

저진공 축전 결합형 BCl₃/N₂ 플라즈마를 이용한 GaAs의 건식 식각

김재권 · 박주홍 · 이성현 · 노호섭 · 주영우 · 박연현 · 김태진 · 이제원[†]

인제대학교 나노공학부/나노기술연구소, 김해, 621-749

Capacitively Coupled Dry Etching of GaAs in BCl₃/N₂ Discharges at Low Vacuum Pressure

Jae Kwon Kim, Ju Hong Park, Sung Hyun Lee, Ho Seob Noh, Young Woo Joo,
Yeon Hyun Park, Tae Jin Kim and Je Won Lee[†]

School of Nano Engineering, Center for nano technology applications, Inje University, Gimhae, 621-749, Korea

(2008년 11월 28일 접수 : 2009년 1월 7일 최종수정 : 2009년 2월 17일 채택)

Abstract This study investigates GaAs dry etching in capacitively coupled BCl₃/N₂ plasma at a low vacuum pressure (>100 mTorr). The applied etch process parameters were a RIE chuck power ranging from 100~200 W on the electrodes and a N₂ composition ranging from 0~100 % in BCl₃/N₂ plasma mixtures. After the etch process, the etch rates, RMS roughness and etch selectivity of the GaAs over a photoresist was investigated. Surface profilometry and field emission-scanning electron microscopy were used to analyze the etch characteristics of the GaAs substrate. It was found that the highest etch rate of GaAs was 0.4 μm/min at a 20 % N₂ composition in BCl₃/N₂ (i.e., 16 sccm BCl₃ / 4 sccm N₂). It was also noted that the etch rate of GaAs was 0.22 μm/min at 20 sccm BCl₃ (100 % BCl₃). Therefore, there was a clear catalytic effect of N₂ during the BCl₃/N₂ plasma etching process. The RMS roughness of GaAs after etching was very low (~3 nm) when the percentage of N₂ was 20 %. However, the surface roughness became rougher with higher percentages of N₂.

Key words GaAs, plasma etching, CCP, low vacuum pressure, BCl₃/N₂

1. 서 론

현재 GaAs 반도체는 레이저 소자, 고출력의 이동통신용 소자 등으로 사용되고 있다. 그런 GaAs 소자 제조를 위한 플라즈마 식각은 주로 Cl을 포함한 가스를 이용하여 할 수 있다.¹⁻³⁾ 플라즈마를 이용한 GaAs의 건식 식각에서 문제가 될 수 있는 것들은 낮은 식각률, 휘발성이 높은 As의 선택적 손실로 인한 거친 표면 거칠기와 언더컷팅 (undercutting) 등이다. GaAs의 이런 문제들을 최소화하며 원하는 우수한 식각 결과를 얻기 위하여 축전결합플라즈마 (capacitively coupled plasma, CCP) 뿐만 아니라, 유도결합플라즈마, ECR(electron cyclotron resonance) 플라즈마 등 다양한 플라즈마 시스템을 이용한 건식 식각 공정이 개발되어 왔다.⁴⁻¹⁰⁾ 그러나 GaAs 소자를 개발하고 양산화하는 기술적 관점에서 보았을 때 플라즈마 식각에서 해결해야 할 과제가 아직 많이 남아 있다고 할 수 있다.

첫째는 플라즈마 식각 공정에서 가능하면 고가의 진공

펌프를 사용하지 않는 기술을 개발하여야 한다. 예를 들어, 플라즈마 식각 공정에서는 고진공 펌프로 터보분자 펌프를 많이 사용한다.¹¹⁻¹²⁾ 터보분자 펌프는 스테터와 로터로 구성되어 있으며 회전 날개인 로터가 분당 수만 번 회전함에 의해 고진공을 유지하게 되어있다. 그러나 일반적으로 터보 펌프는 기계적 충격에 상대적으로 약하고, 고장시에는 유지 보수에 많은 비용이 들 수 있다. 따라서 소자 제조 원가 비용 절감을 위해 대면적이거나 여러 장의 웨이퍼를 동시에 식각하고자 하는 경우에 역시 고가의 대용량 터보 분자펌프의 사용은 소자 제조업체와 장비업체 모두에 큰 부담이 아닐 수 없다. 두 번째로 GaAs 식각에서 Cl을 포함하고 있으면서 보관과 관리에서 편리성과 안정성이 우수한 가스를 적절하게 사용하여야 한다. 세 번째로 플라즈마를 발생시키기 위하여 공정 반응기로 인가되는 전압과 전류를 지나치게 높은 것을 사용하는 것을 피해야 한다. 이 문제는 우리가 지금까지 개발한 모든 플라즈마 장비를 바라보는 관점을 새롭게 할 수 있다.¹³⁻¹⁴⁾ 즉, 플라즈마 반응기에 높은 전압과 많은 전류를 공급하면 식각 속도를 어느 정도 높일 수는 있겠지만 그런 높은 전압과 전류의 사용은 그만큼 식각 시스템의 공정 안전성을 약화시킬 수 있다.

[†]Corresponding author

E-Mail : jwlee@inje.ac.kr (J. W. Lee)

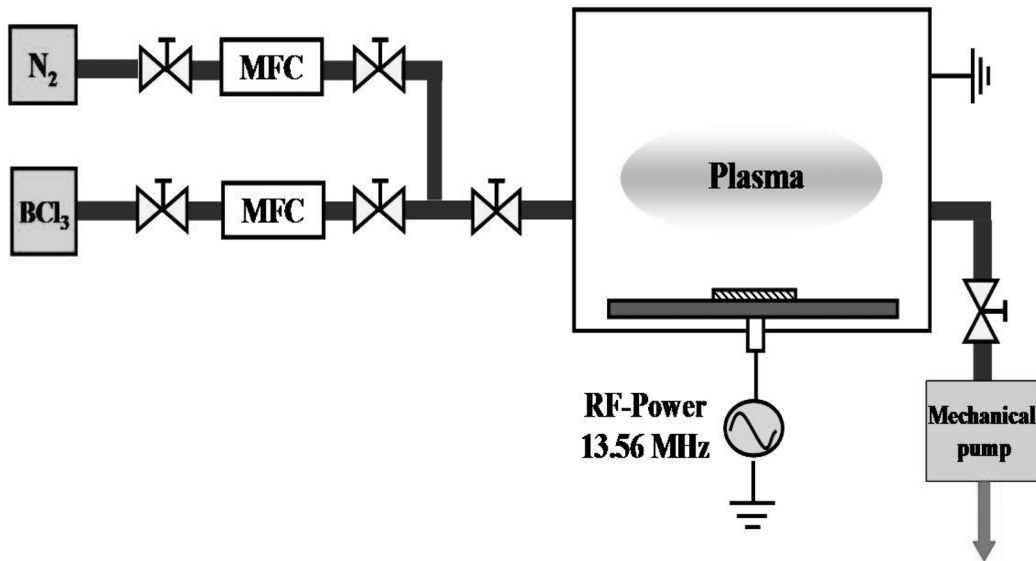


Fig. 1. Schematic of low vacuum pressure capacitively coupled plasma (CCP) system.

본 연구는 GaAs의 플라즈마 식각에서 그런 문제를 해결하기 위한 시도로 기초연구에 해당한다. 본 연구에서는 기계적 펌핑에 의한 저진공 압력만을 사용하고, 사용과 관리가 쉬운 BCl₃/N₂ 혼합가스와 플라즈마 발생이 쉬운 저렴한 축전결합형 플라즈마를 사용하여 상대적으로 높은 GaAs 건식 식각률 (> 0.2 μm/min)과 우수한 공정 결과를 줄 수 있는 플라즈마 공정을 개발하고자 하였다.

2. 실험 방법

이번 실험에 사용한 축전 결합형 플라즈마 시스템은 본 연구팀의 실험실에서 자체 조립된 것이다 (Fig. 1). 플라즈마를 발생시키는 전원 장치로는 영신 RF의 13.56 MHz, 공냉식 600 W 용을 사용하였다. BCl₃와 N₂의 가스 유량 조절기는 KNH 인스트루먼트에서 교정된 가스 유량 조절기 (Mass Flow Controllers)를 사용하였다. 기계적 펌프는 분당 600 리터를 배기하는 것을 이용하였다. GaAs 샘플을 올려놓는 샘플 척은 직경 150mm 이었다. GaAs 샘플은 식각 마스크로 사용하는 감광제로 패터닝을 한 것과 하지 않은 것을 따로 준비하여 1×1 cm² 정도로 조각내어 실험하였다.

실험에 사용한 플라즈마 식각 공정 변수로는 BCl₃/N₂의 혼합가스 내에서 % N₂ (0-100 %)와 샘플 지지대로 사용하는 RIE 척에 인가되는 RF 척 파워 (10-200 W) 이었다. 플라즈마 반응기로 유입되는 BCl₃/N₂ 가스의 총량은 20 sccm (standard cubic centimeter per minute)으로 고정하였다. 공정 압력은 150 mTorr이었다. 플라즈마 식각 시간은 5 분으로 하였다.

식각 공정이 끝난 GaAs 샘플들은 아세톤으로 감광제

(photoresist, PR)을 제거한 후에 표면 단차 측정기 (Tencor alpha-step IQ)로 식각 깊이를 측정하여 식각률을 계산하였다. 또 식각 공정이 끝난 후에 표면에 패턴이 되어있지 않은 GaAs를 선택하여 표면 거칠기 측정 프로그램을 이용하여 표면 거칠기를 측정하였다. 이 때 GaAs 샘플의 측정 거리는 1,000 μm로 일정하게 하였다. GaAs의 식각비면과 표면상태는 주사전자현미경 (Scanning Electron Microscopy)을 이용하여 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 플라즈마 반응기로 유입된 BCl₃/N₂의 혼합가

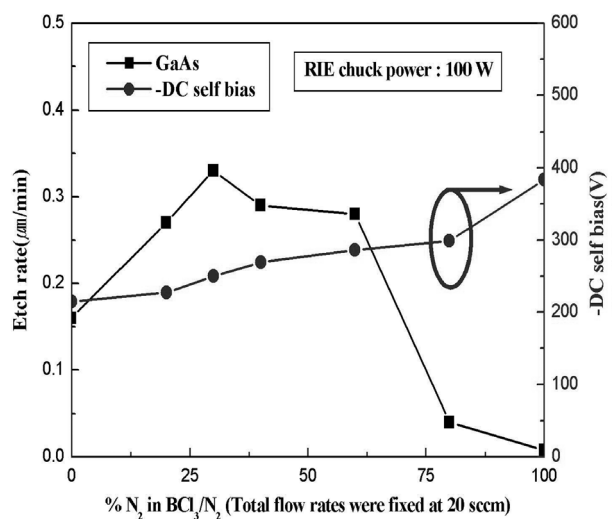


Fig. 2. GaAs etch rates and -DC biases as a function of % N₂ in CCP BCl₃/N₂ discharges.

스 중에서 % N₂에 따른 GaAs 식각률을 그린 그래프이다. 순수한 N₂ (즉, 100 % N₂)를 사용하면 100W의 RIE 척 파워 조건에서 GaAs를 식각할 수 없었다. 그러나 순수한 BCl₃ 가스만을 사용하면 GaAs의 식각률은 100 W의 RIE 척 파워인 경우에 약 0.18 μm/min의 식각률을 얻을 수 있었다. 그리고 BCl₃와 N₂가 반응기 내에서 적절히 (즉, 20~60 % N₂) 혼합되면 순수한 BCl₃ 플라즈마보다 GaAs를 더욱 빠르게 식각할 수 있음을 발견하였다. 예를 들어 100W RF 파워를 사용한 경우 40 % N₂를 사용한 12 sccm BCl₃/8 sccm N₂의 조건으로 식각했을 때 식각 속도는 0.28 μm/min 정도로 20 sccm의 BCl₃를 사용한 것보다 식각 속도가 월등히 높았음을 알 수 있다. 즉, 우리는 이 결과를 통하여 저진공 축전결합형 BCl₃/N₂ 플라즈마 식각에서 N₂는 GaAs를 식각하는데 식각률을 높이는 촉매로 작용한다는 것을 추론할 수 있었다. Fig. 2에서 % N₂가 60% 이상이 되었을 때 % N₂가 증가함에 따라 GaAs의 식각 속도가 감소함을 알 수 있었다. 그 주된 이유로는 플라즈마내의 반응성 가스인 BCl₃의 양이 임의의 한계치 이하로 줄어들었고, 또 상대적으로 GaAs와 반응하지 않는 N₂의 양이 지나치게 많아 BCl₃와 GaAs의 반응을 방해하여, 궁극적으로 GaAs의 식각률을 감소시킨 것으로 생각한다.

Fig. 3는 BCl₃/N₂ 플라즈마 식각에서 % BCl₃에 따른 GaAs 식각 후, GaAs의 감광제 (photoresist)에 대한 식각률 선택비를 그린 그래프이다. 식각률 선택비는 전반적인 경향을 보았을 때 % N₂가 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있다. 즉 순수한 20 sccm BCl₃를 이용한 플라즈마 식각에서는 식각률 선택비는 100 W RF 파워에서 약 4.3:1 정도이었다. 그러나 순수한 20 sccm N₂를 사

용한 경우에는 약 0.2:1 정도의 낮은 식각률 선택비를 나타내었다. 즉 순수한 N₂ 플라즈마는 GaAs는 거의 식각하지 않고 유기 고분자인 감광제를 더 많이 식각하는 원하지 않는 결과를 나타내었다. 주목할만한 것은 그림 2에서 GaAs의 식각률은 % N₂가 20~60 % 정도에서는 순수한 BCl₃를 사용했을 때보다 월등히 증가했지만 GaAs의 감광제에 대한 식각률 선택비는 BCl₃/N₂의 혼합 플라즈마에서 % N₂의 양이 많아질수록 지속적으로 감소했음을 볼 수 있었다는 것이다. 이 의미는 BCl₃/N₂의 가스 성분비에서 N₂의 성분비를 증가할수록 GaAs의 식각률 증가폭보다는 감광제의 식각률 증가폭이 상대적으로 더 높았다는 것이다.

Fig. 4는 BCl₃/N₂의 플라즈마 식각에서 % N₂에 따른 GaAs 식각 표면의 표면 거칠기 변화를 그린 그래프이다. 참고로 식각 전의 컨트롤 GaAs 샘플의 표면 거칠기는 1.8 nm이었다. 100 W RF 파워와 20 sccm BCl₃ 플라즈마에 식각된 GaAs의 표면 거칠기는 4.0 nm였다. 이 값은 플라즈마 식각을 하지 않은 GaAs control 샘플의 값과 비교하였을 때 약간 높아졌지만 그리 나쁘지는 않은 것으로 사료된다. 또 20 % 정도의 N₂가 포함된 16 sccm BCl₃ / 4 sccm N₂의 조건에서도 식각 후 GaAs의 표면 거칠기가 약 5.0 nm로 20 sccm BCl₃의 식각 후 표면 거칠기 결과와 비슷하였다. 그림 2의 결과를 참고하면, 20 sccm BCl₃나 16 sccm BCl₃/4 sccm N₂의 공정 조건에서 식각된 GaAs는 비교적 높은 식각률과 매끈한 식각 표면을 유지한다는 것을 이해할 수 있었다. 이 그래프에서 이해할 수 있는 것은 Fig. 2에서는 BCl₃/N₂ 플라즈마에서 N₂가 20~60 % 정도 포함되면 식각률을 상당히 증가시키는 촉매 현상을 보였지만, BCl₃ 플라즈마

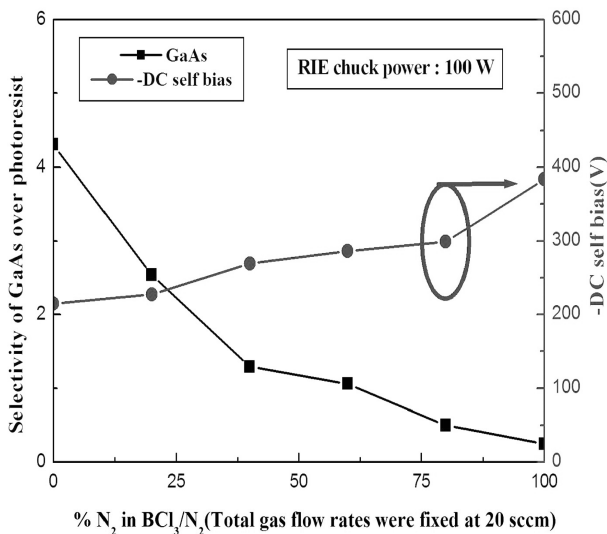


Fig. 3. Etch rate selectivity of GaAs over a photoresist as a function of % N₂ after etching in CCP BCl₃/N₂ discharges.

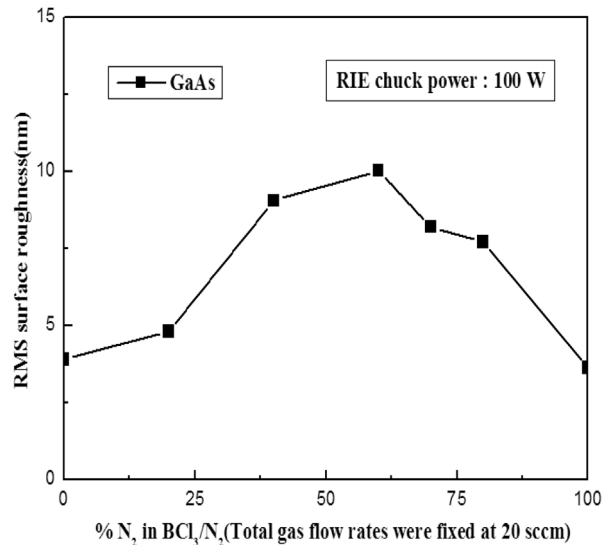


Fig. 4. RMS surface roughness of GaAs as a function of % N₂ after etching in CCP BCl₃/N₂ discharges.

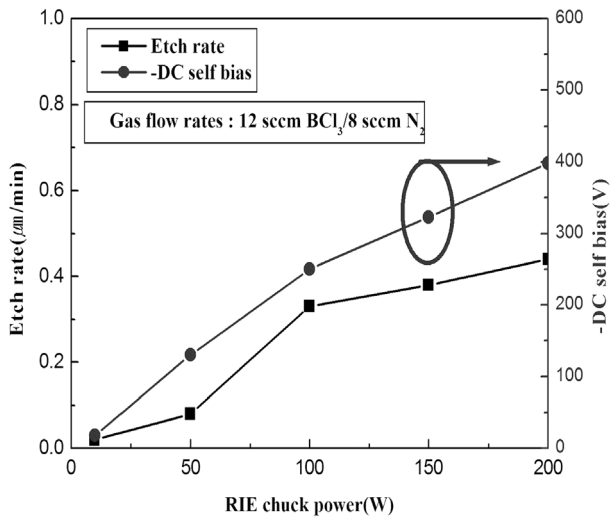


Fig. 5. GaAs etch rates and -DC biases as a function of RIE chuck power in the CCP BCl₃/N₂ discharges.

에 N₂ 가스의 지나친 혼합은 GaAs의 식각 표면 거칠기를 높여 표면을 거칠게 했다는 것이다. 즉, 100 W RIE 척 파워의 경우 BCl₃에 20 % 이상의 N₂를 혼합하면 식각 후 GaAs의 표면 거칠기가 급격히 나빠진다는 것을 알 수 있었다. Fig. 4에서 % N₂가 60% 이상이 되었을 때 % N₂가 증가함에 따라 식각 후 GaAs의 표면 거칠기가 감소함을 알 수 있었다. 그 이유는 BCl₃의 양이 줄어들어 반응기가 N₂ 플라즈마가 지배적인 분위기로 바뀌면서 BCl₃ 플라즈마 종과 GaAs의 급격한 화학적 반응을 줄였다. 그에 따라 GaAs 식각률이 감소하며 (Fig. 2 참조) 상대적으로 식각 후 GaAs 표면 거칠기의 값을 낮춘 것으로 생각한다. 참고로 순수한 N₂ 플라즈마는 GaAs를 거의 식각하지 않았으며 GaAs의 표면 거칠기 값도 4 nm 정도로 식각 전의 값에서 크게 변하지 않았다.

Fig. 5는 RF 척 파워의 증가에 따른 GaAs의 식각률 변화를 나타낸 그래프이다. 이 실험에서 사용한 플라즈마 혼합가스 조건은 12 sccm BCl₃/8 sccm N₂이었다. 축전 결합형 플라즈마라는 조건에서 쉽게 예상할 수 있듯이 샘플 척에 유도되는 -DC bias는 RF 척 파워가 증가할수록 꾸준히 높아지는 것을 알 수 있었다. 또한 그에 따라 GaAs의 식각률도 함께 증가하는 것을 알 수 있었다. GaAs의 식각률은 10 W RF 척 파워 (-DC bias는 20 V)에서는 약 0.02 μm/min, 50 W (-DC bias는 140 V)에서는 0.08 μm/min 정도로 낮았으나 RF 척 파워가 100 W 이상에서는 0.3 μm/min 이상의 높은 식각률을 나타냈었다. RF 척 파워가 100 W이었을 때 샘플 척에 유도된 -DC bias는 245 V이었다.

Fig. 6은 저진공 축전결합형 BCl₃/N₂ 플라즈마를 이용하여 식각한 GaAs의 패턴을 찍은 주사전자현미경 사진

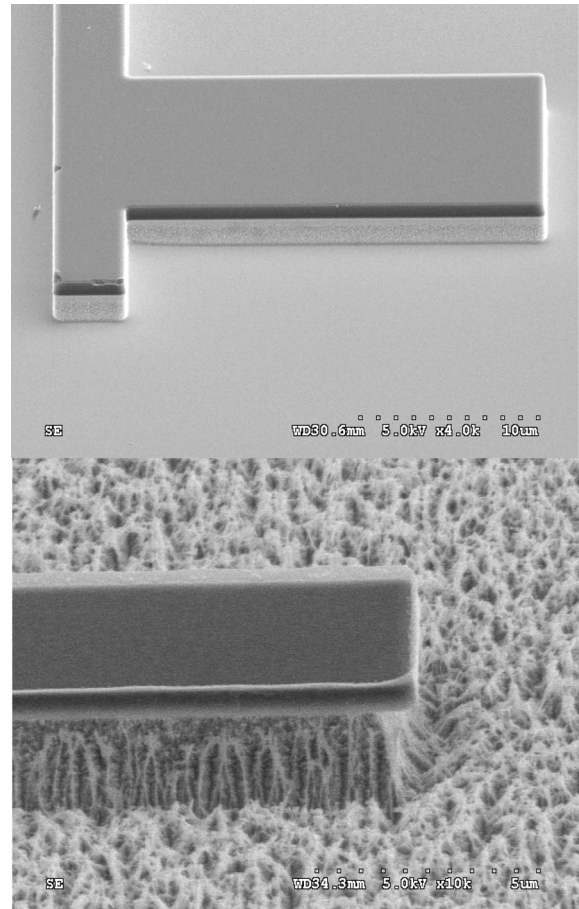


Fig. 6. Scanning electron microscopy photos of GaAs after etching in CCP BCl₃/N₂ discharges at 16 sccm BCl₃ / 4 sccm N₂ (top), and 8 sccm BCl₃ / 12 sccm N₂ (bottom). (RIE chuck power was 100 W and chamber pressure was 150 mTorr, respectively.)

이다. Fig. 6 (top)의 사진은 100 W RF 파워에서 16 sccm BCl₃/4 sccm N₂의 혼합 가스 플라즈마로 식각한 샘플을 찍은 것이다. Fig. 6 (bottom) 사진은 100 W RF 파워에서 플라즈마의 % N₂의 비율을 더 증가시켜, 8 sccm BCl₃ / 12 sccm N₂의 조건에서 5분간 식각한 후에 찍은 것이다. 두 사진을 비교해 보면, Fig. 3의 설명에서 언급하였듯이, 16 sccm BCl₃/4 sccm N₂로 식각하면 GaAs의 표면은 상당히 깨끗하고 매끈하였다. 또한 식각된 벽면도 거의 수직을 유지하고 있었으며 언더컷팅도 나타나지 않았다. 그러나 % N₂의 값이 증가되면 그림 7의 아래처럼 식각된 GaAs의 표면이 상당히 거칠어지고 식각벽면에도 언더컷팅이 심각하였다. SEM 사진을 참고하였을 때, 우리는 저진공 축전결합형플라즈마를 이용한 GaAs 식각에서 16 sccm BCl₃ / 4 sccm N₂, 즉 20 %의 N₂가 포함된 BCl₃/N₂ 플라즈마 공정에서 0.3 μm/min의 빠른 식각 속도, 그리고 매끈한 식각표면과 수직 식각벽면을 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 저진공 축전 결합형 BCl_3/N_2 플라즈마를 사용하여 GaAs를 건식 식각 하였다. 본 연구를 통하여 BCl_3/N_2 의 혼합 가스를 사용한 플라즈마 식각에서 N_2 의 혼합비가 20~60 % 일 때 N_2 가스의 축매 현상으로 GaAs의 식각률이 순수한 BCl_3 플라즈마에서의 식각률보다 월등히 높아졌다는 것을 알 수 있었다. 그러나 BCl_3/N_2 플라즈마에서 과다하게 N_2 를 혼합하면 GaAs의 식각 표면을 상당히 거칠게 하고 식각벽면에도 언더컷팅이 생기게 하여 오히려 순수한 BCl_3 를 사용한 플라즈마 식각보다 나쁜 공정 결과를 초래한다는 것을 확인하였다. 본 연구 범위에서 가장 최적화된 공정 조건은 80 %의 BCl_3 를 포함하고 있는 16 sccm $\text{BCl}_3/4$ sccm N_2 , 100 W RIE 척 파워 그리고 150 mTorr이었다. 이 조건에서 GaAs는 0.3 $\mu\text{m}/\text{min}$ 의 속도로 식각되었다. 또한 그 조건에서 식각된 GaAs는 매끈한 식각 표면과 수직의 식각벽면 상태를 유지하였다. 결론적으로 기계적 펌프만을 사용한 저진공에서 축전결합형 BCl_3/N_2 플라즈마를 이용하여 우수한 GaAs 건식식각 공정을 개발하였다

감사의 글

이 논문은 2004년도 인제대학교 학술연구조성비 보조에 의한 것임.

참고문헌

1. J. Hong, E. S. Lamber, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, R. J. Shul and W. S. Hobson, *J. Electron. Mater.*, **27**, 132 (1998).
2. L. Jalabert, P. Dubreuil, F. Carcenac, S. Pin, L. Salvagnac, H. Grainer and C. Fontaine, *Microelectron. Eng.*, **85**, 1173 (2008).
3. Y. B. Hahn, D. C. Hayes, H. Cho, K. B. Jung, C. R. Abernathy, S. J. Pearton and R. J. Shul, *Appl. Surf. Sci.*, **147**, 207 (1999).
4. R. J. Shul, G. B. McClellan, R. D. Briggs, S. J. Pearton, C. R. Abernathy, J. W. Lee, C. Constantine and C. Barratt, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A15**, 633 (1997).
5. S. Thomas, K. K. Ko and S. W. Pang, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A13**, 894 (1995).
6. D. C. Hays, H. Cho, K. B. Jung, Y. B. Hahn, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, F. Ren and W. S. Hobson, *Appl. Surf. Sci.*, **147**, 125 (1999).
7. I. K. Baek, W. T. Lim, J. W. Lee, M. H. Jeon and G. S. Cho, S. J. Pearton *J. Vac. Sci. Technol.*, **B21**, 2487 (2003).
8. J. W. Lee, M. H. Jeon, M. Devre, K. D. Mackenzie, D. Johnson, J. N. Sasserath, S. J. Pearton, F. Ren and R. J. Shul, *Solid-state Electron.*, **45**, 1683 (2001).
9. S. H. Yang and P. R. Bandaru., *Mater. Sci. Eng.*, **B143**, 27 (2007).
10. C. C. Wang, Y. L. Lin, S. K. Lin, C. S. Li, H. K. Huang, C. L. Wu and C. S. Chang, *J. Vac. Sci. Technol.* **B25**, 312 (2007).
11. M. A. Libermann and A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges & Materials Processing*, p.604, John Wiley & Sons, New Jersey, USA (2005).
12. M. Sugawara, *Plasma Etching*, p.180, Oxford University Press, NY, USA (1998).
13. R. J. Shul and S. J. Pearton, *Handbook of Advanced Plasma Processing Techniques*, p.459, Springer, NY, USA (2000).
14. O. A. Popov, *High Density Plasma Sources*, p.100, Noyes Publications, NJ, USA (1995).