

고주파 때려내기법에 의한 질화알루미늄 박막의 제작과 특성

RF
10-7-9

Preparation and characterization of AlN Thin Films by RF sputtering method

정성훈*, 김영호*, 문동찬*, 김선태**

(Sung-Hoon Chung, Young-Ho Kim, Dong-Chan Moon, Seon-Tai Kim)

Abstract

AlN(Aluminium Nitride) thin films were prepared using by RF sputtering method on the Si(100) and Si(111) substrates as the parameters of the substrate temperature, RF power, sputtering duration and the N₂/Ar ratio and investigated by X-ray diffraction, IR spectrometry, n&k analyzer. For the Si(100) substrate, the AlN thin films of (101) orientation were obtained under the conditions of room temperature and the nitrogen of 60 vol.%. For the Si(111) substrate, the (002) AlN thin films were obtained under the nitrogen of 100 vol.%. In case of the thin film prepared in the condition of above 60 vol.% of the nitrogen, the average value of the surface roughness of the film was 151Å. From the changes of the half widths of E₁(TO) phonon bands at the wavenumber of 680cm⁻¹, it was compared of the crystallinities of the films which were grown under the different conditions. The thicknesses of AlN films were decreased dramatically in the region of the nitrogen of 40~60 vol.%. It's due to the nitridation of the Al target surface and getting low of the sputtering yield by the N₂/Ar ratio being increased.

Key Words(중요용어) : RF sputtering(고주파 때려내기), AlN(질화알루미늄), FTIR(적외선분광법), Surface roughness(표면평활도), Phonon band(포논띠)

1. 서 론

질화알루미늄은 wurzite 구조를 지닌 III족 질화물 중 실온에서 6.2eV의 에너지 갭을 갖는 반도체이며¹⁾ 고온에서의 안전성, 열전도성, 무독성등의 특성을 지니고 있다. 전기적으로 14kV/mm의 고유전강도와 함께 6×10⁵cm/s의 높은 탄성파속을 갖고 있으므로 탄성 표면파 소자 재료로 응용되고 있다. 탄성 표면파 소자재료로서 사용하기 위해서는 평활도가 높은 표면과 단일 결정방향성을 지닌 박막의 제작이 선행되어야 한다. 질화알루미늄 제작방법으로는 마이크로파 플라즈마화학기상증착법(MPCVD)²⁾, 금속유기화학기상증착법(MOCVD)³⁾, 펄스레이저증착법(PLD)⁴⁾ 방법등이 있으나, 고온이 필요하고 3차원성장

의 불균일한 표면층의 발생등으로 인해 요구되는 박막 제작에 어려움이 있다. 이런 점에서 양질의 박막 제작이 가능한 때려내기 방법이 주목을 받고 있으며 최근에는 이 방법으로 실용화 수준의 질화알루미늄 탄생 표면파 소자가 개발된 바 있다.⁵⁾

본 논문에서는 질화알루미늄을 Si(100) 및 Si(111) 기판위에 단일 결정방향성으로 높은 평활도를 지닌 박막을 제작하기 위하여 기판온도, 고주파 출력, 때려내기 시간, 질소비율 등을 변화시켜 질화알루미늄 박막을 제작한 후 결정의 비화학적 균형과 평활도등을 조사하여 응용 가능성을 알아보았다.

2. 실험 방법

2-1. 박막 제작

본 실험에서는 고주파 때려내기 장치(ANELVA, SPF-210B)를 사용하여 질화알루미늄박막을 제작하였다. 99.99% 순도의 디스크형 Al 타겟(직경:10cm)을 사용하였고 방전가스로서 99.999%의 아르곤 및

* : 광운대학교 공대 전자재료공학과

** : 대전산업대학교 재료공학과

접수일자 : 1997년 3월 7일

심사완료 : 1997년 7월 29일

질소가스를 사용하였다. 기판으로는 Si(100)과 Si(111)을 사용하였다. 아르곤 플라즈마 상태에서 총 압력이 3×10^{-2} Torr가 유지되도록 배기구를 조정 한 후에 때려내기를 행하였다. 박막 형성 전에 기판과 타겟사이에 셔터를 위치시킨 상태에서 2시간 30분동 안 아르곤 가스로 Al 타겟표면을 플라즈마 에칭하여 불순물과 산화막을 제거하였고 이후 1시간 동안 다 시 플라즈마 에칭하여 순수한 알루미늄이 때려내기 되도록 하였으며 박막 제작조건에서 1시간동안 때려 내기한 후 셔터를 개방하여 기판에 질화알루미늄 박 막을 형성하였다.

표 1. 때려내기 조건

Table. 1. sputtering conditions

TARGET	99.99% Al (diameter:10cm)
SUBSTRATE	Si(100), Si(111)
SUBSTRATE TEMPERA- TURE	room temperature ~ 300°C
BASE PRESSURE	6×10^{-7} Torr
TOTAL PRESSURE	3×10^{-2} Torr
RFPOWER/APPLIED	40~140W / 1.1~1.8kV
VOLTAGE	
N ₂ /Ar	0% ~ 100%
TARGET ETCHING	Ar ambient: 2.5 hr (Ar + N ₂) ambient : 1hr
SPUTTERING DURATION	1 ~ 7hr

2-2. 특성 분석

X선 회절법으로 제작된 박막의 방향성과 결정성 을 조사하였고 상온에서 적외선 분광기(Nicolet Magna-IR 550)를 사용하여 포는 모드의 변화로부터 제작된 박막의 결정성 및 비화학적 안정성을 조사하 였다. 190~900nm 영역의 반사도를 연속 측정하여 박막의 굴절률, 소광계수, 두께, 평활도를 Forouhi-Bloomer(F-B) 식⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾ 및 SZCZYRROWSKI 식⁽⁹⁾ 에 의해 결정하는 굴절률 및 소광계수 분석기(n&k Technology, Inc)를 사용하여 조사하였다.

반사도와 투과도 측정에 의해 표면 거칠기를 측정 하는 방법은 반사도 및 투과도가 유전 함수에 의해 관계되므로, 표면 거칠기와 유전 함수의 관계를 고 찰함으로써 광학적 표면 거칠기 결정방법의 유효성 을 알아 볼 수 있다. ζ (불균일 표면에서의 산간격) $\ll \lambda$ (입사광 파장)의 조건을 만족할 때, 입사광은 표

면 거칠기에 크게 의존하지 않는다. 두 매질 경계에 서 x에 대해 $\epsilon(x)$ 의 값이 기울기를 가지므로 Drude approximation을 사용하면,

$$\epsilon^2 = \epsilon_1 + N \alpha_p \tag{1}$$

여기서 N : oscillator의 농도, ϵ_1, ϵ_2 ; 매질 1과2 의 복소 유전 함수

α_p : atomic polarizability

SZCZYRROWSKI 에 의해 제안된 식(1)를 사용하여 $\epsilon(x)$ 와 x의 관계를 구하면,

$$N = f N_0$$

여기서, 매질2의 상대 체적비 :

$$f = \left(\frac{1}{1 + \exp(-x/a)} \right) \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \epsilon(x) &= \epsilon_1 + \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{1 + \exp(-x/a)} \\ &= \epsilon_2 \frac{1 + \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}\right) \exp\left(\frac{-x}{a}\right)}{1 + \exp\left(\frac{-x}{a}\right)} \end{aligned} \tag{3}$$

그런데, $\zeta \ll \lambda$ 의 조건에서는 거칠기 밀도의 영향 이 무시되므로 표면 거칠기 크기와 밀도를 나타내는 변수 a는 평균 표면 거칠기 값만을 대표하게 된다.

그러나, 위와같은 표면 거칠기와 유전함수와의 관 계 정립은 표면 플라즈몬의 여기현상을 배제한 것이 므로 다음식에 의해 이것을 보완하기로 한다. 즉 거 친면에 대한 유전 함수를 각각 x에 의존하는 $f_1 = 1 - f, f_2 = f$ 의 체적비를 갖고 ϵ_1 와 ϵ_2 의 유전 함수 값을 지닌 매질과 함께 나타내면 그에 대한 일반 관 계식은 아래와 같다.

$$\epsilon = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 + \bar{\epsilon} [(1-f)\epsilon_1 + f\epsilon_2]}{\bar{\epsilon} + [(1-f)\epsilon_2 + f\epsilon_1]} \tag{4}$$

여기서, $\bar{\epsilon} = \epsilon_h \frac{1-q}{q}$

ϵ_h : hot dielectric function

q : screening parameter

Bruggeman EMA(effective Medium approximate) model에 의해 위에서 구한 ϵ 값을 사용하여 x에 대 한 $\epsilon(x)$ 의 일반식을 구하면

$$\epsilon(x) = \epsilon_2 \frac{1 + (\epsilon_1/\epsilon_2) \exp(-z/a)}{1 + \exp(-z/a)} \tag{5}$$

여기서 $z = x - a \ln Q$

$$Q: \left(= \frac{\epsilon_2 + \bar{\epsilon}}{\epsilon_1 + \bar{\epsilon}} \right) \text{ (EMA 연속막의 경우)}$$

$$\left(= \frac{\epsilon_2 + 2\epsilon_1}{3\epsilon_1} \right) \text{ (Maxwell 모델의 선형태}$$

막인 경우)

위 관계에서 구한 ϵ 값으로 반사도 R, 굴절률 n,

표면거칠기 a 의 관계식을 다음과 같이 나타낼 수 있으므로 반사율에 의한 거칠기 정도를 알 수 있다.

$$R_r \approx \left(\frac{1-n_2}{1+n_2} \right)^2 \left(1 - \frac{\pi^2}{3} \frac{16\pi^2}{\lambda^2} a^2 n^2 \right) \quad (6)$$

3. 결과 및 논의

3-1. 기판온도에 따른 결정방향의 변화

기판온도에 따른 질화알루미늄 박막의 x선 회절도를 그림 1에 나타내었다. Si(100) 기판의 온도가 상온일때 (101)방향의 질화알루미늄 박막이 형성되었으나, 100°C에서 제작된 박막은 AlN (101) 및 AlN (101)방향의 회절선을 볼 수 있으며 온도가 증가함에 따라 AlN (101)면이 우세하게 나타났으며 기판온도가 증가하게 되면서 재증발과정에 의해 질소원자가 박막에서 이탈하게 되어 증착두께가 작아지므로 회절선의 강도가 낮아지는 현상을 보인다.

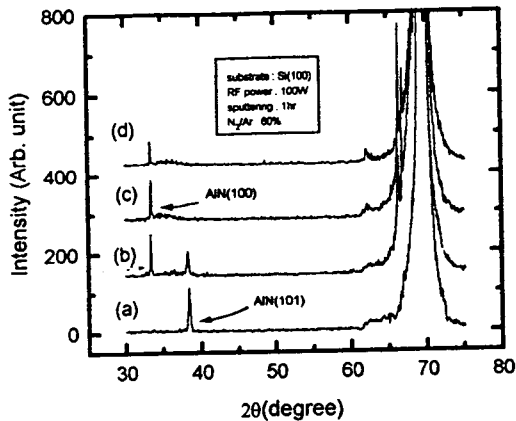


그림 1. 기판온도에 대한 X선 회절도의 변화
(a) 상온 (b) 100°C (c) 200°C (d) 300°C

Fig. 1. Variation of X-ray diffraction pattern on the substrate temperature :
(a) room temperature (b) 100°C
(c) 200°C (d) 300°C

3-2. 고주파 출력에 따른 적외선 분광의 변화

Si(100)위에 제작된 질화알루미늄 박막의 고주파 출력변화에 따른 적외선 분광 특성을 그림 2에 나타내었다. wurtzite 구조의 질화알루미늄에서 관찰한 포논모드는 9개로 알려져 있는데⁴⁾ 667cm⁻¹의 포논모드는 그중 하나로서 질화알루미늄의 경우, 정전력 (electrostatic force)이 원자간의 비등방성에 의한 힘보다 크기 때문에 A₁[LO]-E₁[LO] 또는 A₁[TO]-E₁[TO] 보다 A₁[LO]-A₁[TO] 또는 E₁[LO]-E₁[TO]

의 주파수가 커지게 되어 LO-TO 모드사이의 갈라짐이 A₁-E₁의 갈라짐보다 우세하게 되므로 강한 LO, TO 포논모드를 볼 수 있다.¹⁰⁾ 따라서 그림2와 같이 질화알루미늄 고유의 E₁[TO]분광선을 확인할 수 있고 분광선의 형태에 따라 제작된 박막의 화학양론적인 안정성을 비교할 수 있다.

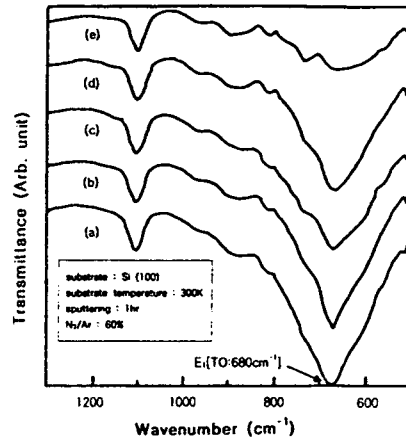


그림 2. 고주파출력에 대한 적외선 분광의 변화
(a) 140W (b) 120W (c) 100W (d) 60W (e) 40W

Fig. 2. Variation of the IR spectrum on the RF power : (a) 140W (b) 120W (c) 100W
(d) 60W (e) 40W

그림 2에서 고주파 특성이 40W인 경우, 질화알루미늄 박막의 고유한 분광특성을 볼 수 없으나, 60W 이상에서 제작된 박막의 경우 E₁[TO] 분광선을 확인할 수 있다. 출력이 증가할수록 분광선이 뚜렷해지는 경향을 보인다. 기판에 질화알루미늄이 형성되는 과정은 알루미늄 음극판의 표면에 형성되어 있는 질화알루미늄에 N⁺이 충돌하여 알루미늄과 질소원자를 때려내고, 떨어져 나온 알루미늄은 N⁺과의 충돌로 발생한 N₂⁺, N⁺과 반응하여 이루어진다. 그런데 알루미늄질화물 박막을 이루고 있는 질소원자의 일부는 입사되어 들어오는 이온에 의해 튀어나가, 박막에 질소가 결핍됨으로써 화학양론적 불균형현상이 생기는데 이는 플라즈마내에 질소이온의 수를 증가시킴에 의해 완화시킬 수 있다. 고주파 출력을 증가시킬 경우, N⁺의 에너지도 비례하여 증가하므로 질소이온화를 용이하게 하여 위의 질소결핍현상을 완화시키는 역할을 한다. 그러므로 형성되는 박막의 알루미늄원자와 질소원자의 비율이 1:1에 근접하게 되어 화학양론적으로 안정된 상태를 이루게 되어 이 조건에서 제작된 박막의 분광선의 폭은 좁아지게 된

다. 120W이상에서는 밴드폭의 변화가 없었으므로 120W의 출력으로 충분한 질소이온이 박막에 공급됨을 알 수 있었다.

3-3. 때려내기 시간에 따른 결정방향의 변화

때려내기 시간에 따른 x선 회절도의 변화를 그림 3에 나타내었다. Si(111)기판에 1시간동안 질화알루미늄 박막을 형성하였을 때, 때려내기 시간이 증가함에 따라 주 회절선의 폭이 감소하였고 2.5시간의 경우 AIN (101)과 함께 AIN(0002)의 회절선이 함께 나타났으나 시간의 증가에 따라 AIN (101)방향이 주회절선으로 나타났다. Si(100)의 경우에는 AIN (101) 과 함께 AIN (101)의 회절선이 나타났는데, 입방정계 구조인 Si(111) 및 Si(100)면의 방향은 육방정계 구조의 AIN(002), AIN (101)면과 각각 결정면방향이 평행을 이루므로 각각의 기판방향에 의해 박막방향이 결정된 것으로 생각된다. 그림 4는 Si(100)위에 제작된 질화알루미늄 박막의 때려내기 시간변화에 따른 적외선 분광 특성을 나타낸 것이다. 1시간 이상 때려내기한 경우, 분광선이 680cm⁻¹에서 800cm⁻¹까지의 대역에 걸쳐 형성된 것을 볼 수 있다. 680cm⁻¹~800cm⁻¹ 대역에서 관찰되는 질화알루미늄의 포논모드 주파수는 A₁[TO:610cm⁻¹], E₁[TO:667cm⁻¹], E₁[LO:825cm⁻¹]으로서,⁴⁾¹¹⁾ 위 분광선은 E₁[LO]에 의한 것으로 생각된다.

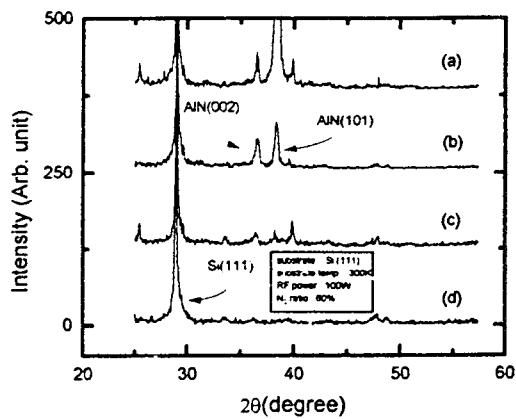


그림 3. 때려내기 시간에 대한 X선 회절도의 변화
 (a) 6hr (b) 2.5hr (c) 1hr (d) 0.5hr
 Fig. 3. Variation of X-ray diffraction pattern on the sputtering duration
 : (a) 6hr (b) 2.5hr (c) 1hr (d) 0.5hr

3-4. 질소비율에 따른 표면의 변화

사진 1에 질소혼합비율에 따라 Si(111)기판위에 제

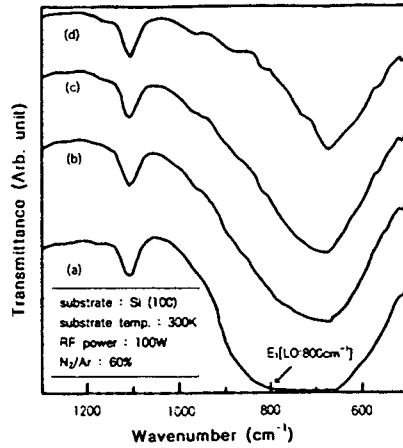


그림 4. 때려내기 시간에 대한 적외선 분광의 변화
 : (a) 4hr (b) 3hr (c) 2hr (d) 1hr
 Fig. 4. Variation of the IR spectrum on the sputtering duration
 : (a) 4hr (b) 3hr (c) 2hr (d) 1hr

작된 질화알루미늄 박막의 표면사진을 나타내었다. 사진 1(a)에 의해 질소비율이 낮을 때는 질소가 거의 포함되지 않은 알루미늄상이 덩어리 형태로 박막상에 형성되는 것을 볼 수 있다. 이 현상은 그림 5(a)에서 알루미늄상의 EDS를 통해 알루미늄 피크만 발생하는 것과 일치한다. 그림 5(b)는 알루미늄상의 중간지점에 대한 EDS 결과로서 알루미늄의 상대비가 매우 큰 비화학적으로 불완전한 질화알루미늄으로 이루어져 있음을 알 수 있다. 한편 질소비율이

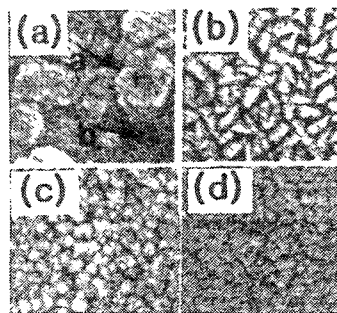


사진 1. 질소비율에 대한 표면의 변화:
 (기판: Si (100), 기판온도: 300K, 고주파 출력: 100W, 때려내기 시간 : 1hr)
 : (a) 20% (b) 40% (c) 80% (d) 100%
 Photo. 1 Variation of the surface morphology on the N₂ ratio (substrate : Si (100), substrate temperature : 300K, RF power : 100W, sputtering : 1hr)
 : (a) 20% (b) 40% (c) 80% (d) 100%

높아짐에 따라 (c)와 (d)와 같이 결합된 질화알루미늄 결정립이 균일하게 분포되어 있는 것을 볼 수 있다.

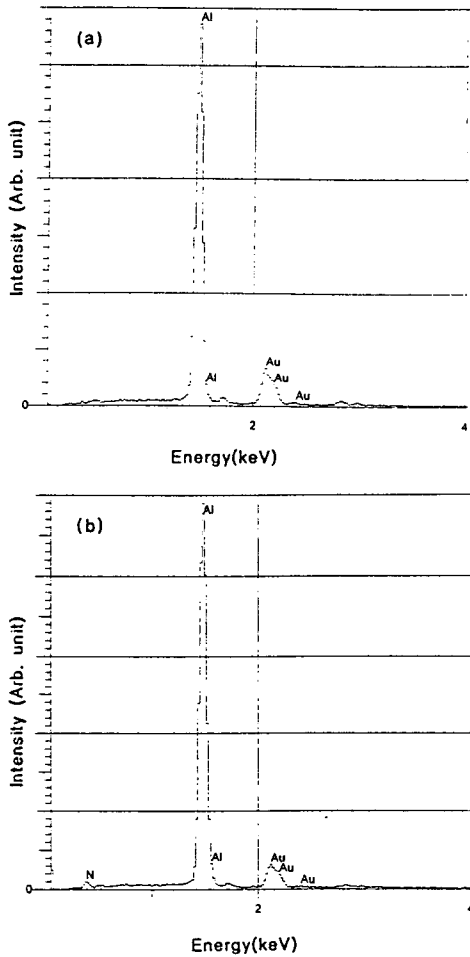


그림 5. 질소비율 20% 시편의 EDS 결과 (기판: Si (100), 기판온도: 300K, 고주파출력: 100W, 때려내기 시간 : 1hr) (a) a 부분 (b) b 부분

Fig. 5. The EDS results of the sample prepared in N₂ 20% (substrate : Si (100), substrate temperature : 300K, RF power : 100W, sputtering duration : 1hr) (a) at the region of a (b) at the region of b

그림 6은 질소비율에 따른 X선 회절도의 변화를 나타낸 것이다. 질소의 혼합비율이 40% 이상에서는 AlN (101)회절선이 나타나지만 질소비율이 증가함

에 따라 (101)방향의 회절강도는 감소하고 (002)방향이 우세하게 나타나는 것에 의해 질소비율이 증가함에 따라 Si(111)위에 형성된 AlN박막의 기판방향에 대한 의존도가 증가함을 알 수 있었다.

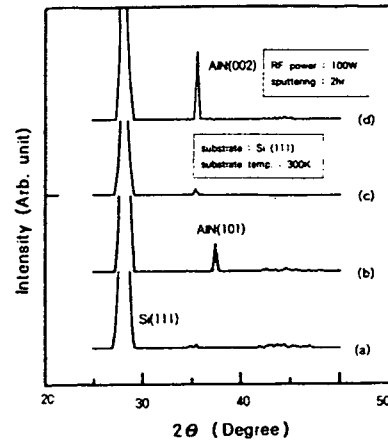


그림 6. 질소비율에 대한 X선 회절도의 변화 (AlN/Si(111)) (a) 20% (b) 40% (c) 80% (d) 100%

Fig. 6. Variation of X-ray diffraction patterns on the N₂ ratio (AlN/Si(111)) : (a) 20% (b) 40% (c) 80% (d) 100%

3-5. 고주파 출력 및 질소비율에 따른 증착율의 변화

질소비율에 따른 증착율의 변화를 그림 7에 나타내었다. 질소가 증가함에 따라 동일시간내에 형성된 박막의 두께는 감소함을 볼 수 있는데, 특히 40%~60% 까지의 영역에서 급격한 감소를 보였다.

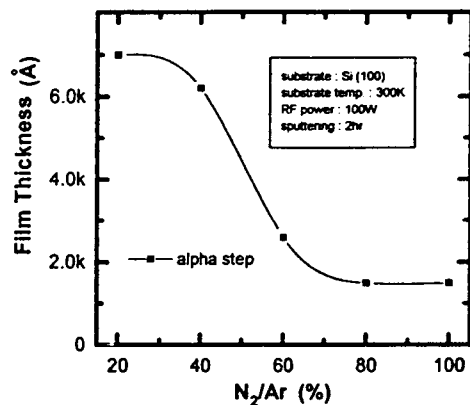


그림 7. 질소비율에 대한 증착율의 변화 Fig. 7. Variation of the deposition rate on the N₂ ratio

질화알루미늄의 형성은 알루미늄 타겟표면에 질화알루미늄이 형성되면서 시작된다.²⁾ 질소비율이 20~40%영역에서는 낮은 질소비율 때문에 질화막층이 타겟에 완전하게 형성되지 못하여 알루미늄입자가 때려내기되므로 기판위에 금속성 박막을 형성하는데 수율이 높은 아르곤의 비율이 높으므로 이때 형성되는 박막의 증착율은 높아진다. 질소비율이 60%이상의 영역에서는 질소비율이 높아지면서 상대적으로 짧은 시간에 타겟에 완전한 질화막층을 형성하게 되므로 기판위에 질화알루미늄 박막이 형성되며 수율이 낮은 질소에 의한 때려내기가 지배적이므로 증착율은 감소한다. 또한 질소비율이 60%이상에서 때려내기 시간을 변화시켜 제작된 시편의 평균평활도는 151Å이었다. 즉, 때려내기 시간을 1~5시간까지 변화시켰을 때 rms 평활값은 19~203Å의 변화를 보였는데 이같은 현상은 때려내기 시간이 증가함에 따른 결정립 크기의 증가 및 columnar 성장에 기인하는 것으로 사료된다. 한편 질소비율의 증가에 따라 표면의 평활도가 높아지는 경향을 보였는데 이것은 Si(111)을 기판으로 했을 때 뚜렷하게 나타나므로 x선 회절도에서 확인한 박막의 (002) 결정방향과 관계가 있음을 알 수 있었다. 즉, 기판과 평행한 방향으로의 결정립의 형성이 박막의 평활도를 높이는데 기여함을 의미한다. 이와 같이 제작된 질화알루미늄막을 탄성표면과 소자와 소자보호막에 적용하기 위해서는 수 마이크로미터의 두께가 필요한데 이는 물리적 증착법에 의해 얻어지는 columnar구조의 막구조 특성상 결정립 계면을 통한 누설전류를 방지해야 하기 때문이다. 얻고자 하는 두께로 양질의 막을 제작하는데 있어서 공정시간의 감소 즉, 증착율을 향상시키기 위해서는 고주파 출력과 때려내기 시간을 고려해야 하는데 본 실험의 결과, 때려내기 시간에 따른 두께값은 선형적으로 증가하므로 때려내기 시간에 따른 증착율은 일정값을 가짐을 알 수 있었고 막 형성율은 고주파 출력에 대해 120W이상에서 점차 포화되는 경향을 나타내었다. 이는 때려내기되어 기판에 입사되는 입자에 의해 기 형성된 막이 다시 때려내기됨으로써 막 형성율이 저하되는 것에 기인한다. 그러므로 효율적인 증착을 제고를 위해서는 때려내는 면적이 상대적으로 큰 magnetron 고주파법 등의 사용이 유리할 것으로 사료된다.

4. 결 론

고주파 때려내기 방법으로 Si(100), Si(111) 위에 AlN(질화알루미늄) 박막을 형성하였다.

상온에서 100W의 출력과 100%의 질소비율 조건

에서 AlN(002)/Si(111)의 단일 결정면을 지닌 다결정 질화알루미늄 박막을 얻을 수 있었다. 이는 (111)방향의 입방정계 기판에 형성되는 육방정계 구조의 박막은 (111)방향에 평행한 (0002)방향으로 성장됨을 알 수 있다. 적외선 분광 결과, 상온의 기판과 120W 출력, 60% 질소비율로 제작된 질화알루미늄 박막으로부터 뚜렷한 680cm^{-1} 의 질화알루미늄 포논모드를 확인할 수 있으므로 화학양론적으로 안정된 질화알루미늄 박막 제작을 위해서는 60%이상의 질소비율이 적절한 조건임을 알 수 있었다. 증착율은 고주파 출력에 대해 비례관계를 보였으나 질소 비율변화에 대해 박막두께는 반비례의 경향을 보였으며 특히 질소비율 40~60%에서 급격한 감소를 확인하였다. 위 영역에서의 두께감소는 아르곤에 대한 질소의 비율이 증가하면서 상대적으로 수율이 낮은 질소에 의해 그 질화물이 때려내기되어 박막이 형성되기 때문인 것으로 생각된다. 또한 위의 조건에서 형성된 AlN(101) 박막의 평균평활도는 151Å이었으며 기판방향성의 영향에 의해 질소비율의 증가에 따라 질화알루미늄 박막의 평활도는 증가하였다.

※ 본 연구는 1997년도 광운대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

1. S. Strite and H. Morkoc, "GaN, AlN, and InN: A review", J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 10(4), pp. 1237 Jul/Aug (1992)
2. Yoshihiro SOMONO, Makoto SASAKI and Toshio HIRAI, "Effect of Ar Gas Addition on AlN Film Formation by Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 30, No 4, pp. 790 (1991)
3. J. Chaudhuri and R. Thokala, J. H. Edgar, B. S. Sywe, "X-ray double crystal characterization of single crystal epitaxial aluminum nitride thin films on sapphire, silicon carbide and silicon substrates", J. Appl. Phys. Vol. 77(12), pp.6263 (1995)
4. R. D. Vispute, J. Narayan, Hong Wu, and K. Jagannadham, "Epitaxial growth of AlN thin films on silicon(111) substrates by pulsed laser deposition", J. Appl. Phys. Vol. 77(9), pp. 4724 (1995)
5. Hiroshi OKANO, Naoki TANAKA, Yasuhiro

- HIRAO, Yasumi KOBAYASHI, Kenichi SHIBATA and Shoichi NAKANO, "Preparation of c-Axis Oriented AlN Thin Films by Low-Temperature Reactive Sputtering", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 33, pp. 2957 (1944)
6. A. R. Forouhi, I. Bloomer, "Optical dispersion relations for amorphous semiconductors and amorphous dielectrics", Phys. Rev. B, Vol. 34, pp. 7018 (1986)
 7. A. R. Forouhi, I. Bloomer, "Optical properties of Crystalline Semiconductors and Dielectrics", Phys. Rev. B, Vol. 38, pp. 1865 (1988)
 8. A. R. Forouhi, I. Bloomer, "Method and Apparatus for Determining optical Constants of Materials", US Patent No. 4, 905, 170 (1990)
 9. J. Szczyrbowski, "Optical properties of rough thin films", Thin Solid Films, Vol. 130, pp.57 (1985)
 10. C. A. ARGUELLO, D. L. ROUSSEAU, AND S. P. S. PORTO, "First-Order Raman Effect in Wurtzite-Type Crystals", Phys. Rev. Vol. 181, No. 3, pp. 1351 (1969)
 11. C. Carlone, K. M. Lakin, and H. R. Shanks, "Optical phonons of aluminum nitride" J. Appl. Phys. Vol. 55(11) (1984)

저자소개

정성훈



1965년 1월 22일생. 1991년 광운대학교 공대 전자재료공학과 졸업. 1993년 광운대 일반대학원 졸업(석사). 1993년-95년 LG전자부품연구소 주임연구원. 현재 광운대학교 전자재료공학과 박사과정.

문동찬



1935년 2월 25일생. 1957년 연세대 이공대 물리학과 졸업. 1965년 연세대 대학원 물리학과 졸업(석사). 1981년 동 대학원 물리학과 졸업(이박). 1982년 미국 라이트-페더슨 공군연구소 초빙과학자. 현재 광운대학교 공대 전자재료공학과 교수.

김영호



1973년 11월 21일생. 1996년 광운대학교 전자재료공학과 졸업. 현재 광운대학교 대학원 전자재료공학과 석사과정.

김선태



1956년 9월 11일생. 1981년 광운대 공대 전자재료공학과 졸업. 1984년 동 대학교 대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 1988년 동 대학교 대학원 전자재료공학과 졸업(박사). 현재 대전산업대학교 재료공학과 부교수.

송복식



1967년 12월 1일생. 1990년 광운대학교 전자재료공학과 졸업. 1992년 동 대학교 대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(박사). 1997년 3월-현재 현대전자 부품소재부문 PDP사업추진팀 근무