

可开/关的微棱镜反光膜

王宏¹ 蓝庆东¹ 程建敏¹ 孙飞¹ 陈高庭²

(¹ 浙江省反光材料工程技术研究中心, 浙江 永康 321300; ² 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 可开/关微棱镜反光膜是一种利用调制反射光(闪光)、为增强显示和夜视应用而研发的新型反光膜,具体包括集成电润湿散射、集成和外置电润湿光阀、外置液晶光阀和外置液晶散射等五种可行结构和工作机制的可开关微棱镜反光膜。广泛地比较和讨论了5种技术的特性,以期为此类器件未来的发展提供参考。

关键词 光学器件;角锥;逆反器;可开关微棱镜反光膜;电润湿;光阀;散射;液晶

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.110006

Switchable Retroreflecting Films

Wang Hong¹ Lan Qingdong¹ Cheng Jianmin¹ Sun Fei¹ Chen Gaoting²

(¹ Zhejiang Research Center of Retroreflecting Material Engineering Technology, Yongkang, Zhejiang 321300, China)
(² Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Switchable retroreflecting films are the new type of retroreflector by modulating (flashing) the retroreflected light for enhanced visibility and night vision applications. There are five types of viable constructions and operating mechanisms for switchable retroreflector, including integrated electrowetting scattering, integrated and external electrowetting light valve, external liquid crystal light valve and external liquid crystal scattering. This paper gives broad comparison and discussion about the characteristics of five technologies for further development of switchable retroreflecting films.

Key words optical devices; cube corner; retroreflector; switchable retroreflecting film; electrowetting; light valve; scattering; liquid crystal

OCIS codes 230.2090; 230.3120; 230.3990; 230.4000

1 引言

众所周知,由三个互相正交的平面构成的角锥棱镜是一种典型回归反射的几何光学器件。入射光通过角锥界面折射及多面体全内反射,能够平行地逆向回归光源的基本原理,早在几百年前就被珠宝商用于钻石的切割、打磨抛光,继而加工成多棱角锥多面体,形成外形精美至极、晶莹剔透、熠熠发光的珍贵饰品。随着社会的发展,角锥回归反射的应用遍及人们生活生产实践的各个方面,比如利用角锥反射器制作各类制式干扰伪装器材、精密测距、海上航标、救援避险指示及空间光通信、仪器仪表、遥感测量等不胜枚举^[1-3]。

上述应用中的角锥反射器从外形地貌上说归属于大型刚性类。而20世纪60年代开始研发和生产的柔性(厚度0.15~0.25 mm)微角锥棱镜反光膜^[4-5],可谓是反光器材的重大技术进步。由于反光膜具有大面积的通光孔径,从而在黑暗或光线不足的环境中,当外部光源照射反光膜时,强烈的定向回归反射光使其变成非常醒目的可视目标。此刻反光膜可等效为一具夜间“无源的照明灯光”。这种反光膜已广泛用于交通控制和安全防护指示和显示。据统计由于反光膜的使用,每年交通事故次数下降达30%~40%,减少因交通事故而引发的直接经济损失2000亿美元,挽救近30万人的生命,突显了十分巨大的经济效益和社会效益^[6]。

20世纪90年代,随着平面显示技术的崛起,微棱镜反光膜作为液晶显示器的背光模组中的增亮部件,得到广泛应用^[7]。

诚然,微棱镜反光膜经历了几十年发展,性能和技术都获得了很大的提升。但除了继续提高现有反光膜材料性能和降低制备成本外,研究和开发微棱镜反光膜的新功能仍是人们追逐的目标。值得关注的是新世

收稿日期: 2013-06-25; 收到修改稿日期: 2013-07-10; 网络出版日期: 2013-10-28

作者简介: 王宏(1970—),男,技术总监,主要从事高强度级反光膜、高亮度反光防伪材料等方面的研究。

* 通信联系人。E-mail: gtchen@siom.ac.cn

纪刚开始的这些年,已有众多学者致力于研究一类新型的具有开/关功能的微棱镜反光膜^[8],利用光调制(开/关脉冲闪光)的显示模式,增强显示功能,提升显示信息容量,扩展显示应用范围,开发红外波段的夜视自动安全系统。

为此,本文试图对新型可开/关的微棱镜反光膜的研究进展作一综述。首先介绍可开/关的微棱镜反光膜结构设计的关键技术,其中包括衬底微棱镜反光膜结构及材料的选择、光开/关薄膜技术方案的选择、回归反射光效率的评估等,然后评述5种可开/关的微棱镜反光膜结构的特色、工作机制及其性能,最后对可开/关的微棱镜反光膜的研究水平做一总结,并展示其红外夜视应用前景。

2 可开/关的微棱镜反光膜的关键技术

可开/关的微棱镜反光膜是为了适应夜视特殊应用、扩展回归反光膜可视信息范围、提高大屏幕可视信息容量、增强显示度以及提供交通控制数字化自动化等的需求应运而生的^[7]。因此,可开/关的微棱镜反光膜的性能必须满足人眼响应及便携要求:1)反射光谱的谱宽(半峰全宽,FWHM)大于100 nm;2)开/关时的反光强度对比度(也称光调制消光比)大于10:1,并且反射光绝对亮度远大于周围环境杂散光的亮度;3)开/关速度对应于人眼的响应时间,既不能太快(无法分辨),又不能太慢(刺激不了眼球的关注),开/关周期以数毫秒至百毫秒为宜;4)为便于远距离可视鉴别且无需仔细对准,可开/关反光膜的面积至少应大于100 cm²,而且希望输入角越大愈好;5)开/关驱动电压、功耗双低;6)薄膜材料的柔软性好,能适应各种曲率曲面张贴闪光显示。

事实上可开/关的微棱镜反光膜是电致平面显示技术和光学微棱镜反光显示技术相结合的产物,即是电致光开/关薄膜与微棱镜反光膜材料集成的结果。于是,选择合理的微棱镜反光膜衬底的结构及电致光开关薄膜技术方案和薄膜结构的优化,成为研究和评估实用化可开/关的微棱镜反光膜的关键技术。

2.1 微棱镜反光膜结构选择

现有微棱镜反光膜中最为成熟的商品,要属三角形角锥微棱镜反光膜。其中根据角锥结构和材质的差异可分为图1(a)所示的胶囊型微棱镜反光膜和图1(b)示意的金属化微棱镜反光膜。胶囊型微棱镜反光膜[图1(a)]从上至下的层次结构依次为:表面导光层、角锥阵列反射层、桥接(空气)胶囊层、释放层等。而金属化微棱镜反光膜[图1(b)]采用空腔式、表面金属化(Al膜)的微角锥阵列,由于金属膜(Al膜)的反射率很高(大于90%),显然金属化微棱镜反光膜的回归反射效率(35%)大于胶囊型微棱镜反光膜(20%)^[8]。

另外一种效率更高的正方形角锥棱镜反光膜于2006年被3M公司研发成功^[8],命名为钻石级DG³,它

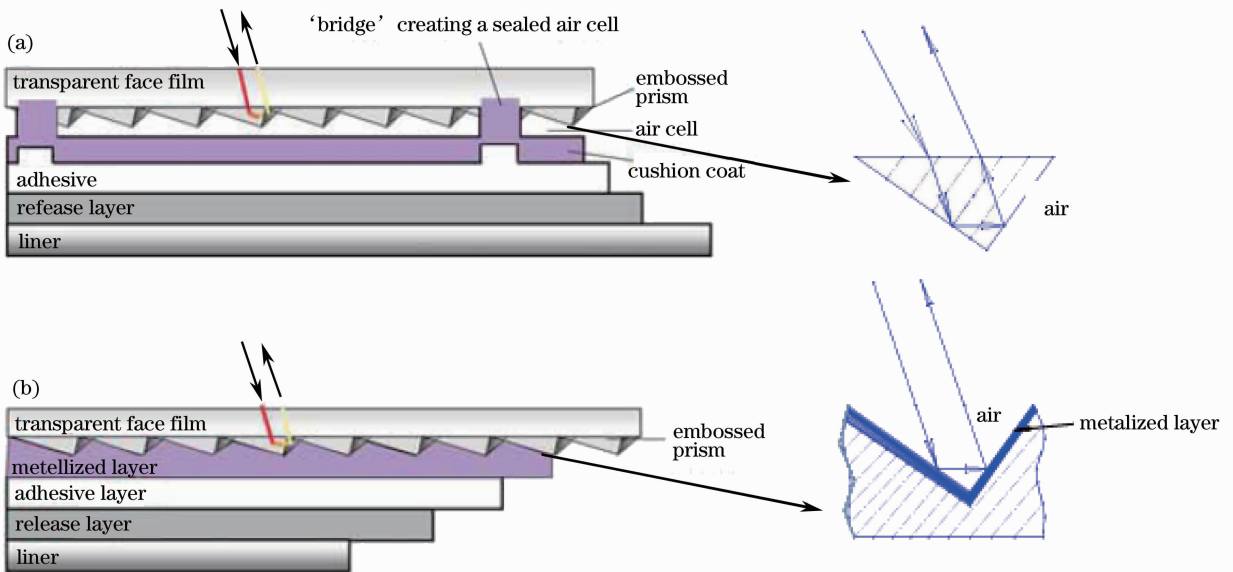


图1 (a) 胶囊型微棱镜反光膜; (b) 金属化微棱镜反光膜

Fig. 1 (a) Encapsulated microprismatic retroreflecting film; (b) metalized microprismatic retroreflecting film

们的效率普遍达到 58%。但是受制备技术复杂、难度大、成本高、价格昂贵等诸多因素制约,目前尚未大量推广应用。

为便于比较,把上述 3 种角锥反光膜的主要性能列于表 1。

表 1 衬底反光膜技术比较

Table 1 Comparison of base retroreflector technologies comparison

	Metallized microprismatic	Encapsulated microprismatic	Full cube
Efficiency / %	35	20	58
Maximum input angle at 30% of maximum reflectivity / (°)	± 45	± 45	± (30~38)
Complexity of manufacturing technology		Moderate	Complicated
Internal switching integration	Yes	No	No

综合上述对微角锥棱镜反光膜主要性能的比较评估,同时考量衬底反光膜能与光开关膜匹配集成的现实性和成本,选择空腔式、金属化三角形角锥棱镜反光膜作为可开/关反光膜的窗口是合适的。下面所介绍的 5 种结构可开/关反光膜的衬底都采用 Reflexite V82 金属化微角锥棱镜反光膜。它的形貌和尺寸如图 2(a)所示。3 个正交三角形反射面的倾角为 54.74° ,最大输入角[图 2(b)]约为 $\pm 45^\circ$ 。为便于制备,三角形角锥边长采用 $800\ \mu\text{m}$ (也用过 $175\ \mu\text{m}$)。此反光膜的响应波长如图 2(c)所示,从可见光扩展到红外光的宽广波段。

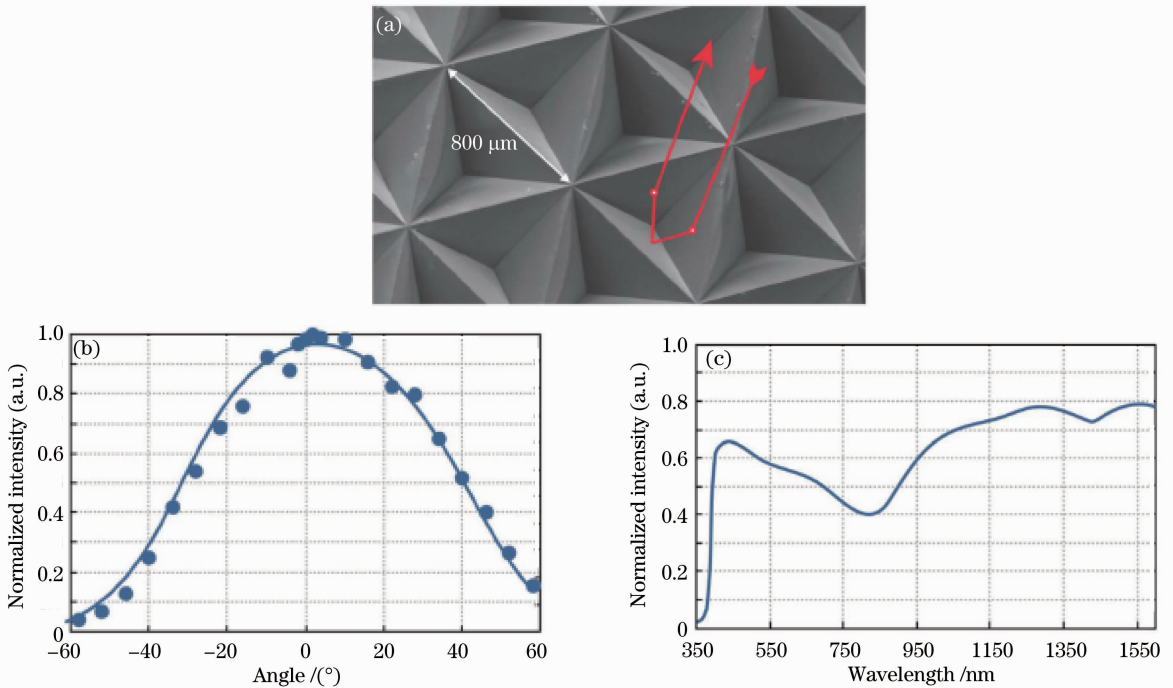


图 2 (a)角锥结构的扫描电镜形貌;(b)反射光强与入射角之变化实测曲线;(c)反射光强与入射光波长(350~1600 nm)变化关系^[8]

Fig. 2 (a) SEM of cube corner structures; (b) retroreflection as a function of input angle as measured; (c) retroreflection versus wavelength from 350 nm to 1600 nm^[8]

2.2 电致光开/关方式的选择

可开/关的反光膜的初期研究,主要工作是解决光开/关显示的技术方案。先前已有文章报道了几种反射光开/关技术^[9],如微电子机械技术或量子阱技术。尽管反射光开关系统显示数据速率高达 45 Mb/s,反射距离长达 16 km^[10],但因开/关速度太快,以致肉眼无法甄别。而另外一些技术如电光显示技术、电变色等技术则因光开关速度过慢(百秒至几十秒)而不被采纳。后来 Philips 开发的电润湿(EW)显示技术^[11]以及通用液晶显示技术的推广应用^[12]带来灵感和启示:通过适当调节它们的光开关速度和改善透射特性,即可实现调制式反光显示。

2.2.1 电润湿

电润湿技术是利用偏置电压改变流体界面的湿润能力,即改变液体与介质的接触角,使液滴发生变形和位移。电润湿接触角 θ_V 可用下式描述:

$$\theta_V = \cos \theta_Y + CV/2\gamma_{Cl}, \quad (1)$$

式中 θ_Y 为 0 电压时的 Young 角, C 为单位疏水性介质表面积的电容(F/m^2), V 为施加的电压, γ_{Cl} 为导电流体(水)和绝缘体(油)之间界面的张力(N/m)。

通常利用导电流体(水)作为加电的一个电极,而另一电极由疏水性绝缘介质(聚合物)薄膜覆盖的透明氧化锡铟(ITO)薄膜提供。当电极接通电源时,相当于薄膜电容充电,在电荷诱导下改变液滴接触角,改变液滴形态和位置,从而改变其对光的透射性能^[13]和反射性能^[14]。电润湿速度(即开/关速度)小于 100 ms,驱动电压与材料性质(C, γ_{Cl})有关,低至 4 V,最高不超过 100 V。

2.2.2 液晶

采用像素矩阵开关方式的液晶显示(LCD)技术和聚合物分散液晶(PDLC)显示技术,已在电视和监控设备中普遍应用^[15-16]。凭借对液晶技术的深入了解、液晶显示技术的快速发展以及价格的不断下降等有利条件,同时利用液晶优良的导光性和红外光谱响应等特点,只要将这些液晶显示器件调节至合适的开关速度,即可优先成为可开/关反光膜实用化的技术方案。

2.3 反光效率的评估

反光效率毫无例外地被公认为评估可开/关反光膜实用性的主要指标和判据。众所周知,光在某个光学系统中传播的效率 $\eta(\%)$ 与组成该系统的各部件介质的透射率 T 和各个有效通光口径 D 有关。从后面介绍的可开关反光膜的具体结构可知,它是由多层薄膜集成组建的,光的透射和反射途径比纯裸反光膜要复杂,但如果把它视为一个微型光学系统,其处理方法仍然简单。可开/关反光膜反射光总效率度量表达式为

$$\eta = T^2 \cdot D^2 \cdot \rho_{re}, \quad (2)$$

式中光往返总透射率表示为 $T^2 = (T_1, T_2, \dots, T_n)^2$, 每一层的透射率 $T_i = 1 - \alpha_i - R_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$), α_i 为每一层材料内部损耗, R_i 为每层相邻界面的菲涅耳反射系数: $R_i \approx (n_1 - n_2 / n_1 + n_2)^2$, n_1, n_2 分别为相邻两层的折射率; D 为有效通光口径(开关层和微棱镜反光层通光口径的乘积); ρ_{re} 为角锥阵列反光层的反射效率,针对本案选用的空腔 Al 膜角锥, $\rho_{re} = 35\%$ 。

3 可“开/关”微棱镜反光膜

迄今已提出了 5 种不同机理的可“开/关”反光膜结构,具有各自的性能和特色。

3.1 电润湿液体棱镜反光膜

电润湿“开/关”反光膜的原理结构如图 3 所示。这里反光膜采用空腔式、表面镀 Al 的角锥阵列。然后在 Al 膜上包覆一层电润湿膜(疏水性绝缘介质膜),并分别向角锥腔内注入适量的油(染色, $n > 1.4$)和水($n = 1.3$),最后用沉积有 ITO 透明电极的聚对苯二甲酸乙二酯(PET)薄膜覆盖密封。有关其他制备信息另有详细报道^[12,17]。结构中角锥表面 Al 膜和顶层的 ITO 膜分别为施加电压的链接电极。当无电压时,则无

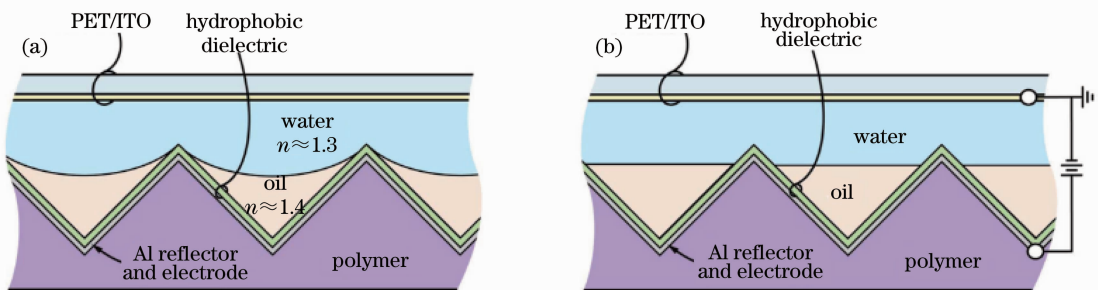


图 3 电润湿棱镜反光膜。(a) 无电压时出现的棱镜散射;(b) 电压偏置时所显示的回归反射/开态^[8]

Fig. 3 Electrowetting lenslet retroreflector. (a) in the scattering state (voltage off) and (b) with voltage provided to enable the retroreflecting/on state^[8]

电润湿,如图 3(a)所示,此刻由于油/水表面张力的差异,致使在每个三角形角锥的腔内部形成弯月形的凹面液体微透镜。众所周知,凹面透镜是一种发散元件,即把入射准直光改变成发散的散射光而被角锥内的染色油液吸收和衰减,等效于角锥窗口不透明[图 4(a)](图中光强度不具可比性,相机灵敏度为获取最佳拍摄效果而针对开/并状态取不同值)相当于反光膜被关闭。如果施加适量的电压(19 V),如图 3(b)所示,在电润湿的作用下,使疏水性绝缘膜上水的接触角达到 125° ,推动水液的微流,改变水油界面由弯月形变成平面,透镜消失,这时呈现常规的回归反射[图 4(b)],即反光膜处于“开”态。如此来回反复控制电压的开和关,实现了反光膜的“闪光”调制显示。这里须说明的一点是:虽然也可进一步增大驱动电压(高于 19 V),利用更剧烈的电润湿作用,又把平的界面改变成上弯的曲面,再次形成凸透镜的方法实现“关”态,但相比“0 电压的关态”既复杂又耗电,不可取。

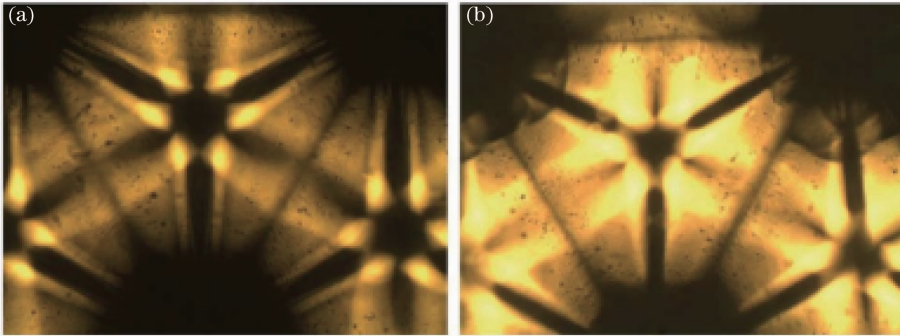


图 4 电润湿棱镜型逆反膜的顶视图像。(a)电压“关”,无光反射;(b)电压开,反射“开”^[8]

Fig. 4 Images of the lenslet retroreflectors with (a) voltage off and retroreflection off, (b) voltage on and retroreflection on^[8]

图 5 给出了实验检测到电润湿棱镜反光膜的回归反射强度随入射角变化关系曲线。可以清晰地看到:1)输入角在 $\pm 30^\circ$ 范围内,其光调制对比度(或消光比)大于 $10:1$;2)开态时,入射角在 $\pm 10^\circ$ 和 $\pm 20^\circ$ 处分别出现谷底和峰巅,推测是反射光因角锥上的疏水性电介质周期性阵列引起相互干涉的结果^[13],但真实的原因尚不清楚。

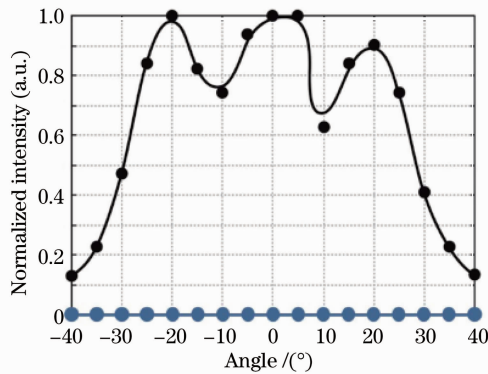


图 5 电润湿棱镜逆反膜开/关时回归反射光强随输入角变化关系,其中圆点为实验数据^[8]

Fig. 5 Retroreflection as a function of input angle for integrated electrowetting lenses. Points are experimental data^[8]

电润湿棱镜反光膜的特点有:1)工作电压比常用的裸电润湿棱镜反光膜低^[12];2)水的接触面积只有总面积的 48%,降低开态能耗,每次仅 1.8 mJ/m^2 ;3)水液导光损耗小,回归反射总效率高,可达 27%;4)开关速度快,小于 0.1 ms ;5)可视光谱带宽广;6)入射角宽,逆反光强均匀。

3.2 外置电润湿光阀反光膜

电润湿光阀早在 2003 年已见报道^[14,18-19],无论透射或反射模式工作都具有很高的光学效率,而且很快就会实用化。因此,把电润湿光阀移植到微角锥棱镜反光膜上,构成新型外置式电润湿光阀反光膜,实现调制闪光显示是一种很好的方案。同时这种光阀反射膜制备十分简便。从图 6 可知,只要用环氧胶把大像素阵列的电润湿光阀与微角锥棱镜反光膜胶合于一体即成。至于电润湿光阀制备详细流程可参见文献^[20]。

图 6(a)给出了电润湿光阀 0 电压时内部界面状态。此刻掺有 10% (质量分数) 黑色染料的油形成一层薄膜完全覆盖整个疏水绝缘介质表面,吸收外部入射的光,光阀的透明性差,致使角锥反射膜无光反射,如图 7(a)所示,只见表面暗灰的格栅图像,相当于微棱镜反光膜处于关闭状态。当亲水性像素格栅施加 15 V 左右的电压时,垂向电磁力克服油膜的表面张力,驱使油膜破裂,并即刻被上层的水液乘隙流入与疏水介质膜接触。与此同时,横向电磁力和水流体机械力共同做功促进油滴收缩,并移动到像素格栅的一端[图 7(b)],从而打开通光窗口,启用正常的逆反射功能[图 6(b)]。如果再次断电,即吸收光的油膜会在 10 ms 内迅速覆盖疏水性绝缘介质膜表面,恢复“关”态。如此通过不同速度多次反复,以承载告知的信息,则人们就可从对应速率闪光显示中获取相应的指示。

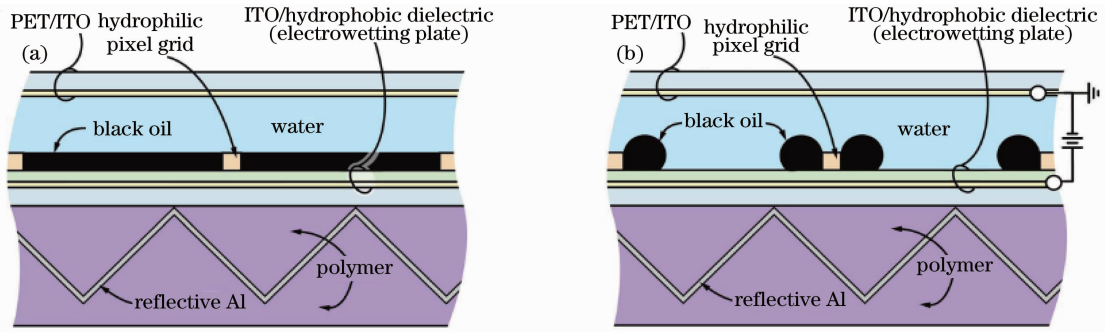


图 6 外置电润湿光阀逆反射膜。(a)电压关时,光处吸收态逆反关;(b)电压开,光逆反开通^[8]

Fig. 6 External electrowetting light valve retroreflector in the (a) voltage off state and light absorbing state, (b) voltage on state and retroreflecting state^[8]

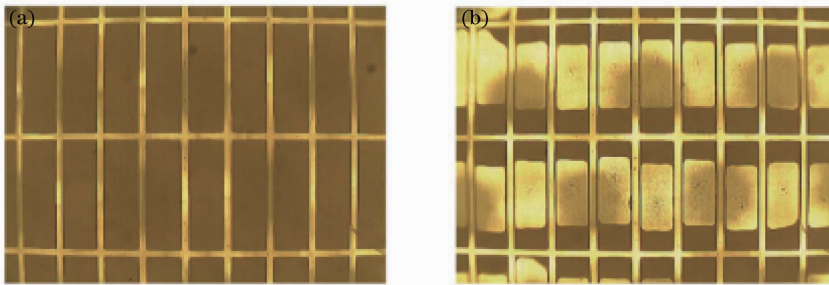


图 7 外置电润湿光阀逆反射膜正视图像。(a)0 电压状态;(b)施加电压状态^[8]

Fig. 7 Collinear images of external electrowetting light valve retroreflector in the (a) voltage off state and (b) voltage on state^[8]

图 8 给出了外置电润湿光阀反光膜分别在开态/关态时回归反射光强随输入角变化的实验结果。可明显看到开/关反射光强对比度(消光比)很低,即使入射角在 $\pm 15^\circ$ 的小范围内对比度也只有 4:1。这要归因

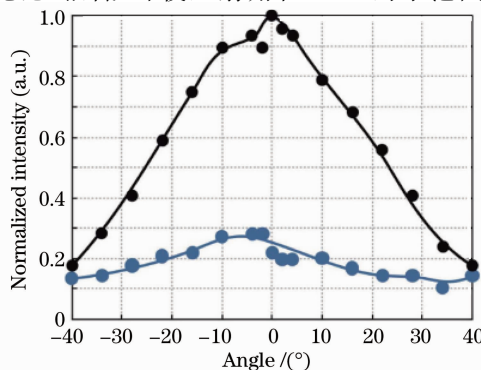


图 8 根据开态/关态实验数据描绘出的外置电润湿光阀逆反射器的逆反射强度依随入射角改变的关系曲线,圆点为实验检测数据^[8]

Fig. 8 Retroreflection as a function of input angle for the external electrowetting light valve retroreflector. Points are experimental data, and trend curves are for guidance^[8]

于“关态”时光阀中亲水性像素格栅介质材料的透明性[图 7(a)]引起部分光的泄漏。同时,由于电润湿光阀结构层次较多,光损耗大,透射率低(约 83.3%),有效通光孔径 D^2 仅为 49%,这些因素制约了外置电润湿光阀反光膜的反光效率, $\eta=12\%$,但也有它的优点,其开态电压和功耗都比电润湿棱镜反光膜要低,分别为 15 V 和每次 7 mJ/m^2 左右。

3.3 集成电润湿光阀反光膜

如图 9 所示,把电润湿光阀与微棱镜反光膜直接集成于一体,明显地比外置光阀优越了许多:1)利用角锥表面的铝膜作为光阀的一个电极,省去了外置式光阀中的 ITO 下电极,使制品厚度更薄,更加柔软;2)上电极 PET/ITO 薄膜下面的疏水性绝缘介质膜恰好位于角锥底面三条边脊的上方,形成三角形阵列像素格栅,替代外置光阀中的附加的长形像素格栅,既杜绝了泄漏的途径,提高调制消光比,又保持了电润湿光阀开启工作电压低、功耗小的优点。值得指出的是:集成光阀内导电水溶液和绝缘油膜的位置布局恰与外置光阀相反,而且光阀结构层次大为简化,减少了损耗,预期有更高的回归反光效率。

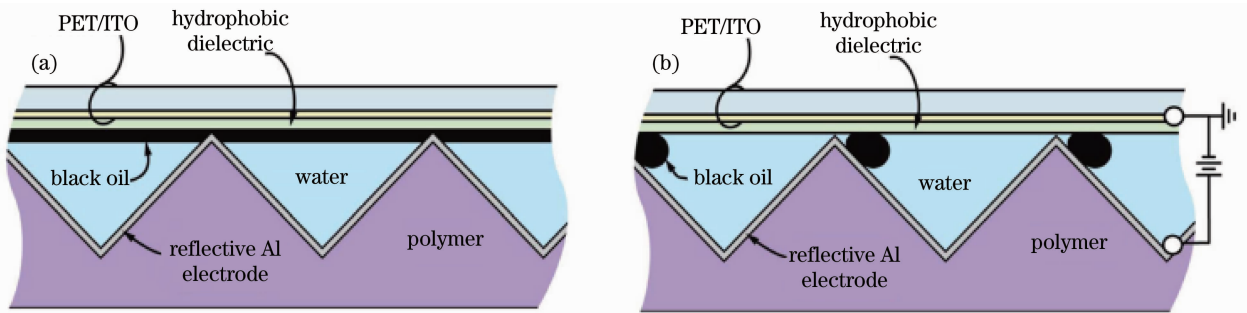


图 9 集成化电润湿光阀回归反射膜。(a)电压关,光阀吸收态;(b)电压开,回归反射开启^[8]

Fig. 9 Integrated electrowetting light valve. (a) Voltage off and light absorbing state; (b) voltage on and retroreflecting state^[8]

图 9 形象地描述了集成电润湿光阀反光膜的工作过程。图 9(a)显示无电压时光阀处于关态的形貌。这时染黑的油膜均匀覆盖整个角锥通光表面,仿佛通光窗口挂上黑窗帘。如果设计是采用染黑油来吸收可见光,那么关态时,如图 10(a)所示,无法看清反光膜的表面图像。由此,通过改变油的吸收光谱,就可实现闪光彩色图像的显示。当光阀打开电压时,光阀中的油和水最终定格在图 9(b)所示的状态。初始时,电荷先在角锥表面 Al 膜电极的脊顶附近积聚,产生的电磁力推动脊顶附近的水溶液去润湿疏水性绝缘介质表面,被挤压出来的分离油膜受表面张力的牵引而收缩成球,并快速迁移到角锥底面的的某个角落,如图 9(b)所示的黑滴,从而油滴之间出现大面积的透明间隙,打开光的通道,清晰地看到图 10(b)所示的表面图像,重现角锥反光膜的回归反射功能。一旦关断电压,光阀立即恢复到关态。依次反复,就能很方便地实现反射光的调制显示。

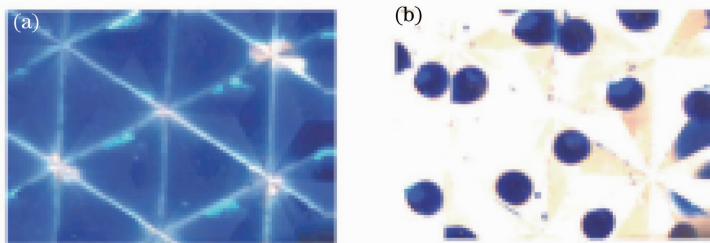


图 10 集成电润湿光阀回归反射膜正视图像。(a)关态;(b)开态^[8]

Fig. 10 Collinear images of the integrated electrowetting light valve retroreflector in its (a) off state and (b) on state^[8]

从集成电润湿光阀反光膜的结构和工作过程可以推断,该反光膜具有优良的光学性能:1)由于光阀关态时,无像素格栅的光泄漏,而开通时染色油滴都保持并停留在角锥无回归反射的死角,因此能充分利用角锥的通光有效孔径(单次 $D=65\%$),回归反射光强度高,光调制消光比大于 10:1;2)结构的简化可减少层次损耗、提高透射率至 $T=89.8\%$,理论计算总体反光效率可达到 $\eta=27\%$;3)保持低电压和低功耗工作。

3.4 通用液晶光阀反光膜

液晶显示中的调制机制用来开发可开/关微棱镜反光膜是一个不错的方案。况且这种可开/关微棱镜反

光膜的制备尤为简单方便。正如图 11 所示,只要把通用液晶光阀粘贴在角锥阵列薄膜表面即成。光阀是采用标准扭曲向列型液晶显示(TNLCD)显示薄膜,有关它的详细结构和工作原理已有很多文献报道^[21-22]。

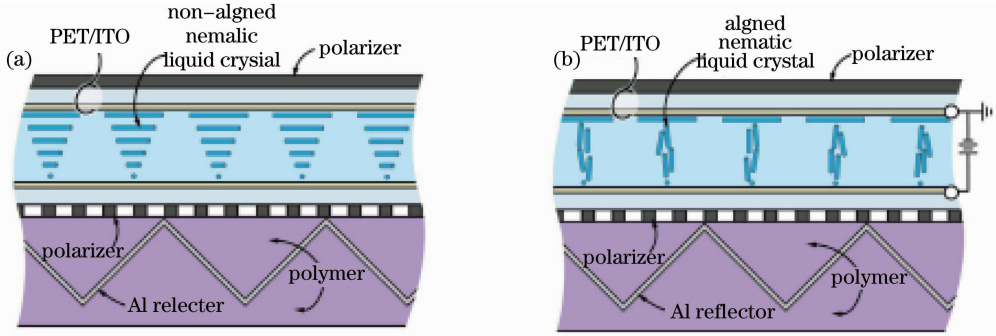


图 11 液晶光阀逆反器。(a) 0 电压,开态;(b)开电压,光阀关态^[8]

Fig. 11 Liquid crystal light valve retroreflector in the (a) retroreflecting state with no voltage applied and (b) light absorbing state with voltage applied^[8]

图 11(a)描述了无电压偏置时液晶光阀开启的工作状态。此时光阀内部的扭曲向列型液晶分子沿平面排列,并把入射起偏的偏振光旋转 90° ,从而透过检偏薄膜入射角锥阵列,然后沿逆向路径回归反射,反射光照亮表面,显现如图 12(a)所示的光亮图像。当施加电压(5 V)时,液晶分子沿磁场方向排列,如图 11(b)所示,因无法旋转起偏后的入射偏振光,从而不能通过正交的检偏薄膜,光阀关闭,反光膜无光反射可言,出现了如 12(b)所示的漆黑一片的表面图像。须提醒的是液晶光阀电致“关/开”的工作模式与前述电润湿光阀的电致“开/关”工作模式恰好相反。

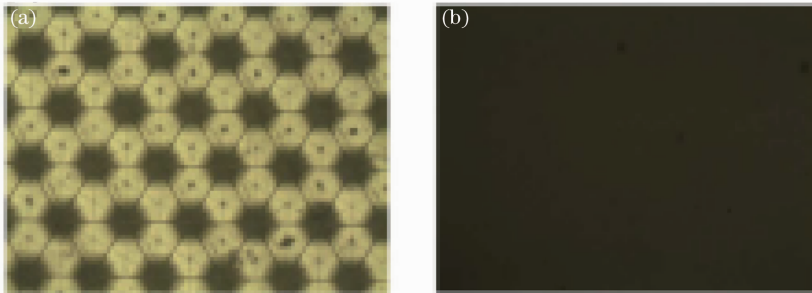


图 12 液晶光阀逆反膜的正视图像。(a) 0 电压时;(b)有电压时^[8]

Fig. 12 Collinear images of liquid crystal light valve retroreflector in the (a) voltage off and (b) voltage on states^[8]

实验结果表明,液晶光阀的工作电压很低,小于等于 5 V;每次开关功耗特小,约为 2 mJ/m^2 。但是由于液晶光阀中采用多层聚合物(起偏、检偏)偏振膜,其材料吸收损耗大,透射率低, $T=38\%$,加之粘结界损耗(单次透射率 $T=35.2\%$),导致反光总效率低下, $\eta=4\%$ 。但从图 13 显示的液晶光阀“开/关”时反射光强与

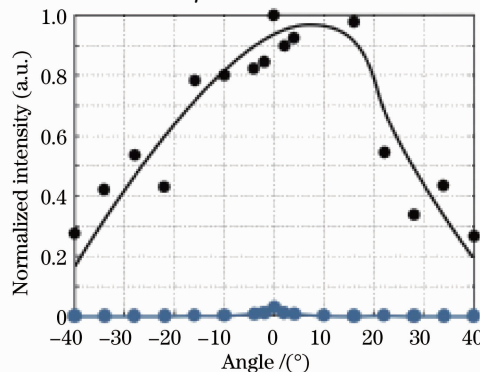


图 13 TNLCD 微棱镜逆反器反射强度与入射角的关系,曲线是根据开/关时实验数据描绘所得

Fig. 13 Retroreflection as a function of input angle for the TNLCD retroreflector. Points are experimental data

入射角的关系曲线可以看到 $\pm 35^\circ$ 范围内调制光强对比度大于 $100:1$,是已叙述的几个方案中最优的,可惜绝对亮度偏低。

3.5 液晶散射反光膜

当聚合物中液晶微滴矩阵随机指向时,因液晶微滴的双折射特性引起光散射的机制可用于反光膜的前置电致光闸。液晶散射微棱镜反光膜的组装十分简便。如图 14 所示,只需把 PDLC 薄膜粘贴在微棱镜反光膜的表面即成。有关 PDLC 光闸的调制工作机理、制备过程、应用等详细资料可参阅其他专著^[23-27]。当没有电压偏置时,从图 14(a)看到,那些离散悬浮停留在聚合物薄膜内的液晶微滴,其取向随机分布,从而在 PDLC 薄膜内出现了随机折射率差异,引起入射光的严重散射损耗,使 PDLC 薄膜变得不透明,相当于微角锥棱镜反光膜的窗口被关闭。此时在器件表面看到的是一片漆黑的图像[图 15(a)]。而当 PDLC 光闸施加特定的电压时,如图 14(b)所示,在电场作用下,所有的液晶微滴的取向都对准垂直表面的电场方向,并与周围的聚合物折射率匹配,PDLC 薄膜变成透明,可实现正常的逆向回归反射,这时可看到明亮清晰的器件表面图像[图 15(b)]。只要按上述周期性操作电压“开与关”,就可实现反射光强的调制显示。

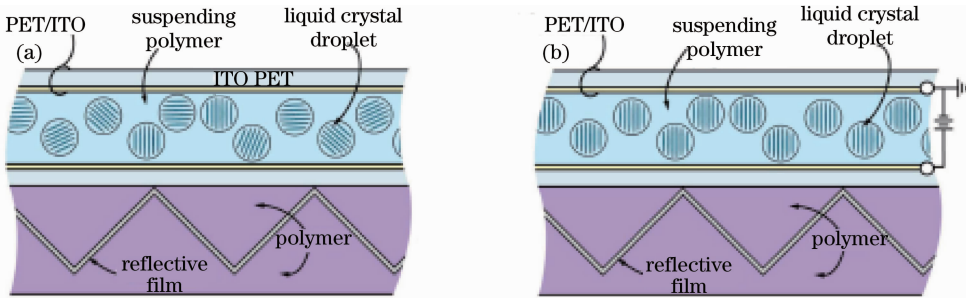


图 14 PDLC 光闸逆反膜的调制。(a) 0 电压,关态; (b) 开电压,开态^[8]

Fig. 14 PDLC retroreflector in the (a) voltage off and scattering states and (b) voltage on and retroreflecting states

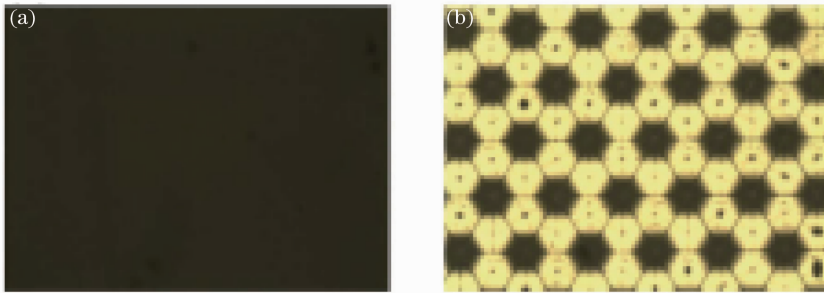


图 15 PDLC 光闸微棱镜逆反膜的正视图像。(a) 0 电压,关态; (b) PDLC 施加电压,开态^[8]

Fig. 15 Collinear images of the PDLC scattering retroreflector in its (a) voltage off state and (b) voltage on state^[8]

实验检测了液晶散射反光膜回归反射光的调制特性及其他性能。图 16 给出了反射光强与入射角的变化

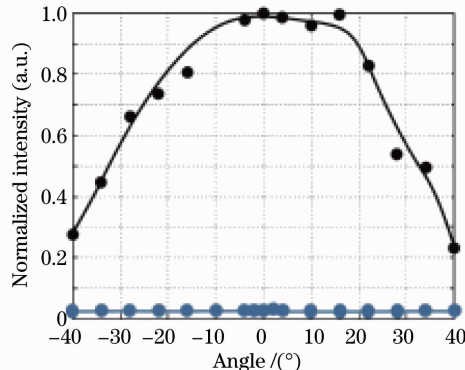


图 16 PDLC 逆反射强度随入射角变化关系^[8]

Fig. 16 Retroreflection as a function of input angle for PDLC retroreflector^[8]

化关系。可以看到输入角范围比较宽, $\theta_{30\%} = \pm 38^\circ$, 在此宽角区域内开/关光强对比度(或光调制消光比)大于 10:1。光阀的开启电压为 5 V, 功耗每次为 1.3 mJ/m², 开关时间小于 2 ms, 响应光谱覆盖可见光至红外的很宽波段。特别指出, 由于液晶散射反光膜的结构层次比较少, 且材质透光性好, 因此, 器件单次透射率高达 85%。加之调制时光闸透光有效面积无损失, 仍为 100%, 逆反射总效率达到 25%, 与裸微棱镜反光膜的反光效率差不多。

综观五种结构的可开/关微棱镜反光膜, 显现不同的品质和各自特色。为了比较的方便, 把它们的主要性能罗列于表 2。

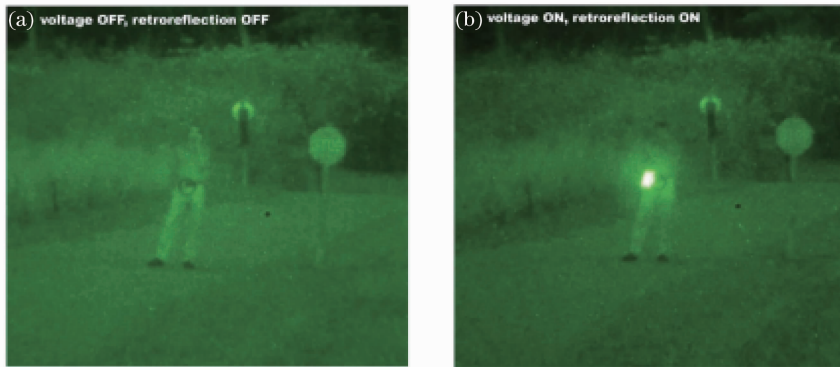
表 2 五种可开/关反光膜主要品质的比较

Table 2 Comparison of key attributes of the five switchable retroreflectors

	EW lenslet	External EW light valve	Integrated EW light valve	TNLCD	PDLC
Efficiency η / %	27	12	23	4	25
Maximun input angle / (°)	± 35	± 30		± 35	± 40
Contrast	$>10:1$	$>5:1$		$>100:1$	40:1
Operating voltage / V	19	10	10	<5	5
Energy per switch / (mJ/m ²)	1.8	7	9.5	1.2	1.3

4 演示实验

选择性能较佳的可开/关 PDLC 光阀反光膜开展了全天候现场实验。薄膜样品面积为 5 cm×15 cm; 样品的柔软性很好, 可弯曲半径 5 cm 的曲面, 粘贴在人体上。在夜晚使用 AN/PVS14 型夜视仪进行观察。夜视仪中光源为红外半导体激光器(850 nm, 28 mW), 发射角 10 mrad, 在距人体 200 m 的位置观看, PDLC 光阀的开/关电源由对方控制, 图 17(a)、(b)分别为样品关态和开态时的图像。白天, 采用功率为 30 mW、波长为 532 nm 的绿光激光器作为光源, 在 400 m 处直接肉眼观察, 看到非常醒目的闪光图像。

图 17 可开/关反光膜夜视现场演示。(a)电压关, 样品无显示; (b)电压开, 样品显示^[8]Fig. 17 Field demonstration of a switchable retroreflector using night vision through binoculars at a range of 200 m with (a) no voltage applied/tag off and (b) voltage applied/tag on^[8]

5 结 论

上述五种不同工作机理和结构的可开/关微棱镜反光膜, 显现不同的性能和各自特色。从表 2 通过比较和评估可得下列结论: 1) 按反光效率高和开关速度快慢等总体性能优劣排序, 电润湿液体棱镜反光膜最为先进, 紧跟其后的是 PDLC 光阀反光膜和集成电润湿光阀反光膜, 它们的反光效率比裸反光膜稍低一些, 显示出实用性。2) 电润湿液体棱镜反光膜具有很高的逆反光调制速度(快速开/关), 对应用是十分有利的, 既可承载更多的信息, 而且通过接收锁相放大反光信号, 可提供更多的用途。3) PDLC 光阀微角锥棱镜反光膜除了效率和开关速度以外, 其他包括响应光谱宽度、最大入射角、调制消光比、工作电压及每次开关功耗等性能, 都胜过电润湿液体棱镜反光膜。同时基于 PDLC 光阀制备技术成熟和材料成本低廉等综合考量, 可以预言, PDLC 光阀微棱镜反光膜是最有条件优先实现商业化的产品。与此同时, 进一步改善 PDLC 薄膜的温度特性, 把工作温

度可扩展到 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[28]。PDLC薄膜采用PET为衬底,具有优良的密封性和电的绝缘性,确保PDLC光阀微棱镜反光膜能经受雨天、沙尘等恶劣环境、全天候工作。PDLC光阀反光膜或电润湿液体棱镜反光膜是开发新兴夜视自动安全系统特殊应用的优选材料,技术方案可行,展示美好的产业前景。

参 考 文 献

- 1 Lixia Zhou, Joseph M Kahn, Kristofer S J Pister. Corne-cube retroreflectors based on structure-assisted assembly for free-space optical communication [J]. *J Microelectromechanical System*, 2003, 12(3): 233–242.
- 2 B E Hinse. Optical truss retroreflector modeling for picometer laser metrology [C]. *SPIE*, 1993, 1947: 198–208.
- 3 R A Chipman, J Shamir, H J Caulfield, *et al.*. Wavefront correcting properties of corner-cube arrays [J]. *Appl Opt*, 1988, 27(15): 3203–3209.
- 4 H D Eckhardt. Simple model of corner reflector phenomena [J]. *Appl Opt*, 1971, 10(11): 1559–1566.
- 5 W P Rowland. Retroreflective Material [P]. US Patent 3684348, 1972-08-15.
- 6 Dong Huijun, Zhao Yang, Li Xiaoping, *et al.*. Elementary introduction to the current situation of retroreflective materials in China and the perspective of development trend [J]. *China Safety Science Journal*, 2004, 14(2): 71–75.
董会君, 赵 阳, 李晓平, 等. 浅谈我国逆反射材料现状及其发展趋势 [J]. *中国安全科学学报*, 2004, 14(2): 71–75.
- 7 Dennis Vanderwerf. *Applied Prismatic and Reflective Optics* [M]. Bellingham: SPIE Press, 2010. 221.
- 8 P schultz, B Cumby, J Heikenfeld. Investigation of five types of switchable retroreflector films for enhanced visible and infrared conspicuity applications [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(17): 3744–3754.
- 9 J Heikenfeld, P Drzaic, J S Yeo, *et al.*. A critical review of the present and future prospects for electronic paper [J]. *J Soc Inf Disp*, 2011, 19(2): 129–156.
- 10 M Plett, W S Rabinovich, R Mahon, *et al.*. Free-space optical communication link across 16 kilometers over the Chesapeake Bay to a modulated retroreflector array [J]. *Opt Eng*, 2008, 47(4): 045001.
- 11 F Mugele, J C Baret. Electrowetting from basics to applications [J]. *J Phys Condens Matter*, 2005, 17(28): R705–R774.
- 12 M K Kilaru, B Cumby, J Heikenfeld. Advanced characterization of electrowetting retroreflectors [J]. *Opt Express*, 2009, 17(20): 17563–17569.
- 13 S Kuiper, B H W Hendriks. Variable-focus liquid lens for miniature cameras [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 85(7): 1128–1130.
- 14 R A Hayes, B J Feenstra. Video-speed electronic paper based on electrowetting [J]. *Nature*, 2003, 425(6956): 383–385.
- 15 P G De Gennes, J Prost. *The Physics of Liquid Crystals* [M]. Oxford: Oxford University Press, 1995. 597.
- 16 V G Chigrinov. *Liquid Crystal Devices: Physics and Applications* [M]. Boston: Artech House, 1999. 366.
- 17 M K Kilaru, B Cumby, J Heikenfeld. Electrowetting retroreflectors: scalable and wide-spectrum modulation between corner cube and scattering reflection [J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 94(4): 041108.
- 18 B Sun, J Heikenfeld. Observation and optical implication of oil dewetting patterns in electrowetting displays [J]. *J Micromech Microeng*, 2008, 18(2): 025027.
- 19 A Schultz, J Heikenfeld, H Kang, *et al.*. 1000:1 contrast ratio transmissive electrowetting displays [J]. *J Disp Technol*, 2011, 7(11): 583–585.
- 20 K Zhou, J Heikenfelde, K A Dean, *et al.*. A full description of a simple and scalable fabrication process for electrowetting displays [J]. *J Micromech Microeng*, 2009, 19(6): 065029.
- 21 J Fergason. *Display Devices Utilizing Liquid Crystal Light Modulation* [P]. US Patent 3731986, 1973-05-08.
- 22 M Gu. *The World of Liquid Crystal Displays* [OL]. <http://www.personal.kent.edu/~mgu/LCD/home.htm>.
- 23 P S Drzaic. Polymer dispersed nematic liquid crystal for large area displays and light valves [J]. *J Appl Phys*, 1986, 60(6): 2142–2148.
- 24 J W Doane, A Golemme, J L West, *et al.*. Polymer dispersed liquid crystals for display application [J]. *Mol Cryst Liq*, 1988, 165(1): 511–532.
- 25 G Spruce, R D Pringle. Polymer dispersed liquid crystal (PDLC) films [J]. *J Electron Commun Eng*, 1982, 4(2): 91–100.
- 26 J L West. Extended Temperature Range Polymer Dispersed Liquid Crystal Light Shutters [P]. US Patent 5004323, 1991-04-02.
- 27 N R Smith, D C Abeyinghe, J W Haus, *et al.*. Agile wide-angle beam steering with electrowetting micropisms [J]. *Opt Express*, 2006, 14(14): 6557–6563.
- 28 M Schadt. Voltage-dependent optical activity of a twisted nematic liquid crystal [J]. *Appl Phys Lett*, 1971, 18(4): 127–128.