

# 基于准分子灯的复合颗粒反射膜研究与制备

杨志骞<sup>1,2</sup>, 葛荣淞<sup>1</sup>, 陈超敏<sup>1</sup>, 陈毅湛<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>五邑大学应用物理与材料学院, 广东 江门

<sup>2</sup>广明源光科技股份有限公司, 广东 江门

收稿日期: 2026年4月25日; 录用日期: 2026年5月17日; 发布日期: 2026年5月29日

## 摘要

基于介质阻挡放电的172 nm准分子灯在深紫外光源领域具有核心应用价值, 但其光子各向同性发射导致的严重紫外能量损耗极大限制了其工业效率。目前, 传统金属反射膜在真空紫外波段存在强烈的本征吸收损耗, 而多层介质干涉膜则因依赖高端真空设备面临制备成本高昂的瓶颈。在此, 本研究提出了一种基于溶胶-凝胶法制备的低损耗深紫外复合颗粒反射膜, 为解决上述光子逸散难题提供了经济且高效的途径。依据半导体能带理论与Tauc法则, 我们精准筛选出禁带宽度远超7.21 eV的SiO<sub>2</sub>与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颗粒作为极低损耗的散射介质。结合米氏(Mie)散射理论与时域有限差分仿真, 研究确立了300 nm SiO<sub>2</sub>与100 nm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的最佳光学匹配尺寸。我们发现, 当溶液固含量为35%时, 颗粒能够形成致密的微观紧密堆积网络, 将孔隙率降至最优的0.64%; 同时, 按6:4质量比混合SiO<sub>2</sub>与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 可通过物理特性的互补有效耗散界面残余热应力, 将膜层脱落率抑制在5%以下的极低水平。实验验证表明, 该光学膜层不仅将准分子灯的中心照度显著提升至73.22 mW/cm<sup>2</sup>, 提升率最高20.75%, 更实现了变异系数仅为1.49%的超高照度均匀性。该研究提出了一种低成本、可扩展的复合氧化物反射膜制备方案, 为高功率、高均匀性深紫外光源的规模化制造提供了一种可行性方案。

## 关键词

172 nm准分子灯, 溶胶-凝胶法, 复合颗粒反射膜, 米氏散射, 深紫外光源

# Research and Preparation of Composite Particle Reflective Film Based on Excimer Lamp

Zhiqian Yang<sup>1,2</sup>, Rongsong Ge<sup>1</sup>, Chaomin Chen<sup>1</sup>, Yizhan Chen<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Applied Physics and Materials, Wuyi University, Jiangmen Guangdong

<sup>2</sup>Guangming Yuanguang Technology Co., Ltd., Jiangmen Guangdong

Received: April 25, 2026; accepted: May 17, 2026; published: May 29, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 杨志骞, 葛荣淞, 陈超敏, 陈毅湛. 基于准分子灯的复合颗粒反射膜研究与制备[J]. 材料科学, 2026, 16(5): 275-287. DOI: 10.12677/ms.2026.165121

## Abstract

172 nm excimer lamps based on dielectric barrier discharge are of core value in deep-ultraviolet light source applications, yet their industrial efficiency is severely limited by ultraviolet energy loss caused by isotropic photon emission. Currently, traditional metal reflective films suffer from strong intrinsic absorption in the vacuum ultraviolet region, while multilayer dielectric interference films are bottlenecked by high manufacturing costs due to their reliance on high-end vacuum equipment. Here, we present a low-loss deep-ultraviolet composite particle reflective film fabricated via a cost-effective sol-gel method, providing an efficient pathway to address this photon dissipation challenge. Guided by semiconductor band theory and the Tauc method, we precisely identified  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  as ultra-low-loss scattering media, given that their band gaps far exceed 7.21 eV. Integrating Mie scattering theory with finite-difference time-domain (FDTD) simulations, we established the optimal optical matching sizes of 300 nm for  $\text{SiO}_2$  and 100 nm for  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . We demonstrate that a solid content of 35% enables a dense microscopic particle packing network, minimizing the porosity to an optimal 0.64%. Furthermore, blending  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  at a 6:4 mass ratio effectively dissipates interfacial residual thermal stress through complementary physical properties, suppressing the film detachment rate to an exceptionally low level of under 5%. Experimental validation reveals that this optical coating not only significantly boosts the central illuminance of the excimer lamp to 73.22 mW/cm<sup>2</sup> (an enhancement of up to 20.75%), but also achieves an ultra-high illuminance uniformity with a coefficient of variation of merely 1.49%. This study proposes a low-cost and scalable preparation scheme for composite oxide reflective films, providing a feasible solution for the large-scale manufacturing of high-power and high-uniformity deep ultraviolet light sources.

## Keywords

172 nm Excimer Lamp, Sol-Gel Method, Composite Particle Reflective Film, Mie Scattering, Deep-Ultraviolet Light Source

Copyright © 2026 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

基于介质阻挡放电的准分子灯，凭借无汞环保、单色性优异、光子能量高、可大面积均匀辐照等突出优势，成为深紫外光源领域的核心发展方向，在半导体干法光清洗、有机污染物降解等场景具有极高的应用价值。但该类准分子灯在工业化长期服役中，仍面临准分子光子各向同性发射导致紫外能量利用率不足。可行的方法是在准分子灯内壁底部制备一层反射膜，但金属反射膜虽制备工艺简单，但在真空紫外波段存在严重的本征吸收损耗，且长期工作中易发生氧化失效，而多层介质干涉反射膜可实现特定波段的高镜面反射，但其制备依赖真空磁控溅射、蒸镀等高端设备，成本高且不适配平板型准分子灯的制膜工艺[1]。

本研究基于溶胶凝胶(Sol-gel)法制备了一款适用于 172 nm 平板型准分子灯的复合颗粒反射膜。其反射本质由米氏(Mie)散射理论、材料本征光学特性与膜层微观堆积结构共同决定。高达 7.21 eV 光子能量的 172 nm 真空紫外光对散射材料有着严苛的理论约束，依据半导体能带理论，材料禁带宽度  $E_g$  需大于 7.21 eV，方可从根源上避免本征吸收损耗；复折射率理论中，折射率与消光系数分别决定界面散射强度

与光吸收损耗，是材料筛选的核心光学参数；米氏散射理论则明确，散射颗粒与介质的折射率差、粒径与入射波长的匹配度，直接决定散射效率，是提升漫反射性能的核心理论依据。

本研究根据上述光学理论完成散射材料筛选与最优粒径匹配设计，构建  $\text{SiO}_2$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  复合颗粒反射膜体系，系统探究了颗粒固含量及两组分配比对膜层性能的影响。制备出兼具高漫反射效率、强界面结合力与高热稳定性的复合颗粒反射膜并最终将其应用于 172 nm 准分子灯完成性能验证。

## 2. 实验与表征

### 2.1. 溶液制备

由于 TEOS 和水不易混溶，一般选用乙醇作共溶剂。在烧杯中加入一定量的乙醇，然后加入一定量的去离子水，保留一部分水用于调节盐酸浓度。然后使用保鲜膜密封烧杯避免乙醇挥发，随后将烧杯移至在漩涡混合器上匀速搅拌，使水和乙醇混合均匀。使用滴管或移液管，将一定量的 TEOS 缓慢地、逐滴加入到水和乙醇的混合液中。将盐酸加入剩余的少量去离子水中，稀释混匀，随后将其缓慢滴加到水和乙醇和 TEOS 的混合液中，期间使用 pH 试纸进行测量，将溶液的 pH 值调节至 2.0~3.0 范围内即可。该适度的酸性环境能够有效催化硅酸四乙酯的水解反应，同时抑制硅醇基的过度缩聚，从而保障溶胶体系的长期稳定性与成膜均匀性。密封烧杯后继续搅拌 15 min，随后将称量好的  $\text{SiO}_2$  颗粒和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒分别缓慢地加入到溶液中，密封烧杯后继续搅拌 15 min，将溶液倒入带盖的玻璃瓶内密封后放入超声波机内进行超声处理，超声时间大概为 3 h。当颗粒混合均匀，悬浮液底部无颗粒沉淀后即可得到反射膜溶液。实验所用物质的量之比为：TEOS:乙醇:去离子水 = 1:16:4，颗粒固含量为 35%。反射膜溶液制备过程如图 1 所示。

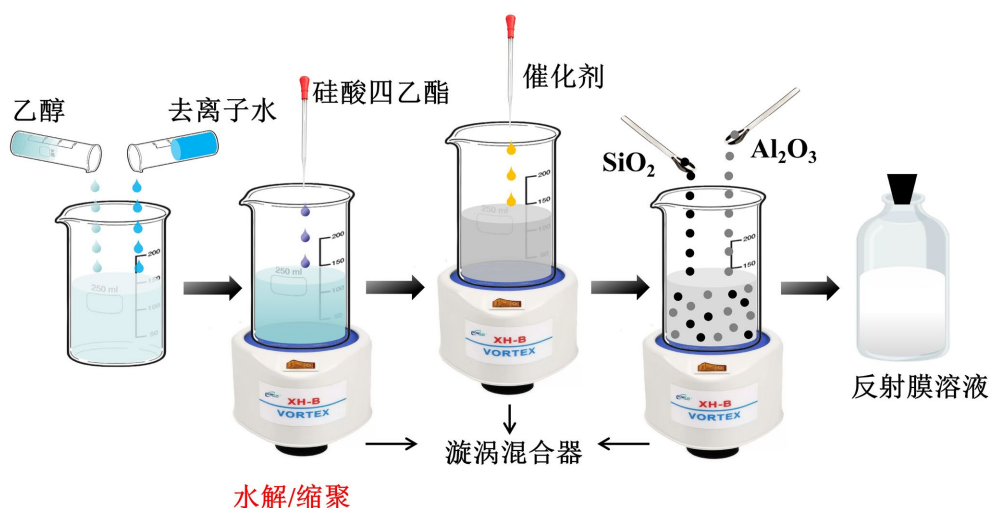


Figure 1. Preparation process of reflective film solution

图 1. 反射膜溶液制备过程

### 2.2. 反射膜制备

在槽具中倒入一定量的反射膜溶液，液面高度为 5 mm。将灯管放入槽具内浸泡 30 s，该浸泡时间经前期工艺优化确定，可确保基底表面充分润湿并均匀吸附溶胶前驱体，避免时间过短导致涂层不连续或时间过长引起膜层过厚开裂。取出后缓慢倾斜灯管将多余溶液从侧壁口流出，随后竖直固定整个灯管，并进行初步的室温流平干燥。此静置过程利用重力有效去除了多余溶胶，同时避免了后续快速升温时溶剂剧烈挥发导致的表面橘皮或针孔缺陷。去除热缩膜后，将灯管放置在马弗炉中进行烧结固化，烧结气

氛为空气，升温速率为 10℃/min，峰值温度 850℃保温 1 h，此升温速率和峰值温度，与后续制备表面电极的导电金浆的烧结参数一致，目的是确保工艺的一致性与稳定性。保温结束后，自然降温至室温后取出则得到制备在准分子灯底部内壁上的白色反射膜。操作过程如图 2 所示。

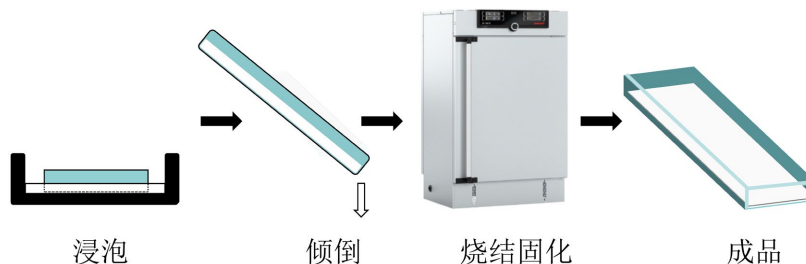


Figure 2. Preparation process of reflective film  
图 2. 反射膜制备过程

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 材料的光学属性

在材料光学中，材料对光线的折射能力和吸收能力是材料的固有属性，这种属性统称为复折射率  $N$ ，其分别由实部  $n$  和虚部  $ik$  组成，其方程式由式(1)给出[2]-[4]。

$$N = n + ik \tag{1}$$

式中，折射率  $n$  代表材料使光线传播速度变慢、传播方向发生偏折的能力；消光系数  $k$  代表材料吸收光线的的能力，折射率  $n$  和消光系数  $k$  均是无量纲，没有具体单位[5]。

本文选择介质膜常用的球形颗粒二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )、氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、二氧化钛( $\text{TiO}_2$ )、二氧化铪( $\text{HfO}_2$ )和氟化镁( $\text{MgF}_2$ )作为提升反射膜性能的材料，经深紫外光谱椭偏仪测量它们的折射率  $n$  和消光系数  $k$ ，测试结果分别如图 3 所示。

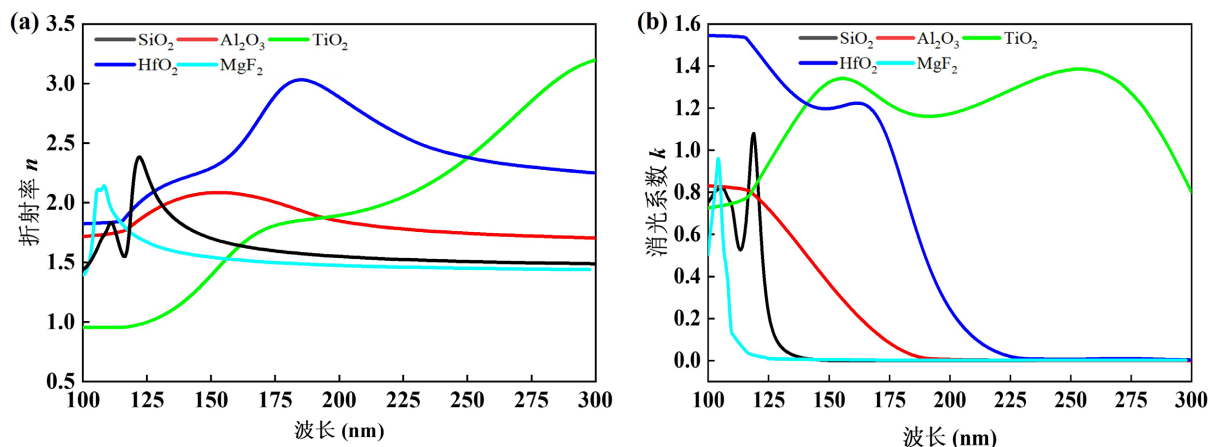


Figure 3. Optical properties of materials: (a) Refractive index; (b) Extinction coefficient  
图 3. 材料的光学属性: (a) 折射率; (b) 消光系数

从图 3(a)可以看到，五种材料的折射率  $n$  存在较大差异。在目标波段 172 nm 处，材料的折射率  $n$  由高到低分别是  $\text{HfO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$  和  $\text{MgF}_2$ ，它们的折射率分别是 2.81、2.02、1.79、1.60 和 1.50。

从图 3(b)可以看到, 在目标波段 172 nm 处, 材料的消光系数  $k$  由高到低分别是  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{HfO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgF}_2$  和  $\text{SiO}_2$ , 它们对应的消光系数  $k$  分别是 1.23、1.11、 $1.02 \times 10^{-1}$ 、 $2.41 \times 10^{-3}$  和  $4.13 \times 10^{-6}$ 。在选择材料时, 应选择在 172 nm 波段处折射率大的材料, 这样才能提高膜层对光线的折射和漫反射能力。下面对材料进一步分析。

半导体或绝缘材料价带顶(VBM)到导带底(CBM)的能量差定义为禁带宽度  $E_g$ , 单位为 eV, 是决定材料吸收截止波长的核心参数。在材料光学理论上, 当入射光子能量  $h\nu > E_g$  时, 光子会激发价带电子跃迁至导带, 发生本征吸收,  $k$  和  $\alpha$  急剧上升; 当入射光子能量  $h\nu < E_g$  时, 无法激发电子跃迁, 材料无本征吸收,  $k \approx 0$ 、 $\alpha \approx 0$ 。以 172 nm 波长的紫外线为例, 其光子能量  $h\nu$  约为 7.21 eV, 因此构成反射膜的粒子禁带宽度  $E_g$  应该大于 7.21 eV。

求解材料的禁带宽度  $E_g$  是一个比较麻烦的事情, 学术界通用的方法是用 Tauc 等式绘制材料的 Tauc 曲线, 再通过拟合的方式求解材料的禁带宽度  $E_g$ 。相关计算如下所示[6]-[9]。

$$(ah\nu)^{1/n} = A(h\nu - E_g) \quad (2)$$

$$a = \frac{4\pi k}{\lambda} \times 10 \quad (3)$$

$$h\nu = \frac{1240}{\lambda} \quad (4)$$

式中,  $A$  为材料跃迁概率相关的比例常数, 仅影响曲线斜率, 不影响禁带宽度计算结果;  $n$  为跃迁类型系数, 由材料带隙类型决定;  $\lambda$  为入射光波长, 单位为 nm;  $h\nu$  为光子能量, 单位为 eV。通过查阅相关资料, 所选材料的带隙类型[10]-[14]及  $n$  值如表 1 所示。

**Table 1.** Band gap types and  $n$ -values of materials

**表 1.** 材料的带隙类型及  $n$  值

材料	带隙类型	$n$ 值
$\text{SiO}_2$	间接带隙	2
$\text{Al}_2\text{O}_3$	间接带隙	2
$\text{TiO}_2$	直接带隙	1/2
$\text{HfO}_2$	间接带隙	2
$\text{MgF}_2$	间接带隙	2

Tauc 法求禁带宽度的步骤是由对应波长  $\lambda$ , 如 172 nm 计算对应的光子能量  $h\nu$ , 作为 X 轴数据; 由消光系数  $k$  计算吸收系数  $\alpha$ ; 根据材料带隙类型, 计算  $(ah\nu)$ , 作为 Y 轴数据; 绘制 Tauc 曲线后, 选取曲线的第一个线性上升段做线性拟合; 求拟合直线  $Y = 0$  时对应的横坐标值即为材料的禁带宽度  $E_g$ 。材料的 Tauc 曲线和线性拟合直线如图 4 所示。

由吸收曲线拟合可得到各材料禁带宽度,  $\text{HfO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$  和  $\text{MgF}_2$  的禁带宽度分别为 5.23 eV、8.29 eV、4.01 eV、8.15 eV 和 9.56 eV。172 nm 紫外光子能量为 7.21 eV,  $\text{TiO}_2$  与  $\text{HfO}_2$  禁带宽度小于该值, 存在强本征吸收, 不适用于反射膜;  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgF}_2$  无明显本征吸收, 但  $\text{MgF}_2$  化学稳定性与漫反射性能不佳, 而  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  折射率高、稳定性好, 可作为复合颗粒反射膜的反射材料。

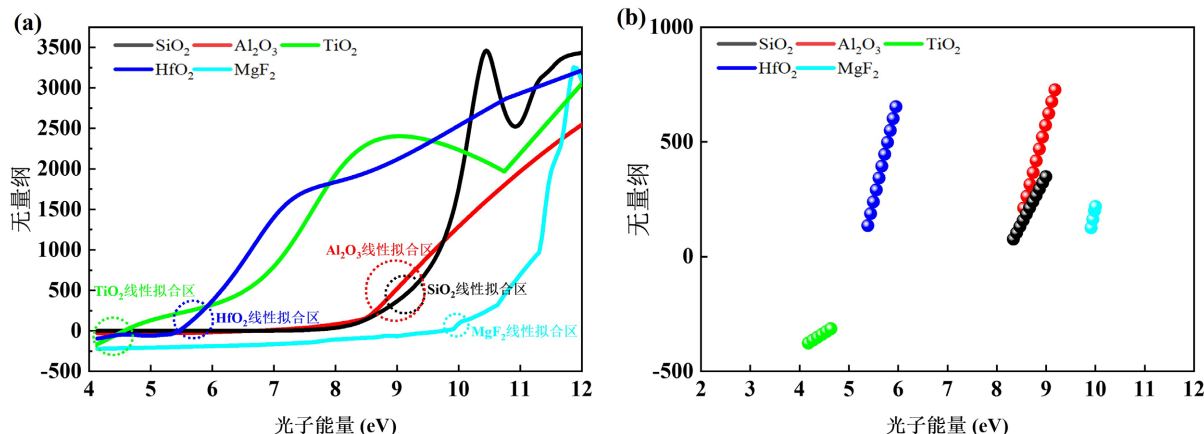


Figure 4. Tauc method: (a) Tauc curve; (b) Linear fitting  
图 4. Tauc 法: (a) Tauc 曲线; (b) 线性拟合

### 3.2. 材料粒径对其米氏散射的影响

使用溶胶 - 凝胶法掺杂 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒制备的反射膜, 经干燥与热处理后会形成颗粒堆砌的结构, 当 172 nm 紫外光入射到反射膜上后, 会在颗粒与颗粒间、颗粒与孔隙间介质发生多重米氏散射, 宏观上则表现为漫反射。要提高颗粒的漫反射效率, 就需要找到颗粒粒径在 172 nm 波长下散射效率因子  $Q_{sca}$  的最大值和吸收效率的  $Q_{abs}$  的最小值, 根据米氏理论可知[15]-[18]:

$$Q_{sca} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \tag{5}$$

$$Q_{ext} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \tag{6}$$

$$Q_{abs} = Q_{ext} - Q_{sca} \tag{7}$$

$$x = \frac{2\pi n_m r}{\lambda_0} \tag{8}$$

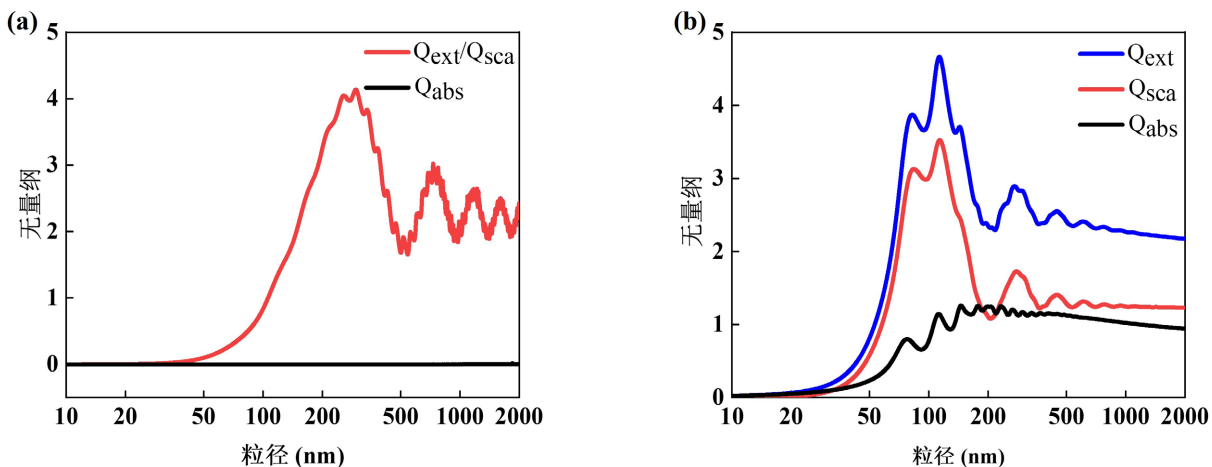


Figure 5. The influence of material particle size on Mie scattering: (a) SiO<sub>2</sub>; (b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
图 5. 材料粒径对米氏散射的影响: (a) SiO<sub>2</sub>; (b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

式中,  $m$  为相对复折射率,  $\text{Re}(\cdot)$  取复数实部计算,  $a_n$  为电多极子系数,  $b_n$  为磁多极子系数。为简化运算过程, 本章配合 Mieplot 软件程序辅助计算, 这是计算米式散射的常用工具。根据前面的实验结果, 在 172 nm 波长下,  $\text{SiO}_2$  的折射率  $n$  为 1.6, 消光系数  $k$  为  $2.41 \times 10^{-3}$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的折射率  $n$  为 2.02, 消光系数  $k$  为  $1.02 \times 10^{-1}$ ; 计算粒径设置为 10 nm~2000 nm 的区间范围内, 计算结果如图 5 所示。

Mie 散射模拟显示:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒在 100 nm 时  $Q_{\text{ext}}$ 、 $Q_{\text{sca}}$  达到峰值, 散射能力最强且吸收较低;  $\text{SiO}_2$  颗粒吸收极低, 300 nm 时散射效率最优。因此, 本研究选用 300 nm  $\text{SiO}_2$  与 100 nm  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒作为 172 nm 准分子灯反射膜材料。

### 3.3. 溶液固含量与孔隙率的关系

本研究中固含量指外加的掺杂颗粒如 300 nm  $\text{SiO}_2$  颗粒和 100 nm  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的总质量占 TEOS 溶液的总质量的比例。为控制实验变量,  $\text{SiO}_2$  颗粒与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的比例固定为 1:1, 溶液体系、成膜工艺等均保持不变, 不同固含量制备的反射膜如图 6 所示。

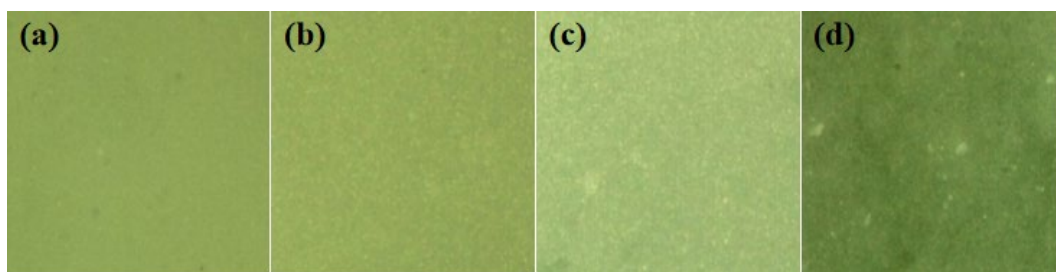


Figure 6. Appearance of reflective films prepared with different solid contents: (a) 25%; (b) 30%; (c) 35%; (d) 40%  
图 6. 不同固含量制备的反射膜外观: (a) 25%; (b) 30%; (c) 35%; (d) 40%

图 6 显示, 随固含量升高, 膜层表面团聚现象逐渐加剧, 25%固含量时膜层光滑透明, 30%、35%时出现粗糙颗粒, 40%时形成明显大团聚体; 同时透光性随固含量增加不断减弱, 25%透光性最强, 40%最弱。可见固含量对膜层粗糙度和透光性具有显著规律性影响, 后续通过图 7 测试了膜层厚度。

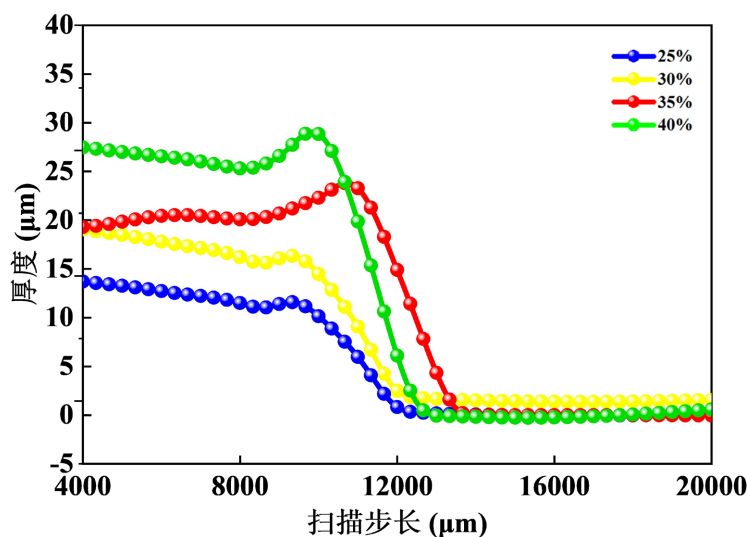
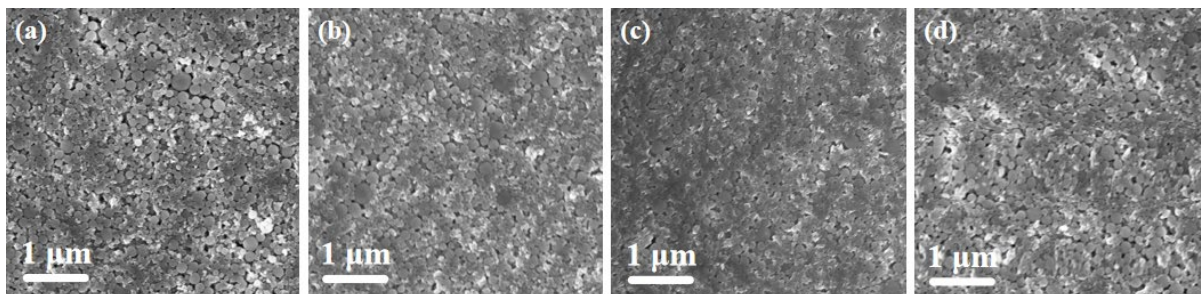


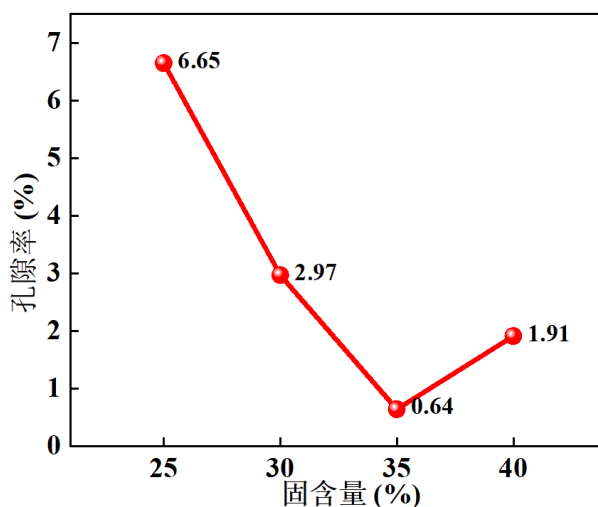
Figure 7. Reflective film thickness prepared with different solid contents  
图 7. 不同固含量制备的反射膜膜厚

每个样品测量 5 次取平均值，反射膜厚度随固含量升高显著增加，25%固含量下为  $14.7\ \mu\text{m}$ ，30%为  $16.5\ \mu\text{m}$ ，35%为  $19.1\ \mu\text{m}$ ，40%达  $27.4\ \mu\text{m}$ ，二者呈明显正相关。这是由于固含量提升会增大溶液黏度，浸涂时单位面积附着的溶液更多，进而使膜层更厚，SEM 图图 8 可进一步直观体现这一差异。



**Figure 8.** SEM images of reflective films prepared with different solid contents: (a) 25%; (b) 30%; (c) 35%; (d) 40%  
**图 8.** 不同固含量制备的反射膜 SEM 图: (a) 25%; (b) 30%; (c) 35%; (d) 40%

图 8 显示，固含量在 25%~35% 范围内，膜层致密度随固含量变化规律明显：25% 和 30% 时颗粒浓度偏低，颗粒间距较大；35% 时颗粒浓度适中，形成紧密堆积；40% 时溶液黏度过大，颗粒布朗运动受阻而易团聚，致密度反而下降。经 ImageJ 分析得到孔隙率数据如图 9 所示。



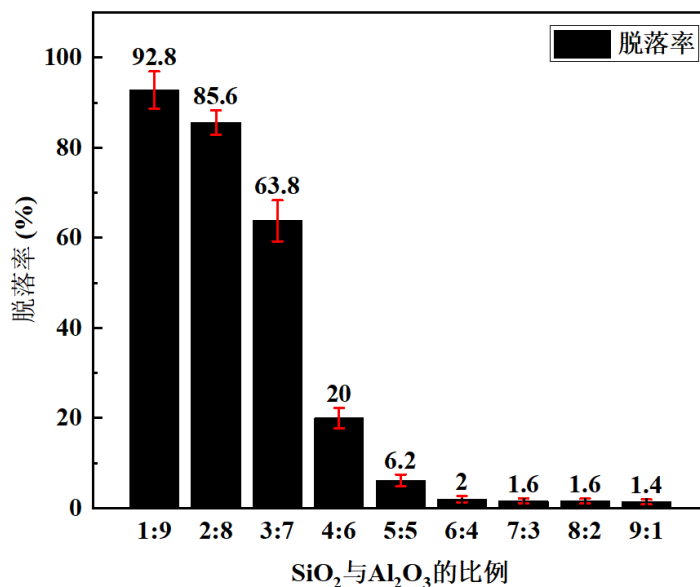
**Figure 9.** Porosity of reflective films prepared with different solid contents  
**图 9.** 不同固含量制备的反射膜孔隙率

固含量 25%~35% 时，反射膜孔隙率随固含量升高显著降低：25% 时孔隙率 6.65%，30% 时为 2.97%，35% 降至最低 0.64%，膜层致密；40% 时孔隙率回升至 1.9%。孔隙率变化会改变局部折射率梯度，影响光子散射，35% 固含量可形成最适宜多重散射的致密网络。

### 3.4. 粒子掺杂比例对反射膜附着性能的影响

本研究参照 ISO 2409 国际标准，采用划格法对涂层附着力进行评估。具体操作规范为：分别设置 10 组不同配比的样品作为对比，使用专用划格器在膜层表面划出间距为 1 mm 的正交网格，划线需穿透涂层至玻璃基底表面，共划分 36 个独立网格。随后使用 3M600 标准压敏胶带，紧贴膜层测试区域并排尽

气泡，静置片刻后，在 0.5 s~1 s 内以接近 60° 的平稳角度快速剥离胶带。最后在显微镜下计算脱落面积与膜层测试区域总面积的比例记作脱落率。为减小随机误差，每组配比均进行 5 次平行重复实验，取脱落率的平均值作为最终结果。统计数据如图 10 所示。

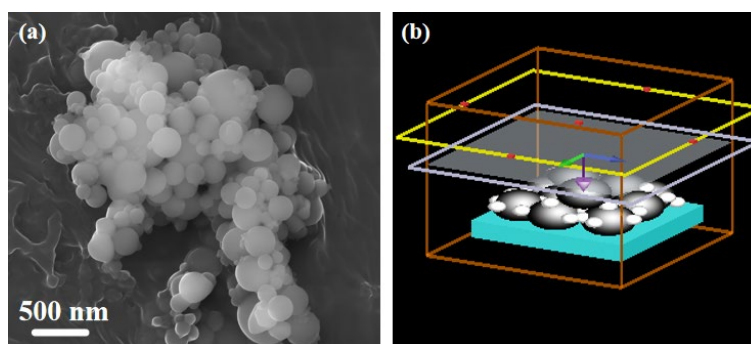


**Figure 10.** The influence of the ratio of SiO<sub>2</sub> to Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the detachment rate of the film layer  
**图 10.** SiO<sub>2</sub> 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的比例对膜层脱离率的影响

SiO<sub>2</sub> 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 配比从 1:9 增至 9:1 时，膜层脱落率显著下降，界面结合性能提升。1:9~3:7 区间脱落率偏高，主要因为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 占比大，与石英基底热膨胀匹配性差，界面残余热应力高易剥离；4:6~5:5 脱落率大幅降低，6:4 及以上脱落率均低于 5%，无明显脱落。增加 SiO<sub>2</sub> 可梯度缓冲热膨胀差异、缓解界面应力，综合来看二者质量比宜为 6:4 及以上。

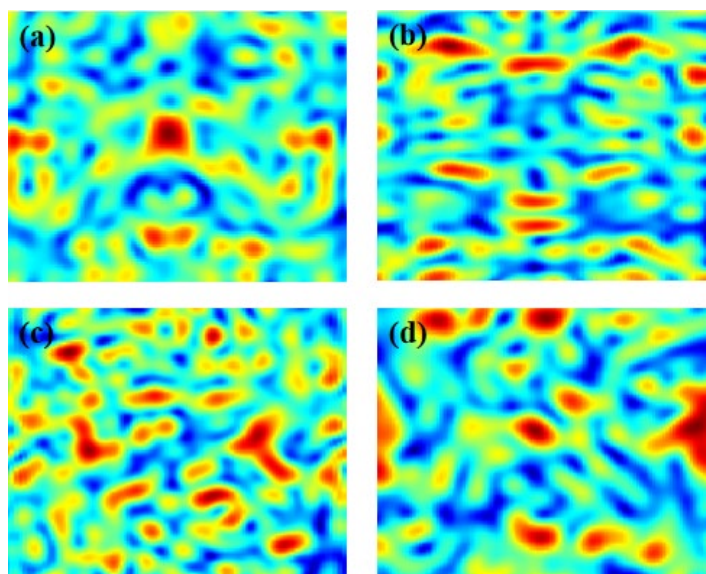
### 3.5. 基于时域有限差分法的模拟仿真

本研究采用 Ansys Lumerical 2024 R1 的 FDTD 模块，依据反射膜微观形貌进行仿真。该方法通过直接求解麦克斯韦方程组，可计算复杂结构反射率并直观呈现光场传播与散射特性[19] [20]；仿真选用 172 nm 平行光入射，并在光源上方设置功率监视器，以获取颗粒间电场分布与整体反射率。仿真过程如图 11 所示。



**Figure 11.** FDTD simulation modeling: (a) Microscopic morphology of film layer; (b) Simulation modeling  
**图 11.** FDTD 仿真建模: (a) 膜层微观形貌; (b) 仿真建模

从图 11(a)可以看到复合颗粒堆积膜的微观结构, 通过小颗粒填充大颗粒的间隙, 实现颗粒之间的紧密堆叠, 增大了颗粒与颗粒之间的接触点, 如图 11(b)所示为仿真建模结构, 通过脚本随机堆积颗粒使其尽可能地接近膜层的微观真实形态。模拟以  $\text{SiO}_2$  颗粒与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的质量比 2:8、4:6、6:4、8:2 进行, 计算出对应的体积比例后, 转化为数量关系, 然后通过脚本实现密集堆积, 仿真结果如图 12 所示。



**Figure 12.** Simulation results of different proportion scattering of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : (a) 2:8; (b) 4:6; (c) 6:4; (d) 8:2

**图 12.**  $\text{SiO}_2$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的不同比例散射模拟结果: (a) 2:8; (b) 4:6; (c) 6:4; (d) 8:2

从图 12(a)中可以看到图中散射斑点分布不规则且强度较低。这说明在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量过高时, 由于两种介质的折射率差异或填充状态限制, 未能形成有效的漫反射网络, 反射效果较弱。图 12(b)可以观察到散射区域有明显提升, 整体有所改善, 图 12(c)红色高亮区的密度最高, 且分布最均匀, 发生了强烈的多重散射或相干增强。图 12(d)红色区域变得巨大且模糊, 分布也不够均匀, 这说明二氧化硅比例过高导致了颗粒团聚。光散射模拟结果揭示了不同组分比例下的光传播行为, 为实验中反射率性能的差异提供了机理解释。综合模拟与实验结果可知,  $\text{SiO}_2$  颗粒与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的组分比例通过调控两相分散状态与界面数量, 直接决定了复合膜层的漫反射性能, 综合前面章节的附着力测试, 确定  $\text{SiO}_2$  颗粒与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的比例 6:4 为最优配比。

### 3.6. 基于准分子灯的复合颗粒反射膜性能测试

照度对比测试以某商用准分子灯、没有反射膜的准分子灯和带有反射膜的准分子灯作为对照, 分别编号为 Z1、Z2、Z3。待准分子灯启动后稳定工作 10 min, 测量准分子灯出光窗口中心点位 C 点的照度, 测试距离分别是距灯管表面 6 mm 处和 10 mm 处。测试数据以统计 5 次后的平均值为准, 结果如图 13 所示。

测试结果显示: 6 mm 距离下, Z1 和 Z2 平均照度分别为  $65.06 \text{ mW/cm}^2$  和  $61.28 \text{ mW/cm}^2$ , 有反射膜的准分子灯 Z3 照度为  $73.22 \text{ mW/cm}^2$ , 较二者分别提升 12.5%、19.5%。10 mm 距离下, Z1、Z2 照度降至  $58.26 \text{ mW/cm}^2$  和  $54.3 \text{ mW/cm}^2$ , Z3 仍最高, 为  $66.26 \text{ mW/cm}^2$ , 较二者提升率分别为 13.7%、22%, 照度衰减系紫外光在长光程中被散射吸收所致。Z3 相对 Z1、Z2 的平均提升率分别为 13.1%、20.75%, 证明反射膜可显著提升准分子灯照度。

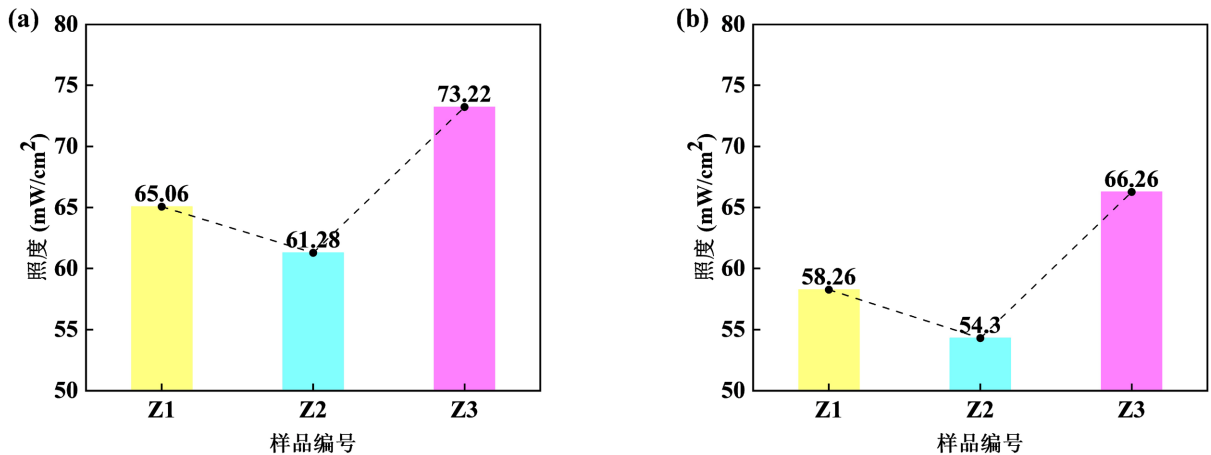


Figure 13. Comparison of illuminance of Z1, Z2, Z3 excimer lamps: (a) 6 mm away; (b) 10 mm away

图 13. Z1、Z2、Z3 准分子灯照度对比: (a) 6 mm 处; (b) 10 mm 处

为探究准分子灯の出光均匀性, 待准分子灯启动后稳定工作 10 min, 测量准分子灯出光窗口五个平均分布点位 A、B、C、D、E 点的照度, 测试距离分别是距灯管表面 6 mm 处和 10 mm 处。测试数据以统计 5 次后的平均值为准, 结果如图 14 所示。

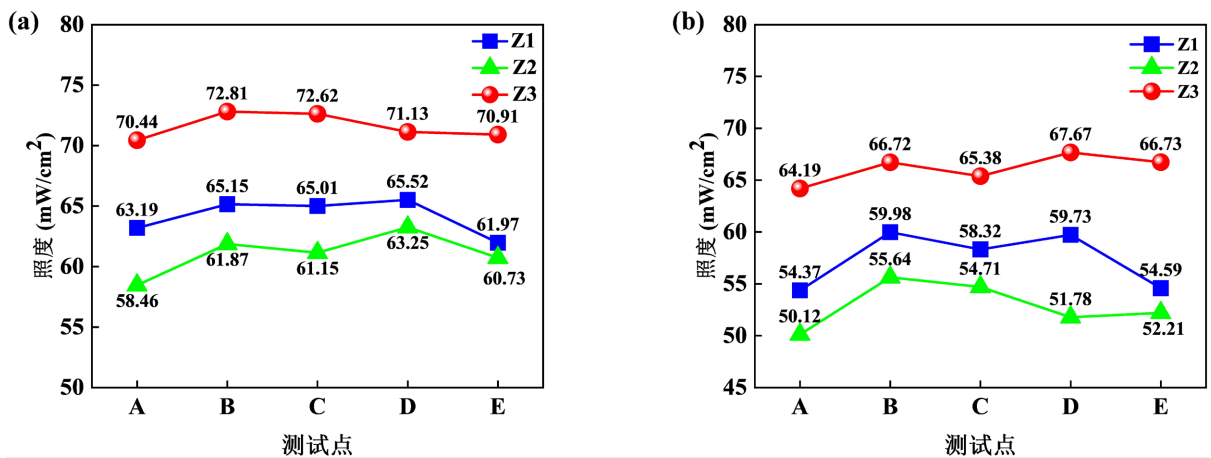


Figure 14. Comparison of illuminance uniformity of Z1, Z2, Z3 excimer lamps: (a) 6 mm away; (b) 10 mm away

图 14. Z1、Z2、Z3 准分子灯照度均匀性对比: (a) 6 mm 处; (b) 10 mm 处

6 mm 测试距离下, Z1、Z2、Z3 照度极差分别为 3.55 mW/cm<sup>2</sup>、4.79 mW/cm<sup>2</sup> 和 2.37 mW/cm<sup>2</sup>; 10 mm 时三者极差依次为 5.61 mW/cm<sup>2</sup>、5.52 mW/cm<sup>2</sup> 和 3.48 mW/cm<sup>2</sup>。Z3 在两种距离下照度极差均最小。为量化均匀性指标, 通过变异系数(CV)表示数据相对平均值的波动比例, 在本研究中则可以作为考察照度均匀性的指标, 变异系数越小, 则说明照度越均匀, 计算方法如式 9 所示。

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \quad (9)$$

式中,  $\bar{X}$  为平均值,  $S$  为标准差。Z1、Z2、Z3 准分子灯在 6 mm 和 10 mm 测试距离处的变异系数 CV 计算结果如表 2 所示。

通过对比发现, 三款准分子灯在 6 mm 测试距离和 10 mm 测试距离处均具备优质级的出光均匀性,

即出光均匀性  $\leq 10\%$ ，但 Z3 准分子灯的变异系数  $CV$  均低于 Z1 和 Z2，这也就表示 Z3 准分子灯具有更好的照度均匀性。该结果表明，反射膜不仅提升了准分子灯の出光均匀性，更显著降低了均匀性受工作距离的影响。

**Table 2.** Coefficient of variation of three excimer lamps at 6 mm and 10 mm

**表 2.** 三款准分子灯在 6 mm 和 10 mm 处的变异系数

名称	$\bar{X}$ (6 mm)	$S$ (6 mm)	$CV$ (6 mm)	$\bar{X}$ (10 mm)	$S$ (10 mm)	$CV$ (10 mm)
Z1	64.168	1.5239	2.37%	57.398	2.7390	4.77%
Z2	61.092	1.7553	2.87%	52.892	2.2496	4.25%
Z3	71.582	1.0660	1.49%	66.138	1.3607	2.06%

#### 4. 结论

本研究针对 172 nm 平板型准分子灯的光子逸散与能量损耗难题，系统性地构建了基于 Sol-gel 的深紫外复合颗粒反射膜体系。依托半导体能带理论与 Tauc 法则，精准筛选出禁带宽度超过 7.21 eV 的 SiO<sub>2</sub> 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 作为极低损耗散射介质。通过米氏散射理论结合电磁场仿真，深入揭示了特征粒径与漫反射截面之间的本征响应关系，确立了 300 nm SiO<sub>2</sub> 与 100 nm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的最优光学匹配尺寸。论证了 35% 固含量是实现颗粒微观紧密堆积、将孔隙率压降至 0.64% 的最优态。此外，确立了 SiO<sub>2</sub> 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 质量比 6:4 的组分最优解，利用两相物理特性的互补性成功耗散了界面残余热应力，将膜层脱落率抑制在 5% 的极低水平。准分子灯实测结果表明，该光学膜层的引入不仅使灯管照度跃升至 73.22 mW/cm<sup>2</sup>，更赋予准分子灯 1.49% 超低变异系数的照度均匀性。

#### 参考文献

- [1] Chen, M. and He, Y. (2018) Plasmonic Nanostructures for Broadband Solar Absorption Based on the Intrinsic Absorption of Metals. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **188**, 156-163. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.09.003>
- [2] De Lorenci, V.A. and de Paula, L.T. (2025) Light Propagation in Magnetoelectric Materials: The Role of Optical Coefficients in Refractive Index Modulation. *Physical Review A*, **112**, Article ID: 013514. <https://doi.org/10.1103/w2y7-gfc8>
- [3] Parthasarathy, H. (2022) Models for the Refractive Index of Materials and Liquids Models for the Refractive Index of Materials and Liquids. In: Parthasarathy, H., Ed., *Advanced Classical and Quantum Probability Theory with Quantum Field Theory Applications*, CRC Press, 185-215. <https://doi.org/10.1201/9781003353430-6>
- [4] Shankar, S., Sumpter, B.G., Shankar, V., Goddard, W. and Naserifar, S. (2024) *In-Silico* Analysis of High Refractive Index Materials through Principles of Materials Design. *IEEE Nanotechnology Magazine*, **18**, 21-32. <https://doi.org/10.1109/mnano.2024.3475890>
- [5] Rodionov, S.A. and Merzlikin, A.M. (2022) Effective Refractive Index of 2D Porous Composite Materials. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, **134**, 600-606. <https://doi.org/10.1134/s1063776122050119>
- [6] 王集锦, 普文冉, 马骏王, 等. 紫外可见漫反射光谱和 Tauc plot 方法分析无机 Ruddlesden-Popper 钙钛矿带隙[J]. *大学物理实验*, 2022, 35(4): 13-16.
- [7] 徐方龙, 赵鹏君, 张家齐, 等. Bi 过量对 BiFeO<sub>3</sub> 薄膜禁带宽度及光伏性能的影响[J]. *化工新型材料*, 2015, 43(8): 119-121, 148.
- [8] Paton, K.R. and Coleman, J.N. (2016) Relating the Optical Absorption Coefficient of Nanosheet Dispersions to the Intrinsic Monolayer Absorption. *Carbon*, **107**, 733-738. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.06.043>
- [9] Wehlitz, R., Juranić, P.N. and Lukić, D.V. (2008) Double Photoionization of Magnesium from Threshold to 54 eV Photon Energy. *Physical Review A*, **78**, Article ID: 033428. <https://doi.org/10.1103/physreva.78.033428>
- [10] 李文东, 何刚. 钼掺杂对溅射法制备 MoS<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub> 异质结能带排列的调制[C]//中国真空学会薄膜专业委员会. TFC'17 全国薄膜技术学术研讨会论文摘要集. 合肥: 安徽大学物理与材料科学学院辐射探测材料与器件构筑实验室, 2017: 82.

- 
- [11] 林峰, 盛箴, 龚大卫, 等. 硅-二氧化硅超晶格——探索硅基发光材料的一条新途径[J]. 物理, 1998, 27(8): 20-24.
- [12] 罗鸣. 基于基板的 TiO<sub>2</sub> 纳米点结构的制备及性能研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [13] 王银海, 牟季美, 蔡维理, 等. 纳米 Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 组装体模板合成与光吸收[J]. 物理学报, 2001, 50(9): 1751-1755.
- [14] 张文婷. 含 LiNbO<sub>3</sub> 缺陷层一维 TiO<sub>2</sub>/MgF<sub>2</sub> 可调带隙光子晶体研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- [15] Berg, M.J., Sorensen, C.M. and Chakrabarti, A. (2010) Explanation of the Patterns in Mie Theory. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **111**, 782-794. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2009.11.010>
- [16] Javan, H. (1999) Application of Mie Theory to Large Particle. *Proceedings IEEE Southeastcon'99. Technology on the Brink of 2000 (Cat. No.99CH36300)*, Lexington, 25-28 March 1999, 237-241. <https://doi.org/10.1109/secon.1999.766131>
- [17] Wang, Z.B., Luk'yanchuk, B.S., Hong, M.H., Lin, Y. and Chong, T.C. (2004) Energy Flow around a Small Particle Investigated by Classical Mie Theory. *Physical Review B*, **70**, Article ID: 035418. <https://doi.org/10.1103/physrevb.70.035418>
- [18] Wilson, J.D. and Foster, T.H. (2005) Mie Theory Interpretations of Light Scattering from Intact Cells. *Optics Letters*, **30**, 2442-2444. <https://doi.org/10.1364/ol.30.002442>
- [19] 曾巧, 戴志平. FDTD 方法下光的全反射的讨论[J]. 光源与照明, 2022(7): 55-57.
- [20] Lesina, A.C., Vaccari, A., Berini, P. and Ramunno, L. (2015) On the Convergence and Accuracy of the FDTD Method for Nanoplasmonics. *Optics Express*, **23**, 10481-10497. <https://doi.org/10.1364/oe.23.010481>