

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103017908 A

(43) 申请公布日 2013. 04. 03

(21) 申请号 201210506923. 5

(22) 申请日 2012. 11. 30

(71) 申请人 中国科学院上海技术物理研究所
地址 200083 上海市虹口区玉田路 500 号

(72) 发明人 张明 王建宇 贾建军 吴金才
张亮 陈爽 刘军

(74) 专利代理机构 上海新天专利代理有限公司
31213

代理人 郭英

(51) Int. Cl.

G01J 4/00(2006. 01)

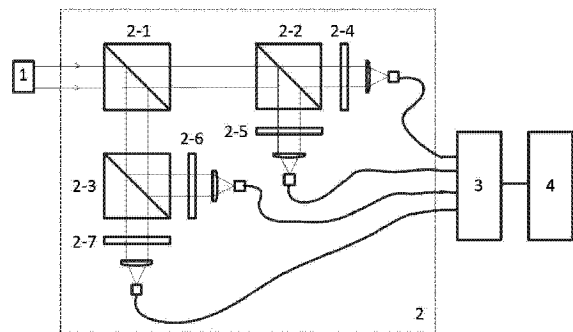
权利要求书 2 页 说明书 6 页 附图 1 页

(54) 发明名称

基于四路分光模块的偏振光特性实时测量装置及方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于四路分光模块的偏振光特性实时测量装置及方法。该系统利用三片分光棱镜将偏振光平均分为四路,再通过功率检测模块实时检测四路光通过四个不同方位角的偏振片后的能量,利用偏振片能量透过率公式可计算出入射光的偏振方位角和椭圆率角,从而达到实时测量的目的。该系统适用于偏振光学系统、椭圆偏振测量领域、激光技术和量子通信等与偏振相关的测量与检测领域。



1. 一种基于四路分光模块的偏振光特性实时测量装置,它包括四路分光模块(2)、功率检测模块(3)和数据处理模块(4),其特征在于:

1) 所述的四路分光模块(2)由第一分光棱镜(2-1)、第二分光棱镜(2-2)、第三分光棱镜(2-3)和 0° 偏振片(2-4)、 90° 偏振片(2-5)、 45° 偏振片(2-6)、 -45° 偏振片(2-7)组成;分光棱镜的反射率和透射率均为0.5,反射方向的相位延时小于 0.1 度;偏振片采用直线偏振片,安装偏振方位角精度 0.1 度;

2) 所述的功率检测模块(3)是四路光功率计组成的经典光功率检测模块,或者是四路单光子探测器和计数器构成的单光子功率检测模块;功率检测模块可以分别在经典光量级或单光子量级下,同时检测四路光源的功率,检测速率 0.5s ,检测精度 0.1% ;

3) 所述的数据处理模块(4)主要包含硬件和软件两个部分;硬件部分采用电脑或者具有浮点运算功能的可编程器件;软件部分是实时偏振测量软件,主要包括实时数据采集,实时偏振测量算法,数据保存和显示等功能;

测量装置各部件之间连接方式如下:

A) 四路分光模块(2)与被测光源(1)采用空间耦合方式连接;被测光源(1)经第一分光棱镜(2-1)分为两路、一路经第二分光棱镜(2-2)分成两路光并分别入射至 0° 偏振片(2-4)和 90° 偏振片(2-5),另一路经第三分光棱镜(2-3)分成两路光并分别入射至 45° 偏振片(2-6)和 -45° 偏振片(2-7),由此被测光源被分为四路能量相同、偏振特性不变的光线; 0° 偏振片(2-4)、 90° 偏振片(2-5)、 45° 偏振片(2-6)和 -45° 偏振片(2-7)分别按照 0° 、 90° 、 45° 和 -45° 方位角安装好,偏振片的平面与四路分光光路方向垂直,偏振方位角安装精度达 0.1 度;

B) 四路分光模块(2)输出的四路偏振光,经耦合镜耦合到四根光纤上,并通过光纤连接到功率检测模块(3);

C) 功率检测模块(3)所采集的能量数据通过USB数据线连接到数据处理模块(4)的硬件上。

2. 一种基于权利要求1所述的基于四路分光模块的偏振光特性实时测量装置的偏振光特性实时测量方法,其特征在于包括以下步骤:

1) 测量四路分光模块(2)中光学元件分光棱镜、偏振片和光纤耦合效率的参数以及功率检测模块(3)的功率检测效率,测量精度 0.1% ;并将测量参数填入数据处理模块(4)中的实时测量软件中;

2) 根据被测光源(1)能量量级选择功率检测模块(3),如果被测光源是经典光则选择经典光功率检测模块,如果被测光源是量子光则选择单光子功率检测模块;

3) 根据被测光源的能量量级选择数据处理模块(4)的数据采集模式,并且设定实时偏振特性测量时长,实时测量速率可达 0.5s ;4) 数据处理模块(4)软件部分中的实时偏振特性测量算法利用入射直线偏振片的椭圆偏振光的能量透射率来计算椭圆偏振光的偏振特性;功率检测模块(3)检测到四路分光模块(2)中四路偏振光能量分别为 E_1, E_2, E_3 和 E_4, E_1, E_2, E_3 和 E_4 是四路光功率计测量的能量值,或者是单光子探测器测量的单光子个数,通过以下公式可以计算出入射光偏振方位角 θ 和椭圆率角 β :

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{E_3 - E_4}{E_1 - E_2}\right) \quad (E_1 > E_2) \quad (1-1)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{E_3 - E_4}{E_1 - E_2}\right) + \frac{\pi}{2} \quad (E_1 < E_2) \quad (1-2)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \arccos\left(\frac{E_1 - E_2}{E_1 + E_2} \cdot \frac{1}{\cos 2\theta}\right) \quad (2)$$

5) 打开被测光源(1),被测光源是一个偏振特性不断变化的光源,经四路分光模块(2)后形成四路不同能量大小的线偏振光,再通过四根光纤传送到功率检测模块(3);功率检测模块将检测到的四路偏振光能量通过 USB 发送到数据处理模块(4);数据处理模块接收到四路偏振光的能量后,通过偏振特性测量算法实时计算出被测光源的偏振方位角和椭圆率角,并将结果显示出来;以此便完成了被测光源的实时偏振特性测量,使不断变化偏振特性的被测光源的偏振方位角和椭圆率角能够实时的被检测出来。

基于四路分光模块的偏振光特性实时测量装置及方法

技术领域

[0001] 本发明涉单光子探测技术和偏振光特性测量技术,具体涉及一种基于四路分光模块的偏振光特性实时测量装置和方法,它适用于偏振光学系统、椭圆偏振测量领域、激光技术和量子通信等与偏振相关的测量与检测领域。

技术背景

[0002] 随着人们对光的偏振现象认识与研究的不断深入,偏振信息已逐渐应用于对目标的探测。通过探测目标反射光的偏振信息反演出待测目标的相关信息,可以将待测目标的可测信息量从原有的维数再增加三维,偏振信息已经在地物遥感探测、大气探测、水下探测、天文探测、医学诊断、目标检测、图像处理和军事应用等领域得到广泛应用。

[0003] 随着单光子探测技术的日趋成熟,高效率的单光子探测器已经在技术上可以实现,单光子探测技术的发展导致单光子偏振应用领域的快速发展,目前基于偏振编码的自由空间量子保密通信就是单光子偏振的一种重要应用之一。在量子光接收、基失标定和基失校正过程中,均会用到量子光偏振检测的手段。

[0004] 传统意义上的偏振态检测设备,实际上是一种光束偏振态分析仪,只是在经典光下检测光束的偏振态,同时在检测的过程中需要旋转某些相位延迟器件,无法实时的测量出未知入射光的偏振特性。这就需要研究一种能以单光子检测为手段,并且不需要旋转相位延迟器件就能实时检测量子光偏振的方法。

[0005] 中国科学院上海技术物理研究所于 2011 年研制的基于量子接收模块的实时测量偏振光特性的装置,其分光光路对被测光源的偏振特性会造成较大影响;并且光路复杂,安装难度比较大;实时偏振检测算法也相对复杂。本专利提出的基于四路分光的实时偏振光特性检测装置光路相对较简单,基于能量分光对被测光源偏振特性影响较小,而且由线性偏正器能量透过率推导出来的实时检测算法比较简单,从而在偏振光特性实时测量性能上有所提高。

[0006] 本专利基于偏振光理论,利用能量分光对被测光源的偏振特性造成影响比较小的特性,将被测光源进行能量分光后经过两组正交基的偏振片,对透过偏振片后的分光能量进行计算,获得被测光源的偏振方位角及椭圆率角,从而实现对偏振光特性的测量;由于该方法中对四路偏振光的测量是同时进行的,所以可以实现对被测光源偏振特性的实时测量;并且由于该装置中的功率检测模块可以在经典光和单光子两种两级中切换,所以可以实现不同能级被测光源的检测。

发明内容

[0007] 本专利的目的是提供一种基于四路分光模块的实时测量偏振光方位角和椭圆率角的装置及方法,克服了现有偏振测量装置在测量过程中耗时较长的问题,测量过程实时性强;并且利用能量分光的方式,避免了分光过程中对被测光源偏振特性的影响;该装置的功率测量模块可以使用经典光功率测量模块,也可以换做单光子功率测量模块,可用于

经典光偏振特性实时检测,也可以应用于量子通信中对量子光偏振特性的实时检测;该检测系统的可移植性较强,应用范围较广。

[0008] 本专利利用入射直线偏振片的椭圆偏振光的能量透射率 κ 来计算椭圆偏振光的偏振特性,假设入射椭圆偏振光的椭圆率角为 β ,方位角为 θ_1 ,直线偏振片的长轴方向与水平夹角为 θ_2 ,那么椭圆偏振光与直线偏振片之间的相对方位角 $\theta = \theta_1 - \theta_2$,由入射直线偏振片椭圆偏振光的能量透射率公式:

$$[0009] \quad \kappa = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\beta \cos 2\theta)$$

[0010] 可以得知,如果改变偏振片的长轴方向,测得在偏振片长轴方向不同角度下的椭圆偏振光的能量大小,即可得到不同偏振片长轴方向下的能量透过率的公式,通过这些公式即可计算出入射光的偏振方位角 θ_1 和椭圆率角 β 。

[0011] 实际测量中,我们可以首先测出入射偏振光的能量,再测得透过偏振片后的入射光能量来计算出 κ 值;但是实时测量时不方便测量入射光的能量,所以需要至少测得三组不同相对方位 θ 下的透射能量才能完全计算出入射光的偏振方位角 θ_1 和椭圆率角 β 。

[0012] 为了简化算法,我们将偏振片分别置于 0° 和 90° , 45° 和 -45° 两组正交方位角度下,测量透射过的偏振光能量分别为 E_1, E_2, E_3 和 E_4 ,假设入射偏振光能量为 P 可得到如下方程:

[0013]

$$\begin{cases} \frac{E_1}{P} = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\beta \cos 2\theta_1) \\ \frac{E_2}{P} = \frac{1}{2}[1 + \cos 2\beta \cos 2(\theta_1 - 90^\circ)] \\ \frac{E_3}{P} = \frac{1}{2}[1 + \cos 2\beta \cos 2(\theta_1 - 45^\circ)] \\ \frac{E_4}{P} = \frac{1}{2}[1 + \cos 2\beta \cos 2(\theta_1 + 45^\circ)] \end{cases}$$

[0014] 解以上方程可得偏振方位角 θ_1 :

$$[0015] \quad \begin{cases} \theta_1 = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{E_3 - E_4}{E_1 - E_2}\right) \quad (E_1 > E_2) \\ \theta_1 = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{E_3 - E_4}{E_1 - E_2}\right) + \frac{\pi}{2} \quad (E_1 < E_2) \end{cases}$$

[0016] 利用求的 θ_1 可求解出椭圆率角 β :

$$[0017] \quad \beta = \frac{1}{2} \arccos\left(\frac{E_1 - E_2}{E_1 + E_2} \cdot \frac{1}{\cos 2\theta_1}\right)$$

[0018] 根据椭圆率角 β 可求出入射光的消光比 ER :

$$[0019] \quad ER = \frac{1}{\tan^2 \beta}$$

[0020] 本专利提出的基于四路分光的实时偏振光特性检测装置光路相对较简单,基于能量分光对被测光源偏振特性影响较小,而且由线性偏正器能量透过率推导出来的实时检测算法比较简单,从而在偏振光特性实时测量性能上有所提高。为了达到实时测量的目的,通

过图 1 所示装置中的四路分光模块 2 中的第一分光棱镜 2-1、第二分光棱镜 2-2 和第三分光棱镜 2-3 将被测光源平均分成四路能量相同,偏振特性不变的光线;再通过四片方位角分别为 0° 、 90° 、 45° 和 -45° 的 0° 偏振片 2-4、 90° 偏振片 2-5、 45° 偏振片 2-6 和 -45° 偏振片 2-7 同时测量四路分光的透过能量 E_1 、 E_2 、 E_3 和 E_4 ,根据前面所述的推导公式即可实时计算出被测光源的偏振方位角 θ_1 和椭圆率角 β 。

[0021] 本发明基于四路分光模块的偏振光特性实时测量装置结构如图 1 所示,其结构包括:四路分光模块 2、功率检测模块 3 和数据处理模块。其中:

[0022] 1) 所述的四路分光模块 2 由第一分光棱镜 2-1、第二分光棱镜 2-2、第三分光棱镜 2-3 和 0° 偏振片 2-4、 90° 偏振片 2-5、 45° 偏振片 2-6、 -45° 偏振片 2-7 组成;分光棱镜的反射率和透射率均为 0.5,反射方向的相位延时小于 0.1 度;偏振片采用高精度的直线偏振片,偏振方位角安装精度 0.1 度;

[0023] 2) 所述的功率检测模块 3 可以是四路光功率计组成的经典光功率检测模块,也可以是四路单光子探测器和计数器构成的单光子功率检测模块;功率检测模块可以分别在经典光量级或单光子量级下,同时检测四路光源的功率,检测速率 0.5s ,检测精度 0.1% ;

[0024] 3) 所述的数据处理模块(4) 主要包含硬件和软件两个部分;硬件部分采用电脑或者具有浮点运算功能的可编程器件;软件部分是实时偏振测量软件,主要包括实时数据采集,实时偏振测量算法,数据保存和显示等功能;

[0025] 装置各部件连接如下:

[0026] A) 四路分光模块 2 与被测光源 1 采用空间耦合方式连接;被测光源 1 经第一分光棱镜 2-1 分为两路、一路经第二分光棱镜 2-2 分成两路光并分别入射至 0° 偏振片 2-4 和 90° 偏振片 2-5,另一路经第三分光棱镜 2-3 分成两路光并分别入射至 45° 偏振片 2-6 和 -45° 偏振片 2-7,由此被测光源被分为四路能量相同、偏振特性不变的光线; 0° 偏振片 2-4、 90° 偏振片 2-5、 45° 偏振片 2-6 和 -45° 偏振片 2-7 分别按照 0° 、 90° 、 45° 和 -45° 方位角安装好,偏振片的平面与四路分光光路方向垂直,偏振方位角安装精度 0.1 度;

[0027] B) 四路分光模块 2 输出的四路偏振光,经耦合镜耦合到四根光纤上,并通过光纤连接到功率检测模块 3;

[0028] C) 功率检测模块 3 所采集的能量数据通过 USB 数据线连接到数据处理模块 4 的硬件上;

[0029] 基于四路分光模块的偏振光特性实时测量装置的偏振光特性实时测量方法,其特征在于包括以下步骤:

[0030] 1) 测量四路分光模块 2 中光学元件分光棱镜、偏振片和光纤耦合效率的参数以及功率检测模块 3 的功率检测效率,测量精度 0.1% ;并将测量参数填入数据处理模块 4 中的实时测量软件中;

[0031] 2) 根据被测光源 1 能量量级选择功率检测模块 3,如果被测光源是经典光则选择经典光功率检测模块,如果被测光源是量子光则选择单光子功率检测模块;

[0032] 3) 根据被测光源的能量量级选择数据处理模块 4 的数据采集模式,并且设定实时偏振特性测量时长,实时测量速率可达 0.5s ;

[0033] 4) 数据处理模块 4 软件部分中的实时偏振特性测量算法利用入射直线偏振片的椭圆偏振光的能量透射率来计算椭圆偏振光的偏振特性;功率检测模块 3 检测到四路分光

模块 2 中四路偏振光能量分别为 E_1, E_2, E_3 和 E_4 (E_1, E_2, E_3 和 E_4 可以是四路光功率计测量的能量值,也可以是单光子探测器测量的单光子个数),通过以下公式可以计算出入射光偏振方位角 θ 和椭圆率角 β :

$$[0034] \quad \theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{E_3 - E_4}{E_1 - E_2}\right) \quad (E_1 > E_2) \quad (1-1)$$

$$[0035] \quad \theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{E_3 - E_4}{E_1 - E_2}\right) + \frac{\pi}{2} \quad (E_1 < E_2) \quad (1-2)$$

$$[0036] \quad \beta = \frac{1}{2} \arccos\left(\frac{E_1 - E_2}{E_1 + E_2} \cdot \frac{1}{\cos 2\theta}\right) \quad (2)$$

[0037] 5) 打开被测光源 1,被测光源是一个偏振特性在不断变化的光源,经四路分光模块 2 后形成四路不同能量大小的线偏振光,再通过四根光纤传送到功率检测模块 3;功率检测模块将检测到的四路偏振光能量通过 USB 发送到数据处理模块 4;数据处理模块接收到四路偏振光的能量后,通过偏振特性测量算法实时计算出被测光源的偏振方位角和椭圆率角,并将结果显示出来;以此便完成了被测光源偏振特性的实时测量。

[0038] 本发明的有益效果在于:基于四路分光的检测装置光路相对较简单,能量分光对被测光源偏振特性影响较小;由线性偏正器能量透过率推导出来的实时检测算法比较简单,计算精度较高;该系统可以同时四路分光透过正交基偏振片的能量进行检测,可实现对被测光源偏振特性的实时测量;由于该装置中的功率检测模块可以在经典光和单光子两种两级中切换,所以可以实现对不同能级偏振光特性的实时测量。

附图说明

[0039] 图 1 为偏振光特性实时测量装置的结构图,图中:

- | | | | |
|--------|---------------------|---------------------|----------------------|
| [0040] | 1. 待测光源 | 2. 四路分光模块 | 2-1. 第一分光棱镜 |
| [0041] | 2-2. 第二分光棱镜 | 2-3. 第三分光棱镜 | 2-4. 0° 偏振片 |
| [0042] | 2-5. 90° 偏振片 | 2-6. 45° 偏振片 | 2-7. -45° 偏振片 |
| [0043] | 3. 功率检测模块 | 4. 数据采集模块 | |

具体实施方式

[0044] 整个可用于偏振光特性实时测量的系统装置如图 1 所示:

[0045] 1) 该实例系统中的被测光源 1 采用 850nm 脉冲激光器,把光源透过旋转的偏振片和 $\frac{\lambda}{4}$ 玻片组来模拟不断变化的偏振状态,透过不同衰减度的衰减片来模拟不同量级的光强,实时的偏振方位角和椭圆率角可以通过偏振片和 $\frac{\lambda}{4}$ 玻片组读出来,读数精度达 0.1° ;

[0046] 2) 该实例系统中四路分光模块 2 所使用的第一分光棱镜 2-1、第二分光棱镜 2-2 和第三分光棱镜 2-3 采用定制的分光棱镜,该分光棱镜的通光孔径为 12.5mm,透射光和反射光的能量比为 1:1,透射光的相位偏移为 0° ,反射光的相位偏移小于 0.1° ; 0° 偏振片 2-4、 90° 偏振片 2-5、 45° 偏振片 2-6 和 -45° 偏振片 2-7 采用 THORLABS 公司生产的 LPVIS050 系列偏振片,该偏振片的通光孔径为 12.5mm,有效波长为 600-1200nm,透过的偏振光偏振对比度能达到 100000:1;

[0047] 3) 该实例系统中的功率检测模块 3 可以采用定制的四路光功率计实现,也可以采用单光子探测器和计数器实现;所采用的定制光功率计利用四片 Si 探测器作为光敏元件,通过数模转换电路将检测到的光功率转换为数字信号,再发送给数据处理模块 4,功率测试范围为 50nw-50mw,测试速率为 0.5s;所采用的四路单光子探测器 3-2 为四个 EXCELITAS 公司生产的 SPCMAQRH-13-FC 系列单光子探测器,其暗计数为 150Hz,最大计数速率为 31.2MHz,死时间为 28.5ns,在 850nm 波长下量子效率为 45%左右;所采用的计数器 3-3 为 FASTCOMTEC 公司生产的 MCS6A 多路定标器;其死时间为 100ps,采集速率能达到 10GHz。

[0048] 4) 该实例系统中的数据处理模块 4 采用电脑和偏振特性实时检测软件实现。偏振特性实时检测软件采用 C++ 编程实现,利用软件时钟控制检测速率 t ,每隔时间 t 读取一次功率检测模块 3 的数据,根据四路功率能量值计算出实时偏振特性,然后将数据保存到数据文件并同时显示在软件中。

[0049] 该实例系统可以进行经典光和量子光的偏振特性实时检测,两种能级下的偏振特性实时检测方法类似,只是采用的功率检测模块 3 不同而已;以下结合图 1 分别通过单光子量级和经典光量级来进一步阐述本发明能够进行偏振光特性实时测量的具体实施步骤。

[0050] 单光子量级偏振光特性实时测量步骤:

[0051] 1. 将系统中四路分光模块 2 中的第一分光棱镜 2-1、第二分光棱镜 2-2 和第三分光棱镜 2-3 的参数、 0° 偏振片 2-4、 90° 偏振片 2-5、 45° 偏振片 2-6 和 -45° 偏振片 2-7 参数测准,并将各个光学元件安装好,安装精度为 0.1 度;

[0052] 2. 功率检测模块 3 采用单光子功率检测模块,首先需要测量功率检测模块中单光子计数器的暗计数和量子效率;然后按照图 1 将被测光源 1、四路分光模块 2、功率检测模块 3 和数据处理模块 4 连接起来;

[0053] 3. 将所测得的分光棱镜参数、偏振片参数、光纤耦合参数和单光探测器的各项参数输入数据处理模块 4 中的实时检测软件中,并且设定实时采集时间为 500ms;打开被测光源 1,将被测光源衰减到单光子量级,开启功率检测模块,待系统稳定后打开实时检测软件;实时检测软件每隔 500ms 读取一次功率检测模块中四路偏振光的数据,然后通过偏振特性实时算法将被测光源的偏振特性计算出来,将结果保存到数据文件并同时显示在软件中;

[0054] 4. 在进行单光子量级偏振光特性实时测量的某时刻,数据处理模块 4 读取的四路偏振光单光子个数分别为:51772、37166、85910 和 1876,计算得入射光偏振方位角为 40.06° ,实际测得被测光源的偏振方位角为 39.89° ,实时检测误差为 0.17° ;计算得被测光源的椭圆率角为 8.42° ,相应的消光比为 46:1,实际测得被测光源的消光比为 43:1,消光比测量误差为 7.5%;以此便完成了偏振光特性的实时测量,测量速率为 0.5s,偏振方位角实时测量精度达到了 0.5° ,偏振消光比测量精度达到了 10%。

[0055] 经典光量级偏振光特性实时测量步骤:

[0056] 经典光量级偏振光特性实时测量步骤与单光子量级偏振光实时测量步骤大致相同,只需要做以下 1 和 2 两个步骤的改变:

[0057] 1. 将单光子量级偏振光测量步骤 2 中的功率检测模块 3 换成经典光功率检测模块,测量四路光功率计的相对检测精度,并将结果输入到偏振实时测量软件中;

[0058] 2. 在单光子量级偏振光测量步骤 3 中将被测光源 1 的衰减片去掉,调整被测光源

功率到 3mw 左右；

[0059] 3. 做完以上 1 和 2 步骤的改变后,其他步骤按照单光子量级偏振光测量步骤进行测量。在进行经典光量级偏振光特性实时测量的某时刻,数据处理模块(4)读取的四路偏振光功率别为:1.584mw、54uw、0.937mw 和 0.63mw,计算得入射光偏振方位角为 5.67° ,实际测得被测光源的偏振方位角为 5.86° ,实时检测误差为 0.19° ;计算得被测光源的椭圆率角为 8.8° ,相应的消光比为 42:1,实际测得被测光源的消光比为 43:1,消光比检测误差为 2.3%;以此便完成了偏振光特性的实时测量,测量速率为 0.5s,偏振方位角实时测量精度达到了 0.5° ,偏振消光比测量精度达到了 10%。

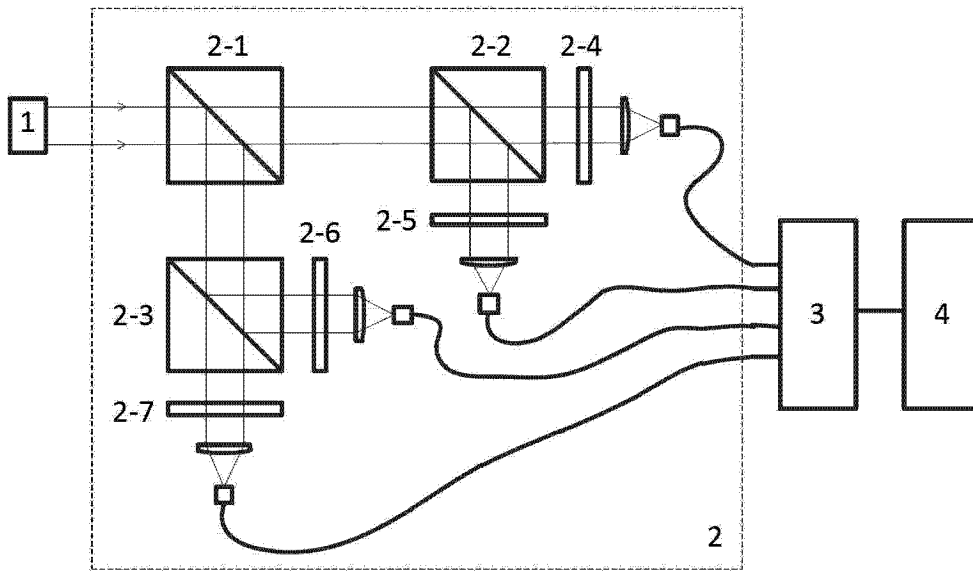


图 1