

基于液晶的可调谐太赫兹双折射滤波器的设计

吕英进,徐德刚,刘鹏翔,吕 达,王 鹏,姚建铨

(天津大学精仪学院,教育部光电信息技术科学重点实验室,天津 300072)

摘 要: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,采用数值模拟的方法,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。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 0.691 ~ 0.866 THz。

关键词:光学器件;太赫兹;液晶;调谐;双折射滤波器

中图分类号: O441.4 **文献标识码:** A

Design of tunable THz birefringent filter based on liquid crystal

LÜ Ying-jin, XU De-gang, LIU Peng-xiang, LÜ Da, WANG Peng, YAO Jian-quan

(College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Key Lab of Opto-electric Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Liquid crystal birefringent filter has advantages of room temperature operating, simple tuning, narrow bandwidth and better output characteristics. In order to design such filters with different tuning range and bandwidth to meet the needs of practical application, we make numerical simulation, select the device parameters and summarize the design ideas. We designed a narrow band transmission filter with output tuning range of 0.691 ~ 0.866 THz. The results show that through numerical simulation and analysis of key parameters that impact the tuning range and output bandwidth of the filters, design scheme can be set up for liquid crystal birefringent filter with different tuning range. The design example meets the expected requirements well.

Key words: optical devices; terahertz; liquid crystal; tunable; birefringent filter

1 引 言

近年来,世界上掀起了太赫兹(Terahertz, THz)的研究热。太赫兹技术及其调制器件也取得了很大的发展^[1-3]。2003年,加州大学洛杉矶分校提出了一种微结构的太赫兹高通滤波器^[4];2005年, H. Němec和 P. Kužel 提出了一种可调光子晶体太赫兹滤波器,利用温度变化来调节透射率^[5];2008年,英国的 S A Jewell 等人设计了一种基于液晶材料的太赫兹波的 F-P,通过改变外加电场,可以实现透

射中心频率在 0.588 ~ 0.612 THz 之间连续变化^[6]。双折射滤波器作为一种光波长调谐器件,具有调谐方便、制作简单、插损小等优势。2006年, Ciling Pan 和他的研究小组提出一种调谐范围为 0.388 ~ 0.564 THz 的双折射滤波器^[7],不仅实现了窄带输

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60801017)资助。

作者简介:吕英进(1985-),男,硕士研究生,现主要从事太赫兹波应用方面的研究。

收稿日期:2010-12-06

出,而且可以在室温下简单方便的调谐。因此,为了适应不同太赫兹源的应用需要,研究设计这种滤波器的方法,使其具有不同调谐范围和透射带宽,对扩大其应用范围是很有意义的。

本文分析了双折射滤波器的工作原理,通过对影响滤波器调谐范围和带宽的参数的数值模拟和分析,为设计其他调谐范围的滤波器提供了依据;并且计算了一套窄带输出的双折射滤波器参数实例,对设计思路进行了总结。

2 工作原理

双折射滤波器的基本构成是在两个偏振片之间,放置相位延迟器件。当一束线偏振光(偏振方向平行于入射平面)入射到延迟器件上的时候,由于它的双折射效应,线偏光在传播过程中分成o光和e光。由于折射率不同,出射时两束光之间存在一定的相位差,经过第二个偏振片时,发生偏光干涉输出。两偏振片互相平行的情形下,干涉光强为:

$$I = I_0 \left(1 - \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right) \quad (1)$$

式中, I, I_0 分别是出射光和入射光的光强; α 为偏振面(即入射面)与电位移矢量 D' 或 D'' 的夹角; φ 为 o 光和 e 光的相位差。

在两个偏振片之间放置利用液晶材料制作的可调谐相位延迟器件,便构成液晶可调谐双折射滤波器。它的基本结构^[7]如图1所示。

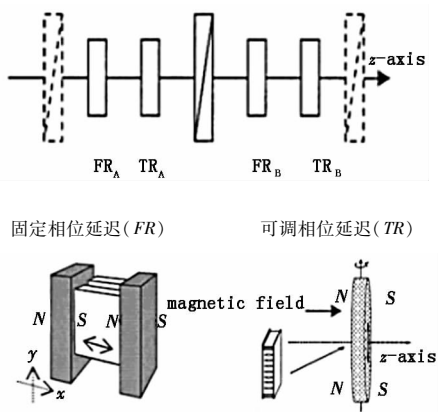


图1 装置原理
Fig.1 device principle

其中, FR_A 和 FR_B, TR_A 和 TR_B 分别是两种相同的液晶盒。通过在基底材料中掺杂不同离子,控制液晶分子的排布方向。液晶盒 FR_A 和 FR_B 中的液晶分子平行于基底排布,提供固定的相位延迟 Γ_A, Γ_B ;

TR_A 和 TR_B 是磁场控制的可调谐的太赫兹相位延迟器^[8],液晶分子垂直于基底排布,提供可调的相位延迟 $\Delta\Gamma_A, \Delta\Gamma_B$ 。在本设计中,由于两组延迟器实现的相位差比为 1:2,即 $\Gamma_B = 2\Gamma_A, \Delta\Gamma_B = 2\Delta\Gamma_A$,记 $\Gamma_A = \Gamma, \Delta\Gamma_A = \Delta\Gamma$,利用公式(1)经过计算,该双折射滤波器的透射公式可以写成:

$$T = 4\cos^6 \left(\frac{\Gamma + \Delta\Gamma}{2} \right) - 4\cos^4 \left(\frac{\Gamma + \Delta\Gamma}{2} \right) + \cos^2 \left(\frac{\Gamma + \Delta\Gamma}{2} \right) \quad (2)$$

式(2)表示的是滤波器的透射率与相位延迟量之间的关系^[7]。通过控制 $\Delta\Gamma$ 的改变,达到控制通过率 T 的目的。

3 数值模拟与分析

对可调谐相位延迟器 TR ,液晶盒(E7 液晶材料)外加的磁场大小为 0.425 T,磁场方向在水平面内可旋转变化,磁场偏转角度和相位延迟量之间的关系见公式(3)^[8]:

$$\begin{aligned} \delta(\theta) &= \frac{2\pi f L}{c} \cdot \Delta n_{\text{eff}} \\ &= \frac{2\pi f L}{c} \cdot \left[\left(\frac{\cos^2 \theta}{n_o^2} + \frac{\sin^2 \theta}{n_e^2} \right)^{-\frac{1}{2}} - n_o \right] \end{aligned} \quad (3)$$

其中, L 是液晶的厚度; f 是太赫兹波的频率; θ 是磁场偏转角度; $\delta(\theta)$ 是引起的相位延迟。对 TR_A ,即有 $\Delta\Gamma = \delta(\theta)$;液晶盒 FR 引起固定的相位延迟,不存在调谐磁场。对 FR_A ,计算时形式上可表示为 $\Gamma = \delta\left(\frac{\pi}{2}\right)$,但需注意这两个液晶盒厚度不一样。

利用式(2),经过计算和数值模拟,得到透射率和磁场偏转角度的关系(不妨取 $f = 1 \text{ THz}, n_o = 1.58, n_e = 1.74, L = 3 \text{ mm}$),如图2所示。

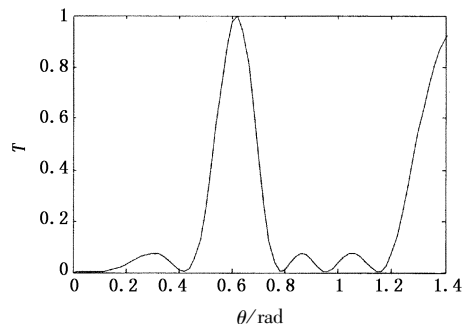


图2 透射率与磁场偏转角度的关系
Fig.2 relationship between the magnetic field deflection angle and the transmission

从图2可看出,在不同的磁场偏转角度下,对一定频率的太赫兹波,透射率可以实现0~1的连续变化,而且改变磁场方向在实验中实现起来也较容易。因此,采用磁场控制的相位延迟器可以方便实现对相位的调节,用其设计可调谐滤波器具有实际意义。通过控制磁场的方向,我们可以对不同频率的太赫兹波的透射率进行控制。在不同的磁场方向下,计算出透射率与频率之间的关系如图3所示。

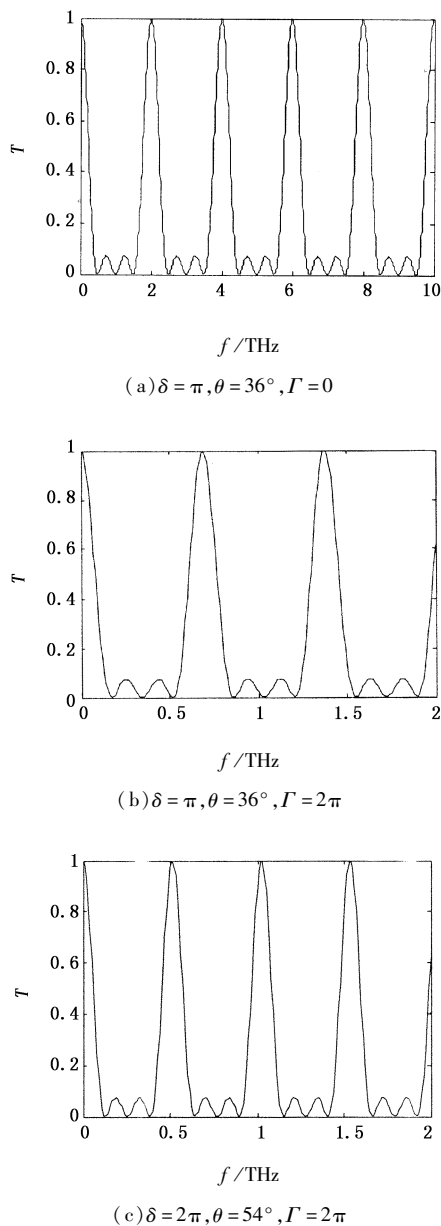


图3 双折射滤波片在不同相位延迟下透射率和频率的关系

Fig. 3 birefringent filter under different phase delay between transmission and frequency

从图3可以看出,可调相位延迟 $\Delta\Gamma$ (也就是

δ),主要影响着图像在频率轴上的漂移,通过调节 $\Delta\Gamma$ 的大小,可以改变不同频率的透射率,从而调节透射中心频率;固定的相位延迟 Γ ,主要影响着透射带宽,随着 Γ 增大,透射带宽变窄。可以计算出在不同磁场方向下的各级(取了前三级)透射中心频率,如图4所示。

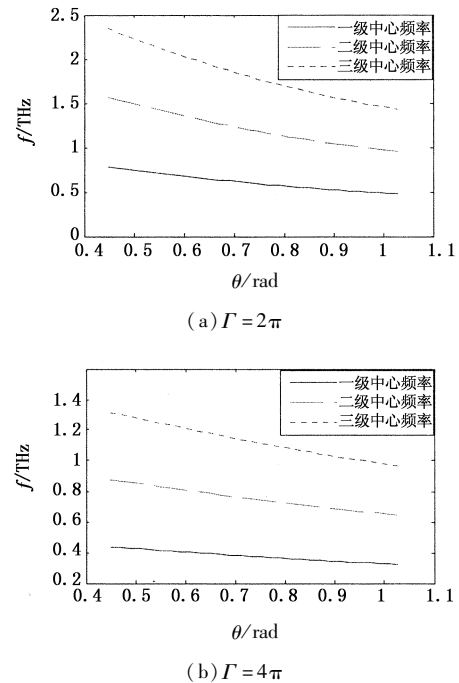


图4 磁场偏转角和各级透射中心频率的关系

Fig. 4 relationship at all levels between magnetic deflection angle and the transmission center frequency

从图4(a)可以看出,随着磁场偏转角度 θ 的增大,即 $\Delta\Gamma$ 增大,各级透射中心频率明显变化;在较高的频率段,如1.5~2.5 THz,中心频率变化更显著,即调谐范围更大。但是,设计过程中还要考虑输出带宽的要求。随着 Γ 的增加,输出带宽变窄,但此时由 $\Delta\Gamma$ 引起调谐范围反而变小。在图4(b)中,各级中心频率的变化范围明显比图4(a)中相应的小许多;但因为这种情况下对应的输出带宽却更窄(如图5所示),所以输出特性更好。同时,从图5可看出, $\Delta\Gamma$ 在一定程度上也影响带宽,但影响较小。在 $\Gamma = 4\pi$ 的情况下,输出带宽在0.1附近,变化范围只有大约0.03。可见, $\Delta\Gamma$ 和 Γ 是在设计过程中非常重要的参数,二者并不是相互孤立的,需要根据对调谐范围和带宽的实际需要,综合考虑,以保证设计的器件符合要求。

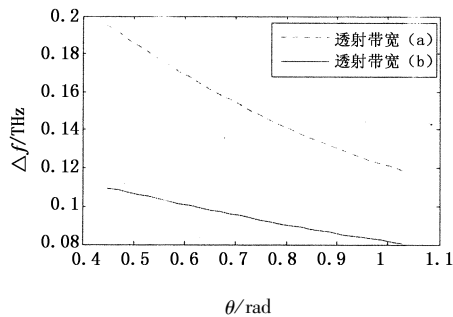
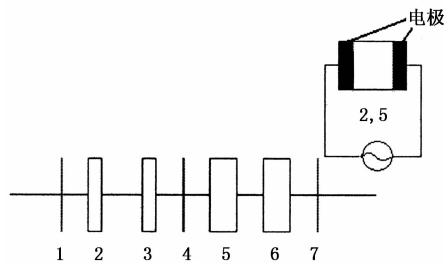


图5 图4(a) $\Gamma=2\pi$ 和(b) $\Gamma=4\pi$ 两种情况下的透射带宽

Fig.5 the corresponding transmission bandwidth in Figure 4 (a) $\Gamma=2\pi$ and (b) $\Gamma=4\pi$

基于以上的分析,我们可以作一个设计实例。依据液晶材料 E7 的双折射率参数^[8],在 0.76 THz 附近相对较大, $n_o - n_e \approx 0.15$;不妨设计调谐范围在这附近,同时期望的输出带宽 0.1 THz,也就是使 Γ 在 4π 附近取值。这样综合考虑 $\Delta\Gamma$ 和 Γ 两个参数,我们可以计算出两组液晶盒厚度为 4.8 mm, 1.8 mm 和 9.6 mm, 3.6 mm。装置图如图 6 所示。



1,4 - Polarizer; 2,5 - FR; 3,6 - TR; 7 - Polarizer

图6 装置

Fig.6 device

1,4 和 7 是偏振方向互相平行的偏振片;2 和 5 是两个相位延迟器,在液晶盒两侧通过两个电极(间距与液晶盒边长有关,不妨取 1.5 cm),外加固定的交流电场(1 kHz, 30 V),液晶分子平行于电场方向分布,它们引入固定的相位延迟 Γ 和 2Γ ;3 和 6 是磁场控制的可调谐相位延迟器(结构见 TR),液晶分子垂直于基底分布,外加 0.4 T,在水平面内方向可旋转变化的磁场,它们引入可调谐的相位延迟 $\Delta\Gamma$ 和 $2\Delta\Gamma$ 。由于 o 光和 e 光的折射率虚部不同^[8],引起两束光的损耗不同,因此为了保证两束光干涉时光强相近,提高输出光强,调整液晶的光轴与入射光偏振面之间的夹角 α 为 50° 。通过调节磁场方向,可以实现透射中心波长为 0.691 ~ 0.866 THz 的连续可调谐输出,输出透射带宽约 0.1 THz。数值模拟结果如图 7 所示。

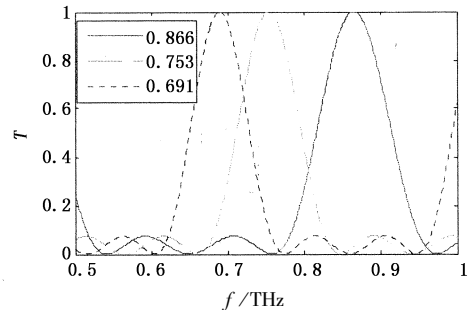


图7 透射中心频率:0.691 ~ 0.866 THz

Fig.7 transmission center frequency:0.691 ~ 0.866 THz

从图 6 可以看出,该设计实例基本上达到了预期的效果。另外,器件的损耗直接影响着中心频率的透过率,是一个比较重要的指标,在器件应用过程中需要注意。在已经报道的具体器件中,插入损耗大约 8 dB^[7],换算成中心频率的透过率大约为 15.6%。可见这类器件的损耗还是比较大的。这个例子在改进损耗方面没有涉及。考虑到液晶盒 FR 在厚度上较厚,在 FR 上加交流电场(1 kHz, 30 V),可以控制液晶分子的排布方向,提高液晶盒的稳定性。

显然,室温条件下工作,调谐方便、简单是这种液晶滤波器最大的优势。在根据实际需要设计过程中,主要注意三个问题:①根据带宽和调谐范围综合考虑 $\Delta\Gamma$ 和 Γ ,尽量选择材料双折射率较大的频段;②在传播过程中, o 光和 e 光的损耗不同,有必要适当调整 α 保证发生干涉时光强相近,提高输出光强;③器件制作和实际应用中注意液晶的稳定性和损耗的问题。另外,液晶的物理性质方面,由于流动性较差,这种双折射滤波器在调谐时响应较慢,通常需要几分钟的时间,不适合设计用作快速光开关。

4 总结展望

本文通过对基于液晶的太赫兹可调谐双折射滤波器的数值模拟,利用控制量(磁场和电场)与输出透射率之间的关系,详细分析了设计过程中影响调谐范围和透射带宽的参数 $\Delta\Gamma$ 和 Γ ,并对这种可调谐滤波器的设计思路进行了总结,以满足不同调谐范围和透射带宽的设计需要。设计实例基本上实现了预期设想,通过改变磁场的方向,在室温条件下可以实现调谐范围 0.691 ~ 0.866 THz 和透射带宽 0.1 THz 的窄带输出。尽管这类滤波器具有调谐简单,调谐范围灵活,带宽窄等优势,但实际应用中插损仍然相对较大,在如何减小损耗方面还有待继续

研究。

参考文献:

- [1] Zhang Huaiwu. THz basic research in China [J]. China Basic Science-Review & Summary, 2008, 1: 15 - 20. (in Chinese)
张怀武. 我国太赫兹基础研究 [J]. 中国基础科学·综述评述, 2008, 1: 15 - 20.
- [2] Wang Huajuan. Research of THz devices based on photonic crystal [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
王华娟. 基于光子晶体的太赫兹器件研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [3] Cheng Zhaohua, Zhu Dajun, Liu Shenggang. The progress of THz detection technology [J]. Electronic Measurement and Instrument, 2005, 19(4): 1 - 4. (in Chinese)
程兆华, 祝大军, 刘盛纲. 太赫兹探测技术研究进展 [J]. 电子测量与仪器学报, 2005, 19(4): 1 - 4.
- [4] Wu Dongmin, Nicholas Fang, Sun Cheng, et al. Terahertz plasmonic high pass filter [J]. Appl. Phys. Lett., 2003, 83(1): 201 - 203.
- [5] H Němec, P Kužel. Highly tunable photonic crystal filter for the terahertz range. Opt. Lett., 2005, 30(5): 549 - 551.
- [6] S A Jewell, E Hendry, T H Isaac, et al. Tuneable fabry-perot etalon for terahertz radiation [J]. New J. Phys, 2008(10): 033012.
- [7] Chaoyuan Chen, Ciling Pan, Chofan Hsieh, et al. Liquid-crystal-based terahertz tunable lyot filter [J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 88: 101 - 107.
- [8] Chen C Y, Hsieh C F, Lin Y P, et al. Magnetically tunable room-temperature 2π liquid crystal terahertz phase shifter [J]. Opt. Express, 2004, 12(12): 2630 - 2635.
-