DOI：10.19789/j.1004-9398.2025.01.004
文献引用：郭进，王海，刘颖．三碲化铬纳米颗粒中的法诺共振现象[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2025，46（1）：26-31. GUO J，WANG H，LIU Y. Fano resonance phenomenon in chromic telluride nanoparticles [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)，2025，46(1)：26-31.

三碲化铬纳米颗粒中的法诺共振现象

郭　进[1]，王　海[1]，刘　颖[2*]

（1.首都师范大学物理系，北京　100048；2.北京师范大学化学学院，北京　100088）

摘要：二维磁性材料在自旋电子学的应用以及数据存储方面具有强大潜力，而反铁磁材料更是在光电领域应用广泛。本文采用化学气相沉积方法制备出反铁磁材料三碲化铬（$CrTe_3$）的纳米结构，并通过X射线以及拉曼光谱进行了表征。在910 ℃的温度下沉积出密度较大、颗粒均匀的样品。通过红外反射光谱发现其存在法诺共振现象。在$CrTe_3$的纳米结构中，法诺共振现象中的不对称线型是由具有颗粒化的离散态与平整表面的连续态之间的耦合产生的。通过对不同形貌样品进行测试，分析其法诺线型，显示该特征不随其形貌的改变而发生变化，说明法诺共振现象为$CrTe_3$纳米结构的内禀特性。

关键词：化学气相沉积；反铁磁材料；$CrTe_3$；红外反射；法诺共振
中图分类号：O469　　**文献标志码**：A

Fano resonance phenomenon in chromic telluride nanoparticles

GUO Jin[1]，WANG Hai[1]，LIU Ying[2*]

（1. Department of Physics，Capital Normal University，Beijing　100048；
2. College of Chemistry，Beijing Normal University，Beijing　100088）

Abstract：Two dimensional magnetic materials have great potential for the application of spintronics and data storage，while antiferromagnetic materials are widely used in the field of optoelectronics. In this paper，the nanostructure of antiferromagnetic material $CrTe_3$ was prepared by chemicalvapor deposition and characterized by X-ray and Raman spectroscopy. At the most suitable temperature of 910 ℃，the samples with high density and uniform particles were deposited. Fano resonance phenomenon was found by infrared reflection spectrum. In the nanostructure of $CrTe_3$，the asymmetry linearity in the Fano resonance phenomenon is generated by the coupling between the discrete state with granulation and the continuous state on the flat surface. By testing samples with different morphologies and analyzing their Fano linearity，it is shown that the characteristic does not change with the change of morphology，indicating that the Fano resonance phenomenon is an intrinsic characteristic of $CrTe_3$ nanostructures.

Keywords：Chemical vapor deposition；antiferromagnetic material；$CrTe_3$；infrared reflection；Fano resonance
CLC：O469　　**DC**：A

收稿日期：2023-01-19

*通信作者：11112017013@bnu.edu.cn

0　引　言

法诺共振现象是原子系统中连续激发态和离散激发态能级发生重叠,使其在特定的光频段出现零吸收的现象,其光谱呈现出非对称线型[1]。2010年前后,科研人员在二维材料系统[2]、纳米系统[3]和超材料系统[4-5]中发现了不对称的光谱线型。其中:利用红外吸收光谱在几层石墨烯的非对称特征显示了声子与带间电子跃迁之间的耦合[6];在独立的纳米颗粒和平面结构中,非对称线型的来源为等离子体之间的共振[7]。这些不同的来源为了解法诺共振的机制提供了重要参考。而同样作为二维层状材料的三碲化铬($CrTe_3$),是铬碲系统中独特的分支[8-9],与CrTe[10-11]、$CrTe_2$[12]和Cr_2Te_3[13]类似,其结构均为层状结构,且层与层之间由弱的范德华力相连,层内由强的共价键相连。铬碲化合物有2种磁性构型,分别为铁磁系统[14-15]和反铁磁系统[16],与其他铬碲化物不同的是,$CrTe_3$是唯一的反铁磁半导体,具有0.35 eV的带隙[17-18],这对于半导体器件的结合具有广阔的应用前景[19]。因此,$CrTe_3$中额外出现的法诺共振现象增加了其可利用性。纳米结构中的法诺共振现象在非线性、增强透射、光学开关与调制等方面具有重要应用,因而引起了科研工作者的广泛兴趣。

本文研究了通过化学气相沉积[20]方法生长出的$CrTe_3$纳米结构,首次发现了$CrTe_3$在红外波段存在法诺共振现象,说明$CrTe_3$在近红外波段处具有光学灵敏性,并且指出法诺共振现象是$CrTe_3$材料本身的特性。这对于研究纳米结构$CrTe_3$在光学中的应用有一定的促进作用。

1　实验制备

$CrTe_3$晶体结构如图1所示,该图是沿*bc*方向有一定倾角的俯视图,其中黄色为Te原子。$CrTe_3$是单斜晶系结构,空间群为P2/m,每个晶胞由相邻的4个Cr原子组成Cr_4的四聚体,以四聚体的形式向外扩展,Cr原子之间通过Te原子的边共享八面体结合。$CrTe_3$的层间为弱的范德华力,层内为强的共价键,形成Te-Cr-Te的三明治结构[21-22]。

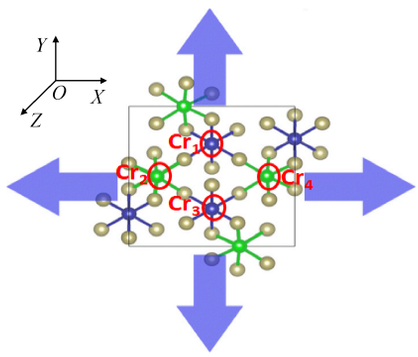


图1　$CrTe_3$晶体结构

化学气相沉积法[23-24]制备$CrTe_3$纳米结构如图2所示。其中Te(购自西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司)和$CrCl_2$(购自阿法埃莎(中国)化学有限公司)粉末分别提供Te和Cr源,放置在石英舟中,反应基底为SiO_2/Si。管的左端为进气口,连接有气瓶,气瓶中有H_2和Ar的混合气体,H_2体积混合百分比为10%,右端为出气口,载气由进气口进入管内,携带加热后的反应物质蒸汽到达基底表面,在合适的条件下发生化学反应,反应完成后,产物停留在基底表面,副产物随载气在出气口排出。为了使管内温度不散失,管的两端放置了隔热塞,隔热塞的直径与管内直径相同。

2　表征与讨论

本实验选择在源区温度为910 ℃,气体流速为150 mL/min制备的$CrTe_3$样品(记为A_1)进行表征,如图3所示。图3(a)是X射线衍射(X-ray diffraction,XRD)图,显示有4个衍射峰与$CrTe_3$的标准卡片(PDF#49-1503)相对应,其中(−3 0 1)位置处为最强振动峰,其余(2 3 0)、(4 4 0)和(6 1 0)峰位处均与之对应,为了更清晰地看到样品的峰位,将衬底峰设为断点,结果表明该样品是晶格结构为P2/m的

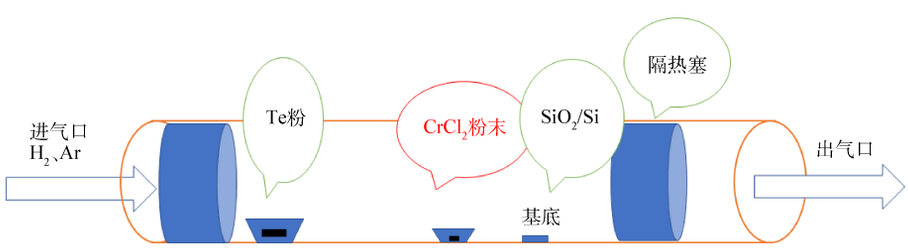
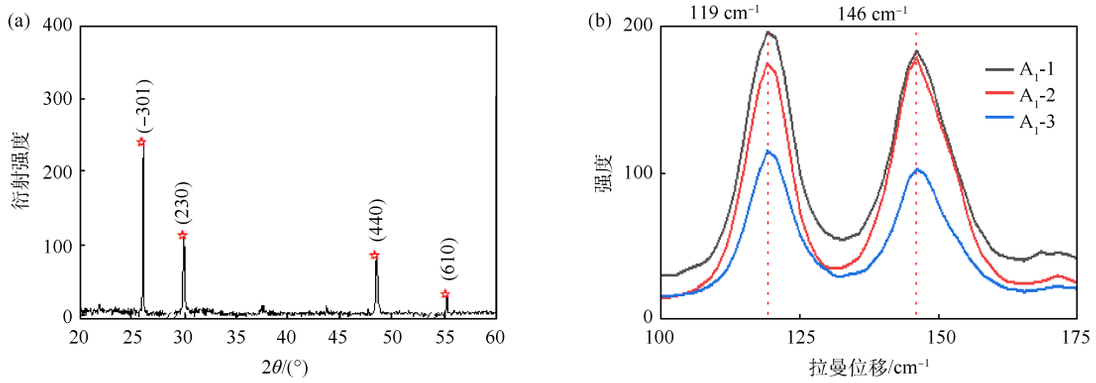


图2　$CrTe_3$化学气相沉积法制备示意



注:A_1-1、A_1-2和A_1-3表示样品A_1的3个不同位置。

图3　样品A_1的表征

(a)X射线衍射(XRD);(b)3个不同位置的拉曼光谱

$CrTe_3$。图3(b)是$CrTe_3$在100~175 cm^{-1}的拉曼光谱。为了验证制备样品的均匀性,本文选取了样品的任意3个不同位置进行测量,记为A_1-1、A_1-2和A_1-3,明显可知在119和146 cm^{-1}处2个拉曼振动峰,峰位基本一致,表明制备的样品具有很好的均匀性。由于在文献中缺乏相关的报道,通过比较$CrTe_2$中的拉曼光谱[25],推测这2个峰位很可能属于$CrTe_3$纳米颗粒的拉曼振动峰,这还需要进一步的实验验证。

样品A_1的原子力显微镜(atomic force microscope,AFM)相貌如图4所示。可以清晰地看到纳米结构$CrTe_3$的颗粒状形貌,单个颗粒大小为1 μm,呈聚集状态。小颗粒的聚集可能是由于基底的温度高,反应物在基底表面反应时,形核点增多;也可能是由于气体流速过大,使得反应物在反应区的停留时间变短,从而沉积过程变短,形成小颗粒,小颗粒之间发生了融并现象。图4(b)为A_1的三维形貌图,选取的范围为10.0 μm×10.0 μm,样品最大高度为500.5 nm,图中更为明显地看到$CrTe_3$纳米颗粒的堆积。

为了探究$CrTe_3$的光学特性,对样品A_1在600~4 000 cm^{-1}进行了红外反射光谱测试,$CrTe_3$红外反射光谱如图5所示。5(a)为波数在750~2 000 cm^{-1}处的红外反射光谱测试结果。在近红外波段1 000~1 150 cm^{-1},相对于在SiO_2/Si基底上的红外光谱强度,峰强先是剧烈下降,之后突然升高,显现出不对称线型。图5(b)重点展示了$CrTe_3$样品在1 005~1 250 cm^{-1}波段的光谱,红外光谱显现出明显的不对称线性,这种现象与在少层石墨烯声子红外光谱中的谱线型相似,是一种法诺共振现象,可应用于红外光学探测器的研究。在$CrTe_3$纳米材料中法诺共振现象的发现,表明该材料具有在反射率传感器应

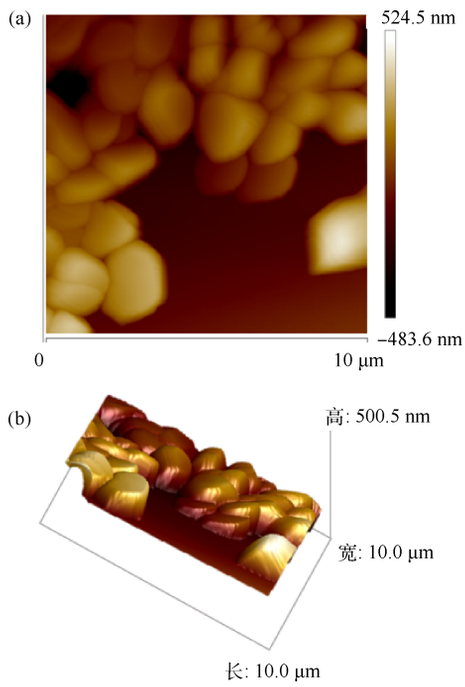


图4　样品A_1的原子力显微镜相貌

(a)二维平面;(b)三维立体

用方面的潜力。

在1 000~1 150 cm^{-1}波段范围内的法诺共振现象更加明显,在1 150~1250 cm^{-1}的法诺共振现象信号相对较弱。利用公式拟合的方法,对较明显的法诺共振进行拟合,其公式的唯象表达式为[26]

$$\sigma = (\varepsilon + q)^2/(1 + \varepsilon^2), \tag{1}$$

式中:σ为2束光散射总截面的形状,通过一系列的参数来调节;ε为共振能量的峰宽;q为法诺参数,用来描述线型的非对称程度。根据实验情况,将该唯象公式改写为

$$\sigma = S\left[\frac{2(E-A)}{\Gamma} + q\right]^2 \Big/ \left\{1 + \left[\frac{2(E-A)}{\Gamma}\right]^2\right\}, \tag{2}$$

式中:E表示对应横坐标的波数;q是唯象模型的参数,控制不对称线型的程度,可以随着法诺共振能量的变化而被调谐;参数A是与$CrTe_3$纳米颗粒的平均粒径Ψ有关的函数,随样品平均粒径的变化而变化;参数S定义为入射光的强度,恒为正,该参量可以在一定范围内进行微调;参数Γ为法诺共振强度谱线的半峰宽,半峰宽的变化表明样品的法诺共振与不对称参数q有关。

法诺共振现象拟合结果如图 5(c)所示。其中A=1 075,入射光的能量$S=5\times10^{-4}$,经过观察与对比,得出法诺共振的半峰宽Γ=85,法诺参数q可以随着法诺共振能量的变化不断调谐,此时q=0.3。法诺公式很好地拟合了实验数据,进一步表明$CrTe_3$在特定红外波段具有法诺共振现象。

材料的边缘缺陷在很大程度上影响法诺共振现象,在 Ag 纳米微盘中,银盘的缺陷程度越大,法诺共振现象越明显,共振强度之间的差值越大。而在狄拉克半金属Cd_3As_2纳米线中[27],法诺共振现象则来源于其离散的表面态与连续体态之间的干涉。

为了进一步研究$CeTe_3$中法诺共振现象的来源,本文对温度为 910 ℃、气体流速 150 mL/min,温度为 980 ℃、气体流速 150 mL/min 和温度为 980 ℃、气体流速 80 mL/min 的 3 种不同生长条件的样品进行红外反射光谱的测试,探究在$CrTe_3$中形貌对法诺共振产生的影响。$CrTe_3$不同生长条件下光学显微镜的形貌如图 6 所示。3 种不同生长条件的样品形貌包括密集颗粒状、规则颗粒状以及二维平铺类型,其中密集颗粒状密度最大,规则颗粒直径约为 5 μm,如此大的变化原因是基底温度的升高,反应物的反应过程更加充分,但是密度却减小。而二维平铺型中,沉积样品大小可以达到 3 μm,是因为流速降低之后,反应物在基底表面停留的时间变长,使得化学反应的过程更加缓慢,同时表明生长模式的改变影响了沉积物的形貌大小。

$CrTe_3$ 样品 3 种不同沉积形貌样品红外反射光谱如图 7 所示。3 种样品均存在法诺共振谱,共振峰的位置均在 1 000~1 200 cm^{-1},这说明$CrTe_3$中的法诺共振现象与其生长模式及样品形貌可能无关,是材料本身的特性,黑色谱线为SiO_2/Si 的红外反射谱。由于本身的颗粒化结构,在探测时就会出现离散态,法诺共振的来源可能是较大颗粒的离散态与平整表面形成的连续态之间的耦合,这一发现为$CrTe_3$红外部分的研究提供了可能性。图 7(b)为基底与 3 种不同生长条件下$CrTe_3$的红外反射光谱图,3 种样品的红外反射谱中,在某一波数下,材料的反射率都能到达 0,但是强度有所不同,法诺现象之外

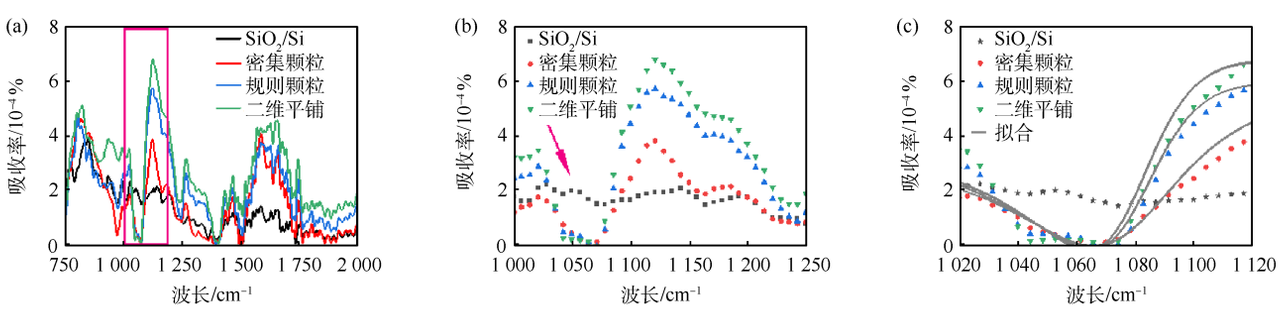


图 5　$CrTe_3$红外反射光谱

(a)近红外波段的红外反射谱;(b)法诺共振现象;(c)法诺共振现象拟合

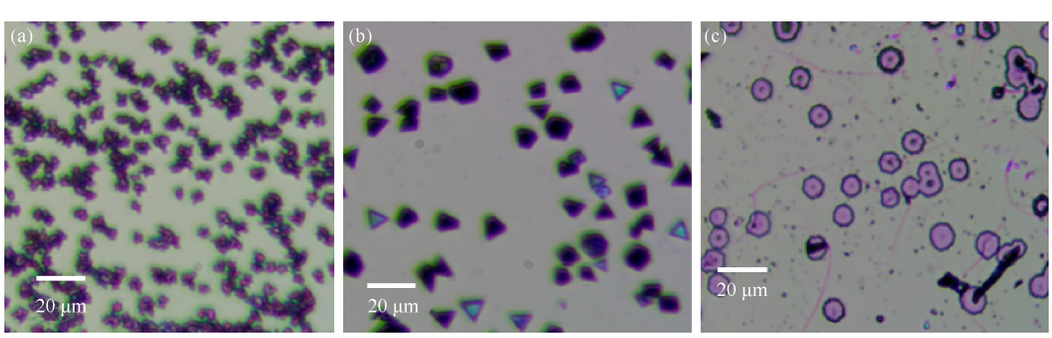


图 6　$CrTe_3$不同生长条件下光学显微镜的形貌

(a)温度 910 ℃、气体流速 150 mL/min;(b)温度 980 ℃、气体流速 150 mL/min;(c)温度 980 ℃、气体流速 80 mL/min

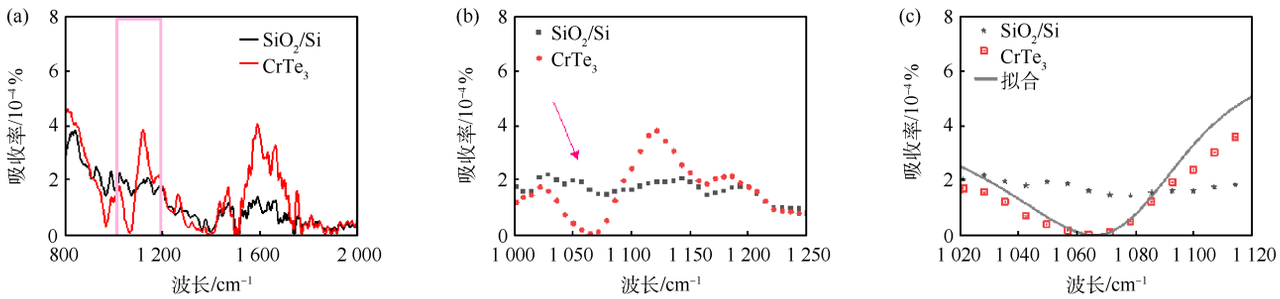


图7　$CrTe_3$样品3种不同沉积形貌样品红外反射光谱

(a)近红外反射光谱;(b)红外反射中的法诺共振现象;(c)法诺共振拟合

的反射光谱与基底的光谱趋势一致。继续对3种法诺共振光谱现象进行数据拟合,结果如图7(c)所示。通过拟合数据可知,反射光谱中的不对称线形与法诺公式具有相同的线形,表明样品的形貌和尺寸等只影响法诺共振峰的强度。$CrTe_3$在近红外波段的法诺共振现象为固有的光学现象,也表明生长条件对法诺共振没有影响。

3　结束语

本工作在SiO_2/Si基底上首次成功利用化学气相沉积法制备出了颗粒化的$CrTe_3$纳米结构,通过实验中改变基底温度以及载气流速,探究了不同制备条件下的沉积形貌的差别,温度过高会使颗粒化密度变小。在近红外1 000~1 150 cm^{-1},具有法诺共振现象,在波长为1 080 cm^{-1}处,具有零反射现象。本研究对$CrTe_3$的生长具有一定的指导作用,并对其红外范围内的应用提供机会,有利于提高光响应器件的性能。

参 考 文 献

[1] 靳悦荣.金属纳米颗粒有序阵列中Fano共振的产生条件[D].南京:南京大学,2013.

[2] KUZMENKO A B, BENFATTO L, CAPPELLUTI E, et al. Gate tunable infrared phonon anomalies in bilayer graphene[J]. Physical Review Letters, 2009, 103(11): 116804.

[3] FANG Z Y, CAI J Y, YAN Z B, et al. Removing a wedge from a metallic nanodisk reveals a Fano resonance [J]. Nano Letters, 2011, 11(10): 4475.

[4] SINGH R, AL-NAIB I A I, KOCH M, et al. Sharp Fano resonances in THz metamaterials[J]. Optics Express, 2011, 19(7): 6312.

[5] GALLINET B, MARTIN O J F. Ab initio theory of Fano resonances in plasmonic nanostructures and metamaterials[J]. Physical Review B, 2011, 83(23): 235427.

[6] LI Z Q, LUI C H, CAPPELLUTI E, et al. Structure-dependent Fano resonances in the infrared spectra of phonons in few-layer graphene[J]. Physical Review Letters, 2012, 108(15): 156801.

[7] 李石磊.基于表面等离激元的法诺共振及其在信息领域的应用[D].北京:北京邮电大学,2018.

[8] CANADELL E, JOBIC S, BREC R, et al. Electronic structure and properties of anionic mixed valence and layered $CrTe_3$: the question of extended tellurium bonding in transition metal tellurides[J]. Journal of Solid State Chemistry, 1992, 98(1): 59-70.

[9] KLEPP K O, IPSER H. $CrTe_3$: a novel transition-metal polytelluride [J]. Angewandte Chemie International Edition, 1982, 21(12): 911.

[10] SUN S, LIANG J, LIU R, et al. Anisotropic magnetoresistance in room temperature ferromagnetic single crystal CrTe flake[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 890: 161818.

[11] WANG M S, KANG L X, SU J W. Two-dimensional ferromagnetism in CrTe flakes down to atomically thin layers[J]. Nanoscale, 2020, 12(31): 16427-16432.

[12] HUANG M, WANG S S, WANG Z H, et al. Colossal anomalous Hall effect in ferromagnetic van der Waals $CrTe_2$[J]. ACS Nano, 15(6): 9759-9763.

[13] BIAN M Y, KAMENSKII A N, HAN M J, et al. Covalent 2D Cr_2Te_3 ferromagnet [J]. Materials Research Letters, 2021, 9(5): 205-212.

[14] PURBAWATI A, CORAUX J, VOGEL J, et al. In-plane magnetic domains and Néel-like domain walls in thin flakes of the room temperature $CrTe_2$ van der Waals ferromagnet [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2020, 12(27): 30702.

[15] SETHULAKSHMI N, MISHRA A, AJAYAN P M, et al. Magnetism in two-dimensional materials beyond graphene[J]. Materials Today, 2019, 27: 107-122.

[16] HANSEN A L, BASTIAN D, MARTIN E, et al. Temperature-dependent synchrotron X-ray diffraction,

pair distribution function and susceptibility study on the layered compound $CrTe_3$ [J]. Zeitschrift fur Kristallographie Crystalline Materials,2018,233(6):361-370.

[17] MCGUIRE M A,GARLEA V O,SANTOSH K C,et al. Antiferromagnetism in the van der Waals layered spin-lozenge semiconductor $CrTe_3$[J]. Physical Review B,2017,95(14):144421.

[18] LU Z W,QIU S B,XIE W Q,et al. Theoretical study of strain induced magnetic transition of single-layer $CrTe_3$ [J]. Journal of Applied Physics,2020,127(3):033903.

[19] LI R,NIE J H,XIAN J J,et al. Planar heterojunction of ultrathin $CrTe_3$ and $CrTe_2$ van der Waals magnet[J]. ACS Nano,2022,16(3):4348-4356.

[20] JIANG J,LI N,ZOU J,et al. Synergistic additive-mediated CVD growth and chemical modification of 2D materials[J]. Chemical Society Reviews,2019,48(17):4639-4654.

[21] LU Z W,QIU S B,XIE W Q,et al. Theoretical study of strain induced magnetic transition of single-layer $CrTe_3$ [J]. Journal of Applied Physics,2020,127(3):033903.

[22] FREITAS D C,WEHT R,SULPICE A,et al. Ferromagnetism in layered metastable 1T-$CrTe_2$ [J]. Journal of Physics Condensed Matter,2015,27(17):176002.

[23] SENTHILKUMAR V,LE C T,YONG S K,et al. Direct vapor phase growth process and robust photoluminescence properties of large area MoS_2 layers [J]. Nano Research,2014,7(12):1759-1768.

[24] REINA A,JIA X T,HO J,et al. Large area,few-layer graphene films on arbitrary substrates by chemical vapor deposition[J]. Nano Letters,2009,9(1):30.

[25] MENG L J,ZHOU Z,XU M Q,et al. Anomalous thickness dependence of Curie temperature in air-stable two-dimensional ferromagnetic 1T-$CrTe_2$ grown by chemical vapor deposition[J]. Nature Communications,2021,12(1):809.

[26] FANO U. Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts[J]. Physical Review,1961,124(6):1866-1878.

[27] WANG S,LIN B C,ZHENG W Z,et al. Fano interference between bulk and surface states of a Dirac semimetal Cd_3As_2 nanowire[J]. Physical Review Letters,2018,120(25):257701.

(责任编辑:兰丽丽)

(上接第25页)

[11] ERDEN S. Companions of perturbed type inequalities for higher-order differentiable functions[J]. Cumhuriyet Science Journal,2019,40(4):819-829.

[12] ERDEN S. Perturbed companions of Ostrowski type inequalities for *n*-times differentiable functions and applications[J]. Проблемы Анализа,2020,9(2):45-57.

[13] AMJAD J,QAYYUM A,FAHAD S,et al. Some new generalized Ostrowski type inequalities with new error bounds[J]. Innovative Journal of Mathematics,2022,1(2):30-43.

[14] CERONE P. A new Ostrowski type inequality involving integral means over end intervals[J]. Tamkang Journal of Mathematics,2002,33(2):109-118.

[15] QAYYUMA A,FAYE I,SHOAIBC M. Improvement of Ostrowski integral type inequalities with application[J]. Filomat,2015,30(6):1441-1456.

[16] QAYYUM A,SHOAIB M,MOATOUK A,et al. On new generalized Ostrowski type integral inequalities[J]. Abstract and Applied Analysis,2014,2014(1):1-8.

[17] QAYYUM A,SHOAIB M,FAYE I. Some new generalized results on Ostrowski type integral inequalities with application [J]. Journal of Computational Analysis and Applications,2015,19(4):693-712.

[18] 时统业,曾志红.新的广义Ostrowski型不等式的加强[J].首都师范大学学报(自然科学版),2022,43(1):12-18.

[19] QAYYUM A,SHOAIB M,FAYE I. Derivation and applications of inequalities of Ostrowski type for *n*-times differentiable mappings for cumulative distribution function and some quadrature rules [J]. Journal of Nonlinear Sciences and Applications,2016,9(4):1844-1857.

[20] CHENG X L,SUN J. A note on the perturbed trapezoid inequality [J]. Journal of Inequalities in Pure and Applied Maththematics,2002,3(2):29.

[21] CERONE P,DRAGOMIR S S,ROUMELIOTIS J. Some Ostrowski type inequalities for *n*-time differentiable mappings and applications[J]. Demonstratio Mathematica,1999,32(4):697-712.

(责任编辑:马田田)