

光谱选择性窗口纳米薄膜的光学常数

Winston T. Ireeta¹, Edward Bwayo^{1,2*}, Daniel Mukiibi¹, Denis Okello¹, Willy Okullo¹, Robert Lugolole¹

¹Department of Physics, School of Physical Sciences, College of Natural Sciences, Makerere University, Kampala, Uganda

²Department of Physics, Faculty of Science, Muni University, Arua, Uganda

【摘要】 本工作对沉积角度对光学选择窗口光学常数的影响进行了光谱分析。将 ZnS/Ag 纳米结构涂层沉积在 0° 至 60° 的玻璃基板上。测量的透射率随着可见光区银纳米薄膜沉积角度的增加而增加，但随着红外区银沉积量的增加而降低。透射率随着可见光区硫化锌沉积角度的增加而降低。尽管如此，它还是随着红外区硫化锌沉积角度的增加而增加。反射率随着可见光区银纳米颗粒沉积角度的增加而降低，但随着硫化锌沉积角度的增加而降低。有效折射率从可见光谱中的 3.25 增加到红外光谱中的 6.2。可见光波长下的有效折射率值较低意味着纳米薄膜对可见光是透明的。消光系数从波长 400nm 处的平均 0.2 向红外光谱带方向增加。ZnS 沉积量的增加对能带隙的影响不显著。然而，银沉积角度的增加使纳米薄膜的能带从 3.52 eV 增加到 3.99 eV。

【关键词】 沉积角度；透射率；反射率；折射率；消光系数；能带隙

【基金项目】 乌干达独立奖学金信托基金委员会、教育和体育部以及瑞典国际合作署（SIDA）通过乌普萨拉大学国际科学计划（ISP）提供财政和物质支持

【收稿日期】 2025 年 7 月 3 日

【出刊日期】 2025 年 8 月 5 日

【DOI】 10.12208/j.op.20250001

Optical constants of nanofilms for spectrally selective windows

Winston T. Ireeta¹, Edward Bwayo^{1,2*}, Daniel Mukiibi¹, Denis Okello¹, Willy Okullo¹, Robert Lugolole¹

¹Department of Physics, School of Physical Sciences, College of Natural Sciences, Makerere University, Kampala, Uganda

²Department of Physics, Faculty of Science, Muni University, Arua, Uganda

【Abstract】 In this work, a spectral analysis of the effect of deposition angle on the optical constants for optically selective windows was carried out. The coatings of ZnS/Ag nanostructures were deposited on glass substrates from 0° to 60°. The measured transmittance increased with an increase in the deposition angle of silver nanofilms in the visible region but decreased with an increase in the deposition of silver in the infrared region. The transmittance decreased with an increase in the deposition angle of zinc sulfide in the visible region. Still, it increased with an increase in the deposition angle of zinc sulfide in the infrared region. The reflectance decreased with an increase in the deposition angle of silver nanoparticles in the visible region but decreased with an increase in the deposition angle of zinc sulfide. The effective refractive index increased from 3.25 in the visible spectrum to 6.2 in the infrared spectrum. The low values of the effective refractive index at visible wavelengths imply that the nanofilms were transparent to visible light. The extinction coefficient increased from an average of 0.2 at a wavelength of 400nm toward the infrared spectral band. The increase in deposition of ZnS did not significantly affect the energy band gap. However, the increase in the deposition angle of silver increased the energy band of the nanofilms from 3.52 to 3.99 eV.

【Keywords】 Deposition angle; Transmittance; Reflectance; Refractive index; Extinction coefficient; Energy band gap

*通讯作者: Edward Bwayo

注: 本文于 2024 年发表在 OAJRC Material Science 期刊 6 卷 1 期, 为其授权翻译版本。

1 简介

建筑物窗户和其他开窗装置的性能^[1]在控制建筑物内部热量积聚速度方面起着重要作用。尽管已经制造出一些装置（例如电子空调）来调节室内温度^[2,3]，但最好采用其他成本较低的装置来减少红外热辐射进入建筑物。因此，应调整门窗玻璃的光谱和光学特性，以阻挡热能红外辐射，同时允许足够的可见光进入^[3-7]。

物理气相沉积过程中，基底上薄膜的微观结构取决于入射蒸汽通量在基底上的方向或倾斜度。当蒸汽通量垂直入射时，薄膜结构相对均匀^[8,9]。当沉积角度较大（即倾斜）时，薄膜的均匀性往往会被破坏。这是因为在倾斜沉积过程中，粒子到达基底表面的时间不同^[10]。最初附着的分子往往会屏蔽前面的蒸汽分子，避免其直接粘附到基底表面。

蒸汽方向倾斜的纳米柱的形成^[11-13]。纳米柱形成的多孔微结构与法向入射形成的薄膜不同。纳米柱的倾斜度会影响材料的密度、光谱和光学特性以及电学特性^[14-17]。

当电磁场与介电材料^[18]相互作用时，会发生电荷极化，其极化程度取决于场的强度以及材料固有的复电极化率和折射率。然而，材料的折射率直接影响光学界面的光程长度、相位和反射特性。垂直入射时光学界面的反射率定义如下式（1）。

$$R = \left(\frac{n_p - n_m}{n_p + n_m} \right)^2 \quad (1)$$

其中 R 是反射率， n_p 是为基底的折射率， n_m 为入射介质的折射率。折射率 n 与消光系数 k 的关系表达式为：

$$\bar{n} = n - ik \quad (2)$$

$\bar{n}$ 表示材料的复折射率。折射率 n 可以根据测量的反射率数据通过公式 3 计算得出，如下所示^[19-20]：

$$n = \frac{(1 + \sqrt{R})}{(1 - \sqrt{R})} \quad (3)$$

电磁波在材料中传输时，会发生吸收，导致强度损失。这种吸收损失用材料的消光系数来量化，该系数取决于^[20]吸收系数 α 和波长 λ ，因此：

$$k = \frac{\alpha \lambda}{4\pi} \quad (4)$$

其中，公式（4）中的吸收系数为：

$$\alpha = 2.3026 \frac{A}{d} \quad (5)$$

其中 A 是计算出的吸光度， d 是薄膜厚度。

在沉积极薄的金属纳米颗粒^[20]（例如银（Ag））的过程中，纳米颗粒倾向于渗透到介电材料中，形成混合光学常数。因此，银纳米颗粒与硫化锌（ZnS）融合，形成具有独特光学特性的混合 ZnS/Ag 多层结构^[21]。

当光能入射到物质上时，它会被反射、透射或吸收。被吸收的光量子会触发价电子的激发。高能价电子会从价带跨越能带隙移动到导带。能带隙的大小有助于解释半导体的光学特性和化学活性。然而，能带隙是根据 Tauc 方法^[22,23]提出的公式（6）确定的：

$$(\alpha h\nu) = B (h\nu - E_g)^n \quad (6)$$

常数 h 、 ν 分别 E_g 代表普朗克常数、光子频率和带隙能量。 B 也是一个常数，由 Tauc 图沿直线部分的斜率决定。因子 n 取决于电子跃迁的性质，对于直接跃迁带隙和间接跃迁带隙，分别等于 1/2 或 2。吸收系数 α 是根据 ZnS/Ag 的透射率 T 和反射率 R 值^[24]计算得出的，计算公式如下：

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{(1-R)^2}{T} \right) \quad (7)$$

其中 d 是薄膜厚度。

当价带顶的电子吸收光能时，电子能量会增加，并被推进到导带^[25]。在跨越能隙的跃迁过程中，价带和导带中的电子态密度都会向能隙方向尾移。这种现象是由于局部尾态的存在产生的无序性造成的，而这种尾态源于薄膜微观结构中的缺陷^[24,26]。此外，当导带中的电子受到外部电磁场的作用时，它们会吸收能量，表面电子会产生电振荡。这些振荡导致金属表面形成局部表面等离子体^[27]。

表面等离子体的激发会导致金属表面电荷极化，在共振点处，入射光会被强烈吸收^[28,29]。然而，表面等离子体效应受多种因素的影响，包括入射辐射频率、薄膜厚度以及介质基底表面原子岛的形成^[30]。因此，本文定量分析了沉积角度对斜沉积 ZnS/Ag 纳米薄膜光谱和光学常数的影响。

2 材料和方法

将玻璃片固定在扩散真空镀膜机（Edwards AUTO 306）内距离耐火舟 11cm 的旋转支架上。基片支架和玻璃片与水平面成 θ 角，使蒸汽倾斜入射。垂直于基体法线^[31]。将银金属线（纯度 99.99%）置

于耐高温钼舟中,在真空压力为 2.5×10^{-5} mBars 的条件下加热,并沉积在载玻片基体上。以不同的角度 ($\theta=0^\circ$ 、 30° 和 60°) 沉积三组厚度为 10nm 的银膜样品。

硫化锌(纯度 99.99%)的沉积是通过将硫化锌晶体置于钼舟中加热来实现的。钼舟上装有源盖,以减少硫化锌蒸气的扩散。硫化锌被加热并以入射角 $\theta=0^\circ$ 、 30° 和 60° 沉积在预先涂有银膜的玻璃片上,形成厚度为 10 纳米的薄膜,形成 ZnS/Ag/玻璃多层膜体系。在真空室内,针对每种材料分别校准厚度监测器。薄膜厚度由连接到扩散室内石英晶体监测系统的厚度监测器测量^[32]。

使用紫外/可见/近红外光谱仪(Perkin Elmer Lambda 19)和 UV-WinLab 软件^[33]研究了样品的光谱反射率和透射率。该仪器为双光束仪器,覆盖紫外、可见和近红外光谱波长。使用一块干净的基底进行基线测量。反射率是在 15° 入射角下测量的。将多层膜与光学系统耦合,在 250~2500nm 的波长范围内,以垂直入射角测量多层膜的透射率^[15,34]。折射率 n 由测得的反射率数据通过公式(3)计算得出。能带隙采用 Tauc 法^[22,35]根据公式(7)确定。

3 结果与讨论

3.1 光谱测量

在后面的章节中,ZnS/Ag 纳米薄膜前括号内的数字表示薄膜厚度,而 ZnS 和 Ag 后括号内的数字表示相应纳米材料的沉积角度。

3.1.1 透射率

本节如图 1 所示,展示了沉积角度对 ZnS/Ag 纳米结构光学透射率的影响,其中 Ag 纳米薄膜以不同角度沉积在 ZnS 上。图 1(a)中,测量了 ZnS(0)/Ag(0)、ZnS(0)/Ag(30)和 ZnS(0)/Ag(60)纳米结构的透射率,在可见光谱中分别达到 54.9%、61.3%和 53.9%的峰值。透射率值表明,Ag 的倾斜沉积提高了可见光区的光学透射率^[36]。随后,透射率从可见光区向红外光谱波长方向下降。

当 ZnS 沉积角度从 0° 增加到 30° 图 1(b)可见光区的透射率略有下降,ZnS(30)/Ag(0)、ZnS(30)/Ag(30)和 ZnS(30)/Ag(60)的可见光区透射率峰值分别达到 55.8%、48.6%和 58.4%。在红外区,透射率随 Ag 沉积角度的增加而增加,但由于 30° 的沉积角度,红外区的透射率总体上有所增加。

ZnS 的斜沉积角度。

与图 1(a)中红外区域获得的透射率值相比,红外区域的透射率值略高且更加分散。因此,ZnS 降低了可见光区域的透射率,但提高了红外波长范围内高能电磁辐射的透射率^[37]。

当 ZnS 的沉积角度进一步提高到 60° (图 1(c))时,与 ZnS(30°)/Ag 纳米结构相比,可见光区的透射率进一步降低。对于 ZnS(60)/Ag(0)、ZnS(60)/Ag(60)和 ZnS(60)/Ag(60),可见光谱中的透射峰分别为 54.9%、47.3%和 50.1%。ZnS/Ag 纳米多层膜在可见波长下的高透射率是由于 ZnS 的高折射率增强了入射电磁辐射的抗反射性能^[36,38]。在红外区,在约 $\lambda=800$ nm 处,透射率<20%,但随着波长的增加而进一步迅速下降。

因此,增加 ZnS 的沉积角度会降低可见光区的透射率,但由于 ZnS 的沉积角度较大,因此会增加红外区的透射率。这一观察结果的物理意义在于,斜角沉积对可见光区的透射率有负贡献,而对红外区的透射率有正贡献。为了控制太阳热能并提高建筑围护结构的可见度,ZnS 的斜沉积应以接近法线或与基底法线成很小的角度进行^[34,39]。

3.1.2 反射率

对以不同沉积角度制备的样品进行了分光光度法反射率测量分析。图 2(a)中,正常沉积的 ZnS(0)/Ag(0)纳米薄膜的反射率在电磁波谱可见光范围(400-800nm)内介于 5%至 35%之间,随后在红外区域($\lambda=810$ nm 左右)反射率上升至 41.1%。在所有样品的红外区域均观察到显著的干涉效应。这些效应是在 800-2200nm 范围内的红外区域观察到的^[40]。当波长接近可见光谱的上缘时,干涉效应消失或减弱^[6,41]。

当薄膜沉积在 ZnS(0)/Ag(30)表面上时,(10nm) ZnS(0)/Ag(30)在可见光区(波长 400-800nm)的反射率为 13%至 31%。红外区的反射率最大为 50.5%。反射率低的原因是 ZnS/Ag 纳米结构中的光吸收增加。此外,沉积角度的增加会增加薄膜的不连续性和粗糙度,这反过来又会由于纳米结构中银岛的聚集而增加光吸收^[42,43]。相消干涉增强了光吸收和透射率,但抑制了电磁波的反射率^[44]。干涉效应随银纳米薄膜的沉积角度而交替出现。这对近红外辐射的反射率有显著的影响。

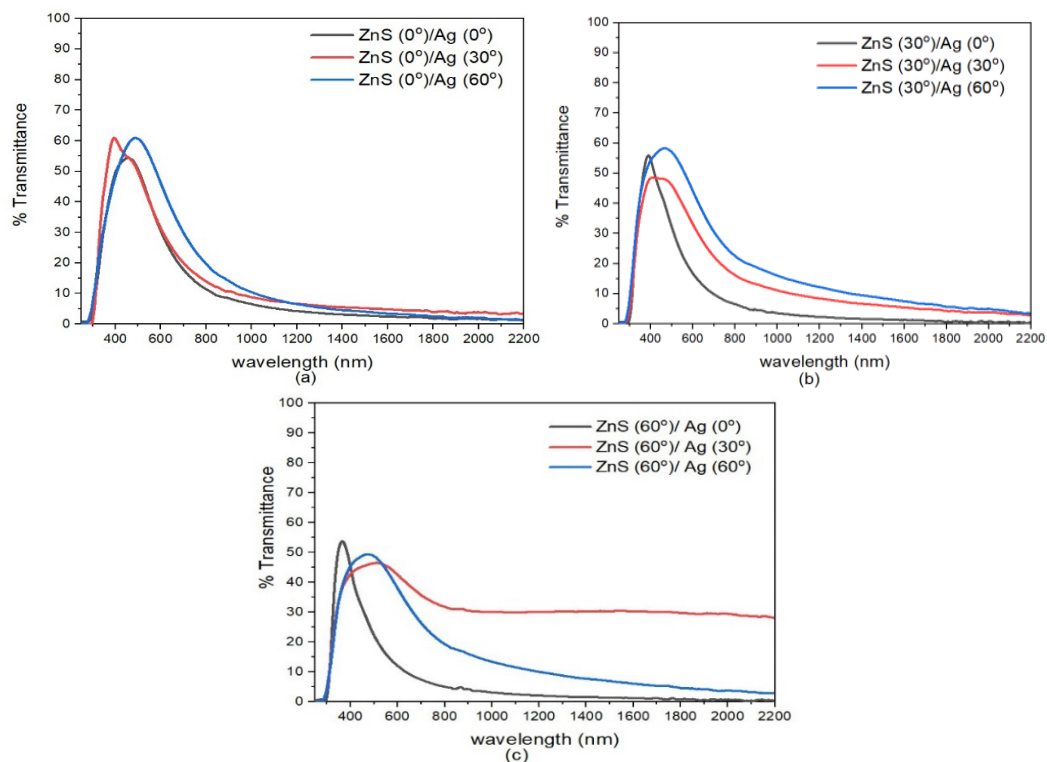


图1 ZnS/Ag 纳米薄膜的沉积角度与透射率的变化关系：(a) ZnS (0°) 在不同沉积角度下涂覆 Ag；(b) ZnS (30°) 在不同沉积角度下涂覆 Ag；(c) ZnS (60°) 在不同沉积角度下涂覆 Ag

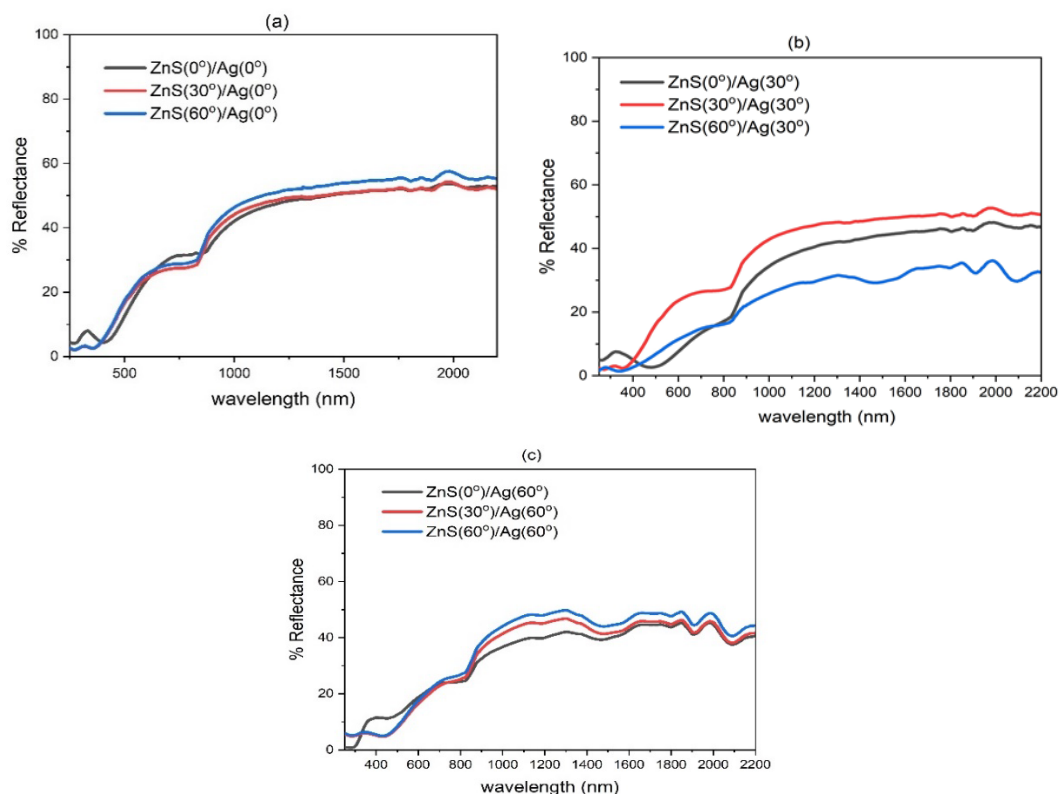


图2 ZnS/Ag 纳米结构的反射光谱：(a) 当沉积角度固定为 0° 时，ZnS 的沉积角度从 0° 增加到 60° ；(b) 当沉积角度固定为 0° 时，ZnS 的沉积角度从 0° 增加到 60° 。至 60° 当沉积角度固定为 30° 时；(c) ZnS 的沉积角度从 0° 增加到至 60° 当沉积角度固定为 60° 时

随着 ZnS/Ag 沉积角度从 ZnS (0°) /Ag (30°) 进一步增加到 ZnS (0°) /Ag (60°), 反射率值进一步下降。然而, 多层膜的反射率角度响应对银金属膜沉积角度的微小增加并不十分敏感。反射率的降低归因于原子遮蔽效应, 该效应产生了银原子晶粒尺寸减小的区域^[44]。这导致银纳米薄膜出现缺陷, 从而产生了晶粒边界, 但反过来又增加了薄膜的透射率并降低了反射率。随着沉积角度的增加, 晶粒边界的数量增加, 由于入射光的散射, 非常薄的薄膜的镜面反射率会降低。波长 $\lambda > 800\text{nm}$ 处反射率的增加与类德鲁德吸收的增加有关, 其中金属相中的空隙数量增加^[3,44]。

图 2 (a)、2 (b) 和 2 (c) 中红外区域的干涉效应在 ZnS (60°) /Ag (60°) 纳米薄膜中更为强烈。这些效应是由于空气-ZnS、ZnS-Ag 和 Ag-玻璃界面等不同光学界面的反射所致^[45-47]。在波长约 1300nm 的红外区域, 反射率进一步上升至约 54%。对于低于 400nm 的波长, 样品的反射率存在干涉最小值。这些效应是由于锌和银原子的带间电子跃迁导致吸收增加所致^[41,48]。

3.2 光学常数

根据测量的反射率数据, 按照公式 (3) 计算纳米结构 ZnS/Ag 纳米薄膜的折射率^[18,49]。材料的消光系数 (公式 4) 由吸收系数确定, 而吸收系数则由 $\alpha = 2.3026 \frac{A}{d}$ 电磁波在材料中传播时的吸光度 A 计算得出^[16]。

3.2.1 沉积角度对折射率和消光系数的影响

如图 3、4 和 5 所示, 观察到 (10nm) ZnS/Ag 纳米薄膜的有效折射率随波长增加而增加, 但在 700-800nm 的波长范围内趋于保持不变。可见光区的折射率值低于红外区。可见光区的折射率较低是由于强光吸收和量子限制效应造成的^[15,50]。当波长超过 $\lambda = 800\text{nm}$ 时, 有效折射率显著增加, 并在近红外光谱区观察到最大峰值。

下沉积时对于不同的 ZnS 沉积角度, 即 ZnS/Ag (0°), 在波长 $\lambda = 1000\text{nm}$ 处测量的折射率分别为 0°、30° 和 60° 时的 $n = 2.3$ 、5.0 和 5.4, 这些折射率值对于红外辐射穿过纳米薄膜而言非常高。进一步增加 Ag 的沉积角度至 30°, 即 ZnS (30°) /Ag (0°) 纳米结构的 ZnS/Ag (30°), 在波长 $\lambda = 1000\text{nm}$ 处测得的不同 ZnS 沉积角度下的折射率分别为 $n = 3.7$ 、4.8

和 6.9 (0°、30° 和 60°)。这些折射率值对于红外辐射穿过纳米薄膜来说非常高^[51,52]。

当 Ag 的沉积角度增加到 60° 时, 即 ZnS/Ag (60°) 纳米薄膜, 在不同 ZnS 沉积角度下测量的波长 $\lambda = 1000\text{nm}$ 下的折射率值分别为 ZnS (0°) /Ag (0°)、ZnS (30°) /Ag (0°) 和 ZnS (60°) /Ag (0°) 的 $n = 4.1$ 、4.7 和 5.0。然而, 10nm ZnS/Ag 的有效折射率随着 ZnS 沉积角度的增加而增加, 无论是在可见光和红外区域^[39,53]。有效消光系数通过公式 (4) 和 (5) 进行评估。观察到有效消光系数从波长 $\lambda = 250\text{nm}$ 减小到约 $\lambda = 380\text{nm}$ 处的较小值。Jones^[32]在用椭圆偏振光谱法测量金属薄膜折射率时也报告了这一观察结果。当波长超过 $\lambda = 400\text{nm}$ 时, 有效消光系数呈指数增长, Urbach 尾部在 400nm 处收敛。这是由于可见光和红外光谱区域对热辐射的强烈吸收所致^[52,54]。

当银的沉积角度从 0° 增加到 30° 时, 有效折射率值普遍下降, 而有效消光系数值则上升 (图 4 (b))。这种趋势在可见光和红外光谱范围内均有观察到。红外区域有效消光系数的下降是由于光学透射率增加和反射率降低所致^[55]。

进一步增加银的沉积角度, 有效折射率降低 (图 5 (a)), 但吸收带边缘处的有效消光系数增加 (图 5 (b))。这是由于红外区域的透射率逐渐增加所致。可见光区域的有效消光系数较低, 表明吸收损失较低。然而, 红外区域的有效消光系数较高, 意味着红外光谱区域内热能损失较大^[53]。

可见光波长范围内的有效折射率较低, 表明纳米薄膜对可见光透明。红外区域有效折射率的增加和吸收带边缘有效消光系数的降低可以用较高的光吸收或散射来解释^[56]。有效消光系数随沉积角度的增加而增加, 表明穿过 ZnS/Ag 纳米薄膜的光由于能量损失而发生了衰减。这可以通过多种损耗机制来解释, 例如声子的产生、散射、晶粒尺寸以及密度较低的层结构 (其密度随沉积量的增加而降低)^[43],^[57,58]。

3.3 能带隙

纳米薄膜的能隙由吸收系数 (α) 确定, 公式 (5) 由 ZnS/Ag 薄膜的透射率 (T) 计算得出^[59]。

3.3.1 沉积角度对 ZnS/Ag 纳米薄膜带隙能量的影响

使用公式 7, 图 6 显示了 $(\alpha h\nu)^2$ 与光子能量 $h\nu$

的关系图。从图中可以看出，线性部分沿着 $h\nu$ 向右倾斜轴具有非常陡的斜率。图 6 (a)、(b) 和 (c) 中能带隙的增加是由于沉积角度增加引起的限制效应的增强^[60]。图 6 (a) 中 ZnS (0°) /Ag (0°)、ZnS

(30°) /Ag (0°) 和 ZnS (60°) /Ag (0°) 的能带隙分别为 3.62eV、3.68eV 和 3.77eV。在 Bartek 等人的另一项研究中^[22]观察到，由于带隙能量中的缺陷，吸收带边缘出现在 2.23eV 至 3.45eV 范围内。

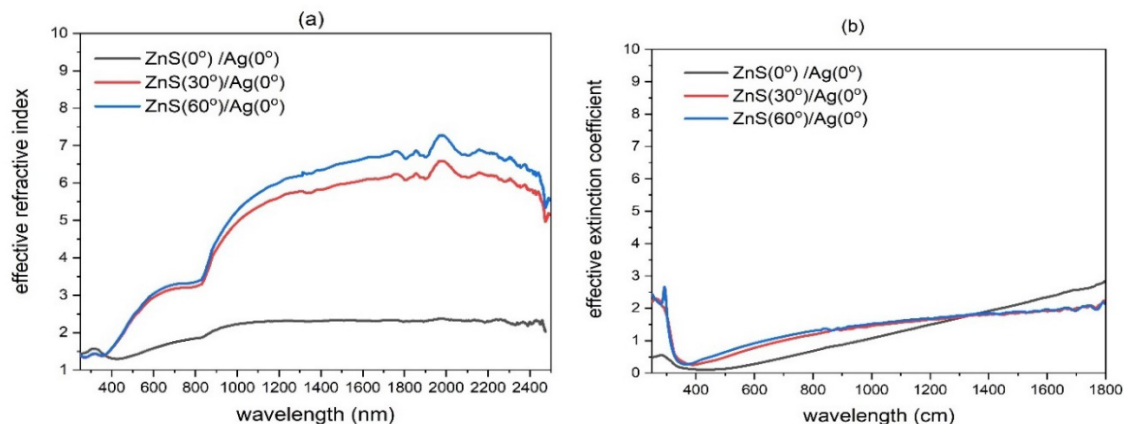


图 3 (a) 0° 沉积 Ag 纳米薄膜时 ZnS 沉积角度对有效折射率的影响；(b) 不同沉积角度沉积 Ag 时 ZnS 沉积角度对 ZnS/Ag 纳米薄膜有效消光系数的影响

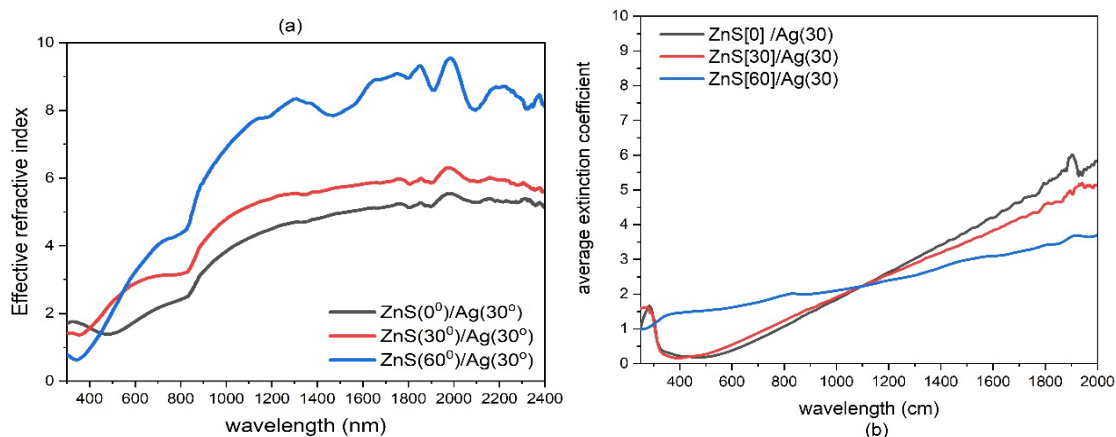


图 4 ZnS 沉积角度的影响：(a) 在 Ag 沉积角度恒定的情况下 ZnS/Ag 薄膜的折射率；(b) 在 Ag 沉积角度恒定的情况下 ZnS/Ag (30°) 纳米薄膜的消光系数

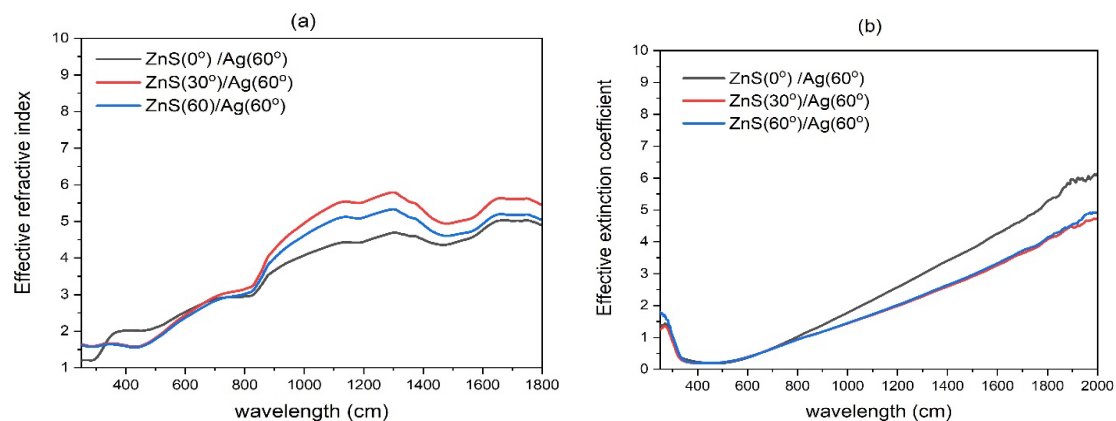


图 5 ZnS 沉积角度对：(a) 在恒定 Ag 沉积角度下 ZnS/Ag 薄膜折射率的影响；(b) 在恒定 Ag 沉积角度下 ZnS/Ag (60°) 纳米薄膜的消光系数

当银的沉积角度增加到 30° (图 6 (b)) 时, ZnS (0°)/Ag (30°)、ZnS (30°)/Ag (30°) 和 ZnS (60°)/Ag (30°) 的能带隙分别为 3.79eV、3.87eV 和 3.83eV。进一步将银的沉积角度增加到 60° (图 6 (c)), 纳米薄膜的能带隙增大。

ZnS (0°)/Ag (60°)、ZnS (30°)/Ag (60°) 和 ZnS (60°)/Ag (60°) 的能带隙分别为 3.95eV、3.99eV 和 3.87eV。较小的薄膜厚度和增大沉积角度使光学带隙增大。所有 ZnS/Ag 纳米薄膜的最小值都在 2.49eV 至 3.25eV 范围内。较大的带隙是由于纳米晶体的尺寸和晶体的缺陷造成的。尽管如此, 较高的带隙能量可以用与纳米晶体的存在和较小的薄膜厚度相关的量子限制效应来解释^[61]。这允许可见波长的透射, 但阻止了低能红外辐射的透射^[20,62,63]。

ZnS (0°)/Ag (60°)、ZnS (30°)/Ag (60°) 和 ZnS (60°)/Ag (60°) 的能带隙分别为 3.95eV、3.99eV 和 3.87eV。较小的薄膜厚度和增大沉积角度使光学带隙值增大。所有 ZnS/Ag 纳米薄膜的最小值都在 2.49eV 至 3.25eV 范围内。较大的带隙是由于纳米晶体的尺寸和晶体的缺陷造成的。尽管如此, 较大的带隙能量可以用与纳米晶体的存在和较小的薄膜厚度有关的量子限制效应来解释。这允许可见光波段的光能透射, 但阻止了低能红外辐射的透射^[20,37,62]。

然而, ZnS 沉积角度从 0° 增加到 60° 对能带隙随沉积角度变化的影响很小。另一方面, 银沉积角度的增加反而增加了能带。在图 6 (a)、(b) 和 (c) 中, 我们沿每幅图的 Urbach 区域额外绘图后观察到了这种趋势。

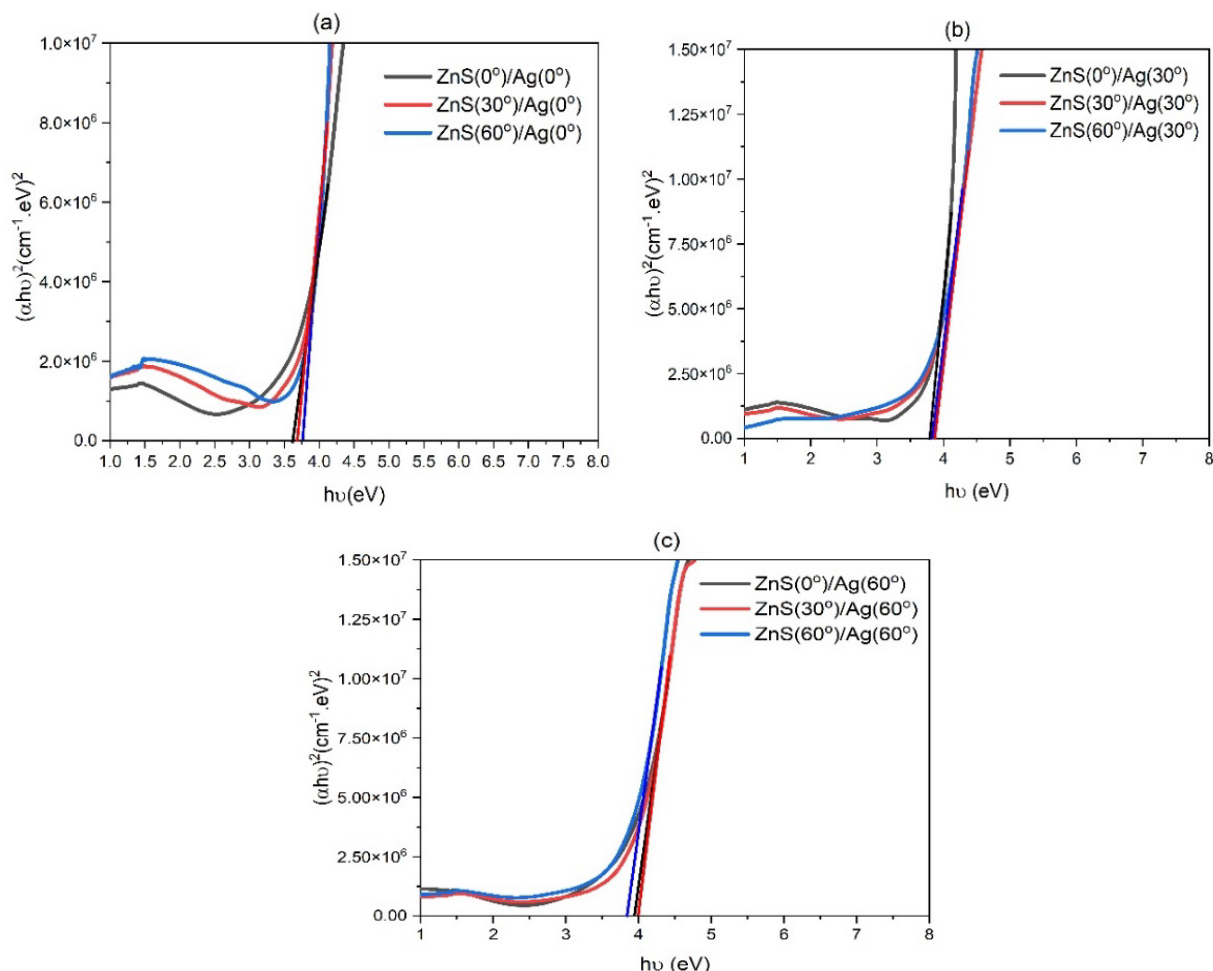


图 6 沉积角度对能带隙的影响: (a) 当 Ag 沉积角度保持在 0° 时, ZnS 的沉积角度增加; (b) 当 Ag 沉积角度保持在 30° 时, ZnS 的沉积角度增加; (c) 当 Ag 沉积角度保持在 60° 时, ZnS 的沉积角度增加

4 结论

以较高的沉积角度沉积银纳米粒子可以提高

ZnS/Ag 纳米薄膜在可见光区的光学透过率。然而, 以较高的沉积角度沉积银纳米粒子会抑制红外区的

光学透过率。蒸发的 ZnS/Ag 纳米薄膜的反射率随 ZnS 沉积角度的减小而降低。然而，反射率随银金属薄膜沉积角度的增加而降低。银沉积角度的增加会降低有效折射率。有效折射率从可见光谱中的 3.25 增加到红外光谱中的 6.2。可见波长下的有效折射率较低表明纳米薄膜对可见光是透明的。消光系数从约 400nm 处的平均 0.2 增加到红外光谱范围。ZnS 沉积量的增加对能带隙没有显著影响。然而，银沉积角度的增加使纳米薄膜的能带从 3.52eV 增加到 3.99eV。

参考文献

- [1] Bwayo, E., & Obwoya, S. K. (2014). Coefficient of Thermal Diffusivity of Insulation Brick Developed from Sawdust and Clays. *Journal of Ceramics*, 2014, 1-6. <https://doi.org/10.1155/2014/861726>.
- [2] Fang, B., Yang C., Shen, W., Zhang, X., Zhang, Y., & Liu, X. (2017). Highly efficient omnidirectional structural color tuning method based on dielectric-metal-dielectric structure. *Applied Optics*, 56(4), 175-180.
- [3] Multilayer, M. C., Nur-e-alam, M., Rahman, M., & Basher, M. K. (2020). Thin-Film Structures Prepared by RF.
- [4] Chambouleyron, I., & Martinez, J. M. (2002). Optical properties of dielectric and semiconductor thin films. *Handbook of Thin Films*, 3, 593-622. <https://doi.org/10.1016/b978-012512908-4/50048-5>.
- [5] Davalos, J. A. G., Carvano, J. M., & Blanco, J. (2017). Numerical determination of visible/NIR optical constants from laboratory spectra of HED meteorites. *Icarus*, 285, 275-290. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.10.022>.
- [6] Sakkas, C., Rauch, J. Y., Cote, J. M., Tissot, V., Gavoille, J., & Martin, N. (2021). Tuning the optical properties of WO₃ films exhibiting a zigzag columnar microstructure. *Coatings*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/coatings11040438>.
- [7] Włodarski, M., Chodorow, U., Jóźwiak, S., Putkonen, M., Durejko, T., Sajavaara, T., & Norek, M. (2019). Structural and optical characterization of ZnS ultrathin films prepared by low-temperature ALD from diethylzinc and 1,5-pentanedithiol after various annealing treatments. *Materials*, 12(19), 1-16. <https://doi.org/10.3390/ma12193212>.
- [8] Peng, S., Yang, X., Yang, Y., Wang, S., Zhou, Y., Hu, J., Li, Q., & He, J. (2019). Direct Detection of Local Electric Polarization in the Interfacial Region in Ferroelectric Polymer Nanocomposites. *Advanced Materials*, 31(21), 1-9. <https://doi.org/10.1002/adma.201807722>.
- [9] Sun, X., Hu, K., Tu, J., & Chen, K. (2021). Design and preparation of superhydrophobic, broadband and double-layer antireflective coatings. *Surfaces and Interfaces*, 24(March). <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101135>.
- [10] Sharma, N., Sharma, S., Prabakar, K., Amirthapandian, S., Ilango, S., Dash, S., & Tyagi, A. K. (2015). C. Substrate temperature induced microstructural transition from amorphous at RT, nanocrystalline at 300. *ArXiv*.
- [11] Charles, C., Martin, N., & Devel, M. (2015). Optical properties of nanostructured WO₃ thin films by GLancing Angle Deposition: Comparison between experiment and simulation. *Surface and Coatings Technology*, 276, 136-140. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2015.06.051>.
- [12] Dalapati, G. K., Kushwaha, A. K., Sharma, M., Suresh, V., Shannigrahi, S., Zhuk, S., & Masudy-Panah, S. (2018). Transparent heat regulating (THR) materials and coatings for energy saving window applications: Impact of materials design, micro-structural, and interface quality on the THR performance. *Progress in Materials Science*, 95, 42-131.
- [13] Taylor, R. A., Hewakuruppu, Y., DeJarnette, D., & Otanicar, T. P. (2016). Comparison of selective transmitters for solar thermal applications. *Applied Optics*, 55(14), 3829. <https://doi.org/10.1364/ao.55.003829>.
- [14] Baetens, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2010). Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(2), 87-105.
- [15] Ding, G., & Clavero, C. (2017). Silver-Based Low-Emissivity Coating Technology for Energy-Saving Window Applications. *Modern Technologies for Creating the Thin-Film Systems and Coatings*.

- <https://doi.org/10.5772/67085>.
- [16] Sharma, M., Sen, S., Gupta, J., Ghosh, M., Pitale, S., Gupta, V., & Gadkari, S. C. (2018). Tunable blue-green emission from ZnS(Ag) nanostructures grown by hydrothermal synthesis. *Journal of Materials Research*, 33(23), 3963-3970. <https://doi.org/10.1557/jmr.2018.358>.
- [17] Sönmezolu, S., Arslan, A., Serin, T., & Serin, N. (2011). The effects of film thickness on the optical properties of TiO₂-SnO₂ compound thin films. *Physica Scripta*, 84(6). <https://doi.org/10.1088/0031-8949/84/06/065602>.
- [18] Ramzan, M., Rana, A. M., Ahmed, E., Bhatti, A. S., Hafeez, M., Ali, A., & Nadeem, M. Y. (2014). Optical description of HfO₂/Al/HfO₂ multilayer thin film devices. *Current Applied Physics*, 14(12), 1854-1860. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2014.10.023>.
- [19] Haus, J. W., Katte, N., Serushema, J.-B., & Scalora, M. (2010). Metallodielectrics as metamaterials. *Active Photonic Materials III*, 7756(September 2010), 77560F. <https://doi.org/10.1117/12.862407>.
- [20] Huang, L., Wang, T., Li, X., Wang, X., Zhang, W., Yang, Y., & Tang, Y. (2020). UV-to-IR highly transparent ultrathin diamond nanofilms with intriguing performances: Anti-fogging, self-cleaning and self-lubricating. *Applied Surface Science*, 527, 146733. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146733>.
- [21] Khan, S. B., Wu, H., Ma, L., Hou, M., & Zhang, Z. (2017). HfO₂ Nanorod Array as High-Performance and High-Temperature Antireflective Coating. *Advanced Materials Interfaces*, 4(6), 1-9. <https://doi.org/10.1002/admi.201600892>.
- [22] Bartek, N., Shvartsman, V. V., Lupascu, D. C., Prah, U., & Uršič, H. (2019). Influence of synthesis route on the properties of lead iron niobate. 2019 IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, ISAF 2019 - Proceedings, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ISAF43169.2019.9034943>.
- [23] Bashir, K., Ali, A., Ashraf, M., Mehboob, N., & Zaman, A. (2021). Optical and structural properties of vacuum annealed multilayer nanostructured CdZnS thin films deposited by thermal evaporation. *Optical Materials*, 119(May), 111353. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111353>.
- [24] Savaloni, H., & Savari, R. (2018). Nano-structural variations of ZnO:N thin films as a function of deposition angle and annealing conditions: XRD, AFM, FESEM and EDS analyses. In *Materials Chemistry and Physics* (Vol. 214). <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.04.099>.
- [25] Boubaia, A., Assali, A., Berrah, S., Bennacer, H., Zerifi, I., & Boukourt, A. (2021). Band gap and emission wavelength tuning of Sr-doped BaTiO₃ (BST) perovskites for high-efficiency visible-light emitters and solar cells. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 130(November 2020), 105837. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.105837>.
- [26] Rhodes, C., Cerruti, M., Efremenko, A., Losego, M., Aspnes, D. E., Maria, J. P., & Franzen, S. (2008). Dependence of plasmon polaritons on the thickness of indium tin oxide thin films. *Journal of Applied Physics*, 103(9). <https://doi.org/10.1063/1.2908862>.
- [27] Chalana, S. R., Ganesan, V., & Mahadevan Pillai, V. P. (2015). Surface plasmon resonance in nanostructured Ag incorporated ZnS films. *AIP Advances*, 5(10), 107207.
- [28] Blake, J. C., Rossi, S., Jonsson, M. P., & Dahlin, A. (2022). Scalable Reflective Plasmonic Structural Colors from Nanoparticles and Cavity Resonances – the Cyan-Magenta-Yellow Approach. *Advanced Optical Materials*, 10(13). <https://doi.org/10.1002/adom.202200471>.
- [29] Vrakatseli, V. E., Kalarakis, A. N., Kalamounias, A. G., Amanatides, E. K., & Mataras, D. S. (2018). Glancing angle deposition effect on structure and light-induced wettability of RF-sputtered TiO₂ thin films. *Micromachines*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/mi9080389>.
- [30] Diab, M., & Alabbosh, O. (2018). Studying of Thickness Effects on the Optical and Structural Properties of ZnO / Ag / ZnO Multilayer Thin Films by Using Surface Plasmon Resonance. 70, 27-30.
- [31] Chaffar Akkari, F., Ben Jbara, H., Abdelkader, D., Gallas, B., & Kanzari, M. (2018). Effect of angle deposition γ on

- the structural, optical and electrical properties of copper oxide zigzag (+γ, -γ) nanostructures elaborated by glancing angle deposition. *Thin Solid Films*, 657, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.05.006>.
- [32] Jones, A., Uggalla, L., Li, K., Fan, Y., Willow, A., Mills, C. A., & Copner, N. (2021). Continuous in-line chromium coating thickness measurement methodologies: An investigation of current and potential technology. *Sensors*, 21(10). <https://doi.org/10.3390/s21103340>.
- [33] Studenikin, S. A., Golego, N., & Cocivera, M. (1998). Optical and electrical properties of undoped ZnO films grown by spray pyrolysis of zinc nitrate solution. *Journal of Applied Physics*, 83(4), 2104-2111. <https://doi.org/10.1063/1.366944>.
- [34] Garlisi, C., Trepici, E., Li, X., Al Sakka, R., Al-Ali, K., Nogueira, R. P., Zheng, L., Azar, E., & Palmisano, G. (2020). Multilayer thin film structures for multifunctional glass: Self-cleaning, antireflective and energy-saving properties. *Applied Energy*, 264(February). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114697>.
- [35] Bashir, K., Ali, A., Ashraf, M., Mehboob, N., & Zaman, A. (2021). Optical and structural properties of vacuum annealed multilayer nanostructured CdZnS thin films deposited by thermal evaporation. *Optical Materials*, 119(May). <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111353>.
- [36] He, C. Y., Gao, X. H., Yu, D. M., Guo, H. X., Zhao, S. S., & Liu, G. (2021). Highly Enhanced Thermal Robustness and Photothermal Conversion Efficiency of Solar-Selective Absorbers Enabled by High-Entropy Alloy Nitride MoTaTiCrN Nanofilms. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 13(14), 16987-16996. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c23011>.
- [37] Zhao, Y., Xu, R., Zhang, X., Hu, X., Knize, R. J., & Lu, Y. (2013). Simulation of smart windows in the ZnO/VO₂/ZnS sandwiched structure with improved thermochromic properties. *Energy and Buildings*, 66, 545-552. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.071>.
- [38] Cho, H., Yun, C., Park, J.-W., & Yoo, S. (2009). Highly flexible organic light-emitting diodes based on ZnS/Ag/WO₃ multilayer transparent electrodes. *Organic Electronics*, 10(6), 1163-1169.
- [39] Osanyinlusi, O., Mukolu, A. I., & Zebaze Kana, M. G. (2016). Structural and optical properties of Al/ZnO thin films deposited by radio frequency sputtering. *Materials Research Express*, 3(9), 1-9. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/3/9/096401>.
- [40] Lou, R., Zhang, G., Li, G., Li, X., Liu, Q., & Cheng, G. (2020). Design and fabrication of dual-scale broadband antireflective structures on metal surfaces by using nanosecond and femtosecond lasers. *Micromachines*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/mi11010020>.
- [41] Włodarski, M., Chodorow, U., Józwiak, S., Putkonen, M., Durejko, T., Sajavaara, T., & Norek, M. (2019). Structural and Optical Characterization of ZnS Ultrathin Films Prepared by Low-Temperature ALD from Diethylzinc and 1,5-Pentanedithiol after Various Annealing Treatments. *Materials*, 12(19), 3212.
- [42] Cho, K. H., Ahn, S. Il, Lee, S. M., Choi, C. S., & Choi, K. C. (2010). Surface plasmonic controllable enhanced emission from the intrachain and interchain excitons of a conjugated polymer. *Applied Physics Letters*, 97(19). <https://doi.org/10.1063/1.3508949>.
- [43] Lee, G.-J., & Wu, J. J. (2017). Recent developments in ZnS photocatalysts from synthesis to photocatalytic applications—A review. *Powder Technology*, 318, 8-22.
- [44] He, Y., Basnet, P., Murph, S. E. H., & Zhao, Y. (2013). Ag nanoparticle embedded TiO₂ composite nanorod arrays fabricated by oblique angle deposition: Toward plasmonic photocatalysis. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 5(22), 11818-11827. <https://doi.org/10.1021/am4035015>.
- [45] Al Garni, S. E., & Qasrawi, A. F. (2017). Effect of Indium nano-sandwiching on the structural and optical performance of ZnSe films. *Results in Physics*, 7, 4168-4173. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.10.040>.
- [46] Multilayer, M. C., Nur-e-alam, M., Rahman, M., & Basher, M. K. (2020). Thin-Film Structures Prepared by RF.
- [47] Vrakatseli, V. E., Kalarakis, A. N., Kalampounias, A. G., Amanatides, E. K., & Mataras, D. S. (2018). Glancing angle

- p>deposition effect on structure and light-induced wettability of RF-sputtered TiO
- ₂
- thin films.
- Micromachines*
- , 9(8), 389.
- [48] Zhou, C., & Liu, H. (2017). A novel nanofibrous film chemosensor for highly selective and sensitive optical signaling of Zn²⁺. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 28(10), 1947-1952. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20170036>.
- [49] Sönmezoğlu, S., Termeli, T. A., Akin, S., & Askeroğlu, I. (2013). Synthesis and characterization of tellurium-doped CdO nanoparticles thin films by sol-gel method. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 67(1), 97-104. <https://doi.org/10.1007/s10971-013-3054-1>.
- [50] Pan, Y., Fan, Y., & Niu, J. (2020). Optical properties of ultra-thin silver films deposited by thermal evaporation and its application in optical filters. *Infrared Physics and Technology*, 104, 103123. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103123>.
- [51] Granqvist, C. G., Arvizu, M. A., Bayrak Pehlivan, Qu, H. Y., Wen, R. T., & Niklasson, G. A. (2018). Electrochromic materials and devices for energy efficiency and human comfort in buildings: A critical review. *Electrochimica Acta*, 259, 1170-1182. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.11.169>.
- [52] Veziroglu, S., Ullrich, M., Hussain, M., Drewes, J., Shondo, J., Strunskus, T., Adam, J., Faupel, F., & Aktas, O. C. (2020). Plasmonic and non-plasmonic contributions on photocatalytic activity of Au-TiO₂ thin film under mixed UV-visible light. *Surface and Coatings Technology*, 389, 125613. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125613>.
- [53] Hadia, N. M. A., Mohamed, W. S., & Abd El-sadek, M. S. (2019). Simultaneous synthesis of various Sb₂S₃ nanostructures by vapor transport technique. *Materials Chemistry and Physics*, 235(March), 121750. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.121750>.
- [54] Patil, R. G., Yerudkar, A. N., Joglekar, A. R., Panse, S. V., Dalvi, V. H., Shankarling, G. S., Deshpande, V. D., Nayak, A. K., & Joshi, J. B. (2022). Transition metal compounds as solar selective material. *Reviews in Chemical Engineering*, 38(6), 669-702. <https://doi.org/10.1515/revce-2020-0026>.
- [55] Hassanien, A. S., & Akl, A. A. (2016). Effect of Se addition on optical and electrical properties of chalcogenide CdSSe thin films. *Superlattices and Microstructures*, 89, 153-169. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2015.10.044>.
- [56] Khalef, W. K., Mohammed, S. R., Salman, A. A., Shukur, N. J., Yousif, B. A., Al-Baghdadi, S. B., & Faisal, A. D. (2018). Oblique angle deposition of cadmium oxide film on quartz substrate. *International Journal of Nanoelectronics and Materials*, 11(Special Issue BOND21), 23-30.
- [57] Han, Y., Dong, S., Shao, J., Fan, W., & Chi, C. (2021). Synthesis of a Sidewall Fragment of a (12,0) Carbon Nanotube. *Angewandte Chemie*, 133(5), 2690-2694. <https://doi.org/10.1002/ange.202012651>.
- [58] Kumar, S., Kumar, S., Sharma, P., Sharma, V., & Katyal, S. C. (2012). CdS nanofilms: Effect of film thickness on morphology and optical band gap. *Journal of Applied Physics*, 112(12). <https://doi.org/10.1063/1.4769799>.
- [59] Pedrosa, P., Ferreira, A., Cote, J.-M., Martin, N., Yazdi, M. A. P., Billard, A., Lanceros-Mendez, S., & Vaz, F. (2017). Influence of the sputtering pressure on the morphological features and electrical resistivity anisotropy of nanostructured titanium films. *Applied Surface Science*, 420, 681-690.
- [60] Bilal, U., Ramzan, M., Imran, M., Naz, G., Mukhtar, M. W., Fahim, F., & Iqbal, H. M. N. (2022). HfO₂-based nanostructured thin-films (i.e., low-e coatings) with robust optical performance and energy efficiency. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 12(6), 1131-1142. <https://doi.org/10.1007/s40097-022-00485-2>.
- [61] Saha, A., Figueroba, A., & Konstantatos, G. (2020). Ag₂ZnSnS₄ Nanocrystals Expand the Availability of RoHS Compliant Colloidal Quantum Dots. *Chemistry of Materials*, 32(5), 2148-2155. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.9b05370>.
- [62] Sharma, S. S., Palaty, S., & John, A. K. (2021). Band gap modified zinc oxide nanoparticles: an efficient visible light active catalyst for wastewater treatment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(9),

2619-2632. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02976-7>.

4958. <https://doi.org/10.1039/c2cc31648j>.

- [63] Zhang, X., Bao, N., Ramasamy, K., Wang, Y. H. A., Wang, Y., Lin, B., & Gupta, A. (2012). Crystal phase-controlled synthesis of Cu₂FeSnS₄ nanocrystals with a band gap of around 1.5 eV. *Chemical Communications*, 48(41), 4956-

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS