

·光电器件与材料·

太赫兹液晶器件的研究进展

王建国

(索雷博光电科技(上海)有限公司, 上海 200331)

摘要: 基于液晶技术的太赫兹器件的研究开发已经成为该领域研究的重要方向之一。介绍了太赫兹器件的应用背景和太赫兹液晶器件的基本知识,并重点介绍了液晶在太赫兹频段的光电性质和材料特性,指出了若干有潜在可行性的液晶材料。在此基础上对太赫兹液晶移相器、太赫兹可调液晶滤波器、太赫兹可调偏振器等液晶器件的设计原理和目前的研究结果进行了分析。最后,对太赫兹液晶器件的产品应用开发进行了总结分析,提出了此类元器件的研究开发方向。

关键词: 太赫兹;可调;液晶器件

中图分类号:TB133;TB383

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2013)-05-0024-06

Research Progress of Terahertz Liquid Crystal Device

WANG Jian-guo

(Thorlabs Optical Electronic Technology (Shanghai) Co. Ltd., Shanghai 200331, China)

Abstract: Research and development of Terahertz (THz) devices based on liquid crystal technology have been one of the important research directions in the area of THz technology. The application background and basic knowledge of THz liquid crystal device are introduced. The electro-optical and material properties of liquid crystal in the area of THz are discussed in detail. Some potential liquid crystal materials are introduced. Based on this, the design principle and presented research results of THz liquid crystal phase shifter, THz tunable liquid crystal filter and THz tunable polarizer are analyzed. The application developments of THz liquid crystal devices are summarized and analyzed finally. And research and development directions of the devices are proposed.

Key words: Terahertz; tunable; liquid crystal device

奥地利植物学家F. Reinitzer在1888年观察到一个奇怪的现象:即对胆甾醇苯甲酸脂固体进行加热时发现有两个熔点。在他的实验中,加热固体样品时可以观察到晶体变为雾浊的液体;当进一步升高温度时,液晶会突然从雾浊状变成清亮的液体^[1]。德国物理学家O. Lehmann用附有加热装置的偏光显微镜对这些脂类化合物进行了观察。他发现,这类白而浑浊的液体外观上虽然属于液体,但却显示出各向异性晶体特有的双折射性^[2]。液晶是一种介于固态和液态之间的有机化合物,即具有固态光学特性,又具有液态的流动特性,主要有粘性、弹性和极化性三种物理特性。液晶显示器就是利用液晶这些特

性,使液晶产生光电效应实现图像显示。随着20世纪60年代末液晶材料进入显示行业等应用领域,液晶科学及其应用研究进入了全面发展阶段。目前液晶显示应用,包括液晶电视、手机屏和显示仪表等,已经成为光电行业重要领域,液晶在该领域的应用研究已经相对比较成熟。液晶的一些非显示光电子器件领域的研究已经得到越来越多的重视,譬如液晶光阀、液晶相位可调延迟片、液晶可调滤光片、液晶空间光调制器、液晶光栅、液晶可调透镜等,其中一些器件已经有商业化的产品^[3-11]。

太赫兹(Terahertz,缩写为THz)是频率单位,1太赫兹等于 10^{12} 赫兹。太赫兹波是指频率在0.1~10

THz 范围的电磁波,波长大概在 0.03~3 mm 范围,介于微波与红外之间的电磁波,如图 1 所示^[12]。随着 20 世纪 80 年代一系列新技术、新材料的发展,特别是超快技术的发展,使得获得宽带稳定的脉冲太赫兹源成为一种准常规技术,太赫兹技术才得以迅速发展^[13-14]。

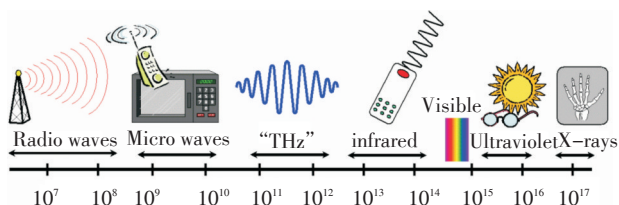


图 1 电磁波频谱

太赫兹波之所以引起广泛的关注,是因为大量的太赫兹光谱包含更多的物理和化学信息,研究人员可以在太赫兹频段探索物质光谱信息。太赫兹的独特性能给通信、雷达、电子对抗、电磁武器、天文学、医学成像、无损检测、安全检查等领域带来了深远的影响^[15-20]。太赫兹科学技术是电磁学、光学、半导体物理学、激光物理学、量子力学、固体物理等学科的交叉,同时它为这些学科的研究提供了新的方法和手段。而这些应用需要的各种主动和被动太赫兹光学元件如滤波器、偏振片、衰减器、开关、调制器和相位延迟器等。液晶的双折射特性是众所周知的,通过液晶盒上的电场或磁场的调制可以实现液晶双折射率的变化,目前已经被广泛用于可见波段和 IR 波段。液晶的一些显著优点,如对电场比较敏感,化学稳定性好,比较大的双折射特性,使其在太赫兹领域有着广泛的应用前景^[21-28]。

1 太赫兹液晶器件的发展

1.1 液晶在太赫兹频域的光电特性

液晶是一种在太赫兹频率比较有希望用于被动可调光学元件的材料。一般的液晶在太赫兹频域表现出来的双折射特性小于光学波长范围^[29-30]。在设计可调相移元件、可调反射阵列等元件时,就需要在特定的频率范围内对液晶材料的特性进行系统的了解。Köberle 等人采用自由空间的连续太赫兹波系统(如图 2 所示),给出了 K15 和 E7 两种液晶在 100 ~ 350 G 频率范围内的特性。结果表明,在上述频率范

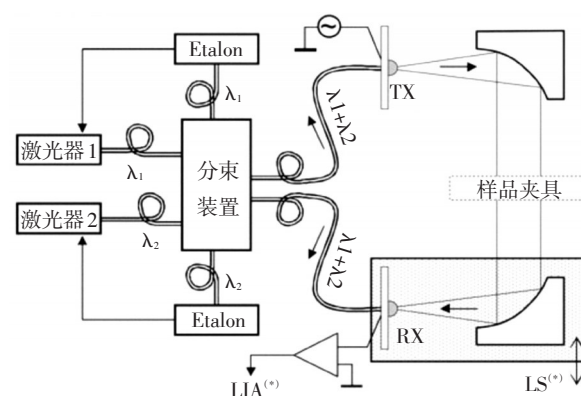


图 2 连续太赫兹波测量装置的示意图, TX/RX 分别是带有棱镜的发射和接收混光器, TS 是用来探测相位和最大振幅的机械相移平台, LIA 是锁相放大器

围内,双折射率 Δn 分别大于等于 0.05(K15 液晶)和 0.08(E7 液晶)^[31]。

Bulja 等采用一种新型的液晶盒研究了 30~60 GHz 频率范围内的向列相液晶的透射特性。对 E7、K15、E44、E63 和 MDA-00-3506 等五种不同的向列相液晶进行了电学和力学参数测量和分析,这五种液晶的介电常数双折射特性最大的是 E44 液晶^[32]。

表 1 不同液晶在 60 GHz 频率下的材料特性^[32]

	E7	K15	E44	E63	MDA-00-3506
ϵ_{\perp}	2.78	2.86	2.81	2.78	2.78
$\Delta\epsilon$	0.47	0.35	0.59	0.45	0.59
$\tan(\delta_{\perp})$	0.006 1	0.010 9	0.020 0	0.007 6	0.040 3
$\tan(\delta_{\parallel})$	0.001 1	0.000 2	0.001 2	0.000 6	0.012 3

Rafa 等人研究了 CB 液晶系列的四款液晶 5CB、6CB、7CB 和 8CB 的太赫兹特性。除了绝对折射率和吸收系数,并给出了在不同电场和温度条件下的双折射值。在可见光范围内,这些小棒状分子在向列相具有较大的双折射 $\Delta = 0.16$ 和折射率 $n_o = 1.53$ 和 $n_e = 1.69$ 。在太赫兹范围,这些分子在太赫兹范围 n_o 在 1.64 和 1.60 之间, n_e 在 1.74 和 1.70 之间。在远红外线的性质主要由液晶的振动和扭转模式决定,而这些不会出现在可见光波段。液晶在太赫兹吸收都是较弱的,每种液晶非常光的吸收系数均小于寻常光的吸收系数。nCBs 系列液晶的吸收主要来自于液晶分子苯环在液晶分子短轴方向的扭转^[29]。

N. Vieweg 等人研究了 BL037 液晶混合物在太赫兹频域的光谱并从测量数据中分析提取了折射率和吸收系数等参数,同时分析了该液晶的温度依赖性,

表现出了比较大的双折射特性,是应用于太赫兹频段的比较好的液晶。在BL037这个液晶混合物中,除了用烷基和烷氧基取代联苯外,另外加了苯环和环己烷环来实现在可见波段0.28的双折射,而且在室温达到109℃这个清亮点温度范围内具有稳定的向列相^[33]。基于太赫兹时域频谱方法研究了BL037向列液晶物的特点,并从测量数据中提取了折射率和吸收系数等参数。除了这些参数的频率依赖性以外,还研究了温度相关性,并将其结果和纯液晶的特性进行了比较。结果表明,液晶混合物具有目前最大的双折射特性。因而BL037是一种太赫兹液晶器件理想的材料。同时该研究组提出了频率和温度依赖太赫兹的折射率和吸收向列型液晶混合物BL037系数的研究结果^[34]。

Cheng Pin等人采用太赫兹时域频谱分析的方法测量了MDA-00-3461液晶在25℃温度条件下在远红外的光学常数,MDA-00-3461的 n_e 和 n_o 分别为1.74和1.54,即0.2的双折射在0.3~1.4 THz范围内。MDA-00-3461在该频域内的消光系数相对比较小,在整个频域范围内没有观察到有吸收峰^[35]。Nico等人报道了向列相液晶在太赫兹频域内的分子特性。首先,基于太赫兹时域谱方法研究了5CB、6CB和7CB的折射率和吸收系数等特点。探讨影响烷基链的长度对宏观液晶特性,特别侧重于最明显的奇偶效应。文献中还用Vuks和Haller方法极化率和液晶指向矢等。在此基础上计算了径向和轴向的极化率,建立了液晶分子结构与其太赫兹特性之间的联系^[30]。Nico等人系统地研究了向列相液晶的太赫兹特性。并利用太赫兹时域光谱获得的数据在0.2~2.5 THz。这样一个宽带太赫兹数据尚未见报告。从实测数据提取了寻常偏振态和非常偏振态的双折射、折射率和吸收系数。液晶分子侧链和主结构对太赫兹各向异性的影响也进行了分析讨论^[36]。

Yang等人用太赫兹时域频谱方法研究了E7液晶在26℃~70℃温度范围内的光学常数。结果显示,在0.2~2.0 THz范围内,E7液晶在室温条件下,其消光系数小于0.035,没有尖锐的吸收峰, n_e 值的范围为1.690~1.704, n_o 值的范围为1.557~1.581,即双折射值的变化范围为0.130~0.148。双折射值的温度相关性与可见波段的特性相似。温度梯度的太赫兹光学常数也给出了结果。E7的光学常数可以用扩展的柯西等式由可见和近红外波段推算到太赫兹或亚毫米

波段^[37]。Hongk Yu等人用太赫兹时域频谱方法研究了E7、BL037和RDP97304的太赫兹特性。折射率和消光系数在这里进行了推导。结果表明,与E7和BL037相比,RDP97304具有最大的双折射值、最小的吸收率。因而RDP97304是一种比较有效的开发太赫兹器件的液晶材料^[38]。

1.2 太赫兹液晶移相器

太赫兹(THz)技术及其应用得到了迅速发展。尽管如此,许多必不可少的准光元件,如可调谐太赫兹相位转换等器件尚在研究开发中。有一些移相器是基于光学或电学控制量子阱的载流子浓度来实现的。这些基于量子阱的相位延迟器可调性比较差,一般需要在远低于室温的条件下实现^[39-40]。Ci Ling Pan课题组最初利用38.6 μm的向列相液晶盒实现5°的延迟量^[22],该课题组研究人员采用570 μm的向列相液晶盒在125 V的驱动电压作用下实现了在1 THz条件下延迟量为90°的器件^[41]。该器件可以作为在1 THz的电控四分之一波片,也可以作为电控四分之一波片的补偿片。同时该课题组实现了在1 THz的可调相位为360°相位延迟器件,相位延迟所对应的电压为100 V和90.5 V/cm。该器件采用盒厚为1.83 mm的垂直配向液晶盒(如图3所示),所用液晶为E7。该器件实现1 THz达到360°^[42]。

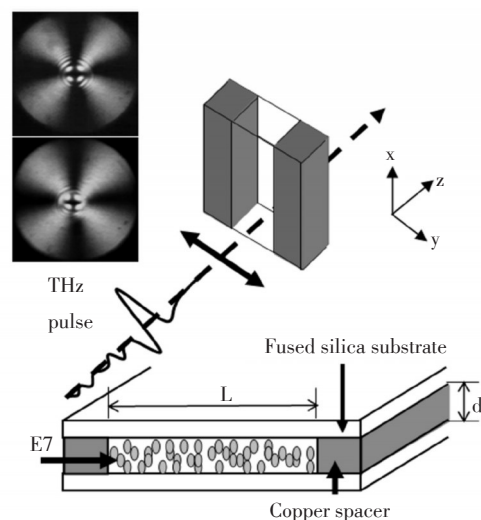


图3 电控液晶THz相位延迟器的示意图。左上角的两个干涉图是1.5 mm和2.0 mm液晶盒的干涉图

Chen等人提出了在1 THz的可调液晶相位控制

器件,该器件的主要设计要点是:采用向列相液晶E7,该液晶在0.2~1.2 THz范围内的双折射值约为0.17;三明治结构的液晶盒(总厚度为3.0 mm)增加量光波的相干长度,减少了界面的菲涅尔损失;应用磁场来给厚液晶盒配向,实现0~360°相位可调^[22]。

1.3 太赫兹可调液晶滤波器

Vieweg 等人提出了一个可切换的太赫兹带阻滤波器(如图4所示),这个过滤器包含一液晶层,作为一个半波延迟片在一种状态,而在另外一种状态是一种各向同性膜层。该器件结合了三种独特的性质:它可以电控切换,它提供了一个在350 GHz 透过率达-35 dB 和可调谐在宽频率范围从350~700 GHz^[43]。

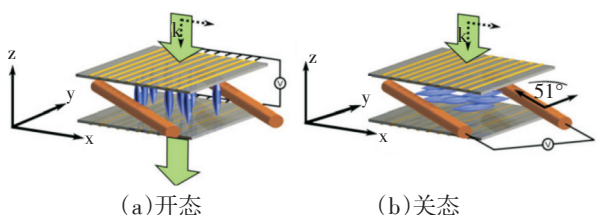


图4 太赫兹滤波器的示意图

Ren 等人基于Lyot 液晶可调滤光片和F-P可调液晶滤光片设计了室温条件下的太赫兹液晶滤波片。结果表明,该液晶可调滤光片具有较宽的可调范围和较窄的带宽^[44]。Chen 等人设计了一个工作频率范围在太赫兹的二级Lyot 滤光器(如图5所示),中心带通频率可以在0.388~0.564 THz 区间连续可调,液晶的双折射通过磁铁来控制。该器件的透射带宽为0.1 THz,由于厚液晶盒内的液晶分子的散射导致的插入损耗为8 dB。该滤光器可以在室温下工作^[25]。

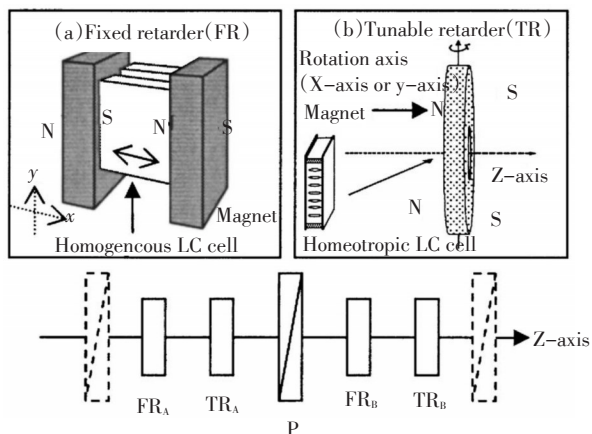


图5 Lyot型太赫兹液晶滤光器的示意图,P为偏光片, N为磁场N极;S为磁场S极

Ho 等人提出了一种可调的宽带太赫兹滤光器(如图6所示),连续可调频率范围为0.176~0.793 THz,液晶的双折射通过磁场控制,器件的插入损耗为5 dB^[45]。

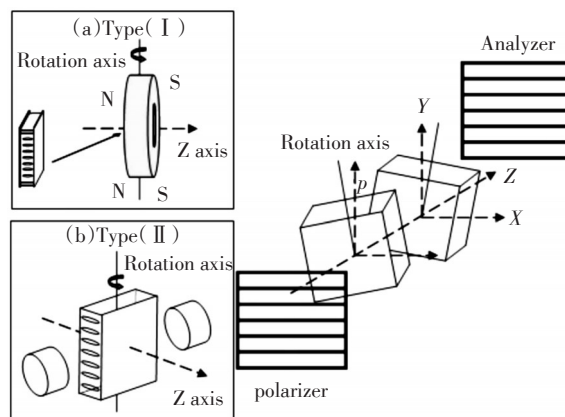


图6 液晶可调 Solc 滤光器的示意图(其中, (a)和(b)是两种不同加磁场的方式)

液晶双折射滤波器具有室温下工作,调谐简单方便,带宽窄等优点。为了达到设计不同调谐范围和带宽的这种滤波器的目的,以满足实际应用的需要,扩大其应用范围,吕英进等人采用数值模拟方法,进行参数计算和设计思路的总结,并设计了一套窄带输出的滤波器实例^[46]。结果表明,通过对影响滤波器调谐范围和输出带宽的关键参数的数值模拟和分析,为设计不同调谐范围的液晶双折射滤波器提供了依据,设计实例基本上满足预期的设计要求,调谐范围为0.691~0.866 THz。

Li 等人提出了一个液晶电控太赫兹带通滤波器。考虑消色差理论,这个二维金属光子晶体设计成在太赫兹波段带通^[47]。电场用来改变液晶分子的轴向,因而液晶的折射率也随之改变,对应的透过频段也会随着改变。该带通滤光片可以在0.18~0.19 THz 范围内进行调制。相应的峰值透射率频率的太赫兹波的带通滤波器可通过上面提到的这种电控液晶太赫兹带通滤波器来实现。

1.4 太赫兹可调偏振器

Thorsten Göbel 等人实现了采用双频液晶制作了可调太赫兹滤波器,实现了单纯的电场滤波调制^[48]。Hsieh 等人提出了基于向列相液晶的费斯纳尔型的太赫兹偏振片,在0.2~0.9 THz 范围内的偏振因数超过0.95^[49]。Hsieh 等人还设计了在两块熔融石英棱镜的

中间为向列相液晶层的费斯纳尔型太赫兹偏振片(如图7所示),这种向列相液晶型的太赫兹偏振器的偏振因子和消光系数分别超过0.99和 10^{-5} [50]。

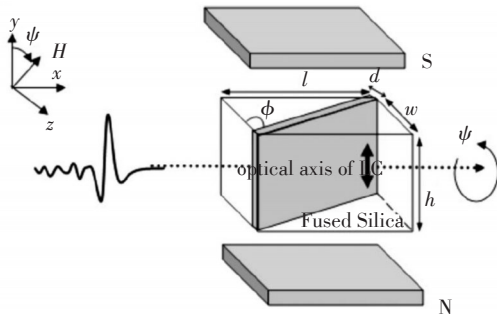


图7 太赫兹液晶Feussner偏振片。该期间的尺寸为 $22.3\text{ mm}\times 15\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 。太赫兹波的偏振方向沿着 y 轴

Niu等人提出了一种连续改变太赫兹波偏振态的器件,该器件包括金属层、减反膜、液晶和反射镜,正交偏振态之间的相移可以连续调节。采用时域有限差分方法计算相移,透射率和反射率由严格耦合波分析方法计算。结果表明,该结构可以在1 THz实现相移连续可调[51]。Zhou等人设计了基于液晶腔的太赫兹偏振滤光片,P偏振和S偏振均为透射的,在带通区域的透过率大于99.5%,P偏振和S偏振可以在小角度均可以区分。并且还讨论了其他结构参数对光谱性能等因素的影响[52]。

2 结束语

主要介绍了近些年来太赫兹液晶器件的工作原理、研究进展,并对研究结果进行了总结。可以看到,液晶技术在太赫兹器件有着广泛的应用。可以通过电场或磁场改变液晶的双折射特性来实现对器件的传输特性进行有效调节。目前太赫兹液晶光电特性的研究主要是集中在现有液晶应用的可行性分析研究,对太赫兹电磁波特性及其器件的要求进行相关液晶的设计和开发的研究偏少。太赫兹液晶移相器主要分成两种工作模式,一种是纯电场调节实现;另一种是同时采用电场和磁场对液晶的指向分布进行调节。这主要取决于液晶的光电特性和器件的结构设计。而太赫兹液晶可调滤波器和偏振控制器等器件都主要处于实验室科学研究阶段,离产品化还有段距离。如果太赫兹液晶器件的应用能够充分借鉴显示和光学领域已经成熟的技术,将对太赫

兹液晶器件的研究、开发有很大帮助。

参考文献

- [1] Reintzer F. Beiträge Zur Kenntniss Des Cholesterins [J]. Monatshefte für Chemie, 1888, 9: 421-441.
- [2] Lehmann O. Über Fliessende Krystalle [J]. Zeitschrift für Physikalische Chemie, 1889, 4: 462-472.
- [3] Miniewicz A, Gniewek A, Parka J. Liquid crystals for photonic applications [J]. Optical Materials, 2003, 21(1-3): 605-610.
- [4] Apter B, Efron U, Bahat-Treidel E. On the fringing-field effect in liquid-crystal beam-steering devices [J]. Appl. Opt., 2004, 43(1): 11-19.
- [5] Bagwell B E, Wick D V, Batchko R, et al. Liquid crystal based active optics[C]. SPIE, 2006, 6289: 628908-628908-12.
- [6] 杨傅子.近期液晶研究中的几个新方向—液晶非显示应用基础研究的进展[J].物理学进展, 2008, 2: 107-129.
- [7] 苏坚,陈鹤鸣.基于液晶光子晶体的太赫兹波调制器[J].光学学报,2010, 30(9): 2710-2713.
- [8] Chigrinov V G. Liquid crystal applications in photonics [C]. SPIE, 2009, 7232: 72320P-1-P-12.
- [9] Valley P, Mathine D L, Dodge M R, et al. Tunable-focus flat liquid-crystal diffractive lens[J]. Opt. Lett., 2010, 35(3): 336-338.
- [10] Chigrinov V G, Kwok H S, Poon A, et al. Recent liquid crystal photonics research in HKUST [J]. Photonics Letters of Poland, 2011, 3 (1): 2-4.
- [11] Beeckman J, Neyts K, Vanbrabant J M. Liquid-crystal photonic applications [J]. Opt. Eng., 2011, 50: 081202-1-081202-17.
- [12] Web:<http://www.sp.phy.cam.ac.uk/SPWeb/research/thzcamera/WhatsTHzImaging.htm>
- [13] Ferguson B, ZHANG X C. Materials for Terahertz science and technology [J]. Nature Mater., 2002, 1: 26-33.
- [14] 李玉林,陈华,汪力,等.太赫兹波的产生、传播和探测[J].现代物理知识,2006, 18 (3): 29-30.
- [15] Mittleman D. Terahertz Imaging in Sensing with THz Radiation [M]. New York: Springer-Verlag, 2002: 131-137.
- [16] Siegel P H. Terahertz technology [J]. IEEE trans. microw. Theory Tech., 2002, 50(3): 910-928.
- [17] 刘盛纲,姚建铨,张杰,等.太赫兹科学技术的新发展[C]//香山科学会议第270次学术讨论会,2005.
- [18] 牧凯军,张振伟,张存林.太赫兹科学与技术[J].中国电子科学研究院学报,2009,4(3): 221-237.

- [19] 刘盛纲, 钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(5): 481-486.
- [20] 魏华. 太赫兹探测技术发展展望[J]. 红外技术, 2010, 32(4): 231-234.
- [21] CHEN C Y, Tsai T R, Pan C L, et al. Room temperature Terahertz phase shifter based on magnetically controlled birefringence in liquid crystals [J]. Appl. Phys. Lett., 2003, 83: 4497-4499.
- [22] Tsai T R, CHEN C Y, Pan P P, et al. Room temperature electrically controlled Terahertz phase shifter [J]. IEEE Microwave Wireless Compon. Lett., 2004, 14(2): 77-79.
- [23] CHEN C Y, Hsieh C F, LIN Y F, et al. Magnetically tunable room-temperature 2π liquid crystal Terahertz phase shifter [J]. Opt. Express, 2004, 12(12): 2625-2630.
- [24] PAN C L, Hsieh C F, PAN R R, et al. Control of enhanced THz transmission through metallic hole arrays using nematic liquid crystal [J]. Opt. Express, 2005, 13(11): 3921-3930.
- [25] CHEN C Y, PAN C L, Hsieh C F, et al. Liquid-crystal-based Terahertz tunable lyot filter [J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 88: 101107-1-101107-3.
- [26] LIN C Y, LI Y T, Hsieh C F, et al. Manipulating Terahertz wave by a magnetically tunable liquid crystal phase grating [J]. Opt. Express, 2008, 16(5): 2995-3001.
- [27] Ghattan Z, Hasek T, Wilk R, et al. Sub-terahertz on-off switch based on a two-dimensional photonic crystal infiltrated by liquid crystals [J]. Optics Communications, 2008, 281(18): 4623-4625.
- [28] Wilk R, Vieweg N, Kopschinski O, et al. Liquid crystal based electrically switchable bragg structure for THz waves [J]. Opt. Express, 2009, 17(9): 7377-7382.
- [29] Wilk R, Vieweg N, Kopschinski O, et al. THz spectroscopy of liquid crystals from the CB family [J]. J Infrared Milli. Terahz Waves, 2009, 30(11): 1139-1147.
- [30] Vieweg N, Jansen C, Shakfa M K, et al. Molecular properties of liquid crystals in the Terahertz frequency range [J]. Opt. Express, 2010, 18(6): 6097-6107.
- [31] Köberle M, Göbel, T, Schönherr D, et al. Material characterization of liquid crystals at THz-frequencies using a free space measurement setup[C]. Microwave Conference (GeMIC 2008), German, 2008: 1-4.
- [32] Bulja S, Mirshekar Syahkal D, James R, et al. Measurement of dielectric properties of nematic liquid crystals at millimeter wavelength [J]. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, 2010, 58(12): 3493-3501.
- [33] Vieweg N, Shakfa M K, Koch M. BL037: A nematic mixture with high Terahertz birefringence [J]. Optics Communications, 2011, 284(7): 1887-1889.
- [34] Shakfa M K, Vieweg N, Koch M. Liquid crystal with high THz birefringence[C]. Microwave Conference (GeMIC 2011), German, 2011: 1-4.
- [35] Ku C P, Shih C C, LIN C J, et al. THz optical constants of the liquid crystal MDA-00-3461 [J]. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 2011, 541:65/[303]-70/[308].
- [36] Nico Vieweg, Mohammad Khaled Shakfa, Benedikt Scherger, et al. THz properties of nematic liquid crystals [J]. J Infrared Milli Terahz Waves, 2010, 31:1312-1320.
- [37] YANG C S, LIN C J, PAN R P, et al. The complex refractive indices of the liquid crystal mixture E7 in the Terahertz frequency range [J]. JOSA B, 2010, 27(9): 1866-1873.
- [38] Park H Y, FAN F, Meehyun Lim, et al. Terahertz properties of liquid crystals [C]. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 36th International Conference on, 2011: 1-3.
- [39] Libon I H, Baumgärtner S, Hempel M, et al. An optically controllable Terahertz filter [J]. Appl. Phys. Lett., 2000, 76: 2821-2823.
- [40] Kersting R, Strasser G, Unterrainer K. Terahertz phase modulator [J]. Electron. Lett., 2000, 36: 1156-1158.
- [41] Hsieh C F, PAN R P, TANG T T, et al. Voltage-controlled liquid crystal Terahertz phase shifter and quarter-wave plate [J]. Opt. Lett., 2006, 31(8): 1112-1114.
- [42] Hsin-Ying Wu, Cho-Fan Hsieh, Tsung-Ta Tang, et al. Electrically tunable room-temperature 2π liquid crystal Terahertz phase shifter [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2006, 18(14): 1488-1490.
- [43] Vieweg N, Born N, Naib I A, et al. Electrically tunable Terahertz notch filters [J]. J Infrared Milli Terahz Waves, 2012, 33: 327-332.
- [44] REN G J, WANG X C, MA X R, et al. Terahertz liquid crystal tunable filter[C]. Terahertz Science and Technology, 2008, 7277: 72770L-1-72770L-6.
- [45] Ho I C, PAN C L, Hsieh C F, et al. Liquid-crystal-based Terahertz Tunable Solc Filter [J]. Opt. Lett., 2008, 33(13): 1401-1403.
- [46] 吕英进, 徐德刚, 刘鹏翔, 等. 基于液晶的可调谐太赫兹双折射滤波器的设计 [J]. 激光与红外, 2011, 41(4): 450-454.
- [47] LI Hui, ZHANG Xin-yu, ZHANG Tian-xu, et al. Electrically controlled Terahertz band pass filter with liquid crystal[C]. Terahertz Science and Technology, 2008, 7277: 72770M-1-72770M-6.

实现以1 dB为步长精确调整激光输出功率密度;激光功率密度解算处理模块可根据需要计算衰减装置的组合方式,并自动解算和显示当前激光输出功率密度值;激光能量均化光学装置把能量分布为抖动起伏较大的激光光束整形为能量均匀分布的匀场光束;扩束准直光学装置对激光光束进行整形,使输出近似远场匀场激光光束;综合数据处理模块可自动设置测试方式,记录并保存测试数据,所有数据可通过USB接口自动传输。

3 验证试验

3.1 试验方法

(1)将激光探测灵敏度检测设备和激光空间能量密度检测设备分别放置在光具座导轨上。

(2)调整激光探测灵敏度检测设备和激光空间能量密度检测设备使其准直并使激光探测灵敏度检测设备出光孔径中心对准激光空间能量密度检测设备探测光学系统孔径中心,同时DELIXI单相接触调压器接市电,用UT53万用表监测调整单相接触调压器至220 V。

(3)在激光探测灵敏度检测设备不同档位上发射单脉冲激光,与其同时调整激光空间能量密度检测设备测量档位,分别测试激光探测灵敏度检测设备1~63 dB不同档位的激光功率密度。

3.2 试验条件

- (1)激光空间能量密度检测设备:2 fJ/mm²;
- (2)光具座:1 500 mm;
- (3)UT53万用表;
- (4)DELIXI单相接触调压器。

3.3 试验结论

激光探测灵敏度检测设备输出激光功率密度最小值为 0.32×10^{-6} W/mm²。激光探测灵敏度检测设备激光功率不确定度变化范围为2.0%~9.1%,与通常使用的激光探测灵敏度检测方式所造成的灵敏度检测最大偏差数倍相比,大大提高了激光探测灵敏度测量准确性,确保了检测结果的可信性。激光探测灵敏度检测设备输出激光功率密度范围为 0.32×10^{-6} ~1.43 W/mm²,动态范围为66 dB。

4 结论

激光探测灵敏度检测设备原理样机采用激光光束均匀化整形、精确衰减数控等先进技术,有效解决了激光探测灵敏度动态范围等测试需求,可有效提高激光探测设备的调试精度,提升质量,缩短生产周期,节约生产成本,同时为用户提供了有效的检测和维修手段,具有广泛的应用前景和较好的经济效益。

(上接第29页)

- [48] Thorsten Göbel, Peter Meissner, Alexander Gaebler, et al. Dual-frequency switching liquid crystal based tunable THz filter[C]. Optical Society of America, 2009: CThFF4.
- [49] Cho-Fan Hsieh, Yu-Chien Lai, Ru-Pin Pan, et al. A liquid-crystal-based Terahertz polarizer [C], Laser Science, 2007: JSuA2.
- [50] Hsieh C F, Lai, Y C, et al. Polarizing Terahertz waves with nematic liquid crystals [J]. Opt. Lett., 2008, 33(11): 1174-1176.
- [51] NIU C, CHANG S J. Reflective Terahertz tunable polarization controller [J]. Optoelectronics Letters, 2012, 8(4): 0264-0268.
- [52] ZHOU Y, ZHANG J, GU P Y, et al. Terahertz flat-top polarization filter based on liquid crystal cavities[C], Asia Communications and Photonics, 2011, 8307: 830722.