

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
G02B 26/10 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200510019130.0

[45] 授权公告日 2007 年 12 月 5 日

[11] 授权公告号 CN 100353205C

[22] 申请日 2005.7.20

[21] 申请号 200510019130.0

[73] 专利权人 华中科技大学

地址 430074 湖北省武汉市洪山区珞喻路
1037 号

[72] 发明人 曾绍群 骆清铭 占成 吕晓华

[56] 参考文献

US2002/0023903A1 2002.2.28

US3799652A 1974.3.26

JP3-4579A 1991.1.10

US6804000B2 2004.10.12

GB2117529A 1983.10.12

审查员 张玉艳

[74] 专利代理机构 华中科技大学专利中心

代理人 曹葆青

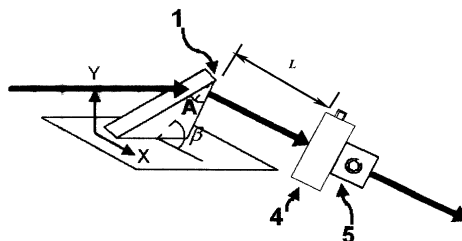
权利要求书 2 页 说明书 11 页 附图 14 页

[54] 发明名称

一种基于二维声光偏转器的激光扫描装置

[57] 摘要

本发明公开了一种基于二维声光偏转器的激光扫描装置。它包括由正交放置的 X 向声光偏转器和 Y 向声光偏转器构成的二维声光偏转器，在二维声光偏转器之前或之后倾斜 β 度设置有顶角为 A 的三角棱镜，三角棱镜与二维声光偏转器之间设置有第一反射镜和第二反射镜，使激光导入二维声光偏转器的第一通光孔。在声光偏转器对激光进行二维扫描时，既补偿了二维声光偏转器对超短脉冲光的空间色散，同时也补偿了二维声光偏转器的时间色散。这一装置结构紧凑、易于调节，适用于多光子激发扫描测量与成像，激光微加工等领域，特别适用于需要光斑在多个感兴趣的区域随机跳跃扫描的情况。



1、一种基于二维声光偏转器的激光扫描装置，包括由正交放置的 X 向声光偏转器和 Y 向声光偏转器构成的二维声光偏转器，其特征在于：在二维声光偏转器之前或之后倾斜 β 度设置有顶角为 A 的三角棱镜(1)，其中：

β 值满足(I)式要求，式中 $\Delta\theta_y$ 和 $\Delta\theta_x$ 分别为二维声光偏转器中第一个声光偏转器和第二个声光偏转器引起的光发散角：

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta\theta_y}{\Delta\theta_x}\right) \quad (\text{I})$$

顶角 A 满足(II)式要求，式中 $\Delta\theta_z$ 为二维声光偏转器引起的光发散角，n 为棱镜对光的折射率， λ_0 为中心波长， $\Delta\lambda$ 为带宽，A 为棱镜顶角， I_1 为光入射棱镜的角度：

$$|\Delta\theta_z| = \left| \frac{\sin^{-1}[(n(\lambda_0 + \Delta\lambda/2))^2 - \sin^2 I_1]^{1/2} \sin A - \cos A \sin I_1}{\sin^{-1}[(n(\lambda_0 - \Delta\lambda/2))^2 - \sin^2 I_1]^{1/2} \sin A - \cos A \sin I_1} \right| \quad (\text{II})。$$

2、根据权利要求 1 所述的激光扫描装置，其特征在于：三角棱镜(1)到二维声光偏转器的第一通光孔表面的光程为 L，光程 L 满足(III)式要求，其中， λ 为光波长，c 为真空中的光速， θ 为声光偏转器对光的偏转角，n

为折射率， $s = \frac{h \sin A}{2 \sin[A + \sin^{-1}(\frac{\sin I_1}{n})] \cos I_1}$ ，A 为棱镜顶角，h 为入射三角棱镜的

光束的直径， I_1 为光入射棱镜的角度：

$$\left| -\frac{\lambda^3}{2\pi c^2} L \left(\frac{d\theta}{dn}\right)^2 \left(\frac{dn}{d\lambda}\right)^2 + \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} (s/2) \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \Big|_{\lambda} + \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} d \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \Big|_{\lambda} \right| = 0 \quad (\text{III})。$$

3、根据权利要求 1 或 2 所述的激光扫描装置，其特征在于：三角棱镜(1)与二维声光偏转器之间设置有第一反射镜(2)和第二反射镜(3)，使激光导入二维声光偏转器的第一通光孔。

4、根据权利要求1或2所述的激光扫描装置，其特征在于： $\beta = 45^\circ$ 。

5、根据权利要求1或2所述的激光扫描装置，其特征在于：二维声光偏转器之间设有透镜，且X向声光偏转器和Y向声光偏转器分别处于透镜的物象共轭位置。

一种基于二维声光偏转器的激光扫描装置

技术领域

本发明属于激光扫描技术，具体为一种具有色散补偿功能的基于二维声光偏转器（acoustic-optical deflector, AOD）的激光扫描装置，它尤其适合于多光子激发扫描测量与成像，激光微加工等领域。

背景技术

利用声光偏转器控制激光光束进行扫描是一种非常有前途的激光扫描技术，尤其在多光子激发扫描测量与成像，激光微加工等领域有着很有前途的应用。国外已经在这方面申请了多项专利，例如美国专利 No. 6, 804, 000 B2，美国专利 No. US 2002/0023903 A1。在美国专利 No. 6, 804, 000 B2 中使用单个声光偏转器进行超短脉冲激光的扫描，并用单个棱镜补偿单个声光偏转器的空间色散，提出采用两个棱镜补偿二维声光偏转器的空间色散，但装置比较复杂，透射率低；在美国专利 No. US 2002/0023903 A1 中使用二维声光偏转器进行超短脉冲激光的二维扫描，并用衍射光栅补偿二维声光偏转器的空间色散，该发明主要应用于激光微加工领域，且没有提到对二维声光偏转器的时间色散进行补偿。

发明内容

本发明的目的在于提供一种基于二维声光偏转器的激光扫描装置，该激光扫描装置解决了二维声光偏转器带来的色散问题。

本发明提供的一种基于二维声光偏转器的激光扫描装置，包括由相互正交放置的 X 向声光偏转器和 Y 向声光偏转器构成的二维声光偏转器，其特征在于：在二维声光偏转器之前或之后倾斜 β 度放置顶角为 A 的三角棱镜，使激光导入二维声光偏转器的第一通光孔。

其中, β 值满足(I)式要求, 式中 $\Delta\theta_y$ 和 $\Delta\theta_x$ 分别为二维声光偏转器中第一个声光偏转器和第二个声光偏转器引起的光发散角:

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta\theta_y}{\Delta\theta_x}\right) \quad (\text{I})$$

顶角 A 满足(II)式要求, 式中 $\Delta\theta_z$ 为二维声光偏转器引起的光发散角, n 为棱镜对光的折射率, λ_0 为中心波长, $\Delta\lambda$ 为带宽, A 为棱镜顶角, I_1 为光入射棱镜的角度:

$$\Delta\theta_z = \sin^{-1}[(n(\lambda_0 + \Delta\lambda/2)^2 - \sin^2 I_1)^{1/2} \sin A - \cos A \sin I_1] - \sin^{-1}[(n(\lambda_0 - \Delta\lambda/2)^2 - \sin^2 I_1)^{1/2} \sin A - \cos A \sin I_1] \quad (\text{II})。$$

作为本发明的进一步特征, 三角棱镜到二维声光偏转器的第一通光孔表面的光程为 L , 光程 L 满足(III)式要求, 其中, λ 为光波长, c 为真空中的光速, θ 为声光偏转器对光的偏转角, n 为折射率, $s = \frac{h \sin A}{2 \sin I_1 + \sin^{-1}(\frac{\sin I_1}{n}) \cos I_1}$, A 为棱镜顶角, h 为入射三角棱镜的光束的直径, I_1 为光入射棱镜的角度:

$$\left| -\frac{\lambda^3}{2\pi c^2} L \left(\frac{d\theta}{dn}\right)^2 \left(\frac{dn}{d\lambda}\right)^2 + \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} (s/2) \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \Big|_{\lambda} + \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} d \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \Big|_{\lambda} \right| = 0 \quad (\text{III})。$$

三角棱镜与二维声光偏转器之间可设置第一反射镜和第二反射镜。

本发明提出了一种新的补偿二维声光偏转器色散的装置——用单个棱镜补偿二维声光偏转器色散, 从而实现了一种新的基于二维声光偏转器的激光扫描方法和装置。由于本发明既能实现二维声光偏转器的空间色散补偿, 同时也补偿了时间色散, 因此适用于多光子激发扫描测量与成像。多光子激发要求激发脉冲光有较高的峰值能量密度和平均光强, 而声光偏转器一般是用大色散材料做成的, 比如 TeO_2 , 因此会引起脉冲激光产生较大的色散, 引起脉冲展宽和光斑变形, 降低了多光子激发效率, 激发出的荧光强度减小, 信噪比降低, 还会造成图像模糊, 降低空间分辨率, 使得图像质量变差。单个棱镜倾斜放置的装置, 能同时补偿二维声光偏转器的空

间色散，而不需要用两个棱镜分别补偿二维声光偏转器的色散。棱镜补偿声光偏转器空间色散的同时，对时间色散也有一定的补偿作用，减小了激光脉冲宽度的展宽，能提高多光子激发获取的荧光图像的成像质量。类似的，本发明如果应用于多次谐波激光扫描成像显微镜中，也可以提高成像质量。本发明的优点在于：在声光偏转器对激光进行二维扫描时，既补偿了二维声光偏转器对超短脉冲光的空间色散，同时也补偿了二维声光偏转器的时间色散。这一装置结构紧凑、易于调节，适用于多光子激发扫描测量与成像，激光微加工等领域，特别适用于需要光斑在多个感兴趣的区域随机跳跃扫描的情况。

附图说明

图 1 是本发明装置原理示意图。

图 2 为本发明装置的一种具体实施方式的结构示意图；

图 3 是声光偏转器对超短脉冲光的偏转以及空间色散示意图。

图 4a 是二维声光偏转器引起的空间色散示意图；图 4b 是二维声光偏转器空间色散导致光斑畸变情况示意图。

图 5 是二维声光偏转器空间色散与声波频率的关系示意图。

图 6a 是棱镜对超短脉冲光的偏转以及空间色散示意图；图 6b 是棱镜补偿单个声光偏转器空间色散原理图示意图。

图 7a 是当超短脉冲光以布儒斯特角入射，棱镜顶角与其产生的空间色散量的关系图；图 7b 是等边三角棱镜的空间色散量与光入射角度的关系图。

图 8 是发明装置的应用实例示意图。

图 9a 和图 9b 是单个棱镜补偿二维声光偏转器空间色散的原理图，其中，图 9a 为棱镜放置在二维声光偏转器之前，图 9b 为棱镜放置在二维声光偏转器之后。

图 10 是表示棱镜相对于二维声光偏转器倾斜角度的示意图。

图 11 是棱镜补偿二维声光偏转器空间色散补偿前后的光斑变化测试系统原理图。

图 12 是将本发明应用于多光子激发扫描显微镜而建立的新系统的组成

图。

图 13 是单个棱镜补偿二维声光偏转器空间色散后观测光斑形状变化的实验结果。

图 14 是图 12 所示系统中加入棱镜补偿色散前后获得的荧光小球图像比较。

图 15 是表示单个棱镜对二维声光偏转器时间色散补偿的实验结果。

具体实施方式

如图 1 所示，本发明包括二维声光偏转器和三角棱镜。二维声光偏转器由正交放置的 Y 向声光偏转器 4 和 X 向声光偏转器 5 构成，二维声光偏转器实现对超短脉冲激光的二维扫描，并引起色散，为此，在二维声光偏转器之前或之后倾斜 β 度放置顶角为 A 的三角棱镜 1 来实现对声光偏转器的色散补偿。 β 和 A 的值的计算方法如下：

倾斜度 β 采用下式计算，其中 $\Delta\theta_y$ 和 $\Delta\theta_x$ 分别为二维声光偏转器中第一个声光偏转器和第二个声光偏转器引起的光发散角：

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta\theta_y}{\Delta\theta_x}\right) \quad ;$$

顶角 A 采用下式计算，其中 $\Delta\theta_z$ 为二维声光偏转器引起的光发散角，n 为棱镜对光的折射率， λ_0 为中心波长， $\Delta\lambda$ 为带宽，A 为棱镜顶角， I_1 为光入射棱镜的角度：

$$|\Delta\theta_z| = \left| \frac{\sin^{-1}[(n(\lambda_0 + \Delta\lambda/2))^2 - \sin^2 I_1]^{1/2} \sin A - \cos A \sin I_1}{\sin^{-1}[(n(\lambda_0 - \Delta\lambda/2))^2 - \sin^2 I_1]^{1/2} \sin A - \cos A \sin I_1} \right| \quad .$$

当满足下述条件时，本发明可以达到更好的补偿效果：即三角棱镜 1 到二维声光偏转器的第一通光孔表面的光程为 L，光程 L 采用下式计算：

$$\left| -\frac{\lambda^3}{2\pi c^2} L \left(\frac{d\theta}{dn}\right)^2 \left(\frac{dn}{d\lambda}\right)^2 + \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} (s/2) \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \Big|_{\lambda} + \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} d \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \Big|_{\lambda} \right| = 0$$

其中， λ 为光波长， c 为真空中的光速， θ 为声光偏转器对光的偏转角，

n 为折射率, $s = \frac{h \sin A}{2 \sin[A + \sin^{-1}(\frac{\sin I_1}{n})] \cos I_1}$, A 为棱镜顶角, h 为入射三角棱镜

的光束的直径, I_1 为光入射棱镜的角度。

为了使得操作更方便、简单, 在三角棱镜 1 与二维声光偏转器之间可设置第一反射镜 2 和第二反射镜 3, 将激光导入二维声光偏转器的第一通光孔(即与三角棱镜较近的声光偏转器的通光孔)。

本发明的巧妙之处在于将棱镜相对于二维声光偏转器倾斜了一个特定的角度, 使得用单个棱镜能够同时补偿二维声光偏转器的色散。本发明也可以通过改变光入射棱镜的角度来进一步调整空间色散补偿量, 还可以通过改变棱镜相对于声光偏转器的距离调整时间色散补偿量。

下面对此作进一步详细地说明:

如图 3 所示, 声光偏转器对入射光束的偏转角为:

$$\theta = \frac{\lambda}{\Lambda} = \frac{\lambda f}{v} \quad (1)$$

其中 λ 为晶体中的光波长, Λ 为声波波长, f 为声波 41 的频率, v 为声波在声光晶体中传播速度。对于超短脉冲光入射, 声光偏转器对不同波长的光偏转角度不同, 因此偏转光存在一定的发散角, 根据式 1) 得到带宽为 $\Delta\lambda$ 的入射光通过声光偏转器后的发散角为:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta\lambda}{\Lambda} = \frac{\Delta\lambda f}{v}, \quad (2)$$

即声光偏转器的空间色散量可表示为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = \frac{f}{v} \quad (3)$$

由于空间色散的存在, 超短脉冲光通过声光偏转器后光斑形状会发生改变, 图 3 所示, 假设入射为圆形光斑 101, 出射偏转光的光斑 108 变为椭圆, 图中用 $\lambda_n > \dots > \lambda_2 > \lambda_1$ 表示光谱分布。

如果让超短脉冲光入射两个在垂直和水平方向正交放置的声光偏转器, 则二维声光偏转器的空间色散将共同作用于出射偏转光上, 引起偏转光发散。假设水平放置的 X 向声光偏转器 5 引起的发散角为 $\Delta\theta_x$, 垂直放置

的 Y 向声光偏转器 4 引起的发散角为 $\Delta\theta_y$ ，如图 4a 所示，则二维声光偏转器共同作用时的光发散角 $\Delta\theta_z$ 可以表示为：

$$\Delta\theta_z = \sqrt{(\Delta\theta_x)^2 + (\Delta\theta_y)^2} \quad (4)$$

即二维声光偏转器空间色散量 ε_z 表示为：

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta\theta_z}{\Delta\lambda} \quad (5)$$

由于二维声光偏转器空间色散的影响，会引起出射光发散，进而导致光斑变形。假设入射光的光斑为圆形，则出射光斑会变为椭圆，如果二维声光偏转器同时作用，则不但会变为椭圆，而且光斑相对于 X 轴有一定的倾斜角，如图 4b 所示，其中 $\lambda_n > \dots > \lambda_2 > \lambda_1$ 。倾斜角 α 为：

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta\theta_y}{\Delta\theta_x}\right) \quad (6)$$

例如，飞秒激光器 (Ti: s, Spectra-Physics) 输出的脉冲激光 (中心波长为 800nm，带宽 10nm) 通过正交放置的两维声光偏转器 (晶体材料为 TeO_2 ，声波频率范围 78 MHz~114 MHz，声波在晶体中的传播速度 650m/s) 后，根据式 2)、3)、4)、5) 可以得到产生的空间色散量随着声波频率的改变在 0.009722"/nm~0.01421"/nm 之间变化，当两维声光偏转器都工作在声波中心频率 96 MHz 时，空间色散量为 0.01196"/nm，如图 5 所示。而由式 6) 可以得到光斑相对于 X 轴的倾斜角在 34.37°~56.08° 之间变化，当两维声光偏转器工作的声波频率相等时，倾斜角为 45°。

为了解决两维声光偏转器色散的问题，本发明采用了一种色散元件——棱镜对色散进行补偿。棱镜对入射光有偏折的作用，如图 6a 所示，光以入射角 I_1 进入棱镜 1，出射光相对于入射光有一定的偏转角 D，则棱镜 1 对超短脉冲光的发散角可以表示为：

$$\Delta D = \sin^{-1}[(n(\lambda_0 + \Delta\lambda/2)^2 - \sin^2 I_1)^{1/2} \sin A - \cos A \sin I_1] - \sin^{-1}[(n(\lambda_0 - \Delta\lambda/2)^2 - \sin^2 I_1)^{1/2} \sin A - \cos A \sin I_1] \quad (6)$$

即棱镜的空间色散量 σ 可表示为：

$$\sigma = \frac{\Delta D}{\Delta\lambda} \quad (7)$$

其中 A 为棱镜的顶角, $n(\lambda)$ 为棱镜对波长为 λ 的光波的折射率, λ_0 为脉冲激光的中心波长, $\Delta\lambda$ 为带宽。图 6a 所示, 假设入射光斑 101 为圆形, 经过棱镜后光斑 102 变为椭圆, 且光谱分布情况为 $\lambda_n < \dots < \lambda_2 < \lambda_1$ 。

用单个棱镜补偿二维二维声光偏转器空间色散时, 就是要使得棱镜产生的空间色散量与二维二维声光偏转器产生的空间色散量符号相反、数值相等。因此只需要令 ε_z 与 σ 的绝对值相等, 即:

$$|\varepsilon_z| = |\sigma| \quad (8)$$

将式 5)、7) 代入式 8), 且令光入射棱镜的角 I_1 为布儒斯特角, 可求出所需三棱镜的顶角 A 。

例如, 为了解决前面例子中二维声光偏转器的空间色散, 过程如下: 因为前面计算得到的二维声光偏转器的空间色散量随着声波频率的改变在 $0.009722''/\text{nm} \sim 0.01421''/\text{nm}$ 之间变化, 而棱镜只能补偿某个频率点的空间色散量。为了在二维声光偏转器的整个声波频率范围内都较好的补偿其空间色散, 应该以中心声波频率处的色散量 $0.01196''/\text{nm}$ 为准进行补偿, 且棱镜相对于 X 轴倾斜角 $\beta = 45^\circ$ 。虽然这样做会使得高于声波中心频率时, 色散欠补偿; 而低于中心频率时, 色散过补偿, 但这是能做到的最好结果。

选定色散值较大的 ZF_4 玻璃作为棱镜材料, 其折射率与入射光波长关系可用如下关系式表示:

$$n^2(\lambda) = a_0 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda^{-2} + a_3\lambda^{-4} + a_4\lambda^{-6} + a_5\lambda^{-8} \quad (9)$$

其中 n 为折射率, λ 为入射光波长, $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ 为折射率常数。中心波长 800nm , 带宽 10nm 的飞秒脉冲激光以布儒斯特角入射时, 棱镜顶角和空间色散补偿量的关系可以由式 6)、9) 计算得到, 如图 7a 所示。而当棱镜顶角 $A = 64.74^\circ$ 时, 能产生的空间色散补偿量为 $0.01104''/\text{nm}$, 和需要的补偿量 ($0.01196''/\text{nm}$) 基本相当。

如果没有顶角正好是 64.74° 的棱镜, 还可以调节光入射棱镜的角度来调整空间色散补偿量。以顶角为 60° 的等边棱镜为例, 如果光以布儒斯特角入射, 空间色散补偿量仅有 $0.005809''/\text{nm}$, 大约只有所需补偿量的一半。但是如果改变光入射棱镜的角度, 则能调节色散补偿量的大小, 如图 7b 所

示。当光入射角为 47.5° 时，空间色散量为 $0.01213^\circ/\text{nm}$ ，与所需的补偿量相近，因此可以根据补偿量的需要，来调节光入射棱镜的角度。

图 9 是棱镜补偿二维声光偏转器空间色散时，放置在二维声光偏转器之前或者之后的原理图。图中光斑 101, 103, 104, 105, 106, 107 表示光路中各个位置处光斑的形状。

对于时间色散补偿，可以通过改变棱镜到二维声光偏转器中的第一个 Y 向声光偏转器 4 之间的光程长 L 来调节色散补偿量。

二维声光偏转器引入的材料色散 GDD_A 为：

$$GDD_A = \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} d \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \Big|_\lambda, \quad (10)$$

其中 c 为真空中的光速度， d 为二维声光偏转器晶体的厚度， $\frac{d^2 n}{d\lambda^2}$ 为二维声光偏转器材料的二阶色散率。

而光进入棱镜时，引入的角色散 GDD_u 为：

$$GDD_u = -\frac{\lambda^3}{2\pi c^2} L \left(\frac{d\theta}{dn} \right)^2 \left(\frac{dn}{d\lambda} \right)^2 \quad (11)$$

其中 L 为棱镜到二维声光偏转器中第一个二维声光偏转器通光孔表面的光程。棱镜引起的材料色散 GDD_M 为：

$$GDD_M = \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} (s/2) \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \Big|_\lambda \quad (12)$$

其中， $s = \frac{h \sin A}{2 \sin[A + \sin^{-1}(\frac{\sin I_1}{n})] \cos I_1}$ ， h 为入射三角棱镜的光束的直径， I_1 为光

入射棱镜的角度。由式 11)、12) 求得棱镜引起的总色散 GDD_p 为：

$$GDD_p = GDD_u + GDD_M \quad (13)$$

而为了使棱镜尽可能补偿二维声光偏转器的时间色散，应使得 $|GDD_A + GDD_p|$ 最小，最好为 0。因此我们可以根据这个来调节棱镜到第一个声光偏转器通

光孔表面光程 L 来实现对时间色散补偿量的调节。

综上所述，在确定好棱镜的顶角 A ，棱镜放置的倾斜角度 β 后，可以调节光入射棱镜的角度 I_1 来调节空间色散补偿量，同时还可以调节棱镜到二维声光偏转器的第一个声光偏转器的通光孔表面的光程长 L 来调节时间色散补偿量。

在二维声光偏转器之间可加入中继光路系统(如透镜)，且 X 向声光偏转器和 Y 向声光偏转器分别处于中继光路的物象共轭位置。

实例一：

根据图 11 所示实验系统，用等边三棱镜（顶角 60° ）进行了棱镜补偿二维声光偏转器空间色散实验。图 8 所示，棱镜倾斜 45° 放置，光入射棱镜的角度为 47.5° ，且棱镜到第一个声光偏转器 4 的通光孔表面的光程为 20cm（以下实验中均是如此）。图 11a 所示，先让飞秒激光器 6 发出的单色光（800nm）通过二维声光偏转器后打到白屏 8 上，用 CCD 7 拍摄光斑形状。使得二维声光偏转器的声波频率在 78 MHz~114 MHz 之间快速等间隔变化，从而得到图 13a 所示光斑阵列图。此时因为是单色光入射，所以没有空间色散，不会导致光斑变形，因此图 13a 相当于原始光斑形状；如果飞秒激光器发出的是带宽为 10nm 的脉冲光，则得到的光斑阵列见图 13b 所示，光斑为倾斜椭圆，相比于 13a 图，空间色散的影响明显。当飞秒脉冲光通过图 11b 所示系统后，因为棱镜 1 对二维声光偏转器的空间色散起到了补偿作用，因此得到的光斑阵列如图 13c 所示，光斑又重新变为圆形，接近图 13a 所示没有空间色散的情形。

实施二：

将补偿系统应用于基于二维声光偏转器的多光子激发随机扫描显微镜中，如图 12 所示实验系统，飞秒激光器 6 发出的激光通过本发明装置进行二维扫描后，经过扫描透镜 9、狭缝 10、显微镜中的筒镜 11、二色镜 12、

物镜 13、到达样品 14（若丹明 6G 标记的聚苯乙烯荧光小球），多光子激发出的荧光用光电倍增管 15 探测，从而获取样品的多光子激发的荧光图像。

实验中，系统中先不加入补偿棱镜 1，获取的荧光小球图像如图 14a 所示，由于二维声光偏转器的色散影响，小球荧光图像上有斜条纹，且比较模糊；然后在系统中加入棱镜以补偿二维声光偏转器的空间色散，获取的小球图像如图 14b 所示，由于二维声光偏转器的空间色散得到补偿，小球图像上的斜条纹变得不明显（或者说消失了），且图像比较清晰；图 14c 是用奥林巴斯 FV300 共聚焦扫描显微镜获取的该样品的多光子激发荧光图像，由于该扫描显微镜中用的是振镜扫描，不存在空间色散，用该系统获取的图像可以作为一个参考，以比较基于二维声光偏转器的多光子激发扫描显微成像系统用棱镜补偿空间色散前后，图像质量的改善情况。

棱镜在补偿二维声光偏转器空间色散的同时，也能补偿时间色散。图 15 很好的说明了本发明也能有效补偿时间色散的这一特点，实验过程中棱镜到第一个声光偏转器通光孔表面的光程为 20cm。图 15a 为飞秒激光器输出脉冲激光的原始脉宽，为 84fs（标准偏差 2fs），图 15b 为二维声光偏转器（此时声波在中心频率处）引起超短脉冲光时间色散后，激光脉宽变为 404fs（标准偏差 5fs），图 15c 为棱镜补偿二维声光偏转器（此时声波在中心频率处）时间色散后，激光脉宽减小为 226fs（标准偏差 5fs）。改变二维声光偏转器的工作频率（78 MHz~114 MHz），不加补偿棱镜，输出脉宽在 355fs~520fs 之间变化；加上补偿棱镜后，输出光脉宽在 207fs~267fs 之间变化，时间色散平均减小了约 200fs。

本发明可以直接应用于激光微加工领域。基于二维声光偏转器的激光扫描装置结合超短脉冲激光后用来进行微加工有很多优点，例如定位精确、可重复性高、速度快，但是声光偏转器对超短脉冲激光的空间色散会导致光斑变形，且降低扫描装置可分辨的光点数，使得微加工精度降低。而棱镜补偿二维声光偏转器空间色散后，能很好的校正光斑变形，提高空间分辨率，从而提高激光微加工的精度。

除了应用在多光子激发扫描显微镜中，本发明还可以应用于多次谐波激光扫描成像显微镜中。多次谐波成像也是一种非线性成像，需要用到超

短脉冲激光，也可以利用二维声光偏转器控制激光束达到扫描样品的目的，因此也面临二维声光偏转器带来的色散问题，和多光子激发荧光成像类似。同样可以通过单个棱镜来补偿二维声光偏转器的色散。

总之，单个棱镜补偿二维声光偏转器色散的方法简单实用、效果明显，对于多光子激发扫描测量和成像、激光微加工等领域有重要的意义，特别适用于需要光斑在多个感兴趣的区域随机跳跃扫描的情况。

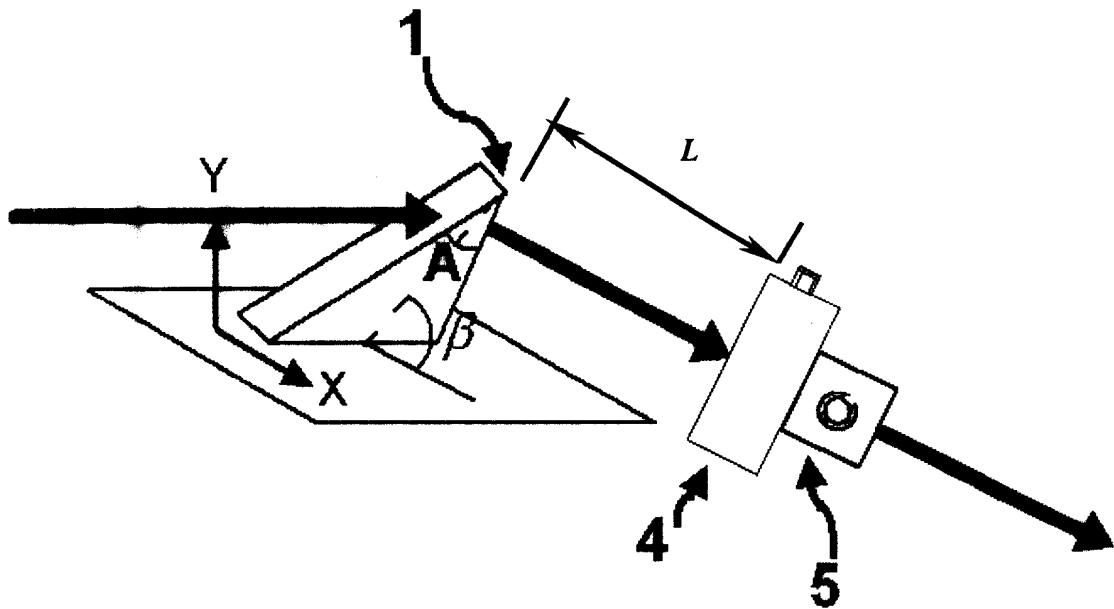


图 1

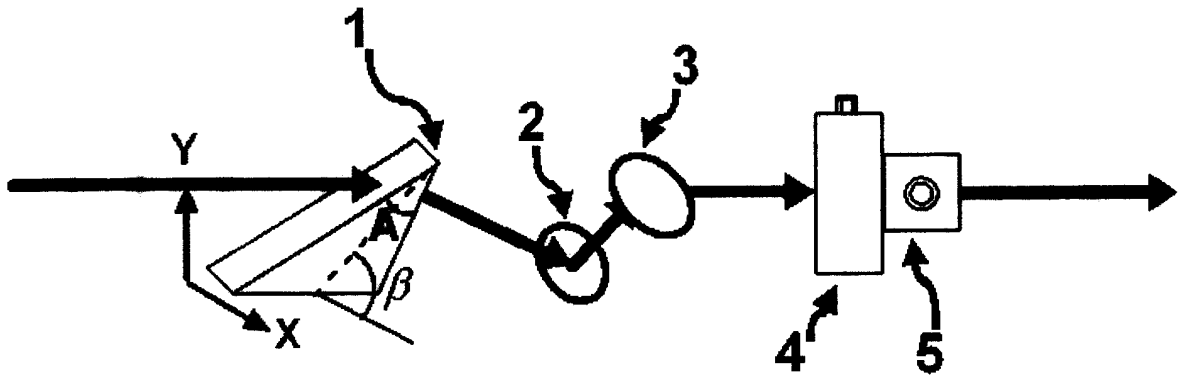


图 2

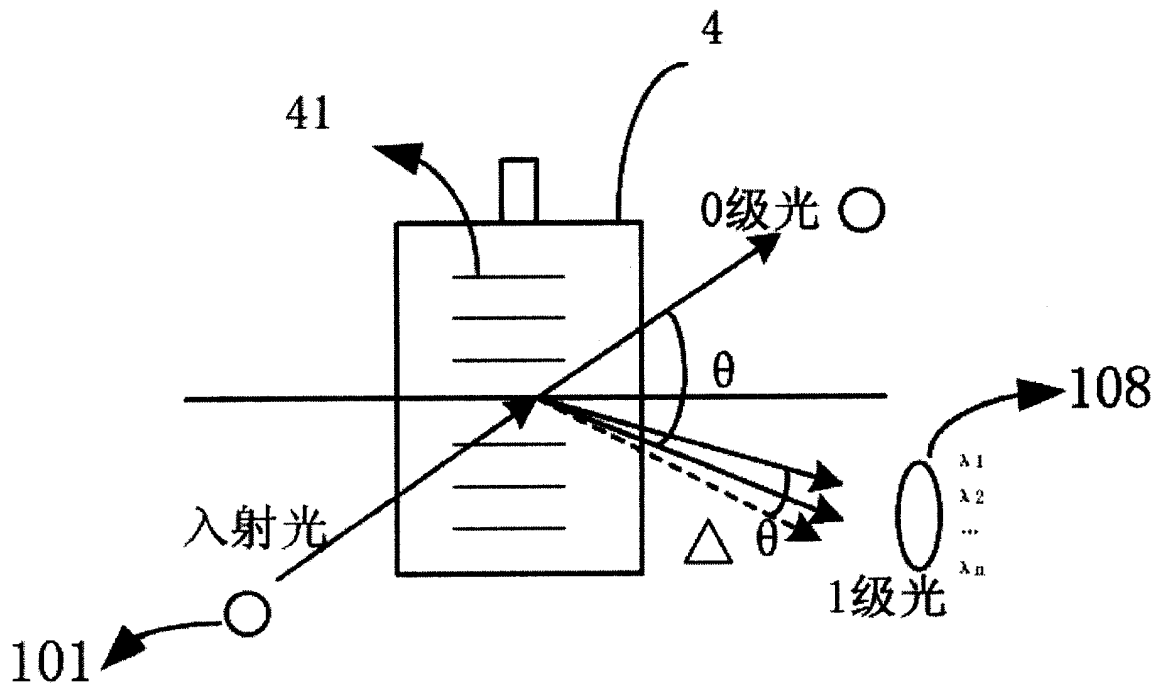


图 3

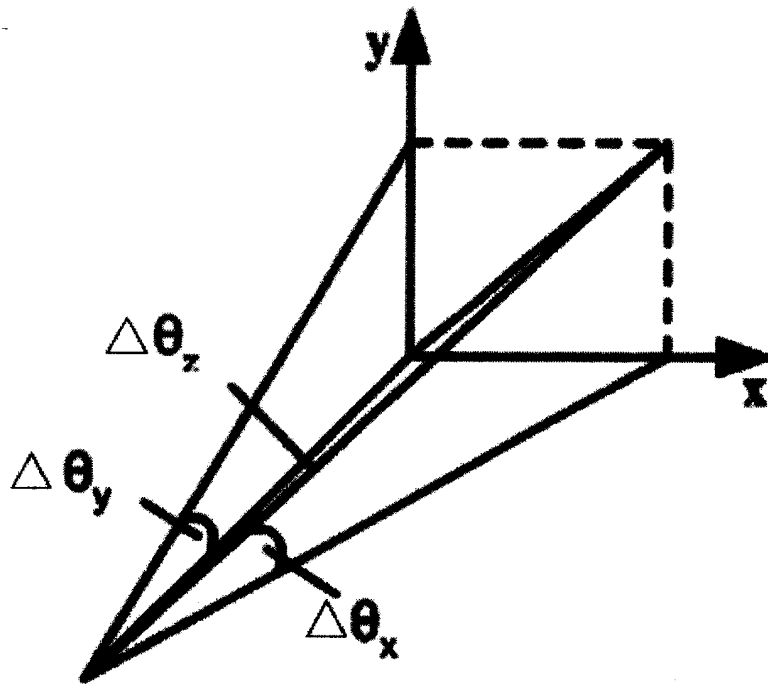


图 4a

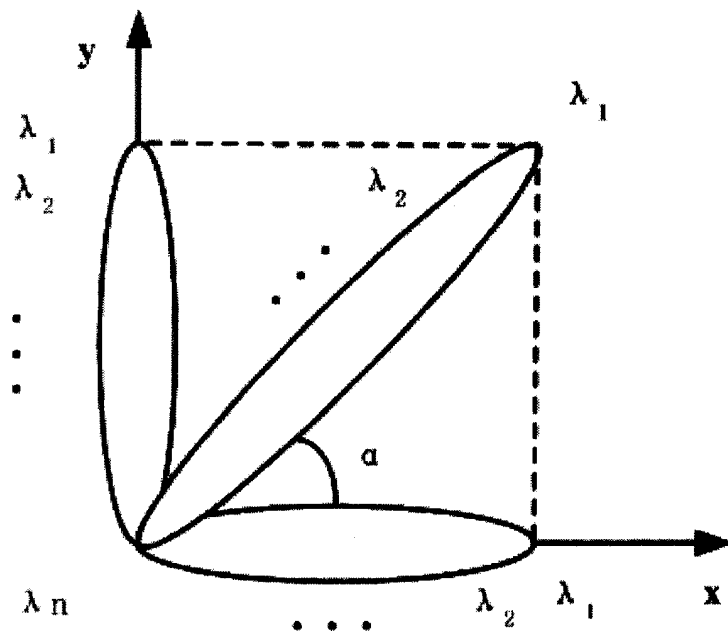


图 4b

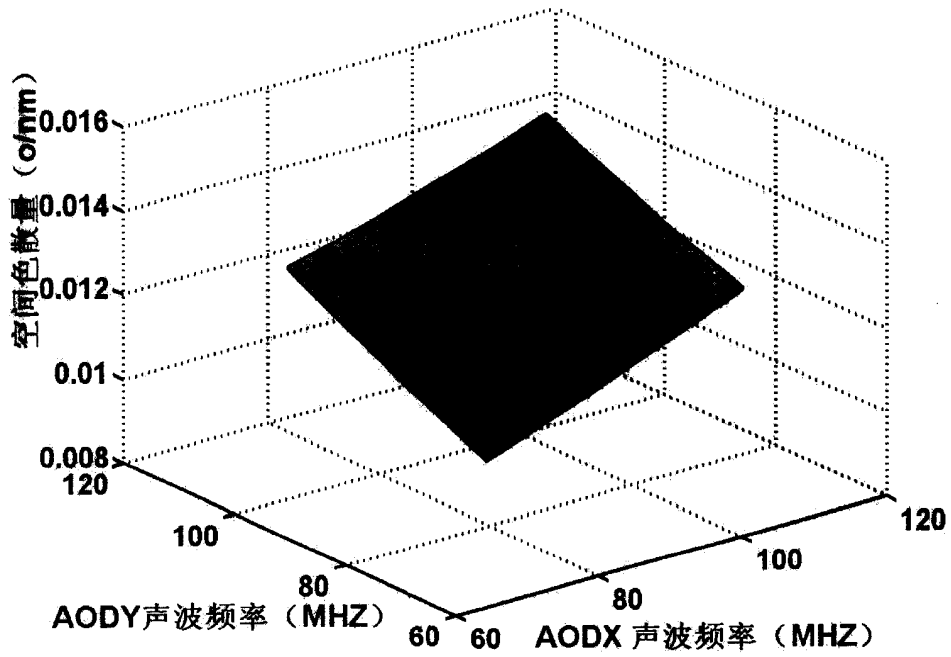


图 5

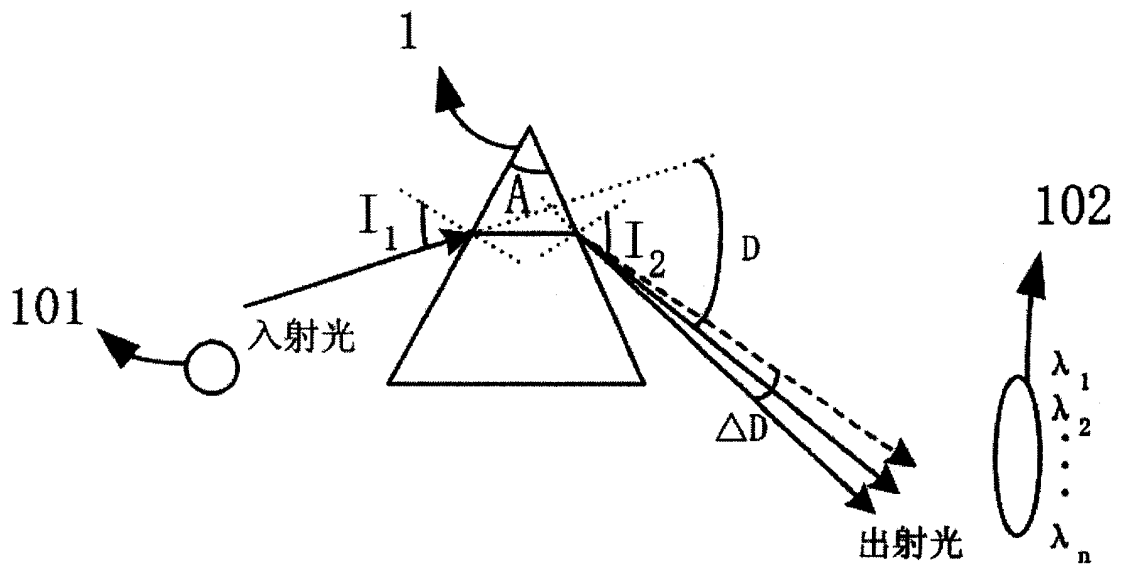


图 6a

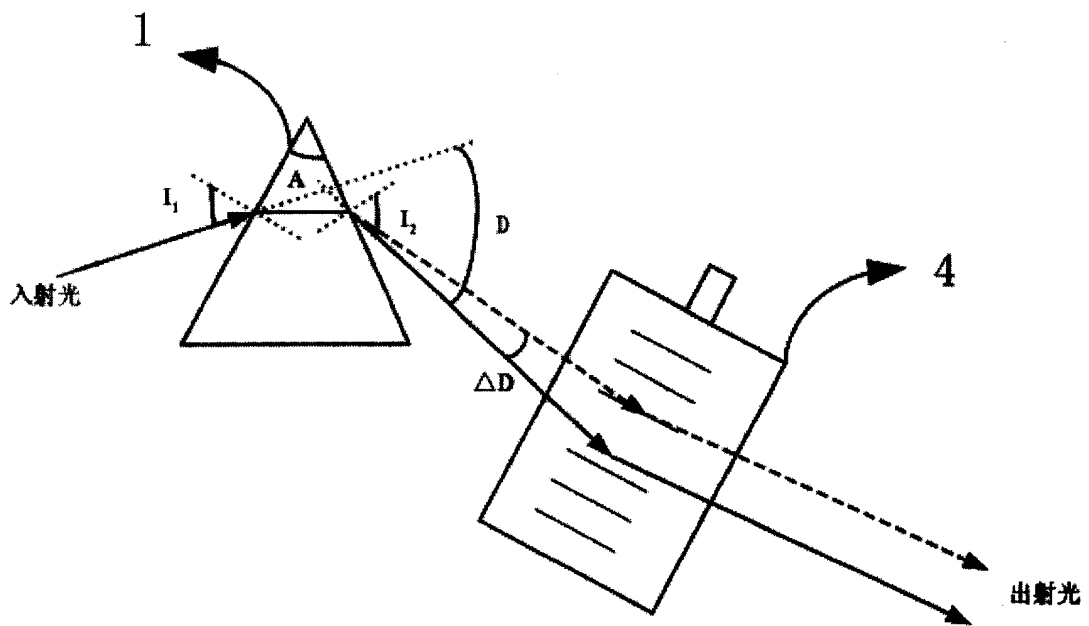


图 6b

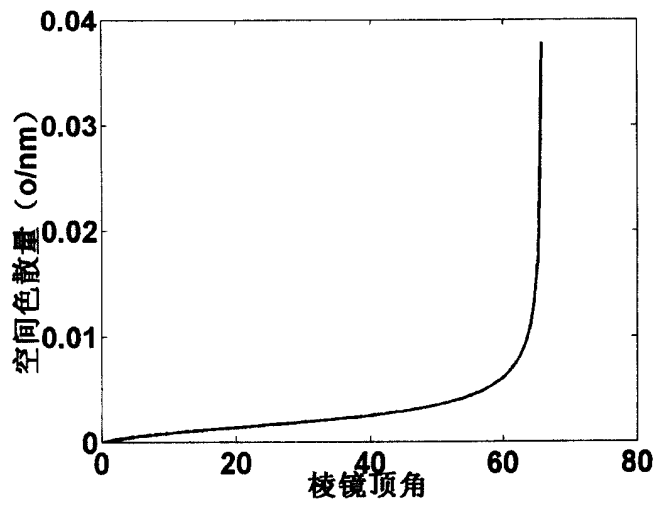


图 7a

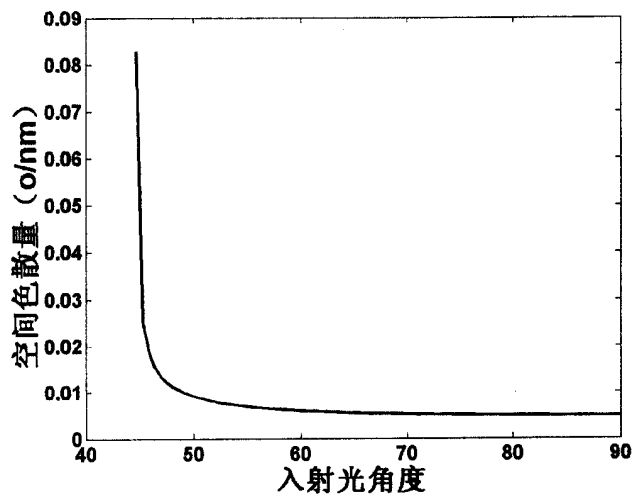


图 7b

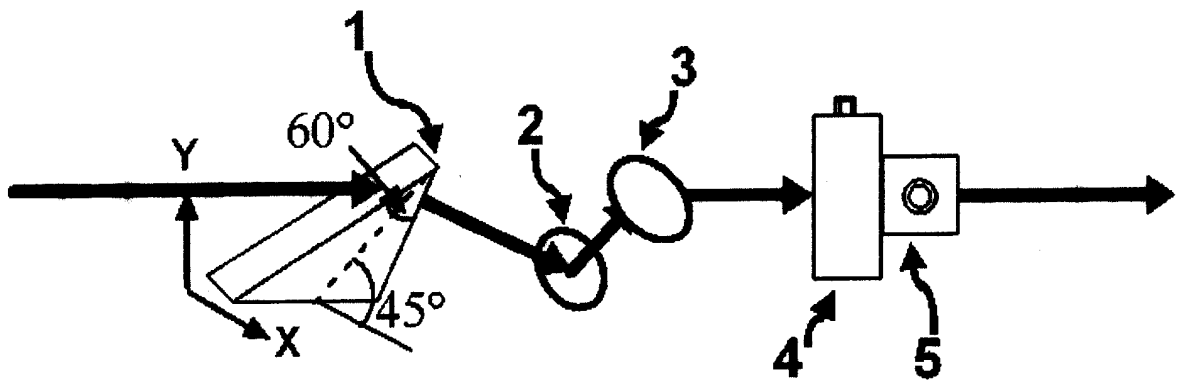


图 8

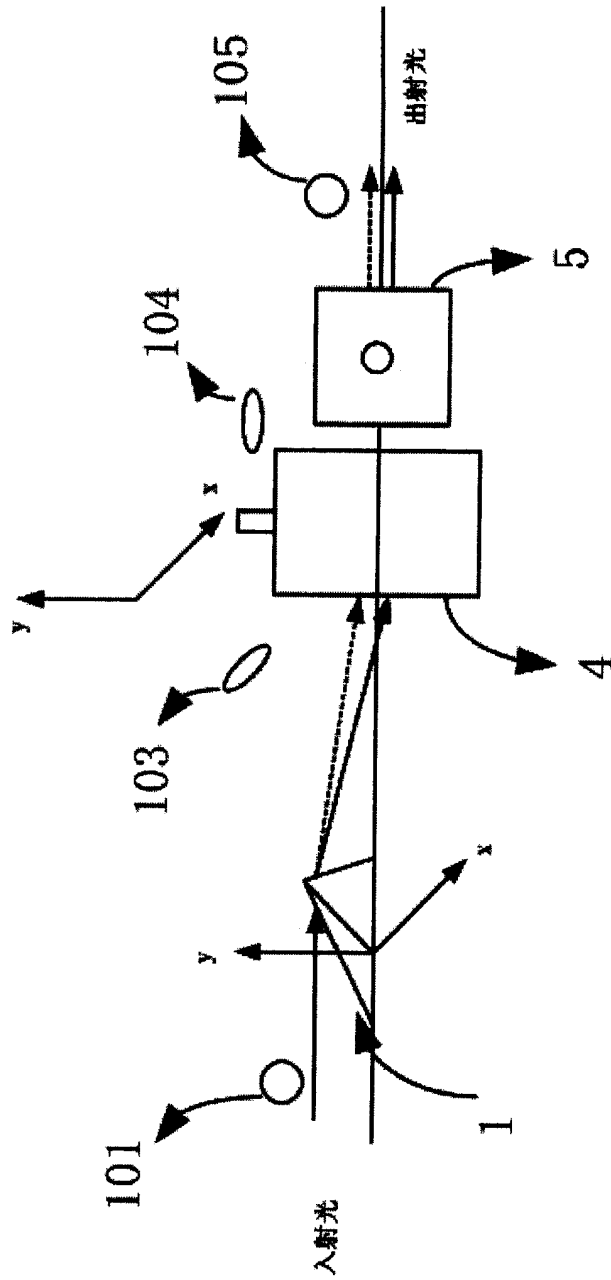


图 9a

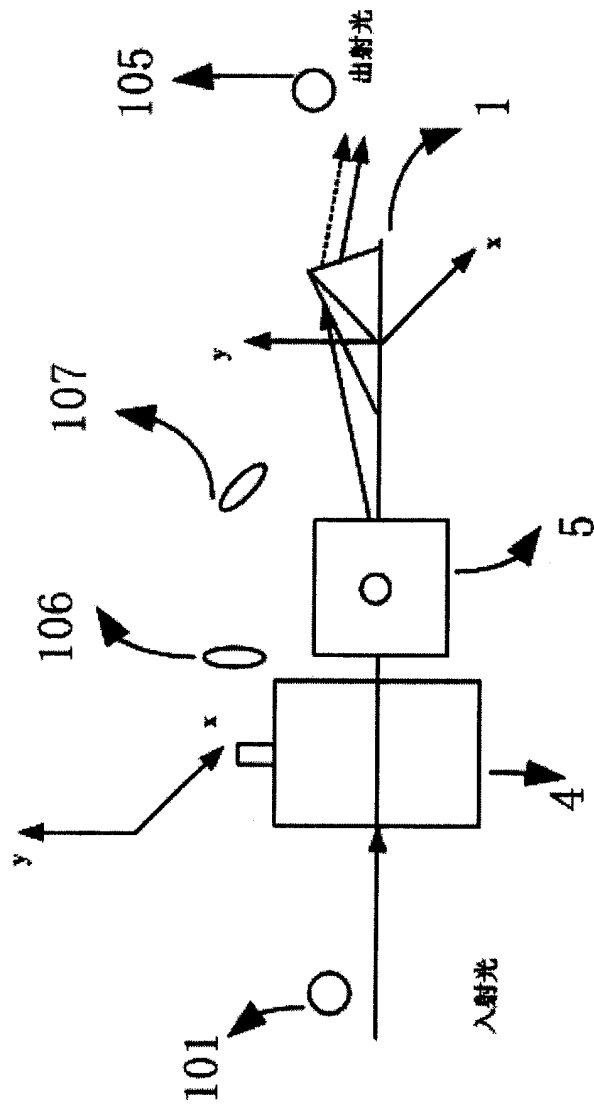


图 9b

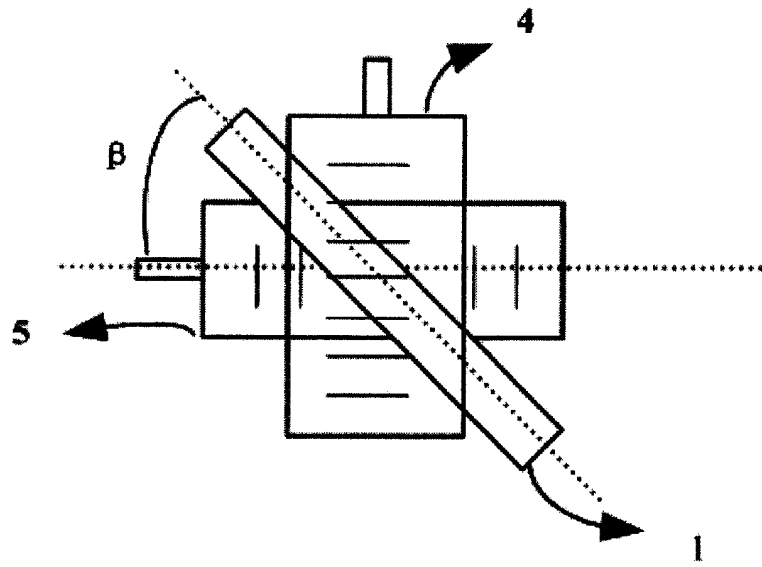


图 10

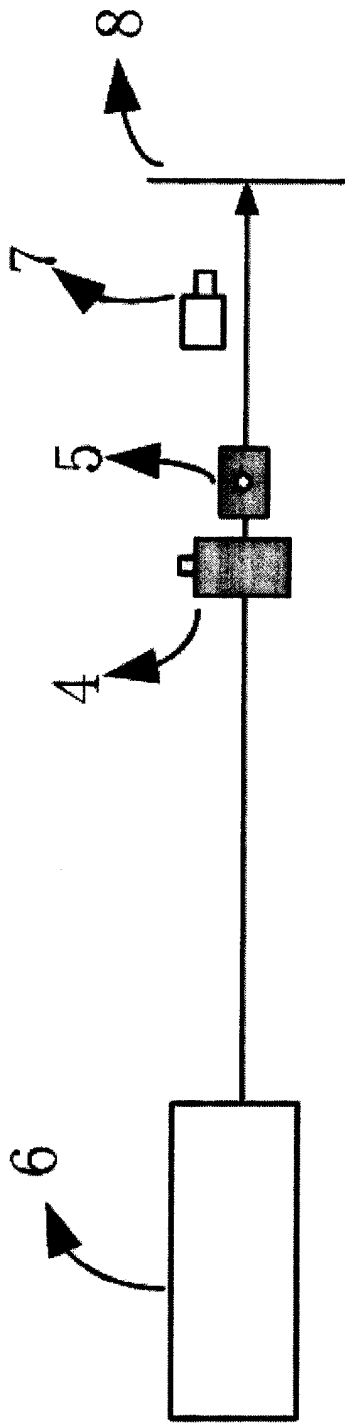


图 11a

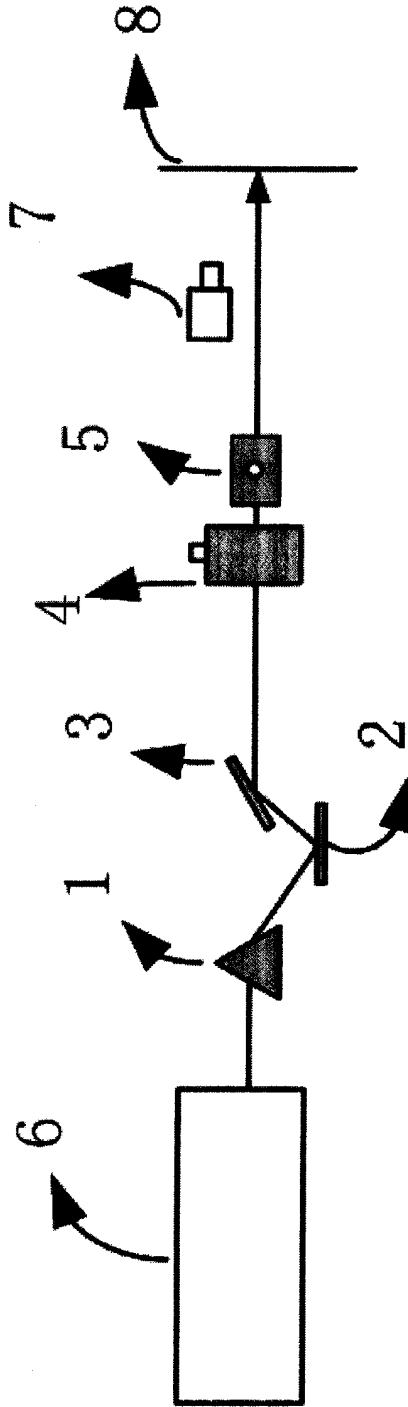


图 11b

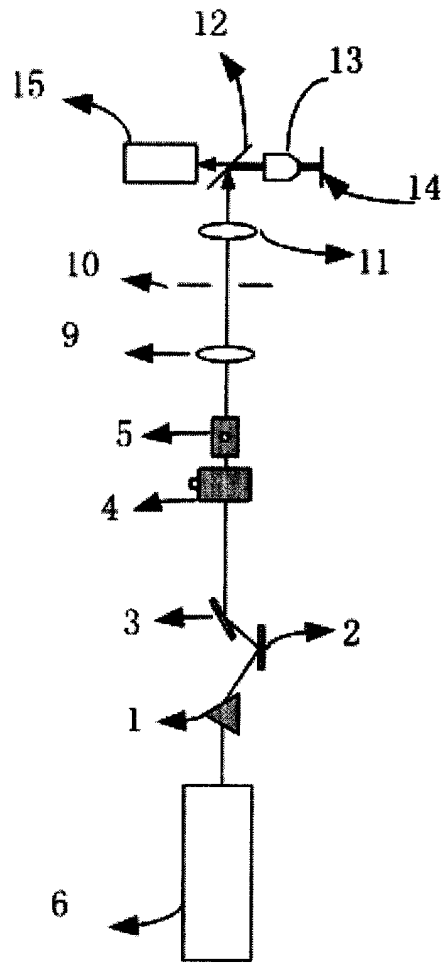


图 12

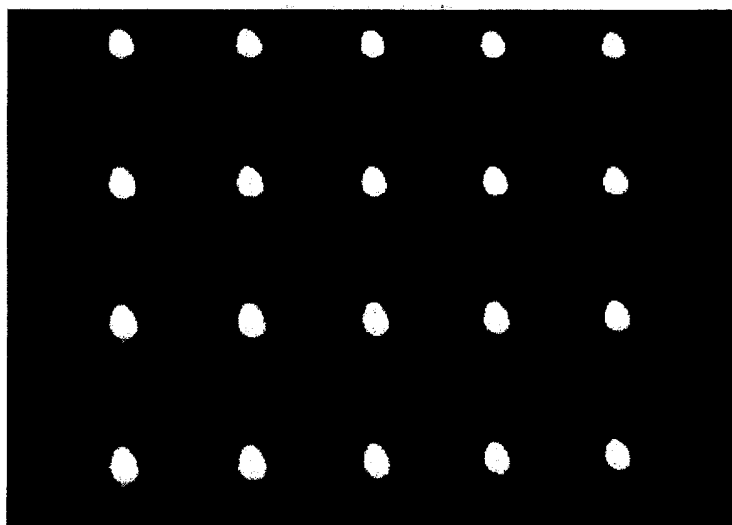


图 13a

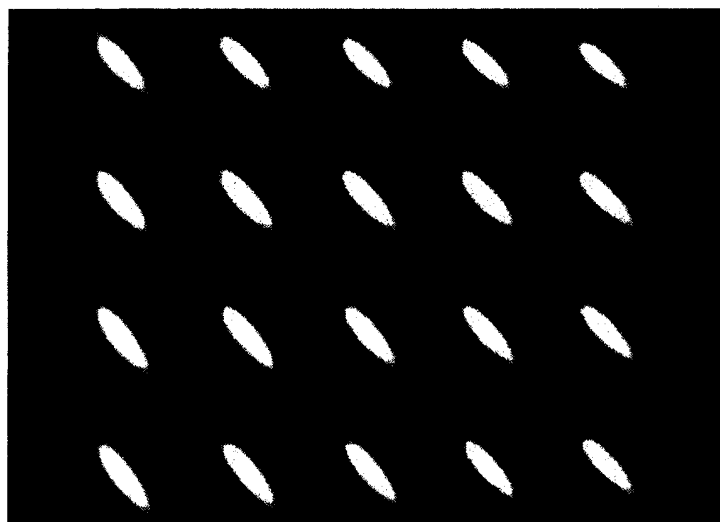


图 13b

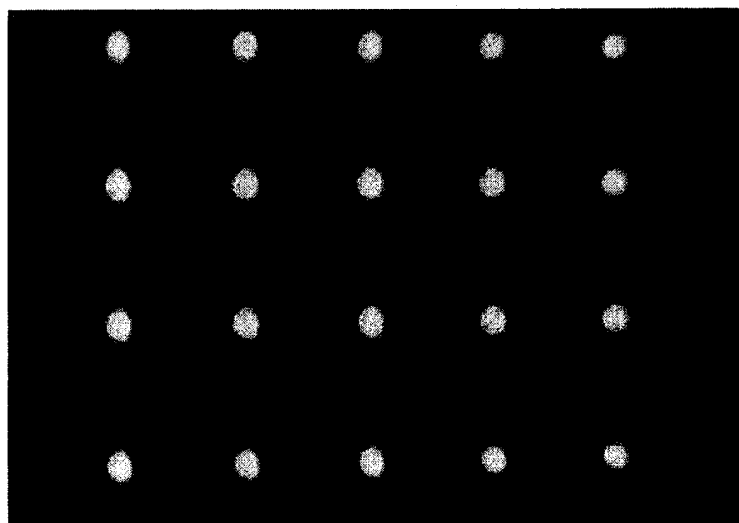


图 13c

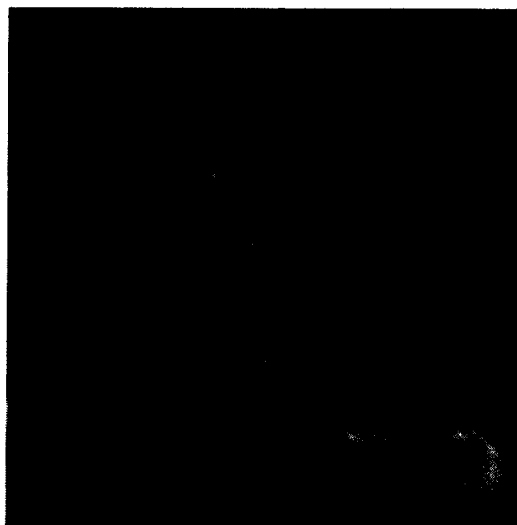


图 14a

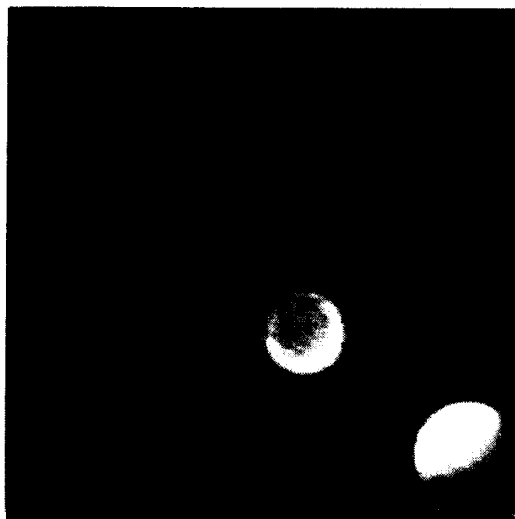


图 14b

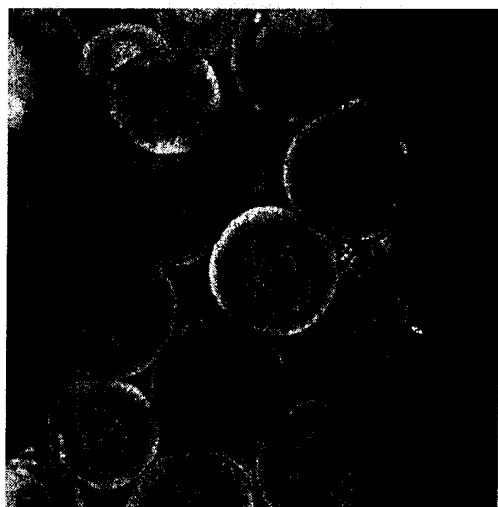


图 14c

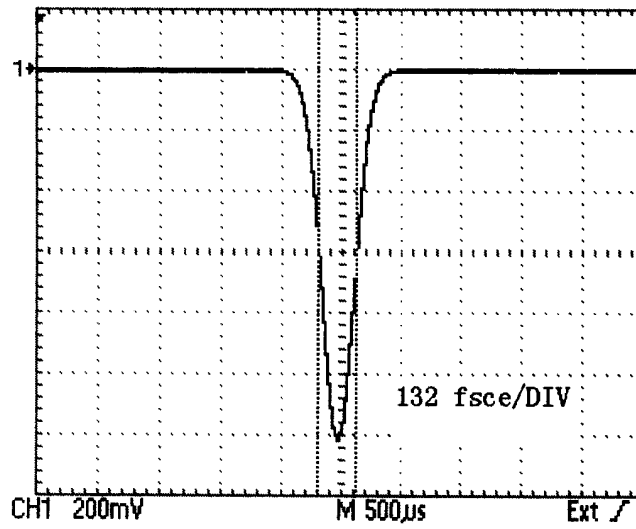


图 15a

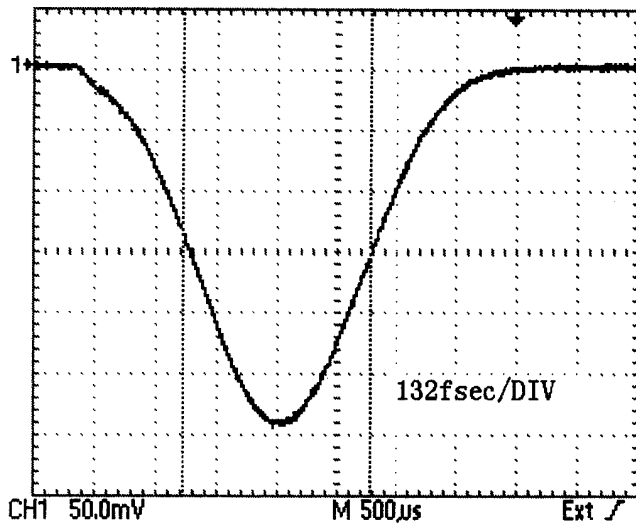


图 15b

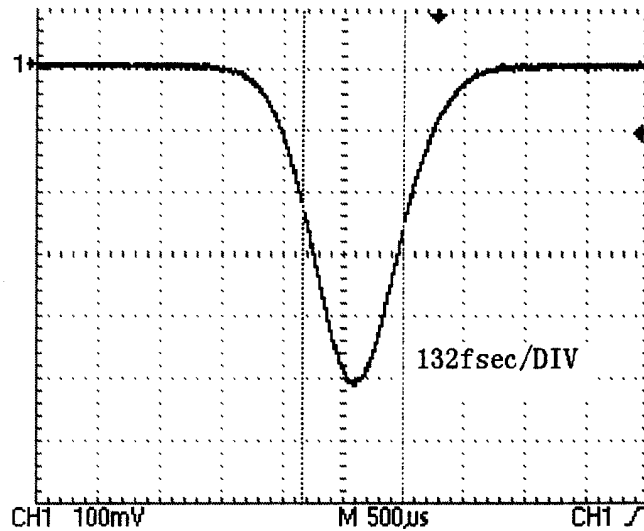


图 15c