

저에너지의 Ar 중성빔을 이용한 Silicon의 Atomic Layer Etching

오창권 · 박상덕 · 엄근영*

성균관대학교 공과대학 신소재공학부

*테라급 나노소자 개발 사업단

Atomic Layer Etching of Silicon Using a Ar Neutral Beam of Low Energy

Changkwon Oh, Sangduk Park and Geunyoung Yeom*†

Department of Advanced Materials Science & Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-330 Korea

*The National Program for Tera-Level Nanodevice, Hawolgok-dong, Sungbuk-ku, Seoul, 136-791, Korea

(2006년 1월 19일 접수, 2006년 3월 10일 최종수정본 접수)

Abstract In this study, atomic layer etching of Si has been carried out using Cl_2 adsorption followed by the irradiation Ar neutral beam of low energy. In this experiment, the etch rate of Si was dependent on the Cl_2 pressure(the surface coverage of chlorine) and the irradiation time of Ar neutral beam(the flux density of Ar neutral beam). And the etch rate of Si(100) and Si(111) were saturated exactly at one monolayer per cycle with $1.36\text{\AA}/\text{cycle}$ and $1.57\text{\AA}/\text{cycle}$, respectively.

Key words atomic layer etching (ALET), silicon, neutral beam, chlorine.

1. 서 론

반도체 소자의 고집적화에 대한 요구가 증가하면서, 소자의 설계 및 공정에서 요구되는 실제적인 critical dimension이 $0.25\ \mu\text{m}$ 이하에 이르렀다.¹⁾ 이러한 기술적 경향에 따라 식각 공정에서는 더욱 정확한 식각 길이의 제어와 공정에서 야기되는 소자의 손상을 최소화할 수 있는 방법이 모색되어야 하는 추세에 놓여있다. 그러나 현재 널리 사용되고 있는 건식 식각의 기술은 일반적으로 높은 에너지를 가지는 이온을 이용하기 때문에 정확한 식각률의 제어가 어려우며, 공정 중에 발생하는 소자의 물리적 손상을 막을 수 없는 상황이다.^{2,4)} 따라서 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 정확한 식각률의 제어 및 소자의 물리적 손상을 최소화할 수 있는 atomic layer etching (ALET)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 상황이다.

ALET 기술은 1990년대에 GaAs와 Si 등의 식각을 통하여 증명되었으며,⁵⁻¹⁰⁾ 그 후에도 많은 연구가 진행되었다.¹¹⁻¹³⁾ Fig. 1에서 볼 수 있듯이 ALET는 (a)반응성 가스의 주입 및 표면 흡착, (b)표면 반응 후 남은 잉여 가스의 배기, (c)에너지를 가진 빔에 의한 반응물 탈착, (d) 반응물 및 잉여 가스의 배기의 순으로 이루어지며, 이때 반응성 가스를 식각하고자 하는 물질의 표면에 단 원자

층을 흡착시킴으로써 한 주기의 공정을 거침에 따라 원자층 단위의 식각공정을 수행할 수 있게 된다. 먼저 Horiike et al.은 fluorine 가스를 이용하여 Si의 ALET를 수행하였다.⁸⁾ 이때 반응물을 탈착시키기 위하여 Electron Cyclotron Resonance(ECR) 이온 발생장치들 통해 얻은 약 20eV의 Ar^+ 이온빔을 사용하였으며, Si(100)의 단 원자층인 1.36\AA 에 근접하는 $1.5\text{\AA}/\text{cycle}$ 의 식각률을 얻을 수 있었다. 그러나 fluorine 가스를 반응성 가스로 사용할 경우 Si과의 자발적인 반응을 막기 위하여 기판 온도를 -160°C 까지 내려야 하는 문제점 등이 발생하게 되었다. 이에 반하여 Matsuura et al.은 Cl_2 가스를 반응성 가스로 사용하여 상온에서 ALET를 진행하였다.⁹⁾ 이때 반응물을 탈착시키기 위한 빔은 ECR 플라즈마를 이용하여 형성시킨 약 10eV의 Ar^+ 이온을 사용하였으며, 이때 Si(100)의 식각률은 단 원자층의 1/2에 해당하는 $0.68\text{\AA}/\text{cycle}$ 을 얻을 수 있었다. 또한 Athavale et al.은 helical 광명 플라즈마를 이용하여 ALET를 수행하였는데,¹⁰⁾ 이때 얻어진 식각률은 Si의 단 원자층에 해당하는 $1.36\text{\AA}/\text{cycle}$ 을 얻을 수 있었다. 그러나 위의 연구들에서 사용된 플라즈마 발생장치들은 현재 12inch까지 대면적화 된 Si wafer의 공정에 어려움이 있으며, 식각되는 물질이 플라즈마에 직접 노출되기 때문에 발생하는 소자의 손상 등의 근본적인 문제를 내포하고 있어, 차기ALET에 적용이 힘들 것으로 생각된다.

†E-Mail : gyyeom@skku.edu

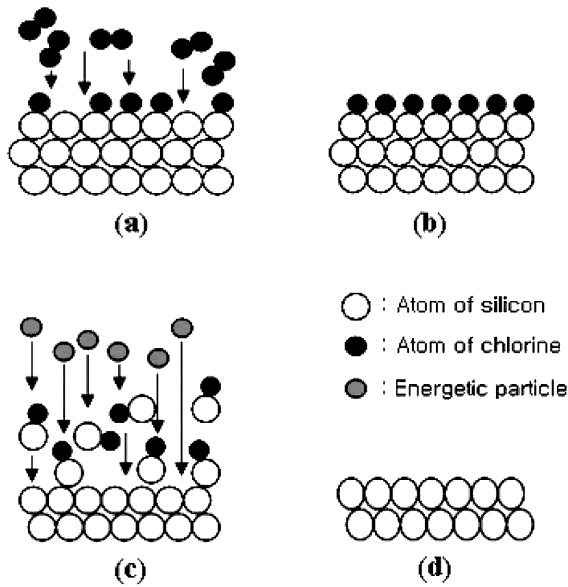


Fig. 1. Schematic of the ALET. (a) Etchant molecules adsorb onto a substrate surface. (b) Excess etchant is purged. (c) An energetic beam irradiates the surface, and surface atoms bonded with etchant are etched off owing to beam-induced chemical etching. (d) Etching products are purged after which one cycle of the ALET is completed.

따라서 본 연구에서는 대면적화가 용이하고, 식각되는 물질과 플라즈마가 분리되기 쉬운 ICP-type의 이온 발생 장치를 이용하여 형성시킨 Ar^+ 이온 빔을 reflector를 이용, 중성빔으로 변환하여 Si의 ALET를 수행하였으며, 각각의 식각 변수의 변화에 따른 식각 특성을 관찰하였다. 또한 ALET의 메커니즘을 이해하기 위하여 Si의 결정 방향에 따른 식각 특성 및 식각 전후의 표면 roughness를 관찰하였다.

2. 실험 방법

Fig. 2는 본 실험에 사용된 ALET장비의 모식도이다. 본 연구에서 사용된 Ar 중성빔 형성 방법은 low-angle forward reflected neutral beam technique(LAFRN)을 이용하였다. LAFRN 소스는 r.f 이온 소스와 planar-reflector로 구성되어있다. 그림에서 알 수 있듯이 Ar 중성빔은 두 개의 그리드를 사용한 ICP type의 이온 발생 장치에서 형성된 Ar^+ 이온 빔을 reflector를 통하여 중성화 시키는 방법을 이용하였으며, 그때의 중성화율은 99% 이상이었다.^{14,15)} 플라즈마 생성을 위한 전력은 800 W를 사용하였으며, Ar 중성빔의 에너지를 제어하는 첫 번째 그리드(accelerator grid)는 50 V로 고정하였고, 두 번째 그리드는 접지를 시켰다. 이온 빔 발생장치와 기관 사이에는 자동 shutter를 장착하여 Ar 중성빔의 조사시간을 제어할 수 있게 하였으며, Cl_2 가스도 주기적으로 공

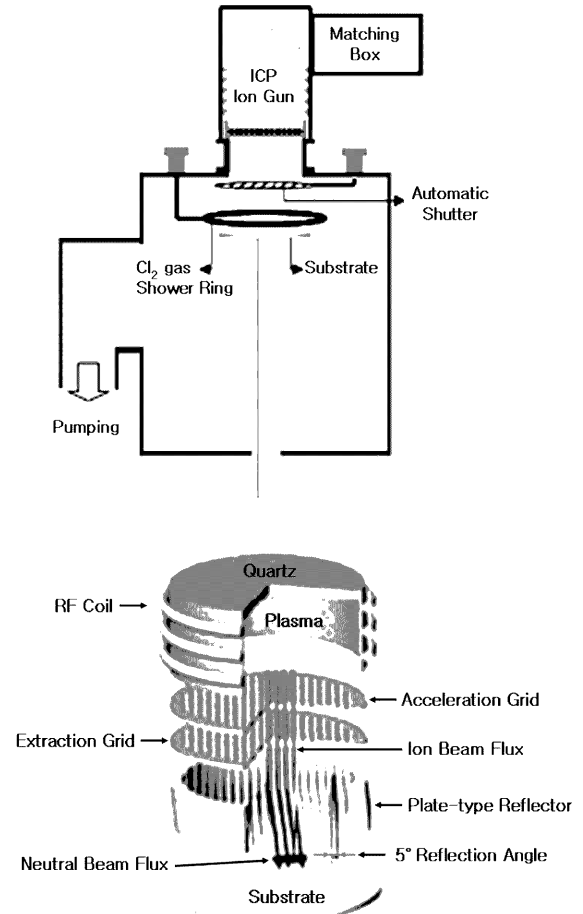


Fig. 2. Schematic diagram of the ALET system and neutral gun used in the experiment.

Table 1. Typical experimental parameters for ALET used in the experiment.

Base pressure	2.0×10^{-6} Torr
Working pressure	2.5×10^{-4} Torr
Inductive power	800 Watt
Acceleration grid voltage	50 Volts
Ar flow rate	10 sccm
Ar neutral beam irradiation time	60~840 sec
Cl_2 pressure	0~0.67 mTorr
Cl_2 supply time	20 sec
Substrate temperature	RT

급될 수 있게 구성하였다. 그리고 그 외의 자세한 실험 조건들은 Table 1에 명시 하였다. 실험 시 사용한 시편은 p-type의 Si(100)과 Si(111)이며, 자연 산화막을 제거하기 위하여 실험 전 첫 번째 그리드에 200 V의 가속 전압을 인가한 후 Ar 중성빔으로 3분 동안 sputter를 실시하였다. 식각 깊이를 측정하기 위하여 α -step profilometer (Tencor Instrument, Alpha Step 500)를 사용하였으며, 표

면 RMS roughness를 측정하기 위하여 atomic force microscope(AFM, Thero-microscopes, CP research)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

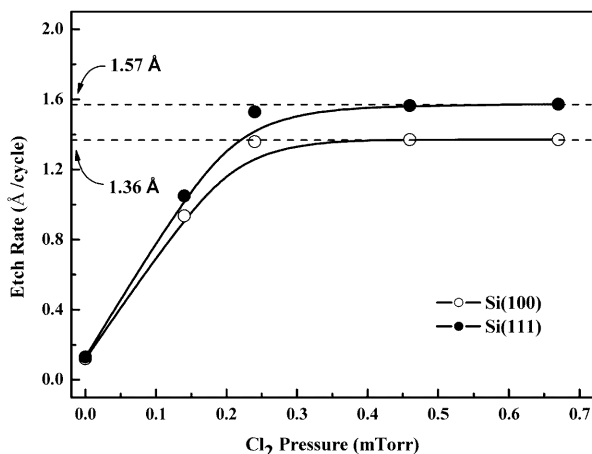
Fig. 3(a)는 주입되는 Cl₂ 가스의 압력에 따른 Si의 식각률의 변화를 나타낸 그림이다. 이때 Ar 중성빔의 조사시간은 780 sec로 고정하였으며, Cl₂ 가스의 압력은 0~0.67 mTorr로 변화시켰다. 그림을 통해 알 수 있듯이 Cl₂ 가스를 주입하지 않고 Ar 중성빔만을 이용하여 Si를 sputter 하였을 경우 Si(100) 및 Si(111) 모두 sputter율이 0.15Å/cycle 이하로 매우 낮은 값을 나타냈다. 이러한 결과는 가속 그리드의 전압을 50 V 이하로 유지할 경우 sputter에 의한 Si의 변화는 무시할 수 있음을 말해준다. 반면에 Cl₂ 가스를 주입할 경우 그림에서 관찰되는 바와 같이 Cl₂의 압력을 증가시키에 따라 Si(100)과 Si(111)

모두 식각률이 선형적으로 증가되다가 Cl₂의 압력이 0.24mTorr 이상으로 증가할 경우 Si(100)과 Si(111)의 식각률은 각각의 주기 당 단 원자층에 해당하는 1.36Å/cycle 및 1.57Å/cycle에서 Cl₂의 압력과 상관없이 일정한 값을 가짐을 관찰할 수 있었다.

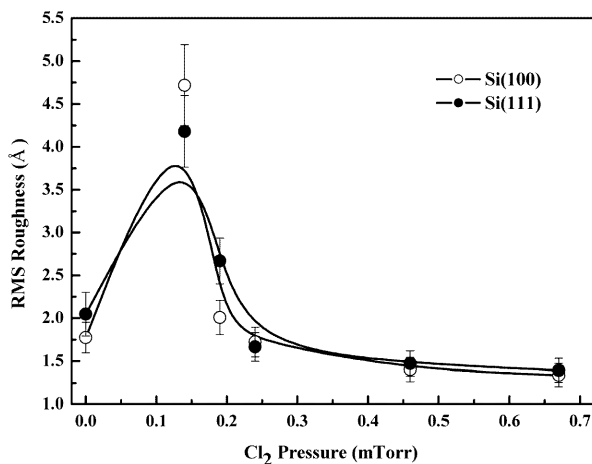
Fig. 3(b)는 위의 실험과 동일한 조건에서 Si 표면의 root-mean-square(RMS) roughness 변화를 나타낸 그림이다. 표면 RMS roughness 또한 Cl₂ 가스를 주입하지 않고 sputter하였을 경우, 실험전의 시편(Si(100):1.691Å, Si(111):1.352Å)에 비하여 큰 변화가 없는 것으로 관찰되었다. 또한 Cl₂ 가스를 주입하여 실험을 행한 결과 Cl₂ 가스 압력이 0.14 mTorr일 경우 Si(100) 및 Si(111)의 RMS roughness가 각각 4.719Å 및 4.179Å으로 큰 값을 가지지만, 그 이후로는 RMS roughness 값이 줄어들다가 0.24 mTorr 이상에서는 거의 일정한 값으로 수렴하였다.

이러한 결과는 Cl₂ 가스의 압력 변화에 따른 Si 표면에 형성되는 Si-Cl 결합의 coverage 차이에 의한 것으로 판단된다. Langmuir isotherm에 의해 Si 표면에 Si-Cl 결합이 형성될 경우 Si-Si 결합에서 Si-Cl 결합으로 전하가 이동되어 Si-Si 결합이 약화되기 때문에,¹⁶⁾ Ar 중성빔이 Si 시편표면에 조사될 경우 Si-Cl 결합이 끊어지기 보다는 Si-Si 결합이 쉽게 끊어져 Si-Cl 결합이 형성된 Si의 표면층만이 제거된다고 생각된다. 따라서 Ar 중성빔의 flux 밀도가 Si(100) 및 Si(111)의 표면 원자 밀도인 $6.78 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 및 $7.83 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 보다 높다고 가정할 경우 Si의 식각률은 Cl₂의 압력에 의하여 결정될 것이다. 이러한 ALET 변수에 대한 추론은 Si RMS roughness의 변화를 통해서도 확인할 수 있는데, 앞에서 언급했던 바와 같이 Cl₂의 압력이 0.14 mTorr일 때 RMS roughness의 급격한 증가는 Si 표면에 Cl₂가스가 부분적으로 덮혀 Ar 중성빔에 의한 식각 또한 부분적으로 이루어졌기 때문으로 사료되며, Cl₂의 압력이 증가함에 따른 RMS roughness의 감소 및 0.24 mTorr 이상에서 일정한 값을 가지는 것은 Si 표면에서 Cl의 coverage가 1에 가까워짐에 따라 한 주기 당 단 원자층에 해당하는 Si 층이 제거되었기 때문으로 분석된다.

앞에서 Cl₂의 압력 변화가 ALET에 미치는 영향을 설명하기 위하여 Ar 중성빔의 flux 밀도를 Si 표면 밀도보다 높을 경우로 한정하였다. 따라서 Ar 중성빔의 flux 밀도 효과를 관찰하기 위해서는 Si 표면에 형성되는 Si-Cl의 coverage가 완전히 이루어졌을 경우로 가정해 보아야 할 것이다. 그러나 본 실험에 사용된 중성빔 발생장치의 경우 중성빔의 flux를 변화시키기 위해서는 가속 전압을 변화시켜야 하는데, 가속 전압을 변화시킬 경우 중성빔의 에너지가 변화되므로 가속 전압은 50 V로 일정하게 유지하고, Ar 중성빔의 조사시간을 변화시킴으로써



(a)

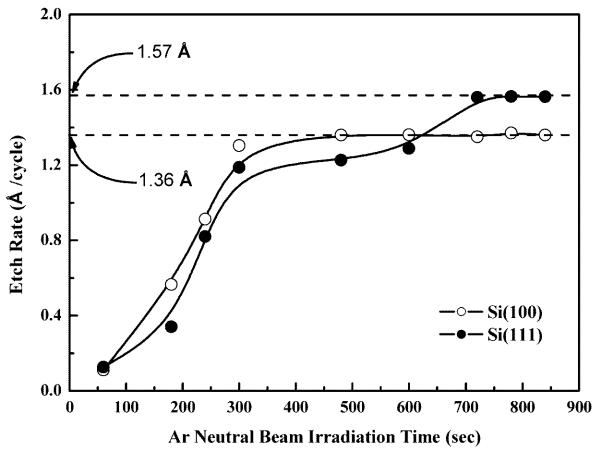


(b)

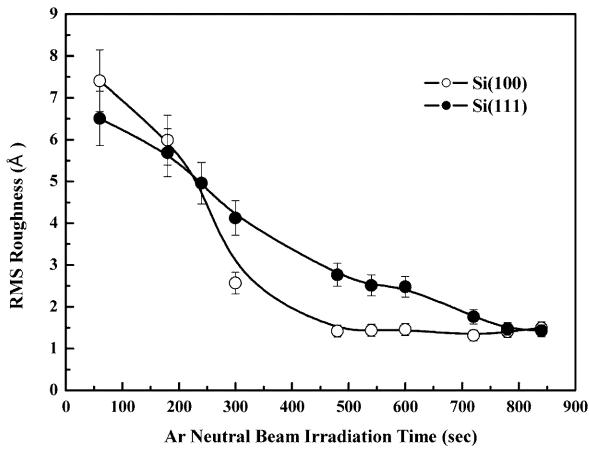
Fig. 3. (a)Etch depth per cycle and (b)RMS roughness by the ALET as a function of Cl₂ pressure (mTorr).

주기 당 Si 표면에 도달하는 Ar 중성빔의 flux양을 변화시켰다.

Fig. 4(a)와 (b)는 Fig. 3의 결과에 따라 Si 표면에 형성되는 Si-Cl의 coverage가 완전히 이루어졌다고 볼 수 있는 Cl₂의 압력인 0.46 mTorr에서 Ar 중성빔의 조사시간 변화에 따른 Si(100) 및 Si(111) 각각의 식각률 및 RMS roughness 변화를 나타낸 그림이다. 이때 Ar 중성빔의 조사시간은 60~840 sec로 변화시켰다. Fig. 4(a)에서 관찰되는 바와 같이 Ar 중성빔의 조사시간이 증가함에 따라 Si(100) 및 Si(111) 식각률이 모두 선형적으로 증가됨을 관찰할 수 있었으며, Si(100)은 Ar 중성빔의 조사시간이 480sec일 경우, Si(111)은 780 sec일 경우부터 Ar 중성빔의 조사시간의 증가와 상관없이 식각률이 각각의 단 원자층에 해당하는 1.36Å/cycle 및 1.57Å/cycle 을 가짐을 관찰할 수 있었다. 또한 Fig. 4(b)에서 알 수 있듯이 Si의 RMS roughness는 Ar 중성빔의 조사시간이 증가함에 따라 계속적으로 감소하는 경향을 관찰할 수 있



(a)



(b)

Fig. 4. (a) Silicon etch rate(etch depth/cycle) and (b) RMS roughness by the ALET as a function of Ar neutral beam irradiation time.

었으며, 식각률의 변화와 비슷하게 Si(100) 및 Si(111) 각각 Ar 중성빔의 조사시간 480 sec 및 780 sec에서 RMS roughness가 특정 값에 수렴됨을 관찰 할 수 있었다. Ar 중성빔의 조사시간이 증가함에 따라 식각률이 선형적으로 증가하는 것은 Ar 중성빔 flux가 Si 표면에 형성되어 있는 Si-Cl 층을 완전히 제거할 수 있을 정도로 충분하지 않았기 때문으로 판단된다. 또한 Si의 결정면에 따라 식각률이 일정한 값이 되는데 필요한 Ar 중성빔의 조사시간이 다른 것은 Si(100)과 Si(111)의 표면 원자 밀도가 다르기 때문인 것으로 생각되며, 이와 같은 Ar 중성빔의 조사시간 변화에 따른 Si의 식각 특성은 RMS roughness 변화에서도 동일한 결과를 관찰 할 수 있다. 즉, Ar 중성빔의 조사시간의 증가에 따른 Si의 RMS roughness의 감소는 Si 표면에 형성되어 있는 Si-Cl의 제거율을 증가시켜, 공정 주기가 증가함에 따른 RMS roughness의 증가를 억제시켰기 때문으로 분석되며, 전체적으로 Si(111)의 RMS roughness가 Si(100) 보다 높은 이유 또한 앞에서 언급하였던 결정면간의 표면 밀도의 차이에 의한 Si-Cl의 잔류 정도가 차이 나기 때문으로 생각된다. 그러나 Ar 중성빔의 조사시간이 Si(100) 및 Si(111) 모두 단 원자층이 제거될 수 있는 Ar 중성빔의 flux를 초과할 경우 각각의 RMS roughness는 1.45Å로 비슷한 값을 나타내었다. 이러한 RMS roughness 결과는 실험전의 시편과 거의 비슷한 것으로, 이는 Ar 중성빔의 flux가 충분히 확보될 경우 Si 표면에 형성된 Si-Cl만이 시편의 sputter없이 제거될 수 있음을 나타내는 결과라 할 수 있을 것이다.

Fig. 5는 Si(100)과 Si(111) 모두 식각률이 한 주기당 단 원자층이 식각되는 조건, 즉 Ar 중성빔의 조사시간이 780 sec이고 Cl₂ 압력이 0.46 mTorr일 경우 식각 주기 횟수의 증가에 따른 식각률 및 식각 깊이, 그리고 Si의 RMS roughness 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 관찰되는 바와 같이 식각 주기의 횟수 증가에 비례하여 식각 깊이는 증가하며, 그에 따라 식각률은 Si(100)과

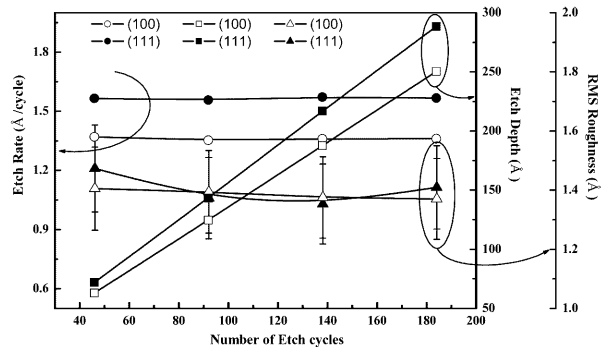


Fig. 5. Silicon etch depth and etch rate(etch depth/cycle) by the ALET and the surface roughness variation as a function of the number of etch cycle.

Si(111) 모두 1.36Å/cycle 및 1.57Å/cycle로 일정하게 유지됨을 관찰할 수 있었다. 또한 Si의 RMS roughness도 1.45Å 정도로 거의 일정하게 유지됨을 관찰할 수 있었다. 이러한 결과는 식각 주기 횟수의 변화에 따라 얻고자 하는 정확한 식각 깊이를 제어 할 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 식각 변수의 변화를 통하여 Si의 ALET 공정 조건을 확립하였으며, 식각의 특성 및 원리를 이해하고자 하였다. 확립된 공정 조건하에서 Si의 ALET를 수행한 결과 Si(100) 및 Si(111) 모두 한 주기당 단 원자층에 해당하는 식각률인 1.36Å/cycle 및 1.57Å/cycle 을 얻을 수 있었으며, 식각 주기의 횟수에 따라 정확한 식각 깊이를 제어할 수 있음을 확인하였다. 뿐만 아니라, 반응 가스인 Cl₂의 압력변화와 Ar 증생법의 조사시간의 변화에 따른 식각률과 RMS roughness를 통하여 Si의 ALET시 주요 변수는 Cl₂의 압력 변화에 따른 Si 표면에 형성되는 Si-Cl의 coverage 및 Ar 증생법의 flux 밀도임을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 한국 과학기술부 주관의 21세기 프론티어 연구개발 사업단(테라급 나노소자 사업)에 의하여 지원되었습니다.

참 고 문 헌

1. International Technology Roadmap for Semiconductorb (ITRS), International Sematech, Austin, TX [http://public.itrs.net/files/2002update/2002update.htm].
2. T. Nozawa and T. Kinoshita, Jpn. J. Appl. Phys., **34**, 2107 (1995).
3. T. Kinoshita, M. Hane and J.P. McVitte, J. Vac. Sci. Technol., B **14**, 560 (1996).
4. H. Ootera, Jpn. J. Appl. Phys., **33**, 6109 (1993).
5. Y. Aoyagi, K. Shinmura, K. Kawasski, T. Tanaka, K. Gamo, S. Namba and I. Nakamoto, Appl. Phys. Lett., **60**, 968 (1992).
6. T. Meguro, M. Ishii, K. Kodama, Y. Yamamoto, K. Gamo and Y. Aoyagi, Thin Solid Films, **225**, 136 (1993).
7. K. K. Ko and S. W. Pang, J. Vac. Sci. Technol., **B 11**, 2275 (1993).
8. Y. Horiike, T. Tanaka, M. Nakano, S. Iseda, H. Sakaue, A. Nagata, H. Shindo, S. Miyzaki and M. Hirose, J. Vac. Sci. Technol., **A 8**, 1844 (1990).
9. T. Matsuura, J. Murota and Y. Sawada, Appl. Phys. Lett., **63**, 2803 (1993).
10. S. D. Athavale and D. J. Economou, J. Vac. Sci. Technol., **B 14**, 3702 (1996).
11. T. Meguro and Y. Aoyagi, Appl. Surf. Sci., **112**, 55 (1997).
12. K. Ikeda, S. Imai and M. Matsumura, Appl. Surf. Sci., **112**, 87 (1997).
13. T. Matsuura and T. Sugiyama, J. Murota, Surf. Sci., **402**, 202 (1998).
14. M. J. Chung, D. H. Lee and G. Y. Yeom, Thin Solid Films, **420**, 579 (2002).
15. D. H. Lee, J. W. Bae, S. D. Park and G. Y. Yeom, Thin Solid Films, **398**, 647 (2001).
16. Y. Ayagi, K. Shinmaura, K. Kawasaki, K. Gamo and S. Namba, Thin Solid films, **225**, 120 (1993).