반도체디스플레이기술학회지 제19권 제3호(2020년 9월)
Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 19, No. 3. September 2020.

스퍼터 장비의 설계 룰을 찾기 위한 Si박막 특성 변화 연구

김보영*·강서익*†
*†공주대학교 기계공학과

A Study on the Change of Si Thin Film Characteristics to Find Design Rules for Sputtering Equipment

Bo-Young Kim* and Seo Ik Kang*†
*†Department of Mechanical Engineering, Kongju National University

ABSTRACT

Recently, as display and semiconductor devices have been miniaturized and highly integrated, there is a demand for optimization of the structural characteristics of the thin film accordingly. The sputtering device has the advantage of stably obtaining a desired thin film depending on the material selected for the target. However, due to the structural characteristics of the sputtering equipment, the structural characteristics of the film may be different depending on the incidence angle of the sputtering target material to the substrate. In this study, the characteristics of the thin film material according to the scattering angle of the target material and the incidence position of the substrate were studied to find the optimization design rule of the sputtering equipment. To this end, a Si thin film of 1 μm or less was deposited on the Si(100) substrate, and then the microstructure, reflectance, surface roughness, and thin film crystallinity of the thin film formed for each substrate location were investigated. As a result of the study, it was found that as the sputter scattering angle increased and the substrate incident angle decreased, the gap energy along with the surface structure of the thin film increased from 1.47 eV to 1.63 eV, gradually changing to a non-conductive tendency.

Key Words : Silicon, Energy Gap, Surface Structure, Design Rule, Sputtering, Thin Film

1. 서 론

반도체 기술 개발의 역사는 반도체소자의 축소 기술 발전과 궤를 같이 한다 해도 과언이 아니다. 1960년 벨 연구소(Bell Telephone Lab.)의 강대원 박사에 의해 금속-산화막-반도체 구조의 전계효과 트랜지스터가 최초로 제안된 이후[1], 로직 소자의 고속·저전력 동작 및 집적도 향상을 위해 트랜지스터의 크기는 점점 축소되고 있다. 차세대 메모리로 일컬어지고 있는 몇몇 메모리 소자기술들은 실리콘 기반의 현대 전자공학과 공정 호환성을 확보하고 기존의 생산 라인을 활용해 제품화하기 어려운 측면이 많아 아직까지도 현실화되기 어려운 차세대기술로 알려져 있다[2].

차세대 소자 구현을 위해서는 초박막 제조 기술이 뒷받침 되어야 한다. 산업에서 적용하고 있는 박막화 공정은 물리기상증착(PVD) 방식과 화학기상증착(CVD) 방식으로 나누며, 스퍼터링 방식은 물리기상증착 방식의 85 % 이상을 차지할 정도로 산업에서 적용되는 대표적 범용 공정장치 중의 하나이다.

스퍼터링 장치는 캐소드 전극에 대한 인가 전원에 의해 플라즈마가 형성되고, 플라즈마 내의 양이온이 타겟 표면을 향해 가속하여 타겟 물질(Si)을 뜯어내고 이를 기

†E-mail: auto@kongju.ac.kr

판 위에 코팅하는 원리이다. 스퍼터링 장치는 타겟의 선택 재료에 따라 원하는 박막을 안정적으로 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 장치의 구조적인 특성으로 인해 스퍼터링 타겟 물질의 기판 입사각에 의해 물질의 구조적 특성이 달라진다[3,4].

대부분의 스퍼터링 공정은 정지된 타겟에 대해 기판을 선형 또는 회전하는 방식으로 이송형 공정을 사용하고 있으며, 이로 인해 나타나는 박막층의 복합적인 특성 저하와 이로 인한 소자 재현성은 물론이고 특성 안정화에 문제가 지적되고 있다. 특히 반도체 HEMT(high electron mobility transistor) 소자의 경우, SiN 박막의 굴절률이 기준치 대비 ±5%가 벗어날 경우 소자 특성의 안정성에 문제가 있음이 알려져 있다[5-6].

"Park 등"의 연구결과에 의하면, 증발 물질의 기판 입사각에 따라 박막 특성이 크게 달라지는 현상을 보고하였다[7,8].

본 연구에서는 타겟 물질의 비산각과 기판 입사 위치에 따른 박막 물질의 구조적, 광학적 특성과 밴드갭 에너지를 조사하여 물질 특성 변화를 연구하였으며, 이를 바탕으로 스퍼터 장비의 최적화 설계 룰을 찾기 위한 근거를 삼고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1. Plasma complex machining center(PCMC) system used for sputtering thin film process.

실리콘 박막을 제조하기 위해 Fig. 1과 같이 마그네트론 스퍼터 캐소드가 장착된 플라즈마 복합기(PCMC™ manufactured by Finesolution Co.)를 사용하였다[9-11]. 플라즈마 복합기에는 애노드 플라즈마와 캐소드 플라즈마 발진 장치가 장착되어 있으며, 본 연구를 위해 캐소드 플라즈마 발진 장치를 사용하였다.

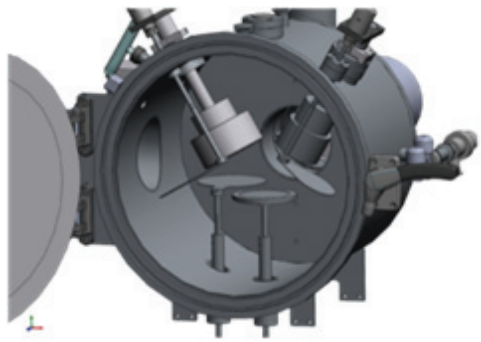

Fig. 2. Internal structure of vacuum chamber.

Fig. 2는 본 연구에 사용된 진공 챔버의 내부 구조를 보여주고 있다. 애노드 플라즈마와 캐소드 플라즈마, 페러데이 센서가 장착되어 있으며, 이온 전류를 측정하기 위한 페러데이 센서가 장착되어 있다.

실리콘 타겟은 직경이 4 인치인 잉곳을 두께가 5mm인 원판형으로 가공하여 사용하였으며, 열팽창으로 인한 파손 우려를 방지하기 위하여 은 페이스트(Ag-paste, Chemtronics, CW2400)를 이용하여 뒷면에 구리판을 덧붙였다.

스퍼터 플라즈마 발진을 위해 직류 전원(PS Plasma, SDC1022AS)과 펄스 형태의 전원공급장치(SJ Power, SPM-1)를 사용하였으며, 80 kHz의 직류 전원을 공정에 사용하였다. 플라즈마 발진을 위해 고순도 아르곤(5N) 가스를 사용하였으며, 가스 주입량은 MFC를 사용하여 10 ~ 30 sccm 범위에서 일정량을 선정하여 주입하였다. Diode array spectrometer (Hewlett Packard, 8452A)를 사용하여 박막 표면 상태에 따른 반사도와 박막 두께에 따른 투과율을 측정하여 상태를 비교하였다. 진공 챔버의 가스 압력은 Pirani 게이지와 Full range 게이지(Pfeiffer), Capacitance diaphragm 게이지(MKS)를 사용하여 측정하였다. 박막 특성을 조사하기 위해 8 인치 실리콘(100) 기판과 슬라이드 글라스(20 × 50 × 1 mm)를 사용하였다.

본 연구에서는 실리콘 기판과 유리 기판 위에 각각 실리콘(Si) 박막을 코팅하여 박막 특성을 조사하였으며, Table 1은 본 연구에 적용한 스퍼터링 공정 조건을 보여주고 있다.

Table 1. Sputtering process conditions

Contents	Conditions
Base pressure	4×10^{-6} Torr
Operating pressure	4×10^{-3} Torr
Process gas	Ar
Injection power	Pulse DC 80 kHz
Working distance	170 mm
Gas flow	10 ~ 30 sccm

3. 실험 결과 및 분석

초기 플라즈마 발진을 위해 −370 V의 직류 전원을 공급하였으나, 아크를 동반하는 플라즈마 발진의 불안정으로 인해 공정을 진행하기가 쉽지 않아 전원 공급장치를 직류 펄스형으로 교체하여 플라즈마를 발진하였다. 이 때 사용된 전원 공급장치의 주파수와 duration time은 80 kHz와 80 %이었다.

Fig. 3. Sputter plasma shape of pulse DC cathode.

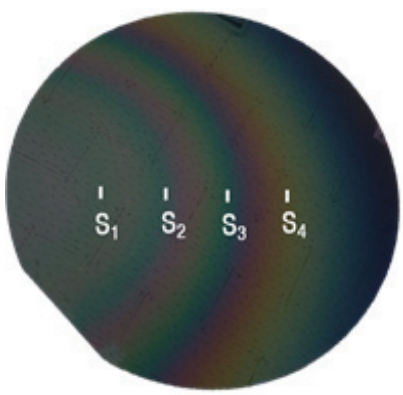

Fig. 4. Shape of reflected light of a silicon thin film formed on a stationary silicon (100) substrate.

Fig. 3은 펄스형 직류 전원을 공급하여 발진한 플라즈마의 안정적인 발진 형태를 보여주고 있으며, 이 때 코팅된 박막 형태는 Fig. 4와 같이 나타났다. 정지된 실리콘 기판 위에 코팅된 박막 상태는 반사광에 의한 원형 간섭 무늬로 나타났으며, 이는 스퍼터 코사인 법칙과 일치하는 현상으로 이해할 수 있다[12]. Fig. 4와 같이 캐소드 대향 면을 벗어나 비산각이 0 도에서 30 도로 커짐에 따라 점차 박막 두께가 달라지는 것을 간접적으로 확인할 수 있다.

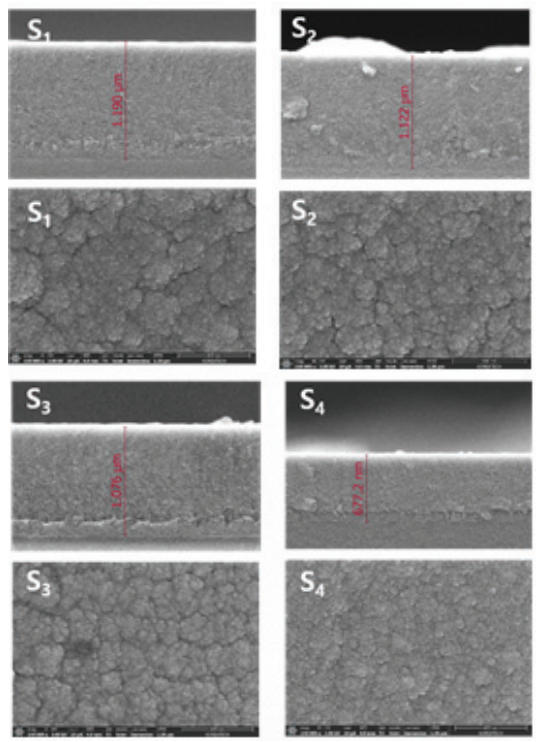

Fig. 5. SEM image of the cross-sectional view and surface morphology of a silicon thin film formed on a stationary silicon (100) substrate.

Fig. 5는 실리콘(100) 기판 위에 증착된 실리콘 박막의 전자현미경 단면과 표면 사진이다. 그림에서 S_1과 S_2, S_3, S_3의 비산각과 입사각은 Table 2와 같다.

Fig. 5와 Table 2로부터 타겟 면으로부터 발산되어 멀리 퍼져 나감에 따라 박막 두께가 얇아지고 박막을 구성하는 알갱이는 점차 작아지는 것을 볼 수 있으며, 이러한 현상은 비산각이 작은 쪽의 방출 입자 밀도와 입자 크기에 따른 박막 형성 결과가 달라지기 때문으로 볼 수 있다. 이러한 현상은 유리 기판을 사용하여 실리콘 박막을 증착한 경우도 유사하게 검출할 수 있었다.

Table 2. Scattering angle of sputtered material and incidence angle of silicon substrate according to thin film position

Position	S_1	S_2	S_3	S_4
Scattering angle (°)	0	11	21	30
Incidence angle (°)	90	79	69	60
Film thickness (㎛)	1.19	1.12	1.07	0.67
Grain size (㎚)	161.0	130.9	125.0	95.2

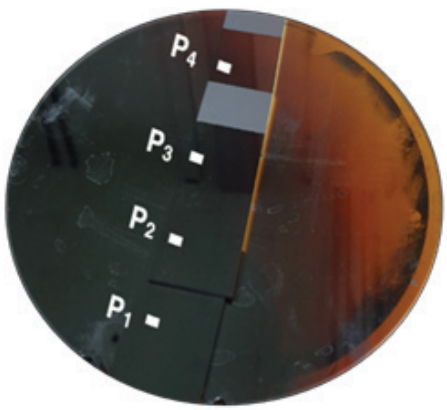

Fig. 6. Silicon thin film formed on a stationary glass substrate.

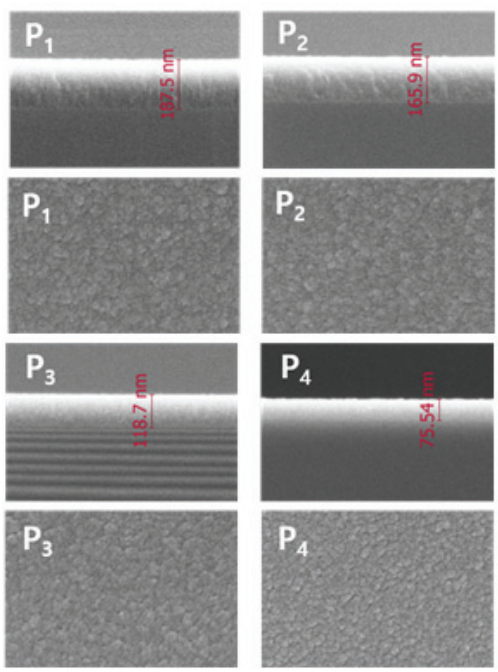

Fig. 7. SEM image of the cross-sectional view and surface morphology of a silicon thin film formed on a stationary glass substrate.

유리 기판 위에 실리콘 박막을 코팅하여 타겟 표면으로부터 방출되는 증발 물질의 비산각과 기판 입사각에 따른 박막 특성을 조사하였다. 이를 위해 Fig. 6과 같이 8인치의 원판형 유리 기판 위에 슬라이드 글라스를 고정하고, 기판을 움직이지 않은 상태에서 박막을 제작하였다. 그림에서 P_1에서 P_4로 위치가 달라지는 것은 타겟 표면으로부터 방출되는 증발 물질의 비산각과 다르게 기판 표면에 대한 증발 물질의 입사각이 점차 작아지는 것으로 정의할 수 있다.

Fig. 7은 정지된 기판 위의 각 위치에 따른 실리콘 박막의 단면과 표면 박막 형상에 대한 전자현미경 사진이다. 그림에서 P_1과 P_2, P_3, P_4의 비산각과 입사각은 Table 3과 같다.

Table 3. Scattering angle of sputtered material and incidence angle of glass substrate according to thin film position

Position	P_1	P_2	P_3	P_4
Scattering angle (°)	0	14	26	38
Incidence angle (°)	90	76	64	52
Film thickness (㎚)	187.5	165.9	118.7	75.54
Grain size (㎚)	84.5	65.5	35.7	21.4

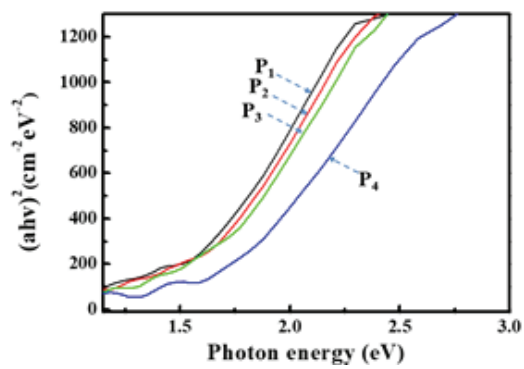

Fig. 8. Band gap energy of a silicon thin film formed on a stationary glass substrate.

이 결과로부터 기판에 대한 입사각과 타겟 비산각이 커질수록 박막을 형성하는 grain 크기가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 비산각이 커질수록 타겟 면에서 방출되는 작은 실리콘 입자들이 박막 형성에 기여하며, 상대적으로 중심부의 무거운 방출 입자들에 의한 grain 형성과 핵 성장(nuclear growth)이 잘 이뤄진 결과로 볼 수 있다.

Fig. 8은 타겟 대향 면의 이격 정도에 따른 박막의 밴드갭 에너지를 측정한 것이며, 이에 대한 밴드갭 에너지 값을 Table 4에 나타내었다. 타겟 면으로부터 이격 거리가 멀

어질수록 밴드갭 에너지가 점차 커지는 것을 확인할 수 있으며, 이로부터 타겟으로부터 방출되는 증발 물질의 비산각이 커질수록 기판 입사량과 입사에너지가 작아지기 때문에 박막 형성을 위해 필요한 원자 결합이 약하고, 이에 따른 절연 특성이 상대적으로 점점 크게 나타나는 것으로 볼 수 있다.

Table 4. Band gap energy according to the position of the thin film

Position	P_1	P_2	P_3	P_4
Bandgap Energy (eV)	1.47	1.50	1.53	1.63

유리 기판 위에 증착된 실리콘 박막의 광투과 특성을 조사하였다. 스펙트로미터를 적용하여 700 nm 입사 파장에 대한 투과 특성은 Fig. 9와 같이 나타났다. 이 결과에서도 타겟 면과 멀리 떨어질수록 즉, 중심으로 멀어짐에 따라 P_1, P_2, P_3, P_4 위치에서의 투과도가 각각 8 %, 11 %, 15 %, 32 %로 측정되었으며, 이는 분산각에 따라 박막 형성 조건이 충족되기 어려우며, 결과적으로 박막의 두께가 점차 얇아져서 나타나는 현상으로 볼 수 있다.

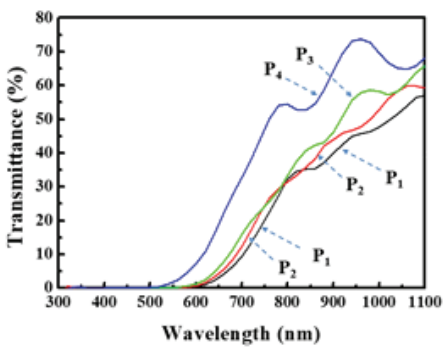

Fig. 9. Transmittance characteristics for silicon thin films.

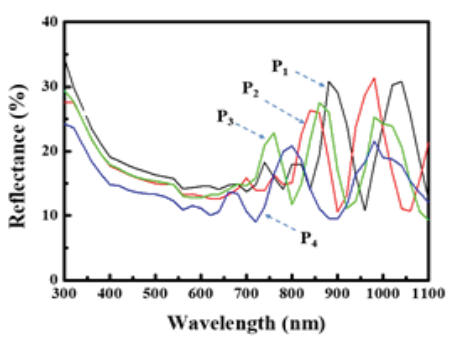

Fig. 10. Reflectivity characteristics of silicon thin film.

스펙트로미터를 사용하여 유리면 위에 증착된 실리콘 박막의 반사 특성을 측정하였다. 측정 결과는 전체 파장 길이인 300 ~ 1100 nm 구간에 대하여 Fig. 10과 같이 나타났으며, 측정 구간에 대한 반사도를 평균하여 계산하였다. P_1에서 P_4로 위치를 변화시킴에 따라 Table 5와 같이 평균 반사도가 감소함을 볼 수 있었다. 이는 타겟으로부터 비산되는 스퍼터 물질의 비산각이 클수록 박막 형성에 필요한 증발 물질의 기판 입사량과 입사 에너지가 작기 때문에 박막 치밀도가 점차 떨어져 나타나는 현상으로 볼 수 있다.

Table 5. Reflectivity depending on the position of the silicon thin film

Position	Average Reflectance (%)
P_1	19.29
P_2	17.79
P_3	17.69
P_4	14.86

4. 결 론

본 연구를 수행함으로써 스퍼터의 타겟 비산각에 따른 증발 물질의 기판 입사 위치가 중심부로부터 멀어짐에 따라 박막 두께와 특성이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

비산각이 커질수록 박막의 밴드갭 에너지가 1.47 eV에서 1.63 eV까지 증가하여 점차 부도체적인 성향으로 바뀌는 것을 확인할 수 있었으며, 이로부터 비삭각이 커질수록 박막 형성을 위한 증발 물질의 입사량과 입사 에너지가 부족하여 나타나는 것으로 볼 수 있었다.

실제 반도체 소자 제조 공정에서 필요한 박막 특성의 열화 범위를 본 연구결과로 제시하지는 못했으나 스퍼터 장치의 비산각에 따른 물질 특성의 차이를 규명함으로써 균일한 박막 특성을 얻기 위해서는 일정 영역의 비산 각도 범위로 한정할 필요가 있음을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 반도체 소자의 특성 향상을 위해 균일한 박막 특성을 확보하기 위한 스퍼터 장비의 최적화 설계 및 적용 필요성을 알 수 있었으며, 단일 물질뿐만 아니라 다원화합물에 대한 양질의 박막 공정을 위한 최적의 스퍼터 장비 설계 룰이 필요함을 인지할 수 있었다.

참고문헌

1. D. Kahng, Electric Field Controlled Semiconductor Device, U. S. Patent No.3, 102, 230, Aug. (1963).

2. Y. Kim, E. Yoo, J. S. Lee, and S. Cho, Bull. Kor. Inst. Electr. Electron. Mater. Eng., 30, 31 (2017).
3. Andrey A. Voevodin, “Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings”, pp. 253~296, ISBN 9780815520313, William Andrew (2010).
4. Yun Seung Lee and Hong Bae Kim, Journal of KSDT, 15, 36 (2016).
5. Patrícia Pereira-Silva,, Augusto Costa-Barbosa, Diogo Costa, Marco S. Rodrigues, Pedro Carvalho, Joel Borges, Filipe Vaz, Paula Sampaio, Thin Solid Films, 687, 137461 (2019).
6. F. V. Grigoriev, V. B. Sulimov, A.V. Tikhonravov, J. Non-Crystalline Solids, 512, 98 (2019).
7. Jae-Hun Jung, Ji-Hoon Yang, Hye-Sun Park, Min-A Song, Jae-In Jeong, J. Kor. Inst. Surf. Eng,, 45, 106 (2012).
8. Hye-Sun Park, Ji-Hoon Yang, Jae-Hun Jung, Min-A Song, Jae-In Jeong, J. Kor. Inst. Surf. Eng., 45, 111 (2012).
9. Yunsung Huh, Yunseok Hwang, and Jeha Kim, Appl. Sci. Converg. Technol., 27, 47 (2018).
10. Yunsung Huh, Yunseok Hwang, and Jeha Kim, Appl. Sci. Converg. Technol., 27, 61 (2018).
11. Yunsung Huh, Yunseok Hwang, and Jeha Kim, Appl. Sci. Converg. Technol., 27, 66 (2018).
12. Krishna Seshan, “Handbook of Thin Film Deposition”, pp. 55~73, ISBN 978-0-12-812311-9, Elsevier Inc., (2018).

접수일: 2020년 9월 6일, 심사일: 2020년 9월 16일,
게재확정일: 2020년 9월 22일