

자화 유도 결합형 CH₄/H₂/Ar 플라즈마를 이용한 GaN 건식 식각 특성

論 文

49C - 4 - 1

Dry Etching Characteristics of GaN using a Magnetized Inductively Coupled CH₄/H₂/Ar Plasma

金文永* · 沈鍾庚** · 太興植*** · 李昉駿[§] · 李龍鉉^{§§} · 李正熙^{§§§} · 白榮植[#]
(Moon-Young Kim · Jong-Kyung Sim · Heung-Sik Tae · Ho-Jun Lee · Yong-Hyun Lee · Jung-Hee Lee · Young-Sik Baek)

Abstract - This paper proposes the improvement of the etch rate of GaN using a magnetized inductively coupled CH₄/H₂/Ar plasma. The gradient magnetic field with the axial direction is investigated using Gauss-meter and the ion current density is measured using double Langmuir probe. The applied magnetic field changes the ion current density profile in the radial direction, resulting in producing the higher density in the outer region than in the center. GaN dry etching process is carried out based on the measurements of the ion current density. The etch rate of 2000 Å/min is achieved with CH₄/H₂/Ar chemistries at 800 W input power, 250 W rf bias power, 10 mTorr pressure and 100 gauss magnetic field.

Key Words : a magnetized inductively coupled CH₄/H₂/Ar plasma, ion current density, GaN, dry etching, etch rate

1. 서 론

최근 들어 wide-band gap III-V족 질화 화합물의 청색 LED(Light Emitting Diode) 및 Laser의 구현이 가능해짐에 따라 그 응용범위가 고밀도 데이터 저장, 고출력 및 고온 전자 소자의 개발 등으로 넓어지고 있는 추세이다[1,2]. GaN는 뛰어난 화학적 안정성과 강한 결합력을 가지고 있고 또한 불활성 물질이므로 주로 화학 반응에 의해 식각하는 습식 식각은 낮은 식각률과 등방성 식각에 의해 수직된 식각 단면 형상이 어렵다. 따라서 활성종에 의한 화학적 식각 뿐만 아니라 기판으로 입사되는 이온 에너지에 의한 물리적인 식각도 더불어 할 수 있는 건식 식각이 각광을 받고 있다.

GaN 건식 식각은 RIE(reactive ion etching)[3], ECR(electron cyclotron resonance)[4], CAIBE(chemically assisted ion beam etching)[5], ICP(inductively coupled plasma)[6]등의 다양한 플라즈마 식각 장치에 의해 행하여지고 있다. ICP 플라즈마 식각 장치는 낮은 압력에서

고밀도 플라즈마가 구현되므로 이온화 효율을 높일 수 있어 식각률을 향상시킬 수 있고, 입력 전력과 바이어스 전력을 독립적으로 제어할 수 있으므로 이방성 식각에 의한 수직 단면이 가능하다. 또한 장치가 간단하며 안테나에 따라 대면적으로의 확대가 용이하다는 장점이 있다. GaN 건식 식각에 사용되는 소스 가스 또한 식각 공정시에 중요한 변수로 작용한다. 지금까지 Cl₂[7], BCl₃[8], ICl₃[9], HI[10], HBr[10], HCl[5], CH₄/H₂[6], SiCl₄[11] 등의 다양한 소스 가스가 GaN 식각에 사용되어져 왔다. CH₄/H₂ 플라즈마는 식각률이 다른 혼합 가스에 비해 비교적 낮다는 단점이 있으나,[12] 부식성과 독성이 없고 이방성 식각에 의한 수직 단면이 가능하고 표면을 부드럽게 하는 장점[4]이 있다.

본 연구진은 이미 자기장이 인가되지 않은 평판형 ICP 식각 장치에서 CH₄/H₂/Ar의 혼합 가스를 사용하여 900 Å/min 이상의 식각률과 1 nm 안팎의 rms roughness 식각 표면을 얻은 바 있으나, chlorine-based 식각 가스를 이용했을 때의 식각률과 비교하면 개선의 여지가 필요하다. 따라서 본 실험에서는 평판형 ICP 식각 장치에 보빈(bobbin)을 장착하여 외부 자기장을 인가해 줌으로써 입력 전력에 따라 플라즈마로의 전력 전달 효율과 플라즈마의 이온화 효율을 향상시키고, 이를 GaN 식각 공정에 적용시켜 CH₄/H₂ 플라즈마의 식각률이 chlorine-based 식각 가스를 이용했을 때의 식각률에 대해 비교적으로 낮은 단점을 개선함으로써 식각률을 향상시켜 공정의 최적화를 이루는데 목적이 있다.

* 正 會 員 : 慶北大 電子電氣工學部 博士課程

** 正 會 員 : 慶北大 電子電氣工學部 碩士

*** 正 會 員 : 慶北大 電子電氣工學部 助教授 · 工博

§ 正 會 員 : 威德大 電氣工學科 助教授 · 工博

§§ 正 會 員 : 慶北大 電子電氣工學部 正教授 · 工博

§§§ 正 會 員 : 慶北大 電子電氣工學部 副教授 · 工博

正 會 員 : 慶北大 電子電氣工學部 正教授 · 工博

接受日字 : 1999年 9月 20日

最終完了 : 2000年 2月 25日

2. 실험 방법

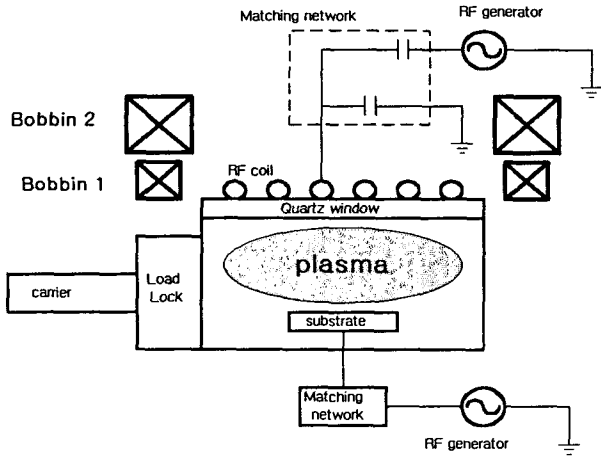


그림 1 자화 유도 결합형 플라즈마 식각 장치의 개략도
Fig. 1 A schematic diagram of a magnetized inductively coupled plasma etcher

실험에 사용된 건식 식각 장치는 기본적으로 GaN 박막 식각 응용을 고려하여 제작되었다. 그림 1은 평판형 ICP 식각 장치에 보빈을 장착했을 때 장치의 전체적인 개략도를 나타낸 것이다. 장치의 구성은 플라즈마 발생과 식각 공정을 수행하는 공정 챔버 부분, rf 전원(generator) 및 정합 회로(matching network) 그리고 rf 코일로 구성된 rf 입력부, 외부 자기장을 인가하기 위해 2개의 보빈으로 구성된 자기장 발생부로 나누어 질 수 있다.

공정 챔버는 내경 280 mm, 높이 120 mm인 원통형 구조이며 로드-락(load-lock) 챔버와 연결되어 있다. 챔버의 재질은 외부 자장이 차폐됨을 막기 위해 비자성체인 sus-316이 사용되었다. 배기는 터보 분자 펌프(turbo molecular pump)와 기계적 펌프(mechanical pump)로 이루어지며 기저 진공도를 10^{-6} Torr로 유지하였다. rf 투과창(window)은 진공 시스템에 적용하기에 문제가 없고, rf 자계를 손실 없이 투과시킬 수 있을 뿐만 아니라 대기압을 견딜 수 있는 기계적 강도가 있는 두께 17 mm의 석영(quartz)판을 사용하였다.

rf 코일의 경우 저항 손실을 최소화하기 위해 전기 전도도가 좋은 재질인 무산소 구리를 선택하였고, rf 전류는 전도 영역이 표피에 한정되므로 표면을 은으로 도금하여 외경이 220 mm가 되도록 등간격으로 4회 평면형으로 감겨진 형태이며, 장시간의 플라즈마 운전시 발생하는 저항 가열에 의한 코일의 과열을 막기 위해 냉각 라인이 안으로 흐르도록 설치되어 있다. 유도성 부하의 고주파 정합 회로는 100 pF와 500 pF의 진공용 콘덴서가 π 회로로 결합되어 있는 정합 회로를 사용하였다. rf 전원으로는 코일에 전력을 공급하여 플라즈마 밀도에 주된 영향을 주는 주파수 13.56 MHz, 2 kW의 용량을 가지는 rf 전원과 기판(substrate) 전극에 전력을 공급하여 기판으로 유입되는 이온 에너지를 조절하기 위한 주파수 13.56 MHz, 500 W 용량의 rf 전원이 사용되었다.

보빈은 외곽을 1 cm 두께의 플라스틱 재질로 만들었고 코일은 지름 2.6 mm에 에나멜 피복을 한 구리선을 사용하였다. rf 투과창 부근에 장착된 보빈 1은 내경 345 mm, 외

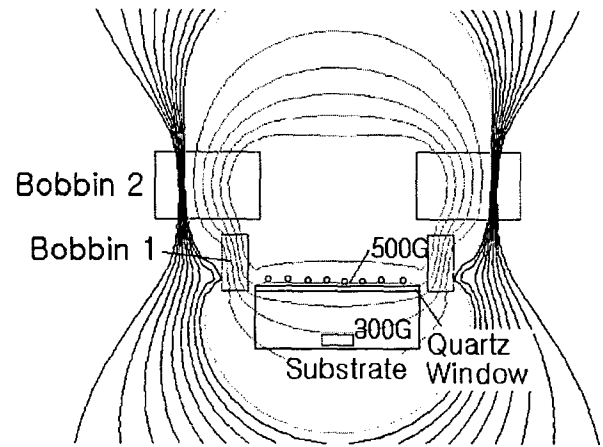


그림 2 10 A 전류 인가했을 때의 자기장 분포의 시뮬레이션
Fig. 2 A simulation of a magnetic field distribution at applied current 10 A

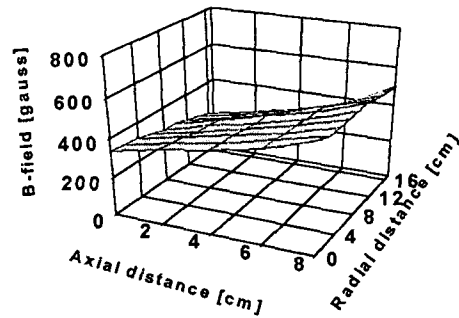


그림 3 10 A 전류 인가했을 때의 공정 챔버 내에서 자기장의 3차원 분포.
Fig. 3 Three dimension distribution of a magnetic field in process chamber at applied current 10 A

경 445 mm 및 높이 103 mm에 구리선을 510 회 감은 형태이고, 보빈 1로부터 약 3 cm 위에 장착된 보빈 2는 내경 300 mm, 외경 700 mm 및 높이 125 mm에 구리선을 2678 회 감았다. 큰 저항 때문에 열 발생률이 높을 경우를 대비하여, 보빈 폭의 중간 지점의 코일 사이에 냉각 라인을 넣어두었으며, 온도를 측정하기 위해 열전대 두 개를 냉각 라인 전후에 넣어 주었다. 보빈의 전류원은 정격 200 V, 15 A인 직류 전원 공급 장치(DC power supply)를 사용하였다.

그림 2은 전류원으로부터 전류 인가시 공정 챔버 내의 자기장의 변화를 시뮬레이션을 통해 나타낸 그림이다. 여기서 라인(line)은 등가우스면을 나타낸다. 전류원으로부터 10 A 전류를 인가했을 때 기판 부근에 300 G 정도의 자기장을 얻을 수 있었다. 보빈을 공정 챔버를 기준으로 대칭되게 장착하는 Helmholtz 구조에서는 축 방향(axial direction)에 대하여 균일한 자기장 분포^[13]를 보이지만, 보빈을 한쪽에만 설치할 경우 축 방향으로 기울기를 가짐을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 사용된 시뮬레

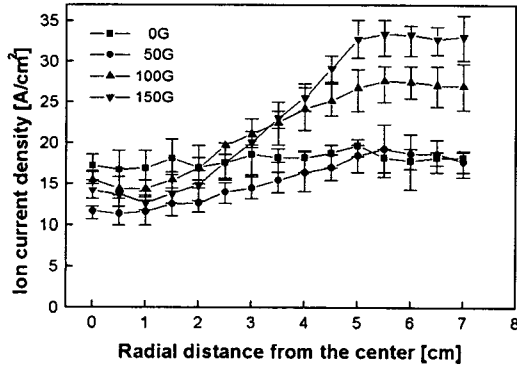


그림 4 인가된 자기장의 변화에 따른 중심으로부터 반경 방향으로의 이온 전류 밀도 변화 : 입력전력 800 W, 압력 5 mTorr, Ar 가스 유량 10 sccm

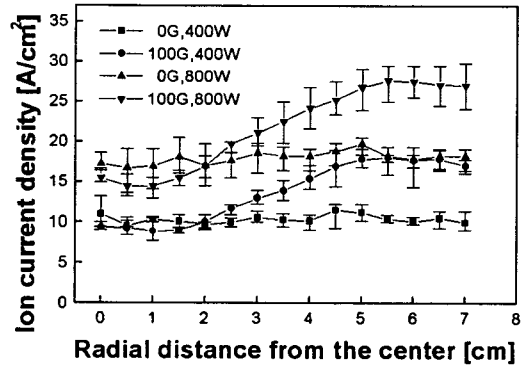
Fig. 4 Radial variation of ion current density as a function of the applied magnetic field : Input power 800 W, pressure 5 mTorr, Ar gas flow rate 10 sccm

이선은 솔레노이드 코일의 기하학적 위치와 암페어 턴(Ampere turn)의 변화에 따른 공간적인 자기장 변화를 모의 실험 할 수 있는 본 연구진이 자체적으로 C 언어를 이용하여 개발한 프로그램이다.

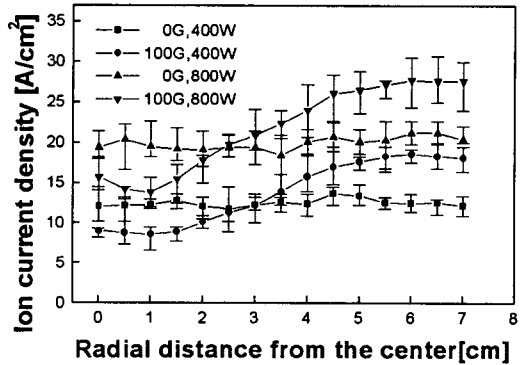
그림 3은 시뮬레이션과의 일치성을 확인하기 위해 실제로 제작된 보빈에서 만들어지는 자기장의 분포를 가우스-메타(Gauss-meter)로 측정하여 3차원 도표로 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 축 방향으로 자기장의 크기가 증가함을 확인할 수 있다. 따라서, 제작된 보빈에서 만들어지는 자기장의 분포는 시뮬레이션을 통한 자기장의 분포와 일치함을 알 수 있다.

플라즈마의 기본적인 물성인 이온 전류 밀도를 측정하기 위해 이중 랑뮤어 프로브(double Langmuir probe)를 제작하여 실험에 사용하였다. 랑뮤어 프로브법[14]은 플라즈마 측정 방법 중에서 비교적 손쉽고 간단한 장치이며, 정밀한 측정이 요구되지 않는 일반 실험실의 플라즈마 측정에 많이 사용되고 있다. 일반적으로 공정 챔버 내벽이 금속으로 만들어지고 접지 되었을 경우에는 단일 프로브를 쓰지만, 챔버가 자화된 경우에는 자기장의 영향을 덜 받는 이중 랑뮤어 프로브를 사용한다. 본 실험에 사용된 이중 랑뮤어 프로브는 0.45 mm 직경의 텅스텐 선을 넣은 상태에서 노출된 부분의 길이가 3 mm 정도 되도록 제작하였다. 또한 단락되지 않도록 세라믹 관으로 절연시켰고, 플라즈마 특성 분석을 위해 이중 랑뮤어 프로브는 기관으로부터 위로 약 3 cm 되는 지점에서 측정하였다.

건식 식각에 사용된 시편은 사파이어 기관 위에 MOCVD(metal organic chemical vapor deposition)에 의해 성장된 캐리어 농도 $1 \sim 2 \times 10^{17} / \text{cm}^3$, 1.5 μm 두께의 도핑이 되지 않은 GaN 박막이다. 식각 실험에 사용된 마스크는 PECVD(plasma enhanced chemical vapor deposition)로 성장된 약 4000 Å 정도 두께의 SiO₂를 사용하였다.



(a)



(b)

그림 5 압력 및 인가된 자기장의 변화에 따른 중심으로부터 반경 방향으로의 이온 전류 밀도 변화 : (a) 5 mTorr (b) 10 mTorr

Fig. 5 Radial variation of ion current density as a function of the applied magnetic field at different pressure : (a) 5 mTorr (b) 10 mTorr

공정 챔버는 일정한 벽면 상태를 유지하기 위해 식각 전·후에 10분간의 산소 방전으로 플라즈마 세정(plasma cleaning)을 하였고, 기저 압력을 10^{-6} Torr 영역대의 저압력으로 일정하게 유지하였다.

식각 실험후 표면 분석과 식각 정도 및 식각 단면 형상을 측정하기 위한 분석 장비로는 Alpha-step 200과 SEM(Scanning Electron Microscopy)을 사용하였고, rms(root-mean-square) surface roughness와 3-dimension etched surface를 측정하기 위해 AFM(Atomic Force Microscopy)으로써 식각된 표면의 거친 정도를 측정 분석하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 4는 제작된 이중 랑뮤어 프로브를 이용하여 이온 전류 밀도를 최고값과 최저값을 제외한 나머지의 평균과

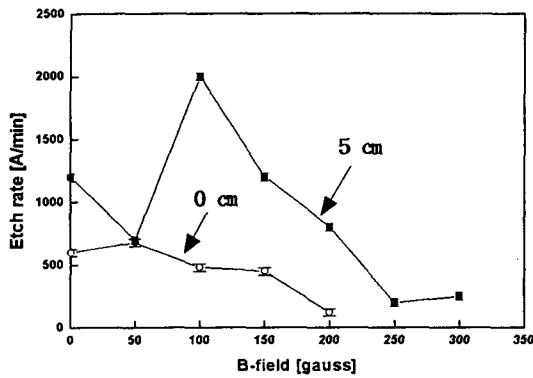


그림 6 외부 자기장에 따른 GaN 식각률의 변화 : 입력전력 800 W, rf 바이어스 전력 250 W, 압력 10 mTorr

Fig. 6 Variation of etch rate of GaN as a function of a external magnetic field : Input power 800 W, rf bias Power 250 W, pressure 10 mTorr

편차를 사용하여 중심에서부터 반경방향으로 측정하였다. 자화되지 않은 경우(0 G)일 때는 측정범위 내에서 반경 방향으로 거의 균일하다. 하지만 자기장이 인가되면서 비균일하게 된다. 또한 100 G와 150 G에서는 중심 부근에서 이온 전류 밀도가 자화되지 않은 경우 일 때 보다 작지만 반경 방향으로 증가하면서 더 커지게 된다. 또한 반경 방향으로 5~7 cm의 범위에서 이온 전류 밀도가 균일함을 볼 수 있다. 이는 자기장의 인가에 따른 확산의 제약에 기인한다. 일반적으로 평판형 유도 결합 플라즈마 소스에서 전기장의 세기가 가장 큰 영역은, 대략 안테나 반경의 1/2되는 부근으로 이 영역에서 플라즈마로의 전력전달 및 이온화율이 가장 높을 것으로 추정된다.[15] 자화되지 않은 경우일 때는 등방적 확산 과정이 플라즈마 밀도 분포에 큰 영향을 미치지만 외부 자장에 의해 반경방향으로의 확산이 제한 될 경우 밀도 분포가 이온-전자쌍의 생성 분포에 의해 결정될 확률이 높다. 반경방향으로의 전류 밀도 분포는 불균일 해졌으나 100 G 정도의 외부자장 인가에 의해 공정 챔버 유효 체적내의 총 하전 입자수는 크게 증가하였다. 따라서 전자-이온쌍의 생성 분포를 균일하게 조절할 경우 고효율, 고균일도를 가지는 식각 시스템으로 발전시킬 수 있을 것으로 생각된다.

그림 5는 압력 변화에 따른 이온 전류 밀도를 보여준다. 그림에 나타난 바와 같이 자화되지 않은 경우와 100 G 모두 입력 전력이 증가함에 따라 이온 전류 밀도가 증가하였다. 압력에 대해서는 이온 전류 밀도 증가 경향은 비슷하지만 증가폭의 차이가 있음을 보여준다. 압력에 대한 이온 전류 밀도의 증가폭을 반경 방향으로 6 cm되는 지점을 기준으로 계산하였을 때 5 mTorr에서는 입력 전력 400 W에서 자기장을 0 G에서 100 G로 증가시켰을 때 평균 이온 전류 밀도 증가율이 76 %이었으며, 10 mTorr에서 입력 전력 400W일 때 자기장을 0 G에서 100 G로 증가시켰을 때 평균 이온 전류 밀도 증가율은 48.8 %이었다. 그리고, 5 mTorr에서 입력

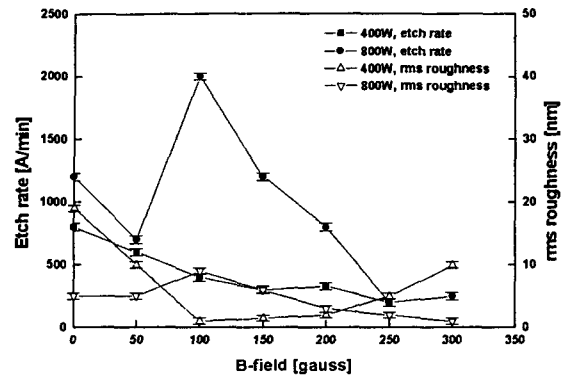
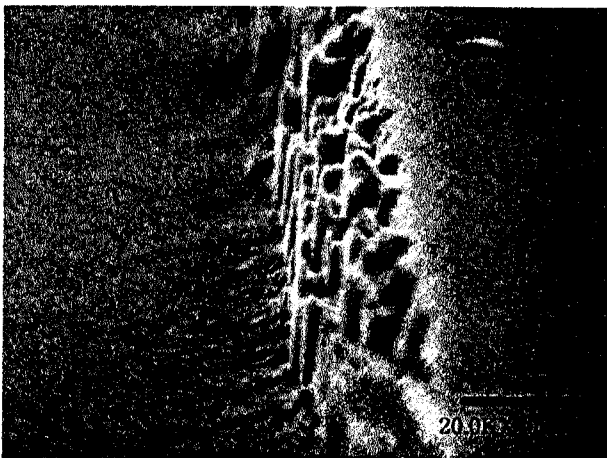


그림 7 외부 자기장에 따른 GaN의 식각률과 rms roughness 변화 : rf 바이어스 전력 250 W, 압력 10 mTorr

Fig. 7 Variation of etch rate and rms roughness of GaN as a function of a external magnetic field : rf bias power 250 W, pressure 10 mTorr

전력 800 W조건에서 자기장을 역시 0 G에서 100 G로 증가시켰을 때 평균 이온 전류 밀도 증가율이 54.5 %이었으며, 10 mTorr에서는 입력 전력 800 W조건에서 자기장을 0 G에서 100 G로 증가시켰을 때 평균 이온 전류 밀도 증가율은 30.7 %이었다. 이와 같이 압력이 낮을수록 더 높은 이온 전류 밀도의 증가폭을 보였고 이것으로 보아 자기장의 영향이 압력이 낮을수록 더 커짐을 알 수 있었다. 일반적으로, 압력이 낮은 경우는 전자가 가지는 평균 자유 경로(mean free path)가 크므로 전자는 충분히 가속되지만 중성 입자와의 낮은 충돌확률로 인하여 이온화 효율이 떨어지게 된다. 그러나, 자기장이 인가되면 전자는 자기장에 수직되게 사이클로트론 운동을 하게 되므로 중성 입자와의 충돌확률을 높게 되어 이온화 효율이 증대된다. 따라서 플라즈마 밀도와 연관이 있는 이온 전류 밀도는 저압에서 자기장의 영향을 클 경우에 이온화 효율이 증가함을 알 수 있다.

이온 전류 밀도 측정의 결과를 바탕으로 하여 GaN 박막의 건식 식각 실험을 수행하였다. 기판 중심 부근은 자기장이 증가할수록 이온 전류 밀도가 감소하고 반경방향으로 갈수록 증가했는 것을 감안하여, 건식 식각 실험은 중심과 5 cm 두 지점을 선정하고 자기장 인가시의 변화 양상을 살펴보았다. 그림 6은 800 W 입력 전력, 250 W rf 바이어스 전력, 10 mTorr 압력과 CH₄ 유량 10 sccm, H₂ 유량 15 sccm, Ar 유량 5 sccm 조건에서 자기장 변화에 따른 GaN의 식각률을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 중심보다는 반경방향으로 5 cm 위치한 곳에서 더 높은 식각률을 보였다. 이는 중심에서 5 cm 떨어진 지점에서 이온 전류 밀도 측정 결과를 비교해 볼 때 자장의 증가에 따라 이온 전류 밀도는 증가하지만, 식각률은 같은 경향을 나타내고 있지않다. 그 이유는 이온에 의한 식각보다는 이온 도우메에 의한 중성 입자의 화학적 반응에 의한 식각 공정(ion-assisted chemical etching process)의 의존도가 높다고 할 수 있기 때문이다. 즉, 본 장치에서 5 cm



(a)



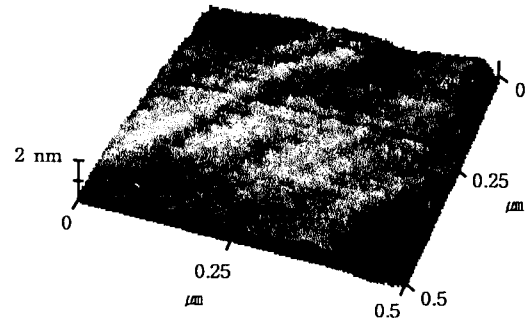
(b)

그림 8 식각된 GaN의 SEM 사진 : 입력 전력 800 W, rf 바이어스 전력 250 W, 압력 10 mTorr, (a) 0 G (b) 100 G

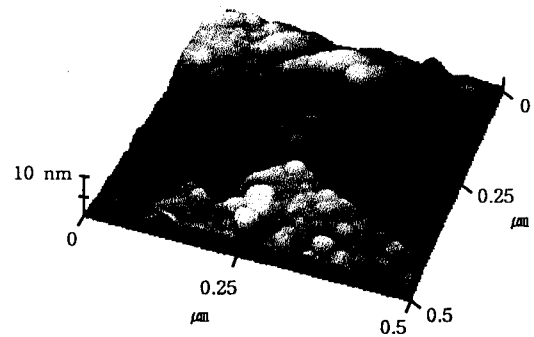
Fig. 8 SEM photograph of etched GaN : Input power 800 W, rf bias power 250 W, pressure 10 mTorr, (a) 0 G (b) 100 G

지점에서 100 G 자기장 인가시에 이은 도움에 의한 중성 입자의 효율적 식각 반응이 수행된 것으로 생각할 수 있다.

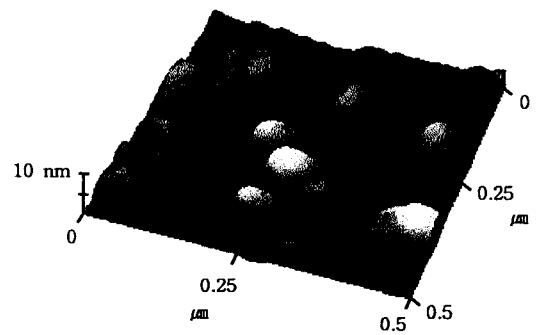
그림 6에서의 공정 챔버 중심과 반경 방향의 5 cm 위치한 지점에 대해 자기장의 변화에 따른 식각률 변화를 바탕으로 하여 그림 7은 250 W rf 바이어스 전력, 10 mTorr 압력과 CH₄ 유량 10 sccm, H₂ 유량 15 sccm, Ar 유량 5 sccm 조건 하에서, 중심에서 반경방향으로 5 cm 위치한 지점에서의 입력전력 및 자기장에 따른 GaN의 식각률과 식각된 GaN 표면의 rms roughness를 보여준다. 입력전력 400 W와 비교하여 800 W 일 때 높은 식각률이 보였고, 800 W 입력 전력, 100 G 자기장 인가시 약 2000 Å/min 으로 자화 되지 않을 때 보다 1.7 배의 식각률을 얻을 수 있었다. GaN의 식각된 표면은 외부 자장의 인가에 의해 자화 되지 않을 때 보다 식각률이 1.7 배정도 증가하였음에도 불구하고 rms roughness는 10 nm이하로 비교적 평



(a)



(b)



(c)

그림 9 식각된 GaN의 AFM 표면 상태 : 입력 전력 800 W, rf 바이어스 전력 250 W, 압력 10 mTorr, (a) unetched (b) 0 G (c) 100 G

Fig. 9 AFM surface morphology of etched GaN : Input power 800 W, rf bias power 250 W, pressure 10 mTorr, (a) unetched (b) 0 G (c) 100 G

탄하고 부드러운 식각 표면을 형성하였다.

그림 8은 입력 전력 800 W에서 자화되지 않은 경우와 100 G의 자기장을 인가한 경우의 SEM 사진을 나타낸 것이다. 식각 마스크의 완벽한 패턴 구현의 어려움으로

수직된 식각 단면을 형성하진 못했지만, 자기장을 인가했을 때 높은 식각률을 얻을 수가 있었다.

그림 9는 입력 전력 800 W일 때의 자화 되지 않은 경우와 100 G의 자기장을 인가했을 때의 AFM 표면 상태를 식각하기 전의 표면과 비교하여 나타낸 것이다. 자화 되지 않은 경우와 자기장 100 G를 인가했을 때 모두 10 nm 이하의 식각 표면을 이룰 수 있었으며, 자기장의 변화에 따른 식각된 표면의 거친 정도는 변화가 없음을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는, 자화 유도 결합형 CH₄/H₂/Ar 플라즈마 식각 장치를 제작하여 플라즈마의 기본적인 특성을 측정하고, 이를 바탕으로 하여 GaN 건식 식각 공정에 응용하였다.

제작된 보빈에서 10 A의 전류를 인가했을 때 기판부근의 자기장이 300 G로 만들어지는 자기장의 분포는 시뮬레이션을 통한 자기장의 분포와 일치함을 알 수 있었고, 이중 랑뮤어 프로브를 제작하여 이온 전류 밀도를 측정한 결과 자기장 인가했을 때 반경방향으로의 이온 전류 밀도 분포는 반경방향으로의 확산 제한에 의해 불균일해졌으나 외부자장 인가에 의해 공정 챔버 유효 체적내의 총 하전 입자수는 크게 증가한 것을 알 수 있었다. 또한 같은 입력 전력에서 10 mTorr의 압력에서 보다 5 mTorr의 압력에서 이온 전류 밀도의 증가율이 더 큼을 알 수 있었다.

이온 전류 밀도 측정을 바탕으로 GaN 박막의 건식 식각 실험 결과 자기장의 변화에 따라 기판 중심에서부터 반경방향으로 5 cm 위치한 곳에서 식각률이 중심에서의 식각률보다 높음을 확인하여 이온 전류밀도 측정결과와 그 경향이 일치함을 알 수 있었고, GaN 건식 식각의 최적 공정 조건을 형성하는 과정에서 800 W 입력 전력, 250 W rf 바이어스 전력, 10 mTorr 공정 압력, CH₄ 유량 10 sccm, H₂ 유량 15 sccm, Ar 유량 5 sccm, 100 G 외부 자장의 조건에서 자화 되지 않은 경우와 비교해서 1.7 배 높은 식각률인 2000 Å/min의 최대 식각률을 얻을 수 있었으며, 식각된 GaN의 표면 또한 10 nm의 rms roughness로 비교적 평탄하고 부드러운 식각 표면을 이룰 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 학술진흥재단의 과학 기술 기초 중점지원(반도체 분야 : 과제번호 1998-016-E00016)으로 진행되었기에 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

[1] S. Nakamura, "Highly p-typed Mg-doped GaN films grown with GaN buffer layers," Japanese

Journal of Applied Physics, vol. 30, no. 10A, pp. L1708, 1991.

- [2] H. Amano, "P-typed conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy electron beam irradiation," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 28, no. 12, pp. L2112, 1989.
- [3] M. E. Lin, "Reactive ion etching of GaN using BCl₃," Applied Physics Letters, vol. 64, no. 7, pp. 887, 1994.
- [4] R. J. Shul, "High temperature electron cyclotron resonance etching of GaN, InN, and AlN," Applied Physics Letters, vol. 66, no. 14, pp. 1761, 1995.
- [5] I. Adesida, "Characteristics of chemically assisted ion beam etching of gallium nitride," Applied Physics Letters, vol. 67, pp. 1250, 1995.
- [6] C. B. Vartuli, "Inductively coupled plasma etching of III-V Nitrides in CH₄/H₂/Ar and CH₄/H₂/N₂ chemistries," Journal of Electrochemical Society, vol. 144, no. 8, pp. 2844, 1997.
- [7] R.J. Shul, "Inductively coupled plasma etching of GaN," Applied Physics Letters, vol. 69, pp. 1119, 1996.
- [8] S. J. Pearton, "High etch rates of GaN with magnetron reactive ion etching in BCl₃ plasmas," Applied Physics Letters, vol. 66, no. 24, pp. 3328, 1995.
- [9] C. B. Vartuli, "Plasma etching of III-nitrides in ICl/Ar and IBr/Ar plasmas," Journal of Vacuum Science Technology A, vol. 15, no. 3, pp. 638, 1997.
- [10] S. J. Pearton, "ECR plasma etching of GaN, AlN, and InN using iodine or bromine chemistries," Electronics Letters, vol. 30, no. 23, pp. 1985, 1995.
- [11] L. Zhang, "Electron cyclotron resonance etching characteristics of GaN in SiCl₄/Ar," Applied Physics Letters, vol. 68, pp. 367, 1996.
- [12] G. F. McLane, "Magnetron enhanced reactive ion etching of GaAs in CH₄/H₂/Ar : Surface damage study," Journal of Vacuum Science Technology A, vol. 12, no. 4, pp. 1356, 1994.
- [13] 이 호준, "자화 유도 결합 플라즈마의 건식 식각 특성에 관한 연구," 서울대학교 전기공학박사학위논문, 1996.
- [14] I. H. Hutchison, Principles of Plasma Diagnostics, Cambridge University Press, pp. 10-49, 1987
- [15] J. Hopwood, "Electromagnetic fields in a radio-frequency induction plasma," Journal of Vacuum Science Technology A, vol. 11, no. 1, pp. 147, 1993.

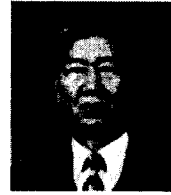
저 자 소 개



김 문 영 (金 文 永)

1970년 6월 28일생. 1996년 경북대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 053-940-8663, Fax : 053-950-5505
E-mail: mykim@palgong.kyungpook.ac.kr



이 용 현 (李 龍 鉉)

1946년 3월 17일생. 1975년 경북대 (학사) 1977년 동 대학교 (석사) 1991년 충남대 (공학) 현재 경북대 전자전기공학부 교수

Tel : 053-950-5520
E-mail : yhlee@ee.kyungpook.ac.kr



심 중 경 (沈 鍾 庚)

1970년 5월 23일생. 1994년 충북대 전기공학과 졸업. 1999년 경북대 대학원 전기공학과 졸업(석사)

Tel : 053-940-8663, Fax : 053-950-5505
E-mail : simson0505@hanmail.net



이 정 희 (李 正 熙)

1957년 6월 30일생. 1979년 경북대 전자공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1986년 Florida Institute Technology, Electrical and computer Eng. 졸업(석사). 1990년 North Carolina

State University, Electrical and computer Eng. 졸업(공학). 1990년~1993년 한국전자통신연구소 선임연구원. 현재 경북대 전자전기공학부 부교수

Tel : 053-950-6555
E-mail : jlee@ee.kyungpook.ac.kr



태 흥 식 (太 興 植)

1962년 11월 14일생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 경북대 전자전기공학부 조교수

Tel : 053-950-6563, Fax : 053-950-5505
E-mail : hstae@ee.kyungpook.ac.kr



백 영 식 (白 榮 植)

1950년 7월 8일생. 1974년 서울대 전기공학과 졸업. 1977년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1977년 명지대 전기공학과 조교수. 현재 경북대 전자전기공학부 교수

Tel : 053-950-5602
E-mail : ysbaek@bh.kyungpook.ac.kr



이 호 준 (李 戶 駿)

1966년 10월 14일생. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학). 1996년~1998년 Kyoto University, Venture Business Lab. 강사. 1998년~1999년 경북대 전자전

기공학부 연구원. 현재 위덕대 전기공학과 조교수

Tel : 0561-760-1663
E-mail : hjlee@viro.uiduk.ac.kr