doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2015.04.002

液晶显示屏防眩光结构的研究现状与展望 *

冯俊元，万珍平，汤 勇
（华南理工大学 机械与汽车工程学院，广州 510640）

摘 要： 液晶显示屏表面的眩光现象对使用者的视力健康有极大的隐患，而防眩光结构是消除屏幕眩光的主要手段。按照宏观的结构特征进行分类，列举介绍了 4 种防眩光结构：广泛应用的防眩光结构包括表面粗化结构和纳米光学颗粒散布结构，常用于减反射领域的光干涉多层膜复合结构和三维微纳结构。并对这 4 种结构的原理、国内外研究现状和未来发展趋势都进行了详尽的描述。分析表明：直接在屏幕玻璃上成型防眩光结构的方法、新屏幕材料防眩光结构的加工方法以及对各种结构实现防眩光原理的探究，将是未来的研究重点。

关键词： 液晶显示屏；防眩光；增透减反射

中图分类号： TN312.8 **文献标志码：** A **文章编号：** 1007-9289(2015)04-0014-12

Status and Prospect on Anti-glare Structure of Liquid Crystal Display Screen

FENG Jun-yuan, WAN Zhen-ping, TANG Yong
(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

Abstract: Glare does harm to vision health of liquid crystal display (LCD) screens users. Anti-glare coating is an effective way of reducing glare on computer screens. Anti-glare structures like surface roughened structure and structure with nanoparticles have been widely used. Aside from traditional anti-glare structure, the bio-mimetic nano structure and the optical interference multicoat-stack structure that are widely used in LED and solar cells can also reduce the specular reflection on the screen. A detailed introduction to four anti-glare structures, as well as their research status, disadvantagements, mechanisms, and trends in future development is made. According to the analysis of the trend in anti-glare technology, the future studies will focus on forming structures on glass surface directly, forming anti-glare structure on new screen materials and the study on the anti-glare mechanism.

Keywords: liquid crystal display (LCD) screen; anti-glare; anti-reflection

0 引 言

液晶显示(Liquid crystal display, LCD)技术具有电压低、功耗微、平板化等特点，在过去十多年里，与微电子技术、光学补偿技术相结合，快速发展并成为当今屏幕显示领域的主流技术。

但在强光源环境下使用时，大多数液晶显示屏都存在眩光问题。眩光是指导致视觉障碍的强反射光，LCD 屏幕表面的镜面反射是眩光的主要成因。随着信息技术的发展，个人电脑、平板电脑及手机等设备的普及，屏幕使用频率大大增加，长时间受眩光现象影响，使用者视力健康容易受损。在一些特殊情况，如当战斗机在高空飞行时，太阳光强度很大，机载 LCD 显示器表面若形成强眩光效应，会导致飞行员短暂失明。因此防眩光技术的研究对于很多领域都有极其重要的意义。

目前，防眩光技术的实现，大多是通过制备不同的表面结构增加表面漫反射率或透过率。

收稿日期： 2015-03-09；**修回日期：** 2015-06-16；**基金项目：** * 国家自然科学基金面上项目(51275180)

通讯作者： 冯俊元(1993—)，男(汉)，博士生；**研究方向：** 表面功能结构的先进制造；**Tel：** (020) 8711 0684；**E-mail：** beenoera@126.com

网络出版日期： 2015-06-23 16：56；**网络出版地址：** http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150623.1656.003.html

引文格式： 冯俊元，万珍平，汤勇. 液晶显示屏防眩光结构的研究现状与展望 [J]. 中国表面工程，2015，28(4)：14-25. Feng J Y, Wan Z P, Tang Y. Status and prospect on anti-glare structure of liquid crystal display screen [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(4): 14-25.

而随着原理的一步步探明，国内外防眩光结构方面的研究正朝着外形更精细、制备更简单和复合结构的方向发展。

文中对防眩光结构进行了分类介绍，详细论述了防眩光结构的研究现状，并分析了其未来的发展趋势。

1　眩光现象及防眩光结构简介

眩光是指在强光源照射下，物体表面形成强烈镜面反射对人的视觉系统造成干扰乃至导致短暂失明的现象。根据眩光对于人眼干扰程度的不同，研究人员将其分成 3 类：适应性眩光（Adaptation glare）、不适性眩光（Discomfort glare）和失能性眩光（Disability glare）[1]。其中失能性眩光会导致短暂失明，在车辆驾驶等与安全相关的场合，如果发生失能性眩光现象，会产生严重后果，因此研究人员对相关方面展开了广泛的研究。适应性眩光现象也是为人熟知的现象之一，由于人眼在光强急剧变化的情况下，需要一定的调整时间，而在调整过程中，视力会短暂下降。比如在夜晚驾车时，如果对面的车辆在两车交汇时打开远光灯，驾驶者会自觉的眯起眼睛希望适应突如其来的强光照射，并且短暂时间内看不清路面状况，这就是适应性眩光现象。

这两种眩光强度很大，但时间短，并不会对眼睛造成长时间的影响。而时常发生且危害较小的不适性眩光，并没有引起人们足够的重视。不适性眩光强度不大，对于视觉的干扰很小，但是在一些场合中，如教室内黑板、办公场所的电脑屏幕等，人们受眩光效应影响的时间较长时，使用者经常会有眼镜不适、头疼等症状，并且会有注意力无法集中和工作效率低下等问题[2-4]。Huang [5] 等人在研究中邀请了 56 名试验者进行识别试验，在试验中要求被试者在偶尔眩光干扰的情况下辨别箭头方向是否有发生变化，结果无眩光干扰组的辨识度明显高于有眩光干扰组的。说明眩光对于人注意力的集中有一定的干扰作用。

眩光现象发生的场合很多，常见的有电视、电脑及手机屏幕，大楼的玻璃外墙，商场的玻璃展示柜等。如今信息技术飞速发展，手机屏幕、电脑 LCD 屏幕的使用越来越频繁，其表面的眩光效应更应该得到及时解决。

眩光现象的解决办法有很多，主要是依靠各式各样的表面结构来实现的。如最常见的磨砂贴膜可以有效的降低电脑 LCD 屏幕的镜面反射，降低眩光效应。从原理上讲，磨砂膜利用的是表面粗化结构的漫反射特性，可以有效的降低镜面反射的强度；同样具有将镜面反射转变为漫反射的纳米光学颗粒分散结构，光学颗粒表面的无定向反射让同一角度入射的光线向不同方向散射出去。

另一方面，人们也可以借助发光二极管（Light-emitting diode，LED）技术、光伏产业中研究甚多的减反射结构来帮助实现防眩光。减反射技术所用的多重复合薄膜结构和三维微纳结构，其渐变折射率能有效减少表面反射，增加光线透过率，能减少镜面反射，削弱眩光现象；同时保证了光线的透过率和显示的清晰度，是更为理想的技术，也是未来发展的重要方向。

2　防眩光结构的研究现状

2.1　微观表面粗化结构

眩光效应的成因是屏幕表面的镜面反射，因此，防止眩光就是要将 LCD 屏幕表面的镜面反射削弱，其中最简便的方法就是利用粗化结构将镜面反射转化为漫反射。图 1 为光滑玻璃表面及微观粗化结构表面的反射。由图 1 可知：随着表面粗糙度的上升，表面的镜面反射很大部分转变为漫反射，眩光效应得以减弱。

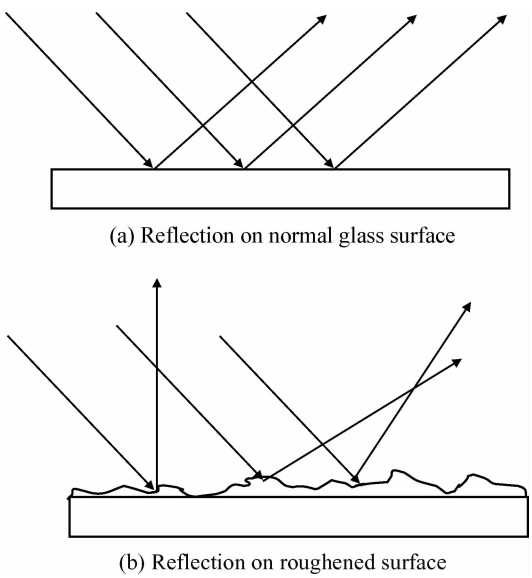


图 1　光滑玻璃表面及微观粗化结构表面反射的比较

Fig. 1　Comparison of the reflection on the normal glass surface and roughened surface

增加液晶玻璃表面粗糙度的方法有很多，酸蚀是最简单的方法之一。王海风[6]等人使用硫酸和氟化物的混合溶液对玻璃表面进行化学腐蚀，制备如图 2 所示的蜂窝状粗化结构，并研究了不同酸蚀工艺对于玻璃表面防眩光性能的影响，结论是将玻璃表面在 20 ℃下侵蚀 10 min，表面结构的防眩光性能最佳。韩伟军[7]等人进行了类似的试验，得出类似的最佳工艺参数，并进一步研究台阶式表面对光反射类型的影响，试图通过光程差的不同解释腐蚀后表面镜面反射向漫反射转变的原因；另外还提出酸蚀所得到的蜂窝状结构具有一定的捕光能力，有利于降低玻璃表面反射。

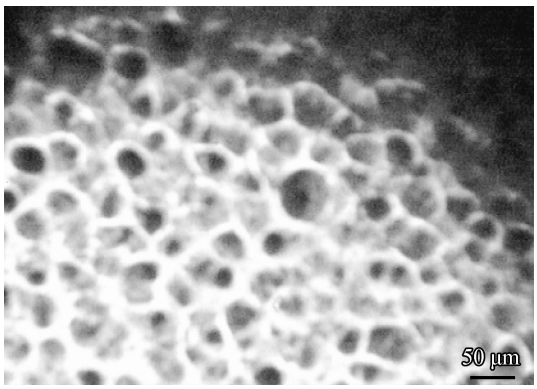


图 2 酸蚀玻璃表面的蜂巢结构[6]

Fig. 2 Honeycomb structure on the etched glass surface[6]

在一些化学组成比较特殊的玻璃表面，酸蚀的过程具有自停止性，可以利用此性质制备形状规则的表面结构。罗春炼[8]介绍了一种向玻璃表面喷吹酸液进行蚀刻的方法，将酸液加热到一定温度，再经加压罐，将酸液用压缩空气喷射到玻璃制品平面上，再用 40 ℃的热水冲洗残留酸液。如图 3 所示，该工艺下酸液腐蚀玻璃表层，生成了小颗粒的难溶物晶体。覆盖于玻璃表面的晶体可以抵挡氢氟酸进一步的侵蚀，而裸露的玻璃则继续被氢氟酸侵蚀，从而形成侵蚀程度不同、凹凸不平的表面结构，能使入射光线以漫反射形式离开，得到无光泽的玻璃表面。研究还表明：除了酸蚀法外，喷砂法、磨砂法和喷吹法等物理加工方法也可以通过调整加工参数控制无光泽毛面的表面粗糙度。这些方法原理相似，加工所得的结构属于微米级别，防眩光效果也差不多。表面粗化结构的加工方法和原理都很简单，成本低廉，适合于大面积大批量生产。

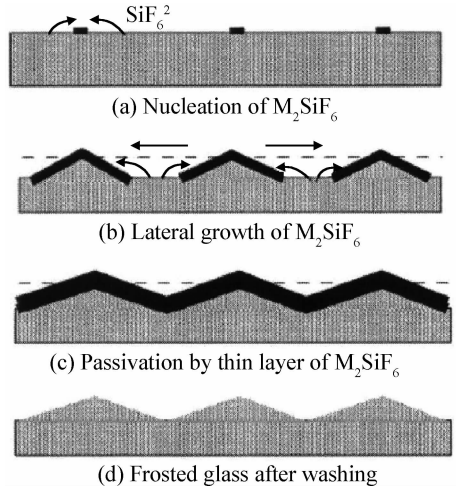


图 3 酸蚀玻璃表面凹凸结构的形成原理示意图[8]

Fig. 3 Schematic diagram of the forming principle for the concave-convex structure on etched glass surface[8]

酸蚀法使用的氢氟酸和硫酸难以处理，危害人体健康和环境；另外，酸蚀法制备的表面微结构不规则，蚀刻过程的工艺参数控制困难，防眩光效果一般，且对表面的透过率有较大影响。因此单纯的微观表面粗化结构多被运用在表面光学性能要求不高的场合。

国外的研究人员在酸蚀的基础上，再对玻璃表面进行镀膜工艺，在凹凸不平的微化结构表面再加工出尺度更小的微凸起，以增加表面的防眩光性能。Janthong[9]和 Hongsingthong[10]等人先用活性离子腐蚀法(Reacted ion etching)处理玻璃表面，形成凹凸不平的粗化结构后，再用有机金属化学气相沉积法(Metalorganic chemical vapor deposition，MOCVD)在其上镀一层氧化锌的薄膜，利用粗化结构的漫反射特性及氧化锌薄膜的高雾度，降低玻璃表面的镜面反射效果，增加太阳能电池的效率。

由此可见：与其他表面防眩技术相结合之后，粗化结构也可以被充分利用起来。如在粗化表面镀上带有纳米光学颗粒的薄膜或具有渐变折射率的多重复合薄膜，这一方面利用了粗化结构表面漫反射的天然优势；另一方面通过其他技术增加光线透过率，改善表面光学性能，这样的复合结构有非常好的防眩光功能。再加上用活性离子蚀刻技术替代了传统酸蚀，降低了生产工艺对于人体和环境的危害，因此表面粗化结构的应用会越来越多。

2.2　光干涉多层膜结构

在 LCD 屏幕表面镀上一层透明薄膜，如图 4 所示，当薄膜的厚度刚好是入射光波长的四分之一时，根据光干涉原理，薄膜的上下表面产生的两束反射光的相位正好相反，产生干涉，反射就会被削弱。

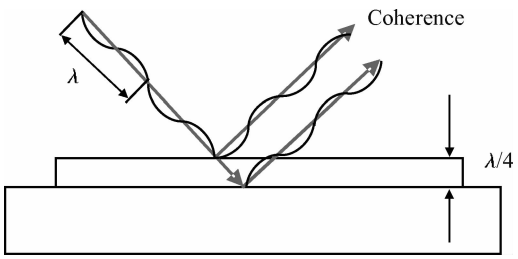


图 4　光干涉削弱镜面反射的示意图

Fig. 4　Schematic diagram of reducing the reflection with optical interference

除了膜厚条件，利用光干涉实现减反射并使其效果最优化的另外一个要求是，对于折射率为 1.5 的玻璃，若空气的折射率为 1，则薄膜材料的折射率必须低至 1.23，而常见材料的折射率都无法达到这个标准。通常是使用具有介孔结构的微颗粒制备薄膜，Moghal[11] 等人将介孔二氧化硅纳米颗粒用湿法涂布制成单层减反射薄膜，二氧化硅纳米颗粒内部有许多大小介于 2～50 nm 的微孔，薄膜折射率仅为 1.28，能将表面反射减少至 0.1%。

由于薄膜厚度要求与入射光的波长有固定的比例关系，同时入射角度对于反射率的影响也很大，因此单层反射薄膜只能做到某一个波长的光垂直入射时无反射。图 5 为光干涉单层膜表面反射率与入射光波长的关系。当入射光波长变化或光线以倾斜角度入射时，减反射效果不佳[12]。

由此人们提出了多层膜结构，其中包含有多层不同折射率的薄膜，而上下相邻薄膜层之间的折射率关系仍然遵循光干涉折射率条件。因此相当于多个干涉式单层膜的叠加，可以让特定的几个波长的光在表面的反射几乎为零，并能让倾斜入射的光的反射减少。彭露露[13] 按照该原理设计出特殊的多层膜结构，并用 Matlab 进行仿真验证，其结果如图 6 所示。在可见光范围内各波长光的反射率都得到了有效的降低，并且在几个中心波长处都出现了反射率的极低值。Selj[14] 等人设计的多种颜

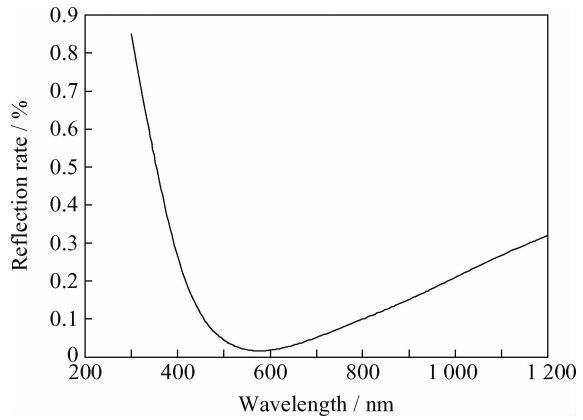


图 5　光干涉单层膜表面反射率与入射光波长的关系[12]

Fig. 5　Relationships between the reflection rate and the incident light wavelength on single-layer coating[12]

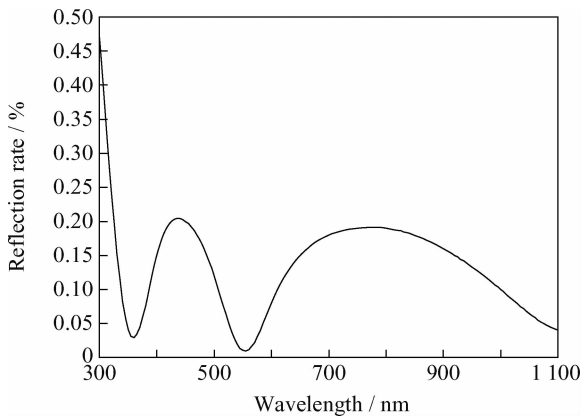


图 6　光干涉多层膜的反射率与入射波长的关系[13]

Fig. 6　Relationships between the reflection rate and the incident light wavelength on the surface of multi-layer coating[13]

色的多层膜在可见光区段有3～4个反射率极低值，表面的反射率在可见光全频段下均低于 20%。

除此以外，研究人员还设计出了周期性多层膜结构。周期性多层膜是由折射率高、低交替相间的膜排列构成，这样的结构也称一维光子晶体。一维光子晶体的左右两侧分别为空气与硅基板。分析光子晶体形成的光子能带结构，利用光子禁带与通带的特性，通过改变薄膜折射率、厚度以及周期数可以获得特殊的光子带隙，有选择性地完全禁止或允许某些波长的光通过，从而获得优良的减反射防眩光特性。Kala[15] 等人提出一种新型的二氧化硅-锗-二氧化硅复合膜，其中二氧化硅层的折射率为 1.44，而锗层的折射率为 4.00，多层堆叠复合薄膜能让玻璃表面多角度

反射率下降至4%以下。Bao[16]等人将平均直径8.4 nm的氧化锌颗粒旋涂在氧化钛单层膜上方，通过厚度的控制，很好的利用了禁带特性，最终试验结果与设计时的计算结果相吻合，可见光波段透过率达80%以上，在453 nm波长处透过率达到峰值，为92.7%。Chen[17]等人利用光子通禁带特性设计的多层膜结构甚至能够在完全阻绝1 000 nm波长光的情况下，可见光波段仍可保证80%以上的通过率，该膜结构用于眼镜表面可以有效防止钇铝石榴石(YAG)激光对人眼的伤害，但是又不会降低眼镜的透光性。

具备渐变折射率的多层膜结构也能够有效的抑制眩光作用。反射是光线在通过不同折射率的介质之间的界面时发生的现象。因此，从原理上讲，若能使LCD屏幕表面的空气—玻璃界面消除，即在中间增加一层从空气到玻璃的渐变折射率层，则光线的反射可以完全消除。这样的特性令渐变折射率结构成为最近几年减反射领域经常研究的对象。同理，采用多种不同折射率的材料制备多层膜，从空气到玻璃表面让不同层按折射率从小到大排列，即可以制备出渐变折射率的多重膜结构。李真一[18]使用光学薄膜分析软件，对具有渐变折射率的多层膜结构的反射率进行模拟分析。分析过程中涉及到的研究对象是分别按一次函数、二次函数对称形式、二次函数、余弦函数和反余弦函数分布的渐变折射率薄膜结构。结果发现：余弦函数式分布的渐变折射率薄膜结构具有最优的减反射性能。即便在分层数相对较少的情况下也是如此。

多层膜复合结构通过降低屏幕表面反射可以实现防眩光，而且效果很好，但其设计、制备难度大，多层膜每一层的厚度和折射率，都需要经过计算确定，层数越多则制备越困难。而对于材料折射率的要求，很多时候无法实现，进一步增加了多层膜结构设计和制造的难度。

2.3 表面微纳结构

三维结构如金字塔形、圆锥形等微小结构也有减少反射削弱炫光的作用，只要结构特征尺寸小于光波长，光线入射时该表面就相当于一层具有连续渐变折射率的过渡层，相当于空气与液晶显示玻璃之间的界面被有效消除，因此在该界面产生的反射也被消除了[19]。

Deinega等人[20]对圆锥形、六棱锥和四棱锥形状的纳米结构进行了减反射性能的研究，并且通过模拟得到适用波长上下限，模拟后发现几百纳米大小的微结构对于可见光的减反射作用最为明显。微纳结构的最大优点在于，其对于任何入射角度和不同波长的光都会有较好的减反射的作用。马志博[21]根据等效介质理论设计的亚波长光栅与二氧化硅相结合的组合式减反射结构实现了在大入射角范围(0°～60°)、宽光谱波段(0.4～1.1 μm)内的低平均反射率，使晶体硅光伏电池的表面反射损失大幅降低，光电转换效率大大提高。Liu[22]等人先用碱液腐蚀玻璃表面，利用其腐蚀的各向异性制作出简单的微米级金字塔阵列，然后再用活性粒子腐蚀法在微米级结构表面腐蚀出微米级的突起，最终得到的结构如图7所示，表面在400～1 000 nm波长段的光线反射率均低于12%。

另一方面，基于仿生学的蛾眼结构也有极佳的光学性能。蛾眼结构的减反射作用最早在20世纪60年代被发现，如图8所示[23]。在显微镜

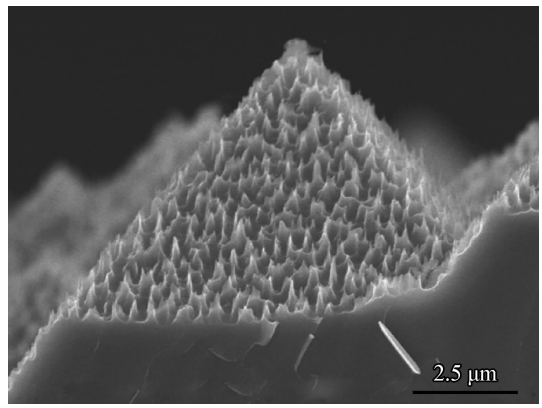


图7 微纳复合表面结构的表面形貌[22]

Fig. 7 Surface morphology of the micro-nano structured surface[22]

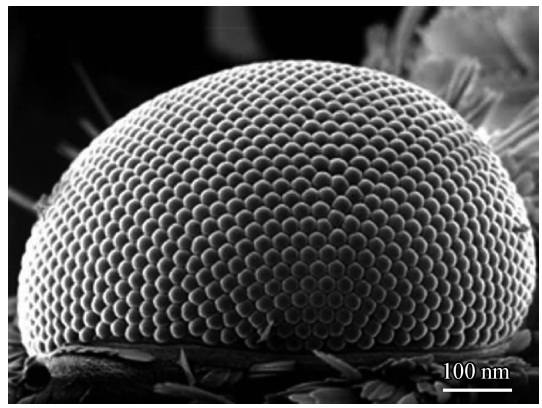


图8 飞蛾眼睛表面微结构的形貌[23]

Fig. 8 Morphology of the nanostructures on the eye of a moth[23]

下发现：蛾的眼睛表面是由许许多多的乳头状突起构成的，能减少眼睛表面对光线的反射，使更多的光线能进入飞蛾的眼睛，从而增加飞蛾的视觉能力[24-25]。除此以外，飞蛾的翅膀和其他的昆虫眼睛上也有类似的结构，能够帮助降低被天敌发现的几率[26]。

Boden 等人利用计算机模拟蛾眼结构的减反射效果。如图 9 所示的高度为 500 nm 的蛾眼结构，当光线的入射角度在 0°～80°范围内时，透射率均能达到 90%以上的[27]。

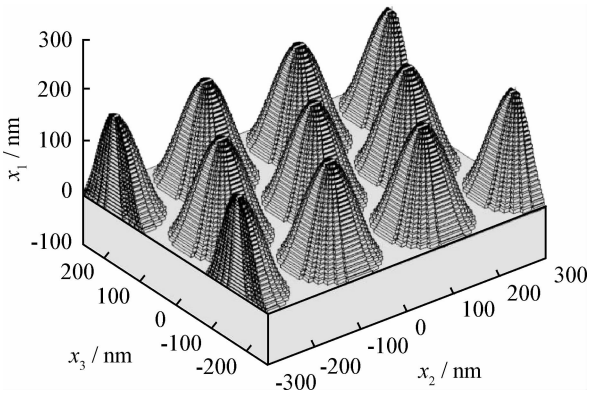


图 9　Boden 等人模拟的蛾眼结构形状[27]

Fig. 9　Moth-eye structure model in Boden's simulation[27]

在计算机模拟的基础上，研究人员制备了具有蛾眼结构的减反射薄膜。首个基于仿生学的蛾眼结构减反射薄膜是由 Clapham 和 Hutley[28] 用干涉光蚀刻的方法制备的。Ju-HyeonShin 等人[29]使用纳米压印制作模板，用溶胶-凝胶法在玻璃表面制成一层带有二氧化硅纳米颗粒的蛾眼结构涂层。该薄膜能够使玻璃的反射率比平板玻璃表面低 3%，比带有微沟槽的玻璃表面最多低 3%。而用机械刻槽工艺制作的金字塔形微结构，经测试在光波长为 950 nm 处表面反射率仅可以降低到 5.6%[30]。Shen[31] 等人用压印的方法制备出蛾眼结构薄膜，并将膜镀在玻璃的上下表面，如图 10 所示，得到的玻璃表面的反射率可以在全频段都降低到 1%以下。

制备三维微纳结构的方法很多，可以通过纳米压印、光刻技术和活性离子腐蚀的方法在特殊光学材料制备的薄膜表面制作微纳结构；也可以使用腐蚀法或机加工的方式直接在玻璃基体上成型微结构。这两类方法各有优点，防眩光的效果都很不错。

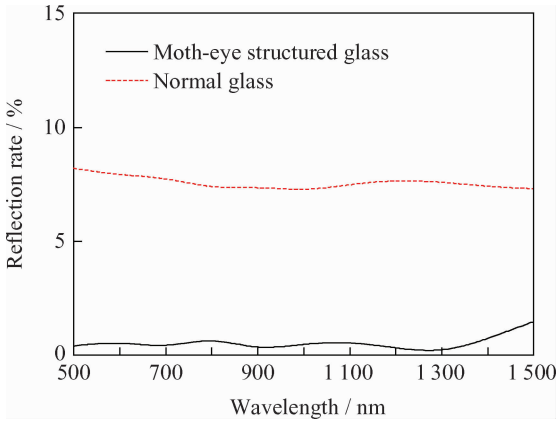


图 10　涂覆 400 nm 蛾眼结构双层膜前后玻璃表面的反射率[31]

Fig. 10　Surface reflectivity of the glass before and after molding double-sided moth-eye films with 400 nm[31]

2.4　纳米光学颗粒分散结构

直径小于光波长的微小颗粒通常具有特殊的光学性能。亚微米级的颗粒由于尺寸与可见光波长相近，表面会产生各向异性的漫散射。而由有机分子和无机分子混合相组成的，且相尺寸小于 100 nm 的复合材料，也称纳米复合材料，具有比纯聚合物更透明，折射率更低的特性[32]。利用这些光学颗粒制备的结构，可划分成两大类：一类是将亚微米级的有机物颗粒涂布于玻璃表面，形成单层的紧密排布结构或多层的微颗粒堆垛结构；另一类则是将光学颗粒镶嵌在薄膜基体中的镶嵌式结构。

堆垛结构仅由光学颗粒组成，这种特殊的膜结构的厚度若能控制在入射光波长的四分之一，就可以借助干涉效应大大减少表面反射。另一方面，由于颗粒紧密排布时表面凹凸不平，若颗粒尺寸为微米级，表面会形成漫反射；若尺寸大小接近或小于光波长，则等效于在表面铺上一层半球状亚微米阵列结构，与三维微纳结构相类似，其表面形成的渐变折射率对于减少反射增加光线透过率有很大帮助。融合以上两种原理的作用，这些单层/多层光学颗粒涂层具有全频段光线减反射和增加透过率的能力。图 11 为表面涂布式光学颗粒散布结构的防眩光原理。

图 12 为 Yeung 等人[33]使用浸渍涂拉法制作的表面铺有 200 nm 自组装微颗粒的减反射薄膜的形貌。将经过多次清洗的钠钙玻璃浸泡在两种不同二氧化硅单分散溶液 MP1040 和 MP2040

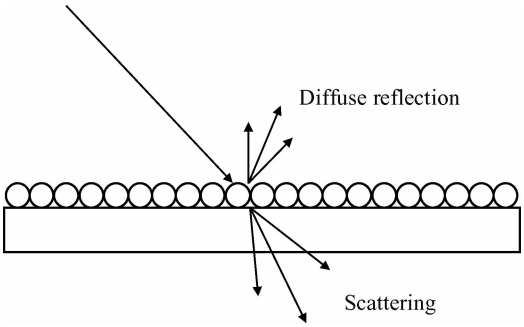


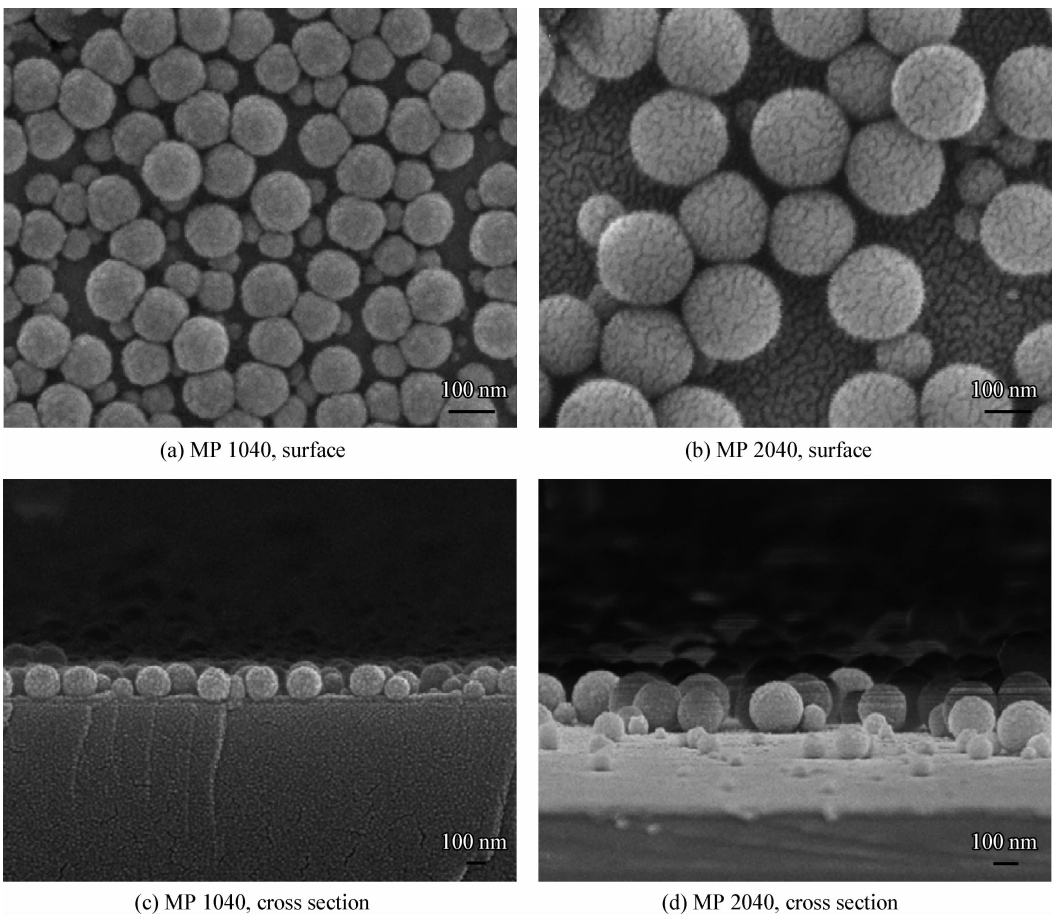
图 11 纳米光学颗粒涂布结构表面的反射

Fig. 11 Reflection on the optical nanoparticles coating structure

中，烘干后二氧化硅自组装成纳米级的球状颗粒散布在玻璃表面，其中 MP1040 二氧化硅样品颗粒的平均直径为 126 nm，而 MP2040 样品的则为 200 nm。所得结果为 499 nm 波长的光透射率在两面镀膜的玻璃上能达到 97.7%，60°入射时仍然能够很好的降低反射。

Liu 和 Yeh[34]将 80、90、100 及 120 nm 4 种尺寸的硅酸盐颗粒涂布在玻璃表面，并通过控制浸泡时间调整表面颗粒的分布密度，最后进行表面反射率的测试。结果发现 120 nm 的纳米颗粒散布结构减反射性能最佳，在全频段的反射总量最低。值得注意的是反射率最低的光波长段落在 500 nm 左右，如图 13 所示，刚好是颗粒直径的 4 倍，这与利用干涉的单层膜结构的四分之一波长条件相吻合，说明主导减反射作用的正是干涉现象。

这种简单的堆叠体系的缺点是容易脱落，若用在经常形变或被触摸、刻划的屏幕表面，光学性能可能会受到较大的影响。Wu[35]就此进行了相关的研究，他们首先将 100 nm 的聚二烯丙基二甲基氯化铵(PDAC)和二氧化硅颗粒分散于聚二甲基硅氧烷(PDMS)为基体的薄膜中去，并进行了相关的反射率测试，再对涂覆薄膜的有机透明材料进行 50 次的弯曲形变，在此以后再对薄膜表面的反射率进行测试，发现表面反射率平均有 6.67%的降低。



(a) MP 1040, surface (b) MP 2040, surface

(c) MP 1040, cross section (d) MP 2040, cross section

图 12 自组装减反射薄膜的形貌[33]

Fig. 12 Morphologies of the self-assembled antireflection coatings[33]

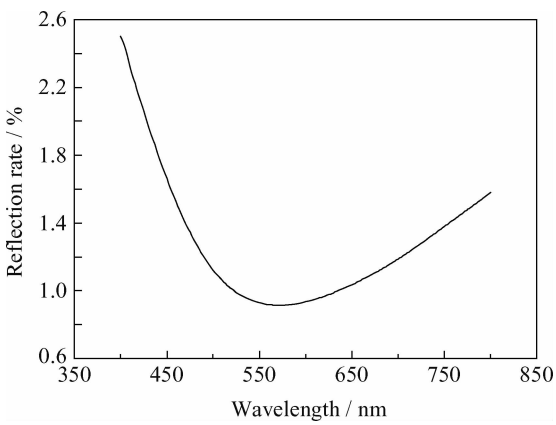


图 13　纳米光学颗粒涂布结构表面反射曲线[34]

Fig. 13　Reflection curve on the optical nanoparticle covering structure[34]

另一种常见的光学颗粒散布结构则是将这些微小的光学颗粒分散在防眩光薄膜的内部。图 14 为内部散布结构防眩光的原理图。

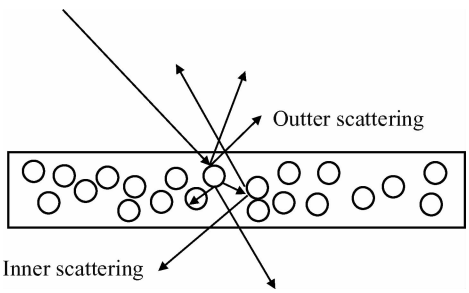


图 14　纳米光学颗粒内部散布结构的反射

Fig. 14　Reflection in the optical nanoparticle distribution structure

其中，光学颗粒散布结构的一种简单的实现方法是将亚微米级的有机或无机金属小颗粒分散于凝胶-溶胶(Sol-gel)的体系中，借助溶胶-凝胶法将其均匀涂布在玻璃表面。有机小颗粒具有很高折射率，依靠空气-膜基质和膜基质-有机颗粒之间的折射率差，能有效削弱表面的镜面反射[36]。李世保[37]进行了一系列的试验，将直径为 0.1 ～8.0 μm 的有机粒子分散在薄膜内部，并对薄膜表面进行了反射率的测试，试验发现当粒子的直径小于 4 μm 时，表面的反射率开始下降。该试验同时说明：通过控制薄膜体系中颗粒的直径和浓度可以实现对薄膜反射和透射性能的调整。

值得注意的是，这种结构能将玻璃表面的镜面反射转变为漫反射，实际上包含两方面的作用。一是薄膜表面凹凸不平造成的漫反射，称为外部漫散射(Outer haze)；一种是由薄膜内部光学颗粒球形表面造成的漫散射，称为内部漫散射(Inner haze)[36]。外部漫散射不会改变总的反射强度，对于光线的透过没有贡献，因此对于屏幕显示的影响不大。而内部散射会使部分光反射最终透过薄膜体系，因此具有一定的增加透过的能力，但是薄膜内部的散射对于从外部入射和从 LCD 屏幕发出的光有相同的作用，因此这种内散射增加会使薄膜的雾度上升，影响到屏幕的显示效果。而在光学颗粒散布结构中，薄膜内部的散射作用占主导地位，在实际应用中应当仔细考虑并平衡防眩光性能和显示效果之间的关系。

若分散在薄膜内部的是经过特殊方法制备的纳米复合粒子，则该结构的防眩光效果更佳。王璧[32]将大小为 10 μm 的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)/二氧化钛纳米复合粒子添加到可紫外(UV)固化的水性聚氨酯体系中，并先用湿法涂布再紫外固化的方法制备防眩光薄膜，使样片透光率可以达到 92.3%，雾度仅为 10.69%，反射光泽度为 62.4 GU。更深入地研究表明：纳米复合粒子的组成不同，防眩光性能也有明显差异。Liu[38]等人对不同的有机和无机纳米材料之间的相互作用进行了分析，并通过试验得出结论，不同的材料之间由于基团不同，化学性质差异大，因此各种复合材料的结合能力也有差异，结果导致用其制备的纳米复合粒子分散结构的减反射和防眩光性能有明显差异。

更进一步的研究已经开始在微粒表面制造更小的二级结构，以获得更优的光学性能。黄惠华[39]申请的专利中提到将使用特殊方法制备如图 15 所示的具有柱状、内椎状、岛状等不同形状凸起的无机粒子分散在聚乙烯醇缩丁醛(PVB)基体中并旋涂在样品表面，其结果为样品透光率可达 92.9%，雾度 10%，同时在入射角为 60°时，使用毕克-加特纳(BYK Gardner)公司制备的 BYK AG-4446 光泽仪测量反射光泽度仅为 68 GU，该方法在实现防眩光的同时能保证较好的图像清晰度。

从以上例子中可以看出：微纳尺度的光学颗粒对于光线的作用除了增加漫反射外，还能明显提高薄膜对光线的透过率。在涉及到亚微米级粒子的文章中，粒子对光线作用原理性的描述都

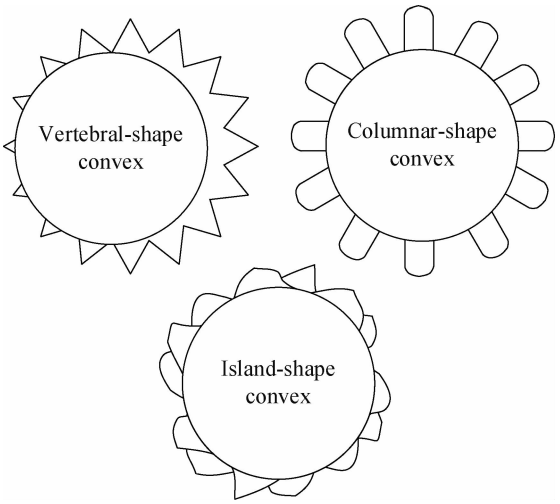


图 15 具有内椎状、柱状和岛状凸起的微粒[39]

Fig. 15 Microparticles with vertebral-shape, columnar-shape and island-shape convexs[39]

较模糊。根据相关的光学知识,其光学特性其实跟一种散射现象有关。如图 16 所示[40],当光线入射时,直径接近可见光波长的颗粒表面就会产生米氏散射,其特点是前向散射比后向散射大,若颗粒大小略微增加,则前向散射与后向散射之比也会增大。诱导光线的前向散射的特殊作用,才是微粒子能增加光线透过率的真正原因。同时粒子对于光线有散射作用,因此表面的镜面反射可以被转化成漫反射,在两种作用的结合下,具有该结构的表面有较好的防眩光效果。

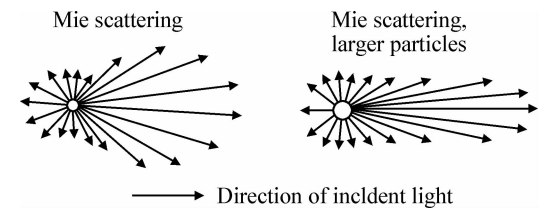


图 16 米氏散射的散射方向与强度的关系[40]

Fig. 16 Relationships between the direction and light intensity of Mie scattering[40]

3 防眩光技术的发展趋势

3.1 防眩光与减反射的关系

文中列举了 4 种可以实现防眩光的结构,前两种在防眩光技术领域已被广泛使用。而多层膜结构或模仿蛾眼结构制作的光功能结构,其现有研究都是以增透减反射为出发点的。

虽然有部分研究将防眩光和增透减反射技术严格的区分开来,并且强调他们是针对不同功能而提出的两个概念:增透减反射技术针对的是降低表面对于全频段光线的反射,以增加透过率;而防眩光技术则多被应用在户外等受阳光直射或光照强度大的场合,侧重于消除表面对于强光的镜面反射,增加漫反射,同时对表面雾度、光泽度等参数有一定的要求[41]。因此两者光学性能上的要求不同,具有一定差异。

由于减反射在 LED、光电池等领域有非常重要的应用意义,在这两大产业快速发展的推动下,减反射技术的革新速度也很快,从简单的单层膜到多层复合膜结构,从三维微米级结构到微纳米复合结构,结构的复杂程度和精细程度不断增加。而防眩光技术方面的研究则仍然很少。

但从原理上说,增透减反射结构能减少屏幕表面反射光强度,当反射光强度降低以后,眩光现象也能被明显削弱[35,42-43]。因此,减反射领域常用的结构如果能应用到防眩光领域中去,不仅能够实现防眩光的目的,还能达到高质量的显示效果,其光泽度、雾度和清晰度等参数也可以通过工艺参数调控,充分满足防眩光的要求。

3.2 多种防眩光结构的对比

表 1 是针对这 4 种防眩光结构进行的对比。文中按照各种结构的宏观特征进行分类,比如多层膜结构是有多层折射率不同、材料不同的透明薄膜层叠组成的,而纳米颗粒的散布结构中有亚微米级和纳米级的光学颗粒,他们的组成、特征都是截然不同的。然而从原理上考虑,各种结构可能会有共通之处,比如光干涉原理既可以应用在由均匀聚合物层组成的单层膜上,也可以用在由纳米级颗粒紧密排布堆垛成的薄膜上,只要他们都满足一定的折射率和膜厚度条件,都可以实现光干涉主导的减反射和防眩光的作用。而防眩光的效果,主要和结构的尺度、涉及的原理有关系,光干涉对于单一波长光垂直入射有很好的减反射作用,因此也能起一定的防眩光作用;而基于光子通禁带原理制作的复合膜对于入射光的选择性透过,使其减少镜面反射的效果非常理想;渐变折射率的防眩光结构的防眩光效果也不错,尤其是其对于入射角度不敏感,能够实现大角度入射光的防眩光。

而不管是哪一种原理,对于结构的尺度都有一定的要求,并不是越小越好,比如光干涉对薄膜

表 1　4 种防眩光结构的对比

Table 1　Comparison of the four antiglare structures

	Roughening structure	Optical particle distribution structure	Multilayer composite structure	Three dimensional micro-nano structure
Scale	Micro	Nano, micro	Nano	Nano, micro
Mechanism	Diffuse reflection	Mie scattering, coherence, graded reflective index	Coherence, graded reflective index, photon flux band gap	Graded reflective index
Effect	Normal	Good	Very good	Good
Applications	Glass curtain wall	LED, solar PV, LCD screen	LED, solar PV, LCD screen	LED, solar PV, LCD screen

材料折射率要求十分苛刻，对膜厚度变化很敏感。另外渐变折射率的微结构尺寸大概在几百纳米时其减反射和防眩光的能力才能达到最佳。

3.3　防眩光结构的发展趋势

防眩光结构制备方法的研究，是防眩光技术中重要的一环。实现防眩光功能的一种简易方法是在屏幕玻璃面板上涂覆光学薄膜，并将防眩光结构制备在薄膜表面。结构成型在薄膜表面时，不受机体材料限制，因此结构的制作更加简单方便，还能应用特殊薄膜材料的低折射率提高屏幕表面的光学性能。但有薄膜强度不足、涂覆不均匀、容易脱落等问题。而除此以外，也可以直接在玻璃表面加工微结构实现防眩光。目前，已有研究在单晶硅、二氧化硅、硅酸盐、金属钛、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚苯乙烯(Polystyrene，PS)等各种材料表面制作微结构[18]。相比光学薄膜而言，直接在表面制备具有不同光学特性的微结构，可以保证强度，无需考虑薄膜涂覆不均匀等问题，同时其光学性能更加优异。但是在玻璃表面加工防眩光结构相对困难。若使用化学方法获得的结构不均匀；而机加工的方式要在玻璃面板表面加工出精细的微纳结构需要很高的机床精度，要实现硬脆性材料的超精密切削需要对其原理非常了解，即便能够实现，其成本也十分高昂。因此，能否找到更加简单、低成本且适宜批量化生产的新加工方法，是防眩光结构研究领域的一个重大难题。

防眩光结构方面的研究与屏幕材料技术的发展相关。未来显示屏幕的材料可能会有更多的变化，不再局限于玻璃或有机玻璃。蓝宝石或其他具有更高强度的材料也能用做屏幕显示，另外，手机厂商已经开始开发柔性屏幕。而在这些新材料表面是否能够制作同样的微观结构，仍然需要大量的研究去验证。

另外各种防眩光结构背后光学原理的探明也十分重要。比如三维微纳结构，其作为一种光学性能优异的新型结构，能够很好的满足防眩光的需求，但也只有在特定形状、尺寸落在某一特定区间内的三维微纳结构能够发挥出最佳的性能，这说明其性能与尺度效应有明显的关联。必须要运用工程光学等知识，充分利用有限元软件、光线追踪软件进行模拟研究，才能更好地了解两者之间的关系，从而根据原理设计制备出更优秀的防眩光结构。

减反射领域中备受关注的梯度折射率原理在未来也会越来越受防眩光技术研究者的重视。通过腐蚀、沉积、镀膜和机加工的方法，都能制作出具有梯度折射率的表面结构，该结构特殊的性能能有效削弱甚至消除表面反射，是最为理想的防眩光结构。但是如何快速低成本的制作出规则且形状理想的微结构，仍然是研究人员面对的一大难题。而更为值得关注的是，不同种类的防眩光结构相互结合能让玻璃表面的防眩光性能提升不少。如梯度折射率的薄膜上表面再加工出三维微纳结构，这种二级结构让两种结构的减反射作用叠加起来，可能会有更加好的防眩光效果，当然这也需要更多研究的投入。

4　总　结

随着技术的逐渐成熟，液晶显示屏幕已经成

为显示领域的主流。但屏幕表面眩光也随着液晶屏幕数量的增加，开始威胁到越来越多人的视力健康。近年来防眩光结构研究的进展迅速，由简单的表面粗化结构到纳米颗粒涂布结构和三维微纳结构，原理更加复杂，效果更加优异，而其制备成本和难度也大大提高。因此找到一种快速廉价适宜批量化生产的新成型方法，对于防眩光结构方面的研究有重大意义。而探明三维微纳结构削弱眩光效应的复杂原理，从而指导更优秀的防眩光结构的设计和制备，也是今后发展的重点。

参考文献

[1] Boyce P R. Human factors in lighting [M]. 2 edition, Taylor & Francis, New York, 2003.

[2] Sheedy J E, Smith R, Hayes J. Visual effects of the luminance surrounding a computer display [J]. Ergonomics, 2005, 48(9): 1114-28.

[3] Osterhaus W K E. Discomfort glare assessment and prevention for daylight applications in office environments [J]. Solar Energy, 2005, 79(2): 140-158.

[4] Lin P H, Lin Y T, Hwang S L, et al. Effects of anti-glare surface treatment, ambient illumination and bending curvature on legibility and visual fatigue of electronic papers [J]. Displays, 2008, 29(1): 25-32.

[5] Huang Y Y, Menozzi M. Effects of discomfort glare on performance in attending peripheral visual information in displays [J]. Displays, 2014, 35(5): 240-246.

[6] 王海风，王丹，王青，等. 防眩玻璃制备工艺的研究 [J]. 玻璃与搪瓷，2012，40(4)：6-9.
Wang H F, Wang D, Wang Q, et al. The study on the preparation process of antiglare glass surface [J]. Glass & Enamel, 2012, 40(4): 6-9 (in Chinese).

[7] 韩伟军，韩文爵，罗春炼. 无反射蒙砂玻璃 [J]. 玻璃，2014(12)：46-51.
Han W J, Han W J, Luo C L, et al. Non-reflection etched glass [J]. Glass, 2014(12): 46-51(in Chinese).

[8] 罗春炼. 高透过防眩玻璃的制备与性能研究 [D]. 上海：东华大学，2009.
Luo C L. The preparation and properties study on high transmission antiglare glass surface [D]. Shanghai: DongHua University, 2009 (in Chinese).

[9] Janthong B, Moriya Y, Hongsingthong A, et al. Management of light-trapping effect for a-Si: H/μc-Si: H tandem solar cells using novel substrates, based on MOCVD ZnO and etched white glass [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2013, 119: 209-213.

[10] Hongsingthong A, Krajangsang T, Limmanee A, et al. Development of textured ZnO-coated low-cost glass substrate with very high haze ratio for silicon-based thin film solar cells [J]. Thin Solid Films, 2013, 537: 291-5.

[11] Moghal J, Kobler J, Sauer J, et al. High-performance, single-layer antireflective optical coatings comprising mesoporous silica nanoparticles [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2012, 4(2): 854-9.

[12] Lee H C, Su Y K, Kuei Chuang W, et al. Discussion on electrical characteristics of i-In 0.13 Ga 0.87 N pin photovoltaics by using a single/multi-antireflection layer [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2010, 94(7): 1259-62.

[13] 彭露露. 基于光学微结构减小硅太阳能电池反射光损失的研究 [D]. 合肥：安徽大学，2013.
Peng L L. Research of optical microstructure in order to reduce the loss of reflected light from silicon solar cells [D]. Hefei: Anhui University, 2013 (in Chinese).

[14] Selj J H, Mongstad T T, Søndenå R, et al. Reduction of optical losses in colored solar cells with multilayer antireflection coatings [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95(9): 2576-82.

[15] Kala M B, Bandyopadhyay P K, Nautiyal B B. Thorium free antireflection coating in MWIR region on silicon optics [J]. Infrared Physics & Technology, 2012, 55(5): 409-411.

[16] Bao X, Yang Y, Yang A, et al. Antireflection and band gap extension effects of ZnO nanocrystalline films grown on ITO-coated glasses by low temperature process [J]. Materials Science and Engineering: B. 2013, 178(4): 263-266.

[17] Chen M, Li C, Xu M, et al. Eye-protection glasses against YAG laser injury based on the band gap reflection of one-dimensional photonic crystal [J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(1): 214-218.

[18] 李真一. 梯度折射率减反射光伏玻璃的研究 [D]. 青岛：中国海洋大学，2014.
Li Z Y. Research on antireflection photovoltaic glass with gradient refractive indexes [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014 (in Chinese).

[19] Morhard C, Pacholski C, Brunner R, et al. Antireflective 'moth-eye' structures fabricated by a cheap and versatile process on various optical elements [C]. //Nanotechnology (IEEE-NANO), 2011 11th IEEE Conference on. IEEE, 2011: 116-121.

[20] Deinega A, Valuev I, Potapkin B, et al. Minimizing light reflection from dielectric textured surfaces [J]. Journal of the Optical Socity of America A, Optics, Image Science and Vision, 2011, 28(5): 770-777.

[21] 马志博. 光学表面微结构杭反射特性与优化设计研究 [D]. 西安：西北大学，2011.
Ma Z B. Research on antireflection glass with micro structure [D]. Xi'an: Northwest University, 2011 (in Chinese).

[22] Liu J, Ashmkhan M, Dong G, et al. Fabrication of micro-nano surface texture by CsCl lithography with antireflection and photoelectronic properties for solar cells [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2013, 108: 93-97.

[23] Dexter Johnson. Nanostructures modeled on the moth eye reduce radiation in medical mmaging [J/OL]. http://spectrum. ieee. org/nanoclast/semiconductors/nanotechnology/nanostructures-modeled-on-the-moth-eye-reduce-radiation-in-medical-imaging, 2012-06-10.

[24] Allen J. An electromagnetic analysis of the optics of the compound eye of moths [C]. //Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE, 1968, 6: 440-441.

[25] Stavenga D G, Foletti S, Palasantzas G, et al. Light on the moth-eye corneal nipple array of butterflies [J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2006, 273(1587): 661-667.

[26] Li Y, Zhang J, Zhu S, et al. Bioinspired silicon hollow-tip arrays for high performance broadband anti-reflective and water-repellent coatings [J]. Journal of Materials Chemistry, 2009, 19(13): 1806-10.

[27] Boden S A, Bagnall D M. Bio-mimetic subwavelength surfaces for near-zero reflection sunrise to sunset [C]. // Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on. IEEE, 2006, 2: 1358-61.

[28] Clapham P B, Hutley M C, Reduction of lens reflection by the 'moth eye' principle [J]. Nature, 244, 1973, 281-282.

[29] Shin Ju-Hyeon, Kim Yang-Doo, Choi Hak-Jong, et al. Multi-functional SiO_2 moth-eye pattern for photovoltaic applications [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2014, 126: 1-5.

[30] Willeke G, Nussbaumer H, Bender H, et al. A simple and effective light trapping technique for polycrystalline silicon solar cells [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1992, 26(4): 345-356.

[31] Shen L, Du H, Yang J, et al. Optimized broad band and quasi-omnidirectional anti-reflection properties with moth-eye structures by low cost replica molding [J]. Applied Surface Science, 2015, 325: 100-104.

[32] 王璧. 防眩光膜材料的制备及性能研究 [D]. 北京：北京化工大学，2006.
Wang B. The preparation and the properties study of anti-glare coating material [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2006 (in Chinese).

[33] Yeung K M, Luk W C, Tam K C, et al. 2-Step self-assembly method to fabricate broadband omnidirectional antireflection coating in large scale [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95(2): 699-703.

[34] Liu B T, Yeh W D. Antireflective surface fabricated from colloidal silica nanoparticles [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2010, 356(1): 145-149.

[35] Wu Z, Walish J, Nolte A, et al. Deformable antireflection coatings from polymer and nanoparticle multilayers [J]. Advanced Materials, 2006, 18(20): 2699-2702.

[36] Liu B T, Teng Y T. A novel method to control inner and outer haze of an anti-glare film by surface modification of light-scattering particles [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2010, 350(2): 421-426.

[37] 李世保. 微结构聚合物漫反射材料的设计及成型基础研究 [D]. 北京：北京化工大学，2013.
Li S B. The research into the design and preparation of micro-structured polymer haze material [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology. 2013 (in Chinese).

[38] Liu B T, Teng Y T, Lee R H, et al. Strength of the interactions between light-scattering particles and resins affects the haze of anti-glare films [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2011, 389(1/2/3): 138-43.

[39] 黄惠华，储成义，孙爱华，等. 一种用于防眩光膜的组合物 [P]. 中国：201210159435, 2012-09-19.
Huang H H, Chu C Y, Sun A H, et al. A composition for anti-glare film [P]. China: CN201210159435, 2012-09-19 (in Chinese).

[40] Alkholidi A G, Altowij K S. Free space optical communications-theory and practices [M]. Croatia, Intech, 2014.

[41] Yao L, He J. Recent progress in antireflection and self-cleaning technology-from surface engineering to functional surfaces [J]. Progress in Materials Science, 2014, 61: 94-143.

[42] Wilson S J, Hutley M C. The optical properties of 'moth eye' antireflection surfaces [J]. Journal of Modern Optics, 1982, 29(7): 993-1009.

[43] Han J, Dou Y, Wei M, et al. Erasable nanoporous antireflection coatings based on the reconstruction effect of layered double hydroxides [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2010, 49(12): 2171-4.

（责任编辑：黄艳斐）