

金属网栅法布里-珀罗干涉仪测量太赫兹波波长

蒋呈阅 蔡 瑞 刘劲松 王可嘉 汪盛烈

(华中科技大学光电子科学与工程学院 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 设计并制作了用于测量波长大于 $150\ \mu\text{m}$ (频率低于 $2\ \text{THz}$) 的太赫兹波波长的金属网栅法布里-珀罗干涉仪 (FPI)。采用光电子微纳制造工艺制作了五组周期不大于 $40\ \mu\text{m}$, 线宽不大于 $10\ \mu\text{m}$ 的有衬底方形金属网栅, 利用太赫兹时域光谱技术测量了金属网栅的太赫兹波段光电特性, 得到了各组金属网栅在感兴趣频段的反射率和金属网栅 FPI 的反射精细度, 结果表明所制作的金属网栅 FPI 均可用于测量波长大于 $150\ \mu\text{m}$ 的太赫兹波。实验搭建金属网栅 FPI 扫描测量了 $212\ \mu\text{m}$ 的太赫兹波波长, 与理论结果吻合。研究了金属网栅 FPI 对太赫兹波偏振方向的依赖性以及对 FPI 腔镜平行度的要求, 结果表明, 方形金属网栅 FPI 对正入射太赫兹波偏振方向不敏感, 而对 FPI 腔镜平行度很敏感。

关键词 光学器件; 太赫兹波; 金属网栅; 法布里-珀罗干涉仪; 时域光谱术

中图分类号 O431.1; O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1112009

Measurements of Terahertz Wavelength Using Metallic Mesh Fabry-Pérot Interferometer

Jiang Chengyue Cai Rui Liu Jinsong Wang Kejia Wang Shenglie

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Several metallic mesh Fabry-Pérot interferometers (FPI) are designed and manufactured to measure terahertz waves with wavelengths larger than $150\ \mu\text{m}$ (that is less than $2\ \text{THz}$ in frequency). Metallic meshes with five different structural parameters whose periods are less than $40\ \mu\text{m}$ and linewidths are less than $10\ \mu\text{m}$ are fabricated by employing optoelectronics micro-nano manufacturing technology. By using terahertz time-domain spectroscopy, the refractive indices of the meshes and the refractive finesses of the FPI in terahertz wave band are obtained. Results show that all the meshes can work well for the interesting wavelengths. In order to test the feasibilities of the FPI, a wavelength of $212\ \mu\text{m}$ is measured. Results show good agreements with theory. Moreover, dependences on the polarization orientation of the terahertz waves and the parallelism of the FPI are also demonstrated, and it is found that the FPI is insensitive to the polarization of the terahertz waves while susceptible to the parallelism of the FPI.

Key words optical devices; terahertz wave; metallic mesh; Fabry-Pérot interferometer; time-domain spectroscopy

OCIS codes 230.1950; 050.2230; 040.2235

1 引言

太赫兹波是一种频率范围介于 $0.1\sim 10\ \text{THz}$ (波长 $3000\sim 30\ \mu\text{m}$) 的远红外电磁波, 是当前的研究热点之一。由于其介于光波和微波之间, 所处频

率位置特殊, 成熟的适用于光波段及微波的光谱仪或波长计不能满足太赫兹波的波长测量需要, 于是人们便开发出各种金属光栅用于太赫兹波段测量, 如一维条状金属光栅、二维金属网栅等^[1], 取得了不

收稿日期: 2012-05-25; **收到修改稿日期**: 2012-06-07

基金项目: 国家自然科学基金 (10974063, 61177095, 60907045)、湖北省重点基金 (2010CDA001)、教育部博士点基金 (20100142110042) 和中央高校基本科研业务费 (2010MS041, 2011TS001, 2012QN094, 2012QN097) 资助课题。

作者简介: 蒋呈阅 (1985—), 男, 博士研究生, 主要从事太赫兹波探测方面的研究。E-mail: jiangcy125@126.com

导师简介: 刘劲松 (1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事太赫兹光电子学、激光物理与随机激光器、非线性光学与空间光孤子和人工电磁材料等方面的研究。E-mail: jsliu4508@vip.sina.com (通信联系人)

错的效果。法布里-珀罗标准具(或干涉仪)自其发明之日起,便得到广泛应用,如激光雷达^[2]、传感器^[3]和滤波器^[4,5]等。20世纪60年代,Ulrich等^[6,7]利用无衬底金属网栅构建法布里-珀罗干涉仪(FPI)应用于远红外波段光谱测量,如水蒸汽和CO气体的汞灯吸收谱。这种结构被Shikata等^[8]继承并应用于太赫兹参变振荡器(TPO)输出的太赫兹辐射的波长测量,效果不错。其优点是精细度高、测量结果准确,但无衬底金属网栅对制作工艺要求高且对保存条件苛刻,此外,构建FPI时难于安装及保证两金属网栅的平行度。Ding等^[9]则选用对太赫兹波透射率较高的半导体如Ge、GaAs等作为太赫兹波反射镜搭建FPI测量窄线宽太赫兹波波长。由于这些作为FPI腔镜的半导体材料对太赫兹波有较低反射率,可以预见这种干涉仪的精细度较低,测量结果不理想。但是其优点是廉价、易于安装调节、保证平行度,且对仪器保存要求不高。此外,Scheller等^[10]则采用迈克耳孙干涉仪方法测量太赫兹波波长,虽然这种方法精细度高且能测量太赫兹波线宽,但是系统复杂、不紧凑。

鉴于当前各种窄线宽太赫兹波波长测试仪的特点,本文采用对太赫兹波有高透射率的半导体材料作为金属网栅的衬底,使用有衬底金属网栅构建FPI来测量窄线宽太赫兹辐射波长^[11],这种结构克服了上述各方法的一些缺点,同时具有廉价、紧凑、易于安装、调节、保证平行度、便于保存和测量结果准确等特点。并详述了有衬底二维金属网栅构建FPI扫描测量太赫兹波波长的制作方法及实验结果。

2 金属网栅 FPI 测试太赫兹波波长的机理

采用光电子微纳制造工艺制作出有衬底金属网栅,将两片金属网栅安装到两个光学调整架上,其中一个光学调整架固定不动,另一个安装到平移台上,就构成了一个可扫描的金属网栅FPI,两片金属网栅的平行度可以通过光学调整架来调节。金属网栅FPI测试太赫兹波波长是基于多光束干涉原理。对于垂直入射的太赫兹波(假设波长为 λ),FPI间距每变化 $\lambda/2n$ (n 为两金属网栅间介质折射率),透射功率便会会出现一次极大或极小值,故可通过平移台改变FPI间距,记录下FPI间距值及对应的太赫兹波透射功率,便可拟合出待测太赫兹波波长。

3 金属网栅的设计与制作

金属网栅在远红外波段的理论及实验上都已比较成熟。Marcuvitz^[1]提出等效电路模型分析一维条状金属光栅的性质,之后该理论得到发展并被实验验证^[6,12]。所谓等效电路模型,就是将金属网栅与其周围电磁环境用等效的电感、电容及电阻元件来表示,并分析整个电磁网络的性质。根据其等效电路元件,金属网栅可分为电感型和电容型,其物理结构互补。

要测量波长大于 $150\ \mu\text{m}$ (频率低于2 THz)的线偏振太赫兹波,须要求金属网栅具有2个特点:1)对偏振方向不敏感;2)在该波长范围内具有较高的反射率以保证构建的FPI有足够的精细度。

对于特点1),二维电感型金属网栅可以满足。由于其方形对称结构,二维金属网栅对垂直入射的电磁波的偏振方向并不敏感。此外,从制作工艺上考虑,电感型金属网栅易于实现,如图1所示, $2a$ 为网栅线宽, g 为网栅周期, t 为网栅厚度。

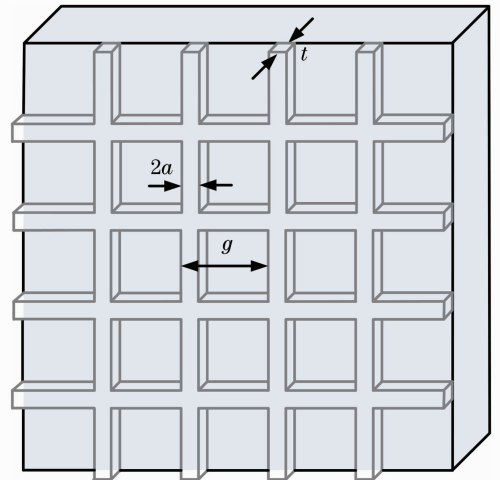


图1 有衬底金属网栅结构示意图

Fig. 1 Structure of the metallic mesh with substrate

对于特点2),网栅的反射率主要由金属的材料,网栅的周期、线宽、厚度以及衬底决定,因此可以通过选材,参数设计来保证。

3.1 金属材料对网栅光电特性的影响

3.1.1 金属膜电导率对网栅反射率的影响

根据Hansen等^[13]的分析结果,当金属膜厚度远小于趋肤深度时,金属的电导率越大,功率反射率越高。该结论也可从文献^[6,12,14]中得出。因此,对同一网栅结构,要获得高反射率可以选用电导率大的金属材料。

3.1.2 金属膜电导率对网栅吸收特性的影响

网栅对电磁波的吸收主要是由于高频电流在网栅中欧姆损耗引起的。在红外频段,网栅的功率(或能量)吸收率可写为^[15]

$$A = \frac{g}{2a} R \left(\frac{10^7 \mu_r}{\sigma_{dc} \lambda} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

式中 μ_r 为金属的相对磁导率, σ_{dc} 为金属的直流电导率, c 为光速, R 为网栅的反射率。由(1)式可以看出,网栅的吸收与金属材料的电导率的开方成反比,所以可以选择铜、银、金、铝和镍等金属,实际应用中人们往往采用镍,因为它的机械性能比较好。而在实验中选择了铜,因为它比镍廉价且电导率高于镍。虽然铜的机械性能不如镍,但由于衬底的支撑使得机械性能上有保障。而且 Ulrich 的实验证实具有相同结构的铜网格和镍网格的透射率相差无几。

3.2 衬底材料的选择

衬底的出现对金属网栅的光电特性有一些影响。Ulrich 的实验表明衬底的出现会增加金属网栅的透射率,此外也会对入射波有一些反射和吸收。尽管如此,考虑到无衬底金属网栅的制作工艺要求高、网栅样品的机械性能差等因素,有衬底的金属网栅不失为一种不错的选择。本实验选择衬底材料为电阻率约为 $3000 \Omega \cdot \text{cm}$ 、厚度约 $300 \mu\text{m}$ 的 N<111>型硅片。

3.3 网栅结构对其光电特性的影响

网栅会对入射太赫兹波产生多级衍射,对于应用网栅构建 FPI 测量太赫兹波长,要求网栅只对太赫兹波中心零级反射和透射,因为如果有边波衍射,会降低 FPI 的精细度,影响 FPI 的性能。根据 Whitbourn^[12]等,网栅周期应满足

$$g < \lambda/n_1, \quad g < \lambda/n_2, \quad (2)$$

式中 n_1, n_2 分别为网栅前后介质折射率。对于感兴趣的波长 $150 \mu\text{m}$,使用硅片衬底(在太赫兹波段,折射率约为 3.42),网栅周期应小于 $44 \mu\text{m}$ 。

金属网栅的线宽 $2a$ 越大,对入射波的反射率越高,综合目前光电子微纳制造工艺水平考虑,设计了如下金属网栅参数,如表 1 所示。

表 1 金属网栅参数设计

Table 1 Designed parameters of metallic meshes

No.	Metal	t / nm	$g / \mu\text{m}$	$2a / \mu\text{m}$
#1	Cu	30	20	6
#2	Cu	30	25	7
#3	Cu	30	30	8
#4	Cu	50	25	7
#5	Cu	50	40	10
Substrate		N<111> Si, Thickness: $300 \mu\text{m}$, Resistivity: $3000 \Omega \cdot \text{cm}$		

4 金属网栅的太赫兹波段光电特性

经过衬底清洗、衬底镀膜、旋涂光刻胶、光刻、显影、金属膜刻蚀以及去胶等光电子微纳制造工艺,有衬底的金属网栅便制作完成。图 2 为制作的 #5 金属网栅的金相显微镜相片,窄带部分为铜膜,方格露出的为衬底硅。

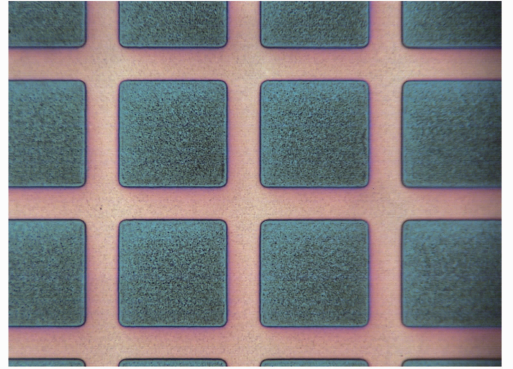


图 2 #5 金属网栅的金相显微镜相片

Fig. 2 Metallographic microscope photographs of the #5 metallic mesh

利用基于太赫兹波时域光谱技术 (THz-TDS) 的 mini-Z 测试了金属网栅样品在感兴趣的太赫兹波段的反射率。图 3 为不同参数的网栅对太赫兹波反射率的影响。样品 #1、#2、#3 的占空比 $(1-2a/g)$ 分别为 0.70、0.72 及 0.73,从图 2 中可以看出,当 $\lambda \gg g$ 时,网栅对太赫兹波的反射率大致与网栅的占空比成反比,图中反射率的周期变化是由于太赫兹脉冲在薄的硅衬底两内表面的形成的 FP 效应的影响。在应用 THz-TDS 测试表面平行的样品时,FP 效应总是存在的,只是有强弱之分。实际应用中,可以通过设置时间窗口来减小或消除 FP 效应对测量结果数据处理带来的干扰。

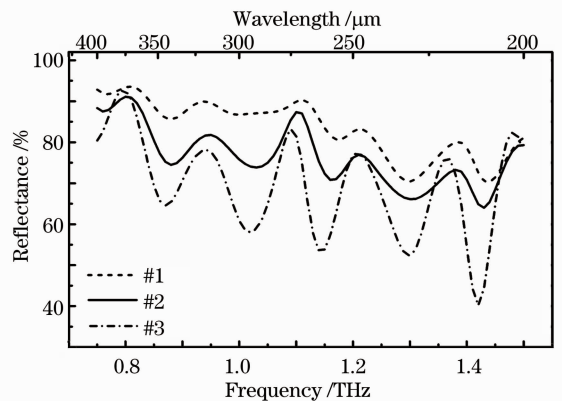


图 3 网栅结构对太赫兹波反射率的影响

Fig. 3 Influence of mesh structures on terahertz wave reflectance

铜在太赫兹波段的趋肤深度也在纳米量级,如处于 0.6 THz 时为 110 nm^[16]。由于金属薄膜的电导率远小于金属体电导率(膜越薄,膜的电导率越小)^[17]。可以估算铜膜在 0.3~3 THz 的趋肤深度为 169~54 nm,所用计算式及参数为

$$\delta = \sqrt{1/(\pi\nu\mu\sigma_{\text{eff}})}, \quad (3)$$

式中 σ_{eff} 为铜膜的有效电导率,取值为铜的直流电导率(约 $5.9 \times 10^7 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)的 1/2, ν 为太赫兹波频率, $\mu = \mu_0\mu_r$ 为导体的绝对磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{C}^2$, μ_r 取 1。根据上述趋肤深度估算结果,可以看出设计的铜膜厚度在亚趋肤深度^[18],而 Hansen 等^[13]的研究表明,当金属膜厚度 t 远小于电磁波的趋肤深度时,金属膜对电磁波的反射率与金属膜厚度成正比。图 4 为亚趋肤深度金属膜厚度对太赫兹波反射率的影响,由图 4 中可以看出,金属膜厚度大者的反射率高。

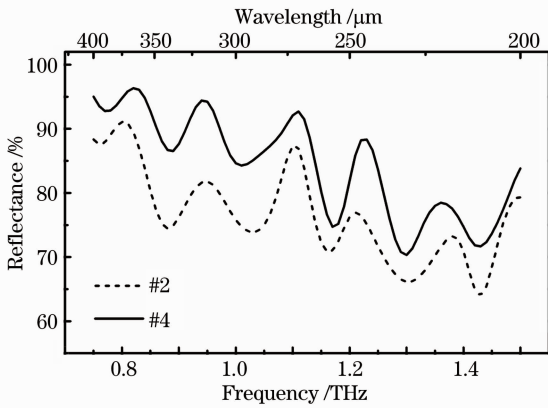


图 4 金属膜厚度对太赫兹波反射率的影响
Fig. 4 Influence of metal films thicknesses on terahertz wave reflectance

5 金属网栅 FPI 的实验结果

理论上讲,FPI 的精细度可以用艾里函数导出的反射精细度 F_R (仅与 FPI 腔镜的反射率有关)描述,但是对于实际的 FP 标准具,反射精细度仅代表实验精细度(或总精细度)的上限。许多因素影响着金属网栅 FPI 的实验精细度,如腔镜表面的缺陷、腔镜的平行性以及太赫兹波入射角等。Belland 等^[15]分析得出,FPI 的实验精细度 F_T 可近似表示为

$$\frac{1}{F_T^2} \simeq \frac{1}{F_R^2} + \frac{1}{F_D^2}, \quad (4)$$

式中 F_D 为总的缺陷精细度,表征表面不平行以及表面缺陷对精细度造成的影响,而

$$F_R = \frac{\pi}{2\arcsin[(1-R)/(2\sqrt{R})]}. \quad (5)$$

图 5 为各个金属网栅 FPI 的理论反射精细度,由图中可以看出,#5-FPI 的反射精细度最低。为了测试有衬底金属网栅 FPI 的有效性,使用制作的各金属网栅 FPI 测量太赫兹波波长。实验中发现,由于#1~#4-FPI 对太赫兹波的高反射率(或低透射率)以及受太赫兹源功率及探测器(Golay cell)灵敏度和信噪比的限制,在干涉极小值附近,信噪比较低,于是得不到足够高信噪比的数据进行拟合。因此为了保证采集到的数据有足够高的信噪比,使用对太赫兹波透射率最大(即以牺牲一定精细度为代价)的#5-FPI 扫描测量了窄线宽太赫兹波波长,实验布置如图 6 所示。实验中手动改变固定在高精密平移台(最小分辨率 1 μm)上的 FPI 间距并通过数字示波器采集输出稳定后的太赫兹波功率数。FPI 的腔镜平行度通过实时观察 He-Ne 校准光经腔镜(Si 衬底表面)反射后的光斑位置保证。

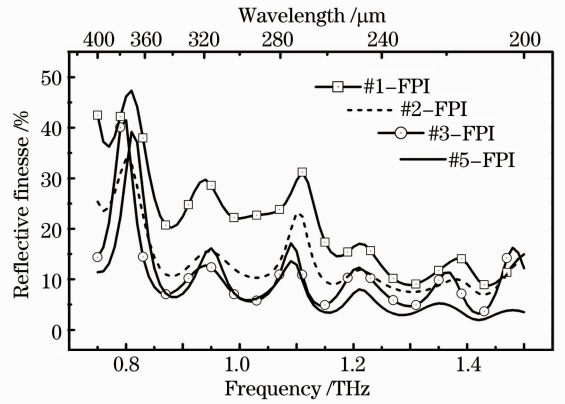


图 5 网栅结构对 FPI 反射精细度的影响
Fig. 5 Dependences of FPI's reflective finesse on mesh structures

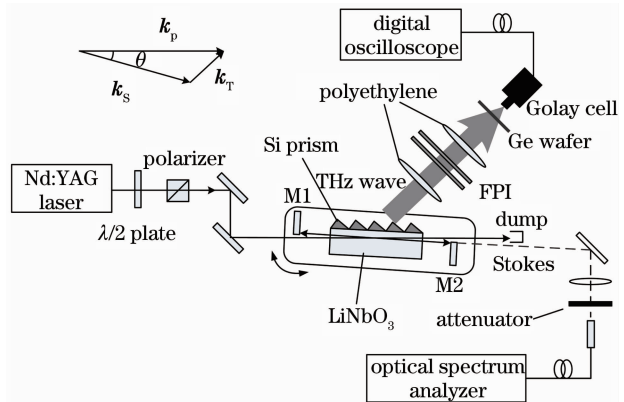


图 6 金属网栅 FPI 测试太赫兹波波长实验布置示意图
Fig. 6 Experimental setup of measuring terahertz wavelength using metallic mesh FPI

待测线偏振太赫兹波是利用基于 LiNbO_3 晶体的太赫兹参量振荡器输出的太赫兹波，太赫兹波参量振荡器的基本工作原理为：抽运光(1064.39 nm)入射到同时具有红外活性和拉曼活性晶格振动模的晶体(如 LiNbO_3)中会发生受激电磁耦子散射过程，该过程中会产生满足能量守恒条件 $\lambda_i/\lambda_p = 1/\lambda_s + 1/\lambda_T$ 和非共线相位匹配条件 ($k_p = k_s + k_T$) 的宽带斯托克斯光和太赫兹波，通过对散射的宽带斯托克斯光加一光学谐振腔，当腔内增益大于损耗时，散射光就会往返持续振荡，从而大大提高斯托克斯光和太赫兹波的输出功率，而且还可以通过改变非共线相位匹配夹角 θ (见图 6 中的波矢匹配关系) 获得一定频率范围的相干窄带、连续可调谐的斯托克斯光和太赫兹波输出。

为了验证有衬底金属网栅 FPI 测试太赫兹波波长的有效性，将用 FPI 扫描测量波长的结果与利用光纤光谱分析仪采集到斯托克斯光谱后根据能量守恒关系换算出来的太赫兹波波长进行了对比：采集到的斯托克斯光中心波长为 1069.70 nm (对应 $\theta \approx 0.60^\circ$)，根据能量守恒条件 ($1/\lambda_p = 1/\lambda_s + 1/\lambda_T$) 可以得到理论太赫兹波长为 $214 \mu\text{m}$ ，而 FPI 测量结果为 $212 \mu\text{m}$ (如图 7 所示)，可见有衬底金属网栅 FPI 测量的准确性。间接计算得到的理论值与直接测量的实验值之间的误差来源主要有以下几个方面：1) 太赫兹波参量振荡器输出的斯托克斯光在空间上是有一定宽度的，利用光纤光谱分析仪采集斯托克斯光波长时会存在一定的偏差；2) 利用高精密度平台扫描测量太赫兹波长时读数时会存在一定偏差。为了减小数据采集带来的误差，可以通过编写程序使计算机精确控制步进电机并采集数据。

图 8 为定量研究 FPI 对腔镜平行度要求的实验

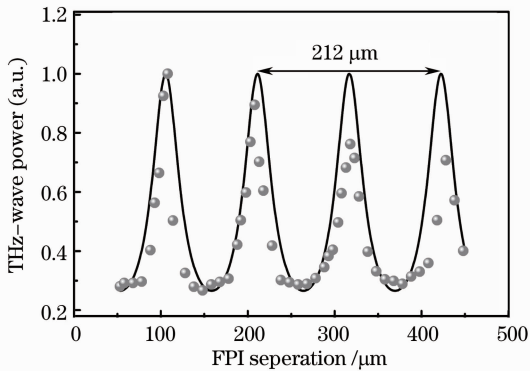


图 7 #5-FPI 测量 $212 \mu\text{m}$ 的太赫兹波波长
Fig. 7 Comparisons between fitted and measured data using the #5-FPI

结果，定义金属网栅 FPI 两腔镜平行度最好时的失谐角 β 为 0° ，可以看出，FPI 对腔镜平行性很敏感。两腔镜间 0.02° 的偏斜造成 FPI 透射率约 10% 的波动，因此，实验中保证 FPI 腔镜平行度是至关重要的。

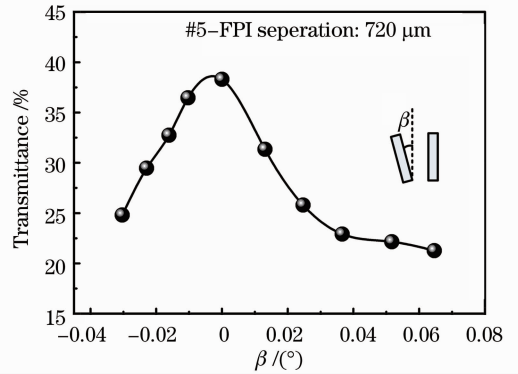


图 8 #5-FPI 腔镜平行度对 FPI 透射率的影响
Fig. 8 Transmittance of the #5-FPI versus cavity mirror's parallelism

图 9 实验测试了金属网栅 FPI 对入射太赫兹波偏振方向的依赖性，图中的 α 为金属网栅网孔排列方向与基于受激电磁耦子散射产生的垂直线偏振太赫兹波的偏振方向的夹角。实验结果表明，二维方形金属网栅对垂直入射电磁波的偏振方向不敏感，这与前面提到的结论一致。

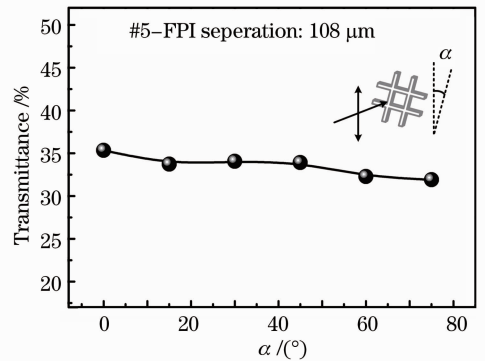


图 9 #5-FPI 腔镜与入射太赫兹波偏振方向夹角 α 对 FPI 透射率的影响

Fig. 9 Transmittance of the #5-FPI versus angle α between cavity mirror and incident terahertz wave

此外，还实验研究了各金属网栅 FPI 透射率与干涉级次的变化情况 (图 10)，实验表明，对固定波长的太赫兹波，FPI 峰值透射率随干涉级次的变大而减小，透射峰的半峰全宽变大 (图 7)。分析原因如下，随着 FPI 间距变大或干涉级次变大，FPI 的自由光谱范围减小，透射峰的半峰全宽变大，实验精细度降低，所以，金属网栅 FPI 测试太赫兹波波长应该工作在低干涉级次或小间距。

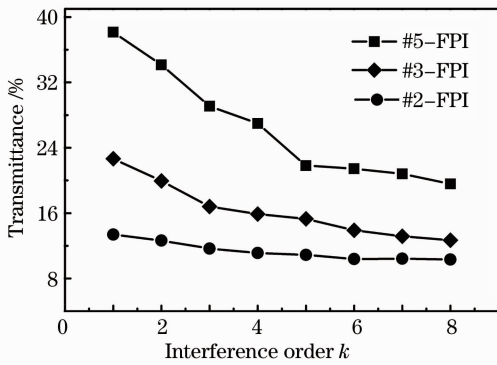


图 10 在 $212 \mu\text{m}$ 太赫兹波下,金属网栅 FPI 各干涉级次峰值透射率变化

Fig. 10 Peak transmittance of metallic meshes FPI versus interference order at $212 \mu\text{m}$

6 结 论

有衬底金属网栅具有易于制作、成本相对低廉且易于保存等特点。虽然衬底的出现对 FPI 的精细度带来一定的影响,但有衬底金属网栅 FPI 机械性能明显提升,并易于安装、保管及保证 FPI 腔镜平行度。利用制作的 FPI 扫描测量了 $212 \mu\text{m}$ 的线偏振太赫兹波波长,实验证明应用有衬底金属网栅 FPI 测量窄线宽太赫兹波波长是一种准确度高、方便可行的方法。此外,实际测量中,为了得到准确度高的测量结果,可使用计算机控制相关仪器进行数据采集。而且 FPI 应工作在小间距或低干涉级次,同时需要保证 FPI 腔镜的高度平行,因为 FPI 对腔镜平行度十分敏感。

参 考 文 献

- 1 N. Marcuvitz. Waveguide Handbook [M]. New York: Mc Graw-Hill Press, 1951. 280~285
- 2 Wang Yufeng, Hua Dengxin, Mao Jiandong. Effect of propagation properties of Gaussian beam on Fabry-Pérot etalon in lidar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3013~3018
王玉峰, 华灯鑫, 毛建东. 高斯光束的传输特性对法布里-珀罗标准具分布的激光雷达影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3013~3018
- 3 Xu Fuguo, Rao Yunjiang, Ran Zengling. Optical fiber Fabry-Pérot strain sensor fabricated by using laser micromachining [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2202~2207
徐富国, 饶云江, 冉曾令. 激光微加工的光纤法布里-珀罗应变传感器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2202~2207

- 4 Su Liqin, Shen Yonghang. Investigation on a novel Fabry-Pérot filter for high power tunable fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2351~2354
苏立钦, 沈永行. 适用于高功率可调谐光纤激光器的法布里-珀罗滤波器研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2351~2354
- 5 Chen Xianfeng, Zhang Huixia, Wang Guang *et al.*. Design of omnidirectional filter using single-negative materials [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0406004
陈宪锋, 张辉霞, 王光等. 利用单负材料设计全向滤波器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0406004
- 6 R. Ulrich, K. F. Renk, L. Genzel. Tunable submillimeter interferometers of the Fabry-Pérot type [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1963, **11**(5): 363~371
- 7 K. Sakai, T. Fukui, Y. Tsunawaki *et al.*. Metallic Mesh bandpass filters and Fabry-Pérot interferometer for the far-infrared [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1959, **8**(8): 1046~1055
- 8 J. Shikata, K. Kawase, K. Karino *et al.*. Tunable terahertz-wave parametric oscillators using LiNbO_3 and $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ crystals [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2000, **48**(4): 653~661
- 9 Y. J. Ding, P. Zhao, S. Ragam *et al.*. Recent progress on terahertz generation based on difference frequency generation: from power scaling to compact and portable sources [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(11): 1~10
- 10 M. Scheller, J. M. Yarborough, V. Jerome *et al.*. Room temperature continuous wave milliwatt terahertz source [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(26): 27112~27116
- 11 Cao Tieling, Yao Jianquan, Zhen Yi. Ways of wavelength measurement of terahertz wave based on Fabry-Pérot interferometer [J]. *Optical Instruments*, 2008, **30**(2): 13~16
曹铁岭, 姚建权, 郑义. 基于法布里-珀罗干涉仪的太赫兹波波长测试方法[J]. *光学仪器*, 2008, **30**(2): 13~16
- 12 L. B. Whitbourn, R. C. Compton. Equivalent-circuit formulas for metal grid reflectors at a dielectric boundary [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(2): 217~220
- 13 R. C. Hansen, W. T. Pawlewicz. Effective conductivity and Microwave reflectivity of thin metallic films [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique*, 1982, **30**(11): 2064~2066
- 14 R. Ulrich, T. J. Bridges, M. A. Pollack. Variable metal mesh coupler for far infrared lasers [J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(11): 2511~2516
- 15 P. Belland, J. C. Lecullier. Scanning Fabry-Pérot interferometer performance and optimum use in the far infrared range [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(12): 1946~1952
- 16 S. Biber, J. Schur, L. P. Schmidt. Technological issues for micromachining of new passive THz components based on deep-trench silicon etching [C]. *Infrared and Millimeter waves, 2004 and 12th International Conference on Terahertz Electronics*, 2004. 145~146
- 17 N. Laman, D. Grischkowsky. Terahertz conductivity of thin metal films [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(5): 051105
- 18 A. K. Azad, W. Zhang. Resonant terahertz transmission in subwavelength metallic hole arrays of sub-skin-depth thickness [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(21): 2945~2947

栏目编辑: 李文洁