



<연구논문>

ISSN 1225-8024(Print)
ISSN 2288-8403(Online)

한국표면공학회지
J. Korean Inst. Surf. Eng.
Vol. 50, No. 3, 2017.

<https://doi.org/10.5695/JKISE.2017.50.3.192>

UBM 마그네트론 스퍼터 시스템을 이용한 구리 타겟의 이온전류밀도 향상 연구

강충현, 주정훈*

군산대학교 공과대학 신소재공학과

Development of UBMS(Unbalanced Magnetron Sputtering) System and Ion Current Density Measurement of Copper Target

Chunghyeon Kang, Junghoon Joo*

Department of Materials Science & Engineering, Kunsan National University, Kunsan 54150, Korea

(Received June 26, 2017 ; revised June 28, 2017 ; accepted June 28, 2017)

Abstract

A 6-way-cross consisting of a 2.75-inch CF flange was used as a main chamber on a PFEIFFER VACUUM TMP station based on a 67 l / sec turbo molecular pump and a diaphragm pump to produce a magnet array with a volume ratio of 5.5: 1. A 1-inch diameter copper target and graphite target were fabricated using MDX-1.5K from Advanced Energy Industries, Inc as a DC power supply. Ion current density of copper target and graphite target was measured by unbalanced magnetron sputtering. The basic pressure condition was 6.3×10^{-7} mbar and the process pressure was Ar 50 sccm at 1.0×10^{-2} mbar (7.5 mTorr) in the Ar atmosphere. Therefore, the relative density of copper ions reaching the substrate with the measured ion current density was derived.

Key words: UBMS(Unbalanced Magnetron Sputtering), Sputtering, Ion current density

1. 서 론

박막의 증착 속도는 target의 스퍼터링 속도와 관련이 있으며, 스퍼터링 속도는 이온화율에 가장 큰 영향을 받는다. 즉 공정 조건에서 plasma의 밀도를 향상시키기 위한 많은 연구가 이루어 졌으며, plasma의 밀도를 향상 시키는 방법 중 Thornton 등이 제안한 마그네트론 스퍼터링 기술이다 [1]. Glow discharge에서 plasma를 형성하고 유지하는 것은 음극에서 발생하는 2차 전자 이며, 작은 질량으로 비교적 쉽게 전기장에 의해 가속되고, 기체 원자 또

는 분자들과 충돌하여 ionization를 일으키거나 내부에너지를 전달하는 역할을 한다. 이에 음극에서 발생하는 2차 전자들의 손실을 줄이며 머무르는 시간을 연장 할 수 있다면 collision cross section이 증가하게 되고 ionization 효율을 높일 수 있다 [2]. 판형의 target 뒤에 magnet을 부착하여 전기장에 수직인 자기장을 형성시켜 전자들이 $E \times B$ drift(이동)를 하게 되고 사이클로이드(Cycloid)를 통해 운동을 target 주위로 2차 전자를 구속시킴에 따라 스퍼터링 효율을 높이는 것이 마그네트론 스퍼터링의 원리이다 [3, 4]. 하지만 마그네트론 스퍼터링은 plasma를 target 주위에서만 구속하기 때문에 기관에 입사하는 이온의 유속을 증대시키기엔 부족한 점이 있다. 이러한 점을 보완하기 위해 개발된 기술이 UBMS(Unbalance Magnetron Sputtering) system이다. Target 뒷면에 비율이 다른 magnet을 위치시켜 다

*Corresponding Author: Junghoon Joo

Department of Materials Science & Engineering, Kunsan National University
Tel: +82-63-469-4736
E-mail: jhjoo@kunsan.ac.kr

른 자기장의 세기를 형성시켜 target 주위뿐만 아니라 자기장을 기관 방향으로 퍼져 나가도록 함으로써 이온의 흐름을 기관 쪽으로 유도하는 것이다 [5, 6].

본 논문에서는 UBMS(Unbalanced Magnetron Sputtering) system을 설계에 따른 magnet array cathode 의 FEMM을 이용한 전자기장 해석을 통해 기관까지 형성하는 자기장 분석을 진행하고, 스퍼터링 수율이 다른 타겟 제작을 통해 기관 부분에서 각 target의 이온전류밀도 측정을 통해 비교적 간단한 방법으로 기관에 도달하는 Cu^+ 이온의 이온전류밀도 값을 도출 할 예정이다.

2. 실험방법

2-1. UBMS system 제작

Main chamber의 역할을 위해 CF flange type의 2.75 inch 6way-cross를 선택함으로써 이에 맞는 cathode 및 target을 제작 하였다. Cathode의 경우 Cu(99.9%) D20 × 100T (mm)의 봉을 범용선반을 이용하여 상부를 ring type magnet인 D20 × d13 × 3T (mm)의 크기에 맞게 가공하였으며, 중앙에 들어갈 center magnet인 D5 × 5T (mm)의 사이즈에 맞게 가공 하였다. 하부는 직경 20 mm 에 중앙부분에 직경 6.3 mm인 feed-through를 연결하기 위해 6 mm의 드릴을 이용하여 깊이 4 mm로 가공하였다. 조립한 magnet array 및 cathode는 그림 1에 나타내었다. Magnet은 UBMS system의 단순화를 위해 냉각 system을 적용하지 않은 대신 고온용 Sm-Co magnet을 적용 시켰다. Sm-Co magnet은 curie temperature 700~800°C 이며 maximum operating temperature는 250°C 정도로 일반 네오디움 magnet의 경우 curie temperature가 100°C 미만인 점을 감안 한다면 고온에서 사용이 가능한 자석이다. 이렇게 만들어진 magnet array cathode는 부피비 5.5:1로 제작하였다. Magnet은 KANETEC사의 tesla meter인 TM-501을 이용하여 표면자속밀도를 측정하였으며, 측정 시 center 부분은 N극-450 mT(4500 G)의

값이 측정되었으며, side magnet의 경우 S극-275 mT(2750 G)의 값이 측정되었다.

Target은 Cu gasket을 주조하여 선반을 이용해 cathode와 체결이 가능하도록 cover type으로 제작 하였다. Target은 내부 D20 × T16 (mm) 깊이로 가공하고, 외부는 D 24 × T18 (mm)로 가공을 진행 하였으며, 그림 2에 나타내었다. Target의 두께는 2 mm로 target 표면에서 수백 gauss 영역에 포함시키기 위해 2 mm로 선택하여 가공하였다.

또한 anode cover는 cathode와 접지를 이루며 Al D50 × L500 (mm)의 봉을 범용선반을 이용하여 제작하였으며, 이에 feed-through와의 고정을 위해 teflon joint를 제작하였으며 그림 3에 나타내었다. Anode cover의 경우 내부 직경이 27 mm로 target과 약 1.5 mm 간격을 유지하게 하였으며, target 과의 접지를 위해 제작하였다. Anode cover 없이 plasma



Fig. 1. Magnet array cathode (Sm-Co side magnet : D20×d13×3T, center magnet : D5×5T mm).

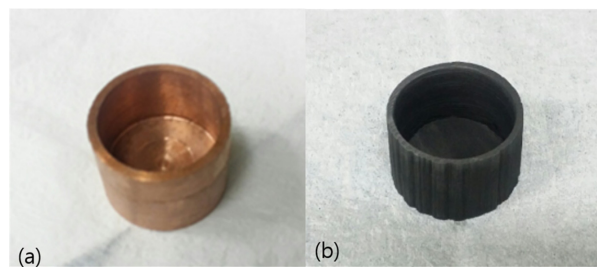


Fig. 2. Photograph of target (a : Cu target , b : Graphite target, thickness : 2 mm).



Fig. 3. Photograph of anode cover and teflon joint (a : Anode cover, b : Teflon joint).

를 띄웠을 경우 target 전체에 형성되어 불필요한 부분 까지 sputter를 시키게 되는데 anode cover를 사용함으로써 plasma가 형성될 수 있는 조건을 차단시켜 target의 표면부에만 plasma가 형성 되 sputter가 될 수 있도록 하며, 전자를 흡수하여 전류를 흐르게 하는 역할을 한다. 즉, anode cover와 target과의 간격은 sputtering이 일어나지 않도록 dark space shield 이내 이어야한다 [7]. Cathode와 연결되어 전력을 전달해주는 역할인 electrical feed-through는 sus로 이루어져 있으며, anode cover를 절연시키는 역할 및 고정부를 teflon을 사용하여 가공하였다. 또한 접지를 위해 anode cover와 teflon 사이에 철사를 고정시키고 chamber와 연결시켜 GND 역할을 하였다. 만들어진 unbalance magnet cathode 및 anode cover를 electrical feed-through에 연결한 것을 그림 4에 나타내었다. (a)는 조립된 상태를 보여주는 것이며 (b)는 DC power supply로 Advanced energy industries, inc 사의 MDX-1.5K를 보여준다. MDX-1.5K는 output power 0~1500 W, output voltage 1200 V의 사양을 가지고 있어 DC

magnetron sputtering에 사용하였다 [8].

2-2. 장비의 구성 및 실험조건

그림 5 는 본 실험을 제작한 장비 사진이다. Chamber의 구성은 2.75 inch 6way-cross를 사용하여 plasma 관찰에 용이하기 위해 target에서의 정면, 측면에 viewport를 설치하여 plasma 형상 및 target의 상태를 확인 할 수 있도록 하였다. 윗부분은 gas input 부분으로 plasma 생성 가스인 Ar gas를 주입할 수 있도록 설치하였으며, 뒷부분은 PFEIFFER VACUUM사의 compact full range gauge를 사용하여 1000 mbar ~ 5×10^{-9} mbar 까지 측정이 가능하도록 하였다. 하단 pump와 상단 6way-cross 사이에 MDC 사의 2.75 inch gate valve를 사용하여 적절한 진공도를 조절 할 수 있도록 구성하였다. 진공 시스템으로는 PFEIFFER VACUUM사의 Hi-CUBE 80 Eco를 사용하여 67 l/s의 pumping을 통해 저진공에서 고진공 영역까지 형성 할 수 있다. Full range gauge를 이용하여 측정한 base pressure는 6.3×10^{-7} mbar 이다. 공정 압력 2.2×10^{-2} mbar(16.5 mTorr)



Fig. 4. Photograph of composed feed-through and DC power supply.

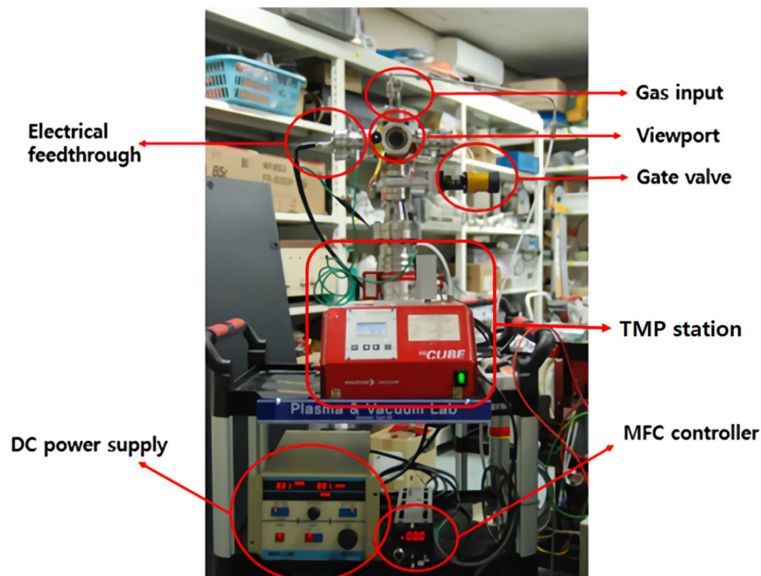


Fig. 5. Photograph of set-up for UBMS (Unbalanced magnetron sputtering) system.

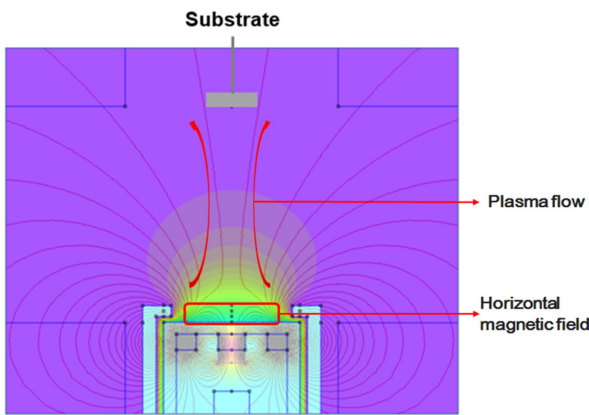


Fig. 6. Photograph of electromagnetic field result by FEMM 4.2 (UBM 5.5:1).

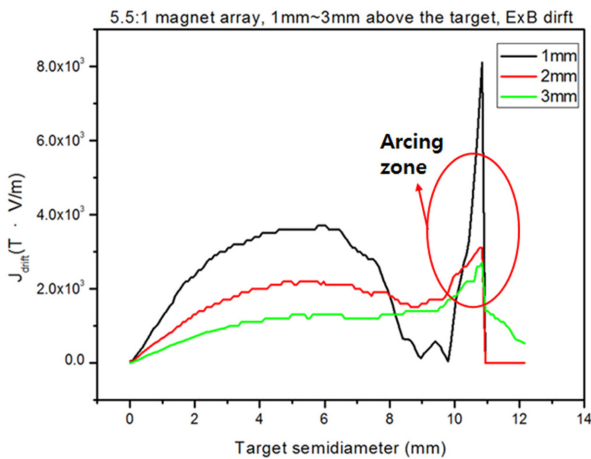


Fig. 7. Graph of $E \times B$ drift calculation result.

에서 진행하였으며, 공정 가스는 Ar을 사용 하였다. MFC(Mass Flow Controller)는 MKS사의 1179(full range 200 sccm_Ar)를 사용하였으며, Ar의 유량은 50 sccm 을 흘려주고 gate valve를 통해 적정 공정 압력을 control 하였다. 측정은 기판 부분에 면적 0.32 cm²을 가지는 electrical feed-through를 설치하고 전압을 인가한 후에 sputtering이 일어나는 조건에서 current meter를 이용하여 이온전류밀도를 측정 하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. Magnet array cathode 전산모사

Sm-Co magnet array 5.5:1 비율의 UBM (Unbalanced Magnet)를 FEMM 4.2를 통해 target에서의 자기장과 전기장에 의한 plasma 특성을 예측 하였으며, 그림 6에 나타내었다. 나타낸 결과는 전기장과 자기장을 따로 계산한 결과를 토대로 overlay 한 것으로, 자기장은 기판 부분 까지 형성되어 있

는 것을 볼 수 있다. Center magnet의 크기에 비해 side magnet의 크기가 크기 때문에 자기장이 공간적으로 퍼지게 되고, 일부 자기력선은 기판 쪽으로 형성하게 된다. Target 표면 부분에서 수평자기장이 형성됨에 따라 2차 전자를 더욱 구속하여 이는 고밀도 plasma를 형성 시키게 되며, 기판 쪽으로 형성되어 있는 자기력선의 영향을 받아 plasma의 흐름이 기판 쪽으로 형성됨에 따라 기판 근처의 이온 밀도를 증가 시킨다는 것을 예측 할 수 있다. 또한 제작한 magnetron sputtering source는 target 표면 근처의 plasma를 안정적이고 높은 밀도로 가두어 둘 수 있는데 이러한 가둠은 전자의 drift와 mirroring 효과에 의해 가능하나, DC power를 기반으로 한 sputter의 경우에 $E \times B$ drift 가 매우 커서 다른 효과는 상대적으로 미미하다 [9]. 이에 FEMM 4.2를 통해 계산한 결과를 가지고 target 표면에서 1 mm, 2 mm, 3 mm 떨어진 거리에 따라 발생하는 $E \times B$ drift의 계산결과를 Fig. 7에 나타내었다. 계산 결과를 통해 center magnet과 side magnet 사이에 plasma가 형성 되는 것을 예측할 수 있으며 target과 anode cover 사이에 전기력선이 밀집 되어 arcing이 발생할 수 있다는 것을 예측 할 수 있다.

또한 하전 입자가 자기장 속에서의 원운동을 Larmor radius라 하는데 이 반경은 자기장과 가속전압에 의해 결정되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r = 3.37 \frac{\sqrt{\omega_{\perp}(eV)}}{B(\text{gauss})} \text{cm} \tag{3.1}$$

r : Larmor radius

ω : electron volt

E : gauss

식 3.1에서 자속밀도와 electron volt의 변화에 따른 반경의 변화를 그림 8에 나타내었다. 자기장의 크기가 커질수록 Larmor radius 가 줄어들며 electron volt가 커질수록 반경은 늘어나는 것을 보여준다. 이는 magnetron sputter에서 plasma 속에 양이온은 전압강하로 가속되어 target에 충돌하게 되고, 발생한 2차 전자는 cathode에 평행으로 작용하는 자기장에 의해 Larmor radius 의 크기로 cycloid 를 그리며 운동을 통해 양전극에 흡수되어 소멸될 때까지 이온화 반응 횟수를 높여 제작한 magnet array에 의해 도넛형의 고밀도 plasma를 형성 할 수 있게 된다 [4].

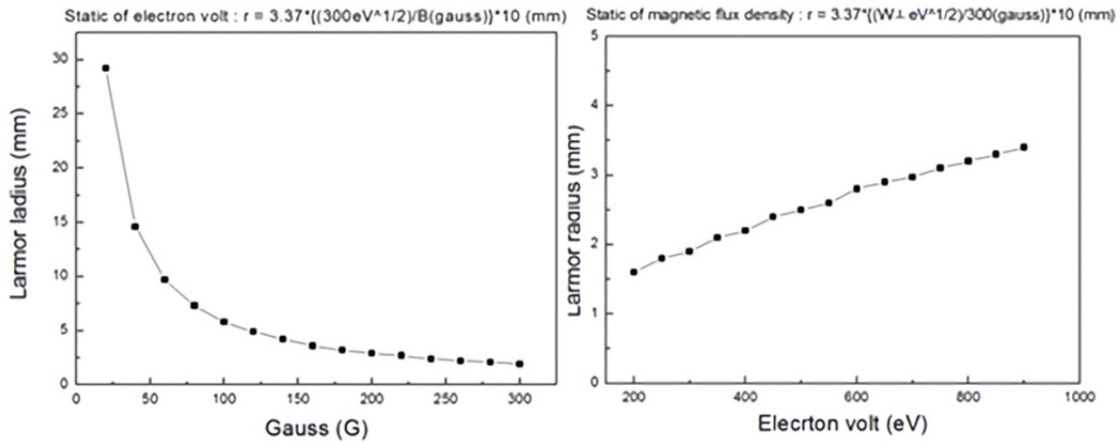


Fig. 8. Change of Larmor radius with electron volt and gauss.

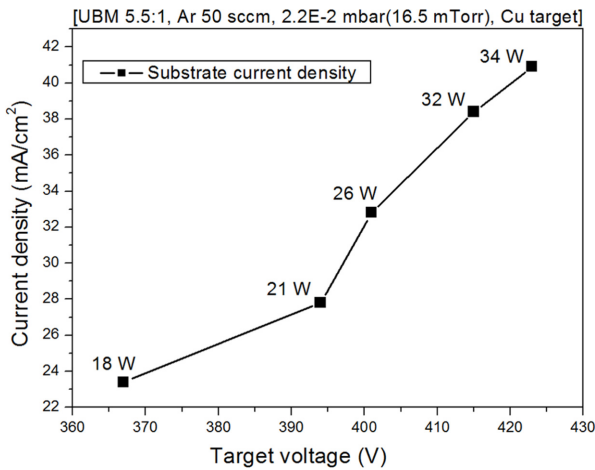
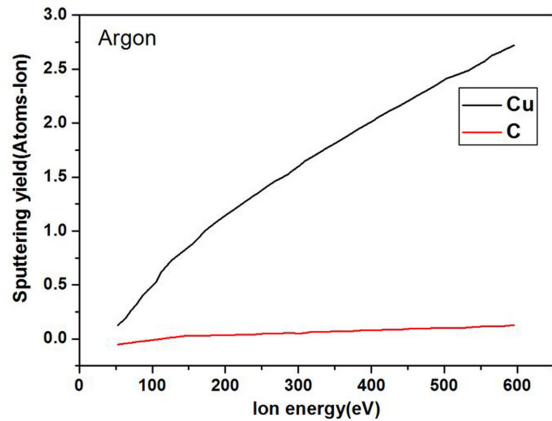


Fig. 9. Ion current density (UBM 5.5:1, Ar 50 sccm, 16.5 mTorr, Cu target).

3-2. Cu⁺ 이온전류밀도

UBM 5.5:1의 cathode에 Cu target을 장착 후 전압을 인가함에 따라 7 cm 떨어진 기판이 설치되어져 있는 부분에 electrical feed-through를 장착한 후에 current meter를 이용하여 측정된 이온전류밀도 값을 그림 9에 나타 내었다. 높은 전압을 인가할수록 이온전류밀도 값이 증가하는 것을 보여주며, 평균 32.66 mA/cm²의 값을 보였다. 기판에 도달하는 Cu⁺의 값을 도출하기 위해 그림 10에 재료마다 다른 sputtering yield를 나타내었다. Cu의 sputtering yield(Atoms/Ion)으로 김선규 저, 표면공학[10]에 600 eV에서 2.3 (Atoms-Ion)으로 나타나 있다. 이에 비해 C의 경우 sputtering yields는 600 eV에서 0.2 (Atoms-Ion)으로 기재되어 있다. C의 경우 sputtering yield가 매우 작은 물질이며 이에 sputtering 되는 C의 양이 매우 적은 것을 바탕으로 graphite를 가공하여 target으로 제작한다면 sputtering 되어지는 C⁺ 이온은 미미한 것으로 가정하였다. 따라서 Ar 분위기에서 생성되는 plasma를



Ion energy	200 eV (Atoms-Ion)	600 eV (Atoms-Ion)	T _m (°C)	승화열 (eV/atom)
Cu	1.1	2.4	1084	3.50
C	0.05	0.2	3,462	7.39

Sputtering yield

Fig. 10. Sputter yield of various materials [9].

기판 부분에서 이온전류밀도를 측정된 값을 Ar⁺ 이온전류밀도 값으로 가정하였다. 가정을 바탕으로 graphite를 이용해 제작한 target을 UBM 5.5:1 sputtering을 이용하여 plasma를 형성하고 이온전류밀도를 측정된 결과 평균 0.062 mA/cm²이 측정되었다. Graphite target를 sputtering하여 기판에서 얻은 이온전류밀도는 가정한 것을 토대로 Ar⁺ 이온전류밀도 값으로 예측하였다. 따라서 Cu target의 이온전류밀도 측정결과 평균값인 32.66 mA/cm²의 값을 뺀 결과 32.598 mA/cm²의 값이 도출되었다. 이 값은 5.5:1 UBM의 조건에서 Cu target이 sputtering 된 후 기판에 입사되어지는 Ar⁺ 이온을 제외한 Cu⁺ 이온이 약 99.8% 차지하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

TMP station을 이용하여 1 inch target을 적용할 수 있는 UBMS system을 설계하고 제작하였다. 5.5:1 magnet array를 적용함에 따라 FEMM 4.2 simulation program을 이용하여 전자기장 계산을 통해 target에서 2차 전자의 거동과 plasma의 유동을 예측하였다. 자기력선이 기관까지 형성됨에 따라 plasma의 유동이 생기며 이에 따라 target에서 sputtering 되어 나오는 이온이 직진성을 가지며 이온 밀도를 높이기 위해 target의 가속 전압을 키우거나 내외부 자기장 세기의 비율을 조절하면 기관까지 높은 이온 밀도를 형성하는 것을 보였다. 또한 sputtering yield가 낮은 C(graphite) target을 이용하여 높은 sputtering yield를 가지는 Cu target에서 방출되는 이온의 양을 측정 하였으며 기관에 도달하는 Cu^+ 이온전류밀도는 약 99.8 %로 5.5:1 UBM에서 발생하는 plasma는 Cu^+ ion 임을 알 수 있다.

후 기

본 논문은 신성장 동력장비 경쟁력 강화사업의 일환인 “반도체 기관의 TSV 제조용 스퍼터 개발”을 통해 얻은 결과임을 밝힙니다.

References

- [1] Lee, Byung Chul, Semiconductor thin film growth method and equipment technology, The Magazine of the IEEK, (2013) 31-45.
- [2] J. A. Thornton and A. S. Penfold, Thin Film Processes, edited by J. L. Vossen and W. Kern, Academic Press (1978) 75
- [3] Biswas et al., Defect growth in multilayer Chromium Nitride/Niobium Nitride coatings produced by combined High Power Impulse Magnetron Sputtering and Unbalance Magnetron Sputtering technique, Thin Solid Films (2017) online 15
- [4] Kim, Gong-Ho, Plasma electronics, kyohak (2006) 128-130
- [5] B. Window and N Savvides, J Vac Sci Technol, V A4 (1986) 565
- [6] G. Orozco-Hernández, Optical response of bismuth based thin films synthesized via unbalanced magnetron DC sputtering technique, Thin Solid Films 628 (2017) 170–175
- [7] T. E. Sheridan, M. J. Goeckner and J. Goree, J. VAC. Sci, tech.A8(1) (1990) 30
- [8] The advanced energy, MDX-1.5K magnetron drive (1997) 1-12
- [9] F. F. Chen, Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion, 2nd edition, New York: Plenum Press (1984) 63-204
- [10] Kim Seon-gyu, Surface engineering, dooyangsa (2005) 246-248