

气相沉积 薄膜强韧化技术

Strengthening and Toughening Technology of
Vapor Deposition Thin Film

杜军 朱晓莹 底月兰 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

气相沉积薄膜强韧化技术

Strengthening and Toughening Technology of
Vapor Deposition Thin Film

杜军 朱晓莹 底月兰 编著



国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

气相沉积薄膜强韧化技术/杜军,朱晓莹,底月兰
编著. —北京:国防工业出版社,2018.5

ISBN 978-7-118-11522-2

I. ①气… II. ①杜… ②朱… ③底… III. ①气
相沉积—薄膜技术 IV. ①TB43

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第051332号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 19 $\frac{3}{4}$ 字数 376 千字

2018年5月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 86.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展已经取得了举世瞩目的成就,国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断摸索、认真总结和及时改进,更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授、以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	赵伯桥	
秘书长	赵伯桥			
副秘书长	许西安	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

在装备表面材料制备强韧化薄膜具有重要的现实意义。薄膜/基体体系在温和的工作环境中(尤其是静载荷)能够正常服役,薄膜韧性差的问题并不突出(此即为何微纳米薄膜研究往往强调硬度的原因)。但如果要保证微纳米薄膜在动载荷下具有可靠性,韧性与硬度同样重要,而二维薄膜材料韧性研究基础相对薄弱,逐渐成为薄膜应用的瓶颈。具有高硬度和高韧性的新型超硬薄膜才是未来最具有工程应用价值的薄膜材料体系。

本书总结了近年来作者在气相沉积强韧化薄膜方面的工作,参考了国内外最新期刊、书籍中硬质薄膜、韧化薄膜的研究进展,对薄膜强韧化的方法、机理,强韧性能表征方法进行了较为系统的总结和梳理,对于强韧化薄膜的研究具有重要的参考意义。同时,虽然本书主要论述了气相沉积技术制备的厚度为若干微米以下薄膜的强韧化,但本书所论述的强韧化方法、机理、表征方法对于喷涂、刷镀、堆焊等其他厚涂层制备技术同样适用,对于上述技术的研究具有重要的参考意义。

本书分六章。第1章薄膜制备方法,简要介绍了物理气相沉积和化学气相沉积技术的原理、设备和工艺。第2章薄膜强化技术,概述了强化的意义和目的。论述了薄膜的强化方法,具体讨论了细晶强化、强化晶界、固溶和析出强化、离子束辅助轰击强化、多层强化五种强化方法的原理和技术特点。介绍了常见硬质薄膜类型。第3章薄膜韧化技术,介绍了韧化的重要概念及其内涵,分别讨论了韧性相韧化,纳米晶结构设计韧化,成分梯度韧化,多层结构韧化,相变韧化,压应力韧化,碳纳米管韧化的机理、技术和应用。论述了高韧性薄膜设计的一般准则。第4章讨论了薄膜的强韧力学原理,介绍了硬度、结合强度、韧性强韧化关键力学指标,介绍各种方法的原理、方法步骤和影响因素。第5章薄膜内应力对强韧化的影响,首先介绍了薄膜内应力概念、产生原因和测试方法,然后讨论了内应力对强韧化力学性能的影响,并介绍了典型薄膜体系内应力与力学性能研究。第6章薄膜强韧化技术实例,以氮化铬基(CrN)耐磨损薄膜、氮化锆基(ZrN)耐冲蚀薄膜和非晶碳膜(a-C)三类典型硬质薄膜为例,介绍了前述强

韧化技术的具体应用。

本书既讨论了强化技术,又讨论了韧化技术。从写作意图上说,本书更针对硬质薄膜的韧化,即如何获得具有较高韧性的硬质薄膜,以及如何来定量或定性地评价薄膜的韧性。

本书由杜军担任主编。第1章由底月兰编写,第2、4章由杜军、朱晓莹编写,第3章由杜军编写,第5章由杜军、王红美编写,第6章由蔡志海、底月兰编写。全书由杜军、王红美、王鑫统稿。在编写过程中于鹤龙、周新远、闫世兴、宋占永、何东昱等讲师,王尧、杜林飞、叶雄等硕士生参与了文献收集整理工作。

本书研究成果受到国家自然科学基金青年基金项目(基金号:51401238, 51102283)的资助,本书出版获得国防科技图书出版基金资助。在此对上述基金表示感谢。

由于作者水平有限,本书中的不足之处在所难免,我们衷心希望得到读者的指正。

作者

2017年10月

目 录

第 1 章 薄膜制备方法	1
1.1 基本概念	2
1.1.1 薄膜生长过程	2
1.1.2 薄膜结构模型	3
1.1.3 等离子体	5
1.2 物理气相沉积	6
1.2.1 蒸发镀膜	6
1.2.2 溅射镀膜	8
1.2.3 离子镀膜	10
1.2.4 离子束辅助气相沉积	14
1.3 化学气相沉积	15
1.3.1 化学反应原理	16
1.3.2 化学气相沉积技术的分类和简介	16
1.3.3 化学气相沉积过程及特点	21
1.3.4 化学气相沉积技术在工模具上的应用	23
1.4 气相沉积技术的应用及进展	24
1.5 小结	25
第 2 章 薄膜强化技术	26
2.1 薄膜的强化方法	27
2.1.1 细晶强化	27
2.1.2 强化晶界	29
2.1.3 固溶和析出强化	32
2.1.4 离子束辅助轰击强化	33
2.1.5 多层强化	34
2.2 常见硬质薄膜类型	36
2.2.1 纳米多层膜	36
2.2.2 纳米复合膜	47

2.2.3	非晶碳膜	60
2.3	小结	63
第3章	薄膜韧化技术	64
3.1	概念及内涵	65
3.1.1	从断裂能角度理解韧化	65
3.1.2	断裂韧性(K_{IC})	67
3.1.3	能量释放率(G_{IC})	69
3.2	薄膜的韧化方法	70
3.2.1	韧性相韧化	72
3.2.2	纳米晶结构设计韧化	77
3.2.3	成分和结构梯度韧化	79
3.2.4	多层结构韧化	81
3.2.5	压应力韧化	98
3.2.6	相变韧化	98
3.2.7	碳纳米管韧化	99
3.3	高韧性薄膜的设计	103
3.4	小结	104
第4章	薄膜的强韧原理、关键力学指标及其表征	107
4.1	强韧化力学原理	108
4.1.1	材料强韧化的三个层次	108
4.1.2	从微观结构角度理解薄膜的强韧化	111
4.2	强韧化关键力学指标	122
4.3	强韧化力学指标表征方法及应用	134
4.3.1	硬度(H)及弹性模量(E)	134
4.3.2	结合强度	142
4.3.3	韧性	155
4.4	小结	188
第5章	薄膜内应力对强韧化的影响	189
5.1	气相沉积薄膜的内应力	189
5.1.1	内应力概念	189
5.1.2	薄膜内应力产生的原因	192
5.1.3	薄膜内应力的测试方法	196

5.1.4	薄膜内应力的调控	203
5.2	内应力对强韧化力学性能的影响	212
5.2.1	内应力对硬度的影响	212
5.2.2	内应力对结合强度的影响	218
5.2.3	内应力对韧性的影响	227
5.3	典型薄膜体系的内应力与强韧性能研究	235
5.3.1	Ti 薄膜的残余应力与力学性能	235
5.3.2	Ti/TiN 多层薄膜的内应力与力学性能	237
5.3.3	Cu/Si 薄膜的内应力与力学性能	243
5.3.4	SiN _x :H 薄膜的内应力与断裂韧性	246
5.4	小结	254
第 6 章	薄膜强韧化技术实例	255
6.1	耐磨损 CrN 基薄膜的强韧化	256
6.1.1	工艺方法对强韧性能的影响	257
6.1.2	多层结构提高强韧性能	259
6.1.3	合金化提高强韧性能	260
6.2	耐冲蚀 ZrN 基薄膜的强韧化	264
6.2.1	工艺方法对强韧性能影响	265
6.2.2	多层结构提高强韧性能	266
6.2.3	合金化提高强韧性能	267
6.3	非晶碳膜强韧化	273
6.3.1	典型强韧非晶碳膜的力学性能及影响因素	273
6.3.2	合金化实现碳基薄膜的强韧化	275
6.3.3	膜层结构设计实现碳基薄膜强韧化	277
6.4	小结	283
参考文献	285

Contents

Chapter 1 Preparation Method of Vapor Deposition Thin Film	1
1.1 Concepts	2
1.1.1 Film Growth Process	2
1.1.2 Structure Models For Evaporated and Sputtered Films	3
1.1.3 Plasma	5
1.2 Physical Vapor Deposition	6
1.2.1 Evaporation Process	6
1.2.2 Sputtering Process	8
1.2.3 Ion Plating Process	10
1.2.4 Ion Beam Assistant Deposition	14
1.3 Chemical Vapor Deposition	15
1.3.1 Chemical Reaction Principles	16
1.3.2 Reaction Types	16
1.3.3 CVD Process and Characteric	21
1.3.4 CVD Application on Moulds	23
1.4 Application and Progress of Vapor Deposition	24
1.5 Summary	25
Chapter 2 Film Strengthening Technology	26
2.1 Strengthening Method	27
2.1.1 Refined Crystalline Strengthening	27
2.1.2 Grain Boundary Strengthening	29
2.1.3 Solution and Precipitation Strengthening	32
2.1.4 Ion Beam Assistant Bombardment Strengthening	33
2.1.5 Multilayer Strengthening	34
2.2 Conventional Hard Film Type	36
2.2.1 Nano Multilayer Film	36
2.2.2 Nano Composite Film	47
2.2.3 Amorphous Carbon Film	60
2.3 Summary	63

Chapter 3 Film Toughening Technology	64
3.1 Concepts and Connotation	65
3.1.1 Understanding Toughening: Fracture Energy Perspective	65
3.1.2 Fracture Toughness (K_{IC})	67
3.1.3 Energy Release Rate (G_{IC})	69
3.2 Film Toughening Methods	70
3.2.1 Ductile Phase Toughening	72
3.2.2 Nano Crystallite Structure Toughening	77
3.2.3 Composition and Structure Gradient Toughening	79
3.2.4 Multilayer Structure Toughening	81
3.2.5 Compress Stress Toughening.	98
3.2.6 Phase Transformation Toughening	98
3.2.7 Carbon Nano Tube Toughening	99
3.3 High Toughness Film Design Principles	103
3.4 Summary	104
Chapter 4 Strengthening and Toughening Mechanism, Key Mechanics Properties and Characterization	107
4.1 Strengthening and Toughening Mechanism	108
4.1.1 Three Levels	108
4.1.2 Film Strengthening and Toughening: Microstructure Perspective	111
4.2 Key Mechanical Properties	122
4.3 Characterization Methods and Applications	134
4.3.1 Hardness and Elastic Modulus	134
4.3.2 Bonding Strength	142
4.3.3 Toughness	155
4.4 Summary	188
Chapter 5 Internal Stress Effect on Thin Film Strengthening and Toughening	189
5.1 Internal Stress of Vapor Deposition Film	189
5.1.1 Concepts	189
5.1.2 Internal Stress in Thin Films and Their Causes	192
5.1.3 Techniques for Measuring Internal Stress in Thin Films	196
5.1.4 Regulation and Control of Internal Stress in Thin Films	203
5.2 Internal Stress Effect on Mechanical Properties	212

5. 2. 1	Hardness	212
5. 2. 2	Bonding Strength	218
5. 2. 3	Toughness	227
5. 3	Internal Stress and Mechanical Properties of Typical Thin Film System	235
5. 3. 1	Ti Film	235
5. 3. 2	Ti/TiN Multilayer Film	237
5. 3. 3	Cu/Si Thin Film	243
5. 3. 4	SiN _x :H Thin Film	246
5. 4	Summary	254
Chapter 6	Example of Strengthening–Toughening Thin Films	255
6. 1	Abrasion Resistant CrN Thin Film	256
6. 1. 1	Technique Effect	257
6. 1. 2	Multilayer Structure Effect	259
6. 1. 3	Alloying Effect	260
6. 2	Erosion Resistant ZrN Thin Film	264
6. 2. 1	Technique Effect	265
6. 2. 2	Multilayer Structure Effect	266
6. 2. 3	Alloying Effect	267
6. 3	Amorphous Carbon Films	273
6. 3. 1	Mechanical Properties and Influence Factor	273
6. 3. 2	Alloying Effect on Strengthening–Toughening	275
6. 3. 3	Structure Design Effect on Strengthening–Toughening	277
6. 4	Summary	283
References		285

第 1 章 薄膜制备方法

薄膜是指厚度与表面尺寸相差甚远,可近似为二维结构的材料^[1]。本书所述硬质薄膜是指为了提高构件(或材料)表面耐磨损、耐腐蚀和耐高温性能而施加在表面的覆盖层。其厚度可依据作用而有所差别,通常是几纳米到几十微米^[2]。

按薄膜的用途,可以将其分为功能性薄膜和保护性薄膜两大类。功能性薄膜指具有特殊光、电、热、声和磁性能的薄膜。功能性薄膜在现代科技和生活中的应用不胜枚举。尽管功能性薄膜不以力学性能为主要性能指标,但力学性能对某些功能性薄膜的应用仍具有重要意义。以微机电系统(MEMS)为例,薄膜材料在 MEMS 中使用频繁,其电学性能评价工作已能满足半导体器件的研究需要,但薄膜材料的力学性能评价工作还十分有限。而评价力学性能对 MEMS 的器件性能和可靠性有重要影响,对 MEMS 器件实用化有着显著的意义^[3]。保护性薄膜主要利用薄膜的强度、耐磨性和耐腐蚀性赋予机械零件更好的表面力学性能。提高表面的耐磨性、耐腐蚀性是表面工程的重要任务。薄膜技术为完成这个任务提供了高效、节能、环保的技术手段。

薄膜技术是通过某些特定工艺过程,在物体表面沉积、附着一层或者多层与基体材料材质不同的薄膜,使镀膜之后物体表面具有与基体材料不同性能的技术。本书所述薄膜技术,主要指物理气相沉积(PVD)和化学气相沉积(CVD)技术。简单地说:物理气相沉积包括热蒸发、离子镀、溅射镀等,这些方法中原子都需要在低气压环境中运动,并在基片上沉积成膜;化学气相沉积是一种化学气相反应生长法,通过不同方法使原料气体裂解后发生化学反应并沉积成膜。

硬质薄膜的宏观强韧性能由微观组织结构决定,故可以通过微观组织调控宏观力学性能。不同制备方法、不同工艺所得到薄膜的微观结构差别很大,可根据需求选用合适的制备方法。理解薄膜的生长过程和薄膜结构模型对于薄膜微观组织结构具有重要作用。本章对薄膜生长过程、薄膜结构类型和等离子基本概念,以及物理气相沉积和化学气相沉积技术的原理、工艺、技术特点进行简要的介绍。

1.1 基本概念

1.1.1 薄膜生长过程

薄膜生长过程直接影响到薄膜的结构及性能。简单地说,薄膜生长是沉积原子在基体表面吸附、扩散、凝结、形核与长大的过程^[1,4]。

1.1.1.1 吸附、扩散与凝结

(1) 吸附。固体表面的原子或分子间化学键在表面中断,称为不饱和键或悬挂键。这种键具有吸引外来原子或分子的能力。入射到基体表面的气相原子被这种悬挂键吸住的现象称为吸附。如果吸附仅仅是由原子电偶极矩之间的范德瓦尔斯力起作用,则称为物理吸附;若吸附是由化学键结合力起作用,则称为化学吸附。

与固体内部相比,固体表面具有一种过量的能量,称为表面自由能。固体表面吸附气相原子后自由能减小,从而变得更稳定。伴随吸附现象发生而释放的一定能量称为吸附能。将吸附在固体表面上的气相原子除掉称为解吸,除掉被吸附气相原子所需的能量称为解吸能。

入射到基体表面的气相原子都带有一定的能量,它们到达基体表面之后可能发生三种现象:①与基体表面原子进行能量交换被吸附;②吸附后气相原子仍有较大的解吸能,在基体表面做短暂停留(或扩散)后,再解吸蒸发(再蒸发或二次蒸发);③与基体表面不进行能量交换,入射到基体表面上立即被反射回去。

当用真空蒸镀或溅射镀制备薄膜时,入射到基体表面的气相原子,绝大多数都与基体表面原子进行能量交换而被吸附。一个气相原子入射到基体表面,能否被吸附?是物理吸附还是化学吸附?除与入射原子的种类、所带的能量有关外,还与基板材料、表面的结构和状态密切相关。

(2) 扩散。入射到基体表面的气相原子被吸附后,它便失去了在表面法线方向的动能,只具有平行于表面方向的动能。依靠这种动能,被吸附原子在表面上沿不同方向扩散。在扩散过程中,单个被吸附原子相互碰撞形成原子对后产生凝结。吸附原子的表面扩散运动是形成凝结的必要条件。

(3) 凝结。指吸附原子在基体表面上形成原子对及其以后的过程,具体地说,是气相原子形核与长大的过程。

1.1.1.2 形核与生长

形核与生长的物理过程可用图 1-1 说明,可分为四个步骤:

(1) 气相原子入射到基体表面,其中一部分原子因能量较大而弹性反射回去,另一部分则吸附在基体表面。吸附原子中有一小部分因能量稍大而再次返回气相。

(2) 吸附气相原子在基体表面上扩散迁移,互相碰撞结合成原子对或小原子团,并凝结在基体表面上。

(3) 原子团时而团聚长大,时而分解变小。一旦原子团体积超过临界值,会向着长大方向发展形成稳定的原子团。临界体积的原子团称为临界核,稳定的原子团称为稳定核。

(4) 稳定核再捕获其他吸附原子,或者与入射气相原子相结合使它进一步长大成为小岛。

形核过程若在均匀相中进行称为均匀形核;若在非均匀相或不同相中进行称为非均匀形核。在固体或杂质的界面上形核时都是非均匀形核。薄膜在基体表面形核与水滴在固体表面的凝结过程相类似,都属于非均匀形核。

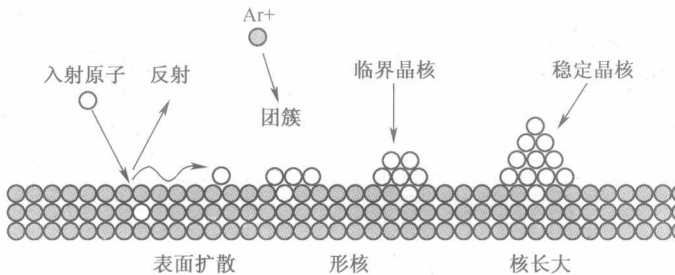


图 1-1 沉积粒子在基材表面的成膜过程

1.1.2 薄膜结构模型

如上所述,薄膜沉积过程中,入射原子首先被衬底或薄膜表面所吸附。若这些原子具有足够的能量,它们将在衬底或薄膜表面进行扩散运动,除了可能脱附的部分原子之外,大多数被吸附原子将到达生长中的薄膜表面的某些低能位置。在薄膜沉积的过程中,如果衬底的温度条件许可,则原子还可能经历一定的体扩散过程。因此,原子的沉积过程包含吸附、扩散以及体扩散过程。由于这些过程均受到激活能的控制,因此最终薄膜结构与沉积时衬底相对温度 T_s/T_m 以及沉积原子携带能量密切相关。这里, T_s 为衬底温度,而 T_m 为沉积物质的熔点。

薄膜的组织结构决定了薄膜的(力学)性能。在研究薄膜的过程中,人们提出采用结构区域模型(SZM)来描述气相沉积薄膜的微观结构与沉积工艺的关系。蒸发镀膜和溅射镀膜都有相应的结构区域模型。由于溅射镀膜是本书所述硬质薄膜的主要方法,下面就溅射镀膜结构区域模型(图 1-2)进行讨论。

图 1-2 中,主要分为四个区域,分别是疏松纤维状区域 I、致密纤维状区域 II、柱状晶状区域 III 和等轴晶状区域 IV。区域 I: 在温度很低、气压较高(真空度低)的条件下,入射粒子的能量较低,原子扩散能力有限,形成的薄膜组织为区域 I 型的组织。低温沉积时,临界核心尺寸很小而形核密度很高,原子表面扩

散及体扩散能力很低,吸附原子失去了扩散能力。加上沉积阴影效应的影响,沉积组织呈现出细纤维状形态,晶粒内缺陷密度很高,而晶粒边界处的组织明显疏松,细纤维状组织由孔洞所包围,力学性能很差。区域Ⅱ:随着温度的升高,原子扩散增强。因此,虽然因阴影效应仍保持纤维状的特征,但晶粒变得致密,孔洞和疏松逐渐消失。区域Ⅱ与区域Ⅰ的分界线与真空室内真空度有关,真空度越高,入射粒子能量越高,分界线越向低温区域移动。区域Ⅲ:温度进一步升高,原子可进行长距离扩散,抵消了阴影效应的影响。开始出现柱状晶组织,晶粒内部缺陷密度低,致密性好。区域Ⅳ:原子的体扩散开始发挥重要作用,晶粒迅速长大,出现贯穿薄膜厚度的粗大柱状晶,晶粒内缺陷密度很低。由上面讨论可知,基体温度和真空度对溅射薄膜的结构起到非常重要的作用。

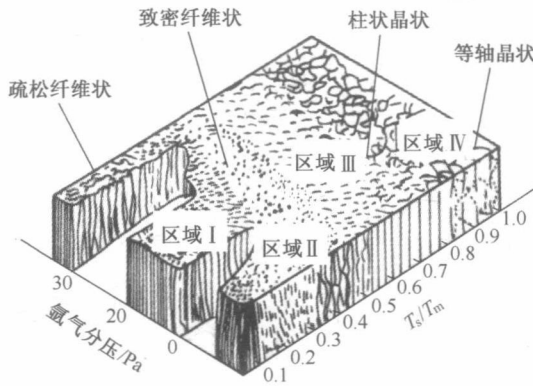


图 1-2 溅射镀膜的结构区域模型

从能量角度看,薄膜生长时沉积原子能量(E)主要有两部分,分别是衬底热传递的能量 E_s 和粒子轰击传递的能量 E_p ,即 $E = E_s + E_p$ 。 E_p 包括离子轰击能量 E_{bi} 和中性粒子轰击能量 E_{fn} ,即 $E_p = E_{bi} + E_{fn}$ 。因此,薄膜制备时,若衬底不加热,则传递的总能量 $E = E_p$ 。实验证明,衬底不加热的条件下,可以制备表面光滑、致密、结构无序的纳米晶薄膜,满足 Thornton J. A. 所提出的结构区域模型 (SZM) 中的区域Ⅱ的制备条件。随着氩气压力 P_{Ar} 降低,以及 T_s/T_m 值逐渐减小,进入结构区域模型中的区域Ⅱ中,在这种情况下可以制备晶体薄膜。这是由于当薄膜的制备气压 $P_{Ar} \leq 0.1 \text{ Pa}$ 时,粒子运动的平均自由程远大于衬底到靶材的间距,粒子之间无碰撞或有极少的碰撞,能量损失较小,因此粒子的全部动能都转化为薄膜生长和结晶的能量。此时的轰击能量 E_p 使薄膜制备满足结构区域模型 (SZM) 中区域Ⅱ的条件,能够制备出晶态薄膜。这说明,利用粒子轰击和冷凝所传递的能量,使得薄膜制备由平衡的基体/薄膜加热方式,转变为非平衡的原子尺度加热方式 (E_p),能够在未加热的基体上制备纳米晶薄膜,这对需低温条件制备薄膜的情况具有特殊意义。