



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105210245 B

(45)授权公告日 2019.04.12

(21)申请号 201480027556.8

(22)申请日 2014.03.13

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 105210245 A

(43)申请公布日 2015.12.30

(30)优先权数据
61/783,686 2013.03.14 US
14/209,908 2014.03.13 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2015.11.13

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2014/026617 2014.03.13

(87)PCT国际申请的公布数据
W02014/151887 EN 2014.09.25

(73)专利权人 IPG光子公司
地址 美国马萨诸塞州

(72)发明人 曼纽尔·J·莱昂纳多
马克·A·阿尔伯雷
格雷戈里·L·基顿

(74)专利代理机构 中科专利商标代理有限责任
公司 11021
代理人 倪斌

(51)Int.Cl.
H01S 3/109(2006.01)

(56)对比文件
CN 102918726 A, 2013.02.06,
CN 102918726 A, 2013.02.06,
CN 101103501 A, 2008.01.09,
US 2006/0250677 A1, 2006.11.09,
JP 特开2011-197432 A, 2011.10.06,
US 5850407 A, 1998.12.15,

审查员 薛正燕

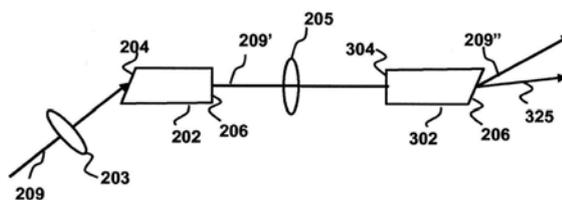
权利要求书2页 说明书12页 附图4页

(54)发明名称

具有圆形输出光束的高效单通型谐波发生器

(57)摘要

一种外腔谐波发生器系统可以根据标称圆形的、无象散衍射受限的输入基波光束,产生圆形的无象散的三次谐波输出光束。所述系统包括二次谐波产生SHG晶体。所述基波光束尺寸在SHG晶体输入面上沿SHG晶体的非走离方向扩展。高次谐波产生晶体具有布置为沿HHG晶体的非走离方向具有入射斜角的输出面,使得输出的高次谐波光束尺寸沿所述方向收缩。输入基波光束在SHG晶体的输入面处的扩展超过三次谐波光束在HHG晶体的输出面处的减小。



1. 一种外腔谐波发生器系统,配置为根据标称圆形的无象散衍射受限的输入基波光束产生圆形的无象散的三次谐波输出光束,所述系统包括:

二次谐波产生SHG晶体,具有相对于输入基波光束具有入射角朝向的输入面,其中所述基波光束尺寸在输入面上沿SHG晶体的非走离方向扩展,所述SHG晶体配置为根据输入基波光束产生二次谐波光束;

三次谐波产生THG晶体,具有沿THG晶体的非走离方向具有入射斜角朝向的输出面,使得三次谐波光束尺寸沿所述方向收缩,所述THG晶体配置为根据来自SHG晶体的二次谐波光束和剩余基波光束来产生三次谐波光束;

其中所述输入基波光束在SHG晶体的输入面处沿所述SHG晶体的非走离方向的扩展超过所述三次谐波光束在THG晶体的输出面处沿所述THG晶体的非走离方向的减小。

2. 根据权利要求1所述的系统,其中所述SHG晶体的输入面朝向为相对于基波输入光束具有入射斜角,以便在输入面处沿着SHG晶体的非走离方向扩展基波光束。

3. 根据权利要求1所述的系统,其中所述THG晶体的输出面朝向为小于相对于三次谐波光束的布鲁斯特角。

4. 根据权利要求1所述的系统,其中所述三次谐波光束与基波光束和二次谐波光束以比光束发散角大的角度角向地分离。

5. 根据权利要求1所述的系统,其中所述三次谐波光束的平均功率大于约30W。

6. 根据权利要求1所述的系统,其中所述SHG晶体的输入面朝向为相对于输入基波光束在布鲁斯特角的大约5度内。

7. 根据权利要求1所述的系统,其中所述THG晶体的输出面朝向为相对于剩余基波光束和二次谐波光束具有近似20度的入射角,其中所述剩余基波光束和二次谐波光束入射在THG晶体的输出面处。

8. 根据权利要求1所述的系统,其中所述THG晶体的输出面朝向为相对于剩余基波光束和二次谐波光束具有入射角,其中所述剩余基波光束和二次谐波光束入射在THG晶体的输出面处,其中选择所述入射角以便优化基波光束到三次谐波辐射的净转换效率。

9. 一种外腔谐波发生器系统,配置为根据标称圆形的无象散衍射受限的输入基波光束产生圆形的无象散的高次谐波输出光束,所述系统包括:

二次谐波产生SHG晶体,具有相对于输入基波光束具有入射角朝向的输入面,其中所述基波光束尺寸在输入面上沿SHG晶体的非走离方向扩展,所述SHG晶体配置为根据输入基波光束产生二次谐波光束;

一个或多个高次谐波产生HHG晶体,具有沿所述HHG晶体中至少一个的非走离方向具有入射斜角朝向的输出面,使得输出高次谐波尺寸沿所述方向收缩,所述一个或多个HHG晶体配置为根据来自SHG晶体的二次谐波光束和剩余基波光束产生高次谐波光束;

其中所述输入基波光束在SHG晶体的输入面处沿所述SHG晶体的非走离方向的扩展超过高次谐波光束在所述一个或多个HHG晶体中的至少一个的输出面处沿所述HHG晶体的非走离方向的减小。

10. 根据权利要求9所述的系统,其中所述一个或多个HHG晶体包括:THG晶体,配置为根据来自SHG晶体的二次谐波光束和第一剩余基波光束产生三次谐波光束;以及四次谐波产生FHG晶体,配置为根据来自THG晶体的三次谐波光束和第二剩余基波光束产生四次谐波

光束。

11. 根据权利要求9所述的系统,其中所述一个或多个HHG晶体包括非线性晶体,所述非线性晶体配置为根据二次谐波光束产生四次谐波光束。

具有圆形输出光束的高效单通型谐波发生器

技术领域

[0001] 本发明涉及非线性光学,更具体地,涉及一种产生圆形输出光束的谐波发生器系统。

背景技术

[0002] 波长转换激光系统通常使用非线性光学晶体(诸如,硼酸锂LBO)以根据由源激光器产生的红外输入光束来产生可见波长的输出光束。在二次谐波产生(SHG)中,例如,发生在晶体内的非线性过程将红外输入辐射的两个光子进行组合以便产生可见输出辐射的光子,其中该可见输出辐射的频率是输入的红外辐射的频率的两倍。在三次谐波产生(THG)中,将二次谐波与相位匹配的附加非线性光学晶体结合,以便将红外输入的光子与SHG输出的光子相结合,从而产生三次谐波(THG)输出,其中三次谐波输出的频率是红外输入辐射的频率的三倍。

[0003] 通常,诸如LBO的非线性晶体的特征在于各向异性的折射率,这将影响经波长转换的输出光束的形状。各向异性折射率意味着:折射率依赖于辐射在晶体中的传播方向和偏振。如果将非偏振光束射向这种晶体,则它通常表现出双折射:光束将分为不共线的两个偏振光束,其传播方向相差称作走离角(walk-off angle)的角度。

[0004] 当将诸如LBO的具有各向异性折射率的晶体用于产生二次谐波时,光束将发生走离。输出光束相对于输入光束以走离角行进,或输入光束本身经历双折射而分为两个光束,其中的一个光束以走离角传播。由于发生走离,输出光束失真并以与输入光束不同的形状结束。通常,输入光束是圆形,输出光束为椭圆形。

[0005] 优选地,商业化的三次谐波系统具有以下属性中的所有属性或大部分属性。这种系统应是可靠的,并提供成千上万个小时的不干涉式操作。输出参数(诸如,模式质量、光束指向和光束位置)应在较长时间段内保持是恒定的或基本恒定的。由这种系统产生的三次谐波光束应是圆形的。该光束应具有较小的不对称性,例如,小于大约15%。该光束应具有较小的象散,通常小于瑞利波长的20%。该光束应近似衍射受限的高斯光束,通常 $M^2 < 1.3$ 。输出光束在光谱上应是纯净的,也就是说剩余的基波和二次谐波光束应小于三次谐波功率的1%。该系统应以高于约30%的效率(优选地,高于约40%)将基波辐射转换为三次谐波。用于产生三次谐波的光学布置还应该是易于进行优化的,并包含相对简单的光学组件。该系统应灵活地工作在较大工作范围的脉冲重复频率和脉宽上。

[0006] 还需要的是三次谐波输出具有较高功率,具有至少足以处理大量材料的适度能量脉冲。例如,平均功率应大于1W,优选地高于10W且具有调节到更高功率的能力。脉冲能量应大于约1微焦(μJ),优选地大于10 μJ 且具有调节到更高脉冲能量的能力。

[0007] 目前,现有的解决方案不能实现所有这些商业要求,从而使消费者做出妥协并限制了三次谐波系统的应用。

[0008] 许多与三次谐波产生有关的现有技术处理内腔系统。在内腔系统中,三次谐波产生发生在由两个反射表面限定的谐振腔内。激光系统的光学增益介质连同一个或多个非

线性光学晶体都位于该腔内。光学增益介质产生在非线性光学晶体中经历频率转换的基波辐射。

[0009] William Grossman的美国专利号5,850,407公开了在激光腔体内I型二次谐波产生(SHG)晶体接着II型三次谐波产生(THG)晶体。该对比文件描述了使用所制造的硼酸锂(LBO)非线性晶体来内腔产生三次谐波,使得输出面相对基波和三次谐波光束精确地处于布鲁斯特角。在这种系统中,对于基波光束,输出面必须处于布鲁斯特角,否则基本腔(fundamental cavity)可能受到附加损耗。布鲁斯特表面提供了三个功能。首先,它用于根据在有角度的界面上发生色散来对基波、二次谐波和三次谐波光束进行波长分离。第二,它对IR和UV光提供近似为零的损耗。第三,它是损伤阈值较高的表面。然而,美国专利号5,850,407的系统要求椭圆输入光束,且不提供较高的单次通过转换效率。较低的单次通过转换效率在Q开关内腔谐波产生中不是难题,这是由于基波光束在谐振腔内再次通过。此外,由于该系统仅在内腔中高效地工作,该系统并不灵活,这是由于Q开关激光器仅工作在较窄范围的工作参数下。

[0010] 应注意:对于较大的且圆形的输入基波光束,在低效率限制中(in the low-efficiency limit),布鲁斯特-布鲁斯特设计(即,非线性晶体的输入和输出表面二者都是布鲁斯特角表面的设计)产生圆形的UV光束。实质上,这是5,850,407专利所述系统的工作点。尽管布鲁斯特-布鲁斯特设计在内腔三倍频系统中是有用的,然而单次通过转换效率仍然过低而无法用于外腔谐波产生。

[0011] 美国专利号7,016,389描述了另一示例。该专利讨论了在三次谐波晶体的出射表面上制造小窗口,该窗口通常小于布鲁斯特角。该设计仍然用于内腔谐波产生系统。为了进行高效的谐波产生,外腔设计相较于内腔设计要求输入光束在非线性晶体中更紧密地聚焦。

[0012] 美国专利号7,170,911描述了一种以布鲁斯特角输出面制造的外腔三次谐波非线性晶体。备选地,这种系统可以制造有适用于减小在法线或近法线输入输出面处的反射的涂层。然而,不希望的是将这种涂层布置在接收大量紫外辐射通量的表面上。

[0013] 以上是本发明实施例所涉及的背景技术。

发明内容

[0014] 本公开的多个方面涉及一种可以使用入射在非线性晶体输出面上的入射斜角,以单次通过的外腔光学布局来高效地产生圆形无象散的三次谐波输出光束的装置。

[0015] 外腔谐波发生器系统可以配置为根据标称圆形无象散衍射受限的输入基波光束,来产生圆形无象散的三次谐波输出光束。该系统可以包括二次谐波产生(SHG)晶体和三次谐波产生(THG)晶体。SHG晶体配置为根据输入基波光束来产生二次谐波光束。THG晶体配置为根据来自SHG晶体的二次谐波光束和剩余基波光束来产生三次谐波光束。SHG晶体可以具有相对于输入基波光束具有入射角朝向的输入面。基波光束尺寸在输入面处沿SHG晶体的非走离方向扩展。THG晶体具有沿THG晶体的非走离方向具有入射斜角朝向的输出面,使得三次谐波光束尺寸在该方向上收缩。输入基波光束在SHG晶体的输入面的扩展超过了三次谐波光束在THG晶体的输出面处的减小。

[0016] 这种构思可以扩展至涉及产生高次谐波辐射(例如,四次谐波或更高)的谐波发生

器系统。

附图说明

[0017] 可以通过结合附图考虑以下详细描述,来理解本发明的教义,附图中:

[0018] 图1是描述了用于三次谐波产生的基本现有技术的光学布局的示意图。

[0019] 图2A是根据本公开多个方面的用于三次谐波产生的光学布局的示意图。

[0020] 图2B是根据本公开多个方面的用于三次谐波产生的备选光学布局的示意图。

[0021] 图3是针对折射率为1.6(通常为LB0)的材料,扩展比(expansion ratio)随着入射角改变的图。

[0022] 图4是“p”和“s”偏振光的反射损耗随着针对初始反射系数为1(空气)和最终反射系数为1.6(通常为LB0)的未镀膜表面的入射角改变的图。

[0023] 图5是为了在基波、二次谐波和三次谐波之间提供比光束发散更大的角度分离,在THG晶体输出面上的最小内角的图。

[0024] 图6是根据本公开一个方面的波长转换激光器系统的示意图。

[0025] 图7是示出了在根据本公开多个方面的三次谐波产生系统中的不同位置处的横截面光束形状的示意图。

具体实施方式

[0026] 尽管以下详细描述包含用于说明的具体细节,然而本领域的任何普通技术人员应认识到,可以在本发明的范围内对以下细节进行多种变型和替换。因此,在丧失所要求保护的发明的通用性的前提下,描述了下文所述的本发明实施例,并且不对所要求保护的发明施加任何限制。

[0027] 以下具体实施方式中,参考了构成本发明一部分的附图,其中附图示意性地示出了可以实现本发明的具体实施例。因此,参考所述附图的朝向,使用诸如“顶部”、“底部”、“正面”、“背面”、“首位”、“末尾”等的方向性术语。由于本发明实施例的组件可以位于许多不同朝向,方向性术语仅用于说明目的,而不是为了进行限制。应理解,可以使用其他实施例并且可以在不脱离本发明的范围的前提下进行许多结构或逻辑的改变。因此,不应将以下详细描述理解为用于限制,本发明的范围是由所附权利要求来限定的。

[0028] 附加地,文中可以以范围形式来表示浓度、数量和其他数值数据。应理解,这种范围形式仅是为了简单清楚,应灵活地将其理解为不仅包括在该范围界限明确引述的数值,而且还包括在该范围内包括的所有单个数值或子范围,如同明确引述了每个数值和子范围。例如,厚度范围为大约1nm到大约200nm应理解为不仅包括明确引述的界限(约1nm和约200nm),而且还包括单个尺寸(诸如,不限于2nm、3nm、4nm)和子范围(诸如,10nm到50nm、20nm到100nm等)。

[0029] 术语词汇:

[0030] 如文中所用:

[0031] 象散表示光学象差,其中沿两个垂直平面传播经过光学系统的光线具有不同的焦距。象散光束在x轴方向上的束腰与y轴方向上的束腰在不同位置。(下文将限定术语“束腰”)。如果光束的x束腰半径 w_{0x} 在位置 Z_x 处且y束腰半径为 w_{0y} 在位置 Z_y 处,则象散性A定义为

束腰位置之间的差值除以束腰的平均瑞利范围：

$$[0032] \quad A = \frac{Z_x - Z_y}{\bar{Z}_R}$$

[0033] 其中 \bar{Z}_R 是平均瑞利范围：

$$[0034] \quad \bar{Z}_R = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\pi w_{0x}^2}{\lambda} + \frac{\pi w_{0y}^2}{\lambda} \right\}。$$

[0035] 分束器表示能够将光束分为两个或更多个部分的光学器件。

[0036] 腔体或光学谐振腔表示由两个或更多个反射表面限定的光学路径，其中光线可以沿着所述腔体或光学谐振腔往复或循环。与所述光学路径相交的物体被称作在所述腔体内。

[0037] 连续波 (CW) 激光器表示连续地而不是以短脉冲形式 (如在脉冲激光器中) 发出辐射的激光器。

[0038] 二极管激光器表示设计用于使用受激辐射 (stimulated emission) 来产生相干光输出的发光二极管。公知的二极管激光器有激光二极管或半导体激光器。

[0039] 泵浦二极管激光器表示具有由二极管激光泵浦的增益介质的激光。

[0040] 增益表示信号从一个点通过放大器到另一个点的强度、功率或脉冲能量的增加。术语“不饱和增益”表示经过放大器的小信号的增加，其中小信号不会明显地改变放大器的反转级别 (inversion level)。文中使用的增益和不饱和增益可替换使用。

[0041] 增益介质是指针对激光器的能够产生如下所述的光学增益的材料。

[0042] 石榴石是指特定类型的氧化物晶体，包括例如钇铝石榴石 (YAG)、钇镓石榴石 (GGG)、钇钪镓石榴石 (GSGG)、钇钪镓石榴石 (GGG) 和类似物。

[0043] 红外辐射是指真空波长在大约700纳米 (nm) 和大约100,000nm之间的电磁辐射。

[0044] 激光是由受激辐射产生光放大的缩写。激光器是包含可激光材料的腔体。可激光材料是任何材料——晶体、玻璃、液体、半导体、染料或气体——其原子能够通过例如由光或放电进行泵浦而被激发到亚稳态。当原子返回到基态时，该材料从亚稳态发射光。由于存在经过的光子 (passing photon) 而激励光辐射，这样引起发射的光子 (emitted light) 与激励光子具有相同的相位和方向。光 (文中称作受激辐射) 在所述腔内振荡，其中从腔内出射的一部分形成输出光束。

[0045] 光：本文使用的术语“光”通常表示从红外到紫外的频率范围内的电磁辐射，大致与约1纳米 (10^{-9} 米) 到约100微米的真空波长范围相对应。

[0046] M^2 是光束质量的度量。每个光束具有相关的 M^2 ，其中可以根据其束腰半径 w_0 、其发散半角 θ 和其波长 λ 来计算 M^2 。 M^2 的值为：

$$[0047] \quad M^2 = \frac{\pi w_0 \theta}{\lambda}$$

[0048] 仅具有一个横模的光束 (即，完美高斯光束) 的 $M^2=1$ 。多模光束 $M^2>1$ 。对于在可接受的程度上近似于纯高斯光束的光束，通常需要 $M^2<1.3$ 。

[0049] 非线性效应是指如下类型的光学现象：通常仅可以用近似单色的方向性的光束

(诸如,由激光产生的光束)观看到的光学现象。高次谐波产生(例如,二次、三次、和四次谐波产生)、光学参量振荡、和频产生、差频产生、光学参量放大和受激拉曼效应是非线性效应的示例。

[0050] 非线性光波长转换过程是非线性光学过程,其中通过非线性介质的给定真空波长 λ_0 的输入光与该介质和/或经过该介质的其他光相互作用,从而产生真空波长与输入光波长不同的输出光。非线性波长转换等同于非线性频率转换,这是由于两个值是通过光的真空速度相关联的。可以替换性地使用这两个术语。非线性光学波长转换包括:

[0051] 高次谐波产生(HHG),例如,二次谐波产生(SHG)、三次谐波产生(THG)、四次谐波产生(FHG)等,其中输入光中的两个或更多个光子相互作用,使得产生频率为 Nf_0 的输出光光子, N 为相互作用的光子数。例如,在SHG中, $N=2$ 。

[0052] 和频产生(SFG),其中频率为 f_1 的输入光光子与频率为 f_2 的另一输入光光子相互作用,使得产生频率为 f_1+f_2 的输出光光子。

[0053] 差频产生(DFG),其中频率为 f_1 的输入光光子与频率为 f_2 的另一输入光光子相互作用,使得产生频率为 f_1-f_2 的输出光光子。

[0054] 非线性晶体的示例包括而不限于:铌酸锂(LiNbO₃)、三硼酸锂(LBO)、 β -硼酸钡(BBO)、硼酸锂(CLBO)、钽酸锂、化学计量比的钽酸锂(SLT)磷酸氧钛钾(KTiOPO₄,熟知为KTP)、砷酸二氢铵(ADA)、磷酸二氢铵(ADP)、三硼酸铯(CsB₃O₅或CBO)、氘代二氢砷酸铵(DADA)、氘化磷酸二氢铵(DADP)、氘化磷酸精氨酸(DLAP)、二氘磷酸铷(RbD₂PO₄或DRDP)、硼酸钾(KABO)、砷酸二氢钾(KDA)、磷酸二氢钾(KDP)、氘化磷酸二氢钾(KD₂PO₄或DKDP)、Li₂B₄O₇(LB₄)或一水甲酸锂(LFM)及其同质异相体;周期性极化的材料,诸如周期性极化的铌酸锂(PPLN)、周期性极化的钽酸锂和周期性极化的钽酸锂(PPSLT)等。还可以通过在光纤中制造微结构,来向光纤引入对光学辐射的非线性响应。

[0055] 光学放大器是指对输入光信号的功率进行放大的装置。光学放大器与激光的相似之处在于:都使用由泵浦辐射驱动的增益介质。放大器通常缺少反馈(即,腔体),所以它具有增益但不能振荡。如文中所用,光学功率放大器通常表示在向目标或波长传感器传送经放大的光束之前的最后光学放大器。在辐射源和功率放大器之间的放大器级通常在文中被称作前置放大器。

[0056] 相位匹配是指在多波非线性光学过程中用于增长有可能在所述多波之间相干传递能量的距离的技术。例如,三波过程是指当 $k_1+k_2=k_3$ 时进行相位匹配,其中 k_i 是参与该过程的第 i 波的波矢。在倍频过程中,例如,当基波和二次谐波相位矢量相匹配时,该过程是最有效的。通常通过仔细的选择非线性材料中的光学波长、偏振状态和传播方向,来实现相位匹配条件。

[0057] 脉冲能量是指脉冲内的能量值。可以通过在脉冲周期上对瞬时脉冲功率求积分,来计算脉冲能量。

[0058] 脉冲周期(T)是指在两个或更多个脉冲串内连续脉冲的等价点(equivalent points)之间的时间。

[0059] 脉冲重复频率(PRF)是指脉冲在单位时间内的重复率。PRF与周期 T 成反比,例如 $PRF=1/T$ 。

[0060] Q 表示谐振腔(腔体)的量度值,定义为 $(2\pi) \times$ (谐振腔中存储的平均能量)/(每个周

期耗散的能量)。光学谐振腔的表面的反射率越高且吸收损耗约低, Q就越高, 从期望模式的能量损耗就越小。

[0061] Q开关是指用于快速改变光学谐振腔的Q因子的器件。

[0062] Q开关激光器是指在激光腔体内使用Q开关, 以便在激光介质中实现较高等度的反转(光学增益和能量存储)之前防止激射行为。当该开关快速增加腔体的Q因子时(例如, 使用声光或电光调制器或可饱和吸收体), 产生大量脉冲。

[0063] 准CW是指以足够高的重复频率产生一系列脉冲, 从而看似是连续的。

[0064] 准相位匹配(QPM)材料: 在准相位匹配材料中, 通过周期性地改变该材料的非线性系数的符号, 使得基波和高次谐波辐射是相位匹配的。符号改变周期(k_{QPM})向相位匹配等式添加附加项, 使得 $k_{QPM}+k_1+k_2=k_3$ 。在QPM材料中, 基波和高次谐波可以具有相同的偏振, 通常改善效率。准相位匹配材料的示例包括: 周期性极化的钽酸锂(PPLT)、周期性极化的铌酸锂(PPLN)、周期性极化的学计量比钽酸锂(PPSLT)、周期性极化的磷酸氧钛钾(PPKTP)或周期性极化的微结构的玻璃光纤。

[0065] 紫外(UV)辐射是指具有如下特征的电磁辐射: 真空波长短于可见光范围的波长, 但是长于软X射线的波长。紫外辐射可以被细分为以下波长范围: 近UV, 从约380nm到约200nm; 远UV或真空UV(FUV或VUV), 从约200nm到约10nm; 以及超UV(EUV或XUV), 从约1nm到约31nm。

[0066] 真空波长: 电磁辐射的波长通常根据传播所述波的介质而改变。真空波长是给定频率的电磁辐射在真空条件下进行传播时所具有的波长, 可以表示为光在真空下的速度除以该频率。

[0067] 束腰: 通常应用于高斯光学, 光束的束腰 w 是指光束在其最小点处(即, 焦点处)的半径。将光束的半径限定为光束中心与光强降至该中心处光强值的 $1/e^2$ 的点之间的距离。当光束不是圆形的时, 通常存在两个束腰或两个束腰半径(w_x 和 w_y), 其中通过将光束拟合为椭圆高斯并提取沿着长短轴的 $1/e^2$ 距离, 来获得束腰半径 w_x 和 w_y 。光束沿着特定长度(假定, 沿着x轴)的直径或宽度是束腰值的二倍: 直径 $=2w$ 。

[0068] 引言

[0069] 图1示出了用于三次谐波产生的典型光学结构的示意图。基波光束209通过基波聚光透镜203并由基波聚光透镜203聚焦。二次谐波(SH)晶体202位于基波光束焦点处或其附近。SH晶体202将入射的基波光束的一部分转换为二次谐波。例如, 如果基波光束为1064nm, 则正确制造和朝向的二次谐波晶体可以是LB0。最终的二次谐波的波长可以是532nm。剩余的基波光束209'和二次谐波323光束从SH晶体202的输出面206出射。出射的基波光束209'的功率低于入射的基波光束209, 这是由于它的一部分功率被转换为二次谐波光束323。二次谐波光束323的频率为基波光束209'的光学频率的两倍。这可以等效地意味着: 二次谐波光束的真空波长是基波光束209'的真空波长的一半。两个光束通过中继透镜205, 并由中继透镜205聚焦。

[0070] 三次谐波(TH)晶体302布置在基波和二次谐波光束焦点处或其附近。这些光束在TH晶体302中至少部分地交叠。TH晶体302将基波光束209'和二次谐波光束323的混合转换为三次谐波光束325。三次谐波光束325的光学频率等于基波光束的频率和二次谐波光束323的频率的总和。例如, 如果基波光束的真空波长是1064nm且二次谐波光束的真空波长为

532nm,则正确制造和朝向的三次谐波晶体可以是LBO。最终的三次谐波光束325的真空波长可以是355nm。

[0071] 三个不同波长的光束(基波209'、二次谐波323'和三次谐波325)从TH晶体302的输出面306出射。图1中为了清楚表述,将光束示出为空间错位的线条302,但是实际上,这些光束具有有限空间范围,并且可以是在空间上交叠的。

[0072] 尽管图1显示了基本的三次谐波产生系统,然而存在许多可能变型。例如,SH和TH晶体可以制造为平行六面体或棱镜。此外,光束可以入射在入口上,并以斜角从晶体表面出射。可以代替透镜使用备选类型的聚焦元件(例如,曲面镜),以便对光束进行聚焦。

[0073] 许多因素影响三次谐波光束形状和转换效率。这些因素包括但不限于:

[0074] i) 基波光束横模特性

[0075] ii) 基波光束峰值功率

[0076] iii) 基波光束光谱宽度

[0077] iv) 在SHG晶体中的聚焦条件

[0078] v) 在THG晶体中的聚焦条件

[0079] vi) SHG晶体的输入输出角

[0080] vii) THG晶体的输入输出角

[0081] viii) SHG晶体的长度

[0082] ix) THG晶体的长度

[0083] x) SHG内的坡印廷矢量走离

[0084] xi) THG内的坡印廷矢量走离

[0085] 通常在高效的转换效率和产生圆形三次谐波光束之间有所权衡。高效转换要求较高的光强来形成密集的光束焦点,以及较长的SHG和THG晶体。密集的焦点和较长的晶体加剧了坡印廷矢量走离的效应,从而在走离方向上使光束拉长和失真。此外,当转换效率大于约30%时,泵浦消耗可以使光束形状变形并限制转换效率。

[0086] 相较于低强度区域,高强度区域将大部分功率转换为谐波。此外,晶体中的密集的焦点在晶体表面上产生较大的强度,这样增加了在这些表面上产生灾难性光学损伤的可能性。这尤其是THG晶体的输出面上成为难题,这是由于该表面被暴露在高强度的三次谐波光束下。

[0087] 本公开描述了一种新型的光学谐波发生器系统,其中该系统以较少的光学组件在较大范围的操作条件下同时产生单次通过转换效率高的、圆形近衍射受限的输出光束。

[0088] 本公开的多个方面特别适合与美国专利7,443,903、美国专利7,529,281、美国专利7,469,081和美国专利8,009,705所述的种子光纤放大器源一同使用,其中所有这些专利通过引用合并于此。

[0089] 光学谐波发生器

[0090] 图2A示意性示出了根据本公开的多个方面的光学谐波发生器200的布局。聚焦透镜将入射基波辐射聚焦为输入基波光束209,其中输入基波光束209为圆形的近衍射受限的光束,且 $M^2 < 1.2$,象散性最小。例如,象散性可以小于10%。

[0091] 输入基波光束209经由基波聚焦透镜203聚焦在SHG晶体202上。将SHG晶体202制作和朝向为将基波与基波辐射的二次谐波进行相位匹配。布置SHG晶体202的输入面204的朝

向,使得输入基波光束209以入射斜角 θ_i 入射在该面上,以便沿一个方向扩展光束的尺寸。扩束比(R)被表示为 $R = \cos\theta_i / \cos\theta_t$,其中 θ_t 是指透射角。一般情况下,相对SHG晶体202的输入面204的法线方向(即,垂直)测量这些角度。这些角度受斯涅尔定律约束, $n_i \sin\theta_i = n_t \sin\theta_t$,其中 n_i 是入射介质的折射率(例如,真空下 n_i 等于1,空气中 n_i 近似于1), n_t 是SHG晶体202的折射率。

[0092] 图3所示的图绘制了针对折射率 n_t 是1.6(近似于LBO的折射率)的介质,扩束比R随着入射角 θ_i 的改变。选择入射角 θ_i ,使得它在布鲁斯特角或接近布鲁斯特角 $\theta_B = \arctan(n_t/n_i)$ 。例如,布置SHG晶体的输入面的朝向,使得它相对输入基波光束209在 5° 的布鲁斯特角内(即,针对SHG晶体, θ_i 在 5° 的布鲁斯特角内)。本领域技术人员熟知,当光以布鲁斯特角 θ_i 入射在界面上时,从该界面反射的光是S偏振的(即,被偏振化为垂直于入射平面的方向)。如图4所述附图所示,对于未镀膜表面,“p”偏振化的入射光(即,偏振化为与入射平面平行的光)的反射损耗最小。如果将入射角 θ_i 选择为布鲁斯特角,则扩束比R是SHG晶体折射率,例如,对于LBO大约为1.6。

[0093] 选择SHG晶体202的输入面204的朝向,使得光束在输入面202上的扩束方向是沿着SHG晶体202中的非走离方向。

[0094] 可以通过相对基波光束焦点布置SHG晶体202,来随便控制由于象散性光束扩展而在基波光束中引起的象散。例如,如果将输入面204布置为完全处于束腰处,则所述扩展不会引入象散。备选地,如果将束腰移动到SHG晶体202中,则相较于在未经扩束的方向上的束腰,所引发的象散将随着经扩束的方向上的束腰远离输入面,而单调增加。将束腰置于SHG晶体202之前将在相反的层面上引起象散,即相较于位于经扩束的方向上的束腰,所引发的象散将随着未经扩束的方向上的束腰远离输入面,而单调增加。

[0095] 重要的是可以通过简单调整基波光束束腰相对于SHG晶体输入面204的位置,来方便地控制基波光束象散。光束束腰的调整对扩束比的影响较小。扩束比主要受到输入基波光束209在SHG晶体输入面204上的入射角 θ_i 的控制。可以通过晶体制造来控制该角度。例如,可以控制该角度,使得在SHG晶体内的典型光束束腰尺寸可以在密集的焦点方向上约是60微米,在走离方向上约是100微米。典型扩束比的范围从1.5:1到2.5:1。

[0096] 剩余的基波光束209'和二次谐波光束(未示出)在输出面206上离开SHG晶体202。可以制造并对准该表面以便进行所谓的法线入射。精确的入射角并不重要。可以布置输出面206的朝向,使得以偏离法线方向的若干角度入射,以便减小后向反射的影响。SHG晶体202的输出面206还可以镀有抗反射涂层,以便减小后向反射并最大化输出功率。有利地,所述涂层可以在出射的基波光束209'和二次谐波光束下具有较低的反射率。

[0097] 然后,基波光束和二次谐波光束经过中继透镜205,或一些其它光学聚焦元件(例如,聚光镜)。聚焦系统可以有利地设计为在二次谐波晶体内的束腰属性在三次谐波产生(THG)晶体302中是重复的,其中一些限定了放大倍数。至少存在两种可能方法来实现该目的。一种方法使用单个中继透镜305,它被布置为位于从二次谐波晶体出射的光束的远场中。远场意味着距离大于与二次谐波晶体内的最大束腰相对应的瑞利长度的5倍。例如,如果在二次谐波晶体内的最大基波光束束腰尺寸是120微米且波长为1064nm,则瑞利长度大约是42.6mm。因此,束腰到中继透镜的间隔应大于约200mm。放大倍数应大约为透镜两侧上的距离的比值,表示为 $1/f = 1/d_1 + 1/d_2$,其中f是透镜聚焦长度, d_1 是透镜和在二次谐波晶体

内或附近的束腰之间的距离, d_2 是透镜和在三次谐波晶体内或附近的束腰之间的距离。

[0098] 图2B所示的第二方法使用焦距分别为 f_1 和 f_2 的第一和第二透镜205A、205B。第一透镜205A布置在与二次谐波晶体内的束腰相距大约为 f 。第一透镜205B布置在与第一透镜205A相距大约为 f_1+f_2 。由第二透镜205B产生的束腰是到透镜2的距离 f_2 。放大倍数近似为比值 f_2/f_1 。

[0099] 如果SHG晶体输出面206非常靠近THG晶体输入面304, 则一些实现方案可以完全省略在SHG晶体202和THG晶体302之间的中继透镜。

[0100] 二次谐波光束和剩余基波光束209'的焦点在THG晶体302内或附近。可以制造并对准THG晶体302的前表面304, 以便进行所谓的法线入射。此外, 精确的入射角并不重要。此外, 可以配置THG晶体302, 使得光束可以偏离法线方向若干角度, 以便减小后向反射的影响。THG晶体302的前表面可以是镀有抗反射涂层, 以便减小后向反射并最大化输出功率。这种涂层可以有利地在基波波长和二次谐波波长下具有较低的反射率。经聚焦的基波光斑的尺寸类似于SHG晶体202中经聚焦的基波光斑的尺寸。

[0101] 将THG晶体302制造并朝向为令基波和二次谐波光束是相位匹配的, 从而产生三次谐波。还可以布置THG晶体302的朝向, 使得当基波和二次谐波光束穿过所述晶体时它们彼此“继续向前走(walkon)”, 如Pieterse的美国专利5,835,513所述。这样使基波光束和二次谐波光束在THG晶体302中的交叠最大化, 因此, 使转换效率最大化。

[0102] 制造THG晶体302的输出面306, 使得将光束209'、325以入射斜角入射。可以使用如下标准来选择入射角:

[0103] (i) 对三次谐波的反射适当地较低, 例如, 小于5%。

[0104] (ii) 由于色散而产生的角向光束分离是较为明显的, 使得可以将三次谐波与基波和二次谐波空间过滤。例如, 但不限于, 过滤的一般标准可以是光束之间的角度间隔至少是光束发散角的两倍。

[0105] (iii) 三次谐波经历收缩穿过输出面可以在走离方向和非走离方向上产生几乎相同的束腰尺寸。

[0106] (iv) 由于输出面引起的象散可以选择用于近似抵消任何在先光束象散, 使得出射的三次谐波光束的显性束腰位置在走离方向和非走离方向上是基本相同的。

[0107] (v) 输出面优选地相对光学损伤是鲁棒性的, 并工作寿命较长。

[0108] 示例但非限制性地, 对于使用近似布鲁斯特角的LBO SHG晶体和LBO THG晶体的三次谐波发生器光学布局, 输出面可以布置为使得三次谐波入射角是满足上述5个标准的 20° 。具体地, 对于低反射损耗, 三次谐波光束可以以大约 33° 的透射角射出晶体。对于未镀膜的输出面, 这种设计给予3.1%的可接受三次谐波反射率。可以针对为1064.2nm的输入基波波长和为 35°C 的LBO温度, 实现足够的角度间隔; 基波、二次谐波和三次谐波光束的折射率分别大约为1.565、1.613和1.597。在THG晶体输出面上的色散可以有利地将所述光束进行空间分离, 这是由于不同波长的透射角是不同的。图5绘制了THG晶体输出面上的内部入射角相对THG晶体内的基波光束束腰尺寸的变化, 其中导致三次谐波光束与二次谐波光束的间隔至少等于两个光束的半发散(half divergence)。

[0109] 从THG晶体302出射的三次谐波光束325的光学功率可以大于约1瓦、大于约10瓦或大于约30瓦。

[0110] 为了令THG晶体302的输出面相对光学损伤是鲁棒性的,可以不对THG晶体的输出面镀膜。如William Grossman的美国专利号5,850,407所述,使用未镀膜的输出面提供较高的损伤阈值。

[0111] 总言之,可以使用具有如下组件的光学布局,根据圆形象散无象散的近衍射受限的基波光束,产生圆形非象散的、近衍射受限的三次谐波光束:

[0112] i) 将基波输入光束聚焦在SHG晶体中的透镜或其他光学组件;

[0113] ii) 布鲁斯特或近似布鲁斯特角的SHG输入面;

[0114] iii) 在SHG和THG晶体之间的瑞利透镜(或其他光学组件);以及

[0115] iv) SH光束和剩余基波光束以约 20° 入射在THG输出面。

[0116] 上述光学布局具有如下优点。

[0117] (1) 它允许非线性晶体中的较小光束尺寸以提供优化效率。

[0118] (2) 它不需要特殊透镜或棱镜来进行走离补偿。

[0119] (3) 它通过调整第一基波光束束腰相对SHG晶体输入面的位置,来提供针对象散性调节“旋钮”。

[0120] (4) 它通过调整中继透镜和THG晶体位置来提供针对正圆度的调节“旋钮”。

[0121] 通常,SHG输入面204可以处于约布鲁斯特角或足够靠近布鲁斯特角,使得功率损耗是可接受的。例如,如图4可以看出,如果在SHG输入面上的入射角在大致 θ_B-20° 到 θ_B+10° 之间,则p偏振光在SHG 204输入面上的反射损耗可以保持为约2%或更小。图4还可以用于估计在THG输出面306的反射损耗。在这种情况下,相关角应是在THG输出面上的折射角,即,在THG输出光束325和THG输出面306的法线之间的角度。

[0122] 为了帮助理解本公开的一些方面,图6所示的四个附图示出了光学谐波发生器300中不同位置处的光束的形状变化。具体地,在图1中,基波光束209开始偏离圆形。然后在图2中,基波光束在SHG晶体202的输入面204处沿着非走离方向扩展。扩展导致椭圆形的光束横截面,该光束横截面的方向布置为垂直于SHG晶体202的走离方向。THG晶体302产生三次谐波光束325,形状如图3所示。该形状不是图2所示的基波光束的椭圆形,这是由于在走离方向上将其拉伸。然后,三次谐波光束325需要在非走离方向上压缩,如图4所示,以便得到圆形光束。如上所述,所述压缩可以发生在THG晶体的输出面处。所述减小应小于基波光束的扩展,这是由于三次谐波光束325相较于基波光束209是不太椭圆的。因此,在SHG晶体的输入面处的扩展超过在THG晶体302的输出面处的后续的减小。

[0123] 备选实施例

[0124] 第一备选实施例是增加在SHG晶体202上的入射角,使得它大于布鲁斯特角。可以对SHG 202的输入表面204进行镀膜以便减小后向反射并改善效率。可以通过使用THG晶体302,来获得圆形的无象散的近受限的三次谐波,其中制造所述THG晶体302使得其输出面布置为布鲁斯特角或近似布鲁斯特角。

[0125] 在一个备选实施例中,可以在SHG晶体302之前的光束中的任何位置处布置一对棱镜,可以选择它们的制造角和对准,以便在SHG晶体202中得到所希望的椭圆形和象散。

[0126] 另一备选实施例在于将这里所述的光学设计用于除了三次谐波产生之外的高次谐波产生(HHG)。例如,可以实现四次谐波版本。这种实施例的一个版本可以使用两个非线性晶体。第一非线性晶体将基波辐射转换为二次谐波,第二非线性晶体将二次谐波转换为

四次谐波。对于1064nm或近似1064nm的基波波长,LBO晶体可以用作SHG晶体,硼酸钡(BBO)晶体可以用作FHG晶体。

[0127] 第二版本可以使用三个非线性晶体,以便将基波辐射转换为四次谐波辐射。具体地,第一晶体可以用于将一部分基波辐射转换为二次谐波。第二晶体将二次谐波和剩余的基波混合以便产生三次谐波。第三晶体将三次谐波与剩余的基波混合以便产生四次谐波。对于1064nm或接近1064nm的基波波长,可以在所有谐波转换级中使用适合朝向的LBO晶体。

[0128] 无论在第一版本或第二版本中,透射三次谐波光束或四次谐波光束的所有表面可以是未镀膜的,并且这些表面按照针对所述谐波光束的布鲁斯特角或小于布鲁斯特角朝向。

[0129] 本公开的多个方面用于使用单个柱状透镜和高斯光学的原理来简单调整光束形状。可以将透镜布置为靠近非线性晶体,从而克服在一些光学系统中的预先存在的空间限制,而不需要重新设计主要硬件组件。

[0130] 所提出的系统的优点包括:到三次谐波的较高的转换效率以及圆形输出光束。这种系统可以结合LBO和BBO非线性晶体二者工作。该系统的特征在于三次谐波晶体的损伤阈值较高。此外,该系统不使用UV光束整形光学器件,不在透射UV的任何表面上镀膜,导致较高的可靠性和较长的使用寿命。

[0131] 通过在三次谐波发生器晶体输出面处的色散,易于将三次谐波光束与基波光束和二次谐波光束分离。这种系统可以提供可设计调整的光束正圆度和可对准调整的象散。该系统需要的光学组件较少,需要柱状光学器件或棱镜的数目较少,或不需要柱状光学器件或棱镜。

[0132] 激光系统

[0133] 图6描述了根据本发明示例的波长转换激光系统600的示例。具体地,该系统600通常包括种子源602;一个或更多个光学放大器604、606;以及波长转换器100,可以结合图2A、图2B或上述其他配置中的任何配置来配置波长转换器100。种子源602产生种子辐射601,通过光学放大器604、606来放大所述种子辐射601以便产生经放大的输出,该输出用作波长转换器的基波输入辐射101。波长转换器100对经放大的输出的至少一部分进行波长转换,以便产生经波长转换的输出。基波输入光束的一部分还可以从波长转换器100出射。

[0134] 针对种子源602存在大量不同的可能设计。例如,种子源602可以通过驱动电流经过二极管来泵浦的二极管激光器。可以使用多种类型的激光二极管,诸如分布布拉格反射(DBR)激光器、分布反馈(DFB)或法布里-珀罗激光二极管。商业可用的DBR的示例是来自德国马尔堡Sacher Lasertechnik Group的型号DBR-1064-100。备选地,种子源602可以是二极管泵浦固态(DPSS)激光器,所述激光器可以是无源Q开关的、锁模的或连续波(CW)或准CW的。备选地,其他类型的激光器可以用作种子源602。

[0135] 光学放大器可以包括一个或更多个放大器单元604、606。例如,可选性的前置放大器604可以可选地串联耦接在种子源602和功率放大器606之间。前置放大器604可以放大种子辐射602,从而产生中间信号605,中间信号602经过功率放大器606放大以便产生经放大的输出,所述经放大的输出形成基波输入光束101。放大器604、606可以光学地耦接到输出光纤608。基波输入光束101从光纤608的端面出射。

[0136] 例如,放大器604、606中的一个或更多个可以是包括耦接到泵浦原603、307的光纤

放大器。光纤通常可以包括包层和掺杂性的纤芯。光纤的纤芯直径可以例如是约6微米。光纤可以是保偏光纤或单偏振光纤。放大器606之一的一部分可以形成输出光纤608。要进行放大的输入辐射(例如,种子辐射601或中间辐射605)被耦接到纤芯。来自泵浦源603、607的泵浦辐射(例如,二极管激光器)通常还耦接到纤芯,并且可以备选地耦接到包层。在光纤纤芯中的掺杂原子(例如,诸如镱(Yb)、铒(Er)、钕(Nd)、钬(Ho)、钐(Sm)和铥(Tm)或其中两个或更多个的组合的稀土元素)吸收来自泵浦辐射的能量。所吸收的能量对光纤纤芯中的输入辐射的能量进行放大。输入辐射激励发射来自掺杂原子的辐射。受激辐射与输入辐射具有相同的频率和相位。最终,经放大的输出与输入辐射具有相同的频率和相位,但光强度更大。

[0137] 控制器610可以可选地耦接到种子源602和/或泵浦源603、607。控制器610可以执行硬件或软件逻辑电路,用于控制种子辐射601或由泵浦源603、607提供的泵浦辐射的功率。通过控制来自种子源的种子辐射601和/或来自泵浦源603和607的泵浦辐射的功率,控制器610控制向波长转换器100提供的输入光束101的光功率。

[0138] 波长转换器100可以包括第一和第二非线性光学晶体102、104以及透镜110、112,其中可以如上所述地进行配置这些组件。示例但非限制性地,第一非线性晶体102可以根据晶体102和输入激光辐射101之间的非线性相互作用,产生二次谐波光束输出的SHG晶体。

[0139] THG晶体通过在来自SHG晶体102的SHG输出光束和来自SHG晶体的剩余基波光束之间的和频作用,产生三次谐波辐射。三次谐波辐射从THG晶体出射,作为经过波长转换的输出111。一些其余输入辐射101'也可以从第二晶体104出射。THG晶体可以包括布鲁斯特切角端面106,该端面106将经过波长转换的输出111与从第二晶体出射的剩余基波光束分离。

[0140] 尽管以上是对本发明优选实施例的完整描述,然而有可能使用多种替换物、修改和等同物。因此,不应该根据上述描述来确定本发明的范围,而是应该参考所附权利要求以及其全部范围内的等同物来确定本发明的范围。可以将文中所述的任何特征(无论优选的或非优选的)与文中所述的任何其他特征相结合(无论优选的或非优选的)。在以下权利要求中,除非明确限定,否则不定冠词“一”或“一个”表示存在一个或多个在所述冠词之后的项目。所附权利要求不应理解为包括装置附加功能的限制,除非在使用短语“用于.....的装置”的特定权利要求中明确引述了这种限制。

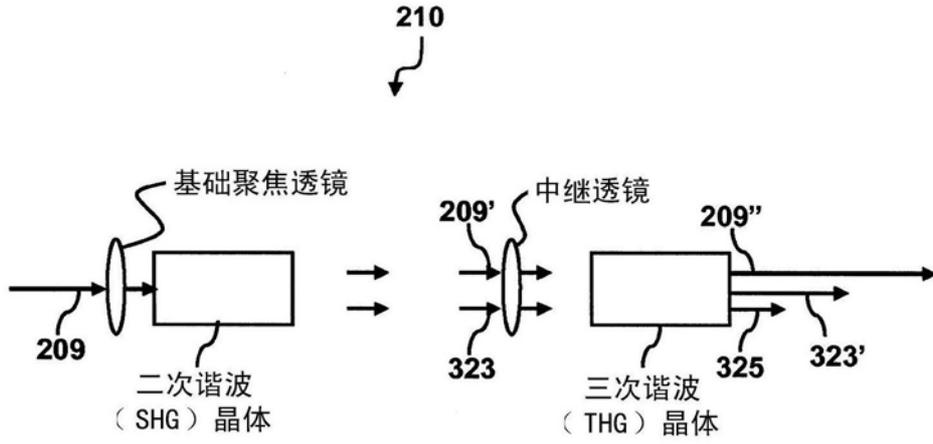


图1 (现有技术)

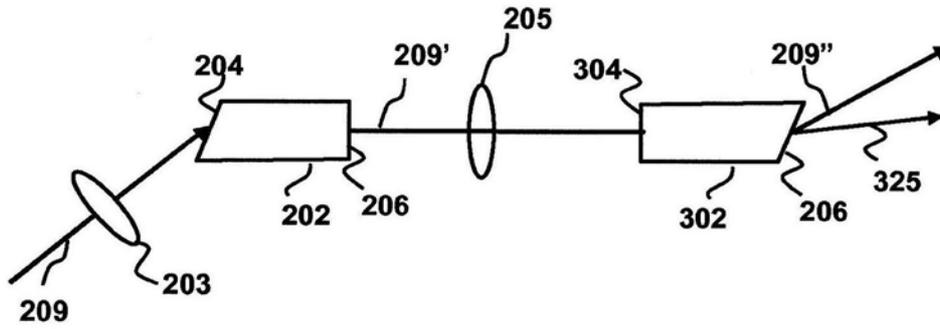


图2A

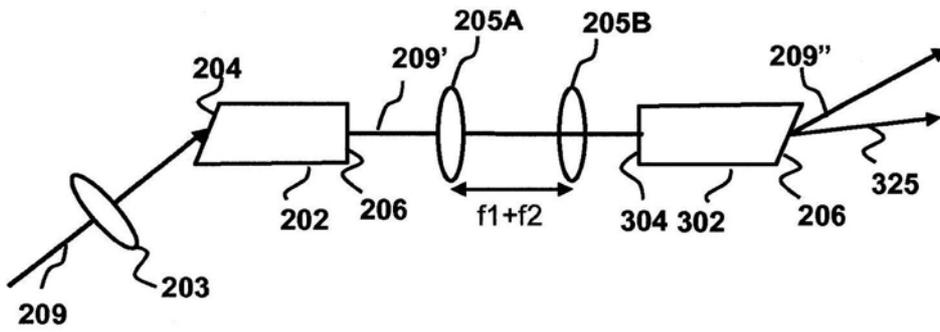


图2B

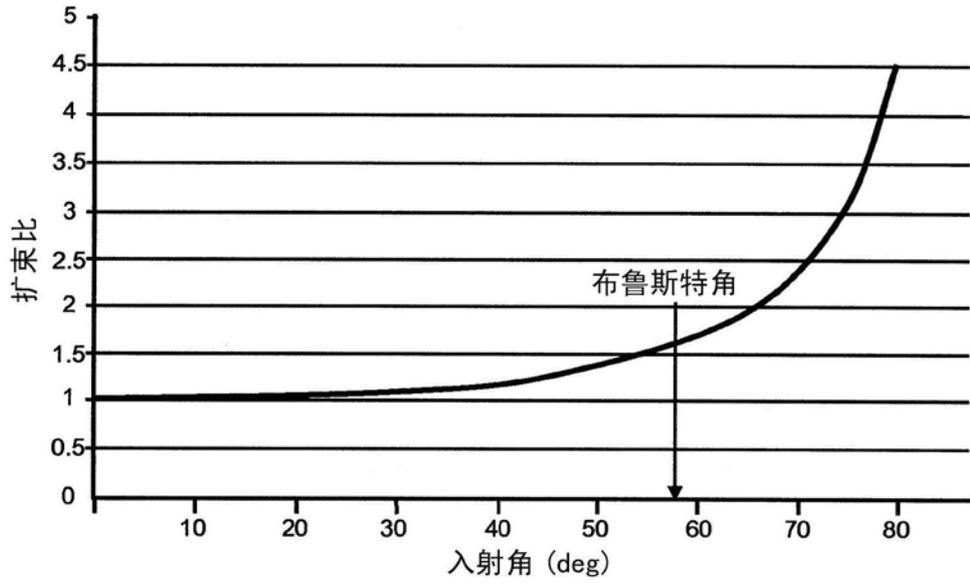


图3

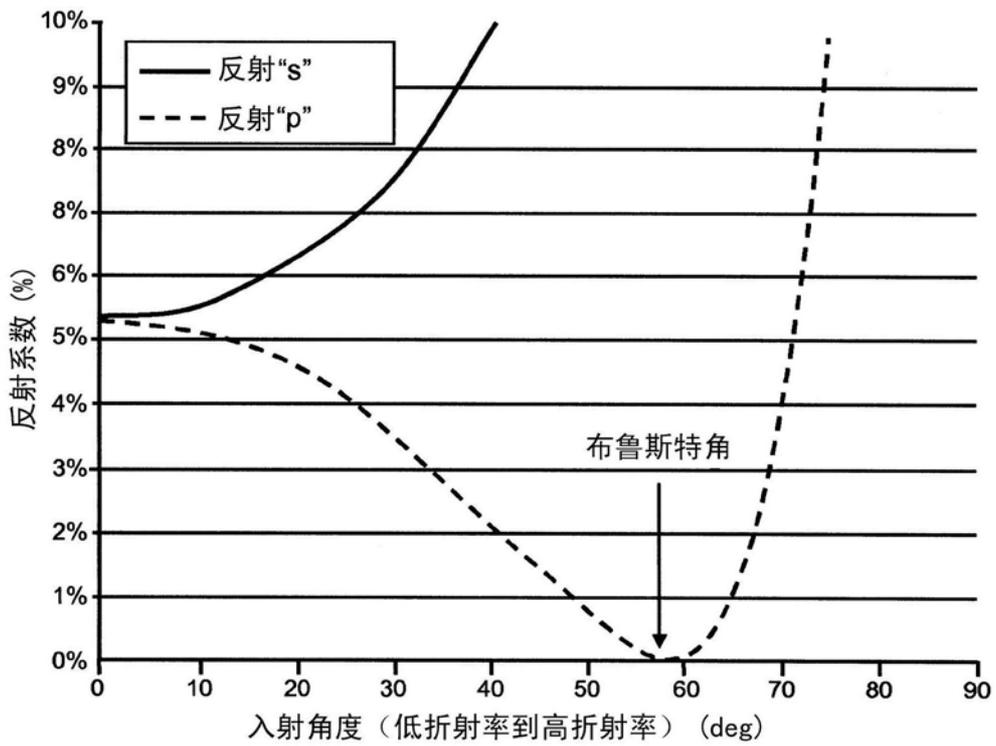


图4

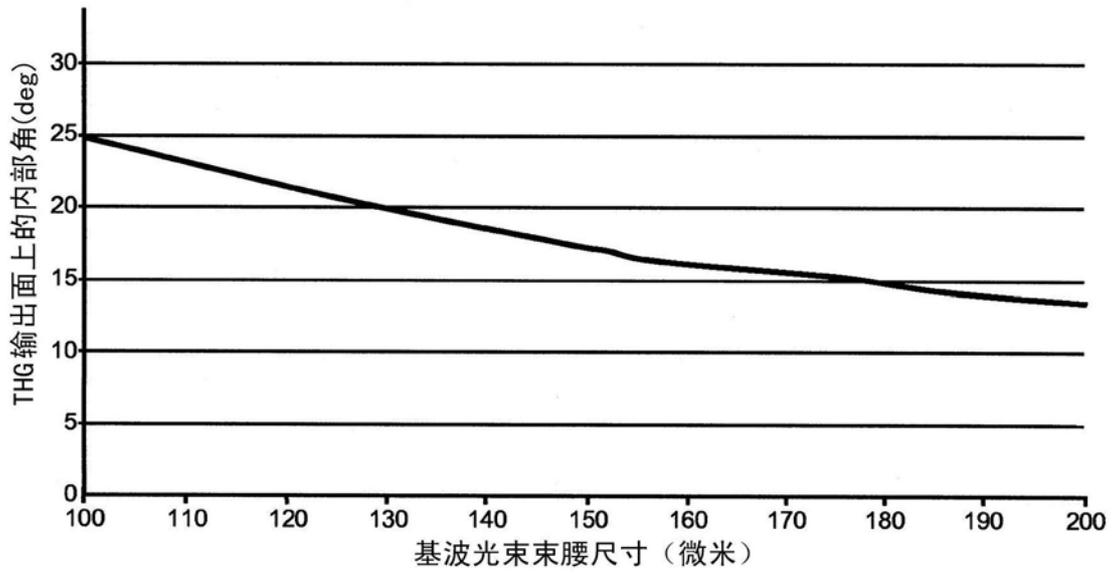


图5

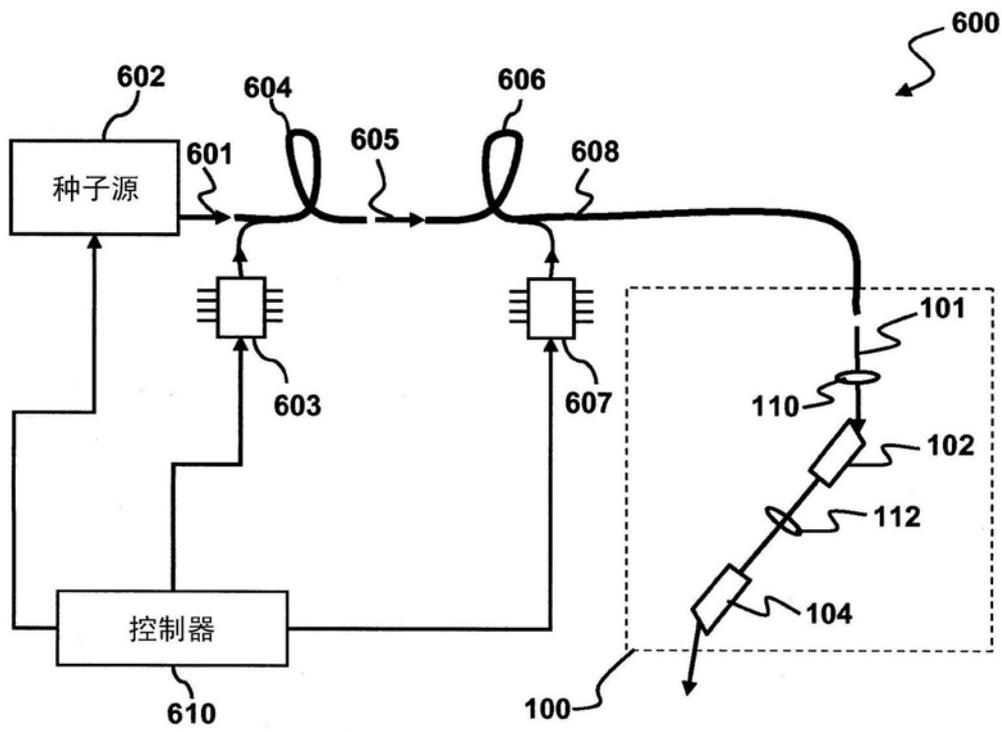


图6

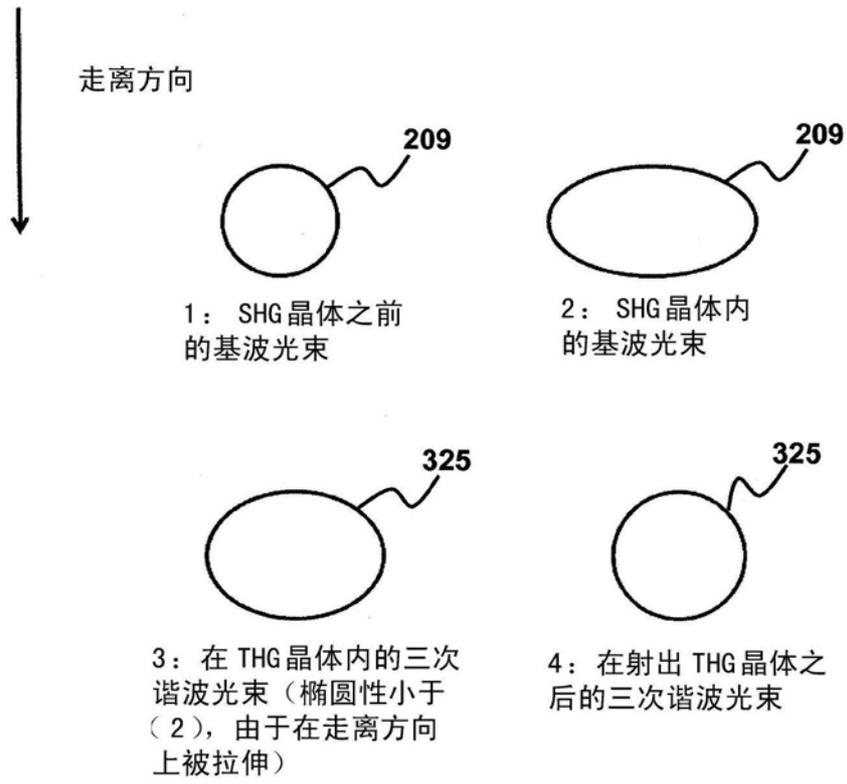


图7