

SnTe 纳米薄膜的椭圆偏振光谱研究

宋立媛^{1,2,3}, 唐利斌^{1,2,3*}, 王善力^{2*}, 郝群^{1*}, 孔令德², 李俊斌²

(1. 北京理工大学 光电学院 信息光子技术工信部重点实验室, 北京 100081;

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: SnTe 纳米薄膜材料光学常数的准确获取, 对于其在高性能光电器件设计和在光电子领域的潜在应用具有重要的意义。然而, 目前仍然很少有关于获取其纳米薄膜光学常数方法的相关研究报道。采用磁控溅射法以 SnTe 单靶为靶材, 在石英衬底上制备了 SnTe 纳米薄膜; 在未加衬底温度和未进行退火处理的条件下, 通过制备工艺参数优化, 即得到晶化的、组分可控的面心立方结构 SnTe 纳米薄膜。采用椭圆偏振光谱法, 建立不同的拟合模型结构, 利用 SE 数据库中的 SnTe 材料数据列表和 Tauc-Laurents 模型对所制备的 SnTe 纳米薄膜材料的膜厚、组成及折射率、消光系数等光学常数进行了研究。结果显示, 具有该厚度的 SnTe 纳米薄膜材料在可见光波段具有较高的折射率、在可见到近红外具有较宽的光谱吸收。

关键词: SnTe 纳米薄膜; 椭圆偏振光谱; 光学常数

中图分类号: O434.3

文献标识码: A

Study on spectral ellipsometry of SnTe nanofilm

SONG Li-Yuan^{1,2,3}, TANG Li-Bin^{1,2,3*}, WANG Shan-Li^{2*}, HAO Qun^{1*}, KONG Ling-De², LI Jun-Bin²

(1. The Laboratory of Photonics Information Technology, Ministry of Industry and Information Technology, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;

3. Yunnan Key Laboratory of Advanced Photoelectronic Materials & Devices, Kunming 650223, China)

Abstract: The accurate acquisition of optical constants of SnTe nanofilm is of great significance for the design of high-performance optoelectronic devices and their potential applications in the field of optoelectronics. However, there are still few reports about the methods to obtain the optical constants of the nanofilm. SnTe nanofilm was prepared on quartz substrate by magnetron sputtering with a SnTe single target. Under the conditions of with no heating of the substrate and annealing treatment, using the appropriate process parameters, a crystalline and compositionally controlled face-centered cubic SnTe nanofilm has been obtained. The thickness, composition, refractive index, extinction coefficient and other optical constants of SnTe nanofilm were studied by using spectral ellipsometry (SE). Different fitting model structures were established. SnTe material data lists in SE database and the Tauc-Laurents model were used for fitting analysis respectively. The results show that the SnTe nanofilm with such thickness has a higher refractive index in the visible band and a wider spectral absorption from visible to near infrared.

Key words: SnTe nanofilm, spectral ellipsometry, optical constants

引言

新型 SnTe 材料拥有许多优点, 例如在室温下其具有高的迁移率^[1]、通过改变膜厚或所受应力可对

其带隙进行调控^[2]、优异的机械性能等, 从而使其在紫外、可见及红外宽波段范围具有明显的光电应用潜力。然而, 近年来关于 SnTe 材料的研究仍然主要集中在对其热电性能的研究上, 有关其纳米薄膜的

收稿日期: 2023-02-08, 修回日期: 2023-07-08

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFB2203404)

Foundation item: Supported by the National Key Research and Development Program (2019YFB2203404)

作者简介 (Biography): 宋立媛 (1979—), 女, 河南镇平人, 高级工程师, 博士, 主要从事光电材料与器件研究. E-mail: bitslyy@163.com

* 通讯作者 (Corresponding authors): E-mail: scitang@163.com, wshanli@hotmail.com, qhao@bit.edu.cn

Received date: 2023-02-08, Revised date: 2023-07-08

光学特性的研究报道仍然很少,而采用椭圆偏振光谱法(spectral ellipsometry, SE)进行SnTe纳米薄膜材料光学性质的研究也鲜有报道。M. V. Kovalenko^[3]等人采用红外吸收光谱法发现SnTe纳米晶体可通过改变生长温度、反应混合物浓度等,使其纳米晶体的平均直径在4.5~15 nm内可调,相应带隙为0.8~0.38 eV,表明SnTe纳米晶体在近红外、中红外光电领域中具有很大的应用潜力。S. Norihiro和A. Sadao^[4]采用椭圆偏振光谱法研究得到了SnTe材料的折射率和消光系数等光学常数,其SnTe材料形态是采用布里奇曼法制备的单晶块体材料。R. K. Saini和R. Kumar^[5]等人采用紫外-可见-近红外(UV-Vis-NIR)吸收光谱研究了SnTe_xSe_{1-x}薄膜的光学特性,其带隙随组分x的增大而线性变小,使其适用于不同的光电器件和检测系统。

椭圆偏振光谱法是一种研究和测定物质光学性质的方法,它具有无损、高精度、无需进行测试样品的特殊制备、可以获得样品较为全面的光学性质等优点。椭圆偏振测试的基本思路为:利用菲涅尔公式(菲涅尔反射折射定律),通过研究光在样品表面反射时偏振态的变化,以得到材料的光学性质。通过测定椭圆偏振参量 Δ 和 Ψ ,并借助Kramerg-Kronig关系,从而可以获得样品的折射率(n)、消光系数(k)、介电函数的实部(ϵ_r)和虚部(ϵ_i)等光学常数;对于薄膜材料,还可以获得薄膜的厚度(d)信息。

本文采用北京创世威纳科技有限公司的磁控溅射镀膜仪器在石英衬底上制备了立方相SnTe纳米薄膜。利用椭圆偏振光谱仪,通过测量、建模拟合、结果分析以及结果验证等步骤,得出了所制备的SnTe纳米薄膜材料的膜厚、组成及折射率、消光系数等光学常数。

1 实验

1.1 溅射法制备SnTe纳米薄膜

将SnTe单靶靶材安装在射频磁控溅射腔室内,并将清洗后的石英衬底放入腔室内的样品转盘上;靶材规格为 $\Phi 60 \times 3$ mm,靶材纯度 $\geq 99.99\%$;对溅射腔室抽真空至 7×10^{-4} Pa以下,通入氩气作为溅射气体,控制氩气流量为80 sccm,控制腔室内的工作压力为4.5 Pa,进行SnTe靶材预溅射,以清洁靶材表面,预溅射时间为180 s;在不加衬底温度的条件下溅射120 s,得到原生片SnTe纳米薄膜。

1.2 SnTe纳米薄膜的性能表征

采用美国FEI公司的Tecnai G2 TF30型透射电

子显微镜(TEM, Transmission electron microscope)对SnTe纳米薄膜的晶体结构、结晶性等进行表征,并采用X射线能谱(Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)进行薄膜微区成分元素种类与含量分析。采用荷兰PAalytical B. V.公司的EMPYREA型X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)仪对薄膜进行物相分析。采用日本Hitachi公司的SPA-400型原子力显微镜对薄膜厚度进行表征。采用日本Shimadzu公司的UV-3600 Plus型紫外可见分光光度计对薄膜的光学吸收性能进行表征。

1.3 SnTe纳米薄膜的椭圆偏振光谱测试

本实验采用美国Horiba公司的UVISEL型椭圆偏振光谱仪,以150 W氙灯作为光源,入射角设置 70° ,在室温下测量SnTe纳米薄膜样品的椭圆偏振参量,并采用不同模型对其进行了拟合。 I_s 和 I_c (光强)是测量值和拟合值,其来自于被检测信号的傅里叶组成部分,并与椭圆偏振参量 Ψ 、 Δ 相关,具体如公式(1)和(2)^[6]。

$$I_s = \sin 2\psi \sin \Delta, \quad (1)$$

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

采用 χ^2 作为对实测数据拟合结果的评价函数,该函数量化了椭圆偏振测量值和用模型得到的计算值(拟合值)之间的差异,如公式(3)^[7]所示:

$$\chi^2 = \frac{1}{N + M - 1} \sum_i^N \left[\left(\frac{I_s^{\text{exp}} - I_s^{\text{cal}}}{\sigma_{I_s}} \right)^2 + \left(\frac{I_c^{\text{exp}} - I_c^{\text{cal}}}{\sigma_{I_c}} \right)^2 \right], \quad (3)$$

其中, I_s^{exp} 是实验确定的值, I_s^{cal} 是用模型得到的计算值, σ_{I_s} 为各测量值的逐点实验误差,N是数据的个数,M为未知模型参数的个数。

2 结果和讨论

2.1 SnTe纳米薄膜的结构特性、成分和厚度分析

图1(a)、(b)分别为原生片SnTe纳米薄膜的高分辨率透射电子显微镜图(HRTEM)、晶面间距测量图;在HRTEM图中,对所有出现的晶格条纹进行测量并比对面心立方结构SnTe标准PDF卡片(PDF# 46-1210, Cubic, Fm $\bar{3}$ m(225))后发现其晶面间距为0.319 nm和0.231 nm,分别归属于立方相SnTe的晶面(200)和(220);对图1(a)做快速傅里叶变换(Fast fourier transform, FFT)后得到图1(c),在FFT图中出现了该立方相更多的特征晶面,点状的衍射图样说明所制备的SnTe纳米薄膜是多晶,且没有其

他杂相出现。

图1(d)是TEM-EDS谱图,可以看出,制备得到了组分可控的SnTe纳米薄膜,其Sn:Te \approx 1:1(Atomic%),接近于其化学计量比^[8];谱图中出现的元素“C”和“Cu”的峰,是由于在测试样品制备的过程中采用了铜网碳膜做为支撑膜。

图1(e)是SnTe纳米薄膜的XRD谱图,其中, 2θ 为 21° 处为石英衬底的特征峰;其在 2θ 为 28.190° 、 40.283° 、 49.884° 、 58.278° 、 65.968° 和 73.222° 处分别出现了6个衍射峰,依次归属于SnTe面心立方结构的晶面(200)、(220)、(222)、(400)、(420)和(422),这与FFT结果相对应。结果进一步表明,制备的SnTe纳米薄膜是面心立方结构并且只有单相。

图1(f)是SnTe纳米薄膜的AFM图及厚度测量结果,在120 s的溅射时间下其厚度为21.6 nm。

2.2 SnTe纳米薄膜的光学性能分析

图2(a)是SnTe纳米薄膜的紫外-可见-近红外

(UV-Vis-NIR)吸收光谱,由图可以看出,SnTe纳米薄膜在波长为585 nm处出现了明显的吸收峰;在近红外波段,其吸光度随波长的增加而减小;在265~2000 nm较宽的波长范围内其均有较强的吸收。由于SnTe薄膜是直接带隙材料,其光学带隙可以通过以下Tauc公式^[9]进行推算:

$$\alpha(h\nu) = B(h\nu - E_g)^{1/2}, \quad (4)$$

其中, E_g 是该半导体材料的光学带隙, h 是普朗克常量, ν 是入射光的频率, B 是常数, α 是吸收系数。

图2(b)是经过线性拟合、推算出SnTe纳米薄膜的带隙,其中,图中插图是该薄膜的实物图。可以看出,溅射时间为120 s,厚度为21.6 nm的SnTe纳米薄膜其带隙为0.51 eV,该带隙大于文献报道的体晶SnTe材料的带隙(0.18 eV,300 K)^[10-11]。然而,2015年,Qian等人^[2]报道了采用第一性原理计算得出:通过改变SnTe材料的厚度,可对其带隙进行调控。

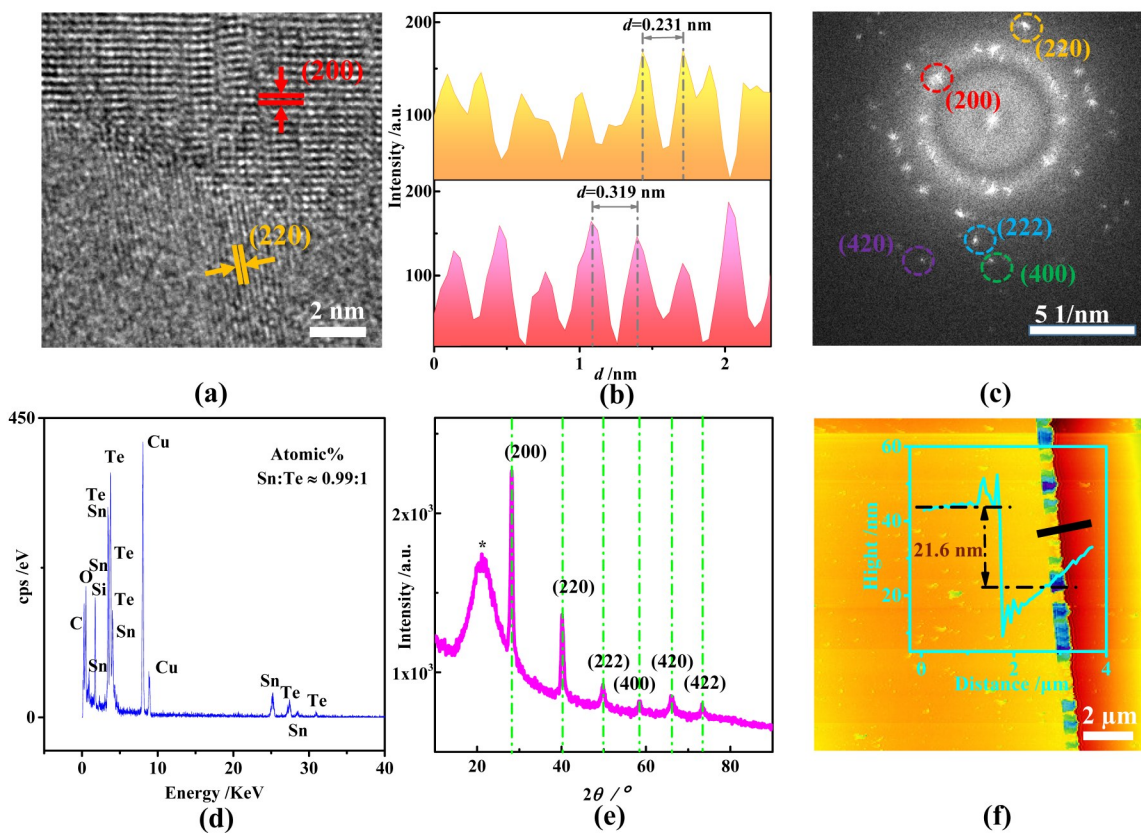


图1 SnTe纳米薄膜的结构特性、成分和厚度分析图:(a) HRTEM图;(b)晶面间距测量图;(c)FFT图;(d)EDS谱图;(e)XRD谱图;(f)AFM图及厚度测量图(插图)

Fig. 1 Structural properties, composition and thickness analysis of SnTe nanofilm; (a) High resolution TEM images of SnTe nanofilm; (b) Line profiles showing the interplanar spacings in (a); (c) Fast Fourier transform (FFT) image of the SnTe nanofilm; (d) EDS spectrum of the SnTe nanofilm; (e) XRD spectra of SnTe nanofilm; (f) AFM images on step edges of 21.6-nm thick nanofilms; Inset: Line profiles for thickness measurement

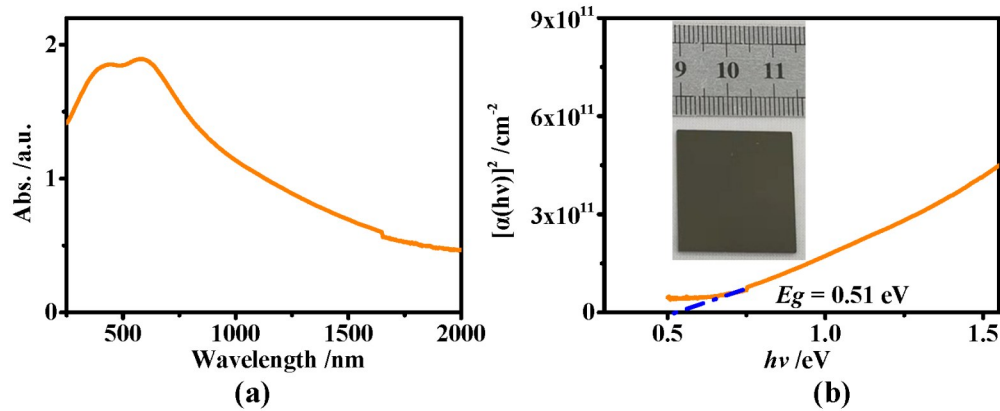


图2 SnTe纳米薄膜的吸收谱:(a) UV-Vis-NIR 吸收谱;(b)带隙拟合及(插图)薄膜实物图

Fig. 2 Absorption spectra of SnTe nanofilm: (a) UV-Vis-NIR absorption spectra of SnTe nanofilm; (b) Plot used to obtain optical band gap of the nanofilm (thickness of 21.6 nm). Inset: Picture of the SnTe nanofilm prepared on quartz substrate

2.3 SnTe 纳米薄膜的椭偏光谱测试分析

2.3.1 采用 SE 数据库中的 SnTe 材料数据列表进行拟合

SE 数据库中仅有的 SnTe 材料数据列表是来自于 S. Norihiro 和 A. Sadao^[4]于 1995 年的文献报道,其 SnTe 材料形态是布里奇曼法制备的单晶体材料。拟先采用 SE 数据库中的该体材料数据列表进行拟合,并建立两种拟合模型:采用表面层不加 Void(拟合厚度)和表面层加 Void(拟合厚度和组分),具体模型结构如图 3(a)所示。

图 3(b)是在 1~5 eV 范围内,分别用模型结构(i)(表面层不加 Void)和模型结构(ii)(表面层加 Void)对石英衬底上溅射 120 s 的 SnTe 纳米薄膜样品进行 n, k 拟合。采用图 3(b)模型结构(i),拟合得到 SnTe 纳米薄膜的厚度为 35.8 nm, χ^2 为 17;而采用模型结构(ii),其拟合结果是: χ^2 明显变小为 1.04(理论上认为 $\chi^2 < 10$ 则拟合结果合理),说明采用表面层加 Void 的模型结构进行拟合更为合理;拟合得膜厚为 29.8 nm,采用 AFM 台阶厚度的方式测得的厚度(21.6 nm)来验证,结果较吻合;拟合得表面层 SnTe 的含量为 $88.94 \pm 0.19\%$ 。图 3(b)模型结构(ii)中,在 1~5 eV 范围内,SnTe 纳米薄膜的折射率(n)拟合值为 0.89~8.09,消光系数拟合值(k)为 1.54~5.28。

图 3(c)-(f)是 SnTe 纳米薄膜采用模型结构(ii)进行各光学常数拟合的结果。图 3(c)是椭偏参量 Ψ, Δ 的测量值和拟合值;图 3(d)是光强 I_s 和 I_c 的测量值和拟合值,测试光谱与拟合光谱较吻合。复数介电常数的实部 $\varepsilon_1(E)$ 和虚部 $\varepsilon_2(E)$ 的测量值和拟合值如图 3(f)所示, $\varepsilon_1(E)$ 随光子能量的增大逐渐

降低,至 2.0 eV 时又缓慢增大; $\varepsilon_2(E)$ 随光子能量为 5 eV(即波长 248 nm)时的 2.7 缓慢上升至 2.25 eV(即波长 564 nm)附近的 22,然后随光子能量的减小迅速上升至 1.38 eV(900 nm)时的 66,表明在该可见、近红外波段范围 SnTe 纳米薄膜对光子有强的吸收。依据复折射率与介电常数之间的关系: $\varepsilon(E) = N^2(E)$,可得 1~5 eV 范围内的折射率和消光系数, $n(E)$ 和 $k(E)$ 谱形分别与 $\varepsilon_1(E)$ 和 $\varepsilon_2(E)$ 的类似。图 3(e)是 $n(E), k(E)$ 的测量值和拟合值,图中 $n(E)$ 在光子能量为 2.5 eV 出现弱的色散峰,~2.5 eV 光子能量对应于带间临界点 E_3 ^[4]; $k(E)$ 光谱在光子能量为 1.73 eV 出现色散峰,~1.73 eV 光子能量对应于 E_2 临界点^[4];在 E_2 和 E_3 临界点处呈现不同的电子能带结构, E_2 能量(~1.73 eV)可能对应于带内跃迁: $\Sigma_5(7) - \Sigma_5(5)$ ^[12] 或 $\Delta_6(5) - \Sigma_6(6)$ ^[11], E_3 能量(~2.5 eV)可能对应于带内跃迁: $\Sigma_5(6) - \Sigma_5(4)$ ^[10] 或 $\Sigma_5(4) - \Sigma_5(7)$ ^[13],由于能带结构计算的偏差^[14],不同文献报道的能带结构计算结果不太相同。

在图 3(e)中,取 SnTe 纳米薄膜在 k 峰值(4.23)时其光子能量(1.73 eV)对应的 n 拟合值,可以看出,在其 k 峰值(即 716 nm 的可见光波段)附近,可以观察到高折射率值(4.44),这意味着具有此厚度的 SnTe 纳米薄膜在光子学和光电子学中具有很多潜在应用,例如,在光电领域可作为良好的防反射涂层^[15]、作为增强光伏电池响应的光学封装材料^[16]等。

采用 SE 数据库中的 SnTe 材料数据列表进行拟合,通过表面层加 Void 的拟合尝试,初步获得了较好的拟合结果, χ^2 较小,并且其膜层厚度信息用 AFM 表征手段可以得到较好的验证。然而,通过 SE

数据库中 SnTe 材料数据列表进行拟合是基于单一材料和结构(文献报道的布里奇曼法制备的单晶体材料^[4])进行拟合,适用性较低。而采用模型计算进行拟合,适用性强,因此,进一步,采用 Tauc-Laurents 模型进行拟合尝试。

2.3.2 采用 Tauc-Laurents 模型进行拟合

采用经典 Tauc-Laurents 振荡模型进行 SnTe 纳米薄膜的拟合。已有文献报道采用此模型进行 SnS₂^[17]、PtS₂^[18] 等纳米薄膜材料建模。Tauc-Laurents 公式如下:

$$\varepsilon_2 = \begin{cases} \frac{AE_0C(E - E_g)^2}{[(E^2 - E_0^2 + C^2E^2)] \cdot E} & \text{for } E > E_g \\ 0 & \text{for } E < E_g \end{cases}, \quad (5)$$

其中, E 是光子能量, A 是振子强度, C 是振子宽度, E_g 为光学带隙, E_0 为振子中心能, 介电函数的实部 ε_1 是利用 Kramers-Kronig 积分由虚部 ε_2 获得, 结合 ε^∞ 来解释高能电子跃迁。

采用石英衬底及其上的 SnTe 两层模型结构进行椭圆拟合分析。使用 Tauc-Laurents 模型对 SnTe

纳米薄膜样品进行拟合, 初步尝试的拟合方法是: 采用拟合厚度、拟合 Tauc-Laurents 模型中所有 9 个参数, 拟合结果均得到了很小的 χ^2 为 0.068; 然而, 拟合得到的膜厚 (36.2 ± 4.5 nm) 和 E_g (0.158 ± 0.636 eV) 均为一个较宽的范围值, 数值区间有些宽泛, 采用其他表征进行印证时, 不易进行比对。

考虑到厚度和光学常数的高相关性, 在 Tauc-Laurents 模型下, 采用上述拟合方式可能会导致不正确的厚度和光学常数结果^[18]。

在前述采用 SE 数据库中 SnTe 进行拟合分析、参比其他纳米材料文献的基础之上, 采用不拟合厚度和带隙 (SnTe 薄膜用 AFM 测定其厚度、用 UV-Vis-NIR 吸收光谱结合 Tauc 公式推算其带隙)、对 Tauc-Laurents 模型中其他 7 个参数进行拟合。图 4 (a) 和 (b) 是 SnTe 纳米薄膜在不同光子能量 (1.6 ~ 6.0 eV) 下的折射率和消光系数的椭圆偏测量值和拟合值, 结果显示, 测试光谱与拟合光谱很吻合; 其中, 在 1.6 ~ 6.0 eV 范围内 n, k 均随光子能量的增大而减小; 在此光子能量范围内, SnTe 纳米薄膜的折射率 (n) 拟合值为 0.83 ~ 6.96, 消光系数拟合值 (k) 为 1.18 ~ 5.20。

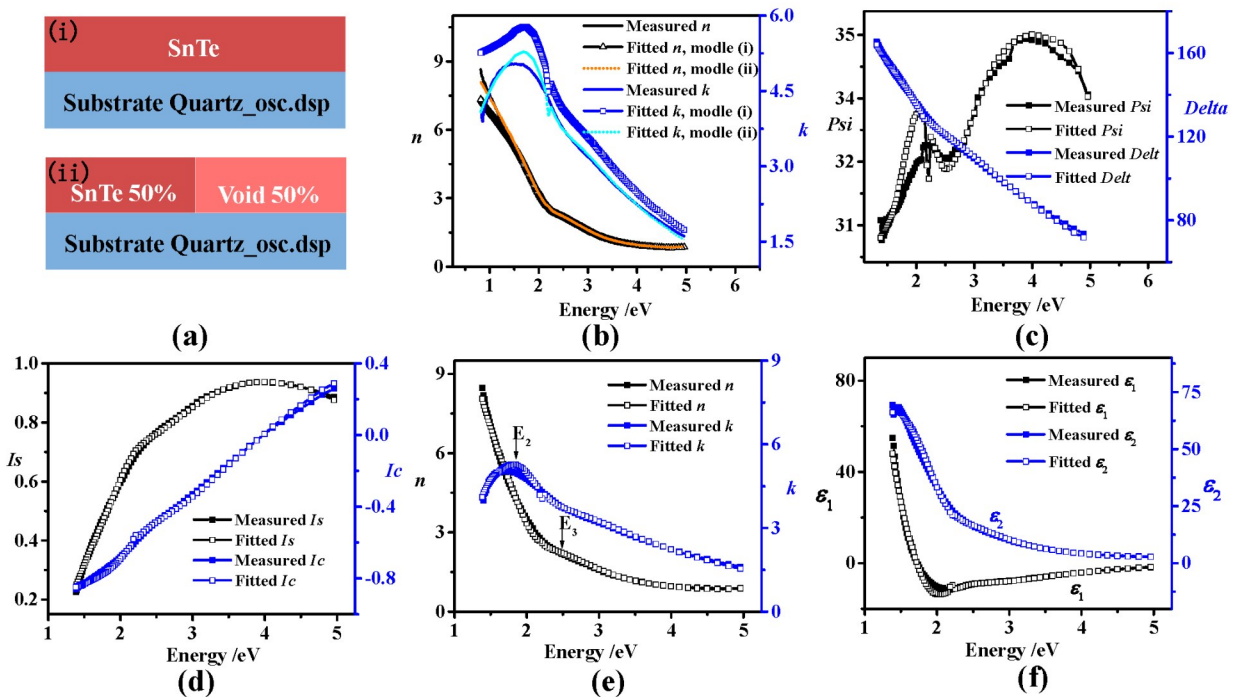


图3 SnTe纳米薄膜椭圆模型结构及各光学常数的测试值和拟合值:(a)椭圆模型结构(i)和(ii);(b) n, k 测量值和分别采用模型(i)和(ii)的拟合值;(c)-(f)各光学常数的测试值和采用模型(ii)的拟合值

Fig. 3 Fitting models used for SnTe nanofilm on quartz substrate and the measured values of each optical constant and fitted values: (a) modeled structure (i) and (ii); (b) n and k measured and fitted values using models (i) and (ii) respectively; (c)-(f) The measured values of each optical constant and fitted values using model (ii)

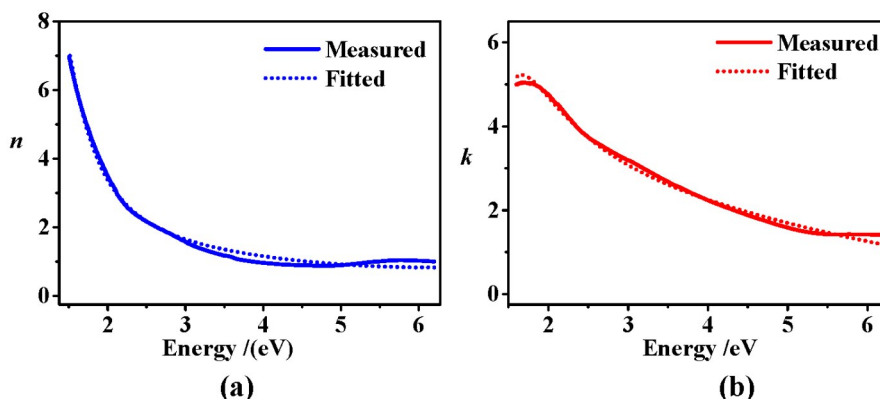


图4 SnTe纳米薄膜光学常数的测试值和拟合值:(a)折射率 $n(E)$ 谱的测试值和拟合值;(b)消光系数 $k(E)$ 谱的测试值和拟合值

Fig. 4 Measured and fitted values of the optical constants of SnTe nanofilm:(a) The measured and fitted values of (a) refractive index $n(E)$ spectrum;(b) The measured and fitted values of extinction coefficient $k(E)$ spectrum

石英衬底上 SnTe 纳米薄膜样品采用经典 Tauc-Laurents 模型的拟合参数如表 1 所示。

表 1 SnTe 纳米薄膜 Tauc-Laurents 模型拟合参数

Table 1 Fitted parameters of Tauc-Laurents model for SnTe nanofilm

样品	ε_{∞}	A_1	E_{01}	C_1	A_2	E_{02}	C_2	χ^2
SnTe	1.67	122.93	1.41	0.86	420.87	10.12	518.07	3.76

3 结论

采用磁控溅射法制备得到了面心立方相 SnTe 纳米薄膜;采用椭圆偏振光谱法,建立不同的模型结构拟合得出了该薄膜的膜厚、组成及折射率、消光系数等光学常数;相较于文献报道的仅有关于 SnTe 单晶块体材料的椭圆偏振分析,首次提供了 SnTe 纳米薄膜材料的椭圆偏振光谱分析数据。采用 SE 数据库中的 SnTe 材料数据列表对 SnTe 纳米薄膜进行拟合,通过建立的模型结构(ii)即表面层加 Void 进行拟合,在消光系数 k 峰值(即 716 nm 的可见光波段)附近,可以观察到高折射率 n 值(4.44)。采用 Tauc-Laurents 振荡模型进行拟合,得到的 SnTe 纳米薄膜的光学常数的测量值和拟合值,很吻合;其中,在 1.6 ~ 6.0 eV 范围内 n 、 k 均随光子能量的增大而减小;其折射率(n)拟合值为 0.83 ~ 6.96,消光系数拟合值(k)为 1.18 ~ 5.20。结果显示,具有该厚度的 SnTe 纳米薄膜材料在可见光波段具有较高的折射率、在可见到近红外具有较宽的光谱吸收,表明该纳米薄膜可作为功能层材料在光电领域有潜在应用。

References

- [1] Taskin A A, Yang F, Sasaki S, *et al.* Topological Surface Transport in Epitaxial SnTe Thin Films Grown on Bi₂Te₃ [J]. *Physical Review B*, 2014, **89**(92): 121302.
- [2] Qian X, Fu L, Li J. Topological Crystalline Insulator Nanomembrane with Strain-Tunable Band Gap [J]. *Nano Research*, 2015, **8**: 967-979.
- [3] Kovalenko M V, Heiss W, Shevchenko E V, *et al.* SnTe nanocrystals: a new example of narrow-gap semiconductor quantum dots [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2007, **38**(50):11354-11355.
- [4] Norihiro S, Sadao A. Optical Properties of SnTe [J]. *Japanese journal of applied physics*, 1995, **34**(11): 5977-5983.
- [5] Saini R K, Kumar R, Jain G. Optical studies of SnTe_xSe_{1-x} sintered films [J]. *Optical Materials*, 2009, **32**(2) 297-301.
- [6] Shim Y, Okada W, Mamedov N. Incoherent ellipsometry below energy gap of TlInS₂ [J]. *Thin Solid Films*, 2006, **509**(1-2): 137-140.
- [7] Ho C H, Chen Y J, Jhou H W, *et al.* Optical anisotropy of ZnO nanocrystals on sapphire by thermoreflectance spectroscopy [J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(18): 2765-2767.
- [8] Haque A, Banik A, Varma R M, *et al.* Understanding the Chemical Nature of the Buried Nanostructures in Low Thermal Conductive Sb-Doped SnTe by Variable Energy Photoelectron Spectroscopy [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2019, **123**(16): 10272-10279.
- [9] Tauc J, Mentha A. States in the gap [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1972, **8**: 569-585.
- [10] Salavati N M, Bazarganipour M, Davar F, *et al.* Simple routes to synthesis and characterization of nanosized tin telluride compounds [J]. *Applied Surface Science*, 2010, **257**(3): 781-785.
- [11] Kobayashi K. Electronic states of SnTe and PbTe (001) monolayers with supports [J]. *Surface Science A Journal Devoted to the Physics & Chemistry of Interfaces*, 2015, **639**: 54-65.
- [12] Tung Y W, Cohen M L. Relativistic Band Structure and Electronic Properties of SnTe, GeTe, and PbTe [J]. *Phys-*

- ical Review*, 1969, **180**(3): 823–826.
- [13] Melvin J S, Hendry D C. Self-consistent relativistic energy bands for tin telluride [J]. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 1979, **12**(15): 3003–3012.
- [14] Suzuki N, Adachi S. Optical constants of $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ alloys [J]. *Journal of Applied Physics*, 1996, **79**(4): 2065–2069.
- [15] Bouhafs D, Moussi A, Chikouche, *et al.* Design and simulation of antireflection coating systems for optoelectronic devices: application to silicon solar cells [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1998, **52**(1–2): 79–93.
- [16] Ming M, Mont F W, Poxson D J, *et al.* Enhancement of photovoltaic cell response due to high-refractive-index encapsulants [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, **108**(4): 406.
- [17] Ermolaev G A, Voronin K V, Tatmyshevskiy M K, *et al.* Broadband Optical Constants and Nonlinear Properties of SnS_2 and SnSe_2 [J]. *Nanomaterials*, 2022, **12**(1).
- [18] Ermolaev G A, Voronin K V, Tatmyshevskiy M K, *et al.* Broadband Optical Properties of Atomically Thin PtS_2 and PtSe_2 [J]. *Nanomaterials*, 2021, **11**(12).