

液晶光子学的研究和应用

Research and Application of Liquid Crystal Photonics

王勇竞 郭转运 张延忻

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

一、学科的产生

1888年,奥地利植物学家弗莱特希(Friedrich Reinitzer)首先发现物质存在第三态——液晶相。在以后的几十年时间里,液晶作为一种新的物质形态,受到了广泛的重视和研究,人们的兴趣主要集中在基础研究上。1968年液晶的动态散射电光效应发现以来,情况发生了戏剧性的变化。在不到30年的时间里,液晶显示设备得到巨大的发展,1994年的市场占有率已达50亿美元,第一次超过传统的阴极射线管,成为显示设备的主流。从简单的仪器仪表数字显示、公告牌,到便携式电脑、高清晰度平板电视,液晶正以惊人的速度进入现代社会生活。在科学技术史上,也许只有微电子技术,才有如此迅速的发展。液晶显示迅速成为一种世界范围内的新兴产业,各种相关的基础产业逐渐建立和完备起来。液晶科学首先是一项基础研究,液晶的相变、物性,都是典型的凝聚物理的内容;同时也是一项应用研究,液晶显示器件的每一个发展,大都迅速找到它的商业利益。液晶是一门科学,也是一门技术。随着光子学的提出和发展,以“光子为信息载体”的研究及光计算、光学信息处理等前沿科学迅速发展起来。在此基础上,从液晶光阀开始,液晶器件突破了其传统的显示领域,成为光计算、光学信息处理、光学神经网络等研究中不可缺少的一环。光学实时输入输出器件、并行光学取阈器件、实时全息的记录、相位共轭装置、高速光学开关等都需要用液晶器件来完成。

液晶科学已远远超出典型的光电子范畴,且和信息科学密不可分。我们可以把液晶及其在信息科学中应用研究归结为液晶光子学。它的研究范畴包括:1. 液晶显示,这是以光子为载体信息的显示过程;2. 在光计算、光学神经网络等领域中的光学输入器件的应用,这是信息的输入和存储过程;3. 液

晶相位共轭装置、光学取阈器件、光互连的实现等功能器件,这是信息的处理过程。

液晶光子学的产生有以下三方面的原因:其一,现代社会越来越信息化,信息的存储、显示和处理等过程在整个社会生产中占越来越大的比例。人类接受的信息80%以上是视觉信息,即光学信息。其二,光子学作为一门新型科学,有了长足的进展,其广阔的应用前景已见明朗。光纤通讯、光计算、光学神经网络的飞速发展,急需光子学功能材料,而液晶就是最重要的候选者之一。其三,液晶工业的飞速发展。液晶材料、集成驱动器、镀膜基片、偏振片、滤光片等相关技术都已形成商业化的产业,为液晶光子学的发展打下深厚的基础。

二、液晶光子学发展的特点

近30年液晶光子学的发展是以液晶显示技术为标志的。液晶显示技术的提高,是一个社会需求与技术进步相互作用的良性循环过程。液晶显示是第一种被动式平板显示技术,它具有轻便、寿命长、功耗低、在阳光下可见等明显区别于阴极射线管的特点。动态散射液晶器件迅速在数字手表显示上找到立足点,紧接着是扭曲向列型液晶器件的广泛应用,均导致各大公司大量资金人力的投入,使性能稳定、宽工作温度的液晶材料、导电玻璃、偏振片等各种必须技术迅速商业化,为液晶技术的进一步发展提供了坚实的物质基础。超扭曲向列(STN)、有源矩阵(AMLCD)、铁电液晶(FLC)等各种液晶技术正是在这一基础上发展起来的。这些更优良的工作方式的出现,又促进了社会对便携电脑显示、大屏幕电视、高清晰度平板电视的需求,最终又反过来推动了液晶技术的发展。我国的工业界和科学界都可以从液晶的发展模式中吸取一些有益的经验。

液晶科学已经发展成为诸多相关学科、产业紧密结合的一门综合学科。液晶作为液态和固态之间的一种物质形态,广泛存在于有机材料中。成熟的

化学有机合成业,为液晶的发展提供了众多的候选材料。人们可以按照需要为液晶分子添加光学活性中心,或者手性基团,这些都为液晶技术的丰富和发展提供了重要的物质基础。与此相应的是液晶器件的各种工作方式层出不穷,例如60年代的动态散射,70年代的扭曲向列、超扭曲向列和有源矩阵,80年代的表面稳定的铁电液晶。每一种新工作方式的提出,都克服了原有器件的一些缺点,扩展了液晶器件的适用范围。这一趋势进入90年代以来仍没有减弱的趋势,聚合凝胶液晶、聚合物分散液晶、多稳态等各种新的工作方式和新现象仍然不时见诸报导。

其中最富戏剧性的例子是铁电液晶的发现和开发。1974年梅耶(Meyer)通过理论分析,大胆地预见了由手性分子组成的倾斜近晶液晶(SmC⁻)具有铁电性。1975年,梅耶与克勒尔(Keller)合作,合成出了第一种铁电液晶材料,直接证明了铁电性的存在。到1980年,克拉克(Clark)等人提出了表面稳定的铁电液晶工作方式,使得一种高速器件成为可能。1991年佳能公司推出了最新的24英寸高清晰度铁电液晶电视,也是目前最大的液晶电视。这种从物质结构的理论分析、材料的制备,到器件开发、商品的推出,一系列环环相扣的过程就是液晶研究史上一个成功的典型范例。

三、液晶的电光效应

液晶的电光效应及其在信息显示领域的应用是液晶光子学中研究最充分的课题。以下简单介绍液晶的主要电光效应及其发展过程。

1. 动态散射(SD)。1968年由美国RCA公司海麦尔(Heilmeyer)等人发现,是最先用于液晶器件的电光效应。用于初期的液晶电子手表、计算器显示等。它不需要偏振片,视角较宽,但工作电压高、耗电量大,自从扭曲向列等模式的电光效应发现以来,几乎已不再使用。

2. 宾主模式(GH)。它是利用添加于液晶的双色染料吸收系数的各向异性而显示的器件。GH液晶器件的应用范围远不及扭曲向列等模式广阔,其主要原因是它的驱动电压高、响应速度慢,无法作大容量、多路显示。但是它亮度高、视角宽,能在高温高湿环境下工作,因此在一定的范围内,如军用、航空设备、公告牌等,有其特有的市场。

3. 扭曲向列(TN)。70年代初,萨特(Schadt)等人发明了90°扭曲向列型液晶显示器件。从此,从早期的电子表和计算器,到最近的有源矩阵液晶技术均有应用,且一直兴盛不衰。这主要由于扭曲向列器件驱动电压较低,具有较高的对比度,同时液晶盒间距的不均匀、摩擦方向和偏振片方向的偏差都

不大影响对比度等优点。但是,它的电光效应曲线不陡峭,不能应用在大容量显示中。这一点通过后来发展的各种技术才得到克服。

4. 超扭曲向列(STN)。1983年舍夫尔(Scheffer)等人发现,当加大扭曲角($120^{\circ}\sim 360^{\circ}$)时,可以大大提高多路驱动的线数,达到数百,甚至上千,满足计算机监视器VGA的要求。在日本各大公司的推动下,超扭曲向列器件迅速发展起来。首先,在工艺上放弃了成本较高的斜蒸氧化硅定向的方法,采用了一般液晶所常用的摩擦定向的方法,达到具有预倾角的定向效果。其次用扭曲补偿片消除了背景色,实现了黑白显示。 640×480 的单色或彩色的监视器迅速实用化,并在便携式电脑显示领域占有了统治地位。然而超扭曲向列器件液晶盒的间距要求较高,为 ± 0.1 微米,同时响应速度也较慢。而当设法提高器件响应速度后,用传统的多路驱动的方法能达到的对比度又很低。In Focus公司为解决这个问题,提出了主动寻址的驱动方式,提高了快响应速度下的器件的对比度。带有扭曲补偿片,以主动寻址方式驱动的超扭曲向列显示器成本较低,制作简单,易于制成大面积器件,成为平板电视、高清晰度电视领域和有源矩阵竞争的重要对手之一。

5. 有源矩阵(AM)。1971年费舍尔(Fischer)提出依靠半导体技术,在器件每一个像素上集成薄膜晶体管,用有源的电极驱动液晶(主要是扭曲向列),可以大大提高显示容量。但直到1979年非晶硅场效应薄膜晶体管的出现,它才变得实用化,引起了人们的广泛重视。在80年代中后期兴起的有源矩阵热中,投入了大量的人力物力,甚至超过了同期的超扭曲向列器件。它以驱动容量大、对比度高、响应速度较快等优点成为下一代高清晰度平板电视最重要的候选者。1986年第一台袖珍电视出现,到现在有源矩阵液晶袖珍电视已经完全商业化,正向大型化发展。限制有源矩阵液晶显示器件发展的最重要的因素是成本问题,典型的制造过程要经过六步掩膜,每一步的缺陷都可能导致器件的短路,成品率较低,人们正在寻找其它的方法以降低工艺的复杂程度。同时由于它复杂的极板结构,使得较大面积的器件成本高昂,难于实用化。为了实现大屏幕显示,投影的方法被广泛使用。

6. 铁电液晶(FLC)。它最主要的特点是很快的响应速度和存储性能。这一特点使得铁电液晶用无源驱动的方法就能实现大容量(理论上是无限的)高速显示,所以一开始,它就受到广泛重视,尤其是日本佳能公司更是不遗余力地开发铁电技术。铁电液晶以其快的响应速度、大显示容量、高分辨率以及驱动成本低等优点,和超扭曲向列器件一样成为有源矩阵器件最重要的竞争者之一。铁电液晶器件的主要问题是灰度的实现,它本质上只能作二值显

示。一般利用时间和空间分割的方法来实现灰度显示,而这增加了工艺的难度,进一步连续灰度的显示正在研究之中。下表中列出几种液晶主要工作方式的特点、发展水平和商业化程度。

液晶几种主要工作方式比较

	发现时间	对比度	显示容量	响应速度	商业化程度	最新进展
TN	1970	高	小	中	完成	
STN	1983	中	大	低	基本完成	1 280×1 024 工作站用监视器
AM	1971	高	大	中	基本完成	21 英寸彩色电视
FLC	1980	中	很大	高	正在完成	24 英寸黑白电视

四、液晶在光子学中的应用及前景

液晶在光子学中的应用,不外乎利用液晶的各种光学、电学、化学效应,其中主要包括以下方面。

1. 电光效应。这是研究最充分的一个领域,一般用电寻址的方法,完成信息由光到电的转换,例如各种显示器件。显示器件是现代基于微电子学的信息技术中,人机界面必不可少的一个环节,也是信息的重要媒介。在这一领域液晶器件已经占有了统治地位。同时作为空间光调制器,它们又是光计算、光学信息处理、光学神经网络中必不可少的实时光学输入器件。特别值得注意的是铁电液晶器件,它有极快的响应速度(电致倾斜铁电液晶已能达到亚微秒的量级)、很高的分辨率和存储性能,特别适合于并行光学输入,充分发挥光学二维并行的特点。

2. 光敏半导体材料的光电效应加液晶的电光效应。它可完成间接的光对光的调制,例如光寻址的液晶光阀。它利用光敏材料的光电效应产生的电场驱动液晶,调制第二个光束,也就是通常的投影方法。它可以实现高分辨率小面积的液晶屏到大屏幕、高清晰度显示的转换,在投影电视中得到广泛应用。典型器件是光寻址的液晶光阀。在非相干光和相干光的转化、图象的波长变换、二维并行光学取阈等光子学课题中已得到广泛的应用。这种混合效应,能充分发挥液晶技术和微电子集成技术的兼容性,有效借鉴微电子技术的方法和工艺,有希望在现有技术的基础上研制一些光子学系统中急需的全光器件,例如光学神经网络中并行取阈反馈装置、光学双极(正负)求和器件、液晶微分滤波器,等等。

3. 直接的光光效应。利用向液晶分子上接挂光学活性基团,或向液晶中掺入有光活性的物质,利用活性分子受光照射后产生的构象变化来驱动液晶;利用光热效应产生相变来改变液晶状态,例如

掺染料液晶的相位共轭镜、激光热写入投影电视等。这两种方式都能实现直接的光对光的调控,由于它没有经过电这一中间环节,所以一般制造工艺简单、分辨率高、响应速度较快,能广泛应用在动态全息图的记录、高密度光学存储、光子“晶体管”、光象放大器等。

液晶作为一种光子学材料,其突出的优点有以下几个方面。

其一,工业基础深厚。没有任何一种其它光子学材料形成如此完备的工业、技术和材料基础。

其二,发展前景宽阔。众多的材料(现已合成有液晶特性的化合物多达数万种)、丰富的工作方式和现象,为液晶光子学的发展提供了广阔的天地。

其三,液晶技术上和微电子技术兼容。可以把微电子技术,甚至微电子集成的结构直接应用在液晶器件中。这使得它很容易吸收微电子技术的结果,把微电子学的方法转化为光子学的方法。

其四,液晶具有二重性。分子的长程有序,使它具有光学活性,相当于一种单轴晶体,有大的各向异性和双折射;它同时又是一种敏感材料,对电场、磁场、温度、压力、边界条件、杂质等极为敏感。无论光控还是电控的液晶光子学器件,都有较高的灵敏度,可以在低光强、低场强下工作,能够满足实际应用的要求。

这些优点使得液晶成为最重要的光子学器件之一,在光学显示、光纤通信、光计算和信息处理,甚至光学神经网络计算机中有着广阔的应用前景。

五、结 论

虽然液晶光子学这一名称还比较陌生,但是它的发展从 60 年代已经开始,从光子学的角度研究液晶已逐渐引起人们的重视,液晶在光子学中的应用研究方兴未艾。美国和日本凭借其发达的科技已远远走在前头。相对讲,美国研究比较全面,而日本主要关心显示技术领域。液晶的高档次产品也集中在这两个国家。欧洲则形成了液晶材料完备的科研生产体系。大多数低中档液晶器件的生产已集中在我国和东南亚。我国的液晶工业已有了长足的进步,而我国液晶光子学的科研相对讲要薄弱得多,只有清华等少数几所大学形成了一定的科研体系。工业上的热和科研上的冷已成为一对矛盾。液晶光子学是一门蓬勃发展新学科,远没有定型。几种互相竞争的工作方式中谁为胜者还无法预料,务必不能盲目引进。怎样利用液晶的特点研制适合光子学应用的器件还是一个有待解决的问题。只有科研和生产互相联合与促进,才能掌握液晶的最新发展,占领市场。

(责任编辑 肖庆山)