

❖ 特约专栏 ❖

液晶光学相控阵在高功率激光应用中的研究进展(特邀)

汪相如, 周庄奇

(电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要: 综述了液晶光学相控阵器件在高功率激光应用方面的研究进展。从器件的实现原理出发, 阐述制约器件在高功率应用的原因, 并基于器件的多层结构, 着重介绍了各个功能膜层对高功率激光的耐受情况, 并详细介绍透明导电层、配向层、液晶层的最新研究进展; 同时, 针对器件工作模式和散热结构对高功率的约束关系进行详细分析, 并综述相关的研究进展。

关键词: 高功率激光; 光学相控阵; 光束合成; 液晶

中图分类号: TN21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0103006

Research progress of liquid crystal optical phased array in high power laser applications(Invited)

Wang Xiangru, Zhou Zhuangqi

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The progress of liquid crystal optics phased array devices in high power laser applications was reviewed in this paper. Based on the realization principle of the device, the reason of the device in the high power application was illustrated. Based on the multi-layer structure of the device, the working condition and limitation of the high power laser were introduced, including the transparent conductive layer, alignment layer and liquid crystal. Meanwhile, the latest research progress of these typical functional layers was carried out. At the same time, the relationship between laser threshold and the operating mode or the heat dissipation structure was also analyzed in detail. The related research progress was also reviewed.

Key words: high power laser; optical phased array; beam combination; liquid crystal

收稿日期: 2017-12-05; 修订日期: 2018-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(61405029, 91438108, 61775026)

作者简介: 汪相如(1983-), 男, 副教授, 主要从事液晶光电子器件及相关应用系统方面的研究。Email: xiangruwang@uestc.edu.cn

0 引言

光学时代人们对容量、带宽、速度等方面具有更高层次的需求,载体已经从电子向光电子和光子的转换,光电子技术是未来信息技术发展的必然趋势^[1-3]。相应地,光电子器件结构也已由块体结构发展到薄膜微纳结构,功能已由单一功能芯片发展到光电集成化,材料已由无机材料发展到有机/无机复合材料,工作模式已从幅度调制发展到幅度/相位/偏振/频率全参数调制^[4-6]。液晶作为一类“液态晶体”形式存在的光电子材料,依据其材料特性研制的液晶光电子器件极具特色,同时具备“幅度/相位/偏振/频率”全参数调制能力;

1971 年,Dr. Meyer 使用铈酸锂晶体研制了世界上第一个一维光学相控阵以后^[7],由于液晶光学相控阵具有低 Swap(大小、重量、功耗)和波束捷变的优势^[8],液晶光学相控阵的研究受到了空前的重视和发展。在研究初期,也存在诸多的困难,如:激光光束的大角度偏转、激光传输的稳定性以及高能激光的角度偏转。特别由于液晶材料物理特性的限制,液晶光学相控阵对于高功率激光的偏转一直是各国研究的重点和难点。

针对高功率激光偏转的应用场景^[9],美国雷声公司 APPLE 计划应用而生,致力于解决液晶光学相控阵耐受高能激光的能力。同时,美国空军实验室也将高耐受激光功率液晶光学相控阵作为激光武器制备的核心器件。如图 1 所示,经过研究,2007 年 3 月雷声公司发布了其研究成果,制备测试了 113 W/cm² 的液晶光学相控阵器件^[10]。2010 年,美国空军实验室的国防报告指出,其测试和制备了 100 W/cm² 的液晶光学相控阵器件^[11]。而相较于国外的研究,国内由于受到了材料、加工工艺的影响,高功率液晶光学相控阵的研究主要集中于理论仿真和单膜层研究,面向器件的制备研究极少。

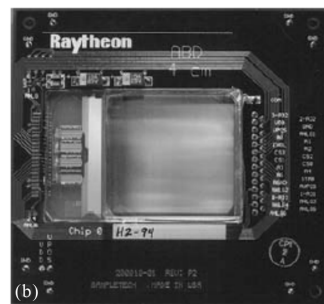
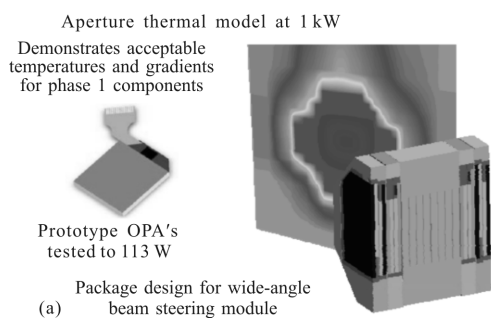


图 1 APPLE 计划测试成果(a)和雷声公司液晶光学相控阵(b)
Fig.1 Experimental results of APPLE project (a) and its liquid crystal optical phased array (b)

1 液晶光学相控阵原理和结构

在相控波束控制技术中,应用最为广泛的是微波相控阵技术,微波相控通过电子扫描的方式控制相位,利用独立可控的天线单元合成不同指向的定向波束实现目标物体的探测和跟踪^[12]。而液晶光学相控阵正是借鉴了微波相控阵原理,利用液晶的电控光学移相特性实现光束的定向偏转^[13]。但是由于控制波束波长的差异,导致液晶光学相控阵器件制备和波控方法上和微波都存在很大的不同。一般液晶光学相控阵器件结构如图 2 所示^[14]。

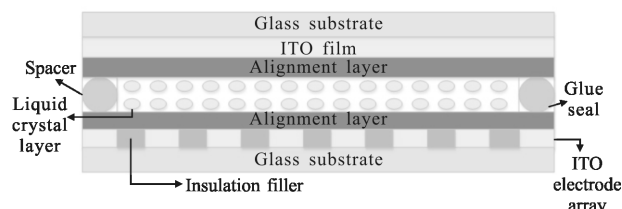


图 2 液晶相控阵器件结构示意图
Fig.2 Schematic diagram of commercial liquid crystal phased array device

由图 2 可以看出,液晶光学相控阵是由多层结构组成,一般分为:基板、电极层、取向层、液晶层。通过氧化铟锡(ITO)阵列电极加载不同的电压,上层 ITO 电极和下层 ITO 阵列电极之间会形成电场分布,而中间液晶层液晶受到电场的作用,致使液晶分子发生偏转。在液晶光学相控阵的制备中,绝缘填充物的使用至关重要,如果未使用填充物将会导致取向层无法实现平整,即会影响液晶相控阵的边界铆钉,使液晶相控阵偏转效果不佳。同时,可以通过选择间隔子的大小实现不同盒厚的液晶光学相控阵制

备。而对于高功率的液晶光学相控阵制备,由于液晶器件不同膜层对于激光都存在吸收,制备中必须尽可能少的降低各个膜层的激光吸收^[15]。特别是电极层和取向层是激光吸收最主要的膜层,必须尽可能的降低,防止器件由于激光入射后过高的热沉积产生。

液晶光学相控阵运用了液晶分子的电控双折射原理^[16]。在电极层加电后,通过液晶分子的寻常光(o光)和非寻常光(e光)产生相位延迟。图 3 是液晶光学相控阵加电后液晶分子的转动图。上层 ITO 阵列电极形成光栅,单个电极宽度是 a ,间隙为 b ,因此单个周期 $d=a+b$ 。下导电层是公共电极(COM 极)。液晶盒厚度为 L ^[17]。

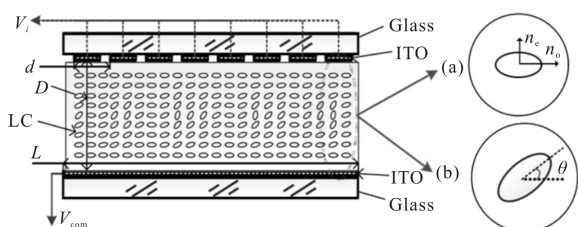


图 3 液晶光学相控阵移相器加电液晶分子转动图,(a)边界锚定分子未发生转动,(b)液晶分子两端加上交流电压发生转动

Fig.3 Tilt angle distribution of liquid crystal molecular,(a) molecules is not rotated without loading electric field, (b) molecules is rotated with loading electric field

液晶分子在外加电场的作用下发生转动,使得液晶分子发生 θ 的偏转,如图 2(b)所示。该液晶对入射光的折射率表示为:

$$n(\theta) = \frac{n_{\perp} n_{\parallel}}{n_{\perp}^2 \cos^2 \theta + n_{\parallel}^2 \sin^2 \theta} \quad (2)$$

式中: n_{\perp} 和 n_{\parallel} 分别是液晶材料垂直方向和平行方向的折射率。如果该液晶移相器厚度为 L ,入射光束通过该液晶的相位延迟为:

$$\phi = k_0 \int_0^L n(\theta) dz \quad (3)$$

式中: $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ 为入射光波长。当光束经过液晶光学相控阵以后,产生相位延迟,在远场即表现为光束的偏转^[18]。所以,通过不同的电压加载,液晶光学相控阵可以实现光束的扫描。

普通的液晶光学相控阵性能一般与制备工艺、材料参数、波控算法相关^[19-21],由于入射激光功率较低,激光热沉积远不能影响器件性能。但是,对于高功率液晶光学相控阵器件偏转扫描性能分析,温度对器件的

影响就不得不作为重要指标考虑。因为大量的热沉积会影响材料的各项参数,进而影响器件的性能^[22]。

在计算入射光的折射率时,计算使用了液晶分子的 n_{\perp} 和 n_{\parallel} ,通过 vuks^[23]理论,可以知道:

$$n_{\parallel}(T) = A - BT + \frac{2(\Delta n)_0}{3} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{\beta} \quad (4)$$

$$n_{\perp}(T) = A - BT - \frac{(\Delta n)_0}{3} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{\beta} \quad (5)$$

式中: A 、 B 、 $(\Delta n)_0$ 、 β 都是液晶材料的基本参数; T_c 是选择的液晶分子清亮点的温度。从公式(4)和(5)可以看出, n_{\perp} 和 n_{\parallel} 是随着器件温度的变化而变化的,不同功率激光入射后,器件内部的热沉积不同,不同的热沉积分布会致使器件液晶各项参数发生改变,液晶参数改变即影响了整体器件的整体性能。

通过以上理论分析,制备和研究高功率液晶光学相控阵不仅仅要考虑一般液晶光学相控阵制备的关键点和难点,同时要考虑高功率激光入射后,器件内部的热沉积问题^[24]。要保证的第一要素是热沉积最高温度不能达到所选液晶的清亮点温度,一旦达到清亮点温度,液晶器件将失去移相能力。第二是应该尽可能均衡降低器件内部温度,使得器件内部温度最大值和最小值尽可能低,避免液晶层透镜效应,影响器件性能。通过总结研究,可以从(1)分析液晶光学相控阵各膜层对激光的吸收;(2)改变器件结构改善液晶光学相控阵散热;(3)增加辅助散热系统加快器件散热等几方面来研究高功率液晶光学相控阵。

2 器件膜层分析

对于液晶光学相控阵器件的膜层分析,主要研究各个膜层对于激光的透过率和吸收率。特别是对于器件的导电层氧化铟锡(ITO)和取向层聚酰亚胺(PI)分析,因为传统液晶光学相控阵制备采用的 ITO 和 PI 对于 1 064 nm 激光有较强的吸收,膜层吸收高能激光后转换为很强的热沉积,使得器件性能变差甚至无法工作。如今研究较多的透明导电电极一般有:石墨烯、ITO、有机聚合物导电薄膜等。在 2010 年 5 月,中国工程物理研究院对液晶器件功能薄膜的激光损伤做了详细的研究^[25]。

从图 4 可以看出,100 nm 厚度和 300 nm 厚度 ITO 对于不同波长激光的透过率和吸收率。对于 1 064 nm 激光的透过率,100 nm 和 300 nm 的 ITO 分别是 87% 和 82%,并且 ITO 对激光的吸收主要是本征吸收,光学

禁带宽度约为 3.5 eV, 对应本征吸收的波长为 354 nm。同时, 从图 4(b) 可以看出, ITO 薄膜越厚, 热沉积在薄膜中的激光能量越多, 致使温度越高^[26]。

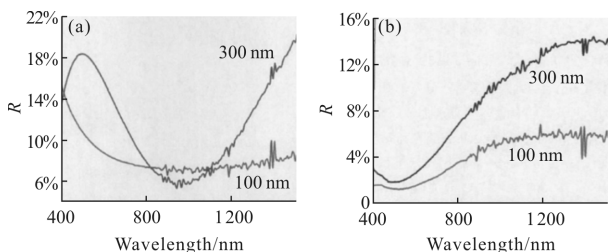


图 4 不同厚度 ITO 的光谱透过率(a)和吸收率(b)

Fig.4 Reflection spectrum (a) and absorption spectrum (b) of ITO with different thicknesses

通过图 5(a) 的展示, 可以看到 100 mJ/cm² 单脉冲激光作用 300 nm 厚度 ITO 薄膜后, ITO 薄膜表面出现的损伤形貌。在激光的辐照范围内, ITO 出现了熔融损伤, 外围出现了应力损伤。而图 5(b) 展示了 160 W/cm² 的连续激光辐照 300 nm 厚度 ITO 薄膜 5 s 后的损伤形貌。可以看出, 激光的损伤深度达到几十微米, 损失开始于基底, 并向 ITO 膜层表面传递。通过以上分析, 减薄 ITO 薄膜的厚度, 可以提高 ITO 膜层耐受激光的功率, 同时, 可以提高 ITO 薄膜对激光的透过率, 减小 ITO 对激光的吸收, 进而降低器件的热沉积。

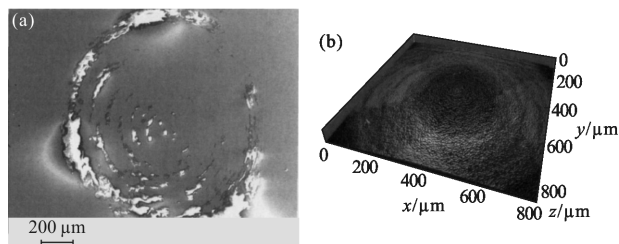


图 5 脉冲激光作用 ITO 形貌图(a)和连续激光辐照 ITO 损伤形貌图(b)

Fig.5 ITO morphology diagram after pulsed laser pumping (a) and continuous laser (b)

对于聚酰亚胺(PI)耐受激光功率研究, 中国工程物理研究院将 1 000、2 000、5 500、6 500 W/cm² 的 1 064 nm 连续激光入射 50 μm PI 薄膜, 得到了 PI 薄膜表面中心处温度随时间的变化曲线如图 6 所示。

由图 6 可以看出, 研究中 PI 耐受高能激光的能力远高于 ITO 薄膜, 在 1 000 W/cm² 的连续聚光入射中, 温度也只升高了 50 °C 左右。一般液晶光学相控阵耐受功率达到 200~300 W/cm² 的功率密度即能满

足要求, 所以对于取向层的选择, PI 可以满足要求。

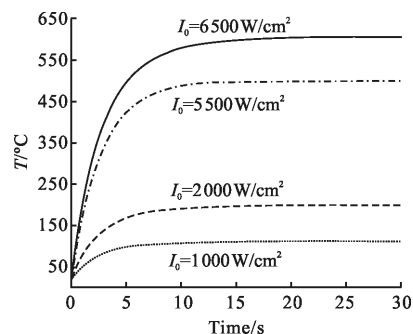


图 6 不同功率密度激光辐照引起 PI 薄膜温度变化

Fig.6 PI film temperature change at different incident laser power density

对于透明导电薄膜的研究, 除去已经比较成熟的 ITO 导电薄膜, 石墨烯的研究和应用也越来越成熟。如图 7 所示是石墨烯的晶格结构^[27]。

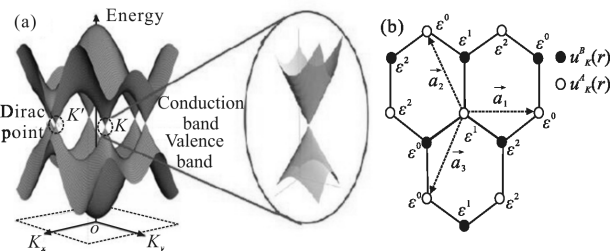


图 7 石墨烯结构。(a)石墨烯能带结构,(b)第一布里渊区中石墨烯的电子色散图

Fig.7 Structure of graphene. (a) Structure diagram of graphene energy band (b) electronic dispersion diagram of graphene in first Brillouin zone

石墨烯得到大力的发展, 是由于其本身诸多优点相关。它是一种二维晶体材料, 并且具有十分优异的光电特性。单层石墨烯的透光率高达 97.7%^[28]。同时, 石墨烯除了在紫外的 270 nm 波段有一处明显的吸收峰值之外, 直至 3 000 nm 处都没有明显的吸收峰。这对于用石墨烯制备液晶光学相控阵有得天独厚的优势, 但是虽然石墨烯具优良的光电性能, 但是在液晶光学相控阵制备过程中, 涉及到了电极光刻, 而石墨烯的电极光刻是一个十分困难的问题。因此, 目前尚未见用石墨烯制备的液晶光学相控阵器件。

有机聚合物导电薄膜是透明导电薄膜又一研究重点, 其中乙烯二氧噻吩/聚乙烯磺酸钠(PEDOT:PSS)导电薄膜研究较为成熟, 其优点是在可见光波段光吸收率低, 比例和掺杂数可调等, 使得薄膜性能

的可操作性大大提高。图 8 是不同掺杂下 PEDOT:PSS 的透过率测试^[29]。

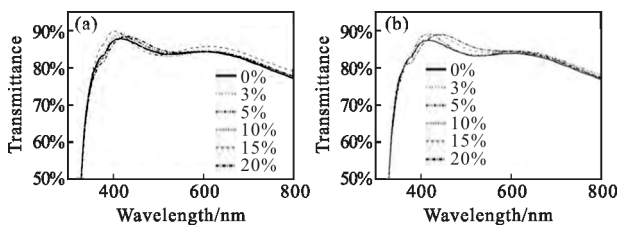


图 8 掺杂 DMSO 的 PEDOT:PSS 薄膜透过率(a)掺杂丙三醇的 PEDOT:PSS 薄膜(b)透过率

Fig.8 DMSO-doped PEDOT: PSS film transmittance (a) and glycerol-doped PEDOT: PSS film transmittance (b)

通过查阅资料,未掺杂的 PEDOT:PSS 薄膜的平均透过率约为 83%,而掺杂 DMSO(二甲基亚砜)后,虽然导电率大大提高,但是其薄膜平均透过率为 84%,并未提升太高,而通过丙三醇掺杂后,薄膜的透过率虽然也有一定的改善,但是离制备高激光功率液晶光学相控阵的透明导电电极还是有极大的差距。同时,由于有机物薄膜的耐高温能力较差,在高能激光入射后,器件的热沉积过高会直接破坏 PEDOT:PSS 导电薄膜。因此,在制备高激光功率液晶光学相控阵器件时有机物薄膜一般不作为器件的电极。

在 2008 年 1 月,美国发明专利中公布了一种透明导电薄膜(CdO 掺杂 In)^[30],其超高的光束透过率成为了亮点。随后,这种透明导电薄膜的研究越来越多,通过掺杂比例等对薄膜性能做了全面的分析。图 9 是不同掺杂浓度的 CdO 薄膜表面形貌。

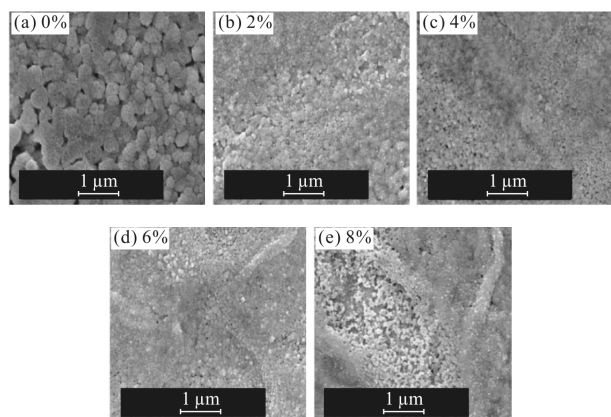


图 9 扫描电镜下不同掺杂浓度的 CdO 表面形貌

Fig.9 SEM images of surface morphology of CdO with different doping concentration

根据掺杂浓度不同,可以测得不同掺杂浓度下不同波长的薄膜透过率,如图 10 所示,In 的掺杂浓度不同,对于 CdO 薄膜的透过率有较大影响,但是 In 的掺杂质量分数不是越高越好,在 4%~6%的浓度掺杂后,CdO 薄膜的透过率达到最佳,且波长越长透过率越高。

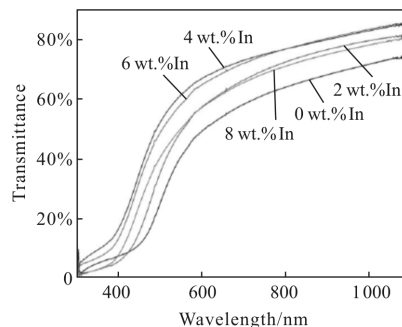


图 10 不同 In 掺杂浓度下 CdO 薄膜透过率

Fig.10 Optical transmittance spectra of CdO and In-doped CdO thin films

根据 US 7314673B2 专利可知,其制备的 CdO 掺 In 薄膜的最高透过率甚至可以达到 99%,且导电率可以达到比较成熟的 ITO 薄膜导电率。如图 11 所示。

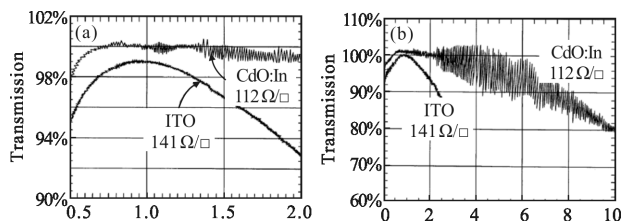


图 11 CdO 掺 In 下薄膜导电率和透过率

Fig.11 Conductivity and transmittance of In-doped CdO films

但是在国内,对于 CdO 掺 In 薄膜的研究尚不算成熟,并未到达国外所报道的薄膜高透过率和薄膜高导电率。并且 CdO 的制备中 Cd 为毒性较强物质,会污染空气和严重影响人体健康。在制备高功率液晶光学相控阵时,虽然 CdO 掺 In 薄膜是十分优良的电极备选薄膜,但是在实际制备中,尚未达到高透高导的目标,且制备条件有一定风险,所以该薄膜并未在高功率液晶光学相控阵器件制备中得到广泛的使用。不可否认,CdO 掺 In 薄膜如果运用在高功率液晶器件的制备中,必将降低器件内部的热沉积,从而提高器件的耐受高能激光的能力。

3 器件结构分析

传统液晶光学相控阵器件为透射式结构,如图12所示^[31],透射式结构制备和检测相对简单。在器件制备完成后,器件在光路设计和运用中也十分方便,所以大部分液晶光学相控阵器件的设计都是透射式结构。但是,随着应用需求的不断提升,传统液晶移相器已经无法满足实际需求。特别是耐受高激光功率的能力一直是液晶移相器发展的瓶颈。所以为了研究耐受高激光功率的液晶光学相控阵,设计良好的器件结构显得十分必要。

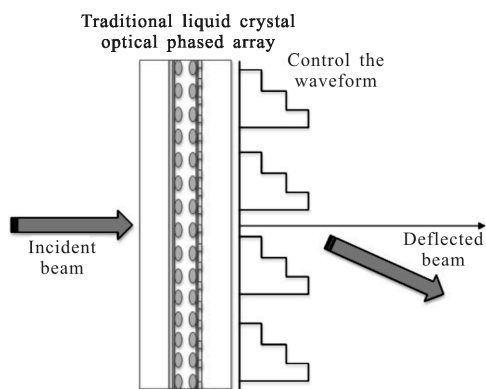


图 12 传统液晶光学相控阵结构

Fig.12 Structure of traditional liquid crystal optical phased array

为了能使器件耐受高能激光入射,器件不光需要使用低吸收度的膜层使器件内部的热沉积降低,同时,需要将已经沉积在器件内部的热量及时的导出器件。这就需要改善器件结构和设计。传统液晶光学相控阵器件的基板使用的是石英玻璃,而石英玻璃的热导率约为 $1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,这使得器件内部热沉积不可能及时被导出。因此,找到热导系数高,同时可以作为基底的材料就显示十分关键。硅基液晶光学相控阵器件由此得到发展。如图 13 所示^[32]。

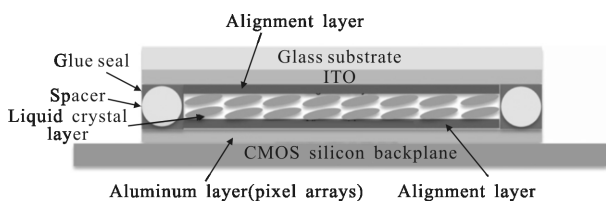


图 13 硅基液晶光学相控阵结构

Fig.13 Structure of silicon-based liquid crystal optical phased array

选择硅片作为液晶光学相控阵基底,是由于硅片具有十分优良的导热性能。硅片的热导系数约为

$148 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,与石英基板相比较,硅片的导热系数是石英玻璃的上百倍。因此,以硅片作为基底的液晶光学相控阵器件的散热性能上是石英玻璃基底液晶光学相控阵器件的近百倍,这极大的降低了液晶光学相控阵内部的热沉积,同时大大提升了液晶光学相控阵器件耐受高能激光的能力。

由图 14 可以看出,硅基液晶光学相控阵器件为反射式结构。通过 ITO 阵列电极和硅基片 COM 极形成电场。在硅片上镀上对应光束的全反射膜和取向膜,控制器件内部的电场分布,即可对光束进行控制。而由于激光在器件内部反射,出射时也会经过 ITO 电极,其实和透射式结构经过的 ITO 膜层数是一致的。但是,硅基反射式液晶光学相控阵由于用硅片作为 COM 极,ITO 薄膜被刻蚀成了阵列电极,反射式液晶光学相控阵经过的两层 ITO 薄膜都是经过刻蚀成阵列电极的膜层,一些地方只剩下了石英基板,所以有助于降低 ITO 整体膜层对于激光的吸收。同时,在计算液晶光学相控阵相位延迟量时,由于光束经过两次液晶层,相位延迟量也会变成透射式液晶光学相控阵相位延迟的两倍。

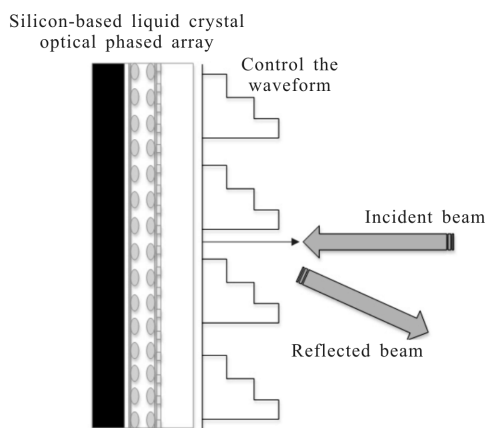


图 14 光束入射硅基液晶光学相控阵

Fig.14 Silicon-based liquid crystal optical phased array on light beam incident

4 器件散热分析

对于任何高功率器件的制备,散热系统辅助散热是器件性能好坏的重要因素。制备高功率液晶光学相控阵器件辅助散热系统的设计同样十分重要。由于必须提高内部散热效率,液晶光学相控阵基板改为硅片,使用反射式结构,这正好为器件散热系统的设计提供了便利。因为如果是传统的液晶光学相

控阵透射式结构,要保证光束通过器件,在设计散热系统时就会遇到很大的困难。如图 15 所示为一般反射式器件散热结构的设计。

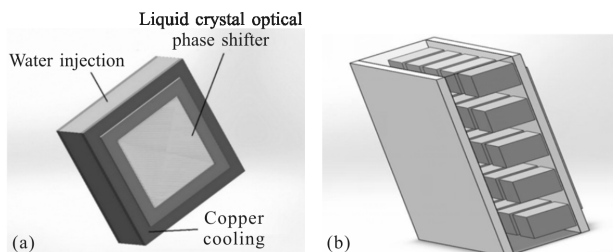


图 15 液晶光学相控阵散热系统设计

Fig.15 Cooling system of liquid crystal optical phased array

2016 年, D.Gu 在其论文中展示了其团队设计的高功率液晶光学相控阵系统, 其液晶光学相控阵内部导电膜采用了一种被称作 Transcon™ 1 的透明导电薄膜^[9], 该膜拥有非常高的光透过率(其设置仿真时仅仅为 0.2% 光吸收率, 证明该透明导电薄膜拥有非常优异的光电特性), 使得其制备的液晶光学相控阵; 能够耐受较高的激光功率。同时, 他们着重设计了针对液晶光学相控阵器件的散热系统。如图 16、17 所示是理论设计和实际应用系统。

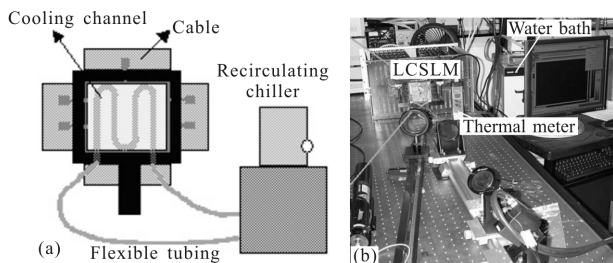


图 16 散热系统设计和实际制备系统

Fig.16 Design of cooling system and actual preparation system

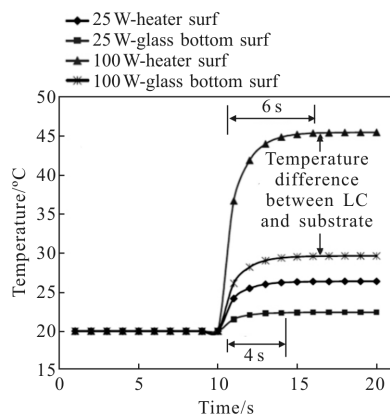


图 17 不同基底和激光功率下液晶温度升高

Fig.17 Liquid crystal temperature changes with different substrate and different laser power

根据论文描述, 不同激光功率入射后液晶层温度升高不同, 且不同的基底会导致不同的温度分布。如图 17 显示其实验结果。

2017 年, 电子科技大学汪相如团队制备了验证性液晶移相器, 运用反射式结构, 改变器件传统导电层, 设计使用高效散热系统, 在国防科技大学的高能激光测试平台下, 测试液晶光学移相器的耐受高能激光的能力。液晶器件测试图如图 18 所示。

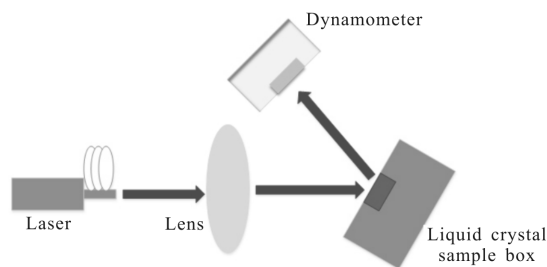


图 18 液晶测试光路图

Fig.18 Tested optical path diagram of liquid crystal

激光器输出激光经过透镜会聚后照射到待测液晶器件上, 激光光斑直径约为 8 mm (对应模场的面积为 0.5 cm²)。激光经过液晶光学移相器内部的反射膜全反射后进入功率计。实验初测量待测液晶的激光功率记为 P₀, 经液晶器件反射后的功率记为 P₁, 液晶温度记为 T。实验测得的实验数据如表 1 所示。

表 1 测试数据

Tab.1 Tested data

Laser currents (I/A)	P ₀ /W	P ₁ /W	Liquid crystal temperature T/°C	Power density /W·cm ⁻²	Reflectivity
0.6	1.1	1.8	21	2.2	163.636 4%
0.8	19.9	22.1	22	39.8	111.055 3%
1	43	36.7	24	86	85.35%
1.2	59.4	53	24	118.8	89.26%
1.4	80.6	76.6	30 (Thermograph calibration)	161.2	95.04%
1.6	101.8	88.2	30	203.6	86.64%
1.8	120.9	104.9	34 (Thermograph calibration)	241.8	86.77%
2	136.2	122.4	35	272.4	89.87%

从表 1 中的测试结果可以看出, 当照入功率为

136 W(功率密度为 272.4 W/cm²)时,液晶的温度为 35 ℃,温升为 14 ℃。该液晶器件的反射率约为 86%~90%,实验开始时功率计反射率异常主要原因为加载电流误差导致。两个功率下典型的温度图像如图 19 所示。

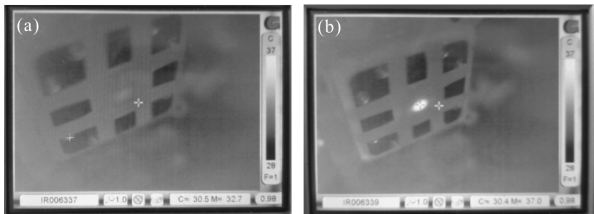


图 19 入射激光功率 40 W(a)入射激光功率 130 W(b)
Fig.19 Incident laser power 40 W (a) and incident laser power 130 W (b)

经过对器件结构改造和器件膜层改变,使液晶光学移相器耐受激光功率达到了 272.4 W/cm²,这极大的提高了国内液晶光学移相器耐受高激光功率的能力。并且此实验还未测量硅基结构的设计模式,试验中器件的基板仍是石英玻璃。通上文器件结构设计介绍,如果将反射式结构中的基板换为高掺杂硅片,那么器件的耐高功率激光能力将进一步提高。

5 结 论

随着空间激光的发展和高能激光的应用,高功率液晶光学相控阵的研究和制备已经越来越迫切。文中综述了国内外大量的研究报告,通过分析器件膜层材料、器件结构设计和器件散热系统设计入手,对高功率液晶光学相控阵器件的发展技术和研究重点做了深入的研究分析。同时,通过研究发现,设计反射式结构和良好的散热系统是制备高功率液晶光学相控阵器件的关键。

参 考 文 献:

[1] Xu Yulong. Analysis of the Development trend of photoelectron technology [J]. *Technology Innovation and Application*, 2015 (20): 107-107. (in Chinese)
徐玉龙. 光电子技术发展态势分析 [J]. *科技创新与应用*, 2015 (20): 107-107.

[2] Yang Jiaoyu. Development status and application analysis of optoelectronic technology[J]. *Information & Communications*, 2014(11): 129-129. (in Chinese)

杨娇瑜. 光电子技术的发展现状及应用探讨分析[J]. *信息通信*, 2014(11): 129-129.

[3] Ren Zhengqi. Development trend and practice of optoelectronic technology [J]. *Silicon Valley*, 2014(13): 5-6. (in Chinese)
任政企. 光电子技术发展态势及实践探究 [J]. *硅谷*, 2014 (13): 5-6.

[4] Zhang Xiwei. Construction of p-n junction based on p-type ZnSe nanostructures and study of their optoelectronic devices [D]. Suzhou: Soochow University, 2014. (in Chinese)
张希威. 基于 p-型硒化锌纳米结构的 p-n 结构筑及其光电子器件研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2014.

[5] Nie Biao. Quasi-one-dimensional ZnM (M =O, Se) nanostructures: controlled synthesis and optoelectronic devices application[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013. (in Chinese)
聂彪. 准一维 ZnM(M=O,Se)纳米结构: 可控合成及其光电子器件应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.

[6] Tao Jifang. Study of Silicon-based micro nano optoelectronics devices [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012. (in Chinese)
陶继方. 硅基微纳光电子器件的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012.

[7] Meyer R A. Optical beam steering using a multichannel lithium tantalate crystal [J]. *Applied Optics*, 1972, 11 (3): 613-616.

[8] Mcmanamon P F, Bos P J, Escuti M J, et al. A review of phased array steering for narrow-band electrooptical systems [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(6): 1078-1096.

[9] Gu D, Mahajan M, Guthals D. High power liquid crystal spatial light modulators[C]//SPIE, 2006, 6306: 630602.

[10] Dorschner T A. Adaptive photonic phase locked elements: an overview (BRIEFING CHARTS)[Z]. 2007: 1-16.

[11] Whitaker B, Harris S R. A preliminary investigation into the effects of high-power illumination on optical phased arrays [Z]. 2010: 1-20.

[12] Zhang Hui. Investigations on microwave and millimeter wave array imaging key technologies [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
张慧. 微波毫米波阵列成像关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.

[13] Yan Aimin, Zhi Yanan, Sun Jianfeng, et al. Recent development of optical phased array scanning technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(10): 45-51. (in Chinese)
闫爱民, 职亚楠, 孙建锋, 等. 光学相控阵扫描技术研究进

- 展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(10): 45–51.
- [14] Sun Liang. The study of light-beam scanning based on optical phased array [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
孙亮. 基于光学相控阵的光束扫描研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2008.
- [15] He X, Wang X, Wu L, et al. Theoretical modeling on the laser induced effect of liquid crystal optical phased beam steering[J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 437–443.
- [16] Wang N, Li G H, Yun M J. Voltage dependent birefringence measurements of liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, 29(12): 1064–1066. (in Chinese)
- [17] Tang Zhenhui. Research on the beam scanning method of liquid crystal optical phased array [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.(in Chinese)
汤镇辉. 液晶光学相控阵的波束扫描方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [18] Wu Yunlong, Nie Jinsong, Shao Li, et al. Propagation characteristics of airy beams in the far-field with Fourier analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(3): 88–99.(in Chinese)
吴云龙, 聂劲松, 邵立, 等. 用傅里叶分析法研究艾里光束远场传播特性[J]. 光子学报, 2017, 46(3):88–99.
- [19] Zhao Xiangjie. The key technology and application of liquid crystal phase control array [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2014.(in Chinese)
赵祥杰. 液晶相位控制阵列关键技术及其应用 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2014.
- [20] Zhou Jianhua. Research on liquid crystal phased array waveform control [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
周建华. 液晶相控阵波控技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [21] Wang Xiangru, Huang Ziqiang. Analysis and research on liquid crystal optical phase array component steering precision[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2017, 32(4): 33–37. (in Chinese)
汪相如, 黄子强. 液晶光学相控阵组件扫描精度分析研究 [J]. 光电技术应用, 2017, 32(4): 33–37.
- [22] Li J, Gauzia S, Wu S T. High temperature-gradient refractive index liquid crystals[J]. *Optics Express*, 2004, 12(9): 2002.
- [23] Li J, Wu S T. Self-consistency of Vuks equations for liquid-crystal refractive indices [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 96(11): 6253–6258.
- [24] Zhang Z, You Z, Chu D. Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices [J]. *Light Science & Applications*, 2014, 3(10): e213.
- [25] Li Yanglong. Laser damage on functional films of liquid crystal optical elements [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2010. (in Chinese)
李阳龙. 液晶光学器件功能薄膜的激光损伤机理研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2010.
- [26] Li Yanglong, Wang Weiping, Luo Yongquan, et al. 1 064 nm laser damage on indium tin oxide films[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2012, 26(1): 107–112. (in Chinese)
李阳龙, 王伟平, 骆永全, 等. 1 064 nm 激光对氧化铟锡薄膜的损伤研究[J]. 高压物理学报, 2012, 26(1): 107–112.
- [27] Gan Tao. Photoelectric properties of graphene and its detector technology[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics), 2016. (in Chinese)
甘桃. 石墨烯的光电特性及其探测器技术[D]. 上海: 中国科学院大学(上海技术物理研究所), 2016.
- [28] Wu Tianru. Investigation on fabrication and optoelectronic properties of high-quality graphene grown by CVD [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.(in Chinese)
吴天如. 化学气相沉积法生长高质量石墨烯及其光电性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [29] Zhao Zhiqiang. Modification of PEDOT:PSS films toward applications in polymer solar cells [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
赵志强. 改性 PEDOT:PSS 薄膜及其在聚合物太阳能电池中的应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- [30] Kumaravel R, Ramamurthi K, Krishnakumar V. Effect of indium doping in CdO thin films prepared by spray pyrolysis technique [J]. *Journal of Physics & Chemistry of Solids*, 2010, 71(11): 1545–1549.
- [31] Lin Zhenhua. Research on modeling and waveform control of liquid crystal phased array [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012. (in Chinese)
林振华. 液晶相控阵建模分析与波控算法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [32] Collings N, Pivnenko M. High quality assembly of liquid crystal on silicon (LCOS) devices for phase-only holography [C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2010, 7618: 120–126.