

文章编号:1007-2780(2009)06-0779-04

液晶材料介电常数的毫米波频率特性研究

马 恒^{1,2}, 浮新普^{1,2}, 女川博義³

(1. 河南省光伏材料重点实验室, 河南 新乡 453007, E-mail: hengma@henannu.edu.cn;
2. 河南师范大学 物理与信息工程学院, 河南 新乡 453007; 3. 日本富士大学 工学部, 日本 富山 930-8555)

摘 要: 利用矩形波导管和向量分析仪, 测量了几种液晶材料在 26.5~40 GHz 波段 (Ka 波) 的介电常数。实验表明, 1 kHz 频率下呈现正、负介电各向异性的液晶材料, 在该微波波段下都显示为正的介电各向异性。尽管这些材料的静介电常数各向异性相差很大, 但是该微波波段对应的介电各向异性相差却很小, 而且在 26.5~38 GHz 区间内几乎不随频率的增大而发生变化。

关 键 词: 矩形波导管; 液晶; 介电常数
中图分类号: O753⁺.2 **文献标识码:** A

1 引 言

显示技术应用是液晶材料目前最为广泛的应用。由于对显示产品的大量需求, 越来越多的新型液晶材料被合成并应用于显示领域, 关于液晶材料在可见光和低频区域物理性质的研究已非常广泛和深入。液晶除了作为显示材料展现出优异的光电特性以外, 还有其他一些潜在的应用, 例如低驱动电压和低功耗的小型光学器件。近年来, 液晶分子在红外^[1-4]和近红外^[5-8]频段的性质研究也有不少报道。液晶分子的光电特性也可以应用在电磁波谱中更宽的频段。

现代通信、航天是采用微波信号进行传输的。为了拓展液晶材料的应用领域, 研究液晶材料在高频微波波段的物性是十分必要的。但是, 由于设备条件的限制, 微波波段的液晶材料物性研究报道并不多见。本研究利用矩形波导管和向量网络分析仪, 通过分析微波在波导管的液晶分子层的传播性能, 对液晶材料在 26.5~40.0 GHz 波段的介电常数的各向异性进行了研究。实验发现, 1 kHz 频率下呈现正、负介电各向异性的液晶材料, 在该微波波段下都显示为正的介电各向异性。尽管这些材料的静介电常数各向异性相差很大, 但是该微波波段对应的介电各向异性相差却很小, 而且在 26.5~38 GHz 区间内几乎不随频

率的增大而发生变化。

2 实 验

2.1 材料和设备

实验中选用 3 种向列相液晶材料, 材料的向列相转变温度 (°C) 和静介电特性 (1 kHz 下) 如表 1 所示。图 1 列出了这些液晶材料的分子结构。

表 1 测定用的向列相液晶材料
Table 1 Several nematic liquid crystal materials used in the experiment

Compounds	Temperature	$\epsilon_{//}$	$\epsilon_{\perp}$	$\Delta\epsilon$
5CB	N(34.5) Iso	17.9	6.9	11.0
I22	N(66) Iso	2.9	2.9	-0.02~0
MBBA	N(47) Iso	4.75	5.38	-0.63

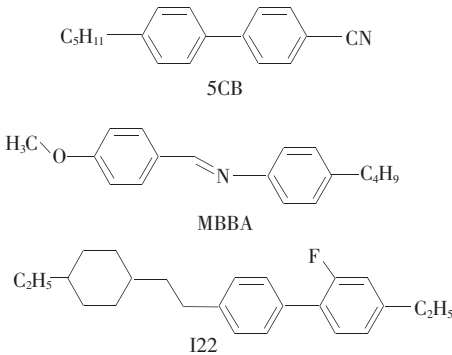


图 1 研究中使用的液晶分子结构
Fig. 1 Liquid crystal molecule structure used in the study

实验中所使用的向量网络分析仪 Anritsu 37369C 可以输出的频率范围是 40 MHz~40 GHz,矩形波导管标准型号为 35WR28KF,其内截矩形尺寸为 7.11 mm×3.55 mm,波导管的 TE₁₀截止频率 f_c 为 21.053 GHz,截止波长 λ 为 14.22 mm,测量中向量分析仪输出频率由 26.5 GHz 开始,到 40.0 GHz 终止。

2.2 测量方法

实验中所使用的液晶材料被放置在如图 2 所示的波导管型液晶盒中,液晶层厚度为 0.5~15 mm,每增加一个 0.5 mm 作为一个测量厚度单元(共 30 个液晶厚度单元),液晶封装板使用含氟树脂,并且假定该树脂的微波吸收为零。电磁波通过液晶层,再经铜质反射板反射回向量分析仪。采用 Fabry-Perot etalon^[9]的基本模型计算反射系数,研究 TE₁₀电磁波在波导管中液晶材料中的传输,分析波导管内液晶材料的折射率,进而求得液晶分子的介电常数。在矩阵波导管内,液晶材料的折射率 n_{LC} 可表示为^[10]:

$$n_{LC} = \sqrt{\left(\frac{\lambda_o}{\lambda_c}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_o}{\lambda_g}\right)^2}$$

(1)

$$\lambda_g = \frac{\lambda_o}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_o}{2a}\right)^2}}$$

(2)

其中 λ_o 为自由空间中的波长, λ_c 为截止波长, λ_g 为波导波长, a 为矩形波导截面宽边的长度。根据样品在波的传播方向上的厚度与反射波的相位之间的关系导出管内波长 λv_g 。

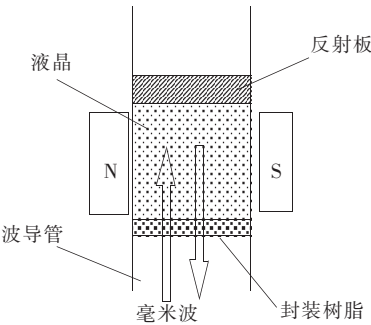


图 2 波导管型液晶盒的构造

Fig. 2 Liquid crystal cell made from a rectangular waveguide

在光频区,由麦克斯韦方程可得折射率和介电常数的关系为^[11]:

$$n_r = \epsilon_r^{1/2}$$

(3)

通过在波导管两侧放置两块永磁铁(约 0.5 T),

使得波导管内的液晶材料进行定向。当波导管内的液晶分子在没有施加外界磁场时,分子长轴的取向是杂乱无章的。当外界磁场大于阈值磁场时,分子的取向开始变得有序。如图 2 所示,在波导管中,当毫米波的电场振动方向垂直于外界磁场方向时,所测量的是液晶分子的短轴的性质;而当毫米波的电场振动方向平行于外界磁场方向时,测定的是分子长轴的性质。

3 实验结果与讨论

基于 26.5~40.0 GHz 频率范围内连续变化的电磁波,在室温条件下对 3 种向列相液晶材料的介电常数进行了测定。图 3 列出了液晶分子沿短轴方向的介电常数 $\epsilon_{\perp}$ 随频率增加的变化情况。比较同种材料分别在 Ka 波段和 1 kHz 条件下的介电常数,有如下的大小顺序:

- 1 kHz: 5CB>MBBA>I22;
- Ka 波: MBBA>5CB>I22。

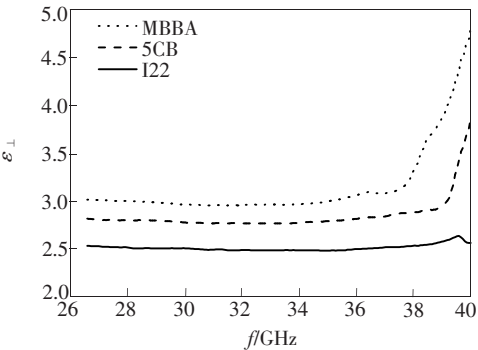


图 3 短轴介电常数的频率特性

Fig. 3 Frequency dependency of the dielectric constant of the short molecular axis

从分子结构来看,静态下无极性液晶材料 I22 在高频波段下短轴方向的介电性仍然较弱,这可能是由于分子较长,分子绕长轴转动的速度较慢,其中的环己烷环对分子的极性贡献较少引起的。在 26.5~36.0 GHz 范围内,分子短轴方向的介电常数大小随频率而变化的依存性较小;而在 36.0 GHz 以上波段,介电常数有一个突变,其原因将在后面提出。

长轴方向的介电常数 $\epsilon_{\parallel}$ 随频率变化的结果显示在图 4。在 26.5~36.0 GHz 范围内,长轴方向的介电常数大小随频率而变化的依存性较小,其大小和短轴方向一样具有以下关系:

1 kHz:5CB>MBBA>I22;
Ka 波:MBBA>5CB>I22。

低频(1 kHz)条件下小分子液晶 5CB 在电场中容易随电场极化,由于带有较强极性的—CN 基,5CB 表现出较强的介电性。MBBA 由于含有一O—以及 C=N 基,在长轴方向也表现出较强极性。而 I22 由于分子较大,长轴方向也没有强极性元素,所以无论是低频还是 Ka 波,在长轴方向都不能表现出强极性。

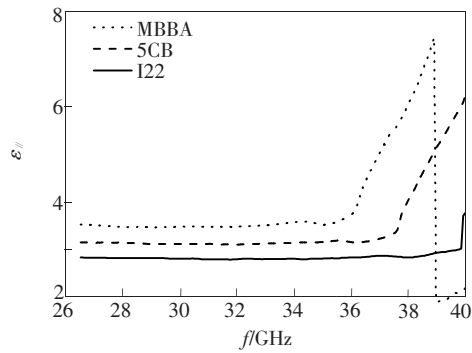


图 4 长轴介电常数的频率特性

Fig. 4 Frequency dependency of the dielectric constant of the longer molecular axis

由于分子在绕旋转时其构成分子的原子质量分布将影响其运动状态^[12],因此有必要讨论质量分布来研究分子的震动与旋转。分析分子 5CB 的原子质量对称性可知,在分子以骨骼(双苯环)作为转子时,两端侧链的质量分布为 C₅H₁₁(71)—双苯(152)—CN(26),两端侧链质量相差 3 倍,而且 C₅H₁₁(71)的原子质量达到骨骼的 1/2,因此分子在旋转时对称性很差,在高频波段下,分子的振动更为剧烈,因此其介电性就变得较弱。

关于分子 MBBA 的原子质量对称性,在分子以骨骼(苯—C=N—苯)作为转子时,两端侧链的质量分布为 C—O(29)—苯—C=N—苯(179)—C₄H₉(57),两端侧链质量相差仅 2 倍,而且两端侧链质量分别仅是骨骼的 1/6 和 1/3,因此分子在旋转时对称性较好,在高频波段下,分子的振动并不十分剧烈,材料的分子极化率就有可能较高,因此表现出较强的介电性。

图 5 描述了介电常数各向异性 Δε 随频率变化的特性。在 26.5~36.0 GHz 范围内 Δε 的值大致介于 0.3~0.7 之间的范围。1 kHz 条件下介电常数为负的液晶材料在 Ka 波段却变成了正

性液晶。1 kHz 下具有较大各向异性的 5CB,在 Ka 波段条件下其各向异性也变得非常小。说明在高频微波中该类液晶分子无论是分子长轴或者是短轴,在向列相时随电波电场的方向改变而变化迟缓,亦即它们的极化弛豫时间可能较长,介电损耗可能较严重。因此,这些问题的定量研究将是下一步的主要工作。

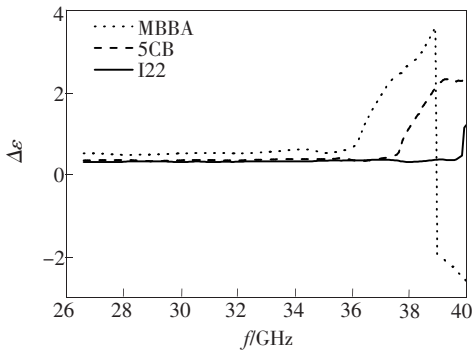


图 5 介电常数各向异性的频率特性

Fig. 5 Frequency dependency of the dielectric anisotropy

对于 36 GHz 和 37.5 GHz 以上频率,MBBA 和 5CB 的介电常数分别随频率的升高而发生快速增加,我们猜测,可能该区域进入了分子的共振频率带致使材料的长轴和短轴方向的介电常数都有所增加。特别是 MBBA,在频率达到 39 GHz 后,长轴方向的介电常数突然变小,可能进入下一个分子振动频率带。有关这方面的推测还需要更深层次的研究和其他方面的证明,这将是我们未来的主要工作。

4 结 论

利用矩形波导管,通过电磁波反射方法研究了作为各向异性电介质液晶材料的介电性。研究发现,液晶分子在高频波段的介电常数明显低于低频条件下的介电常数,主要是由于随着频率的升高,对介电常数贡献较大的分子取向极化发生介电弛豫所致,在一定区域内,材料的介电性随频率的变化很小;同时,无极性的 I22 材料在高频电磁波条件下略显正的介电性。在低频下表现为负性的液晶材料 MBBA,在高频下可以转变为正性液晶。

致谢:感谢日本富山大学工学部 Okata 教授、Nozokido 教授和 Sibada 技官在作者赴日本实验研究期间的指导工作。

参 考 文 献:

- [1] Mada H, Kobayashi S. Wavelength and voltage dependences of refractive indices of nematic liquid crystals [J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1976, 33:47-53.
- [2] Warenghem M, Grover C P. Dispersion curve measurement using Talbot bands [J]. *Rev. Phys. Appl.*, 1988, 23 (6):1169-1178.
- [3] Abdulhalim I. Dispersion relations for the refractive indices and the effective birefringence of liquid crystals [J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1991, 197:103-108.
- [4] 王宁,李代林,朱化凤,等. 液晶吸收光谱的偏光干涉法研究 [J]. *液晶与显示*, 2008, 23(5):536-539.
- [5] Wu S T, Wu C S, Warenghem M, *et al.* Refractive index dispersions of liquid crystals [J]. *Opt. Eng.*, 1993, 32 (8):1775-1780.
- [6] Mada H, Nishikawa A. Dielectric properties of n-pentyl-p-n-cyanobiphenyl in 2 wide frequencies range [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1993, 32(7B):L1009-L1010.
- [7] Mada H, Ryuzaki M. Ion influence on nematic liquid crystal cell impedance at low frequency [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1995, 34(9A):L1134-L1136.
- [8] Nakanowatari J, Ono K. Effect of the thickness alignment layer on the low frequency dielectric dispersion of a nematic liquid crystal [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1996, 35(1B):L111-L113.
- [9] Born M, Wolf E. *Principles of Optics* [M]. Oxford: Pergamon Press, 1991:323-367.
- [10] Nose T, Honma M, Nozokido T, *et al.* Simple method for the determination of refractive indices and loss parameters for liquid-crystal materials in the millimeter-wave region [J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44(7): 1150-1155.
- [11] 王娟,张长瑞,冯坚. 介电常数介质薄膜的研究进展 [J]. *化学进展*, 2005, 17(6): 1001-1011.
- [12] 马恒,孙瑞芝. 含氟三环液晶材料相变与分子构造相关性的机械旋转模型研究 [J]. *液晶与显示*, 2006, 21(6): 589-592.

Millimeter Wave Frequency Dependency of Dielectric Constant in Liquid Crystal Materials

MA Heng^{1,2}, FU Xin-pu^{1,2}, ONNAGAWA Hiroyoshi³

(1. Henan Key Laboratory of Photovoltaic Materials, Xinxiang 453007, China, E-mail: hengma@henanmu.edu.cn;

2. College of Physics and Information Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China,

3. Faculty of Engineering, University of Toyama, Toyama 930-8555, Japan)

Abstract

A reflection-type liquid crystal (LC) test cell prepared with a K-band rectangular waveguide is used to determine the dielectric constant of LC materials. It is found that the usual LCs showing positive or negative dielectric anisotropy in 1 kHz reveal positive dielectric anisotropy in millimeter wave region. Furthermore, the high frequent dielectric anisotropy shows slight difference among the LCs and weakly frequency dependency between 26.5~37 GHz.

Key words: rectangular waveguide; liquid crystal; dielectric constant

作者简介: 马恒(1963—),男,河南方城人,博士,教授,主要从事液晶材料研究。