

基于 TMM 与混合整数遗传算法的 PDMS 辐射冷却多层膜仿真设计与参数优化

苑孟理想, 赵娜娜^{*}, 吴嘉润, 刘文娜, 郭紫哈, 刘新红

北京石油化工学院, 北京 102617

DOI:10.61369/ERA.2026080028

摘 要 : 全球能源消耗持续攀升, 热环境问题日益突出, 发展高效被动制冷技术具有重要意义。本文以 PDMS 基辐射冷却材料为切入点, 采集了材料光学常数、太阳光谱和大气透射率等数据, 运用三次样条插值与传输矩阵法 (TMM) 计算了不同厚度薄膜的光谱发射率。结果表明, 在 8–13 μm 大气窗口内, PDMS 发射率随厚度增加而升高, 100 μm 后趋于饱和, 平均发射率 0.936。在此基础上, 建立辐射–对流耦合的净制冷功率模型, 并采用牛顿迭代法求解平衡温度, 定量揭示了厚度对制冷性能的边际效应。针对多层膜结构的优化问题 (材料离散、厚度连续), 建立了混合整数遗传算法与 TMM 相结合的 MIGA–TMM 模型, 以净制冷功率为适应度进行全局寻优, 得到 PDMS/SiO₂/TiO₂/Ag 七层最优结构, 净制冷功率 57.09 W/m², 敏感性分析表明, 对流换热系数波动 $\pm 50\%$ 时净制冷功率变化约 10%, 环境温度变化 $\pm 5\text{K}$ 时平衡温度变化约 22%, 模型整体鲁棒性良好。

关 键 词 : 辐射冷却; PDMS; 传输矩阵法; 牛顿迭代法; 混合整数遗传算法

Simulation Design and Parameter Optimization of PDMS-Based Radiative Cooling Multilayer Films Based on TMM and Mixed-Integer Genetic Algorithm

Yuan Menglixiang, Zhao Nana^{*}, Wu Jiarun, Liu Wenna, Guo Zihan, Liu Xinhong

Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617

Abstract : With the continuous increase in global energy consumption and the growing severity of thermal environment problems, the development of efficient passive cooling technologies has become increasingly important. Taking PDMS-based radiative cooling materials as the research object, this paper collects optical constants of materials, solar spectral data, and atmospheric transmittance data. Cubic spline interpolation and the transfer matrix method (TMM) are used to calculate the spectral emissivity of films with different thicknesses. The results show that, within the atmospheric window of 8–13 μm , the emissivity of PDMS increases with film thickness and tends to become saturated after 100 μm , with an average emissivity of 0.936. On this basis, a radiation–convection coupled net cooling power model is established, and the equilibrium temperature is solved by the Newton iteration method, which quantitatively reveals the marginal effect of thickness on cooling performance. For the optimization problem of multilayer film structures, where material selection is discrete and layer thickness is continuous, a MIGA–TMM model combining the mixed–integer genetic algorithm and TMM is constructed. Taking net cooling power as the fitness function, global optimization is carried out. The optimized seven-layer PDMS/SiO₂/TiO₂/Ag structure achieves a net cooling power of 57.09 W/m². Sensitivity analysis shows that when the convective heat transfer coefficient fluctuates by $\pm 50\%$, the net cooling power changes by about 10%; when the ambient temperature changes by $\pm 5\text{K}$, the equilibrium temperature changes by about 22%. Overall, the model shows good robustness.

Keywords : radiative cooling; PDMS; transfer matrix method; Newton iteration method; mixed–integer genetic algorithm

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划 (2026J00115); 北京市大学生创新创业训练计划 (2026J00091); 北京市高等教育学会课题 (MS2025130); 北京市教委科研计划一般项目 (KM202410017004)。

作者简介:

苑孟理想, 本科生, 新材料与化工学院;

吴嘉润, 本科生, 新材料与化工学院;

刘文娜, 本科生, 信息工程学院;

郭紫哈, 本科生, 信息工程学院;

刘新红, 副教授, 博士, 研究方向: 应用数学。

通讯作者: 赵娜娜, 讲师, 博士, 研究方向: 概率论与数理统计。

引言

全球能源消耗持续攀升，热环境问题日益突出，传统主动制冷方式能耗高、碳排放量大。被动日间辐射冷却（PDRC）技术无需外界能量，可直接向太空排热，因此成为绿色制冷领域的研究热点。在各类辐射冷却材料中，聚合物因其成本低、易加工且在大气窗口具有本征吸收峰而受到广泛关注^[1]。其中，聚二甲硅氧烷（PDMS）因在大气窗口（8–13 μm）具有高发射率，同时在可见光波段具有高透射率，被视作 PDRC 的理想材料之一。辐射冷却材料的系统综述指出，PDMS 是一种具有良好应用前景的柔性辐射冷却基体材料^[2]。

自 Raman 等^[3]首次在太阳直射下实现低于环境温度的辐射冷却以来，该技术的可行性已得到广泛验证。在材料设计方面，Zhai 等^[4]通过玻璃–聚合物混合超材料展示了可扩展制造的日间辐射冷却方案，为多层膜结构设计提供了重要思路。

然而，目前针对 PDMS 基辐射冷却材料的系统性能分析尚不充分，尤其在发射率与厚度的定量关联、制冷性能的综合评估、多层膜结构优化等方面，建模方法与优化算法仍有进一步提升的空间。现有研究多聚焦于单一性能或结构仿真，缺乏从光学计算、热平衡到离散优化的完整建模框架。

因此，本文以 PDMS 基辐射冷却材料为研究对象，融合传输矩阵法（TMM）、牛顿迭代法、混合整数遗传算法（MIGA），从发射率计算、制冷性能量化到多层膜结构优化开展系统研究。相关结论可为建筑节能、电子散热、农业冷链等领域的辐射制冷技术研发提供参考。

一、数据预处理

（一）数据收集

材料光学常数（折射率 n 与消光系数 k ）取自 refractiveindex.info 数据库，涵盖 PDMS、SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、HfO₂、Ag 等材料，波长范围 0.3–25 μm。太阳光谱采用 ASTM G173–03 标准（美国国家可再生能源实验室），大气透射率基于美国 1976 标准大气计算生成。

（二）三次样条插值

原始光学常数的波长点分布较稀疏，直接用于传输矩阵法会产生较大误差。为此，采用三次样条插值对 $n(\lambda)$ 和 $k(\lambda)$ 进行加密，统一为 0.3–25 μm、步长 0.01 μm 的密集波长序列。

二、模型建立与求解

（一）传输矩阵法（TMM）

传输矩阵法是分析多层膜光学特性的经典方法，在薄膜光学领域已有广泛应用^[5, 6]。要分析 PDMS 薄膜的辐射冷却性能，首先需要获得其光谱发射率。对于空气–PDMS–空气三层平面结构，电磁波垂直入射时，可用传输矩阵法描述光在膜层中的传播。PDMS 薄膜的特征矩阵为：

$$M = \begin{bmatrix} \cos\delta & -\frac{i}{\tilde{n}_j} \sin\delta \\ -i\tilde{n}_j \sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $\delta = \frac{2\pi\tilde{n}_j d}{\lambda}$ 为相位厚度， $\tilde{n}_j = n_j + ik_j$ 表示 PDMS 薄膜的

复折射率。

通过矩阵可求解反射系数 r 和透射系数 t ：

$$r = \frac{M_{11} + M_{12} - M_{21} - M_{22}}{M_{11} + M_{12} + M_{21} + M_{22}}, \quad t = \frac{2}{M_{11} + M_{12} + M_{21} + M_{22}} \quad (2)$$

反射率 $R = |r|^2$ ，透射率 $T = |t|^2$ 。根据能量守恒和基尔霍夫定律，在热平衡条件下，光谱发射率 $\epsilon = 1 - R - T$ 。

上述 TMM 计算过程采用 Python 编程实现，并在统一波长网格下完成光谱发射率计算。

（二）纯 PDMS 薄膜的发射特性

首先研究纯 PDMS 薄膜（空气–PDMS–空气三层结构）的发射特性。

利用上述 TMM 模型，计算厚度为 10、25、50、100、200、300 μm 的薄膜，其光谱发射率。具体结果如图 1 所示。

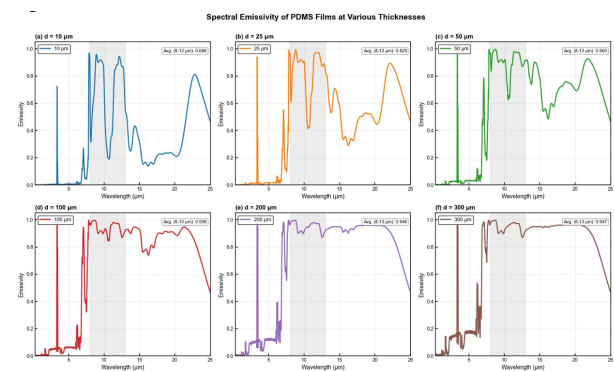


图 1：PDMS 薄膜不同厚度的光谱发射率图

如图所示，在 8–13 μm 大气窗口内，PDMS 发射率均较高，且随厚度增加趋近于 1。较薄膜（10、25 μm）存在明显波动，这是光学干涉与分子吸收耦合的结果；较厚薄膜（≥100 μm）发

射率趋于稳定,说明干涉效应减弱、分子吸收更加充分。

接下来进一步计算8-13 μm 薄膜厚度与平均发射率的关系曲线,如图2所示。

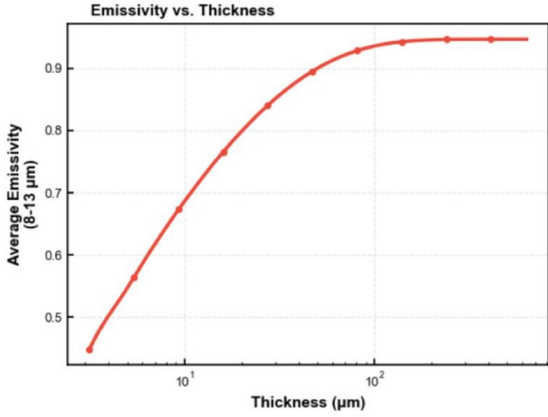


图2: PDMS 薄膜厚度与平均发射率的关系曲线图

当厚度达到100 μm 时,平均发射率趋于饱和,约为0.936。这说明100 μm 是兼顾性能与材料用量的一个关键厚度。

(三) 净制冷功率与平衡温度

发射率高只是实现辐射冷却的必要条件,最终冷却效果还需要考虑实际环境中的各种能量交换。为此,本文建立了净制冷功率模型。黑体光谱辐射出射度由普朗克公式给出:

$$E_b(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1 \right)} \quad (3)$$

对于水平放置的薄膜,净制冷功率定义为自身热辐射减去吸收的大气辐射、地面辐射、太阳辐射以及非辐射热损失:

$$P_{\text{net}}(T_{\text{surf}}) = P_{\text{rad,emit}} - P_{\text{atm,abs}} - P_{\text{ground,abs}} - P_{\text{sun,abs}} - P_{\text{non-rad}} \quad (4)$$

各项具体含义如下:

$$P_{\text{rad,emit}} = 2 \int_{\lambda=0.3\mu\text{m}}^{25\mu\text{m}} E_b(\lambda, T_{\text{surf}}) \cdot \epsilon(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

表示薄膜因自身温度向外辐射的能量;

$$P_{\text{atm,abs}} = \int_{\lambda=0.3\mu\text{m}}^{25\mu\text{m}} E_b(\lambda, T_{\text{amb}}) \cdot (1 - t_{\text{atm}}(\lambda)) \cdot \epsilon(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

表示薄膜吸收的大气辐射;

$$P_{\text{ground,abs}} = \int_{\lambda=0.3\mu\text{m}}^{25\mu\text{m}} E_b(\lambda, T_{\text{amb}}) \cdot \epsilon(\lambda) \cdot F_{\text{ground}} d\lambda \quad (7)$$

表示薄膜吸收来自地面的热辐射功率。

其中,取 $F_{\text{ground}} = 0.5$,表示一半的半球空间来自地面;

$$P_{\text{sun,abs}} = \int_{\lambda=0.3\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} I_{\text{solar}}(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda)) d\lambda = \int_{\lambda=0.3\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} I_{\text{solar}}(\lambda) \cdot (\epsilon(\lambda) + T(\lambda)) d\lambda \quad (8)$$

表示薄膜-基底系统吸收的有效太阳辐射(透射部分可能被下层基底吸收,故采用 $1-R$ 更准确);

$$P_{\text{non-rad}} = h_c \cdot (T_{\text{amb}} - T_{\text{surf}}) \quad (9)$$

表示薄膜和周围空气之间通过对流、传导产生的热交换功率。

其中 $h_c = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $T_{\text{amb}} = 300 \text{ K}$ (27 $^{\circ}\text{C}$), 平衡温度 T_{eq} 满足 $P_{\text{net}}(T_{\text{surf}}) = 0$

本文采用牛顿迭代法对非线性方程进行数值求解。

通过上述计算,得到了PDMS薄膜的净制冷功率与平衡温度,如图3和图4所示。

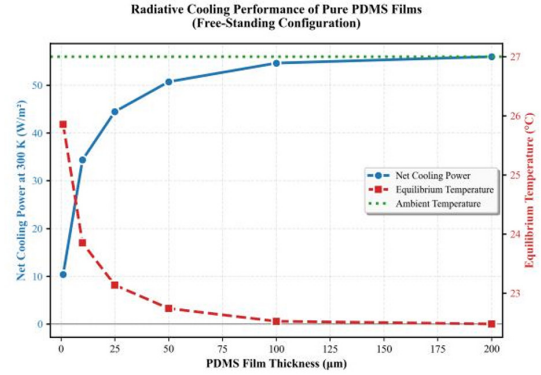


图3: 纯PDMS冷膜(独立结构)的辐射制冷性能

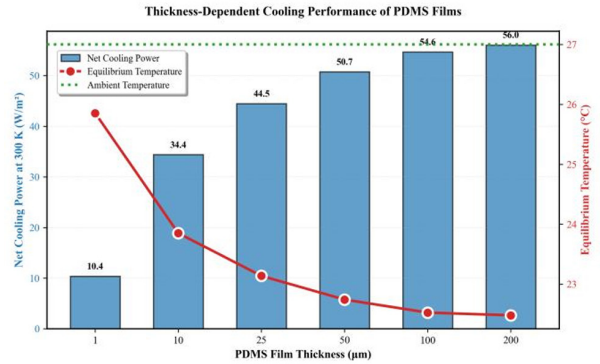


图4: PDMS冷膜厚度与制冷性能的关系图

由上图可知,净制冷功率随膜厚增加快速上升,当厚度 $\geq 100 \mu\text{m}$ 后趋于稳定;平衡温度随膜厚增加快速下降,厚度超过100 μm 后稳定在约22 $^{\circ}\text{C}$,这表明边缘效应在100 μm 后显著减小,推荐100 μm 为实际应用的最优厚度。

(四) 多层膜结构的MIGA-TMM优化

纯PDMS薄膜在大气窗口有高发射率,但在太阳波段的吸收仍不可忽略。为进一步提升冷却性能,将PDMS与高低折射率交替的介电材料组合成多层膜结构。此时面临两个难点:材料种类为离散选项(SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 HfO_2),每层厚度为连续变量(中间层0.01-0.8 μm ,PDMS层10-100 μm),底层固定为Ag。这属于混合整数非线性规划问题,传统梯度方法难以处理。

为此,构建混合整数遗传算法与TMM相结合的MIGA-TMM模型^[7]。采用锦标赛选择、单点交叉(材料)与模

拟二进制交叉（厚度）、均匀变异（材料）与多项式变异（厚度），并保留精英个体。适应度函数为净制冷功率 P_{net} （由 TMM 计算），值越大表示结构越优。基于该模型，得到以下优化结果：

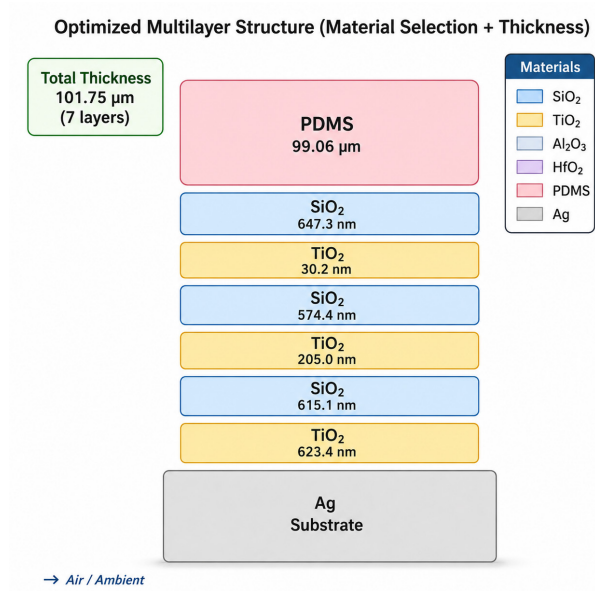


图5：最优多层膜结构示意图

图5展示了最优结构：七层结构，顶层 PDMS 厚度 $99.06\mu\text{m}$ ，中间层为 SiO_2 与 TiO_2 交替（共6层）^[8、9]，底层 Ag（高反射、低透射）^[10]。总厚度 $101.75\mu\text{m}$ ，净制冷功率 57.09 W/m^2 。

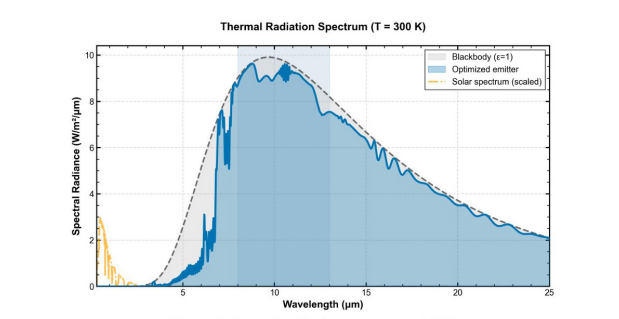


图6：最优结构的热辐射光谱图（300 K）

图6展示了该结构的热辐射光谱：在 $8-13\mu\text{m}$ 波段高效发射，在太阳波段几乎不发射，实现了选择性辐射。

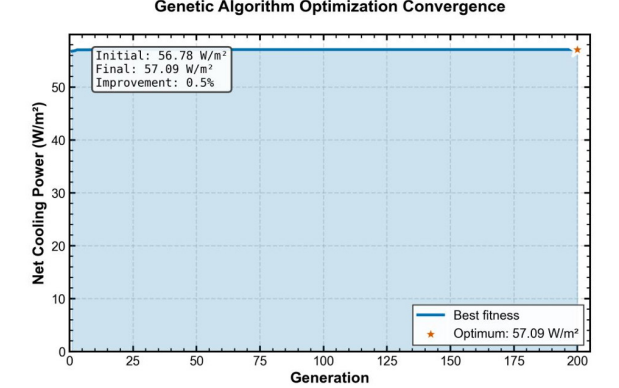


图7：遗传算法优化的收敛曲线图

图7收敛曲线显示，初始种群中已存在性能较优的结构（初始净制冷功率 56.78 W/m^2 ），后续优化提升有限（最终 57.09 W/m^2 ）。

MIGA-TMM 模型的主要价值不在于性能的大幅提升，而在于实现了离散材料选择与连续厚度参数优化的一体化自动筛选。

三、敏感性分析

实际环境中，对流换热系数 h_c 和环境温度 T_{amb} 会随风速、天气等因素波动。为评估模型稳定性，对这两个参数进行敏感性分析，结果见表1和表2。

表1： h_c 敏感性分析结果表

h_c	P_{net}	T_{eq}	P_{net} 相对变化率	T_{eq} 相对变化率
5 (-50%)	62.3	20.1	+8.9	-8.6
8 (-20%)	59.7	21.2	+4.2	-3.6
10 (基准)	57.0	22.0	0	0
12 (+20%)	54.5	22.8	-4.4	+3.6
15 (+50%)	51.2	23.9	-10.2	+8.6

表2： T_{amb} 敏感性分析结果表

$T_{\text{amb}}(\text{K})$	P_{net}	T_{eq}	P_{net} 相对变化率	T_{eq} 相对变化率
295 (-5K)	60.1	17.3	+5.4	-21.4
298 (-2K)	58.2	19.8	+2.1	-9.1
300 (基准)	57.0	22.0	0	0
302 (+2K)	55.9	24.1	-1.9	+9.5
305 (+5K)	54.2	26.8	-4.9	+21.8

结果表明， h_c 变化 $\pm 20\%$ 时， P_{net} 变化约 $\pm 4\%\sim\pm 4.5\%$ ， T_{eq} 变化约 $\pm 3.6\%$ ；变化 $\pm 50\%$ 时，变化率扩大至 $\pm 8.9\%\sim\pm 10.2\%$ ，模型对 h_c 具有中低敏感性。 T_{amb} 变化 $\pm 5\text{ K}$ 时， T_{eq} 最大变化约 $\pm 21.8\%$ ，但 P_{net} 变化不超过 $\pm 5\%$ ，表明平衡温度对不同气候区敏感，但核心净制冷能力相对稳定，模型整体鲁棒性良好。

四、结束语

本文系统建立了 PDMS 基辐射冷却材料的系列数学模型，主要结论如下：

- 1.PDMS 薄膜在 $8-13\mu\text{m}$ 大气窗口具有高发射率，厚度 $100\mu\text{m}$ 后趋于饱和，平均发射率 0.936。
2. 净制冷功率和平衡温度随厚度增加而改善，超过 $100\mu\text{m}$ 后边际效应显著，推荐 $100\mu\text{m}$ 为实际应用的最优厚度。
3. 通过 MIGA-TMM 模型优化得到 PDMS/ SiO_2 / TiO_2 /Ag 七层结构，净制冷功率 57.09 W/m^2 ，实现了“太阳波段低吸收、大气窗口高发射”的选择性辐射。

本文所建立的 TMM- 遗传算法集成框架不仅适用于 PDMS 基辐射冷却材料，还可推广到其他多层膜光学器件设计（外探测

器、激光反射镜、太阳能电池抗反射涂层等），在应用层面，辐射冷却材料可应用于建筑节能、电子散热、农业冷链等领域。

敏感性分析表明模型稳定性良好，未来工作将进一步扩展材料库、引入环境老化因素，以增强模型的实用适用性。

尽管存在理想化假设（如垂直入射、恒定对流系数等），但

参考文献

[1] 万中伊欣, 刘东青, 余金山. 日间辐射制冷材料研究进展 [J]. 材料导报, 2022, 36(3): 27–33.

[2] Liu R, Wang S, Zhou Z, et al. Materials in radiative cooling technologies[J]. Advanced Materials, 2025, 37(12): 2401577.

[3] Raman A, Anoma M A, Zhu L, et al. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight[J]. Nature, 2014, 515(7528): 540–544.

[4] Zhao X, Zhai Y, Ma Y, David S N, et al. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling[J]. Science, 2017, 355(6329): 1062–1066.

[5] 蔡清元, 蒋林, 等. 光学薄膜与系统的偏振控制 [J]. 光学技术, 2018, 44(3): 23–29.

[6] Zhao X, Zhang Y, Zhang Q, et al. Transmission comb of a distributed Bragg reflector with two surface dielectric gratings[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 21125.

[7] Pourmasoud S, Moretti L. Designing of broadband solar omnidirectional reflector with a chirped multilayer using an optimization procedure based on a genetic algorithm[J]. Optical Materials, 2024, 157: 116415.

[8] 刘润政, 韩宗晟, 黄晓卫, 等. PLA/SiO₂/TiO₂ 双层复合膜辐射制冷性能研究 [J]. 纺织高校基础科学学报, 2025, 38(5): 9–16.

[9] Realization of an efficient radiative cooling emitter with double layer inorganic SiO₂ and TiO₂ metamaterial[J]. Results in Physics, 2023, 45: 106121.

[10] Perrakis G, Tasolamprou A C, Kakavelakis G, et al. Infrared-reflective ultrathin-metal-film-based transparent electrode with ultralow optical loss for high efficiency in solar cells[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 548.