

文章编号: 1001-3806(2009)02-0151-05

CO₂ 激光抽运太赫兹成像研究新进展

李琦, 姚睿, 尹奇国, 单纪鑫, 王骥

(哈尔滨工业大学 光电子技术研究所 可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 为了研究基于 CO₂ 激光抽运的远红外激光源的太赫兹 2 维成像方法的各自特点和今后的发展方向, 在介绍 CO₂ 激光抽运的远红外激光源的基本工作原理及美、英两国典型产品 SIFIR-50FPL 和 FIRL100 激光器的基础上, 重点介绍了国内外近几年的主要成像研究成果, 并对其成像特性进行了简要评述。最后总结出 CO₂ 激光抽运太赫兹成像研究的发展趋势是大力发展能远距离成 3 维像的太赫兹雷达、能实时成像的焦平面探测及实时图像处理和目标自动识别系统。

关键词: 激光器; 气体激光器; 太赫兹成像; 太赫兹雷达; 2 维扫描

中图分类号: TN248.2

文献标识码: A

Recent advance of CO₂-pumped THz imaging

LI Qi, YAO Rui, YIN Qi-guo, SHAN Ji-xin, WANG Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Optic-Electronic, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to study the characteristics and the future development direction of terahertz two-dimension imaging methods based on CO₂ laser-pumped far-infrared laser source, the basic principle of CO₂ laser-pumped far-infrared laser source and two typical lasers, SIFIR-50FPL and FIRL100 made in USA and England respectively, were introduced. Then the domestic and international research results of imaging in recent years and their imaging characteristics were discussed. Finally it was concluded that the long-distance three-dimension image THz radar, the real-time imaging focal plane array (FPA) detection and the real-time image processing and automatic target recognition system were the development trends of the research of CO₂ laser-pumped terahertz imaging.

Key words: lasers; gas laser; THz imaging; THz radar; two-dimension scan

引言

太赫兹辐射是频率在 0.1THz ~ 10THz 区间内的远红外电磁辐射。由于它容易穿过大多数非金属、非极性物质, 所以可以穿透一些障碍物进行成像, 例如背包、衣服、塑料或纸制包装品等, 可用于安全检测。而且, 太赫兹辐射的光子能量低, 频率为 1THz 的电磁波的光子能量只有约 4meV, 远远小于 X 射线的能量, 因此不会对生物组织产生有害的电离, 适合于生物组织活体检查。另外, 太赫兹辐射具有惧水性, 水分子对太赫兹波段的电磁波有十分强烈的吸收, 很少含量的水分就能吸收几乎全部的太赫兹辐射。因此, 太赫兹

辐射成像在危险品检测、医疗和食品检验等领域有广泛的应用前景^[1-7]。

太赫兹成像作为研究热点已有十多年的历史, 国内外相关文章很多, 倍受瞩目^[8-9]。超短脉冲的时域谱成像, 同时获得相位和振幅信息, 信息量大, 但设备较复杂, 体积较大。与之相比, CO₂ 激光抽运太赫兹 2 维成像系统结构紧凑、功率较高、易操作, 因此, 一直为人们所关注。CO₂ 激光抽运太赫兹激光源被认为是较易推广应用的太赫兹辐射源。

国内外研究 CO₂ 激光抽运太赫兹激光源的单位很多, 但做为商品出售的主要有美国相干公司和英国的爱丁堡仪器公司。美国相干公司的 SIFIR-50 激光器, 已经由美国航天航空局(National Aeronautical and Space Administration, NASA)放置在卫星上工作了 5 年。

本文中首先介绍 CO₂ 激光抽运太赫兹激光器基本原理和主要商品特点, 然后介绍和分析国外近几年来利用此类激光源进行太赫兹成像的状况和发展趋势, 最后介绍国内利用此激光源成像的进展。

基金项目: 哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助

作者简介: 李琦(1963-), 女, 教授, 主要从事激光主动成像和 THz 成像技术研究。

E-mail: hit_liqi@yahoo.com.cn

收稿日期: 2008-03-14; 收到修改稿日期: 2008-06-19

1 CO₂ 激光抽运太赫兹激光器基本原理和主要商品简介

自从 CHANG 和 BRIDGES 发现了光抽运甲醇远红外激光振荡后,连续波远红外激光器获得了迅速的发展,至今已经在 40μm ~ 1200μm 之间发现了几千谱线,其中抽运甲醇^[10]产生的太赫兹激光中 118.83μm 激光输出功率最强。

用 CO₂ 的 9P(36) 线抽运甲醇产生 2.5THz 激光的能级示意图如图 1 所示。

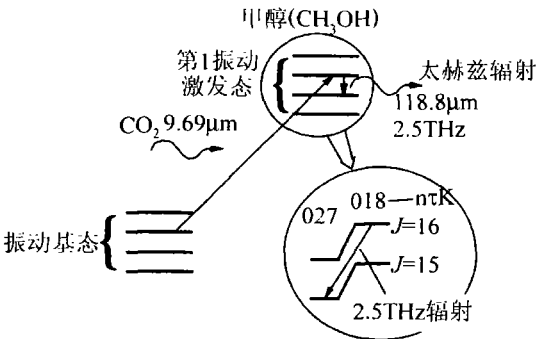


图 1 2.5THz 激光的产生的能级示意图

光抽运太赫兹激光主要产生于分子转动能级之间的跃迁,甲醇分子吸收波长为 9.69μm 的 CO₂ 激光,从振动基态跃迁到第 1 振动激发态,且转动能级 J = 16;分子在第 1 振动激发态上自发从 J = 16 的转动能级跃迁到 J = 15 的转动能级,辐射出波长为 118.83μm 的太赫兹光子;然后分子自发的跃迁回振动基态。这个循环过程可以产生连续的太赫兹辐射。

太赫兹激光器的原理示意图如图 2 所示,激光器

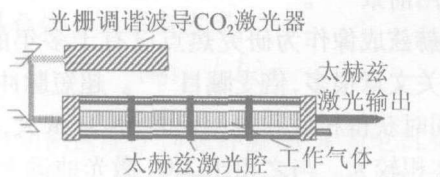


图 2 太赫兹激光器的工作原理示意图

主要包括 2 个单元,一个可调光栅 CO₂ 激光器作为抽运源,发出的激光进入一个充有几十帕斯卡低气压的太赫兹腔中,使甲醇等工质产生受激辐射发出太赫兹激光。

相干公司生产的 SIFIR-50FPL 太赫兹激光器,它的实物图如图 3 所示,主要部件为太赫兹激光头和激

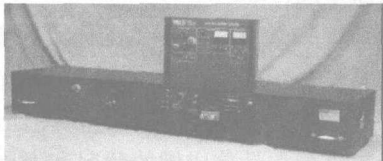


图 3 SIFIR-50FPL 太赫兹激光器

光器控制器。为使系统正常运转,该系统需配有直流电源、分子泵和水泵等设备。激光头体积约为 1.8m ×

0.5m × 0.3m。

SIFIR-50FPL 加入了一个法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 频率锁定系统,以使输出频率和功率稳定。它主要是一个恒温的 F-P 共焦腔干涉仪利用爬山法锁定抽运激光的频率,即通过改变 F-P 的腔长,使 F-P 振动正好落在频率的峰值上,产生一个 2 倍于其自身振动频率的信号,然后通过灵敏相位探测器调节 CO₂ 激光器压电陶瓷来锁定 CO₂ 波长。

由于 CO₂ 谱线和太赫兹气体工质不同,SIFIR-50 FPL 产生多种太赫兹波输出,表 1 中给出 SIFIR-50FPL 主要的输出激光参量。

表 1 SIFIR-50FPL 输出激光参量

波长/μm	频率/THz	气体工质	输出功率/mW
70.510	4.25	CH ₃ OH	29
96.500	3.11	CH ₃ OH	42
109.29	2.74	CH ₂ F ₂	30
117.73	2.55	CH ₂ F ₂	48
118.83	2.52	CH ₃ OH	49
122.40	2.45	CH ₂ F ₂	35
122.40	2.45	CH ₂ F ₂	20
134.00	2.24	CH ₂ F ₂	45
158.51	1.89	CH ₂ F ₂	72
184.31	1.63	CH ₂ F ₂	125
214.58	1.40	CH ₂ F ₂	61

英国爱丁堡仪器公司生产的 FIRL100 型太赫兹激光器,采用的抽运光源为流动 CO₂ 激光器,其输出功率较高。FIRL100 型太赫兹激光器也有主动稳定系统。激光头体积约为 2.2m × 0.4m × 0.3m (不包括 CO₂ 充配气系统)。它与 SIFIR-50FPL 最大的区别在于抽运源气体流动。为使 CO₂ 气体流动,FIRL100 型太赫兹激光器配有真空配气装置。显然 FIRL100 虽然功率高于 SIFIR-50FPL,但操作较复杂。图 4 为 FIRL100 型太赫兹激光器的激光头实物结构。表 2 中给出 FIRL100 型太赫兹激光器主要的输出激光参量。

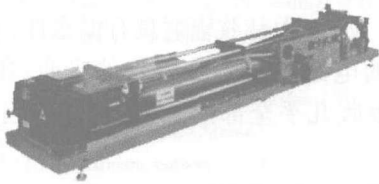


图 4 FIRL100 型太赫兹激光头

表 2 FIRL100 输出激光参量

波长/μm	频率/THz	气体	输出功率/mW
96.500	3.11	CH ₃ OH	>60
118.83	2.52	CH ₃ OH	>150
184.31	1.63	CH ₂ F ₂	>150

2 国外成像新进展

2006年,德国的SALHI和KOCH等人利用自制CO₂抽运太赫兹激光器(波长118.83 μ m)进行了半共焦透射成像。提出了利用参考光探测消除激光器输出不稳定引起的噪声^[11]。图5是其成像示意图。

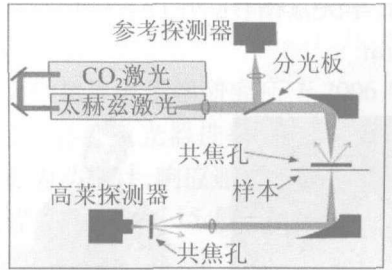


图5 噪声抑制装置图^[11]

出射的太赫兹光经分束片分成两路,一路参考光,一路信号光。参考光由透镜聚焦到参考探测器上。信号光经反射镜聚焦到共焦针孔上,再照射到样品上。透过样品的信号光再经反射镜平行出射,最后经一透镜聚焦到另一共焦针孔上,进入高莱探测器中。共焦针孔起到空间滤波作用,即只允许焦点上的光束成像,以提高图像分辨率。样品放置在2维移动平台上,通过2维平台的移动,实现样品的2维成像。由于信号光和参考光的比率不受激光功率波动的影响,因此,可以抑制由激光器输出功率不稳定引起的系统噪声。这种方法要求两个探测器必须同时读取信号。

图6中给出了有无参考光探测成像结果对比:图

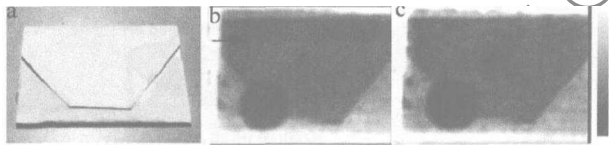


图6 有无参考探测器成像结果对比^[11]

a—信封照片 b—无参考 c—有参考

6a为内有硬币的信封照片,图6b为无参考探测器时的太赫兹图像,图6c为有参考探测器时的太赫兹图像。显然,有参考探测器时的图像噪声较小,图像较清晰。

同时,他们还提出了光学聚焦显微镜方案^[11],见图7。由激光器出射的光束聚焦到共焦针孔,经分束片进入透镜,聚焦到样品上;再由样品反射到透镜和分

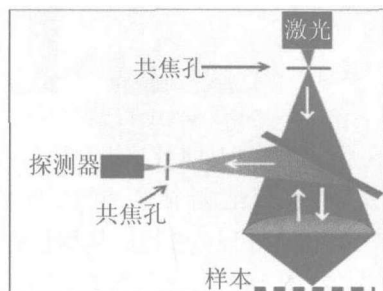


图7 光学聚焦显微镜^[11]

束片上,经分束镜反射聚焦到共焦针孔,最终进入探测器。此方案至今未见后续报道。

2004年,美国加利福尼亚技术学院喷气推进实验室SIEGEL和DENGLER将2.5THz外差成像用于生物医学领域^[12]。这种成像机制原则上可以同时获得样品的强度信息和相位信息。为了获取相位信息,必须具有较高的频率稳定性;同时,为了使检测样品厚度增加,必须提高外差系统的动态范围;为此,他们提出了带有两个平面斯达克二极管混频器(信号混频器和参考混频器)的外差成像器,图8是稳定的中低频输出的成像系统示意图,其中给出了部分参量。采用两

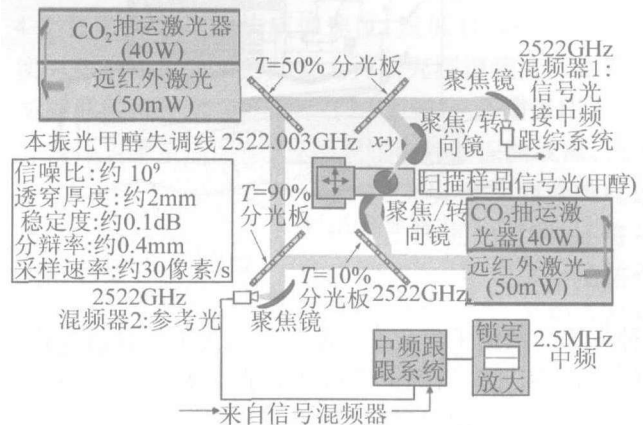


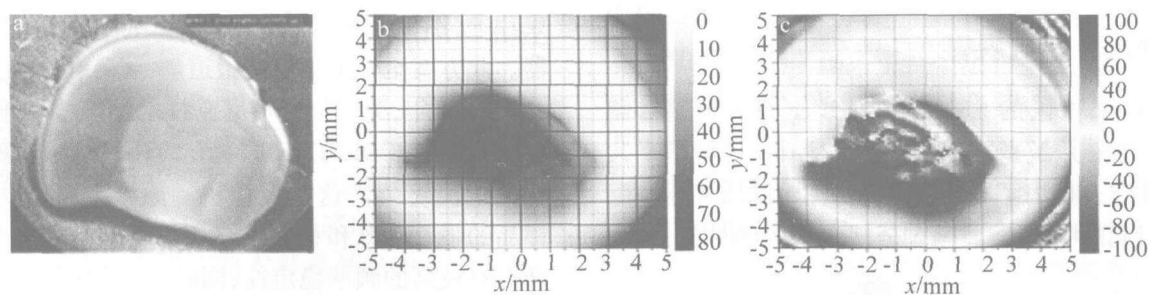
图8 稳定的中低频外差成像器^[12]

台相干公司的SIFIR-50太赫兹系统分别作为主振光和本振光。通过两个太赫兹源前的分光片将光路分成参考和测量两路。图中左右两侧的混频器2和1分别输出参考光路和信号光路的中频信号,外差中频为1MHz~3MHz。这两个中频信号的瞬时频率相同,但振幅和相位不同。两个中频信号经中频跟踪系统和锁相放大器得到样品的强度信息和两路的相位差信息。成像样品放置在2维移动平台上,且成像光学系统焦点位于样品上。

他们利用上面的成像器对2mm厚的老鼠脑组织进行外差成像。图9是该组织照片和太赫兹强度图及相位图。

美国马萨诸塞州Lowell大学亚毫米波技术实验室DICKINSON等人于2006年对3m远的人进行了外差成像,即太赫兹相干雷达实验。他们在全光束照明成像实验的基础上,又进行了点扫描成像实验^[13]。图10是全光束照明外差成像系统示意,其输出频率1.56THz和350GHz。

整个系统包括两台太赫兹激光器、外差探测系统和太赫兹消声舱,目标物体放在定位转台上,扩束的平行光束全部覆盖物体。发射和接收光路不重合,有略微偏差,即光学系统是收发分置的。利用此成像系统,获得了着装人体模特胸前藏匿手枪的反射像。由于这

图9 老鼠脑组织的强度图和相位图^[12]

a—照片 b—强度 c—相位

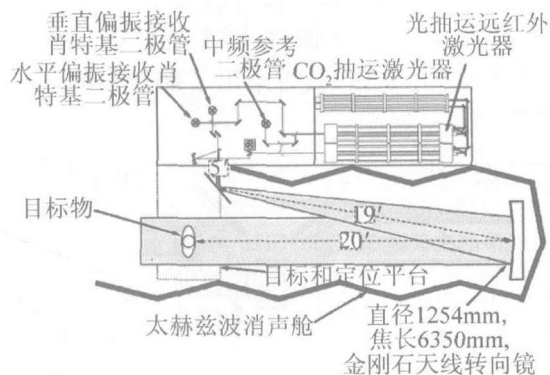
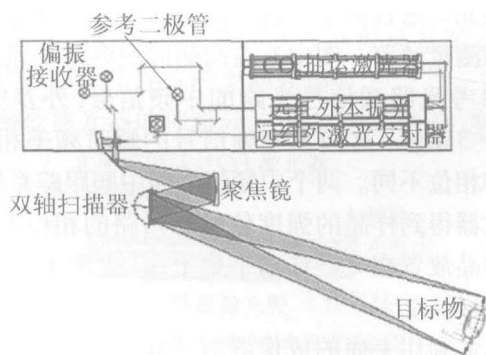


图10 全光束照明外差成像系统示意图

种方法的数据采集存在不能容忍意外的接收信号相位的变化,因此对目标定位精度要求较高。

对真人成像时,显然全光束照明外差成像系统的定位精度不能满足,因此,DICKINSON 等人又提出了点扫描外差成像系统。图11是光路示意图。它是对

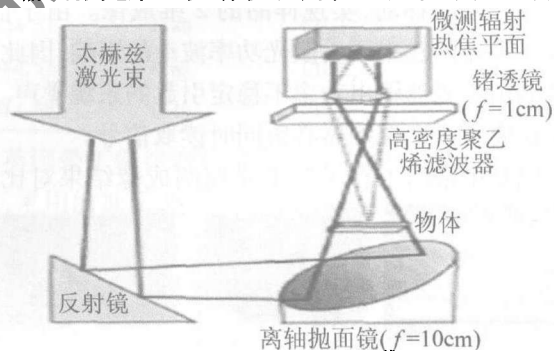
图11 外差成像系统示意图^[13]

全光束照明外差成像系统的改进,也由两台太赫兹激光器、外差探测系统和太赫兹消声舱组成,激光输出频率1.56THz。该系统在结构上与前一系统不同的是,取消了物体定位转台,而增加了2维光栅扫描,使聚焦光束打在物体不同部位,形成2维图像;另外,其光学系统是收发合置的。已获得几米远的真人反射像。图12为对真人点扫描外差成像的结果。图左侧为光学照片,右侧为太赫兹成像结果,放置在棉衬衫下的隐藏的手枪(图中黑的L)可较清晰辨出。此方法原理上也可以成距离像,但目前尚未见他们关于距离像报道。

美国麻省理工学院于2005年利用响应光谱范围为 $7.5\mu\text{m} \sim 14\mu\text{m}$ 的 160×120 像元的微辐射热计焦

图12 外差成像系统示意图^[13]

平面阵列进行了实时连续波太赫兹成像^[14]。太赫兹源输出波长为 $118.83\mu\text{m}$ 。图13是该成像装置示意图。输出激光束经反射镜和离轴抛物面镜聚焦后,由紫

图13 实时连续波太赫兹成像装置^[14]

贴镜头放置的6.5mm厚的高密度聚乙烯滤波器滤除背景杂散光,进入微辐射热计焦平面阵列。此装置成像帧频可达60帧/s。图14中给出了用此装置对带鳞剃刀的太赫兹成像结果。

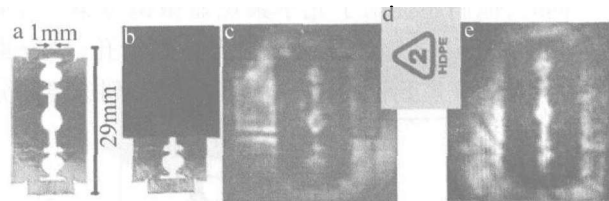
图14 实时太赫兹成像结果^[14]

图14a中为带鳞剃刀照片;图14b为带鳞剃刀部分被 $50\mu\text{m}$ 厚低密度聚乙烯板遮挡的实物照片;图14c是在16ms时间内对图14b进行成像,且进行直方图修正的太赫兹图像;图14d为含纤维性高密度聚乙烯材料制成的特快专递信封照片,信封上标有HDPE;图

14e 是带鳞剃刀完全放入图 14d 中的信封内, 成像时间 5ms, 且进行直方图修正的太赫兹图像。这种成像结果还不够清晰。

3 国内成像研究现状

在我国利用连续 CO₂ 激光抽运太赫兹激光器进行 2 维扫描成像研究的单位有南京大学、深圳大学和哈尔滨工业大学^[15-17]。

南京大学超导电子学研究所于 2006 年应用英国 FIRL100 型太赫兹激光器进行了 2 维透射成像, 当时所用探测器为功率计, 响应速度慢, 他们正在研究超导探测器代替功率计。图 15 是其成像结果。

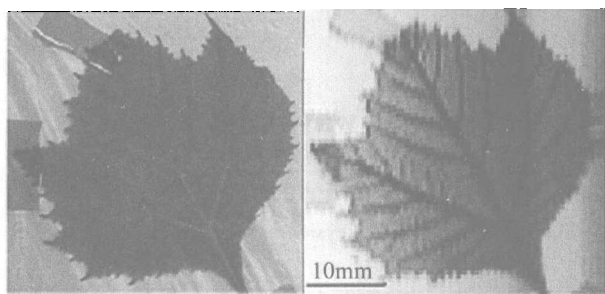


图 15 干枯叶片的照片以及对叶片的成像^[15]

深圳大学于 2007 年采用美国相干公司的 SIFIR-50 激光器进行了 2 维透射成像, 探测器采用的是 Pyrocam III 焦平面热像仪, 它是快响应的固态热释电相机, 主要用于太赫兹光束质量分析, 通过板卡与计算机连接, 可以直接得到光束的轮廓。将它用于成像成本较大。图 16 中给出它们成出的 10 元白水印。

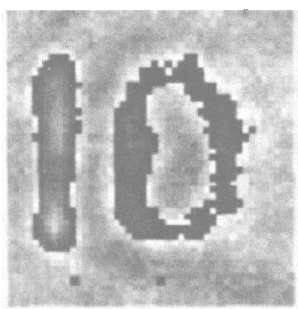


图 16 10 元水印^[17]

哈尔滨工业大学光电子技术研究所于 2007 年建立了利用美国相干公司生产的 SIFIR-50 FPL 太赫兹

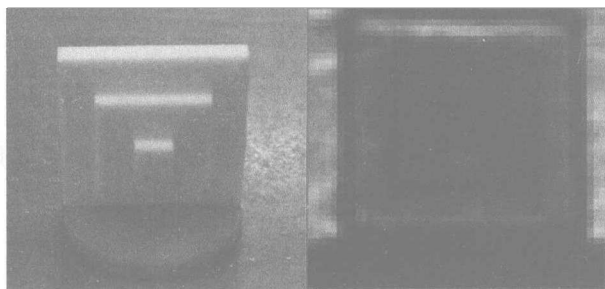


图 17 聚四氟乙烯样品照片和像

激光器和商用室温单元探测器构成的太赫兹透射 2 维扫描成像系统, 自行设计和实现了此成像系统控制软件。图 17 是利用此成像系统获得的聚四氟乙烯方台太赫兹图像。目前还在进一步研究中。

4 结束语

利用 CO₂ 抽运的太赫兹辐射源用于单频成像研究一直被人们认为非常值得研究和推广应用的方向。2004 年~2007 年期间多个不同国家的研究小组对此种太赫兹源进行了不同成像体制的研究。从这些研究成果可以预测, 今后国际上此领域研究的重点主要有 4 个方面: (1) 为加快成像速度, 发展直接探测方式的实时焦平面成像。为此要大力研究频谱响应范围在太赫兹波段的面阵探测器。(2) 为提高成像作用距离, 并获得 3 维距离图像, 发展双光束外差探测成像, 也就是发展相干太赫兹雷达。为此, 需突破探测器响应速度较慢的难关。(3) 为使所成图像更加清晰, 还将从图像处理方面进行深入细致的研究, 达到事半功倍作用。(4) 由于太赫兹成像多用于安检、反恐和食品检测等, 因此, 物体辨识几乎是成像的最终目的。如果系统能够完成自动识别, 将减轻人们的负担; 为此, 太赫兹图像目标自动识别方面的研究也将是一个重要方向, 这方面的研究已初见端倪。

参 考 文 献

- [1] SCHADE U, HOLLDAK K, KUSKE P, *et al.* THz near-field imaging employing synchrotron radiation [J]. *A P L*, 2004, 84 (8): 1422-1424.
- [2] PRADARUTTI B, RIEHEMANN S, NOTNI G, *et al.* Terahertz imaging for styrofoam inspection [J]. *SPIE*, 2007, 6772: 67720P1-67720P5.
- [3] ZIMDARS D, WHITE J, STUK G, *et al.* Time domain terahertz detection of concealed threats in luggage and personnel [J]. *SPIE*, 2006, 6212: 62120O1-62120O5.
- [4] ZHONG H, KARPOWICZ N, PARTRIDGE J, *et al.* Terahertz wave imaging for landmine detection [J]. *SPIE*, 2004, 5411: 33-44.
- [5] CHERKASSKY V S, KNYAZEV B A, KUBAREV V V, *et al.* Imaging techniques for a high-power THz free electron laser [J]. *Nuclear instruments and Methods in Physics Research*, 2005, A543 (1): 102-109.
- [6] FEDERICI J F, SCHULKIN B, HUANG F, *et al.* THz imaging and sensing for security applications-explosive, weapons, and drugs [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2005, 20 (7): S266-S280.
- [7] WANG Q, CHI X, LI Q. Imaging theory and development of THz free electron lasers [J]. *Laser Technology*, 2006, 30 (6): 643-646 (in Chinese).
- [8] ZHANG Zh W, CUI W L, ZHANG Y, *et al.* Terahertz time-domain spectroscopy imaging [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2006, 25 (3): 217-22 (in Chinese).
- [9] PLANKEN P C M, BAKKER H J. Towards time-resolved THz imaging [J]. *Appl Phys*, 2004, A78 (4): 465-469.

(下转第 158 页)

$$E_0 0.876 \sqrt{(0.997 \cos \theta)^2 + (0.916 \sin \theta)^2}.$$

设入射光振幅 $E_0 = 1$, 则对于 $2.1 \mu\text{m}$ 的透射光振幅是 θ 的函数, 其关系曲线如图 2 所示。在图中可以

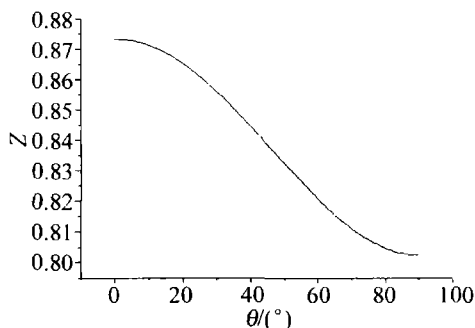


Fig. 2 The relation between the amplitude of optical transmission and the θ angle

发现, θ 越大, 透射振幅越小, 即二向吸收的影响越明显。原因是冰洲石晶体对于寻常光的吸收大于对非常光的吸收。将(11)式变形得到:

$$\vec{E}_t = \sqrt{A^2 + B^2} \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \\ \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) e^{-i\delta} \end{bmatrix} e^{-i\alpha_r} \quad (12)$$

偏振光振动方向转过的角度用 β 表示, 与(1)式比较可得:

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \varphi + \theta = \frac{\pi}{2} - \arctan(\cot \theta e^{0.06 \times 1.415}) + \theta \quad (13)$$

定义旋光系数 $r = \beta/\theta$, 表征 $\lambda/2$ 波片的旋光作用。由图 3 可以看出: 考虑二向吸收后, $\lambda/2$ 波片的旋光作用

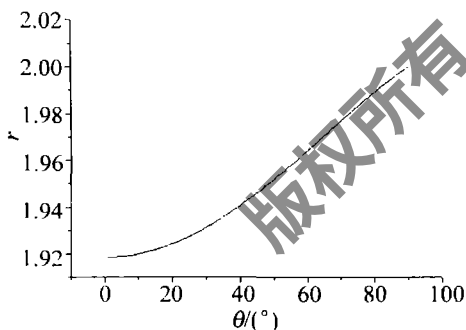


Fig. 3 The relation between the polarimetry role of $\lambda/4$ wave-plate and the θ angle

不再是 2 倍 θ 角的关系, 且 θ 越接近 $\frac{\pi}{2}$, 影响越小。例

如在 $\theta = 10^\circ$ 时, $\beta = 19.21^\circ$, $r = 1.920$; $\theta = 80^\circ$ 时, $\beta = 159.13^\circ$, $r = 1.989$, 可见, 二向吸收对 $\lambda/2$ 波片旋光作用的影响是比较明显的。

4 结 论

(1) 光矢量与晶体光轴成 45° 夹角的线偏光通过 $\lambda/4$ 波片, 由于晶体二向色性的影响, 得到的不是圆偏振光, 而是椭圆偏振光, 且椭圆率与吸收系数有关。(2) 考虑晶体二向色性, 线偏振光通过 $\lambda/2$ 波片依然得到线偏光, 但光矢量的旋转角度不是 θ 角的 2 倍而是吸收系数与 θ 角的函数。(3) 由于晶体二向吸收的影响, 透射光振幅减小。

通过分析可见: 晶体的二向色性对波片性能的影响是不容忽视的, 在器件使用中应该引起人们的注意。

参 考 文 献

- [1] XU Y Q, SONG L K, ZHAO P T. Birefringence measurements of muscovite mica with wavelength modulation compensation method [J]. Laser Technology, 2006, 30(1): 99-100 (in Chinese).
- [2] LI G H. Optics [M]. Ji'nan: Shandong Education Press, 1990: 452-458 (in Chinese).
- [3] FENG W W, LI G H, CHEN L G. Polarized-light interference spectrum of quartz wave-plate [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(6): 1044-1048 (in Chinese).
- [4] MU T K, LI G H, SONG L K. Study on retardation variation behavior of quartz wave-plate follows temperature [J]. Chinese of Journal Lasers, 2006, 33(7): 949-952 (in Chinese).
- [5] ZHANG Zh Y. Circular dichroism technic and application [J]. Modern Physics, 2000, 12(5): 23-29 (in Chinese).
- [6] WANG G H, WU F Q. Effect of magnetic circular dichroism on Faraday rotator's extinction ratio [J]. Laser Technology, 1999, 23(6): 350-353 (in Chinese).
- [7] HUANG H H. Optical matrix method and Fourier method [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1991: 19-23 (in Chinese).
- [8] XU W W, JIANG Y. The Change of linearly polarized light by uniaxial crystal plate film [J]. Heilongjiang University Natural Science Journals, 2000, 17(2): 64-66 (in Chinese).
- [9] GUO Sh H. Electrodynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1997: 135-142 (in Chinese).

(上接第 155 页)

- [10] FU E Sh, WANG Zh Zh, SHI P Sh. CW CH_3OH far infrared lasers [J]. Acta Optica Sinica, 1982, 2(1): 9-17 (in Chinese).
- [11] SALHI M, KOCH M. Semi-confocal imaging with a THz gas laser [J]. SPIE, 2006, 6194: 61940A/1-61940A/8.
- [12] SIEGEL P H, DENGLER R J. Terahertz heterodyne imager for biomedical applications [J]. SPIE, 2004, 5354: 1-9.
- [13] DICKINSON J C, GOYEETTE T M, GATESMAN A J, et al. Terahertz imaging of subjects with concealed weapons [J]. SPIE, 2006, 6212: 62120Q/1-62120Q/12.
- [14] LEE A W, HU Q. Real-time, continuous-wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array [J]. Opt Lett, 2005, 30

(19): 2563-2565.

- [15] ZHANG C H, WANG Y Y, CHEN J, et al. Continuous-wave terahertz imaging system based on far-infrared laser source [C]//Conference Digest of the 2006 Joint 31st International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics. Shanghai: IEEE, 2006: 426.
- [16] ZHANG C H, WANG Y Y, GAI B, et al. Continuous-wave THz imaging system based on far-infrared laser source [J]. Superconductivity, 2007, 35(3): 245-247 (in Chinese).
- [17] ZHANG M, RUAN Sh Ch, YANG J, et al. The software design of THz imaging system [J]. Microcomputer Information, 2007, 23(31): 25-27 (in Chinese).