

자기 중성방전 스퍼터링에 의한 산화몰리브덴 박막의 제작 및 그 응용

(Molybdeum Oxide Film Preparation by a Magnetic Null Discharge Sputtering
and its Application)

김두환* · 박차수 · 성열문**

(Doo-Hwan Kim · Cha-Soo Park · Youl-Moon Sung)

요 약

본 실험에서 자기중성방전 스퍼터링 시스템으로 균일한 산화 몰리브덴 박막을 얻을 수 있었다. 한편, 열처리 조건에 따라 박막의 제반특성은 XRD, XPS 및 SEM 등으로 고찰되었다. 기판의 열처리 온도에 따라 결정성장배향이 (100)에서 (210)으로 변함으로써, 박막의 결정성이 향상되었으며, 박막의 구조는 치밀해졌다. 광전자 Mo3d의 XPS 피크치는 결합에너지 228.9[eV]과 232.4[eV]에서 검출되었지만, O1s 피크치는 532.6[eV]였다. 서지 전압으로 방전시험은 연속적으로 10회 수행되었다. 전류-전압 특성곡선으로부터, 400[V]의 전압이 인가된 상태에서 시료의 초기 및 평균 저항치는 1.4[MΩ]과 800[kΩ]이었다.

Abstract

In this experiment molybdeum oxide(MoO₃) films were prepared by a magnetic null discharge(MND) sputtering system and fundamental properties by XRD, XPS and SEM analysis were investigated. The initial and mean insulation resistance of the same with MoO₃ film were about 1.4[MΩ] and 800[kΩ] under the condition of applied voltage of 400[V]. The preferred orientation in the films changed from(100) to (210) with substrate temperature. Two XPS peaks of the Mo3d photoelectron were detected at the binding energies of 228.9[eV] and 232.4[eV], while the binding energy of the O1s peak was 532.6[eV]. The substrate temperature and reactivity gives large effects to the structure and growth of the film and system is also very useful for performing the uniform reactive deposition. It can be found from the result of a MoO₃ film deposition that the system is very useful for performing the uniform reactive sputtering.

Key Words : Magnetic Null Discharge, Molybdeum Oxide, Electron Heating, Erosion, Arrester, Uniform Process

* 주저자 : 경성대학교 전기전자공학과

** 교신저자 : 경성대학교 전기전자공학부 부교수

Tel : 051-620-4777, Fax : 051-524-5980

E-mail : ymsung@ks.ac.kr

접수일자 : 2008년 12월 5일

1차심사 : 2008년 12월 8일

심사완료 : 2008년 12월 22일

1. 서 론

마그네트론 스퍼터링 방식은, 대향타겟 스퍼터, ECR 스퍼터, 홀로캐소드 형태 등 다양한 방식들이 제안되고 있다[1-4]. 각 스퍼터 시스템들은 각각의 특성들을 지니고 있는데, 예를 들면, 마그네트론 스퍼터 장치의 장점은 고속의 증착율을 가지며[1-2], 대향타겟 스퍼터는 자성물질의 박막을 얻을 수 있다는 점을 들 수 있다[3]. 특히 마그네트론 스퍼터 방식은 탁월한 증착속도 때문에 가장 폭넓게 산업에 이용되고 있다. 그러나, 이 방식은 타겟 표면에서의 E×B 드리프트 현상에 의한 국부적으로 타겟의 침식(Erosion)이 발생하여, 타겟의 전 면적을 사용하는데 제한이 있다. 그리하여 타겟의 사용면적을 극대화할 수 있는 방안들이 모색되어 왔고[4], 이러한 배경 하에 자장의 동적제어에 의해 Erosion 영역을 제어하는 방식의 Magnetic null discharge(MND) 스퍼터 장치가 제안되었다[5]. 이 방식은 영구자석들의 배치에 의해 타겟 표면에 자기중성(magnetic null) 영역을 형성시키고 13.56[MHz]의 고주파 전계를 인가함으로써 MN 영역에서의 전자가열(electron heating)을 효율적으로 발생시켜 고효율의 플라즈마를 발생시키는 원리를 도입하고 있다[6]. 특히 박막형성 과정에서 MN 영역의 위치 및 반경을 제어할 수 있기 때문에, 플라즈마의 동적제어를 통한 공정의 균일도(Uniformity)를 높일 수 있는 장점이 있다[7-9]. MND 기술의 동적인 제어성이 스퍼터링 공정에서 이용이 되면, 타겟의 국부적인 침식문제를 해결하고, 높은 스퍼터율을 얻을 수 있으리라 기대된다. 한편 전력기기의 보호 장치로서 파괴소자의 역할은 매우 중요하다[10-12]. 현재까지, 파괴소자는 소형변압기 등의 보호 특성 개선과 소형화 등으로 개발되어 왔다. 파괴소자의 구성은 두 가지 방식으로 이루어진다. 즉, SiC 혹은 ZnO로 이루어진 비선형 저항 파괴소자와 두 전극 갭 사이의 아크방전에 의한 열로 아크를 소호시키는 방사형 파괴소자 등이다[13-14]. 기존의 통신회로 혹은 자동화기기의 안전성을 고려할 때, 파괴소자는 300[V] 보다 낮은 전압에서 동작되어야 한다. 그러나 널리 이용되고 있는 ZnO 파괴소자는 고 주파수에서 가지는 큰 손실이 문제가 된

다. 이러한 이유 때문에 낮은 정전용량을 가진 가스 방전 갭이 되든지 혹은 SF6 같은 특수 기체를 주입시킨 방전관을 사용하게 된다. 방전 갭 방식인 경우에는, 300[V]보다 낮은 전압에서 방전이 되어야 하므로 두 전극의 갭은 0.1[mm] 보다 작아야 한다. 이로 인해 두 전극이 대전류의 충격에 의한 절연파괴 및 단락으로 분해가 되는 문제가 있다. 아울러, 가스 주입형 방전관은 가스 성분의 변화로 피해를 입기 쉽다. 이에 반해 최근 제안되고 있는 산화몰리브덴 소재의 파괴소자는 기존 소자와는 달리 기기의 소형화, 고속 응답시간, 반영구적인 뛰어난 성능 등으로 전력 배전설비의 안전성 및 경제성을 제고할 수 있다는 점에서 기대되고 있다.

본 연구에서는 몰리브덴 파괴소자를 MND 스퍼터링법으로 제작하여, 몰리브덴 박막 및 파괴소자에의 응용에 있어서 제반특성을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 이론

그림 1은 스퍼터링 장치로서 영구자석들로 이루어진 Magnetic null discharge (MND) 스퍼터 장치를 나타낸다. MND 플라즈마를 발생시키는 핵심은 자계를 변화시킴으로써 위치 제어가 용이한 magnetic null(MN) 영역의 형성에 있다. MND 스퍼터 장치를 간략히 정리하면 다음과 같다. 장치는 원형 상으로 8조의 영구자석이 설치되어 있고, 자석들의 배치에 의해 몰리브덴 타겟 표면과 수직으로 8개의 magnetic null 영역이 형성되어 진다. 몰리브덴 타겟은 폭이 70[mm]인 도우넛 형태이며, 타겟과 기판 간의 거리는 200[mm]이다. 그리고 타겟의 과열을 막기 위해 냉각수가 타겟 내부를 통과하여 흐르도록 되어 있다. 링 형태의 바깥 자계홀더는 박막을 증착하는 동안 MN magnetic field의 제어를 위해 5[°]씩 간격으로 회전할 수 있도록 되어 있다. 자계를 회전시킴으로써 박막의 균일성을 이룰 수 있다. 이와 같이 MND 플라즈마를 적용함으로써 MN 영역의 위치 및 반경을 제어할 수 있기 때문에, 플라즈마의 동적 제어를 통한 공정의 균일도(Uniformity)를 높일 수 있다. 이것이 MND 스퍼터·장치가 가지는 장점이다.

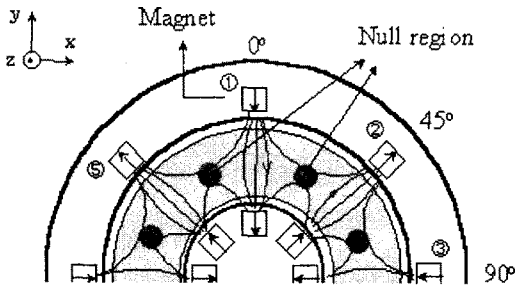


그림 1. Magnetic null discharge(MND) 스퍼터 장치
Fig. 1. Schematic arrangement of the experimental apparatus

그림 2는 영구자석 배치에 따른 타겟 표면의 자장 분포를 측정한 결과를 나타낸다. 그림1에서 알 수 있듯이, 영구자석(120[mT])의 배열에 따라 자계는 0~90[°] 구역으로 나누어진다. 입의 4개의 인접한 자석 그룹의 배치에 따라 MN 영역은 자석들을 포함하는 평면의 중앙 한 점에 형성된다. 그림 2에서 보여 주듯이, MN 영역들은 Z축 방향에서 타겟 표면으로부터 64.3[mm], 22.5[°] 지점과 64.3[mm], 67.5[°] 지점 등에서 형성된다. 즉, 타겟 표면에 B=0인 라인이 만들어진다. 그림에서 $r_N=64.3[mm]$ 은 null 점들을 포함하는 타겟 반경이다. 그리고 13.56[MHz] RF 전원으로부터 타겟을 경유하여 MN 영역에 고주파 전계가 가해 질 때, 전자들은 전자계 하에서 가속된다. 전자 에너지의 계산 결과로부터, MN 영역 근방에서의 전자의 평균 에너지는 다른 영역에 비해 두 배보다 크다는 것을 알 수 있다[6-9]. 효율적인 전자 가열(electron heating)이 MN 영역 근방에서 이루어짐을 알 수 있고, 이로 인해 타겟 표면에 걸쳐 국부적으로 고밀도 플라즈마가 MN 영역을 중심으로 형성된다. 한편, 음극타겟의 내부와 외부 측에는 20[mm] 높이의 벽을 각각 설치하였다. 이것은 MN 영역으로부터 양극을 향하여 자계를 따라 움직이는 전자들이 이들 음극 벽의 전계로부터 반발되어, 다시 MN 영역에서 되돌아 가게 하여 전자의 비행 수명을 길게 하고 전자가열을 반복시킴으로써 방전 효율을 향상시키는 효과가 있다. 게다가 이 방식의 가장 큰 특징은 타겟의 Erosion 영역이 MN 영역 근방에 집중되는데, 프로세스 중에 자계의 위치를 변화

시킴으로써 Erosion 영역을 제어할 수 있다. 또 상이한 자속밀도를 갖는 자석들을 사용한다면, MN 영역의 방사상 위치 변화도 가능하다. 이것은 본 장치의 MN 영역 근방에서 플라즈마 생성율을 최대로 한다면, 타겟 표면에 플라즈마의 제어가 가능하고, 타겟 침식의 균일도를 향상시킬 수 있음을 의미한다.

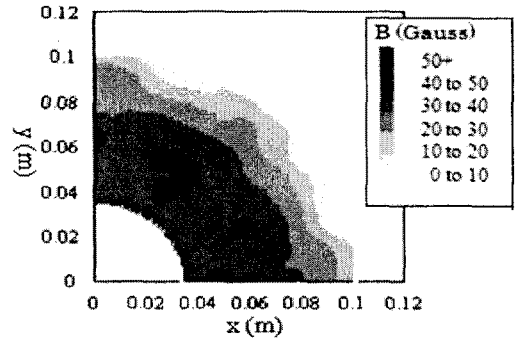


그림 2. MND 스퍼터 타겟 표면의 자장 분포
Fig. 2. Calculated magnetic field line distribution

3. 실험결과 및 고찰

박막 증착에 있어서 균일도 및 증착율은 프로세스의 중요한 요소 중 하나이다. 몰리브덴을 타겟으로 하여, 기관의 방사상 위치를 변화시킴에 따른 박막 두께를 그림 3에서 보여 주고 있다.

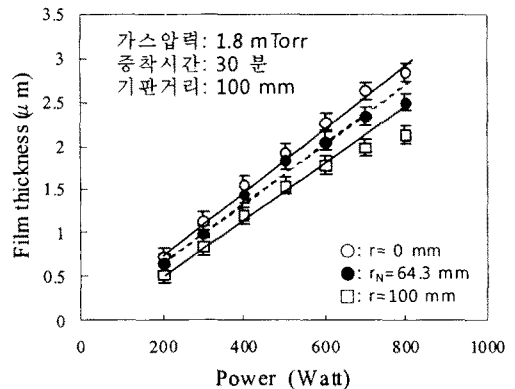


그림 3. 기관 위치에 따른 박막 두께 분포
Fig. 3. Profile of the Mo films thickness deposited by the MND sputter system

자기 증생방전 스퍼터링에 의한 산화몰리브덴 박막의 제작 및 그 응용

타겟과 기판과의 거리는 100[mm]이다. 타겟 전극은 30분 동안 아르곤 1.8[mTorr] 압력하에서 스퍼터된다. RF 전력이 400[W]일 때, 중앙 점에서 ($r=0$ [mm]) 약 1.6[μm]의 최대 박막 두께가 얻어졌다. 타겟의 바깥쪽($r=100$ [mm])의 최소 박막 두께는 약 1.23[μm]이었다. 박막 두께의 방사상 균일도는 약 $\pm 6\%$ 이었다. 여기서, 박막 두께의 균일도는 박막 두께에 대해서 다음과 같이 정의된다. 즉, (최대 두께 값-최소 두께 값)/(최대 두께 값+최소 두께 값) $\times 100\%$ 이다.

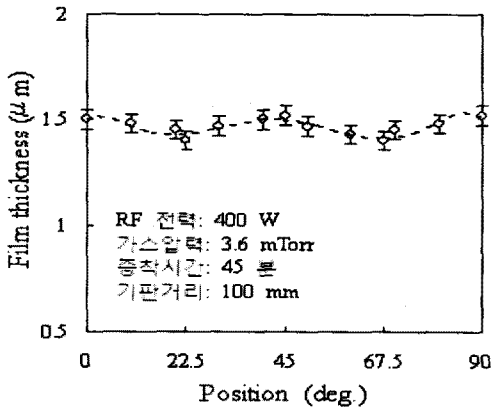


그림 4. MN field의 회전에 따른 MND스퍼터 시스템에서 증착된 몰리브덴 박막 두께의 위치별 분포

Fig. 4. Circular profile of the Mo films thickness deposited by the MND sputter system with MN filed rotation

그림 4는 MN field의 회전에 따른 MND 스퍼터 시스템에서 증착된 몰리브덴 박막 두께의 위치별 분포를 나타내고 있다. 그림 4에서는 스퍼터가 진행되는 중에 MN의 위치를 동적으로 변화시키게 되면 박막 증착 및 타겟의 erosion분포가 어떻게 변화하는지를 규명하고자 하였다. 기판의 위치는 타겟의 반경 선 $rN=64.3$ [mm] 상에서 5°씩 간격으로 0~90°로 변할 수 있도록 하였다. RF 전력과 증착시간은 각각 400[W]와 36분이었다. 그 외 다른 조건은 그림 3과 동일하다. MN field가 회전 없이 고정될 때, MN 영역사이의 0°, 45°, 90° 위치에서 박막의 최대 두께 약 1.55[μm]가 얻어졌다. 22.5° 및 67.5°인 MN 위치에서 최소의 두께는 약 1.4[μm]

이었다. 이러한 두께 분포로부터, 박막의 두께 균일도는 $\pm 5.1\%$ 로 나타났고, 평균 증착율은 49 [nm/min]이었다. 이러한 웨이브형의 두께 분포는 Knudsen'cosine 법칙[15]에 따르면, 증착동안 타겟 표면의 침식면적이 불균일함을 의미한다. 그리고 타겟 표면을 충격하는 이온들의 공간적인 분포와 두께 분포와는 밀접한 관련이 있다. 높은 에너지를 갖는 아르곤 이온들이 MN field 영역에서 타겟을 집중하여 충격하기 때문에 각각의 위치별 박막 증착율은 달라지는 것으로 보인다. 이러한 두께의 불균일도는 MN field의 회전으로 개선되어 질 수 있음을 확인할 수 있고, 최적의 막 두께 균일도는 20[cm] 지름 내에서의 0.26[%]였다. 증착이 진행되는 동안 MN field의 회전은 다음과 같은 방식으로 이루어 졌다. 초기 스퍼터링은 그림 2의 0° 조건에서 출발하였고, 증착 시간이 1분씩 경과할 때마다, 바깥 쪽 자석들을 5°씩 회전시켰다. 그리하여 증착 시간 36분 동안 180°를 회전하게 된다. 이것은 기판의 두께 균일도가 MN field의 동적 위치 제어에 의해 개선되어지는 효과를 도입한 것이다. 그리고 산화 몰리브덴 박막을 얻기 위해 반응성 스퍼터링법이 도입되었으며, 앞서 언급한 바와 같이 증착되는 동안 MN field가 회전하도록 하였다. 이상에서 알 수 있듯이 MND 스퍼터 장치에서 전자가열 면적의 위치는 MN 영역과 일치함을 확인할 수 있다. 또한 자석의 자계 세기와 배열에 따라 전자가열 면적을 제어할 수 있으므로, 타겟의 국부적인 침식문제를 개선하고, 박막의 균일도를 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 5는 MND 스퍼터 장치를 이용하여 Si 기판 위에 성장시킨 샘플의 SEM 사진을 보여주고 있다. 본 실험에서, 입력, 타겟과 기판과의 거리, 스퍼터 전력, 기판온도, 스퍼터 시간 등은 일정하게 고정시켰다. 최적의 산화 몰리브덴 박막은 가스 압력 18[mTorr], RF 전력 600[W], 아르곤-산소 혼합비율 10[%], 기판온도 400[°C], 증착시간 60분 등 스퍼터 조건에서 제작되었다. 산화몰리브덴 층의 두께는 각각 20 및 22[μm]이었고, 기판의 온도와 반응도는 박막의 구조 및 성장에 크게 영향을 끼침을 알 수 있었다. 한편, 반응성 스퍼터링에서 MN field의 회전도

도입되었지만, 박막의 화학적인 특성에는 두드러진 변화가 없었다.

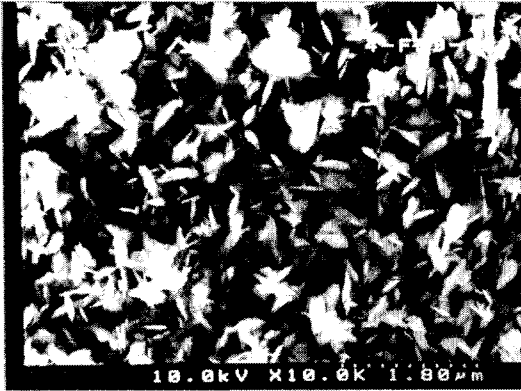


그림 5. MND 스퍼터 장치를 이용하여 Si 기판위에 성장시킨 산화몰리브덴 박막의 SEM 사진
Fig. 5. SEM images of the MoO₃ samples prepared by the MND sputtering

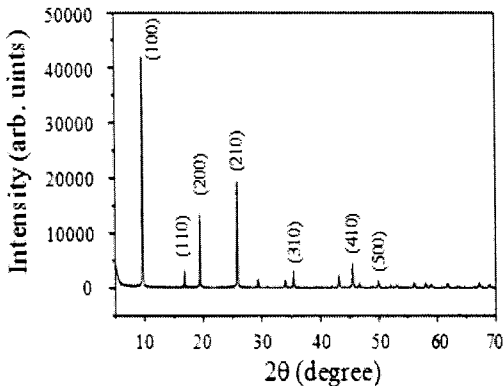


그림 6. MND 스퍼터 장치를 이용하여 Si 기판위에 성장시킨 산화몰리브덴 박막의 XRD 사진
Fig. 6. XRD images of the MoO₃ prepared by the MND sputtering

그림 6은 그림 5의 시료에 대한 산화 몰리브덴의 XRD 사진을 보여주고 있다. 박막의 결정 성장 배향이 기판의 온도에 따라 (100)면에서 (210)면으로 변하였다. 이러한 변화는 기판 온도에 따라 박막의 결정성장이 제어됨을 알 수 있다. 그리고 기판의 온도를 400[°C]까지 상승시키면 박막의 부착력 및 구조적인 특성의 향상을 기할 수 있었다. 본 실험에서 최

적의 기판온도는 400[°C]이었다. 그리고 몰리브덴 산화막에 대한 XPS 분석도 행하였다. Mo3d와 O1s의 XPS의 스펙트럼을 보여 주고 있다.

표 1은 XPS의 분석에 따라 얻어진 각 성분의 스펙트럼 특성을 보여주고 있다. Mo3d 광전자의 두 개의 피크들은 결합 에너지가 228.9[eV]와 232.4[eV]임을 나타내며, O1s 피크의 결합 에너지는 532.6[eV]이었다. 표면의 탄소(C1s)의 피크는 결합 에너지가 약 292.6[eV]이었다. 이는 XPS 분석에서 흔히 나타나는 일반적 특성이다[16]. 결합 에너지 292.6[eV]에서의 C1s 피크는 박막의 표면에서 매시간 얼어졌다.

표 1. XPS의 분석에 의한 각 성분의 스펙트럼 특성
Table 1. XRD spectra of the MoO₃ film

	성분	결합에너지	밀도비
표면	Mo(3d)	228.9/232.4	21.6
	O(1s)	532.6	76.2
	C(is)	292.6	2.2
10[nm] 깊이	Mo(3d)	228.3/231.5	26.1
	O(1s)	534	73.9
	C(is)	-	-

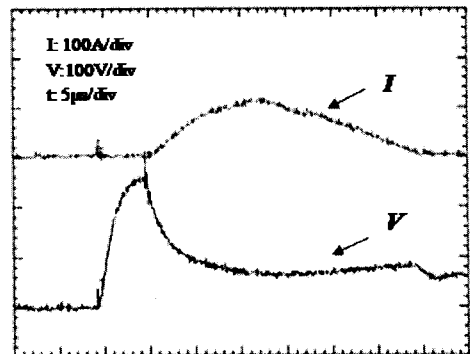


그림 7. 표준 뇌임펄스전류(8/20(μs)) 인가시 산화 몰리브덴 소자의 전류-전압 파형
Fig. 7. I-V curve characteristics of the MoO₃ film at the applied standard impulse current (8/20(μs))

이러한 피크는 XPS의 측정 과정에서 대기 중에 시료가 노출되면서 탄소 성분이 표면에 흡착되었기 때문인 것으로 보인다. 몰리브덴과 산소의 농도비율은 표면 층에서 21.6:76.2이었고, 10[nm] 깊이에서는 26.1:73.9이었다. 이상의 결과들로부터, 양호한 박막이 얻어짐을 알 수 있었다.

그림 7은 절연파괴와 서지 전압에 대해 몰리브덴 피뢰소자를 시험하기 위해서 표준 뇌 임펄스전류(8/20[us])을 인가하여 얻어진 산화몰리브덴 박막 시료의 전류-전압 곡형을 보여주고 있다. 광전자 증배관으로부터 얻어진 발광 신호는 절연파괴 시 발생하는 아크 방전이 서지 전압으로 인해 산화몰리브덴 피뢰소자 시료 내에서 발생함을 알 수 있었다. 서지 전압으로 방전시험은 연속적으로 10회 수행되었다. 전류-전압 특성곡선으로부터, 400[V]의 전압이 인가된 상태에서 시료의 초기 및 평균 저항치는 각각 1.4[MΩ]과 800[kΩ]이었다.

표 2. 열처리 조건에 따른 산화몰리브덴 박막 시료제작

Table 2. Preparation conditions of MoO₃ films

	실험조건	시료 A	시료 B
Ar/O ₂ 혼합비율 10[%]	기판온도	상온	400[°C]
	압력	18[mTorr]	18[mTorr]
	RF전력	600[W]	600[W]
	증착거리	60분	60분
	기판거리	100[mm]	100[mm]
	MN field	5[°]/분	5[°]/분

표 2는 열처리를 하지 않은 산화몰리브덴 박막 피뢰소자 시료(A)와 열처리된 산화몰리브덴 박막 피뢰소자 시료(B)를 제작하여 비교 실험하였다.

두 시료의 절연 상태는 실험 전에 확인하였으며, 절연 회복 상태는 시료(A)에 비해 시료(B)가 우수하였다. 이것은 열처리된 산화몰리브덴 박막 피뢰소자의 갭 사이에 다수의 방전로를 형성하기 때문이라 생각된다. 이상에서 알 수 있듯이, 본 MND 방식에 의해 제작된 몰리브덴 산화막은 피뢰소자의 응용의 관점에서 매우 유용함을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 피뢰소자에의 적용을 위해 산화몰리브덴 박막을 MND 스퍼터링 방식에 의해 제작하였다. 산화몰리브덴 박막에 대해서 XPS 및 SEM 분석 등을 통하여 기본 물성들이 조사되었다. MND 스퍼터링 장치로 몰리브덴 박막의 양호한 균일도 ±0.26[%]가 얻어졌다. 산화몰리브덴 박막의 발광, 전압, 전류, 저항치 등은 표준 임펄스전압(8/20[us])을 인가한 상태에서 산화몰리브덴 박막의 갭 길이를 조정하면서 측정된 결과, 400[V]의 전압이 인가된 상태에서 산화몰리브덴 박막형 피뢰소자의 초기 및 평균 절연 저항치는 각각 1.4[MΩ]과 800[kΩ]이었다. 산화몰리브덴 박막의 증착결과로, 본 MND 방식은 균일한 반응성 박막형성에 매우 유용한 시스템임을 확인할 수 있었다. 향후 MND 스퍼터 방식에서의 플라즈마내 전자거동을 고려하여 프로세스 동적 제어에 관한 실험적 연구를 계속 수행해 나갈 예정이다.

References

- [1] J. A. Thornton, *Met. Finish.* 77 (1997) p.45.
- [2] R. Kukla, J. Kieser, and M. Mayer, "Studies on the plasma localization of a magnetic neutral loop discharge using normalized radio frequency electric field" *IEEE Trans. Magn.* 23 (1987) p.137.
- [3] T. Takahashi and M. Naoe, "Preparation and magnetic properties of Co-Cr films by toroidalplasma type sputtering" *IEEE Trans. Magn.* 25 (1989) p.4174.
- [4] J. Musil, "Rectangular magnetron with full target erosion" *J. Vac. Sci. Technol. A* 17 (1999) p.555.
- [5] Y. M. Sung et al., "Modeling of the Electron Motion in Capacitively Coupled Magnetic Null Plasma" *IEEE Transactions on Plasma Science* 30, (2002) p.142.
- [6] Z. Yoshida et al., "Anomalous Resistance Induced by Chaos of Electron Motion and its Application to Plasma Production" *Phys. Rev. Lett.* 81 (1998) p.2458.
- [7] Y. M. Sung, K. Uchino, K. Muraoka, T. Sakoda, "Studies on the optimum condition for the formation of a neutral loop discharge plasma" *J. Vac. Sci. Technol.* A18, p.2149 (2000).
- [8] Y. Okraku-Yirenkyi, Y. M. Sung et al., "Experimental and numerical analyses of electron temperature and density distributions in a magnetic neutral loop discharge" *J. Vac. Sci. Technol.* A19, p.2590 (2001).
- [9] T. Sakoda and Y. M. Sung, "Studies on electron behaviors at downstream region of a neutral loop discharge" *J. Vac. Sci. Technol. A* 20, p.1964 (2002).
- [10] W. Schmidt, J. Meppelink, B. Richter, L. E. Kehl, K. Feser, D. Qui, "Behaviour of MO-surge-arrester blocks to fast

transients" IEEE Trans. Power Deliv. 4(1), p.292, 1989.

[11] S. Shichimiya, M. Yamaguchi, N. Furuse, M. Kobayashi, S. Ishibe, "Development of advanced arresters for GIS with new zinc-oxide elements" IEEE Trans. Power Deliv. 13(2), 1998, p.465.

[12] I. Kim, et al., "Study of ZnO arrester model for steep front wave" IEEE Trans. Power Deliv. 11(2), 1996, p.834.

[13] D. B. Miller, et al., "The response of MOV and SiC arresters to steep-front longer duration current pulses" IEEE Trans. Power Deliv., 6(2) 1991, p.834.

[14] K. Ishida, et al., IEEE Trans. Power Deliv. 7(3) 1995, 1265.

[15] B. Chapman, "Glow Discharge Processes", John Wiley & Sons, New York(1980).

[16] M. Yahaya et al., "Preparation and physical properties of MoO₃ thin films" Proc. SPIE int. Soc. Opt. Eng., 3175 (1998) p.42.

박차수 (朴且洙)

1952년 8월 16일생. 1982년 경남대학교 전기공학과 졸업. 1992년 부산대학교 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2005년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1975~2008년 한국전력공사 근무(지점장). 2008년~ 현재 동의과학대학 전기과 조교수.
E-mail : packcs@dit.ac.kr

성열문 (成烈汶)

1966년 11월 2일생. 1992년 2월 부산대학교 전기공학과 졸업. 1994년 2월 동대학교 대학원 졸업(석사). 1996년 8월 동대학교 대학원 졸업(박사). 1998년 7월 큐슈대학 Post-doc.(한국과학재단지원). 1999년 7월 큐슈대학 조수. 2006년 2월 미야자키대학 전기전자공학과 조교수. 현재 경성대학교 전기전자공학과 부교수.
Tel : (051)620-4777
Fax : (051)624-5980
E-mail : ymsung@ks.ac.kr

◇ 저자소개 ◇

김두환 (金斗煥)

1961년 4월 13일생. 1988년 2월 부산대학교 전기공학과 졸업. 1993년 2월 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 2월 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1998~2002년 남해대학교 전기공학과 조교수. 2002~2004년 (주)펄스텍 펄스 파워시스템 개발팀장. 현재 경성대학교 전기전자공학과 에너지 재료응용 연구실 특별연구원.
E-mail : kdh4066@paran.com