

평판형 유도 결합 플라즈마를 이용한 GaN 건식 식각 특성

김문영⁰, 김태현, 장상훈, 태홍식
경북대학교 전기공학과

GaN Dry Etching Characteristics using a planar inductively coupled plasma

Moon-Young Kim, Tae-Hyun Kim, Sang-Hun Jang, Heung-Sik Tae
Dep. of Electrical Eng. Kyungpook National University

Abstract

The reliable etching process is one of the essential steps in fabricating GaN based-device. High etch rate is needed to obtain a deeply etched structure and perfect anisotropic etched facet is needed to obtain lasing profile. In the research, therefore, we had proposed a planar inductively coupled plasma etcher (Planar ICP Etcher) as a high density plasma source, and studied the etching mechanism using the $Cl_2/H_2/Ar$ gas mixture. Dry etching characteristics such as etch rate, anisotropic etching profile and so on, for the III-V nitride layers were investigated using Planar ICP Etcher, based on the plasma characteristic as a variation of plasma process parameters.

1. 서론

광반도체 기술은 고속, 고밀도, 고효율의 정보처리 및 정보 표시 능력을 가진 새로운 광소자 개발을 위한 요소 기반 기술이다. 차세대 유망 wide band gap 재료 중의 하나인 GaN를 이용한 신소자는 광소자, 고출력 소자등 응용범위가 광대하므로 선진 각국에서 현재 매우 적극적으로 연구가 진행되고 있다. MOCVD(Molecular Organic Chemical Vapor Deposition)법에 의한 사파이어 기판 위에 양질의 GaN 단결정 성장 및 doping 기술에 대한 연구는[1,2] 지난 수년간 괄목할 만한 성장이 있어 왔으나 III-Vnitride를 이용한 광소자 개발을 위한 공정 개발 영역에 있어서는 여전히 해결하여야 할 많은 문제를 가지고 있으며, 특히 GaN 식각 문제는 소자 제조를 위해서 반드시 필요한 공정이다. GaN 건식 식각 공정에 제안되는 장치들은 ECR 플라즈마, 헬리콘 플라즈마(Helicon Plasma), 헬리칼 공진기(Helical Resonator), 유도 결합 플라즈마(Inductively Coupled Plasma), 전자빔 여기 플라즈마(Electron Beam Excited Plasma)등 저압 고밀도 플라즈마 소스(Low Pressure High Density Plasma Source, HDP)들이다. 이들 플라즈마 소스 중에서 평판형 유도 결합 플라즈마[3,4]는 고주파 전류가 방전 가스중에서 시간적으로 변화하는 자장을 만들어 내고, 시간변화하는 자장이 회전하는 전기장을 생성하여 플라즈마를 발생, 유지하게 되는 것으로 지금까지 흔히 사용되어 왔던 용량 결합형 플라즈마(Capacitively Coupled Plasma, CCP)에 비교하여 동작 압력이 비교적 낮은 반면 높은 플라즈마 밀도를 가지고, 플라즈마를 생성하는 진공챔버내에 방전용 전극을 갖지 않으므로 전극의 스퍼팅(sputtering) 현상등에 의한 플라즈마중으로의 불순물의 혼입이 작다. 그리고 ECR이나 Helicon Wave

Plasma Source와 비교하여 작동원리에서 강력한 외부 자장을 이용하지 않으므로 플라즈마 균일도와 플라즈마 면적을 증가시키는 것이 용이하고 장치의 구조가 매우 간단할 뿐만 아니라 기판(substrate)바로 위에서 플라즈마가 형성되므로 플라즈마는 직접 반응에 사용할 수 있는 장점을 가지고 있으므로, 평판형 유도 결합 플라즈마 소스를 이용하여 독립적인 이온 에너지를 조절, 저압 공정을 가능하게 하여 GaN계 III-V 질화화합물의 광소자 제조시 요구되는 깊게 식각된 구조와 레이저 다이오드를 제작하기 위한 완벽한 비등방성 식각을 만족할 수 있을 것이라 생각된다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 장치는 기본적으로 GaN막 식각 응용을 고려하여 제작되었다. 공정 챔버의 내경이 280mm, 높이가 120mm인 원통형 구조이며, magnetic carrier를 가진 Load-Lock chamber와 연결되어 있다. 배기는 Turbo Molecular Pump와 Mechanical Pump로 이루어지며, 기저 진공도를 10^{-6} Torr로 유지하였다. RF window는 두께 17mm의 quartz판을 RF 투과창으로서 사용하였다. 그림 1은 제작된 평판형 유도 결합 플라즈마 발생 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 제작된 안테나는 제철이 은으로 도금된 구리판으로 외경이 220mm가 되도록 등간격으로 4회 평면형으로 감겨진 형태이며, 장시간의 플라즈마 운전시 발생하는 저항 가열에 의한 코일의 과열을 막기 위해 냉각 라인이 안으로 흐르도록 설치되어 있다. RF 전원으로는 주파수 13.56MHz, 2kW의 용량을 가지는 RF20S Generator가 사용되었으며, 코일에 전력을 인가하여 플라즈마 밀도 조절의 역할을 하고, 기판 전극에 전력을 인가하여 negative-self bias 전압을 조절하는 RF5S Generator가 사용되었다. 실험에서 플라즈마 밀도 측정으로 사용된 탐침은 0.45mm 직경의 텅스텐 선을 낚은 상태로 노출된 부분의 길이가 3mm 정도 되도록 제작되었으며, 기판은

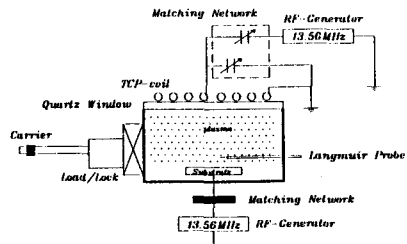


그림 1. 평판형 유도 결합 플라즈마 발생 장치의 개략도.

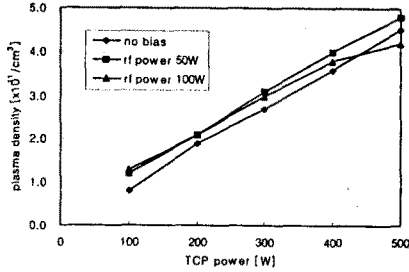


그림 2. 입력 전력에 따른 플라즈마 밀도의 변화.

로부터 약 1cm위에 위치한 곳에서 반경 방향을 따라 이동하면서 측정하였다. 식각에 사용된 GaN막은 MOCVD법에 의해 사파이어(sapphire) 기판위에서 성장된 1μm 정도의 두께를 가진 가로, 세로 1cm 크기인 표본(sample)이다. 실험에 사용된 mask는 약4000Å 두께의 Al막으로 사용하였다. 식각 가스로는 Ga(Galium)을 식각하기 위한 CH₄(methane), N(Nitrogen)을 식각하기 위한 H₂(hydrogen), 그리고 물리적 식각을 위한 Ar을 사용하였으며, 전체 유량을 30sccm으로 일정하게 유지하였다. 식각 실험후 표면 분석과 식각 정도 및 식각 단면 형상도를 측정하기 위한 분석 장비로는 α-step 200과 SEM(Scanning Electron Microscopy)로써 식각 속도와 식각 단면의 비등방정도를 측정 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰.

그림 2는 입력 전력(TCP source power)에 따른 플라즈마 밀도의 변화를 나타내는 것으로 입력 전력을 100W에서 500W로 증가함에 따라 플라즈마 밀도는 $0.8 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ 에서 $4.5 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ 으로 선형적으로 증가하는 반면, RF bias용 입력 전력의 증가에 따른 플라즈마 밀도의 증가는 큰 변화를 나타내지 않고 있다. 그림 3과 같은 반경 방향의 플라즈마 밀도 분포 변화는 플라즈마의 고유 성질의 하나인 양극 확산(ambipolar diffusion)에 기인하는 것으로 중심에서 반경 방향으로 거리가 멀어질수록 플라즈마 밀도가 줄어드는 것을 알 수 있다. 균일한 분포를 가지는 영역의 면적을 안테나의 크기, 구조와 관계가 있는 것으로 생각되며, 평면, 나선형으로 감겨진 안테나의 경우 중심 부분에서 유도 전계의 크기가 최대가 되므로 균일한 밀도 분포를 가지는 영역은 안테나의 크기보다 작게 됨을 알 수 있다. 또 그림에서와 같이 RF bias 전력을 가한 경우에 있어 RF bias전력을 인가하지 않은 경우보다 플라즈마 밀도의 균일도가 더 우수하게 나타남을 알 수 있다. 이는 RF bias 전력을 인가함으로써 생성되는 기판 주변의 전장으로 인한 플라즈마 밀도가 균일화된 것으로 사료된다. 그림 4는 압력에 따른 플라즈마 밀도 변화 측정 결과를 보여 준다. 저압 영역에서 플라즈마 밀도는 큰

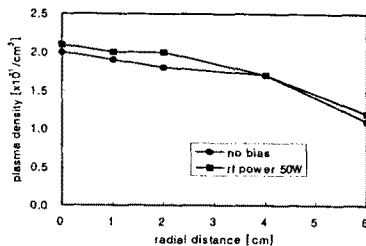


그림 3. 반경 방향의 플라즈마 밀도 분포.

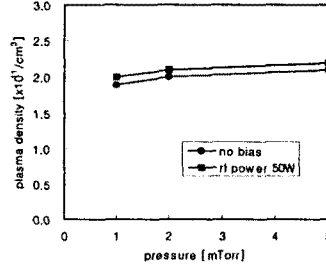


그림 4. 압력에 따른 플라즈마 밀도의 변화.

변화가 없었지만, 압력에 따른 플라즈마 밀도의 증가는 전력 전달 효율 및 중성 입자 밀도의 증가에 기인하는 양상을 알 수 있다. 저압 영역에서는 전자-중성 입자간의 충돌 횟수가 줄어들어 전자의 이동도가 증가하고 손실이 많아지면, 플라즈마가 유지되기 위해서 전자의 생성률도 증가해야 되므로 전자 온도는 증가한다. 실제 측정된 저압 영역에서의 전자 온도는 약 6eV이었다.

식각 실험에 있어서 dc bias 전압과 RF bias 전력의 변화는 중요한 공정 변수 중의 하나이다. 그림 5는 각 dc bias 전압에 따라 입력 전력 변화에 따른 RF bias 전력의 변화를 측정된 것이다. 일정 dc bias 전압에서 입력 전력 증가에 따라 RF bias 전력은 거의 선형적으로 증가하였다. 이는 식각 실험에 있어서 입력 전력 증가에 따른 bias 전압의 증가를 조절할 수 있는 기본 변수로 적용 가능하다.

입력 전력인 TCP source power의 증가는 생성 측면에서 플라즈마 발생의 원동력 격인 전자의 에너지 전달 효과가 커지므로 이온화율을 증가 시킨다. 따라서 플라즈마 밀도 및 이온 전류 밀도의 증가와 더불어 중성 기체의 해리율을 증가시켜 활성화 입자 혹은 라디칼(radical)의 밀도를 증가시킨다. 입력 전력에 따른 식각 속도의 변화 경향을 보기 위해 bias용 입력 전력을 가변하여 dc negative -self bias가 일정하게 유지되도록 하였으며, 2mTorr 압력에서 실험하였다. 그림 6은 각 식각 가스 조성비에서 입력 전력의 증가에 따른 식각 속도를 나타낸 것이다. Ga(Galium)의 경우 CH₄(methane)과 반응하여 (CH₃)₂Ga 결합 형태로[5], N(Nitride)의 경우 H₂(hydrogen)과 반응하여 NHx종 형태로[6] 결합하여 화학적 식각이 이루어 지게 되고, Ar(argon)은 주로 물리적 식각에 기여하면서 식각이 진행되어 진다. 그림에서와 같이 CH₄(methane)보다 Ar(argon)의 조성비를 더 크게 하였을 때 높은 식각 속도를 얻을 수 있었는데, 이는 Ar의 역할이 반응에 참여하는 활성화종들에게 영향을 줄 뿐 아니라 물리적 식각을 더 많이 이루는 것으로 식각 속도 증가의 원인으로 생각된다. 그림 7은 입력 전력을 일정하게 유지하고 일정 압력에서 bias용 입력 전력을 가변하여 dc bias 변화에 따른

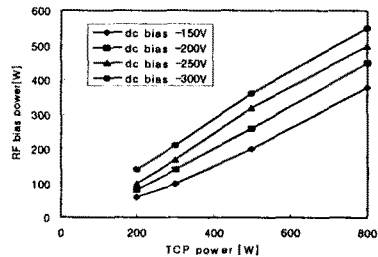


그림 5. 입력 전력에 따른 RF bias 전력의 변화.

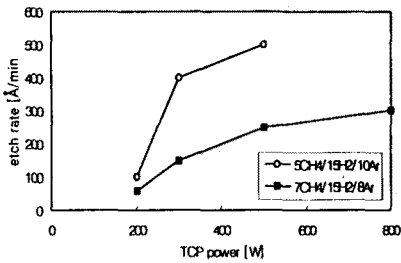


그림 6. 입력 전력에 따른 식각 속도의 변화.

식각 속도를 나타낸 것이다. 기판으로 입사되어 방향성이 있는 이온 에너지에 의해 입력 전력만을 가변했을 때 보다 더 높은 식각 속도를 나타내어 진다. 기판에 입사하는 이온 에너지의 압력 의존성은 플라즈마 밀도 증가와 sheath에서의 탄성 충돌 및 전하 교환 충돌 빈도 증가의 두 가지 요인이 각각 이온 에너지 증가 및 감소의 방향으로 작용한다. 그림 8은 일정 압력 전력과 bias 전압을 인가한 상태에서 압력 변화에 따른 식각 속도 변화를 보여준다. bias 전력의 대부분은 sheath에서 이온 전류, 즉 이온 에너지를 구동하는데 소모된다고 생각할 수 있으므로

$$P_{bias} = I_{ion} \times V_d$$

의 관계로부터 압력이 감소할수록 이온 전류가 증가함을 알 수 있다.[7] 이온 도우에 의한 식각(ion assisted etching)에서 식각 속도를 제한하는 요인을 이온 에너지와 중성 radical flux 로 나누어 볼 때, 식각 속도의 최대점을 기준으로 낮은 압력에서는 중성 활성화 종이, 높은 압력에서는 이온 에너지가 각각 식각 속도를 제한하는 변수가 된다.

4. 결론.

평판형 유도 결합 플라즈마를 이용한 GaN 건식 식각 공정에 주된 연구 결과는 Langmuir probe를 사용하여 평판형 유도 결합 플라즈마 내의 밀도를 측정된 결과 약 $10^{11}/cm^3$ 의 고밀도 플라즈마 소스로서의 플라즈마 계 변수에 따른 물성을 파악하였다. GaN 막의 건식 식각 특성 실험은 플라즈마 공정 변수, 즉 입력 전력, bias용 입력 전력, 압력, 그리고 $CH_4/H_2/Ar$ 가스의 혼합 비중에 따라 시행하였으며, 플라즈마 물성과의 상관 관계를 비교 분석하였다. 입력 전력에 따른 식각 속도는 2mTorr 압력, -200V bias 전압의 조건으로 Ar의 조성비를 크게 한 것이 500W에서 500Å/min로 CH_4 조성비가 큰 500W에서 250Å/min 보다 식각률이 2배 되는 결과를 얻었으며, dc bias 전압의 변화에서도 Ar의 조성비를 크게 한 것이 -250V 전압에서 750Å/min으로 CH_4 조성비가 큰 것 보다 식각 속도가 크다는 것을 알 수 있었다. dc bias 전압에 따른 식각 속도의 변화는 입력 전력 500W에 압

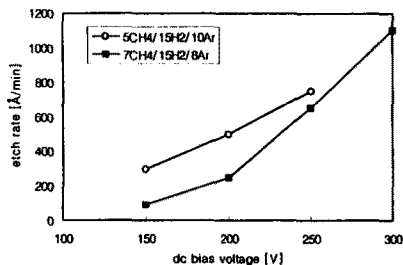


그림 7. dc bias 전압에 따른 식각 속도의 변화.

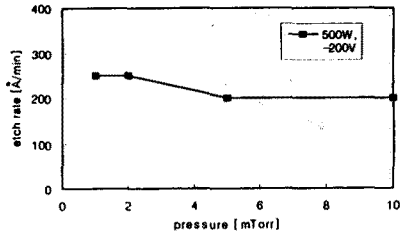


그림 8. 압력에 따른 식각 속도의 변화.

력 2mTorr의 저압 영역에서 -300V의 bias 전압에 1100Å/min의 급격한 식각 속도의 증가를 보였다. 압력에 따른 식각 속도의 변화는 큰 변화는 나타내지 않았지만, 저압 영역에서 고압 영역으로 갈수록 플라즈마 밀도는 다소 증가하나 플라즈마 발생이 비충돌성 전자 가열에 의하기 보다는 충돌성 전자 가열이 주가 되므로 전자의 온도는 다소 떨어지는 것을 알 수 있었다. 본 실험에서는 입력 전력 500W, dc bias 전압 -200V 조건에서 10mTorr까지 압력 영역내에 200~250Å/min의 식각 속도를 얻었다.

참고 문헌

- [1] C F Lin, G C Chi, M S Feng, J D Guo, J S Tsang, and J Minghuang Hong, Appl. Phys. Lett. 68, 3758 (1996)
- [2] K Uchida, A Watanabe, F Yano, M Kouguchi, T Tanaka, and S Minagawa, J. Appl. Phys. 79, 3487 (1996)
- [3] Kazuyoshi Yoshida, Hidenobu Miyamoto, Eiji Ikawa, and Yukinobu Mura, Jpn. J. Appl. Phys. vol 34, 2089, (1995)
- [4] J Hopwood, Plasma Source Sci. Technol. 3, 460, (1994)
- [5] G F McLane, M W Cole, D W Eckart, P Cooke, and R Moerkirk, J. Vac. Sci. Technol. A, 11, 1753 (1993)
- [6] S J Pearton, and C R Abernathy, Appl. Phys. Lett. 64, 2294, (1994)
- [7] 이호준, 자화 유도 결합 플라즈마의 건식 식각 특성에 관한 연구. 박사학위논문, 서울대학교, 1996