



飞行器系列丛书

二维原子晶体材料和器件

TWO-DIMENSIONAL ATOMIC CRYSTAL
MATERIALS AND DEVICES

台国安 编著



科学出版社

飞行器系列丛书

二维原子晶体材料和器件

台国安 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书总结了近年来石墨烯及其他二维原子晶体材料的制备、器件构筑和性能调控方面的研究成果,较系统地介绍了二维原子晶体材料的基本物理特性。本书共分为6章,内容有石墨烯、二维过渡金属硫属化合物、黑磷、硼基及其他二维原子晶体材料(如硅烯、锗烯、砷烯等)的物理力学特性、制备方法及其在光电器件、传感器件、能量存储和转换器件方面的应用研究,并对这些新兴材料在航空航天领域的潜在应用进行了展望。

本书可供材料、化学、物理、力学、机械等专业的高年级本科生、研究生及相关人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

二维原子晶体材料和器件 / 台国安编著. — 北京 :
科学出版社, 2019. 6
(飞行器系列丛书)
ISBN 978-7-03-061355-4

I. ①二… II. ①台… III. ①纳米材料—研究 IV.
①TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 107435 号

责任编辑:许 健 / 责任校对:谭宏宇
责任印制:黄晓鸣 / 封面设计:殷 靓

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

南京展望文化发展有限公司排版

江苏凤凰数码印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2019 年 6 月第一次印刷 印张: 15 1/2

字数: 305 000

定价: 96.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

飞行器系列丛书

编委会

名誉主任：赵淳生 郭万林 聂 宏

主 任：夏品奇

副 主 任：姚卫星 裘进浩 高存法

委 员（按姓氏笔画排序）：

王立峰 王同光 邓宗白 史治宇 余雄庆 陆志良

陈少林 陈仁良 陈国平 金栋平 赵 宁 胡俊辉

袁慎芳 蒋彦龙

丛 书 序

飞行器是指能在地球大气层内外空间飞行的器械,可分为航空器、航天器、火箭和导弹三类。航空器中,飞机通过固定于机身的机翼产生升力,是数量最大、使用最多的航空器;直升机通过旋转的旋翼产生升力,能垂直起降、空中悬停、向任意方向飞行,在航空器中具有独特的不可替代的作用。航天器可绕地球飞行,也可远离地球在外太空飞行。1903年,美国的莱特兄弟研制成功了人类第一架飞机,实现了可持续、有动力、带操纵的飞行。1907年,法国的科尔尼研制成功了人类第一架直升机,实现了有动力的垂直升空和连续飞行。1957年,人类第一颗人造地球卫星由苏联发射成功,标志着人类由此进入了航天时代。1961年,苏联宇航员加加林乘“东方1号”飞船进入太空,实现了人类遨游太空的梦想。1969年,美国的阿姆斯特朗和奥尔德林乘“阿波罗11号”飞船登月成功,人类实现了涉足地球以外的另一个天体。这些飞行器的成功,实现了人类两千年以来的各种飞行梦想,推动了飞行器的不断进步。

目前,飞行器科学与技术快速发展,各种新构型、新概念飞行器层出不穷,反过来又催生了许多新的飞行器科学与技术,促使人们不断地去研究和探索新理论、新方法。出版“飞行器系列丛书”,将为人们的研究和探索提供非常有益的参考和借鉴,也将有力促进飞行器科学技术的进一步发展。

“飞行器系列丛书”将介绍飞行器科学与技术研究的最新成果与进展,主要由南京航空航天大学从事飞行器设计及相关研究的教授、专家撰写。南京航空航天大学已研制成功了30多种型号飞行器,包括我国第一架大型无人机、第一架通过适航审定的全复合材料轻型飞机、第一架直升机、第一架无人直升机、第一架微型飞行器等,参与了我国几乎所有重大飞行器型号的研制,拥有航空宇航科学与技术一级学科国家重点学科。在这样厚重的航空宇航学科基础上,撰写出“飞行器系列丛书”并由科学出版社出版,具有十分重要的学术价值,将为我国航空航天界献上一份厚重的礼物,为我国航空航天事业的发展作出一份重要的贡献。

祝“飞行器系列丛书”出版成功!

夏品奇

2017年12月1日于南京

前 言

自发现石墨烯以来,二维(2D)材料由于具有独特的新现象和新原理而引起了科学界和企业界的广泛关注。石墨烯具有优异的光、电、磁、热、力等性能,在透明电子器件、传感器件、太阳能电池、光电二极管及电热除冰等领域具有广阔的应用前景。石墨烯极高的载流子和双极性行为可用于未来的纳米电子器件。然而,石墨烯缺乏带隙严重制约了其在逻辑器件方面的应用,逻辑器件需要一个足够大的开关比和晶体管的导通电流,因此使用其他 2D 材料具有互补性。在这些材料中,二维半导体过渡金属硫属化合物备受关注,带隙可以通过成分或施加应变得以调控。黑磷从体材到单层均为直接带隙半导体,其在光电探测、高效能量转化和存储方面极具应用潜力,但是在环境中结构的不稳定严重阻碍了它的广泛应用。其他 2D 材料基于第 IV 族元素(如硅烯、锗烯和锡烯)以及基于第 V 族元素(如砷烯、锑烯)的理论预测和实验制备均有很大的进展,但是这些材料结构稳定性问题严重制约了其在该领域的发展。特别地,碳的紧邻元素——硼近年来已成为又一种明星材料,开始进入前沿科学人员的视野,对其丰富相结构的制备和性能研究需要更为深入的探索,在此基础上有望开发出下一代高性能的传感、探测、驱动、能量转换和存储等技术。

本书系统论述了二维原子晶体材料的基本物理性质、制备技术及器件应用方面的最新进展,旨在概述最新的 2D 材料理论和实验取得的进展。第 1 章对二维原子晶体材料进行简单概述,并对该领域进行总结和展望。第 2 章介绍石墨烯的研究进展,首先是石墨烯的发现和结构特点;其次介绍它的光学、电学、磁学、热学、力学等基本物理性质;再次描述石墨烯的各种制备方法和表征技术;最后讲述石墨烯在器件方面的应用。第 3 章讨论二维过渡金属硫属化合物的最新进展,从基本物理性质到制备方法再到场效应晶体管、光电探测器和能量转换器件、存储器件方面进行深入分析和讨论。第 4 章对黑磷的晶体结构特征、基本物理性质、制备方法和电学、能源器件进行深入总结和分析。第 5 章介绍硼烯的结构特征、性能及制备方法,并对潜在应用进行展望。第 6 章介绍其他二维原子晶体材料(如硅烯、锗烯、锡烯、砷烯、锑烯、铋烯)等结构特性和器件应用,以及双元素二维原子晶体(如六方氮化硼和氮化碳)方面的一些研究进展。

感谢南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室和纳智能材料器件教育部重点实验室领导和同事的关心和帮助,特别感谢南京航空航天大学航空

学院领导的大力支持。同时感谢本课题组的伍增辉、王睿、胡廷松、侯闯、郝金钱、盛利航、邵伟等研究生在整理和搜集资料工作中做出的努力。

限于作者的水平,书中难免有不妥之处,敬请专家和读者指正。

台国安

2019 年 1 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 二维原子晶体材料概述	4
1.3 本章小结	8
参考文献	9
第 2 章 石墨烯二维原子晶体材料和器件	11
2.1 引言	11
2.1.1 石墨烯的发现	12
2.1.2 石墨烯的结构特点	13
2.2 石墨烯的基本物理性质	14
2.2.1 光学性质	14
2.2.2 电学性质	15
2.2.3 磁学性质	18
2.2.4 热学性质	21
2.2.5 力学性质	22
2.3 石墨烯的制备	23
2.3.1 机械剥离法	24
2.3.2 SiC 外延生长法	25
2.3.3 氧化还原法	27
2.3.4 液相剥离法	30
2.3.5 化学气相沉积法	31
2.3.6 其他制备方法	36
2.4 石墨烯的表征	36
2.4.1 光学显微镜	36
2.4.2 拉曼光谱	38
2.4.3 扫描电子显微镜	39
2.4.4 透射电子显微镜	40
2.4.5 原子力显微镜	42

2.5	石墨烯器件应用	43
2.5.1	场效应晶体管	43
2.5.2	光电探测器	46
2.5.3	太阳能电池	51
2.5.4	气体传感器	53
2.5.5	能量储存和转换器件	55
2.6	石墨烯在航空航天领域的应用	59
2.7	本章小结	61
	参考文献	61
第3章	二维过渡金属硫属化合物原子晶体材料和器件	68
3.1	引言	68
3.2	TMDCs 的晶体结构	68
3.3	TMDCs 的基本物理性质	70
3.3.1	电学性能	70
3.3.2	光学性能	72
3.3.3	力学性能	74
3.3.4	热学性能	74
3.4	TMDCs 制备方法	75
3.4.1	机械剥离法	75
3.4.2	液相剥离法	76
3.4.3	化学气相沉积法	77
3.4.4	电化学沉积法	81
3.4.5	分子束外延法	82
3.5	2D TMDCs 电子器件应用	83
3.5.1	场效应晶体管	83
3.5.2	双极性晶体管	89
3.5.3	太阳能电池	91
3.5.4	发光二极管	93
3.5.5	光电探测器	94
3.5.6	激光器	96
3.6	2D TMDCs 能量转换器件和存储器件应用	97
3.6.1	能量转换器件	98
3.6.2	可充电能量储存器件	102

3.6.3 微型能源器件·····	107
3.7 本章小结·····	108
参考文献·····	108
第4章 黑磷二维原子晶体材料和器件 ·····	127
4.1 引言·····	127
4.2 黑磷的晶体结构特征·····	128
4.3 黑磷的基本物理性质·····	130
4.3.1 黑磷的电学性质·····	130
4.3.2 黑磷的光学性质·····	132
4.3.3 黑磷的磁学性质·····	135
4.3.4 黑磷的热学性质·····	136
4.3.5 黑磷的力学性质·····	137
4.4 黑磷的制备方法·····	137
4.4.1 体相黑磷的制备·····	137
4.4.2 二维黑磷的制备·····	138
4.5 黑磷的器件应用·····	143
4.5.1 黑磷的电输运·····	143
4.5.2 黑磷光电器件·····	144
4.5.3 黑磷场效应晶体管·····	148
4.5.4 黑磷存储器·····	151
4.5.5 黑磷生化传感器·····	152
4.5.6 黑磷能量转换器件·····	154
4.6 本章小结·····	156
参考文献·····	156
第5章 硼基二维原子晶体材料和器件 ·····	170
5.1 引言·····	170
5.2 硼烯的研究历程·····	170
5.2.1 硼团簇·····	172
5.2.2 硼烯的结构·····	174
5.3 硼烯的性质·····	180
5.3.1 二维硼的电学性质·····	180
5.3.2 二维硼的磁学性质·····	182
5.3.3 二维硼的光学性质·····	183

5.3.4	二维硼的力学性能	184
5.3.5	二维硼的化学性能	184
5.4	硼烯的制备	185
5.4.1	硼纳米结构的制备	185
5.4.2	硼烯的制备方法	186
5.5	硼烯的潜在应用	189
5.5.1	二维硼在光电器件方面的应用	189
5.5.2	二维硼在能量存储与转换器件方面的应用	190
5.5.3	二维硼的其他应用	192
5.6	本章小结	192
	参考文献	193
第6章	其他二维原子晶体材料	202
6.1	引言	202
6.2	单元素二维原子晶体	202
6.2.1	硅烯	202
6.2.2	锗烯	207
6.2.3	锡烯	211
6.2.4	砷烯、锑烯和铋烯	213
6.3	双元素二维原子晶体	215
6.3.1	六方氮化硼	215
6.3.2	六方结构氮化碳	220
6.4	本章小结	225
	参考文献	225
	常用物理常数表	235

第1章 绪 论

1.1 引 言

自人类文明诞生以来,材料就一直起着推动社会发展的重要作用。从各个文明时代的命名,即石器时代、青铜器时代、铁器时代等,可以清楚地认知到材料科学的发展对人类文明进步的重要性。18 世纪后的第一次工业革命中,以英国人詹姆斯·瓦特改良蒸汽机为重要节点,人类生产方式由手工生产逐渐转变为机器生产,促进了钢铁工业的崛起,同时煤炭的使用和冶铁工业带来了工业革命持续性蓬勃发展的物质基础。19 世纪后的第二次工业革命,以电灯的发明为标志,在化学、电气、石油和钢铁等领域展开了规模浩大的创新运动。特别是化工行业的发展极大地丰富了人们的生活所需,改变了人们的生活方式,同时使商品的生产成本大幅降低。第三次工业革命又称信息技术革命,是目前人类历史上影响最为深远的科技革命,以硅为基础展开的半导体材料彰显了自己的竞争能力以及在工业革命中不可撼动的基础地位,成为目前信息社会的物质基础。由此可见,在每一次工业革命中材料科学都处于重要的基础性地位,而工业革命带来文明的每次更迭都是人类生产力的一次极大飞跃,材料科学的发展起推动人类文明进步的重要作用。在人类社会的发展过程中,对事物的认知是从简单到复杂,再从复杂到简单的过程。材料科学的发展是从多元素到单元素的认知及开发利用的过程,如图 1.1 所示。

目前,材料、能源、信息已成为当代社会文明和国民经济的三大支柱。其中,材料是社会进步和科学技术发展的物质基础,也是科技进步的核心,对人类的影响是深远的。当今世界正面临着多种全球性问题的严峻考验,人口问题、环境问题和资源问题凸显,而新材料技术的发展很有可能是解决这些问题的关键。与此同时,新材料技术正在改变着人类目前的生产、生活方式,新材料技术的发展给人类生活带来了极大的便利。而以纳米材料为首的新材料研究无疑是当代最为重要的。纳米科学已然处于材料科学、凝聚态物理等研究领域的前沿地位。21 世纪人类已进入一个崭新的科技时代,即纳米时代。

广义上来说,纳米材料是三维空间中至少有一维处于纳米尺寸范围($1 \sim 100 \text{ nm}$)或由该尺寸范围的物质为基本单元所组成的材料的总称。纳米材料可分为零维纳米材料、一维纳米材料、二维纳米材料、三维纳米材料。其中,三维尺寸均

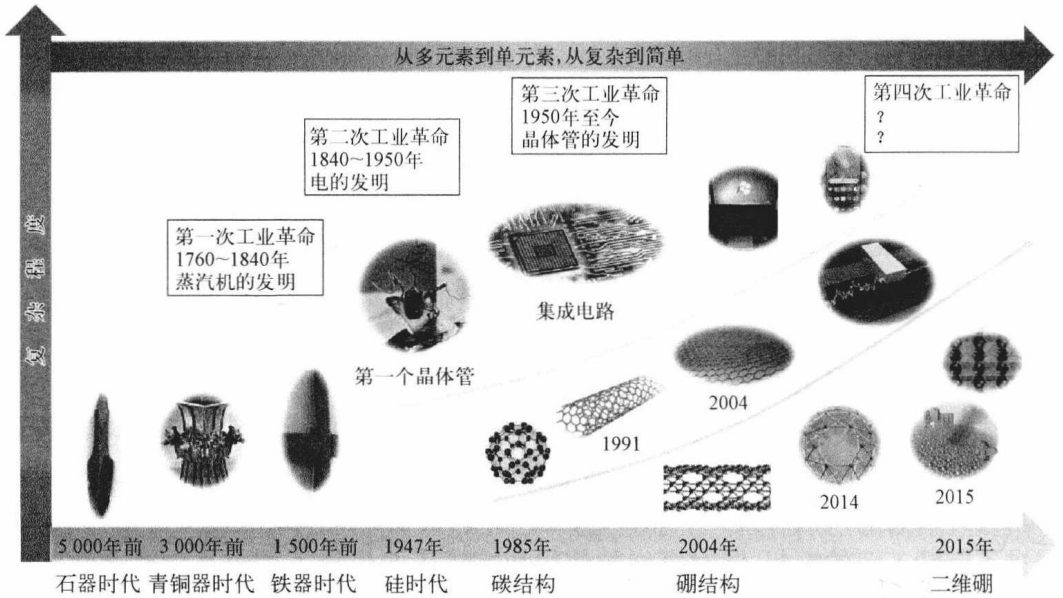


图 1.1 材料科学与工业革命

为纳米数量级的纳米粒子称为零维纳米材料(电子无法自由运动);纳米纤维等线状材料称为一维纳米材料;纳米片或纳米带、薄膜等可称为二维纳米材料;由零维纳米材料、一维纳米材料或二维纳米材料中的一种或多种基本结构单元组成的复合材料可以称为三维纳米材料。当物质的尺寸处于纳米尺寸范围时,将会表现出与体相截然不同的性质,并且很多适用于体相材料的物理理论无法揭示二维材料的本质,如块状晶体材料具有平移对称性和无限尺寸的假设不再成立。而纳米材料具有独特的表面效应、小尺寸效应、库仑阻塞效应、宏观量子隧道效应和量子限域效应等,使得纳米材料在光、电、磁、热、力等方面都具有异于块体材料的奇特性。

虽然纳米材料的使用可以追溯到公元前 600 年,但一直没有对其进行明确定义和针对性研究。1959 年,美国物理学家理查德·费曼在加州理工学院举行的美国物理学会会议上,进行了著名的演讲“*There’s Plenty of Room at the Bottom*”,在这次会议上他提出:从单个分子甚至原子开始进行组装,以达到设计要求。他的预想被视为纳米技术概念的灵感来源,同时对纳米材料的研究和发展必然需要相应的、可达纳米尺寸的观测仪器设备。1981 年,IBM 瑞士苏黎世研究实验室的 Gerd Binnig 和 Heinrich Rohrer 发明了第一台扫描隧道显微镜(*scanning tunneling microscope*, STM),并获得了 1986 年诺贝尔物理学奖。扫描隧道显微镜使人类可以观察和定位单个原子,揭示了一个可见的原子及分子世界,这极大地促进了纳米技术的发展。Donald Mark Eigler 首次成功地使用扫描隧道显微镜操纵原子,他使用 35 个氩原子拼出了“IBM”图标。1986 年,IBM 公司的 Gerd Binnig 和斯坦福大

学的 Quate 在 STM 的基础上发明了原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)表面观测设备。可以说,扫描隧道显微镜和原子力显微镜这两种扫描探针技术直接促成了纳米时代的到来。1990 年 7 月,第一届国际纳米科学技术会议在美国巴尔的摩召开,会议上把纳米材料科学正式作为材料科学的一个分支,这次会议的召开标志着纳米科学技术的正式诞生。

近年来,纳米材料无疑是最热的科学研究领域之一。富勒烯(fullerene)作为碳的同素异形体,是一种完全由碳原子组成的中空分子。其形式可以为空心球、椭球、管等。1985 年, Sir Harold Kroto 等首次发表并确认了第一个富勒烯大家族的分子^[1],即类似足球形状的 C_{60} (又称为巴基球),富勒烯的发现揭开了碳纳米管的序幕,三人也因此获得了 1996 年诺贝尔化学奖。随后,圆柱形的富勒烯[又称碳纳米管(carbon nanotube, CNT)]在 1991 年被 Iijima 报道合成^[2]。碳纳米管拥有巨大的长径比且具有高模量、高强度等优异的力学性能,是高强度的纤维材料,被称为“超级纤维”。还可以在其空心内部填充其他物质或制作成复合材料。

在物理、生物医学领域,1988~1989 年, Albert Fert 和 Peter Grünberg 分别独立发现巨磁阻效应(giant magneto-resistance, GMR)^[3, 4],巨磁阻效应的发现立刻引起了科学界的广泛关注。磁阻效应简单来说是指材料的电阻随外加磁场的变化而改变的效应,而巨磁阻效应指的是在磁性材料和非磁性材料相间的薄膜层结构中,由电子的自旋方向和铁磁性材料薄膜层的磁化方向之间的关系引起电阻的上升或大幅度的减小,而这种电阻的变化带来的电流变化可以定义为逻辑信号中的 0 和 1,因此巨磁阻效应可以利用磁性存储数据,大幅度提高了数据存储的密度,具有极高的商业应用价值。巨磁阻效应的发现,使他们共同获得 2007 年的诺贝尔物理学奖。此外,2014 年的诺贝尔化学奖颁给了 Willia E. Moerner、Eric Betzig 和 Stefan W. Hell 三人,以表彰他们在超分辨率荧光显微技术领域的成就。一直以来,人们认为光学显微镜无法获得比光波半波长更高的分辨率,然而在荧光分子的作用下,光学显微镜的分辨率进入了纳米维度。2016 年,诺贝尔化学奖又颁给了微观领域的突破性研究, Jean-Pierre Sauvage、J. Fraser Stoddart 和 Bernard L. Feringa 三人因“发明了行动可控、在给予能源后可执行任务的分子机器”而共同获得诺贝尔化学奖。这项突破性的研究成果将机器超微型化,有望在医学领域大有作为。

由上述可知,纳米技术的相关研究正处在这个时代的前沿领域中。未来,纳米技术很有可能会颠覆人们的传统观念和生活方式,带来第四次工业革命。

目前,纳米材料合成制备、性能和器件的研究正处于飞速发展中,而纳米材料中二维原子晶体材料的研究是当前最为重要的研究方向之一。众所周知,材料的结构决定了材料所展现的性质。二维原子晶体材料,即单层或少数原子层厚度的二维晶体材料,其厚度在原子尺度上,这种超薄的结构使得二维材料展示出许多前所未有的独特物理、化学性质,迅速成为科学研究的热点。二维材料普遍拥有如下

性质: ① 二维材料由于电子运动受限, 与体相材料中电子的运动有所不同, 具有宏观量子隧道效应等特殊效应, 是凝聚态物理中研究的热点, 并且其独特的电子性质在电子/光电信息领域有极大的应用空间; ② 二维材料横向尺寸较大, 有较大的比表面积, 其表面原子所处的晶体场环境与内部原子不同, 表面原子存在许多悬键, 暴露出更多的活性位点, 不饱和的性质使其具有很高的活性, 目前在电催化、电化学能源存储、电化学传感器上都展示出极大的应用价值; ③ 二维材料平面内共价键强, 具有良好的导电性、出色的力学性能兼具较好的柔韧性, 使其在可穿戴电子器件领域具有重要的应用价值。此外, 不同二维材料堆叠形成异质结, 可以方便调控其物理力学性能。而二维材料由于具有极高的原子暴露面积, 可以直接进行表面修饰改性或元素掺杂, 以实现功能化应用。

综上所述, 在目前追求器件微型化、功能多样化、处理速度更快等目标下, 二维材料从众多类型中脱颖而出, 成为材料研究的最佳选择。基于此, 本书挑选出近十年来具有代表性的一些二维材料, 即第 2 章所述石墨烯 (graphene)、第 3 章二维过渡金属硫属化合物 (transition-metal dichalcogenides, TMDCs)、第 4 章黑磷 (black phosphorus, BP)、第 5 章硼基 (boron) 及第 6 章其他二维原子晶体材料, 从材料的制备、性质、表征及器件应用等方面进行全面介绍。

1.2 二维原子晶体材料概述

2004 年, 英国曼彻斯特大学物理学家 Andre Geim 和 Konstantin Novoselov 等以机械剥离的方法成功制备出石墨烯, 并发现了石墨烯不同寻常的电学性质^[5]。随着研究的深入, 科学家发现石墨烯的厚度为 A4 纸厚度的十万分之一, 在白光光谱中仅有 2.3% 的吸收率, 近似透明^[6]。石墨烯具有如下特性: 显著的量子霍尔效应^[7]、超大比表面积、极高的杨氏模量、极高的载流子迁移率和高的热导率。石墨烯的迁移率是商用硅材料迁移率的 140 倍, 高于目前已知的所有半导体材料。它的力学性能十分优异, 并且其热导率要高于目前公认的自然材料中热导率最高的金刚石两倍之多^[8]。诸多性质意味着石墨烯在光电信息、能量转换和存储器件、化学传感器、生物医学等领域均极具应用前景, 石墨烯的发现者也因此在 2010 年获得了诺贝尔物理学奖。

随着对石墨烯的不断探索, 人们开始意识到当材料进入“低维世界”后, 它会呈现不同于体相的各种优异特性。二维材料拥有高结晶性与近乎完美的晶格结构、原子级的厚度、高的机械拉伸强度及光学透明度, 并且表现出优异的电荷传输性质和自旋极化性质等。低维材料向人们展示了另一个神秘、充满惊喜又充满挑战的领域。随后, 二维材料在科研界形成了爆发式的研究浪潮。研究人员开始思考其他类似石墨具有强面内键、弱层间范德瓦耳斯力的层状材料是否也能通过剥

离获得性能非同寻常的二维材料。令科学家兴奋的是,二维过渡金属硫属化合物、黑磷、六方氮化硼等层状材料都被成功地剥离出单层和少数层,如图 1.2 所示。不仅如此,其他非层状材料(如硼基二维材料等)也被成功合成。而探索新型二维材料的同时,科学家还发展了各种二维材料的制备工艺,如化学气相沉积法、液相剥离法、氧化还原法等。通过机械剥离法、化学气相沉积法等制备方法可以得到质量较高的二维材料,可用于实验室开发高性能器件研究。而基于溶液的喷涂、旋涂等制备工艺促进了二维材料走向大规模商业化应用。

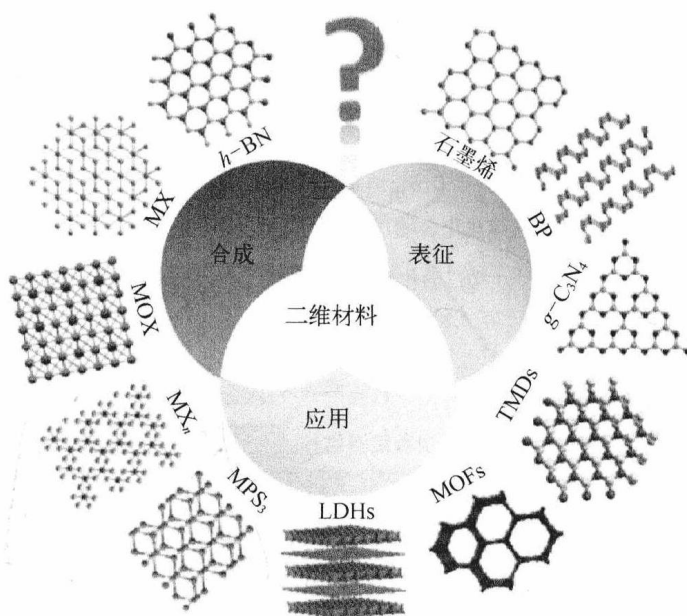


图 1.2 不同二维材料及其结构^[9]

在成功制备的基础上,科学家探索了二维材料在各种器件方面的应用。在光学领域,所有二维半导体所覆盖的宽带隙范围可以用于光学和光电子学,如图 1.3 所示。图 1.3 中的水平条代表通过层数的改变、材料的应变或合金化处理能够使材料得以跨越的带隙值范围。从图 1.3 可以看出,二维材料可以用于热成像(检测超过 1 200 nm 的波长)、光纤通信(应用 1 200~1 550 nm 内的波长)、光伏发电(能够吸收 700~1 000 nm 波长光的半导体),以及用于显示照明的发光二极管(能够发射处于 390~700 nm 波长内光子的半导体)^[10]。在电学领域,特别是晶体管领域,随着目前基于硅器件尺寸的不断减小,物理特性将发生变化,例如,可能产生的量子隧道效应将会使得晶体管漏电严重。因此,下一代高性能半导体器件要求设计新的几何形状或使用新的材料,以应对晶体管产业不断发展的巨大挑战。而二维材料可以提供极薄的“沟道”,使得在原子水平上控制沟道厚度转化为如何改进对沟道势垒的栅极控制和如何减少短沟道效应。此外,二维材料可以制成高效和更

小的电子器件,满足了电子产业对器件更高性能和更低功耗两个重要指标的基本要求。使用二维材料还可以制成大面积、柔性电子器件,可以应用于可弯曲的显示器、“电子纹身”传感器、可穿戴设备等。特别地,二维材料还可应用到航空航天领域,例如,应用于红外探测器中以用于战略预警、战术侦察等;吸收雷达波作为微波吸收材料,将电磁波吸收并转化为热能;和飞行器的蒙皮结合作为传感器接受外界刺激,反馈飞行过程中的数据;作为功能性涂层,用于防腐蚀、延缓老化或防机翼结冰等方面。

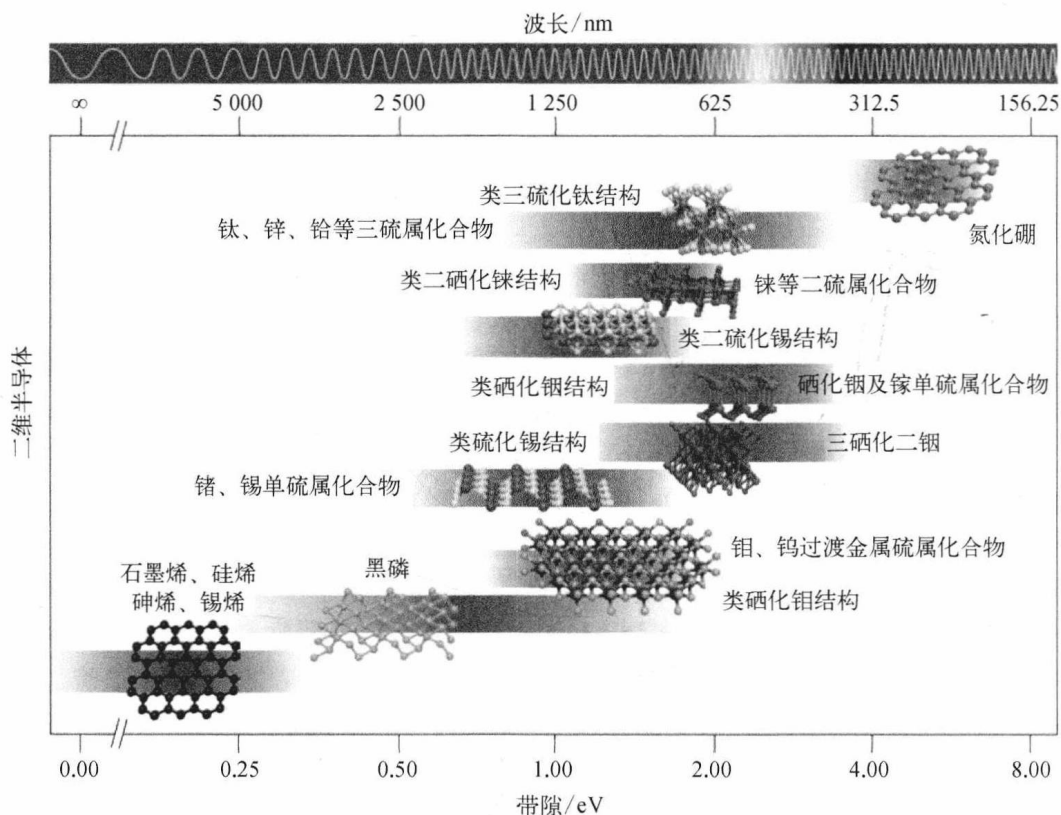


图 1.3 比较不同二维半导体材料的带隙值^[10]

接下来将分别简单介绍本书各章中的材料。第 2 章中的石墨烯为二维材料中的“明星材料”,它开启了二维材料的研究之路。图 1.4 中,从零维、一维、二维和三维的角度分类碳各种同素异形体,其结构之间相互联系。碳元素本身就是极其重要的,它是有机化学中的主要组成元素,与人类本身息息相关。无论是零维的富勒烯、一维的碳纳米管、二维的石墨烯,还是三维的金刚石都曾引起人们的广泛关注。而二维的石墨烯由于其独特的性质成为碳家族中的“明星材料”。目前,石墨烯的相关研究已越来越成熟,在催化、能量转换和存储、传感器、生物医学方面都得到了广泛应用。