

고주파 반응성 스퍼터링에 의해 제작된 InN 박막의 특성

논문
11-7-5

Characteristics of InN thin films fabricated by RF reactive sputtering

김영호*, 최영복**, 정성훈**, 홍필영**, 문동찬*, 김선태**

(Young-Ho Kim, Young-Bok Choi, Sung-Hoon Chung, Pil-Young Hong, Dong-Chan Moon, Sun-Tae Kim)

Abstract

Thin film deposition of InN, which is a less-studied III-nitride compound semiconductor because of the difficulty of crystal growth, was performed by rf reactive sputtering method using In target and N₂ reactive gas. The structural, electrical, and optical properties of the produced films were measured and discussed according to the sputtering parameters such as deposition pressure, rf power, and substrate temperature.

From the result of deposition pressure, rf power, and substrate temperature, we could obtain optimal conditions of 5mTorr, 60W, 60°C for preparing InN thin film with high crystallinity, low carrier concentration, and high Hall mobility. The carrier concentration, Hall mobility, and optical bandgap of the fabricated InN thin films at optimal condition were $6.242 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, $212.526 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, and 1.912eV, respectively.

Key words(중요 용어) : RF reactive sputtering(고주파 반응성 스퍼터링), InN(질화 인듐), surface scattering(표면 산란), grain boundary scattering(결정립계 산란)

1. 서 론

단파장 발광체에 관한 연구는 최근에 급속적인 증가 추세에 있으며 고성능 GaN 청색 발광 다이오드(LED ; Light Emitting Diode)는 이미 상업적으로 이용 가능한 연구 단계에 있다.¹⁾ In_xGa_{1-x}N의 삼원 화합물 반도체는 청색-자색 발광 다이오드까지 실현할 수 있는 물질로 각광 받고 있다. 그러나 III족 질화물 반도체를 이용한 전색상 표시소자(full color display)는 적색 발광을 위한 InN(Indium Nitride)결정 성장이 실제 사용 단계까지는 불가능하기 때문에 실현되지 않고 있다. 그러므로 III족 질화물 반도체를 기초로 한 발광 다이오드에 관한 연구 분야 중 적색 발광 다이오드에 관한 연구가 진행되고 있는데, InN를 이용한 적색 발광 다이오드를 성공적으로 제조하게 되면 집적 전색상 표시소

자(monolithic FCD)를 한 기판 위에 직접 만들 수 있다.^{2,3)}

또한 직접 천이형 에너지갭을 갖는 III족 질화물 반도체인 Al_xGa_{1-x}In_{1-y}N_y계를 이용한 청색과 자외선 파장영역에서 동작하는 발광·수광 소자의 제작과 고온 동작 소자 및 고출력 마이크로파 소자 등의 응용이 검토되고 있다.

이들 중 InN는 직접 천이형 에너지 갭(E_g=2.1eV at 300K)를 갖기 때문에 가시광 파장 영역에서 고효율의 새로운 광전자 소자로 응용할 수 있을 것으로 기대되며, 이론적으로 높은 이동도를 갖기 때문에 전자 소자 응용에 무한한 잠재력을 갖고 있다. 그러나 InN는 전형적인 성장 온도에서 질소의 평형 기체압과 분해압이 매우 높기 때문에 III족 질화물 반도체 중 가장 결정 성장하기가 어려운 실정에 있다.^{4,5)} InN는 분해 온도가 낮고, 대규모 결정을 촉진시키기 위해서 이동 속도(adatom mobility)를 충분히 높게 해야 하는데 이러한 성장 온도에서는 질소가 결핍되어 고밀도의 질소 공극자(nitrogen vacancy)가 생성되므로 비화학적으로 불안정한 조성을 보이기 때문에 격자 변수와 관련된 많은 특성들에 영향을 주게 된다.⁶⁾

* : 반도체제조장비국산화연구센터(호서대학교)
(충남 천안시 안서동 산120-1, FAX: 0417-555-5460)
E-mail : rrc@dogsuri.hoseo.ac.kr
** : 광운대학교 전자재료공학과
*** : 대전산업대학교 재료공학과
1997년 12월 26일 접수, 1998년 5월 25일 심사완료

이러한 어려움을 극복하기 위해서 상대적으로 InN 분해압이 낮은 저온 성장 기술이 요구되고 있는 실정에 있다. 저온 성장 기술로 고주파 반응성 스퍼터링⁷⁾, 반응성 증착⁸⁾, 반응성 마그네트론 스퍼터링⁹⁾, HVPE¹⁰⁾, Microwave-excited MOVPE¹¹⁾, Microwave-excited MBE¹²⁾ 등이 있으며, 낮은 성장 온도에서 성장하는데 효과적인 방법으로 보고되고 있다. 그러나 제작된 InN 박막은 도우너 중심으로 작용하는 많은 양의 질소 공격자가 결합되어서, $1\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 의 낮은 이동도와 10^{20}cm^{-3} 이상의 높은 캐리어 농도를 보이며, 이러한 결과는 전도성 제어와 농도 조절이 어렵기 때문에 광전소자로서의 응용을 제한하게 된다. Tansley와 Foley¹³⁾는 홀 이동도가 300K에서 $730\sim 3980\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 이고, 캐리어 농도가 $7\sim 70\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 를 갖는 양질의 박막을 반응성 스퍼터링법을 사용하여 제작하였다. 그러나, 이러한 높은 홀 이동도와 낮은 캐리어 농도의 막을 얻기 위해서 증착 조건이 체계적으로 조사되지 않았다.

본 논문에서는 사용하는 물질이 독성이 없고 질소 공격자를 억제하기 위해서 저온성장이 가능한 고주파 반응성 스퍼터링 법을 이용하여 증착 압력, 고주파 출력, 기판 온도 등의 스퍼터링 변수를 달리 하여 Si(100) 기판 위에 InN 박막을 증착하여 박막의 증착율, 결정질과 전기적 특성 변화를 체계적으로 관찰하여 양질의 wurtzite 결정구조의 InN 박막을 제작할 수 있는 최적의 증착 조건을 제시하였다.

2. 실험

본 연구에서는 고주파 스퍼터링 장치(ANELVA, SPF-210)를 이용하여 InN 박막을 제작하였다. 99.99% 순도의 디스크형 In 타겟(diameter ; 4 inch)을 사용하였고, 글로우 방전 가스로는 99.999%의 아르곤과 질소 가스를 사용하였다. 아르곤 가스는 타겟의 불순물과 산화막(In_2O_3) 및 전 실험에서 타겟에 증착된 질화막을 제거하기 위하여 사용하였고, 질소 가스는 안뎀과의 반응가스로 사용하였다. 기판으로는 Si(100)를 사용하였고, 기판을 지지대에 장착하기 전에 TCE(trichloroethylene), 아세톤, iso-propanol, 증류수 순으로 각각 5분 동안 초음파 세척기를 사용하여 4단계 세척하였다. 증류수와 불산이 1:1로 혼합된 용매를 사용하여 화학 에칭 한 후 4단계 세척을 다시 반복하고, iso-propanol에 담근 후 질소건으로 송풍 건조하였다.

스퍼터링을 수행하기 위하여 진공조를 $2\times 10^{-6}\text{Torr}$ 이하로 배기시킨 후에 아르곤 가스를 $5\times 10^{-4}\text{Torr}$ 가 되도록 주입하여 글로우 방전을 형성하였다. 이때 아르곤 방전

동안 타겟의 불순물과 산화막 및 전 실험에서 타겟에 증착된 질화막을 제거하기 위하여 20분 동안 고주파 출력 120W, 증착 압력 5mTorr의 스퍼터링 조건에서 pre-sputtering을 수행하였다. 이어서 질소 가스를 주입하면서 박막을 증착하기 전에 초기의 불안정한 상태의 플라즈마를 안정화시키고, 원하는 스퍼터링 조건으로 고주파 출력, 증착 압력, 기판 온도를 조절하고 1시간 동안 pre-sputtering을 하였다.

표 1. InN 박막의 스퍼터링 조건.

Table 1. Sputtering conditions of InN thin films.

target	99.99% In (Dia. : 4inch)
substrate	Si(100)
substrate temperature	60°C ~ 350°C
base pressure	2×10^{-6} Torr
deposition pressure	3mTorr ~ 30mTorr
RF power	20W ~ 120W
reactive gas	99.999% N ₂
target etching	Ar : 200min. N ₂ : 60min.
sputtering time	10min. ~ 120min.

X-선 회절 장치(Rikagu사, Cu $k\alpha$; 1.5405Å)를 이용하여 스퍼터링 변수에 따라서 증착한 InN 박막의 결정질과 방향성 변화를 분석하였다. 홀 효과 측정을 위해 본 실험에서는 van der Pauw 법을 이용하여, 기판에 의한 영향을 배제하기 위해서 클로버형의 마스크 패턴을 통하여 InN 박막을 증착하였다. 제작된 박막의 네 모서리에 인듐을 진공 열증착기를 사용하여 증착한 후, 질소 분위기 하에서 150°C, 10분간 열처리하여 오믹 접촉을 형성하였다. 측정을 위해 인가된 자기장은 5000gauss였고, 1mA의 전류를 인가하였다. 시편에 흐르는 전압강하를 일렉트로미터(electrometer)로 측정하여, 박막의 비저항, 홀 이동도, 홀 계수 및 캐리어 농도를 구하였다. 광 투과도 분석기(n&k technology)를 사용하여 200nm~900nm 파장영역에서 InN 박막의 광투과도를 측정하여 광학적 밴드갭을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. InN 박막 제작

고주파 반응성 스퍼터링법에 의하여 증착한 InN 박막은 어두운 적색을 띠었다. 증착 압력을 변화시키면서 증착한 InN/Si(100) 박막의 두께를 단차 표면 측정기(α -step)로 측정된 결과를 그림 1에 나타내었다. 증착 압력이 낮아지면, 진공조 내의 화학종(species)들의 양이 감소하고, 스퍼터링된 입자의 운동 에너지가 크기 때문에 기판에 도달하여 증착되는 막의 증착율은 증가하게 되므로 낮은 증착 압력 영역에서는 증착율이 매우 높고 일정하게 나타났다. 그러나 그림 1과 같이 낮은 증착 압력에서의 증착율 포화 현상은 낮은 증착 압력에서는 음극(타겟)의 이온수집효율(ion collection efficiency)이 감소하기 때문에 더 이상 증가하지 않고 최대값으로 포화된다. 7mTorr 이상의 증착 압력에서는 증착율이 급격히 감소하였으며, 이렇게 높은 증착 압력에서 증착율이 급격히 감소하는 것은 타겟에 도달하는 질소 이온이 질소 분자와 충돌하여 스퍼터링율(sputtering yield)이 감소하고, 스퍼터링된 물질의 기체 산란에 기인하여 급격히 감소하기 때문이다.^{7,14)}

을 증가시키면 플라즈마 내에 활성화된 화학종(질소

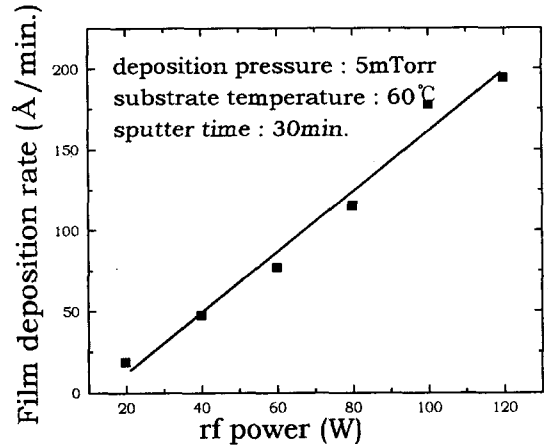


그림 2. 고주파 출력에 따른 InN/Si(100) 박막의 증착율.

Fig. 2. Deposition rates of InN/Si(100) thin films with rf power.

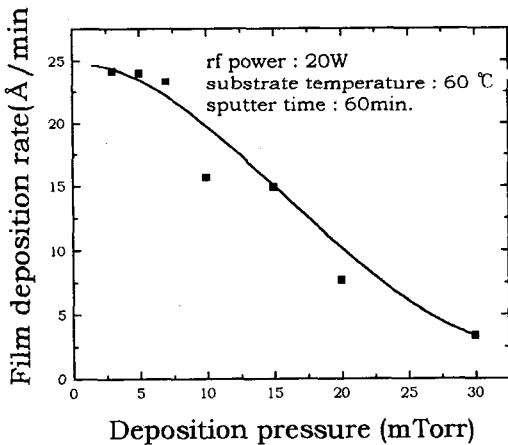


그림 1. 증착 압력에 따른 InN/Si(100) 박막의 증착율.

Fig. 1. Deposition rates of InN/Si(100) thin films with deposition pressure.

낮은 증착 압력에서의 증착율은 약 24Å/min 이었다.

증착 압력 5mTorr, 스퍼터링 시간 30분, 기판 온도 60°C일 때 고주파 출력 변화에 따른 InN/Si(100) 박막의 증착율을 그림 2에 나타내었다. 고주파 출력

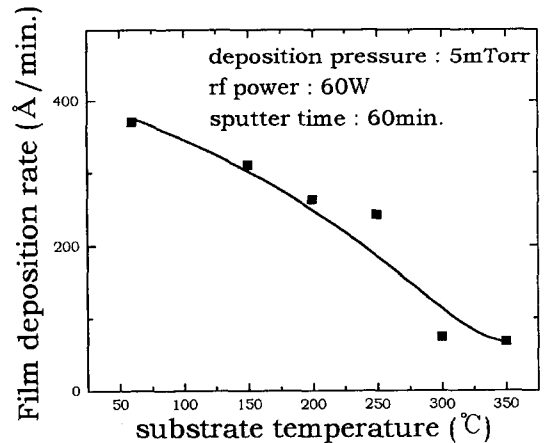


그림 3. 기판 온도에 따른 InN/Si(100) 박막의 증착율.

Fig. 3. Deposition rates of InN/Si(100) thin films with substrate temperature.

이온)의 수가 늘어나고 플라즈마 내 입자들의 운동 에너지도 증가하게 되므로 증착율은 선형적으로 증가하게 된다.

그림 3에서 기판 온도를 변화시키면서 증착한 InN/Si(100) 박막의 SEM 단면 사진에서 측정된 증

InN/Si(100) 박막의 SEM 단면 사진에서 측정된 증착율을 나타내었다, 기판 온도가 증가하게 되면 InN/Si(100) 박막은 증착된 입자의 재방출, 특히 질소원자의 재스퍼터링과 재기화 현상에 의하여 증착막의 질소가 결핍되어 증착율은 감소하게 된다.

3-2. 구조적 특성

증착 압력에 대한 결정질 의존성을 알아보기 위해서 증착 압력을 변화시키면서 증착한 InN 박막의 X-선 회절도 변화를 그림 4에 나타내었다. 전체적으로 모든 증착 압력 영역에서 wurtzite 결정구조를 나타내는 InN(0002) 피크가 관찰되었으나, X-선 회절 강도는 약하다. 증착 압력이 낮아지면 플라즈마 내 입자들의 평균자유경로(mean free path)가 증가해서 운동 에너지가 증가하고, 박막 표면으로 도달하는 질소원자의 flux가 증가하여 InN 박막이 단일 방향으로 배향되며, 특히 5mTorr와 7mTorr의 증착 압력에서 회절 강도가 크게 나타났다. 그러므로 본 논문에서는 증착 압력을 5mTorr로 유지하여 실험을 수행하였다. 높은 증착 압력에서 In₂O₃(11·0)가 관찰되었는데 이것은 잔류산소에 의해서 In₂O₃가 형성된 피크로 여겨진다.

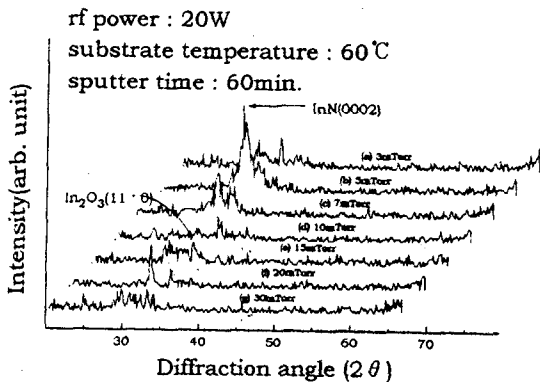


그림 4. 증착 압력에 따른 InN/Si(100) 박막의 X-선 회절도

Fig. 4. X-ray diffraction patterns of InN/Si(100) thin films with deposition pressure.

증착 압력이 5mTorr일 때 고주파 출력 변화에 따른 X-선 회절도 변화를 그림 5에 나타내었다. 모든 고주파 출력에서 c축 방향성의 wurtzite 결정구조를 나타내는 InN(0002) 피크가 강하게 나타났다. 고주파 출력이 60W일 때 InN(0002) 피크의 회절

강도가 가장 크게 나타났으며, 고주파 출력이 120W로 증가하게 되면 InN(0002) 피크가 약해지고 상대적으로 다른 피크들이 증가하기 때문에 양질의 InN 박막을 얻기 위한 고주파 출력의 상한 임계치를 100W로 결정할 수 있다. 즉 고주파 출력 100W에서 박막 표면에 증착되는 입자의 이동속도가 급격히 감소한다는 것을 의미한다. 이상의 결과로부터 고주파 출력이 증가함에 따라 박막 표면에 증착되는 입자의 운동 에너지가 증가하므로 이동속도가 증가하여 결정질이 좋아지지만 최적 조건 이상에서는 과도한 질소원자의 flux로 인해서 박막 표면에 증착되는 입자들의 이동속도가 감소하여 결정질은 저하된다.

증착 압력을 5mTorr, 고주파 출력을 60W로 고정하고 기판 온도를 변화시키면서 증착한 InN/Si(100) 박막의 결정성 변화를 관찰하기 위해서 측정된 X-선 회절도를 그림 6에서 나타내었다. 기판을 인위적으로 가열하지 않았을 때의 기판 온도인 60°C에서 아주 강한 InN(0002) 피크가 관찰되었으

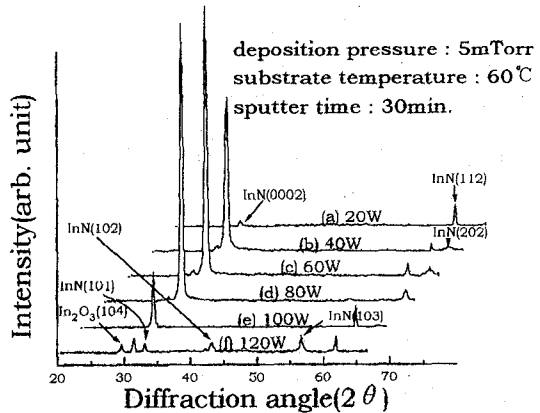


그림 5. 고주파 출력에 따른 InN/Si(100) 박막의 X-선 회절도.

Fig. 5. X-ray diffraction patterns of InN/Si(100) thin films with rf power.

나, 기판 온도가 증가하게 되면 InN(0002) 피크 강도는 약해져서 300°C에서는 거의 관찰되지 않았으므로 c축 우선 배향성을 갖는 InN 박막을 증착하기 위해서는 기판 온도를 낮게 유지해야함을 알 수 있었다.

사진 1의 단면 사진은 고주파 반응성 스퍼터링법에 의하여 Si(100) 기판 위에 증착된 InN 박막의 columnar 구조를 보여주고 있으며, 막 두께는 기판

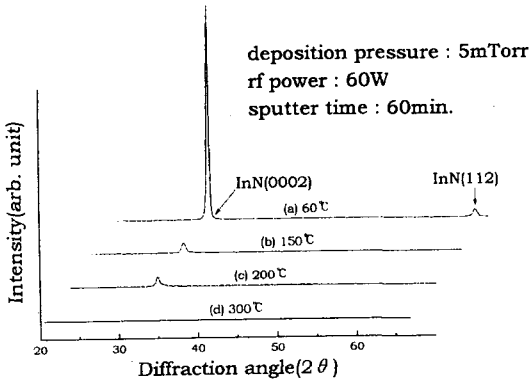


그림 6. 기판 온도에 따른 InN/Si(100) 박막의 X-선 회절도.

Fig. 6. X-ray diffraction patterns of InN/Si(100) thin films with substrate temperature.

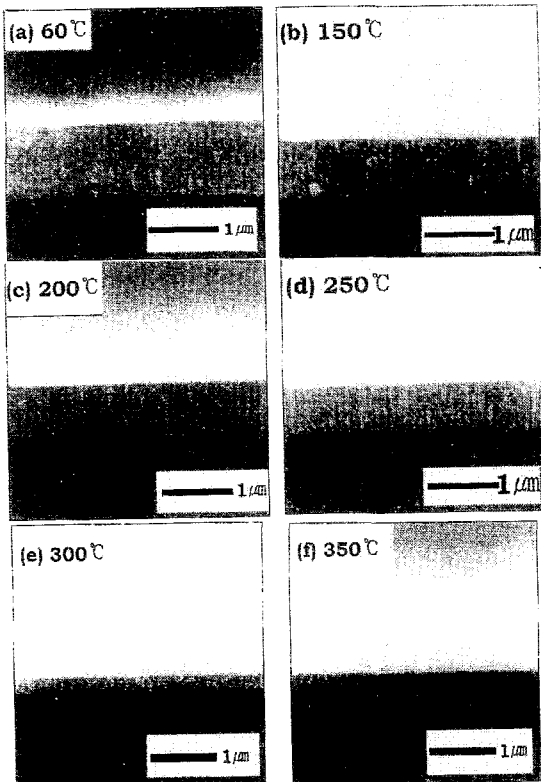


사진 1. 기판 온도에 따른 InN/Si(100) 박막의 SEM 단면 사진.

Photo. 1. Cross-section SEM micrographs of InN/Si(100) thin films with substrate temperature.

온도가 올라감에 따라서 감소하였다.

사진 2는 스퍼터링 시간을 30분으로 고정하였을 경우 증착 압력이 5mTorr일 때 고주파 출력에 따른 InN/Si(100) 박막의 표면 형상 변화를 관찰하기 위해서 측정한 SEM 표면 사진이다. 고주파 출력이 증가함에 따라서 박막 표면에 증착되는 입자의 운동 에너지가 증가하여 박막 표면에서의 이동속도가 증가하기 때문에 결정립의 크기는 커지게 된다. 그러나 120W일 때 결정립 크기가 작아지고 있는데 이러한 원인은 갑자기 스퍼터링된 인듐 입자의 flux가 증가해서 박막 표면에서의 이동속도의 감소가 급격히 일어나기 때문이다. 사진 2에서 고주파 출력의 중간 영역인 60W, 80W에서 결정립계의 분포가

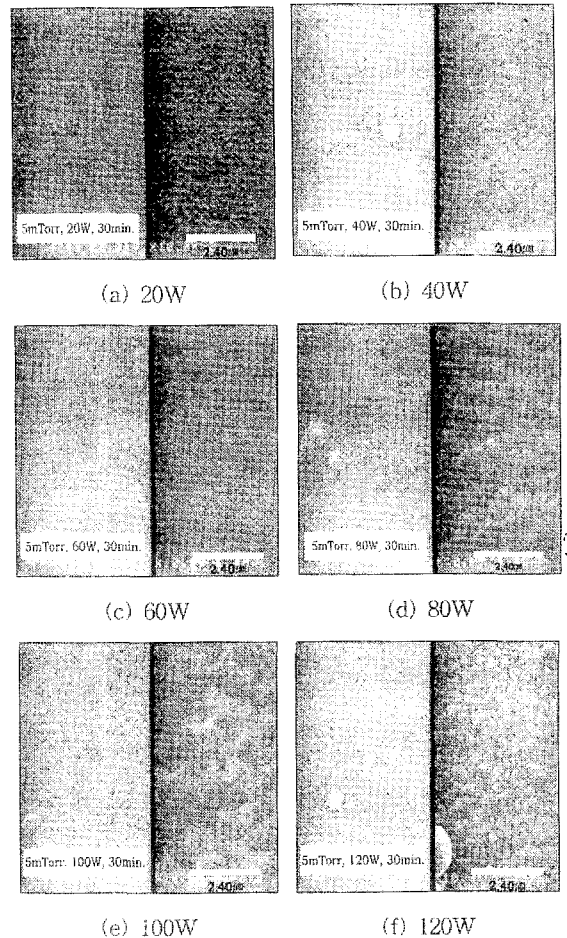


사진 2. 고주파 출력에 따른 InN/Si(100) 박막의 SEM 표면 사진.

Photo. 2. SEM surface photographs of InN/Si(100) thin films with rf power.

균일하고 평탄한 형상을 얻을 수 있으며, 높은 고주파 출력 영역인 100W, 120W에서는 표면 형상이 거칠고, 불균일한 결정립을 보인다.

3-3. 전기적 특성 및 광학적 특성

고주파 출력에 따른 InN 박막의 전기 전도 특성을 알아보기 위해서 측정된 홀 이동도와 캐리어 농도를 표 2에 나타내었다. 사진 2와 같이 낮은 고주파 출력 20W, 40W와 높은 고주파 출력 120W에서는 불균일한 표면과 결정립계 분포에 기인하여 낮은 홀 이동도를 보였으나, 고주파 출력 60W에서는 가장 높은 홀 이동도를 보였다. 많은 연구자들에 의하면 InN 박막이 낮은 홀 이동도를 보이는 원인으로 InN 박막의 표면과 결정립계 산란 상태나 질소 결합 자리(nitrogen defect site), 특히 결정립계에 의한 것으로 보고하고 있다. 결정립계에 의한 산란 현상은 결정립계 내부(intergain boundary)에 존재하는 국부적인 결함(localized defect)으로부터의 산란과 전하 캐리어 포획(charge carrier trapping)에 기인한다.⁹⁾

표 2. 고주파 출력에 따른 InN/Si(100) 박막의 홀 이동도와 캐리어 농도.

Table 2. Hall mobility and carrier concentration of InN/Si(100) thin films with rf power.

	Hall mobility (cm ² /V · s)	Carrier concentration (cm ⁻³)
20W	25.836	1.778 × 10 ²⁰
40W	34.207	2.198 × 10 ²⁰
60W	212.526	6.242 × 10 ¹⁸
80W	175.335	3.016 × 10 ¹⁹
100W	33.051	5.34 × 10 ²⁰
120W	23.857	5.89 × 10 ²⁰

기판 온도를 달리하여 증착된 InN/Si(100) 박막에서 측정된 홀 이동도와 캐리어 농도를 표 3에 나타내었다. X-선 회절 측정에서 c축 우선 배향성을 보였으며, 평탄한 표면 형상과 결정립 크기가 크고 균일한 결정립 분포

를 갖는 60°C에서 증착한 InN 박막이 높은 홀 이동도와 낮은 캐리어 농도를 갖는 가장 우수한 전기적 특성을 보였다. 기판 온도가 증가함에 따라서 질소원자의 재스피터링과 재기화 현상이 증가하기 때문에 질소가 결핍되어 많은 수의 질소 공격자가 생성되므로 비화학량론적으로 불안정한 조성을 보이기 때문에 캐리어 농도는 10²⁰cm⁻³ 이상의 높은 값으로 증가한다. 그러나 250°C에서 다소 높은 홀 이동도를 보이는 것은 평탄한 표면이 전기 전도에 영향을 미치는 표면 산란을 완화시키기 때문으로 사료된다.

표 3. 기판 온도에 따른 InN/Si(100) 박막의 홀 이동도와 캐리어 농도.

Table 3. Hall mobility and carrier concentration of InN/Si(100) thin films with substrate temperature.

	Hall mobility (cm ² /V · s)	Carrier concentration (cm ⁻³)
60°C	212.526	6.242 × 10 ¹⁸
150°C	45.591	6.242 × 10 ²⁰
200°C	37.283	2.109 × 10 ²⁰
250°C	175.335	3.016 × 10 ¹⁹
300°C	12.789	8.667 × 10 ²⁰
350°C	5.979	1.203 × 10 ²¹

고주파 반응성 스피터링에 의하여 증착된 InN 박막의 광학적인 특성을 알아보기 위해서 광 투과도 분석기(n&k technology)를 사용하여 투과 모드에서 200nm에서 900nm까지의 파장영역에서 광 투과도를 측정하였다. 광학적 흡수계수(optical absorption coefficient)가 α(cm⁻¹)이고 막의 두께가 d(cm)인 시료에 대한 광 투과도(T)는 Lambert 법칙¹⁵⁾에 따라 T=T₀exp(-αd)로 표현되므로 시료의 광학적 흡수계수는 측정된 투과도를 시료의 두께로 나누어줌으로써 계산할 수 있다.

InN와 같은 직접 천이형 밴드갭 반도체의 밴드단(band edge) 근처에서 광학적 흡수계수 α는 밴드갭 에너지(E_g)와 광자 에너지 ħω에 대해서 식(3-1)과 같은 의존성을 나타낸다.¹⁶⁾

$$\alpha \propto (\hbar\omega - E_g)^{1/2} \quad (3-1)$$

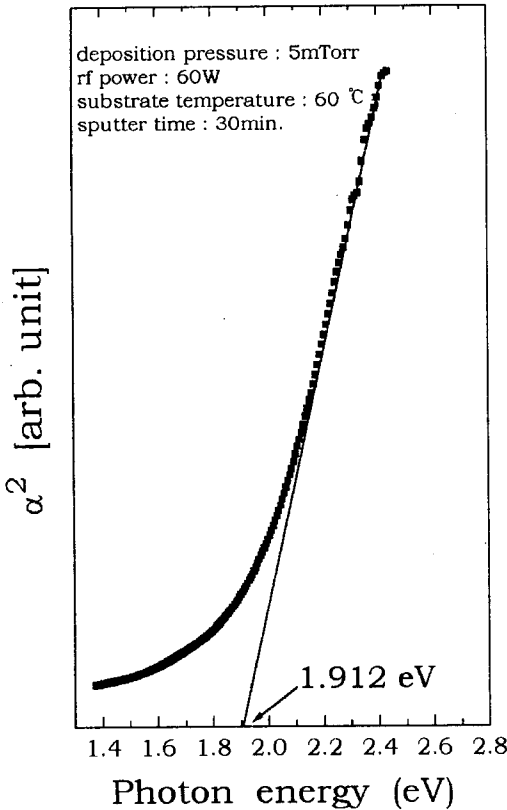


그림 7. InN/Si(100) 박막의 광학적 흡수 계수 제곱 곡선.
Fig. 7. Plot of optical absorption coefficient squared vs the photon energy for InN/Si(100) thin films.

고주파 출력을 60W, 기판 온도를 60°C, 스퍼터링 시간을 30분으로 고정하고 증착 압력이 5 mTorr 일 때 InN/Si(100) 박막의 광자 에너지에 대한 광학적 흡수계수 제곱 곡선을 그림 7에 나타내었다. 선형 의존하는 부분을 외삽하여 광학적 밴드갭을 구하였다. 광학적 밴드갭 $E_g=1.912\text{eV}$ 이상에서의 선형 의존성으로 보아 직접 천이형 밴드갭임을 알 수 있으며, 이러한 밴드갭은 Tansley등¹⁷⁾에 의하여 보고된($E_g=1.89\text{eV}$) 밴드갭보다 더 크다.

4. 결 론

본 연구에서는 고주파 반응성 스퍼터링법을 이용하여 In 타겟과 반응성 질소 가스 분위기에서 Si(100) 기판 위에 증착 압력, 고주파 출력, 기판 온도 등의 스퍼터링 변수를 변화시키면서 InN 박막을 증착하여 다음과 같은 특성을 관찰하였다.

1. 스퍼터링 변수에 대해서 XRD를 사용하여 결정질을 분석한 결과 증착 압력 5mTorr, 고주파 출력 60W, 기판 온도 60°C에서 c축 배향성이 우수한 wurtzite 구조의 InN 박막을 제작할 수 있었다.
2. 스퍼터링 변수에 대해서 홀 효과와 SEM을 측정한 결과 우수한 결정질을 보이는 조건인 5mTorr, 60W, 60°C에서 $212.526\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 의 가장 높은 홀 이동도와 $6.242 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 의 가장 낮은 캐리어 농도를 보였으며, 평탄한 표면 형상과 균일한 결정립 분포를 갖는 InN 박막을 얻을 수 있었다.
3. 광 투과도 측정에 의하여 계산된 광학적 흡수계수 제곱 곡선에 외삽하여 구한 광학적 밴드갭 이상에서의 선형 의존성으로 보아 직접 천이형 밴드갭임을 보기 좋게 있었으며, 증착 압력 5mTorr, 고주파 출력 60W, 기판 온도 60°C에서 이론치에 근접한 $E_g=1.912\text{eV}$ 값을 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 광주대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었음.

참고 문헌

1. I. Akasaki, H. Amano, H. Murakami, M. Sassa, and K. Manabe, "Growth of GaN and AlGaIn for UV blue p-n junction diodes", J. Crystal Growth, 128, 379(1993).
2. S. Nakamura, T. Mukai, and M. Senoh, "In situ monitoring and hall measurements of GaN grown with GaN buffer layers", J. Appl. Phys., 7(11), 5543(1992).
3. I. Akasaki, H. Amano, Y. Koide, K. Hiranmatsu, and N. Sawaki, "Effects of AlN buffer layer and on electrical and optical properties of GaN and $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ ($0 < x \leq 0.4$) films grown on sapphire substrate by MOVPE", J. Crystal Growth, 98, 209(1989).
4. J. B. MacChesney, P. M. Bridenbaugh and P. B. O'Connor, "Thermal stability of indium nitride at elevated temperatures and nitrogen pressures", Mater. Res. Bull., 5, 783(1970).
5. I. Grzegory, J. Jun, M. Bockowski, "III-V Nitrides : Thermodynamics and Crystal Growth at high N-2 pressure", J. Phys. Chem. solids, 56(3-4), 639(1995).

6. "Properties of group III-Nitrides", edited by James H. Edgar, INSPEC, 35(1994).
7. B. R. Natarajan, A. H. Eltoukhy, J. E. Greene, R. L. Barr, "Mechanisms of reactive sputtering of indium 1 : growth of InN in Mixed Ar-N₂ discharges", Thin Solid Films, 69, 201(1980).
8. Yuichi Sato, Susumu Sato, "Influence of growth rates on properties of InN thin films", J. Crystal Growth, 146, 262(1995).
9. T. J. Kistenmacher, S. A. Ecelberger and W. A. Bryden, "Buffer layer thickness and the properties of InN thin films on AlN-seeded (00·1) sapphire and (111) silicon", Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 339, 509(1994).
10. Yuichi Sato, Susumu Sato, "Growth of InN thin films by hydride vapor phase epitaxy", J. Crystal Growth, 144, 15(1994).
11. Qixin Guo, Hiroshi Ogawa, "Growth of InN films on GaAs(111) and GaP(111) substrates by microwave excited metalorganic vapor phase epitaxy", Appl. Phys. Lett., 66(6), 715(1995).
12. S. Strite, D. Chandrasekhar, David J. Smith, "Structural properties of InN films grown on GaAs substrates : observation of the zincblende polytype", J. Crystal Growth, 127, 204(1993).
13. T. L. Tansley, C. P. Foley, "Electron mobility in indium nitride", Electron Lett., 120, 1066(1984).
14. C. P. Foley, T. L. Tansley, "Morphology and Structure of indium nitride films", Appl. Surf. Scien. 22/23, 663(1985).
15. K. D. Möller, OPTICS, University Science Books, 284(1988).
16. T. L. Tansley and C. P. Foley, "Optical bandgap of indium nitride", J. Appl. Phys., 59(9), 3241(1986).
17. T. L. Tansley and C. P. Foley, "Infrared absorption in indium nitride", J. Appl. Phys., 60(5), 2092(1986).