

MoTe₂量子点薄膜的制备及椭圆偏振光谱研究

李国彬^{1,2,3}, 胡 坤^{1,2,3}, 张泰玮^{1,2,3}, 杨 奥^{1,2,3}, 夏溢坪^{1,2,3}, 李学铭^{1*},
唐利斌^{2,3*}, 杨培志¹, 王善力², 陈晟迪^{2,3}, 杨 丽^{2,3}, 张 艳^{2,3}

- (1. 云南师范大学 能源与环境科学学院 可再生能源材料先进技术与制备教育部重点实验室, 云南 昆明 650500;
2. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223;
3. 云南省先进光电材料与器件重点实验室, 云南 昆明 650223)

摘要:量子点薄膜的制备和光学常数的准确测定在其光电领域的发展应用尤为重要。目前通过机械剥离和化学气相沉积制备的 MoTe₂ 单晶薄膜的光学常数测定较为成熟, 然而, MoTe₂ 量子点薄膜的光学常数的报道却较为少见。采用超声辅助液相剥离的方法制备出 MoTe₂ 量子点, 并通过改变辅助溶剂的种类与超声顺序制备了两种尺寸的 MoTe₂ 量子点; 使用椭圆偏振光谱技术, 通过 B-spline 模型和 Tauc-Lorentz 模型分别研究了两种尺寸量子点薄膜的折射率、消光系数与介电常数等光学常数。结果显示, 两种尺寸的 MoTe₂ 量子点在可见到红外波段内具有相近的折射率、消光系数和较宽的光谱吸收区, 并且与 MoTe₂ 体材料相比, 具有较低的介电常数。

关键词: 光学; 光学常数; 椭圆偏振光谱; MoTe₂ 量子点薄膜

中图分类号: O433.4

Study on the preparation and spectroscopic ellipsometry of MoTe₂ quantum dot films

LI Guo-Bin^{1,2,3}, HU Kun^{1,2,3}, ZHANG Tai-Wei^{1,2,3}, YANG Ao^{1,2,3}, XIA Yi-Ping^{1,2,3}, LI Xue-Ming^{1*},
TANG Li-Bin^{2,3*}, YANG Pei-Zhi¹, WANG Shan-Li², CHEN Sheng-Di^{2,3}, YANG Li^{2,3}, ZHANG Yan^{2,3}

- (1. Key Laboratory of Advanced Technique & Preparation for Renewable Energy Materials, Ministry of Education, School of Energy and Environment Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;
2. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;
3. Yunnan Key Laboratory of Advanced Photoelectric Materials & Devices, Kunming 650223, China)

Abstract: The preparation of quantum dot thin films and the accurate determination of optical constants are particularly important in the development and application of their optoelectronic fields. At present, the optical constants of MoTe₂ single-crystal films prepared by mechanical exfoliation and chemical vapor deposition are relatively mature. However, the optical constants of 2H-MoTe₂ quantum dot films are rarely reported. 2H-MoTe₂ quantum dots were prepared by ultrasonic assisted liquid phase exfoliation, and two sizes of 2H-MoTe₂ quantum dots were prepared by changing the type of solvent and ultrasonic order. The optical constants such as refractive index, extinction coefficient and dielectric constant of quantum dot films of two sizes were studied by B-spline model and Tauc-Lorentz model using ellipsometry. The results show that the two sizes of 2H-MoTe₂ quantum dots have similar refractive index, extinction coefficient and a wider spectral absorption in the visible to near infrared band. And compared with MoTe₂ bulk material, it has a lower dielectric constant.

Key words: optics, optical constants, spectroscopic ellipsometry, MoTe₂ quantum dot thin film

收稿日期: 2024-08-12, 修回日期: 2024-10-12

Received date: 2024-08-12, Revised date: 2024-10-12

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFB2203404); 云南省科技厅科技人才与平台计划项目 (202205AC160026)

Foundation items: Supported by the National Key Research and Development Program (2019YFB2203404), Science and Technology Talents and Platform Project of Science and Technology Department of Yunnan Province (202205AC160026)

作者简介 (Biography): 李国彬 (1999—), 男, 贵州毕节人, 硕士研究生, 主要研究领域为光电材料与器件. E-mail: ynnulgb@163.com

*通讯作者 (Corresponding authors): E-mail: lxmscience@163.com, scitang@163.com

引言

量子点薄膜的制备及其光学常数的准确测定是量子点在光电器件领域应用的重要前驱。二碲化钼(MoTe_2)属于层状过渡金属二硫化合物,具有半金属(1T')相和半导体(2H)相两种结构,其所具备的光电特性和厚度依赖带隙可调等特点使其成为二维材料器件研究的热点话题之一^[1]。Keum^[2]等人发现1T'- MoTe_2 在1.8 K下的14 T磁场中表现出 $4\,000\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 的最大载流子迁移率,同时,少层1T'- MoTe_2 显示出60 meV的带隙。2H相带隙0.88~0.90 eV^[3],属于间接带隙半导体,合适的光学带隙使其在近红外光电领域有很大的应用前景。目前的研究对于二维单晶 MoTe_2 的各方面性质的报道比较全面,然而在2H- MoTe_2 量子点结构的制备方面以及通过椭圆偏振光谱法对量子点薄膜进行分析的相关报道较为鲜有。

椭圆偏振光谱法(SE)是一种重要的光学技术,用于获得材料在宽光子能量范围内的光学常数和介电常数。与其他技术相比,例如基于反射对比度或光致发光的方法^[4],椭圆偏振光谱法可以用于直接推导材料的折射率(n)、消光系数(k)、介电函数的实部(ϵ_1)和虚部(ϵ_2)等^[5]。这些常数是由两个独立的椭圆参数 φ 和 Δ 导出的,这两个参数分别是 p 偏振光和 s 偏振光在材料表面反射时的振幅比和相位差^[6]。

Gulo^[7]等人使用椭圆偏振光谱法在不同温度下研究了化学气相沉积法制备的 MoTe_2 单晶,并用第一性原理计算,得出在4.2 K下获得的光学吸收光谱以及相应带隙。Fang等人^[8]通过椭圆偏振光谱法研究了5~25 nm厚的2H- MoTe_2 薄膜在温度为100~450 K,能量为0.75~5.91 eV范围内的介电函数。Munkhbat^[9]等人通过机械剥离制备多层 MoTe_2 薄膜,并利用椭圆偏振光谱法,在不同入射角度下测量了300~1 700 nm波长范围内的折射率变化,发现 MoTe_2 薄膜具有面内各相异性和较高的折射率,并且在近红外波段具有吸收,表明 MoTe_2 材料在红外光电领域具有较大的应用前景。

本文使用液相剥离法将2H- MoTe_2 通过两种溶剂分两步超声制备成量子点,并在石英片上旋涂成薄膜,通过椭圆偏振光谱法测量出2H- MoTe_2 量子点薄膜的 n 、 k 、 ϵ_1 和 ϵ_2 。

1 实验部分

1.1 2H- MoTe_2 量子点的制备

本文采用超声辅助液相剥离制备2H- MoTe_2 量子点,流程如图1所示。

10.5 nm量子点制备步骤为:称取2g 2H- MoTe_2 粉末加入装有60 mL N-N二甲基甲酰胺(DMF)溶液的烧杯中,将混合溶液置于超声仪中,超声仪功率180 W,时间10 h;然后将得到的混合溶液2 000 r/min离心10 min取上清液,9 000 r/min离心10 min,留沉淀,即得到10.5 nm的2H- MoTe_2 量子点。

3.0 nm量子点制备步骤为:称取2g 2H- MoTe_2 粉末加入装有60 mL 1-甲基-2-吡咯烷酮(NMP)溶液的烧杯中,之后将混合溶液置于超声仪中,超声功率300 W,时间24 h;然后将得到的混合溶液8 000 r/min离心10 min,留沉淀,用无水乙醇进行离心清洗2次,将溶液中的NMP去除,倒入60 mL DMF混合沉淀,通过300 W超声24 h,2000 r/min离心10 min,取上清液,用50 mL容量瓶收集,即为2H- MoTe_2 量子点溶液。

1.2 2H- MoTe_2 量子点薄膜的制备

将1.1部分制备的量子点溶液进行9 000 r/min离心20 min,收集沉淀,加入1 mL异丙醇,配成浓度为40 mg/mL的2H- MoTe_2 量子点墨水。之后使用匀胶机进行旋涂,旋涂第一转速为400 r/min,时间5 s,第二转速选择900 r/min,时间40 s,在2 cm的正方形石英片上旋涂一次。

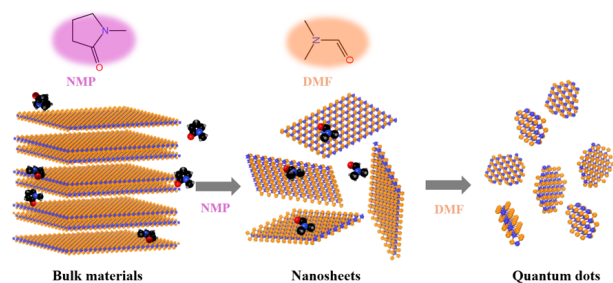
1.3 2H- MoTe_2 量子点的表征与测试

使用X射线衍射仪(XRD, EMPYREAN);傅里叶变换红外光谱仪(FTIR, Nicolet iS10)和拉曼光谱仪(Raman Renishaw-In-Via)对2H- MoTe_2 量子点的物相组成进行分析。利用透射电镜(TEM, Tecnai G2 TF30 S-Twin)对2H- MoTe_2 量子点的尺寸和颗粒分散性进行表征,扫描电镜(SEM)对薄膜表明形貌和厚度进行表征,并使用紫外-可见-近红外分光光度计(UV-Vis-NIR, Shimadzu UV-3600 Plus)测量量子点薄膜在300~2 000 nm波段的吸收光谱。之后使用椭偏仪(J. A. Woollam RC2)进行2H- MoTe_2 量子点薄膜椭偏参量的测量。

2 结果与讨论

2.1 2H- MoTe_2 量子点的形貌和成分分析

如图2(a)和(b)为2H- MoTe_2 量子点的TEM图,从图中可知2H- MoTe_2 量子点分散均匀,通过尺寸统计,

图1 2H-MoTe₂量子点制备流程图Fig. 1 Flow chart of the preparation of 2H-MoTe₂ quantum dots

如插图所示,其平均尺寸分别为10.5 nm和3.0 nm。图2(c_i)和(c_{ii})分别为10.5 nm和3.0 nm 2H-MoTe₂量子点的高分辨TEM(HRTEM)图,两种尺寸的2H-MoTe₂量子点都有清晰的晶格条纹,从图2(c_i)发现,其晶面分别对应(004)和(102),晶面间距分别为0.35 nm和0.28 nm,这表明2H-MoTe₂量子点与MoTe₂体材料有相同的晶体结构。以下以10.5 nm的2H-MoTe₂量子点进行XRD、Raman和FTIR表征,图2(d)为量子点的XRD图,经过与标准PDF卡片(PDF#04-007-3371)对比可知,图中六个衍射峰分别对应于(002)、(004)、(102)、(103)、(110)

和(112)晶面,这表明制备的MoTe₂量子点属于2H相。图2(e)为量子点的Raman图,在161.8和247.2 cm⁻¹处的特征峰分别属于A_{1g}和E_{2g}振动,这与Wang等人^[10]报道的2H-MoTe₂的Raman特征峰的位置相近。图2(f)为量子点的FTIR透射光谱,其中3727、3415和1632 cm⁻¹是O-H振动导致,1400 cm⁻¹是HO-C振动导致,1112 cm⁻¹是C=O振动导致,位于660 cm⁻¹处的振动即为Mo-Te振动,这与Chen^[11]等人报道的振动峰位相近,但峰位存在微小的偏移,这可能是由于量子尺寸效应导致的^[12]。

2.2 2H-MoTe₂量子点薄膜的结构和光学分析

图3(a)和(d)分别是10.5 nm与3.0 nm的量子点薄膜的平面SEM图。从图中可以看见两种尺寸的量子点薄膜在3 μm标尺下表面平整度较高。插图是量子点薄膜平面高倍SEM图,可以看见薄膜的表面是由量子点团聚形成。图3(b)和(e)分别是尺寸为10.5 nm与3.0 nm的量子点薄膜的断面SEM图,厚度分别为296 nm和302 nm;使用UV-Vis-NIR分光光度计先对未旋涂量子点的石英片进行基线校准,排除石英基底对吸收的影响,再对旋涂了量子点的石英片测试,得到了如图3(c)和(f)所示的10.5 nm和3.0 nm量子点薄膜吸收光谱,结果显示

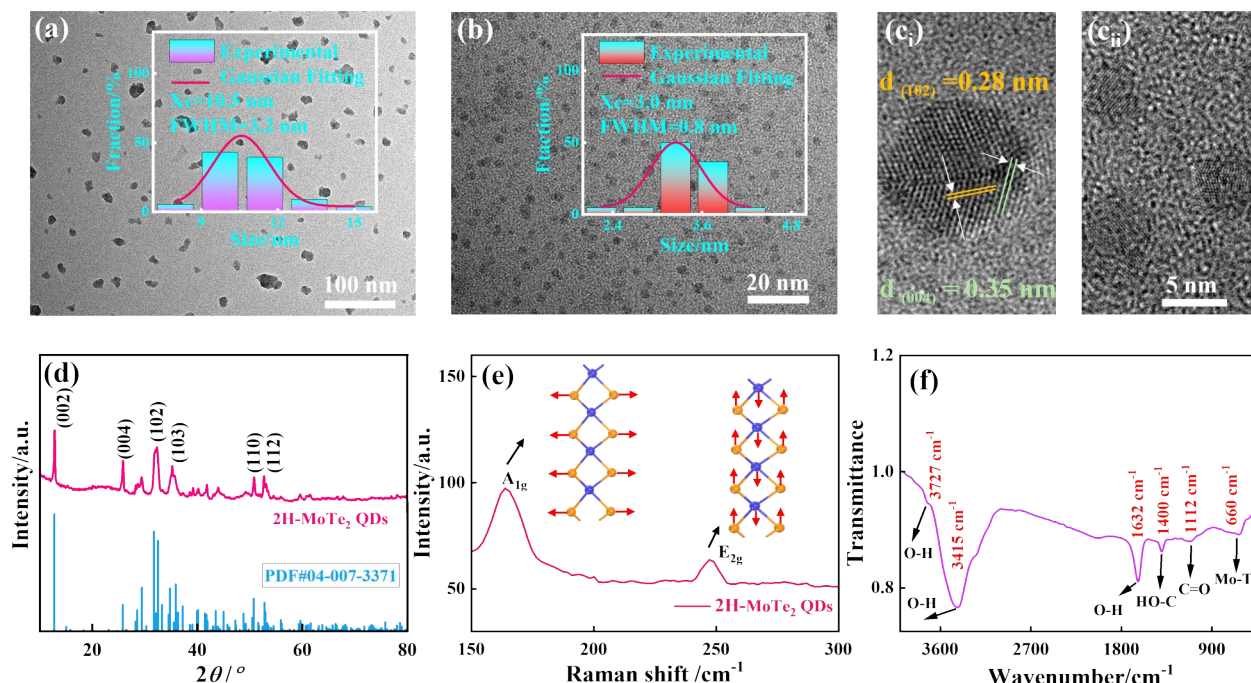


图2 MoTe₂量子点的粒径、形貌、结构和组分分析:(a)10.5 nm量子点TEM图;(b)3.0 nm量子点TEM图;(c)10.5 nm和3.0 nm量子点HRTEM图;(d)10.5 nm量子点的XRD图;(e)10.5 nm量子点的Raman光谱;(f)10.5 nm量子点的FTIR光谱

Fig. 2 Size, morphology, structure and composition analysis of MoTe₂ quantum dots: (a) TEM image of 10.5 nm quantum dots; (b) TEM image of 3.0 nm quantum dots; (c) HRTEM images of 10.5 nm and 3.0 nm quantum dots; (d) XRD pattern of 10.5 nm quantum dots; (e) Raman spectrum of 10.5 nm quantum dots; (f) FTIR spectrum of 10.5 nm quantum dots

两种尺寸的量子点薄膜在 300~2 000 nm 波长内均有吸收,表明该材料在红外探测领域具有潜在应用。

2.3 2H-MoTe₂量子点薄膜椭圆偏振光谱测试分析

图4(a)是椭圆偏振仪的装置示意图,该装置通过分析已知偏振态的入射光经过薄膜表面反射后的偏振态变化,测得薄膜的光学性能。采用椭圆偏仪软件中的SE数据库对量子点薄膜进行拟合。如图4(b)所示,分别是石英衬底上 100% 2H-MoTe₂和石英衬底上 50% 2H-MoTe₂与 50% Void的结构。通过 2.2 对 SEM 薄膜平面分析,有两种结构模型,选取了图4(b)(ii)进行拟合。

通过椭圆偏仪测量入射光和反射光的偏振变化参数,即相对于样品表面在 p 和 s 方向上的光之间的振幅 φ 和相位差 Δ ,实验通过测量 φ 和 Δ ,再由公式(1)~(5)可计算出 ε_1 和 ε_2 [13-14]。

$$\rho = \tan\varphi \cdot e^{i\Delta} \quad , \quad (1)$$

$$I_c = \sin 2\varphi \cos \Delta \quad , \quad (2)$$

$$I_s = \sin 2\varphi \sin \Delta \quad , \quad (3)$$

$$N = \tilde{N}_0 \tan \theta \left[1 - \frac{4\rho}{(1+\rho)^2} \sin^2 \theta \right]^{\frac{1}{2}} \quad , \quad (4)$$

$$N^2 = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2 = (n^2 - k^2) - 2nki \quad , \quad (5)$$

其中, φ 是振幅, Δ 是 p 和 s 方向的光之间的相位差, θ 是检测光的入射角度, I_s 和 I_c 是光强; ρ 是偏振变化, N 是材料的复折射率, \tilde{N}_0 是空气的负折射率 ($\tilde{N}_0=1$)

椭圆偏仪测试的参数通常使用洛伦兹 (Tauc-Lorentz) 振子模型 [15]、Drude 振子模型和柯西 (Cauchy) 振子模型进行拟合分析,应根据材料的物理来选择合适的模型,除了上述模型拟合,已报道的大量研究中使用 B-spline 模型 [16-19]。已有文献报道 Tauc-Lorentz 模型被用于碲化锡 [20]、二硫化钨 [21]、二硒化铅 [22]、碘氧化铋 [23] 和氧化钽 [24] 等范德华材料的椭圆建模拟合。

本论文两种尺寸量子点椭圆偏仪测试的参数分别通过 B-spline 模型和 Tauc-Lorentz 模型拟合,由

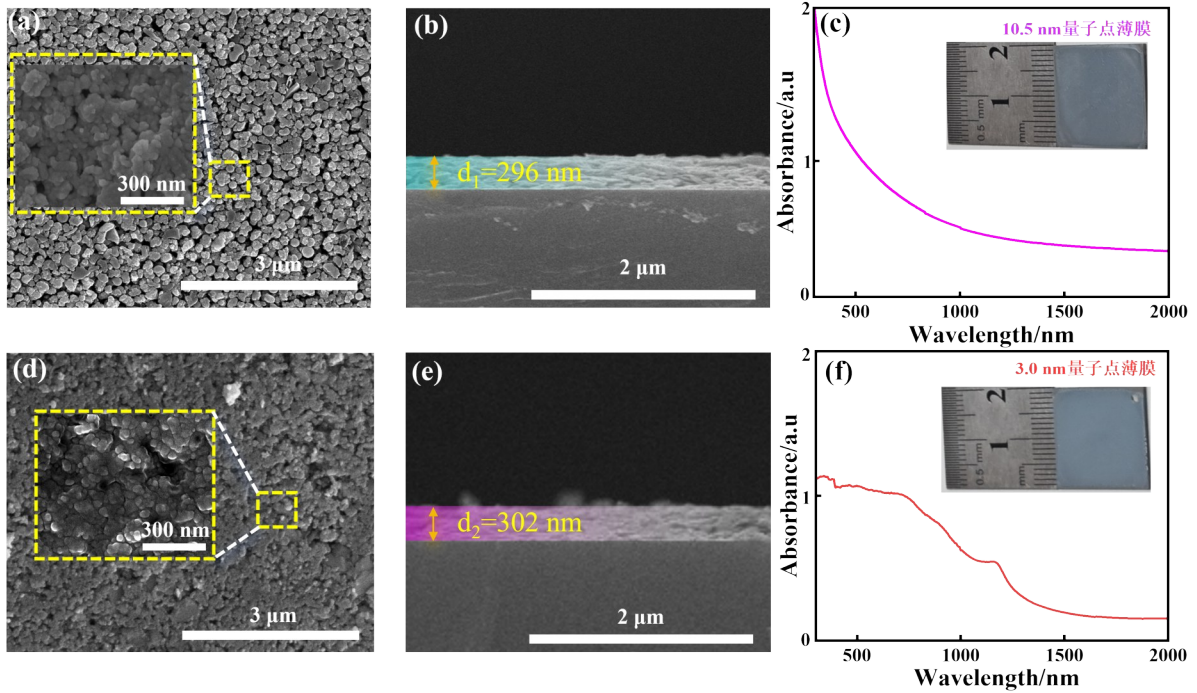


图3 MoTe₂量子点薄膜的SEM和UV-Vis-NIR吸收光谱测试:量子点薄膜平面SEM图(a)粒径10.5 nm, (d)粒径3.0 nm;量子点薄膜断面SEM图(b)粒径10.5 nm, (e)粒径3.0 nm;量子点薄膜UV-Vis-NIR吸收光谱(c)粒径10.5 nm, (f)粒径3.0 nm, 插图为薄膜照片

Fig. 3 SEM and UV-Vis-NIR absorption spectrum tests of MoTe₂ quantum dot films: the top-view SEM images of the quantum dot films: (a) the particle size is 10.5 nm, (d) the particle size is 3.0 nm (insets are the local enlarged images); the cross-sectional SEM image of the quantum dot films: (b) the particle size is 10.5 nm, (e) the particle size is 3.0 nm; the UV-Vis-NIR absorption spectrum of quantum dot films: (c) the particle size is 10.5 nm, (f) the particle size is 3.0 nm (insets are the pictures of the films)

于旋涂制备的薄膜会有微小的差距,椭圆分析时两种尺寸量子点薄膜厚度值均设定为300 nm。公式(6)~(8)即为B-spline模型的公式,其本质是一个拟合曲线震荡的数学模型,通过拟合后的参数来计算薄膜的 n 、 k 、 ε_1 和 ε_2 ,可以减少测试曲线震荡对于结果的影响,使计算结果更可靠。公式(9)是Tauc-Lorentz模型,该模型主要是通过改变入射光的能量使材料发生带内吸收震荡,峰位对应测试材料的光学带隙。

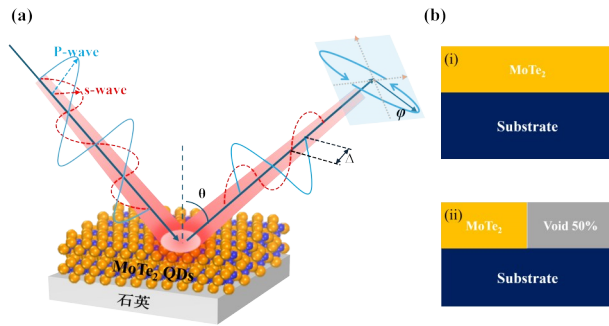


图4 (a) 椭圆偏振光谱仪装置的示意图;(b) 2H-MoTe₂量子点薄膜模型

Fig. 4 (a) The schematic diagram of the ellipsometric spectrometer device; (b) The models of 2H-MoTe₂ quantum dot film

$$B_i^0(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } t_i \leq x \leq t_{i+1}, p=0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (6)$$

$$B_i^p(x) = \frac{x - t_i}{t_{i+p} - t_i} B_i^{p-1}(x) + \frac{t_{i+p+1} - x}{t_{i+p+1} - t_{i+1}} B_{i+1}^{p-1}(x), \quad (7)$$

$$S_{(x)} = \sum_{i=1}^n c_i B_i^k(x) \quad (8)$$

其中,函数 $B_i^0(x)$ 、 $B_i^p(x)$ 和 $B_i^k(x)$ 的上标表示B样条的次数,下标 i 是节点位置; t_i 和 t_{i+p} 表示节点间距。公式(6)定义了0次B-spline函数;利用递推公式(7)可以构造高次函数。公式(8)将样条曲线 $S(x)$ 构造为 n 个基函数的线性组合,其中 c_i 是第 i 个基函数的样条系数。

$$\varepsilon_2 = \begin{cases} \frac{AE_0 C(E - E_g)^2}{[(E^2 - E_0^2)^2 + C^2 E^2] \cdot E} & E > E_g \\ 0 & E \leq E_g \end{cases}, \quad (9)$$

其中 E 是入射光能量, A 是振子强度, C 是振子宽度, E_g 是带隙, E_0 是振子中心能,可以结合K-K关系^[24],从而通过 ε_2 算出 ε_1 值。

图5为10.5 nm量子点薄膜椭圆偏测试与拟合的光学常数值,拟合模型为B-spline,通过椭圆仪测得量子点薄膜的 φ 和 Δ ,随后由公式(2)~(5)计算得出 I_s 、 I_c 、 n 、 k 、 ε_1 和 ε_2 。图5(a,b)为椭圆参量,可以观察到测试值与拟合值对应较好,图5(c)和(d)分别为

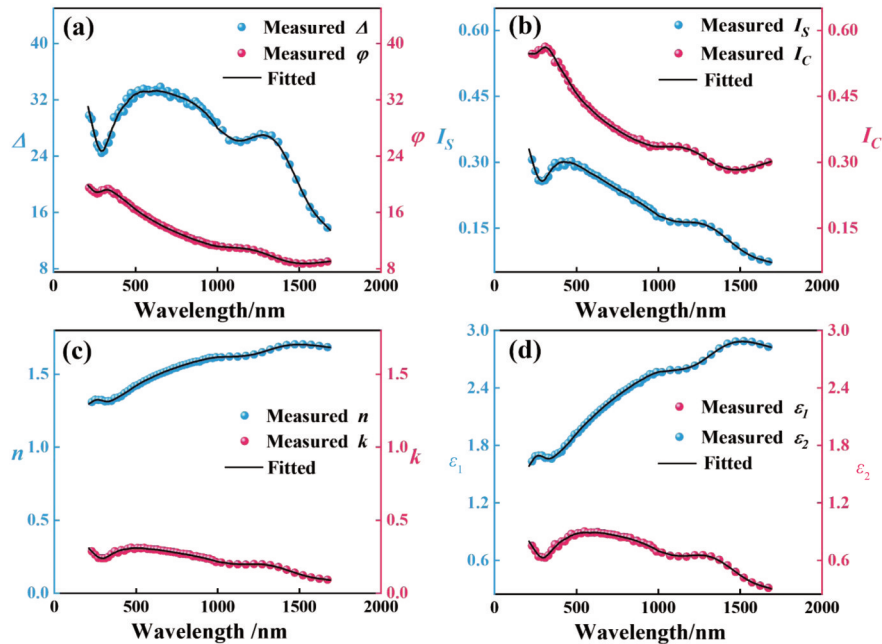


图5 平均尺寸10.5 nm MoTe₂量子点B-spline椭圆模型拟合结果:(a,b)为椭圆参量;(c)为 n 、 k 值的测试值与拟合值;(d)为介电常数 ε_1 和 ε_2 的测试值与拟合值

Fig. 5 The ellipsometry spectra fitted results using B-spline model of MoTe₂ quantum dot film with the size of 10.5 nm: (a, b) the ellipsometric parameters; (c) the tested and the fitted values of n , k ; (d) the tested and the fitted values of the dielectric constants ε_1 and ε_2

量子点薄膜 n 、 k 、 ε_1 和 ε_2 的测试值与拟合值。结果显示,随着波长的增加,在 200~1 700 nm 波长范围内, n 值总体呈现上升趋势,范围为 1.2~1.8;但 k 值逐渐减小,范围为 0.1~0.3; ε_1 值总体随波长的增加而增加,范围为 1.5~3.0; ε_2 值范围在 0.0~1.0 之间,总体随波长增加而下降。Gulo^[7]等人报道的 MoTe₂ 单晶的介电常数位于 0~25 之间,与其相比,10.5 nm 2H-MoTe₂ 量子点薄膜的介电常数较小,其中, ε_2 的峰与样品的带间电子跃迁有关^[22]。

图 6(a, b) 为 3.0 nm 的量子点薄膜的椭圆偏测试与拟合的光学常数值,拟合模型为 Tauc-Lorentz。结果显示,该模型的拟合值与测试值接近。图 6(c, d) 为 3.0 nm 量子点薄膜 n 、 k 、 ε_1 和 ε_2 的测试值和拟合值,结果显示 3.0 nm 量子点薄膜的 n 和 ε_1 随波长增大而先增大后减小,在 1 200 nm 处出现峰值, k 与 ε_2 随波长的增大而减小,在 1 500~2 000 nm 波长区接近零,表明该尺寸的纳米薄膜对 1 500~1 000 nm 波长区的吸收能力极弱,这与图 3(d) 显示尺寸为 3 nm 的 2H-MoTe₂ 量子点薄膜的吸收光谱对应。纳米薄膜的 k 与 ε_2 在低能量的波长区内出现 k 与 ε_2 逐渐趋于零的情况已有较多报道,其与材料的带隙有关^[25-28]。Patel^[29]等人研究发现 MoTe₂ 的 n 和 k 在能量

为 0.8~1.4 eV 之间出现突变区域,对应波段为 885~1 550 nm,这与文中两种尺寸的量子点的 n 和 k 值的突变范围接近。

两种尺寸的 2H-MoTe₂ 量子点薄膜 ε_1 值均比体材料 2H-MoTe₂ 小, ε_2 随波长增大而减小,并且尺寸为 10.5 和 3.0 nm 的量子点薄膜 ε_2 的峰位随尺寸减小而出现红移,可能是由于量子点尺寸变小导致量子限域效应更加明显所导致^[30-31]。

3 结论

采用两步液相剥离法制备了 10.5 nm 和 3.0 nm 的 2H-MoTe₂ 量子点,并旋涂制备了 2H-MoTe₂ 量子点薄膜;通过椭圆偏振光谱法中的 B-spline 和 Tauc-Lorentz 模型分别对粒径为 10.5 nm 和 3.0 nm 的量子点薄膜进行拟合,并得出了两种尺寸 2H-MoTe₂ 量子点薄膜的 n 、 k 、 ε_1 和 ε_2 ;相较于文献报道的单晶 MoTe₂ 材料的椭圆偏分析,首次提供了 2H-MoTe₂ 量子点薄膜材料的椭圆偏振光谱分析数据。随着波长的增加,10.5 nm 的 2H-MoTe₂ 量子点薄膜材料在 200~1 700 nm 波长内, n (1.2~1.8) 和 ε_1 (1.5~3.0) 总体呈现上升趋势,而 k (0.1~0.3) 和 ε_2 (0.0~1.0) 总体呈现下降趋势,直至 1 700 nm 处接近零;3.0 nm

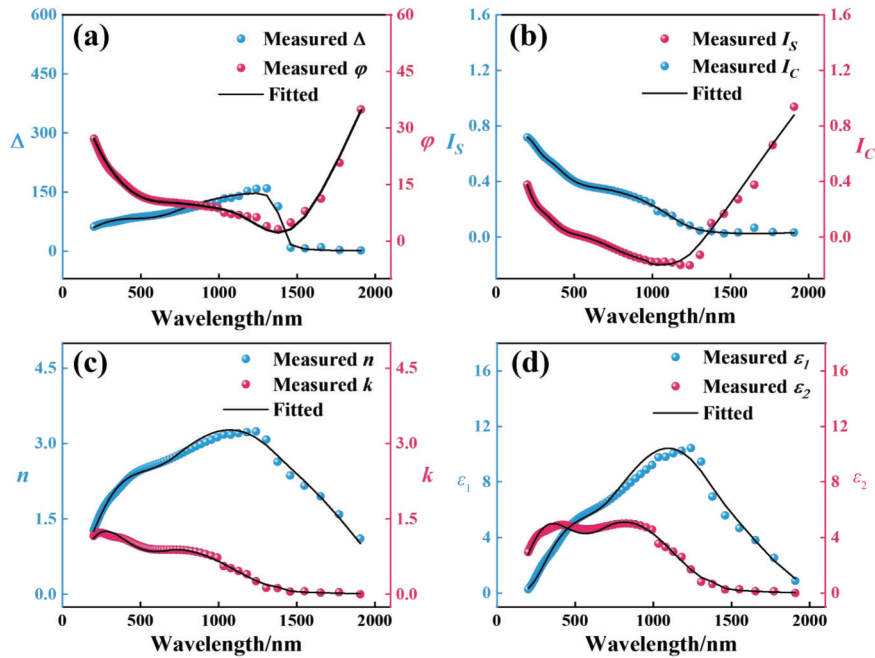


图 6 尺寸 3.0 nm 的 MoTe₂ 量子点薄膜的 Tauc-Lorentz 椭圆模型拟合结果:(a, b) 为椭圆参量;(c) 是 n 、 k 值的测试值与拟合值;(d) 是介电常数 ε_1 和 ε_2 的测试值与拟合值

Fig. 6 The ellipsometry spectra fitted results using Tauc-Lorentz model of MoTe₂ quantum dot film with the size of 3.0 nm: (a, b) the ellipsometric parameters; (c) the tested and fitted values of n , k ; (d) the tested and fitted values of the dielectric constants ε_1 and ε_2

的2H-MoTe₂量子点薄膜的 n (约为3.2)和 ε_1 (约为11)在1 200 nm取得最大值,高于10.5 nm 2H-MoTe₂量子点薄膜的 n 值和 ε_1 值;并且 k 与 ε_2 在1 000 nm之后快速减小直至1 500~2 000 nm波长范围接近零。结果显示,2H-MoTe₂量子点薄膜的光学常数与量子点尺寸关系较大,并且在可见光到红外波长区内两种尺寸的2H-MoTe₂量子点薄膜都具有较高的 n 值、 ε_1 值和较宽的光谱吸收区,表明其在红外光电探测领域具有潜在应用价值。

References

- [1] Chhowalla M, Shin H S, Eda G, et al. The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenide nanosheets [J]. *Nature Chemistry*, 2013, 5(4): 263-275.
- [2] Keum D H, Cho S, Kim J H, et al. Bandgap opening in few-layered monoclinic MoTe₂ [J]. *Nature Physics*, 2015, 11(6): 482-486.
- [3] Lezama I G, Ubaldini A, Longobardi M, et al. Surface transport and band gap structure of exfoliated 2H-MoTe₂ crystals [J]. *2D Materials*, 2014, 1(2): 021002.
- [4] Ruppert C, Aslan O B, Heinz T F, et al. Optical properties and band gap of single- and few-layer MoTe₂ crystals [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(11): 6231-6236.
- [5] Aspnes D E. Spectroscopic ellipsometry—past, present, and future [J]. *Thin Solid Films*, 2014, 571: 334-344.
- [6] Fujiwara H. Spectroscopic ellipsometry: principles and applications [M]. John Wiley & Sons, 2007.
- [7] Gulo D P, Hung N T, Sankar R, et al. Exploring optical properties of 2H- and 1T'-MoTe₂ single crystals by spectroscopic ellipsometry [J]. *Physical Review Materials*, 2023, 7(4): 044001.
- [8] Fang Ming-Sheng, Gu Hong-Gang, Guo Zheng-Feng, et al. Temperature and thickness dependent dielectric functions of MoTe₂ thin films investigated by spectroscopic ellipsometry [J]. *Applied Surface Science*, 2022, 605: 154813.
- [9] Munkhbat B, Wróbel P, Antosiewicz T J, et al. Optical constants of several multilayer transition metal dichalcogenides measured by spectroscopic ellipsometry in the 300 - 1700 nm range: high index, anisotropy, and hyperbolicity [J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(7): 2398-2407.
- [10] Wang Ying, Xiao Jun, Zhu Han-Yu, et al. Structural phase transition in monolayer MoTe₂ driven by electrostatic doping [J]. *Nature*, 2017, 550(7677): 487-491.
- [11] Chen Xin-Peng, Chen Xiang-Dong, Ding Xing, et al. Gas sensitive characteristics of polyaniline decorated with molybdenum ditelluride nanosheets [J]. *Chemosensors*, 2022, 10(7): 264.
- [12] Hamizi N A, Johan M R. Optical and FTIR studies of CdSe quantum dots [C]. 2010 3rd IEEE International Nanoelectronics Conference, Hong Kong, IEEE, 2010: 887-887.
- [13] Diroll B T, Gaulding E A, Kagan C R, et al. Spectrally - resolved dielectric functions of solution-cast quantum dot thin films [J]. *Chemistry of Materials*, 2015, 27(18): 6463-6469.
- [14] Shim Y, Okada W, Mamedov N, et al. Incoherent ellipsometry below energy gap of TlInS₂ [J]. *Thin Solid Films*, 2005, 509(1): 137-140.
- [15] Ito K, Yamada Y, Miura A A, et al. High-aspect-ratio mushroom-like silica nanopillars immersed in air: epsilon-near-zero metamaterials mediated by a phonon-polaritonic anisotropy [J]. *RSC Advances*, 2019, 9(29): 16431-16438.
- [16] Likhachev D V. Selecting the right number of knots for B-spline parameterization of the dielectric functions in spectroscopic ellipsometry data analysis [J]. *Thin Solid Films*, 2017, 636: 519-526.
- [17] Likhachev D V. Optimization of the dielectric-function modeling by B-splines in spectroscopic ellipsometry analysis: A hybrid approach [J]. *Thin Solid Films*, 2022, 762: 139545.
- [18] Wang Xin, Fan Xian-Guang, Xu Ying-Jie, et al. A baseline correction algorithm for Raman spectroscopy by adaptive knots B-spline [J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(11): 115503.
- [19] Cox M G. The numerical evaluation of B-splines [J]. *IMA Journal of Applied mathematics*, 1972, 10(2): 134-149.
- [20] Song Li-Yuan, Tang Li-Bin, Wang Shan-Li, et al. Study on spectral ellipsometry of SnTe nanofilm [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2023, 42(05), 581-587. 宋立媛, 唐利斌, 王善力, 等. SnTe纳米薄膜的椭圆偏振光谱研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2023, 42(05), 581-587.
- [21] Magnozzi M, Ferrera M, Piccinini G, et al. Optical dielectric function of two-dimensional WS₂ on epitaxial graphene [J]. *2D Materials*, 2020, 7(2): 025024.
- [22] Xie Jun-Fang, Zhang Di, Yan Xiao-Qing, et al. Optical properties of chemical vapor deposition-grown PtSe₂ characterized by spectroscopic ellipsometry [J]. *2D Materials*, 2019, 6(3): 035011.
- [23] Zeng Wei, Feng Li-Ping, Yu Yao-Chenet al. Investigation of the layer-dependent optical properties of ultrathin BiOI by spectroscopic ellipsometry [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 850: 156676.
- [24] Chittihan D, Burasiri P, Lertvanthphol T, et al. Observations of the initial stages on reactive gas-timing sputtered TaO thin films by dynamic in situ spectroscopic ellipsometry [J]. *Optical Materials*, 2019, 92: 223-232.
- [25] Magnozzi M, Ferrera M, Piccinini G, et al. Optical dielectric function of two-dimensional WS₂ on epitaxial graphene [J]. *2D Materials*, 2020, 7(2): 025024-025024.
- [26] Pu Yong-Jie, Liu Wen-Qiang, Liu Yun-Yong, et al. Enhancing effects of reduced graphene oxide on photoluminescence of CsPbBr₃ perovskite quantum dots [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(22): 7447-7453.
- [27] Gu Hong-Gang, Song Bao-Kun, Fang Ming-Sheng, et al. Layer-dependent dielectric and optical properties of centimeter-scale 2D WSe₂: evolution from a single layer to few layers [J]. *Nanoscale*, 2019, 11(47): 22762-22771.
- [28] Peci E, Magnozzi M, Ramó L, et al. Dielectric function of 2D tungsten disulfide in homo and heterobilayer stacking [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2023, 10(3): 2201586.

-
- [29] Patel D D, Desai P F, Bhacser D N, et al. Optical, thermal and surface microtopography studies of MoTe_2 single crystals [C]. AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2013, 1536(1): 323–324.
- [30] Zhao Ming-Lin, Shi Yu-Jun, Dai Jun, et al. Ellipsometric study of the complex optical constants of a CsPbBr_3 perovskite thin film [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6(39): 10450–10455
- [31] Tiutiunnyk A, Morales A L, Bertel R, et al. Electronic, optical, and magnetic properties of doped triangular MoS_2 quantum dots: a density functional theory approach [J]. Physica Status Solidi (b), 2022, 259(4): 2100509.