

《物理学报》创刊 90 周年

中国的表面物理*

管丹丹¹⁾ 贾金锋^{1)2)†}

1) (上海交通大学物理与天文学院, 人工结构及量子调控教育部重点实验室, 李政道研究所, 上海 200240)

2) (南方科技大学物理系, 深圳 518055)

(2023 年 11 月 27 日收到; 2023 年 12 月 9 日收到修改稿)

以中国科学院表面物理国家重点实验室为主线, 回顾了表面物理在中国的发展历程, 致敬为中国表面物理做出贡献的老一辈科学家. 通过回顾历史可以看出, 中国表面物理蓬勃发展, 不仅做出了很多国际先进水平的工作, 也培养了大批青年人才, 他们已经成为国际凝聚态物理研究的重要力量.

关键词: 表面原子结构, 纳米团簇, 量子尺寸效应, 二维材料

PACS: 68.35.B-, 68.37.-d

DOI: 10.7498/aps.72.20231858

表面物理是研究固体表面附近的几个原子层内具有异于体内结构和物理性质的学科, 是一门从 20 世纪 60 年代末期发展起来的综合性的学科. 由于固体表面原子配位数与体内不同, 表面原子会产生垂直于表面方向的弛豫和水平方向的重构, 因此, 表面的原子结构、电子结构及各种性质与体内有较大的不同. 但由于表面原子数量与体原子数量相比少很多, 传统用于研究体材料的实验方法都无法用来研究表面, 因此, 对表面的研究更加困难, 起步也比较晚. 表面物理的诞生得益于超高真空技术、表面清洁技术及各种表面敏感的实验技术的发明. 与电子技术、计算机技术和其他许多实验手段的发展有密切联系. 表面科学的研究成果, 对半导体物理、金属物理, 超高真空物理以及化学催化等学科产生了相当重要的影响.

我国的表面物理研究起步稍晚. 1977 年 11 月, 全国自然科学规划会议指出了开展表面物理科研的重要性. 1978 年, 中国科学院物理研究所与复旦大学物理系共同组织了表面物理讲习班. 1978 年秋, 林彰达被任命为分子束外延和表面物理研究室

的筹建负责人. 1979 年, “分子束外延设备研制和表面物理”研究组的许多成员到日本和美国研究表面科学的实验室访问研究, 并陆续全部回国. 1981 年 9 月, 中国科学院物理研究所引进了第一台表面分析设备——X 射线光电子能谱仪 (VG ESCA Lab5). 1982 年秋, 中国科学院物理研究所和浙江大学物理系在杭州联合举办了“中国物理学会表面物理分会的第一次全国大会”. 1983 年, 国家计划委员会决定分期组建一批国家重点开放实验室. 中国科学院将成立表面物理国家重点开放实验室列入计划, 并进入筹建阶段. 1983 年 12 月, 国家计划委员会正式批准表面物理国家重点实验室由中国科学院物理研究所和中国科学院半导体研究所共同筹建, 并同意拨款 150 万美元用作实验室筹建费. 表面物理国家重点实验室筹备小组由物理研究所林彰达任组长, 半导体研究所许振嘉任副组长. 1987 年 9 月, 中国科学院物理研究所表面物理国家重点实验室 (以下简称“表面物理室”) 建成, 并向国内外开放.

与此同时, 复旦大学在谢希德的领导下于

* 国家重点研发计划 (批准号: 2019YFA0308600)、科技创新重大项目 (批准号: XDB28000000) 和上海市科技重大专项 (批准号: 2019SHZDZX01) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jfjia@sytu.edu.cn

1977年组建表面物理实验室,1990年被国家计划委员会批准建设为“应用表面物理国家重点实验室”,并在1992年12月通过验收.表面物理国家重点实验室和应用表面物理国家重点实验室的成立,极大地促进了中国表面物理的发展,这两个实验室也成为中国表面物理研究的主力军.此外,随着改革开放以后第一批留学人员的归来,北京大学、浙江大学、兰州大学等也陆续建立了表面物理研究组.

20世纪70—80年代,表面物理的研究主要集中在确定表面原子结构及各种气体分子在不同表面的吸附、迁移和脱附等,使用的仪器主要是低能电子衍射、俄歇电子能谱、高分辨电子能量损失谱、X射线光电子能谱和热脱附等手段.这段时间,中国的表面物理刚刚起步,很多研究者都是改革开放后在国外进修或学习回来的.北京大学杨威生于1978—1981年在美国纽约州立大学石溪分校进修,他师从低能电子衍射确定表面原子结构的鼻祖F. Jona教授,做出了一些很有意思的工作^[1,2].回国后,北京大学利用世界银行贷款购买了低能电子衍射/俄歇电子能谱设备.杨威生用这个仪器在表面原子结构的确定方面做出了很多代表当时水平的工作^[3-5],并获得了1996年国家教育委员会科学技术进步一等奖.

20世纪90年代初,表面物理室承担了国家重点基金项目“从原子水平上研究薄膜材料的表面与界面”、国家高技术研究发展计划项目“金刚膜的应用基础研究”及教委基金“金刚石膜生长基材表面吸附结构及相变研究”.在金刚石生长方面开展了长期系统性的研究,并取得了很好的成果.“原子尺度的亚稳态金刚石膜生长、形核和异质外延的机理研究”在1997年获得中国科学院自然科学一等奖.

1994年,中国科学院启动“百人计划”,1998年又启动“知识创新工程”.表面物理室在人才引进、科研条件改善、科研合作与交流等方面得到了有力的支持,这段时间王恩哥、薛其坤等先后加入了表面物理室并组建了各自的团队.在他们的带领下,表面物理室进入高速发展的阶段.同时,中国的表面物理也进入了辉煌的年代.

20世纪90年代末,纳米科技席卷全球,国内很多科研单位也都投入了纳米方面的研究.表面物理室也开始了纳米方面的研究.薛其坤研究组^[6]巧

妙利用周期纳米模板上的幻数原子成簇现象,在硅(111)衬底上,利用分子束外延方法,制备出了由全同的金属纳米团簇周期排列而成的二维人造晶格(见图1).这类新物质的形式提供了一个探索新的基本物理现象/规律的理想系统,在纳米电子学、超高密度信息储存、纳米催化和量子计算及信息处理等很多方面有潜在的应用价值,这是近年来凝聚态物理/纳米科学领域的一个重要进展.薛其坤研究组^[6-8]还利用扫描隧道显微镜/谱和第一性原理总能量计算,确定了金属铟、镓和铝团簇的原子结构,澄清了周期点阵的稳定性及形成原因,这是第一个令人信服的表面上团簇的原子结构模型,它为理解其电子结构、建立宏观物性和微结构关系以及发现其新的效应奠定了基础.王恩哥研究组^[9]制备出了各层手性一致、结构完整的多壁碳纳米管.他们首次发现从锯齿型到扶手椅型的多壁碳纳米管中,只有少数几种特殊的手性管呈择优分布.这项工作在多壁碳纳米管可控制生长的研究方面迈出了一大步^[10].他们还采用等离子体辅助热丝化学气相沉积生长技术,首次实现了硼碳氮单壁纳米管结构的直接合成^[11].

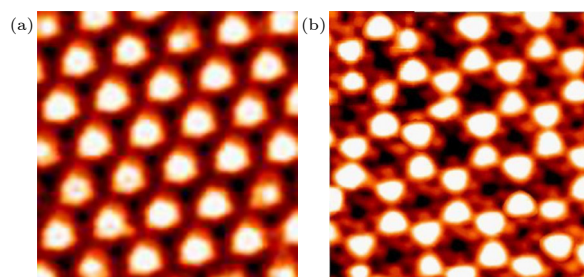


图1 Si(111)表面生长出的全同铟(a)和铝(b)纳米点阵列
Fig. 1. Identical nanocluster arrays of In (a) and Al (b) grown on Si (111) surface.

按照量子力学,电子在一维方势阱中受限运动时,其能级将变成分立的,这些分立的能级称为量子阱态.量子阱态的形成会导致材料奇特的物理和化学性质.半导体或绝缘体衬底上的金属薄膜材料是一个理想的一维方势阱体系.由于金属电子的费米波长很短(~ 1 nm),要观察到显著的量子效应,薄膜的厚度就要达到纳米尺度且其形貌要有原子级的平整度.但对于绝大多数金属/半导体异质结体系(如铅/硅),要有控制地重复性地制备出高质量的薄膜材料是极其困难的,因此,制备金属材料的一维方势阱体系在材料科学上是一个很大的挑战.

薛其坤研究组^[12]采取低温生长方法,在硅衬底上制备出了具有原子级平整度且在宏观范围内均匀的铅薄膜,并实现了薄膜厚度一个原子层、一个原子层变化的精确控制,这实际上就是制备出了一个理想的、势阱宽度可调的一维方势阱体系.他们还进一步深入研究了量子效应对电子结构的影响,根据量子阱态随薄膜厚度的变化,精确地确定了铅的能带结构,从理论上完美解释了量子效应调制铅薄膜的特殊生长模式和薄膜的幻数稳定性,发现了由量子效应导致的超导转变温度振荡^[12].此后,又观察到量子阱态的形成对费米能级附近电子态密度和电声子耦合强度的调制行为^[13],以及由量子效应导致的一系列的奇异材料性质,诸如热膨胀系数^[14]、功函数^[15]、临界磁场^[16]、表面扩散势垒^[17]以及表面化学活性^[18,19]等随薄膜厚度(原子层数)的振荡现象(见图2).这是国际上首次从实验上实现了对金属体系“一维方势阱问题”的系统研究,并利用它实现了对物质基本参量的量子调控.该工作在固体物理的发展上具有重要意义.其中关于超导转变温度振荡的文章在 *Science* 发表后引起了国际上很大反响. *Science* 在发表该文的同时,还邀请了著名科学家 Chiang 教授撰文,在同期的“Perspectives”栏目上对该工作进行了评价^[20].此后,全世界各大科技网站都对此进行了报道.该工作团队人员被邀请在相关的重要国际学术会议上做邀请报告.该工作还被评为2005年中国科学家具代表性的工作,并作为重要部分获得了2005年中国科学院杰出成就集体奖.薛其坤于2006年获得何梁何利基金会科学与技术进步奖.这一系列

工作还获得了2011年国家自然科学奖二等奖.

2009年,理论预言了三维强拓扑绝缘体系列材料的存在,开启了拓扑绝缘体实验研究的热潮.表面物理室吴克辉^[21]以铋修饰的硅(111)重构表面为模板,生长出高质量 Bi_2Se_3 单晶薄膜.马旭村研究组与清华大学薛其坤研究组合作,利用分子束外延(MBE)技术,在Si(111), SiC(0001), Al_2O_3 , STO等衬底上,成功外延生长出原子级平整的和低缺陷密度的 Bi_2Te_3 , Bi_2Se_3 , Sb_2Te_3 单晶薄膜,从而建立了高质量拓扑绝缘体薄膜的分子束外延生长动力学,并实现了对薄膜厚度的逐层控制^[22,23].通过细致研究 Bi_2Se_3 薄膜的能带结构随厚度增加时的演化,观察到厚度小于6个单位原胞时,薄膜中存在有限尺寸效应^[24](见图3).还观察到 Bi_2Se_3 拓扑绝缘体表面态在磁场下的朗道量子化现象,发现朗道能级的能量与 \sqrt{nB} 成正比.这说明表面态可由二维无质量狄拉克费米子来描述^[25].三维拓扑绝缘体的量子薄膜的成功制备为理论预言的量子反常霍尔效应、巨大的热电效应、激子凝聚等效应的研究提供了基础,为拓扑绝缘体的研究和应用打下了很好的材料基础,对发展新的自旋电子器件具有重要的指导意义.该成果入选“2010年度中国科学十大进展”.

最近几年,二维材料成为凝聚态物理研究的热点,在这方面表面物理室也做出了很多非常优秀的工作.吴克辉团队一直致力于单元素二维材料的研究,在硅烯、硼烯等的制备与研究方面取得了世界领先的研究成果.2016年,他们利用超高真空分子束外延的手段直接进行单原子层构筑的方法在

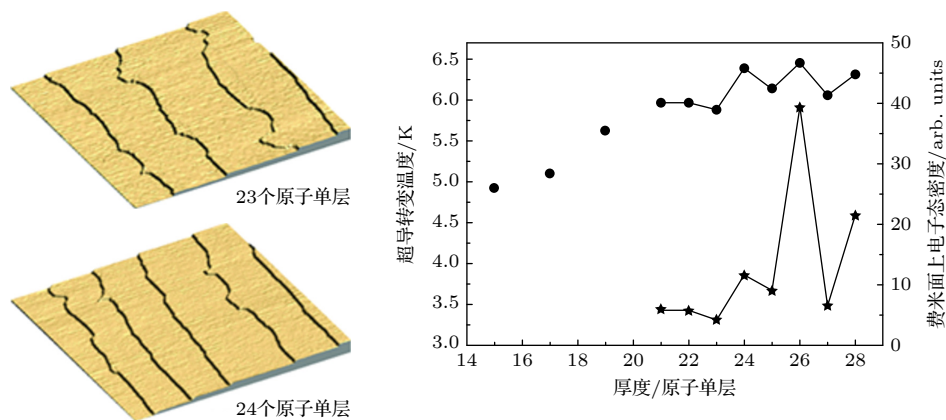


图2 原子级平整的铅薄膜及其超导转变温度和电子态密度随厚度的振荡变化

Fig. 2. Pb films with atomic-scale uniformity, and the superconducting transition temperature T_c and the density of states $N(E_F)$ as a function of Pb film thickness, demonstrating a nonmonotonic oscillatory behavior in both T_c and $N(E_F)$.

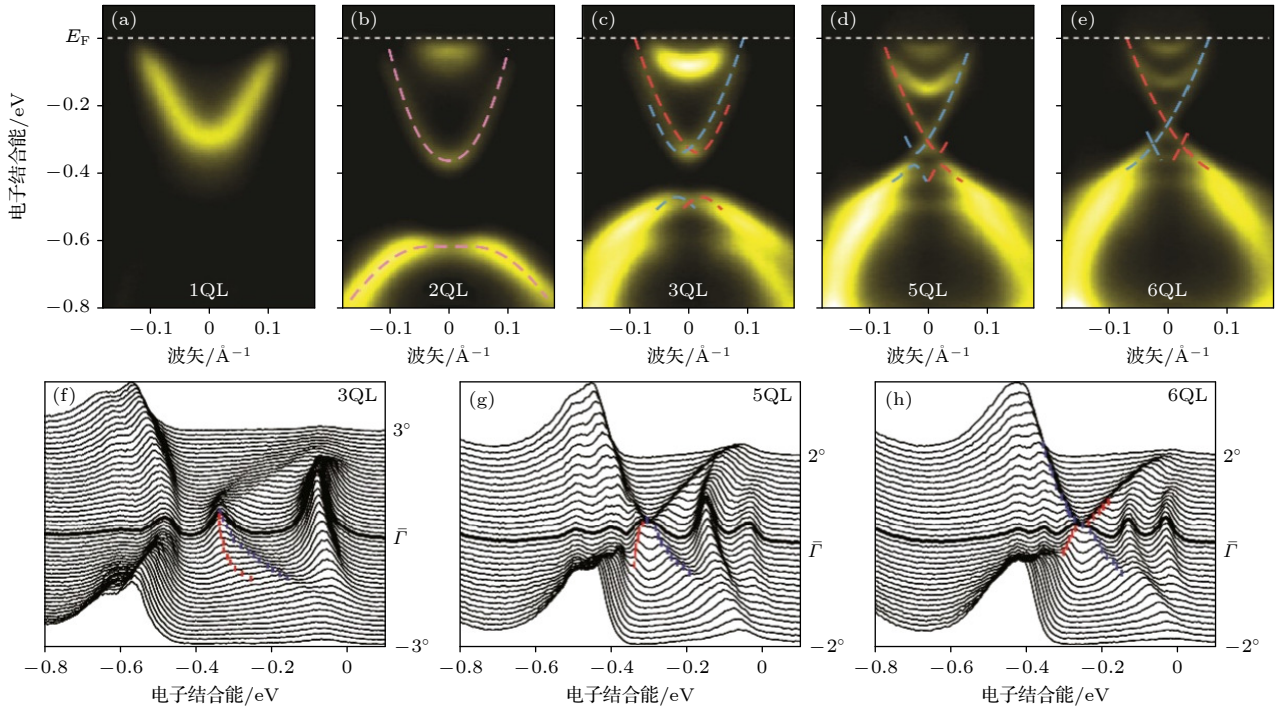


图3 硒化铋薄膜以五原子层(QL)为单元生长,从1 QL到6 QL薄膜的角分辨光电子能谱图(a)–(e)和对应的能量分布曲线(f)–(h),可以清楚看到狄拉克表面态的能隙打开和Rashba型的劈裂^[24]

Fig. 3. ARPES spectra of Bi_2Se_3 films at room temperature: (a)–(e) ARPES spectra of 1–6 quintuple layer (QL), the Bi_2Se_3 films grow in QL-by-QL mode; (f)–(h) the energy distribution curves of (c)–(e) respectively, which clearly shows the opening of the energy gap and the Rashba-type splitting for Dirac surface states^[24].

Ag(111)衬底上获得了理论上期待已久的硼烯^[26],并证实了硼烯结构的多样性.最近又成功地在Cu(111)表面合成了高质量大面积双层硼烯.理论计算还揭示了双层硼烯的结构、稳定性,以及其与衬底的相互作用、电荷分布和电子结构等相关性质.他们的研究还表明,Cu衬底与硼之间独特的电荷转移是双层硼烯能在Cu(111)表面成功生长的最主要原因^[27].

郭建东团队^[28]在2015年成功研制了世界首台具有能量-动量二维成像解析能力的高分辨电子能量损失谱仪(2D-HREELS).该系统将一个带有特殊设计电磁透镜组的电子束单色器与商业化的半球形分析器结合,可以同时探测到散射电子能量和动量的信息.该谱仪可以对表面元激发进行高分辨、高效率的测量,能够给出电子、晶格及其集体激发的综合信息,是研究二维材料拓扑声子的利器.

最近,他们利用2D-HREELS在整个二维布里渊区和整个能量尺度测量了石墨烯的三维全域声子谱,系统观测并揭示了石墨烯中的节线环(nodal-ring)声子和狄拉克(Dirac)声子的拓扑结

构^[29].他们观测到了两个节线环声子并观测到了狄拉克声子的锥形结构.该工作利用2D-HREELS实现的三维声子绘制方法为拓扑声子的识别建立了一个新的范式,并为晶体材料中广泛存在的拓扑玻色子态的实验观测提供了可行的路径.

此外,表面物理室还在表面水结构研究^[30]、有机分子及其自组装薄膜研究^[31]、氧化物薄膜研究^[32]以及表面低维结构生长动力学等理论研究方面都做出了非常好的工作.同时,以复旦大学应用表面物理国家重点实验室为代表的其他表面研究人员也做出了非常多的优秀工作,由于篇幅和个人能力的限制,非常抱歉无法逐一提及.

回顾表面物理在中国的四十多年发展历史,可以看出人才是科学研究的第一要素.当然国家的强盛和充足的经费支持也为表面物理的发展提供了强有力的保障.表面物理的发展同时也为国家培养了大量的人才,与表面物理直接相关的年轻院士就有5位,国家杰出青年基金获得者、长江学者奖励计划有2–30位,他们都为我们国家的科研事业做出了重要贡献.中国的表面物理已经成为国际凝聚态物理研究的一个重要力量.

为了庆祝《物理学报》创刊 90 周年, 应邀撰写此文。期间得到了郭建东和沈健两位实验室主任的大力支持, 在此表示衷心感谢。

参考文献

- [1] Yang W S, Jona F, Marcus P M 1983 *Phys. Rev. B* **27** 1394
- [2] Yang W S, Jona F, Marcus P M 1983 *Phys. Rev. B* **28** 2049
- [3] Jia J F, Zhao R G, and Yang W S 1993 *Phys. Rev. B* **48** 18109
- [4] Jia J F, Zhao R G, Yang W S 1993 *Phys. Rev. B* **48** 18101
- [5] Jia J F, Zhao R G, Yang W S 1992 *Acta Phys. Sin.* **41** 827 (in Chinese) [贾金峰, 赵汝光, 杨威生 1992 *物理学报* **41** 827]
- [6] Li J L, Jia J F, Liang X J, Liu X, Wang J Z, Xue Q K, Li Z Q, Tse J S, Zhang Z Y, Zhang S B 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 066101
- [7] Jia J F, Wang J Z, Liu X, Xue Q K, Li Z Q, Kawazoe Y, Zhang S B 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 3186
- [8] Jia J F, Liu X, Wang J Z, Li J L, Wang X S, Xue Q K, Li Z Q, Zhang Z Y, Zhang S B 2002 *Phys. Rev. B* **66** 165412
- [9] Xu Z, Bai X D, Wang Z L, Wang E G, 2006 *J. Am. Chem. Soc.* **128** 1052
- [10] Xu Z, Bai X D, Wang E G 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 133107
- [11] Wang W L, Bai X D, Liu K H, Xu Z, Golberg D, Bando Y, Wang E G 2006 *J. Am. Chem. Soc.* **128** 6530
- [12] Guo Y, Zhang Y F, Bao X Y, Han T Z, Tang Z, Zhang L X, Zhu W G, Wang E G, Niu Q, Qiu Z Q, Jia J F, Zhao Z X, Xue Q K 2004 *Science* **306** 1915
- [13] Zhang Y F, Jia J F, Han T Z, Tang Z, Shen Q T, Guo Y, Qiu Z Q, Xue Q K 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 096802
- [14] Zhang Y F, Tang Z, Han T Z, Ma X C, Jia J F, Xue Q K, Xun K, Wu S C 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 093120
- [15] Qi Y, Ma X C, Jiang P, Ji S H, Fu Y H, Jia J F, Xue Q K, Zhang S B 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 013109
- [16] Bao X Y, Zhang Y F, Wang Y P, Jia J F, Xue Q K, Xie X C, Zhao Z X 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 247005
- [17] Ma L Y, Tang L, Guan Z L, He K, An K, Ma X C, Jia J F, Xue Q K, Han Y, Huang S, Liu F 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 266102
- [18] Ma X C, Jiang P, Qi Y, Jia J F, Yang Y, Duan W H, Li W X, Bao X H, Zhang S B, Xue Q K 2007 *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* **104** 9204
- [19] Jia J F, Li S C, Zhang Y F, Xue Q K 2007 *J. Phys. Soc. Jpn.* **76** 082001
- [20] Chiang T C 2014 *Science* **306** 5703
- [21] Zhang G H, Qin H J, Teng J, Guo J D, Guo Q L, Dai X, Fang Z, Wu K H 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 053114
- [22] Song C L, Wang Y L, Jiang Y P, Zhang Y, Chang C Z, Wang L L, He K, Chen X, Jia J F, Wang Y Y, Fang Z, Dai X, Xie X C, Qi X L, Zhang S C, Xue Q K, Ma X C 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 143118
- [23] Li Y Y, Wang G A, Zhu X G, Liu M H, Ye C, Chen X, Wang Y Y, He K, Wang L L, Ma X C, Zhang H J, Dai X, Fang Z, Xie X C, Liu Y, Qi X L, Jia J F, Zhang S C, Xue Q K 2010 *Adv. Mater.* **22** 4002
- [24] Zhang Y, He K, Chang C Z, Song C L, Wang L L, Chen X, Jia J F, Fang Z, Dai X, Shan W Y, Shen S Q, Niu Q, Qi X L, Zhang S C, Ma X C, Xue Q K 2010 *Nat. Phys.* **6** 584
- [25] Cheng P, Song C L, Zhang T, Zhang Y Y, Wang Y L, Jia J F, Wang J, Wang Y Y, Zhu B F, Chen X, Ma X C, He K, Wang L L, Dai X, Fang Z, Xie X C, Qi X L, Liu C X, Zhang S C, Xue Q K 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 076801
- [26] Feng B J, Zhang J, Zhong Q, Li W B, Li S, Li H, Cheng P, Meng S, Chen L, Wu K H 2016 *Nat. Chem.* **8** 564
- [27] Chen C Y, Lv H F, Zhang P, Zhuo Z W, Wang Y, Ma C, Li W B, Wang X G, Feng B J, Cheng P, Wu X J, Wu K H, Chen L 2022 *Nat. Chem.* **14** 25
- [28] Zhu X T, Cao Y W, Zhang S Y, Jia X, Guo Q L, Yang F, Zhu L F, Zhang J D, Plummer E W, Guo J D 2015 *Rev. Sci. Instrum.* **86** 083902
- [29] Li J D, Li J X, Tang J L, Tao Z Y, Xue S W, Liu J X, Peng H L, Chen X Q, Guo J D, Zhu X T 2023 *Phys. Rev. Lett.* **131** 116602
- [30] Zhang X, Xu J Y, Tu Y B, Sun K, Tao M L, Xiong Z H, Wu K H, Wang J Z, Xue Q K, Meng S 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 256001
- [31] Yang K, Chen H, Pope T, et al. 2019 *Nat. Commun.* **10** 3599
- [32] Zhang Q, Gao A, Meng F, et al. 2021 *Nat. Commun.* **12** 1853

The 90th Anniversary of *Acta Physica Sinica*

Surface physics in China^{*}

Guan Dan-Dan¹⁾ Jia Jin-Feng^{1)2)†}

1) (*Key Laboratory of Artificial Structures and Quantum Control (Ministry of Education), School of Physics and Astronomy, Tsung-Dao Lee Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

2) (*Department of Physics, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China*)

(Received 27 November 2023; revised manuscript received 9 December 2023)

Abstract

In this paper, the development of surface physics in China is comprehensively reviewed, focusing on the State Key Laboratory of Surface Physics at the Chinese Academy of Sciences. It especially recognizes and honors the invaluable contributions made by the older generation of scientists in this field. By looking back at the history, it can be seen that the surface physics has developed vigorously in China: not only have many research papers with international advanced level been published, but also a large number of young talents have been cultivated, who have become an important force in the research of condensed matter physics internationally.

Keywords: surface atomic structures, nanocluster, quantum size effects, two-dimensional materials

PACS: 68.35.B-, 68.37.-d

DOI: [10.7498/aps.72.20231858](https://doi.org/10.7498/aps.72.20231858)

^{*} Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2019YFA0308600), the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB28000000), and the Science and Technology Commission of Shanghai Municipality, China (Grants No. 2019SHZDZX01).

[†] Corresponding author. E-mail: jfjia@sjtu.edu.cn



中国的表面物理

管丹丹 贾金锋

Surface physics in China

Guan Dan-Dan Jia Jin-Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 236801 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20231858

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231858>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

金属纳米颗粒与二维材料异质结构的界面调控和物理性质

Interface modulation and physical properties of heterostructure of metal nanoparticles and two-dimensional materials

物理学报. 2022, 71(6): 066801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211902>

二维材料热传导研究进展

Recent progresses of thermal conduction in two-dimensional materials

物理学报. 2020, 69(19): 196602 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200709>

二维材料的转移方法

Methods of transferring two-dimensional materials

物理学报. 2021, 70(2): 028201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201425>

二维材料/铁电异质结构的研究进展

Research progress and device applications of multifunctional materials based on two-dimensional film/ferroelectrics heterostructures

物理学报. 2020, 69(1): 017301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191486>

新型二维材料 $Ti_3C_2T_x$ MXene制备及其气敏性能研究

Preparation and gas sensing properties of a novel two-dimensional material $Ti_3C_2T_x$ MXene

物理学报. 2022, 71(1): 010701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211048>

二维磁性材料的物性研究及性能调控

Study on physical properties and magnetism controlling of two-dimensional magnetic materials

物理学报. 2021, 70(12): 127801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202146>