

# 亚表面损伤深度测量的理论研究与实验分析

许逸轩 蒋正东 王华林 何勇

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

**摘要** 光学元件的亚表面损伤指的是在加工过程中产生的划痕和裂纹等。在激光的照射下,亚表面损伤会使光场发生变化,并且随着激光照射时间的增加,裂纹会越来越长,产生散射,最终影响光束的能量集中度。基于全内反射法测量亚表面损伤的原理提出了一种新的估计损伤深度的方法。入射光波和出射光波在样品表面下方叠加形成驻波,入射光的偏振态以及入射的角度会影响样品内部的光强分布。通过分析亚表面损伤点的光强度和入射角之间的关系,能够由入射角的变化量来估算亚表面损伤的深度。

**关键词** 测量; 光学元件; 亚表面损伤; 全内反射法; 驻波理论

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.111401

## Theoretical Research and Experimental Analysis on the Depth Measurement of Subsurface Damage

Xu Yixuan Jiang Zhengdong Wang Hualin He Yong

School of Electronic Engineering and Optoelectronic Techniques, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

**Abstract** The subsurface damage of optical components is the scratches and cracks which are produced in workpiece process. The subsurface damage will change the light field under the laser irradiation. As the laser irradiation time increases, the cracks become larger and generate scattering, which finally effect the encircled energy of laser beam. This paper proposes a new method to estimate damage depth based on the principle of subsurface damage measured by total internal reflection method. Incident and exit light waves are superimposed to form the standing wave under the surface of sample, and the polarization state and the incident angle of incident light affect the distribution of light intensity in the sample. By analyzing the relation between light intensity and incident angle of subsurface damage point, the depth of subsurface damage can be estimated through the change quantity of the incident angle.

**Key words** measurement; optical components; subsurface damage; total internal reflection method; standing wave theory

**OCIS codes** 140.3330; 260.6970; 290.5820; 170.0180

## 1 引言

随着空间光学望远镜、受控核聚变,以及光刻技术的飞速发展,超光滑表面的光学元件得到了越来越多的应用,因此亚表面损伤的检测变得越发重要。它的存在直接影响着光学系统的成像质量、激光损伤阈值等重要技术指标<sup>[1-2]</sup>。相对于表面的损伤,亚表面损伤不能够直接测量,目前测量亚表面损伤的方法主要分为破坏性方法<sup>[3-4]</sup>和非破坏性方法<sup>[5-6]</sup>。非破坏性方法相对于破坏性方法更加迅速、有效,许多精密的光学元件如果采用破坏性方法测量就不能再使用了,所以学者们大多偏向研究非破坏性方法。全内反射法是非破坏

收稿日期: 2016-05-30; 收到修改稿日期: 2016-07-19; 网络出版日期: 2016-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(A030801)

作者简介: 许逸轩(1993—),男,硕士研究生,主要从事光学测量以及图像处理方面的研究。E-mail: 494298171@qq.com

导师简介: 何勇(1966—),男,博士,研究员,主要从事干涉测量、光学精密测量方面的研究。

E-mail: heyong@mail.njust.edu.cn(通信联系人)

性方法中的一种,它具有装置简单,成本低,能够实现快速大面积检测等优点。

本文提出了一种全内反射显微测量法(TIRM)<sup>[7]</sup>,基于光的全内反射,可通过显微镜观测由亚表面损伤缺陷造成的散射光来间接分析光学元件的亚表面损伤。

## 2 测量原理

### 2.1 实验光路介绍

全内反射法原理图如图 1 所示,首先由激光器发出一束光,经过偏振片形成 s(p) 偏振光,再经过由两个反射镜组成的转折光路垂直穿过待测件下方的直角棱镜,待测件与直角棱镜的折射率相同,两者之间涂上与它们折射率接近的折射率液,所以光线在直角棱镜和被测样品中方向是不改变的。通过调整反射镜 2 的角度使得入射到被测件下表面的入射角大于全反射临界角,假如待测件不存在亚表面损伤,那么待测件上方的显微镜就不能探测到任何光线,显微镜的视场应为全黑;假如存在亚表面损伤,入射角就会因为损伤的存在而小于临界角,那么就会有散射的光透过上表面出射,显微镜就能拍到损伤点所成的像。通过电荷耦合器件(CCD)接收显微镜目镜的图像,其中的亮点就是亚表面损伤点所成的像,对其进行分析就能得到样品亚表面损伤的情况。

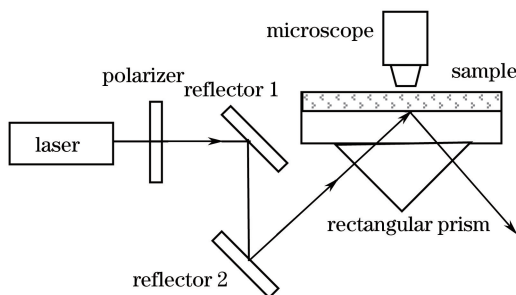


图 1 全内反射显微测量法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of TIRM

对全内反射法测量亚表面损伤的方法进行理论分析,入射光波和反射光波在待测件下表面叠加形成了驻波,由于 s 波和 p 波振动方向不同以及反射时的相位变化不同,所以要对 s 光和 p 光分别分析。除了对不同偏振态下的亚表面损伤可见度进行比较分析,还建立了相对光强与入射角度以及亚表面损伤深度位置的数学关系模型。借助 Matlab 软件分析,可以通过损伤图粗略估计亚表面损伤点的深度。

### 2.2 驻波理论的分析

如图 2 所示,由光波的叠加原理可知,被测样品下表面的入射光波和反射光波在一定深度内会形成驻波<sup>[8]</sup>。驻波场与深度  $z$  相关,若亚表面损伤点处于驻波的波节点,那么损伤的亮度为零,无法被显微镜观测到;若亚表面损伤点处于驻波的波腹点位置,那么损伤点的强度最大,能够被显微镜有效地观察到。此外,不同偏振态的光波因为其电矢量振动方向的差异,在进行叠加的时候需要分别进行分析。另外,不同偏振态的光在全反射的时候发生的相位变化也不相同。根据同一损伤点在不同角度下亮度的变化情况可以估计出该

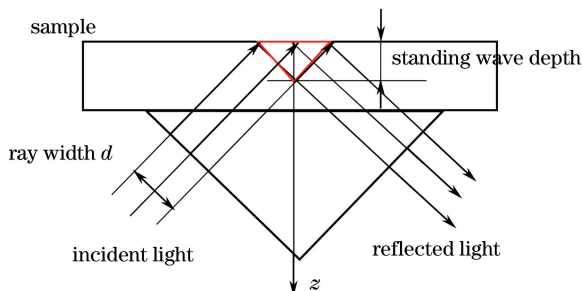


图 2 驻波示意图

Fig. 2 Schematic diagram of standing wave

损伤点的深度信息。

当宽度为  $d$  的激光束以  $\theta$  ( $\theta$  大于全反射临界角) 角入射时, 入射波和反射波频率相同, 振动方向相同, 在深度方向 ( $z$  方向) 上的传播方向相反, 所以能够在图 2 中的红色三角形内形成驻波场, 驻波场的深度最大达到:

$$H = d \cos \theta. \quad (1)$$

入射光波电矢量  $\mathbf{E}_{\text{inc}}$  和反射光波电矢量  $\mathbf{E}_{\text{ref}}$  可以表示为:

$$\mathbf{E}_{\text{inc}} = \arccos\left(\frac{knz}{\cos \theta} + \omega t\right), \quad (2)$$

$$\mathbf{E}_{\text{ref}} = \arccos\left(\frac{knz}{\cos \theta} - \omega t + \delta\right), \quad (3)$$

式中  $\delta$  是光波发生全反射时的相位跳变, 它的大小与入射角度以及光波的偏振态相关。  $n$  为被测件的折射率,  $z$  为从待测件表面向下的深度,  $k$  为光波的空间角频率,  $\omega$  为角频率。

由入射光和反射光形成的驻波电矢量为:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\text{inc}} + \mathbf{E}_{\text{ref}}. \quad (4)$$

通过代入(2)~(3)式, 对上式进行化简得到驻波形式的叠加光波场:

$$\mathbf{E} = 2 \arccos\left(\frac{knz}{\cos \theta} + \frac{\delta}{2}\right) \cos\left(\omega t - \frac{\delta}{2}\right). \quad (5)$$

对于  $z$  方向上任意一点随时间的振动是频率为  $\omega$  的简谐振动, 相应的振幅则随  $z$  而变, 记为:

$$A = \left| 2 \arccos\left(\frac{knz}{\cos \theta} + \frac{\delta}{2}\right) \right|. \quad (6)$$

当入射角度一定时, 虽然不同的深度 ( $z$ ) 处有不一样的振幅, 但是极大值和极小值对应的  $z$  值则是固定的, 也就是该驻波的波腹和波节点。所以仅仅通过一幅亚表面损伤图是不能看到全部的损伤点的, 只有通过改变入射角, 用 CCD 采集多幅图像才能有效地分析光学元件的亚表面损伤。

### 2.3 入射光波偏振态对损伤点可见度的影响

#### 2.3.1 入射光波电矢量振动方向垂直于纸面方向(即 s 偏振光)

如图 3 所示, 当 s 偏振光以  $\theta$  ( $\theta$  大于全内反射临界角) 角入射时, 则入射光波电矢量和反射光波电矢量可以表示为:

$$\mathbf{E}_{s0} = \arccos\left(\frac{knz}{\cos \theta} + \omega t\right), \quad (7)$$

$$\mathbf{E}_s = \arccos\left(\frac{knz}{\cos \theta} - \omega t + \delta_s\right), \quad (8)$$

式中的  $\delta_s$  为 s 偏振光全反射时发生的相位跃变, 因为 s 偏振光的入射光波和反射光波都是沿着垂直纸面的方向振动, 所以入射光波和反射光波叠加的结果可以直接以标量相加, 合成波结果为:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{s0} + \mathbf{E}_s = 2 \arccos\left(\frac{knz}{\cos \theta} + \frac{\delta_s}{2}\right) \cos\left(\omega t - \frac{\delta_s}{2}\right). \quad (9)$$

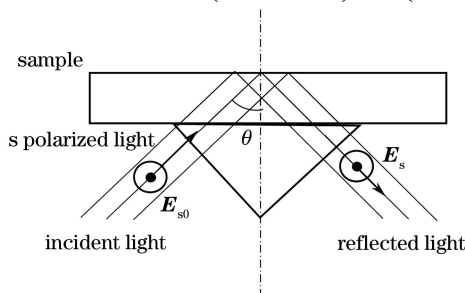


图 3 s 偏振光叠加示意图

Fig. 3 Schematic diagram of superposition of s polarized light

由(9)式可得, s 偏振光合成波相应的振幅随深度  $z$  而变, 记为:

$$A = \left| 2 \arccos \left( \frac{knz}{\cos \theta} + \frac{\delta_s}{2} \right) \right|. \quad (10)$$

因为光强正比于光波电矢量的平方, 所以 s 偏振光对应的驻波场相对入射光的最大光强可以表示为:

$$\left| \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{E}_{s0}} \right|^2 = 4 \cos^2 \left( \frac{knz}{\cos \theta} + \frac{\delta_s}{2} \right), \quad (11)$$

上式可以化简为:

$$\left| \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{E}_{s0}} \right|^2 = 2 \left[ 1 + \cos \left( \frac{2knz}{\cos \theta} + \delta_s \right) \right], \quad (12)$$

式中  $\delta_s$  为 s 偏振光反射前后的相位变化, 表示为:

$$\delta_s = 2 \arctan \left[ - \frac{\sqrt{\sin^2 \theta - \left( \frac{1}{n} \right)^2}}{\cos \theta} \right]. \quad (13)$$

将(13)式代入(12)式中, 则 s 偏振光合成波的相对光强可以表示为:

$$\left| \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{E}_{s0}} \right|^2 = 2 + 2 \cos \left\{ \frac{4\pi n z}{\lambda \cos \theta} + 2 \arctan \left[ - \frac{\sqrt{\sin^2 \theta - \left( \frac{1}{n} \right)^2}}{\cos \theta} \right] \right\}. \quad (14)$$

### 2.3.2 入射光振动方向平行于纸面方向(即 p 偏振光)

如图 4 所示, 当 p 偏振光以  $\theta$  ( $\theta$  大于全内反射临界角) 角入射时, 入射光波和反射光波的电矢量的振动方向不能像 s 光一样沿着同样的方向, 不能进行简单叠加, 需要先把 p 偏振光分解成为竖直方向和水平方向进行标量相加, 再将两者由矢量三角法合成为实际的驻波光场。与 s 偏振光的推导近似得到 p 偏振光在竖直方向和水平方向的合成波相对强度:

$$\left| \frac{\mathbf{E}_{ph}}{\mathbf{E}_{p0}} \right|^2 = 4 \cos^2 \theta \sin^2 \left( \frac{2\pi n z}{\lambda \cos \theta} + \delta_p \right), \quad (15)$$

$$\left| \frac{\mathbf{E}_{pv}}{\mathbf{E}_{p0}} \right|^2 = 4 \sin^2 \theta \cos^2 \left( \frac{2\pi n z}{\lambda \cos \theta} + \delta_p \right), \quad (16)$$

式中  $\delta_p$  为 p 偏振光反射前后的相位跃变, 表示为:

$$\delta_p = 2 \arctan \left( - \frac{n \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}}{\cos \theta} \right). \quad (17)$$

将 p 偏振光水平方向的电矢量与竖直方向叠加得到合成波的相对最大光强为:

$$\left| \frac{\mathbf{E}_p}{\mathbf{E}_{p0}} \right|^2 = \left| \frac{\mathbf{E}_{ph}}{\mathbf{E}_{p0}} \right|^2 + \left| \frac{\mathbf{E}_{pv}}{\mathbf{E}_{p0}} \right|^2 = 2 - 2 \cos 2\theta \cos 2 \left[ \frac{2\pi n z}{\lambda \cos \theta} + 2 \arctan \left( - \frac{n \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}}{\cos \theta} \right) \right]. \quad (18)$$

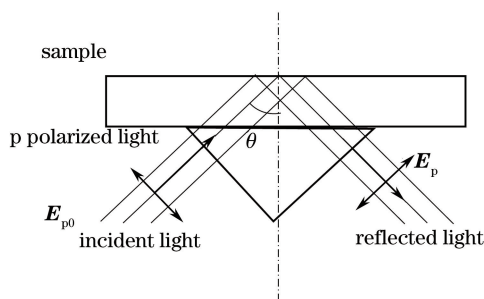


图 4 p 偏振光叠加示意图

Fig. 4 Schematic diagram of superposition of p polarized light

### 2.3.3 Matlab 数据仿真

已知被测件的折射率  $n=1.52$ , 由此可知发生全反射的临界角为  $41.14^\circ$ , 取入射角为  $41.5^\circ$ , 由激光器说明书知道入射激光波长为  $532 \text{ nm}$ , 使用 Matlab 仿真 s 波和 p 波在不同深度( $z$ )位置时的最大驻波相对强度。



如图 5 所示,当入射角度为  $41.5^\circ$  时,s 偏振光形成的驻波的最大强度是入射光强度的 4 倍,强度随着深度呈正弦变化。而 p 偏振光形成的驻波的最大强度是入射光强度的  $4\cos 2\theta$  倍。由此可知,p 波观测到的损伤点光强始终弱于 s 波观测的结果,而且随着  $\theta$  的改变,p 波的光强可能会完全消失,也就是观察不到损伤点。

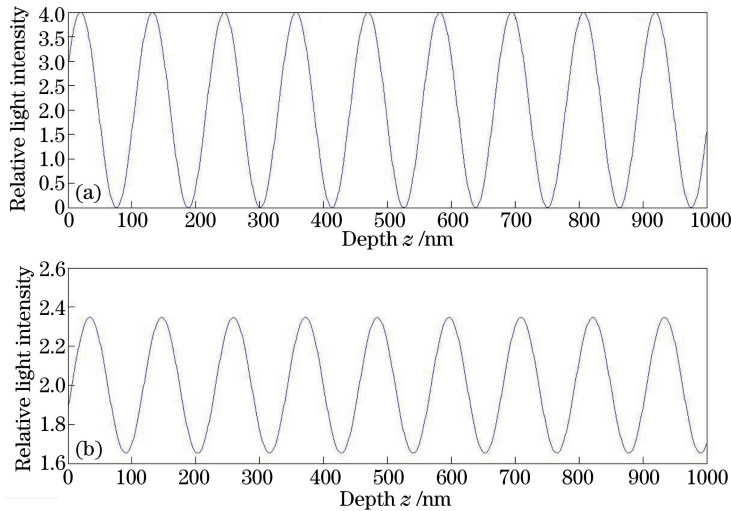


图 5 入射角为  $41.5^\circ$  时,s(p)偏振光形成驻波的相对光强。(a)s 偏振光;(b)p 偏振光

Fig. 5 Relative light intensity of the standing wave formed by s(p) polarized light when the incident angle is  $41.5^\circ$ .

(a) s polarized light; (b) p polarized light

通过 Matlab 软件仿真,不难发现 s 偏振光的最大驻波光强始终强于 p 偏振光,而且 s 偏振光的最大驻波光强不随入射角度的改变而改变,所以使用 s 偏振光观测亚表面损伤点更稳定、清楚,也就是说应该使用 s 偏振光观察和分析亚表面损伤点(之后的分析都是基于 s 偏振光)。

## 2.4 入射角度对损伤点可见度的影响

折射率  $n$  取 1.52,入射激光波长为 532 nm,使用 Matlab 软件分别仿真入射角  $\theta$  为  $41.5^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $50^\circ$  时,s 偏振光入射时的相对强度随深度的变化。对比图 6(a)、(b)、(c)分析可得,随着入射光波角度的增加,s 光形成的驻波的相对强度没有发生改变,而驻波的周期发生了改变。也就是说随着入射角度的改变,同一深度、同一位置的损伤点的光强会随之改变,可能从暗到明,也可能从明到暗。

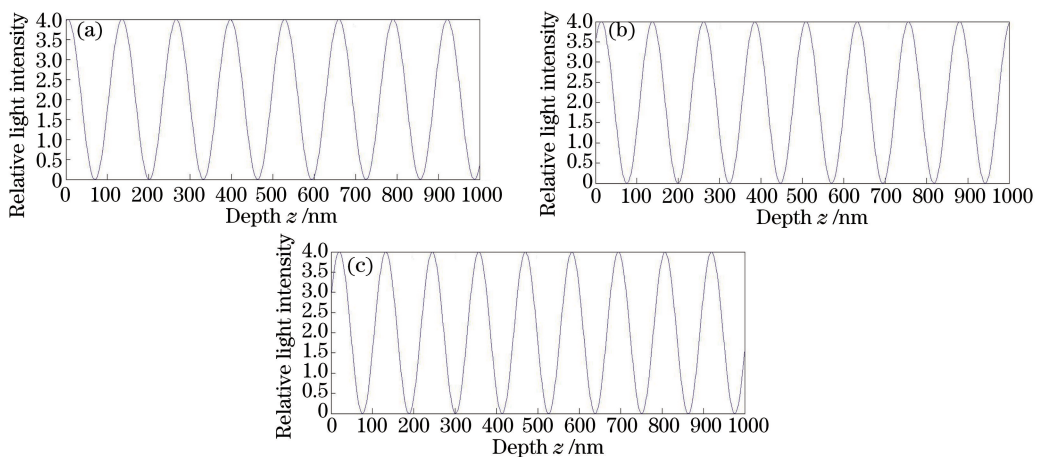


图 6 入射角度不同时,s 偏振光的驻波相对光强。(a)  $41.5^\circ$ ;(b)  $45^\circ$ ;(c)  $50^\circ$

Fig. 6 Relative light intensity of the standing wave formed by s polarized light when the incident angle changes. (a)  $41.5^\circ$ ; (b)  $45^\circ$ ; (c)  $50^\circ$

通过分析亚表面损伤的产生机理,得到亚表面损伤的位置大约位于表面以下  $1\sim 100\ \mu\text{m}$  之间。如图 7 所示,分别模拟了深度为 1000,1500,2000,2500 nm 时驻波的相对光强和入射角度的关系。从图中可得,由于相位跃变是入射角度的函数,所以图像无法维持其正弦性,当入射角从全内反射角的临界值开始增大,深

度为 1000 nm 时,分别在 45.4°和 56.1°处相对光强最大,角度改变为 10.7°;深度为 1500 nm 时分别在 44.9°和 52.7°处相对光强最大,角度改变为 7.8°,深度为 2000 nm 时分别在 44.9°和 51.2°处相对光强最大,角度改变为 6.3°。从而可以通过损伤点第一次从可见到不可见再到可见的角度变化值来估计损伤点的深度位置。表 1 所示的是深度位置从 1000 nm 到 3500 nm 所对应的角度变化值。

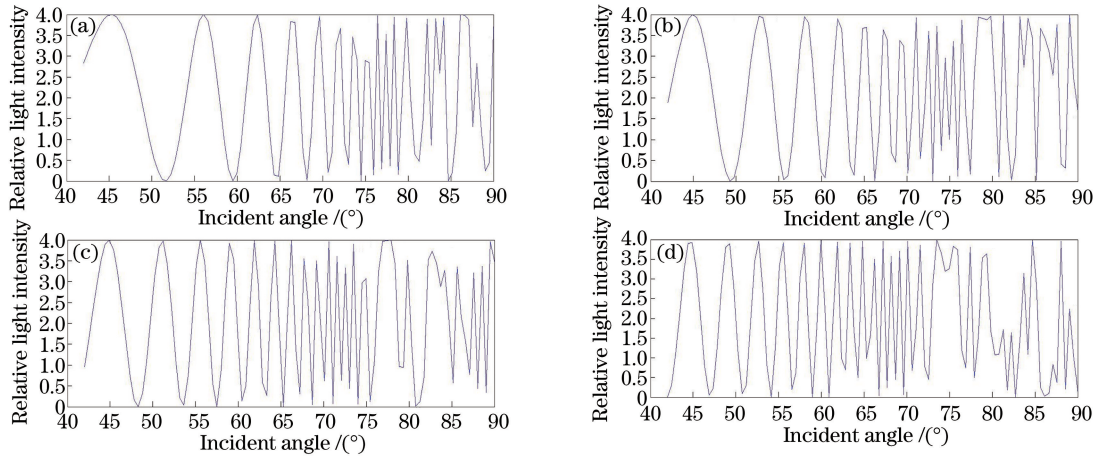


图 7 不同深度位置,相对光强与入射角度的关系。(a)1000 nm;(b)1500 nm;(c)2000 nm;(d)2500 nm

Fig. 7 Relationship between relative light intensity and incident angle with different depths.

(a)1000 nm; (b)1500 nm; (c)2000 nm; (d) 2500 nm

表 1 不同深度处,第一次和第二次相对光强最大时的角度差值

Table 1 Degrees change of maximum relative light intensity for the first time and the second time with different depths

Depth /nm	First time the max / (°)	Second time / (°)	Degrees change value / (°)
1000	45.4	56.1	10.7
1500	44.9	52.7	7.8
2000	44.9	51.2	6.3
2500	44.9	49.8	4.9
3000	44.9	49.3	4.4
3500	44.4	48.3	3.9

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 实验装置说明

亚表面损伤实验测量装置如图 8 所示,由光纤激光器发射的光首先经过图 8(b)的转折光路,再从下方照射到图 8(a)中装置中心的黑色空心铝板上的待测样片上,最后由上方的显微镜观测实验结果,而与显微镜直接相连的 CCD 则将实验结果图存入电脑。

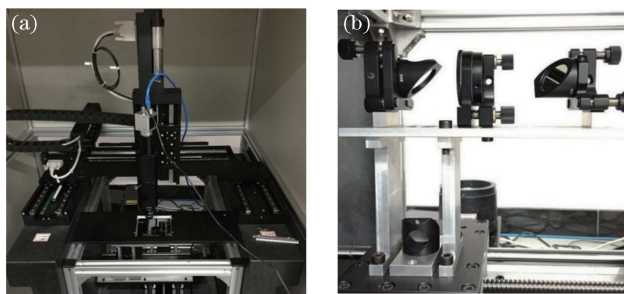


图 8 实验装置图。(a)图像采集部分;(b)光路部分

Fig. 8 Photos of experimental device. (a) Image acquisition part; (b) light path part

### 3.2 偏振态对亚表面损伤点可见度的影响

图 9 和图 10 分别是当入射角度为  $41.5^\circ$  时, s 偏振态下的亚表面损伤图和 p 偏振态下的损伤图, 可以清楚地看到, s 偏振态下损伤图的光强度更大, 所以通过 s 偏振光来观测亚表面损伤更为合适。

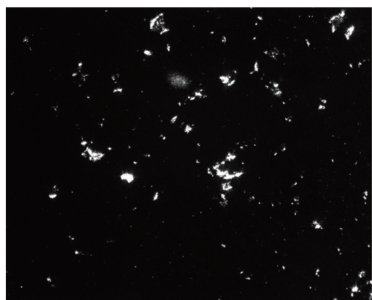


图 9 s 偏振态下的亚表面损伤图

Fig. 9 Subsurface damage image with s polarized light

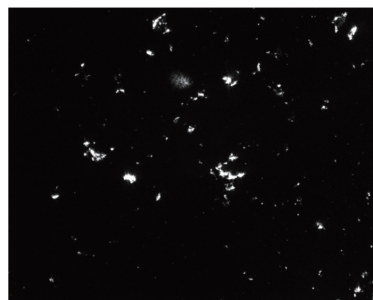


图 10 p 偏振态下的亚表面损伤图

Fig. 10 Subsurface damage image with p polarized light

### 3.3 入射角度对亚表面损伤点可见度的影响

图 11 为 s 偏振光在  $45^\circ$  时的损伤图, 图 12 为选定待测位置后的  $42^\circ \sim 62^\circ$  的损伤组图, 共 21 幅, 用 Matlab 软件求得  $42^\circ$  到  $62^\circ$  的损伤图中所圈出的亮点位置的平均光强值如表 2 所示。将表 2 中的数据进行折线图处理如图 13 所示, 当入射角度从全内反射初始角  $41.5^\circ$  慢慢增大时, 图中圈出的损伤点可见度慢慢增强, 在  $44^\circ$  时达到最强。当入射角度从  $44^\circ$  变化到  $47^\circ$  时, 该损伤点的可见度变为最低, 当入射角度从  $47^\circ$  变到  $48^\circ$  时, 该损伤点的可见度再次变为最大, 将实际测量曲线(图 13)与仿真图(图 7)对比, 发现从  $45^\circ \sim 60^\circ$ , 图 13 包含 4 个周期, 而图 7(c) 包含 3.5 个周期, 图 7(d) 包含 5 个周期, 说明该损伤点的位置大概位于  $2000 \sim 2500 \text{ nm}$  之间。



图 11 s 偏振光  $45^\circ$  时的亚表面损伤图

Fig. 11 Subsurface damage image with s polarized light when the incident angle is  $45^\circ$

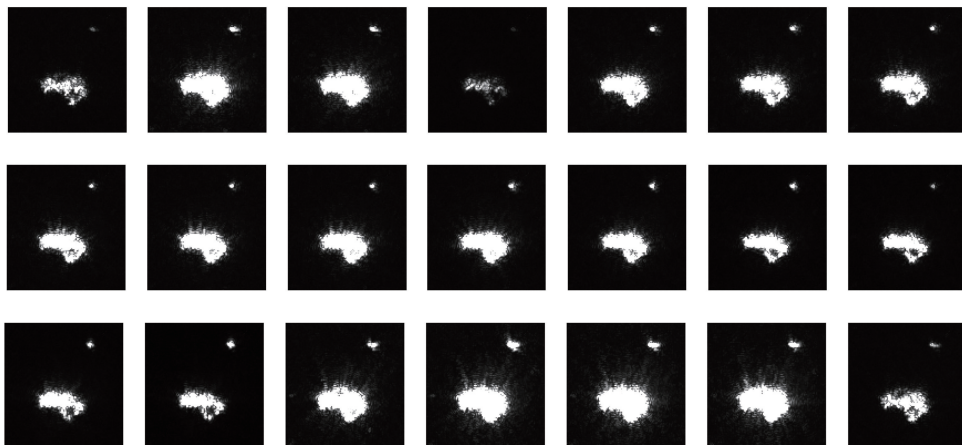


图 12 亚表面损伤点组图( $42^\circ \sim 62^\circ$ )

Fig. 12 Subsurface damage images(from  $42^\circ$  to  $62^\circ$ )

表 2 亚表面损伤点光强随入射角度变化

Table 2 Subsurface damage points intensity varies with incident angle

Incident angle /( $^{\circ}$ )	42	43	44	45	46	47	48
Intensity /gray value	185.4	206.5	209.03	196.96	74.83	28.6	202.96
Incident angle /( $^{\circ}$ )	49	50	51	52	53	54	55
Intensity /gray value	187.5	15.03	196.26	202.06	66.6	29.3	185.5
Incident angle /( $^{\circ}$ )	56	57	58	59	60	61	62
Intensity /gray value	174.2	55.6	35.4	186.06	174.52	74.3	43.2

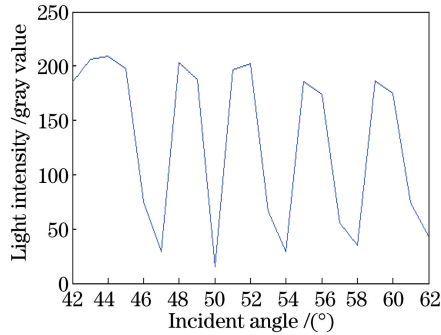


图 13 测量所得亚表面损伤点光强与入射角关系图

Fig. 13 Relationship between measured subsurface damage points intensity and incident angle

## 4 结 论

基于全内反射法检测亚表面损伤的基本原理,通过驻波理论建立了亚表面损伤可见度与入射光波偏振态以及入射角之间的数学关系。用 Matlab 软件仿真了损伤点光强度与损伤深度以及入射角之间的关系曲线,并结合实际测量结果进行分析。最终实现了由实验曲线与仿真曲线之间的比对估计亚表面损伤深度的目的。表明了全内反射法对于亚表面损伤检测具有重要的意义,对以后的亚表面损伤检测有着一定的指导作用。

## 参 考 文 献

- 1 Fine K R, Garbe R, Gip T, *et al.* Non-destructive real-time direct measurement of subsurface damage[C]. SPIE, 2005, 5799: 105-110.
- 2 Wang Zhuo. Study on the detection and control techniques of subsurface damage in optical fabrication[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.  
王 卓. 光学材料加工亚表面损伤检测及控制关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- 3 Deng Yan, Xu Qiao, Chai Liqun, *et al.* Total internal reflection microscopy: a subsurface defects identification technique in optically transparent components[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(6): 835-840.  
邓 燕, 许 乔, 柴立群, 等. 光学元件亚表面缺陷的全内反射显微检测[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(6): 835-840.
- 4 Li Gailin. Theoretical and experimental research on the measurement of grinding subsurface damages for optical materials [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.  
李改灵. 光学材料磨削加工亚表面损伤测量的理论与实验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- 5 Liu Jian, Ma Zhanlong, Wang Junlin. Research status of subsurface damage detection technology of optical elements[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(8): 081204.  
刘 健, 马占龙, 王君林. 光学元件亚表面损伤检测技术研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(8): 081204.
- 6 Tian Ailin, Wang Hui, Wang Chunhui. Simulation research on the light-scattering properties of the subsurface damage of optical components[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 090806.  
田爱玲, 王 辉, 王春慧. 光学元件亚表面损伤的激光散射仿真研究[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 090806.
- 7 Cui Hui, Liu Shijie, Zhao Yuanan, *et al.* Study on total internal reflection microscopy for subsurface damage[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0612004.  
崔 辉, 刘世杰, 赵元安, 等. 全内反射显微技术探测亚表面缺陷新方法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0612004.
- 8 Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 294-298.  
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 294-298.