



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104267557 B

(45)授权公告日 2017. 02. 08

(21)申请号 201410546550.3

(22)申请日 2014.10.16

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 104267557 A

(43)申请公布日 2015.01.07

(73)专利权人 上海交通大学

地址 200240 上海市闵行区东川路800号

(72)发明人 陈静 唐道龙 安宁 钱列加

陈险峰

(74)专利代理机构 上海交达专利事务所 31201

代理人 王毓理 王锡麟

(51)Int.Cl.

G02F 1/37(2006.01)

(56)对比文件

DE 102004062639 A1,2005.09.08,全文.

CN 101179176 A,2008.05.14,全文.

Mingjun Gong等.Multi-broadcast

wavelength conversion using simultaneous

cSHG/DFG and cSFG/DFG.《Optical Society of America》.2009,全文.

薛建华等.KBe2BO3F2晶体的非共线倍频特性数值分析.《光学学报》.2010,第30卷(第4期),全文.

詹仰钦等.光学倍频晶体的非共线相位匹配.《光电工程》.2003,第30卷(第3期),全文.

Kun Li等.Analysis of broadband third harmonic generation with non-collinear angular dispersion in KDP crystals.

《Optics Communications》.2008,第281卷(第8期),全文.

Olivier Lubin等.Modeling of the effects of KDP crystals gravity sag on third harmonic generation.《International Society for Optics and Photonics》.1999,第3492卷全文.

审查员 叶菲

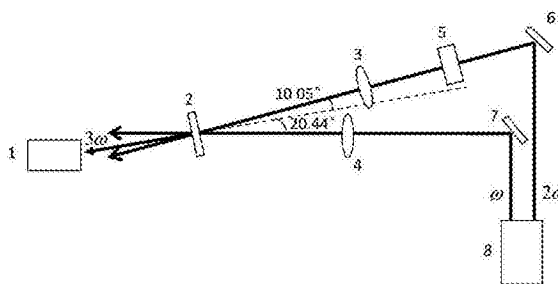
权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54)发明名称

非共线高效率频率转换实现方法

(57)摘要

一种非线性光学技术领域的非共线高效率频率转换实现方法,通过将呈一定角度的基频光和倍频光先经过一个聚焦透镜进行预聚焦,然后再经过非线性光学晶体,从而使得产生的三倍频光自动聚焦.本发明采用基频光、倍频光预聚焦的方法,解决了现有技术中聚焦透镜易于被紫外波段的谐波损坏的问题,避免了更换聚焦透镜后重新调整光路的步骤,提高了工作效率.与共线情况下三倍频过程中晶体的角度带宽相比,本发明所具有的角度带宽更大。



1. 一种非共线高效率频率转换实现方法,其特征在于,通过将呈一定角度的基频光和倍频光先经过一个聚焦透镜进行预聚焦,然后再经过非线性光学晶体,从而使得产生的三倍频光自动聚焦,其中:三倍频光通过负单轴晶体生成,匹配方式为I类匹配方式,即 $o+o \rightarrow e$,I类有效倍频系数不为0,且在入射角度为 90° 时达到最大;基频光与倍频光呈一定角度是指:基频光与倍频光在非线性光学晶体外的夹角不为零。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征是,所述的负单轴晶体由以下方式获得:选取厚度为1cm的KDP或掺杂氘的DKDP晶体,切割角度为 $\theta_i = 90^\circ$, $\phi = 45^\circ$, $i = 1, 2, 3$,Z向为晶体光轴方向,两面通光,通光面为YOZ面,当基频光 (θ_1, φ) 、倍频光 (θ_2, φ) 、三倍频光 (θ_3, φ) 的波矢方向在同一主截面内,其I类有效倍频系数的表达式为 $d_{eff} = -d_{36} \sin \theta_3 \sin 2\varphi$,在 $\theta_3 = 90^\circ$, $\varphi = 45^\circ$ 时有效倍频系数最大,其II类有效倍频系数的表达式为 $d_{eff} = d_{14} \sin \theta_2 \cos \theta_3 \cos 2\varphi + d_{36} \cos \theta_2 \sin \theta_3 \cos 2\varphi$,在 $\theta_3 = 90^\circ$, $\varphi = 45^\circ$ 时有效倍频系数为0。

3. 根据权利要求1所述的方法,其特征是,所述的非线性光学晶体内的夹角由以下方式获得:基频光 k_1 、倍频光 k_2 和三倍频光 k_3 满足矢量三角形的关系 $\vec{k}_1 + \vec{k}_2 = \vec{k}_3$,其中 $k = n\omega/c$,匹配方式为I类匹配方式 $o+o \rightarrow e$,三倍频光 k_3 设置为 90° ,则矢量三角形的三条边长已经确定,分别为 n_{ω}^o 、 $2n_{2\omega}^o$ 和 $3n_{3\omega}^e$,由三角线余弦定理,可计算得到晶体内矢量三角形三个角度,从而得到基频光与倍频光在晶体内的夹角。

4. 根据权利要求1或3所述的方法,其特征是,所述的非线性光学晶体外的夹角由以下方式获得:由折射定律及晶体内矢量三角形的三个角度计算得到对应晶体外的角度,从而得到基频光与倍频光在晶体外的夹角。

5. 根据权利要求1或2所述的方法,其特征是,所述的负单轴晶体具有较大角度带宽由以下方式获得:采用非线性相位匹配,三倍频光 k_3 为 90° ,则基频光 k_1 和倍频光 k_2 与三倍频光 k_3 满足角度关系,使基频光和倍频光均沿逆时针相对匹配角偏离 θ 角度或均沿顺时针相对匹配角偏离 θ 角度,则三倍频光对应偏离原来 90° 方向逆时针或顺时针 θ 角度,即保持矢量三角形形状不变;由于 o 光折射率与入射角度无关, e 光与入射角度有关,则基频光 k_1 和倍频光 k_2 的大小保持不变,三倍频光 k_3 相对原来 90° 方向时稍稍变大,即引入相位失配;由于这种情况下相位失配较小,类似共线相位匹配中的非临界相位匹配情况,因而具有较大的角度带宽,即非共线相位匹配中三倍频光在 90° 附近具有较大的角度带宽,上述偏离 θ 角度与角度带宽的关系由以下公式决定:

$$k_3 = 3n_{3\omega}^e, \quad k_3' = \frac{3n_{3\omega}^o n_{3\omega}^e}{[(n_{3\omega}^o)^2 \sin^2(90^\circ - \theta) + (n_{3\omega}^e)^2 \cos^2(90^\circ - \theta)]^{1/2}}, \quad \Delta k = k_3' - k_3,$$

$$\eta \propto \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k \cdot L}{2}\right)$$

其中: k_3 为原来的三倍频光的波矢, k_3' 为引入偏离 θ 角度后新的三倍频光的波矢, Δk 为引入的相位失配, η 为三倍频光的转换效率,而角度带宽即为三倍频光转换效率的半高宽。

6. 一种实现上述任一权利要求所述方法的装置,其特征在于,包括:纳秒激光器以及设置于其两个输出端的两块全反射镜、聚焦透镜、半波片和非线性光学晶体,其中:第一全反射镜依次经第一聚焦透镜到达非线性光学晶体,第二全反射镜依次经半波片、第二聚焦透

镜到达非线性光学晶体。

7. 根据权利要求6所述的装置,其特征是,所述的第一聚焦透镜和第二聚焦透镜或采用单块聚焦透镜实现,或为一体式结构。

8. 根据权利要求6所述的装置,其特征是,所述的非线性光学晶体采用KDP或DKDP晶体。

9. 根据权利要求6所述的装置,其特征是,所述的第一全反射镜与非线性光学晶体的连线与第二全反射镜与非线性光学晶体的连线的夹角为 30.49° 。

10. 根据权利要求6所述的装置,其特征是,所述的纳秒激光器的第一输出端输出1064nm,偏振方向为水平方向;第二输出端输出为532nm,偏振方向为竖直方向。

非共线高效率频率转换实现方法

技术领域

[0001] 本发明涉及的是一种非线性光学技术领域的方法,具体是一种基于非共线双折射相位匹配条件及相位匹配几何构型对角度带宽的影响,实现锥形光束非共线高效率三倍频的方法。

背景技术

[0002] 三倍频,即产生三次谐波,其频率为基频光的三倍。利用非线性光学晶体进行三倍频,是目前由固态红外激光产生紫外、真空紫外激光的有效途径。紫外及真空紫外激光在激光光谱、激光微加工、光刻技术和激光光化学合成等领域都具有非常大的潜在应用。

[0003] 双折射位相匹配,是利用晶体的双折射效应来补偿基波和谐波的色散特性,也就是通过选择适当的光波波矢方向和偏振方向,使基波与谐波满足相位匹配条件。考虑三波相互作用是否在同一直线上,可分为共线相位匹配和非共线相位匹配两种构型。共线相位匹配指的是基频光、倍频光和三倍频光的波矢均在同一直线上;非共线相位匹配指的是基频光、倍频光和三倍频光的波矢满足矢量三角形的几何关系。

[0004] 光在单轴晶体内发生双折射现象,产生两束光分别为寻常光和非寻常光。根据入射基频光偏振方向的不同,可分为两类相位匹配方式。I类相位匹配是指入射基频光均为寻常光或均为非寻常光,偏振方向平行;II类相位匹配是指入射基频光既有寻常光,又有非寻常光,偏振方向正交。

[0005] 当晶体的双折射位相匹配角为 90° 时,晶体具有较大的角度带宽,且倍频过程不受走离效应的影响。这一特殊角度对某些晶体来说,可通过调节晶体的温度,使其匹配角达到 90° ,即非临界相位匹配。这一过程所需要的温度变化比较大,对实验温控炉的温度可调节范围要求较大,且要考虑晶体的熔点等问题。

[0006] 目前,由基频光和倍频光经非线性光学晶体产生的紫外波段的三倍频光,在大能量情况下,对紫外波段的三倍频光进行聚焦时,容易使聚焦透镜损坏,需要更换,而更换后的光路需重新调节。此外,基频光和倍频光共线产生三倍频光的情况下,非线性光学晶体的角度带宽较小,即晶体对角度较为敏感。

发明内容

[0007] 本发明主要针对在大能量情况下,紫外波段的激光经过聚焦透镜进行聚焦时,容易使聚焦透镜损坏的问题,提出一种非共线高效率频率转换实现方法。采用预聚焦方式,能够克服紫外波段的三倍频光损坏聚焦透镜的问题,可以使三倍频光不经过聚焦透镜而自动聚焦;克服了现有技术中更换透镜后需重新调整光路的步骤,从而提高了效率。与共线情况下三倍频过程中晶体的角度带宽相比,本发明所具有的角度带宽更大。

[0008] 本发明是通过以下技术方案实现的,本发明通过将呈一定角度的基频光和倍频光先经过一个聚焦透镜进行预聚焦,然后再经过非线性光学晶体,从而使得产生的三倍频光自动聚焦。

[0009] 所述的三倍频光具体通过负单轴晶体生成,匹配方式为I类匹配方式,即 $o+o \rightarrow e$,I类有效倍频系数不为0,且在入射角度为 90° 时达到最大。

[0010] 所述的负单轴晶体由以下方式获得:选取厚度为1cm的KDP(磷酸二氢钾)或掺杂铀的DKDP(磷酸二铀钾)晶体,切割角度为 $\theta_i = 90^\circ$, $\phi = 45^\circ$, $i = 1, 2, 3$;Z向为晶体光轴方向,两面通光,通光面为YOZ面,当基频光 (θ_1, φ) 、倍频光 (θ_2, φ) 、三倍频光 (θ_3, φ) 的波矢方向在同一主截面内,其I类有效倍频系数的表达式为 $d_{eff} = -d_{36} \sin \theta_3 \sin 2\varphi$,在 $\theta_3 = 90^\circ$, $\varphi = 45^\circ$ 时有效倍频系数最大,其II类有效倍频系数的表达式为 $d_{eff} = d_{14} \sin \theta_2 \cos \theta_3 \cos 2\varphi + d_{36} \cos \theta_2 \sin \theta_3 \cos 2\varphi$,在 $\theta_3 = 90^\circ$, $\varphi = 45^\circ$ 时有效倍频系数为0。

[0011] 所述的基频光与倍频光呈一定角度指的是基频光与倍频光在非线性光学晶体外的夹角不为零。

[0012] 所述的基频光与倍频光在非线性光学晶体内的夹角由以下方式获得:基频光 k_1 、倍频光 k_2 和三倍频光 k_3 满足矢量三角形的关系 $\vec{k}_1 + \vec{k}_2 = \vec{k}_3$,其中 $k = n\omega/c$,匹配方式为I类匹配方式 $o+o \rightarrow e$,三倍频光 k_3 设置为 90° ,则矢量三角形的三条边长已经确定,分别为 n_{ω}^o 、 $2n_{2\omega}^o$ 和 $3n_{3\omega}^e$ 。由三角线余弦定理,可计算得到晶体内矢量三角形三个角度,从而得到基频光与倍频光在晶体内的夹角。

[0013] 所述的基频光与倍频光在非线性光学晶体外的夹角由以下方式获得:由折射定律及前面已经计算得到的晶体内矢量三角形的三个角度,可计算得到对应晶体外的角度,从而得到基频光与倍频光在晶体外的夹角。

[0014] 所述的较大角度带宽由以下方式获得:采用非线性相位匹配,三倍频光 k_3 为 90° ,则基频光 k_1 和倍频光 k_2 与三倍频光 k_3 满足一定的角度关系。使基频光和倍频光均沿逆时针偏离匹配角 θ 角度,或均沿顺时针偏离匹配角 θ 角度,则三倍频光自动偏离原来 90° 方向逆时针或顺时针 θ 角度,即保持矢量三角形形状不变。由于o光折射率与入射方向 θ 无关,e光与入射方向 θ 有关,则基频光 k_1 和倍频光 k_2 的大小保持不变,三倍频光 k_3 相对原来 90° 方向时稍稍变大,即引入相位失配。由于这种情况下相位失配较小,类似共线相位匹配中的非临界相位匹配情况,因而具有较大的角度带宽,即非共线相位匹配中三倍频光在 90° 附近具有较大的角度带宽。偏离角度 θ 与角度带宽的关系由以下公式决定:

$$[0015] \quad k_3 = 3n_{3\omega}^e$$

$$[0016] \quad k_3' = \frac{3n_{3\omega}^o n_{3\omega}^e}{[(n_{3\omega}^o)^2 \sin^2(90^\circ - \theta) + (n_{3\omega}^e)^2 \cos^2(90^\circ - \theta)]^{1/2}}$$

$$[0017] \quad \Delta k = k_3' - k_3$$

$$[0018] \quad \eta \propto \sin^2\left(\frac{\Delta k \cdot L}{2}\right)$$

[0019] 其中: k_3 为原来的三倍频光的波矢, k_3' 为引入偏离角度 θ 后新的三倍频光的波矢, Δk 为引入的相位失配, η 为三倍频光的转换效率。而角度带宽即为三倍频光转换效率的半高宽。

[0020] 本发明涉及一种实现上述方法的装置,包括:纳秒激光器以及设置于其两个输出端的两块全反射镜、聚焦透镜、半波片和非线性光学晶体。其中:第一全反射镜依次经第一聚焦透镜到达非线性光学晶体,第二全反射镜依次经半波片、第二聚焦透镜到达非线性光

学晶体。

[0021] 所述的第一聚焦透镜和第二聚焦透镜或采用单块聚焦透镜实现,或为一体式结构。

[0022] 所述的非线性光学晶体采用KDP或DKDP晶体。

[0023] 所述的第一全反射镜与非线性光学晶体的连线与第二全反射镜与非线性光学晶体的连线的夹角为 30.49° 。

[0024] 所述的纳秒激光器的第一输出端输出1064nm,偏振方向为水平方向;第二输出端输出为532nm,偏振方向为竖直方向。

[0025] 所述的非线性光学晶体的另一侧优选设有功率计用于检测三倍频光功率。

[0026] 技术效果

[0027] 与现有技术相比,本发明实现锥形光束非共线高效率激光三倍频,使基频光和倍频光预聚焦,则经过非线性光学晶体后的三倍频光会自动聚焦,且晶体具有较大的角度带宽,从而不需要在非线性光学晶体后放置聚焦透镜对三倍频光进行聚焦,解决了现有技术中聚焦透镜易于被紫外波段的谐波损坏的问题,避免了更换聚焦透镜后重新调整光路的步骤,从而提高了工作效率。

附图说明

[0028] 图1为现有技术方案与本发明对现有技术方案改进后的对比示意图。

[0029] 图2为晶体坐标轴示意图。

[0030] 图3为非线性三倍频及其角度带宽示意图。

[0031] 图4为实施例1的测试装置结构示意图;

[0032] 图中:功率计1、KDP晶体2、聚焦透镜3、聚焦透镜4、半波片5、全反射镜6、全反射镜7、纳秒激光器8。

[0033] 图5为实施例1中理论计算得到的角度带宽 2.98° 示意图。

[0034] 图6为实施例2的测试装置结构示意图;

[0035] 图中:功率计1、KDP晶体2、聚焦透镜3、半波片4、全反射镜5、全反射镜6、纳秒激光器7。

具体实施方式

[0036] 下面对本发明的实施例作详细说明,本实施例在以本发明技术方案为前提下进行实施,给出了详细的实施方式和具体的操作过程,但本发明的保护范围不限于下述的实施例。

[0037] 实施例1

[0038] 本实施例选取基频光 $\omega_1=1.064\mu\text{m}$,倍频光 $\omega_2=0.532\mu\text{m}$,一定夹角的两束光分别经过一个聚焦透镜进行预聚焦。将KDP晶体置于旋转台上,然后放置在两聚焦透镜的共同焦点处。调节旋转台上的测微丝杆,以实现旋转台精确细微的角度调整,即使KDP晶体转动到合适角度。在KDP晶体后放置功率计,用来检测三倍频光 $\omega_3=0.355\mu\text{m}$,如图4所示。调节旋转台的测微丝杆,使KDP晶体在水平面上作微小的角度转动,记录KDP晶体转动的角度和功率计能量值,就可以得到转动角度 θ 与三倍频效率 η 之间的关系曲线图。

[0039] 所述的倍频晶体由以下方式获得:选取厚度为1cm的KDP晶体,切割角度为 $\theta=90^\circ$, $\varphi=45^\circ$,Z向为晶体光轴方向,两面通光,通光面为YOZ面,如图2所示。

[0040] 所述的基频光、倍频光、三倍频光的波矢在晶体内合适角度由以下方式计算得到:由非共线相位匹配可知,基频光 k_1 、倍频光 k_2 和三倍频光 k_3 满足矢量三角形的关系 $\vec{k}_1+\vec{k}_2=\vec{k}_3$,其中 $k=n\omega/c$,匹配方式为I类匹配方式 $o+o\rightarrow e$,三倍频光 k_3 设置为 90° ,则矢量三角形的三条边长已经确定,分别为 n_ω^o 、 $2n_{2\omega}^o$ 和 $3n_{3\omega}^e$ 。由三角线余弦定理,可计算得到晶体内矢量三角形三个角度,如图3所示, $A=6.63^\circ$, $B=13.51^\circ$, $C=159.86^\circ$ 。

[0041] 所述的基频光与倍频光的波矢在晶体外合适角度由以下方式计算得到:由折射定律和上述已经计算得到的晶体内的矢量三角形的两个角度A、B,可计算得到对应晶体外的两个角度 $A'=10.05^\circ$ 、 $B'=20.44^\circ$

[0042] 如图4所示,纳秒激光器8分两束光出来,分别为1064nm,偏振方向为水平方向;532nm,偏振方向为竖直方向。1064nm基频光分别经过全反射镜7、聚焦透镜4,入射到KDP晶体2中;532nm倍频光分别经过全反射镜6、半波片5、聚焦透镜3,入射到KDP晶体2中。当基频光和倍频光入射角度合适,满足相位匹配条件时,两束光在KDP晶体内和频,产生三倍频光355nm。用功率计1检测三倍频光功率。

[0043] 如图5所示为实施例1中用计算机模拟计算得到的KDP晶体转角 θ 与三倍频效率 η 之间的关系图。计算得到全高半宽为 2.98° 。

[0044] 本实施例以KDP晶体为例,但不局限于KDP晶体。其它晶体只要满足以下条件亦可:负单轴晶体;I类匹配方式 $o+o\rightarrow e$;I类有效倍频系数在 $\theta=90^\circ$ 时不为0。

[0045] 实施例2

[0046] 本实施例选取基频光 $\omega_1=1.064\mu\text{m}$,倍频光 $\omega_2=0.532\mu\text{m}$ 。与实施例1不同的地方在于,实施例1中基频光与倍频光是分别经过一个聚焦透镜进行预聚焦的;而本实施例只用一个聚焦透镜,即让基频光与倍频光均水平通过同一个聚焦透镜。通过分别控制聚焦前两束光到聚焦透镜主光轴之间的距离,来控制聚焦后基频光、倍频光与聚焦透镜主光轴之间的夹角。将倍频晶体置于旋转台上,然后放置在聚焦透镜的焦点处。调节旋转台上的测微丝杆,使倍频晶体转动到合适的角度。在倍频晶体后放置功率计,用来检测三倍频光 $\omega_3=0.355\mu\text{m}$,如图6所示。

[0047] 通过调节旋转台上的测微丝杆,使晶体在水平面上作微小的角度转动,记录KDP晶体转动的角度和功率计值,就可以得到转动角度 θ 与三倍频效率 η 之间的关系曲线图。

[0048] 所述的倍频晶体由以下方式获得:选取厚度为1cm的KDP晶体,切割角度为 $\theta=90^\circ$, $\varphi=45^\circ$,Z向为晶体光轴方向,两面通光,通光面为YOZ面,如图2所示。

[0049] 所述的基频光、倍频光、三倍频光的波矢在晶体内合适角度由以下方式计算得到:由非共线相位匹配可知,基频光 k_1 、倍频光 k_2 和三倍频光 k_3 满足矢量三角形的关系 $\vec{k}_1+\vec{k}_2=\vec{k}_3$,其中 $k=n\omega/c$,匹配方式为I类匹配方式 $o+o\rightarrow e$,三倍频光 k_3 设置为 90° ,则矢量三角形的三条边长已经确定,分别为 n_ω^o 、 $2n_{2\omega}^o$ 和 $3n_{3\omega}^e$ 。由三角线余弦定理,可计算得到晶体内矢量三角形三个角度,如图3所示, $A=6.63^\circ$, $B=13.51^\circ$, $C=159.86^\circ$ 。

[0050] 所述的基频光与倍频光的波矢在晶体外合适角度由以下方式计算得到:由折射定律和上述已经计算得到的晶体内的矢量三角形的两个角度A、B,可计算得到对应晶体外的

两个角度 $A' = 10.05^\circ$ 、 $B' = 20.44^\circ$

[0051] 如图6所示,纳秒激光器7分两束光出来,分别为1064nm,偏振方向为水平方向;532nm,偏振方向为竖直方向。1064nm基频光分别经过全反射镜6、聚焦透镜3,入射到倍频晶体2中;532nm倍频光分别经过全反射镜5、半波片4、聚焦透镜3,入射到KDP晶体2中。当基频光和倍频光入射角度合适,满足相位匹配条件时,两束光在KDP晶体内和频,产生三倍频光355nm。用功率计1检测三倍频光功率。

[0052] 本实施例以KDP晶体为例,但不局限于KDP晶体。其它晶体只要满足以下条件亦可:负单轴晶体;I类匹配方式 $o+o \rightarrow e$;I类有效倍频系数在 $\theta = 90^\circ$ 时不为0。

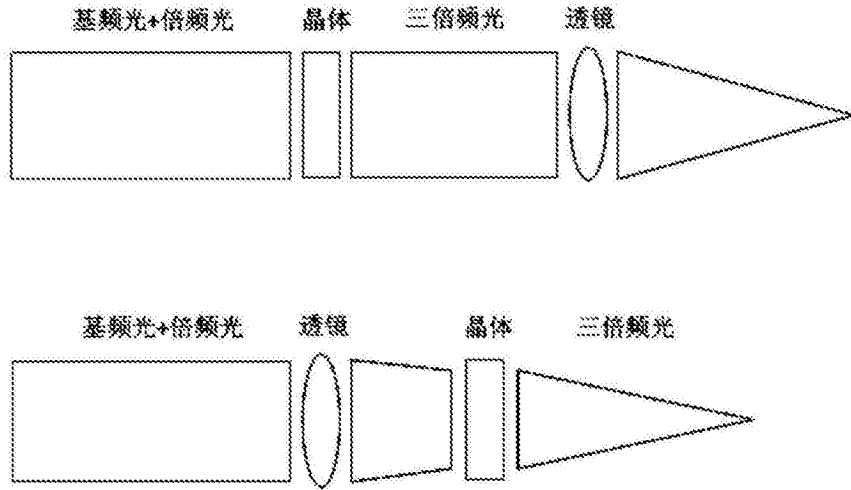


图1

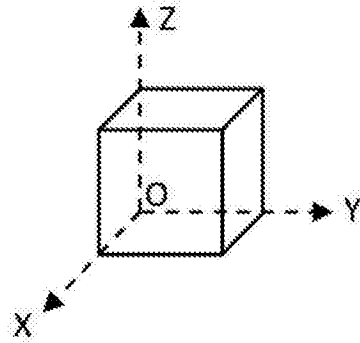


图2

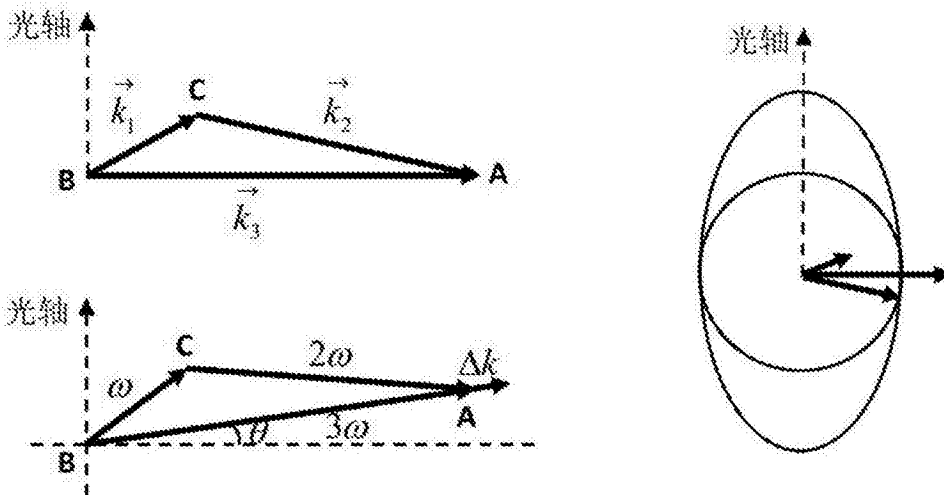


图3

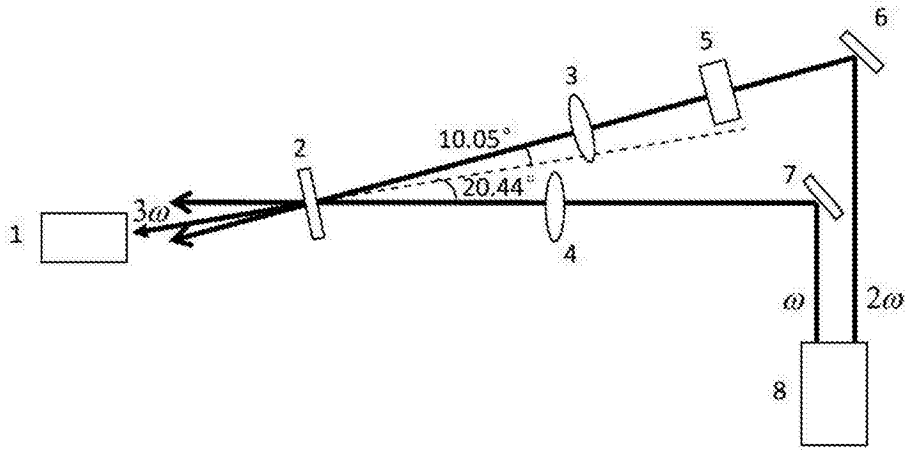


图4

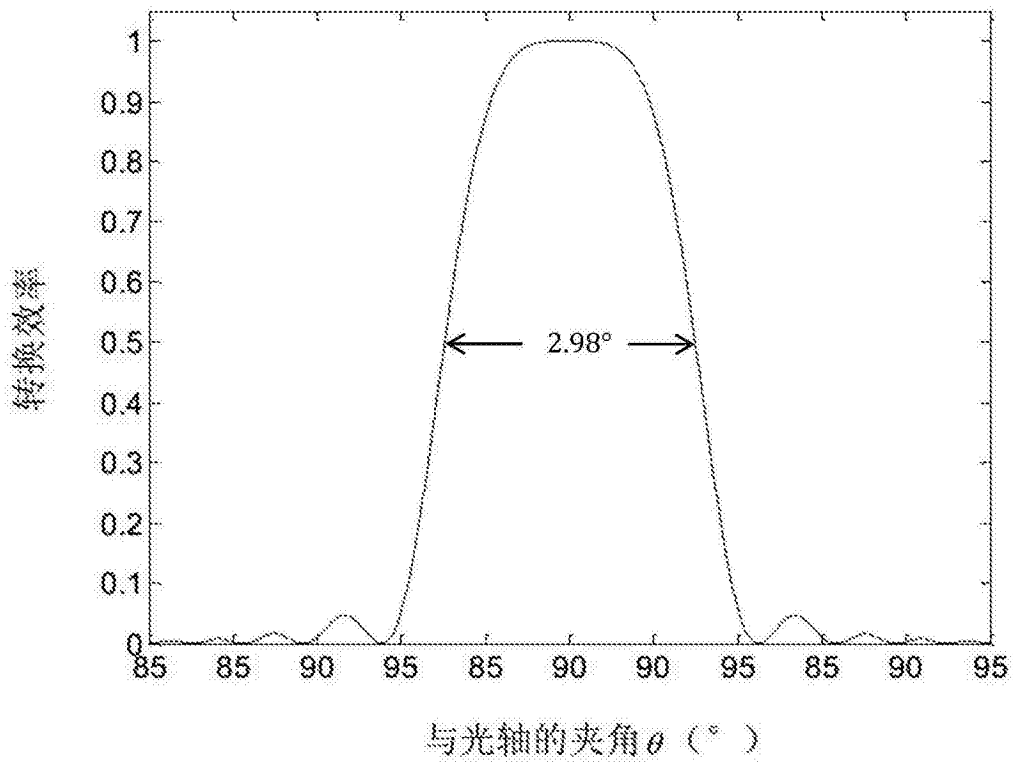


图5

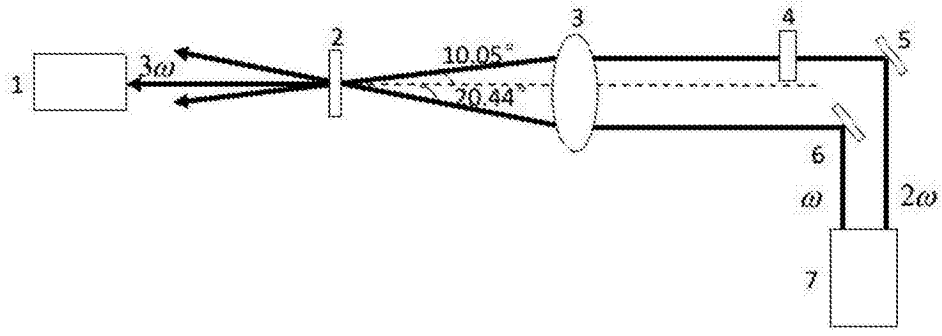


图6