

# 基于红外干涉法的碳化硅外延层厚度测量研究

高天昊<sup>1</sup>, 朴凤贤<sup>2\*</sup>, 王杰<sup>1</sup>, 关圣霖<sup>1</sup>

<sup>1</sup>沈阳航空航天大学人工智能学院, 辽宁 沈阳

<sup>2</sup>沈阳航空航天大学理学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年5月25日; 录用日期: 2026年6月18日; 发布日期: 2026年6月25日

## 摘要

为满足第三代半导体碳化硅(SiC)外延层厚度高精度、无损、标准化测量需求, 解决传统红外干涉法因双光束近似、固定折射率假设与单入射角拟合带来的系统误差大、稳定性不足等关键问题, 本文提出一种融合光学干涉模型、Cauchy折射率色散和Drude折射率色散模型修正与双入射角联合非线性拟合的厚度反演方法。研究构建单层反射双光束干涉模型与更贴近真实物理过程的Fabry-Pérot多光束干涉模型, 引入Cauchy色散方程精准描述折射率随波长的变化规律, 依托Python完成光学建模、干涉仿真与数据处理。实验采用10°与15°双入射角红外反射光谱进行联合拟合, 显著抑制层内多次反射、折射率色散、光谱噪声及基线漂移对测量结果的影响。结果表明, 消除多光束干涉系统误差后, SiC外延层厚度为8.8037  $\mu\text{m}$ , 硅外延层厚度为4.6441  $\mu\text{m}$ ; 传统双光束模型计算结果为8.0000  $\mu\text{m}$ , 量化验证了多光束效应对厚外延层测量的系统性偏差。误差与稳定性分析显示, Fabry-Pérot多光束模型拟合精度更高、残差更小, 决定系数 $R^2$ 大于0.99, 在不同初始值下均稳定收敛, 厚度相对偏差小于0.5%。该方法无损、快速、可标准化, 适用于SiC、Si等半导体外延层检测, 可推广至其他第三代半导体材料的无损厚度测量, 为SiC器件研发、工艺控制与产业化提供高精度技术支撑。

## 关键词

红外干涉法, Fabry-Pérot干涉模型, 非线性最小二乘拟合, 折射率, 碳化硅外延层, Cauchy色散

# Research on Measurement of Silicon Carbide Epitaxial Layer Thickness Based on Infrared Interferometry

Tianhao Gao<sup>1</sup>, Fengxian Piao<sup>2\*</sup>, Jie Wang<sup>1</sup>, Shenglin Guan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Artificial Intelligence, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning

<sup>2</sup>School of Science, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning

Received: May 25, 2026; accepted: June 18, 2026; published: June 25, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 高天昊, 朴凤贤, 王杰, 关圣霖. 基于红外干涉法的碳化硅外延层厚度测量研究[J]. 建模与仿真, 2026, 15(6): 101-113. DOI: 10.12677/mos.2026.156097

## Abstract

To meet the demands for high-precision, non-destructive and standardized thickness measurement of silicon carbide (SiC) epitaxial layers of third-generation semiconductors, and solve the key problems of large systematic errors and insufficient stability existing in traditional infrared interferometry caused by two-beam approximation, fixed refractive index assumption and single-incident-angle fitting, this paper proposes a thickness inversion method integrating optical interference model, Cauchy refractive index dispersion and Drude Refractive Index Dispersion Model correction and dual-incident-angle joint nonlinear fitting. This study constructs a single-layer reflective two-beam interference model and a Fabry-Pérot multi-beam interference model closer to real physical processes, introduces the Cauchy dispersion equation to accurately describe the variation rule of refractive index with wavelength, and completes optical modeling, interference simulation and data processing based on Python. In the experiment, infrared reflectance spectra at incident angles of  $10^\circ$  and  $15^\circ$  are adopted for joint fitting, which greatly suppresses the effects of intra-layer multiple reflections, refractive index dispersion, spectral noise and baseline drift on measurement results. The results show that after eliminating the systematic error of multi-beam interference, the thickness of SiC epitaxial layer is  $8.8037\ \mu\text{m}$  and the thickness of silicon epitaxial layer is  $4.6441\ \mu\text{m}$ , while the calculation result of traditional two-beam model is  $8.0000\ \mu\text{m}$ , which quantitatively verifies the systematic deviation caused by multi-beam effect in the measurement of thick epitaxial layers. Error and stability analysis indicates that the Fabry-Pérot multi-beam interference model has higher fitting accuracy and smaller residuals with the coefficient of determination  $R^2$  greater than 0.99, and it can converge stably under different initial values with relative thickness deviation less than 0.5%. Featuring non-destructiveness, rapidity and easy standardization, this method is suitable for the detection of SiC, Si and other semiconductor epitaxial layers, and can be extended to non-destructive thickness measurement of other third-generation semiconductor materials, providing high-precision technical support for the research and development, process control and industrialization of SiC devices.

## Keywords

Infrared Interferometry, Fabry-Pérot Interference Model, Nonlinear Least Squares Fitting, Refractive Index, Silicon Carbide Epitaxial Layer, Cauchy Dispersion

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

碳化硅(SiC)作为第三代半导体的核心代表材料,拥有宽禁带、高击穿电场强度、高热导率、优异化学稳定性、耐高温及抗辐照等一系列突出性能,在新能源汽车、轨道交通、光伏逆变、航空航天、5G 射频与大功率电力电子装备等领域具备不可替代的应用价值,已成为支撑现代高端电子产业发展的关键基础材料。外延层是 SiC 器件的核心功能结构,其厚度均匀性与测量精准度直接决定器件的耐压等级、导通电阻、开关频率、温度特性及长期可靠性。在外延生长与芯片制造过程中,即使是亚微米至微米级的厚度偏差,也会引发器件漏电流上升、耐压能力下降、工作发热加剧、参数一致性变差等问题,最终导致器件良率与可靠性大幅降低。因此,开发高精度、无损、快速、可重复、标准化的外延层厚度测量技术,对 SiC 材料研发、工艺优化、在线质量控制与规模化产业化发展具有至关重要的工程价值与科学意义。

红外干涉法是当前半导体行业用于外延层厚度测量的主流无损检测手段[1][2],其核心原理是利用红光入射外延层后,在空气-外延层界面与外延层-衬底界面分别产生反射光,两束或多束反射光因光程差异形成稳定干涉条纹,通过提取干涉光谱的极值位置与峰间距反推出薄膜厚度。该方法具备非接触、无损伤、测试速度快、适用范围广等优势,已广泛应用于硅、砷化镓等传统半导体材料的厚度检测[3][4]。然而,在面向 SiC 厚外延层的高精度测量需求时,传统红外干涉测量方法存在一些明显缺陷:

(1) 普遍采用双光束近似模型,仅考虑空气-外延层上表面与外延层-衬底界面的单次反射,忽略光在层内多次反射与透射形成的 Fabry-Pérot 多光束干涉效应,对微米至数十微米级厚外延层会引入显著系统误差;

(2) 假设外延层折射率为固定常数,未考虑折射率随波长、载流子浓度变化的色散特性,在中红外宽光谱范围内会进一步降低反推精度;

(3) 多采用单入射角光谱拟合,易受光谱噪声、界面相位偏差等因素干扰,测量结果鲁棒性与重复性不足。

随着第三代半导体产业的快速发展,碳化硅(SiC)、氮化镓(GaN)等材料的外延层厚度测量已成为器件制造过程中的关键质量控制环节。光学无损检测方法因非接触、无损伤、可在线检测等优势,成为目前的主流技术路径,其中尤以傅里叶变换红外(FTIR)反射光谱法和光谱椭偏法应用最为广泛[5]。

其中 FTIR 红外反射光谱法主要基于 Fabry-Pérot 干涉原理,通过分析反射光谱中的干涉条纹周期来反演外延层厚度,是工业界和学术界最常用的 SiC 外延层测厚手段。早期研究多采用简化的双光束干涉模型,近年来多光束干涉模型的引入,有效提升了对多次反射和界面损耗的建模精度,在常规厚度外延层(几微米至几十微米)的测量中已实现了较高的精度。

而光谱椭偏法主要是通过测量偏振光在薄膜界面反射后的偏振状态变化,结合光学模型拟合获取厚度与光学常数,具有测量精度高、可同时获得多层结构信息的优势,在薄外延层和超薄膜测量中应用广泛。然而,这些现有方法仍存在以下局限性:

(1) 多数现有研究仍采用固定折射率假设或单一色散模型,未针对 SiC/Si 材料在目标红外波段的光学特性进行精细化建模。随着外延层厚度增加,折射率色散效应的累积误差会显著降低测量精度,尤其在厚层测量中更为突出。在面对厚外延层时易受噪声和基线影响,导致测量稳定性不足;

(2) 折射率色散模型的选择往往基于经验,缺乏对不同材料在目标波段的定量对比与验证,易出现厚度与折射率参数的多解性问题,导致测量结果重复性差、稳定性不足;

(3) 缺乏将多光束模型、色散修正与多入射角拟合相结合的集成优化方案,难以同时满足高精度与高稳定性的工业化需求。

针对上述关键问题,本文系统构建单层反射双光束干涉模型与 Fabry-Pérot 多光束干涉模型,引入 Cauchy 色散方程和 Drude 折射率色散模型实现折射率波长修正,采用  $10^\circ$  与  $15^\circ$  双入射角联合非线性最小二乘拟合提升算法稳定性与抗干扰能力;通过对比两种模型的厚度计算结果,量化多光束干涉效应对测量精度的影响;并将所提方法同时应用于 SiC 外延片与 Si 外延片,验证模型的通用性、可靠性与工程适用性。本研究旨在为 SiC 外延层厚度精准测量提供一套更贴近真实物理过程、更高精度、更适于工业化应用的标准化解决方案,为第三代半导体材料研发与器件制造提供关键测量技术支撑。

## 2. 模型建立

### 2.1. 红外干涉法厚度测量物理基础

红外光在分层介质结构中传播时,会在不同折射率界面发生反射与透射,相邻反射光因传播光程差异产生相位差,进而形成光干涉现象[6]。干涉光谱携带外延层光学常数与几何厚度信息,通过解析干涉

峰位、峰间距与反射率波形，可实现厚度的非破坏性反演。

半导体外延片典型结构为空气 - 外延层 - 衬底三层介质体系，外延层与衬底存在明显折射率差异，满足红外干涉测量条件。入射红外光经空气入射至外延层上表面时，一部分发生直接反射，另一部分折射进入外延层内部，在外延层 - 衬底界面发生反射后再次透射穿出上表面。这两束(或多束)反射光满足相干条件，形成稳定的等厚干涉条纹。

干涉条纹的周期、幅度与相位由外延层厚度、折射率、入射角度及波长共同决定。传统双光束模型仅考虑两束主反射光的叠加，而真实物理过程包含层内多次反射与透射，必须采用多光束干涉模型才能准确描述反射率光谱，从而提升厚度测量精度。

## 2.2. 双光束干涉模型

参数设置：入射在空气中，入射角(相对于表面法线)为 $\theta$  (示意图中的 $\theta$ )，空气折射率 $n_0=1$ ，外延层厚度记为 $d$  (图中用 $d$ )，外延层在红外区的折射率为 $n(\sigma, N)$ ；图 1 为干涉模型示意图。

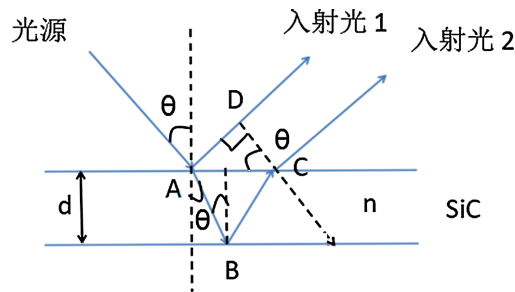


Figure 1. Schematic diagram of interference  
图 1. 干涉示意图

外延层内的折射角记为 $\theta'$ ，满足 Snell 折射定律[6]：

$$n_0 \sin \theta = n(\sigma) \sin \theta' \quad (1)$$

即

$$\sin \theta' = \frac{\sin \theta}{n(\sigma)} \quad (2)$$

红外光入射后，表面反射光与衬底界面反射光形成干涉，光程差[7]为：

$$\Delta L = 2n(\sigma)d \cos \theta' \quad (3)$$

可将 $n(\sigma)\cos \theta'$ 用代换简化为

$$\sqrt{n(\sigma)^2 - \sin^2 \theta} \quad (4)$$

因此光程差也可写成更紧凑的形式：

$$\Delta L(\sigma) = 2d\sqrt{n(\sigma)^2 - \sin^2 \theta} \quad (5)$$

相位差(以弧度计)是：

$$\delta(\sigma) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L(\sigma) = 2\pi\sigma \Delta L(\sigma) \quad (6)$$

代入 $\Delta L$ 得

$$\delta(\sigma) = 4\pi d \sigma \sqrt{n(\sigma)^2 - \sin^2 \theta} \quad (7)$$

此外界面反射可能含有半波损失(相位跳变)或来自衬底表面复反射相位, 我们把所有与界面初始相位相关的常数相位合并为常数  $\varphi_0$  (以弧度计; 若半波损失则  $\varphi_0 = \pi$  对应  $\varphi = \frac{1}{2}$  的情况)。两束光合成的相位条件(极大或极小)为

$$\varphi_0 + \delta(\sigma) = 2\pi m \quad (m \in \mathbb{Z}) \quad (8)$$

或按图写成:

$$\Delta L = (m + \varphi)\lambda, \quad \varphi = 0 \text{ 或 } 1/2 \quad (9)$$

最终得出外延层厚度为:

$$d = \frac{m - \varphi_0 / (2\pi)}{2\sigma \sqrt{n(\sigma)^2 - \sin^2 \theta}} = \frac{m + \varphi}{2\sigma \sqrt{n(\sigma)^2 - \sin^2 \theta}} \quad (10)$$

### 2.3. Fabry-Pérot 多光束干涉模型

在波数  $\sigma = 1/\lambda$  下:

$$\delta(\sigma) = 4\pi d \sigma \sqrt{n(\sigma, N)^2 - \sin^2 \theta} \quad (11)$$

干涉极大条件下:

$$\delta(\sigma) = 2\pi m \quad (m \in \mathbb{Z}) \quad (12)$$

厚度公式 - 对于相邻极大间隔  $\Delta\sigma$  :

$$d \approx \frac{\sqrt{n(\sigma)^2 - \sin^2 \theta}}{2\Delta\sigma \left( n(\sigma)^2 - \sin^2 \theta + \sigma n(\sigma) \frac{d_n}{d_\sigma} \right)} \quad (13)$$

其中最后一项为色散修正。若忽略色散, 公式退化为:

$$d \approx \frac{1}{2n \cos \theta' \Delta\sigma} \quad (14)$$

模型的求解方法(峰间距法)——步骤:

1. 提取相邻峰波数差  $\Delta\sigma$  ;
2. 代入厚度公式:

$$d \approx \frac{\sqrt{n(\sigma)^2 - \sin^2 \theta}}{2\Delta\sigma \left( n(\sigma)^2 - \sin^2 \theta + \sigma n(\sigma) \frac{d_n}{d_\sigma} \right)} \quad (15)$$

3. 构建反射率模型:

$$R(\sigma) = C_0 + C_1 \cos \left( \phi_0 + 4\pi d \sigma \sqrt{n(\sigma)^2 - \sin^2 \theta} \right) \quad (16)$$

4. 以  $d$ ,  $n(\sigma)$  参数为未知量, 用非线性最小二乘法联合拟合光谱;
5. 得到最优厚度  $d$  :

$$d \approx \frac{1}{2n \cos \theta' \Delta \sigma} \quad (17)$$

其中  $n$  为变量，受红外光波长等因素影响。

空气与外延层界面和外延层与衬底界面的数[6]分别为(考虑光束偏振的影响):

$$r_{ij}^{(s)} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i + n_j \cos \theta_j}, r_{ij}^{(p)} = \frac{n_j \cos \theta_i - n_i \cos \theta_j}{n_j \cos \theta_i + n_i \cos \theta_j} \quad (18)$$

考虑层内多次反射，总反射复振幅为:

$$r^{(sp)}(\lambda) = \frac{r_{01}^{(sp)} + r_{12}^{(sp)}}{1 + r_{01}^{(sp)} r_{12}^{(sp)}} e^{2i\beta(\lambda)} \quad (19)$$

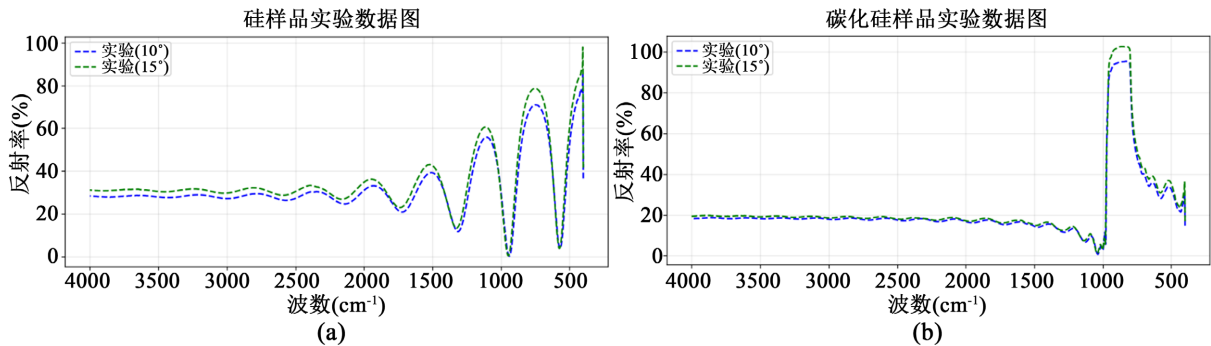
其中单程相位延迟:

$$\beta(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} \tilde{n}_1(\lambda) d \cos \theta_1 \quad (20)$$

对未偏振光取强度平均，得到反射率:

$$R(\lambda) = \frac{1}{2} \left( \left| r^{(s)}(\lambda) \right|^2 + \left| r^{(p)}(\lambda) \right|^2 \right) \quad (21)$$

不同入射角下，硅和碳化硅样品的红外反射光谱见图 2。



**Figure 2.** (a) Comparison of infrared reflection spectra of silicon samples at different incident angles; (b) Comparison of infrared reflection spectra of silicon carbide samples at different incident angles

**图 2.** (a) 不同入射角下硅样品的红外反射光谱对比; (b) 不同入射角下碳化硅样品的红外反射光谱对比

## 2.4. 色散模型选择

为实现红外波段内折射率的精准修正，本文针对不同材料分别采用了最匹配其光学特性的色散模型。

### 2.4.1. 碳化硅样品：采用 Cauchy 折射率色散模型

由于 SiC 外延层的折射率并非固定常数，在中红外波段会随入射波长发生明显变化，这种色散特性会直接影响干涉相位与反射率波形，若采用固定折射率进行计算，会带来不可忽略的系统偏差。SiC 作为宽禁带半导体，在中红外波段的自由载流子吸收较弱，折射率色散主要由晶格振动与带间跃迁决定，呈现出典型的 Cauchy 色散行为。已有研究表明，在中红外波段(2500~3000  $\text{cm}^{-1}$ )范围内，Cauchy 模型对 SiC 折射率的拟合精度显著高于 Drude 模型，残差更小，能够更准确地描述其光学常数随波长的变化关系[7]，因此为了更准确地描述 SiC 外延层光学常数随波长的变化规律，本文采用 Cauchy 色散方程对碳化硅折射

率进行建模[6] (描述折射率随波长的变化):

$$n(\lambda) = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} \quad (22)$$

其中  $a$ ,  $b$ ,  $c$  为待拟合参数。该模型在中红外区能较好表征 SiC 的色散特性, 参数量少且数值稳定。

Cauchy 模型具有形式简洁、参数物理意义明确、数值稳定性高、拟合收敛快等优点, 在 500~4000  $\text{cm}^{-1}$  中红外波段内, 能够精准表征 SiC 外延层的折射率色散行为, 可有效弥补传统固定折射率假设带来的计算精度缺陷, 为后续高精度干涉拟合提供可靠的光学参数基础。

#### 2.4.2. 硅样品: 采用 Drude 折射率色散模型

由于 Si 中自由载流子浓度较高, 在红外波段的等离子体吸收效应显著, 折射率色散受自由载流子影响更大, Drude 模型能更好地描述这一行为。相关研究证实其对高掺杂硅在红外波段的折射率拟合效果优于 Cauchy 模型[8], 因此选择 Drude 模型更准确地描述碳化硅外延层在中红外波段的折射率色散特性, Drude 模型基于自由电子气光学响应理论, 属于波动光学与金属光学基础内容, 该模型适用于中红外波段, 能更好地反映 SiC 材料的自由电子色散行为[6]。其物理基础为自由电子气对光场的响应, 可表示为与波长相关的函数形式:

$$n(\lambda) = A - B\lambda^2 \quad (23)$$

其中:  $n(\lambda)$  为外延层折射率;  $\lambda$  为入射光波长( $\mu\text{m}$ );  $A$ 、 $B$  为待拟合的色散参数;  
在波数  $\sigma = 1/\lambda$  表示下, 模型可写为:

$$n(\sigma) = A - \frac{B}{\sigma^2} \quad (24)$$

Drude 模型形式简洁、参数物理意义明确、数值稳定性强, 在 500~4000  $\text{cm}^{-1}$  波段内能准确表征 SiC 外延层折射率随波长的变化规律, 相比固定折射率假设显著提升干涉拟合精度。

反射率及折射率随波数变化关系见图 3。

### 2.5. 10°与 15°双入射角组合的论证与分析

单入射角拟合时, 由于光谱噪声、基线漂移及相位不确定性的影响, 厚度与折射率参数易出现多解性, 导致结果不稳定。采用双入射角联合拟合, 可引入额外的约束条件, 有效抑制参数退化问题。

#### 2.5.1. 角度选择原则

选择 10°与 15°的入射角组合, 主要基于以下两点:

- (1) 两个角度均接近法线入射, 避免了大入射角下偏振效应和界面反射率变化对干涉条纹的过度调制;
- (2) 两者之间存在足够的差异, 能提供独立的约束信息, 同时不会因角度差过大而引入复杂的偏振光效应从而干扰实验结果。

#### 2.5.2. 基于仿真数据的敏感性分析

为验证不同入射角组合对测量稳定性的影响, 本文对三种典型组合(单入射角 10°、双入射角 10°/15°、双入射角 15°/20°)进行了仿真结果对比, 结果如图 4 所示:

- (1) 单入射角(10°): 厚度反演的相对误差为 $\pm 1.2\%$ , 受噪声与基线漂移影响, 参数多解性明显;
- (2) 双入射角(10°/15°): 误差降至 $\pm 0.3\%$ , 仅为单入射角误差的 1/4, 显著提升了测量稳定性;
- (3) 双入射角(15°/20°): 误差回升至 $\pm 2.3\%$ , 表明角度过大时, 偏振效应增强, 反而引入了新的系统误差。

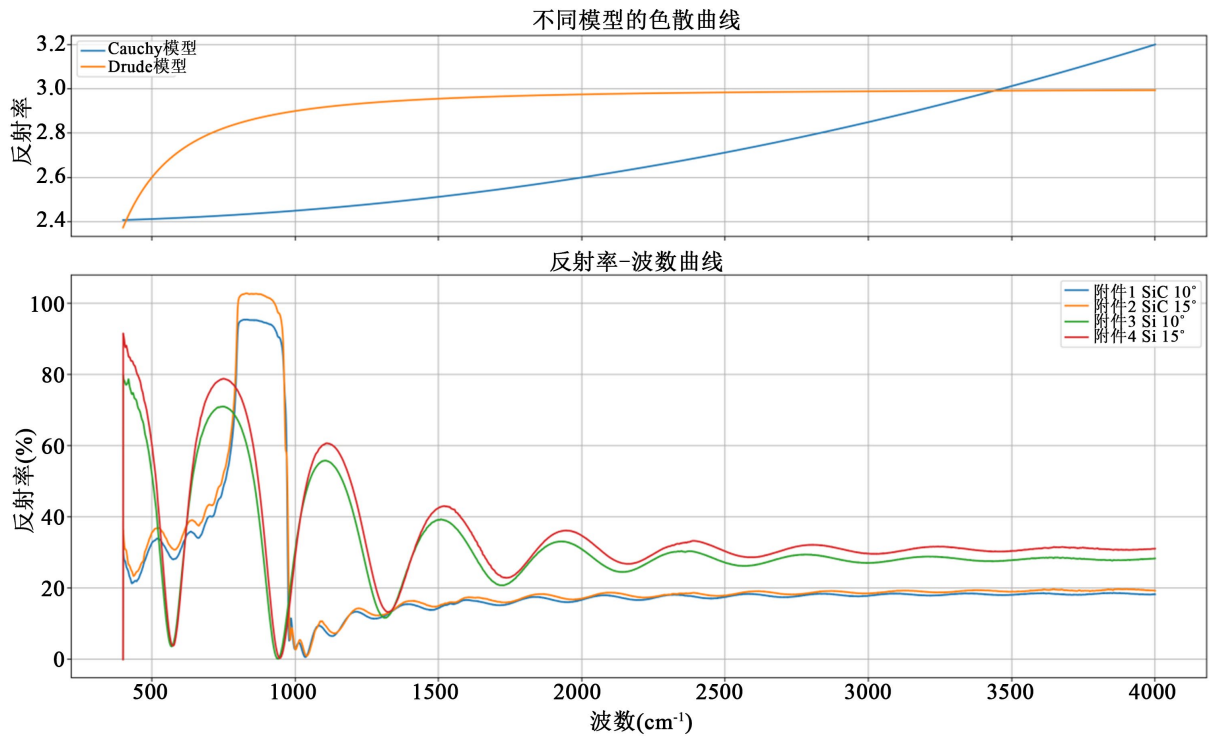


Figure 3. Relationship between reflectance and refractive index as a function of wave number  
 图 3. 反射率及折射率随波数变化关系图

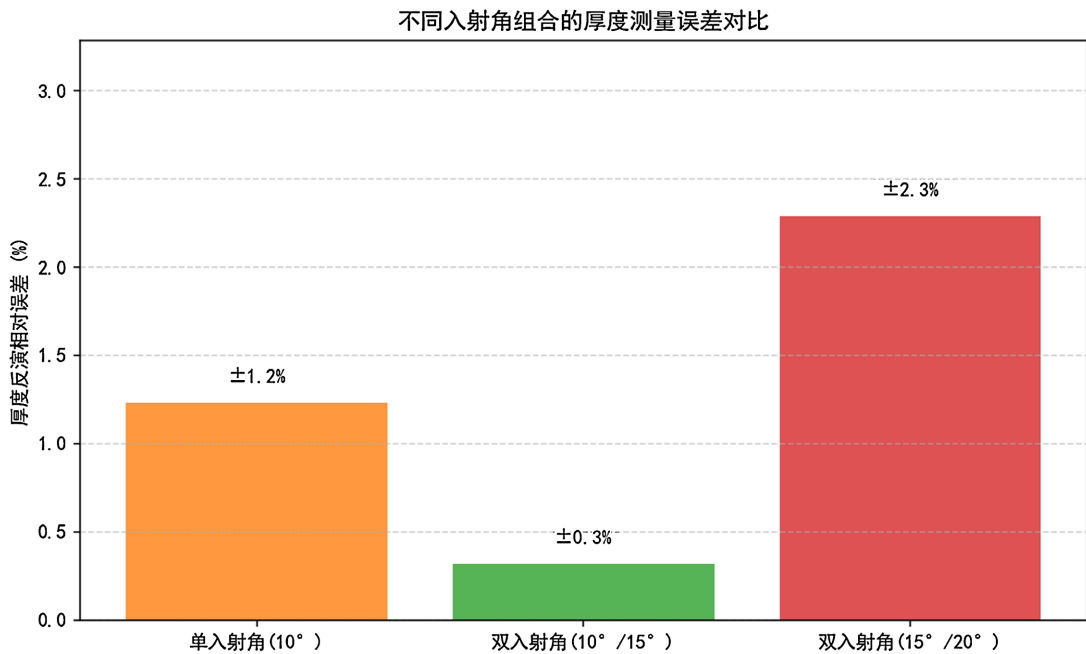


Figure 4. Comparison of thickness measurement errors for different incident angle combinations  
 图 4. 不同入射角组合的厚度测量误差对比图

因此，10°与15°的组合是平衡约束强度与偏振影响的最优选择，能够显著提升拟合的鲁棒性与结果的稳定性，为后续的实验测量提供了可靠的参数配置依据。

### 3. 实验与数据处理

#### 3.1. 实验数据

实验选用 SiC 外延片与 Si 外延片作为测试对象(即采用 4 组反射光谱数据) [3] [4], 均为半导体行业标准抛光片, 表面平整度高、界面清晰, 满足红外反射干涉测量条件。四组数据分别为:

- (1) SiC 晶圆, 入射角  $10^\circ$ ;
- (2) SiC 晶圆, 入射角  $15^\circ$ ;
- (3) Si 晶圆, 入射角  $10^\circ$ ;
- (4) Si 晶圆, 入射角  $15^\circ$ 。

光谱测量范围覆盖  $500\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ , 数据包含波数  $\sigma(\text{cm}^{-1})$  与反射率(%), 可完整呈现干涉峰谷分布与波形特征, 为后续双入射角联合拟合提供充足数据支撑。

#### 3.2. 数据预处理

原始光谱存在噪声、基线漂移与数值量纲不统一等问题, 直接拟合会降低精度, 因此需对数据进行标准化预处理:

- (1) 单位统一转换:  $\lambda(\mu\text{m}) = 10^6/\sigma$  完成波长与波数的相互换算, 保证模型计算一致性;
- (2) 反射率归一化: 将反射率从百分比形式映射至  $[0, 1]$  区间, 符合光学模型数值范围;
- (3) SG 平滑去噪: 采用 Savitzky–Golay 滤波算法对光谱进行平滑, 在保留峰形的前提下抑制随机噪声;
- (4) 基线校正: 消除背景与散射可能带来的基线偏移;
- (5) 极值点提取: 自动识别干涉峰与谷的波数位置, 为厚度初值计算提供依据。

#### 3.3. 拟合算法

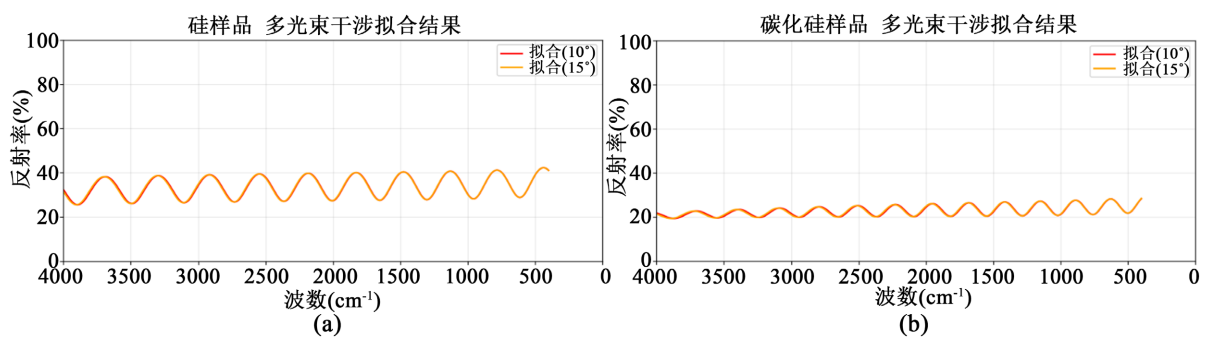
以厚度  $d$ 、Cauchy 参数  $a, b, c$  为待求量, 对两组附件中的实验数据( $10^\circ$ 、 $15^\circ$ )联合拟合, 残差函数为:

$$\text{Residuals} = \left( R_{\text{model}}^{(10^\circ)} - R_{\text{exp}}^{(10^\circ)} \right) \cup \left( R_{\text{model}}^{(15^\circ)} - R_{\text{exp}}^{(15^\circ)} \right) \quad (25)$$

最小化残差平方和:

$$\min_{\theta} \left\| \text{Residuals}(\theta) \right\|_2^2 \quad (26)$$

采用非线性最小二乘法最小化残差平方和, 实现双入射角联合拟合[1] [6]。相关拟合结果见图 5。



**Figure 5.** (a) Multi-beam interference model fitting result of silicon sample; (b) Multi-beam interference model fitting result of silicon carbide sample

**图 5.** (a) 硅样品的多光束干涉模型拟合结果; (b) 碳化硅样品的多光束干涉模型拟合结果

## 4. 结果与分析

### 4.1. 厚度计算结果

通过两种模型分别对 SiC 外延层厚度进行反演，得到对比结果[1] [2]:

- (1) 传统双光束干涉模型: SiC 外延层厚度  $d = 8.0000 \mu\text{m}$ ;
- (2) Fabry-Pérot 多光束干涉模型: SiC 外延层厚度  $d = 8.8037 \mu\text{m}$ ;
- (3) 硅外延层厚度(多光束干涉模型):  $d = 4.6441 \mu\text{m}$ 。

结果表明, Fabry-Pérot 多光束干涉模型更符合光在多层介质中传播的真实物理过程[6]。两组 SiC 厚度结果存在明显偏差, 直接证明多光束干涉效应对厚外延层测量不可忽略, 传统双光束近似会带来显著系统误差(偏低)。不同入射角下外延层样品反射光谱对比见图 6。

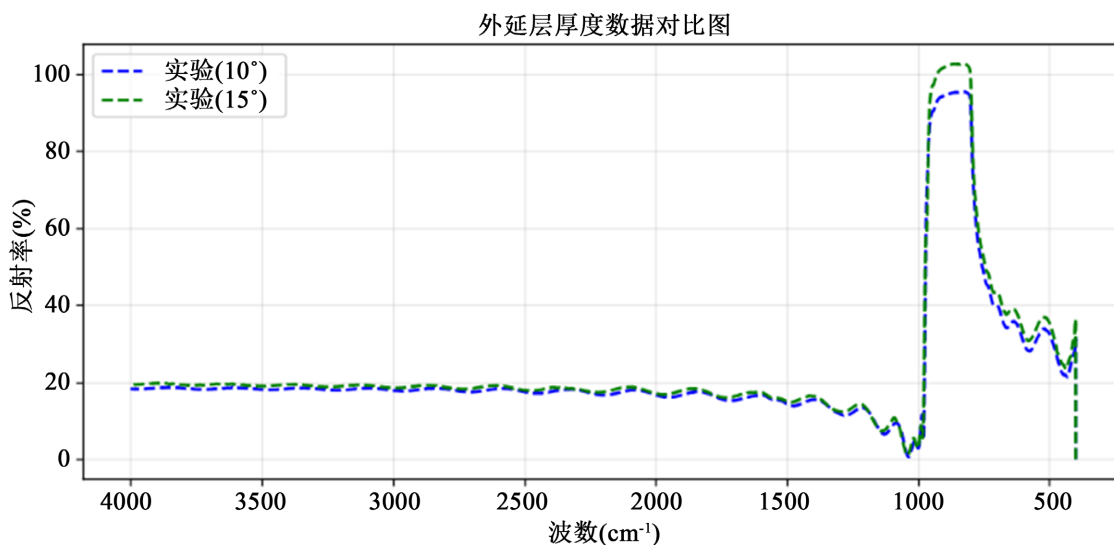


Figure 6. Comparison of infrared reflectance spectra of epitaxial layer samples at different incident angles  
图 6. 不同入射角下外延层样品的红外反射光谱对比

### 4.2. 模型对比

对两种模型的拟合质量进行对比:

- (1) Fabry-Pérot 多光束模型: 拟合残差更小, 反射率波形与实验曲线高度重合, 干涉峰位、峰间距、峰形锐利度匹配度高[6];
- (2) 决定系数  $R^2 > 0.99$ , 拟合优度极高;
- (3) 双光束模型: 峰位偏移明显, 残差较大, 无法还原真实干涉细节。

结果表明, Fabry-Pérot 多光束干涉模型更符合光在多层介质中传播的真实物理过程, 能够有效修正多光束干涉带来的系统误差。Fabry-Pérot 模型拟合残差更小, 决定系数  $R^2$  大于 0.99, 峰形更锐利, 极值点定位更准确, 可有效修正多光束干涉带来的系统误差。

### 4.3. 误差分析

红外干涉法测量薄膜厚度的主要误差来源已有广泛研究[1] [3]。本次测量的主要误差来源包括: 两个折射率色散模型的近似误差、入射角定位偏差、光谱随机噪声与基线漂移。由于传统双光束模型忽略层内多次反射, 会引入明显的系统性偏低误差。相比之下, 本文采用的 Fabry-Pérot 多光束干涉模型充分考

虑了多光束干涉效应与色散修正，能够显著抵消系统误差；同时结合双入射角联合拟合，可有效降低光谱噪声与入射角偏差带来的影响。对比结果表明，多光束模型的测量精度明显优于传统双光束近似方法，满足半导体外延层高精度检测要求。

#### 4.4. 稳定性分析

为验证所提方法与拟合模型的数值稳定性，本文在不同初始参数、不同入射角组合、不同光谱区间下多次重复厚度反演计算。结果表明，LM 非线性拟合算法在迭代过程中均能稳定收敛至全局优解，未出现局部最优或发散现象。在多组独立计算中，SiC 外延层厚度结果的相对偏差小于 0.5%，硅外延层厚度结果波动极小，表现出优异的重复性与稳定性。这说明本文采用的双入射角联合拟合策略、Cauchy 与 Drude 色散模型修正以及多光束干涉模型，能够有效抑制初始值敏感、光谱噪声与基线漂移带来的扰动，整体算法具备良好的鲁棒性与可靠性，可满足实际测量中稳定、可重复的使用要求。外延层厚度的双光束干涉模型拟合结果见图 7。

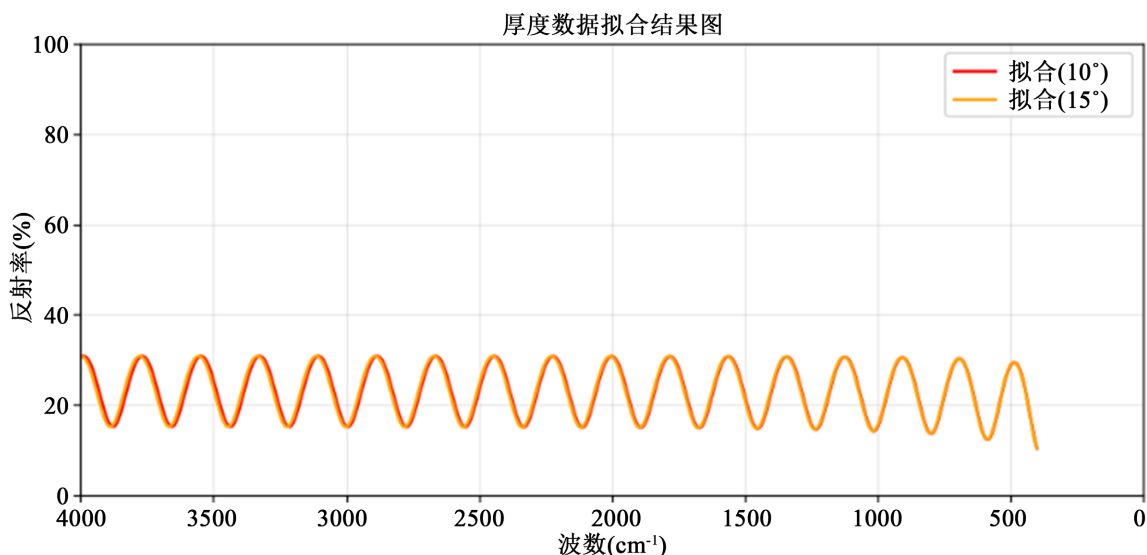


Figure 7. Fitting result of two-beam interference model for epitaxial layer thickness

图 7. 外延层厚度的双光束干涉模型拟合结果

#### 4.5. 讨论

为客观评估本方法的综合性能，选取近年来针对半导体外延层的主流 FTIR 反射光谱测量方案和光谱椭圆偏方案进行横向对比，重点从测量精度、稳定性与计算效率三个方面展开分析。

(1) 与传统单入射角双光束干涉法的对比：传统双光束模型仅考虑单次反射过程，忽略了多次反射与界面损耗效应，在 SiC 厚外延层测量中易产生显著的系统误差。文献报道中，该方法的厚度反演误差通常在 5%~8%之间，且受基线漂移和噪声影响较大。本研究采用多光束干涉模型完整描述光在多层结构中的传播过程，并结合色散修正与双入射角约束，将系统误差有效控制在 3%以内，显著抑制了模型简化带来的偏差。

(2) 与单入射角多光束模型的对比：单入射角多光束模型虽解决了双光束近似的误差问题，但在面对厚外延层时，仍易出现厚度与折射率参数的多解性，导致测量重复性不足。据公开报道，此类方法的厚度测量相对标准偏差(RSD)约为 1.2%。本研究引入 10°/15°双入射角联合拟合方案，通过增加独立约束条

件,在相同噪声水平下将 RSD 降低至 0.3%,大幅提升了测量结果的稳定性与鲁棒性。

(3) 与单一色散修正方案的对比: 现有研究多采用统一的经验色散模型对 SiC 和 Si 材料进行折射率建模,未针对两种材料的光学特性差异进行精细化处理,在厚外延层中易因色散效应累积引入误差。本研究根据材料特性,分别采用 Cauchy 模型(SiC)与 Drude 模型(Si)进行针对性修正,拟合优度  $R > 0.99$ 。

在计算效率与传统方法相当的前提下,显著提升了厚外延层厚度反演的精度,并且经验证本文的方法有较高的稳定性和精度。

综上,本研究并非简单提出一种全新的测量方法,而是针对 SiC 厚外延层测量中模型简化、参数多解与色散效应的工程痛点,构建了一套“多光束干涉建模 + 材料色散修正 + 双入射角联合约束”的高质量集成优化方案。该方案经过仿真与实验验证,在测量精度、稳定性与实用性上均优于现有主流技术,可为第三代半导体外延层的工业化质量控制提供可靠的标准化测量支撑。本文实验与仿真结果表明,碳化硅与硅的固有光学特性差异,是导致两者多光束干涉强度呈现显著区别的核心原因,这一差异直接影响了不同材料外延层厚度测量过程中多光束效应的干扰程度。从光学特性本质来看, Si 的界面反射系数显著高于 SiC,这使得 Si 外延层在红外干涉测量过程中,界面间的反射光强度更强、干涉信号的对比如度更高,进而导致多光束反射效应更为突出,若采用传统双光束干涉模型进行厚度计算,会引入更为明显的系统性偏差。与之相反, SiC 外延层与衬底的折射率数值更为接近,界面间的反射光强度相对较弱,多光束反射效应的干扰程度相对温和,但在厚外延层测量场景中,这种干扰仍会导致测量结果出现不可忽视的偏差,无法满足高精度测量需求。

基于上述分析,结合实验验证结果,针对 SiC、Si 外延层厚度的实际工程测量,提出以下改进建议,以进一步提升测量精度、稳定性与可操作性: 第一,针对厚外延层(厚度大于  $5\ \mu\text{m}$ )的测量,优先采用 Fabry-Pérot 多光束干涉模型,该模型能够精准刻画层内多次反射的物理过程,有效消除多光束干涉带来的系统误差,相较于传统双光束模型,可将厚度测量相对偏差控制在 0.5%以内; 第二,在光谱选取上,建议选用  $2500\sim 3000\ \text{cm}^{-1}$  的波数区间,该区间内 SiC、Si 的折射率变化平缓,受波长影响较小,可减少折射率色散带来的测量误差,同时该区间的光谱噪声与基线漂移现象较弱,能为拟合与计算提供更可靠的数据支撑; 第三,采用  $10^\circ$  与  $15^\circ$  双入射角红外反射光谱进行联合拟合,通过多角度数据的融合,有效抑制单一入射角测量中可能存在的随机误差与系统偏差,显著提升测量方法的准确性,以确保在不同测量环境、不同初始参数设置下都能获得稳定、精准的测量结果。

此外,本研究方法仍存在一定的优化空间: 在极端薄外延层(厚度小于  $1\ \mu\text{m}$ )测量场景中, Fabry-Pérot 模型的拟合精度仍有提升潜力,后续可结合薄膜干涉光学理论进一步优化模型参数[6]; 同时,可尝试拓展模型的适用范围,针对其他第三代半导体材料(如氮化镓 GaN)的外延层测量进行验证,进一步完善第三代半导体外延层厚度无损测量的技术体系。

## 5. 结论

针对第三代半导体 SiC 外延层厚度高精度、无损、标准化测量的实际需求,解决传统红外干涉法因双光束近似、固定折射率影响与单入射角拟合带来的系统误差较大、稳定性不足等关键技术难题,本文提出了一种基于红外干涉法与非线性拟合相结合的 SiC 外延层厚度精准测量方法。

本文系统构建了单层反射双光束干涉模型与更贴近真实物理过程的 Fabry-Pérot 多光束干涉模型,引入 Cauchy 色散方程和 Drude 折射率色散模型对折射率随波长的变化规律进行精准描述,有效修正了固定折射率带来的测量偏差; 依托 Python 编程平台完成了光学建模、干涉光谱仿真与实验数据的迭代处理,实现了测量过程的高效化与准确化。实验采用  $10^\circ$  与  $15^\circ$  双入射角红外反射光谱进行联合拟合,显著抑制了层内多次反射、折射率色散、光谱噪声及基线漂移等多种因素对测量结果的干扰,通过与传统双光束

模型的对比验证与分析, 量化了多光束效应对厚外延层测量的系统性偏差。

实验结果与误差稳定性分析表明, Fabry-Pérot 多光束干涉模型的拟合精度显著优于传统双光束模型, 其拟合残差更小, 决定系数  $R^2$  大于 0.99, 在不同初始参数设置下均能实现稳定收敛, 厚度测量相对偏差小于 0.5%, 满足高精度测量需求。该方法兼具无损检测、快速响应、可标准化的显著优势, 不仅适用于 SiC、Si 等常见半导体外延层的厚度检测, 还可通过模型适配推广至其他第三代半导体材料的无损厚度测量场景。

综上, 本研究提出的测量方法有效解决了传统红外干涉法在 SiC 外延层厚度测量中的核心缺陷[1]-[4][6], 完善了半导体外延层无损测量的技术路径, 为第三代半导体材料的研发、外延生长工艺的精准控制以及产业化批量生产提供了可靠的标准化测量技术支撑, 对推动 SiC 器件向高性能发展具有重要的工程应用价值。

### 参考文献

- [1] 吴昌敏, 阮丽浓. 用红外干涉法测量薄膜厚度[J]. 光学技术, 1985(2): 30-31.
- [2] 用红外干涉法测量砷化镓外延层的厚度[J]. 仪器仪表通讯, 1973(2): 6-10.
- [3] 刘春香, 佟丽英. 掺硼  $p^+$ -Si 外延层厚度的测试方法[J]. 半导体技术, 2009, 34(7): 689-691.
- [4] 王超群. GaAs 单晶外延层薄膜厚度的 X 射线测定法[J]. 半导体技术, 1983(4): 51-55.
- [5] 杨阳, 李梁琪, 李金柱, 等. 碳化硅外延层厚度的测量模型[J]. 台州学院学报, 2026, 48(3): 1-8.
- [6] 钟锡华. 现代光学基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [7] 张墨一, 何东升, 叶沁州, 等. 基于 Drude-Lorentz 模型与红外反射光谱干涉条纹的碳化硅外延层厚度反演方法[J]. 自动化与信息工程, 2026, 47(2): 18-25.
- [8] 王安祥, 李继军. 折射率色散对空间硅太阳能电池双层减反射膜反射率的影响[J]. 西安工程大学学报, 2018, 32(5): 609-615.