

10. $6\mu\text{m}$ 波长时金属光学常数的测定

张新昌 朱力力

(山西大学电子信息技术系, 太原, 030006)

摘要: 提出了一种可用于红外检偏的偏振器原理设计, 用于强二氧化碳激光束作用下金属光学常数的测定, 并论述了通过实验测量求光学常数的计算方法。

关键词: 光学常数 偏振器 复折射率

Measurement of optical constants of metal materials at 10. $6\mu\text{m}$ wavelength

Zhang Xingchang, Zhu Lili

(Department of Electronics and Information Technology, Shanxi University, Taiyuan, 030006)

Abstract: This paper reported the design of a polarizer, which is used in detection of the optical constant of metal materials. The polarizer is composed of three reflective mirrors set at Brewster's angle. This polarized laser beam is employed experimentally to detect the reflective properties or optical constants of metal surface at different incident angles.

Key words: optical constant polarizer complex refracting power

引 言

众所周知, 金属的光学性质可用其复折射率 $N = n + ik$ 来表征, 光学常数 n 和 k 是波长和温度的函数。在激光加工业蓬勃发展的今天, CO_2 激光器以其高功率和高效率成为一种主要的加工光源, 测量不同金属或同种金属的不同结构形态(或不同表面状况)在 $10.6\mu\text{m}$ 波长时的光学常数, 就可推知其对该波长光束的反射与吸收情况, 这对选择激光加工参数有重要指导意义; 同时若测量各种镀金属膜反射镜的光学常数, 就可推知光束经反射镜折反后其光强与偏振态的变化情况, 这对激光加工外光路的设计也有重要意义。

金属光学常数的测定是一个古老的课题。测出这些量的值, 特别是根据它们随波长的变化, 就可得出关于金属结构的信息。它对金属理论的发展曾起过重要作用。在可见波段, 前人已做了大量的工作, 从有关资料中可查到多种金属在某些可见波长下的光学常数值。传统的测量方法是测偏振法^[1], 即如果斜射到金属表面的是平面偏振光, 反射光将是椭圆偏振光, 根据椭圆的偏心率与位置可算出两光学常数值。但在红外波段, 不能用普通的偏振片或偏振器来检偏, 测量比较困难。虽然我们已知众多金属在红外波段具有高反射低吸收的特性, 但迄今为止, 在光学手册或其他资料中仍难以查到各种金属在红外波段的光学常数值。同时强激光束照射下金属表面的温度与弱光情况会显著不同, 金属表面的结构、磨平状况也各不相同, 因此, 即使能查到某些数据, 也只有参考意义, 与实际情况可能相距甚远, 做一些实际的测量仍是很必要的。

一、测量装置与原理

我们采用测量偏振法,提出了一种红外偏振器的原理设计,它采用当光束以布儒斯特角 θ_B 入射时反射起偏的原理,结构如图 1 所示。

图中 M_1, M_2, M_3 为三块抛光的锗(或砷化镓)平板, M_1 和 M_3 的入射角为 θ_B , 锗在 10.6μm 附近的折射率为 4.02, 由: $\tan\theta_B = 4.02$, 得 $\theta_B \approx 76^\circ$ 。采用三镜结构的目的是为了保持原光路方向不变, 以便于偏振器插入光路, 同时采用二次布儒斯特角反射起偏, 也可减小对镜片安装精度要求。偏振器安装在一圆筒内, 便于与光路管道相连接且可灵活绕轴旋转。在接口处刻上 0~ 360° 刻度以便读出旋转角度。若各锗片背面都通水冷却, 可允许大功率激光束入射, 同时冷却水将透射光吸收, 可防止透射光在管壁的漫反射。

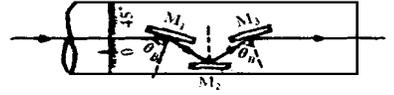


Fig. 1 The structure of polarizer

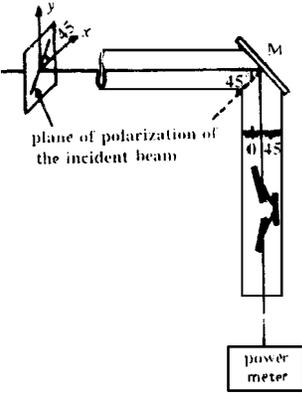


Fig. 2 The arrangement of the measurement setup

测量装置原理图如图 2 所示。M 是待测的金属磨平样品(或待测的镀金属膜反射镜), 用大功率激光束测量时其背面也要通水冷却。设入射激光束为平面偏振光, 其偏振面与 M 入射面(yz 面)成 45°角。若光束以入射角 $\theta_i = 45^\circ$ (θ_i 也可任意值)入射到 M 上, 经 M 反射后将垂直向下进入检偏器, 检偏器的输出光强由功率计检测。旋转检偏器可得出光强随转角 θ 的分布曲线图。

有些激光器(如南京东方激光公司的 G-515 工业 CO₂ 激光器)输出的就是偏振面与水平面成 45°角的平面偏振光, 可直接用来做为测试光源。如果入射光是非偏振光, 可用一个同样的偏振器起偏。

测量原理: 当入射光偏振面与 M 入射面成 45°角时, 它相对于入射面的垂直分量振幅 A_{\perp} 与平行分量振幅 A_{\parallel} 相等。设反射光的两分量振幅分别为 A'_{\perp} 与 A'_{\parallel} , 它们的相移分别为 Φ_{\perp} 与 Φ_{\parallel} , 令 $\Delta = \Phi_{\parallel} - \Phi_{\perp}$, 则反射光的两振动分量可表示为:

$$x = A'_{\perp} \cos \omega t; y = A'_{\parallel} \cos(\omega t + \Delta)$$

它是一个椭圆偏振光, 其椭圆方程为: $x^2/A'^2_{\perp} + y^2/A'^2_{\parallel} - [(2\cos \Delta)/(A'_{\perp} A'_{\parallel})]xy = \sin^2 \Delta$

要确定椭圆的主轴位置, 我们以 z 为轴将 xy 面旋转角度 α 得新坐标轴 x', y' , 使其变为正椭圆。两坐标的关系从图 3a 可知: $x = x' \cos \alpha - y' \sin \alpha; y = x' \sin \alpha + y' \cos \alpha$

代入上述椭圆方程, 整理后得:

$$x'^2 \left[\frac{1}{A'^2_{\perp}} \cos^2 \alpha + \frac{1}{A'^2_{\parallel}} \sin^2 \alpha - \frac{\cos \Delta}{A'_{\perp} A'_{\parallel}} \sin 2\alpha \right] + y'^2 \left[\frac{1}{A'^2_{\perp}} \sin^2 \alpha + \frac{1}{A'^2_{\parallel}} \cos^2 \alpha + \frac{\cos \Delta}{A'_{\perp} A'_{\parallel}} \sin 2\alpha \right] + x'y' \left[\frac{1}{A'^2_{\perp}} \sin 2\alpha - \frac{1}{A'^2_{\parallel}} \sin 2\alpha - \frac{\cos \Delta}{A'_{\perp} A'_{\parallel}} \cos 2\alpha \right] = \sin^2 \Delta$$

正椭圆的条件是 $x'y'$ 项的系数应等于零, 得

$$\tan 2\alpha = [(A'_{\perp} - A'_{\parallel}) / (A'^2_{\perp} - A'^2_{\parallel})] \cos \Delta \tag{1}$$

此时椭圆方程可写为 $x'^2/a^2 + y'^2/b^2 = 1$

$$\text{式中, } \frac{1}{a^2} = \left[\frac{1}{A'^2_{\perp}} \cos^2 \alpha + \frac{1}{A'^2_{\parallel}} \sin^2 \alpha - \frac{\cos \Delta}{A'_{\perp} A'_{\parallel}} \sin 2\alpha \right] / \sin^2 \Delta \tag{2}$$

$$1/b^2 = [(1/A'_{\perp})^2] \sin^2 \alpha + (1/A'_{\parallel})^2 \cos^2 \alpha + \cos \Delta \sin 2\alpha / (A'_{\perp} A'_{\parallel}) / \sin^2 \Delta \quad (3)$$

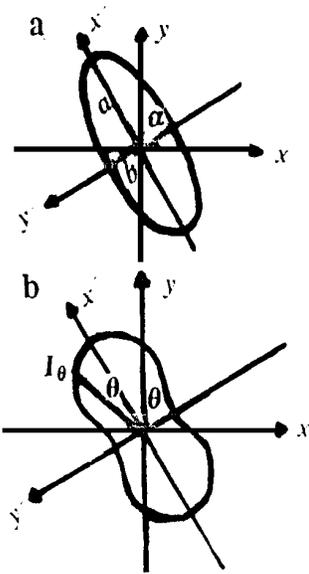


Fig. 3 a—The coordinate converting relation b—The distribution of light intensity

式中, a, b 分别为椭圆的长短半轴。令 $\rho = (A'_{\perp}/A_{\perp}) / (A'_{\parallel}/A_{\parallel}) = A'_{\perp}/A'_{\parallel}$, 代表两分量反射系数之比, 则(1)式可写为:

$$\tan 2\alpha = \rho \cos \Delta / (\rho^2 - 1) \quad (4)$$

由(2)式, (3)式得

$$\frac{b^2}{a^2} = \frac{\cos^2 \alpha + \rho \sin^2 \alpha - \rho \cos \Delta \sin 2\alpha}{\sin^2 \alpha + \rho^2 \cos^2 \alpha + \rho \cos \Delta \sin 2\alpha} \quad (5)$$

上两式表明, 只要实验测出表征椭圆位置的 α 值和比值 b^2/a^2 , 则可由(4)式, (5)式算出两分量反射系数之比 ρ 和相差 $\Delta = \Phi_{\parallel} - \Phi_{\perp}$ 。

求出 ρ 和 Δ 后, 令 $\rho = \tan \Psi$, 就可由下式求出^[2]:

$$n^2 - k^2 = \sin^2 \theta_i \left\{ 1 + \frac{\tan^2 \theta_i (\cos^2 2\Psi - \sin^2 2\Psi \sin^2 \Delta)}{(1 + \sin 2\Psi \cos \Delta)^2} \right\} \quad (6)$$

$$2nk = \sin^2 \theta_i [(\tan^2 \theta_i \sin 4\Psi \sin \Delta) / (1 + \sin 2\Psi \cos \Delta)^2] \quad (7)$$

由菲涅耳反射公式知, 除入射角 $\theta_i = 0$ 或 $\theta_i \approx 90^\circ$ (掠入射) 两种情况外, 垂直分量的反射系数总大于平行分量的反射系数, 即 $\rho = \tan \Psi > 1$, Ψ 是一个大于 45° 的值, 则(7)式中 $\sin 4\Psi$ 是一个负值, 因此, $\sin \Delta$ 也应是负值。所以要

注意, 利用(4)式计算 Δ 值时, 对应同一个 $\tan 2\alpha$ 值, Δ 有正负两个可能的角度取值, 只能取负值(例若 $\rho = 1.02$, $\tan 2\alpha = -10$, 则(4)式得: $\cos \Delta = 0.3961$, $\Delta = 113.33^\circ$ 或 -113.33° 。只能取 $\Delta = -113.33^\circ$), Δ 只能取负意味着平面偏振光经金属面反射后变为左旋椭圆偏振光。

当入射角 $\theta_i = 45^\circ$ 时, (6), (7)两式变得较简单:

$$n^2 - k^2 = (1/2) \{ 1 + [(\cos^2 2\Psi - \sin^2 2\Psi \sin^2 \Delta) / (1 + \sin 2\Psi \cos \Delta)^2] \} \quad (8)$$

$$2nk = \sin 4\Psi \sin \Delta / [2(1 + \sin 2\Psi \cos \Delta)^2] \quad (9)$$

求出 $n^2 - k^2$ 和 $2nk$ 后, 即可算出光学常数 n 和 k 。

二、实验测定方法

这里我们说明如何实验测出表征椭圆位置的 α 值和 b^2/a^2 值。 $x'y'$ 平面上的正椭圆偏振光在 $x'y$ 面上的光强分布应为:

$$I_{\theta'} = a^2 \cos^2 \theta' + b^2 \sin^2 \theta'$$

如图 3b 所示。 θ' 是指与 x' 轴的夹角方向。由于 $\theta = \theta' + \alpha$, 换算到 xy 平面上的光强分布为:

$$I_{\theta} = a^2 \cos^2 (\theta - \alpha) + b^2 \sin^2 (\theta - \alpha) \quad (10)$$

我们让检偏器的入射面与待测金属面 M 的入射面一致时, 检偏器的位置刻度值 $\theta = 0$, 在此位置时, 功率计读出的是 x 方向的相对光强。然后旋转检偏器, 逐点测出不同 θ 值所对应的相对光强, 就可得出如图 3b 所示的光强分布曲线图。当 $\theta = \alpha$ 或 $\theta = \alpha + 180^\circ$ 时, 对应光强最大值 a^2 , 而当 $\theta = \alpha \pm 90^\circ$ 时, 对应光强最小值 b^2 , 则可确定 α 和 b^2/a^2 的大小。

最后说明一点, 我们采用入射角 $\theta_i = 45^\circ$, 主要是为了方便验证。因为在 $\theta_i = 45^\circ$ 时, 菲涅耳反射公式可用复折射率表示为:

$$A'_{\perp} / A_{\perp} = \sin(\theta_i - \theta_t) / \sin(\theta_i + \theta_t) = (1 - \sqrt{2N^2 - 1}) / (1 + \sqrt{2N^2 - 1}) \quad (11)$$

$$A'_{\parallel} / A_{\parallel} = \tan(\theta_i - \theta_t) / \tan(\theta_i + \theta_t) = (N^2 - \sqrt{2N^2 - 1}) / (N^2 + \sqrt{2N^2 - 1}) \quad (12)$$

光学相干层析成像技术的应用

胡晓云 刘 琳 陆治国
(西北大学物理系, 西安, 710069)

摘要: 介绍了光学相干层析成像技术在不同领域的应用, 预言了未来的发展趋势。

关键词: 光学相干层析成像(OCT) 低相干度干涉(LCI) 生物组织 干涉仪

Application of optical coherence tomography

Hu Xiaoyun, Liu Lin, Lu Zhiguo
(Department of Physics, Northwest University, Xi'an, 710069)

Abstract: In this paper the application of optical coherence tomography in different fields was introduced and the possible future developments are presented.

Key words: optical coherence tomography(OCT) low coherence interferometry(LCI) tissues interferometer

引 言

现在所有的光学相干层析成像(OCT)系统都是几何光学扫描系统, 利用低相干度干涉(LCI)获得厚度信息。LCI或白光干涉应用于工业计量中已有多年了。现在所有的OCT技

若已测出光学常数 n 和 k , 将 $N = (n + ik)$ 代入(11)式, (12)式, 即可算出 ρ 和 Δ 值, 它应与实验得出的结果一致。从测量本身来说, 不一定要 $\theta_i = 45^\circ$, 特别是对于某些高反射率金属, 例如银(10.6 μm 时, $n = 9.5$, $k = 73$)^[3], 它在 $\theta_i = 45^\circ$ 时, 由(11)式, (12)式算出 $\rho \approx 1.0026$, $\Delta \approx -178.9^\circ$, 与 M 入射面成 45° 角入射(即 $\alpha = 45^\circ$)的平面偏振光经银面反射后几乎仍近似为平面偏振光($\alpha \approx 135^\circ$), 实验很难测出 b^2/a^2 的准确值, 导致实验误差很大。若增大入射角 θ_i , 让 θ_i 接近于主入射角 θ_1 (主入射角定义见文献[2]), 使 $\Delta \rightarrow -\pi/2$, 可减小椭圆的偏心率, 有利于准确测出 b^2/a^2 值。

三、结 论

采用作者所述的偏振器装置旋转一周时可绘出待测面反射光的光强分布图, 由此图可确定表征椭圆位置的 α 值和最大光强值 a^2 及最小光强值 b^2 , 然后可算出两分量的反射系数比 ρ 和相差 Δ , 最后由(6)式, (7)式即可得出待测面的光学常数。

参 考 文 献

- 1 莫特 N F, 琼斯 H. 金属与合金性质的理论. 北京: 科学出版社, 1958: 116
- 2 玻恩 M, 沃尔夫 E. 光学原理(下册). 北京: 科学出版社, 1981: 825~ 827
- 3 阎毓禾, 钟敏霖. 高功率激光加工及其应用. 天津: 天津科学技术出版社, 1994: 174

作者简介: 张新昌, 男, 1940年1月出生。教授。从事光电子学教学与研究工作。