

# 蓝光防护薄膜的研究

韦龙, 丁可可, 马宇航, 施钧策, 李轩, 李再金\*, 曾丽娜, 李林, 乔忠良, 刘国军, 曲轶, 陈浩, 赵志斌

海南师范大学物理与电子工程学院, 海南省院士团队创新中心, 海南省激光技术与光电功能材料重点实验室, 海南 海口

收稿日期: 2022年5月13日; 录用日期: 2022年6月22日; 发布日期: 2022年6月29日

## 摘要

近年来, 由于电子设备的频繁使用, 蓝光防护薄膜的研究逐渐成为了光学领域的研究热点, 本文详细阐述了几种蓝光防护薄膜的工作原理、材料以及所达到的防护指标, 并对蓝光防护膜最新研究进展与发展现状进行了总结和论述。在此基础上, 对蓝光防护膜的研究方向和发展趋势进行了分析与展望。目前, Chia-Hsun Hsu等人制备的6对有机硅和无机硅堆叠层可实现最佳屏幕显示效果, 蓝光透过率为58.4%, 颜色失真可忽略不计。随着应用领域的不断扩展, 吸收型蓝光防护膜将成为未来的研究热点。

## 关键词

光谱曲线, 防蓝光, 防蓝光膜, 新材料

# Research of Blue Light Protection Films

Long Wei, Keke Ding, Yuhang Ma, Junce Shi, Xuan Li, Zaijin Li\*, Lina Zeng, Lin Li, Zhongliang Qiao, Guojun Liu, Yi Qu, Hao Chen, Zhibin Zhao

Key Laboratory of Laser Technology and Optoelectronic Functional Materials of Hainan Province, Academician Team Innovation Center of Hainan Province, College of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou Hainan

Received: May 13<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jun. 22<sup>nd</sup>, 2022; published: Jun. 29<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

In recent years, due to the frequent use of electronic equipment, the research on blue light protective films has gradually become a research hotspot in the field of optics. This paper elaborates on the working principles, materials and achieved protective indicators of several blue light protec-

\*通讯作者。

tive films. The latest research progress and development status of membranes are summarized and discussed. On this basis, the research direction and development trend of blue light protection film are analyzed and prospected. At present, the 6 pairs of organic silicon and inorganic silicon stacked layers prepared by Chia-Hsun Hsu *et al.* can achieve the best screen display effect, with a blue light transmittance of 58.4% and negligible color distortion. With the continuous expansion of the application field, the absorbing blue light protective film will become a research hotspot in the future.

## Keywords

Spectral Curve, Anti-Blue Light, Anti-Blue Light Film, New Material

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

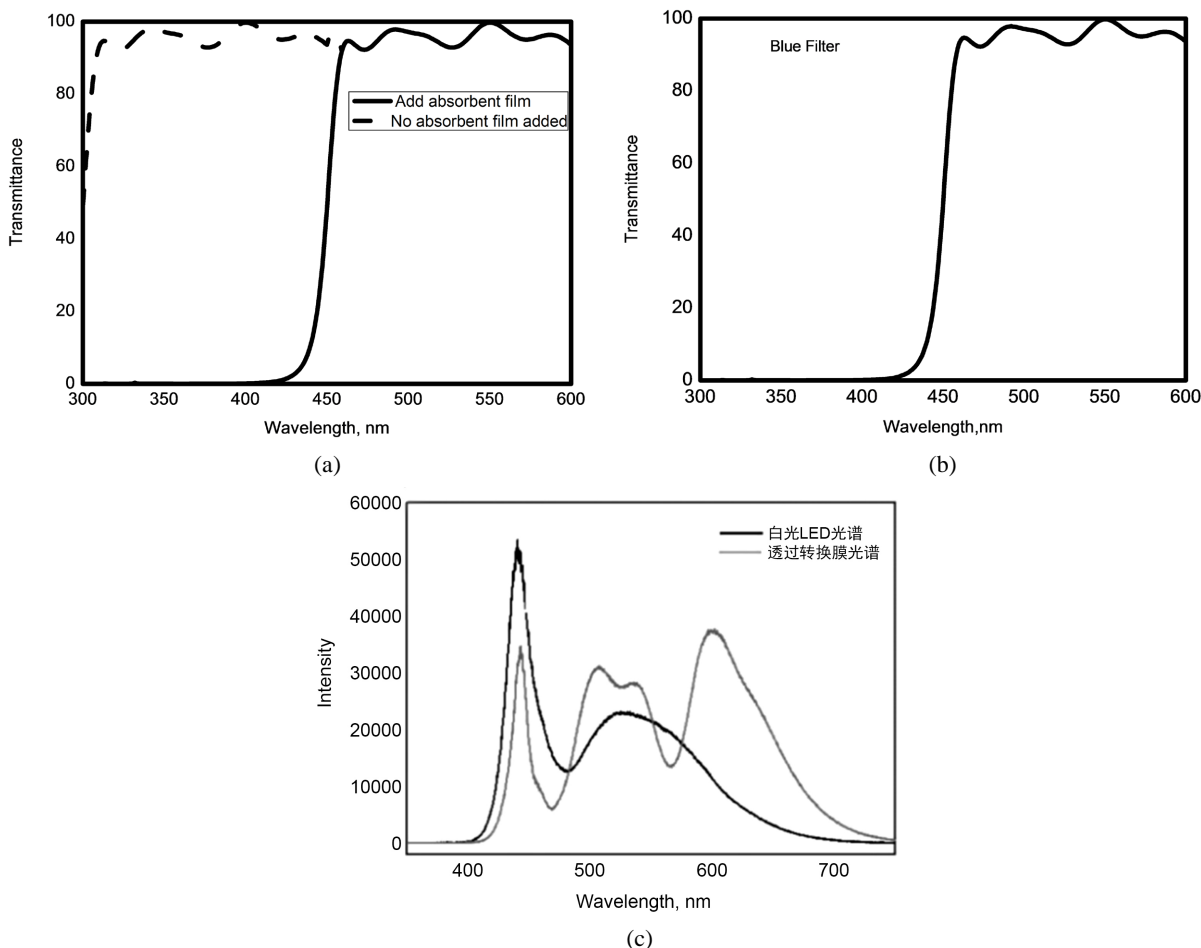
## 1. 引言

随着对设备显示器和照明的依赖日益增加,人类越来越多地暴露在蓝光下,显示设备的频繁使用,不可避免对人的健康产生了影响,由此,人造光源或显示屏幕带来的蓝光危害问题[1]也越来越被消费者所关注。GB/T 30117.2 [2]和 IEC62471 [3]等行业标准均指出,以蓝光为代表的,过强的光辐射会对身体产生危害。Yoshimi Niwano [4]等人详细研究了蓝光对视网膜的损害机理,确定这一损害在波长为 435 nm~440 nm 达到极大值。过多接触蓝光会引起视网膜黄斑部病变[5] [6],加剧色差和视觉模糊,破坏视力,因而保护视力、捍卫眼部健康的防蓝光技术成为显示器行业关注的课题。目前,各式各样的防蓝光眼镜、屏幕防蓝光保护膜、防蓝光灯罩等[7]防蓝光产品纷纷涌入市场,可观的前景吸引了大量研究人员对蓝光防护膜的研究热情,本文根据近几年蓝光防护膜的研究成果,将蓝光防护膜进行分类叙述,主要综述了几种不同类型的蓝光防护薄膜的基本工作原理、薄膜结构与性能,对国内外近几年的研究进展进行了总结和分析,并就其发展趋势做出了展望。

## 2. 基本原理

防蓝光膜主要通过吸收蓝光或者反射蓝光来实现对蓝光的阻挡作用。防蓝光膜常将防蓝光功能与其他功能层复合在一张薄膜上,通过控制特定波段蓝光的阻隔率,尽可能减少显示设备的色调变化、低色偏,并保持一定的亮度。防蓝光膜并不是过滤掉所有的蓝光从而不会严重影响色彩的视觉效果。防蓝光膜实现防蓝光主要分为 3 种类型[8]——吸收型、反射型和其他防蓝光技术。实现蓝光屏蔽原理分别如图 1 光谱图所示,吸收型防蓝光膜通过蓝光吸收剂来吸收蓝光,从而降低蓝光的透过率,达到滤蓝光效果。常用的蓝光吸收剂主要有 3 种类型——有机、有机无机杂化型和无机型[9] [10],滤蓝光效果依次减弱,稳定性依次增强,此类技术路线的典型代表为德国哈罗防蓝光护目眼镜,该方案通过在镜片中添加吸收剂,能过滤 97% 高能短波蓝光;反射型防蓝光膜通过在基材表面依次镀制或沉积多层膜,通过高低折射率搭配的层间结构,通过设置各膜层的材料、折射率、厚度等参数,多层膜间可以实现对蓝光波段的相干相消,从而减小蓝光的透过率,达到防蓝光的效果[11]。这也是目前国内外眼镜企业及激光防护领域所采取的主流技术路线;其他防蓝光技术在常用防蓝光膜的基础上,通过其他方式来实现防蓝光。例如表面微结构实现对蓝光的限制、光扩散粒子实现膜层中蓝光的散射、通过通电产生磁场来限定蓝光的传播、

通过波长转换使蓝光主波长红移，避开 450 nm 以下有害蓝光，将高能蓝光转换成黄绿光或橙红光，不仅能吸收白色 LED 点光源的高能蓝光，减弱蓝光辐射，避免人眼受到伤害，而且还具有提高红绿蓝光颜色纯度，显示器件显色指数，对比度和亮度等功能[12]。



**Figure 1.** (a) Spectrum of absorption type anti blue light film; (b) Spectrum of reflection-type anti-blue light film; (c) Spectral diagram of conversion type anti-blue light film

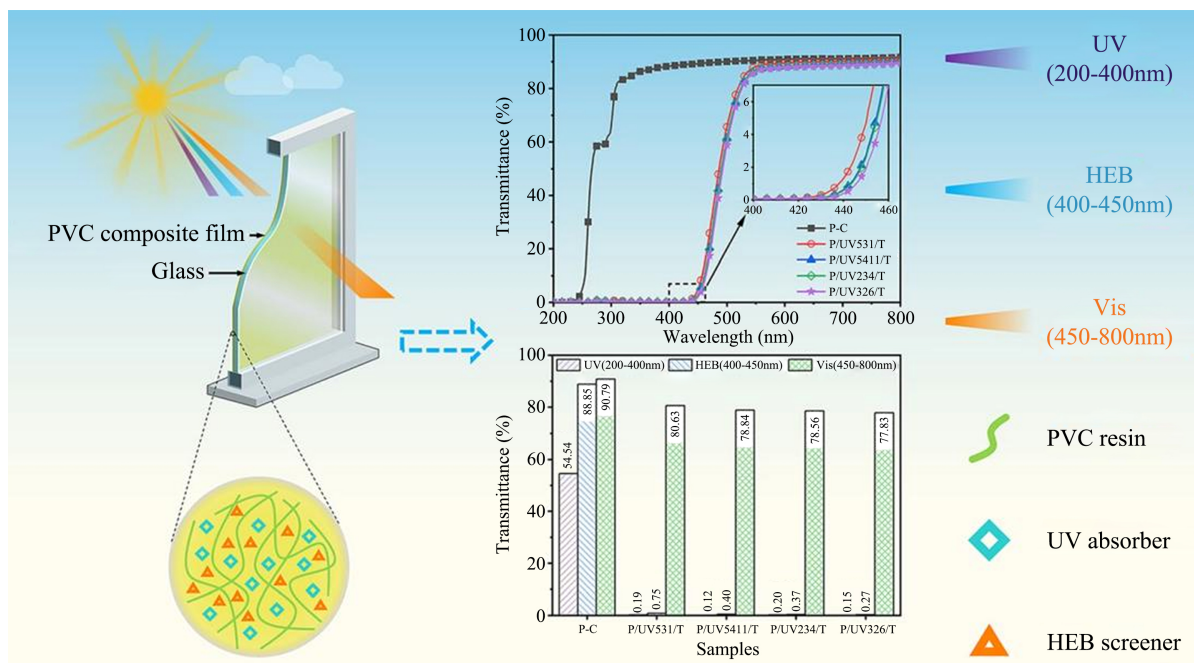
**图 1.** (a) 吸收型防蓝光膜光谱图; (b) 反射型防蓝光膜光谱图; (c) 转换型防蓝光膜光谱图

### 3. 薄膜类型

#### 3.1. 吸收型防蓝光膜

##### 3.1.1. 有机吸收型

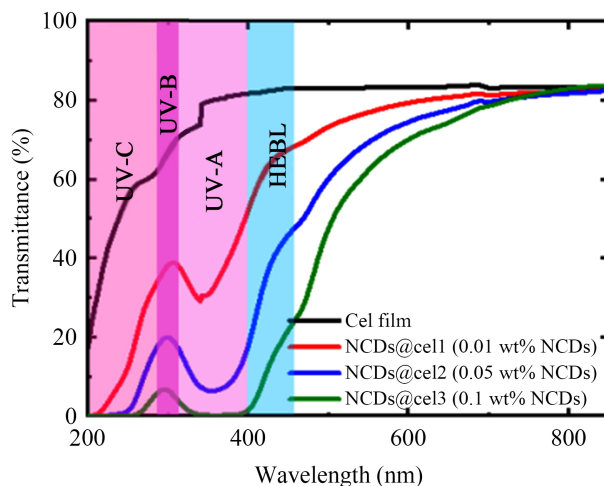
2021 年, Keshun Su 等人[13]提出了一种具有理想的深紫外(UV)和高能蓝光(HEB)屏蔽的高透明薄膜的设计理念。选用具有 HEB 过滤效果的紫外线吸收剂和透明有机黄色颜料[14]作为功能添加剂,通过熔融共混的方式将其引入增塑聚氯乙烯(PVC)中,以提高 PVC 的 UV/HEB 屏蔽性能。如图 2(a)所示,首先证明了苯并三唑类紫外线吸收剂 UV326 与其他类型的紫外线吸收剂相比具有最佳的紫外线屏蔽率 98%,并进一步证实掺入透明有机黄色颜料可以实现 99% 以上的 HEB 过滤。此外,实验得到紫外线吸收剂和透明黄色颜料的组合使所有样品在紫外线和 HEB 区域都显示出 99% 以上的屏蔽效果,光谱数据如图 2(b)所示。



**Figure 2.** (a) PVC composite film containing UV absorber and HEB screener is attached to the outside of the glass; (b) The plasticized PVC composite films added with UV absorbers and transparent yellow pigments

**图 2.** (a) 含有紫外线吸收剂和 HEB 屏蔽剂的 PVC 复合膜贴在玻璃外面; (b) 添加了紫外线吸收剂和透明黄色颜料的增塑 PVC 复合薄膜

同年, Barun Kumar Barman 等人[15]成功研制出一种可生物降解、透明、柔韧的由 N 掺杂碳点(NCD)和羟丙基甲基纤维素(HPMC)通过氢键结合而成的新型杂化薄膜, 含有胶囊化、高度表面功能化 NCD 的纤维素膜(NCDs@cel)在可见光谱区域高度透明。这些薄膜有效吸收紫外线和高能蓝光, 如图 3 所示, 当 NCD 掺杂比为 0.1 wt%时, 完美阻挡 95%的紫外线和 50%的高能蓝光, 且可见光波段的透过率为 60%。这些薄膜显示出足够高的可见光透明度, 并阻挡大多数有害的紫外线和高能蓝光, 同时将其变频为可见光谱中的更长波长的光。



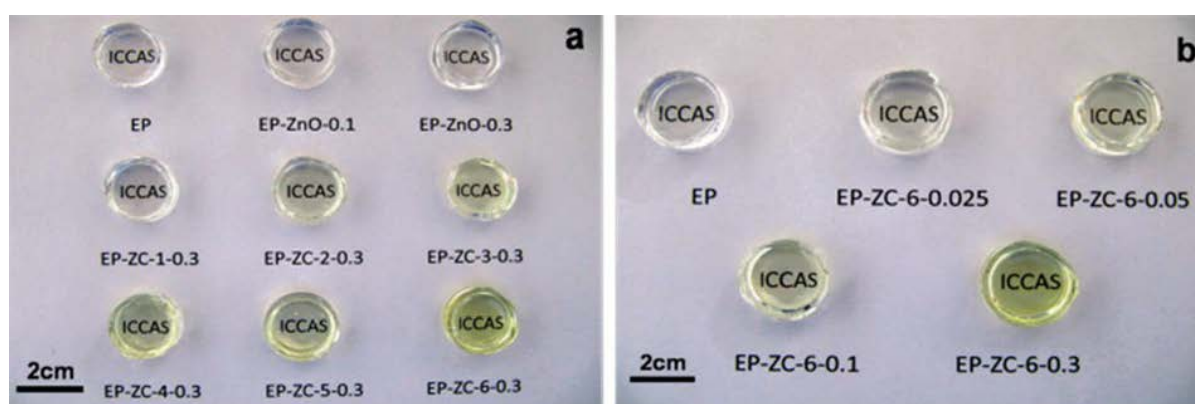
**Figure 3.** Spectral curves under different NCD doping ratios

**图 3.** 不同 NCD 掺杂比下的光谱曲线

2022年, Youqi Han 等人[16]利用微晶纤维素合成了基于生物物质的碳点(Bio-CD), 该碳点不仅吸收短波长光, 产生更长波长的发射, 而且显示出与浓度相关的最大激发和最大发射。将生物 CDs 与聚乙烯醇(PVA)混合以制备优先阻挡蓝光的光学阻挡膜(OBF)。OBF 具有良好的透明度, 也能有效阻挡蓝光。当 OBFs 中含有 9.9% 的 Bio-CDs 时, 该薄膜分别阻挡了 395 nm 和 450 nm 光的 99.6% 和 98.6%, 也分别阻挡了电脑和手机屏幕发出的蓝光的 93.4% 和 97%。含有超过 9.9% 生物 CDs 的 OBF 比市售蓝光遮光眼镜更能阻挡蓝光。通过调整 OBFs 中生物 CDs 的数量, 可以制备出不同程度蓝光阻挡的薄膜, 以满足不同应用的要求。

### 3.1.2. 无机吸收型

2015年, Chunchun Han 等人[17]通过原位聚合制备了能够屏蔽紫外线和蓝色辐射的环氧树脂-ZnO/CdS (EP-ZC)纳米复合材料, 首先, 通过在预制的 ZnO 量子点(ZnO QD)上生长 CdS 来合成 ZnO/CdS 纳米颗粒。与仅吸收部分紫外光的 ZnO QD 相比, ZnO/CdS 纳米粒子在从紫外光延伸到蓝光的波长范围内表现出强吸收。此外, 它们的吸收带范围可以通过调节 Zn/Cd 摩尔比来控制。该复合材料在波长大于 500 nm 时具有高度透明性。结果表明, EP-ZC 纳米复合材料具有很强的紫外线屏蔽能力, 所采用的方法确保了 ZnO/CdS 纳米颗粒很好地分散在环氧树脂基质中。即使添加少量的 ZnO/CdS 纳米颗粒, 也会产生很强的紫外线和蓝光屏蔽性能。当它们含有 0.3 wt% ZnO 时, 便几乎可以完全阻挡 200~400 nm 之间的紫外线以及超过 80% 的 400~450 nm 之间的蓝光。复合材料实物如图 4 所示。



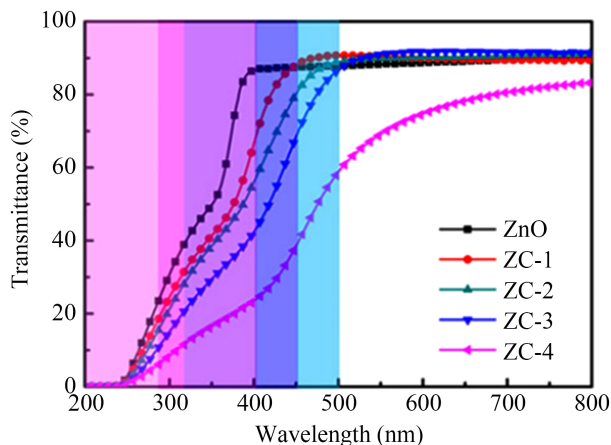
**Figure 4.** Digital photographs of (a) pure EP and the EP-ZnO and EP-ZC nanocomposites and (b) EP-ZC-6 nanocomposites with different ZnO/CdS ratios

**图 4.** (a)纯 EP 和 EP-ZnO 和 EP-ZC 纳米复合材料和(b)不同 ZnO/CdS 比的 EP-ZC-6 纳米复合材料的数码照片

2018年, Guihua Huang 等人[18]使用铯铅卤化钙钛矿纳米晶体 CsPb (Cl/Br)<sub>3</sub> 作为光吸收剂, 制造了一种高效的紫外线和蓝光阻挡膜。以乙基纤维素(EC)作为主体材料, 将 CsPb (Cl/Br)<sub>3</sub> 纳米晶体很好地分散在 EC 基质中, 构成了紫外线和蓝光屏蔽膜, 通过阴离子交换调节 Cl 与 Br 的比例可以调节膜的吸收边缘。CsPbCl<sub>2</sub>Br-EC 薄膜在 459 nm 处的透射率为 5%, 在 478 nm 处为 90%, 在 500~800 nm 范围内为 95%, 这使得它具有出色的紫外线和蓝光屏蔽性能。此外, 所制备的 EC-CsPb (Cl/Br)<sub>3</sub> 薄膜在紫外线照射下表现出优异的光稳定性。这种基于 EC-CsPb (Cl/Br)<sub>3</sub> 的材料具有清晰的吸收边缘、可调的阻挡波长和高光稳定性, 可用于紫外和蓝光阻挡和滤光片的应用。

2019年, Yanan Yang 等人[19]以廉价的 ZnO 和 CdO 前驱体溶胶为原料, 研究开发了具有高能蓝光屏蔽功能的 ZnO/CdO (ZC)薄膜。采用优化的溶胶-凝胶旋涂法, 通过改变 Zn:Cd 的体积比(1:3 至 3:1), 在玻璃衬底上沉积了这些薄膜。图 5 显示了不同 CdO 浓度的 ZC 薄膜的透射比, 不仅具有蓝光屏蔽性能,

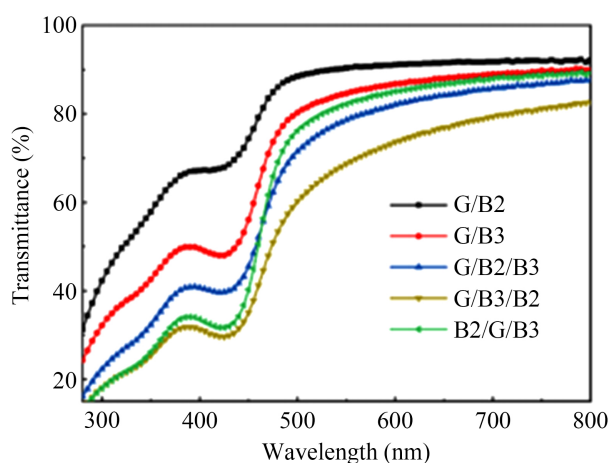
而且可以屏蔽大部分 UVC (200~280 nm)和 UVB (280~320 nm)和部分 UVA (320~400 nm)当 Zn:Cd 的体积比为 3:5 时, 蓝光在 400~450 nm 之间的平均透过率为 54.55%, 中心波长 425 nm 的透过率为 53.8%。同时, 大于 500 nm 的可见光的平均透过率达到 91.2%。



**Figure 5.** UV-transmittance spectra of ZnO and ZC samples with UV treatment in different volume ratios of Zn:Cd

**图 5.** ZnO 和 ZC 样品在不同体积比的 Zn:Cd 下的 UV 透射光谱

2020 年, Yanan Yang 等人[20]在总结了 2018 年设计的 ZnO/CdO (ZC)薄膜的不足, 即镉或铅的毒性, 以及可见光透射率不高阻碍了它们的广泛应用。于是, 经过实验成功通过溶胶凝胶旋涂法研制出成本效益更高, 更环保可靠的具有纳米结构的 BiVO<sub>4</sub> (BVO)双膜[21] [22] [23], 研究表明, 当乙酸和二甲基甲酰胺比例在 20:80 蓝光屏蔽和可见光透过率达到最佳状态。如图 6 中的 G/B3 所示, 它可以阻挡 415~455 nm 波长范围内 65.25%的蓝光, 在 500~800 nm 波长范围内保持大于 85%的平均透射率。同时, 通过湿热测试和细胞实验进一步证实 BVO 滤光片具有出色的稳定性和对 ARPE-19 细胞(人视网膜色素上皮细胞系)的保护作用。此外, 在手机屏幕上应用升级后的 BVO 滤光片后, 蓝光加权辐射亮度 LB 下降了 34.32%。



**Figure 6.** UV-visible transmittance spectra of G/B2, G/B3, G/B2/B3, G/B3/B2, and B2/G/B3

**图 6.** G/B2/B3、GG/B2、G/B/B3/B2 和 B2/G/B3 的紫外 - 可见透射光谱

### 3.1.3. 有机无机杂化型

2013 年, Liu 等人[24]将 CeO<sub>2</sub> 纳米颗粒加入聚苯乙烯(PS)基质中, 紫外 - 可见光谱显示, 复合材料的吸收峰出现在 376 nm 处, 吸收边超过 430 nm。然而, 当与聚合物基体复合时, CeO<sub>2</sub> 颗粒会团聚, 因此很难均匀分散 CeO<sub>2</sub> 颗粒。因此, 复合材料的透射率变低。

2015 年, Yu Zhao 等人[25]使用 TiO<sub>2</sub> 改性 SMS 作为光扩散剂, 解决了 CeO<sub>2</sub> 颗粒难分散的问题, 为提高聚碳酸酯(PC)复合材料的蓝光屏蔽性能, 采用原位沉淀法制备了 SMS-CeO<sub>2</sub> 颗粒。如图 7 所示, SMS 分散在乙醇中, 六水硝酸铈和六亚甲基胺溶解在去离子水中。将两种溶液混合, 并在 75℃ 下通过磁搅拌进行反应干燥和煅烧后, 合成了 CeO<sub>2</sub> 包覆的硅酸盐微球(SMS)核壳粒子(SMS-CeO<sub>2</sub>), CeO<sub>2</sub> 颗粒通过 Ce-O-Si 键均匀包覆在 SMS 上。实验结果确定了当填料质量分数为 0.6% 时, PC/SMS-CeO<sub>2</sub> 复合材料的透射率从未填料的 42.9% 提高到 63.2%, 而对复合材料的雾度没有明显影响。通过光谱分析表明, 在 450 nm 波长的蓝光下, PC/SMS-CeO<sub>2</sub> 复合材料的吸光度从 24% 增加到 50%, 而在 650 nm 波长的红光下, 吸光度保持不变。这些结果表明, PC/SMS-CeO<sub>2</sub> 复合材料具有蓝光屏蔽性能和更好的传输其他可见光的性能。

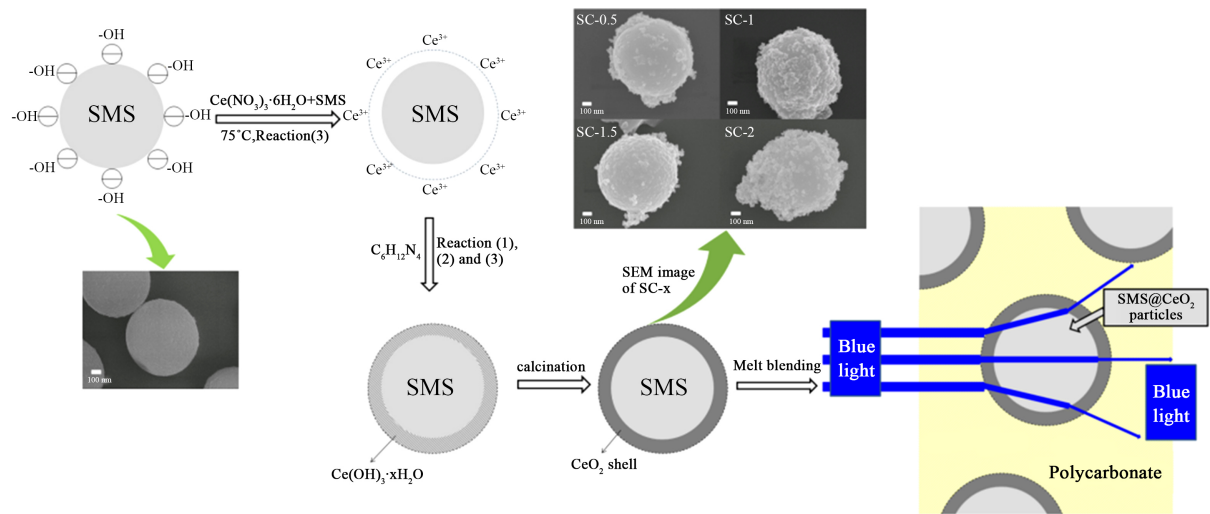


Figure 7. Illustration of synthesis and reaction procedure of SC samples  
图 7. SC 样品的合成和反应过程示意图

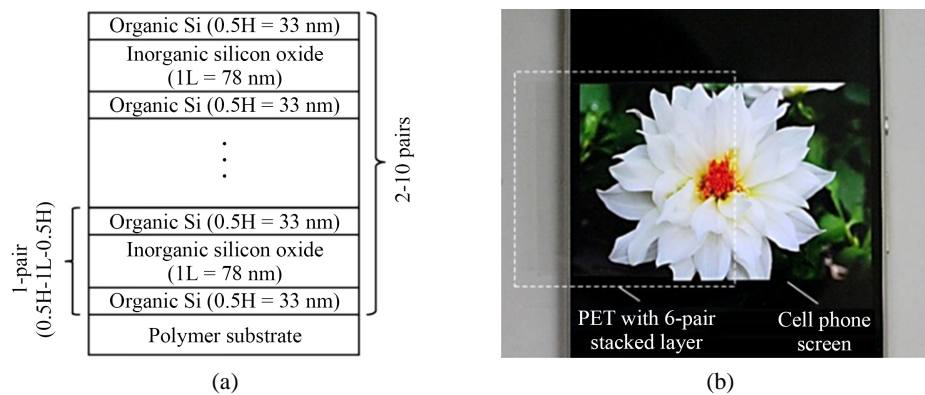


Figure 8. (a) Schematic structure of the organic silicon and the inorganic silicon oxide stacked films on PET; (b) Photographs of an image presented on a mobile phone screen partly covered by the PET with 6-pair stacked layers  
图 8. (a) 有机硅和无机氧化硅在 PET 上的叠层结构示意图; (b) 显示在手机屏幕上的图像照片, 部分被 PET 覆盖, 6 个堆叠

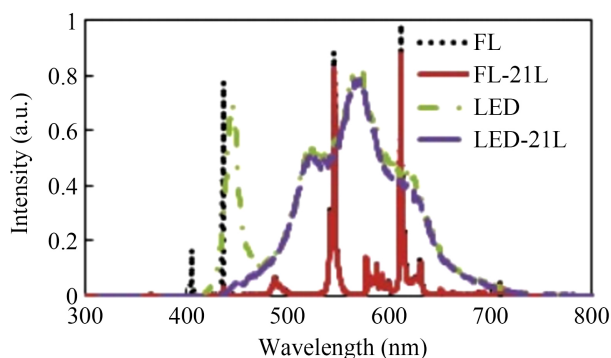
2016年, Chia-Hsun Hsu 等人[26]采用高密度感应耦合等离子体化学沉积系统在柔性聚合物衬底上制备了有机硅和无机氧化硅薄膜。将这两种薄膜堆叠为有机/无机/有机硅结构,如图8(a)所示,改变堆叠对数以研究其对蓝光屏蔽性能、硬度和疏水性的影响。实验结果表明,叠层对6是有利的,其蓝光透过率为58.4%,颜色失真可以忽略不计。实物图如图8(b)所示,由于整个结构中的氧化硅增厚,硬度随着堆叠对的增加而逐渐增加。此外,有机硅层可以为随后沉积的无机氧化硅提供高密度的成核位点,使无机氧化硅致密而坚硬[27] [28]。具有6对堆叠层的PET可具有4H的硬度,且所有堆叠层(无论堆叠对数如何)都可以具有高水接触角和高疏水性,有助于在光电子器件中的应用。

### 3.2. 反射型防蓝光膜

2015年,刘旭等人[29]设计了达到截止蓝光目的的膜系 $(0.5HL0.5H)^X$ ,并采用磁控溅射镀膜工艺,以 $TiO_2$ 、 $SiO_2$ 作为介质膜,通过优化工艺参数,在玻璃基片成功制备了具有截止蓝光特性的功能复合薄膜。并用紫外-可见光谱仪测试了复合膜选择性透过的特性,分析了影响截止蓝光镀膜玻璃性能的因素,镀膜玻璃的蓝光截止率达到98%,大于蓝光波长的光谱透射率达到90%。

2016年, Hui-Chul Ju 和 Yeon-Serk Yu [30]采用电子束热蒸发技术,以 $CeO_2$ 、 $MgF_2$ 为高低折射率材料,设计并制造一种改进型蓝光截止滤光片[31],以阻挡由于光谱范围而对人眼造成不利影响的蓝色波长区域。带有蓝光截止滤光片的白光LED的相对强度在435 nm至440 nm范围内平均降低了24.17%,在通带内降低了3.6%。平均显色指数下降1.375,最高中心亮度下降8.2%,色温下降约500 K。蓝光危害函数,蓝光危害在整个光谱中降低了19.35%,在435 nm和440 nm处分别降低了25%和22.15%。大大降低了白光LED对人眼有害的蓝光危害。研究结果可根据用途应用于室内光源和白光LED光源。

2018年, GISIA BEYDAGHYAN 等人[32]报告了溶胶凝胶法制备高光学质量、折射率可调薄膜的方法。使用溶胶法沉积构成各层干扰涂层,调节混合液中的 $TiO_2$ 和 $SiO_2$ 比率[33],以异丙酮代替乙醇,成功制造出一种在450 nm处具有锐利边缘的蓝光阻挡滤光片,薄膜由 $2 \times 21$ 叠层制成的蓝光阻挡边缘滤光片在阻带区域显示小于1%的透射率,而在可见光谱区域的其余部分保持超过80%的高透射率,综合明视透射率为89.7%。该薄膜已证明可有效隔绝蓝光,测试结果如图9所示。



**Figure 9.** Detected intensity of a fluorescent bulb (FL) and an LED source shown with the intensities when filtered by our sample MC2 (denoted by FL-21L and LED-21L, respectively)

**图 9.** 荧光灯泡(FL)和 LED 光源的检测强度显示为样本 MC2 过滤时的强度(分别由 FL-21L 和 LED-21L 表示)

2021年,王思雨等人[34]通过改进薄膜设计过程中目标值的设定方法,利用非线性玻尔兹曼函数拟合波通薄膜结构,获得非线性目标值,并进一步优化膜系中的膜层厚度使其满足光谱设计要求,改进的



非线性目标值结合计算机辅助优化实现了厚度最优解的选取，得到了斜率可高精度调控的全介质薄膜结构。以透明介质材料  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$  [35] [36]为高、低折射率材料，确定膜系初始结构为 $(0.5\text{HL}0.5\text{H})^S$ 。以优化后的膜系为  $\text{G}|28.16\text{H } 55.26\text{L } 45.28\text{H } 70.54\text{L } 37.63\text{H } 69.7\text{L } 43.49\text{H } 72.19\text{L } 40.15\text{H } 58.35\text{L } 43.33\text{H } 53.47\text{L } 10\text{H } 79.8\text{L}|A$ ，并利用电子束蒸发离子束辅助沉积方法制备了 14 层蓝光防护薄膜，实验结果如图 10 所示。所制备的单面光学多层薄膜在紫外 385~415 nm 的平均透过率小于 3.2%，高能蓝光 415~445 nm 的平均透过率小于 30.88%，有益蓝光 445~475 nm 的透过率大于 81.9%，在剩余可见光波段的透过率大于 95.5%。所制备的蓝光防护薄膜满足 GB/T38120-2019 要求。

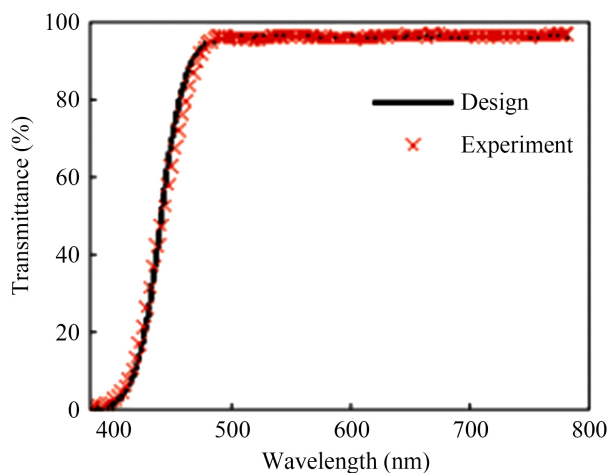
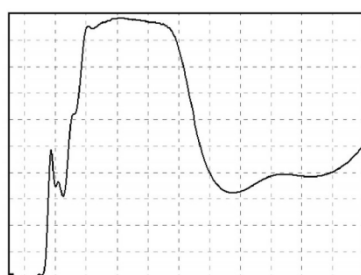


Figure 10. Transmission of the blue light protective thin film at 400~800 nm

图 10. 蓝光防护薄膜的 400~800 nm 透射曲线

同年，石澎等人[37]通过膜系设计软件 TFCalc 设计了多波段防护膜系，膜系为  $\text{G}|0.4319\text{H } 0.4722\text{L } 0.5832\text{H } 1.4563\text{L } 0.1364\text{H } 0.6447\text{L } 1.0135\text{H } 0.1615\text{L } 0.7964\text{H } 0.0560\text{L } 1.9454\text{H } 1.9073\text{L } 1.6535\text{H } 1.8040\text{L } 1.6912\text{H } 0.8546\text{L}|A$ ，并采用电子束蒸发的方式进行了镀制，以电阻蒸发的方式在镜片两侧加镀了防水膜，用分光光度计对镜片的光谱性能进行了测试。设计及测试结果如图 11 所示，研制的镀膜镜片在 250~360 nm 的紫外波段、400~430 nm 的蓝光波段、500~780 nm 的可见光波段、900~1400 nm 近红外波段平均透过率分别约为 0.5%、38%、96%、40%，水滴角可达 113°，能够有效减少紫外、蓝光、近红外对人眼的伤害，且镜片低偏色、可见光透过率高、防水效果好。



(a)

主要防护波段/nm	防护镜片镀膜实测透过率值/%	达标情况
250~360	小于 0.5	达标
400~450	38.5	达标
800~1400	42.3	达标

(b)

Figure 11. (a) Measured spectral transmittance curve of lens; (b) Goggles membrane system test through the average standard

图 11. (a) 镜片的实测光谱透过率曲线；(b) 防护镜膜系测试透过平均达标情况

### 3.3. 其他防蓝光技术

2017年,赵晟等人[38]采用溶胶凝胶法在浮法玻璃本体的富锡表面还原  $\text{AgNO}_3$  成 Ag 纳米粒子,在 3 mm 厚的普白玻璃含锡面镀制镶嵌 Ag 纳米粒子的氧化硅薄膜,在其非锡面镀制纤锌矿结构的氧化锌薄膜,利用氧化锌薄膜和 Ag 纳米粒子的散射作用,达到对紫外和短波蓝光有效阻隔吸收,从而获得具有紫外蓝光防护及润眼功能的镀膜玻璃。所制备双层膜玻璃样品表面的 Ag 纳米粒子[39]对蓝光波段有很好的选择性吸收,380~450 nm 最高阻隔率能达到 90.73%,同时 450~780 nm 可见光透过率达 77.8%,紫外光截止率为 98.83%。其蓝光透射比  $\tau_{sb} \leq 0.93 \tau_v$ , 满足相关标准要求。

同年,张忠义,徐日宏等人[40]利用稀土氧化物  $\text{Ho}_2\text{O}_3$  替代  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Nb}_2\text{O}_5$  等高折射率介质制备多层交替折射率膜层组合,采用中频反应磁控溅射法设计并制备防蓝光多层纳米薄膜,并研究其光学、力学及耐候性等性能。膜层对整个蓝光波段反射率达到 40% 左右,实现蓝光部分阻隔;600~780 nm 可见光波段透过率高达 98% 以上,反射率低于 1% 以下;光谱图如图 12 所示,使用功率(10~20) kW,40 kHz 的美国 AE 中频电源,采用孪生磁控阴极靶成功开发出具有防蓝光效果优质功能膜层,技术先进,工艺可靠,在直线式多箱体连续镀膜设备上实现了在线连镀一次成膜,并在实际生产中得到了应用。采用这种膜层设计即可满足对高能量蓝光的一定阻隔又能达到显示器元件在其它波长上透光量的增透效果。

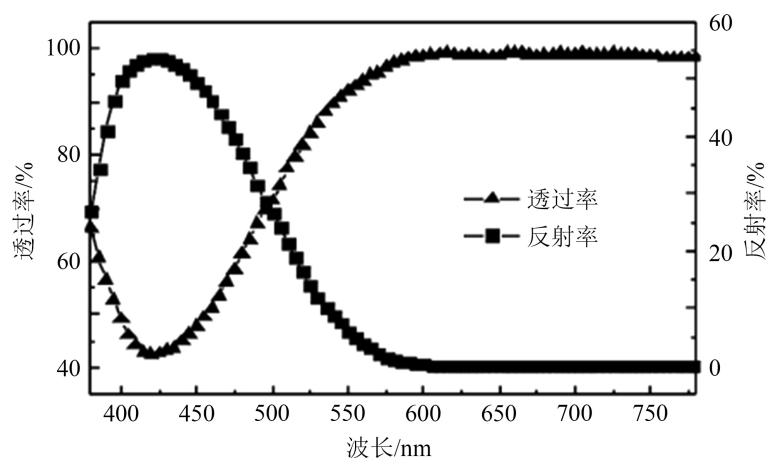
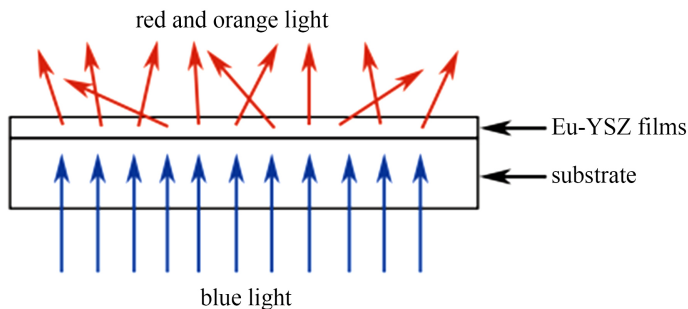


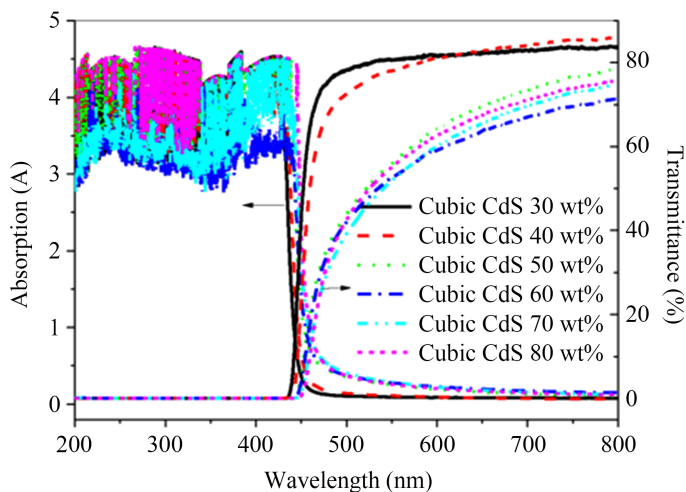
Figure 12. Transmission and reflectivity curves of anti blue nano films  
图 12. 防蓝光纳米薄膜透射和反射率曲线

2018年,莫忠等人[41]采用化学溶液沉积法,在石英玻璃上制备了  $\text{ZrO}_2:\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Y}^{3+}$  (Eu-YSZ) 转光膜,当掺杂比 92% $\text{ZrO}_2$ :5% $\text{Eu}_2\text{O}_3$ , 3% $\text{Y}_2\text{O}_3$  和 92% $\text{ZrO}_2$ :7% $\text{Eu}_2\text{O}_3$ , 1% $\text{Y}_2\text{O}_3$  时薄膜平均透过率大于 90%,从可见光到紫光波段,薄膜透过率逐渐减小,并截止于 210 nm 处。在波长为 396 nm 的紫外光和波长为 466 nm 的蓝光照射下, Eu-YSZ 薄膜可发射出发光中心在 593 nm 和 609 nm 附近的红光带,这归因于  $\text{Eu}^{3+}$  离子的能级跃迁,且薄膜在可见光区间具有较高的透过率。Eu-YSZ 转光膜结构如图 13 所示。

2020年, Xinxin Li 等人[42]以巯基乙醇为封端剂,采用溶剂热法合成了单立方和六方晶格的 CdS 量子点。结果表明,反应 10 min 后,合成了直径约为 2.5 nm 的六方型 CdS 量子点,在低温(80℃)下缓慢生长。更高的温度(160℃)有助于合成立方型 CdS,该 CdS 快速生长至约 4 nm 的最终尺寸。六方和立方 CdS 都显示出分离的能级结构,分别对应于 3.59 eV 和 3.1 eV 的带隙。将 CdS 量子点复合到基体中制备出透明的纳米复合薄膜,该薄膜可以保持 CdS 量子点的光学性质,当纳米复合薄膜含有 30% 的 CdS 时,光谱显示出较窄的蓝光吸收过渡带。如图 14 所示,从最大透射率的 5% 到 80% 的波长范围仅为 20 nm (440~460 nm)。



**Figure 13.** Structural diagram of Eu-YSZ light conversion films  
**图 13.** Eu-YSZ 转光膜的结构示意图



**Figure 14.** Absorption and transmission spectra of CdS nanocomposite films with different contents  
**图 14.** 不同含量的 CdS 纳米复合薄膜吸收光谱和透射光谱

#### 4. 蓝光防护膜的应用与现状

中国市场的防蓝光产品经历了从抗辐射 - 纯粹医用防蓝光 - 民用防蓝光的发展历程，其产品也日趋丰富，防护也更具针对性。目前，防蓝光膜研究领域比较有代表性的研究机构和公司有：德国 AHT 研究实验室、中国上海快基光电有限公司、中国广东深圳 JEAN MARC、德国普泰克公司、美国的 GUNNAR 公司、德国 PRISMA 公司、德国哈罗公司。其中，过滤有害蓝光最好的是德国 PRISMA 研制的防蓝光镜片，该镜片采用昂贵的 PC 镜片，由叶黄素、玉米黄质等结合光生物学光科技技术专制而成的光波吸收剂使镜片呈现黄色，可吸收 95% 的有害蓝光，保留有益蓝光，镜面透过率为 72%，由于滤掉大部分蓝光，镜面偏黄，色差较大。德国 AHT 研究实验室多次反复光学实验，采用 TAC 三醋酸纤维素镜片，实现过滤 40% 有害蓝光，且可见光波段 90% 透光率，低色差，找到有效防蓝光和舒适度平衡点，是目前显示效果最好的镜片。

#### 5. 总结与展望

在过去的几年里，人们越来越意识到屏蔽蓝光危害的重要性，不断增长的消费需求推动着防蓝光技术的创新与发展。本文根据近几年蓝光防护膜的研究成果，将蓝光防护膜进行分类叙述，由近几年的相关报道可知：3 种类型的防蓝光薄膜中，反射型防蓝光膜能起到较好的防蓝光效果，还具有高亮度和

底色偏,是目前国内外眼镜企业及激光防护领域所采取的主流技术路线,但制备过程繁琐,需要精确控制膜层厚度,难度较大。吸收型防蓝光膜通过不同类型蓝光吸收剂的搭配使用,可以提高防蓝光膜的透光效果、透光率和稳定性。制备方法简便,成本低,成膜质量好。目前已知的吸收剂多具有毒性,以及可见光透射率不高阻碍了它们的广泛应用,但随着安全无毒的新材料的开发,吸收型蓝光防护膜或将成为蓝光防护领域的研究热点。其他防蓝光技术中 Chia-Hsun Hsu 等人通过改变膜层表面微结构实现对蓝光的限制,制备的 6 对有机硅和无机硅堆叠层实现了最佳屏幕显示效果。但工艺难度较高,现阶段较难普及,防蓝光膜技术有望平衡防蓝光效果与成本,成为近年来的研究热点,虽然应用防蓝光技术可以降低蓝光危害,但过度使用显示器仍会导致一些健康问题。因此,遵循关于缓解眼部疲劳的安全和健康建议很有必要。

## 基金项目

项目资助信息:海南省院士创新平台专项(YSPTZX202034, YSPTZX202127),海南省重点研发项目(ZDYF2020217, ZDYF2020020, ZDYF2020036),海南省高等学校科学研究项目(Hnky2020-24, Hnjg2021ZD-22, Hnky2020ZD-12),海南省自然科学基金(2019RC190, 2019RC192, 120MS031),海南省重大科技计划项目(ZDKJ2019005),国家自然科学基金项目(62174046, 62064004, 61964007, 61864002)和大学生创新创业开放基金(202111658021X, 202111658022X, 202111658023X, 202111658013)。

## 参考文献

- [1] Beydaghyan, G., Ajjou, A.N. and Ashrit, P.V. (2018) Fabrication of Blue Light-Blocking Optical Interference Coatings by the Solgel Method. *Applied Optics*, **57**, 428-431. <https://doi.org/10.1364/AO.57.000428>
- [2] 中国机械工业联合会. GB/T30117.2-2013 灯和灯系统的光生物安全第 2 部分: 非激光光辐射安全相关的制造要求指南[S], 2013.
- [3] BSI Standards Publication, PD IEC-TR 62741-2-2009 2009 Photobiological Safety of Lamps and Lamp Systems—Part 2: Guidance on Manufacturing Requirements Relating to Non-Laser Optical Radiation Safety.
- [4] Niwano, Y., Iwasawa, A., Tsubota, K., Ayaki, M., Negishi, K., *et al.* (2019) Protective Effects of Blue Light-Blocking Shades on Phototoxicity in Human Ocular Surface Cells. *BMJ Open Ophthalmology*, **10**, Article No. 1136. <https://doi.org/10.1136/bmjophth-2018-000217>
- [5] Noell, W.K. (1980) Possible Mechanisms of Photoreceptor Damage by Light in Mammalian Eyes. *Vision Research*, **20**, 1163-1171. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(80\)90055-3](https://doi.org/10.1016/0042-6989(80)90055-3)
- [6] Waxler, M. and Hitchins, V.M. (1986) *Optical Radiation and Visual Health*. CRC Press, Boca Raton, 103-124.
- [7] 唐小军, 韩世杨, 等. 镜片的蓝光辐射防护评价及其标准研究[J]. 中国眼镜科技杂志, 2017(7): 125-127.
- [8] 李彩翠, 王增敏. 防蓝光技术发展现状[J]. 信息记录材料, 2019, 20(9): 11-13.
- [9] 任远飞, 等. 一种防蓝光的光学薄膜及其应用[P]. 中国, vCN201510257196.7. 2015-05-19.
- [10] 王清, 等. 一种液晶显示器用低蓝光光学薄膜及其制备方法[P]. 中国, CN2017110949112.5. 2017-10-12.
- [11] 姚永新, 王龙梅. 触摸屏用保护膜光学性能评价研究[J]. 玻璃搪瓷与眼镜, 2021, 49(9): 1-4.
- [12] 施克炜, 等. 一种蓝光转换扩散膜[P]. 中国, CN201610395596.9. 2016-06-06.
- [13] Su, K.S., Tao, Y.Y., Zhang, J., *et al.* (2021) Highly Transparent Plasticized PVC Composite Film with Ideal Ultraviolet/High-Energy Short-Wavelength Blue Light Shielding. *Materials Science*, **56**, 17353-17367. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06408-w>
- [14] Pridmore, R.W. (2021) Complementary Colors: A Literature Review. *Color Research and Application*, **46**, 482-488. <https://doi.org/10.1002/col.22576>
- [15] Barman, B.K., Handegård, Ø.S., *et al.* (2022) Carbon Dot/Cellulose-Based Transparent Films for Efficient UV and High-Energy Blue Light Screening. *ACS Sustainable Chemistry Engineering*, **44**, 9. <https://doi.org/10.1021/acsschemeng.1c02791>
- [16] Han, Y.Q., Huang, X.L., *et al.* (2022) Seeking Eye Protection from Biomass: Carbon Dot-Based Optical Blocking

- Films with Adjustable Levels of Blue Light Blocking. *Journal of Colloid and Interface Science*, **617**, 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.02.115>
- [17] Han, C.C., Wang, F., Gao, C., Liu, P., Ding, Y.F., Zhang, S.M., *et al.* (2015) Transparent Epoxy-ZnO/CdS Nanocomposites with Tunable UV and Blue Light-Shielding Capabilities. *Journal of Materials Chemistry C*, **3**, 5065. <https://doi.org/10.1039/C4TC02880E>
- [18] Huang, G.H., Huang, Y.P., Xu, W., Yao, Q.H., Liu, X.F., Ding, C.F., Chen, X., *et al.* (2019) Cesium Lead Halide Perovskite Nanocrystals for Ultraviolet and Blue Light Blocking. *Chinese Chemical Letters*, **30**, 1021-1023. <https://doi.org/10.1016/j.ccl.2018.12.028>
- [19] Yang, Y., Li, Y., Yin, L.Q., Chen, L.L., Zhang, J.H., *et al.* (2019) Low Cost ZnO/CdO Thin Films Effectively Reduce Blue Light-Induced Damage to RPE Cells by Display and Lighting Devices. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, **676**, 72-82. <https://doi.org/10.1080/15421406.2019.1596106>
- [20] Yang, Y.N., Ju, Y.H., Li, Y., Yin, L.Q., Chen, L.L., Gu, P., *et al.* (2020) Transparent Nanostructured BiVO<sub>4</sub> Double Films with Blue Light Shielding Capabilities to Prevent Damage to ARPE-19 Cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 20797-20805. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b22465>
- [21] Su, J., Bai, Z., Huang, B., Quan, X., Chen, G., *et al.* (2016) Unique Three Dimensional Architecture Using a Metal-Free Semiconductor CrossLinked Bismuth Vanadate for Efficient Photoelectrochemical Water Oxidation. *Nano Energy*, **24**, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.04.032>
- [22] Song, J., Cha, J., Lee, M.G., Jeong, H.W., Seo, S., *et al.* (2017) Template-Engineered Epitaxial BiVO<sub>4</sub> Photoanodes for Efficient Solar Water Splitting. *Journal of Materials Chemistry A*, **5**, 18831-18838. <https://doi.org/10.1039/C7TA04695B>
- [23] Park, Y., McDonald, K.J., Choi, K.S., *et al.* (2013) Progress in Bismuth Vanadate Photoanodes for Use in Solar Water Oxidation. *Chemical Society Reviews*, **42**, 2321-2337. <https://doi.org/10.1039/C2CS35260E>
- [24] Liu, K.Q., Kuang, C.X., Zhong, M.Q., Shi, Y.Q. and Chen, F. (2013) Synthesis, Characterization and UV-Shielding Property of Polystyrene-Embedded CeO<sub>2</sub> Nanoparticles. *Optical Materials*, **35**, 2710-2715. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2013.08.012>
- [25] Zhao, Y., Shi, L.Y., *et al.* (2015) Enhanced Blue Light Shielding Property of Light-Diffusion Polycarbonate Composites by CeO<sub>2</sub>-Coated Silicate Microspheres. *Functional Materials Letters*, **20**, 34-36. <https://doi.org/10.1142/S1793604715500745>
- [26] Hsu, C.-H., Liu, T.-X., Hsieh, I.-C., *et al.* (2016) Blue-Light Shielding, Hard and Hydrophobic Inorganic and Organic Silicon Stack-Films Prepared on Flexible Substrates. *Thin Solid Films*, **3**, 55. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.03.055>
- [27] Persano, L., Carro, P.D. and Pisignano, D. (2012) Reversible Wettability of Electron-Beam Deposited Indium-Tin-Oxide Driven by ns-UV Irradiation. *Applied Physics Letters*, **100**, Article ID: 151607. <https://doi.org/10.1063/1.3701590>
- [28] Son, Y.H., Lee, J.H. and Kim, H.J. (2003) Excimer Laser Crystallization of a-ITO Thin Film Deposited on Plastics. *Journal of the Korean Physical Society*, **42**, 814-816.
- [29] 刘旭, 赵青南, 罗乐平, 等. 截止蓝光镀膜玻璃的溅射法制备与性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2015(34): 128-134.
- [30] Ju, H.-C. and Yu, Y.-S. (2016) A Study on Blue Light Cut-Off Filter for White Light LED. *Indian Journal of Science and Technology*, **24**, 1-6. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i24/96019>
- [31] Baumeister, P.W. (2004) Optical Coating Technology. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, 9-11. <https://doi.org/10.1117/3.548071>
- [32] Beydaghyan, G., Ajjou, A.N., *et al.* (2018) Fabrication of Blue Light-Blocking Optical Interference Coatings by the Solgel Method. *Applied Optics*, **57**, 22. <https://doi.org/10.1364/AO.57.000428>
- [33] Que, W., Sun, Z., Zhou, Y., Lam, Y.L., Chan, Y.C., *et al.* (2000) Optical and Mechanical Properties of TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/Organically Modified Silane Composite Films Prepared by Sol-Gel Processing. *Thin Solid Films*, **359**, 177-183. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(99\)00746-4](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(99)00746-4)
- [34] 王雨思, 周贤建, 李青原, 等. 截止斜率可控的蓝光防护光学薄膜[J]. 中国光学, 2021, 14(3): 544-551.
- [35] 袁文佳, 沈伟东, 郑晓雯, 等. 离子束溅射制备 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 薄膜的光学、力学特性和微结构[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 356-363.
- [36] Fang, M., Hu, D.F. and Shao, J.D. (2010) Evolution of Stress in Evaporated Silicon Dioxide Thin Films. *Chinese Optics Letters*, **8**, 119-122. <https://doi.org/10.3788/COL20100801.0119>
- [37] 石澎, 王丽荣, 张鸿佳, 曹秀锋, 等. 多波段防护镜光学薄膜的研制[J]. 光电技术应用, 2021, 36(1): 39-42.
- [38] 赵晟, 贺建雄, 等. 溶胶-凝胶法制备紫外及蓝光双截止润膜镀膜玻璃[J]. 人工晶体学报, 2017, 46(12): 2509-2513.
- [39] 李先丽. DNA 纳米环及其金属化研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2014.

- 
- [40] 张忠义, 徐日达, 张振华, 等. 防蓝光纳米薄膜的磁控溅射制备技术及性能研究[J]. 真空, 2017, 54(5): 35-38.
- [41] 莫忠, 梁立容.  $\text{ZrO}_2\text{:Eu}^{3+}, \text{Y}^{3+}$  转光膜的制备及其在蓝光危害防护中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 444-448.
- [42] Li, X.X. and Xu, J.K. (2020) Synthesis of CdS QDs with Single Cubic and Hexagonal Lattice for Blue-Light Blocking Nanocomposite Films with a Narrow Absorbing Transitional Band. *Materials Today Communications*, **24**, 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101108>