

플라즈마 진단에 의한 PECVD SiO₂ 증착의 불균일성 원인 연구

함용현¹, 권광호¹, 이현우^{2,a}

¹ 고려대학교 제어계측공학과

² 한서대학교 전자컴퓨터통신학부

The Study on the Non-Uniformity of PECVD SiO₂ Deposition by the Plasma Diagnostics

Yong-Hyun Ham¹, Kwang-Ho Kwon, and Hyun Woo Lee^{2,a}

¹ Department of Control and Instrumentation Engineering, Korea University, Sejong 339-700, Korea

² Division of Electronic, Computer, and Communication Engineering, Hanseo University, Seosan 356-706, Korea

(Received November 16, 2010; Revised December 6, 2010; Accepted December 24, 2010)

Abstract: The cause of the thickness non-uniformity in the large area deposition of SiO₂ films by PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) was investigated by the plasma diagnostics. The spatial distribution of the plasma species in the chamber was obtained with DLP(Double Langmuir Probe) and the new-designed probe-type QMS(Quadrupole Mass Spectrometer). From the relationship between the spatial distribution of the plasma species and the depositing rate of the SiO₂ films, it was conformed that the non-uniform deposition of SiO₂ films was related with the spatial distribution of the oxygen radical density and electron temperature.

Keywords: PECVD, non-uniformity, deposition, SiO₂, QMS, DLP.

1. 서론

플라즈마를 이용한 식각 및 박막 형성 기술은 여러 산업분야의 기반이 되는 기술로써 전자 및 광학소자 등등 다양한 분야에 있어 파급효과가 큰 핵심 기술이라 할 수 있겠다 [1-3].

특히 PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition)를 이용한 박막의 증착 기술은 낮은 온도에서 박막을 형성할 수 있다는 장점으로 인해 반도체 및 디스플레이 소자의 제조 공정에서 많이 사용되고 있다. 그러나 디스플레이 제조 공정의 대면적 박막 형성에 있어서 박막의 불균일한 증착이 원인이 되어

소자 특성이 불균일하게 되어 생산성이 악화되는 것으로 알려져 있어 균일하게 증착된 박막을 얻기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다 [4-8].

일반적으로 박막의 불균일 증착은 장비의 장시간 사용 후에 따른 증착 챔버의 노후화에 따라 더욱 심하게 나타나게 되는 것으로 알려져 있다. 장비가 노후화되면 챔버 변형이 발생하며, 이러한 변형의 요인은 PECVD를 이용한 박막 증착시 박막의 질을 향상시키기 위해서 하부 기관에 열을 가하는 공정이 원인이 되어 발생하게 된다. 이에 장비를 장시간 사용함에 따라 챔버는 열에 의해 고온과 상온에 반복적으로 노출이 되어 시간이 지날수록 샤워헤드 (showerhead)의 중심부는 아래쪽으로 처지고, 하부 기관 부분의 중심부가 위쪽으로 부풀어 휘게 된다. 그 결과 샤워

a. Corresponding Author; hwlee@hanseo.ac.kr

헤드와 하부 기관의 간격이 중심부에서 좁아지게 되는 현상이 나타나게 되어 박막의 불균일 증착이 발생하는 것으로 추측되어지고 있다. 그러나 이러한 추측을 확실히 규명하기 위한 연구는 부족하다. 이에 본 연구에서는 챔버 변형에 따른 플라즈마 내 활성종들의 공간적 분포를 분석하여, 불균일한 박막 증착의 정확한 원인규명을 하고자 한다. 이에 챔버의 변형에 따라서 본 연구팀에서 새로 고안한 탐사침 (probe) 형태의 QMS (quadrupole mass spectrometer)와 DLP (double langmuir probe)를 이용하여 플라즈마 내의 활성종인 라디칼과 하전입자의 공간적 분포 및 거동을 확인 하였다. 이러한 플라즈마 활성종의 분포를 기초로 하여 불균일한 SiO₂ 증착 메커니즘을 규명하는 연구를 수행하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 SiH₄와 N₂O 가스를 이용하여 PECVD에서 SiO₂ 박막을 증착하였다. SiO₂ 박막은 6인치 Si (100) 기관 위에 증착하였으며, 이때 SiH₄/N₂O의 가스 유량은 각각 5 sccm/90 sccm 이었다. 한편, 플라즈마 형성을 위해 챔버 상부에 13.56 MHz의 RF 전압을 350 W 인가하였으며, 공정압력은 350 mTorr, 그리고 증착 온도는 150°C로 고정시켰다. 이때, 하부 전극과 샤워헤드사이의 간격을 4, 6, 그리고 8 cm로 변화시키면서 SiO₂을 증착 하였다.

플라즈마 내 활성종은 크게 하전입자와 중성입자로 구분할 수 있다. 플라즈마 내 하전입자의 특성을 측정하는 장치로는 DLP가 널리 이용되고 있는데, 프로브 팁에 수집된 하전입자를 통해 I-V curve를 얻어 전자의 밀도 및 온도, 양전하의 밀도, 이온포화전류 등 플라즈마 내 하전입자에 관한 많은 정보를 얻을 수 있다 [9,11]. 한편, QMS는 사중극을 이용하여 원자의 질량을 분석하여 검출할 원자의 질량을 확인할 수 있는 장치로서, 플라즈마 내 중성입자의 화학종을 분석할 수 있는 장치이다 [10].

챔버 내부의 플라즈마 활성종의 불균일은 박막 증착의 균일도에 가장 큰 영향을 미칠 것이다. 이에 활성종의 공간 분포의 해석 없이는 박막의 불균일 증착을 설명할 수 없음은 자명한 사실이다. 이에 본 연구팀에서는 플라즈마 내 중성종의 특성을 추출하기 위하여 새로운 탐사침 형태의 QMS를 고안하였으며, 이의 개략도를 그림 1에 나타내었다. 그림 1을 살펴

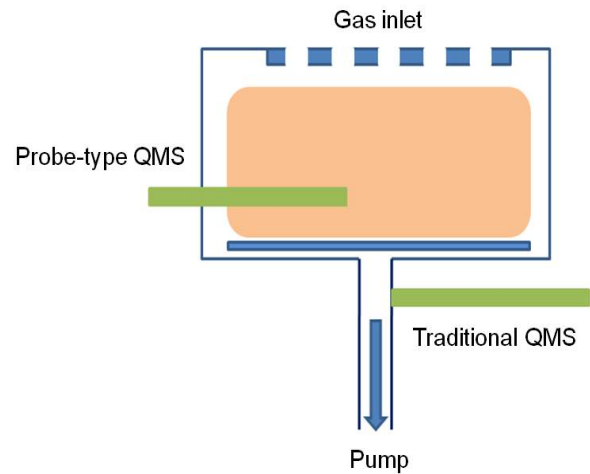


Fig. 1. Schematic of probe-type QMS.

보면 종래의 QMS는 가스의 배기구에 QMS가 연결되어져 진단 장비가 플라즈마에 미치는 영향을 최소화하는 장점이 있으나 챔버내 활성종의 공간적 분포를 해석할 수 없었다. 이에 챔버내 활성종의 공간적 분포를 확인하기 위해 PECVD 챔버 벽에 접속구를 형성하여, HIDDEN사의 HPR-30을 고안한 탐사침 형태 QMS를 챔버의 접속구에 삽입하여 챔버 중심에서 가장자리 방향으로 4 cm씩 탐사침을 이동시키며 활성종의 공간적 분포를 추출하였다.

한편, 하전입자의 공간적 분포를 확인하기 위해 PLASMART사의 DLP2000을 이용하여 QMS와 동일한 위치에서 하전입자의 공간적 분포를 확인하였다. 이때, 탐사침의 위치는 샤워헤드로 부터 2.5 cm 아래쪽에 설치되었으며, 챔버의 변형에 따른 플라즈마 활성종의 거동을 확인하기 위해 지름 30 cm의 금속판을 높이 1.5 cm, 2.5 cm로 제작하여, 위 금속판을 챔버내의 기관 위에 올려놓은 후 챔버 내의 활성종의 거동을 확인하였다.

한편, SiH₄와 N₂O 가스가 모두 사용되는 증착공정의 경우 Langmuir probe tip에 SiO₂박막이 증착되어져 I-V curve를 얻을 수 없어 플라즈마 진단이 곤란하다. 이에 본 실험에서는 N₂O 가스가 전체 기체의 약 95% 이므로, SiH₄와 N₂O 플라즈마 특성은 N₂O 가스만의 플라즈마 특성과 크게 다르지 않을 것이라 판단하여, 본 실험에서는 N₂O 가스만을 사용하여 탐사침형 QMS와 DLP를 이용한 챔버내 활성종의 변화를 관찰하였다.

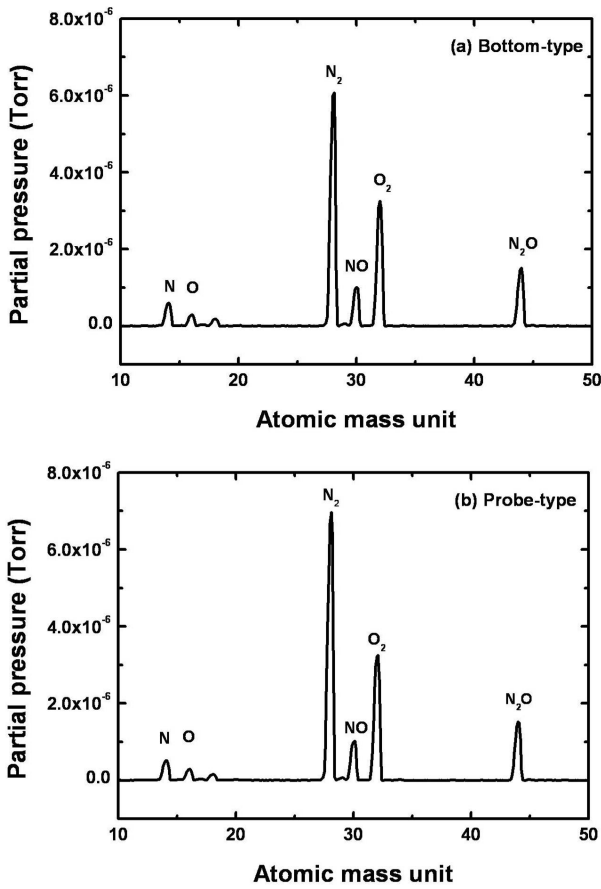


Fig. 2. Comparison of (a) bottom-type QMS with (b) probe-type QMS in N₂O plasma.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 본 연구에서 고안된 탐사침 형태의 QMS의 타당성을 검증하기 위하여 N₂O 가스를 기존 QMS 데이터 추출 방법인 가스 배기구에 연결하여 추출한 가스분압 결과와 본 연구에서 고안되어진 탐사침 형태의 QMS를 이용하여 추출한 가스분압 결과를 비교한 것이다. 위 결과를 비교해 보면 원자량 14, 16, 28, 30, 32, 44에서 각각의 해당 피크인 N, O, N₂, NO, O₂, N₂O가 거의 동일하게 추출됨을 확인할 수 있다. 이는 탐사침형태의 QMS를 사용하여도 플라즈마 내에 존재하는 원소를 정확하게 추출할 수 있음을 말해준다.

그림 3은 샤워헤드와 하부 기판 사이의 간격을 각각 4, 6, 8 cm로 변화시키며 각 간격 마다 기판 중심

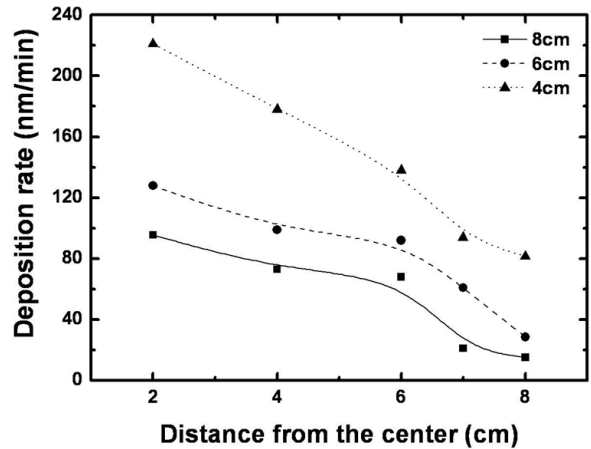


Fig. 3. Variation of SiO₂ deposition rate as a function of electrode distance.

에서의 거리에 따른 PECVD에서 증착한 SiO₂의 증착 속도의 결과이다. 위 그림을 살펴보면, 샤워헤드와 하부 기판 사이의 간격과 기판 위치의 변화에 따라 박막의 증착속도가 변화함을 알 수 있다. 샤워헤드와 하부 기판의 간격이 8 cm인 경우는 간격이 4 cm의 경우에 비해, 상대적으로 낮은 증착 속도를 보인다. 한편, 증착된 박막의 균일도를 나타내는 식은 아래와 같다 [12]. 이때, T는 증착 두께를 나타낸다.

$$\left(\frac{T_{MAX} - T_{MIN}}{2} \right) \times \frac{1}{T_{AVR}} \times 100 = Uniformity(\%)$$

수치값이 낮을수록 증착 균일도가 뛰어남을 의미하는데, 샤워헤드와 하부 기판의 간격이 8 cm인 경우 챔버의 중심부를 기준으로 증착 균일도를 아래의 수식으로 계산한 결과 챔버 가장자리에서 약 92%의 증착 균일도를 가지는데, 이는 약 146%의 증착 균일도를 가지는 4 cm의 샤워헤드와 하부 기판 간격에 비해 상대적으로 균일함을 보이고 있다.

이에 샤워헤드와 하부 기판 간격이 감소함에 따라 박막 증착 불균일도가 더욱 심해지는 것을 알 수 있다. 또한, 샤워헤드와 하부 기판 간격이 감소함에 따라 챔버의 가장자리 보다 중심부에서 증착속도의 증가량이 더 커짐을 확인할 수 있다.

한편, SiH₄/N₂O 가스를 이용하여 SiO₂ 박막을 형성할 때 주요 흡착 반응 활성종은 H₂SiO로 알려져 있다 [13-15]. 이는 다음 반응식 중에서 (d)와 같은

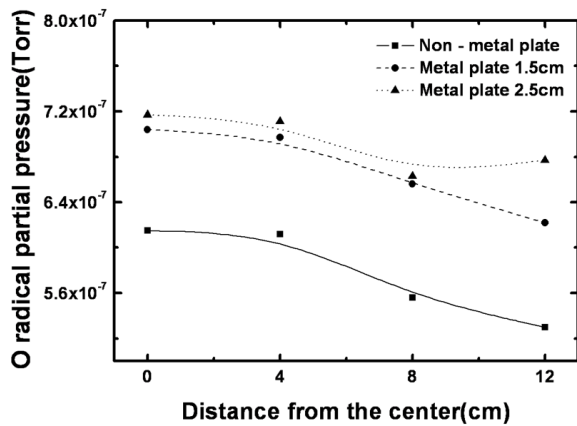
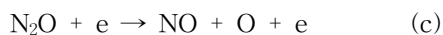
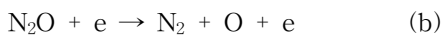
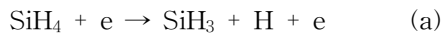


Fig. 4. Spatial distribution of O radical as a function of metal plate and chamber position.

반응으로 형성되는데, 이러한 낮은 휘발성을 갖는 화합물이 기판 표면에 흡착되고, O와 OH 라디칼의 반응을 통하여 SiO₂가 형성된다 [13-15]. 이때, 반응식 (d)의 반응종인 O와 SiH₃는 (a)- (c)와 같은 전자 충돌 분해 (electron impact dissociation) 반응에 의해 형성되어 진다 [15].



이에 따라 SiO₂의 증착 속도와 균일도는 O와 SiH₃의 공간적 밀도 분포에 밀접한 관계가 있을 것으로 판단된다. 따라서 N₂O 가스만의 플라즈마에서 O 라디칼의 공간 분포 변화를 탐사침형 QMS를 이용하여 추출하여, 이를 그림 4에 나타내었다.

그림 4는 높이가 다른 금속판을 챔버내 기판위에 얹어 샤워헤드와 하부 기판 사이의 간격의 변화를 만든 후 이에 따른 O 라디칼의 분포를 측정 한 것이다. 그림을 살펴보면 1.5, 2.5 cm의 금속판을 기판위에 얹어 샤워헤드와 하부 기판의 간격이 점차 좁아질수록 O 라디칼의 밀도가 증가함을 보여준다.

또한, 챔버의 중심부에서 가장 자리 쪽으로 멀어질수록 O 라디칼의 밀도가 감소함을 확인할 수 있는데, 이를 그림 3과 비교해보면 SiO₂ 증착 속도의 변화와 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

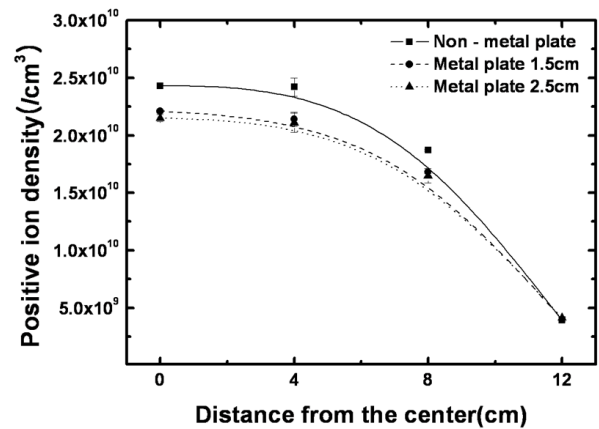


Fig. 5. Spatial distribution of positive ion density as a function of metal plate and chamber position.

이들 산소 라디칼 및 이온은 근본적으로 N₂O 가스의 분해에 의해 형성된다. 따라서 전극 간격이 좁아질수록 N₂O의 가스 분해가 더 많이 일어나고, 이에 따라 SiO₂ 형성에 결정적인 역할을 수행하는 산소 라디칼의 농도가 증가 되는 것으로 판단된다.

본 실험에서 전극 간격 변화를 위해 금속판을 삽입하였기에 PECVD 챔버 내부 체적이 감소되어졌다. 일정한 RF 전력이 인가되고 있으므로 단위 체적 당 전력 밀도가 증가하였다. 일반적으로 단위 체적에 인가되는 전력밀도가 증가하면, 플라즈마 온도가 증가하고 이에 따라 산소 라디칼 농도가 증가하는 것으로 추론된다.

그림 5는 PECVD 챔버 내부에 형성되는 N₂O 플라즈마내의 양이온의 밀도를 DLP를 이용해 추출한 데이터이다. 위 그림을 살펴보면 챔버의 중앙에서 양이온의 밀도가 챔버의 가장자리에 비해 높게 나타났다. 한편, 1.5, 2.5 cm의 금속판이 얹어 짐에 따라 샤워헤드와 하부 기판 간격이 좁아지게 되는데, 이에 따라 양이온의 밀도는 조금 낮아지고 있다. 금속 표면에 이온이 충돌하면 이온의 중성화가 발생한다는 것은 잘 알려진 사실이다 [17]. 간격이 좁아질수록 양이온의 금속 표면과의 충돌 더 빈번히 발생하고, 충돌에 의한 중성화가 더 많이 발생하여 양이온의 밀도가 감소한 것으로 이를 설명할 수 있다. 따라서 그림 3과 비교해보면, SiO₂ 증착에 주 활성종이 하전입자가 아닌 O 라디칼이며 간격이 감소할 수록 산소 라디칼의 밀도가 증가함을 알 수 있다.

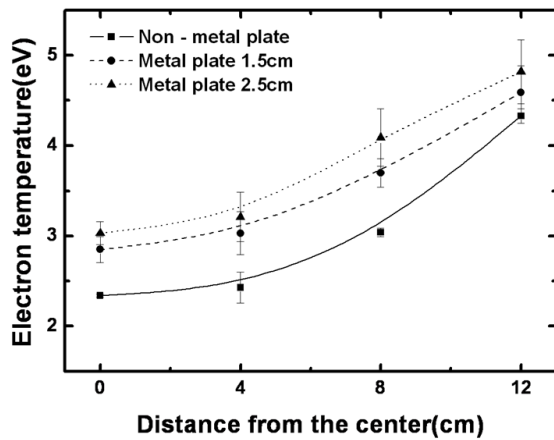


Fig. 6. Spatial distribution of electron temperature as a function of metal plate and chamber position.

위의 논의를 확인하기 위하여 DLP로 플라즈마 내 전자 온도를 측정하였다. 그림 6은 샤워헤드와 하부 기관의 간격과 금속판 삽입에 의한 전극 간격 변화에 따른 N_2O 플라즈마 내의 전자온도를 나타낸 그림이다. 위 그림을 살펴보면 1.5, 2.5 cm의 금속판이 없어짐에 따라 샤워헤드와 하부 기관 간격이 좁아지게 되는데 이에 따라 전자온도가 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 위에서 언급한 바, 단위 체적 당 전력 밀도가 증가하여 플라즈마 온도가 증가하고 또한 전자의 온도가 증가한 것으로 판단된다. 이러한 전자온도의 증가는 전자 충돌 분해 반응율이 커지고 따라서 H_2SiO 생성률이 커지게 된다. 이에 그림 3의 SiO_2 의 증착속도 변화와 그림 6의 전자온도의 변화를 비교해보면 전자의 온도의 증가에 따른 전자 충돌 반응률의 증가가 SiO_2 증착속도 변화와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 즉 플라즈마 내의 전자의 온도가 높을수록 SiO_2 증착 속도가 높음을 알 수 있다.

한편, 챔버의 가장자리 쪽으로 갈수록 전자온도가 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 챔버의 중심부에 비해 O 라디칼과 이온들의 밀도가 상대적으로 현저히 낮기에 전자의 평균이동행로가 길어져 전자의 온도가 증가하게 된 것으로 판단되나 정확한 해석을 하기 위해서는 더 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이에 챔버의 가장자리는 전자온도가 상대적으로 높더라도 반응에 기인하는 활성종의 밀도가 현저히 낮기에 증착속도가 증가하지 않은 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 플라즈마 진단에 의한 대면적 PECVD SiO_2 박막의 불균일 증착 원인을 분석하였다. 샤워헤드와 하부 기관의 간격이 증가할수록 증착 속도는 감소하며, 균일도가 좋아짐을 알 수 있다. N_2O 플라즈마 내의 하전입자와 라디칼의 공간적 분포를 각각 DLP와 탐사침형 QMS를 이용하여 전극의 간격과 기관 중심에서의 거리에 따른 변화를 확인하였다. 전극의 간격이 좁아질수록 O 라디칼의 밀도와 전자온도가 커지게 되어 SiO_2 의 증착속도가 증가함을 확인하였다. 또한, 기관 중심부에서 가장자리 쪽으로 멀어질수록 O 라디칼의 밀도가 감소함을 확인하였다. 따라서 SiO_2 박막의 불균일 증착은 O 라디칼의 밀도와 전자의 온도의 불균일함이 원인이라고 판단할 수 있다.

이러한 결과를 토대로 PECVD 챔버 설계시 샤워헤드와 기관의 온도 변화에 따른 챔버 내부의 변형률이 계산되어진다면 장비의 수명을 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 증착 불균일 문제를 해결하는데 있어서 증착 불균일 문제를 야기시키는 플라즈마 활성종을 정확하게 추적함으로써 박막의 불균일 문제를 해결하는 대안이 되리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부, 산업기술연구회의 협동연구 사업 일환인 "3D Printed 전자소자기반 그린 스마트 카드 Platform 기술" 사업의 지원에 의한 것입니다.

REFERENCES

- [1] A. Lugstein, B. Basner, W. Brezna, M. Weil, S. Golka and E. Bertagnolli, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **242**, 93 (2006).
- [2] Y. Mo, Y. Wang and M. Bai, *Physica E* **41**, 146 (2008).
- [3] M. Zaborowski and P. Grabiec, *Microelectronic Engineering* **85**, 1257 (2008).
- [4] H. Shirai, Y. Sakuma, K. Yoshino and H. Ueyama, *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, L782 (2000).
- [5] S. Fu, J. Chen, X. Wu, N. Wang, M. Zhang and S. Hu, *Plasma Science & Technology* **8**, 300 (2006).

- [6] K. Takechi, M. Nakata, T. Eguchi, S. Otsuki, H. Yamaguchi, and S. Kaneko, *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, 7122 (2008).
- [7] J. Forster and W. Holber, *J. vac. Technol. A* **7**, 899 (1989).
- [8] S. J. Jeong and S. G. Oh, *New Physics (Korea Physical Society)* **33**, 56 (1993).
- [9] A. Schwabedissen, E. C. Benck, and J. R. Roberts, *Phys. Rev. E* **55**, 3450 (1997).
- [10] Y. H. Ham, D. A. Shutov, K. H. Baek, L. M. Do, K. Kim, C. W. Lee and K. H. Kwon, *Thin Solid Films* **518**, 6378 (2010).
- [11] Y. H. Ham, A. Efremov, S. J. Yun, J. K. Kim, N. K. Min and K. H. Kwon, *Thin Solid Films* **517**, 4242 (2009).
- [12] S. H. Cho, Y. Y. Choi and D. J. Choi, *J. Kor. Ceram. Soc.* **47**, 262 (2010).
- [13] M. J. Kushner, *J. Appl. Phys.* **74**, 6538 (1993).
- [14] K. Radouane, L. Date, M. Yousfi, B. Despax and H. Caquineau, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **33**, 1332 (2000).
- [15] E. Meeks, R. S. Larson, P. Ho, C. Applett, S. M. Han, E. Edelberg and E. S. Aydil, *J. Vac. Sci. Technol. A* **16**, 544 (1998).
- [16] L. Date, K. Radouane, B. Despax, M. Yousfi, H. Caquineau and A. Hennad, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **32**, 1478 (1999).
- [17] J. C. Tully, *Phys. Rev. B* **16**, 4324 (1977).