

Study on target erosion in rocking magnet sputtering system

Do-Sun Lee* · Ui-Hui Kwon*,** · Won-Jong Lee†*

* Dept. of Materials Science and Engineering, KAIST, Daejeon, 305-701, Korea

** Samsung Electronics, Kiheung Gyunggido, Korea

(Received August 26, 2005)

요 약

A high performance dual rocking magnet sputtering gun has been developed. The rocking magnet sputtering gun introduces full-face erosion by rapidly rocking the magnet in the region where the high plasma density is maintained. The newly developed dual rocking magnet sputtering gun whose target utilization was 77 percent achieved high performance in quality in the view of target utilization and target life-time comparing to the existing magnetron sputtering gun. The PIC-MCC target erosion simulation has been performed simultaneously. Comparing experimental target erosion profiles with simulated target erosion profiles, the simulation could estimate the tendency of the target erosion profiles but could not estimate an exact target erosion profile. If the simulation were improved more precisely, the cost reduction for the development of the multiple rocking magnet sputtering gun would be expected.

주제어 : magnetron sputtering, erosion, target utilization, target life-time, PIC-MCC

1. 서 론

고효율 마그네트론 스퍼터링 장비 개발은 많은 시간과 비용을 필요로 한다. 따라서 새로운 스퍼터링 건의 개발에 있어서 전산모사를 통하여 경비와 시간을 절약하려는 노력이 요구되고 있다. 마그네트론 스퍼터링 장비는 박막증착속도가 빠르고 양산성이 우수하여 반도체 및 디스플레이 소자의 제조시 박막의 증착에 가장 널리 쓰이는 장비이다. 그러나 자기장에 의해서 전자가 타겟 표면에 국부적으로 집중되어 타겟의 식각이 균일하지 못하여 타겟효율(target utilization) 및 타겟수명(target life-time)이 감소하고 식각형상이 고르지 못함에 따라 박막의 증착균일성 역시 저하되는 문제점을 가지고 있다. 특히 고가의 타겟을 사용하는 경우 치명적인 공정비용상승을 초래할 수 있게

되므로, 타겟의 균일한 식각과 긴 타겟 수명은 마그네트론 스퍼터링 시스템에 있어서 중요한 성능 지표이다. 이를 개선하기 위하여 타겟 배후의 자석조립체 설계를 최적화 하거나 자석조립체를 회전 운동시킴으로써 타겟 전면에 균일한 자기장을 형성하여 고른 식각을 유도하는 연구들이 이루어져 왔다 [1-5]. 이들 시도 중 요동자석 스퍼터링 건은 고정자석열 사이에 일정한 각도범위를 주기적으로 왕복하는 요동자석열을 사용하여 증착효율의 저하없이 타겟 전면에 고른 식각을 유도할 수 있다는 장점을 가지고 있어 기존 마그네트론 스퍼터링 건의 단점을 극복할 수 있는 새로운 고효율 스퍼터링 방식이다 [2].

본 연구에서는 이중 요동자석 스퍼터링 건(dual rocking magnet sputtering gun) 타겟표면의 자기장을 대칭적, 주기적으로 변화시켜 가며 타겟효율,

타겟수명과 같은 주요 성능지표들에 대한 연구를 수행하였다. 또한 PIC-MCC(particle-in-cell Monte Carlo collision)방식의 타겟 스퍼터링 식각전산모사를 수행하여 실험결과와 전산모사 결과를 비교, 분석하였다. 이를 위하여 이중 요동자석 스퍼터링 건을 장착한 스퍼터링 장치를 이용하여 요동자석 열간 간격, 요동자석열의 자화각도차이에 따른 식각형상을 실험적으로 알아보고 전산모사된 식각형상과 비교, 분석하였다.

2. 실험 방법

스퍼터링 식각실험을 위하여 사용한 이중 요동자석 스퍼터링 건의 원리를 Fig. 1에 나타내었다. Pose1 및 pose2는 각각 요동자석열이 시계방향 및 반시계방향으로 최대한 회전한 상태를 의미한다. 식각실험중 요동자석열은 하나의 pose에서 3초간 머물다가 다른 pose로 50RPM의 속도로 빠르게 회전하여 옮겨가게 된다. 내부에 배치된 두 요동자석열을 pose1과 pose2사이를 왕복운동시킴으로써 왕복운동하는 한 주기내에 타겟의 전면에도 밀도 플라즈마를 이동시켜 고른 식각형상을 유도한다. 이 때, 두 요동자석열간의 각도차이를 요동각도(rocking angle)로 정의하고 rocking angle은 요동자석열의 회전각도를 의미하기도 한다.

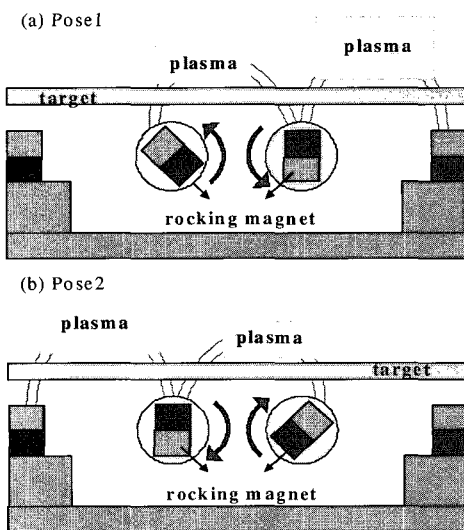


Fig. 1. Principle of dual rocking magnet sputtering gun

마그네트론 플라즈마 생성을 위하여 희토류원소 화합물 중 대표적인 자성합금인 NbFeB 소결자석을 사용하였다. 식각실험시 방전기체로는 Ar을 사용하였으며 공정압력은 5mTorr로 유지하였고 타겟으로는 알루미늄(140*250*7mm³)을 사용하였다. 타겟의 식각형상을 측정하기 위해 제작된 식각측정장치는 서보 모터를 이용하여 타겟면과 평행한 방향의 이동을 제어하고 probe가 식각된 깊이를 측정하게 된다. 이 장치에 사용된 probe는 roller모양의 tip이 달려있는 DG25BP Sony digital gauge로서 타겟표면의 식각형상을 ±1μm의 정확도로 측정하였다.

3. 식각형상 전산모사

Los Alamos National Laboratory(LANL)의 Poisson Superfish [6] 프로그램을 사용하여 얻은 전산모사된 자기장하에서 U. C. Berkley 대학에서 개발된 2D PIC-MCC 플라즈마 전산모사기법인 XOOPIIC [7]을 이용하여 마그네트론 플라즈마의 천이상태를 전산모사하고, 이로부터 음극 타겟에 흐르는 정상상태 방전전류밀도를 예측하였다. XOOPIIC상에서 PIC-MCC 플라즈마 전산모사의 연산순서는 Fig. 2와 같이 단위시간(Δt)당 연속적인 여러 단계들의 조합이 반복적으로 이루어진다 [8].

마그네트론 플라즈마와 같이 플라즈마 밀도의 불균일도가 크고 위치에 따른 Debye length 변화가 큰 경우에는 플라즈마 밀도의 포화가 잘 이루어지지 않아 본 연구에서는 준정상상태의 플라즈마 영역에서 방전전류밀도를 예측하였다. 준정상

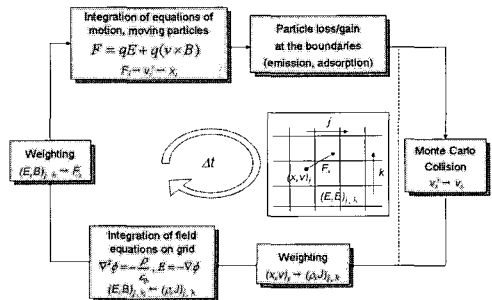


Fig. 2. PIC-MCC flow chart for bounded and collisional models

상태는 플라즈마 밀도가 전자 눈사태 과정에 의해서 급격히 선형적으로 증가하며 전자와 이온의 평균에너지가 수렴하되 전위분포의 섭동이 없는 영역으로 결정하였다. 식각형상을 측정하는 폭방향의 위치 x 에 따른 이온의 에너지 E 의 분포를 나타내는 준정상상태의 방전전류밀도 $I(x, E)$ 로부터 입사이온의 에너지에 따른 스퍼터링 효율 $Y(E)$ 를 고려하여 일차적으로 타겟 원자의 스퍼터링 방출유량 $J_s(x)$ 을 구하였다.

$$J_s(x) = Y(E) \cdot I(x, E)$$

보정에 사용한 Al 타겟의 Ar^+ 에 의한 스퍼터링 효율함수는 Y. Yamamura와 H. Tawara의 이론식 [9]으로부터 1MeV이하 구간을 polynomial fitting하여 구하였다. 스퍼터링 효율이 보정된 스퍼터링 방출유량을 배경기체 밀도에 방전전류가 증가할수록 큰 폭으로 감소한다는 gas rarefaction effect [10]를 보정함으로써 최종 타겟의 식각형상을 구하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 요동자석열 간격에 따른 타겟표면 식각특성연구

요동자석열 간격(rocking distance)을 각각 3, 5, 7 cm로 변화시켜가며 식각실험을 수행하였다. Fig. 3에 나타낸 각 경우의 정적 자기장 형상을 살펴보면 전체적인 분포 형상은 유사하지만 요동자석 간격이 넓을수록 자기장 분포의 비대칭성이 커짐을 알 수 있다. 각 경우의 공정조건에 따라 pose1에 요동자석을 고정시켜 놓고(static mode at pose1) 식각실험을 한 후의 타겟 식각형상을 Fig. 4에 나타내었다. 요동자석열 간격이 넓을수록 최대식각 지점들이 중심으로부터 멀어지고 최대식각된 깊이는 깊어짐을 알 수 있다. 요동자석열을 pose1과 pose2사이에서 요동시키는 경우(rocking mode)의 식각형상을 Fig. 5에 실선으로 나타내었다. Static mode인 pose1과 pose2에서의 식각형상을 중첩하면 rocking mode에서의 식각형상과 거의 일치, 이는 static mode의 식각형상이 rocking mode에 거

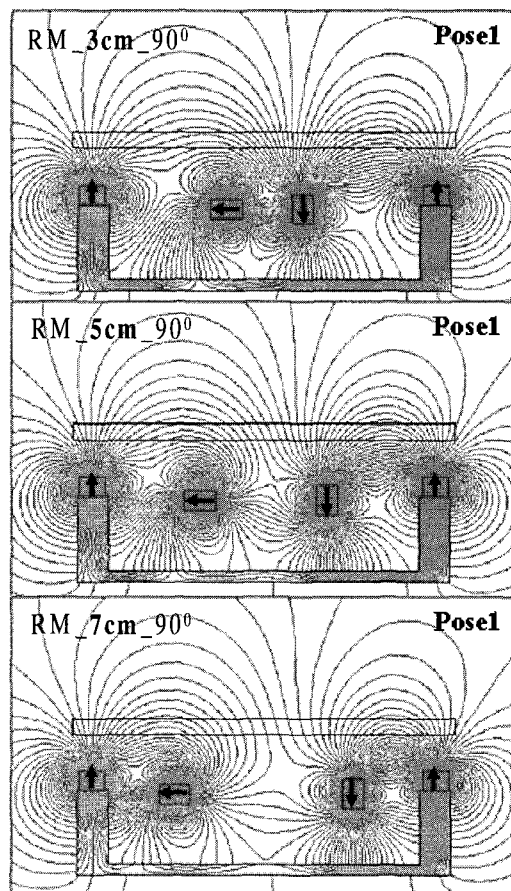


Fig. 3. Magnetic field distribution of the rocking magnet sputtering guns at pose1 with the change of the distance between rocking magnets. Rocking angle is 90°.

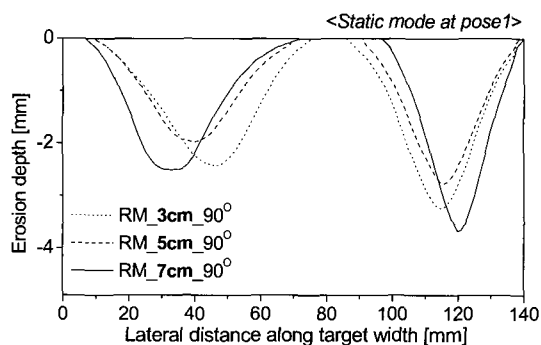


Fig. 4. Erosion profiles of sputter targets with the change of the distance between rocking magnets for the static mode at pose1. Rocking angle is 90°.

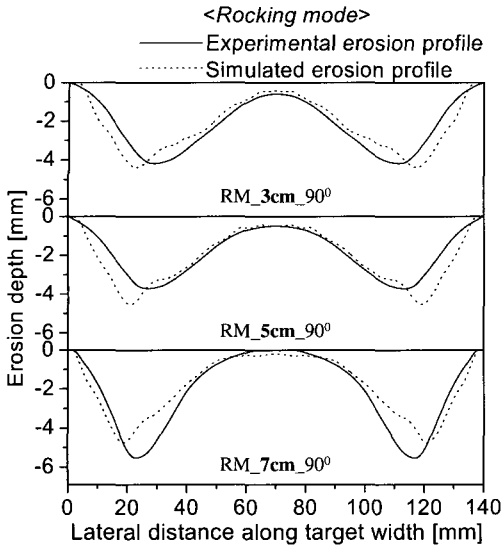


Fig. 5. Comparison between the experimental and the simulated erosion profiles of sputter targets with the change of the distance between rocking magnets for the rocking mode. Rocking angle is 90°.

의 그대로 반영됨을 의미한다. 기존 마그네트론 스퍼터링 장치를 사용한 식각에서는 타겟의 중심부에 재증착이 일어나 particle 문제등이 유발되지만 본 실험에서 rocking distance를 달리한 세 경우 모두 rocking mode에서는 요동 플라즈마에 의해서 중심부에서의 재증착이 없이 전면식각이 진행되었으며 요동자석간 간격이 가까울수록 중심부 식각이 촉진되었다.

Static mode의 식각형상이 rocking mode의 식각형상에 그대로 반영되므로 static mode의 전산모사결과를 요동자석열간 축에 대하여 대칭, 중첩하여 rocking mode의 타겟 식각형상을 전산모사하였다. Rocking mode에서의 전산모사된 식각형상을 Fig. 5에 점선으로 같이 나타내었다. 전산모사결과는 요동자석열 간격이 커질수록 최대식각지점들의 간격이 멀어지며 최대식각지점에서 식각이 더 과도하게 일어나고 중심부의 식각이 덜 일어나는 등 실험결과와 경향성뿐만 아니라 실제 값에서도 상당히 일치함을 알 수 있다.

타겟효율(T_U)과 타겟수명(T_L)을 다음과 같이 정의하였다.

$$T_U [\%] = \frac{V_{EROSION}}{V_{TOTAL}} \times 100$$

$$T_L [kWh] = P_{input} \times \tau_{OP}$$

여기서 $V_{EROSION}$, V_{TOTAL} , P_{input} , τ_{OP} 는 각각 타겟의 식각된 2차원적 넓이, 최대식각깊이×타겟폭, 인가된 power 그리고 식각이 가장 잘 일어난 곳의 타겟의 남은 두께가 1mm가 될 때까지 스퍼터링 시간이다. 요동자석열 간격에 따른 타겟효율과 타겟수명을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6을 보면 타겟효율은 요동자석열 간격이 3cm, 타겟수명은 5cm의 경우 가장 우수하였으며 두 경우가 타겟효율이나 타겟수명의 성능지표에서 비교적 큰 차이를 보이지 않는데 반하여 7cm의 경우 나머지 두 경우에 비하여 열등한 타겟효율과 수명을 보인다. 이는 요동자석열과 정적자석열의 간격이 좁아지면서 평행한 자기장 성분이 세짐에 따라 요동자석열과 정적자석열 사이 부분의 식각이 집중적으로 과도하게 일어났기 때문이다.

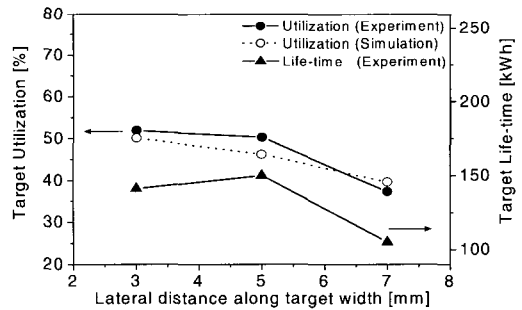


Fig. 6. Target utilization and target life-time of the rocking magnet sputter targets with the change of the distance between rocking magnets. Rocking angle is 90°.

4.2 요동자석열의 요동각도에 따른 타겟표면 식각 특성연구

4.1절의 실험결과로부터 가장 긴 타겟수명을 보인 5cm의 요동자석열간 간격조건하에서 요동각도(rocking angle)를 각각 45°, 90°, 135°, 180°로 변화시켜가며 식각실험을 수행하였다. Fig. 7에 나타

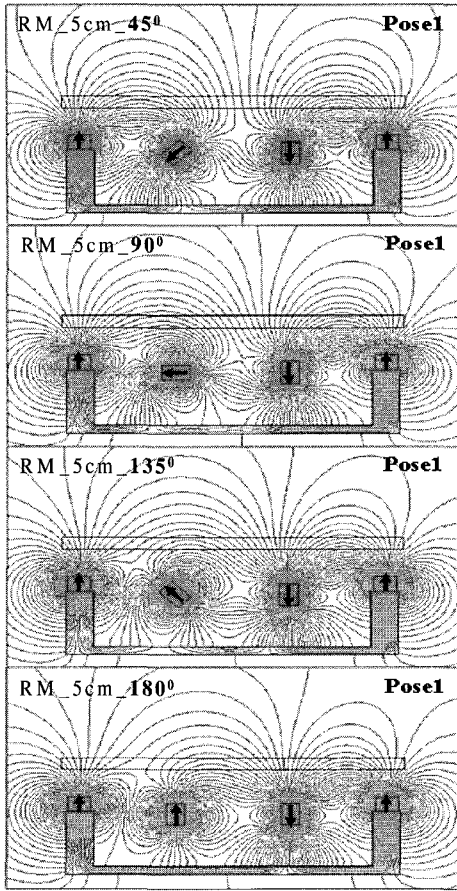


Fig. 7. Magnetic field distribution of the rocking magnet sputtering guns at pose1 with the change of the rocking angle. Distance between rocking magnets is 5cm.

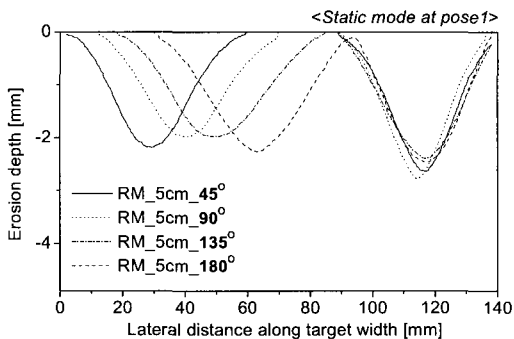


Fig. 8. Erosion profiles of sputter targets with the change of rocking angle for the static mode at pose1. Distance between rocking magnets is 5cm.

낸 각 경우의 정적 자기장 형상을 살펴보면 전체적인 분포 형상은 유사하지만 요동각도가 커짐에 따라 타겟 중심부에서의 타겟에 평행한 자기장 성분이 세지고 가장자리 부분은 약해짐을 알 수 있다. 요동각도에 따른 static mode의 식각형상을 비교하여 보면 Fig. 8과 같이 요동각도가 커짐에 따라 타겟 중심부의 식각이 더 일어나고 가장자리 부분의 식각은 덜 일어남을 관찰할 수 있는데 이는 타겟면의 자기장의 분포로부터 예측되는 결과이다. Rocking mode에서 요동각도에 따른 식각형상을 Fig. 9에 실선으로 나타내었다. 타겟 효율과 타겟수명 측면에서 최적화시키기 위하여 요동각도가 135°와 180°인 경우를 비교하여 보면 135°의 경우 타겟의 중심부보다 가장자리가 식각이 더 일어난 반면 180°의 경우에는 타겟의 가장자리에 비해 중심부의 식각이 더 심했음이 관찰된다. 따라서 그 중간인 153°의 요동각도로 추가적인 식각실험을 수행하였으며, 그 결과 거의 균일한 식각형상을 얻어내었다.

Static mode에서의 전산모사결과를 요동자석열간 축에 대칭, 중첩하여 얻은 rocking mode에서의 전산모사된 식각형상을 Fig. 9에 점선으로 나타내었다. Fig. 9를 살펴보면 전산모사를 통하여 요동각도가 증가함에 따라 타겟 가장자리보다 타겟 중심부의 식각이 더 잘 일어나는 경향성이 예측가능함을 알 수 있다. 하지만 요동각도가 45°, 90°와 같이 상대적으로 작은 경우에는 전산모사된 식각형상과 실험을 통하여 얻은 식각형상이 비교적 잘 일치하는데 반하여 135°, 180°와 같이 요동각도가 큰 경우에는 잘 맞지 않음을 보여주는데 이는 식각형상 전산모사시 플라즈마 밀도가 포화되지 않으므로 발생하는 문제로 해석된다. 추가적으로 실험한 요동각도가 153°인 경우의 전산모사결과는 실험을 통하여 얻은 식각형상과 잘 맞지 않으므로 예상되어 실험만 별도로 수행하였고 전산모사는 수행하지 않았다. 요동자석건에서 타겟면에 평행한 자기장 성분이 강한 위치는 두 부분이며 자기장이 강할수록 플라즈마 밀도는 빠르게 증가한다. 요동각도가 커짐에 따라 두 부분의 자기장 세기의 차이가 커지므로 두 위치에서 플라즈마 밀도의 증가량은 자기장의 세기에 비례하여 차이가

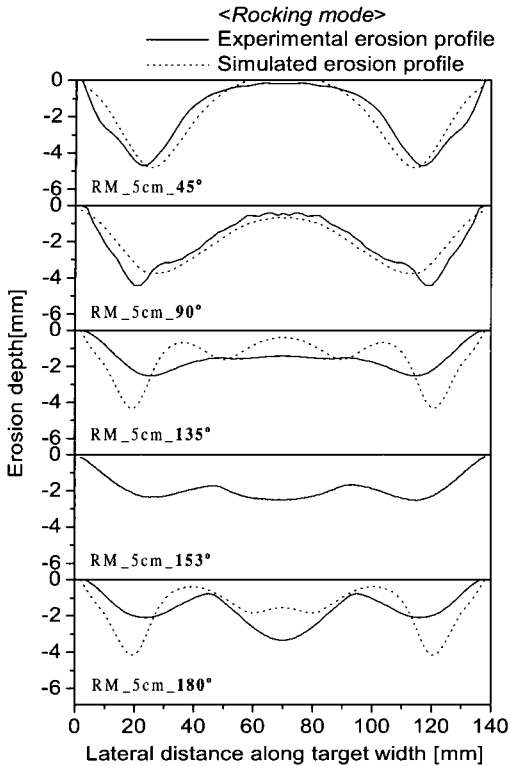


Fig. 9. Comparison between the experimental and the simulated erosion profiles of sputter targets with the change of the rocking angle for the rocking mode. Distance between rocking magnets is 5cm.

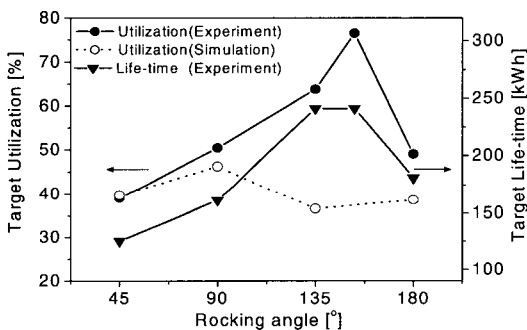


Fig. 10. Target utilization and target life-time of the rocking magnet sputter targets with the change of the rocking angle. Distance between rocking magnets is 5cm.

나게 된다. 즉, 요동각도가 증가하여 타겟면에서 자기장의 세기가 차이가 커지면 이에 따라 표면에

서 플라즈마 밀도는 자기장이 센 곳에서 빠르게 증가하고 약한 곳에서 천천히 증가하게 된다. 결국 자기장의 차이가 커지면 방전전류밀도의 차이는 실제보다 커지고 이에 따라 식각깊이의 차이가 과장되어 나타나게 되는 것이며 이는 앞으로 보다 개선이 필요한 부분이라 할 수 있다.

타겟효율과 타겟수명을 각각의 경우에 대하여 정리하면 Fig. 10과 같다. Fig. 9로부터 rocking angle이 45°, 90°, 135°인 경우는 타겟의 가장자리 부분에서, 180°의 경우에는 중심부분에서 빠르게 식각이 일어나 타겟효율 및 수명에 영향을 줄 수 있다. Rocking angle이 153°인 경우 식각형상을 보면 중심부와 가장자리 부분에서 고르게 식각이 일어났으며 이 경우 타겟효율이 77%로 기존의 마그네트론 스퍼터링 장치의 타겟효율이 30~40%임을 감안하면 크게 개선된 것임을 알 수 있다 [11,12]. 이는 요동자석열간 각도가 45°에서 180°으로 커짐에 따라 요동자석열 사이에서 타겟에 평행한 자기장이 강해져 타겟 중심부의 식각이 빨라지게 되는데 153°과 같은 적절한 요동자석열간 각도에서 가운데 부분이 가장자리 부분과 같은 깊이로 식각되었기 때문이다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 마그네트론 스퍼터링 건의 단점을 보완한 요동자석건을 최적화시켰다. 요동자석건은 내부 요동자석열의 회전범위를 타겟에 형성되는 자기장의 세기가 강하게 유지되는 범위 이내로 국한시킴으로써 증착속도의 저하없이 타겟의 전면식각을 유도하고 동시에 박막의 균일증착성 역시 향상시킬 것으로 기대된다. 기존의 마그네트론 스퍼터링 시스템의 타겟효율이 30~40%인데 반하여 개발된 이종 요동자석건의 경우 요동자석열 간격 및 요동각도를 적절하게 조절함으로써 77%의 매우 우수한 타겟효율을 달성할 수 있었다. 또한 전산모사와 실험을 통한 식각형상을 비교하여 보면 전산모사 결과는 실제 식각실험결과와 경향성 측면에서 일치하였고 특히 요동각도가 90°이하로 작은 경우 전산모사결과와 실험결과가 상당히 일치하였다. 요동각도가 90°이상으로 커짐

에 따라 전산모사결과와 실험결과의 오차가 크게 나타나는데, 이는 타겟면의 위치에 따른 자기장 세기의 차이가 커짐에 따라 타겟 표면의 위치마다 전산모사된 플라즈마 밀도의 증가량이 크게 차이가 나게 되어 식각깊이의 차이가 과장되어 나타나기 때문으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청 중소기업기술혁신개발사업 일환으로 주관기업인 선익시스템의 위탁연구과제로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] H. Barankova et al. U. S. Patent 6, 351, 075 B1, Feb. 2002.
- [2] U. H. Kwon, *A Computational Study on Plasma generation and Film Deposition in a Large-Area Planar Magnetron Sputtering System*, KAIST (2004).
- [3] R. L. Necomb et al, U. S. Patent 6, 372, 098 B1, Apr. 2002.
- [4] R. Adam et al, U. S. Patent 6, 183, 612 B1, Feb. 2001.
- [5] J. Fu, U. S. Patent 6, 183, 614 B1, Feb. 2001.
- [6] Los Alamos National Laboratory Poisson Superfish Codes (www.lanl.gov).
- [7] J. P. Verboncoeur et al, *Comp. Phys. Comm.* **87**, 199 (1995).
- [8] V. Vahedi and M. Surendra, *Comp. Phys. Comm.* **87**, 179 (1995).
- [9] Y. Yamamura and H. Tawara, *Atom. Data Nucl. Data Tables* **62**, 149 (1996).
- [10] D. W. Hoffman, *J. Vac. Sci. Technol. A* **3**, 561 (1985).
- [11] H. Harada et al, *Jpn. J. Appl. Phys.* **36**, 884 (1997).
- [12] Y. K. Yang, *Surf. Coat. Technol.* **37**, 315 (1989).