

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.01.001

包含等离子体辅助沉积参数和离子刻蚀作用过程的结构区域相图*

André Anders (美)

(加利福尼亚大学 劳伦斯伯克利国家实验室, 美国 加利福尼亚 94720)

摘 要: 文中提出一种扩展的薄膜微观结构的区域相图, 可以用其来表征过滤阴极弧以及高功率脉冲磁控溅射镀膜过程中含有大量离子流的动态沉积过程。其坐标轴包括广义同系温度, 标量化动能以及可以表征离子刻蚀作用的净膜厚。需要强调的是, 由于影响薄膜生长的实际参数要远超相图中有限的坐标轴数, 因此该结构区域相图展示的生长条件与薄膜结构之间的关系是近似和简化过的。

关键词: 结构区域相图; 薄膜制备; 等离子体辅助; 离子刻蚀; 应力; 形貌; 同系温度; 位能与动能

中图分类号: TG174.44

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2016)01-0001-06

A Structure Zone Diagram Including Plasma-based Deposition and Ion Etching

ANDERS André

(Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, California 94720, United States)

Abstract: An extended structure zone diagram is proposed that includes energetic deposition, characterized by a large flux of ions typical for deposition by filtered cathodic arcs and high power impulse magnetron sputtering. The axes are comprised of a generalized homologous temperature, the normalized kinetic energy flux, and the net film thickness, which can be negative due to ion etching. It is stressed that the number of primary physical parameters affecting growth by far exceeds the number of available axes in such a diagram and therefore it can only provide an approximate and simplified illustration of the growth condition-structure relationship.

Keywords: structure zone diagram (SZD); thin film deposition; plasma assistance; ion etching; stress; morphology; homologous temperature; potential and kinetic energy

0 引 言

薄膜微观结构区域相图 (Structure zone diagram, SZD) 是表征多晶厚膜 (>100 nm) 相关生长特性的便捷方式。通过对制备参数的尽量简化, 仅展示相关的几个主要参数对薄膜结构的影响。结构区域模型是结构区域相图的高级称法, 然而其并不是真的模型, 而只是简单地图示了薄膜微观结构的生长趋势与制备参数之间的关系。文中研究并

没有实质性的改变结构区域相图, 但提出扩展和修正过的新结构区域相图是十分必要的。与此同时, 文中也阐述了其本质的局限性。

近年来, 随着薄膜沉积技术由蒸镀扩展到溅射沉积和离子束辅助沉积的发展, 结构区域相图概念也逐渐进化。伴随如高功率脉冲磁控溅射等一些等离子体辅助沉积技术的广泛应用, 已有的结构区域相图需要适当的修正, 包括关于等离

收稿日期: 2015-11-08; 修回日期: 2016-01-28; 基金项目: * 美国能源部项目 (DE-AC02-05CH11231)

通讯作者: André Anders (1961—), 男, 博士; 研究方向: 等离子体、离子束表面工程; E-mail: aanders@lbl.gov

网络出版日期: 2016-01-30 16:36; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.tg.20160130.1636.002.html>

引文格式: André Anders. 包含等离子体辅助沉积参数和离子刻蚀作用过程的结构区域相图[J]. 中国表面工程, 2016, 29(1): 1-6.
ANDERS André. A structure zone diagram including plasma-based deposition and ion etching[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(1): 1-6 (in Chinese).

本文经 Elsevier 授权以中文发表, 翻译吉小超, 审校魏荣华。英文原文见 ANDERS André. A structure zone diagram including plasma-based deposition and ion etching[J]. Thin Solid Film, 2010, 518: 4087-4090.

子体辅助沉积过程中的相关参数。文中在简述原有结构区域相图研究进展的基础上,提出了一种扩展的结构区域相图,其包括当基体为高负偏压条件下的高能粒子轰击过程以及离子刻蚀作用的影响。

1 薄膜微观结构区域相图简述

Movchan 和 Demchishin^[1]于1969年首先提出了结构区域相图的概念,用以解释超厚膜的蒸镀制备过程。其只对同系温度 T_h 进行了无量纲化,并将其定义为薄膜制备温度 T 与薄膜熔点 T_m 的比值,温度值都是基于开氏温度。

$$T_h = T/T_m \quad (1)$$

由于薄膜温度难以直接测量,通常利用基底温度代替薄膜温度。这个简化值得进一步商榷,基于此简化的更广义的温度概念将在后文中提出。通过分析大量的已知样品, Movchan 和 Demchishin 将结构区域相图划分为3个区域。区域1中,同系温度 $T_h < 0.3$, 吸附原子的迁移率低,从而导致晶粒继续形核,这促使纹理状和纤维状晶粒结构沿溅射粒子流方向生长,最终形成圆形顶部^[2]。其晶粒边界区域存在许多空洞和高密度的晶格缺陷。区域2的同系温度略高于区域1 ($0.3 < T_h < 0.5$), 由于存在表面扩散作用,促使均匀柱状晶的生长。其晶粒尺寸随同系温度 T_h 的升高而增大,并且有可能贯穿整个薄膜厚度,在薄膜表面生成不同取向的晶面。当同系温度 $T_h > 0.5$ 时,体扩散与再结晶作用使得晶粒变得更大,薄膜更为致密。

Barna 和 Adamik^[3]划分的边界区域稍有不同,他们在区域1和2之间划出一个过渡区,其同系温度为 $0.2 < T_h < 0.4$ 。在该区域中,表面扩散非常明显而晶间扩散很有限,从而导致晶粒的竞争性生长,从而产生V状晶粒结构,但并不能贯穿整个薄膜。他们还强调,更实用的区域结构相图需要包括共沉积的杂质与添加剂在制备过程中的熔析。这说明结构区域相图并没有考虑全部的制备参数,研究人员也很难将结构区域相图直接应用于他们所感兴趣的薄膜材料。还需要强调结构区域相图主要用来描述那些较厚薄膜的微观结构,通常指那些生长过程远长于形核过程的薄膜。

随着磁控溅射技术的出现,镀膜中的真空室

工作气压作为重要的参数也需要被考虑在结构区域相图中。Thornton^[4]发表的文章指出结构区域相图中影响薄膜结构最重要的两个参数分别是同系温度和工作气压。该结构区域相图受到了广泛的认可,并被许多物理气相沉积技术相关的文献书籍所引用^[2,5-7]。

容易理解溅射气压可以代表薄膜制备过程中粒子轰击效应^[8]。在低溅射气压强条件下,粒子在轰击基底前相互之间不发生碰撞,其能量分布近似于Thompson分布模型^[9-10]。在 $E_{SB}/2$ 处获得最大值,然后随 $\sim E^{-2}$ 很快衰减,其中 E_{SB} 为表面结合能。溅射原子携带的动能通常只有几个eV,但其对于促进吸附原子在基底表面重排具有重要作用。在高气压条件下,溅射原子在到达薄膜生长表面之前与气体间会发生多次碰撞,整个能量都会向低能方向移动,能量降低很多^[10]。基于上述原因,Thompson引入了一个新参数用以表征薄膜制备过程中的粒子碰撞过程。其经典的结构区域相图中包含一个用来描述热影响和其它动力学效应的坐标轴。

Messier^[11]针对离子束辅助沉积过程提出了一个修正的结构区域模型,其包括区域1, T, 2和3。其中气压坐标轴被替换为离子能量坐标轴。T代表离子辅助沉积存在时的过渡区。然而在考虑离子能的过程中并没有考虑薄膜制备过程中到达样品表面的离子和原子的比例,没有考虑离子质量与所镀膜的原子质量不相同的情况,也没有考虑离子能量分布函数更宽或依赖于时间的变化,后者更适用于在脉冲偏压条件镀膜的情况。

为解决离子-原子比变化的问题,直观的方法就是用单个原子的平均能量来表征该参数,将其定义为:

$$\langle E_d \rangle = \frac{E_i J_i}{J_M} \quad (2)$$

式中 E_i 为离子的平均能量, J_i/J_M 为能量离子流与原子流的比值,假设原子流在轰击样品表面时携带有热能。尽管 E_i 和 J_i/J_M 都与薄膜的微观结构有关, $\langle E_d \rangle$ 并不是一个普遍适用的参数。薄膜生长在低离子能高离子流条件和高离子能低离子流条件下是不同的,因而对于结构区域相图来说, $\langle E_d \rangle$ 并不是一个适合的参数。

以铜的阳极电弧沉积为特例,薄膜的生长中

有大量的低能离子轰击, Mausbach^[13] 提出利用式 2 中的能量通量作为特征参数来表征系统与平衡条件的偏离程度, 进而研究其变化。他指出当 $T_h < 0.3$ 时, 如果平均离子能超过 1 eV, 将会产生亚稳态的薄膜结构。因此他的区域结构相图中包含两个主要区域, $T_h < 0.3$ 时的区域 M, 用来描述亚稳态薄膜。在温度略高的条件下有个连续的 K 区域, 包括了 Thornton 的区域 2 和 3, 但其过渡非常缓慢。

大离子流的薄膜沉积过程通常被称为载能沉积或等离子相的载能凝结^[7,14-16]。常见的技术手段主要有过滤阴极电弧沉积^[7,17-18], 高功率脉冲磁控溅射^[19-22], 自持溅射^[23-26] 以及其他的离子化物理气相沉积^[27-28] 手段。目前研究者们亟待一个新的区域结构相图, 以帮助理解离子在薄膜生长过程中的作用。文中提出一个基于 Thornton 区域结构相图的广义相图。但首先需要澄清的是所有的区域结构相图仅能笼统地的描述薄膜的大致取向, 不同的薄膜材料, 基底以及制备条件很难用单一的区域结构相图来解释。

2 一种包含等离子体与离子刻蚀作用的薄膜生长区域结构相图

高功率脉冲磁控溅射沉积技术受到越来越多的关注, 并在工业上已经开始应用。许多人尝试解释如峰值电流, 等离子体脉冲的占空比对薄膜生长的影响。Alami 等^[29] 找到了钽薄膜生长的微观结构与高功率脉冲磁控溅射沉积过程中靶材电流之间的关系, 并建议将该关系用在未来的区域结构相图中。然而, 靶材电流的峰值受几何形状, 磁场等磁控管的特征参数, 靶材料及其表面状态, 脉冲周期等因素的影响^[30], 其中靶材料的表面形态还会影响二次电子的产生。需要承认的是靶材电流虽然可以用来表征粒子流与其携带的能量, 但并不能很好的表征薄膜生长过程。

为提出一种普遍适用的结构区域相图, 其坐标轴应当包含和薄膜生长直接相关的参数, 而不仅仅是主要参数。许多的主要参数, 如靶材电流, 电压, 反应气压, 靶材基底间距, 脉冲宽度等因素都对薄膜的生长产生重要影响, 但要把它们都表达在一个多维度的结构区域相图中是难以实现的。因此结构区域相图只是基于薄膜的生长过程对薄膜的物理结构的定性说明。理想的

状态下, 可以通过结构区域相图来了解薄膜生长的一些典型特征。文中基于 Thornton 的结构区域相图, 保留了原有坐标轴的数量以及含义, 但对其进行了归纳, 修正和拓展。主要包括以下变化:

(1) 用一个广义温度 T^* 替代原有的线性同系温度 T_h , 该广义温度为原来的同系温度与粒子撞击基底势能产生的温度变化之和。

(2) 用表示标量化能量 E^* 的对数坐标轴替代线性气压坐标轴, 该标量化能量用来表示有轰击离子的动能所产生的位移和热效应。

(3) 用净膜厚 t^* 作为 z 轴替代原有的无标记 z 轴。其可以很直观的帮助大家理解薄膜厚度由于致密化和溅射作用的减少, 使其能够表达出在离子刻蚀作用下产生的“负膜厚”概念。

图 1 所示为文中所提出的扩展结构区域相图。Thornton 相图中的许多特征都被保留, 扩展的内容主要关注粒子轰击基底表面时, 其携带的动能与势能对薄膜生长的影响。

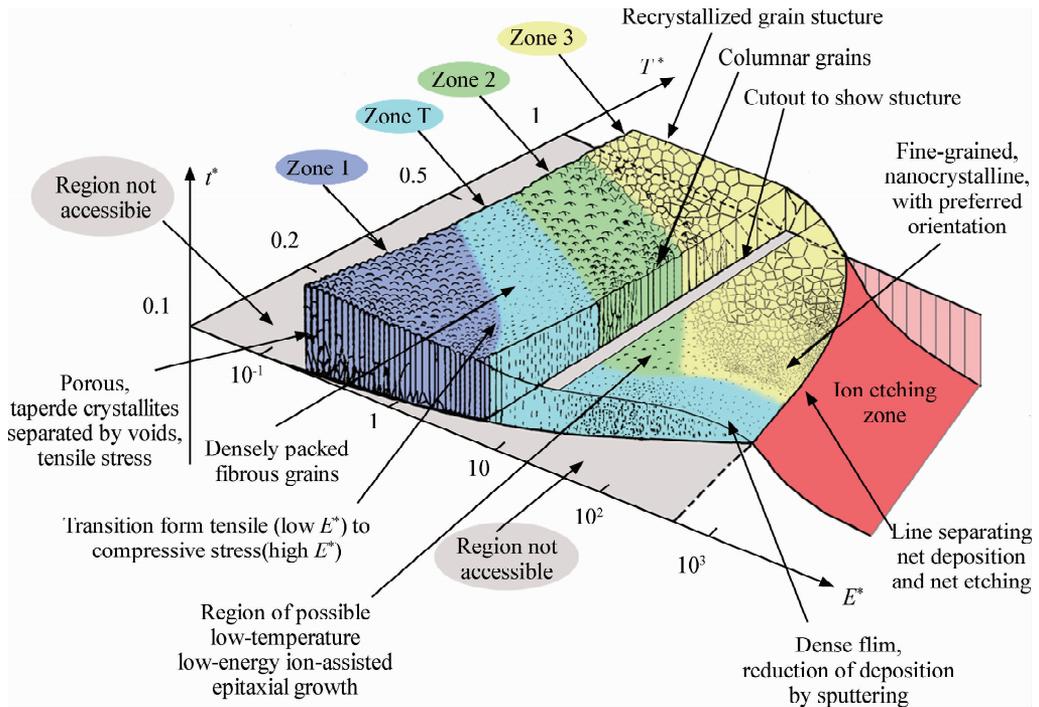
其中势能包括升华的热能即内聚能 E_c , 以及电离能 E_i , 但要减去电子中和过程时的所做的功。即 $E_{pot} = E_c + (E_i - \Phi)$, 当然电离情况并不适合原子, 但对于多电荷离子非常重要。对于单元金属薄膜以及单电荷离子, E_c 通常介于 1~9 eV/原子, E_i 通常介于 4~10 eV/离子。对于大多数材料 Φ 约为 4 eV。广义同系温度如下式所示:

$$T^* = T_h + T_{pot} \quad (3)$$

式中 T_h 由式 1 得出, $T_{pot} = E_{pot} / (kN_{moved})$ 是加热区域 N_{moved} 数量重排原子的本征温度, 式中 k 为波尔兹曼常数。到达基底不参与薄膜生长的离子对于势能也有贡献, 其大小等于离子中和过程时电离能减去电子功函数。

到达样品表面正离子的动能由初始的能量 E_0 与其在鞘层中加速获得的能量组成。 $E_{kin} = E_0 + QeV_{sheath}$, 式中 Q 为离子的电荷数, e 为基本电荷, V_{sheath} 为等离子体与基底之间的电压。尽管我们主要考虑正离子, 但相关的讨论同样适合于溅射过程中的载能中性粒子^[31] 以及负离子^[32]。

利用对数表示的动能可以和动量建立起联系, 如 $\log(mv^2/2) \propto 2\log(mv)$, 当动能值超过体位移能(12~40 eV)时, 动量将可以和原子位移建立联系^[33]。



The generalized temperature T^* is given by Eq. (4), the normalized energy flux E^* by Eq. (5), and t^* represents the net thickness. The boundaries between zones are gradual and for illustration only. The numbers on the axes are for orientation only - the actual values depend on the material and many other conditions and therefore the reader should avoid reading specific values or predictions.

图1 适用于能量沉积的扩展结构区域相图

Fig. 1 Structure zone diagram applicable to energetic deposition

非穿透性的离子或原子所具有的能量可以促进表面原子的扩散。当粒子的动能介于表面位移能和体位移能时,将产生一个有趣的能量窗口,该条件能促进薄膜的外延生长,使得薄膜中不产生缺陷^[34]。

对于穿透粒子,当位移级联发生时,可以观测到一个瞬态的弹道相(~ 100 fs),其后会产生一个热峰相(~ 1 ps),热峰区域的原子的移动性非常高。热峰可以被理解为瞬态的液体。当‘液体’冻结时,即原子们都到达了其平衡的位置。大幅的热振动对于扩散过程具有促进作用,对于晶粒之间的填隙式离子以及表面吸附原子的迁移都有显著影响。化学势梯度是上述过程的驱动力^[35],加上界面和弹性变形能的辅助作用^[15],会导致体自由能以及表面自由能密度的最小化,进而使得薄膜中的晶粒具有择优取向。

载能粒子的轰击使得薄膜中缺陷处于生长—消失的竞争状态。粒子轰击的动能使得晶粒产生位移与缺陷,随后又形成新核^[2]。与此同时,粒子释放的势能以及后弹道热峰会引起原子

尺度的加热作用进而消除缺陷。因此,单个粒子势能与动能的比值以及动能的绝对值会影响体系的平衡,同时造成了晶粒有取向生长以及内应力产生。当动能大于 100 eV 时,产生的内应力会接近最大值,内应力的大小与具体的材料以及其他的一些因素有关。最大内应力的存在,可以解释为什么当原子被嵌入到表层下后,缺陷仍然没有消除^[36]。

在高温区,通过提高同系温度或由于反应过程本身温度升高,晶粒尺寸增大,这是由于吸附原子的移动性升高起主导作用,超过了由于离子轰击而产生缺陷以及再形核的过程对晶粒生长的影响^[2]。

通过设置偏压使离子动能升高时,薄膜表面的溅射率也会升高,使得净沉积率降低。对于大多数元素,当离子能量在 400~1 400 eV 时,薄膜停止生长。随着离子能量的增加,对薄膜反而产生刻蚀作用。金属离子刻蚀就常被用作一些溅射技术的预处理工艺,常见的如电弧溅射^[37-38]以及高功率脉冲磁控溅射^[39]等技术。

如图 1 所示,在考虑到基底表面离子能量流的基础上,可以使得广义温度 T^* 和动能 E^* 的意义更明确。然而由于结构区域相图中并没有将时间选为显式参数,相关的参数都为平均数,进而限制了其所能展示的内容。需要考虑实际到达基底的离子流的种类,从而给出相应的能量通量权重 α ,还需要对能量通量进行标量化处理,除以材料的特征能量 E_c ,此处选择内聚能。也有人提出选择其它关于结合键的强度能量来进行标量化,但考虑到其它能量与内聚能都有比例关系,所以具体选择哪种能量并不是关键。此外,为了能使 E^* 来表征位移的能量,需要考虑到到达基底的离子与原子的质量比 m_i/m_s 大小,因为运动过程中碰撞产生的动量转移与该参数成比例。可以得到式 4:

$$E^* = \sum_{\alpha} \frac{E_{kin,\alpha}}{E_c} \frac{\alpha}{m_s} J_{\alpha} / \sum_{\alpha} J_{\alpha} \quad (4)$$

当薄膜的生长是一个载能沉积的过程,载能粒子与薄膜中原子具有相同的质量时,即 $m_a = m_s$,式 4 可以作一些简化,同时式 3 可以推广为式 5:

$$T^* = T_h + \frac{1}{k} \sum_{\alpha} \frac{E_{pot,\alpha}}{N_{moved,\alpha}} J_{\alpha} / \sum_{\alpha} J_{\alpha} \quad (5)$$

由于是表征脉冲制备过程,式 4 和式 5 都没有考虑时间变化的影响。在高功率脉冲磁控溅射等沉积过程中,参数通常选为整个脉冲周期的平均值。

显然,到达基底表面的所有粒子所携带的能量不同,但是最终都转化为对整个薄膜的非局部的热作用,从而使得反应过程达到更高的同系温度。换言之,薄膜的生长过程不可能发生在温度 T^* 很低而能量 E^* 很高的条件下。因此结构区域相图中存在一个不可达到的区域。当能量非常低时,从等离子体中产生的离子不能够到达基底表面,会产生另一个不可达到的区域。

3 结论

文中所讨论的内容还有许多考虑不周的方面,单元素薄膜,多元素复合薄膜,多相分立纳米薄膜以及低温条件下含有的非晶薄膜等之间的差别都还没有考虑。文中目的在于拓展已有的结构区域相图,对其进行改进,使其能够用来描述大量离子流作用下的载能沉积过程。许多细

化与表述仍是停留在概念方面。实际上,用薄膜微观结构区域相图来描述膜的生长的动态过程注定要定性的,这是因为要对实际成膜过程要做必要的简化。尽管结构区域相图中如温度、气压压强等能够直接读数的参数并不多,但通过概括分析,扩展后的薄膜微观结构区域相图,还是可以作为解释不同条件下薄膜生长实际过程的一个工具。

提出一种新的结构区域相图主要有两个目的。一是提供一种直观的分析制备参数与薄膜微观结构的手段,降低问题复杂性,有助于掌握薄膜制备过程中的主要趋势,并为调整镀膜参数指明方向。二是强调了广义能量坐标轴以及等离子体辅助沉积过程中相关参数对薄膜制备的影响,尽管这会一定程度的降低该结构区域相图的通用性。

致谢

感谢 J. Brown, A. Ehiasarian, P. Hovsepian, J. Andersson 以及一位匿名审稿人的建议。本研究得到美国能源部能源效率与可再生能源部门副部长的资助,合同编号为 DE-AC02-05CH11231。

参考文献

- [1] B. A. Movchan, A. V. Demchishin, *Fiz. Met. Metalloved. (USSR)*, (*Phys. Met. Metallogr.*), vol. 28, 1969, p. 653.
- [2] L. Hultman, J. E. Sundgren, in: R. F. Bunshah (Ed.), *Handbook of Hard Coatings*, Noyes, Park Ridge, NY, 2001, p. 108.
- [3] P. B. Barna, M. Adamik, *Thin Solid Films* 317 (1998) 27.
- [4] J. A. Thornton, *J. Vac. Sci. Technol.* 11 (1974) 666.
- [5] J. E. Greene, in: R. F. Bunshah (Ed.), *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings*, Noyes, Westwood, NJ, 1994, p. 681.
- [6] D. M. Mattox, *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*, Noyes Publications, Park Ridge, N. J., 1998.
- [7] A. Anders, *Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation*, Springer, New York, 2008.
- [8] J. Musil, *Vacuum* 50 (1998) 363.
- [9] M. W. Thompson, *Phila. Mag.* 18(1968) 377.
- [10] T. Ono, T. Kenmotsu, T. Muranoto, in: D. Depla, S. Mahieu (Eds.), *Reactive Sputter Deposition*, Springer, Berlin, 2008, p. 1.

- [11] R. Messier, A. P. Giri, R. A. Roy, *J. Vac. Sci. Technol. A* 2 (1984) 500.
- [12] I. Petrov, F. Adibi, J. E. Greene, L. Hultman, J. E. Sundgren, *Appl. Phys. Lett.* 63 (1993) 36.
- [13] M. Mausbach, *Surf. Coat. Technol.* 74-75(1995)264.
- [14] J. S. Colligon, *J. Vac. Sci. Technol. A* 13 (1995) 1649.
- [15] D. R. McKenzie, M. M. M. Bilek, *Thin Solid Films* 382 (2001) 280.
- [16] O. R. Monteiro, *Annu. Rev. Mater. Sci.* 31(2001)111.
- [17] I. I. Aksenov, V. G. Padalka, V. T. Tolok, V. M. Khoroshikh, *Sov. J. Plasma Phys.* 6(1980) 504.
- [18] P. J. Martin, A. Bendavid, H. Takikawa, *J. Vac. Sci. Technol. A* 17 (1999) 2351.
- [19] V. Kouznetsov, K. Macak, J. M. Schneider, U. Helmersson, I. Petrov, *Surf. Coat. Technol.* 122 (1999) 290.
- [20] J. Alami, P. O. A. Persson, D. Music, J. T. Gudmundsson, J. Bohlmark, U. Helmersson, *J. Vac. Sci. Technol. A* 23 (2005) 278.
- [21] A. Ehasarian, in: R. Wei (Ed.), *Plasma Surface Engineering Research and its Practical Applications*, Research Signpost, Kerala, India, 2008, p. 35.
- [22] R. Chistyakov, B. Abraham, W. D. Sproul, 49th Ann. Tech. Conf. Proc, Society of Vacuum Coaters, Washington, D. C, 2006, p. 88.
- [23] R. C. Krutenat, W. R. Gesick, *J. Vac. Sci. Technol.* 7 (1970) S40.
- [24] W. M. Posadowski, Z. Radzimski, *J. Vac. Sci. Technol. A* 11 (1993) 2980.
- [25] A. Wiatrowski, W. M. Posadowski, Z. J. Radzimski, *J. Vac. Sci. Technol. A* 26 (2008) 1277.
- [26] J. Andersson, A. Anders, *Phys. Rev. Lett.* 102 (2009) 045003.
- [27] J. A. Hopwood (Ed.), *Ionized Physical Vapor Deposition*, Academic Press, San Diego, CA, 2000.
- [28] U. Helmersson, M. Lattemann, J. Bohlmark, A. P. Ehasarian, J. T. Gudmundsson, *Thin Solid Films* 513 (2006) 1.
- [29] J. Alami, P. Eklund, J. M. Andersson, M. Lattemann, E. Wallin, J. Bohlmark, P. Persson, U. Helmersson, *Thin Solid Films* 515 (2007) 3434.
- [30] A. Anders, J. Andersson, A. Ehasarian, *J. Appl. Phys.* 102 (2007) 113303.
- [31] S. M. Rossnagel, *J. Vac. Sci. Technol. A* 9 (1989) 261.
- [32] S. Mráz, J. M. Schneider, *J. Appl. Phys.* 100 (2006) 023503.
- [33] W. Eckstein, *Computer Simulation of Ion-Solid Interactions*, Springer-Verlag, Berlin, 1991.
- [34] D. K. Brice, J. Y. Tsao, S. T. Picraux, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 44 (1989) 68.
- [35] G. Carter, *Phys. Rev. B* 62 (2000) 8376.
- [36] M. M. M. Bilek, D. R. McKenzie, *Surf. Coat. Technol.* 200 (2006) 4345.
- [37] W. -D. Münz, D. Schulze, F. J. M. Hauzer, *Surf. Coat. Technol.* 50 (1992) 169.
- [38] A. P. Ehasarian, A. Anders, I. Petrov, *J. Vac. Sci. Technol. A* 25 (2007) 543.
- [39] A. P. Ehasarian, J. G. Wen, I. Petrov, *J. Appl. Phys.* 101 (2007) 054301.

(责任编辑:陈茜)