

마그네트론쌍음극비산장치에서 고온초전도 박막성장에 주는 자기마당의 영향

유광동, 정금혁

위대한 수령 김일성 동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《오늘 우리앞에 나선 중요한 문제의 하나는 과학과 기술을 발전시키는것입니다.》

(《김일성전집》 제27권 270페이지)

마그네트론비산장치는 고온초전도박막을 비롯한 첨단박막재료개발과 나노구조체제작에서 널리 리용되고있다.[2, 3]

이 논문에서는 고온초전도박막제작용 마그네트론쌍음극비산장치[1]에서 박막의 성장에 미치는 자기마당의 영향을 정량적으로 연구하고 실험결과와 비교하였다.

1. 자기마당의 공간분포에 대한 모형화

마그네트론쌍음극비산장치에서 회로류자석의 배치와 표적결면근방에서 자력선의 분포는 그림 1과 같다.

우선 우리는 표적결면근방에서 자력선들의 분포모양을 반주기시누스함수로 모형화하였다.

표적의 중심에 원점을 정하고 표적결면을 (X, Y) 평면으로, 수직옷방향을 Z 축으로 잡으면 임의의 점 $P(X, Y, Z)$ 에서 자기유도벡터 \vec{B} 의 성분들은 다음과 같이 표시된다.

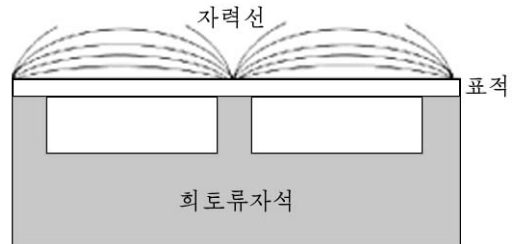


그림 1. 자석배치와 자력선분포

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{B_0 R_0 X}{2r^2 \sin(\pi r / R_0)} \left\{ 1 + \left[\frac{\pi}{R_0} \cot(\pi r / R_0) \right]^2 \right\}^{-1/2} \\ B_y &= \frac{B_0 R_0 Y}{2r^2 \sin(\pi r / R_0)} \left\{ 1 + \left[\frac{\pi}{R_0} \cot(\pi r / R_0) \right]^2 \right\}^{-1/2} \\ B_z &= \frac{B_0 R_0 Z}{2r^2 \sin(\pi r / R_0)} \left[\pi \cot(\pi r / R_0) \right] \left\{ 1 + \left[\frac{\pi}{R_0} \cot(\pi r / R_0) \right]^2 \right\}^{-1/2} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 R_0 은 표적의 반경, B_0 은 자기유도벡터수평성분의 최대값(측정값), $r = \sqrt{X^2 + Y^2}$ 이다.

미광방전특성곡선과 마그네트론쌍음극비산장치의 전원특성을 고려하면 전기마당세기의 성분들은 다음과 같이 표시된다.

$$E_X = E_Y = 0$$

$$E_Z = (2U_0/\lambda) \left(1 - \frac{Z}{\lambda}\right) |\sin(\Omega t + \varphi)| \quad (2)$$

여기서 λ 는 Ar 이온의 평균자유행로, U_0 은 방전전압진폭, Ω 는 전원의 주파수, φ 는 초기위상이다.

마그네트론음극비산과정에 Ar 원자를 이온화시키는 전자의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m\vec{a} = -e\vec{E} - e(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3)$$

이제 식 (1)과 (2)를 고려하고 편리상 $x = X/R_0$, $y = Y/R_0$, $z = Z/R_0$, $b_x = B_X/B_0$, $b_y = B_Y/B_0$, $b_z = B_Z/B_0$, $\tau = eB_0 t/m$ (e , m 은 각각 전자의 전기량의 절대값과 질량)인 무분량들을 받아들이면 운동방정식 (3)의 매 성분들은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{d\tau^2} &= \frac{dz}{d\tau} b_y - \frac{dy}{d\tau} b_x \\ \frac{d^2y}{d\tau^2} &= \frac{dx}{d\tau} b_z - \frac{dz}{d\tau} b_x \\ \frac{d^2z}{d\tau^2} &= \frac{dy}{d\tau} b_x - \frac{dx}{d\tau} b_x + \frac{2U_0 m}{R_0 B_0^2 \lambda e} \left(1 - \frac{R_0}{\lambda} Z\right) \left| \sin\left(\frac{\Omega m}{e B_0} \tau + \varphi\right) \right| \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)를 컴퓨터를 리용하여 수값풀이하였다. 이때 마그네트론쌍음극비산장치에서 해당한 파라메터값은 $R_0 = 40\text{mm}$, $U_0 = 212\text{V}$, $B_0 = 0.2\text{T}$, $\Omega = 377\text{rad/s}$, $\lambda = 3\text{mm}$ 로 하였다.

또한 음극압부구역에 있는 Ar^+ 들에 의하여 비산이 실현된다는 사실과 자석의 두 극과 접하고있는 표적근방에서는 비산이 매우 약하게 진행된다는 실험적사실을 고려하여 연구구역을 $0 \leq Z \leq \lambda$, $2\text{mm} \leq r \leq 38\text{mm}$ 로 제한하는 방법으로 계산과정에 나타날수 있는 발생 위험성을 제거하였다.

수값계산과정에 시간걸음은 $h = 8.53 \times 10^{-13}\text{s}$ 로 주었으며 전자산란의 임의성을 고려하여 초기속도는 모두 0으로 택하고 초기위치는 우연발생방법으로 선택하였다.

2. 비산과정에 주는 자기마당의 영향

우연적으로 선정한 35만개의 전자들의 운동을 분석하여 그것들의 공간분포정형을 결정한 결과는 그림 2와 같다.

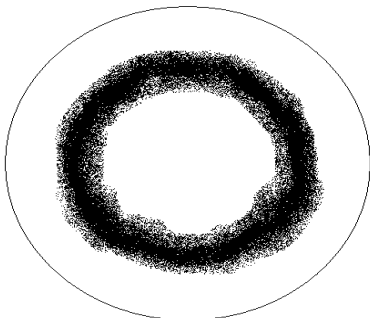


그림 2. 표적근방에서 전자들의 공간적분포

그림 2에서 원의 반경은 40mm이며 매개 검은 점들은 전자들의 위치이다.

그림 2에서 보는바와 같이 표적의 중심부와 변두리에는 Ar 원자의 이온화에 기여하는 전자들이 매우 적고 그 사이에서는 전자밀도가 크며 전자밀도분포가 넓은 고리형으로 뚜렷이 나타난다.

이러한 분포모양은 실지 마그네트론음극비산과정에 생기는 방전고리의 모양이나 표적이 비산된 모양과 잘 일치된다.

그림 3은 초기위치가 $X_0=10\text{mm}$, $Y_0=0\text{mm}$, $Z_0=2.15\text{mm}$, 초기속도가 $v_0=0$, 초기위상이 $\varphi=\pi/2$ 인 전자의 자리길모양이다.

그림 3에서 보는바와 같이 전자는 표적의 중심과 변두리사이를 왕복하면서 회전한다. 그러나 자기유도벡터의 수평성분만 있을 때에는 이런 운동이 나타나지 않는다.

이 계산결과는 자기유도벡터의 수평성분만이 Ar원자의 이온화에 기여한다고 보던 종전의 견해와는 달리 그것의 수직성분도 여기에 적지 않게 기여하고있다는 새로운 물리적결과를 준다.

다음 마그네트론쌍음극비산장치에서 박막의 성장속도에 주는 자기마당의 영향을 연구하였다.

L_B/L_0 과 n 사이관계를 수값계산한 결과는 그림 4와 같다.

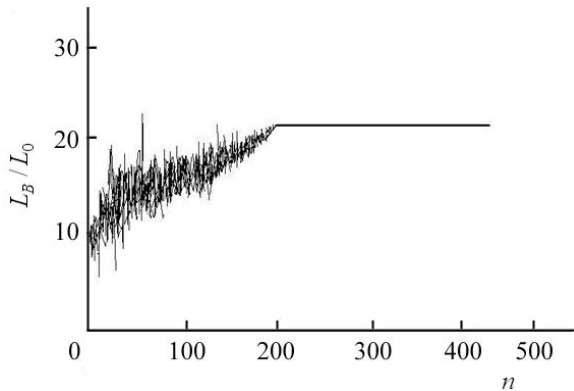


그림 4. L_B/L_0 과 n 사이관계

도는 자기마당이 없는 비산장치들에 비해 10배정도 크며 B_0 값은 0.2T미만이다. 그러나 우리의 장치에서는 B_0 값이 0.2T로서 보통의 마그네트론비산장치들에서보다 2배정도 크며 박막의 성장속도도 100nm/s로서 2배정도 크다. 위의 계산결과는 실험자료와 비교적 잘 일치한다.

맺 는 말

1) 마그네트론비산장치의 표적근방에서 전자들의 공간분포상태를 통계적방법을 리용하여 밝혔다.

2) 마그네트론비산장치에서 표적결면에 대한 자기마당의 수직성분도 Ar원자의 이온화에 기여한다는 사실을 새롭게 밝혔다.

3) 마그네트론비산장치에서 자기마당이 박막성장에 주는 영향을 정량적으로 새롭게 밝혔다. 계산결과들은 실험결과들과 잘 맞는다.

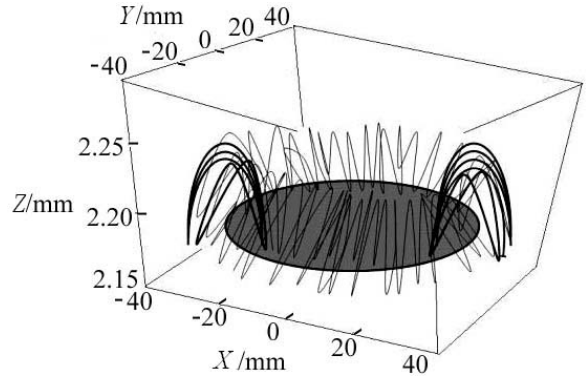


그림 3. 표적근방에서 전자들의 운동자리길

여기서 L_B 와 L_0 은 각각 B 가 있는 경우와 없는 경우 연구구역안에서 전자들이 운동한 자리길의 길이이며 n 은 초기위치를 우연분포에 따라 취한 전자들의 개수이다.

계산결과에 의하면 n 이 커짐에 따라 L_B/L_0 은 일정한 값으로 수렴하는데 그 값은 21.78정도이다.

음극압부에서 전자들의 운동자리길이 길어지면 Ar원자의 이온화확률이 커지기때문에 박막의 성장속도도 빨라진다.

현재 발표된 자료에 의하면 상품화되어 있는 마그네트론비산장치들에서 박막성장속

참 고 문 헌

- [1] 유광동 등; 조선민주주의인민공화국 과학원통보, 6, 23, 주체96(2007).
[2] A. Chen et al.; arXiv:1311.5943.
[3] F. Mitschker et al.; J. Appl. Phys., 46, 49, 495201, 2013.

주체104(2015)년 3월 5일 원고접수

**Influence of the Magnetic Field on the Growth of High T_C
Superconductor Film in the Magnetron
Couple Cathode Sputtering Device**

Yu Kwang Dong, Jong Kum Hyok

We reveal the space distribution of electrons near the target of magnetron sputtering device by using the statistical method. We reveal the fact that the vertical factor of magnetic field contributes to the ionization of Ar atoms. We reveal the influence of the vertical factor of magnetic field to the growth of film in the magnetron sputtering device.

Key words: magnetron sputtering device, high T_C superconductor film