

低维材料与器件丛书

成会明 总主编

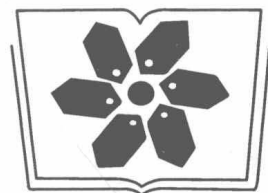
LOW-DIMENSIONAL DIAMOND MATERIALS
AND OPTOELECTRONIC DEVICES

低维度金刚石 及其光电器件

朱嘉琦 代兵 韩杰才 著



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

低维材料与器件丛书

成会明 总主编

低维度金刚石及其光电器件

朱嘉琦 代 兵 韩杰才 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书为“低维材料与器件丛书”之一。全书主要介绍从零维到二维的含有 sp^3 杂化结构的碳质材料,包括本征非晶金刚石薄膜、掺杂非晶金刚石薄膜、纳米晶金刚石材料的制备方法、性能表征及其在光电器件方面的应用等内容。不仅简要介绍了低维度金刚石发展概况,而且详细介绍了在低维度金刚石中具有代表性的纳米金刚石及非晶金刚石的制备及表征方法,最后还分别阐释了纳米金刚石和非晶金刚石在声波增频、光伏发电、电化分析等光电器件领域的创新性成果。内容涵盖了典型低维度金刚石的合成手段、性能检测、器件应用、技术难点、最新成果及发展趋势。

本书可供从事低维度金刚石研究的专业技术人员,高等院校、院所从事相关研究与教学工作的教师、研究生、高年级本科生,以及相关领域的科研、工程技术人员参考学习。

图书在版编目(CIP)数据

低维度金刚石及其光电器件/朱嘉琦,代兵,韩杰才著.

—北京:科学出版社,2018.6

(低维材料与器件丛书/成会明总主编)

ISBN 978-7-03-058069-6

I. ①低… II. ①朱… ②代… ③韩… III. ①金刚石-光电器件-研究 IV. ①P578.1②TN15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 132885 号

责任编辑:翁靖一/责任校对:樊雅琼

责任印制:肖 兴/封面设计:耕者

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018 年 6 月第一次印刷 印张:21 1/4

字数:407 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

中国科学院院长白春礼院士题

论低维并筑器件
致广大而尽精微

白春礼

戊戌暮月

低维材料与器件丛书

编委会

总主编：成会明

常务副总主编：俞书宏

副总主编：李玉良 谢毅 康飞宇 谢素原 张跃

编委(按姓氏汉语拼音排序)：

胡文平	康振辉	李勇军	廖庆亮	刘碧录	刘畅
刘岗	刘天西	刘庄	马仁敏	潘安练	彭海琳
任文才	沈洋	孙东明	汤代明	王荣明	伍晖
杨柏	杨全红	杨上峰	杨震	张锦	张立
张强	张莹莹	张跃钢	张忠	朱嘉琦	邹小龙

总 序

人类社会的发展水平，多以材料作为主要标志。在我国近年来颁发的《国家创新驱动发展战略纲要》、《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》、《“十三五”国家科技创新规划》和《中国制造2025》中，材料都是重点发展的领域之一。

随着科学技术的不断进步和发展，人们对信息、显示和传感等各类器件的要求越来越高，包括高性能化、小型化、多功能、智能化、节能环保，甚至自驱动、柔性可穿戴、健康全时监/检测等。这些要求对材料和器件提出了巨大的挑战，各种新材料、新器件应运而生。特别是自20世纪80年代以来，科学家们发现和制备出一系列低维材料(如零维的量子点、一维的纳米管和纳米线、二维的石墨烯和石墨炔等新材料)，它们具有独特的结构和优异的性质，有望满足未来社会对材料和器件多功能化的要求，因而相关基础研究和应用技术的发展受到了全世界各国政府、学术界、工业界的高度重视。其中富勒烯和石墨烯这两种低维碳材料还分别获得了1996年诺贝尔化学奖和2010年诺贝尔物理学奖。由此可见，在新材料中，低维材料占据了非常重要的地位，是当前材料科学的研究前沿，也是材料科学、软物质科学、物理、化学、工程等领域的重要交叉，其覆盖面广，包含了很多基础科学问题和关键技术问题，尤其在结构上的多样性、加工上的多尺度性、应用上的广泛性等使该领域具有很强的生命力，其研究和应用前景极为广阔。

我国是富勒烯、量子点、碳纳米管、石墨烯、纳米线、二维原子晶体等低维材料研究、生产和应用开发的大国，科研工作者众多，每年在这些领域发表的学术论文和授权专利的数量已经位居世界第一，相关器件应用的研究与开发也方兴未艾。在这种大背景和环境，及时总结并编撰出版一套高水平、全面、系统地反映低维材料与器件这一国际学科前沿领域的基础科学原理、最新研究进展及未来发展和应用趋势的系列学术著作，对于形成新的完整知识体系，推动我国低维材料与器件的发展，实现优秀科技成果的传承与传播，推动其在新能源、信息、光电、生命健康、环保、航空航天等战略新兴领域的应用开发具有划时代的意义。

为此，我接受科学出版社的邀请，组织活跃在科研第一线的三十多位优秀科学家积极撰写“低维材料与器件丛书”，内容涵盖了量子点、纳米管、纳米线、石墨烯、石墨炔、二维原子晶体、拓扑绝缘体等低维材料的结构、物性及其制备方法，并全面探讨了低维材料在信息、光电、传感、生物医用、健康、新能源、环

环境保护等领域的应用，具有学术水平高、系统性强、涵盖面广、时效性高和引领性强等特点。本套丛书的特点鲜明，不仅全面、系统地总结和归纳了国内外在低维材料与器件领域的优秀科研成果，展示了该领域研究的主流和发展趋势，而且反映了编著者在各自研究领域多年形成的大量原始创新研究成果，将有利于提升我国在这一前沿领域的学术水平和国际地位、创造战略新兴产业，并为我国产业升级、提升国家核心竞争力提供学科基础。同时，这套丛书的成功出版将使更多的年轻研究人员和研究生获取更为系统、更前沿的知识，有利于低维材料与器件领域青年人才的培养。

历经一年半的时间，这套“低维材料与器件丛书”即将问世。在此，我衷心感谢李玉良院士、谢毅院士、俞书宏教授、谢素原教授、张跃教授、康飞宇教授、张锦教授等诸位专家学者积极热心的参与，正是在大家认真负责、无私奉献、齐心协力下才顺利完成了丛书各分册的撰写工作。最后，也要感谢科学出版社各级领导和编辑，特别是翁靖一编辑，为这套丛书的策划和出版所做出的一切努力。

材料科学创造了众多奇迹，并仍然在创造奇迹。相比于常见的基础材料，低维材料是高新技术产业和先进制造业的基础。我衷心地希望更多的科学家、工程师、企业家、研究生投身于低维材料与器件的研究、开发及应用行列，共同推动人类科技文明的进步！



成会明

中国科学院院士，发展中国家科学院院士

清华大学，清华-伯克利深圳学院，低维材料与器件实验室主任

中国科学院金属研究所，沈阳材料科学国家研究中心先进炭材料研究部主任

Energy Storage Materials 主编

SCIENCE CHINA Materials 副主编

前 言

低维度金刚石，主要是指从零维到二维的含 sp^3 杂化结构的碳质材料，不仅保持了高热导率、高迁移率、高硬度等优异性能，还具有量子光源、界面友好等特殊性能。本书选取非晶金刚石薄膜(tetrahedral amorphous carbon, 简称 ta-C)作为二维金刚石代表, 纳米金刚石(nanocrystalline diamond, NCD)作为一维金刚石代表, 着重介绍非晶金刚石薄膜、纳米金刚石材料的制备、性质及其光电器件应用。

非晶金刚石薄膜的 sp^3 杂化含量在 50%以上, 具有较高的四配位杂化含量, 因此非晶金刚石具有优异的光热稳定性和机械性能。非晶金刚石的应用非常广泛, 涉及航空航天、生物电极、声波器件、电子信息、光学等领域。纳米金刚石不仅具有金刚石固有的特性, 还具有纳米材料的优异性能, 如比表面积大、晶格常数大、德拜温度低等, 在机械、电子、化工、医疗等领域中得到广泛应用。近年来, 国内掀起了对低维度金刚石材料, 包括非晶金刚石薄膜及纳米金刚石的研究热潮, 很多高校及科研院所都开展了对低维度金刚石材料的基础理论及应用开发研究。但是, 随着时间的推移, 非晶金刚石及纳米金刚石在很多领域的应用有了新的进展, 这些进展在之前的专著中未涉及或未详细介绍。并且, 国内尚未出现论述低维度金刚石材料制备及先进应用的专著。为了推动低维度金刚石研究及应用技术的发展, 满足相关从业人员全面了解该领域发展趋势的需求, 我们力求以全面、新颖的视角介绍低维度金刚石的制备、表征及其在声波增频、光伏发电、电化学分析等光电器件领域的创新性成果。

本书由朱嘉琦、代兵、韩杰才负责编写框架的设定、章节的撰写以及统稿和审校。全书共分 7 章: 第 1 章, 低维度金刚石概述; 第 2 章, 非晶金刚石薄膜的制备及力学性能; 第 3 章, 纳米金刚石晶体; 第 4 章, 非晶金刚石薄膜太阳电池; 第 5 章, 非晶金刚石生物电极; 第 6 章, 非晶金刚石的声波器件应用; 第 7 章, 金刚石色心: 性质、合成及应用。内容丰富, 逻辑结构清晰明了, 首先对低维度金刚石的发展情况进行了简要介绍, 其次详细介绍了在低维度金刚石中具有代表性的纳米金刚石及非晶金刚石的制备及表征方法, 最后分别阐释了纳米金刚石和非晶金刚石在光伏发电、电化学分析、声波增频等光电器件领域的创新性成果。

本书主要素材来自作者课题组十多年来的理论及应用研究成果, 特别感谢团队中檀满林、刘爱萍、陆晓欣、程坤、王建东、王赛、贾振宇等人的科研贡献和支持。在本书撰写过程中, 得到了“低维材料与器件丛书”编委会专家成会明院

士的鼓励和指导，在此表示感谢；为了尽可能做到全书脉络清晰、易于理解，并尽力反映出该领域的先进水平，我们也总结了国内外相关科研人员的研究心血，在此向相关研究者表示感谢；其中，课题组许多研究生(姚凯丽、刘本建、吕致君、薛晶晶、王伟华、刘雪冬、舒国阳、赵继文)也积极参与了本书资料的搜集和整理工作，对他们的努力付出深表感谢。此外，还要感谢科学出版社的相关领导和编辑对本书出版的支持和帮助！

最后，诚挚感谢国家杰出青年科学基金项目(红外增透保护薄膜及金刚石单晶，编号：51625201)；国家优秀青年科学基金项目(碳素材料与超硬材料，编号：51222205)；国家自然科学基金面上项目(四面体非晶碳为固贴式薄膜体声波谐振器布喇格反射栅高声阻抗材料的研究，编号：51072039；掺磷非晶金刚石作为生物电极材料的研究，编号：50972031)及青年科学基金项目(掺硼非晶金刚石薄膜为非晶硅太阳能电池窗口层材料的研究，编号：50602012)对本书出版的支持。

由于低维度金刚石及其光电器件发展迅速，相关理论研究不断深入，应用领域不断扩展，而且涉及固体物理、等离子体技术、生物医学、材料科学、量子光学等多个学科，限于我们的时间和精力，书中难免出现疏漏和不足之处，敬请广大读者批评指正！

著 者

2018年3月

于哈尔滨工业大学

目 录

总序

前言

第1章 低维度金刚石概述	1
1.1 非晶金刚石薄膜	1
1.1.1 类金刚石简介	1
1.1.2 非晶金刚石概述	3
1.1.3 非晶金刚石性能及应用	4
1.2 纳米金刚石	6
1.2.1 金刚石简介	6
1.2.2 纳米金刚石概述	7
1.2.3 纳米金刚石性质及应用	7
参考文献	10
第2章 非晶金刚石薄膜的制备及力学性能	12
2.1 非晶金刚石薄膜的制备方法	12
2.1.1 离子束辅助沉积	12
2.1.2 质量选择离子束沉积	12
2.1.3 脉冲激光熔敷	13
2.1.4 过滤阴极真空电弧沉积	13
2.2 非晶金刚石薄膜的沉积机制	13
2.2.1 薄膜横截面层状密度分布	14
2.2.2 非晶金刚石薄膜的结构模型	18
2.2.3 薄膜的表面形态	21
2.2.4 薄膜的表面成分	23
2.3 非晶金刚石薄膜的热稳定性	24
2.3.1 空气环境中薄膜的热稳定性	25
2.3.2 真空环境中薄膜的热稳定性	29
2.4 多层非晶金刚石薄膜的结构与应力分析	33

2.4.1	多层膜的应力理论	34
2.4.2	多层非晶金刚石薄膜的微结构	35
2.4.3	多层非晶金刚石薄膜的应力分析	39
2.5	多层非晶金刚石薄膜的机械性能研究	41
2.5.1	硬度与杨氏模量	42
2.5.2	断裂性能	44
2.5.3	耐划擦与附着性能	47
2.5.4	子膜层厚度对多层膜机械性能的影响	50
2.6	小结	57
	参考文献	57
第3章	纳米金刚石晶体	62
3.1	纳米金刚石简介	63
3.1.1	纳米金刚石的分类	63
3.1.2	纳米金刚石的稳定性	65
3.2	纳米金刚石的制备	66
3.2.1	纳米金刚石颗粒的制备	67
3.2.2	超纳米金刚石薄膜的制备	70
3.3	纳米金刚石的表征	72
3.3.1	X射线衍射	72
3.3.2	拉曼散射	73
3.3.3	高分辨透射电子显微镜	73
3.3.4	可见光和远红外光谱	74
3.3.5	电子能量损失能谱	74
3.4	纳米金刚石的应用	74
3.4.1	超纳米金刚石在微机电系统中的应用	75
3.4.2	n型超纳米金刚石薄膜的应用	81
3.4.3	碳纳米管/超纳米金刚石复合物作为潜在的高效率高温热电材料	84
3.5	前景与展望	86
	参考文献	87
第4章	非晶金刚石薄膜太阳能电池	93
4.1	掺硼非晶金刚石的制备	94
4.2	掺硼非晶金刚石的结构特征	96
4.2.1	组分分析	96

4.2.2	表面形貌	98
4.2.3	原子结构	99
4.2.4	价带结构	109
4.2.5	组态分析	112
4.3	掺硼非晶金刚石的力学性能及热稳定性	115
4.3.1	薄膜应力	115
4.3.2	薄膜密度	117
4.3.3	硬度和杨氏模量	120
4.3.4	热稳定性	122
4.4	掺硼非晶金刚石的光电性能	127
4.4.1	光学性能	127
4.4.2	电学性能	133
4.5	非晶金刚石薄膜的光伏应用	137
4.5.1	电池制备工艺流程	137
4.5.2	掺硼非晶金刚石为窗口层的非晶硅太阳能电池性能	138
4.6	小结	147
	参考文献	147

第5章 非晶金刚石生物电极 152

5.1	掺磷非晶金刚石概述	153
5.1.1	掺磷非晶金刚石的研究进展	153
5.1.2	掺磷非晶金刚石的制备工艺	155
5.1.3	掺磷非晶金刚石的实验表征	158
5.2	掺磷非晶金刚石的结构和力学性能	160
5.2.1	掺磷非晶金刚石的结构	160
5.2.2	掺磷非晶金刚石的机械性能及应力	174
5.3	掺磷非晶金刚石的电学和电化学性能	178
5.3.1	掺磷非晶金刚石的电学性能	178
5.3.2	掺磷非晶金刚石的电化学性能	183
5.4	掺磷非晶金刚石的生物相容性及耐腐蚀行为	192
5.4.1	掺磷非晶金刚石的生物相容性	192
5.4.2	掺磷非晶金刚石的耐腐蚀行为	200
5.5	掺磷非晶金刚石的表面金纳米粒子修饰	203
5.5.1	金纳米粒子的电化学沉积	203
5.5.2	金纳米粒子的成核机理	207

5.5.3 金纳米粒子修饰的掺磷非晶金刚石电极的电化学行为	210
5.6 掺磷非晶金刚石为生物电极材料的研究	211
5.6.1 对重金属离子的检测	211
5.6.2 对过氧化氢的检测	213
5.6.3 对多巴胺的检测	217
5.7 小结	222
参考文献	222
第6章 非晶金刚石的声波器件应用	227
6.1 非晶金刚石用作体声波器件的高声阻抗材料	227
6.1.1 固贴式体声波器件仿真分析	228
6.1.2 布拉格反射栅的制备及表征	237
6.1.3 固贴式体声波器件压电堆的制备及表征	245
6.2 非晶金刚石用作表面波器件的增频衬底	277
6.2.1 层状结构中的声表面波特异性研究	278
6.2.2 非晶金刚石对声表面波的增频作用	281
6.3 小结	283
参考文献	283
第7章 金刚石色心：性质、合成及应用	287
7.1 金刚石色心缺陷简介	287
7.2 NV 色心	289
7.2.1 NV 色心光谱	290
7.2.2 NV 色心能级结构	291
7.2.3 NV 色心自旋特性及调控方法	291
7.3 硅相关的色心	295
7.3.1 离子注入获得金刚石 SiV 色心	296
7.3.2 纳米金刚石 SiV 色心	297
7.4 其他金刚石色心	299
7.4.1 镍相关的色心	299
7.4.2 铬相关的色心	300
7.4.3 锗相关的色心	300
7.5 金刚石荧光特性及应用	304
7.5.1 金刚石荧光光谱特性	304
7.5.2 荧光纳米金刚石合成	306
7.5.3 细胞荧光成像	309

7.5.4 癌症诊断与治疗	311
7.5.5 亚衍射成像	312
7.5.6 量子信息处理	313
7.6 挑战与展望	315
参考文献	316
关键词索引	321



低维度金刚石是指尺度从零维到二维的含 sp^3 杂化结构的碳质材料。低维度金刚石不仅保持了金刚石的高硬度、低摩擦系数、良好的电绝缘性、高热导率、优良的场发射性能等固有特点，还具有量子光源、界面友好等特殊性能，使其在工业、国防、可再生能源、生物医疗等方面得到了广泛的应用；其需求量也随着科学技术的发展，人们生活水平的提高，呈逐年上升的趋势。因此国内外对低维度金刚石的研究范围也日益扩大。

在众多低维度金刚石材料中，非晶金刚石薄膜及纳米金刚石材料以其突出的性能、广阔的应用前景得到了国内外研究学者的广泛关注。非晶金刚石薄膜主要是由金刚石结构的 sp^3 杂化碳原子和石墨结构的 sp^2 杂化碳原子相互混合而成，其中， sp^3 含量在 50% 以上的非晶-纳米晶复合结构，是二维金刚石材料的典型代表之一^[1]。众所周知，纳米材料与纳米结构具有独一无二的物理及化学特性，因为当材料一维度的尺寸与电子的平均自由程或德布罗意波长相当时，材料会呈现出独特的量子尺寸效应^[2]。因此纳米金刚石不仅具有金刚石的优异性能，还具备纳米材料独特的理化特性，近年来逐渐成为零维及一维金刚石材料的研究热点。因此，本书将主要围绕低维度金刚石材料中具有代表性的非晶金刚石薄膜及纳米金刚石材料进行介绍，并对二者的制备及先进应用进行介绍。

1.1 非晶金刚石薄膜

1.1.1 类金刚石简介

20 世纪 70 年代初，Aisenberg 与 Chabot 首次利用烃类物质的过热离子束沉积形成了硬质非晶碳薄膜，其具有与金刚石晶体相似的光学与力学性能，称为类金刚石碳 (DLC)^[3]。

众所周知，碳存在三种杂化形态： sp^3 、 sp^2 与 sp 。在 sp^3 杂化中，碳原子的四个价电子与周围相邻的碳原子构成四面体配位，形成四个强 σ 键，与金刚石键结构相似。 sp^2 杂化是三个价电子形成面内三角形配位的 σ 键，另一个价电子在垂直

于 σ 键平面的 p_z 轨道与相邻原子形成弱的 π 键，类似于石墨结构。对于 sp 杂化，两个价电子在 x 轴方向形成 σ 键，另外两个价电子在 p_y 与 p_z 轨道形成 π 键。类金刚石中碳的三种杂化结构如图 1-1 所示。在类金刚石碳结构中， sp^2 团簇镶嵌在 sp^3 网络的基体中，其中， sp^3 杂化决定了体系的力学性质， sp^2 团簇则影响体系的电学性质。

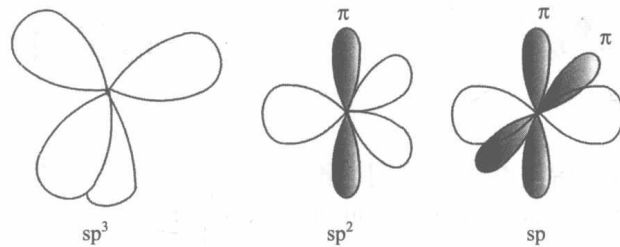


图 1-1 类金刚石中碳的三种杂化形态^[4]

类金刚石薄膜制备工艺简单、沉积速率快、易于大面积沉积，由于存在诸多优点，类金刚石的制备受到广大科研工作者的关注，对类金刚石薄膜制备工艺方法的探索之路逐渐展开。

1992 年，Dekempeneer 等^[5]研究发现，薄膜的机械特性与氢的含量及 C—H 的结构有关，利用射频等离子体增强化学气相沉积(RFACVD)制备的薄膜，通过选择合适的沉积条件，可以在保障硬度的情况下，降低薄膜的应力，偏压在 200~400 V 之间，硬度减少 10%，应力却下降了 30%。该研究提供了高硬度、较低应力的类金刚石薄膜优化工艺参数。20 世纪 90 年代末期，Sattel 等和 Weissmantel 等提出了新型类金刚石薄膜制备方法——离子束增强沉积法(IBED)，并最先对其进行了研究^[6]。该方法制备的薄膜具有精确的计量比、较高的附着力及较小的应力，与传统的离子束制备的类金刚石薄膜相比，其各方面性能都得到了很大的提高。但是该方法制备薄膜时产生的热量较多，不能用于低温基底，同时由于 IBED 使用离子枪，离子枪的大小限制了等离子能够到达的范围，从而限制了薄膜的沉积面积。Mosaner 等^[7]研究了退火对薄膜应力的影响，结果表明，薄膜退火的结果在很大程度上由退火参数决定(如退火温度和时间)。通过研究在退火温度为 300℃ 以下退火时间对应力的影响发现，应力的释放主要是在开始前 1 h 内，在 1 h 后应力基本保持不变。通过沉积薄膜，然后退火，成功地获得厚度大于 1 μm 的低应力类金刚石薄膜。Lacerda 等^[8]对在射频溅射系统中使用甲烷制备的硬质氢化非晶碳材料薄膜的应力进行了研究。研究表明，薄膜的光学带隙和氢的浓度随着 $I(D)/I(G)$ 的增加而减小， sp^3 的浓度随着偏压的增加而减少，应力和硬度随着偏压的增加先增加后减小，沉积速率随着偏压的增加而增加。通过观察应力、硬度和 sp^3 浓度随着偏压的变化情况，他们得出 sp^3 C—C 对材料

的硬度有一定的贡献,但是其主要作用是在薄膜中产生压应力。他们在偏压为-1200 V 的条件下,获得了具有高达 0.23 nm/s 沉积速率、硬度 14 GPa、应力 0.5 GPa 的氢化非晶碳材料薄膜。随着工艺的不断进步,制备出来的类金刚石薄膜的性能也在不断地提高。世界各发达国家掀起了研究、开发和应用类金刚石薄膜的热潮,同时我国也逐渐重视对金刚石相关材料的研究。

1.1.2 非晶金刚石概述

经过几十年的研究与发展,人们已经通过不同的工艺方法制备出多种形式的类金刚石碳,大致可以分为氢化类金刚石碳与无氢类金刚石碳。由于氢的存在形成烃类基团,且在较低的加热温度下容易分解释放,从而导致 sp^2 杂化含量的增加与力学性能的恶化。因此,与氢化类金刚石碳相比,无氢类金刚石碳具有更高的硬度、更好的热稳定性和耐磨性,逐渐成为类金刚石碳中的研究热点。再根据 sp^3 杂化含量的多少,又将无氢类金刚石碳分为非晶碳(a-C)与四面体非晶碳(ta-C)。其中,四面体非晶碳又被称为非晶金刚石^[9]。

图 1-2 为类金刚石碳的 sp^2 - sp^3 -H 三元相图^[10]。非晶金刚石的 sp^3 杂化含量在 50%以上,由于具有更多的四配位杂化含量,非晶金刚石具有更优异的光热稳定性和机械性能。与化学气相沉积(CVD)金刚石相比,非晶金刚石的沉积速率快,膜层表面光滑平整,能够在室温下实现大面积制备,而且薄膜的结构和性能具有可调性。研究非晶金刚石最关键的步骤是对其内部 sp^3 杂化含量的确定,因为非晶金刚石的机械性能主要取决于薄膜中的 sp^3 杂化,而其光电性能主要归因于薄膜中 sp^2 杂化。常用的分析手段有拉曼(Raman)光谱、X 射线光电子能谱(XPS)和电子能量损失光谱(EELS)分析等,根据分析结果可以得到非晶金刚石薄膜中的 sp^3 杂化含量,再通过其他测试可以得到薄膜的硬度、弹性模量等机械性能与 sp^3 杂化含量的具体关系。本书将在第 2 章着重介绍非晶金刚石薄膜的制备及力学性能表征。

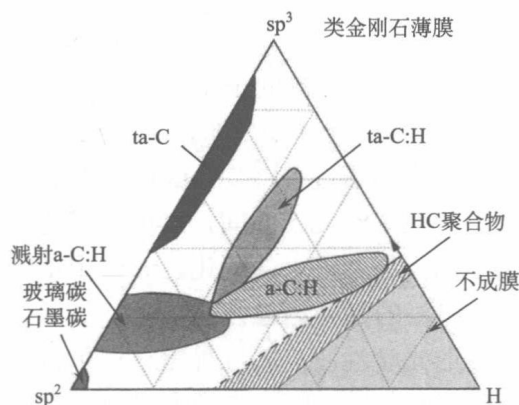


图 1-2 类金刚石碳的 sp^2 - sp^3 -H 三元相图^[3,10]