

## 반응성 스퍼터링에 의한 AlN 박막의 증착 및 특성

논문  
12-8-2

### Deposition and Characteristics of AlN Thin Films by Reactive Sputtering

김형택\*, 황지현\*\*, 정황희\*\*, 최성율\*\*, 박인호\*\*, 권명희\*\*

(Hyung-Taek Kim\*, Ji-Hyun Hwang\*\*, Hwang-Hee Jung\*\*, Sung-Eul Choi\*\*, In-Ho Park\*\*, Myeung-Hoi Kwon\*\*)

#### Abstract

C-axis oriented AlN thin films on SiO<sub>2</sub>/Si(100) were prepared by reactive rf magnetron sputtering in argon and nitrogen atmosphere. We investigated the dependence of some properties of AlN thin film such as crystallization-orientation, crystallinity, microstructures and chemical compositions, on sputtering conditions. It was found that c-axis preferred orientation tended to be improved gradually with decreasing N<sub>2</sub> concentration. The crystallinity and microstructure were also strongly dependent upon rf power and sputtering pressure. The optimal degree of film properties was obtained with sputtering pressure at 6 mTorr, rf power of 300 W, and N<sub>2</sub> concentration at 20 % without substrate heating. The FWHM of the rocking curve for a (002) plane of hexagonal AlN was about 0.28~2.2°. The SEM morphology showed a highly aligned columnar structure and a densely pebble-like surface texture of c-axis oriented AlN thin film. The observed root mean square(rms) roughness of 10~32 Å by AFM was a suitable value to the application of acoustic wave devices.

**Key Words(중요용어)** : AlN film(AlN 박막), c-axis preferred oriented growth(c-축 우선방위성장), reactive sputtering(반응성 스퍼터링), sputtering variables(증착변수), N<sub>2</sub> concentration(질소농도), acoustic wave device(탄성파소자)

#### 1. 서 론

질화 알루미늄(AlN)은 알루미늄과 질소원자가 공유결합을 한 육방정계 Wurtzite 결정구조의 화합물 반도체로, III-A족 질화물반도체 중 가장 큰 에너지갭(6.2 eV)과 높은 열전도도 및 전기절연성, 낮은 열팽창계수와 높은 탄성중파 전달속도( $6 \times 10^3$  m/s)의 특성을 가지고 있다<sup>1-4</sup>. 또한 c-축 결정면의 압전성이 크며 광투과성이 우수하여 광전소자, 탄성파소자 및 내환경소자 재료로 주목을 받고 있다<sup>5,6</sup>. 특히 탄성파(acoustic wave)소자에 대한 AlN 박막응용은 c-축 우선방위성장의 결정성과 낮은 표면거칠기 박막 특성의 성막기술이 요구된다. 탄성파소자 응용을 위

한 AlN 박막제조는 화학기상증착(CVD), 분자빔에 피성장(MBE), 반응성 열증착(reactive evaporation) 및 이온플레이팅(ion plating)등이 보고되고 있다<sup>7-9</sup>. 그러나 화학기상증착은 공정상 고온의 기판 온도(>1000 °C)가 요구되며 높은 결정성장률로 응용 기판의 손상과 박막 표면거칠기 개선의 문제가 있다<sup>10</sup>. 또한, 열증착, 분자빔성장 및 이온플레이팅의 경우는 증착환경 제어의 어려움이 알려지고 있다<sup>11</sup>. Al 타겟을 사용하고 반응성가스로 아르곤과 질소 혼합가스를 사용하는 고주파 마그네트론(rf magnetron) 스퍼터링(sputtering)은 높은 증착율과 증착변수 제어가 용이하며 저온기판에 대한 균일한 박막특성의 대면적, 재현성 증착이 가능하다. 기존의 탄성파소자 응용은 주로 TV, VCR등의 저주파대역 필터에 주로 한정되었으나, 최근에는 정보통신분야의 발전으로 고주파대역 표면 혹은 체적탄성파(BAW) 공진기 응용이 요구되고 있다. AlN박막의 고주파필터 응용은 박막 결정배향성에 따른 삽입손실, 불균일한 박막특성에 기인된 탄성파 진행속도차에 의한 주파수변형등과 같은 문제점 해결이 요구되며 이는 우

\* : 인천대학교 공과대학 재료공학과

\*\* : 인천대학교 자연과학대학 물리학과

(인천광역시 남구 도화동 177번지 (402-749),

E-mail : kim95118@lion.inchon.ac.kr)

1999년 3월 2일 접수, 1999년 7월 12일 심사완료

수한 c-축 우선방위 결정성 및 낮은 표면거칠기, 균일한 박막특성이 만족되는 AlN 성장기술을 요구한다. 따라서 본 연구에서는 AlN 박막의 BAW 고주파 공진기 및 필터 응용을 위해 AlN 박막의 결정성, 미세구조 및 화학적결합 특성 등에 대한 반응성 고주파 마그네트론 스퍼터링의 고주파출력, 질소농도, 증착압력 및 기판온도 등의 증착변수 영향을 조사하여 AlN 스퍼터링 성장에 대한 최적환경을 고찰하였다.

## 2. 실험

본 실험에 사용된 고주파 스퍼터링 장치는 3인치 디스크형 타겟의 상향 스퍼터링 방식이며 99.99 % 순도의 Al 타겟과 반도체공정용 99.999 % 아르곤 및 질소 방전가스에 의한 반응성 스퍼터링으로 AlN 박막이 제작되었다. 기판은 열산화로 2500 Å의 실리콘산화막(SiO<sub>2</sub>)이 성장된 8인치 p형-(100) 실리콘 웨이퍼(비저항: 4~6 Ω·cm)가 사용되었다. 기판은 TCE, 아세톤, 알코올, 증류수로 각각 10분 동안 4단계 초음파세척과 질소가스로 송풍 건조한 후 오븐에서 100 °C로 약 30분간 완전건조 되었다.

Al 타겟표면의 산화/질화막 및 불순물제거를 위한 예비스퍼터링(pre-sputtering)은 진공도가 2×10<sup>-4</sup> Torr 이하로 배기된 후 아르곤가스 주입에 의한 1~4×10<sup>-4</sup> Torr범위에서 진행되었고, 질소가스 주입 반응성스퍼터링 환경에 대한 예비스퍼터링은 플라즈마 안정화상태까지 스퍼터링 변수환경에 따라 30분에서 1시간 실시되었다. 증착시 기판온도는 할로젠램프에 의한 300 °C 및 램프 가열없이 플라즈마 자체 발생열에 의한 100 °C 조건에서 고주파출력, 증착압력 및 질소농도의 변수환경으로 박막시료가 제작되었으며 스퍼터링 증착조건은 표 1과 같다. 또한 스퍼터링 시기판위치에 따른 두께 불균일성을 최소화하기 위해 기판지지대는 분당 1회전되었다.

각각의 스퍼터링 조건으로 제작된 AlN 박막시료들의 두께는 표면단차측정기(Tencor profilometer)에 의한 물리적측정 및 주사전자현미경(SEM)의 단면 미세구조로 확인되었다. 또한, X-선 회절장치(Rikagu, Cu- $\alpha$ : 1.541 Å)로  $\theta/2\theta$  스캔 회절상 및 우선성장 결정면의 rocking curve를 측정하여 박막의 결정성 및 배향성을 조사하였고, 표면/단면 미세구조 및 평활도, 거칠기특성에 대한 스퍼터링 증착변수 영향을 주사전자현미경 및 원자력간현미경(AFM)으로 관찰하였다. 박막표면의 Al-N 화학적 결합상태는 X-선 광전자분광기(XPS) 및 적외선분광(IR)으로 분석되었다.

표 1. AlN 박막의 스퍼터링 조건

Table 1. Sputtering conditions of AlN thin films

## 3. 결과 및 고찰

그림 1은 AlN 박막의 결정성에 대한 질소(N<sub>2</sub>)농도 영향을 조사하기 위해 고주파출력 및 스퍼터링압력을 각 300 W, 6 mTorr로 하고 기판가열 없이 질소분압을 20~70 %로 변화시킨 박막의 X-선 회절패턴을 보여주고 있다. 질소농도는 아르곤과 질소의 총유량을 20 sccm으로 고정하고 각 혼합가스의 유량비로 조절되었다. AlN 박막의 결정배향성은 질소농도가 감소함에 따라 자유방위성에서 (002) 결정면 우선방위성으로 나타나고 있다. AlN (100), (110)면의 자유방위성장이 70 % 질소농도 박막에서 관찰되고 있으며 기판에 수직인 c-축 (002) 결정면 우선방위성장은 60 %에서부터 농도감소에 따라 그 회절강도가 증대하고 있다. 약간의 AlN (200)면 회절피크가 관찰되고 있으나 (002) 결정면 우선배향성의 AlN 성장특성을 보여주고 있다. 20 % 이하 질소농도 박막의 우선방위성장 특성은 45 % 시료의 회절패턴과 유사하게 저하되었으며, 이것은 보고된 결과와도 일치하고 있다<sup>12)</sup>. 본 실험에서 AlN 박막의 c-축 우선방위성장에 대한 질소농도의 최적조건은 20 %로 관찰되고 있으며 질소농도 감소에 따른 우선방위성장 특성향상은 낮은 질소농도에 의한 Al 타겟표면의 질화현상 감소에 기인한 것으로 판단된다. 또한 20 % 질소농도 박막에서 관찰된 우선방위 결정면의 최대 회절피크 강도는 박막 결정면내의 격자결함과 결정립계 구조에 의한 미세응력 및 비균질변형의 최소화를 보여주고 있다. 이러한 X-선 회절패턴을 c-축 배열성의 분포정도를 나타내는 rocking curve

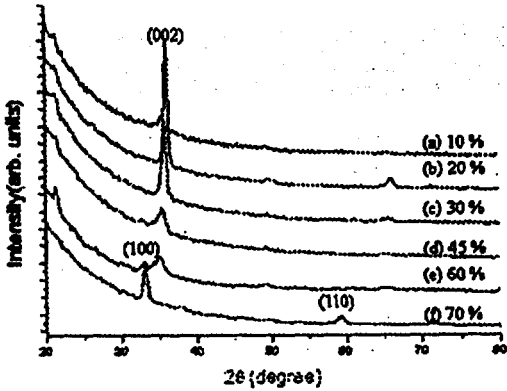


그림 1. 질소(N<sub>2</sub>)농도에 대한 AlN 박막의 X-선 회절 패턴(기판가열 없이 고주파출력 = 300 W, 증착 압력 = 6 mTorr)

Fig. 1. XRD patterns of AlN films deposited under a range of N<sub>2</sub> concentration (rf power = 300 W, sputtering pressure = 6 mTorr without substrate heating)

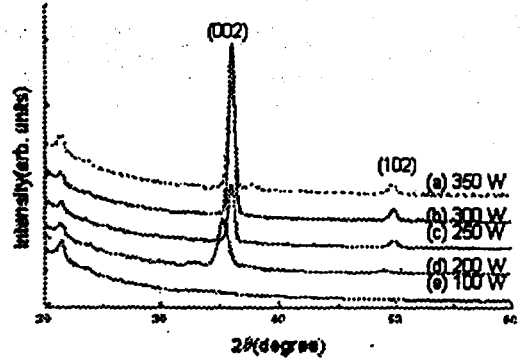


그림 3. 고주파출력에 대한 AlN 박막의 X-선 회절 패턴(기판가열 없이 질소(N<sub>2</sub>)농도 = 20 %, 증착 압력 = 6 mTorr)

Fig. 3. XRD patterns of AlN films deposited at various rf power (N<sub>2</sub> concentration = 20 %, sputtering pressure = 6 mTorr without substrate heating)

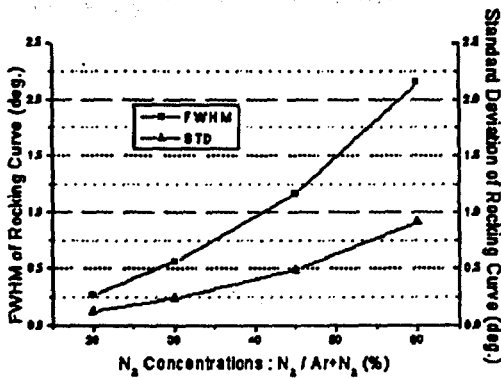


그림 2. 질소(N<sub>2</sub>)농도에 대한 AlN 박막의 (002) 우선방위 결정면 rocking curve의 반치폭과 표준편차(기판가열 없이 고주파출력 = 300 W, 증착 압력 = 6 mTorr)

Fig. 2. Dependence of c-axis orientation : FWHM and standard deviation of XRC at various N<sub>2</sub> concentration (RF power = 300 W, sputtering pressure = 6 mTorr without substrate heating)

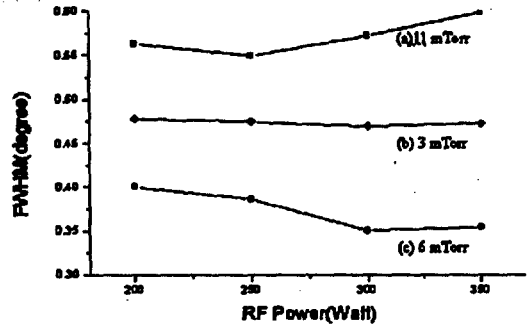


그림 4. 증착 압력 및 고주파출력에 대한 X-선 회절 우선방위성상 (002) 결정면의 반치폭의 변화(기판가열 없이 질소(N<sub>2</sub>)농도 = 20 %)

Fig. 4. Dependence of FWHM of XRD (002) plane on sputtering pressure and rf power (N<sub>2</sub> concentration = 20 % without substrate heating)

분석결과와 비교하여 박막의 우선방위성상 특성을 확인하였다. 그림 2는 질소농도에 대한 AlN 박막의 (002) 우선방위 결정면 rocking curve의 반치폭

(FWHM)과 표준편차 변화를 나타내고 있다. 우선 방위 배열성도 질소농도 감소에 따른 향상이 관찰되고 있으며 표준편차는 약  $0.9^\circ$  에서  $0.2^\circ$  범위로 매우 우수한 c-축 배향성을 보여주고 있다. 이는 X-선 회절결과와 같은 경향성을 나타내는 것으로 향후 판성 파소자 응용에 매우 좋은 표준편차 범위로 사료된다. 또한 질소농도에 대한 반치폭의 변화폭은 표준편차보다 크며 20 % 박막시료의 약  $0.28^\circ$  반치폭은 보고된 결과보다 더 우수한 것으로 나타나고 있다<sup>12)</sup>.

그림 3은 고주파출력에 대한 AlN 박막의 X선 회절 패턴을 보여주고 있다. 분석박막은 기판가열 없이 질소농도 20 %, 스퍼터링 압력은 6 mTorr로 유지시키면서 100 W~350 W의 고주파출력으로 증착되었다. 고주파출력 100 W 박막에서는 거의 비정질상이 관찰되었으나 고주파 인가전력의 상대적 증가에 따라 (002) 면 우선방위성장이 나타나고 있다. 이는 고주파출력에 따른 스퍼터링 입자량의 증가 및 활성화에너지의 점진적 공급으로 기판 흡착이동도가 증가되어 표면 자유에너지가 가장 낮은 최밀충진면인 (002) 결정면으로 우선방위성장이 이루어진 것으로 판단된다. 고주파 인가전력 300 W에서 (002) 우선방위 결정면의 회절강도는

매우 증가하였으며 이는 고주파출력에 따른 충분한 활성화에너지가 AlN 및 Al 입자들의 치밀한 화학양론적 성장구조 형성에 기여한 것으로 사료된다. 따라서 AlN박막의 c-축 우선방위성장에 대한 질소농도 의존성뿐만 아니라 고주파출력 영향이 확인되었다. 그림 4는 스퍼터링 증착압력 및 고주파출력에 대한 X-선 회절 우선방위 (002) 결정면의 반치폭 변화를 나타내고 있다. 증착압력에 대한 우선방위 결정성 변화가 고주파출력 증가에 따라 크게 관찰되고 있다. 또한 3 mTorr에서는 고주파출력에 대한 우선방위 결정성 변화가 미비하나 6 mTorr 및 11 mTorr에서는 고주파출력 의존성이 나타나고 있다. 3 mTorr와 6 mTorr에서 고주파출력 증가에 따른 우선방위성장 특성 향상은 X-선 회절결과와 같은 경향성을 보여주고 있다. 그러나 11 mTorr의 경우 고주파출력 250 W 이상에서 관찰되고 있는 반치폭의 증가는 우선방위성장보다 자유방위성장이 현저해짐을 의미한다. 이는 높은 증착압력 환경의 빠른 핵생성 및 성장물로 인한 자유방위 조대 결정립 성장특성에 기인되는 것으로 판단된다. 증착압력 6 mTorr에서 관찰된 약  $0.35^\circ$  최적 회절상 반치폭은 우수한 우선방위 결정성을 보여주고 있다. 그림 5는 SEM으로 관찰된

(a) 20 %

(b) 45 %

(c) 70 %

그림 5. 질소( $N_2$ )농도에 대한 AlN 박막의 SEM 표면 및 단면 미세구조(기판가열 없이 고주파 출력 = 300 W, 증착압력 = 6 mTorr)

Fig. 5. Surface morphology and cross-sectional SEM photographs of AlN films deposited at various  $N_2$  concentrations (rf power = 300 W, sputtering pressure = 6 mTorr without substrate heating)

(a) 11 mTorr

(b) 3 mTorr

(c) 6 mTorr

그림 6. 증착압력에 대한 AlN 박막의 SEM 표면 미세구조(기판가열 없이 고주파 출력 = 300 W)

Fig. 6. SEM surface morphology of AlN films deposited under a range of sputtering pressures (rf power = 300 W, N<sub>2</sub> concentration = 20 % without substrate heating)

질소농도에 대한 AlN 박막의 표면 및 단면 미세구조 변화를 보여주고 있다. 질소농도 감소에 따라 표면형상은 불분명한 결정립계의 자유방위성장 구조에서 파도선(wave-like) 모양과 자갈모양(pebble-like)의 명확한 층진결정립계 미세구조로 (002) 결정면의 우선방위성장 특성을 나타내고 있다. 질소농도 70 % 박막의 불균일 결정립계 조직은 AlN (100), (101), (110) 혼합 결정면의 자유방위성장 특성에 기인한 것으로 판단되며 20 % 질소농도의 뚜렷한 자갈형상 결정립 구조는 (002) 결정면의 c-축 우선방위성장을 나타낸다. 단면 구조 또한 질소농도 감소에 따른 기판수직면 배열 주상 정구조로 c-축 우선배향성을 보여주고 있다.

그림 6은 스퍼터링 압력에 따른 AlN 박막의 SEM 표면 미세구조 형상을 나타내고 있다. X-선 회절분석에서 유추된 높은 증착압력(11 mTorr)에 의한 조대결정립 자유방위성장 특성이 SEM 미세조직으로 관찰되고 있다. 또한 6 mTorr에서 관찰된 표면 날알크기 및 결정립계 분포의 균일성, 평탄성 정도는 3 mTorr 에서는 불균일 조대화 및 열화 특성으로 나타나고 있다.

그림 7은 FTIR 투과모드에 의한 스펙트럼을 보여준다. 온도의 변화에 대한 피크의 파수변화는 거의 관찰되지 않으며 피크 폭의 변화는 두께 차이로 인한 다중회절의 영향으로 판단된다. AlN 박막의 주 흡수밴드는 600~760 cm<sup>-1</sup>의 파수에서 스펙트럼이 나타난다고 보고되고 있으며<sup>10</sup> 680 cm<sup>-1</sup>에서 주 피크가 나타나고 있는데, 이 피크는 다결정 AlN 박막 내 Al-N stretching vibration에 의한 것이다. 일반적으로 흡수피크의 폭은 다른 결합 배열의 통계적 분포를 나타내며 피크의 폭이 좁을수록 박막이 구조적으로 잘 배열되어 있음을 나타내므로, 피크의 폭이

좁으면 우선방위성장이 좋은 박막임을 알 수 있다. 온도에 대한 X-선 회절패턴과 AFM 형성 또한 많은 차이를 나타내고 있지 않았다. 그러므로 AlN 박막의 우선방위성장에 대한 온도 변수의 의존성은 미비한 것으로 나타난다.

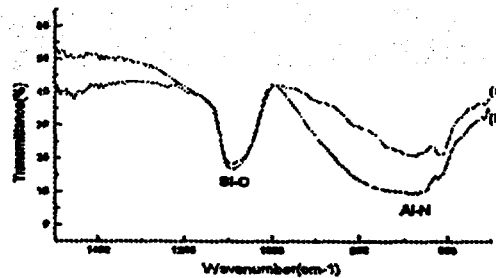


그림 7. 온도에 대한 AlN 박막의 FTIR 스펙트럼 (a) 기판가열 없을 때 (b) 기판온도 = 300 °C(고주파출력 = 300 W, 질소(N<sub>2</sub>)농도 = 20 %, 증착압력 = 6 mTorr)

Fig. 7. Infrared spectra of AlN films deposited (a) without substrate heating (b) with substrate heating at 300°C (rf power = 300 W, N<sub>2</sub> concentration = 20 %, sputtering pressure = 6 mTorr)

그림 8은 질소농도에 대한 AlN 박막의 거칠기(roughness) 특성에 대한 AFM 분석을 나타내고 있다. 70 %의 질소농도에서는 약 32 Å의 평균 거

칠기(root mean square)를 가지고 있으나 질소농도가 감소하면서 향상된 AlN 박막표면을 관찰할 수 있다. 질소농도가 20 %로 감소할수록 평균 거칠기는 거의 10 Å까지 개선되고 20 %이하의 질소농도 감소에 대해서는 45 %의 시료와 유사하게 평균 거칠기가 증대되므로, 질소농도 대한 X-선 회절패턴과 SEM에 의한 미세구조의 관찰 결과와도 잘 일치한다. AlN 박막의 평균 거칠기가 질소농도에 대해 32 ~ 10 Å에서 관찰된 결과들은 이 연구의 목적인 BAW 고주파 공진기 및 필터 응용에 적합한 AlN 박막을 얻었다.

300 W의 고주파출력, 6 mTorr의 증착압력, 20 %의 질소농도에서 기판가열 없이 제작된 AlN 박막 표면의 화학적 결합상태에 대한 XPS 결과가 그림 9에서 보여지고 있다. XPS 분석결과 Al2p, N1s 그리고 O1s의 결합에너지(binding energy)가 각각 77 eV, 400 eV, 535 eV에서 나타내고 있다. O1s의 피크는 박막표면의 산화로 인한 산소흡착의 영향으로 볼 수 있으며 Al2p와 N1s의 결합에너지 변화역시 O1s의 흡착에 의한 것으로 판단된다. 위 결과 AlN 박막은 표면에 흡착된 약간의 산소 외의 불순물이 없는 양호한 화학양론적(stoichiometric) 구조의 균일한 AlN 박막이 제작되었음을 보여준다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 고주파 탄성과 소자 응용을 위한 AlN 박막특성에 고주파 반응성 스퍼터링 증착변수 영향이 조사되었다. 스퍼터링 압력, 고주파출력, 질소농도 및 기판온도 변수에 대한 AlN 박막의 결정화 방위성, 결정성, 미세구조 및 표면 거칠기 특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 기판수직 (002) 결정면의 c-축 우선방위성장 결정화특성은 질소농도의 감소에 따라 향상되어 20 %의 질소농도 환경에서 최적특성을 나타내었다. 따라서 AlN 성막 결정성이 질소농도에 따른 알루미늄 스퍼터링 타겟표면의 질화정도에 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.
2. 관찰된 질소농도에 대한 AlN (002) 우선방위 결정면의 XRC 반치폭(0.28° ~ 2.2°) 및 표준편차는 c-축 우선배향성에 대한 매우 높은 결정립계 분포 균일성과 낮은 격자결함 및 미세용력의 우수한 결정성을 보였다.
3. 고주파 출력의 증가로 c-축 우선 배향성이 향상되었으며 결정성 및 미세구조에 대한 스퍼터링 압력 영향이 확인되었다. 또한 우선방위성장 및 표면

그림 8. 질소농도에 대한 AlN 박막의 AFM 형상 (기판가열 없이 고주파출력 = 300 W, 증착압력 = 6 mTorr)

Fig. 8. AFM images of AlN films deposited under a range of N<sub>2</sub> concentration (rf power = 300 W, sputtering pressure = 6 mTorr without substrate heating)

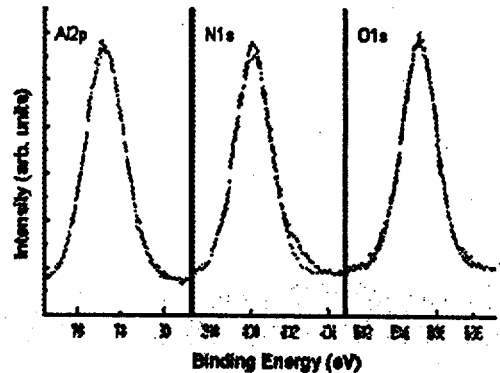


그림 9. AlN 박막의 XPS 스펙트럼(기판가열 없이 고주파출력 = 300 W, 증착 압력 = 6 mTorr, 질소(N<sub>2</sub>)농도 = 20 %)

Fig. 9. XPS spectra of AlN films (rf power = 300 W, sputtering pressure = 6 mTorr, N<sub>2</sub> concentration = 20 % without substrate heating)

거칠기에 대한 기판온도의 영향은 미비한 것으로 관찰되어 낮은 증착 기판온도(약 100 °C) 환경으로 고주파필터 응용에 적합한 AlN 박막특성을 얻을 수 있었다.

4. SEM 형상으로 전형적인 c-축 우선방위성장의 미세구조와 AFM 형상으로 우수한 거칠기 특성을 얻었다. FTIR과 XPS로 화학양론적 구조의 AlN 박막을 얻었다.

본 연구의 최적 스퍼터링 조건은 기판가열 없이 300 W의 고주파출력, 6 mTorr의 증착압력 및 20 %의 질소농도로 얻었다.

### 감사의 글

본 연구는 정보통신연구관리단의 '98년도 대학기초연구 지원사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. Y. Satoh, O. Ikata, T. Matsuda and Y. Fujiwara, T. IEEE Japan 111-C, 1225, 1991.
2. K. M. Lakin, J. Liu and K. Wang, Proceedings of IEEE Ultrasonic System 302, 1986.
3. W. M. Yim and R. J. Paff, J. Appl. Phys. 45, 1456, 1974.
4. Chien-Chuan Cheng, Ying-Chung Chen, Horng-Jwo Wang and Wen-Rong Chen, "Low-temperature growth of aluminum nitride thin films on silicon by reactive radio frequency magnetron sputtering", J. Vac. Sci. Technol. A 14(4), pp. 2238~2242, 1996.
5. Dao-yuan Wang, Yukio Nagahata, Masataka Masuda and Yasunori Hayashi, "Effect of nonstoichiometry upon optical properties of

- radio frequency sputtered Al-N thin films formed at various sputtering pressures", J. Vac. Sci. Technol. A 14(6), pp. 3092~3099, 1996.
6. Tadashi HSIOSEKI, Kazushige HARADA and Akira KAWABATA, "Low-Temperature Growth of Piezoelectric AlN Film and its Optical and Acoustical Properties", Proceedings of Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 21, pp. 69~71, 1982.
7. Y. Chubachi, K. Sato and K. Kojima, Thin Solid Films 122, 259, 1989.
8. F. Hasegawa, T. Takahashi, K. Kubo and Y. nannichi, J. Appl. Phys 26, 1555, 1990.
9. G. Este and W. D. Westwood, J. Voc. Sic. & Technol. A5, 1892, 1987.
10. Yoshihiro SOMENO, Makoto SASAKI and Toshio HIRAI, "Low-Temperature Growth of Polycrystalline AlN Films by Microwave Plasma CVD", Jpn. J. Appl. Phys., Vlo. 29 No. 2, pp. L358~L360, 1990.
11. V. W. Ballarotto and M. E. Kordesch, "Pulsed supersonic molecular beam growth of AlN", J. Vac. Sci. Technol. A 16(3), pp. 1676~1679, 1998.
12. Hiroshi OKANO, Yusuke TAKAHASHI, Toshiharu TANAKA, Kenichi SHIBATA and Shoichi NAKANO, "Preparation of c-Axis Oriented AlN Thin Films by Low-Temperature Reactive Sputtering", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 31 Pt. 1, No. 10, pp. 3446~3451, 1992.
13. Xin Li and T. L. Tansley, "Laser-induced chemical vapor deposition of AlN films", J. Appl. Phys., Vol. 68 No. 10, pp. 5369~5371, 1990.