

河北工业大学城市学院

毕 业 论 文

作 者： 申琦 学 号： 135958

系： 理学系

专 业： 应用物理学

题 目： 液晶在太赫兹领域的研究进展

指导者： 朱吉亮 副教授

评阅者：

2017 年 5 月 20 日

毕业论文中文摘要

液晶在太赫兹领域的研究进展

摘要:

太赫兹辐射是频率在 0.1-10THz, 对应波长是 3000-30 μm 的电辐射。从频率上看, 在无线电和光波之间。它在物理、化学、电子信息、材料科学、通信雷达等多个重要领域具有独特的优越性和应用前景。液晶是调节振幅和光强的媒介。液晶作为一种功能材料, 具有可调的光学各向异性, 从紫外到微波波段都可以通过磁场和电场进行连续的调节。液晶太赫兹元件相比于其他材料具有独特的电磁调谐性, 相比于传统的半导体材料调制器, 液晶调制器具有体积小、质量轻、价格低、工艺简单等优势。因此, 将液晶材料运用于太赫兹元件具有重大的研究意义。本文主要论述了液晶在太赫兹领域的研究进展, 包括宽带可调的液晶太赫兹波片, 液晶可调太赫兹超材料吸收器等。

关键词: 液晶; 太赫兹; 液晶太赫兹波片; 液晶可调太赫兹超材料吸收器

毕业论文外文摘要

The development of liquid crystal In the terahertz realm

Abstract:

The terahertz radiation is a frequency of 0.1 to 10THz, and the wavelength is 3000-30 μm . There is a THz between the radio and light waves in frequency. It has unique advantages and applications in physics, chemistry, electronic information, material science, communication radar and other important fields. The liquid crystal is the medium that regulates amplitude and light. The liquid crystal is a functional material with adjustable optical anisotropy. It can be adjusted continuously through magnetic fields and electric fields from ultraviolet to microwave. The liquid-crystal terahertz components have unique electromagnetic tunability compared to other materials. Compared to conventional semiconductor material modulators, the liquid crystal modulators have advantages such as small volume, low quality, low price and simple process. Therefore, it is of great significance to apply liquid crystal materials to terahertz components. This paper mainly discusses the progress of liquid crystal in terahertz, Includes wideband adjustable liquid crystal tz wave, liquid crystal tuner, super-material absorber, etc.

Keywords: The liquid crystal; Terahertz; Liquid crystal terahertz wave plate; Liquid crystal terahertz absorber vesse

目 录

1 绪论·····	1
1.1 太赫兹技术的简介 ·····	1
1.2 液晶的技术的简介·····	3
2 太赫兹大双折射材料·····	6
2.1 一般规律的大双折射液晶材料的设计和实现·····	6
2.2 太赫兹大双折射液晶材料的性能·····	7
3 宽带可调液晶太赫兹波片·····	8
3.1 液晶太赫兹波片的制作和模拟·····	8
3.2 液晶太赫兹波片性能总结·····	9
4 液晶可调太赫兹超材料吸收器·····	10
4.1 液晶折射率在太赫兹波段的温度特性·····	10
4.2 一种新型可调太赫兹超材料吸收器·····	11
结论·····	14
参考文献·····	15
致谢·····	17

1 绪论

液晶作为光电各向异性功能材料,从微波到紫外波段是可以通过磁场或者电场连续调节的,因此液晶太赫兹材料和器件受到了各界的密切关注。因为液晶太赫兹元件具有独特的电磁调谐性,所以液晶调制器比传统的基于半导体材料调制器有了质量轻、体积小、工艺简单、价格低廉等优势。因此,在太赫兹元件中加入液晶材料对太赫兹技术的发展和研究有深远的影响。

1.1 太赫兹技术的简介

太赫兹波是存在于微波和红外光之间的电磁波,频率在 $0.1\text{-}10\text{THz}$,波长在 $3000\text{-}30\text{ }\mu\text{m}$ 。这一波段也就是太赫兹波段在电磁频谱中,这些年人们一直没能研究透彻,所以也不能充分地加以利用和研究,所以一直到了 20 世纪 80 年代,太赫兹技术才在全世界范围内得到了广泛研究和迅猛发展。我们都知道电磁波谱,然而太赫兹波段的位置如图 1 所示。

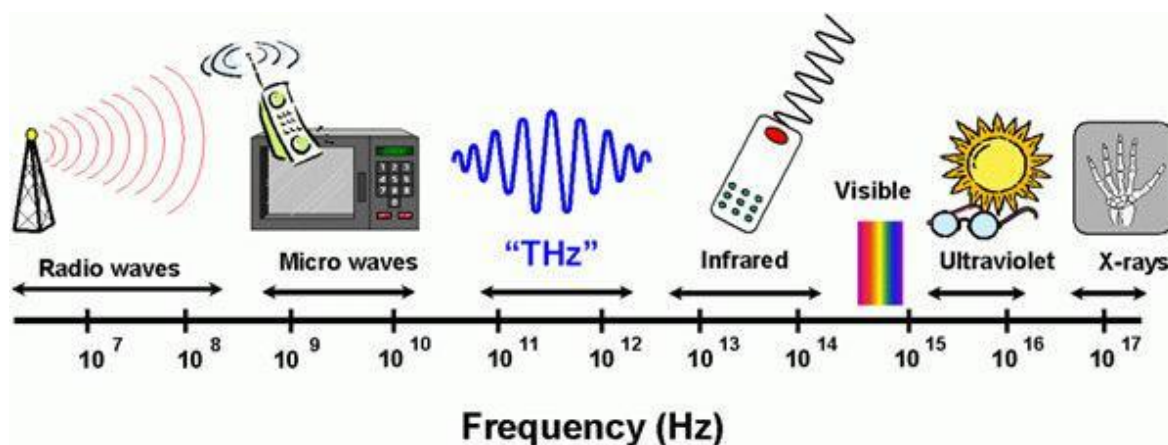


图 1 电磁波谱示意图

1.1.1 太赫兹基本的性质

太赫兹波在电磁波谱中的位置在长波段与毫米波段重合,但是在短波段与红外线重合,然而在宏观电子学向微观电子学过渡的频段,因此太赫兹波有很多独有的性质属性:

1. 太赫兹波的光子能量相对来说比较低,不会对样品有加热效应和产生有害的电离,非常有利于生物的活体的检查等方面。

2. 糖类,蛋白质,DNA 的声子振动能级都在太赫兹波段范围内 表现出很强的吸收和谐振,所以可以作为物质辨别和鉴定的研究。

3. 太赫兹比光通信的穿透能力好,比微波通信的方向性好,无线传输速度能达到 10G bit/s 以上。

4. 有很多的材料对于太赫兹波所造成的的吸收都是比较小的,所以它拥有很高的透过性能。所以我们可以利用太赫兹技术对这些材料进行内部的探查。

1.1.2 太赫兹技术主要应用

太赫兹的基本性质和特性决定了它的研究方向,主要在太赫兹通信,太赫兹成像和太赫兹波谱技术三大方向。具体的技术如图 2 所示。

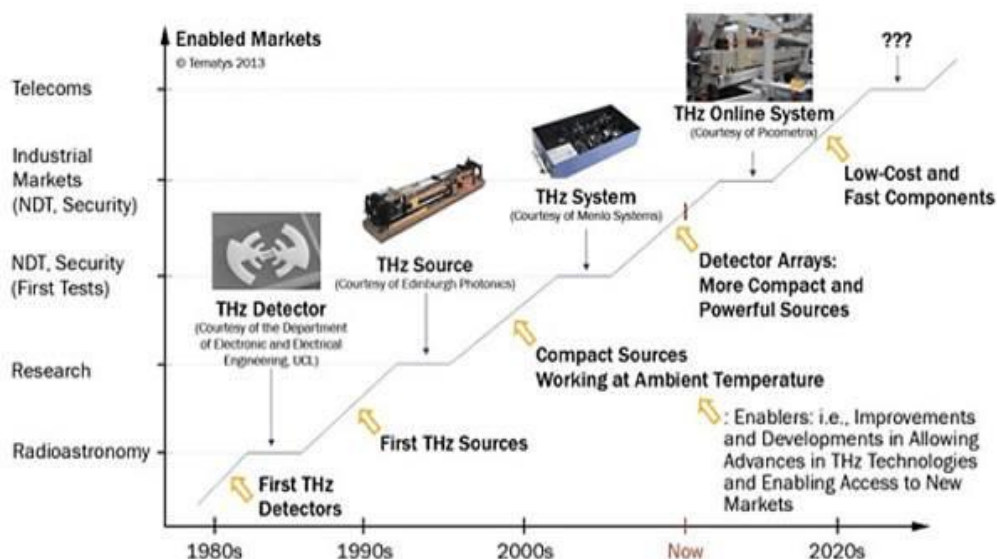


图 2 太赫兹技术主要应用

1. 太赫兹通信技术的传输速度相当快,可以达到 10GB/S,特别是是在微信通信方面。在外太空,空间近似于真空,所以我们不用考虑水分的影响,保密性可以说是非常的强,满足了人们对于此更高的需求。

2. 太赫兹成像技术主要有两种方法,第一就是脉冲,第二就是连续。脉冲方式和太赫兹时域光谱技术有很大的相似之处,因为这个特点,它能对物质进行特殊的功能,获得内部折射率分布。连续方式主要用于太赫兹安检技术,根据太赫兹波的穿透性、对金属的强反射以及高频率使得成像分辨率较高。太赫兹雷达这个技术也是应用

在成像技术的一种体现。

3. 太赫兹在时域光谱方面的技术，由于太赫兹的脉冲具有相对来说比较高的峰值功率，信噪比可达 10^5 并且有可能更高。在药品质量检测，酶的研究，DNA 鉴别方面有很大的应用。

1.1.3 太赫兹器件

截止到现在，已经有的主要为四种太赫兹源：半导体的太赫兹波所产生的的辐射源、在光子学的基础上制造的太赫兹波形成的辐射源、在自由电子太赫兹波的基础上形成的辐射源以及在空气等离子体的基础上产生的太赫兹波辐射源。

1.2 液晶的技术的简介

液晶在 1888 年由奥地利植物学家莱尼茨尔和德国科学家莱曼最先发现，具有独特的物理以及光学特性。液晶不但一方面具有液体的流动性，而且另一方面还具有晶体的有序性，液晶的指向矢分布还有它的光学性质都是主要依靠环境的温度和表面的作用，并且液晶对外场可以说是相当敏感，它是一种非常好的电光材料。

1.2.1 液晶的基本性质

目前发现的液晶材料基本上是一种或几种有机化合物海合而成，按分子形状可分为棒状、盘状和香蕉状等，如图 3 所示。

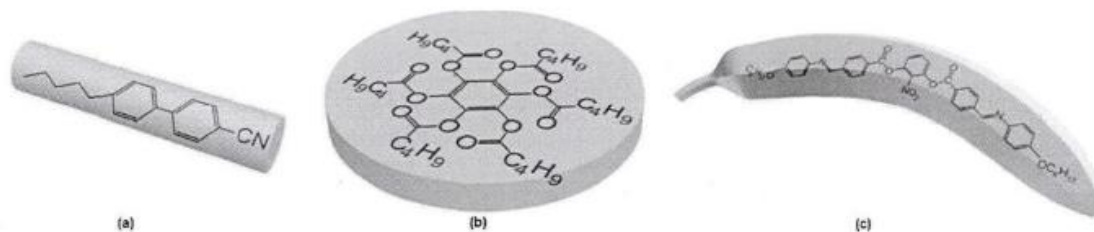


图 3 (a)棒状液晶，(b) 盘状液晶，(c) 香蕉状液晶

根据产生液晶相态的条件可分为三类。热致液晶我们都知道的是一般情况下在一定温度范围内就能够形成液晶相，所以说平时能够在显示技术应用的液晶大多数情况下都是热致液晶。溶致液晶，主要是由极性化合物和另外的一些溶剂作用而形成的、它能够随着溶液的浓度变化而变化，也能够随着温度变化而变化。溶致液晶中的其中一种也就是长棒状溶质分子一般要比构成热致液晶的大，分子长径比约在 15 左右。常见的有肥皂的水，洗衣粉内的溶液。而两性液晶则是指既能够形成热致液晶相同时

也能够形成溶致液晶相的化合物。

另外一种根据液晶分子的排列特点来分类可分为三类。向列相液晶：液晶中最为简单的一种液晶相，这种液晶的棒状分子之间我们近似看成是互相平等的，他们之间不分层。它们的排列也是是无序的，这些分子在受到外力作用的情况下容易发生流动，并且沿着流动方向取向，因此它的流动性相对来说就比较大。近晶相液晶在所有的液晶中是最为接近晶体的一类液晶。在液晶内的层内，分子之间也是可以进行自由的移动，但是有一点不同的是，它们之间不能够在各层之间进行来往，同时我们知道的这些层片它们又不是严格刚性的。胆甾相液晶跟近晶相液晶有一点很相似，就是它们都具有层状的结构，但层内分子的排列则与向列相液晶类似，在受到了特定的强度的电场作用的情况下、磁场作用还是很有可能将胆甾相液晶变成另外一种也就是向列相液晶。

1.2.2 液晶在显示领域的应用

液晶是一种独特的中间相，在固体相位和液体相位之间。它的发现已有一个多世纪，但只是在近 50 年，它在基本理论和应用研究方面才得到迅速发展，尤其以 LCD 为代表，在业界占据了相当的地粒如图 4 所示液晶显示技术的发展，这里仅作简要介绍。

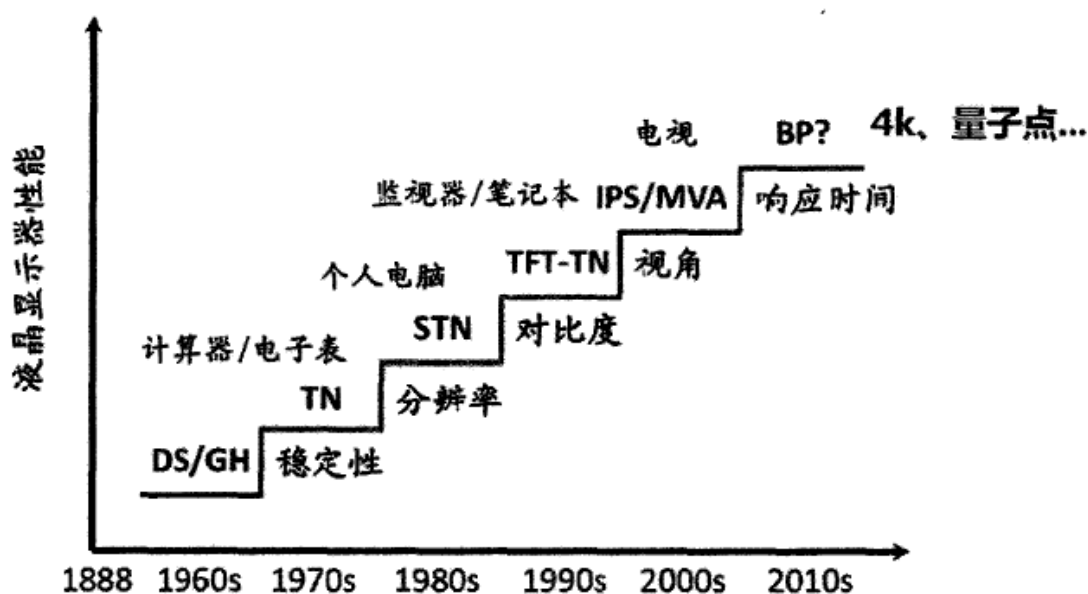


图 4 液晶显示技术的发展

20 世纪 60 年代，液晶显示是通过动态散射和宾主效应来实现，但这两种显示模式的稳定性和寿命都无法满足实际显示要求。直到 1971 年，由 M.Schadt 等人发明了 TN

型液晶，即扭曲向列相液晶显示模式，液晶显示技术才真正走向实用化，在电子手表、计算器等小屏幕上逐步有了应用。随后发现的 STN 使得显示器的分辨率进一步提升，应用到电脑显示器上。但是液晶显示在这方面还存在有很多的问题：比如说对比度比较低，视角相对来说比较窄以及响应的有些慢等。到了 1990 之后的年代，薄膜晶体管有了很大的发展，我们将它和有源矩阵引入到了液晶的显示中，液晶显示技术才从那个时候开始真正地快速发展起来。

目前，液晶显示也在进行着新的材料和技术的研究与开发，其中蓝相液晶显示技术，其在响应时间和光能利用率方面有重大改进。同时，近期出现的 4K 显示和量子点显示技术以它自身的优势受到越来越多的关注，市场前景看好。

1.2.2 液晶在非显示领域的应用

目前，液晶的非显示应用研究呈现出几个趋势，一是新型液晶材料和新型工作模式的引入，二是液晶与各种人工微纳结构的结合越来越密切。人们期望结合液晶的外场敏感性和各种人工介电、金属微结构自身的丰富物理性质，实新型主动可调型光电处理、传感、控制器件，特别是小尺寸光电集成器件，开拓微纳光学材料和器件研究开发的新领域。由于电磁理论模拟和微纳加工技术的不断进步，人工微结构材料和微纳光学已经成为近年来十分热口的的前沿领域。由于光波的波长位于微米或亚微米尺度，这样，与波长可比拟的微纳结构就可能具有许多传统材料不具备的新颖电磁特性。在液晶能够调控的光子晶体还有关于它的光纤的研究基础之上，我们进行更深一步探索，研究液晶和其他的金属微结构之间的相互作用，来实现可以实时进行调控的亚波长光子器件，这对于我们来说也同样是一个十分吸引人的课题。这个研究的方向不但具有很重要的基础研究价值，而且对于我们国家想要发展的新型的集成光电子器件有着非常非常重要的研究意义。最近这几年，国内和国外都已经纷纷开始加入了这方面的探索性研究。清华大学的研究人员将液晶注入由周期劈裂环阵列构成的负磁导率材料中，观测了 210MHz 的共振频率移动；Dickson 等人研究了液晶调控的亚波长金属孔阵，发现外电场可 W 使表面等离子激元的色散和传输特性发生显著的变化。此外，将液晶材料用于制备激光器等有源器件的想法也引起人们越来越多的兴趣，相关的研究正在迅速发展。

由于液晶在广麦的电磁波段都有着良好的电光调制特性，因此对于液晶光子学器件的研究和开发也从可见、近红外逐渐向波长更长的区域如中远红外、太赫兹波段乃至微波波段延伸，相应的液晶可调谐无源器件如相移器、延迟线等等都已经见诸报道。

这些长波段也是与军工用途密切相关的波段，将来的应用前景十分广阔。但正如前面所提到，工作波段越往长波长方向拓展，技术层面的实现难度就更大，对结构设计和材料的要求也更高。因此目前适用于这些工作波段的液晶器件大都还处于初级阶段，其器件性能与稳定性距离产业化要求还有很大的距离，且具体的应用尚未被充分开发出来。

2.太赫兹大双折射材料

太赫兹技术在材料科学、生物医疗、无损检测以及国家安全与反恐等领域显示出广阔的应用前景，近年来相关技术和研究发展迅速。太赫兹技术能够在现在社会得以应用的最为关键的其中一点就是对太赫兹信号的有效地进行探测或者是成像，而太赫兹信号在调制元件当中是不可替代和缺少的，所以它显得尤为重要。液晶由于其优异的外场（电场、磁场、光场、声场、温场等）调谐特性可应巧于可调太赫兹光子学器件，其与传统调制器相比具有无机械移动部件、体小巧、质量轻、成本低工艺简单等优势，因而受到了广泛关注。因此我们觉得只有适用于太赫兹波段，这样的液晶材料是才最基础并且也是最重要的研究方向。

2.1 一般规律的大双折射液晶材料的设计和实现

一般的大双折射液晶材料，它们的分子结构特点为：共轭长度比较长，电子云的共轭性也比较强；还有重要的一点就是在共轭方向上，它的偶极性比较强； Δn 随着某一端基柔性链的增长而相对增加，同时伴随着明显的奇偶效应，液晶分子中有一种刚性结构，它的存在对各向异性的影响要远大于侧链烷基。在可见光波段之中，吴诗聪教授总结了含氟联苯联乙炔还有另外一种二苯乙炔类液晶材料它们的物理性质，联苯类体系有比较大的共轭长度，所以它对应的液晶双折射也是较大的。

高折射率的液晶材料大多数粘度相对来说就比较高，这是一种缺点，而粘度在较高的情况下就会造成响应速度逐渐的下降。因此，结合现在已有的太赫兹大双折射液晶材料结构，得出目前太赫兹大双折射液晶材料结构设计原则是：在可见光的范围内时我们必须放在第一位的是大双折射液晶材料，才能够使用高光学各向异性的这个性能的液晶材料，但是这仅仅只是必要的条件。我们后期的实验表明，有的大双折射液晶材料在太赫兹波段也不是很大，深入原因有待进一步研究。当然在具体设计过程中，

还要兼顾温宽，粘度等液晶其他基本性能，使之确实能为实际所用。

于是南京大学王磊借鉴在可见光波段设计大双折射液晶的方法，做了一种太赫兹波段大 Δn 液晶材料的单体分子设计、合成与材料混配。主要通过混合氟化二苯乙炔衍生物等等的单体材料来制备得到一种太赫兹波段大双折射液晶材料。

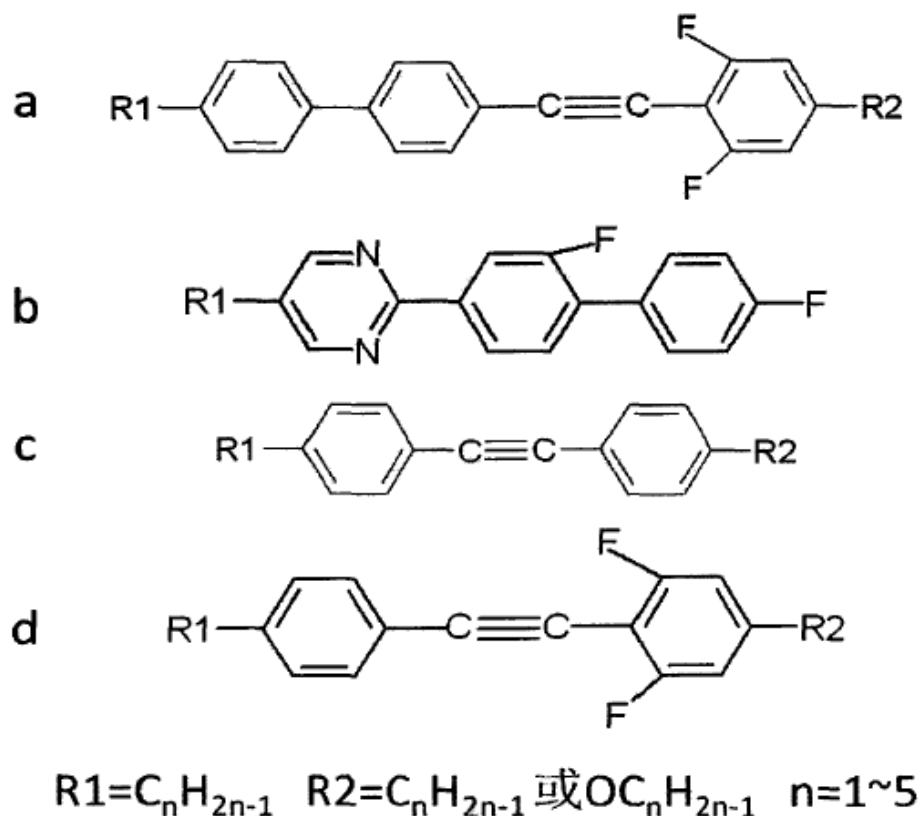


图 5 液晶混晶材料中各组分化合物的分子结构式

本液晶混晶材料采用四大类化合物，利用其不同性能进行混配，以达到混合液晶各项性能最优。其主要利用二苯乙炔结构及其取代基的衍生物达到太赫兹大双折射率（平均双折射在 0.3 左右），同时兼顾液晶相比较宽和粘度比较低这两个参数。具体设计思想如下：组分 a 二苯乙炔的共轭结构有利于提高液晶的双折射，作为主要组分；组分 b 的嘧啶基及末端氟原子有利于增强混晶材料的介电各向异性和各组分的相容性；组分 c 和 d 它们的分子量相对来说比较小，熔点也是很低，所以可以很有效地增大向列相温宽。内部含有氟基团能够作为侧基来降低材料的一项指数，那就是粘度。四大类由不同链长烷基或烷氧基衍生物混合而成的混晶，可以降低共熔点，增宽向列相温宽并有效消除近晶相，最终达到各项性能的均衡和最优，满足实际应用的需求。本方案解决了太赫兹波段长期没有大双折射液晶材料的问题，对设计和制造更新型太

赫兹器件具有远大的意义。

2.2 太赫兹大双折射液晶材料的性能

在太赫兹频段内的研究,这种材料的双折射率第一次超过了 0.3,这是一个了不起的研究,兼具宽温度的液晶相和粘度比较低的特点,能够实现工作电压相对较低、响应速度比较快、太赫兹调制器件的制备,适用于生物科学、材料医学、在不损害材料情况下进行内部检测等广泛的领域。

3 宽带可调液晶太赫兹波片

波片一相位延迟片,利用了晶体的双折射原理所以可以改变光的偏振状态。液晶波片(液晶相位延迟器)是一种全新的器件。通过控制施加在液晶两端的电压,我们要想改变通过液晶波片之间的光的相位差,可以选择通过改变液晶的双折射来实现。人们采用液晶可变延迟器做出了一种纯相位的延迟器件,所以我们可以将它用在偏振控制和成像这两个方面。液晶器件在通信波段的应用已经日渐成熟,使人们都可以看到在太赫兹领域的应用前景。尤其是太赫兹的无线通信方面应用对于太赫兹收发器来说,控制和变换太赫兹波的偏振是一个炙手可热的课题,吸引了相当多的人进行相关研究,但是就目前来说太赫兹液晶波片技术还未成熟。由于缺少太赫兹波段的高透明电极,在研究之初人们都是利用磁场调制液晶。但磁调液晶器件体积大、功耗大,很难集成。

3.1 液晶太赫兹波片的制作和模拟

首先第一点我们利用层比较少孔比较多的石墨稀来做为太赫兹波段的透明的电极,它如果能在太赫兹波段的透过率超过了 98%,那么它就可以成为太赫兹的完美的透明电极。然后结合亚波长金属线栅偏振器电极,驱动被光控取向的大双折射液晶材料 NJU-LDn-4,就可以做出来一个电控可调宽带液晶太赫兹波片。通过叠加多孔石墨烯电极的双层液晶盒,调节带宽使之进一步增大,工作电压进同时减小,实现了真正意义上效率高并且实用的超宽带可调太赫兹波片。我们聚焦于液晶盒一液晶技术的核心,尝试为各种太赫兹液晶器件遇到的一系列问题提供系统解决方案。在太赫兹的基础上制作的液晶波片的具体结构如图 6 所示。石英基板 1、亚波长金属线栅 2、少层多孔石墨烯 3、聚脂薄膜和框胶 4、光控取向层 5、液晶 6,导电胶带 7。两块熔融石

英作为衬底材料，亚波长金属线栅和少层多孔石墨稀材料分别作入射、出射面电极，电极上旋涂光控取向层 SD1，中间液晶层用的是上节介绍的太赫兹大双折射率液晶材料，液晶平行取向且与光栅成 45° ， $250\ \mu\text{m}$ 厚的聚脂薄膜确定液晶层厚度，电压分别通过导电胶带加在电极一侧。

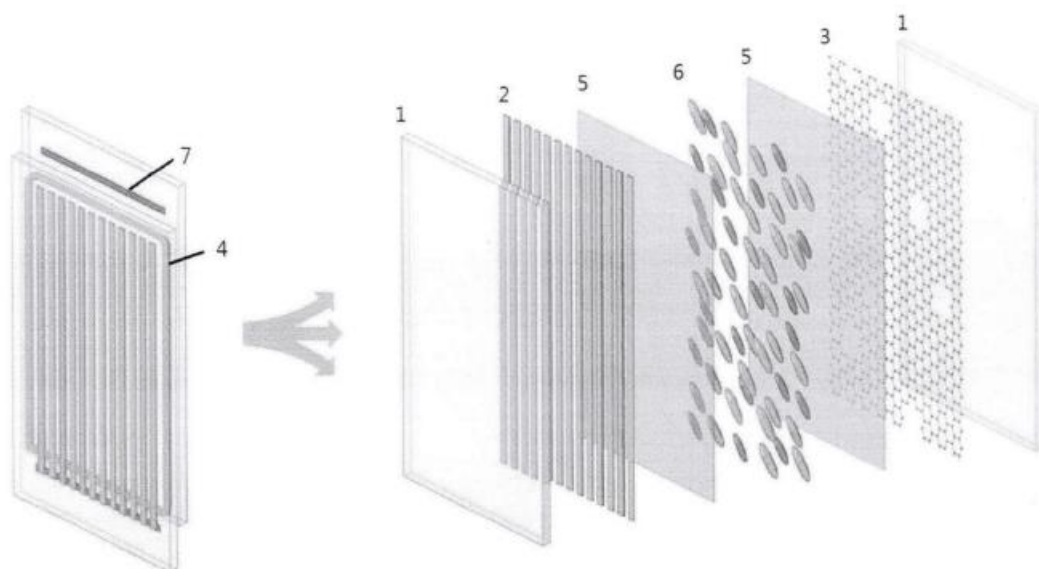


图 6 宽带可调太赫兹波片的结构示意图

3.2 液晶太赫兹波片性能总结

波片是进行偏振转换的基本元件。我们专注于液晶盒—所有液晶技术的基础，从材料到器件为太赫兹液晶器件提供了一个完整的解决方案，系统解决了一系列问题。在本章工作中，我们设计并展示了可调 THz 波片的优异性能。一种在多孔石墨烯的基础上制作的太赫兹透明的电极、亚波长的金属线栅所集成电极或者是起偏器和液晶材料的宽带可调太赫兹波片的设计和制备。我们最终实现在 $0.5\text{--}2.5\text{THz}$ 宽带低驱动电压 ($0\text{--}50\text{V}_{\text{rms}}$) 可连续调节 THz 波的偏振变换，这是目前这一领域最好的结果。通过叠层技术，小于 10V_{rms} 可 W 达到相同的调谐范围。除了体积小、易集成、效率高、能耗低，它还显示了其他有趣的特点和优势：

1. 独特的液晶盒结构包含一个内置亚波长金属线栅偏振器 / 电极和一个低成本的 CVD 生长少层石墨烯电极。

2. 大面积 UVO 处理技术显著提高石墨稀在太赫兹波段的透明度。即使旋涂取向层材料后，其透过率仍高达 95%，且电阻与单层完整石墨烯相当；和亚波长金属线栅

一样，能很好地控制液晶指向矢。

3.非接触式光控取向技术在不损坏电极的情况下，实现了高质量、高精度的液晶初始取向。

4.选用在太赫兹频段低吸收损耗、大双折射率的液晶材料，有效减小盒厚，降低施加电压的同时大大提高了调制速度。这一种宽带可调太赫兹波片实际上是一种能够实现超宽度的频段、自身偏振、透过率比较高、调制量也比较大、响应的快速也很快的电控波片，它的工艺方法简便、高效、能够大量地生产，器件性能相对来说稳定，各项功能指标都达到太赫兹的光子器件的要求，在太赫兹的通信、太赫兹传感探测、太赫兹成像等领域都具有了广泛的应用前景。本工作为其他传统的高性能太赫兹光子学器件打开了新的大门。

4 液晶可调超材料太赫兹吸收器

液晶是一类具备光、电各向异性的材料，具有电、磁响应特性，目前已经被广泛应用于信息显示领域。超材料作为新的材料它具有亚波长的人工的微结构，在理论上我们可以任意设计它的电磁参数（介电常数 ϵ ，磁导率 μ ），会呈现出与自然材料所不同的电磁特性。将液晶和人工超材料相结合，利用液晶的可调控性和超材料的特殊效应，可以实现具备即时调控功能的超材料器件，对液晶器件以及微纳光子学领域的发展将产生深远的影响。基于超材料的太赫兹吸收器可用于测热箱射计、能量收集器、传感、空间光调制器，热成像仪等。

4.1 液晶折射率在太赫兹波段的温度特性

从双折射中提取出来的与温度有关的序参数与可见区域的结果符合的很好，拟合出的折射率随温度的变化公式如下：

$$n = A \times (B - T_R)^C \quad (4-1)$$

其中 n 为折射率， T_R 为温度和清亮点的差值。 A 、 B 、 C 则代表的是 o 光和 e 光在不同频率下的拟合参数。

我们所用到液晶为向列相液晶 5CB。取光纤轴的方向为 Z ，即液晶分子的光轴指向的方向，其折射率是非常光的折射率 n_e 。光纤截面为 X - Y 平面，其 X 、 Y 方向

上的折射率相同都为 n_0 ，则 $n_0 = n_x = n_y$ ， $n_e = n_s$ 。

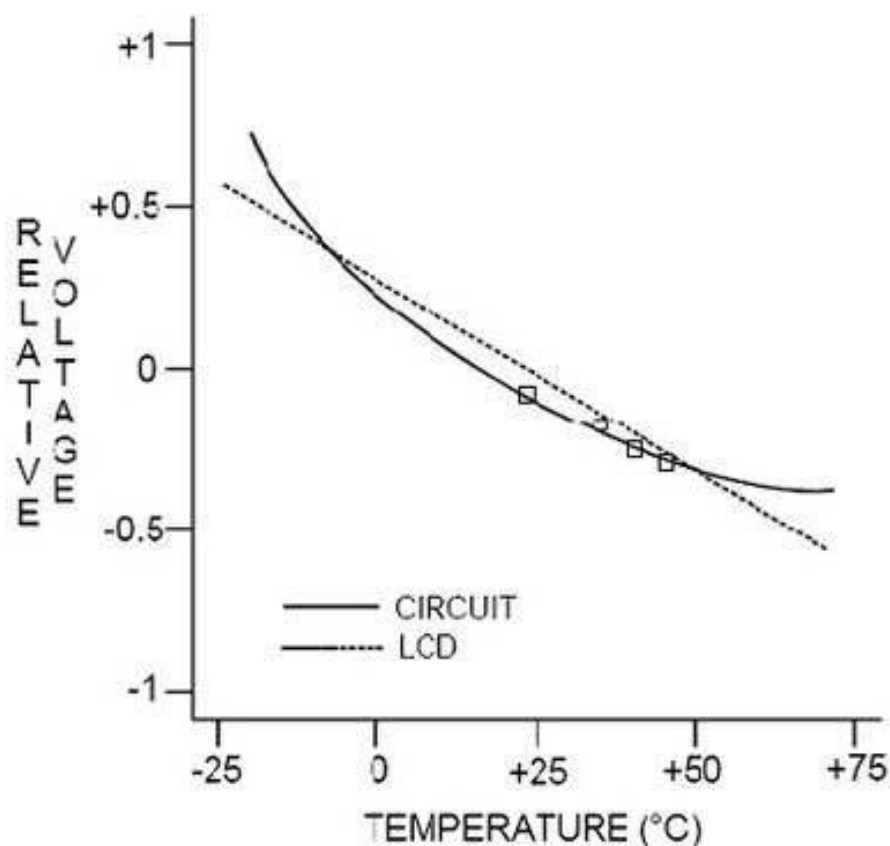


图 7 液晶 o 光折射率随温度变化曲线

根据公式(4-1)我们可以描绘出液晶寻常光的折射率在温度改变的情况下的图形曲线。如图 7 所示。我们得出了液晶 5CB 的清亮点 T_c 为 34°C ，将 A、B、C 分别取频率在 0.625THz 下得出来的拟合参数，其中 $A=1.722863$ ， $B=-0.35694$ ， $C=0.012667$ 。将上面我们得到的参数代入到公式(4-1)之中，可以看出随着温度升高，液晶 o 光折射率减小。

4.2 一种新型可调太赫兹超材料吸收器

基于液晶的太赫兹超材料吸收器结构如图 8 所示，两块熔融石英作为衬底材料，亚波长金属圆盘和金属面分别作入射、反射面电极，电极上旋涂光控取向层 SD1，中间液晶层用的是第二节介绍的太赫兹大双折射率液晶材料，液晶平行取向， $10\mu\text{m}$ 左右厚的 spacer 用来确定液晶层厚度。通过旋转液晶盒或温控可以动态调节吸收器的吸波特性。为了实现一种新的电控液晶来进行的可调太赫兹波吸收器，我们对上述图 8 的结构进行了改进，改进之后的结果如图 9 所示。

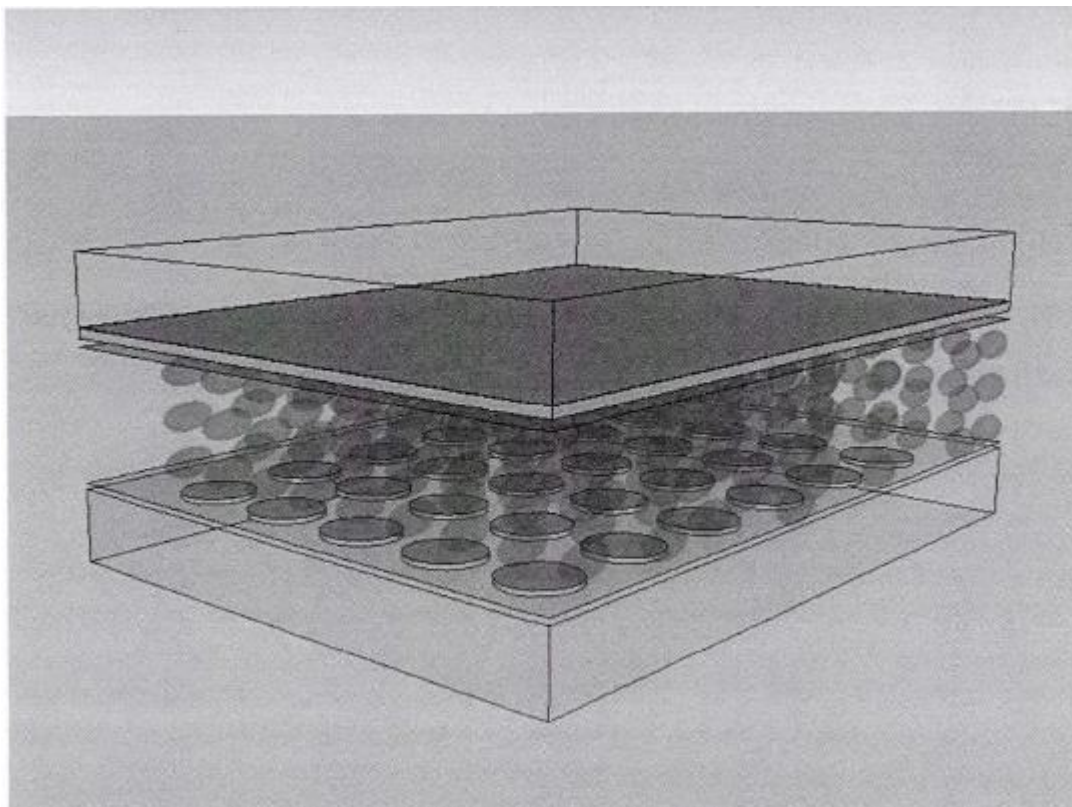


图 8 基于液晶的太赫兹超材料吸收器结构示意图

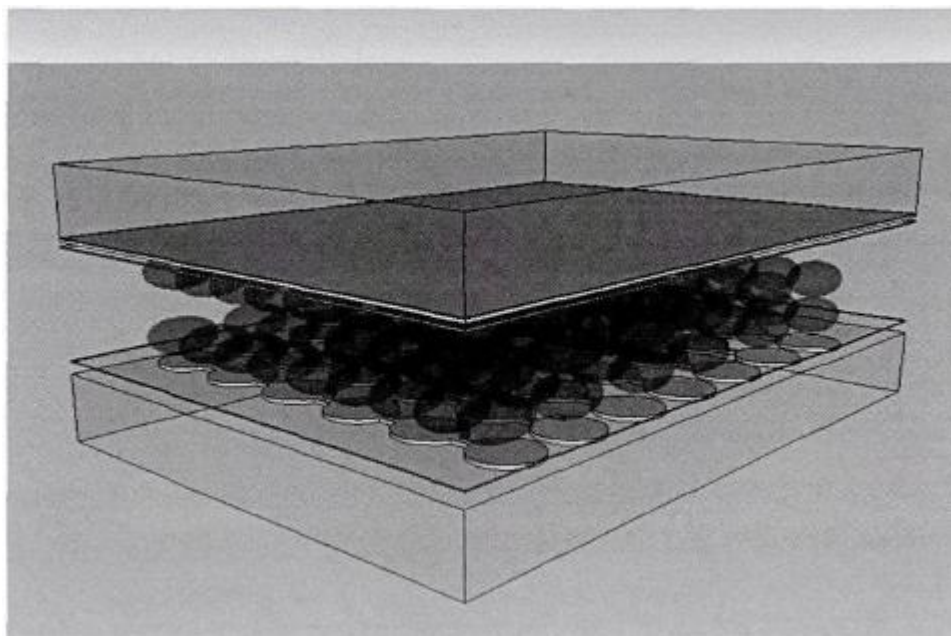


图 9 基于液晶的电可调太赫兹超材料吸收器结构示意图

太赫兹吸波器在我们不断研究的基础上，它的结构有了很大的创新；1，传统吸波器的结构一般都是H层结构，为此我们进行了突破，增加了上层衬底，但这不影响

超材料吸波器本质一核也机制磁谐振，两层金属层间仍形成反向电流。并且我们还增加了一个新的自由度，使得我们仅仅通过改变材料的厚度或者是材料本身都可以进行调节吸收器的一个关键点，那就是谐振频率。

2，突破中间传统固体介质层为液晶层，可电调。利用 LCD 里的边缘场效应,还可形成可调的中间不均匀介质层。对于这种相对来说不是很均匀介质层的研究我们还是开创了新的篇章。

3，中间介质层的厚度仅有 $10\mu\text{m}$ ，与传统光波段液晶盒的厚度在一个量级,具有传统液晶盒的种种优点，其响应速度与传统太赫兹器件相比大大提升。

结 论

液晶兼具液体的流动性和晶体的有序性，其指向矢分布及光学性质强烈依赖于表面作用和环境湿度，并对电场、磁场乃至光场等都非常敏感，其介电各向异性覆盖从紫外到微波的广阔频段，是优异的可调控电光材料。将液晶与微纳加工技术结合，实现对光的控制方面的研究和应用已由来已久。液晶显示技术方面只是利用了液晶对可见光方面，仅仅只是位相延迟的研究和偏振旋转效应的研究，但是最近几年以来随着人们对液晶材料认识有了更大的深入和这方面相关技术有了很大的发展，在非显示领域方面也逐渐引起人们的重视和关注。相关研究已经由可见光拓展到了红外、太赫兹甚至微波频段。现在研究已经有相位调制器、可调滤波器以及可调谐的激光器等等一系列的元器件方面，他们都有了电压比较低、能耗比较低、也没有机械移动的部件和高的可靠性等方面的优势，全面用在了通信、成像技术、光传感等各个领域。超材料作为新的研究方向，它是能够调控太赫兹波的一个理想的平台。液晶和超材料进行结合然后研究，在太赫兹领域将一定会有非常好的前景。

展望未来，还有许多工作要做：设计合成新的性能更加优异的适合太赫兹波段的液晶材料，探索设计规律，深入揭示机制。目前仍存一定随机性，多数借鉴光波段的规律外推太赫兹波段结论。我们还可以研究其他新型的液晶材料，比如说蓝相液晶、铁电液晶等液晶材料在太赫兹波段。

参 考 文 献

- [1] 陈泽章, 赵红枝, 李萌, 补婧, 马恒. 太赫兹波段液晶材料的应用及研究进展[J]. 电子元件与材料. 2015, (04): 1-4.
- [2] 姚建铨, 梁兰菊. 多层电磁超材料在太赫兹技术中的应用研究进展. 枣庄学院学报, (05): 1-11.
- [3] 王晓海. 太赫兹雷达技术空间应用及研究进展. 空间电子技术, 2015, (01): 7-16.
- [4] Yeha J M, Hsieh C F, Yang H C, et al. Preparation and properties of amino-terminated anionic waterborne-polyurethane-silica hybrid materials through a sol-gel process in the absence of an external catalyst. European Polymer Journal, 2008, 44(9):2777-2783.
- [5] Hsieh C F, Pan C L, Pan R P, et al. Polarizing terahertz waves with nematic liquid crystals. Optics Letters, 2008, 33(11):1174-6.
- [6] Aharon O, Abdulhalim I. Liquid crystal Lyot tunable filter with extended free spectral range. Optics Express, 2009, 17(14):11426-33.
- [7] Altmann K, Reuter M, Garbat K, et al. Polymer stabilized liquid crystal phase shifter for terahertz waves. Optics Express, 2013, 21(10):12395-400.
- [8] 邢维. 基于超材料的太赫兹滤波器研究. 北京交通大学, 2016.
- [9] 龚建勋, 刘正义, 邱万奇. 偏振片研究进展. 液晶与显示, 2004, (04): 259-265.
- [10] 王学力. 一种高精度相移器的制作与标定. 计量技术, 2006, (10): 24-27.
- [11] Saeedkia D. Handbook of Terahertz Technology for Imaging, Sensing and Communications. Woodhead Publishing, 2013.
- [12] Reuter M, Vieweg N, Fischer B M, et al. Highly birefringent, low-loss liquid crystals for terahertz applications. Apl Materials, 2013, 1(1):140-120.
- [13] Koenig S, Lopez-Diaz D, Antes J, et al. Wireless sub-THz communication system with high data rate. Nature Photonics, 2013, 7(12):977-981.
- [14] Chen H T. Interference theory of metamaterial perfect absorbers.. Optics Express, 2011, 20(7):7165.
- [15] 王磊. 太赫兹大双折射液晶材料与器件研究. 南京大学, 2014.

- [16] Liu X, Tyler T, Starr T, et al. Taming the blackbody with infrared metamaterials as selective thermal emitters.. Physical Review Letters, 2011, 107(4):045901-045901.
- [17] Watts C M, Shrekenhamer D, Montoya J, et al. Terahertz compressive imaging with metamaterial spatial light modulators. Nature Photonics, 2012, 8(8):605-609.

致 谢

论文写完了之后，回首写论文的这段时间里遇到的种种问题，非常感谢朱吉亮老师每周给我们开组会，让我们明确自己每周都做了些什么，有了大目标之后把它分成了一个一个小目标，并且顺利完成。感谢老师对我的严格要求，让我能在大学最后的日子认真对待自己的论文，并且把它顺利完成。其次，我写的论文为文献综述类型的，在自己查找文献和期刊文件的时候，得到了舍友还有很多同学的帮助，我们在写论文之初互相讨论，得到了很多启发，在写完之后他们还帮助我改正了许多格式以及逻辑上的错误，让我的论文得以顺利完成。最后，感谢河北工业大学，给我一个完美的大学生活，这四年生活将是我以后一生的财富。