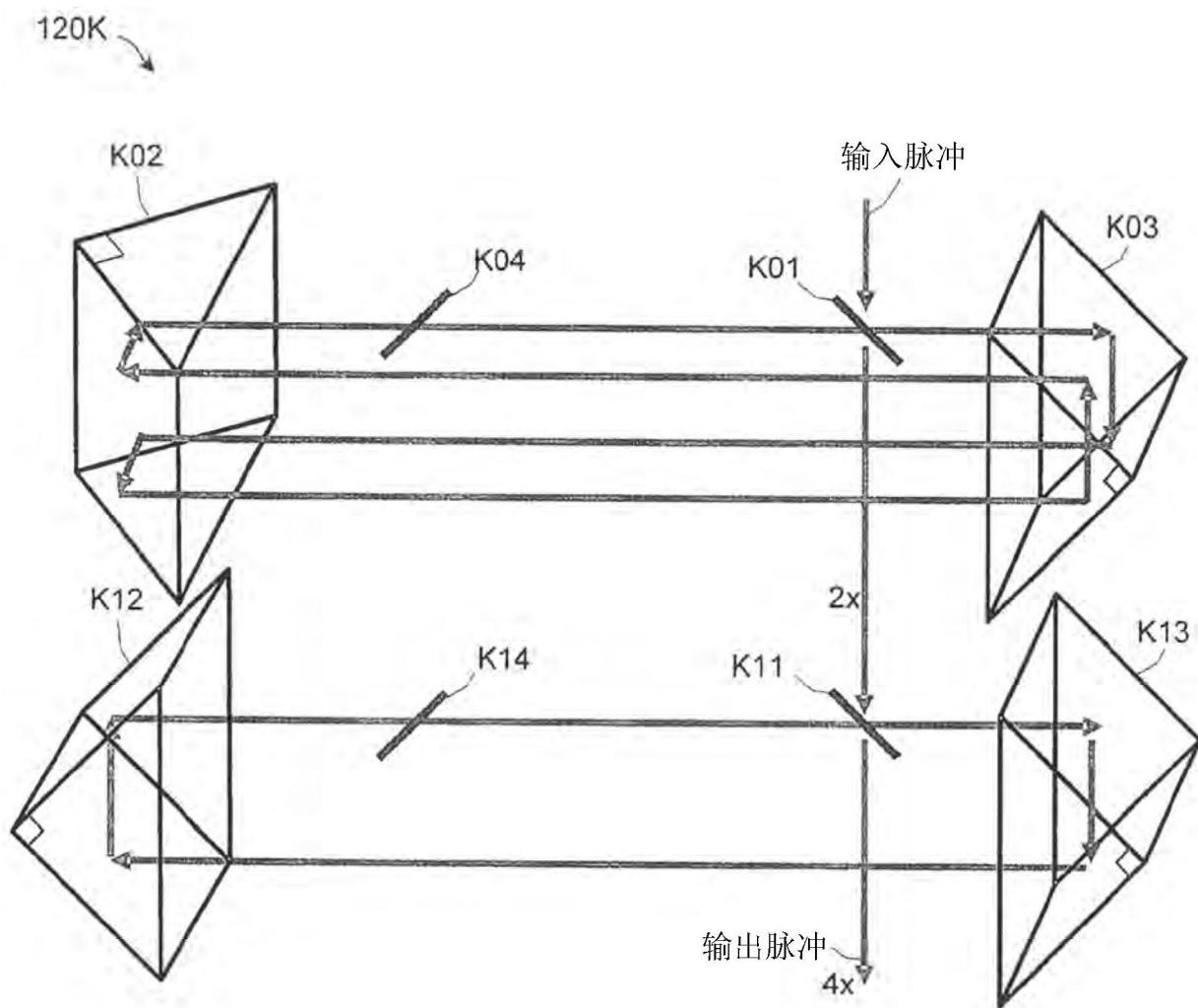


图20

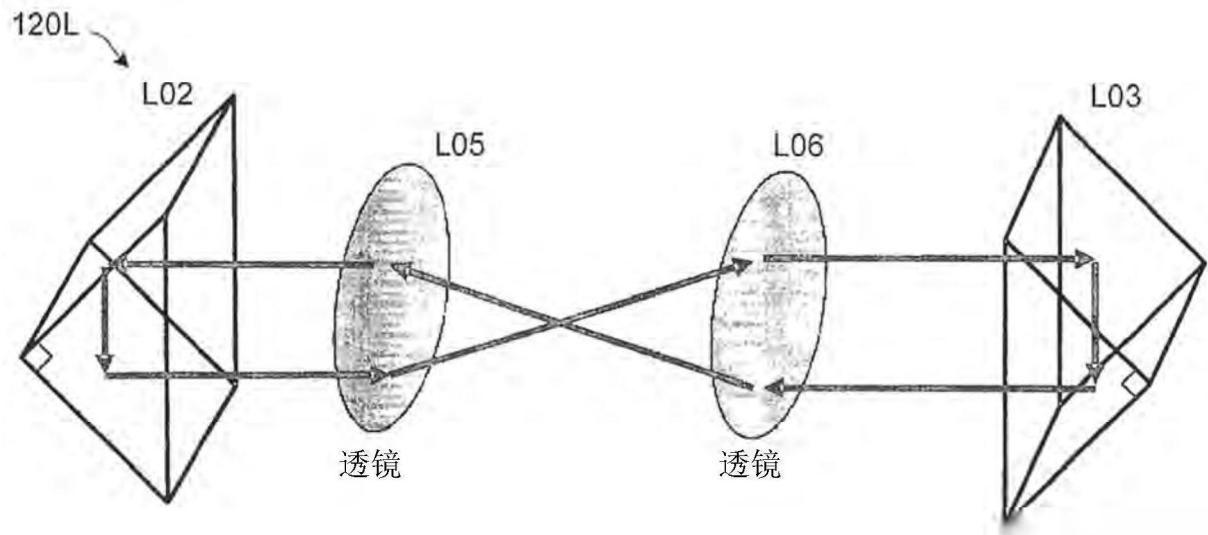


图21

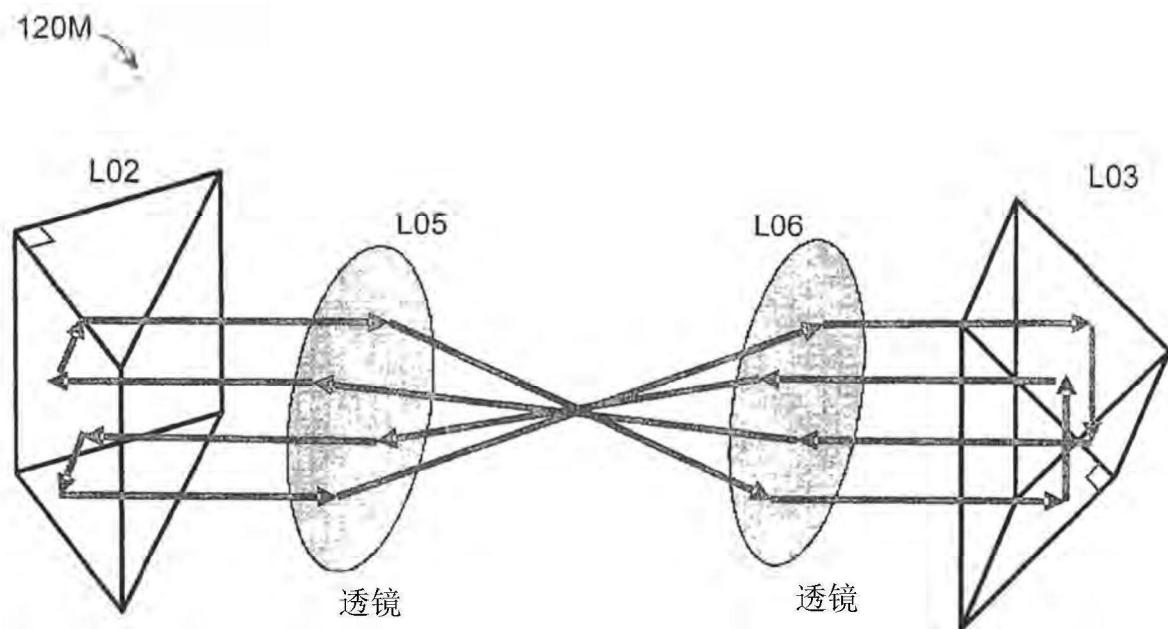


图22

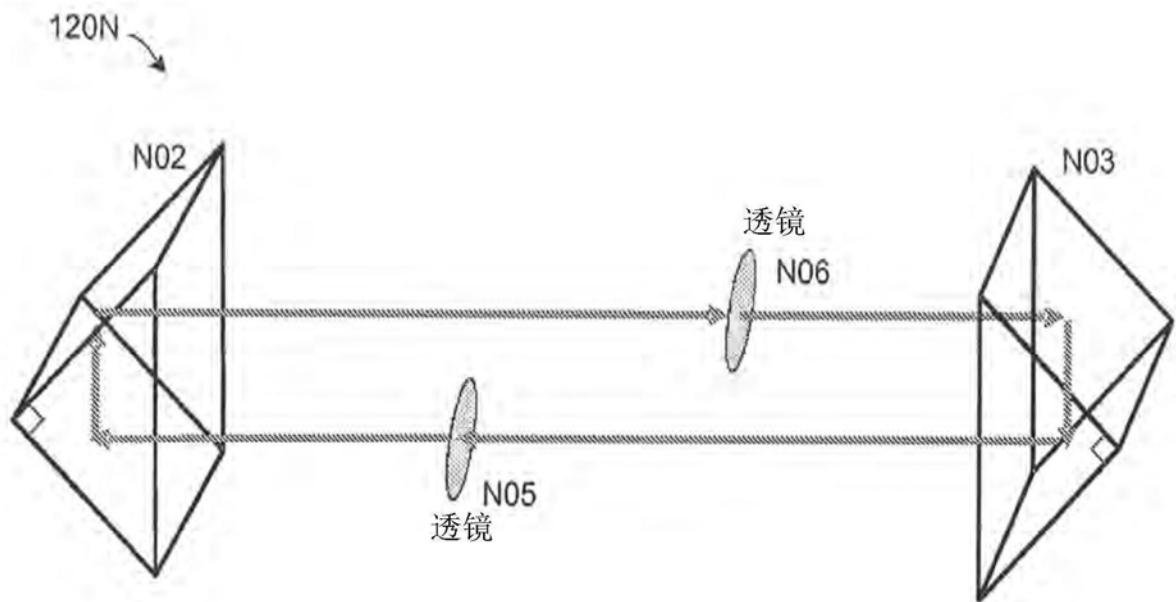


图23

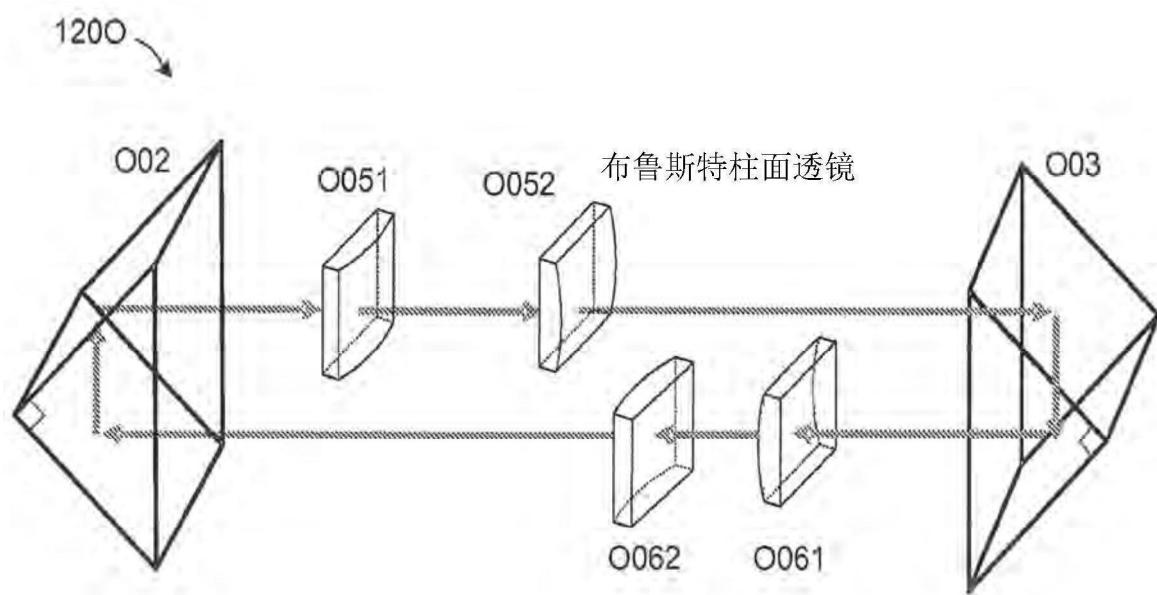


图24

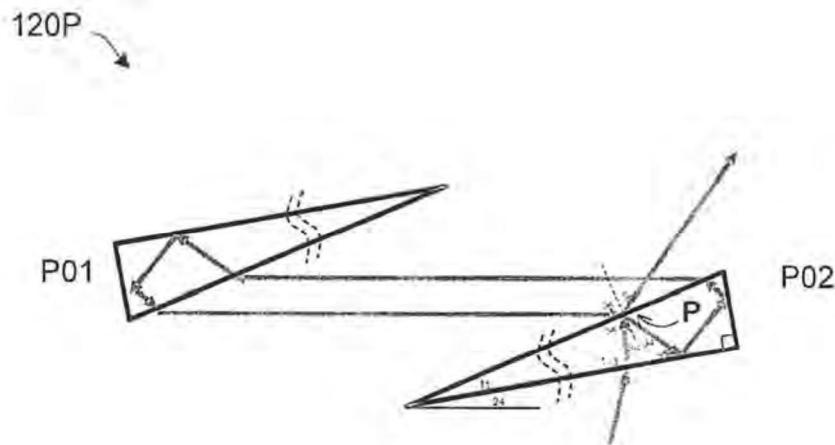


图25A

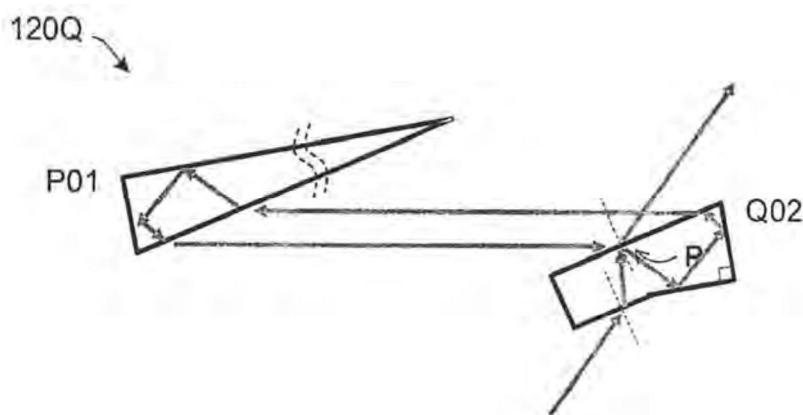


图25B

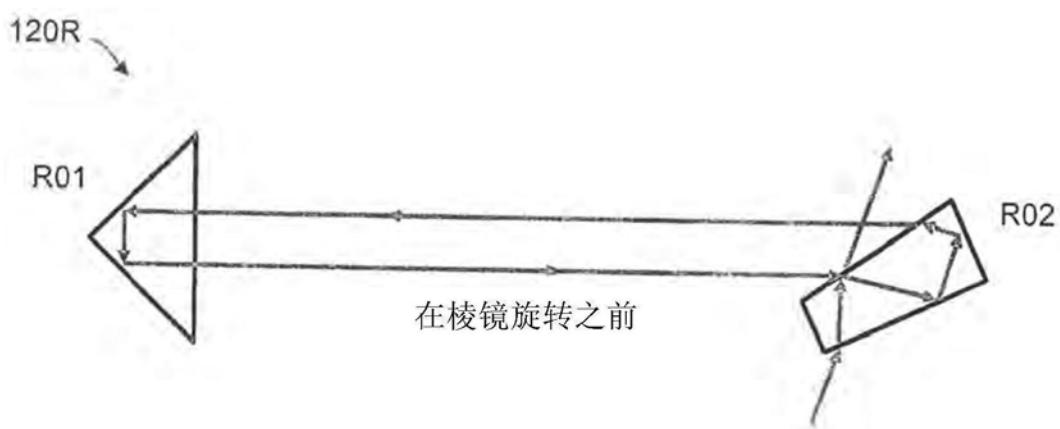


图26A

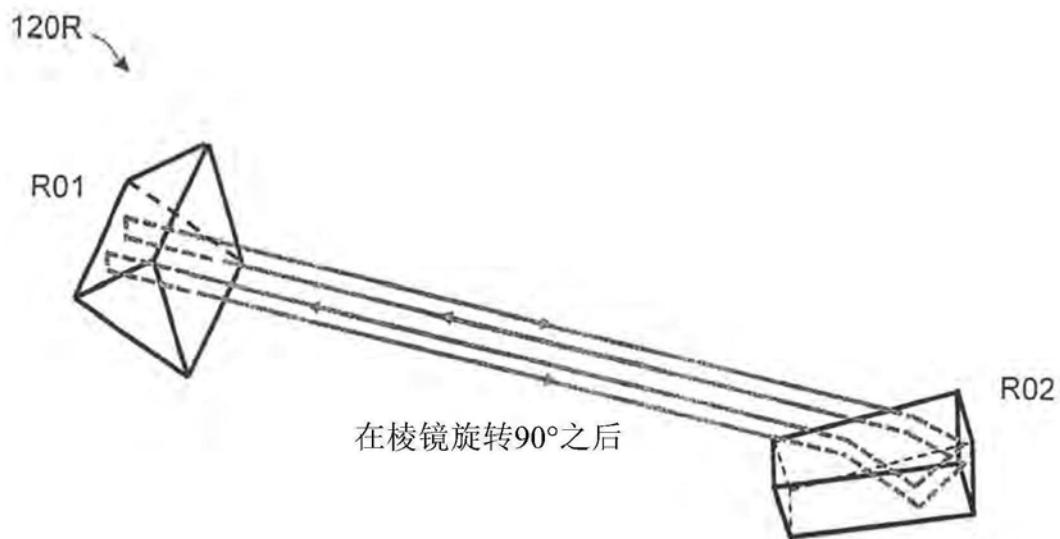


图26B

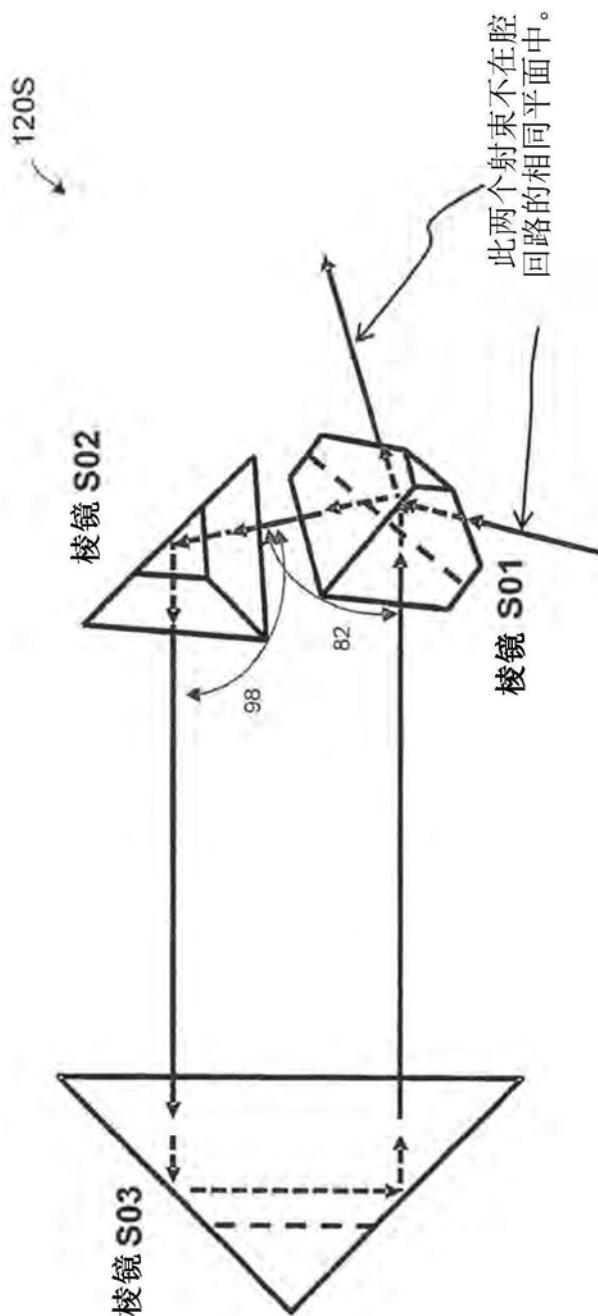


图27A

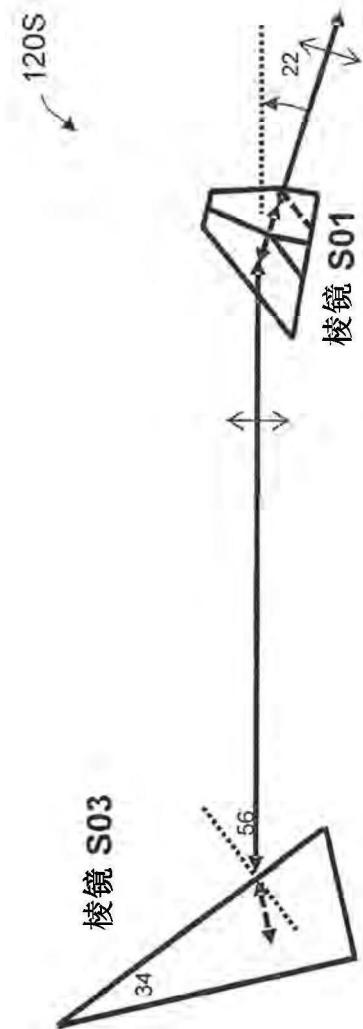
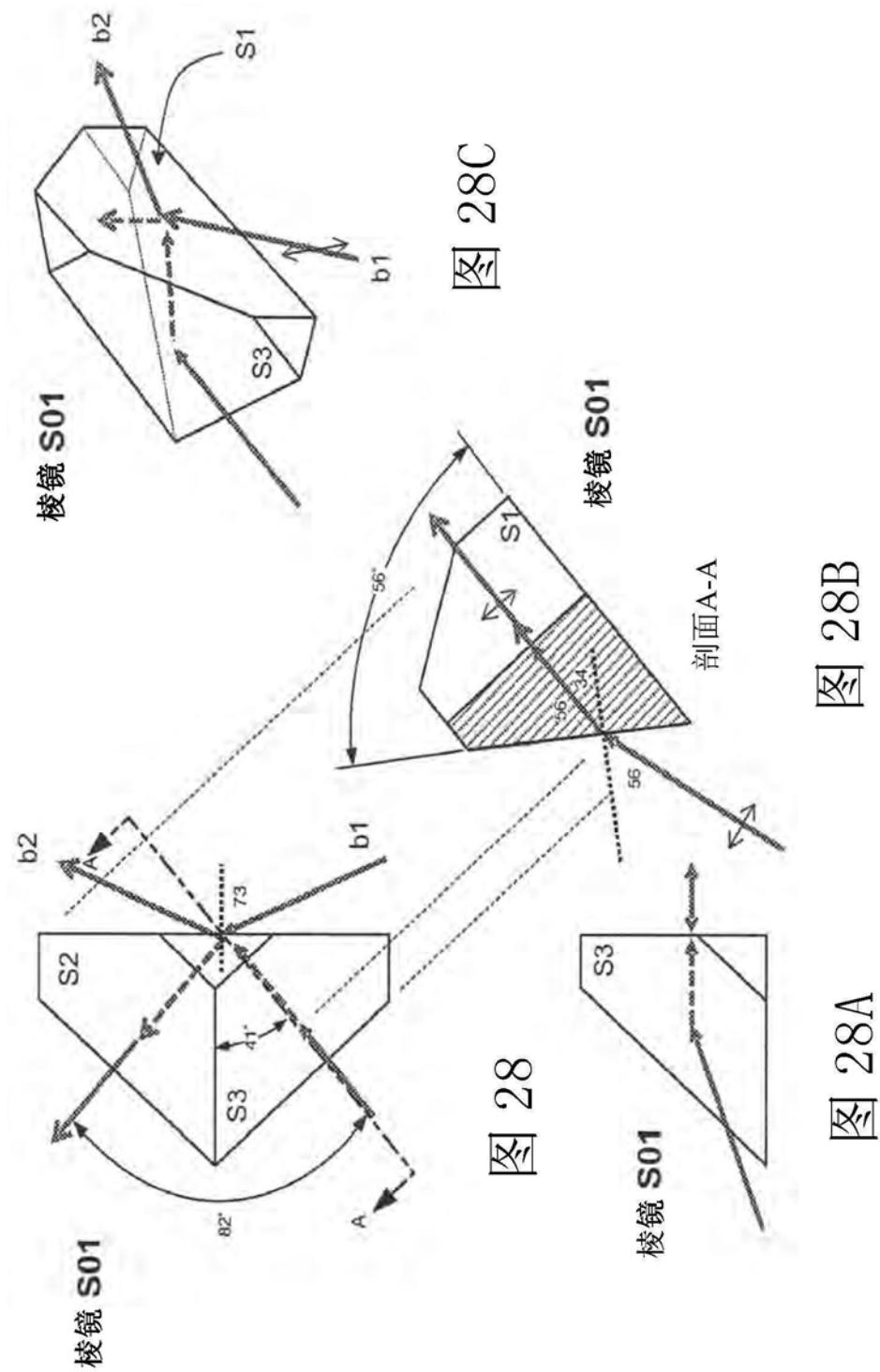


图27B



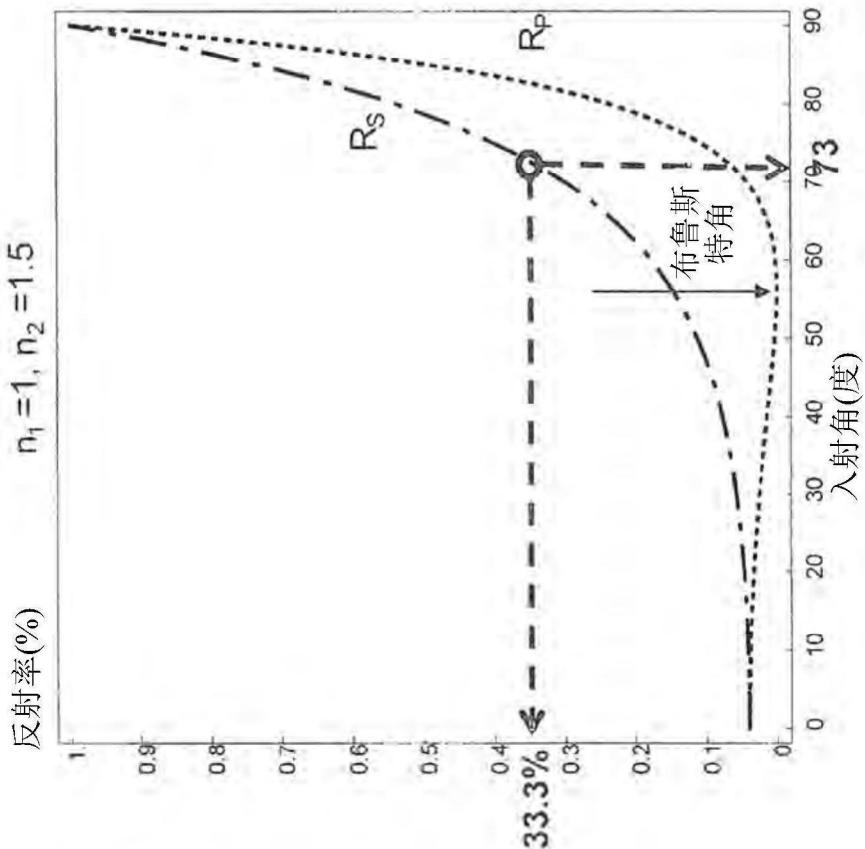


图29A

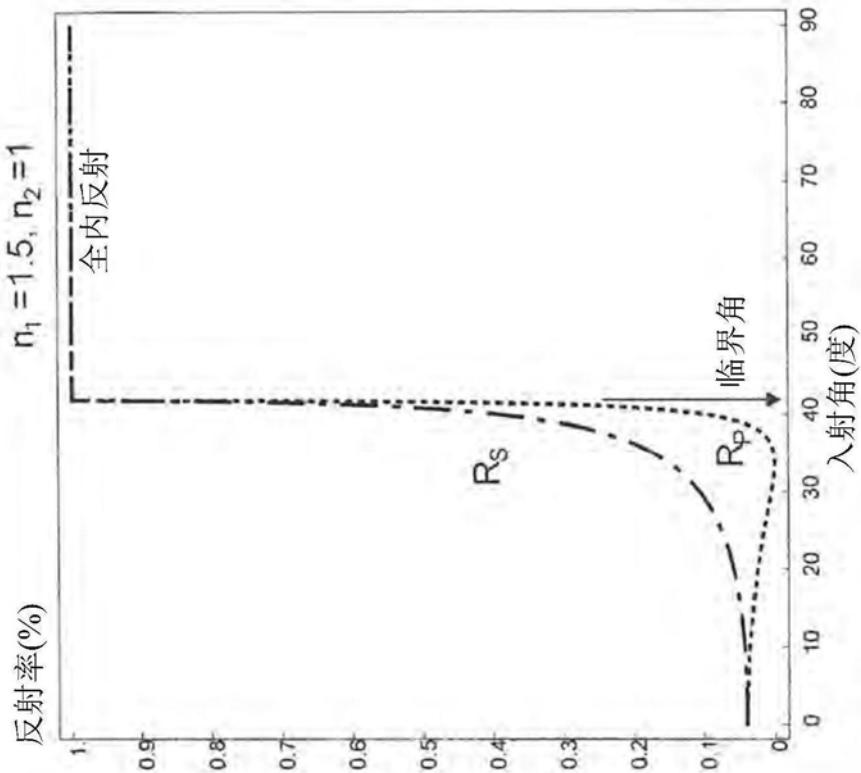


图29B

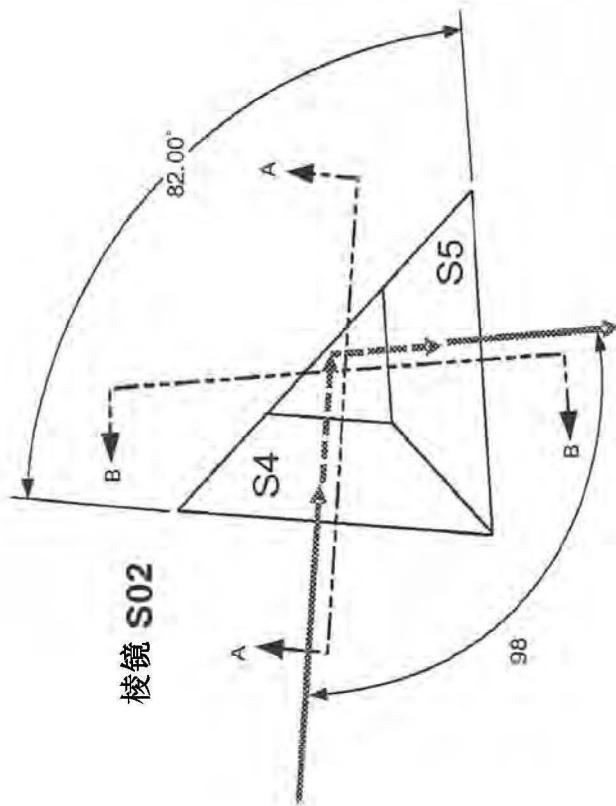


图30

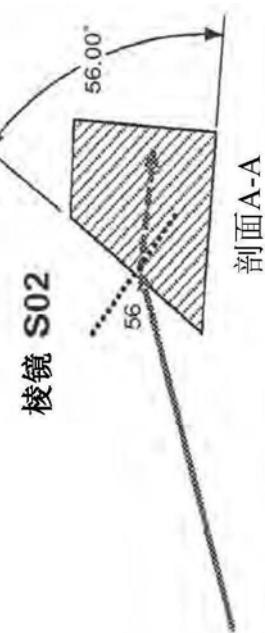


图30A

棱镜 S02

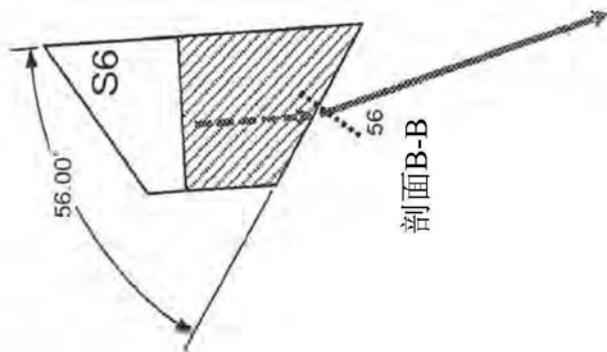
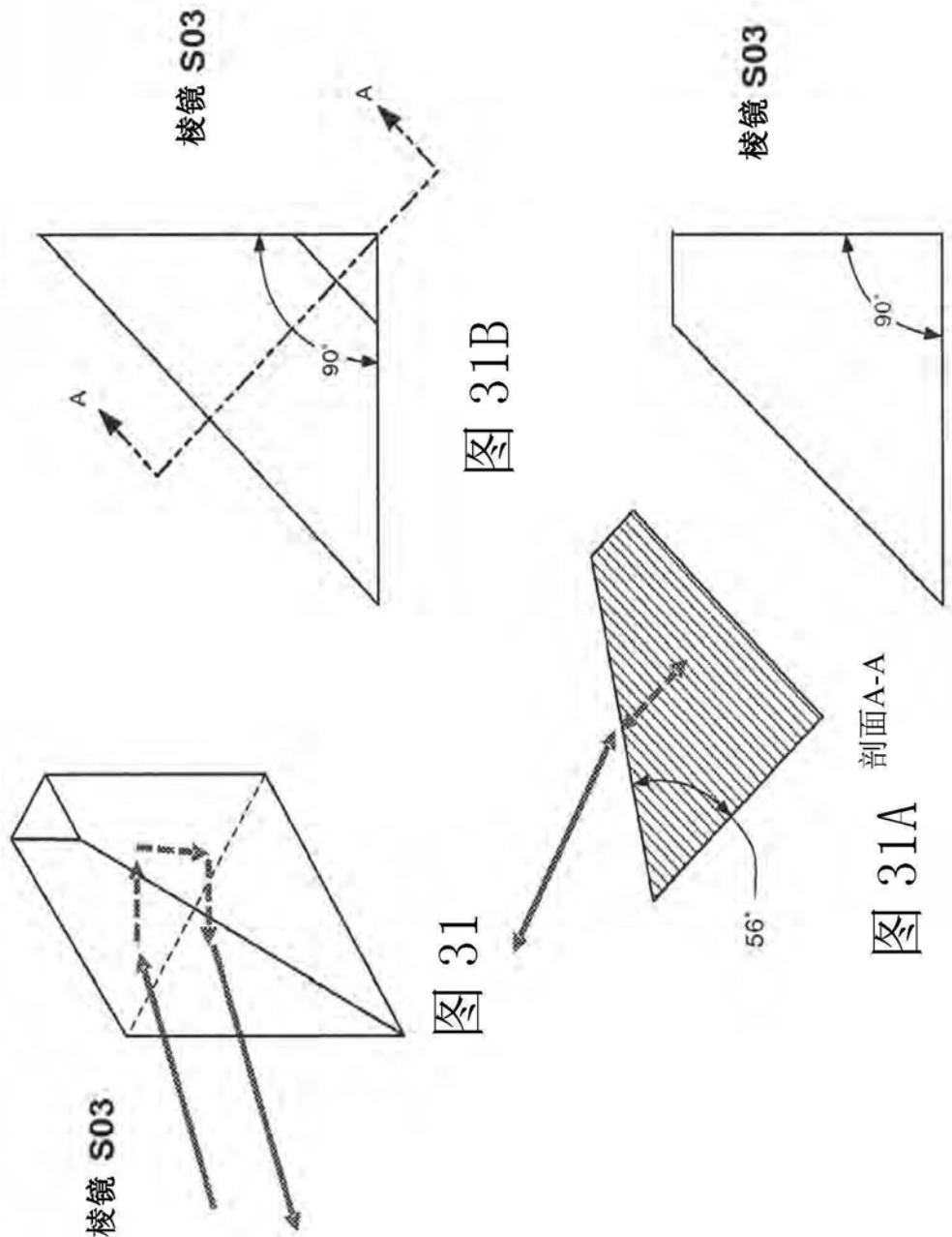


图30B



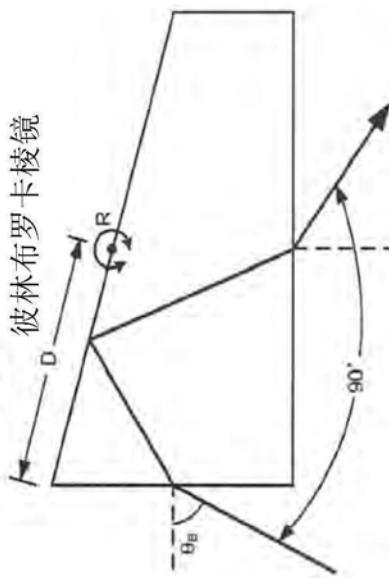
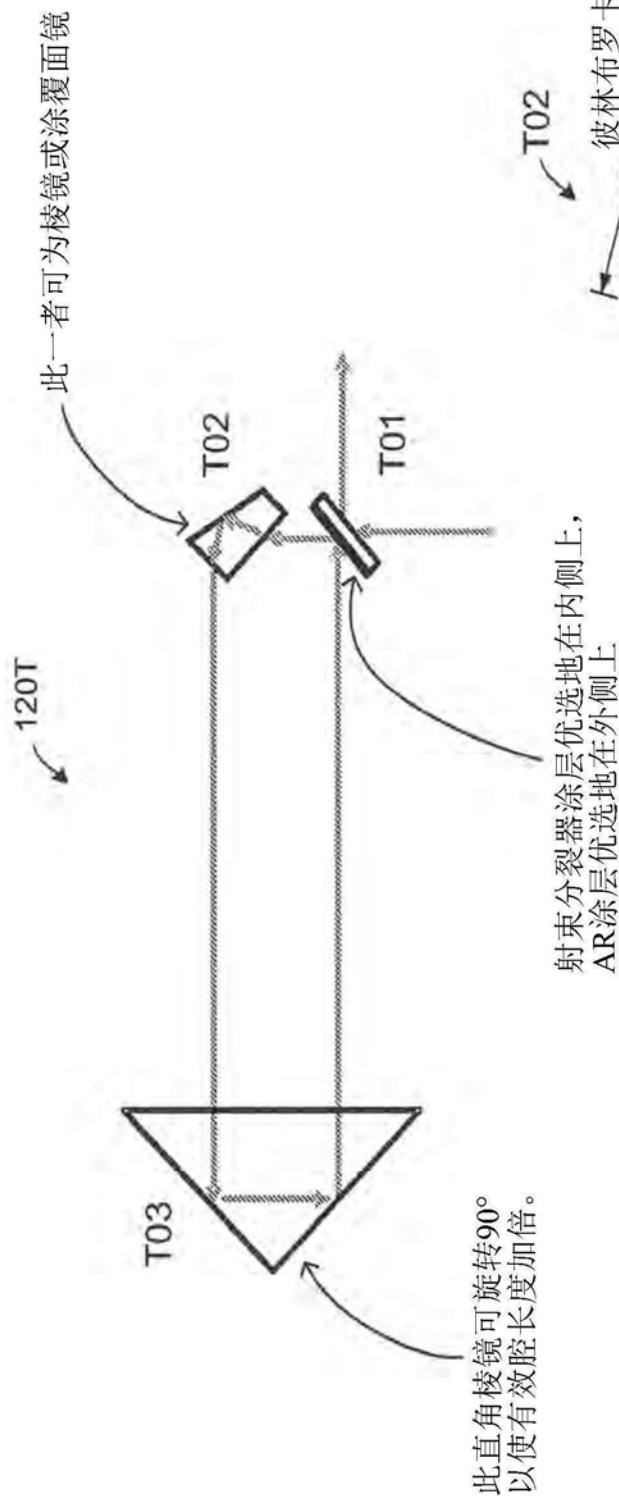


图 32A

图 32B

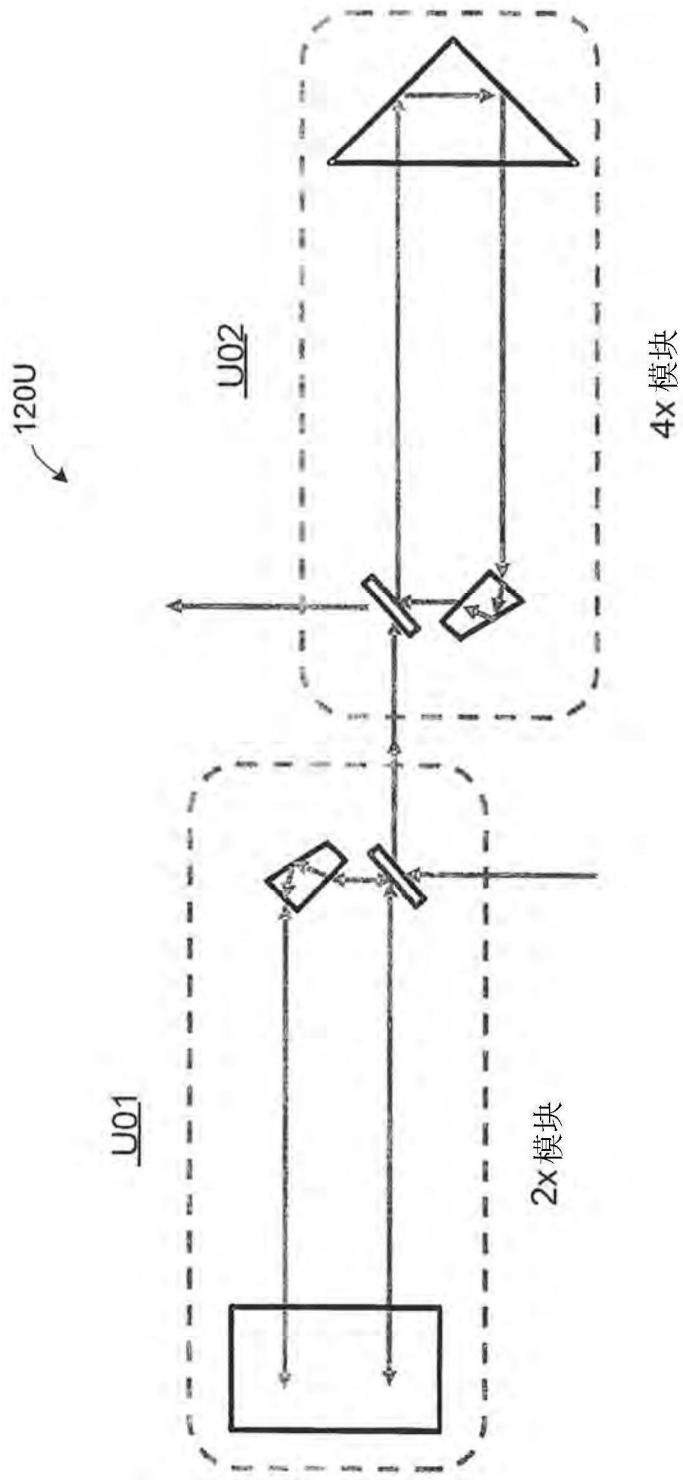


图33