文章编号: 1007 - 4252(2020) 03 - 0003 - 169

二维材料在柔性电子中的研究现状与发展

付涵朵,补钰煜*
(西安电子科技大学微电子学院,西安 710071)

摘要: 基于柔性电子器件对柔性衬底的要求,衬底应足够薄且达到足够的韧性度。二维材料因原子级的厚度表现出极强的发展潜力。至今,石墨烯、硅烯、磷烯和二维过渡金属硫族化合物是二维材料的典型代表,其结构、特性和制备方式影响着它们在柔性电子器件中的应用范围。本文将以上几种二维半导体材料为阐述目标,分别从其合成、改性以及二维纳米结构控制等因素出发,综述了他们在柔性有机发光二极管、有机薄膜晶体管以及场效应晶体管中的应用现状以及在未来亟需解决的问题。

关键词: 柔性电子; 二维材料; 石墨烯; 硅烯; 磷烯; 二维过渡金属硫族化合物
中图分类号: TN402　　**文献标志码:** A

Research Status and Development of Two-dimensional Materials in Flexible Electronics

FU Han duo, BU Yu yu*
(Xidian University, School of Microeletronics, Xi'an 710071,China)

Abstract: Based on the requirements of flexible electronic devices on flexible substrates, the substrate should be thin enough and achieved sufficient toughness. Two-dimensional materials show extremely strong development potential due to atomic thickness. So far, graphene, silene, phosphorene and two-dimensional transition metal chalcogenide compounds are typical representatives of two-dimensional materials. Their structure, characteristics and preparation methods affect their application in flexible electronic devices. In this review, the above mentioned two-dimensional semiconductor materials are employed as elaboration goals, and their application statuses in flexible organic light-emitting diodes, organic thin-film transistors and field-effect transistors are reviewed based on their synthesis, modification and two-dimensional nanostructures controlling. The problems that need to be solved urgently in the future are described in detail also.

Key words: Flexible electron; Two-dimensional material; Graphene; Silene; Phosphene; Two-dimen-

收稿日期: 2020-05-06;　　**修订日期:** 2020-06-12
基金项目: 西安电子科技大学微电子学院本科生科研训练资助计划项目(URTP) 、国家自然科学基金青年项目(41506093) 以及国家自然科学基金重大基础研究项目(61991442) .
作者简介: 付涵朵(1999-) ,女,四川成都人,本科生,专业为集成电路设计与集成系统(E-mail: 1127833645@ qq.com) ;
补钰煜(1986-) ,男,重庆市人,副教授,专业为电子科学与技术(E-mail: yybu@ xidian.edu.cn)

sional transition metal chalcogenide

0 引言

柔性电子是指在柔性衬底上制作电路的技术。由此制作出的电子产品因可拉伸、方便携带等优点，引起科研工作者重点关注。其应用领域涉及广泛，如可穿戴设备、医疗设备和疾病监测等。这些产品的核心部分为一个或多个柔性芯片集成，而柔性衬底是柔性芯片制造的基础。在柔性电子发展的历史上，大量材料被提出并证实可以用于制作柔性衬底：从最初的高分子聚合物到一维材料硅纳米线、氧化锌纳米线等，并且制作出了众多的器件，如有机发光二极管(OLED)和有机薄膜晶体管(OTFT)等。但研究发现，随着半导体工艺尺寸依照摩尔定律缩小，这些材料因不能达到理想的超薄厚度而成为研发瓶颈。科学家们曾思考，如果某种材料能够通过加工达到其极限单原子厚度，那么其器件性能可实现大幅提升。二维材料层内以共价键键合，层间通过范德华力连接，具有韧性好、稳定性高、带隙可调、光透度高等优点。同时，二维材料因其独特的层状结构实现原子级的厚度，且种类丰富，禁带宽度和光电频率覆盖广，可作为柔性衬底材料，具有实现促使器件性能大幅提升的潜力。

因此，本文以近年来国内外二维材料制作柔性衬底的研究为背景，以石墨烯、类石墨烯和金属硫族化合物为代表，将研究成果进行综述，总结二维材料的制备方法、性质及其在柔性有机发光二极有机薄膜晶体管以及场效应晶体管等重要领域的应用研究，并对其未来发展方向和难点进行了预测。

1 石墨烯

石墨烯可被看做是一种极薄的碳原子层材料，由 sp2 杂化的碳原子以类似苯环的六元环的结构连接而成。这种结构具有高柔韧性、结构稳定等特点。另一方面，石墨烯作为半导体，零带隙、超高本征载流子迁移率等特点以及优越的热学、力学、电学性能，使其在微电子和柔性电子领域研究担当着重要的角色。

1.1 石墨烯薄膜的制备

CVD 法在薄膜的制备工艺中扮演着重要角色，这种方法能实现材料的大面积均匀生长。石墨烯薄膜通常采用气态碳源的 CVD 法来生长[1]，但在这种方法中精确控制生长气体流速和温度十分重要，且薄膜需沉淀在 Cu/Ni 等金属催化剂表面，反应结束后涉及石墨烯的转移过程，使得石墨烯的质量下降。因此，有研究者提出固态碳源的 CVD 法。与气态碳源相比，它可控性高且易于获得。至 2010 年，研究者们就尝试采用固态碳源调变和温度调变技术来生长石墨烯薄膜，并逐渐克服了其生长需要较高温度且缺陷浓度较高等关键问题。

Zhang 等[1]以聚苯乙烯(polystrene)和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为碳源，在 400℃下经过蒸发生长出石墨烯薄膜；Shahrokh 等[2]以聚苯乙烯为碳源，采用常压 CVD 法生长出石墨烯薄膜；Lee 等[3]溶解旋涂多环芳烃，在 400℃～600℃温度范围内生长出高质量石墨烯薄膜。图 1 为以多环芳烃族化合物芘为固态碳源，Cu 为基底生长石墨烯的步骤[4]。碳源旋涂在清洁的 Cu 表面，在 400℃～600℃的 Ar 环境下生长出石墨烯薄膜。同样的方法用 2-萘芬代替芘能够减小缺陷浓度，用浓度为 10%的 1-辛基膦酸代替芘能够减小空位型缺陷浓度。

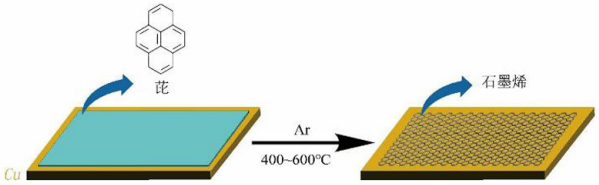

图 1 固态碳源芘生长石墨烯步骤

Fig. 1 Step of growing graphene with solid carbon source pyrene

1.2 基于石墨烯薄膜的 OLED 器件

OLED 工作原理是电子和空穴通过注入、复合、产生激子而发光，如图 2 所示。OLED 器件具有响应快、效率高、外形轻薄等诸多优点，在可穿戴设备、柔性屏幕等领域展现出极大的发展潜力。挑选电极材料为制作柔性 OLED(FOLED)过程当中极其重要的一个环节。传统电极材料如铟锡氧化物(ITO)韧性小、成本高，用于制作 FOLED 并不合适，相反，石墨烯铟韧性好、强度高、性质稳定，是制作 FOLED 电极的良好材料。

透光率、导电性和功函数是影响电极发光效率

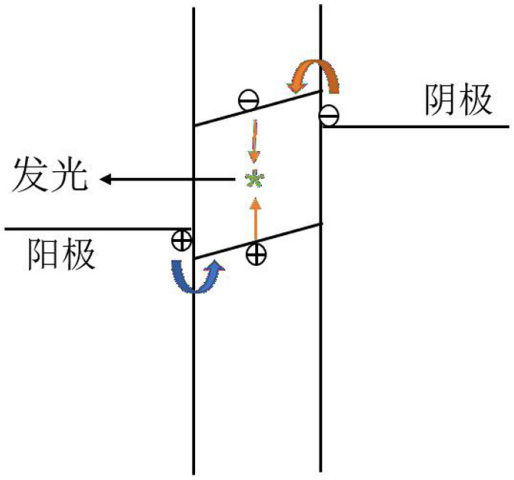

图 2　OLED 的发光原理

Fig. 2 OLED light emitting principle

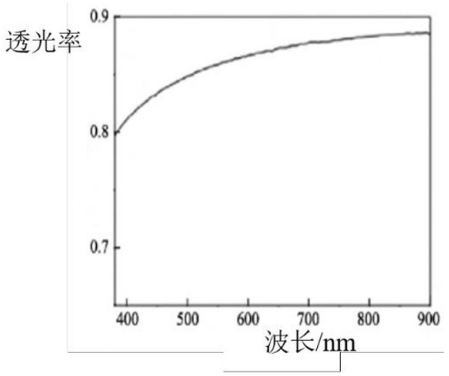

图 3　石墨烯电极透光率

Fig. 3 Graphene electrode light transmittance

的主要因素，石墨烯电极透光率与透射光波长的关系如图 3 所示。最初，Wu 等[5] 以 7nm 石墨烯作为阳极制备了绿光 OLED，但因石墨烯导电性较差导致发光电压阈值较 ITO 升高，器件性能较差。Han 等[6] 结合 CVD 法和 $AlCl_3$ 掺杂工艺，降低了石墨烯的面电阻。Hwang 等[7] 发现石墨烯方块电阻随着层数的增加而降低，因此采用 5～8 层的石墨烯作为阳极，方块电阻降低到 289Ω/sq，透光率增加到 90%。调控石墨烯导电性的另一种方法是掺杂。Meyer J[8] 等用 Mo O_3 掺杂 CVD 所得的单层和三层石墨烯，掺杂后三层石墨烯面电阻更小，空穴注入率更高，制作的 OLED 性能更好。Wu 等[9] 用硼原子掺杂石墨烯，得到替位 P 型的石墨烯薄膜，单层薄膜制作的绿光 OLED 器件就已经具有较高的透光率、功函数、空穴迁移率以及较低的面电阻。另外 Wu 等还分别尝试了使用三氟甲基磺酸(TFSA) 和 AuC l_3 掺杂，发现 AuC l_3 掺杂的石墨烯面电阻不稳定，不适合用作电极材料。

本征石墨烯的功函数过低会导致电极与衬底失配，通过掺杂能提高石墨烯的功函数。Han 等[6] 用 PEDOT: PSS、全氟离子聚合物 (PFI) 和全氟磺酸 (Nafion) 的比例混合物对硝酸(HN O_3) 掺杂的四层石墨烯薄膜进行表面处理，提高了空穴注入效率；但在高驱动电流时，效率会降低。Hwang 等[7,10] 使用氧等离子体处理多层石墨烯，发现功函数增加的同时还伴随着表面粗糙及导电率下降的问题。Chang 等[11] 用 CsF 对石墨烯进行 N 型掺杂，功函数提高到 3.2eV。Zhu 等[12] 用 PEDOT: PSS 对 Ti O_x 掺杂的单层石墨烯薄膜进行表面处理，功函数提高，且面电阻降低为 86Ω /sq，但制成 OLED 器件后，各项效率指数却与传统 ITO 相差不多。Meng 等[13] 用 V_2O_5 处理单层石墨烯，功函数提高了 0.86eV。

制备完成的石墨烯需要通过转移介质转移至衬底，为保证器件性能，要求转移过程清洁度高、残留少。PMMA 作为早期转移介质材料被广泛使用，但其分子微粒大，在有机溶剂中溶解度小，转移过程中易形成颗粒残留，造成表面粗糙，性能下降。Kwon 等[14] 用 CYTOP 代替 PMMA 转移石墨烯，石墨烯的质量略有提升。Wang 等[15] 采用静电力的物理方法来转移电路，有效避免了颗粒残留问题。Chen 等[16] 使用电场清除 PMMA 残留。Han 等[17] 为了避免转移介质和石墨烯直接接触，在 PMMA 和石墨烯薄膜中间增加了 9.9－螺二芴二苯基氧化磷 (SPPO1) “夹层”，但随驱动电流的增加，器件效率降低。Zhang 等[18] 用松香替代 PMMA，松香是一种易溶于有机溶剂、可支撑保护石墨烯的小分子物质，能有效减少颗粒残留，并使器件具有较强的抗弯折性，图 4 为用松香转移的石墨烯薄膜。

1.3　石墨烯研发前景

除了 FOLED，石墨烯还被用于制作柔性传感器、柔性射频微波器件和柔性显示器等。但针对各种不同的用途，需要解决的问题也依旧存在:

(1) 如何大规模高质量地制备石墨烯薄膜

(2) 如何减小石墨烯的面电阻并提高功函数

(3) 如何高质量地转移石墨烯

当然目前已经有一些技术能够一定程度上解决

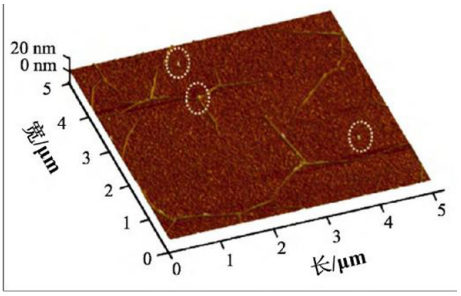

图 4 用松香转移的石墨烯薄膜

Fig. 4 Graphene film transferred with rosin

这些问题，并已经投入了生产，但是也期待关于石墨烯更深一步的研究。

2 硅烯和磷烯

硅烯和磷烯都属于单质二维材料。硅烯晶格形状为六元环蜂窝状，与石墨烯类似，不同之处在于硅烯六元环的其中三个硅原子和另外三个硅原子分别处在两个相垂直的平面上，故又被称为翘曲单原子层二维材料[19]，这种特殊的结构给硅烯带来了许多特有的性质。单层黑磷为磷烯，磷烯由椅状和锯齿状褶皱交错折叠而成，通过对拉曼光谱强度的测定，可以准确的鉴别黑磷。黑磷器件具有高载流子迁移率、高范围栅控能力的特点。图 5 和图 6 分别展示了硅烯和磷烯的结构。

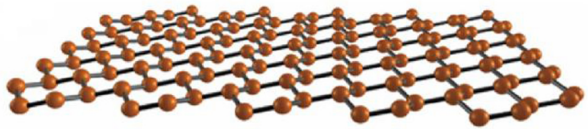

图 5 硅烯结构

Fig.5 Silicone structure

2.1 二维烯类物的制备方法

2.1.1 硅烯的制备

由于硅烯的翘曲结构而不能通过机械剥离产生单层硅烯，只能在某些不与硅有相互作用或反应的表面上生长硅烯。Aufray B 等[20]通过分子束外延在 Ag(111) 表面生长了硅烯纳米带，表面上形成相的比例随银衬底温度的变化而变化。

2.1.2 磷烯的制备

磷烯可以通过机械剥离从黑磷中得到，Liu 等[21]通过胶带从黑磷中剥离得到 2～3 层的磷烯，但缺点是量产难度大，解决该问题的另一种方法是

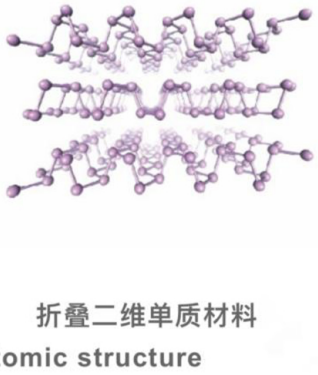

图 6 磷烯结构

Fig.6 Phosphene structure

液相剥离法[22]，用超声波击打黑磷，使黑磷重组形成褶皱状，这样制备出的磷烯韧性好、密度小、导电性好，且足够稳定。

2.2 硅烯和磷烯的性质与调控

硅烯和磷烯在空气中及其不稳定，硅烯尤为显著。两者离开银基底暴露在空气中分别 2 分钟和 24 小时后，双极电特性消失。为解决这个问题，Tao 等[23]采用如图 7 所示的“三明治”结构——氧化铝-硅烯-银(111) 结构，这种结构确保在转移及使用过程中硅烯不离开银的保护，同时银又作为接触电极用于器件当中。Kim 等[24]用电解质-聚合物薄膜覆盖层封装，使其稳定时间从 24 小时增加到数周。基于硅烯的场效应晶体管具有类似石墨烯的电输运特性。黑磷可以以聚酰亚胺衬底作为栅极，制成具有极高载流子迁移率的柔性黑磷场效应晶体管。

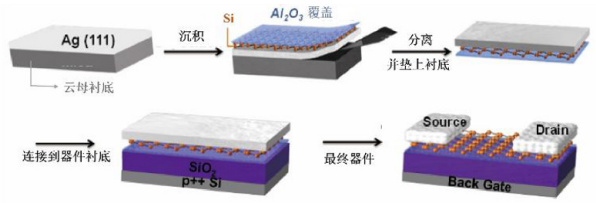

图 7 硅烯的原位电极三明治封装技术流程图[23]

Fig. 7 Flowchart of in-situ electrode sandwich packaging technology of silene

非本征磷烯具有更多样的电学性质。余伟阳[25]发现在任意高浓度掺杂磷烯的电子结构中，原有体系中的电子受掺杂原子的最外层电子的调制十分强烈，当掺杂原子分别具有偶数个和奇数个价电

子时，磷烯分别呈现出金属和半导体特性。因此，当掺杂原子的价电子个数在奇偶之间连续变化时，掺杂体系的特性也在半导体和金属之间连续变化。

硅烯的能带结构与石墨烯相似，基于硅烯的异质结被预言有良好的物理化学性质; 而硅烯与石墨烯的层状结构不同，因此硅烯和石墨烯的异质结需要基于存在新的堆叠方式; 由于硅烯在空中的不稳定性，石墨烯可以充当保护层的角色，在防止硅烯氧化的同时形成异质结。李更、张礼智等[26]先在 Ru 衬底上生长石墨烯，再将一定量的硅原子注入其下，并观察到，少量、适量和大量的硅原子注入，排列也不同; 图 8 展示了在硅烯注入后的退火过程中，硅原子先形成蜂窝状的硅烯薄片，随着退火的进行，逐渐形成单层硅烯; 在空气中暴露两周后，各项表征依旧稳定，实现了石墨烯对硅烯的保护。

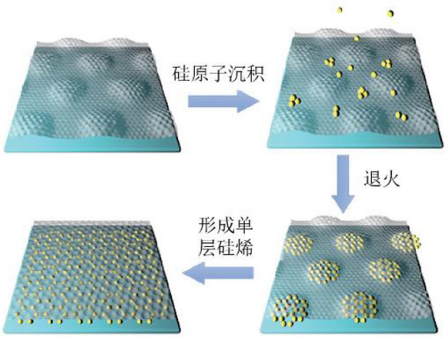

图 8　退火过程中硅烯薄片的形成过程

Fig.8 The formation process of silicon sheet during annealing

2.3　硅烯和磷烯研发前景

目前，硅烯的制备方法还较单一，只有分子束外延呈现出较好的效果; 黑磷具有高迁移率、可调带隙、与硅兼容的特性，适用于制作数字电路器件，但在空气中的不稳定性而对封装提出了更高的要求。基于黑磷研制出的异质结晶体管的性能都不高，但随着各类材料的研发，适合与黑磷形成异质结的材料一定会出现。

3　二维过渡金属硫族化合物 (2D-TMDs)

2D-TMDs 具有许多优异的物理和化学性质，如带隙随层数可调、高迁移率等，具有补偿石墨烯零带隙的特性，为异质结的发展开辟了新的道路，在各类传感器和可穿戴设备中有很大的应用前景。

3.1　硫化物的制备

过渡金属硫化物薄膜的制备方法包括机械剥离法、液相超声剥离法和离子插层剥离法[27]。机械剥离法将一小块材料粘到胶带上，通过两端胶带互相反复的粘扯得到薄层材料，这种方法简单、易操作，但只适用于实验室中的研究，不能够大规模生产，且层数不可控。液相超声剥离法利用有机溶剂分子在超声时的能量破坏材料的层间作用力，形成薄膜，但层数也不可控。离子插层剥离法利用插层剂形成的插层化合物在有机溶剂中发生剧烈反应产生的能量破坏层间作用力，产生薄膜，如图 9 为离子插层剥离法流程图。但这种方法过程复杂、能量产难度大。

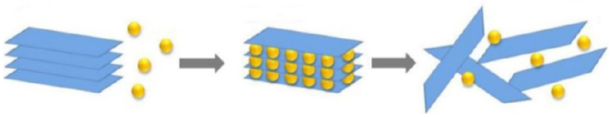

图 9　离子插层剥离法流程图

Fig.9 Flow chart of ion intercalation stripping method

Yan 等[28]使用水热法，用高压釜处理四硫代钼和 N，N-二甲基甲酰胺水溶液，制备了多层的 MoS_2，水热法操作简便，但单层膜制备困难。CVD 法加热粉源成为气态，经过化学反应，最终在衬底上沉积。进一步研究发现，使用熔融态粉源能够促进气体的淀积。

二硫化钼-石墨烯异质结纳米复合薄膜具有高发光率、制备技术成熟等优点。常用制备方法有液相剥离和真空抽滤技术[29]。真空抽滤技术通过过滤、干燥获得薄膜材料。过滤石墨和二硫化钼粉末溶于有机溶剂 N-甲基吡咯烷酮的分散液，控制滤液的量可以控制薄膜的厚度。干燥后，用均匀力将其按压转移至洁净玻璃基底。最后，通过激光照射样品，如没有较大的散射则表面样品均匀度高。

3.2　硫化物性质与调控

随电子元器件尺寸逐渐向量子级尺寸发展，硅基晶体管所能实现的性能逐渐趋于瓶颈，而二维材料的出现，无疑不给电子元件性能的提升提供新的思路。Geim 等[30]首次提出由多种 2D-TMDs 堆叠形成的范德瓦尔斯异质结构，如图 10 所示，并发现金属、绝缘体相互转换的现象。二维材料原子级的

厚度消除了表面的悬挂键，形成异质结时，不需考虑晶格匹配就能得到极其清晰的界面，所以异质结的种类多、迁移率高。这种叠加能够使材料性质互补，集合优点，因此二维材料异质结相比硅基异质结无疑非常有优势。异质结能带结构变化极其复杂，因此对异质结能带结构的研究十分重要，PL 光谱和光电子能谱方法是研究异质结能带结构两个十分重要的方法[31]。石墨烯和二硫化钼的异质结表现出优异的发光特性[32]，而二硫化钼的发光强度随 DNA 浓度的增大而增大，石墨烯作为隔离层阻止二硫化钼与环境发生反应，能够用于高选择性 DNA 检测。同时，其表面可保留 DNA 分子。研究预测，将来这种异质结还可用于蛋白质、细菌以及金属离子检测。

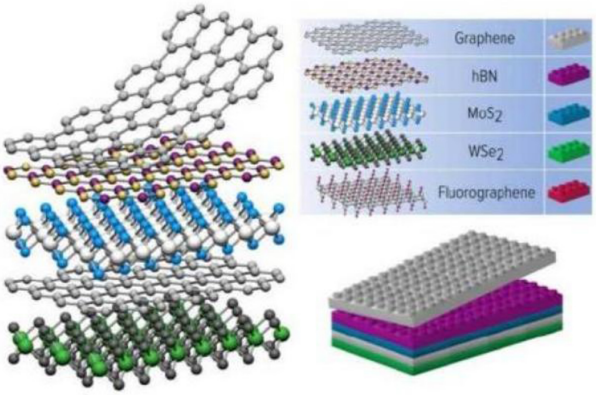

图 10 二维材料的范德瓦尔斯异质结构示意图

Fig.10 Schematic diagram of the van der Waals heterostructure of two-dimensional materials

传统气体传感器类型为电阻型气体传感器，其中核心元件为传感材料涂层，金属氧化物因成本低、灵敏度高成为广泛使用的传感材料涂层，但耗能高、散热差的特点又限制了它的发展。因 2D-TMDs 几乎包含了所有的电子结构，能展现丰富的物理现象如热电、超导，具有很大的潜力成为气体传感器中的传感涂层。Late D J 等[33] 和 Liu 等[34] 分别验证了机械剥离制备的 5 层 MoS_2 和 CVD 法制备的单层 MoS_2 对氨气和二氧化氮敏感，Perkins 等[35] 发现机械剥离的单层 MoS_2 对三乙胺敏感。由于二维材料独特的结构，基于 2D-TMDs 制作的气体传感器能够解决传统传感器能耗高、选择性低的问题。

3.3 硫化物研发前景

2D-TMDs 以其优异的特性和极高兼容性，能够实现的功能涉及诸多领域，结合极强的韧性，能拓展到更加广泛的领域。对于异质结，因为其极具变化性的能带结构，应加强对其能带结构的研究，而目前系统探究能带结构的方法还很缺乏，因此亟需寻找一系列对能带结构的研究方法。

4 结束语

二维材料因优异的薄膜性、柔韧性，成为柔性电子器件研究领域的热点。目前，已经在进行研究的材料有不仅有的石墨烯、硅烯、磷烯、二维过渡金属硫族化合物，还有六方氮化硼、二维钙钛矿、层状金属化合物等。随着研究的深入，这项技术将逐渐走进人们的日常生活，如电子皮肤、智能手环、可折叠电子设备、健康监测系统等。因此，未来柔性电子的发展方向有以下几点：

(1) 材料和调控方法多样化。

为实现更加完备的功能，更加多种多样的材料将会成为研究的对象，以及更具多样化的处理方法用于目的性的调控各项指标。

(2) 建立更多经验值数据库和大数据计算数据库。

跨过研究初期，后来研究应“站在巨人的肩膀上”，而不是重复简单、已知的实验。经验值的积累能有效提高研究速度，加快发展进程。同时，利用计算机和人工智能技术，积累二维材料的合成、特性以及优化方式的计算数据。并以积累的数据为基础，建立数据库，进而利用人工智能技术从理论层面对新型二维材料进行寻觅，并模拟出其合成方法和特性优化方法。

(3) 多领域交叠式发展，将二维材料功能化、产品化。

多领域的交叉合作研究是将新型二维材料的功能化和产品化的基础。目前二维柔性材料在其应用领域，特别是产品化领域研究较少。但随着技术的发展，将这项技术与其他领域交叉结合，如太阳能转换、储能、显示、运动控制系统等，通过推动其功能化研究，尽早将性能更加优化、功能更加丰富的产品呈现在大众眼前。

参考文献：

[1] Li Z., Wu P., Wang C., et al. Low-Temperature Growth of Graphene by Chemical Vapor Deposition Using Solid and

Liquid Carbon Sources. ACS Nano, 2011, 5(4): 3385-3390.

[2] Shahrokh, Ahmadi, Reza, et al. Few-layer graphene growth from polystyrene as solid carbon source utilizing simple APCVD method. Physica E Low Dimensional Systems & Nanostructures, 2016, 81: 302-307.

[3] Lee E., Lee H. C., Jo S. B., et al. Heterogeneous Solid Carbon Source-Assisted Growth of High-QualityGraphene via CVD at Low Temperatures. Advanced Functional Materials, 2016, 26(4): 562-568.

[4] 马驰. 基于固态碳源的 CVD 法制备石墨烯薄膜研究. 西北大学. 2018.

[5] Wu J., Agrawal M., Becerril H. A, et al. Organic Light-Emitting Diodes on Solution-Processed Graphene Transparent Electrodes. ASC Nano, 2010, 4(1): 43-48.

[6] Han T. H., Lee Y., Choi M. R., et al. Extremely efficient flexible organic light-emitting diodes with modified graphene anode. Nature Photonics, 2012, 6(2): 105-110.

[7] Hwang J., Choi H. K., Moon J., et al. Blue fluorescent organic light emitting diodes with multilayered graphene anode. Materials Research Bulletin, 2012, 47(10): 2796-2799.

[8] Meyer J.,Kidambi P. R., Bayer B. C., et al. Metal Oxide Induced Charge Transfer Doping and Band Alignment of Graphene Electrodes for Efficient Organic Light Emitting Diodes. Scientific Reports, 2014, 4(1): 52-57.

[9] Wu T. L., Yeh C. H., Hsiao W. T., et al. High-Performance Organic Light-Emitting Diode withSubstitutionally Boron-Doped Graphene Anode. ASC Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(17): 14998-15004.

[10] Hwang J., Choi H.K., Moon J.,et al. Multilayered graphene anode for blue phosphorescent organic light emitting diodes. Applied Physics Letters, 2012, 100(13): 133304.

[11] Chang J. H., Lin W. H., Wang P. C., et al. Solution-processed transparent blue organic light-emitting diodes with graphene as the top cathode. Scientific Reports, 2015, 5: 9693.

[12] Zhu X. Z., Han Y. Y., Liu Y., et al. The application of single-layer graphene modified with solution-processed TiO_x and PEDOT:PSS as a transparent conductive anode in organic light-emitting diodes. Organic Electronics, 2013, 14(12): 3348-3354.

[13] Meng H., Luo J., Wang W., et al. Top-Emission Organic Light-Emitting Diode with a Novel Copper/Graphene Composite Anode. Advanced Functional Materials, 2013, 23(26): 3324-3328.

[14] Kwon K. C., Kim S., Kim C., et al. Fluoropolymer-assisted graphene electrode for organic light-emitting diodes. Organic Electronics, 2014, 15(11): 3154-3161.

[15] Wang D. Y., Huang I. S., Ho P. H., et al. Clean-Lifting Transfer of Large-area Residual-Free Graphene Films. Advanced Materials, 2013, 25(32): 4521-4526.

[16] Zhang Q., Chen S. F., Zhang S., et al. Negative differential resistance and hysteresis in graphene-based organic light-emitting devices. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6(8): 1926-1932.

[17] Han Y., Zhang L., Zhang X., et al. Clean surface transfer of graphene films via an effective sandwich method for organic light-emitting diode applications. Journal of Materials Chemistry C, 2013, 2(1): 201-207.

[18] Zhang Z., Du J., Zhang D., et al. Rosin-enabled ultraclean and damage-free transfer of graphene for large-area flexible organic light-emitting diodes. Nature Communications, 2017, 8: 14560.

[19] 陈佳熠, 陈启超, 李政雄,等. 基于硅烯和磷烯的新型纳米电子器件. 中国材料进展, 2018, 037(006): 448-452.

[20] Aufray B., Davila M. E., Ealet B., et al. Physics of Silicene Stripes [J]. Journal of Superconductivity & Novel Magnetism, 2009, 22(3): 259-263.

[21] Liu H., Neal A. T, Zhu Z., et al. Phosphorene: A New 2D Material with High Carrier Mobility. ACS Nano, 2014, 8: 4033-4041.

[22] 梅昌荣, 陈冠刚, 何茂权,等. 详解磷烯与柔性元器件. 印制电路信息, 2019, 027(011): 51-55.

[23] Tao L.,Cinquanta E., Chiappe D., et al. Silicene field-effect transistors operating at room temperature. Nature Nanotechnology, 2015, 10(3): 227-231.

[24] Kim J. S., Liu Y., Zhu W., et al. Toward air-stable multilayer phosphorene thin-films and transistors. Scientific Reports, 2015, 5: 8989.

[25] 余伟阳. 基于第 VA 族元素形成的二维材料的结构和性能研究. 郑州大学. 2017.

[26] 中科院物理所. 硅烯表面上单层石墨烯"保护层"的构筑及其异质结构研究获进展. 表面工程与再制造, 2018, 018(006): 63-64.

[27] 张秀梅. 二维层状过渡金属硫属化合物的可控生长及特性研究.江南大学. 2018.

[28] Yan Y., Xia B. Y., Ge X., et al. Ultrathin MoS2 Nanoplates with Rich Active Sites as Highly Efficient Catalyst for Hydrogen Evolution. Acs Applied Materials & Inter-

faces，2013，5(24)：12794-12798.

[29] **何敏敏. 二硫化钼/石墨烯纳米复合薄膜的非线性吸收特性研究.西北大学**. 2018.

[30] Ponomarenko L. A.，Geim A. K.，Zhukov A. A.，et al. Tunable metal-insulator transition in double-layer graphene heterostructures. Nature Physics，2011，7(12)：958-961.

[31] **申高亮. 二维材料异质结的能带结构及性能研究.北京工业大学**. 2018.

[32] Jariwala D.，Sangwan V. K，Lauhon L. J，Marks T. J，Hersam M. C，Emerging Device Applications for Semiconducting Two - Dimensional TransitionMetal Dichalcogenides. ACS Nano，2014，8(2)：1102-1120.

[33] Dattatray J Late，YiKai Huang，Bin Liu，et al. Sensing behavior of atomically thin-layered MoS2 transistors. ACS nano，2013，7(6)：4879-4891.

[34] Liu B.，Chen L.，Liu G.，et al. High-Performance Chemical Sensing Using Schottky-Contacted Chemical Vapor Deposition Grown MonolayerMoS 2 Transistors. ACS Nano，2014，8(5)：5304-5314.

[35] Perkins F. K，Friedman A. L，Cobas E.，et al. Chemical Vapor Sensing with Monolayer MoS2. Nano Letters，2013，13(2)：668-673.