



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103759661 A

(43) 申请公布日 2014. 04. 30

(21) 申请号 201310537707. 1

(22) 申请日 2013. 11. 04

(71) 申请人 北京理工大学

地址 100081 北京市海淀区中关村南大街 5 号

(72) 发明人 彭瑜

(51) Int. Cl.

G01B 11/06 (2006. 01)

G01N 21/21 (2006. 01)

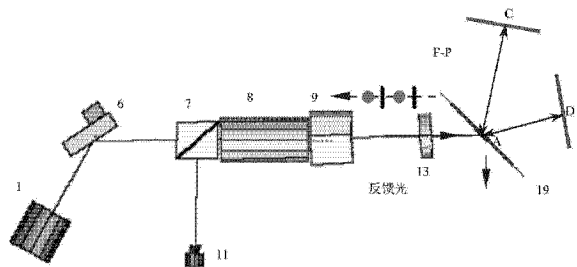
权利要求书1页 说明书6页 附图3页

(54) 发明名称

一种用于介质内测量薄膜厚度和折射率的装置

(57) 摘要

本发明涉及一种用于介质内测量薄膜厚度和折射率的装置,属于光学测量技术领域。自半导体二极管发出的光线经非球面准直透镜准直后,以一定的角度入射到衍射光栅,再经衍射光栅衍射,其一级衍射被原路反射回,零级衍射经可拆卸的光隔离器后,再经过半波片,入射到 F-P 腔形成光反馈,其反馈光依次通过第二 PBS、第一 PBS 后,被 PD 探测器检测,通过示波器显示出来,实现对反馈光强度和光谱特性的检测。本发明装置解决了介质内薄膜厚度和折射率的测量问题,且大幅度提高测量精度。该装置操作简单,稳定。



1. 一种用于介质内测量薄膜厚度和折射率的装置,其特征在于:包括半导体二极管、非球面准直透镜、衍射光栅、半波片、可拆解的隔离器、PD 探测器、F-P 腔、F-P 腔压电陶瓷和 F-P 腔热沉;

所述 F-P 腔包括第一高反射膜、第二高反射膜和被测反射膜;第一高反射膜和第二高反射膜,均为平面结构,成一定角度放置,构成 F-P 腔的两端反射面,反射率能达到 99.9%;所成角度能保证光束分别垂直入射第一高反射膜和第二高反射膜;待测反射膜作为平面环形 F-P 腔的入射面和输出耦合面;

F-P 腔压电陶瓷粘在 F-P 腔的第一高反射膜上,能对 F-P 腔进行频率调谐;

所述可拆解的隔离器包括第一偏振分束器、第二偏振分束器和磁极;第一偏振分束器、第二偏振分束器通过磁极连接;

非球面准直透镜位于半导体二极管与衍射光栅之间,与半导体二极管同轴,位于衍射光栅的左侧位置,成衍射光的入射角;可拆解的隔离器位于衍射光栅的右侧位置,成第一衍射角;PD 探测器位于第一偏振分束器的正下方;半波片位于可拆解的隔离器 ISO 与被测反射膜中间,与可拆解的隔离器 ISO 共轴;

自半导体二极管发出的光线经非球面准直透镜准直后,入射到衍射光栅,再经衍射光栅衍射,其一级衍射被原路反射回,零级衍射经可拆卸的光隔离器后,再经过半波片,入射到 F-P 腔形成光反馈,其反馈光依次通过第二偏振分束器、第一偏振分束器后,被 PD 探测器检测,通过示波器显示,实现对反馈光强度和光谱特性的检测。

2. 根据权利要求 1 所述的一种用于介质内测量薄膜厚度和折射率的装置,其特征在于:第一偏振分束器和第二偏振分束器能分别顺时针或者逆时针旋转。

3. 根据权利要求 1 所述的一种用于介质内测量薄膜厚度和折射率的装置,其特征在于:所述半波片能沿顺时针或者逆时针旋转。

一种用于介质内测量薄膜厚度和折射率的装置

技术领域

[0001] 本发明涉及一种用于介质内测量薄膜厚度和折射率的装置,属于光学测量技术领域。

背景技术

[0002] 光经过反射膜的反射, s 分量和 p 分量的相位发生改变。通常 s 和 p 分量之间的相对相位差可以用椭圆偏振仪来测量,如图 1 所示, LD 发射的光经起偏器后,入射到样品上,其反射经检偏器后,被探测器 PD 检测。以此进一步可测量薄膜厚度和折射率,但是这类椭圆偏振仪测量的条件都限制从空气入射到介质的测量,且传统的椭圆偏振仪测量精度有限。而对于从介质入射到空气方式下的薄膜厚度和折射率的测量,目前尚未有相关的报道。

发明内容

[0003] 本发明的目的是为解决从介质入射到空气的薄膜厚度和折射率的测量问题,提出一种用于介质内测量薄膜厚度和折射率的装置,利用 F-P 腔的共振曲线来测量介质内 s 和 p 之间的相对相位差,进而准确测量薄膜厚度和折射率。

[0004] 一种用于介质内测量薄膜厚度和折射率的装置,包括半导体二极管、非球面准直透镜、衍射光栅、半波片、可拆解的隔离器、PD 探测器、F-P 腔、F-P 腔压电陶瓷和 F-P 腔热沉。

[0005] 所述 F-P 腔包括第一高反射膜、第二高反射膜和被测反射膜。第一高反射膜和第二高反射膜,均为平面结构,成一定角度放置,构成 F-P 腔的两端反射面,反射率能达到 99.9%。所成角度能保证光束分别垂直入射第一高反射膜和第二高反射膜。待测反射膜作为平面环形 F-P 腔的入射面和输出耦合面。

[0006] F-P 腔压电陶瓷粘在 F-P 腔的第一高反射膜上,用于 F-P 腔的快速频率调谐。

[0007] 所述可拆解的隔离器包括第一偏振分束器(PBS)、第二 PBS 和磁极。第一 PBS、第二 PBS 通过磁极连接。第一 PBS 和第二 PBS 能分别顺时针或者逆时针旋转。

[0008] 所述半波片能沿顺时针或者逆时针旋转。

[0009] 非球面准直透镜位于半导体二极管与衍射光栅之间,与半导体二极管同轴,位于衍射光栅的左侧位置,成衍射光的入射角;可拆解的隔离器位于衍射光栅的右侧位置,成第一衍射角;PD 探测器位于第一 PBS 的正下方;半波片位于可拆解的隔离器 ISO 与被测反射膜中间,与可拆解的隔离器 ISO 共轴。

[0010] 自半导体二极管发出的光线经非球面准直透镜准直后,以一定的角度入射到衍射光栅,再经衍射光栅衍射,其一级衍射被原路反射回,零级衍射经可拆卸的光隔离器后,再经过半波片,入射到 F-P 腔形成光反馈,其反馈光依次通过第二 PBS、第一 PBS 后,被 PD 探测器检测,通过示波器显示出来,实现对反馈光强度和光谱特性的检测。通过改变半波片 HWP 改变入射到待测反射膜平面的偏振方向,不仅可得到 s 偏振方向和 p 偏振方向的共振曲线,还可以得到 s 偏振和 p 偏振同时共存的偏振曲线,当半波片 HWP 调节到 s 偏振和 p 偏振之

间时,得到待测反射膜平面内的共振曲线。

[0011] 有益效果

[0012] 本发明装置解决了介质内薄膜厚度和折射率的测量问题,且大幅度提高测量精度。该装置操作简单,稳定,具有很强的实用价值。

附图说明

[0013] 图 1 为背景技术中的椭圆偏振仪;其中, A 为激光源, b 为起偏片, c 为相位补偿仪 1, d 为待测膜, e 为相位补偿仪 2, f 为检偏片, g 为探测器;

[0014] 图 2 为本发明的用于光密介质内相对相位差测量的装置结构示意图;

[0015] 图 3 为具体实施方式中用于光密介质内相对相位差测量的装置实例;

[0016] 图 4 为具体实施方式中薄膜反射和透射示意图;

[0017] 图 5 为具体实施方式中薄膜介质的多光束反射和透射示意图。

[0018] 标号说明: 1: 半导体二极管, 2: 半导体激光管热沉, 3: 非球面准直透镜 AL, 4: 非球面准直透镜调整架, 5: 光栅固定架, 6: 衍射光栅 GT, 7: 可拆卸光隔离器中的第一 PBS, 8: 磁极 B, 9: 可拆卸光隔离器中的第二 PBS, 10: PD 探测器调整架, 11: PD 探测器, 12: 探测器固定架, 13: 半波片, 14: 半波片固定架, 15: F-P 腔压电陶瓷, 16: 底板, 17: 调节架定板, 18: F-P 腔热沉, 19: F-P 腔, 20: 调节架动板, 21: 调节架压电陶瓷, 22: 微调螺钉, 23: 光隔离器固定架。

具体实施方式

[0019] 为进一步说明本发明的优点和目的,下面结合实例对本发明内容做进一步说明。

[0020] 本发明的用于光密介质内相对相位差测量的装置如图 2 所示。图 3 给出了这种用于光密介质内相对相位差测量的装置实施例。

[0021] 本实施例中第一高反射膜和第二高反射膜平面是利用低传输损耗的光学石英玻璃作为材料,在图 2 的 3 个光学表面中, A 点所在表面为折叠面和输入输出耦合面, p 偏振, s 偏振的反射率同为 93%。C 点和 D 点所在的表面构成等效共焦 F-P 腔的两端反射面,其反射率为 99.9%。

[0022] 功率 30mW 波长为 689nm 的半导体二极管 1 发出的激光光束,经过焦距为 4mm,数值孔径为 0.6 的非球面准直透镜 AL3 准直后,以一定的角度入射在刻线密度为 2400g/mm、具有合适的衍射效率、刻线面积大小为 12.5mmX12.5mm、厚度为 6mm 的全息衍射光栅 6 上,其一级衍射原路返回,反馈回半导体二极管 1。零级衍射光经过可拆卸光隔离器 ISO 以及半波片 13 后,以入射角 45° 入射到待测反射膜上,在兼做输入输出耦合面上的待测反射膜的 A 点入射(由光学石英玻璃材料加工),入射光在 A 点发生反射和折射。其中折射进入 F-P 腔的光束部分,入射在镀有高反射膜 C 点,折回到 A 点,形成谐振, F-P 腔 19 的谐振光作为反馈光沿着与原入射光束共线反向的路径,被可拆卸光隔离器 ISO 的第一个 PBS1 (7) 反射后,被 PD 探测器 11 检测。通过扫描光栅 6 的 PZT, F-P 腔的光谱结构通过示波器显示出来。

[0023] 半导体二极管 1 采用温度传感器和半导体激光管热沉 2 实现温度控制。F-P 腔 19 采用温度传感器和 F-P 腔热沉 18 实现温度控制。F-P 腔 19 的谐振频率可通过粘接在该腔上的压电陶瓷 15 的方法和对 F-P 腔热沉 18 精密控温技术分别作快速小范围细调和慢速大

范围粗调,而通过驱动光栅 6 的 PZT,实现对激光频率的扫描。通过微调螺钉 22 或粘接在动板上的压电陶瓷 21 改变单块子腔 19 的反馈角度。在改变角度的过程中,固定在粘有压电陶瓷 21 调节架动板 20 上的 F-P 腔 19 和 F-P 腔热沉 18 随着动板 20 一起旋转,进入 F-P 腔 19 的光束方向也随着调节架动板 20 的转动改变相同的角度,实现反馈光原路返回。

[0024] 非球面准直透镜调整架 4 用于固定非球面镜及激光束准直的调整,F-P 腔 19 通过热沉 18 固定在调节架动板 20 上,光隔离器通过 23 固定在底板上,调节架动板 20 可通过定板 17 上的微调螺钉调整,调节架定板 17,半导体激光管热沉 2,非球面准直透镜调整架 4,光栅固定架 5 均被固定在底板 16 上。

[0025] 光线从半导体二极管发出的激光光束输入面上,以一定的角度入射全息衍射光栅上,再经过可拆卸的光隔离器后,通过半波片,入射到 2 个高反射膜平面,其反馈光原路返回,经过隔离器的第一个偏振分束器反射后,被探测器接收,使用示波器等检测设备检测其反馈,从而实现对反馈光强度和光谱特性的检测。通过改变半波片 HWP 改变入射到待测反射膜平面的偏振方向,不仅可得到 s 偏振方向和 p 偏振方向的共振曲线,还可以得到 s 偏振和 p 偏振同时共存的偏振曲线,当半波片 HWP 调节到 s 偏振和 p 偏振之间时,待测反射膜平面内的共振曲线。FSR 由计算可得,s 偏振和相邻的 p 偏振的频率差为 Δv_a ,因此 s 和 p 之间的频率差 $\Delta v = N * \Delta v_0 \pm \Delta v_a \text{GHz}$ 。 Δv_0 为相邻之间的频率差,N 为整数。

[0026] 对待测反射膜平面进行相对相位差的计算。2 个高反射膜平面共同构成 F-P 腔的几何腔 $L=30\text{mm}$ 。共振光在 A 点的反射角 29° ,总的相位差可由公式:

$$[0027] \quad \Delta \phi = 2 \pi * \Delta v * t \quad (1)$$

[0028] 其中光在单块腔内传播一周的时间 $t=2*n*L/c$,其中 c 为光在真空中传播速度,其值为 299792.458km/s 。n 为折射率,L 指 F-P 腔长。

[0029] 另一方面总的相对相位差为各个反射点产生的相对相位差之和。设 $\Delta \delta 1$ 、 $\Delta \delta 3$ 、 $\Delta \delta 4$ 分别为 A、C、D 点反射产生的 s 和 p 之间的相对相位差。

[0030] $\Delta \delta 3$ 为垂直球面反射 C 点产生的相位差,由于该光束垂直入射到镀膜面,s 和 p 的相位差约为 $-\pi$ 弧度, $\Delta \delta 4$ 为垂直球面 D 点反射产生的相位差,s 和 p 的相位差约为 $-\pi$ 弧度, $\Delta \delta 1$ 为在 A 点反射产生的的相位差,总的相位差可由

$$[0031] \quad \Delta \phi = 2 * \Delta \delta 1 + \Delta \delta 3 + \Delta \delta 4$$

$$[0032] \quad = -2 \times 180^\circ + 2 * \Delta \delta 1 \quad (2)$$

[0033] 由于单块入射耦合面镀膜的原因,入射耦合面上的反射产生的 s 和 p 的相对相位差并非严格的 $-\pi$ 弧度,但不应该偏离太远,其值应该在 $-\pi$ 弧度附近,根据这一原则,选取合适的 N 以及符号,得到 $\Delta v + N * \Delta v_0 = \Delta v_a \text{GHz}$ 。据此可得 Δv ,根据公式(1),可得总相位差。这个值代入(2)反推出 $\Delta \delta 1$,可得在 A 点 s 和 p 之间的相对相位差,如图 5 所示。图中 θ_B 、 θ_C 分别为布鲁斯特角和全反射角。

[0034] 2、薄膜折射率测量, β 指相位, $|E_i|$ 为幅度, E_i 为电场强度

$$[0035] \quad \begin{cases} E_{ip} = |E_{ip}| e^{i\beta_{ip}} \\ E_{is} = |E_{is}| e^{i\beta_{is}} \\ E_{rp} = |E_{rp}| e^{i\beta_{rp}} \\ E_{rs} = |E_{rs}| e^{i\beta_{rs}} \end{cases} \quad (4)$$

[0036] 定义下列反射、透射系数

$$[0037] \quad \begin{cases} r_p = E_{rp} / E_{ip}, & r_s = E_{rs} / E_{is} \\ t_p = E_{tp} / E_{ip}, & t_s = E_{ts} / E_{is} \end{cases} \quad (5)$$

[0038] 根据麦克斯维方程和界面上连续性条件并利用折射定律有

$$[0039] \quad \begin{cases} r_p = \operatorname{tg}(\varphi_1 - \varphi_2) / \operatorname{tg}(\varphi_1 + \varphi_2) \\ r_s = -\sin(\varphi_1 - \varphi_2) / \sin(\varphi_1 + \varphi_2) \\ t_p = 2 \sin \varphi_2 \cos \varphi_1 / \sin(\varphi_1 + \varphi_2) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \\ t_s = 2 \sin \varphi_2 \cos \varphi_1 / \sin(\varphi_1 + \varphi_2) \end{cases} \quad (6)$$

[0040] r 为分别为各个界面 s 和 p 的反射率, φ 为各个入射和衍射角度。

[0041] 界面对于入射光电矢量的 p 、 s 分量有着不同的反射、透射系数。因此,反射光和入射光的偏振态不同,如图 5 所示。为了分别考察反射对于光波的振幅和相位的影响,我们把 r_p 、 r_s 写成如下的复数形式:

$$[0042] \quad \begin{cases} r_p = |r_p| \exp(i\delta_p) \\ r_s = |r_s| \exp(i\delta_s) \end{cases} \quad (7)$$

$$(8)$$

[0043] 由式 (4),得:

$$[0044] \quad G = \operatorname{tg} \psi e^{i\Delta} = \frac{|E_{rp} / E_{rs}|}{|E_{ip} / E_{is}|} e^{i\{(\beta_{rp} - \beta_{rs}) - (\beta_{ip} - \beta_{is})\}} \quad (9)$$

$$[0045] \quad \text{其中:} \quad \begin{cases} \operatorname{tg} \psi = \frac{|E_{rp} / E_{rs}|}{|E_{ip} / E_{is}|} \\ e^{i\Delta} = e^{i\{(\beta_{rp} - \beta_{rs}) - (\beta_{ip} - \beta_{is})\}} \end{cases} \quad (10)$$

[0046] 这时需测 2 个量,即分别测反射光中的两分量振幅比与入射光中的两分量振幅比,相位差变换。对于金属,折射率为复数,可以分解为虚部和实部 $n_2 = N - iK$ 。代入上面公式可以得到 (N, K) 与 (Ψ, Δ) 的对应关系,有近似关系 $(n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \phi)^{1/2} \approx n_2$ 。所以有:

$$[0047] \quad \begin{cases} N = n_1 \sin \phi_1 \operatorname{tg} \phi_1 \cos 2\Psi / (1 + \sin 2\Psi \cos \Delta) \\ K = \operatorname{tg} 2\Psi \sin \Delta \end{cases} \quad (11)$$

[0048] 3、薄膜厚度测量

[0049] 由于光在界面 1、2 之间的多次反射、折射对 p、s 分量是相同的，故舍去下角标 p、s，并用 r_{12} 、 t_{12} 和 r_{21} 、 t_{21} 分别表示来自介质 1 的光线和来自介质 2 的光线的反射、透射系数，用 r_{23} 、 t_{23} 表示界面 2 对来自介质 2 的光线的反射、透射系数，如图 5 所示。这样，总反射波中各分波的复振幅为 $r_{12}E_i$ ， $t_{12}t_{21}r_{23}e^{-i2\delta}E_i$ ， $t_{12}t_{21}r_{21}r_{23}^2e^{-i4\delta}E_i$ ，…… 从中可以算出 $2\delta = 4\pi dn_2 \cos \phi_2 / \lambda$ 。用 2δ 表示相邻两分波的相位差，其中 $\delta = 2\pi dn_2 \cos \phi_2 / \lambda$ ，定义薄膜对于入射光电矢量的 p 分量的总反射系数分别为：

$$[0050] \quad \begin{cases} r_p = E_{rp} / E_{ip} \\ r_s = E_{rs} / E_{is} \end{cases} \quad (12)$$

[0051] 用 r_{1p} 、 r_{1s} 表示光线的 p 分量、s 分量在界面 1、2 间的反射系数，用 r_{2p} 、 r_{2s} 表示光线的 p 分、s 分量在界面 2、3 间的反射系数。由多光束干涉的复振幅计算可知：

$$[0052] \quad \begin{cases} E_{rp} = \frac{r_{1p} + r_{2p}e^{-i2\delta}}{1 + r_{1p}r_{2p}e^{-i2\delta}} E_{ip} \\ E_{rs} = \frac{r_{1s} + r_{2s}e^{-i2\delta}}{1 + r_{1s}r_{2s}e^{-i2\delta}} E_{is} \end{cases} \quad (13)$$

[0053] 其中 E_{ip} 和 E_{is} 分别代表入射光波电矢量的 p 分量和 s 分量， E_{rp} 和 E_{rs} 分别代表反射光波电矢量的 p 分量和 s 分量。现将上述 E_{ip} 、 E_{is} 、 E_{rp} 、 E_{rs} 四个量写成一个量 G，即：

[0054]

$$G = \frac{E_{rp} / E_{rs}}{E_{ip} / E_{is}} = \operatorname{tg} \psi e^{i\Delta} = \frac{r_{1p} + r_{2p}e^{-i2\delta}}{1 + r_{1p}r_{2p}e^{-i2\delta}} / \frac{r_{1s} + r_{2s}e^{-i2\delta}}{1 + r_{1s}r_{2s}e^{-i2\delta}} \quad (14)$$

[0055] 定义 G 为反射系数比，它应为一个复数，可用 $\operatorname{tg} \psi$ 和 Δ 表示它的模和幅角，上述公式的过程量转换可由菲涅耳公式和折射公式给出：

[0056]

$$\begin{cases} r_{1p} = (n_2 \cos \phi_1 - n_1 \cos \phi_2) / (n_2 \cos \phi_1 + n_1 \cos \phi_2) \\ r_{2p} = (n_3 \cos \phi_2 - n_2 \cos \phi_3) / (n_3 \cos \phi_2 + n_2 \cos \phi_3) \\ r_{1s} = (n_1 \cos \phi_1 - n_2 \cos \phi_2) / (n_1 \cos \phi_1 + n_2 \cos \phi_2) \\ r_{2s} = (n_2 \cos \phi_2 - n_3 \cos \phi_3) / (n_2 \cos \phi_2 + n_3 \cos \phi_3) \\ 2\delta = 4\pi dn_2 \cos \phi_2 / \lambda \\ n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 = n_3 \sin \phi_3 \end{cases} \quad (15)$$

[0057] 可以看出，G 最终是 n_1 、 n_2 、 n_3 、 d 、 λ 和 ϕ 的函数。对于某一给定的薄膜—衬底光学

体系,如果波长和入射角确定,G便为定值。从实验上测出 ψ 和 Δ ,就能求出 n_1, n_2, n_3, d , 中的两个未知量。

[0058] 该装置探测系统的扫描频率可通过光栅和半导体二极管控温技术分别实现快速小范围细调和慢速大范围粗调,实现对激光频率的调谐与控制。经过这些途径,可将光栅选频决定的激光频率与 F-P 腔决定的激光频率调成接近一致。利用激光振荡的物理机制,使得在 F-P 腔的谐振频率上产生激光振荡。并可通过改变半波片使得输入 F-P 腔的偏振调节,实现 F-P 腔的 s 和 p 偏振的反馈光探测。

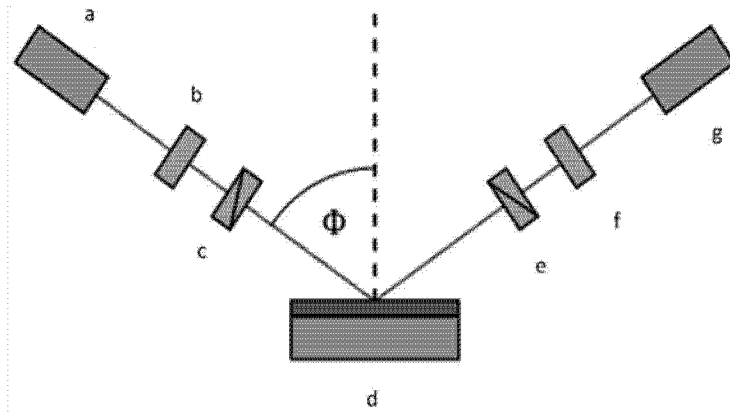


图 1

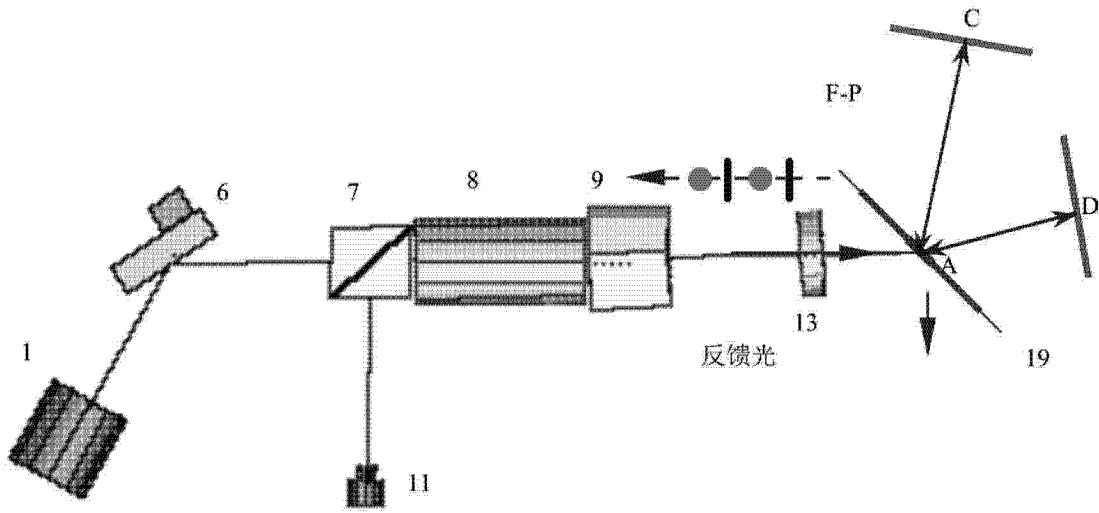


图 2

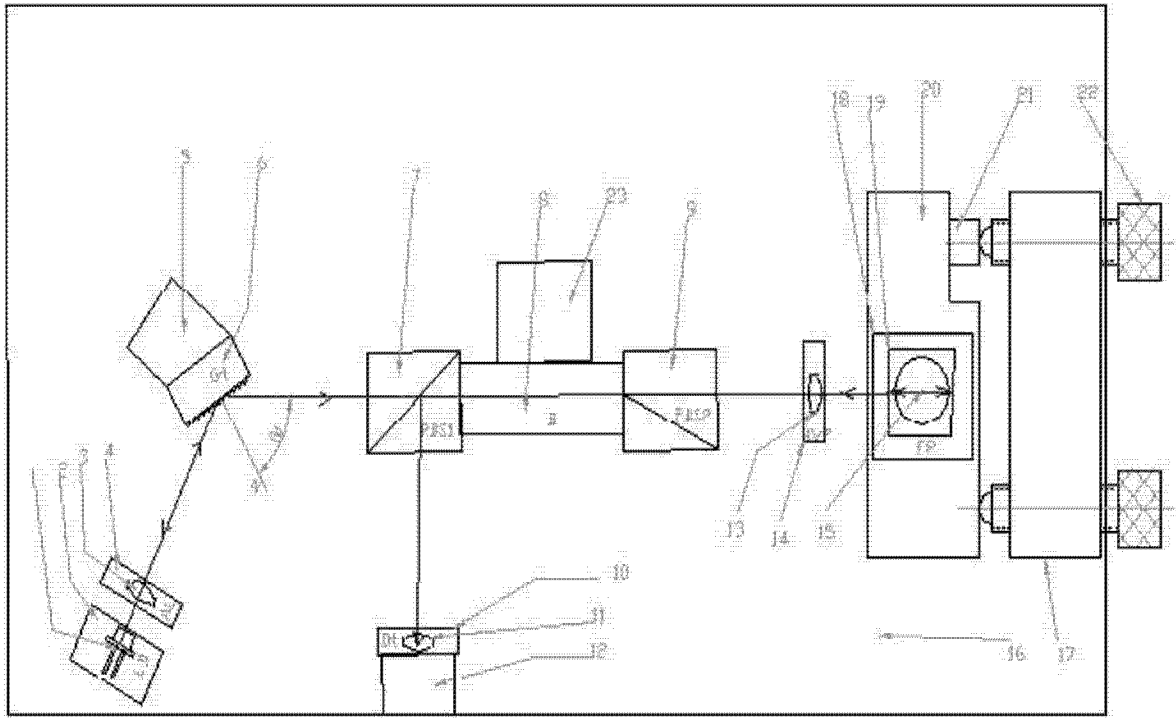


图 3

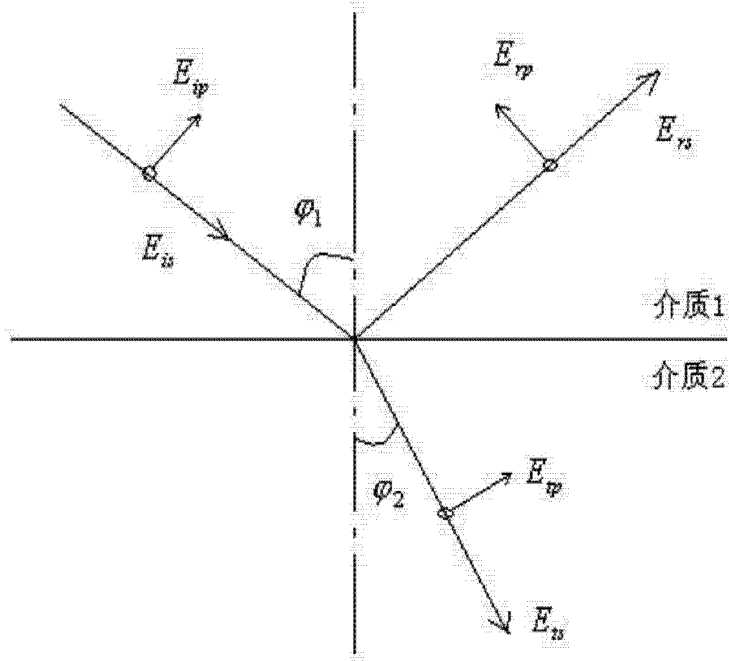


图 4

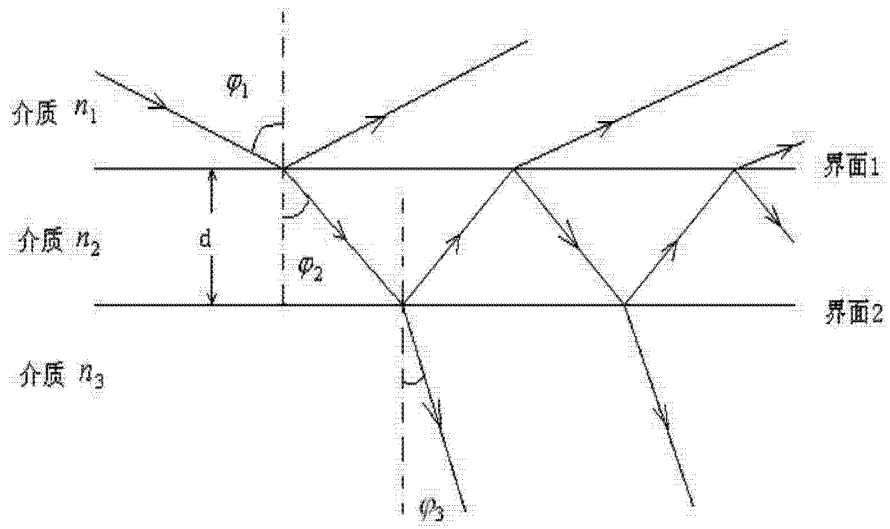


图 5