

本文引用格式: 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.

ZHANG Zhaoyi, HE Dongsheng, YE Qinzhou, et al. Thickness inversion method of silicon carbide epitaxial layers based on the Drude-Lorentz model and interference fringes in infrared reflectance spectra[J]. Automation & Information Engineering, 2026,47(2):18-25.

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*

张墨一¹ 何东升^{2,3} 叶沁州² 刘让雄² 罗海凹⁴

(1.华中科技大学物理学院物理系, 湖北 武汉 430074

2.广州铁路职业技术学院, 广东 广州 511300

3.清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055

4.国家智能电网输配电设备质量检验检测中心, 广东 东莞 523325)

摘要: 针对碳化硅外延层厚度测量因传统的双光束干涉模型折射率常数简化与忽略载流子-声子耦合效应导致误差偏大的问题, 提出一种基于 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。该方法以 n 型 4H-SiC 同质外延片为研究对象, 基于集成载流子-声子耦合效应的复折射率色散模型, 描述其在红外波段的色散特性; 通过对预处理后红外反射光谱曲线中的干涉条纹提取极值点, 获取其波数序列, 并建立碳化硅外延层厚度与干涉相位的物理关联; 通过将预设的碳化硅外延层厚度区间离散化为若干个节点, 计算各节点对应的理论折射率, 并通过最小化理论折射率与极值点实验折射率的残差平方和, 实现对 n 型 4H-SiC 外延层厚度的精确定定。实验结果表明, 该方法得到的 n 型 4H-SiC 外延层厚度的反演结果残差分布近似正态且无明显的系统性偏差, 综合不确定性标准差为 0.061 μm , 为半导体薄膜材料的厚度测量提供了一种高精度、高效率的解决方案。

关键词: 碳化硅外延层厚度; 红外反射光谱; Drude-Lorentz 模型; 干涉条纹; 复折射率; 反演

中图分类号: O433.4

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2026)02-0003-08

DOI: 10.12475/aie.20260203

开放获取

Thickness Inversion Method of Silicon Carbide Epitaxial Layers Based on the Drude-Lorentz Model and Interference Fringes in Infrared Reflectance Spectra

ZHANG Zhaoyi¹ HE Dongsheng^{2,3} YE Qinzhou² LIU Rangxiong² LUO Haiao⁴

(1.Department of Physics, School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China 2.Guangzhou Railway Polytechnic, Guangzhou 511300, China 3.Shenzhen International Graduate School (SIGS), Tsinghua University, Shenzhen 518055, China 4.National Quality Inspection and Testing Center for Smart Grid Transmission and Distribution Equipment, Dongguan 523325, China)

Abstract: To address the problem of large errors in SiC epitaxial layer thickness measurement caused by the simplified constant refractive index in traditional double-beam interference models and the neglect of carrier-phonon coupling effects, this paper proposes a thickness inversion method based on the Drude-Lorentz model and interference fringes in infrared reflectance spectra. The method takes n-type 4H-SiC homoepitaxial wafers as the research object. A complex refractive index dispersion model incorporating carrier-phonon coupling is employed to describe the dispersion characteristics in the infrared band. After preprocessing the infrared reflectance spectrum, extreme points of the interference fringes are extracted to obtain their wavenumber sequence, and the physical relationship between the SiC epitaxial layer thickness and the interference phase is established. By discretizing a preset thickness interval into

several nodes, the theoretical refractive index corresponding to each node is calculated. The n-type 4H-SiC epitaxial layer thickness is accurately determined by minimizing the residual sum of squares between the theoretical refractive index and the experimental refractive index at the extreme points. Experimental results show that the residual distribution of the inverted thickness obtained by this method is approximately normal without significant systematic deviation, with a combined uncertainty standard deviation of 0.061 μm . This provides a high-precision and high-efficiency solution for thickness measurement of semiconductor thin-film materials.

Keywords: SiC epitaxial layer thickness; infrared reflectance spectroscopy; Drude-Lorentz model; interference fringes; complex refractive index; inversion

0 引言

碳化硅(SiC)作为第三代宽禁带半导体的核心材料,凭借其优异的高频、高压及高温性能,已成为制造大功率电力电子器件的关键基础材料。在该类器件制备过程中, SiC 外延层厚度是决定其击穿电压、导通电阻等电学性能的核心参数^[1-3]。因此,研究高精度、无损且在线的 SiC 外延层厚度测量技术,对保障 SiC 基器件的性能与成品率具有重要意义。

目前,基于光学干涉原理的傅里叶变换红外光谱技术因具有非破坏性和高效率的特点,被广泛应用于半导体薄膜厚度测量领域。其中,双光束干涉模型是主流测量方法。然而,传统的双光束干涉模型通常将材料折射率简化为常数,这在宽光谱测量过程中会引入误差。事实上, SiC 在红外波段存在强烈的晶格振动(声子)吸收,其折射率表现出明显的色散特性。此外,第一性原理研究表明, SiC 在禁带以下仍存在声子辅助吸收现象^[4]。同时, SiC 外延层中掺杂的载流子浓度也会影响其光学参数。若忽略这些本征物理属性, SiC 外延层厚度的测量精度难以满足日益精密的工艺控制需求。

尽管经典的光学理论为干涉测量奠定了基础,且 Sellmeier 等基于经验拟合的色散模型被广泛采用,但此类模型缺乏与 SiC 微观物理属性(如晶格振动、载流子浓度)的直接关联。文献[5]采用基于 Drude-Lorentz 模型的物理光学方法,更精确地描述了 4H-SiC 的各向异性介电性质和声子-等离子体耦合效应。早期研究虽揭示了 SiC 的红外光学性质,但尚未建立系统的、基于物理机理的 SiC 外延层厚度测量模型。随着 SiC 外延层向更薄、更精确的方向发展,以及对其电学性能(载流子浓度)监控要求的不断提升,构

建一个能够同时精确描述 SiC 色散与载流子浓度的物理光学模型,已成为亟待解决的科学与工程问题。

针对传统半导体薄膜厚度测量方法存在的折射率常数简化和物理机理缺失等局限,本文提出一种基于 Drude-Lorentz 模型与红外反射光谱干涉条纹的 SiC 外延层厚度反演方法。该方法通过引入集成载流子-声子耦合效应的复折射率色散模型(以下简称复折射率色散模型),将 SiC 外延层的折射率表达为相位差的函数^[6-7];结合 Drude-Lorentz 模型与 Lyddane-Sachs-Teller (LST) 关系,提出融合声子与自由载流子贡献的介电响应表达式;通过对预处理后的红外反射光谱曲线进行分析,提取干涉条纹的极值及对应的波数序列,得到一组外延层厚度的初始估计值;将预设的 SiC 外延层厚度区间离散化为若干个节点,计算其理论折射率,并通过最小化理论折射率与极值点实验折射率的残差平方和,实现对 n 型 4H-SiC 外延层厚度的高精度、无损测量。

1 外延层厚度测量原理

n 型 4H-SiC 外延层厚度测量原理示意图如图 1 所示。

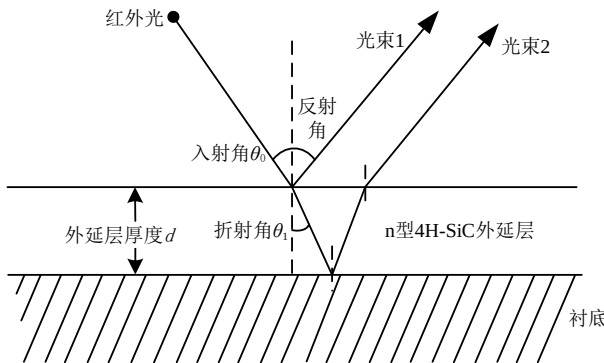


图1 n 型 4H-SiC 外延层厚度测量原理示意图

当红外光入射在 n 型 4H-SiC 上时, 一部分光直接在外延层表面发生反射(光束 1); 另一部分光先折射进入外延层, 随后在外延层-衬底表面发生反射, 再从外延层折射回空气(光束 2)中。这两束光因传播路径差异而产生光程差。该光程差与外延层厚度 d 、外延层的复折射率 $\tilde{n}_2(\lambda)$ 及入射角 θ_0 相关。当这两束光再次相遇时, 由光程差引起的相位差会产生干涉现象, 形成明暗相间的同心圆环干涉条纹, 如图 2 所示。

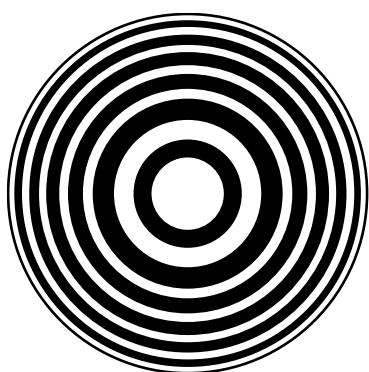


图 2 n 型 4H-SiC 外延层干涉条纹示意图

通过提取红外反射光谱曲线中干涉条纹的极值点, 并结合复折射率色散模型, 可反演得到 n 型 4H-SiC 外延层厚度。

2 研究数据

2.1 研究设计与数据来源

本文采用理论建模与实验数据反演相结合的研究设计, 即引入复折射率色散模型, 并通过实验验证其精度与可靠性。研究数据为 $10^\circ \sim 50^\circ$ 入射角范围内测得的 n 型 4H-SiC 同质外延片的红外反射光谱。

2.2 数据预处理流程

为消除测量噪声与异常值对干涉条纹极值点提取的干扰, 对 $10^\circ \sim 50^\circ$ 入射角范围内测得的 n 型 4H-SiC 同质外延片的红外反射光谱进行如下预处理:

1) 异常值修正, 将红外反射光谱中所有反射率大于 100% 的异常点的反射率修正为 100%, 以确保所有 n 型 4H-SiC 同质外延片的红外反射光谱反射率在 $[0, 100]$ 范围内;

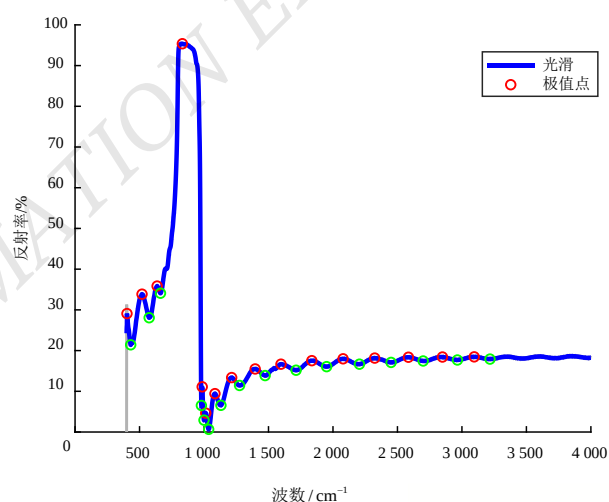
2) 平滑去噪, 采用窗口宽度为 10 cm^{-1} 的移动

平均法对红外反射光谱曲线进行平滑处理, 以抑制高频噪声, 同时保留干涉条纹的主要特征;

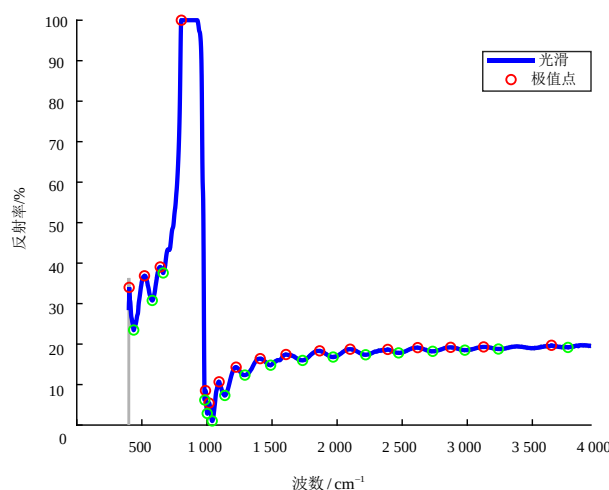
3) 有效区间筛选, 鉴于 SiC 在远红外波段存在由剩余射线带引起的强吸收与反射失真现象^[9], 本文将研究范围限定在波数为 $1\,000 \sim 3\,300 \text{ cm}^{-1}$ 的光谱区间内, 以确保干涉条纹清晰稳定;

4) 极值点提取与修正, 利用 MATLAB 内置的 findpeaks 函数分别提取平滑后红外反射光谱曲线干涉条纹的极大值点与极小值点, 并通过插值修正确保极值点交替分布, 为后续的外延层厚度反演奠定基础。

n 型 4H-SiC 同质外延片 10° 、 15° 入射角预处理后的红外反射光谱曲线与极值点提取结果如图 3 所示。



(a) 10° 入射角



(b) 15° 入射角

图 3 n 型 4H-SiC 同质外延片红外反射光谱曲线与极值点

3 厚度反演理论基础

为解决传统的双光束干涉模型在宽光谱测量时因折射率常数简化而导致的误差较大问题,本文引入复折射率色散模型,旨在将 SiC 外延层的折射率表达为相位差的函数。该模型从电子-声子相互作用的微观机制出发^[8],直接关联光学响应与 SiC 本征物理参数,突破了传统基于经验拟合的色散模型仅通过经验公式拟合,缺乏物理机理支撑的局限。

3.1 复折射率色散模型

基于双光束干涉原理,光束 1 与光束 2 之间的相位差 δ 可表示为

$$\delta = \frac{2\pi\Delta_{\text{actual}}}{\lambda} = \frac{4\pi n_2 d \cos\theta_1}{\lambda} + 180 \quad (1)$$

式中: Δ_{actual} 为光束 1、光束 2 的光程差; λ 为入射红外光波长; n_2 为 n 型 4H-SiC 外延层复折射率的实部; θ_1 为入射红外光在外延层内的折射角,可通过折射定律 $n_1 \sin\theta_0 = n_2 \sin\theta_1$ 计算,其中 θ_0 为入射角, $n_1 \approx 1$ 为空气折射率;入射红外光从光疏介质(空气)进入光密介质(外延层)会产生半波损失,反射光的相位突变了 180° 。

公式(1)中的 n_2 并非常数,而是随入射红外光波长 λ 变化的物理量,其变化规律由公式(2)定量描述为

$$\tilde{n}_2(\lambda) = n_2(\lambda) + i\kappa_2(\lambda) \quad (2)$$

式中: $n_2(\lambda)$ 为 n 型 4H-SiC 外延层复折射率的实部(描述折射特性,对应常规折射率); $\kappa_2(\lambda)$ 为 n 型 4H-SiC 外延层复折射率的虚部(与材料吸收特性相关,对应消光系数)。

在红外波段下 n 型 4H-SiC 同质外延片的吸收损耗(虚部贡献)相对较弱,因此后续反演其外延层厚度时,仅考虑 n 型 4H-SiC 外延层复折射率的实部。

3.2 介电常数公式推导

为精准描述 n 型 4H-SiC 外延层的介电响应特性,本文基于多振子耦合理论^[10-11],将 Drude-Lorentz 模型与 LST 关系相结合,提出融合声子与自由载流子贡

献的介电响应表达式:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty \left(1 + \frac{\omega_{\text{LO}}^2 - \omega_{\text{TO}}^2}{\omega_{\text{TO}}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma} \right) - \sum_{j=e,h} \frac{N_j e^2}{\varepsilon_0 m_j^* m_0 (\omega^2 + i\omega\Gamma)} \quad (3)$$

式中: ε_∞ 为高频介电常数,反映电子在高频场下本征极化行为的贡献;第一项括号内为光学声子的 Lorentz 振子项,其中 ω_{LO} 为纵向光学声子角频率, ω_{TO} 为横向光学声子角频率, γ 为声子阻尼系数,表征声子散射的能量损耗;第二项求和项为自由载流子的 Drude 项,对电子 $j=e$ 和空穴 $j=h$ 的贡献分别求和,其中 N_j 为自由载流子浓度^[12], ε_0 为静态介电常数, m_j^* 为自由载流子有效质量, m_0 为电子静止质量, Γ 为自由载流子弛豫率,其与自由载流子浓度直接相关。

ω_{LO} 、 ω_{TO} 关键参数取值的合理性可通过 LST 关系进行验证。LST 关系的物理本质是通过介电常数的静态-高频差异,定量关联光学声子的纵向、横向振动模式,其表达式为

$$\frac{\omega_{\text{LO}}^2}{\omega_{\text{TO}}^2} = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_\infty} \quad (4)$$

n 型 4H-SiC 的 LST 关系普适性已在诸多实验中得到证实^[18-20], ω_{LO} 与 ω_{TO} 的合理取值为公式(3)的参数赋值提供了可靠依据。

4 厚度反演方法

4.1 初始化与参数设定

参考文献[13-14],设定公式(3)中各物理参数初始值为: $\varepsilon_\infty = 6.5$ 、 $\omega_{\text{LO}} = 971 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\omega_{\text{TO}} = 797 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\gamma = 3 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\Gamma = 1.2 \text{ cm}^{-1}$ 。由于红外光射入 n 型 4H-SiC 外延层时,其光子能量(0.1~0.5 eV)远低于 n 型 4H-SiC 的带隙(~3.26 eV),无法激发电子-空穴对,因此其自由载流子浓度 N 由背景掺杂的杂质(如氮)主导且几乎恒定^[13]。设 n 型 4H-SiC 外延层的电子浓度 N_e 和空穴浓度 N_h 相等,即 $N_e = N_h = N = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ^[15]。

依据 GB/T 42905—2023《碳化硅外延层厚度的测试红外反射法》^[16]，其适用于 3~200 μm 范围内 SiC 外延层厚度的无损测量。鉴于当前 10 kV 级及以下主流 SiC 功率器件的外延厚度通常不超过 100 μm ，且过厚的外延层会导致反射光谱干涉条纹过密而降低解析精度，故本文聚焦工程应用较广泛的区间 3~100 μm 。同时，文献[7]采用红外反射光谱结合介电函数模型^[17]对厚度约 14.4 μm 的 n 型 4H-SiC 外延层进行表征，验证了红外反射法在微米级厚度区间的可靠性。因此，基于上述标准适用范围、实际器件制备需求与文献[7]对微米级厚度红外表征可靠性的验证，本文预设 n 型 4H-SiC 外延层厚度处于 3~100 μm 区间具有合理性。

4.2 SiC 外延层厚度反演

SiC 外延层厚度反演步骤如下：

- 1) 通过对预处理后红外反射光谱曲线中的干涉条纹进行极值点提取，获取图 3 中相邻两个极值点对应的波数 ν_1 、 ν_2 ；
- 2) 利用波数与波长的转换关系 $\lambda_1 = 1/\nu_1$ 、 $\lambda_2 = 1/\nu_2$ ，计算对应波长；
- 3) 利用公式(3)计算对应的介电常数 $\varepsilon'(\lambda_1)$ 、 $\varepsilon'(\lambda_2)$ ；
- 4) 根据介电常数与折射率的关系，计算得到折射率 $n_1(\lambda_1) = \sqrt{\varepsilon'(\lambda_1)}$ 、 $n_2(\lambda_2) = \sqrt{\varepsilon'(\lambda_2)}$ ；
- 5) 根据相位差公式(1)，得到 SiC 外延层厚度 d 。

根据上述反演步骤，通过每相邻两个干涉极值点的波数，可计算得到一个对应的 SiC 外延层厚度；基于不同极值点组合，最终可得到一组 SiC 外延层厚度。然而，受红外反射光谱局部噪声、极值点提取误差等因素影响，这组 SiC 外延层厚度可能存在波动，难以直接确定最优的 SiC 外延层厚度，需对其进行优化。

4.3 SiC 外延层厚度优化

本文通过残差计算优化 SiC 外延层厚度，可有效避免陷入局部极值，确定最优的 SiC 外延层厚度。n 型 4H-SiC 外延层厚度优化流程如下：

- 1) 结合 n 型 4H-SiC 外延层厚度区间与精度需求，将预设的外延层厚度区间离散为 500 个等距节点；

2) 将每个节点对应的 n 型 4H-SiC 外延层厚度 d 代入公式(1)，计算其理论折射率 $n_{\text{theoretical}}(\lambda)$ ；

3) 通过 SiC 外延层厚度反演步骤 1)~4) 得到极值点实验折射率 $n_{\text{experimental}}(\lambda)$ ；

4) 利用公式(5)计算理论折射率 $n_{\text{theoretical}}(\lambda)$ 与极值点实验折射率 $n_{\text{experimental}}(\lambda)$ 的残差平方和 $\text{RSS}(d)$ ：

$$\text{RSS}(d) = \sum \left[n_{\text{experimental}}^{(\lambda_i)} - n_{\text{theoretical}}^{(\lambda_i)} \right]^2 \quad (5)$$

5) 最小 $\text{RSS}(d)$ 对应的 d 即为最优 SiC 外延层厚度 d_{best} 。

5 实验

为验证本文方法反演结果的精度、稳定性、可靠性，针对 n 型 4H-SiC 同质外延片进行实验，通过采集多个入射角的红外反射光谱，获取其外延层厚度反演的实验数据。

5.1 实验环境

- 1) 实验样品：选取商用 n 型 4H-SiC 同质外延片，外延层预设生长厚度约为 7~8 μm 。
- 2) 实验仪器：傅里叶变换红外光谱仪、反射样品台、可变角度调节模块（角度调节精度为 $\pm 0.1^\circ$ ）。

5.2 实验过程

- 1) 将 n 型 4H-SiC 同质外延片固定在反射样品台；
- 2) 通过可变角度调节模块调整反射样品台角度，使入射角分别为 10° 、 15° 、 20° …… 50° ；
- 3) 利用傅里叶变换红外光谱仪对每个入射角重复采集 3 次波数范围为 1 000~3 300 cm^{-1} 的红外反射光谱后取平均，得到各入射角对应的红外反射光谱曲线；
- 4) 通过数据预处理流程，得到 SiC 外延层厚度反演的实验数据。

5.3 实验结果

利用本文方法对入射角为 10° ~ 50° 的 n 型 4H-SiC 同质外延片外延层厚度进行反演，结果如表 1 所示。

表 1 n 型 4H-SiC 外延层厚度反演结果

序号	入射角/(°)	外延层厚度/ μm
1	10	7.633
2	15	7.414
3	20	7.541
4	25	7.581
5	30	7.572
6	35	7.418
7	40	7.509
8	45	7.436
9	50	7.504

由表 1 可知,在 $10^\circ\sim 50^\circ$ 入射角下,本文方法反演得到的 n 型 4H-SiC 外延层厚度接近,平均值为 $7.512\mu\text{m}$,表明本文方法在不同入射角下的反演结果具有良好的一致性,验证了其稳定性。

5.4 不确定性分析

为评估 n 型 4H-SiC 外延层厚度反演结果的可靠性,本文从参数灵敏度、残差分布、概率分布 3 个维度进行不确定性分析。

1) 通过参数灵敏度分析,量化复折射率色散模型参数扰动($+1\sigma$)对 n 型 4H-SiC 外延层厚度反演的影响,如图 4 所示。

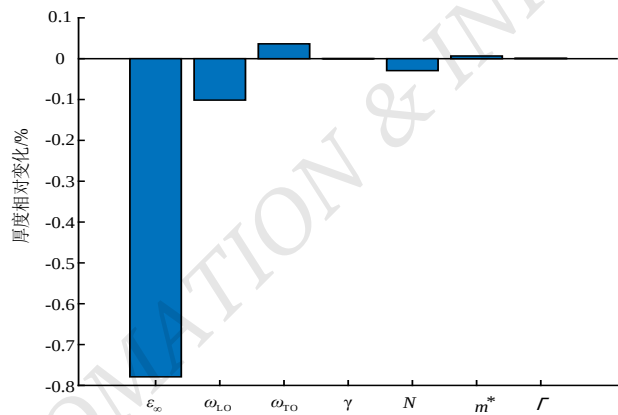


图 4 模型参数扰动($+1\sigma$)对 n 型 4H-SiC 外延层厚度反演的影响分析图

由图 4 可知,当复折射率色散模型参数在其不确定性范围($+1\sigma$)内变化时,高频介电常数 ϵ_∞ 对 n 型 4H-SiC 外延层厚度反演的影响最大,而声子阻尼系数 γ 对 n 型 4H-SiC 外延层厚度反演的影响较小,表明复

折射率色散模型对模型参数的依赖在合理范围内。

2) 对表 1 的 n 型 4H-SiC 外延层厚度反演结果进行残差分布分析,得到残差分布图如图 5 所示。

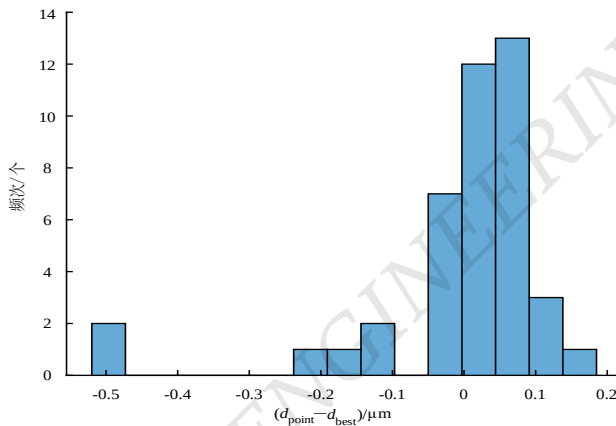


图 5 n 型 4H-SiC 外延层厚度残差分布图

由图 5 可知,独立测量点的残差呈近似正态分布,且无明显系统性偏差,表明各测量点的厚度反演结果(d_{point})与最优外延层厚度 d_{best} 之间契合度良好。

3) 采用蒙特卡洛模拟方法对 n 型 4H-SiC 外延层厚度反演结果的总体不确定度进行概率评估。通过在实验噪声水平范围内进行 1 000 次随机采样并重复厚度反演过程,得到 n 型 4H-SiC 外延层厚度的概率分布如图 6 所示。

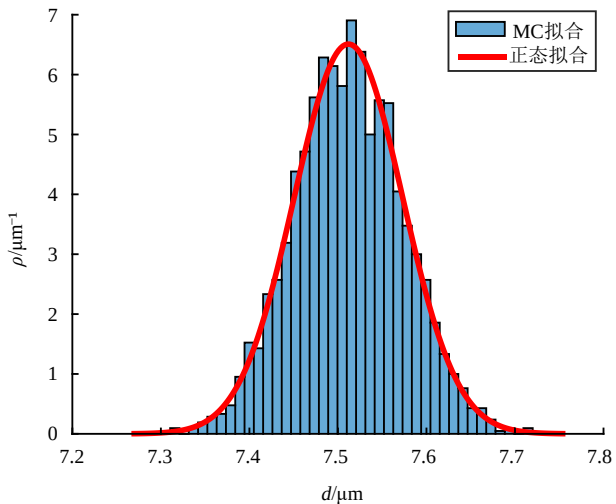


图 6 n 型 4H-SiC 外延层厚度 d 的概率分布图

由图 6 可知, n 型 4H-SiC 外延层厚度服从均值为 $7.512\mu\text{m}$ 的正态分布。

综合考虑复折射率色散模型的参数灵敏度、残差分布、概率分布等多源不确定性,通过蒙特卡洛模拟方法得到其综合不确定性标准差为 $0.061\ \mu\text{m}$ 。该标准差(仅占其厚度的 0.81%)体现了本文方法具有较高的精度。根据该分布确定 n 型 4H-SiC 外延层厚度的 95%置信区间为 $[7.512 \pm 0.119]\ \mu\text{m}$ 。其中,置信区间的边际值 $0.119\ \mu\text{m}$ 由 $1.96 \times 0.061 = 0.119$ 计算得到(1.96 为标准正态分布 95%置信对应的分位数)。

综合上述分析,本文最终确定 n 型 4H-SiC 外延层厚度为 $d = (7.512 \pm 0.119)\ \mu\text{m}$ 。该不确定度涵盖了模型参数灵敏度、残差分布及概率分布等多个不确定性因素。

5.5 多光束干涉分析

相较于 SiC,有些材料(如 Si)的外延层与衬底、空气的折射率差异更显著,反射更强,易引发多光束干涉现象。为验证本文方法的普适性,并评估多光束干涉效应对外延层厚度反演精度的潜在影响,本文对 n 型 4H-SiC 同质外延片外延层进行多光束干涉强度评估。本实验通过精细度系数(finesse, F)判断多光束干涉的影响程度,当 $F > 2$ 时,多光束干涉的影响不可忽略,需采用多光束干涉光程差公式进行厚度反演;当 $F < 2$ 时,多光束干涉的影响可忽略不计。实验结果如表 2 所示。

表 2 多光束干涉精细度实验结果

测试对象	入射角范围/(°)	F
n 型 4H-SiC 同质外延片	10~50	1.08~1.82

由表 2 可知: n 型 4H-SiC 同质外延片的 $F < 2$,表明其多光束干涉的影响不显著,本文方法具备适用性,无需对 SiC 外延层的厚度反演结果进行模型修正。

6 结论

本文提出一种基于 Drude-Lorentz 模型与红外反射光谱干涉条纹的 SiC 外延层厚度反演方法。该方法考虑了 SiC 外延层的载流子-声子耦合效应,有效解决了传统常数折射率模型在宽光谱测量中误差较大

的问题,为半导体薄膜材料厚度测量提供了新的解决方案。未来可从以下方面展开进一步研究:1) 结合遗传、贝叶斯优化等智能算法优化厚度反演方法,细化载流子参数灵敏度分析,提升测量精度;2) 将该方法拓展至 GaN、AlN 等宽禁带半导体及异质外延结构,同时开发工业级自动化红外测量装置,实现在线监测与量产场景的可靠性验证;3) 探究温度、应力等参数对 SiC 外延层光学特性的影响,建立耦合修正模型,为高可靠性器件表征及第三代半导体产业化发展提供更全面的技术支撑。

©The author(s) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

参考文献

- [1] AFANASJEV A V, ZUBKOV V I, ILYIN V A, et al. Determination of thickness and doping features of multilayer 4H-SiC structures by frequency analysis of IR reflection spectra[J]. Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki, 2022,48(2): 34-36.
- [2] KIMOTO T. SiC material properties[M]//Wide Bandgap Semiconductor Power Devices. Woodhead Publishing, 2018:21-42.
- [3] MATSUNAMI H. Fundamental research on semiconductor SiC and its applications to power electronics[J]. Proceedings of the Japan Academy, Series B, 2020,96(7):235-254.
- [4] ZHANG X, KIOUPAKIS E. Phonon-assisted optical absorption of SiC polytypes from first principles[J]. Physical Review B, 2023,107(11):115207.
- [5] CHAHAL J, RAHBANY N, EL-HELOU Y, et al. Temperature dependence of the anisotropy of the infrared dielectric properties and phonon-plasmon coupling in n-doped 4H-SiC[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2024,187:111861.
- [6] FEI T, CHENG T, ZHAO H, et al. Temperature-sensitive hybridization of propagating and localized surface phonon polaritons in polar 4H-SiC nano-resonators[J]. Journal of Applied Physics, 2022,132(12):123101
- [7] 李志云.基于 FTIR 技术的 4H-SiC 同质外延材料的测试[D]. 西安:西安电子科技大学,2010.
- [8] 王光红,施成营,冯敏,等.拉曼光谱研究 n 型 4H-和 6H-SiC 晶

- 体的载流子浓度[J].光散射学报,2007,19(2):108-113.
- [9] LUCHININ V V, PANOVA M F, PAVLOVA M V, et al. Optical control of the parameters of substrates in silicon-carbide epitaxial structures[J]. Semiconductors, 2022,56(13):455-461.
- [10] SPANN B T, COMPTON R, RATCHFORD D, et al. Photoinduced tunability of the reststrahlen band in 4 H-SiC[J]. Physical Review B, 2016,93(8):085205.
- [11] TANG X Y, ZHANG Y M, LI Z Y, et al. Thickness determination of 4H-SiC epitaxial films by infrared reflectance [C]//2009 IEEE International Conference of Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC). IEEE, 2009:295-297.
- [12] DUNKELBERGER A D, ELLIS C T, RATCHFORD D C, et al. Active tuning of surface phonon polariton resonances via carrier photoinjection[J]. Nature Photon, 2018,12(1):50-56.
- [13] GARCIA-POMAR J L, FANDAN R, CALLE F, et al. Modulation of surface phonon polaritons in MoO₃ via dynamic doping of SiC substrate[J]. Nanophotonics, 2025,14(1):23-32.
- [14] 马格林,张玉明,张义门,等.一种碳化硅外延层质量评估新技术[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2011,38(6): 37-43;96.
- [15] CUI Y X, HU X B, XU X G. Infrared transmission and reflectivity measurements of 4H-and 6H-SiC single crystals [C]//Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2015, 821: 265-268.
- [16] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.碳化硅外延层厚度的测试 红外反射法:GB/T 42905-2023[S].北京: 中国标准出版社,2023.
- [17] DONG L, SUN G S, ZHENG L, et al. Characterization of 4H-SiC substrates and epilayers by Fourier transform infrared reflectance spectroscopy[J]. Chinese Physics, 2012,21(4):552-558.
- [18] 韩茹,樊晓桠,杨银堂.n-SiC 拉曼散射光谱的温度特性[J].物理学报,2010,59(6):4261-4266.
- [19] 熊震,邹继军,彭增涛,等.微沟槽结构碳化硅 α 粒子探测器制备与性能分析[J].机电工程技术,2026,55(6):9-13.
- [20] 王瑞泽,郭怀新,付志伟,等.基于微区拉曼法的 AlGaIn/GaN HEMT 沟道温度测试研究[J].中国测试,2024,50(3):13-18; 44.

作者简介:

张翌一,女,2005年生,本科,主要研究方向:光电检测技术与半导体材料自动化表征方法。E-mail: u202310158@hust.edu.cn

何东升(通信作者),男,1978年生,博士研究生,教授/正高级工程师,主要研究方向:智能电力设备检测技术与电力硬质绝缘子研制。E-mail: 13560374768@126.com

叶沁州,男,1990年生,博士研究生,讲师,主要研究方向:智能控制与机器视觉。E-mail: yeqinzhou@163.com

刘让雄,男,1971年生,硕士研究生,教授,主要研究方向:牵引供电系统运行检测与优化、铁道供电高职教育。E-mail: liurangxiong@gtxy.edu.cn

罗海凹,男,1993年生,硕士研究生,工程师,主要研究方向:高、中、低压电力电器产品的试验、认证与设备研发。E-mail: 451827625@qq.com