[1]磁控溅射启辉电压波动和机理

牟宗信*，邓新绿，苟伟，李国卿，张鹏云

（大连理工大学 三束材料表面改性国家重点实验室，辽宁 大连 116024）

摘 要: 磁控溅射沉积技术被广泛应用于沉积各种功能薄膜。深入研究其放电特性对控制沉积过程有重要意义。在磁控靶表面，和电场正交的磁场影响放电特性，一般由$I \propto V^n$来表达，其中I为放电电流，V为放电电压，n 为和阴极结构、磁场和材料有关的常数。在某些特殊的阴极结构和放电参数条件，放电特性也会偏离这种规律。本文研究发现在磁控靶起辉的过程中，阴极电压会出现有规律的波动，波动的幅度在 50-350V 之间，放电电流也有波动，幅值小于 2A，当波动停止，放电电流达到由$I \propto V^n$控制的数值；在相对应电压范围，降低阴极电压也出现同样现象。推测阴极电压波动是进入稳定放电过程的临界状态，这种现象与磁控辉光放电雪崩过程和霍尔电流的形成有关。本文根据汤生雪崩放电理论分析了出现电压波动的原因。

关键词: 等离子体/磁控溅射；辉光放电；汤生理论

1 引言

随着表面工程技术发展和功能薄膜广泛应用于装饰、光电、微机电和微电子领域，要求精确控制薄膜的形貌、结构，以获得需要的光电、机械性能[1]。薄膜的不同生长模式受到沉积参数影响，结构-区域模型（Structure-Zone-Model）中包含了偏压，离子/原子到达比和基体温度三种基本沉积参数[2]，沉积的过程中，偏压调节带电粒子能量，基体温度可以独立控制，放电特性是控制薄膜生长的另一种关键因素，通过影响等离子体状态影响粒子迁移、形核和生长等过程，在原子尺度上控制薄膜的生长。

磁控溅射原理是利用了$\vec{E} \times \vec{B}$交叉场对电子的约束作用[1]，提高阴极前的电荷密度和电离率，磁控靶表面等离子体是封闭环状。阴极鞘层有很强的电场，放电气体和溅射原子的电离主要发生在阴极鞘层，阴极表面的电荷在静电力和密度梯度作用下向沉积区域迁移，这个过程可以用等离子体理论描述[3-6]。根据气体放电理论[7]，阴极鞘层特性决定的二极放电特性，一般符合蔡尔德定律，放电电压和气压的关系符合Paschen定律。由于磁控溅射靶表面磁场和电场形成的正交场作用，放电气压、电压显著降低，溅射效率则显著提高。由于多种因素之间存在相互耦合作用，不容易得到一种准确的模型，大量实验研究表明，磁控溅射靶放电系统的特性一般符合$J \propto V^n$这样的关系[1,7]，其中J为放电电流密度，V为阴极电压。放电参数如放电气压、放电气体等放电参数可以根据实验情况，

[1]本文工作得到国家自然科学基金（批准号 50407015）资助。

按照需要进行调整；放电系统的阴、阳极形状、位置对放电特性也有影响[3-6]，需要在系统的设计中考虑优化的方案，获得理想的使用性能。

Maniv等研究一般放电系统的伏安特性规律[8]，通过实验数据的拟合分析得到经验公式，也适用于射频和中频磁控溅射靶。Pekker研究了低气压磁控放电理论[9]，分析了在短距、负空间电荷模式下的磁控放电系统的放电特性，在小电流放电，模型是稳定的，使用经典的扩散系数，但对较大的放电电流，模型不稳定，电子被等离子体波动散射。通过改变阴极的形状和空心阴极结构的溅射靶[10]，能够改变放电特性，阴极表面如果分布一些孔，在增加电流时会出现负的等离子体阻抗，电子被约束在空洞形成的势阱中，放电特性能够偏离一般的磁控溅射靶的放电特性。还有通过动力学理论和用数值方法研究各种气压、磁场等因素对放电特性的影响[3-5]，如电荷迁移的动力学过程，气压、磁场对放电特性的影响、磁场和阴极离化效率之间的关系、阴极鞘层随放电参数的变化规律等，通过这些研究能够增强对各种实验现象的理解。本文工作中采用记录放电系统升高电压和降低电压过程中的伏安特性的办法，得到磁控溅射系统的一种特殊放电过程即在150-350V的电压区域，系统出现放电电压和电流波动，本文详细描述了这种波动现象，经初步分析这种波动现象和磁控溅射放电过程中雪崩电离过程与霍尔电流的形成有关。

2 实验过程

实验系统的结构如图1所示。磁控溅射靶的表面水平磁场由NdFeB永磁材料产生，最大水平磁场强度为1600Gs。电源是电压在0-1000V可调的滤波直流电源，电动控制的调压器调节阴极电压。磁控溅射系统的工作真空度为0.1-5Pa，放电气体高纯Ar(99.999%)，循环水冷却阴极。阴极直径95mm的圆形磁控溅射靶。实验中阴极靶材料为纯钛（99.8%），气体质量流量计控制气体流量。本文实验中系统的工作真空度分别设定为4Pa和0.78Pa，气体流量分别为23.5sccm和14.5sccm。数据采集系统如图2所示。电压和电流测量分别由分压电阻和霍尔电流探头输入A/D采集板，由程序读出。实验的过程中，控制电动调压器升高阴极的电压，升压的速率约25V/s，阴极电压通过分压器输入A/D卡，霍尔电流计测量阴极放电的电流，输入A/D卡，计算机通过A/D转换卡来读取阴极电压和电流的数据，采样速率为120/s。

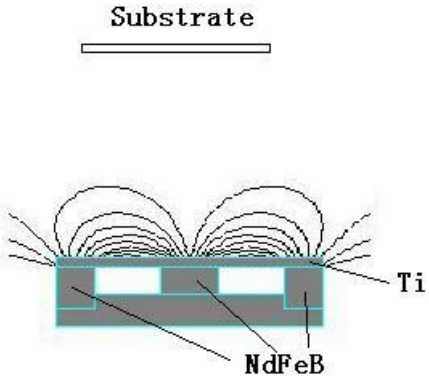

图 1 磁控靶结构简图

Fig.1 Schematic of magnetron target

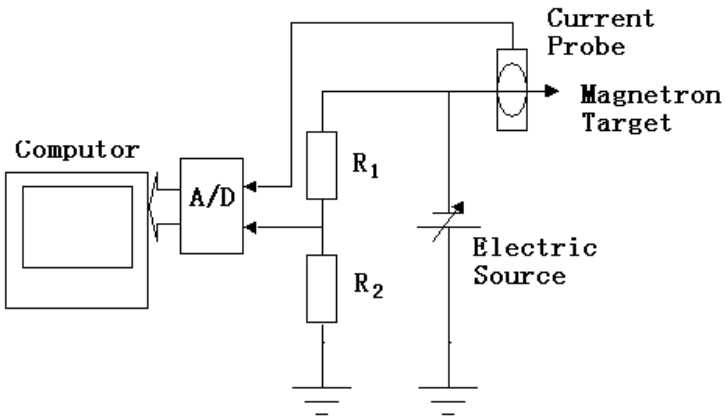

图 2　磁控溅射放电数据采集系统。

Fig.2　Magnetron and data recording system

2 实验的结果与讨论

实验中采用电动控制调压器匀速升压，达到稳定放电状态后再匀速降压。放电气体流量为 14.5 sccm，放电气压为 0.78Pa 时，得到的电压升高、电压降低过程曲线如图 3(a)、3(b)所示。放电气体流量为 23.5sccm，放电气压为 4.0Pa 时电压变化过程和上述曲线相似。图中横坐标是采样的数据点，纵坐标放电电压（负值）。如图 3 所示电压升高过程中，达到放电的临界电压出现大幅度波动，波动的幅度不断加大，平衡电压为 250V 左右，然后进入稳定的放电状态；在降压的过程中，放电的电压下降到一定的数值时电压开始波动，同时有电流波动，电压继续下降达到一定数值时放电过程停止。在电流曲线上观察，电压出现波动区域，电流变化较小，电压波动停止时电流大幅增加，减

小放电电压时，电流缓慢减小。根据实验数据分析，阴极电压的波动频率约为 10-20Hz 左右。在不同气压下另一组实验也表现出同样的规律。对于两种不同真空度条件下放电电流变化过程进行观察，在同一放电电压的条件下，在 0.78Pa 时的放电电流大于 4Pa 的放电条件。

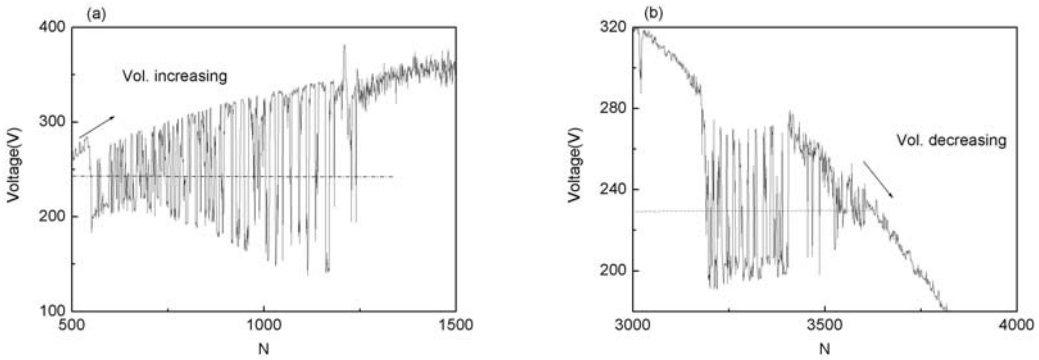

图 3　磁控溅射阴极电压波动过程。（a）为升高电压过程；（b）为降低电压过程

Fig.3 Voltage Waveform at magnetron cathode (a) voltage increasing (b) voltage decreasing

电压、电流的波动发生在起辉和熄灭过程。根据汤生放电理论[7]，当两电极之间的电压达到辉光放电的临界电压，就会发生雪崩过程。最小的临界电压 $V_{\min}$ 取决于Paschen定律 $V_{\min}=f(Pd)$，P 是放电气压，d 是电极间隙。雪崩过程中，电离形成电子/离子对，在电场作用下，电子、离子分别向两极运动，正离子向阴极运动速度很慢。电子向阳极运动过程中不断被加速，又可引起气体电离，称为次级电离。次级电离后电子数目急剧倍增，形成“雪崩”现象。这样的过程继续下去就导致了雪崩放电过程，雪崩电流 I 呈指数增长趋势 $I=I_0\exp(\alpha x)$，其中 I_0 是辉光放电开始时的暗电流，α 为汤生第一电离系数，x 为距离阴极的距离。汤生放电条件为 $\gamma\left(\exp(\alpha l)-1\right)=1$，其中 γ 是阴极材料的二次电子发射系数，l 为阴阳极距离。可见辉光放电启辉和阴极材料、放电介质、气压以及阴阳极之间的距离有关。

由于磁控溅射阴极靶存在平行于靶表面的磁场，平行磁场的作用是使阴极表面的电子运动距离增大，提高电离度[1]，放电电流的一部分形成霍尔电流分量，集中在阴极表面区域，在阴极区形成较大的电位降。磁控溅射放电过程和直流辉光放电的这种差别造成电压波动的现象。磁控辉光放电启始过程符合一般汤生放电规律。但是放电电流分成两种分量，垂直阴极表面的传导电流 j_D 和平行阴极表面的霍尔电流 j_H。由于霍尔电流的形成，电子集中在阴极区形成较大的阴极电位降，在垂直阴极表面的方向上，电子无法获得足够的能量去电离中性原子，霍尔电子的能量取决于电子的霍尔漂移速度 $\vec{v}_H=\left(\vec{E}\times\vec{B}\right)/B^2$，式中的电场强度 $\vec{E}$ 取决于阴极电压，在电子能量无法电离中性原子

的条件下，雪崩放电过程的过程就要终止。第二次雪崩过程要在提高阴极电压的条件下重新开始。如此往复，直到电压达到足够高时，阴极鞘层电子的能量能够持续电离中性原子，能维持雪崩放电过程，放电的过程能够继续。实验中降低电压直至放电熄灭的过程所发生的现象和提高电压的过程正好相反。当阴极电压低于维持辉光放电的最低电压时，电子能量无法电离中性原子的条件下，雪崩放电过程的过程就要终止。在霍尔电流消逝的瞬间，大量离子在电场的作用下向阴极运动，由于阴极电位降已经消逝，所以离子的能量可以产生大量的二次电子，使雪崩的过程又重复开始，直到霍尔电流和阴极电位降的形成，瞬间雪崩过程终止，放电又重新在电压降低的条件下进行下一次的循环。

根据文献[11]分析，j_H/j_D 代表霍尔电流分量和传导电流分量的比值，和电子的回旋频率、碰撞频率的关系为 $j_H/j_D=\omega/\nu$，其中 ω 是电子的回旋频率，ν 是电子碰撞频率。根据汤生理论推导，满足 $\gamma\left(\exp\left(\alpha l\right)-1\right)=1$ 的条件下，系统可以进入雪崩的放电过程；在平面圆靶磁控溅射过程中，由于阴极表面磁场的影响，临界的放电条件要有一个附加的霍尔电流分量，形成一个临界的放电过程，临界条件应该满足 $\gamma\left(\exp\left(\alpha l\right)-1\right)=(\nu+\omega)/\nu$，系统可以进入正常的放电过程，总结这两种临界条件，出现电压波动的条件为 $1<\gamma\left(\exp\left(\alpha l\right)-1\right)<(\nu+\omega)/\nu$。根据汤生雪崩放电理论和帕邢定律，放电的条件除和阴极电压有关之外，还和介质电离系数与二次电子发射系数有关。根据公式 $\alpha/P=f\left(E/P\right)$ 阐述，电离系数 α 和压强 P 的比值是电场强度 E 和压强 P 比值的函数，临界条件和放电气压也有关系，对于不同的放电系统，所得到的实验现象会有一定差别。

4 结论

实验中发现一种磁控溅射临界放电状态的电压、电流波动现象，电压的波动的频率约为 10-20Hz。波动的幅度在 50-350V 之间，放电电流也有波动，平衡电压为 250V 左右，电流幅值小于 2A。初步分析是由于磁控溅射放电条件下，与霍尔电流的形成有关，根据磁控溅射靶的磁场条件初步给出了电压波动条件。

参考文献：

[1] 田民波，刘德令. 薄膜手册. 北京：机械工业出版社，1991. P421

[2] Kelly P J and Arnell R D. Development of a novel structure zone model relating to the closed-field unbalanced magnetron sputtering system, J. Vac. Sci. Technol.

[3] Rossnagel S M, Kaufman H R. Charge transport in magnetron, J. Vac. Sci. Technol., A5(4)1987 J.Vac.Sci.Technol.A5(4) 2276-2279

[4] Kadlec S, Quaeyhaegens C, Knuyt G. Energy distribution of ions in and unbalanced mangetron plasma measured with energy-resolved mass spectrometry, Surface and Coating Technology, 1997, 89:177-184

[5] Sheridan T E, Goecker M J, Goree J. Model of energetic electron transport in magnetron discharges, J. Vac. Sci. Technol., 1990, A 8(3):30-37

[6] Goree J and Sheridan T E. Magnetic field dependence of sputtering magnetron efficiency, Appl. Phys. Lett., 1991, 59(9):1052-1054

[7] 罗思 J R.工业等离子体工程，科学出版社，1998, 66

[8] Westwood W D and Maniv S. The current- voltage characteristic of mangetron sputtering systems, J.Appl.Phys., 1983, 54(12): 6841-6846

[9] Pekker L and Krasheninnikov S I. On the theory of low-pressure magnetron glow discharge. Physics of Plasma, 2000, 7:382-390

[10] Bradley J W and Cecconello M. Modifying the electrical characteristics of magnetron sputtering source using hollow cathode structured targets. Vacuum, 1998, 49:315-329

[11] Rossnagel S M. Induced Drift Currents in Circular Planar Magnetrons，J.Vac.Sci.Tchnol.A5(1),Jan/Feb 1987

The voltage waveform and mechanics of magnetron ignition

Mu Zong-xin, Deng Xinlu, Gou Wei，Li Guo-qing, Zhang Peng-yun

（State Key Laboratory of Materials Modification by Laser, Ion and Electron Beams, Dalian University of Technology, Dalian, 116024）

Email:mzongxin@dlut.edu.cn

Abstract： Magnetron sputtering is extensively applied to deposit functional films. Studies of properties of magnetron are meaningful for deposition process controlling. The magnetic field on the target, which is perpendicular to electrical field, has significant influences on the properties i.e. $I \propto V^n$, in which I is the discharge current, V is the discharge voltage, n is a constant depending on cathode structure, magnetic field and cathode material. The properties have variation under specify parameters. In ignition process the waveform of voltage was observed. The voltage waveform was described when increasing and decreasing the cathode voltage in the range of 150-350V and the discharge current is less than 2A. It is indicated that the voltage vibration is the critical process before the steady discharge. It has relation with the burst discharge process and the formation of Hall current in the magnetron.

Key Words: Plasma/Magnetron; Glow discharge; Townsend theory