



## 마그네트론 음극의 자석 배열에 따른 방전의 형상 변화 연구

지정은, 주정훈\*

군산대학교 공과대학 신소재·나노화학공학부, 플라즈마 소재 응용 센터

### A Study of Discharge Shape Changes by Magnet Arrangements in a Magnetron Cathode

Jungeun Jee, Junghoon Joo\*

Department of Materials Science and Engineering  
 Plasma Materials Research Center, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

(Received April 21, 2008 ; revised June 25, 2008 ; accepted June 29, 2008)

#### Abstract

A new convenient magnet array module is designed to investigate effects of magnetic field array on magnetron discharge characteristics. Magnetic field analysis showed good agreement of measured discharge region by a CCD device which has a high quantum efficiency over visible wavelength range. OES (optical emission spectroscopy) showed major emission peaks are from electronic transitions in 400 nm range and 800 nm range. Effects of driving voltage characteristics were analyzed in a point of electron drift trajectories and ionizing collision frequencies. Pulsed dc with a fast rising and falling time was analyzed to have potential to increase ionization collisions by putting a burst of hot electrons and to raise sheath potential. From measured voltage and current waveform, maximum of  $-1000$  V peak was generated with  $-400$  V<sub>rms</sub> conditions. Possibility of a properly designed magnetron cathode was shown to be used as a melting device. Cu was successfully melted with power density of a several tens of W/cm<sup>2</sup>.

*Keywords: Magnetron, Sputtering, Magnetic field, Plasma, Pulsed dc, Melting*

## 1. 서 론

플라즈마는 여러 가지 방법으로 유도 되는 전기장에 의한 전자의 가열로 유지된다. 사용하는 주파수에 따라서 구분하면 직류, 중주파 사인파, 고주파 사인파, 마이크로웨이브로 분류할 수 있고, 다시 파형으로 구분하면 사인파와 펄스가 있다. 이 중 단위 출력 당 전원 장치의 가격이 고주파보다 저렴하고 직류 전원 보다 아크의 발생을 효율적으로 억제할 수 있어서 펄스 직류 전원이 다양한 박막 증착 장치에 사용되고 있다<sup>1)</sup>. 박막의 증착 방법 중 대면적화가 용이하고 안정적으로 높은 증착 속도를 낼 수 있다는 장점 때문에 마그네트론 스퍼터링이 널리 사용되고 있다. 그러나 20% 정도의 낮은 타겟

사용 효율은 고가의 타겟 사용량을 늘리게 되어 제조 원가에 상당한 부담을 가져온다. 이는 원리상 마그네트론의 플라즈마 발생 영역이 전체 타겟 면적에 비해서 작을 뿐 아니라 플라즈마 밀도가 도넛 형태로 되어 있어서 높은 전자 밀도를 갖는 부분이 다른 부분에 비해서 상대적으로 훨씬 높은 타겟 침식 속도를 갖기 때문이다. 특히 타겟 사용 초기에는 전체적으로 넓은 침식 분포를 보이나, 타겟이 일부 침식되고 나면 전자 밀도를 결정하는 타겟 표면에 평행한 자기장의 분포가 더욱 불균일하여 일반적인 타겟 두께인 10 mm의 50% 정도를 사용하고 나면 race track의 가운데 부분만 급속도로 침식이 진행되어, 결국 타겟 두께에 해당하는 침식이 발생된다<sup>2)</sup>.

이 때 발생하는 문제는 비단 타겟 사용 효율을 저하할 뿐만 아니라 좁고 깊은 부분에서 스퍼터링

\*Corresponding author. E-mail : jhjoo@kunsan.ac.kr

되는 입자들의 불균일성 때문에 증착 균일도에도 영향을 준다. 또, 반응성 증착의 경우에는 재증착되는 면적(race track보다 증착 속도가 월등히 낮은 부분)이 넓어지면서 아킹이 발생할 확률이 높아진다는 점이다. 이를 해결하기 위해 자기장 배열에 따른 전자의 거동과 플라즈마 발생 영역의 거동을 여러 가지 전원에 대해서 원천적으로 연구할 필요가 있으나, 일반적인 마그네트론 음극의 구조는 자석 배열을 변화시키기 위하여 많은 노력이 필요하다. 본 연구에서는 아주 손쉽게 자석 배열을 변경하고, 이를 즉시 방전 시스템에 적용할 수 있는 모델 구조를 설계하고 이를 이용하여 여러 가지 자석 배열에서 방전의 특성을 조사하였다. 마그네트론 음극의 방전 현상에 대한 모델을 다룬 기존의 논문들이 주로 대칭이 존재하는 실린더형이나 막대 형태의 자석으로 제작한 사각형 마그네트론 음극에 대해서 다루고 있다. 여기서 자석을 반드시 연속체로 사용할 필요가 있는가에 대한 의문을 해결하고, 기존의 연구 결과들이 다루었던 직류 방전 외에 최근에 많은 분야에서 사용이 확산되고 있는 펄스 직류 방전의 경우에 대해서도 고찰할 필요가 있다. 이는 과거의 모델링이 이온에 대해서는 정지하고 있다는 가정 하에 전개를 하였고, 전자의 움직임도 전기장이 고정값을 갖는 경우에 대해서 계산을 하고 있다. 최근 개발된 350 kHz까지 펄스 주파수를 올릴 수 있는 전원을 이용한 산화알루미늄 박막의 반응성 증착 결과를 보면<sup>3)</sup>, 증착 속도와 하드 아크의 발생 건수에 주파수가 미치는 영향은 직선적이지 않다. 오히려 역 전압을 인가하는 시간과 역 전압의 정전압에 대한 비율이 큰 영향을 미치는 것으로 나타나 있다. 그리고 역 전압의 크기를 증가시키면 증착 속도가 50% 가량 증가한다고 보고하고 있다. 그 원인은 플라즈마 전위의 부분적인 증가로 인해 타겟에 입사하는 이온의 에너지 증가하게 되고, 결국 스퍼터링 속도가 증가했을 것으로 예측된다.

마그네트론의 자석 배열 문제는 오랜 역사를 가지고 있는 분야이지만, 다양한 타겟의 사용, 직류에서 펄스, 중주파수 사인파 등의 전원 장치의 개발, 회전 자석식 음극, 진동 자석식 음극 등의 개발로 가장 적절한 자석 배열이 어떤 것인가에 대한 연구는 지속적인 관심의 대상이다. 또한 마그네트론에 사용하고 있는 자석의 주원료인 희토류 금속(Nd, Sm 등)의 가격 상승과 고갈에 대한 대책으로, 가장 적은 양의 자석을 사용하면서 목적하는 마그네트론 스퍼터링 특성을 출력하는 최적 설계를 위해 기초 데이터를 구축하는 것을 목표로 한다. 이전의 연구에서 플라즈마 영역과 기판의 상대적인 위치가 박막

의 성질에 미치는 영향에 대해서 살펴보았다<sup>4)</sup>. 아주 흥미로운 결과의 하나는 플라즈마 영역에 대한 이미지 해석 결과가 플라즈마에 의한 가열 효과와 잘 일치하는 실험적 결과를 얻었다는 것이다. 플라즈마에 의한 물체의 가열은 플라즈마 전위와 물체의 표면 전위의 차이에 기인하는 이온의 운동 에너지, 같은 원리의 전자 운동 에너지, 그리고 이온이 중성화 될 때 방출하는 화학적 에너지가 주원인이다. 기타 플라즈마에서 방사되는 빛의 흡수에 의한 가열도 있고 주변 물체와의 접촉을 통해서 얻는 전도 열전달 효과도 있다. 본 논문을 통해서 는 자계의 전자 구속력과 함께 이온 발생과 그에 의한 플라즈마 형상 변화에 대한 체계적인 고찰로 높은 균일도를 요하는 대면적의 타겟 사용과 기판 손상 최소화를 만족할 수 있는 자석 배열에 대한 아이디어를 도출하고자 한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 진공 시스템과 소형 자석 배열 모듈의 디자인

그림 1에 본 연구에 사용한 진공 시스템과 자석 배열 모듈의 구조를 나타내었다. 스테인레스강으로 만든 실린더형 챔버에 140 l/sec의 터보 분자 펌프를 부착하여 베이킹 없이  $1 \times 10^{-6}$  Torr까지 배기할 수 있으며 방전 전극은 역시 스테인레스강으로 만든 직경 100 mm의 수냉식 원형이다. 이 위에 두께 2 mm의 고무자을 강판으로 요크를 만들어 자석을

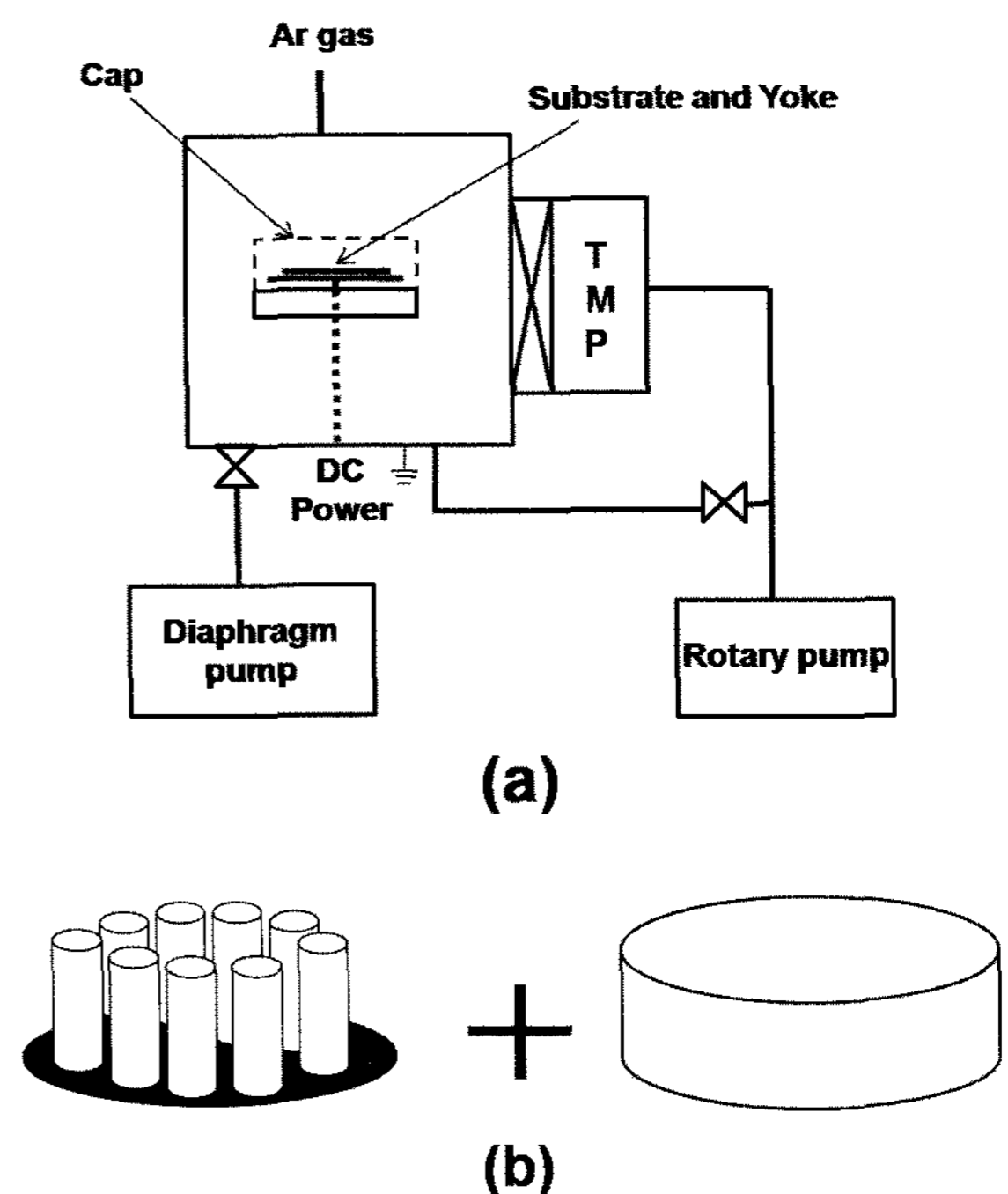


Fig. 1. (a) A schematic diagram of the vacuum system, (b) A magnet array module.

배열하고 다시 실린더형 캡을 스테인레스강으로 씌움으로써 타겟의 역할을 할 수 있도록 하였다. 캡의 높이는 실제 타겟과 자석의 간격을 고려하여 제작했다. 타겟 재료에 따른 스퍼터링 현상을 조사하기 위해서는 이 캡 위에 타겟 재료로 만든 원판을 위치시키면 된다. 오랜 시간 스퍼터링을 하기 위해서는 냉각 시스템을 보다 효율적으로 만들어야 하지만 단시간 동안 자석 배열의 효과를 검증하기 위해서는 1회 실험에 20분 정도의 고진공 배기와 수분 정도의 방전 특성 실험이면 충분하므로 아주 신속히 자기장의 영향을 확인할 수 있다.

자석 배열을 완성하고 나면, 가우스 미터를 사용하여 캡 상 5~10 mm 정도에서의 자속 밀도분포를 측정하였다. 이 값은 3차원 자기장 수치 해석 결과와 비교하였다. 하전 입자의 전자기장 내에서의 운동을 해석하기 위해서는 Lorentz force를 이용한 궤적 시뮬레이션이 필요하다. 즉, 전기장과 자기장에 수직하는 방향의 힘을 받아서 궤적이 바뀌면서 마그네트론 스퍼터링 타겟에서는 타겟의 수직하는 방향으로 전기장이 발생된다. 따라서 타겟에 평행한 방향의 자기장이 전자의 가둠에 필수적이다. 그러나 이것은 원형의 자석과 장방향의 자석에서 달리 고려해야 할 점을 가지고 있다. 즉, 원형 타겟의 경우에는 축대칭이 존재하므로 일정한 축방향의 자기장( $B_z$ )이 전자들의 외곽 탈출을 방지해준다. 그러나 장방향의 타겟 구조에서는 수직 방향의 자속 밀도가 끝 부분에 가서는 변화가 있게 된다. 즉,  $(E \times B)$ 에 비례하는 드리프트 속도에 맞추어서 구심력을 가해주어야 전자의 손실 없이 끝 부분도 균일하게 플라즈마의 밀도를 유지할 수 있고, 결과적인 균일한 타겟 침식을 얻을 수 있다. 본 연구에 사용한 소프트웨어는 CFD-ACE+다. 3차원 multi-physics software이며 기본적인 전·자기장 해석이 가능하다.

## 2.2 플라즈마 형상 관찰

기본적인 플라즈마 발생 조건인 방전 가스 압력, 방전 전압, 전류를 측정하고 디지털 카메라를 이용하여 방전 형상을 촬영하고 분석하였다. Ar의 가시광선 대역 방출광은 주로 에너지가 4-1.7 eV에 해당하는 전자들의 여기 밀도를 관찰하는 것이며 상용 CCD는 이 영역에서 비교적 균일하게 높은 양자 효율을 가지고 있다. 마그네트론에서의 전자-중성 충돌의 종류는 탄성 충돌, 전자 여기 상태 충돌(준중성 및 전자 상태 여기), 이온화 충돌 등이며 전자 에너지에 따른 이들의 적분 충돌 단면적은 그림 2와 같은데 여기 충돌 반응은 에너지가 낮은 영역(이온화 반응이 일어나기 어려운 영역)에서 탄

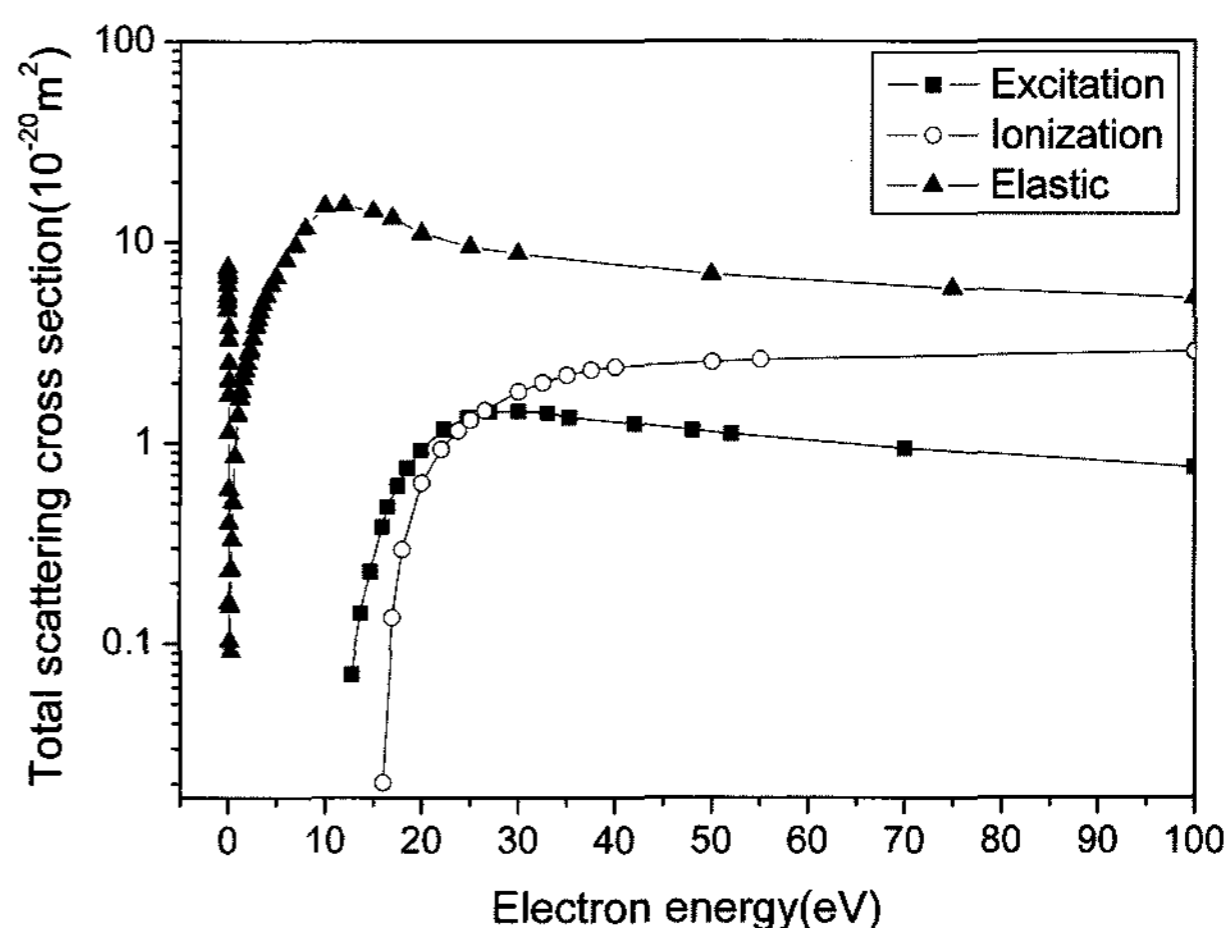


Fig. 2. Total scattering cross sections of electron - Argon system.

성 충돌 반응 다음으로 높다<sup>5)</sup>. 따라서 방전 이미지 관찰은 스퍼터링에 직접 기여하는 이온화 충돌의 밀도와 자기장의 가둠 효과를 적게 받는 낮은 에너지의 전자 밀도를 많이 반영하는 데이터가 됨을 주의할 필요가 있다. 마그네트론에서 가둠 효과는 전자의 발생 위치가 가장 큰 영향을 미치는데 이는 자기장이 가둠 효과를 잘 일으킬 수 있는 구조를 갖고 있는 영역에서 발생된 전자는 오직 충돌에 의해서만 가둠을 벗어날 수 있기 때문이다. 반면 그렇지 않은 위치에서 이온 충돌로 발생된 이차 전자는 불안정한 비행 궤적을 그리며 타겟 영역을 벗어나므로 스퍼터링에 기여하지 못한다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 평판 마그네트론 음극의 분석 - 구동 파형의 영향

그림 3에 125 mm×625 mm의 장방향 음극 구조와 자기장 해석 결과, Al:ZnO 타겟의 실제 침식 분포 이미지를 나타내었다. 그림 3(b)에 나타낸 것은  $Br=(B_x^2+B_y^2)^{1/2}$ 이며, 그림 3(c)의 이미지와 잘 맞는다. 즉, 타겟 침식 초기에는 타겟이 평평하므로 전기장은 거의 고정적으로 z축 방향으로 간주하고 타겟과 평행한 성분의 자기장만 고려하면 침식 분포를 예측할 수 있다는 것이다. 그러나 하전 입자가 가속도 운동을 하면, 전파 발생에 의하여 에너지를 소모하게 된다. 전술한 바와 같이 가장 자리와 직선 구간의 전자 운동의 차이에 의하여 지속적인 타겟 사용으로 인한 가장 자리의 이상 마모(고속 또는 저속)가 균일도 저하를 초래하여 전체 타겟의 사용 연한을 제약하게 되는 일이 발생하게 된다.

연속적인 자석의 배열과 불연속적인 자석의 배열이 갖는 차이에 대해서 고찰하여 보자. 자기장하에

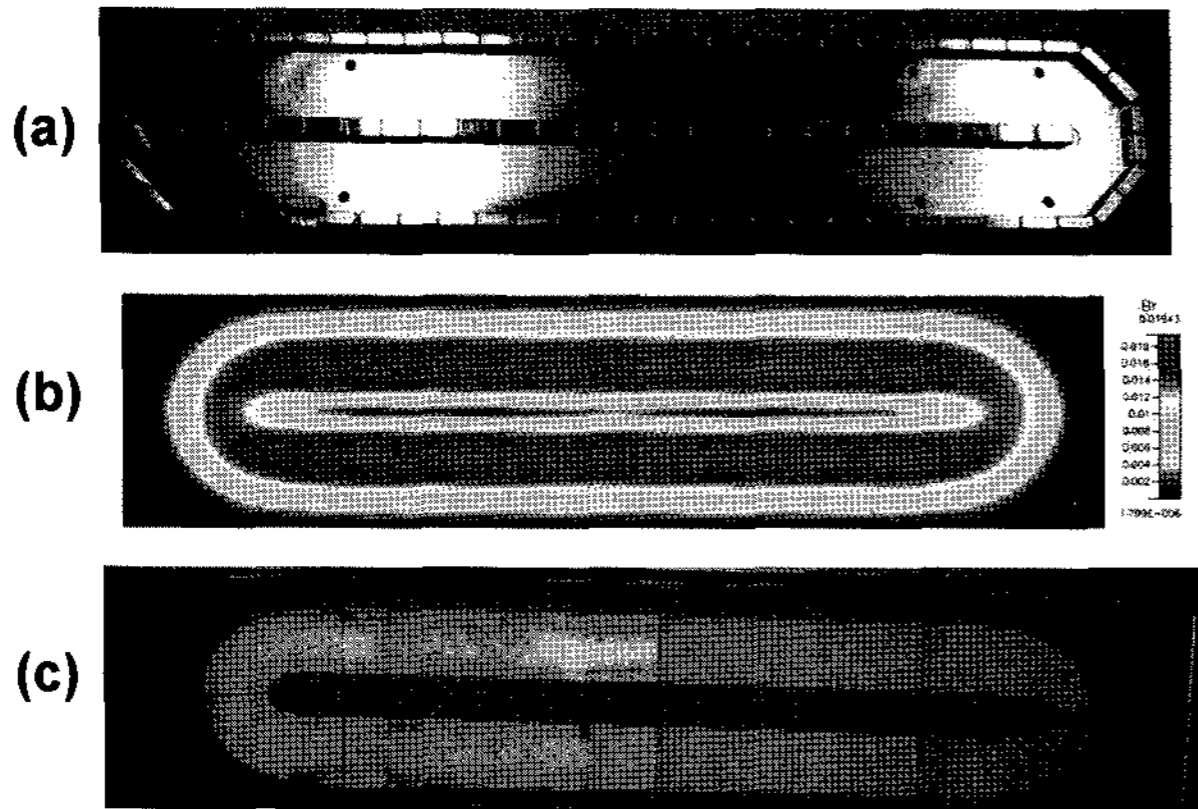


Fig. 3. (a) A plated magnet array, (b) Calculated magnetic fields, (c) The target erosion pattern.

서 받는 하전 입자의 힘은 Lorentz 식으로 표현되고 충돌을 포함한 운동 방정식으로 표현하면 아래 식 (1)과 같다.

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) + \vec{F}_{col} \quad (1)$$

- $m$  : 전자의 질량(kg)
- $q$  : 전자의 전하량(C)
- $E$  : 전기장 벡터(V/m)
- $B$  : 자속 밀도 벡터(T)
- $F_{col}$  : 충돌에 의한 운동량 변화를 힘으로 표시한 값

$F_{col}$ 은 충돌항이다. 이 때 드리프트 속도는  $\vec{E} \times \vec{B} / B^2$ 로 주어지는데 이를 적분하여 궤적을 그려보면 자기장의 크기와 전기장의 크기의 비에 따라서 궤적이 cycloid, Trochoid 등을 갖게 된다. 영구자석 배열이 균일할 때, 즉 실린더형 음극에서 일체형 자석을 두 개 사용하여 제작한 경우에는 균일한 드리프트를 가져오지만 일정 간격 배열에서는 자석과 자석 사이의 공간에서 자기장의 방향과 크기가 변화하므로 전자의 비행 궤적이 일체형에 비하여 굴곡을 갖게 된다. 즉, 충돌이 없는 경우 비행 거리가 늘어난다. 문제는 균일도인데 사용 가스 압력에 따른 전자 - 중성 입자의 충돌 비행 자유 거리를  $\lambda_d$ 라고 하면 자기장의 불균일도의 공간 범위가 이 값보다 작아지는 영역에서부터 전자 비행 궤적의 증대 현상이 나타나기 시작할 것이다. 드리프트에 대한 wiggling 효과를 기대할 수 있는 장점도 있다. 마그네트론의 목적이 이온화 충돌을 일으킬 수 있는 전자들의 비행 궤적을 최대한 늘려서 높은 이온화 효율을 유지하는 것에 있으므로 직류와 교류 전기장에 의한 경우를 나누어 고찰할 필요가 있다. 직류 자기장의 경우에 대해서는 Monte Carlo simulation 결과들이 있으나<sup>6-8)</sup>, pulsed dc에 대해서는 보고된

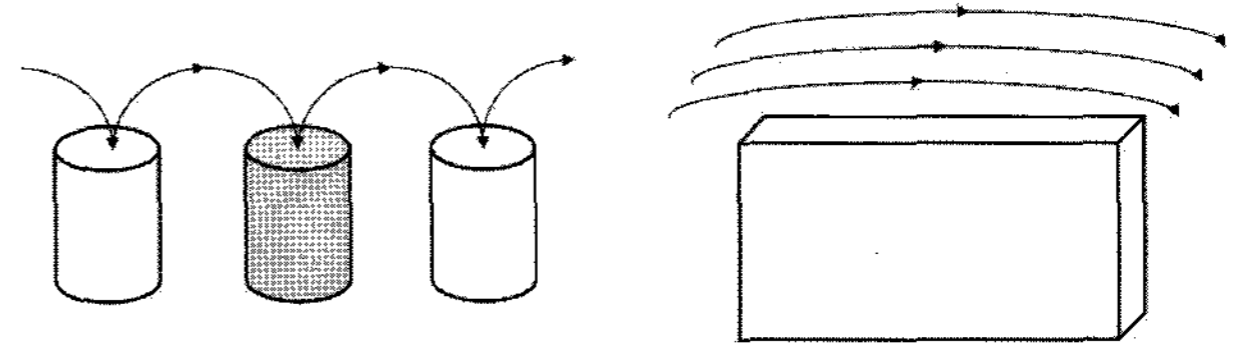


Fig. 4. Magnetic field patterns of magnet arrays with regular intervals and of a block type magnet.

바가 없다. -400 V로 유지되는 마그네트론 음극에 의해서 두께 1 mm의 쉬스를 통해서 400 eV로 가속되었다고 가정하면 음극에 평행한 자기장 200 G에 의한 Larmor 반경은( $r = mV/eB$ )이므로 3.4 mm가 된다. 따라서 본 연구에서 사용한 직경 10 mm의 원통형 자석을 일정한 간격으로 배열하는 경우의 자기장 변화(그림 4)를 그대로 따라 가면서 이온화 충돌을 할 수 있을 것이다. 이 때의 드리프트 속도를 구하기 위하여 전기장을 음극의 전압을 쉬스의 두께로 나누어 구하면 400 V/mm가 된다. 자기장 200G에서 드리프트 속도는  $2 \times 10^7$  m/sec로 자신의 선속도  $1.2 \times 10^7$  m/sec 보다 오히려 빠르다. 즉, 불균일 자기장의 영향을 적절히 이용한다면 보다 많은 이온화 충돌을 만들 수 있다는 것이다.

직류 마그네트론과 교류 혹은 펄스 직류 마그네트론에서 전자의 움직임은 고찰해보자. 간단히 식 (1)에 대한 적분을 Runge-Kutta 방법으로 하고 일정한 전기장과 교류 혹은 펄스 직류 전기장에서 궤적을 구하면 그림 5의 (a), (b), (c), (d)와 같다. 이 중 특히 펄스 직류 전기장에 의한 데이터를 보면 동일한 시간 동안 드리프트 거리가 짧다. 즉 전자의 횡방향 이동도가 감소하였다. Stochastic 가열과<sup>9)</sup> 함께 이온화 전자의 손실 확률을 줄여 줄 수 있다는 장점이 짧은 펄스 상승, 하강 시간을 갖는 시스템에 예견된다. 전자 온도에 비례하는 플라즈마 전위의 펄스 주파수에 따른 상승이 Arnell 등의 논문에서<sup>1)</sup> 측정되었고 이온 에너지 분포에서 높은 값을 갖는 피크의 원인으로 해석되고 있다. 펄스 상승 시간이 10 ns라고 하면  $1.2 \times 10^7$  m/sec의 속도를 갖는 300 eV의 전자가 이동하는 거리는 1.2 cm가 된다. 그 이후 직류에 해당하는 값을 갖고 다시 조금 느린 속도로 플라즈마 전위 정도로 돌아간다. 타겟 직상부의 강한 수평 자기장 부분은 200 G 정도를 가지고 있으므로 300 eV의 전자에 대한 라모어 반경을 구해보면 3.4 mm가 된다. 1회전 둘레는 21.4 mm이므로 1.8 ns가 최소 회전 주기가 된다. 횡방향 드리프트 속도가 선속도와 거의 같으므로 나선의 길이를 고려하면 주기가  $\sqrt{2}$ 로 늘어나서 3.6 ns가 될 것이다. 100 kHz 반복 주파수 펄스의 transient voltage



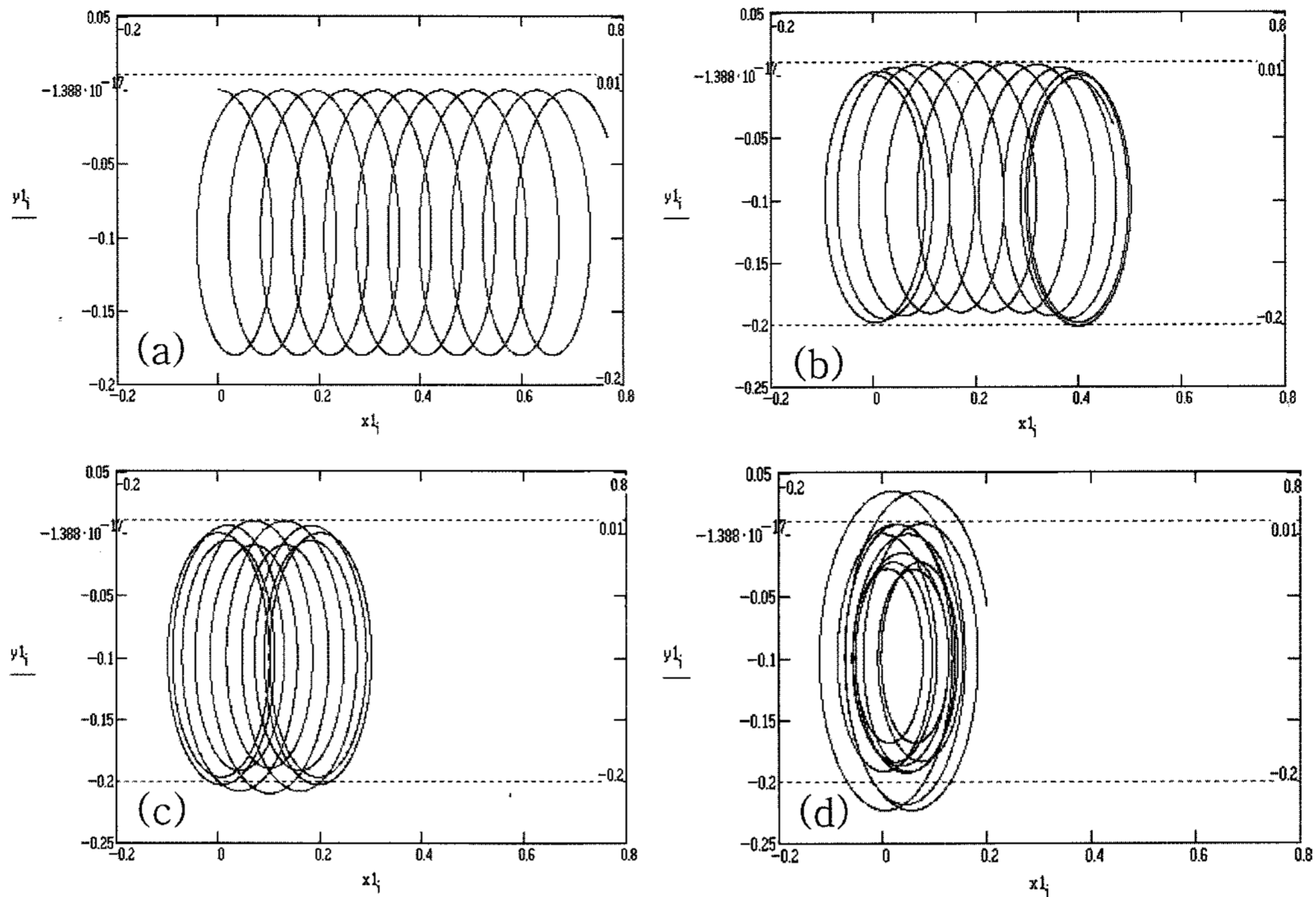


Fig. 5. (a) DC, (b) Sine frequency 1x, (c) Sine frequency 2x, (d) Pulse (frequency 1x, 50% duty).

overshoot 부분의 주기가 450 ns 수준이므로 stochastic heating으로 얻을 수 있는 전력 밀도를 구해보면, 아래 식 (2)로 나타낼 수 있다. 여기서  $\omega_0$ 는 쉬스 경계면의 속도이며, 이는 쉬스의 두께를

$$P_{stoc} = \frac{1}{2} m_e \omega_0^2 n_0 \langle v_e \rangle \quad (2)$$

- $P_{stoc}$  : power absorption by stochastic heating (W)
- $m_e$  : electron mass (kg)
- $\omega_0$  : field frequency near sheath (Hz)
- $n_0$  : neutral density ( $\#/m^3$ )
- $v_e$  : electron velocity (m/s)

주기로 나누는 것이 된다. 마그네트론 방전에서 쉬스의 두께 측정은 매우 어려우나 1 mm 이하라고 하면 쉬스 주변에서 전기장의 주파수를 펄스 상승 시간(10 ns)를 기준으로 계산하면 100 MHz가 된다. 즉, 쉬스의 속도는  $1 \text{ mm}/10 \text{ ns} = 10^5 \text{ m/s}$ 가 된다. 전자의 선속도가  $10^7 \text{ m/s}$ 이므로 실제로 stochastic heating에 의해서 전자가 얻는 속도의 증가는 1% 미만이다. 즉, 이런 전압 burst에 의한 전자의 가열이 충분히 발생하려면 보다 짧은 상승 속도를 갖거나 높은 전압 오버 슈트를 발생 시켜서 유효 방전 전압을 증가시키는 것이 주요 메커니즘이 될 것이다. 실제로 ENI RPG -100을 이용하여 2인치 원형 마그네트론 타겟에서 측정된 전압, 전류 파형을 그림 5에 나타내었는데 전압의 오버슈트는 -1000 V

까지 발생하고 있으며 안정화 까지 걸리는 시간도 매우 길어서 거의 펄스 주기의 60%를 차지하고 있다. 여기에 상응하는 이온 전류는 전압 피크에 대응하여 세 개로 구성되어 있고, (+)반전 펄스 시에 0.3 A의 예리한 전자 전류가 형성되었음을 알 수 있다. 이 전압, 전류 파형은 Al:ZnO 타겟을 이용하여 측정한 것으로서 반응성 스퍼터링이 아니므로 타겟 표면에 전하 축적과 그에 따른 방전 현상은 관찰되지 않는다. 다만 이온 전류와 전자 전류, 그리고 플라즈마 전위를 예측할 수 있는 전극 전위에 대한 정보를 얻을 수 있다. 여기에서 이온의 에너지를 분석할 수 있는 질량 분석기를 설치하여 측정하거나 파형의 분석을 통하여 이온의 에너지 분포를 예측할 수 있다<sup>10)</sup>.

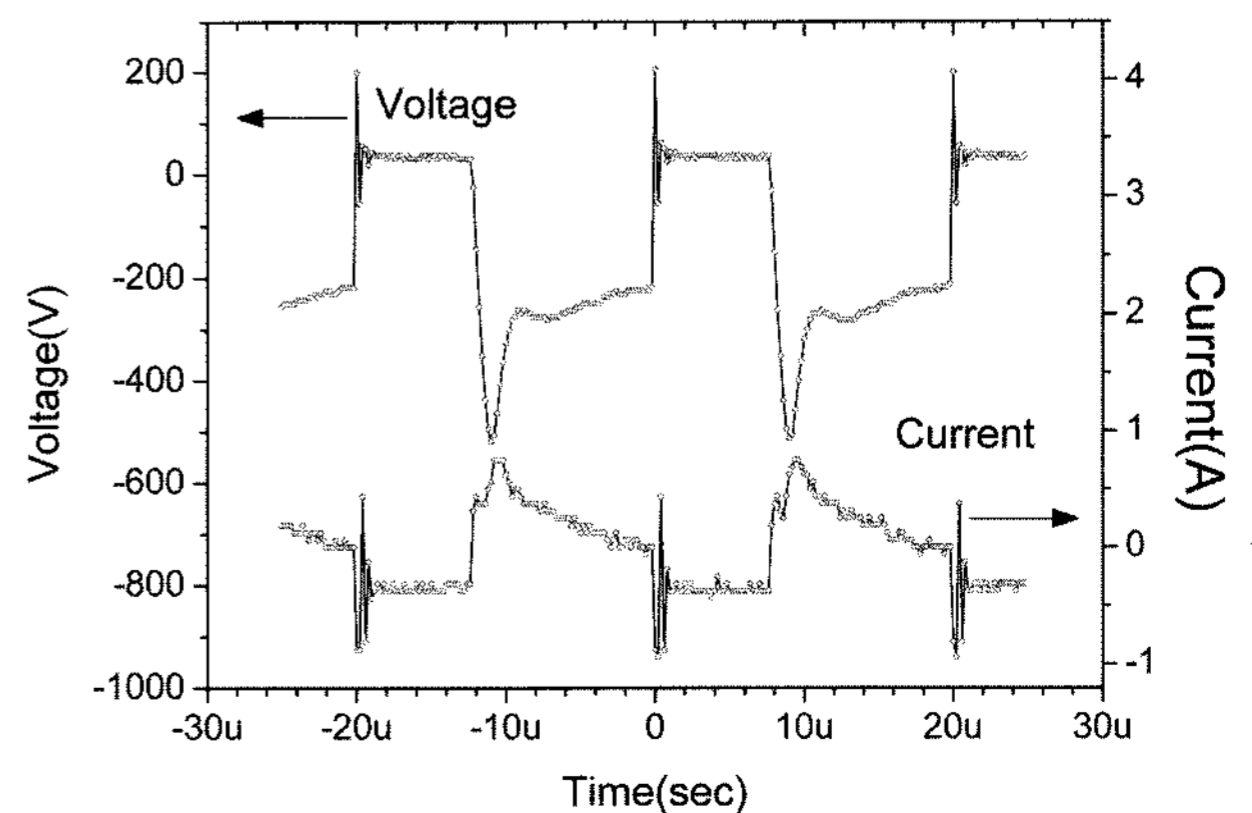


Fig. 6. The voltage and current waveform by 50 kHz pulsed-dc sputtering.

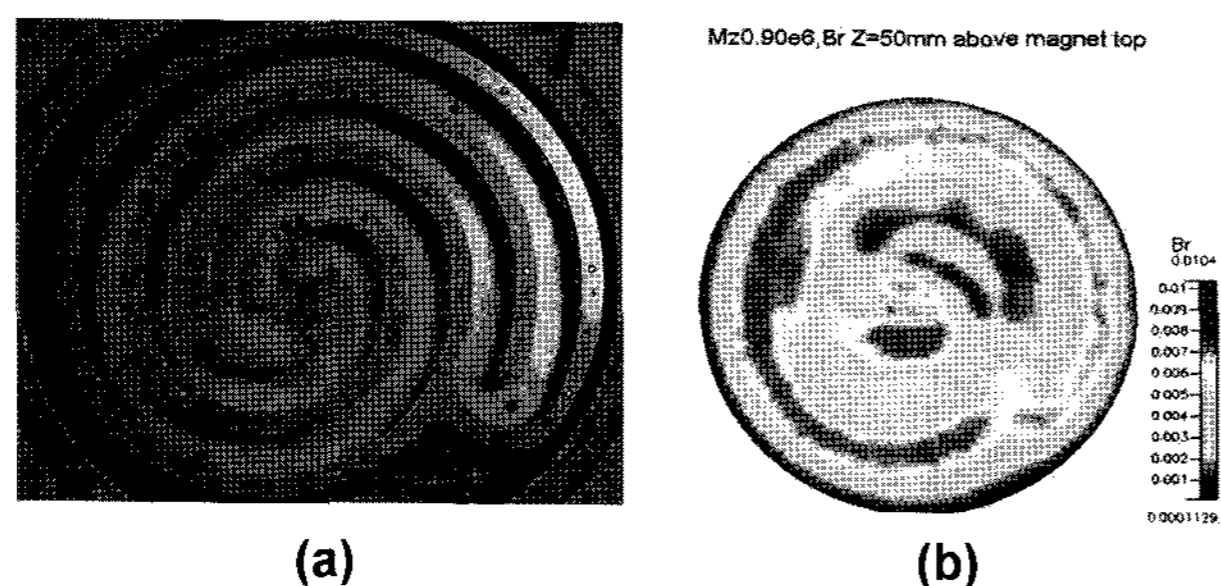


Fig. 7. (a) A rotating cathode magnet array, (b) Modeled magnetic fields.

### 3.2 원형 회전형 자석 배열의 자기장 해석

그림 7은 실제 반도체 장비에서 사용되고 있는 자석구조 중의 일부이다. 전체 직경 370 mm안에  $\Phi 12 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 의 실린더 형태의 영구자석이 배열되어있다. 중앙을 중심으로 왼쪽은 N극 라인, 오른쪽은 S극 라인의 구조를 갖는다. 자기장 해석을 위하여 각 각의 위치를 측정하고 육면체 격자와 프리즘 격자를 혼합하여 172,041개의 셀을 생성하였다. 그림에는 타겟의 식각율에 가장 큰 영향을 미치는 자석 배열에서 50 mm 위 부분의 수평자기장 (Br)의 크기를 나타내었다. 균일한 타겟의 스퍼터링을 위하여 자석을 연속적으로 배열하면 유리하지만, 자기장의 구조상 적은 수의 자석을 사용하여 대등한 플라즈마 밀도와 타겟 식각 균일도를 얻을 수 있다면 경제적으로 유용한 해법이 될 수 있다. 해석 결과를 보면 최외각을 제외한 내부 자석 배열 환 사이의 부분에서는 균일한 수평 자기장 구조를 보이고 있는데, 이 모델의 경우 회전형 마그네트론이므로 증착 균일도를 위한 고려와 함께 반응성 스퍼터링에서 증착이 진행되지 않는 부분의 산화·질화에 의한 방전 정지 문제, 스퍼터링이 되고 있는 부분이 산화·질화되어서 생기는 아크 발생에 대한 고려가 필요하다.

또한 자기장의 undulation을 이용하여 이온화 전자의 비행 거리를 늘리고 이에 따른 전자의 유효 사용 시간을 증가시킬 수 있는 방안이 된다. 따라서 본 연구에서는 직경 100 mm의 소형 모델을 이용해서 각 자석간 거리가 전체의 방전 균일도에 미치는 영향에 대해서 조사하였다.

### 3.3 소형 모델 자석 배열에서의 자기장 해석과 스퍼터링 실험 결과

그림 8(a)는  $\Phi 100 \text{ mm} \times 2 \text{ t}$ 의 요크 플레이트(순철판)에 NdFeB자석을 배열한 모습이다. 중앙에는  $\Phi 10 \text{ mm} \times 20 \text{ t}$ , 바깥쪽은  $\Phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ t}$ 의 N극 자석을 배치하였고 가운데에는  $\Phi 100 \text{ mm} \times 15 \text{ t}$ 의 S극을 배치하였다. 그림 8(b)는 이러한 배열에서 수

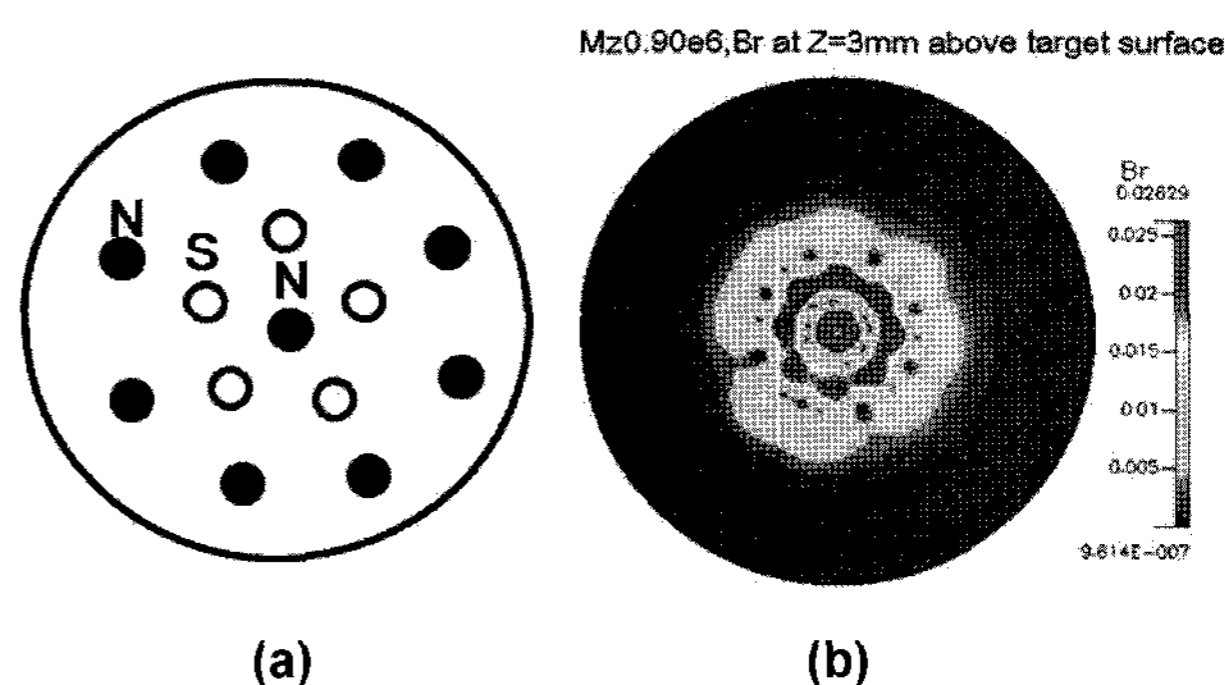


Fig. 8. (a) A dispersed magnet array, (b) Modeled magnetic fields.

평자기장(Br)을 해석한 결과이다. 전사모사에서 수평자기장을 나타내고 있는 부분의 세기 범위는 약 0.008~0.025 T(80~250 G)이다. 가우스 미터로 자석 배열 모듈에 스테인레스강 캡을 씌어 놓고 수평자기장을 측정된 결과, 77~192 G로 수치 해석 결과와 비슷하였다. 가우스 미터로 측정된 수평 자기장의 수치는 cap 바로 위의 자석의 자기장 세기만을 측정된 값이며, 수치 계산은 주어진 Z축 조건에서 각 cell당 계산된 자기 벡터의 평균값을 나타내므로 평균 오차 약 9.3% 정도를 유발 시킨 것으로 보여진다.

그림 9(a)는 그림 8(a)에서 배열한 자석을 실제 진공시스템에 적용하여 방전을 발생시킨 모습이다. 기본 진공도  $3.05 \times 10^{-5}$  Torr, 공정압력 50 mTorr, Ar 15 sccm과 직류전압 -239 V를 공급하여 방전을 발생시켰다. 방전형상은 그림 8(b)의 전사 모사 결과와 매우 흡사하게 중앙의 링 모양과 주변에 별 모양으로 발생되었다. 또한, 스테인레스강 위에 두께 16  $\mu\text{m}$ 의 알루미늄 호일 두 겹을 고정하고 방전시킨 후, 호일이 스퍼터링 된 형상을 그림 9(b)와 같이 얻을 수 있었다. 두 겹 중 한 면의 알루미늄 호일이 스퍼터링 되었으며 전사 모사에서 수평자기장이 약한 부분이 실제로 덜 스퍼터링 되었음을 확인하였다. 그 결과, 수평자기장의 세기와 전자의 가둠

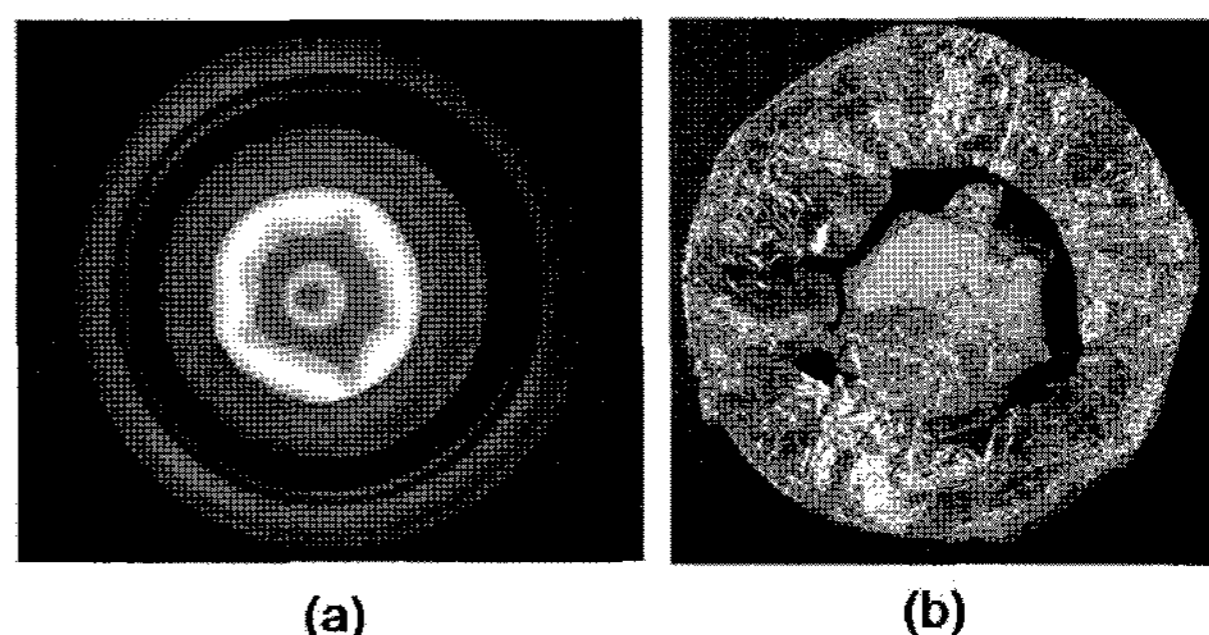


Fig. 9. (a) Real plasma discharge shapes for Fig. 7, (b) the sputtered Al foil by Fig. 8(a).

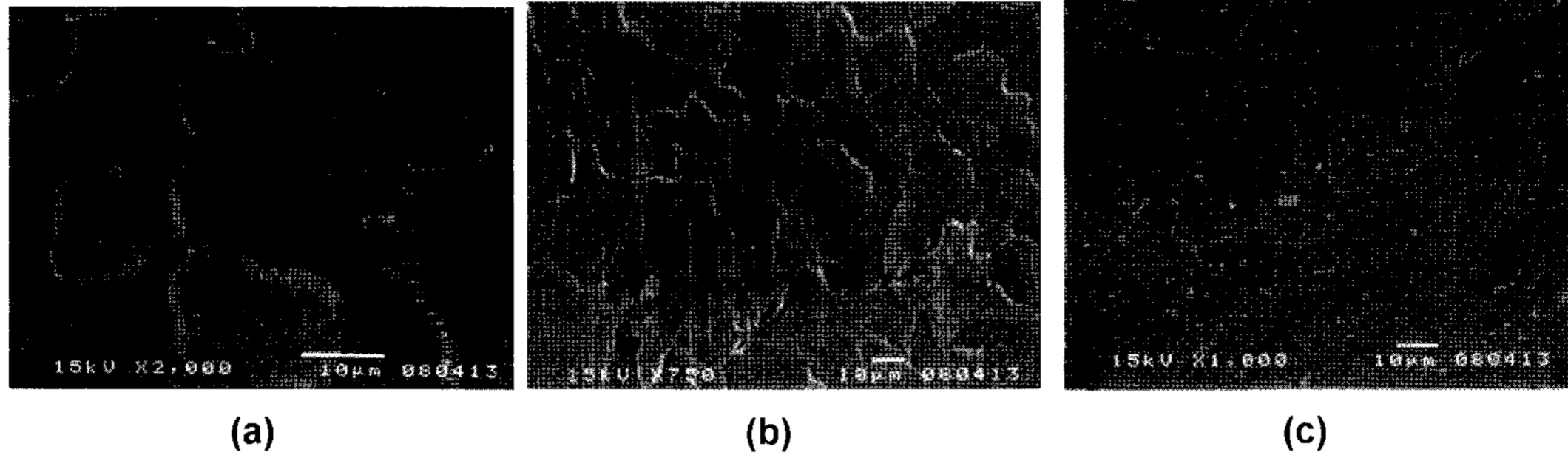


Fig. 10. (a) At an inner point, (b) a middle point, (c) an outer point of a sputtered Al foil.

현상을 가시적으로 확인할 수 있었다. 또한 자기장 계산 방법에 관하여 대략적인 결과 확인할 수 있었다. 얇은 호일을 사용한 이유는 여러 장으로 겹친 모사 타겟을 이용해서 국부적인 스퍼터링 깊이를 즉각적으로 알 수 있을 것으로 예상했기 때문이다. 그러나 두꺼운 실제의 타겟과 정확히 일치하지 않는 이유는 두께가 16µm로 얇아서 스퍼터링 현상 뿐 아니라 증발에 의한 침식이 발생할 수 있기 때문이다. 즉, 진공 중에서의 열전달 기구는 복사와 전도인데 기계적으로 밀착되어 있지 않는 구조를 가지고 있으므로 복사에 의한 열전달만이 유일한 기구가 되고 자기장에 의한 집중적인 이온 충돌과 증성화에 의한 화학 에너지의 방출에 의해서 국부적인 용융 현상과 진공 증발이 발생할 확률이 높다고 판단되기 때문이다. 이를 확인하기 위해서 주사 전자 현미경으로 표면을 관찰하였다.

그림 10은 그림 9(b)의 스퍼터링이 된 호일의 바깥쪽 라인을 분석해 본 결과이다. 플라즈마가 영향에 따른 라인의 안쪽 (a)과 경계 (b), 바깥쪽 (c)로 구분할 수 있었다. 그림 10(a)의 경우 입계를 중심으로 수지상 구조를 갖고 있다. 수지상 구조는 응고 조직의 대표적인 것으로서 스퍼터링에 의해서 알루미늄 호일이 국부적으로 용융되었다는 것을 의미한다. 경계부인 그림 10(b)에서는 일반 호일에서 볼 수 있는 스크래치가 관찰되었으며, 플라즈마 밀도의 차이를 보이는 경계로 해석된다. 바깥쪽인 그

림 10(c)에서는 결정립의 모습만을 볼 수 있었다. 호일을 타겟으로 사용한 경우의 단점으로, 높은 전력에서 진공의 낮은 열전도 때문에 저용점 금속의 경우에는 장시간의 실험에 문제가 있다. 이를 역이용하여 금속의 용융에 응용할 수도 있다. 실제로 그림 11에는 용점 1085°C인 구리가 수 십 W/cm<sup>2</sup>의 스퍼터링 전력밀도에 의하여 용융된 것을 나타내고 있다. 이 결과를 오히려 고순도 재료의 용융에 응용할 수 있다. 최근 태양 전지용 실리콘의 용융 및 정련에 대한 관심이 고조되고 있는데 고전적인 전자빔 스캔 용융법보다 훨씬 저렴하고 안정적인 방법으로 용융할 수 있을 것으로 기대된다. 특히 실리콘의 비저항이 높아서 직류로는 방전 형성이 잘 되지 않지만 pulsed dc 방전을 이용하면 초기 고상

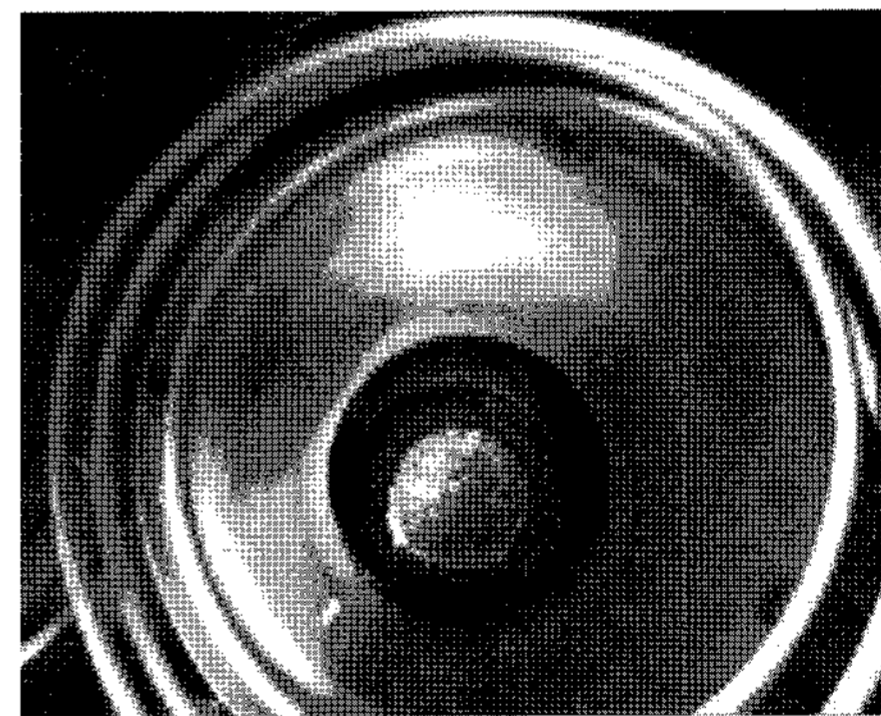


Fig. 11. A melted Cu target by focused high power sputtering.

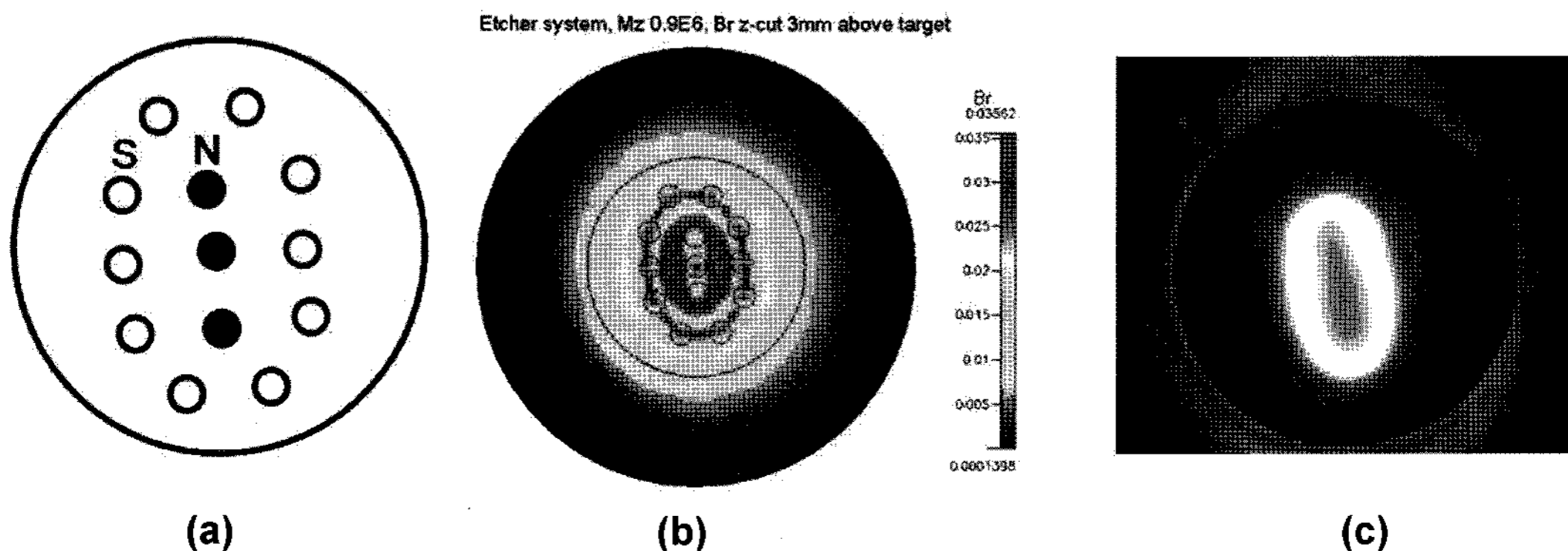


Fig. 12. (a) A rectangular magnet array, (b) Modeled magnetic fields, (c) the real plasma discharge shape.

일 때의 높은 저항값을 갖는 영역에서도 고전력 밀도의 방전이 용이하게 시작되고 이를 이용하여 실리콘의 용융을 유도할 수 있을 것으로 생각된다.

그림 12(a)는 순철판 요크 플레이트에 실제 사각형 스퍼터 음극의 소형 모형을  $\Phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ t}$ 의 실린더형 자석으로 배열한 모습이다. 안쪽 자석 배열은 N극, 바깥쪽 자석 배열은 S극으로 하였다. 기본 진공도는  $4.46 \times 10^{-5} \text{ Torr}$ , 공정압력 20 mTorr, Ar 15 sccm와 직류전압 -196 V를 공급하여 방전을 발생시켰다. 가우스 미터로 타겟에 평행한 자속 밀도를 측정된 결과 최저 117 G~최고 338 G로 자기장 수치 해석 결과 그림 12(b)와 약 4.2% 오차 범위 내에서 일치하였다.

#### 4. 결 론

연구 자석 배열이 마그네트론 스퍼터링에서 타겟 침식 영역 설정에 미치는 영향을 손쉽게 검증하기 위하여 소형 자석 배열 모듈을 개발하고, 실제 현장에서 사용되는 사각형 마그네트론 구조에 대한 자기장 해석을 하였다. 이를 이용하여 연속적인 자석의 배열과 undulation을 갖는 이산형 자석 배열의 방전 형상을 관찰한 결과 방전의 연속성에서는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 마그네트론 방전의 구동 주파수의 영향에 대한 고찰을 통해서 일반적인 연속 직류 구동보다 짧은 상승, 하강 시간을 갖는 펄스 직류 구동 파형이 높은 에너지의 전자를 음극에서 방전 영역으로 주입하여, 더 많은 이온화 충돌을 유발하고, 플라즈마 전위를 높임으로써 음극에 입사하는 이온의 에너지를 증대효과를 가져올

수 있음을 펄스 구동시의 전압, 전류 파형곡선에서 확인하였다. 또한 마그네트론의 에너지 밀도를 이용하여 타겟의 용융에 이용할 수 있음을 발견하였고, 알루미늄 호일과 구리에 대하여 실험적으로 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 소재원천기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. R. D. Arnell, P. J. Kelly, J. W. Bradley, Surf. Coat. Technol., 188-189 (2004) 158.
2. T. E. Sheridan, M. J. Goeckner, J. Goree, J. Vac. Sci. Technol., A 8 (1990) 30.
3. P. J. Kelly, P. S. Henderson, R. D. Arnell, J. Vac. Sci. Technol., A 18 (2000) 2890.
4. 양원균, 주정훈, 한국표면공학회지 40 (2007) 209.
5. Sultana N. Nahar and J. M. Wadehra, Phys. Rev A, 35 (1987) 2051.
6. S. Kondo, K. Nanbu, J. Phys. D, 32 (1999) 1142.
7. T. A. van der Straaten, N. F. Cramer, I. S. Falconer, B. W. James, J. Phys. D 31 (1998) 177.
8. T. A. van der Straaten, N. F. Cramer, I. S. Falconer, B. W. James, J. Phys. D 31 (1998) 191.
9. 김곤호, 양성채, 플라즈마 일렉트로닉스, 교학사, 2006, p142.
10. M.-H. Lee, H.-C. Lee, C.-W. Chung, Appl. Phys. Lett., 91 (2007) 221505.