



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111207673 A

(43)申请公布日 2020.05.29

(21)申请号 202010050875.8

(22)申请日 2020.01.17

(71)申请人 中北大学

地址 030051 山西省太原市尖草坪区学院路3号

(72)发明人 辛晨光 李孟委 亓杰 张瑞金丽

(74)专利代理机构 北京志霖恒远知识产权代理事务所(普通合伙) 11435

代理人 申绍中

(51)Int.Cl.

G01B 11/02(2006.01)

G02B 5/18(2006.01)

权利要求书1页 说明书5页 附图6页

(54)发明名称

一种基于等腰三角闪耀光栅结构的位移传感器

(57)摘要

本发明属于位移传感器技术领域,具体涉及一种基于等腰三角闪耀光栅结构的位移传感器,所述激光器设置在光栅的一侧,所述激光器发出的线偏振光经光栅反射并衍射出衍射光,所述第一反射镜、第二反光镜分别设置在 $\pm 3$ 级衍射光的光路上,所述 $\pm 3$ 级衍射光分别经过第一反射镜、第二反光镜交汇在分光镜上,所述第一反射镜与分光镜之间设置有半波片,所述分光镜的一侧依次设置有四分之一波片、第一偏振片、第二探测器,所述分光镜的另一侧依次设置有第二偏振片、第一探测器。本发明通过采用高级次衍射光提高了位移测量灵敏度,且本发明通过设计等腰三角闪耀光栅结构提高了三级次衍射光的衍射效率,实现了高对比度的信号输出。本发明用于位移的测量。

1. 一种基于等腰三角闪耀光栅结构的位移传感器,其特征在于:包括激光器(1)、光栅(2)、第一反射镜(31)、第二反光镜(32)、半波片(4)、分光镜(5)、四分之一波片(6)、第一偏振片(7)、第二偏振片(8)、第一探测器(9)、第二探测器(10),所述激光器(1)设置在光栅(2)的一侧,所述激光器(1)发出的线偏振光经光栅(2)反射并衍射出衍射光,所述衍射光包括有 $\pm 3$ 级衍射光,所述第一反射镜(31)、第二反光镜(32)分别设置在 $\pm 3$ 级衍射光的光路上,所述 $\pm 3$ 级衍射光分别经过第一反射镜(31)、第二反光镜(32)交汇在分光镜(5)上,所述第一反射镜(31)与分光镜(5)之间设置有半波片(4),所述分光镜(5)的一侧依次设置有四分之一波片(6)、第一偏振片(7)、第二探测器(10),所述分光镜(5)的另一侧依次设置有第二偏振片(8)、第一探测器(9)。

2. 根据权利要求1所述的一种基于等腰三角闪耀光栅结构的位移传感器,其特征在于:所述激光器(1)的波长为 $0.635\mu\text{m}$ ,所述激光器(1)的功率为 $1.2\text{mW}$ 。

3. 根据权利要求1所述的一种基于等腰三角闪耀光栅结构的位移传感器,其特征在于:所述光栅(2)采用等腰三角闪耀光栅,所述光栅(2)的光栅周期为 $4\mu\text{m}$ ,所述光栅(2)的材料采用A1,所述光栅(2)的闪耀角为 $15.5^\circ$ 。

4. 根据权利要求1所述的一种基于等腰三角闪耀光栅结构的位移传感器,其特征在于:所述四分之一波片(6)光轴与激光器(1)发出线偏振光的偏振方向顺时针偏转 $45^\circ$ 。

5. 根据权利要求1所述的一种基于等腰三角闪耀光栅结构的位移传感器,其特征在于:所述第一偏振片(7)的偏振方向与激光器(1)发出线偏振光的偏振方向逆时针偏转 $45^\circ$ ,所述第二偏振片(8)的偏振方向与激光器(1)发出线偏振光的偏振方向顺时针偏转 $45^\circ$ 。

6. 根据权利要求3所述的一种基于等腰三角闪耀光栅结构的位移传感器,其特征在于:所述等腰三角闪耀光栅的加工方法为:先在掩模板光刻胶上用激光直接写入,然后再控制激光束在高能束敏感玻璃上等腰闪耀光栅两条对称透射边对应位置的曝光强度,改变掩模灰度分布,控制加工基板上厚度均匀的光刻胶的曝光深度,从而改变基板的刻蚀深度和刻蚀形状,实现一次加工成型。

## 一种基于等腰三角闪耀光栅结构的位移传感器

### 技术领域

[0001] 本发明属于位移传感器技术领域,具体涉及一种基于等腰三角闪耀光栅结构的位移传感器。

### 背景技术

[0002] 随着人类社会的不断发展,在制造、微电子、生物以及航空航天等领域,迫切希望能实现高精度、高灵敏度的位移测量系统。其中光栅检测法具有精度高、体积小、重量轻、抗电磁干扰等优点,因而获得广泛应用。其中,单光栅位移测量结构主要基于光栅衍射原理及干涉原理,由激光器发出的光经分光镜分光后再经反射镜反射交汇到光栅上,而后发生干涉。干涉光由探测器接收并探测。基于傅里叶光学原理可知,干涉光的光强、相位等信息反映了光栅的位置信息。因此,通过测量干涉光可以推算出光栅位移量。这种方法因其结构简单、易于装配而受到人们广泛关注。但是,这种方法具有以下问题:1. 衍射效率低下;2. 采用1级衍射光,导致光学倍分系数低。以上问题限制了此类器件分辨率的进一步提高。

### 发明内容

[0003] 针对上述单光栅位移测量结构衍射效率低下、光学倍分系数低的技术问题,本发明提供了一种衍射效率高、光学倍分系数高、灵敏度高的基于等腰三角闪耀光栅结构的位移传感器。

[0004] 为了解决上述技术问题,本发明采用的技术方案为:

[0005] 一种基于等腰三角闪耀光栅结构的位移传感器,包括激光器、光栅、第一反射镜、第二反光镜、半波片、分光镜、四分之一波片、第一偏振片、第二偏振片、第一探测器、第二探测器,所述激光器设置在光栅的一侧,所述激光器发出的线偏振光经光栅反射并衍射出衍射光,所述衍射光包括有 $\pm 3$ 级衍射光,所述第一反射镜、第二反光镜分别设置在 $\pm 3$ 级衍射光的光路上,所述 $\pm 3$ 级衍射光分别经过第一反射镜、第二反光镜交汇在分光镜上,所述第一反射镜与分光镜之间设置有半波片,所述分光镜的一侧依次设置有四分之一波片、第一偏振片、第二探测器,所述分光镜的另一侧依次设置有第二偏振片、第一探测器。

[0006] 所述激光器的波长为 $0.635\mu\text{m}$ ,所述激光器的功率为 $1.2\text{mW}$ 。

[0007] 所述光栅采用等腰三角闪耀光栅,所述光栅的光栅周期为 $4\mu\text{m}$ ,所述光栅的材料采用A1,所述光栅的闪耀角为 $15.5^\circ$ 。

[0008] 所述四分之一波片光轴与激光器发出线偏振光的偏振方向顺时针偏转 $45^\circ$ 。

[0009] 所述第一偏振片的偏振方向与激光器发出线偏振光的偏振方向逆时针偏转 $45^\circ$ ,所述第二偏振片的偏振方向与激光器发出线偏振光的偏振方向顺时针偏转 $45^\circ$ 。

[0010] 所述等腰三角闪耀光栅的加工方法为:先在掩模板光刻胶上用激光直接写入,然后再控制激光束在束敏感玻璃上等腰闪耀光栅两条对称透射边对应位置的曝光强度,改变掩模灰度分布,控制加工基板上厚度均匀的光刻胶的曝光深度,从而改变基板的刻蚀深度和刻蚀形状,实现一次加工成型。

[0011] 本发明与现有技术相比,具有的有益效果是:

[0012] 本发明通过采用高级次衍射光提高了位移测量灵敏度,且本发明通过设计等腰三角闪耀光栅结构提高了三级次衍射光的衍射效率,实现了高对比度的信号输出。

### 附图说明

[0013] 图1为本发明的结构示意图;

[0014] 图2为本发明的光束垂直平面示意图;

[0015] 图3为本发明四分之一波片相位引入波形图;

[0016] 图4为本发明在 $-45^\circ$ 偏振方向上光束对干涉的示意图;

[0017] 图5为本发明在 $+45^\circ$ 偏振方向上光束对干涉的示意图;

[0018] 图6为本发明光栅衍射效率仿真图;

[0019] 图7为本发明多普勒频移示意图;

图8为本发明多普勒频移示意图;

[0020] 其中:1为激光器,2为光栅,31为第一反射镜,32为第二反射镜,4为半波片,5为分光镜,6为四分之一波片,7为第一偏振片,8为第二偏振片,9为第一探测器,10为第二探测器,I为I路光束,II为II路光束。

### 具体实施方式

[0021] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0022] 一种基于等腰三角闪耀光栅结构的位移传感器,如图1所示,包括激光器1、光栅2、第一反射镜31、第二反光镜32、半波片4、分光镜5、四分之一波片6、第一偏振片7、第二偏振片8、第一探测器9、第二探测器10,激光器1设置在光栅2的一侧,激光器1发出的线偏振光经光栅2反射并衍射出衍射光,衍射光包括有 $\pm 3$ 级衍射光,第一反射镜31、第二反光镜32分别设置在 $\pm 3$ 级衍射光的光路上, $\pm 3$ 级衍射光分别经过第一反射镜31、第二反光镜32交汇在分光镜5上,第一反射镜31与分光镜5之间设置有半波片4,分光镜5的一侧依次设置有四分之一波片6、第一偏振片7、第二探测器10,分光镜5的另一侧依次设置有第二偏振片8、第一探测器9。

[0023] 进一步,优选的,激光器1的波长为 $0.635\mu\text{m}$ ,激光器1的功率为 $1.2\text{mW}$ 。

[0024] 进一步,优选的,光栅2采用等腰三角闪耀光栅,光栅2的光栅周期为 $4\mu\text{m}$ ,光栅2的材料采用A1,光栅2的闪耀角为 $15.5^\circ$ 。

[0025] 进一步,四分之一波片6光轴与激光器1发出线偏振光的偏振方向顺时针偏转 $45^\circ$ 。

[0026] 进一步,第一偏振片7的偏振方向与激光器1发出线偏振光的偏振方向逆时针偏转 $45^\circ$ ,第二偏振片8的偏振方向与激光器1发出线偏振光的偏振方向顺时针偏转 $45^\circ$ 。

[0027] 进一步,等腰三角闪耀光栅的加工方法为:先在掩模板光刻胶上用激光直接写入,然后再控制激光束在束敏感玻璃上等腰闪耀光栅两条对称透射边对应位置的曝光强度,改变掩模灰度分布,控制加工基板上厚度均匀的光刻胶的曝光深度,从而改变基板的刻

蚀深度和刻蚀形状,实现一次加工成型。

[0028] 本发明的工作流程为:首先,激光器1发出的线偏振光经光栅2反射并衍射,取衍射光中的 $\pm 3$ 级衍射光做测量光, $\pm 3$ 级衍射光分别为图1中的I路光束、II路光束,随后,经反射镜3反射后,使其 $\pm 3$ 级衍射光交汇在分光镜5上,其中一路光经半波片4使其偏振方向偏转 $90^\circ$ 使其另一路光偏振方向垂直。而后当两路光经分光镜5反射和透射后,I路光束的反射光与II路光束的透射光两两重合,I路光束的透射光与II路光束的反射光两两重合,每一路光束对中有两束偏振方向相差 $90^\circ$ 的光束,此时其中一路光束对经四分之一波片6使其与另一路光束对相位相差 $90^\circ$ ,并且此光束对中的两光束变为圆偏振光,而后第一偏振片7、第二偏振片8出射后,每路光束对中的光束都发生干涉,干涉光斑分别由第一探测器9和第二探测器10探测,获得两路相位差为 $90^\circ$ 的A、B相信号,经电路细分后可实现高灵敏度的位移测量。

[0029] 实施例

[0030] 具体实施方式参数如下:

[0031] 激光器波长: $\lambda=0.635\mu\text{m}$ ;

[0032] 激光器功率:1.2mW;

[0033] 光栅周期: $d=4\mu\text{m}$ ;

[0034] 闪耀光栅闪耀角: $\theta=15.5^\circ$ ;

[0035] 光栅材料:Al。

[0036] 具体分析如下:

[0037] 其中,检测位移是通过经光栅2衍射出的 $\pm 3$ 级衍射光重合的干涉信号来测量,由于采用了3级衍射光作为测量光,其光学细分倍数增加到了6倍,最终测量灵敏度和分辨率得到提高。

[0038] 其中,半波片4的光轴方向与与图2中A方向重合,利用半波片4特性,输出光束偏振方向与图2中X方向重合。

[0039] 其中,四分之一波片6光轴方向与图2中A方向重合,使得两路光束对能够产生 $90^\circ$ 的相位差,最终输出信号实现A、B相。

[0040] 其中,第一偏振片7偏振方向与图2中B方向重合,第二偏振片8偏振方向与图2中A方向重合,使得两路光束对中的光束都发生干涉。对于放置四分之一波片6的一路光束对而言,因四分之一波片6的光轴与光束对中两束光的偏振方向夹角都为 $45^\circ$ ,所以两光束都变为了圆偏振光,如图3所示。

[0041] 图3中XOZ面和XOY面上是两束圆偏振光在两偏振面上的分量,再经过 $-45^\circ$ 第一偏振片7后,在该偏振面出射的一束光为两分量的叠加,如图4所示。

[0042] 如图3所示,设XOZ面与YOZ上的分量波形函数为 $\sin t$ ,经四分之一波片后在偏转 $90^\circ$ 后的偏振方向上的分量波形函数为 $\cos t$ ,随即在经过偏振片后,在 $-45^\circ$ 偏振方向上具有光的叠加,如图4所示。具体计算如下:

$$[0043] \quad U_{-45^\circ} = (\sin t - \cos t) \cos 45^\circ - (\sin t + \cos t) \cos 45^\circ = -\sqrt{2} \cos t \quad (1)$$

[0044] 对于未放置四分之一波片6的一路光束对而言,入射到偏振片上的光束仍为偏振方向垂直且相位一致的线偏振光,如图5所示。

[0045] 如图5所示,XOZ面和XOY面上是两束线偏振光的波形,再经过+45°第二偏振片后,在该偏振面上出射的一束光为两束线偏振光在该方向上的叠加,如图6所示。

[0046] 水平与垂直偏振方向上的波形函数与另一路光束对的波形函数一致,故其波形函数都为 $\sin t$ ,经过+45°偏振片后,在该偏振方向上进行叠加,具体计算如下。

$$[0047] \quad U_{+45^\circ} = \sin t \cos 45^\circ + \sin t \cos 45^\circ = \sqrt{2} \sin t \quad (2)$$

[0048] 由此,可以看出两路光束对最终形成的干涉光斑具有90°的相位差,最终分别由两路探测器测得,获得A、B相信号。

[0049] 其中,当等腰三角闪耀光栅闪耀角为15.5°时,在3衍射级次上具有较高的衍射效率,仿真结果如图7所示。经数据处理得到,3级衍射光衍射效率达到了54.09%。所以,当采用光栅周期为4 $\mu\text{m}$ ,闪耀角为15.5°,材质为Al的等腰三角闪耀光栅时,采用3级衍射光作为测量光仍有较高的衍射效率,具有较好的干涉效果。

[0050] 其中,光栅位移引入的相位变化是基于多普勒频移原理造成的,当衍射级次增加时其频移量同时也累加。

[0051] 如图8所示,当入射光垂直入射到光栅上时,若移动速度为 $v$ ,衍射级次为 $m$ 级,对于衍射角为 $\theta$ 的 $\pm m$ 级衍射光,其多普勒频移为

$$[0052] \quad \Delta f_{+m} = \frac{-v \sin \theta}{\lambda} = -\frac{mv}{d} \quad (3)$$

[0053] 同理可得,- $m$ 级衍射光的多普勒频移为:

$$[0054] \quad \Delta f_{-m} = +\frac{mv}{d} \quad (4)$$

[0055] 采用光学结构使 $\pm m$ 级衍射光合束,两束光同振向、等幅、频率相差很小,将产生物理学中的拍频干涉。

[0056] 拍频干涉的干涉光强变化关系式如下:

$$[0057] \quad I = A_0^2 \{1 + \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)]\} \quad (5)$$

[0058] 其中, $A_0$ 为振幅 $\varphi_1 - \varphi_2$ 为干涉光束空间相位差,且 $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda}(\Delta L_2 - \Delta L_1) + (\varphi_{10} - \varphi_{20})$ ,

其中 $\Delta L_2 - \Delta L_1$ 为光程差, $\varphi_{10} - \varphi_{20}$ 为激光器初相位差。其中,激光器的初相位差 $\varphi_{10} - \varphi_{20}$ 变化缓慢,光程差 $\Delta L_2 - \Delta L_1$ 约为常数,因此相位差 $\varphi_1 - \varphi_2$ 可以近似为常数。

[0059] 由上述可知,干涉光强的变化只与变量 $(f_1 - f_2)t$ 相关,并可由上述计算得变量 $(f_1 - f_2)t$ 与位移的关系如下:

$$[0060] \quad \int_0^t 2\pi(f_1 - f_2)dt = 2\pi \int_0^t [(f_0 + \Delta f_{+m}) - (f_0 + \Delta f_{-m})]dt = -\frac{4\pi mx}{d} \quad (6)$$

[0061] 由此可知,基于多普勒频移原理,干涉条纹的光强变化与位移变化相关。

[0062] 另外,结合公式(5)可知,干涉信号随着位移变化光强为正弦型输出。

[0063] 在本结构中, $m=3$ ,由公式(6)可得,干涉光强的变化频率因3级衍射级次变为只采用一级衍射光时的3倍。

[0064] 综上,探测器所接收到的干涉光强与位移关系式为

$$[0065] \quad I = A_0^2 [1 + \cos(-3\pi x + c)] \quad (7)$$

[0066] 其中,  $c$  为常数且  $c = \varphi_1 - \varphi_2$ 。

[0067] 由上述推导可知, 当位移移动一个光栅周期, 即  $x=4$  时, 光强周期变化 6 次, 即通过采用 3 级衍射光的光路实现了 6 倍的光学细分倍数, 与只采用一级衍射光相比, 细分倍数提高了 3 倍, 提高了位移传感器的灵敏度; 同时, 通过对等腰三角闪耀光栅的参数设置, 使其在使用 3 级次衍射光时保证了 50% 以上的衍射效率, 保证了测量信号的可用性, 从而实现了高灵敏度的位移测量。

[0068] 上面仅对本发明的较佳实施例作了详细说明, 但是本发明并不限于上述实施例, 在本领域普通技术人员所具备的知识范围内, 还可以在不脱离本发明宗旨的前提下作出各种变化, 各种变化均应包含在本发明的保护范围之内。

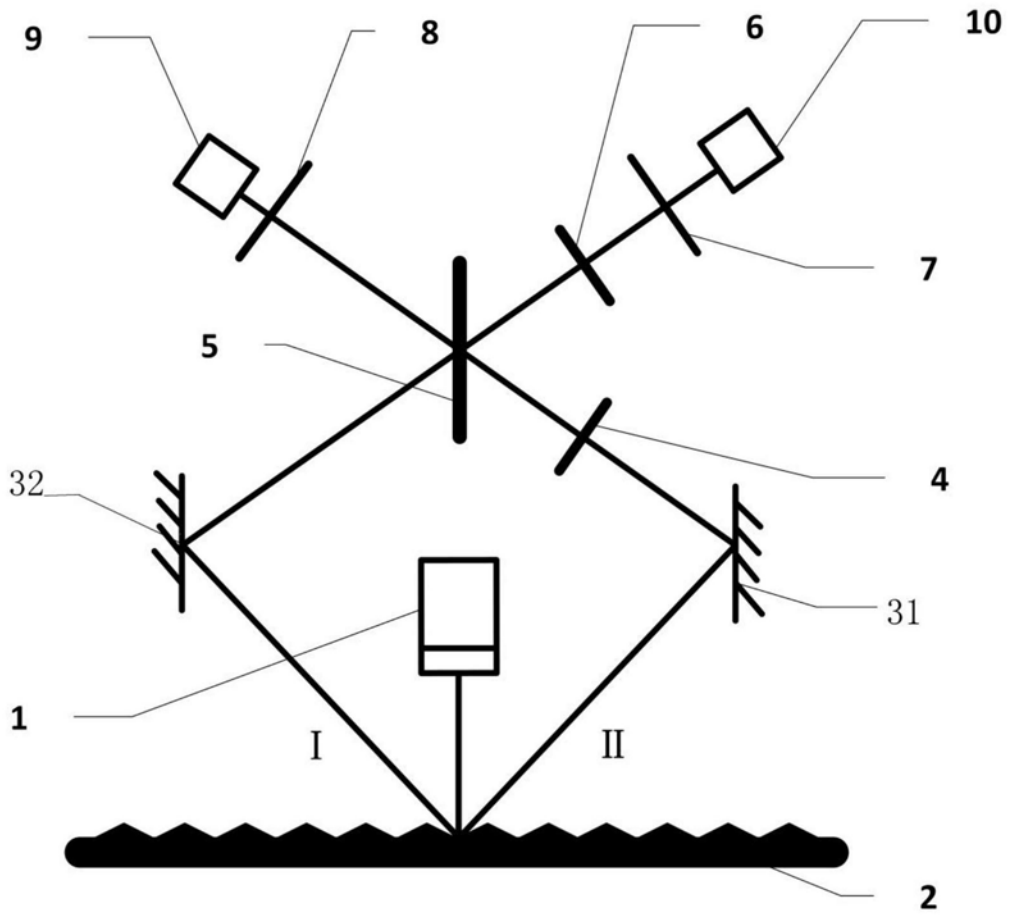


图1



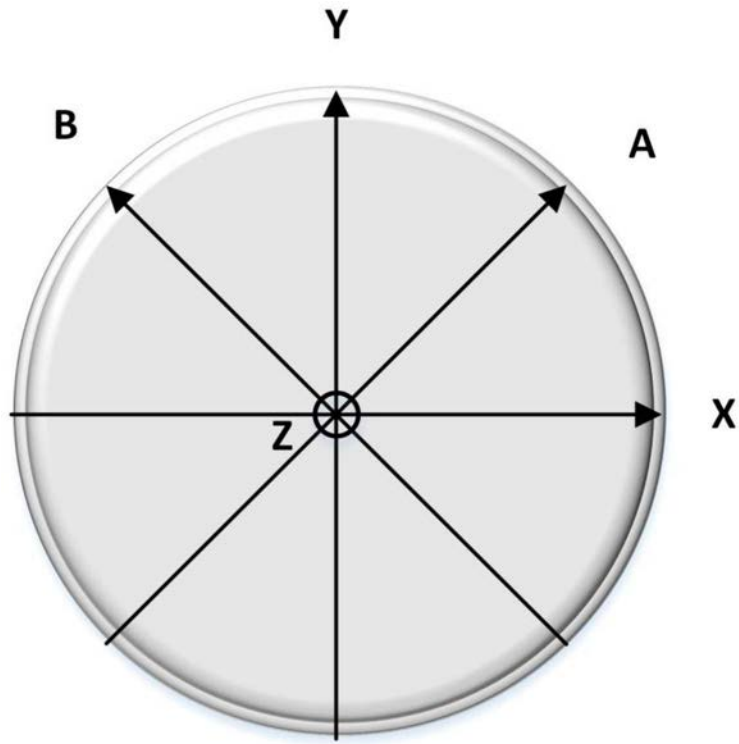


图2

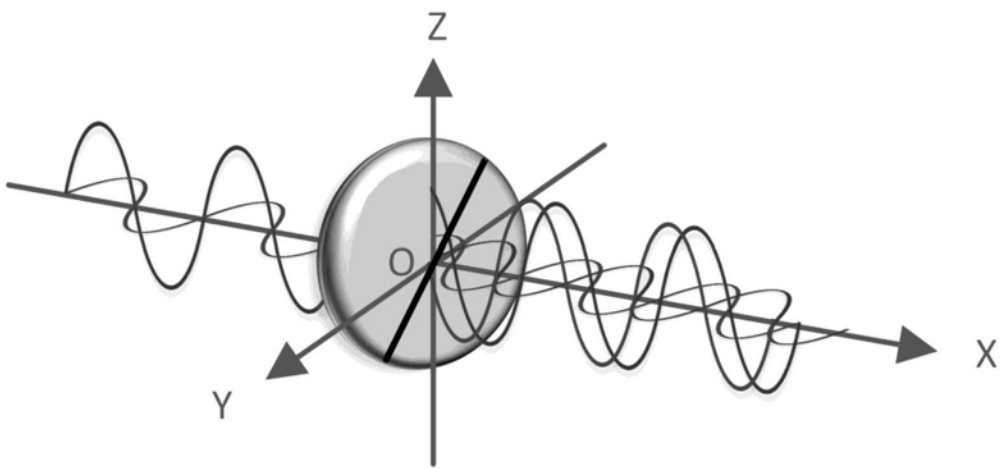


图3

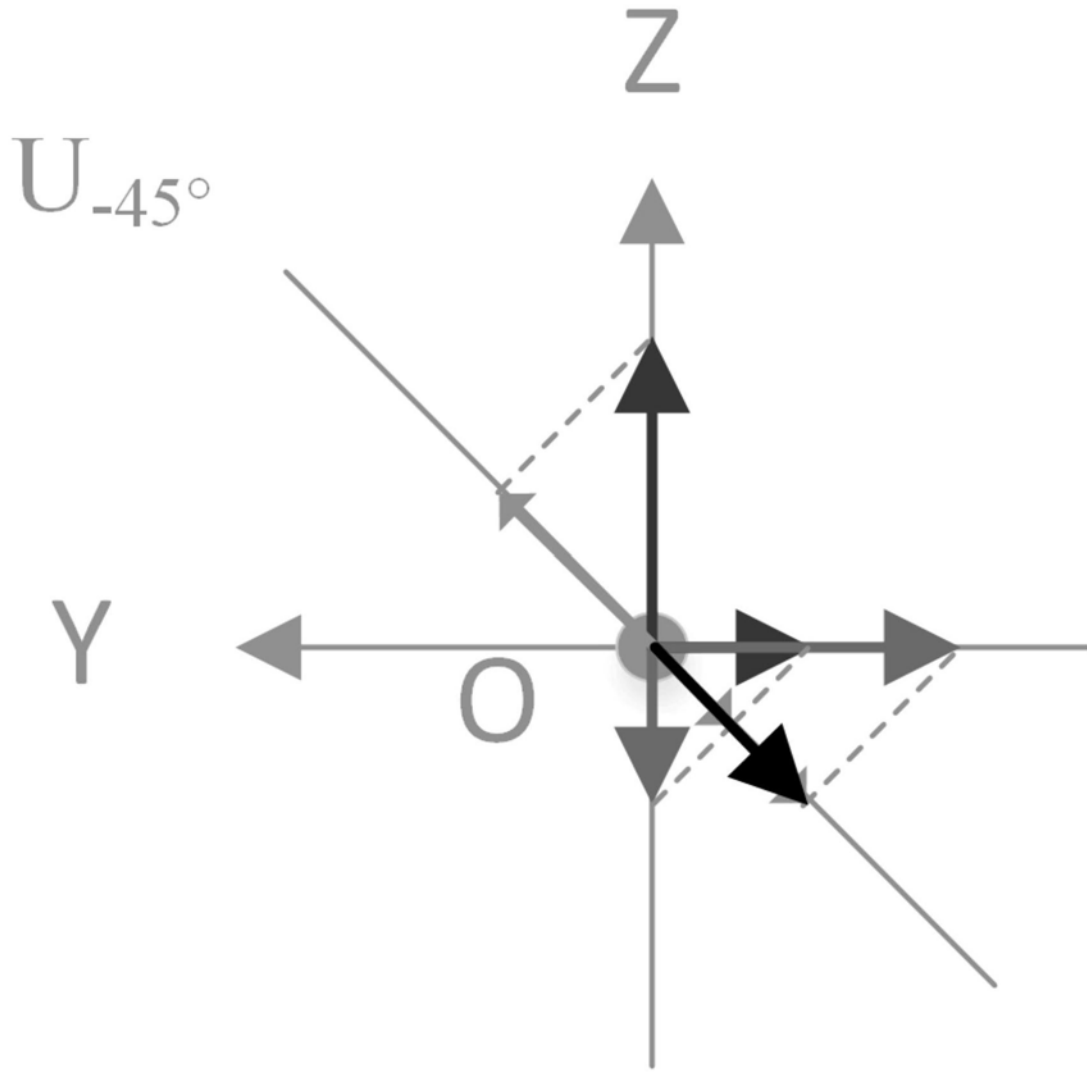


图4

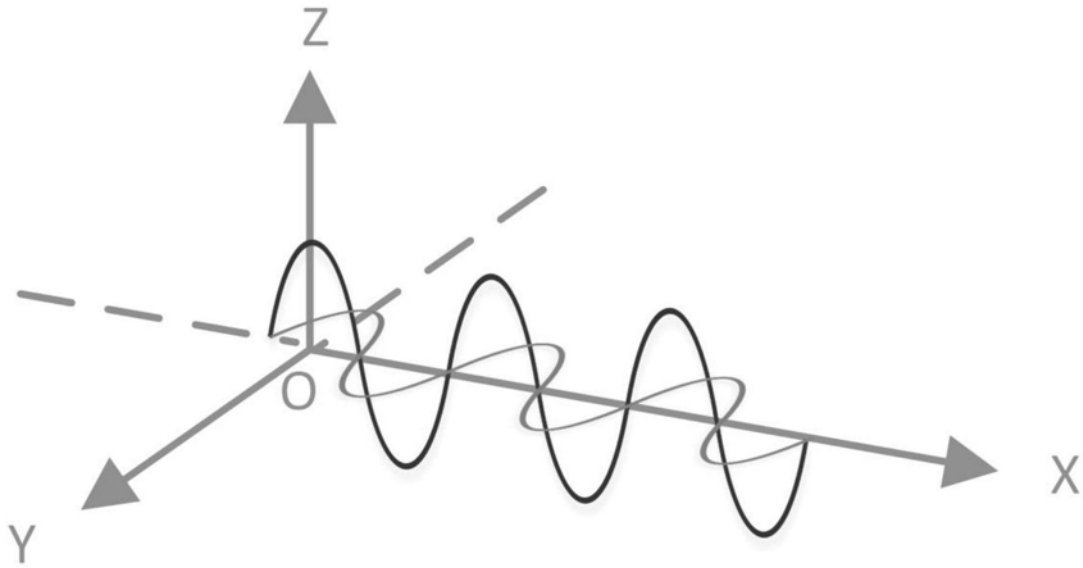


图5

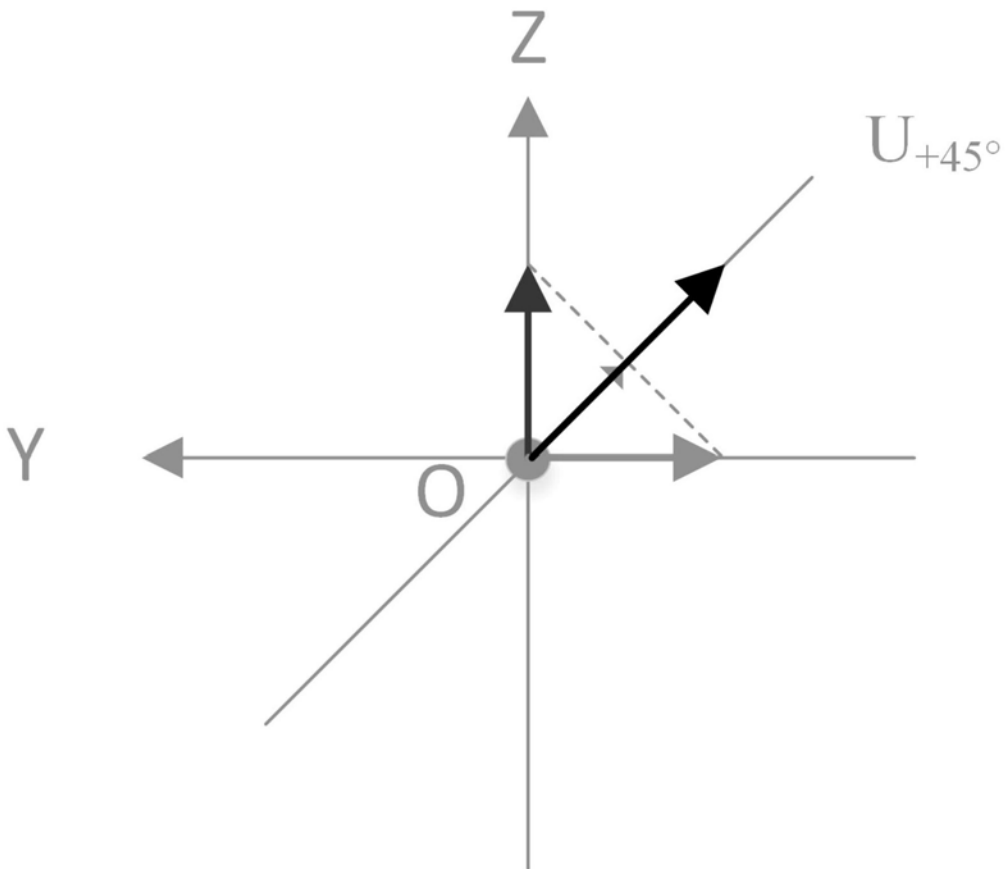


图6

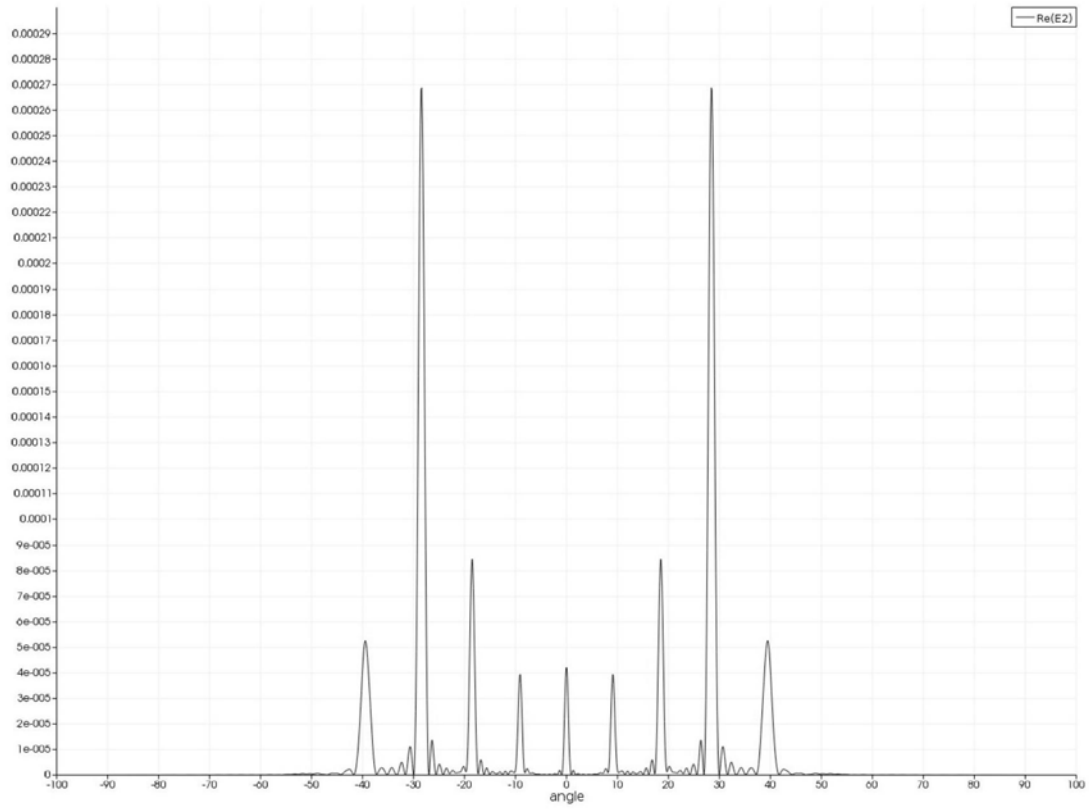


图7

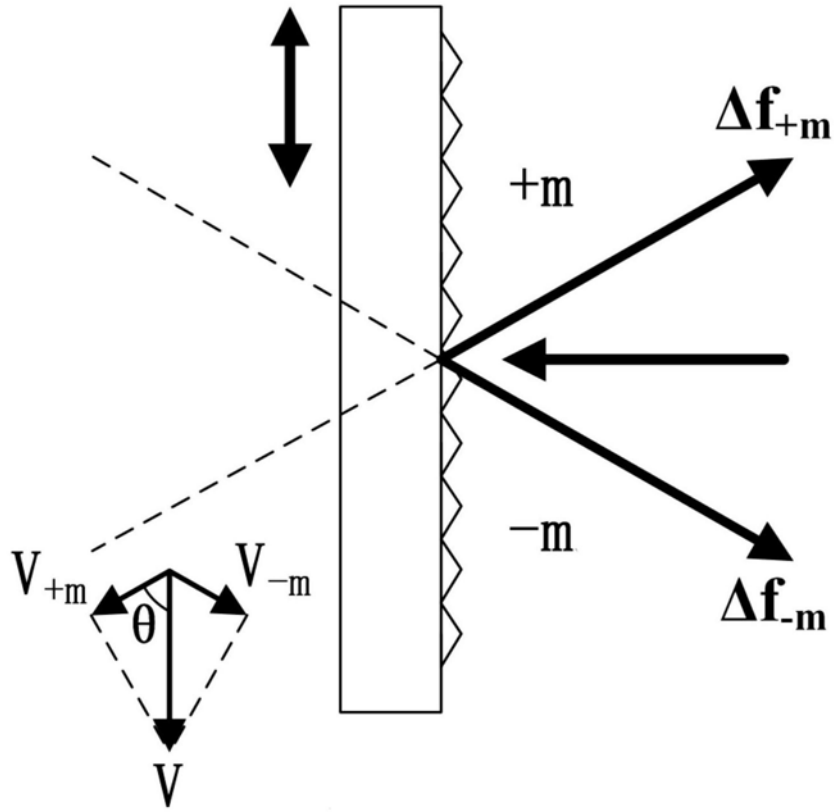


图8