

단일 이온빔 스퍼터링법을 이용한 AlN 박막의 증착

이재빈 · 주한용 · 이용의 · 김형준
서울대학교 공과대학 재료공학부
(1997년 1월 18일 접수)

Deposition of AlN Thin Films by Single Ion Beam Sputtering

Jae-Bin Lee, Han-Yong Joo, Yong-Eui Lee and Hyeong Joon Kim

School of Materials Science and Engineering, Seoul National University
(Received January 18, 1997)

요 약

Reactive Single Ion Beam Sputtering 방법을 이용하여 AlN 박막을 증착하고 물성을 분석하였다. 반응성 가스로 질소 가스 또는 암모니아 가스를 이용하였다. 증착된 AlN 박막의 구조적, 화학적, 광학적 물성을 분석하기 위해 XRD, GAXRD, TEM, SEM, XPS, UV/VIS spectrophotometer, FT-IR 등을 이용하였다. XRD, GAXRD 분석결과에 의하면 증착된 모든 AlN 박막은 비정질이었으나 TEM 분석결과에서는 비정질 속에 육방정의 AlN 미세결정들이 분포해 있었다. 그리고 FT-IR과 XPS 분석을 통하여 Al-N 결합을 확인하였으며, 화학양론적인 조성이 됨에 따라 UV/VIS spectrophotometry 분석에서 투광성이 증가하며 광학적 밴드갭은 6.2 eV까지 증가함을 확인하였다. 또한 단면과 표면 형상관찰에서는, 반응성 가스로 질소 가스나 암모니아 가스에 관계없이, 결정입계가 전혀 관찰되지 않는 아주 평활한 형상이었으며 굴절율은 1.6~1.7의 값을 갖는다.

ABSTRACT

Aluminum nitride (AlN) thin films were deposited by reactive single ion beam sputtering using N_2 or NH_3 as reactive gas. The structural, compositional and optical properties of AlN thin films were characterized by XRD, GAXRD, TEM, SEM, XPS, UV/VIS spectrophotometer, and FT-IR. All the deposited AlN thin films were amorphous by the analyses of XRD and GAXRD. However, TEM analysis showed that AlN nanocrystallites were uniformly distributed in the films. The presence of Al-N bonds were also confirmed by FT-IR and XPS analyses. The optical bandgap of AlN films increased up to 6.2 eV and the transmittance was about 100% in visible range with approaching the stoichiometric composition. Irrespective of using N_2 or NH_3 as reactive gas, the deposited AlN thin films had very smooth surface morphologies. Their refractive index ranged from 1.6 to 1.7.

Key words : AlN, Single ion beam sputter, Optical bandgap.

1. 서 론

Aluminum nitride(AlN)은 공간군 $P6_3mc$ 인 wurtzite 구조로 단단하며, 높은 용융점, 높은 열전도도, 높은 온도에서의 열적, 화학적 안정성, 열팽창계수의 Si, GaAs, InP 등과의 유사성, 높은 절연파괴강도, 높은 전기저항, 빠른 탄성파의 속도,¹²⁾ 6.3 eV정도의 큰 밴드갭,¹⁾ UV의 투광성, 높은 비선형 광학계수 등의 물성을 가지고 있다. 따라서 청색 레이저 등의 광소자,¹⁾ MIS (metal-insulator-semiconductor)구조에 있어서의 절연막,^{5,6)} 그리고 electronic, opto-electronic, electronic pack-

aging 응용에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

AlN 박막의 증착 방법으로는 열 CVD(Thermal Chemical Vapor Deposition),⁷⁾ PECVD(Plasma Enhanced CVD),⁸⁾ Hot-filament CVD,⁹⁾ Laser CVD,¹⁰⁾ Reactive Sputtering,¹¹⁾ 스퍼터링을 이용한 IBAD(Ion Beam Assisted Deposition), 저항가열을 이용한 IBAD, Dual IBS(Ion Beam Sputtering)^{12,13)} 등이 있다. 본 연구에서는 반응성 가스로 질소 또는 암모니아 가스를 사용한 reactive single ion beam sputtering 방법을 이용하여 AlN 박막을 증착하고 그 물성을 분석하였다.

2. 실험방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 단일 이온빔 스퍼터링 장치의 개략도이다. 펌핑장치의 구성은 로터리펌프와 터보펌프로 구성되었으며, DuoPIGatron 타입의 이온원을 갖추고 있다. 기판가열은 할로겐램프를 이용하여 550°C까지 승온가능하다. 기판온도는 열전대를 기판홀더 표면에 고정시켜 측정하였고, 이온빔 전류밀도는 Faraday cup 원리를 이용하여 측정하였다. 타겟은 순도 99.999% 직경 4인치의 Al 타겟을 이용하였으며, 반응성 가스로 99.99%의 질소 가스 또는 99.9995%의 암모니아 가스를 이용하였고, Al 스퍼터링에 이용된 가스는 99.99%의 알곤 가스를 이용하였다. 기판으로는 Si(111), 습식산화시킨 SiO_2 (3000Å)/Si(100) 또는 광학적 특성 분석을 위해 실리카유리(fused silica)를 이용하였다.

막 증착은 다음의 순서로 진행하였다. 반응기의 초기 진공도가 10^{-5} Torr 까지 펌핑한 후, 기판을 가열하고 가스를 이온건으로 밀정압력을 유지하도록 주입하여 플라즈마를 발생시켰다. 인출전압과 바이어스 전압을 인가하여 이온빔을 인출시켜서 반응기 내부의 알루미늄 타겟을 스퍼터하였다. 반응성 가스인 질소 가스는 알곤 가스와 함께 이온건 속으로 유입시켰으며, 암모니아 가스는 이온건의 부식을 막기위해 챔버벽쪽 노즐을 통해 유입시켰다. 예비 스퍼터링을 10분간 실시한 후 셔터를 열어 막을 증착하였다. 기판온도 100~450°C, 증착압력 10^{-4} ~ 10^{-3} Torr, 알루미늄타겟과 기판과의 거리 8~12 cm에서 증착조건을 설정하였다.

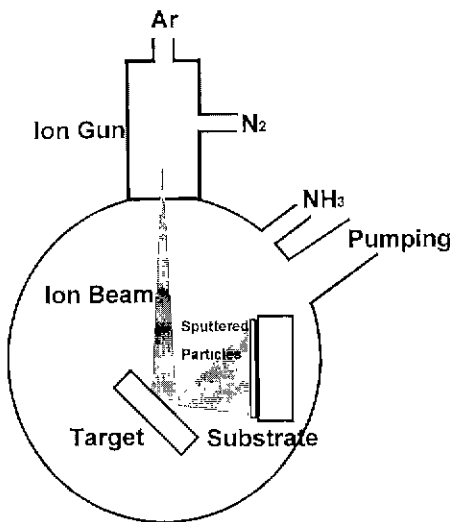


Fig. 1. Schematic diagram of single ion beam sputtering system.

증착속도는 SEM의 단면사진, stylus, ellipsometry를 이용하여 측정하였으며, 박막의 결합 특성을 조사하기 위하여 BIO-RAD사의 MODEL FTS40의 FT-IR를 사용하였다. 측정 스펙트라의 범위는 $4000.0\sim 400.0\text{ cm}^{-1}$ 이었으며, 흡수모드로 측정하였다. 이때 분해능은 4 cm^{-1} , scan 수는 16이었다. 증착박막의 Al과 N의 함량 등의 박막조성 분석과 Al의 결합상태를 확인하기 위하여 XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy)를 이용하였다.

박막의 결정성분석은 X-ray diffractometer를 이용하여 XRD 패턴을 구하였다. 이때 사용한 X-ray는 $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1.5405\text{ \AA}$)를 이용하였고 측정시 인가전압은 40 kV, 인가전류는 30 mA였다. 또한 Philips사의 Glancing Angle XRD(GAXRD)를 이용하여 박막의 결정성을 조사하였다. GAXRD는 X-ray의 입사각을 작게 하므로 얇은 막의 경우에도 X-ray 침투경로가 길어져서 얇은 막의 결정성을 쉽게 측정할 수 있다. 측정조건은 40 kV, 40 mA의 전력 인가로 발생한 $\text{CuK}\alpha$ X-ray와 $1/8^\circ$ 의 divergence slit을 사용하고 2θ 의 scan을 $20\sim 70^\circ$ 범위에서 step size 0.020° , scan speed $0.080^\circ/\text{s}$ 의 속도로 행하였다. 입사각은 $0.5\sim 10^\circ$ 까지 변화시켰다. 그리고 TEM(JEOL, JEM-200CX)을 이용하여 증착박막의 미세구조 및 결정성을 조사했다.

증착된 박막의 광학적 특성은 deuterium lamp를 사용한 자외/가시광선 분광분석기(UV/VIS spectrophotometer, HP 8452A)를 이용하여 조사하였다. 광학적인 특성을 분석하기 위해서는 투명기판을 이용하여 박막을 증착해야하는데, 본 실험에서는 투명기판으로 실리카유리(fused silica)를 이용하였다. 자외/가시광선 분광분석기를 이용하여 투명기판 위에 형성된 박막에 대해서 빛의 파장에 따른 광투과(T)와 반사(R) 스펙트럼을 얻고나서 Manificier의 포락선법(envelope method)¹⁰에 의해 투명기판 위에 형성된 광흡수율이 낮은 단층박막의 두께와 굴절율, 소멸계수등을 광투과 스펙트럼으로부터 결정할 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2에 증착조건에 따른 증착속도를 나타내었다. 알곤 가스 0.3 mTorr, 질소 가스 0.6 mTorr, 기판온도 300°C에서 이온빔 전류밀도를 0.6 mA/cm^2 에서 1.2 mA/cm^2 로 증가시키기에 따라 증착속도는 48 \AA/min 에서 60 \AA/min 까지 증가하였다. 또한 반응성 가스로 암모니아 가스를 이용하고 기판온도 300°C에서 이온빔 전류밀도를 0.3 mA/cm^2 에서 0.9 mA/cm^2 로 증가시키기에 따라 증착속도는 26 \AA/min 에서 43 \AA/min 까지 증가하였다.

반응성 가스의 종류와 관계없이 이온빔 전류밀도를 증가시키면 따라 증착속도가 증가하였다. 이는 이온빔 전류밀도가 이온건으로부터 이온빔을 끌어내기 위해 인가되는 인출전압에 비례하기 때문이다. 즉, 이온빔 전류밀도가 증가하면 알곤 이온의 개수도 많아지며 또한 인출전압이 높아지므로 타겟으로 입사되는 입자들이 갖는 에너지도 커진다. 따라서 알루미늄 타겟에서 스퍼터된 입자들이 많아지므로 박막의 증착속도는 증가한다. 따라서 이온빔 전류밀도가 높을수록 Al 과잉의 박막이 얻어지기 쉬우며 이는 XPS 분석으로 확인하였다. 반응성 가스로 질소 가스를 이용하였을 경우가 암모니아 가스를 이용할 경우보다 더욱 높은 증착속도를 보인다. 이는 두 가스에 대해서 동일한 이온빔 전류밀도를 얻기 위해서는 질소 가스의 경우 더욱 큰 인출전압을 필요로 하기 때문이다. 예를 들어 기판온도 300°C, 전체압력 0.9 mTorr에서 이온빔 전류밀도가 0.9 mA/cm²가 되기 위해서는 질소 가스와 암모니아 가스를 이용했을 경우 각각의 인출전압은 2.2 kV와 2.0 kV였다. 따라서 같은 이온빔 전류밀도(즉, 같은 이온의 숫자)라도 질소 가스를 이용하는 경우가 더욱 큰 에너지의 알곤 이온이 이온건으로부터 인출되어 나와 타겟에 충돌하므로 타겟의 스퍼터율이 크므로 높은 증착속도를 보이는 것이다. 기판의 온도가 증가함에 따라서 증착속도는 감소했다. 이는 기판온도 상승은 기판 위에 도달한 부착입자들의 이동도와 탈착을 증가시키는 요인이 되기 때문이다. 또다른 이유로는 기판온도의 증가는 반응성 가스와의 반응을

촉진하여 박막의 치밀화에 기여하고, 기판으로부터 방사열을 받은 타겟 표면의 질화 촉진에 의한 스퍼터링율의 감소를 들 수 있다.

Fig. 3은 증착된 박막들의 FT-IR에 의한 분석결과를 보여준다. 680 cm⁻¹에서 나타난 피크로부터 Al-N 결합을 확인하였으며, 그 높이는 두께에 의존하였다. 그리고 증착조건에 관계없이 모든 증착된 막들은 Al-N 결합특성을 보였다.

XPS를 이용하여 증착박막의 Al과 N의 함량과 Al의

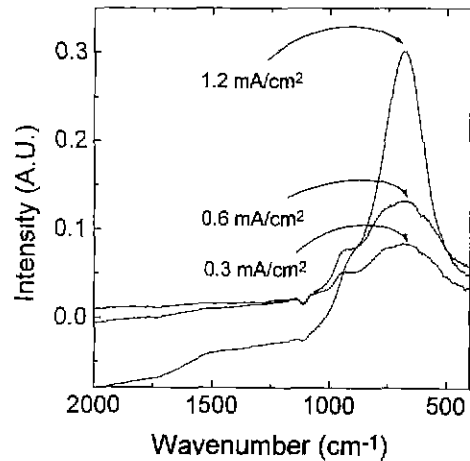


Fig. 3. FT-IR spectra of the AlN films deposited using N₂ gas under various beam current densities.

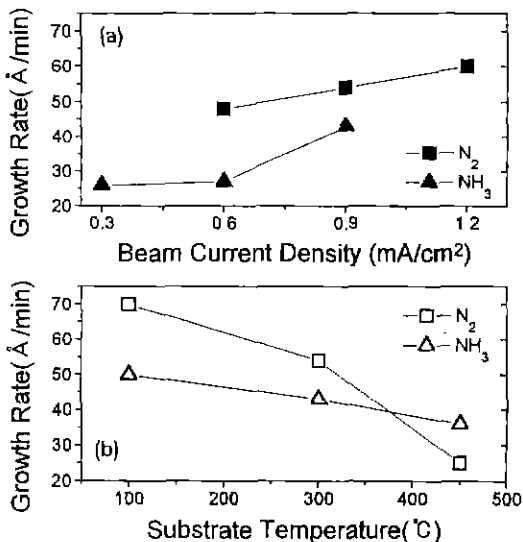


Fig. 2. Variation of growth rate as a function of a) beam current density and b) substrate temperature.

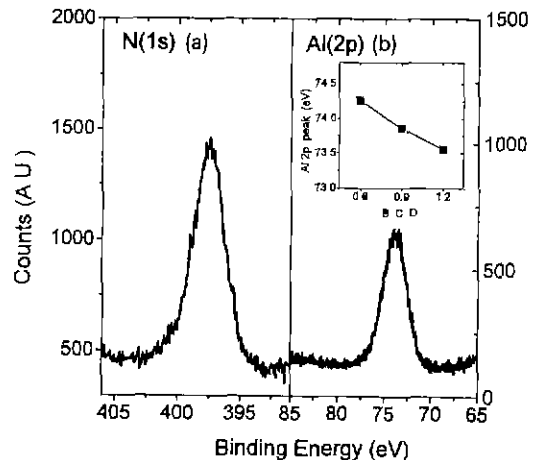


Fig. 4. XPS spectra of (a) N 1s and (b) Al 2p line for the AlN film deposited using N₂ gas at 0.9 mA/cm², 300°C. The inset graph shows variations of Al 2p peak position as function of beam current density.

결합상태를 확인하였다. Fig. 4는 알콘 가스 0.3 mTorr, 질소 가스 0.6 mTorr, 기판온도가 300°C, 이온빔 전류밀도가 0.9 mA/cm²에서 증착된 박막의 N_{1s}와

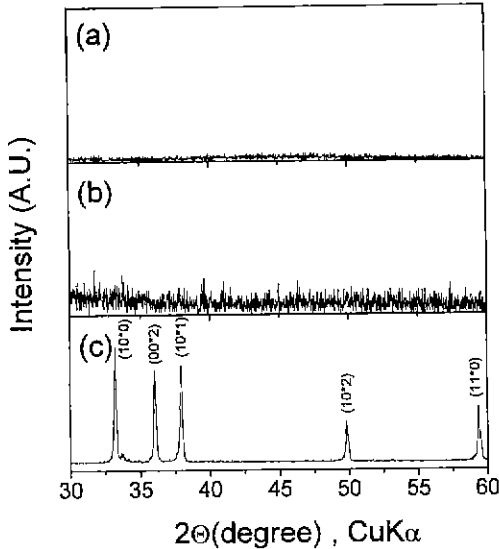


Fig. 5. (a) XRD pattern, (b) GAXRD pattern of AlN films and (c) XRD pattern of the sintered AlN target.

Al_{2p}의 피크가 각각 398 eV와 74 eV에서 나타남을 보여 주고 있다. 이로부터 증착된 박막이 AlN 박막을 알 수 있고, 피크의 면적으로부터 구한 Al과 N의 함량비는 1:0.9였다. 또한 Fig. 4에서 보여주듯이 이온빔 전류밀도가 0.6 mA/cm²에서 1.2 mA/cm²로 증가함에 따라 Al_{2p}의 피크가 74.3 eV에서 73.6 eV로 이동하였다. 이는 이온빔 전류밀도가 증가하면 증착된 박막에서 화학결합이 Al-N 결합으로부터 Al-Al 결합으로 전이되는 chemical shift를 보여주는 것이다. 따라서 이온빔 전류밀도가 증가하면 스퍼터된 알루미늄의 입자수가 증가하여 알루미늄과잉 조성의 박막이 증착됨을 알 수 있었다.

Xiao-Dong Wang 등은 질소 가스와 수소 가스를 이용하여 200°C의 낮은 기판온도에서 단일 이온빔 스퍼터링 법으로 비정질의 AlN 박막을 증착하였다.¹³⁾ 따라서 더 높은 기판온도와 반응성 가스로서 화학적 반응성이 큰 암모니아 가스를 이용하여 결정성을 지닌 AlN 박막을 얻고자하였다. 그렇지만 기판온도 450°C, 반응성 가스로 암모니아 가스를 이용하여 증착된 박막은 비정질이었으며, 그 중 한 시편의 XRD 분석결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5 (a)는 X-ray diffractometer를 이용하여 측정된 XRD 패턴이고, Fig. 5 (b)는 GAXRD를 이용하여 입사각을 2.5°로 측정된 XRD 패턴이다. 이 두 패턴에서 증착된 박막은 비정질임을 알 수 있다. Fig. 5 (c)는 비

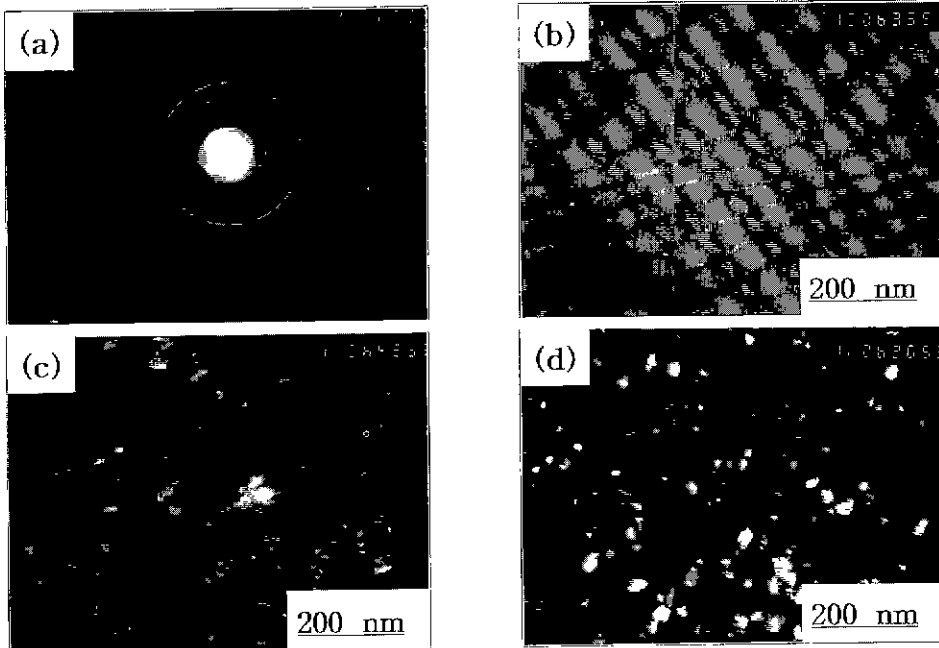


Fig. 6. (a) TEM selected area diffraction(SAD) patterns, and dark field images of the AlN films deposited using N₂ gas under various beam current densities of (b) 0.6 mA/cm², (c) 0.9 mA/cm² and (d) 1.2 mA/cm²

교를 위해서 AlN 소결체의 XRD 패턴을 나타냈다. 본 연구에서 실험한 모든 증착조건에서 증착된 AlN 박막은 모두 비정질이었다. H. Okano 등은 질소 보조 이온건이 추가된 이중 이온빔 스퍼터링법을 이용하여 AlN 박막을 증착하였다.¹²⁾ 이들에 의하면 질소 이온빔의 전류밀도가 0.4 mA/cm²일 때, 질소 이온이 100 eV 크기의 에너지로 기판에 입사해야 증착된 박막이 우수한 결정성과 배향성을 갖는다. 그렇지만 질소이온이 60 eV 이하의 에너지를 갖고 기판으로 입사된 경우에는 이온빔 전류밀도에 관계없이 비정질 박막이 얻어졌다. 따라서 본 연구에서의 조건은 질소이온이 이온건 속에서 가속되어 인출된 후, 알루미늄 타겟에 충돌하면서 타겟표면에서 알루미늄과 반응하거나, 에너지를 잃고 산란되고 중화되기도 하므로 낮은 에너지를 갖고 기판에 도달하므로 위 보고자들의 비정질 박막의 증착조건에 해당한다고 판단된다.

TEM 분석의 암시야상을 통하여 비정질 속에 약 400Å 이하의 작은 미세결정립들이 존재함을 관찰하였다. 이 결정들은 환도형으로부터 육방정의 wurtzite 상으로 확인되었다. 질소 가스를 이용하였을 경우, 이온빔 전류밀도가 증가할수록 그리고 기판의 온도가 감소할수록 미세결정립의 수는 증가하였다. 이를 Fig. 6에 나타내었다. 암모니아 가스를 이용하여 증착시킨 경우, 전반적으로 미세결정립이 많이 생성되며, 기판온도 또는 이온빔 전류밀도의 증가에 따라 미세결정립 수도 증가하였다. 크기도 대략 400Å 까지 성장한 것은 관찰할 수 있었다. 육방정 AlN의 환도형에서 금속 알루미늄결정에 해당하는 환도형은 관찰되지 않으므로 박막의 조성이 알루미늄과잉일지라도 박막내에 알루미늄이 결정립으로 존재하지 않음을 알 수 있다. 박막시편들을 1000°C, 알곤 분위기에서 두 시간 열처리한 후, XRD 분석에서 피크는 관찰되지 않았다. 그러나 TEM의 암시야상 관찰 중에 10분이상의 빔에 노출되었을 경우, 몇 개의 막에서 미세결정립들이 새롭게 생성되나 곧 성장이 중지됨을 관찰할 수 있었다. 이는 시편이 전자빔의 에너지를 흡수하여 결정핵들이 성장에 필요한 활성화 에너지를 제공받았기 때문이라고 생각된다.

Fig. 7은 증착된 박막들의 단면 및 평면형상을 보여 준다. 질소와 암모니아 가스를 이용하여 증착된 모든 시편에서 SEM 관찰결과 단면과 표면형상이 모두 매우 평활하였으며 결정립계는 전혀 관찰되지 않았다. 암모니아 가스를 이용하는 경우에 표면형상이 약간 거칠어졌지만 단면사진에서 결정입계는 확인할 수 없었으며, 표면형상 역시 5만배의 배율로도 윤곽을 확인할 수 없을 정도로 평탄하였다. Fig. 7 (a)과 (b)는 각각 질소 가스와 암모니아 가스를 이용하여 증착시킨 박막들의

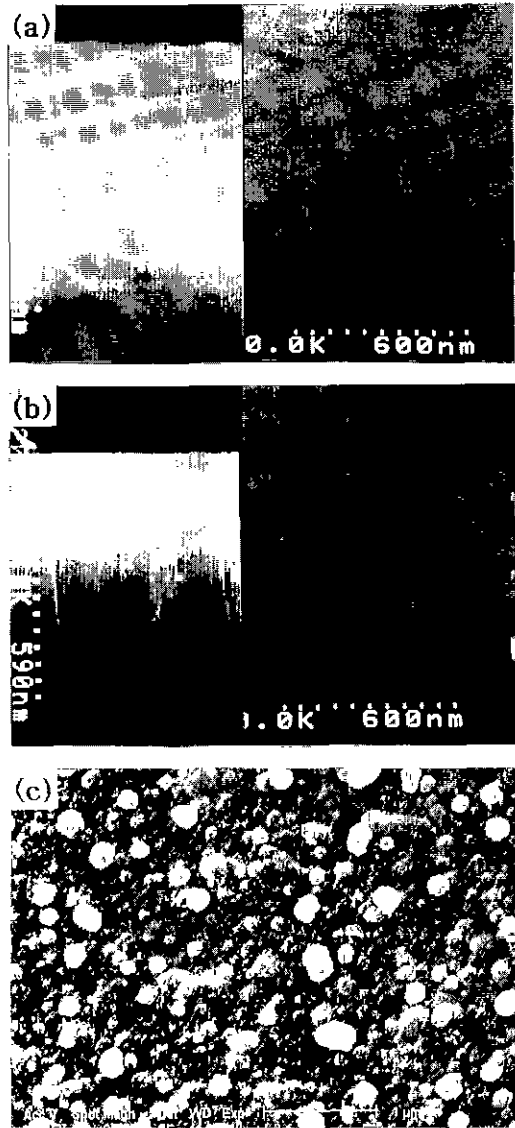


Fig. 7. SEM micrographs of the AlN films deposited using (a) N₂ gas and (b) NH₃ gas as a reactive gas, and (c) SEM micrograph of Al films deposited using Ar gas only.

형상이며, Fig. 7(c)은 반응성 가스를 넣지 않고 증착한 알루미늄 박막의 평면사진이다. 여기에서 알 수 있듯이 알루미늄만 증착하면 입경이 대략 3000Å에 이르는 결정립들이 거친 표면을 보이면서 증착되지만, 질소 가나 암모니아 가스를 넣어 비정질의 AlN 박막이 형성되면 결정립계가 전혀 관찰되지 않는 평탄한 박막이 증착된다.

Fig. 8에 질소 가스를 이용하여 증착한 박막의 투과스

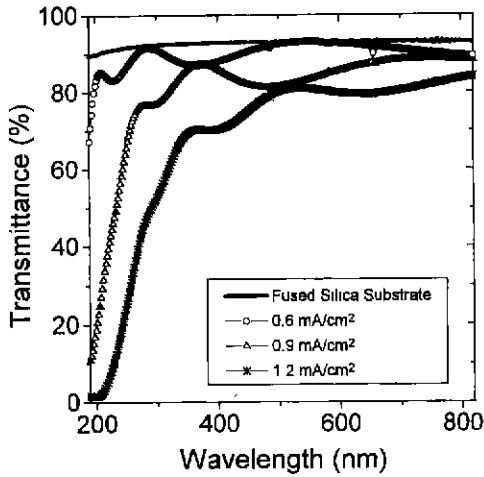


Fig. 8. UV/VIS transmission spectra of AlN films deposited at 300°C using N_2 gas under various beam current densities.

펙트럼을 나타내었다. 이 스펙트럼으로부터 가시광선 영역에서의 투과도, 광학적 밴드갭, 굴절율 등을 알 수 있다. Fig. 4에서 이온빔 전류밀도가 높아짐에 따라 시편의 Al 함량이 많아지고 이에 따라서 가시광선 영역에서 투과도가 감소하며 광학적 밴드갭도 작아짐을 Fig. 8에서 알 수 있었다. Fig. 9는 증착된 박막들의 광학적 밴드갭을 보여준다. 알곤 0.3 mTorr, 질소 0.6 mTorr, 기판 온도가 300°C인 경우, 이온빔 전류밀도가 1.2 mA/cm²에서 0.6 mA/cm²로 감소함에 따라 광학적 밴드갭이 5.26 eV로부터 6.19 eV로 증가하였다. 즉, 비록 비정질이지만 화학양론적인 조성에 가까울수록 벌크의 광학적 밴드갭인 6.3 eV에 근접한다. 이는 이온빔 전류밀도가 낮아짐에 따라 박막의 조성이 화학양론적인 조성에 근접하기 때문이다. 또한 기판온도가 증가함에 따라 Al 과잉의 조성으로부터 화학양론적인 조성으로 변화해감에 따라 밴드갭도 증가하였다. 암모니아 가스를 이용하였을 경우에도 역시 기판온도의 증가에 따라 밴드갭은 증가하였다. 특히 암모니아 가스를 이용하는 경우, 기판온도가 300°C이상이면 이온빔 전류밀도를 0.3 mA/cm²에서 0.9 mA/cm²로 증가시켜도 증착박막의 광학적 밴드갭은 일정하게 6 eV의 값을 보여준다. 이온빔 전류밀도가 증가하면 알루미늄과잉 조성이 되고 따라서 광학적 밴드갭이 낮아짐이 기대되는데, 일정하게 벌크값에 근접하는 것으로 미루어보아 기판온도가 300°C이상이면 유입된 암모니아 가스는 알루미늄의 질화반응에 충분히 참여하고 있음을 알 수 있다. Fig. 10에 각 증착조건에서 얻어진 박막의 굴절율을 나타내었다. 일반적으로 보고되는 바와 같이 결정성이 증가할수록 2.15에 근

요업학회지

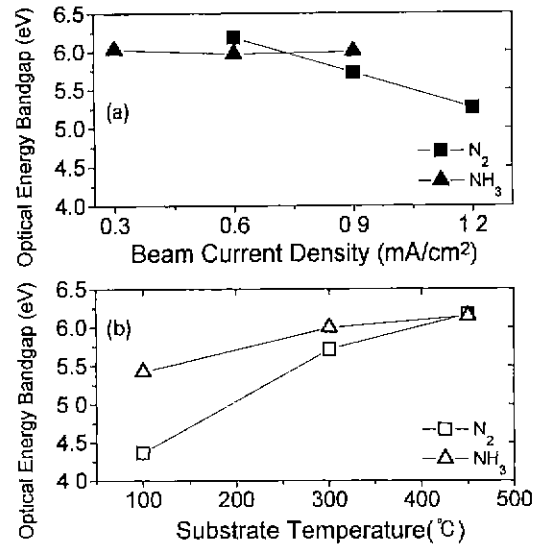


Fig. 9. Variation of optical bandgap as a function of (a) beam current density and b) substrate temperature.

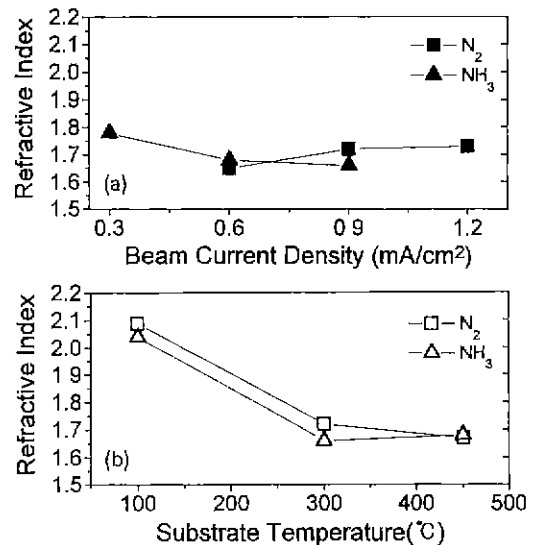


Fig. 10. Variation of refractive index as a function of a) beam current density and b) substrate temperature.

접하고 비정질화되면서 굴절율이 낮아지는 경향과 잘 일치한다.¹⁶⁾ 기판온도가 100°C인 경우를 제외한 모든 박막에서 굴절율의 값은 1.6~1.7값을 보여주고 있다. 기판온도가 100°C인 경우에는 굴절율의 값이 2.1까지 근접하고 있는데 이는 알루미늄과잉 조성이기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

단일 이온빔 스퍼터링법을 이용하여 기판온도 100~450°C, 증착압력 10^{-4} ~ 10^{-3} Torr, 알루미늄타겟과 기판과의 거리 8~12 cm에서 AlN 박막을 증착하였다. 이온빔 전류밀도는 0.3~1.2 mA/cm²였으며, 반응성 가스로 질소 가스 또는 암모니아 가스를 이용하였다. 이 때 증착된 모든 박막은 XRD 분석과 TEM 분석을 통해 AlN 미세결정립이 부분적으로 생성된 비정질임을 알 수 있었다. 그리고 알루미늄 과잉의 조성이어도 박막내에 과잉으로 존재하는 알루미늄이 결정립을 이루고 있지는 않았다. 알루미늄이 과잉으로 존재하면 광학적 밴드갭은 감소하고 굴절율은 증가하였다. 또한 광학적 밴드갭과 FT-IR 그리고 XPS 결과에서 Al-N 결합이 존재함을 알 수 있었다. 질소 가스를 이용하는 경우, 이온빔 전류밀도가 감소할수록 또는 기판의 온도가 증가할수록 증착박막은 화학양론적 조성에 근접하고 광학적 밴드갭 또한 벌크값에 근접하는 6.19 eV이었다. 암모니아 가스를 이용하는 경우, 기판온도가 300°C 이상이 되면 유입된 암모니아 가스는 스퍼터된 알루미늄과의 질화반응에 충분히 기여한다. 이 때 증착된 AlN 박막은 비정질이며, 이온빔 전류밀도에 관계없이 광학적 밴드갭은 6 eV의 일정한 값을 보였다. 단일 이온빔 스퍼터링에 의해 증착된 박막들은 모두 SEM의 단면과 표면 형상에서 결정입계가 전혀 관찰되지 않는 매우 평탄한 형상을 갖는다. 조성이 화학양론적이 되는 조건에서 굴절율 1.6~1.7의 값을 가지며, 광학적 밴드갭이 벌크값에 이르는 박막을 제조할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 1995년도 교육부 학술연구조성비(신소재분야)에 의하여 연구되었습니다. 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. J. K. Liu, K. M. Lakin and K. L. Wang, "Growth morphology and surface-acoustic-wave measurements of AlN films on sapphire," *J. Appl. Phys.*, **46**(9), 3703-3706 (1975)
2. L. G. Pearce, R. L. Gunshor and R. F. Pierret, "Aluminum nitride on silicon surface acoustic wave devices," *Appl. Phys. Lett.*, **39**(11), 878-879 (1981)
3. W. M. Yim, E. J. Stofko, P. J. Zanzucchi, J. I. Pankove, M. Eitenberg and S. L. Gilbert, "Epitaxially grown AlN and its optical band gap," *J. Appl. Phys.*, **44**(1), 292-296 (1973)

4. Wang Dehuang, "SPUTTERED AlN FILMS FOR SEMICONDUCTOR LASERS," *Thin Solid Films*, **187**, 127-132 (1990)
5. M. Morita, S. Isogai, K. Tsubouchi and N. Mikosiba, "Characteristics of the metal insulator semiconductor structure : AlN/Si," *Appl. Phys. Lett.*, **38**(1), 50-52 (1981)
6. Y. Mochizuki, M. Mizuta, S. Fujieda and Y. Matsumoto, "Charge trapping characteristics of the interface states in an AlN/GaAs metal-insulator-semiconductor structure," *Appl. Phys. Lett.*, **55**(13), 1318-1320 (1989)
7. R. G. Gordon and Umar Riaz, "Chemical vapor deposition of aluminum nitride thin films," *J. Mater. Res.*, **7**(7), 1679-1684 (1992)
8. F. Hasegawa, Tsuyoshi Takahashi, Kiyokazu Kubo, and Yasuo Nannichi, "Plasma CVD of Amorphous AlN from Metalorganic Al source and Properties of the Deposited Films," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26**(9), 1555-1560 (1987)
9. Jeffrey L. Dupuie and Erdogan Gulari, "Hot filament enhanced chemical vapor deposition of AlN thin films," *Appl. Phys. Lett.*, **59**(5), 549-551 (1991)
10. Xin Li and T. L. Tansley, "Laser-induced chemical vapor deposition of AlN films," *J. Appl. Phys.*, **68**(10), 5369-5371 (1990)
11. H. Windischmann, "INTRINSIC STRESS IN AlN PREPARED BY DUAL-ION-BEAM SPUTTERING," *Thin Solid Film*, **154**, 159-170 (1987)
12. Hiroshi Okano, Naoki Tanaka, Yasuhiro Hirao, Yasumi Kobayashi. "Characteristics of AlN Thin Films Deposited by Electron Cyclotron Resonance Dual-Ion-Beam Sputtering and Their Application to GHz-Band Surface Acoustic Wave Devices," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33** Part 1(5B), 2957-2961 (1994)
13. Naoki Tanaka, Hiroshi Okano, Tatsuhiro Usuki and Kenichi Shibata, "Preparation of Aluminum Nitride Epitaxial Films by Electron Cyclotron Resonance Dual-Ion-Beam Sputtering," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33** Part 1(9B), 5249-5254 (1994)
14. J. C. Manifacer, J. Gasiot and J. P. Fillard, "A Simple Method for the Determination of the Optical Constants n, k and the Thickness and Optical Constants of Amorphous Silicon," *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **9**, 1002 (1976)
15. Xiao-Dong Wang, K. W. Hipps, J. T. Dickinson, and Ursula Mazur, "Amorphous or nanocrystalline AlN thin films formed from AlN H," *J. Mater. Res.*, **9**(6), 1449-1455 (1994)
16. Roy G. Gordon, David M. Hoffman and Umar Riaz, "Atmospheric pressure chemical vapor deposition of aluminum nitride thin films at 200-250°C," *J. Mater. Res.*, **6**(1), 5-7 (1991)