

基于聚合物网络液晶的近红外波段快响应相位调制器

赵祥杰 刘仓理 曾建成 张大勇 骆永全

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 相位型液晶空间光调制技术已经广泛应用于自适应光学、信息光学等领域,然而一直存在着响应速度较低的问题。为了提高相位型液晶空间光调制器的响应速度,采用聚合物网络液晶制备近红外波段亚毫秒响应相位调制器,并对其光散射特性和瞬态响应特性进行了研究。通过降低聚合反应温度并提高紫外(UV)固化照度,可以降低器件的光散射强度,实现较好的相位调制。在此基础上,初步研究了聚合物网络形貌对最大光散射强度的影响。在高电压加载下,聚合物网络的电致伸缩效应会极大降低聚合物网络液晶的响应速度,使其达到秒级,经分析认为通过采用高介电各向异性的液晶材料可以降低阈值电压,提高器件的响应速度。

关键词 材料;聚合物网络液晶;相位调制器;光散射;响应速度

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0623001

Fast Response Phase Modulator in Infrared Waveband Based on Polymer Network Liquid Crystal

Zhao Xiangjie Liu Cangli Zeng Jiancheng Zhang Dayong Luo Yongquan

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract The slow response has limited further application of phase only liquid crystal spatial light modulator in many research fields, such as adaptive optics and information optics. Polymer network liquid crystal (PNLC) is proposed to apply in phase only liquid crystal spatial light modulator to enhance the response speed to sub-millisecond time scale. The light scattering and transient response on applied voltage are elucidated. The light scattering of PNLC is minimized by lowering the curing temperature and increasing the curing intensity. The morphology of polymer network is also taken by scanning electron microscope (SEM) to elucidate the mechanism of light scattering in polymer network liquid crystal. Upon loading large voltage to generate large phase retardation, electrostriction effect is found to slower the response time to the order of second scale. Lower threshold voltage is proposed to minimize the influence of electrostriction by employing large dielectric anisotropy liquid crystal solvent.

Key words materials; polymer network liquid crystal; phase modulator; light scattering; response speed

OCIS codes 230.1950; 230.3720; 230.6120; 220.4830

1 引言

受益于液晶材料的高双折射率和低控制电压,相位型液晶空间光调制器在自适应光学、二元光学、空间光学和信息光学等领域得到了广泛应用,发展十分迅速^[1-4],尤其在激光雷达、光电对抗和激光通信等领域获得了广大研究人员的青睐^[5-9]。然而在相位型液晶空间光调制器的实际应用中,尽管采用了极为复杂的驱动技术,但是限于普通向列相液晶

材料的粘弹性响应特性,其响应速度也很难达到亚毫秒量级^[10],因此在一些对响应速度要求达到千赫兹以上的应用领域,目前的相位型液晶空间光调制技术不能满足要求,使得相位型液晶空间光调制器在实时光信息处理、自适应光学、光学相控阵等领域的应用受到了较大限制,所以有必要对能够实现亚毫秒量级响应速度的相位型液晶空间光调制技术进行研究。

收稿日期: 2013-12-11; 收到修改稿日期: 2014-02-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(61378095)、中国工程物理研究院科技发展基金(2012B0401055)、流体物理研究所发展基金(SFZ20120304)

作者简介: 赵祥杰(1984—),男,硕士,助理研究员,主要从事液晶光学与液晶相位控制阵列等方面的研究。

E-mail: zxjdouble@163.com

目前提高相位型液晶空间光调制器响应速度的方法主要包含以下两种。一种方法是在大双折射率、低黏度液晶的基础上,采用 Overdrive 和 Undershoot 等驱动方法来提高响应速度,然而这种技术的响应速度通常很难达到亚毫秒量级^[10]。另外一种方法则寻求通过采用新型快速响应液晶材料作为电光调制单元,实现亚毫秒甚至于微秒级响应速度的相位型液晶空间光调制器。因此发展基于新型快响应液晶材料的相位型液晶光调制技术是未来实现亚毫秒响应速度的重要技术途径。目前可用于相位调制的快响应液晶材料主要包含聚合物网络液晶^[11-12]、铁电液晶^[13]、蓝相液晶^[14]和双频液晶^[15]等,然而铁电液晶存在的工艺和灰度问题、蓝相液晶存在的双折射率较小和双频液晶较复杂的驱动方法使得这些材料很难应用于相位调制领域。聚合物网络液晶则在保持较大的双折射率和稳定性的情况下同时拥有亚毫秒的响应速度,有望应用于相位调制。本文主要利用聚合物网络液晶材料制备近红外波段

的相位调制器,针对其在电压加载情况下的光散射特性、响应速度等光学性质进行研究,为进一步制备具有亚毫秒量级响应速度的相位型液晶空间光调制器奠定基础。

2 基于聚合物网络液晶的相位调制器制备方法

制备聚合物网络液晶相位调制器的工艺步骤与器件结构如图 1 所示。将 7% (质量分数) 的聚合物单体 RM257 和 0.5% (质量分数) 的光引发剂 IRGA819 掺入液晶溶剂中,使其混合均匀。采用的液晶溶剂为江苏和成科技公司生产的 HPC851900,其双折射率为 0.25 (589 nm),采用不同光源可以测得其在 1064 nm 和 1.55 μm 处的双折射率分别为 0.2 和 0.19。将混合液晶通过毛细作用灌入 13 μm 厚的空液晶盒中,同时利用紫外光源对液晶盒进行辐照引发聚合产生聚合物网络液晶。

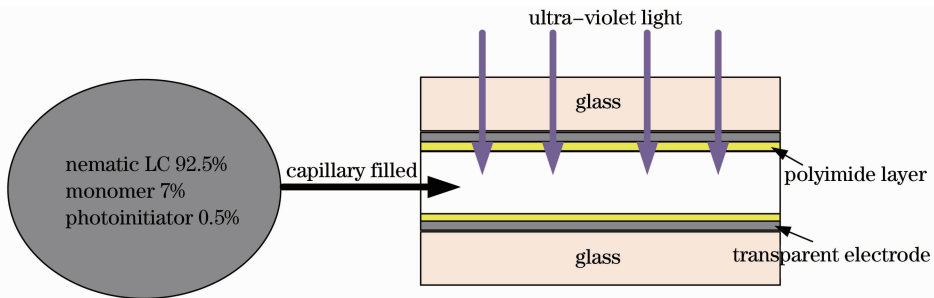


图 1 聚合物网络液晶的制备步骤

Fig. 1 Fabrication procedure of polymer network liquid crystal device

聚合物单体材料的选择是决定整个聚合物网络液晶器件光散射性能的首要因素。聚合物单体首先应该具有双官能团,这样形成的交联聚合物网络才有助于整个聚合物网络液晶体系的快响应和稳定。其次聚合物单体双官能团之间应该具有一定柔性分子链,这样聚合物单体在聚合反应过程中才容易形成具有一定取向的交联聚合物网络,诱导液晶溶剂分子以一定取向排列。基于上述考虑,在实验中选择江苏和成科技公司生产的 RM257 作为聚合物单体材料^[16-19],这种单体浓度下形成的聚合物网络形貌一般较为平滑,相较于谷粒状形貌的聚合物网络液晶而言,往往具有较小的光散射强度。

3 聚合物网络液晶相位调制器的光散射性质

聚合物网络液晶的光散射特性是限制聚合物网

络液晶相位调制应用的关键因素之一。在聚合物网络的分割下,如果不同分割单元内液晶溶剂取向分布不均匀,则会产生强烈的光散射现象,尤其是在电压加载的情况下,这种取向分布不均导致的折射率不均匀分布将会进一步加强,从而造成更强的光散射。使用光纤光谱仪来确定入射光的最大光散射强度。聚合反应前的液晶盒透射率作为基准,近似认为其向列相液晶的光散射可以忽略。光纤光谱仪光源经准直后入射到液晶盒上,然后再经 40 cm 到达光纤光谱仪的收集光纤处,经测算光斑中心处收集角约为 4 mrad。聚合反应后的聚合物网络液晶加载电压后产生了光散射,然而仅透射光被收集到了光纤光谱仪中,其他方向的散射光没有被光纤光谱仪收集,由此时的透射率和基准透射率可以获得在不同电压加载时聚合物网络液晶的光散射强度色散关系。

描述单分子及高分子溶液的光散射理论已经较为成熟,然而目前针对随机分布的聚合物网络进行精确的理论分析较为困难。Sun 等^[16]在 Debye 统计散射理论的基础上,近似认为影响聚合物网络液晶光散射强度的因素主要包含聚合物网络的单元尺寸和液晶溶剂的双折射率,并成正比关系。在此基础上提出通过减小聚合物网络尺寸的方法来降低聚合物网络液晶光散射强度。根据 Rajaram 的理论^[20-21],聚合物网络的最终形貌主要由聚合物单体浓度、聚合反应温度、液晶溶剂黏度以及聚合反应速率等决定。考虑聚合物网络液晶的阈值电压和光散射问题,选择了聚合物单体浓度为 7% 的配比^[11,14],利用冷热台和紫外(UV)固化箱控制其在不同温度和不同照度下发生反应,观察其最终形成的聚合物网络液晶的光散射特性。图 2 给出了两组聚合物网

络液晶样品的最大光散射强度随波长的色散关系。从图 2(a)中可以看出,随着光波长的增加,透射率增加,因而最大光散射强度降低。这主要是因为随着光波长的增加,聚合物网络单元的尺寸相对于光波长而言在减小,因此根据 Sun 的简单模型,可以预见最大光散射强度会降低。还可以看到,随着聚合反应温度的增加,最大光散射强度增加,1.06 μm 和 1.55 μm 处的光散射强度分别从 9% 和 2% 增加到 18% 和 5%。图 2(b)中给出的是聚合物网络液晶光散射强度随 UV 固化光照度的变化关系,可以看到随着 UV 固化光照度的增加,1.06 μm 处的光散射强度从 17% 减小到 9%。根据 Sun 的简单模型,认为这很可能是由于聚合物网络液晶网络单元尺寸的减小造成的。

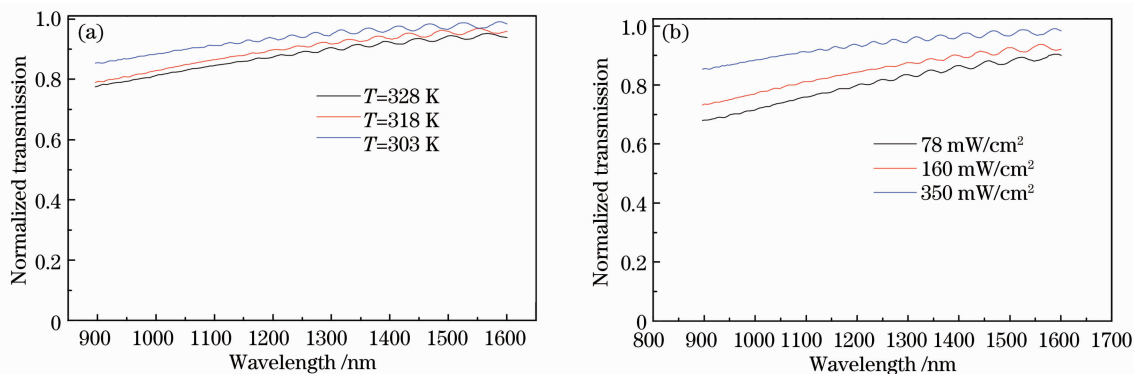


图 2 聚合物网络液晶相位调制器电压加载下最大光散射强度。(a)随聚合反应温度的变化;
(b)随 UV 固化辐照照度的变化

Fig. 2 Maximum light scattering intensity of polymer network liquid crystal phase modulator under applied voltage.
(a) Vary with polyreaction temperature; (b) vary with irradiation intensity of UV curing

为了进一步明确聚合物网络液晶的光散射机理,并指导今后的聚合物网络液晶制备,将上述聚合物网络液晶样品中聚合物网络进行电镜观察,以分析光散射强度和聚合物网络单元尺寸之间的关系。图 3 中给出了在不同温度与不同辐照强度下的聚合物网络形貌图。条形白色带代表形成的聚合物网络纤维,黑色为聚合物网络之间的空隙,光散射强度与聚合物网络纤维的直径及其之间的空隙尺寸有关。观察聚合物网络形貌图时采用的方法如下:首先将聚合后的聚合物网络液晶浸入丙酮浸泡 2.5 h,将聚合物网络液晶中的液晶萃取完毕,仅留下交联的聚合物网络;然后从丙酮中取出,利用外力小心地将液晶盒拆开,静置一段时间,丙酮挥发完毕;附有交联聚合物网络的液晶玻璃基板干后喷金,然后在电镜下可观测到其交联聚合物网络形貌,并对其尺寸和取向等性质进行分析。从图中可以看出,交联

的聚合物网络明显具有取向性质,这是由于在取向了的液晶溶剂作用下,聚合物单体发生聚合反应时也明显带有取向特点。因此,利用 RM257 聚合物单体制备的聚合物网络液晶在没有电压加载情形下,基本上是透明无散射的。

从图 3 中可以看出,尽管降低聚合反应温度或者增加 UV 辐照照度,可以降低聚合物网络液晶的光散射强度,然而电镜下观测到的聚合物网络单元尺寸并没有相应地减小。由图 3(a)和图 3(b)可知,降低聚合反应温度时,聚合物网络纤维直径减小,然而其空隙尺寸增加。在假设聚合物单体反应完全的基础上,可以认为降低聚合反应温度时,液晶溶剂与聚合物网络纤维的相分离更为彻底,因此在电压加载下,液晶溶剂的分布不均匀性会降低,并减少最大光散射强度。由图 3(a)和图 3(c)可知,提高 UV 固化辐照照度与降低聚合反应温度对形成的聚合物网

络有一个类似的影响, 聚合物单体与液晶溶剂的相分离更为彻底, 因此单纯提高 UV 固化辐照照度也会在很大程度上降低聚合物网络液晶的最大光散射强度。根据 Sun 的简单模型, 结合上述论述, 可以认为减小聚合物网络单元尺寸并不是减小聚合物网络液晶光散射强度的唯一办法, 控制聚合物网络纤

维束之间的空隙尺寸也是可以减小其光散射强度的。另外需要指出的是, 以上所叙述的关于光散射强度的讨论, 是在聚合物网络液晶相位调制达到 2π 调制范围的情况下, 选取散射强度最大时的加载电压来讨论的。

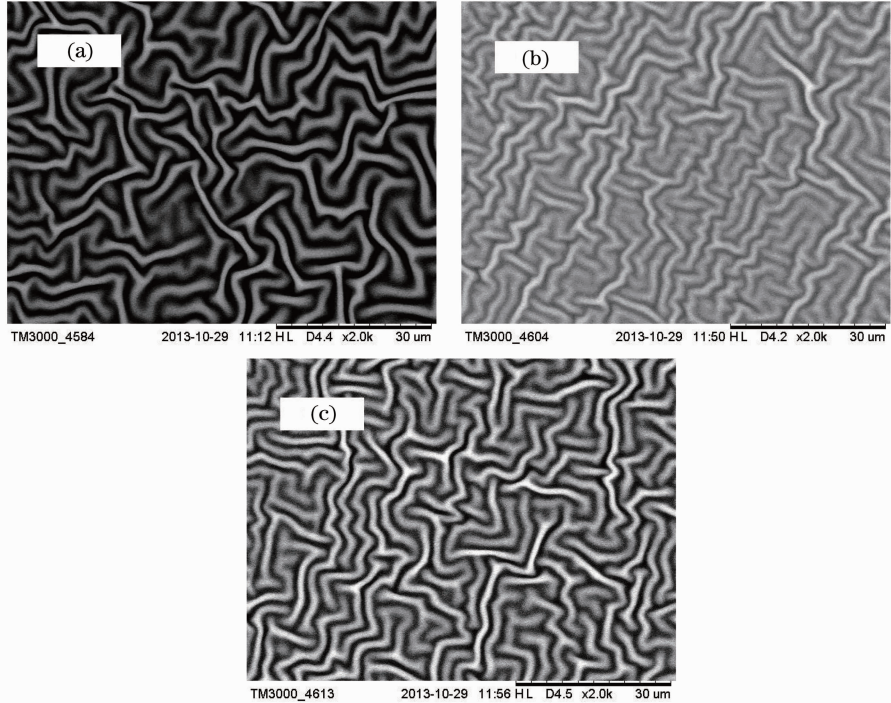


图 3 不同反应条件下聚合物网络液晶中的聚合物网络形貌。(a) $T=303\text{ K}$, $I=350\text{ mW/cm}^2$; (b) $T=328\text{ K}$, $I=350\text{ mW/cm}^2$; (c) $T=303\text{ K}$, $I=78\text{ mW/cm}^2$, T 为聚合反应温度, I 为 365 nm 处的 UV 固化照度

Fig. 3 Morphology of polymer network in polymer network liquid crystal under different conditions. (a) $T=303\text{ K}$, $I=350\text{ mW/cm}^2$; (b) $T=328\text{ K}$, $I=350\text{ mW/cm}^2$; (c) $T=303\text{ K}$, $I=78\text{ mW/cm}^2$, in which T is polyreaction temperature and I is the UV curing intensity

4 聚合物网络液晶相位调制器的电光特性

利用聚合物网络液晶制备近红外波段快响应相位调制器, 不但需要关注器件的光散射强度, 还需了解其电控相位调制特性和瞬态相位响应特性。采用偏光干涉法来表征聚合物网络液晶相位调制器的电控相位调制和瞬态响应。将制备好的聚合物网络液晶器件放置在正交的偏振片中间, 控制液晶的取向方向与正交偏振片成 45° 夹角, 同时以 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光作为光源, 通过改变加载电压获得电控透射率曲线 (V - T) 曲线, V - T 曲线可以说明聚合物网络液晶器件的电控相位调制范围。当电压加载或关闭时, 结合 V - T 曲线, 利用铟镓砷探测器探测透过激光功率的瞬态变化可以测得器件的开态和关态响应

速度。

图 4 中给出在不同参数下得到的聚合物网络液晶的电压-相位延迟曲线。可以看到, 在这些条件下制备的聚合物网络液晶相位调制器的相位调制范围都大于 2π , 实现 2π 相位调制的加载电压 $V_{2\pi}$ 则不同。当聚合反应温度分别为 303 K 和 328 K 时, $V_{2\pi}$ 会随着聚合反应温度的升高而从 118 V 降低到 101 V ; 当 UV 辐照照度分别为 350 mW/cm^2 和 78 mW/cm^2 时, $V_{2\pi}$ 会随着照度的减小而从 118 V 降低到 80 V 。因此, 尽管通过降低聚合反应温度或者提高 UV 辐照照度的方法可以减小聚合物网络液晶的最大光散射强度, 但也带来了高阈值电压, 使得驱动困难, 液晶器件功耗增加。

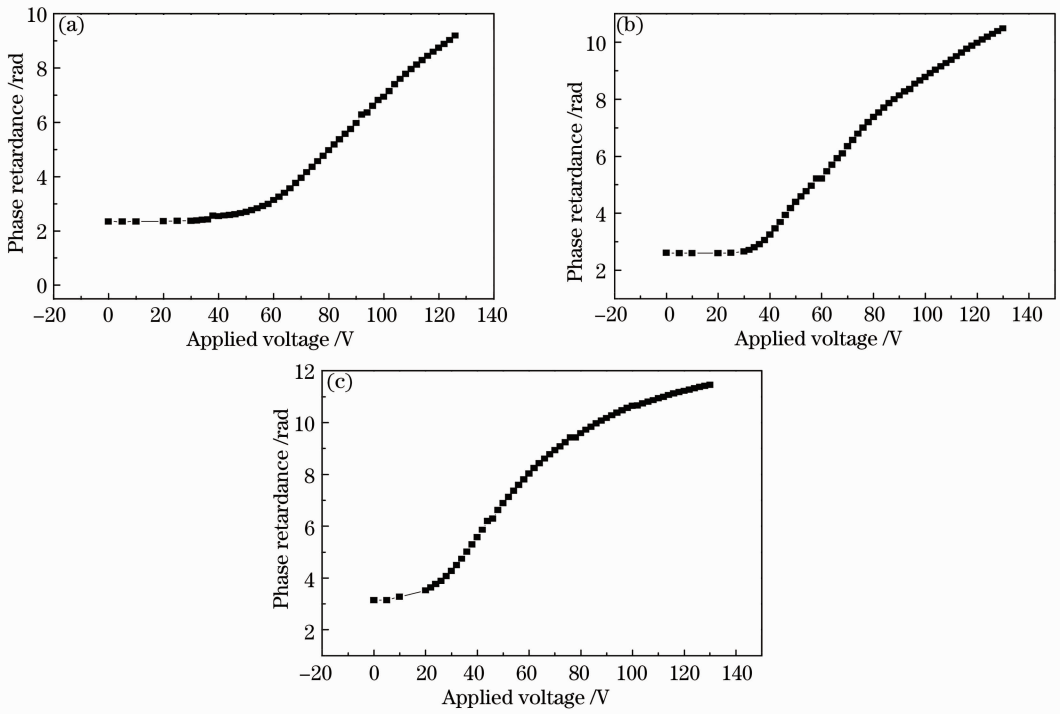


图4 不同反应条件下得到的聚合物网络液晶相位调制器的电控相位调制曲线。(a) $T=303\text{ K}, I=350\text{ mW/cm}^2$;
 (b) $T=328\text{ K}, I=350\text{ mW/cm}^2$; (c) $T=303\text{ K}, I=78\text{ mW/cm}^2$, T 为聚合反应温度, I 为365 nm处的UV固化照度
 Fig.4 Electro-phase retardance curve of polymer network liquid crystal phase modulator under different condition. (a) $T=$
 $303\text{ K}, I=350\text{ mW/cm}^2$; (b) $T=328\text{ K}, I=350\text{ mW/cm}^2$; (c) $T=303\text{ K}, I=78\text{ mW/cm}^2$, in which T is
 polyreaction temperature and I is UV curing intensity

聚合物网络液晶的响应速度是基于聚合物网络液晶材料的相位调制器关键指标。由于一些物理因素的影响,需要观察聚合物网络液晶相位调制器的瞬态响应过程,选取的聚合物网络液晶为图2中光散射强度最小的材料,其聚合反应温度为303 K,UV固化辐照照度为350 mW/cm²。图5为该聚合物网络液晶相位调制器 π 相位的开态与关态响应时间,加载电压为82 V[稳态情形下可产生 π 相位延迟,参见图4中(a)图]。从图5(a)中可以看到,当加载电压时,其相位迅速地由0变化到 π ,10%相位

到90%相位的变化时间约为120 μs 。根据液晶器件不同灰度的响应时间测算,如果产生 2π 的相位延迟,即开态时加载电压更高,则响应速度会更快,甚至会达到数十微秒量级。图5(b)中为液晶相位调制器产生 π 相位延迟后,断开加载电压时观测到的器件关态响应速度。可以看到,相位延迟较快地从 π 变化到0,90%到10%相位的变化时间约为400 μs 。因此可以看到,当该相位调制器 π 相位转换时,开态响应速度与关态响应速度分别达到了120 μs 与400 μs 左右,都达到了亚毫秒量级的响应速度。

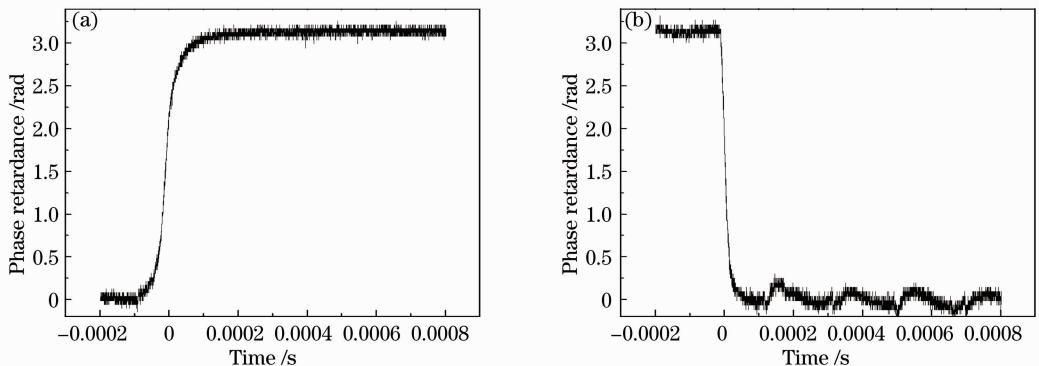


图5 基于聚合物网络液晶的相位调制器 π 相位变化的响应速度。(a)开态; (b)关态

Fig.5 π phase change response speed of phase modulator based on polymer network liquid crystal. (a) On state; (b) off state

然而当增加加载电压使得其相位延迟为 2π 时,其响应速度与较低电压加载时又有不同,此时的加载电压为 118 V[稳态情形下可产生 2π 相位延迟,参见图 4 中(a)图]。图 6 为在不同时间尺度下测量的液晶相位调制器在 $0\sim 2\pi$ 的相位延迟变化下的瞬态响应。从图 6(a)中可以看到,在亚毫秒时间尺度上,当信号电压加载后,只能看到入射光的相位延迟从 0 变化到 1.24π 左右,距离预定的 2π 相位延迟还有一定距离。从图 6(b)和图 6(c)中可以看到,尽管在加载电压的作用下,相位延迟可以以亚毫秒量级的响应速度从 0 变化到 1.24π ,然而相位延迟随后的增加却非常缓慢,相位延迟增加到 2π 的过程通常需要耗时达到秒量级甚至十秒量级。图 6(c)中的插图给出了相位延迟达到 1.24π 以后相位延迟随时间变化的细节。可以看到,相位延迟一定程度上呈周期性变化,变化周期与加载的方波信号电压有关,这是由于聚合物网络液晶的响应速度快,其相位变化会随着加载方波信号的加载时间而变化,是一种典型的相位波纹,可以通过增加加载信号的频率来减小其影响^[12]。为了明确这种抑制器件响应速度的机理,观察相同液晶盒参数下单纯液晶溶剂在同样加载电压下的响应速度,发现其相位延迟经过数十毫秒量级时间达到设定值,这是液晶溶剂本身的固有

响应时间,并且没有发生图 6(b)和图 6(c)中相位延迟的缓慢增长与周期性变化,因此这种缓慢的响应速度是与聚合物网络液晶中的聚合物网络直接相关的。图 6(c)中异常的响应速度是因为在较高电压加载下,聚合物网络液晶中的聚合物网络发生了电致伸缩效应,改变了聚合物网络结构,而聚合物网络中的液晶响应速度较快,会随着其电致伸缩的发生而逐渐变化,导致最终的响应速度变慢。为了进一步证明,在相同的聚合物网络液晶器件上加载了 200 V 的驱动电压,观察其散射特性。刚加载时,整个液晶盒呈乳白色散射态,而当加载时间达到数十秒时,可以观察到整个器件逐渐从乳白色散射态变成透明,这也是由于聚合物网络在高电压的作用下,其不均匀性减小,液晶之间的折射率不匹配减小,从而导致光散射减小。这种实验现象与聚合物致稳蓝相液晶中高电压诱导的电致伸缩效应并导致蓝相液晶的响应速度变慢至秒量级几乎是一致的^[22]。为了提高聚合物网络液晶在大相位延迟范围的快速响应,需要降低其阈值电压或者增强其聚合物网络在高电压加载下的稳定性,这就要求在制备聚合物网络液晶器件时需要选择对液晶溶剂和聚合单体材料进行选择。

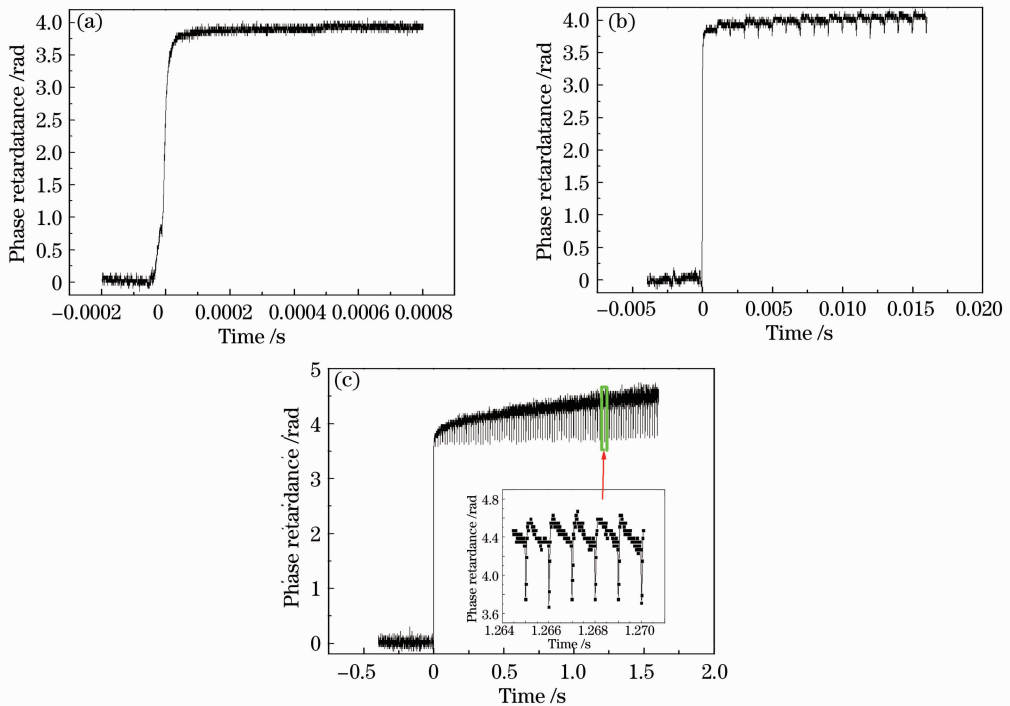


图 6 不同时间尺度下观测到的聚合物网络液晶相位调制器 2π 相位延迟的开态响应过程。(a)窗口时间 1 ms;
(b)窗口时间 20 ms; (c)窗口时间 2 s

Fig. 6 2π phase change response speed of polymer network liquid crystal phase modulator under different time scales.

(a) Window time is 1ms; (b) window time is 20 ms; (c) window time is 2 s

5 结 论

制备了一种基于聚合物网络液晶的亚毫秒响应近红外波段液晶相位调制器,并观察了其光散射特性和相位延迟瞬态响应特性。发现通过降低聚合反应温度和提 高 UV 固化辐照照度可以减小聚合物网络液晶的光散射强度,其 π 相位的开态与关态时间分别可以达到 100 μs 与 400 μs 。在对聚合物网络微观结构电镜观察的基础上,对其在加载电压作用下的光散射机理进行了初步探讨,所获的聚合物网络液晶相位调制器最大光散射强度可以抑制在 8% 以下。在相位调制的瞬态响应方面,为获得 2π 相位调制,加载的高电压会诱导液晶材料中的聚合物网络发生电致伸缩现象,这种物理过程与液晶指向矢耦合会极大地降低聚合物网络液晶的响应速度,使其响应速度降低到秒量级。因此为了进一步实现基于聚合物网络液晶的相位调制器的应用,需要通过材料优化来降低其阈值电压。

参 考 文 献

- 1 D Dayton, J Gonglewski, S Browne. Control algorithm of liquid crystal phased array as adaptive optic correctors [C]. SPIE, 2006, 6306: 630604.
- 2 G D Love. Wavefront correction and production of Zernike modes with a liquid crystal spatial light modulator [J]. Appl Opt, 1997, 36(7): 1517–1524.
- 3 Zhao Xiangjie, Liu Cangli, Zhang Dayong, *et al.*. Numerical analysis of liquid crystal optical phased array with optimized diffraction efficiency [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1123002.
- 4 赵祥杰, 刘仓理, 张大勇, 等. 液晶相控阵衍射效率的优化分析 [J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1123002.
- 5 Kong Lingjiang, Zhu Ying, Song Yan. A beam steering approach of liquid crystal phased array based on nonperiodic blazed grating [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0123001.
- 6 孔令讲, 朱颖, 宋艳. 基于非周期闪耀光栅的液晶相控阵波控方法研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0123001.
- 7 J Stockley, S Serati. Advances in liquid crystal beam steering [C]. SPIE, 2004, 5550: 32–39.
- 8 P McManamon. An overview of optical phased array technology and status [C]. SPIE, 2005, 5947: 594701.
- 9 Y H Lin, M Mahajan, D Taber, *et al.*. Compact 4cm aperture

- transmissive liquid crystal optical phased array for free space optical communications [J]. SPIE, 2005, 5892: 58920C.
- 9 P F McManamon, P J Bos, M J Escuti. A review of phased array steering for narrow band electro-optical systems [C]. SPIE, 2009, 97(6): 1078–1096.
- 10 S Serati, T Ewing, J Stockley. New development in high resolution liquid crystal spatial light modulator for wave-front control [C]. SPIE, 2002, 4825: 46–55.
- 11 H Hu, L Hu, Z H Peng, *et al.*. Advanced single frame overdriving for liquid crystal spatial light modulators [J]. Opt Lett, 2012, 37(16): 3324–3326.
- 12 Y H Fan, Y H Lin, H W Ren, *et al.*. Fast response and scattering free polymer network liquid crystals for infrared light modulators [J]. Appl Phys Lett, 2004, 84(8): 1233–1235.
- 13 G D Love, A K Kirby, R A Ramsey. Sub-millisecond, high stroke phase modulation using polymer network liquid crystals [J]. Opt Express, 2010, 18(7): 7384–7389.
- 14 D Engstrom, M J O'Callaghan, C Waiker, *et al.*. Fast beam steering with a ferroelectric liquid crystal optical phased array [J]. Appl Opt, 2009, 48(9): 1721–1726.
- 15 K M Chen, S Gauza, H Q Xianyu, *et al.*. Sub-millisecond gray level response time of a polymer stabilized blue phase liquid crystal [J]. Display Technology Letters, 2010, 6(2): 49–51.
- 16 Y Huang, C H Wen, S T Wu. Polarization independent and sub-millisecond response phase modulators using a 90 twisted dual frequency liquid crystal [J]. Appl Phys Lett, 2006, 89(2): 021103.
- 17 J Sun, Y Chen, S T Wu. Sub-millisecond response and scattering free infrared liquid crystal phase modulators [J]. Opt Express, 2012, 20(18): 20124–20129.
- 18 I Dierking. Polymer network stabilized liquid crystals [J]. Advanced Materials, 2000, 12(3): 167–181.
- 19 Y H Yin, W B Li, H Cao, *et al.*. Effects of monomer structure on the morphology of polymer network and the electro-optical property of reverse mode polymer stabilized chole-steric texture [J]. J Applied Polymer Science, 2009, 111(3): 1353–1357.
- 20 I Dierking, L L Kosbar, A A Ardakani, *et al.*. Network morphology of polymer stabilized liquid crystals [J]. Appl Phys Lett, 1997, 71(17): 2454–2456.
- 21 C V Rajaram, S D Hudson. Morphology of polymer-stabilized liquid crystals [J]. Chem Mater, 1995, 7(12): 2300–2308.
- 22 C V Rajaram, S D Hudson. Effect of polymerization temperature on the morphology and electrooptic properties of polymer stabilized liquid crystals [J]. Chem Mater, 1996, 8(10): 2451–2460.
- 23 S Yabu, Y Tanaka, K Tagashira, *et al.*. Polarization independent refractive index tuning using gold nanoparticle stabilized blue phase liquid crystals [J]. Opt Lett, 2012, 36(18): 3578–3580.