

비정질 실리콘 박막에서 엑시머 레이저에 의한 붕소이온의 수평확산

박수정, 이민철, 강수혁, 한민구
 서울대학교 전기컴퓨터공학부

Lateral Diffusion of Boron Ions Implanted in The Amorphous Si Film On Silicon Oxide Film During Excimer Laser Irradiation

Soo-Jeong Park, Min-Cheol Lee, Su-Hyuk Kang and Min-Koo Han
 School of Electrical Engineering (#50), Seoul National University

Abstract - 본 논문에서는 엑시머 레이저 조사에 의한 이온 농도의 분포 변화를 알아보기 위해 붕소 이온이 선택적으로 주입된 비정질 실리콘 박막 위에 XeCl ($\lambda = 308\text{nm}$) 엑시머 레이저를 조사하여 붕소이온의 수평 확산 현상을 관찰하였다. 도핑 농도의 분포를 알아보기 위해 불산/질산 용액에 의한 고농도 도핑 영역의 습식 식각을 이용하여 약 $10^{18}/\text{cm}^3$ 이하의 붕소이온을 가지는 실리콘 박막의 형태를 전자주사 현미경을 이용해서 관찰하였다. 실험 결과, $200\text{mJ}/\text{cm}^2$ 의 레이저 에너지가 조사될 경우, 약 100nm 의 수평 확산이 일어났음을 확인할 수 있었다.

1. 서 론

엑시머 레이저 (Excimer laser)는 저온 다결정 실리콘 TFT (Thin Film Transistor) 제작에서 비정질 실리콘 박막을 재결정화 (recrystallization)시키는 방법으로 널리 사용되어져 왔다 [1][2]. 높은 에너지 밀도의 엑시머 레이저빔은 짧은 레이저 조사시간 (~30ns) 동안에 기판의 손상 없이 화학기상증착 (chemical vapor deposition, CVD) 의해 증착된 비정질 실리콘 박막을 효과적으로 재결정화 하는데 적합하여 저온 (<400℃) 다결정 실리콘 TFT 공정에 이용되고 있다[3]. 다결정 실리콘 TFT 제조 공정에서 비정질 실리콘의 결정화와 더불어 TFT의 소스/드레인에 주입된 이온의 활성화 (dopant activation) 공정 또한 엑시머 레이저를 이용하여 이루어진다.[4] 엑시머 레이저빔은 도핑된 실리콘 박막의 상부를 용융시켜, 소스/드레인 영역에 주입된 이온들을 효과적으로 활성화시키는 것으로 알려져 있다. 산화막 위에 증착된 비정질 실리콘 박막에 레이저빔을 조사할 경우, 기판의 깊이 방향인 수직 방향으로의 열 전달 효과뿐만 아니라 수평 방향으로의 열 전달 효과 또한 중요하다. 그러나 엑시머 레이저 조사에 의한 불순물의 수평방향으로의 확산 현상에 대한 보고는 발표된 바가 없다. 본 논문에서는 선택적으로 도핑된 비정질 실리콘(SOI 구조)에서 XeCl ($\lambda = 308\text{nm}$) 엑시머 레이저에 의한 붕소(boron) 이온의 수평 확산현상을 관찰하였다. 이온의 확산에 의한 도핑 농도의 변화를 관찰하기 위하여 불산/질산 용액에 의한 습식 식각 방법을 이용하였고 식각 후에 남은 다결정 실리콘 패턴을 전자주사현미경 (Scanning Electron microscope, SEM)을 이용하여 관찰하였다. 본 실험에서는 엑시머 레이저 에너지 밀도가 $200\text{mJ}/\text{cm}^2$ 일 때 주입된 붕소 이온이 수평 방향으로 약 $0.15\mu\text{m}$ 가 확산됨을 확인했으며, 에너지 밀도 $300\text{mJ}/\text{cm}^2$ 의 경우 불순물 주입 영역의 가장자

리 부분의 불순물 농도가 현저히 감소되는 것을 관찰했다.

2. 실험

시료는 그림1에 나타난 준비과정을 거쳐 제작되었다. 두께 500nm 의 산화막이 성장된 실리콘 기판 위에 두께 80nm 의 비정질 실리콘 박막을 플라즈마 화학기상증착 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)방법으로 300°C 의 온도에서 증착하고, 400°C , 질소 분위기에서 4시간의 탈수소 공정을 거친다. 선택적 붕소 이온 주입을 위해 감광제 (photoresist) 패턴을 비정질 실리콘 박막 위에 형성하고, 이온 주입량 $5 \times 10^{15} \text{ ions}/\text{cm}^2$, 가속 전압 20keV 으로 붕소이온을 주입한다. 박막 내의 붕소 이온의 평균 농도는 약 $6 \times 10^{20} \text{ ions}/\text{cm}^3$ 이다. 감광막을 제거한 후, XeCl ($\lambda = 308\text{nm}$) 엑시머 레이저를 1회 조사하여 선택적으로 도핑된 비정질 실리콘 박막은 다결정 실리콘 박막으로 결정화시킨다. 여기서 레이저 에너지 밀도는 각각 $200, 300 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 이며 조사 횟수는 1회로 하였다. 그리고 선택적으로 이온 주입된 영역에서 다결정 실리콘 박막의 그레인 크기는 $0.1\mu\text{m}$ 보다 작음을 관찰할 수 있었다. 레이저 어닐링을 수행한 다결정 실리콘 박막 내의 붕소 이온의 분포를 관찰하기 위하여, HF/HNO₃ 용액으로 8초 동안 습식식각을 수행하였다. 식각에 사용된 용액은 불산 (49%), 질산 (70%), 아세트산 (97%)이 1:40:20의 비율로 혼합된 것이며[5], 식각 원리는 질산이 먼저 실리콘 막을 산화시킨 후 불산이 질산에 의해 형성된 산화막을 식각하는 방식으로 고농도 ($>1 \times 10^{18} \text{ ions}/\text{cm}^3$)로 도핑된 실리콘 박막의 식각율이 큰 것으로 알려져 있다. [6] 고농도로 도핑된 다결정 실리콘 영역은 불순물이 상대적으로 많고 $0.1\mu\text{m}$ 보다 작은 그레인으로 구성되어 있기 때문에, 이 영역은 도핑 농도가 $1 \times 10^{18} \text{ ions}/\text{cm}^3$ 보다 낮거나 전혀 도핑 되지 않은 부분보다 식각율이 더 높다 [5]. 본 실험에서 측정된 식각율은 다결정 실리콘 박막의 두께가 80nm 일 때, 도핑되지 않은

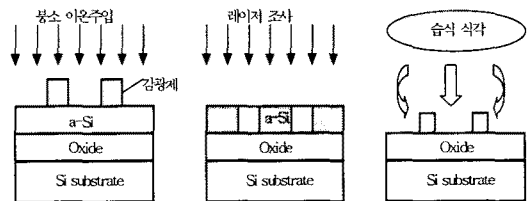


그림 1 수평 확산실험을 위한 샘플의 준비 과정. (산화막 두께는 500nm)

부분은 18~22초, 도핑된 부분은 7초 후 완전 식각됨을 확인할 수 있었다. 습식 식각 후, 남아있는 실리콘 패턴을 광학 현미경과 전자주사 현미경을 이용하여 관찰하였다

3. 결과 및 토의

그림 2는 레이저 에너지 밀도를 $200\text{mJ}/\text{cm}^2$ 로 조사한 다결정 실리콘 박막을 습식 식각 처리 후 SEM으로 관찰한 것이다. 불순물의 농도가 높은 영역 ($>10^{18}\text{ions}/\text{cm}^3$)은 선택적인 습식 식각 후에 완전히 제거되었고, 상대적으로 농도가 낮은 다결정 실리콘 영역이 식각되지 않고 남아 있음을 확인할 수 있다. 그림 2에서 관찰된 다결정 실리콘 패턴의 폭은 $0.8\mu\text{m}$ 이었다. 그런데, 이온을 선택적으로 도핑하는 과정에서 쓰인 마스크 패턴의 폭이 $1.1\mu\text{m}$ 이었으므로, 불순물이 도핑된 영역 폭이 양쪽으로 약 $0.15\mu\text{m}$ 만큼 수축되었다. 이는 레이저 조사에 의해 비정질 실리콘 박막이 녹아 있을 동안 붕소 이온들이 도핑이 되지 않은 영역으로 확산한 것으로 판단된다. 또한, 레이저 에너지를 조사하고 난 후 박막이 고상화 한 후에는 잔존하는 열에너지로 확산이 일어나고, 액상 실리콘에서의 확산계수는 고상 실리콘에서의 확산 계수에 비해 10^8 배 이상 크기 때문에 [5], 우리 실험에서의 수평 확산은 실리콘 박막이 용융되어 있는 짧은 시간동안 대부분의 확산이 일어난다고 판단되므로, 고상화 후의 확산은 무시한다.

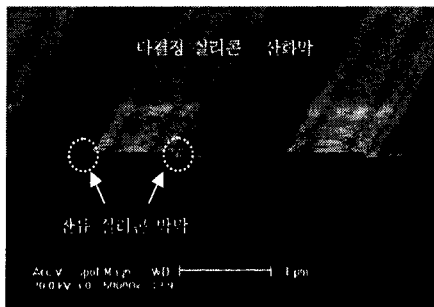


그림 2 8초 식각 후 다결정 실리콘 박막 패턴 (전자주사현미경). 레이저는 1회 조사되었고, 에너지 밀도는 $200\text{mJ}/\text{cm}^2$ 이었다. 이온 주입에 사용된 마스크의 크기는 $1\mu\text{m}/1\mu\text{m}$ 이었다

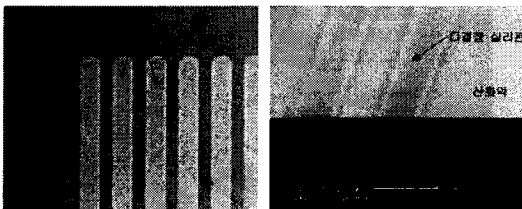


그림 3 8초 동안 식각을 진행한 후 남아있는 다결정 실리콘 패턴. 레이저 에너지 세기는 $300\text{mJ}/\text{cm}^2$ (1회 조사)였고, 제작된 이온주입 마스크의 크기는 $3\mu\text{m}/3\mu\text{m}$ 이었다.

한편, 다결정 실리콘 패턴의 하부 모서리에 실리콘 박막의 일부가 남아있음을 관찰할 수 있다 (그림 2). 남아있는 실리콘 박막은 초기에 도핑되지 않은 영역의 실리콘 패턴보다 두께가 훨씬 얇고 폭은 약 100nm 로 관찰되는데, 다음의 두 가지 원인에 의해 형성된 것으로 판단된다. 첫째는 레이저 에너지 ($200\text{mJ}/\text{cm}^2$)에 의해 비정질 실리콘 박막의 상부만 부분적으로 용융되어 주입된 이온이 도핑되지 않은 영역의 하부까지 충분히 확산이 이루어지지 않은 것이다. 또 다른 원인은 레이저에 의한 용융-재결정화 과정에서 이온의 농도 구배에 의한 확산현상으로 모서리까지 확산되지 않았기 때문이다 (그림 5). 따라서 하부 모서리 부분에 남은 실리콘 박막의 도핑 농도는 $10^{18}\text{ions}/\text{cm}^3$ 이하로 판단된다. 또한, 남은 실리콘 영역은 식각 시간을 증가하여도 잔존하였음도 확인하였다. 역시며 레이저 에너지 밀도를 증가시키면 $200\text{mJ}/\text{cm}^2$ 의 에너지로 재결정화 된 경우와 달리, 몇 가지 특이한 현상을 관찰할 수 있었다. 그림 3은 역시며 레이저 에너지 세기를 $300\text{mJ}/\text{cm}^2$ 로 해서 1회 조사하고, 습식 식각을 거친 후의 다결정 실리콘 박막상태를 보여준다. 이온주입에 사용된 마스크의 선폭과 간격은 $3\mu\text{m}/3\mu\text{m}$ 이었지만, 식각 후의 다결정 실리콘 패턴은 마스크 선폭에 비해 양쪽으로 $0.5\mu\text{m}$ 씩 확장되어 $4\mu\text{m}$ 의 폭을 가진 것처럼 보인다 (그림 3(a)). 이에 반해 패턴의 사이 (이온 주입된 부분)에는 실리콘이 완전히 제거되고 산화막이 드러나 있음을 확인할 수 있었다.

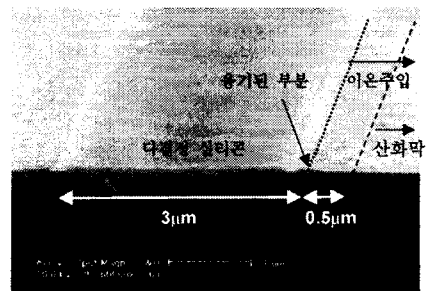


그림 4 습식 식각 후의 실리콘 패턴. 레이저 에너지 밀도는 $300\text{mJ}/\text{cm}^2$ 이고 1회 조사하였다.

그림 4는 그림 3 (b)을 확대한 것으로 도핑되지 않은 다결정 실리콘 패턴영역, 패턴의 양쪽으로 용기되어 있는 영역, 패턴과 용기된 부분 사이에 움푹 패인 영역의 세가지 영역으로 구분해 볼 수 있다. 먼저 용기된 부분을 살펴보면, 그 폭이 약 $0.5\mu\text{m}$ 로서 선택적 이온 주입된 부분에 형성되었음을 알 수 있다. 레이저 에너지를 $200\text{mJ}/\text{cm}^2$ 로 조사한 경우에는 나타나지 않는 부분으로서 레이저 에너지 밀도의 증가에 의해 비정질 실리콘이 용융되어 액상으로 존재하는 시간이 길어짐에 따라 형성된 것으로 판단된다. 용융시간이 길어지면 액상에서의 붕소이온의 확산시간이 늘어나서 레이저 에너지 밀도가 낮은 경우에 비해 고농도로 도핑된 부분이 용융되어 있는 상태에서 확산이 활발히 이루어져서 농도가 높은

부분과 낮은 부분사이의 농도분포가 자연스럽게 재분포할 수 있었을 것으로 판단된다. 한편, 용기된 부분과 도핑되지 않은 영역의 실리콘 패턴 사이에는 움푹 패인 영역이 존재한다. 이는 선택적으로 이온 주입된 비정질 실리콘 박막의 레이저 결정화 과정에서 수평성장 그래인이 형성되고 [7] 수평 그래인이 성장할 때, 액상/고상 실리콘 경계면이 고밀도의 액상 실리콘을 통해 성장하면서 그림 4에 나타난 것과 같이 움푹 패인 부분이 나타난다. [8] 박막표면의 요철 상태는 습식 식각을 거친 후에도 그대로 보존되었음을 전자주사현미경을 통해 확인할 수 있었다.

이러한 특이한 현상으로 인해, 레이저 에너지 밀도가 낮을 때와는 달리 에너지 밀도가 높은 경우에는 확산 길이를 명확히 측정하기가 어려움이 있다. 다만, 높은 에너지 밀도의 레이저 조사로 인해 고농도로 도핑된 영역의 경계에서 이온들의 재분포가 신속히 발생하여 경계에서의 평균농도가 감소하여 패턴이 확장되었다는 것은 확인할 수 있다. 따라서 에너지 밀도가 증가하면 붕소 이온의 확산 길이는 현저히 증가하게 됨을 간접적으로 확인할 수 있고, 확산길이는 레이저 에너지 $200\text{mJ}/\text{cm}^2$ 에서의 확산길이 150nm 보다 더 길다는 것을 알 수 있다.

도가 급격히 감소되었기 때문에 판단된다.

(참 고 문 헌)

- [1] Do-Hyun Choi, M. Matsumura, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.33, 99L83-L86, 1994
- [2] M. C. Lee, J. H. Jeon, I. H. Song, M. K. Han, SID 2001, pp. 1246-1249
- [3] D.P.Gosain, T. Noguchi, A. Machida, S. Usui, Technical Digest of AMLCD' 99, pp.239-242, 1999
- [4] J-H Jeon, M-C. Lee, K-C. Park and M-K Han, IEEE Electron Device Lett., Vol.22, pp.429-431
- [5] Vittorio Privitera, C. Spinella, G. Fortunato, L. Mariucci, Appl. Phys. Lett. Vol. 77, No. 4, pp.552-554, 2000
- [6] C. Spinella, V. Raineri, S.U. Campisano, J. Electrochem. Soc.Vol.142, No.5,pp. 1601-1607, 1995
- [7] M-C. Lee, S-H.Jung, I-H Song and M-K. Han, the proceeding of ISDRS 2001, pp.85-88
- [8] L.Mariucci, A.Pecora, R.Carluccio, G.Fortunato, Thin Solid Films 383 (2001), pp.39-44

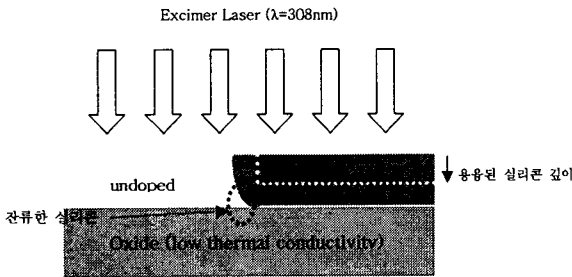


그림 5 레이저 에너지 세기가 $200\text{mJ}/\text{cm}^2$ 일 때의 주입된 이온의 수평방향으로의 확산 모식도

4. 결 론

엑시머 레이저 조사에 의한 불순물의 분포 변화를 알아보기 위해 붕소 이온이 선택적으로 도핑된 비정질 실리콘 박막 위에 엑시머 레이저를 조사하여 이온의 수평 확산 현상을 습식 식각과 전자주사현미경을 이용해서 분석하였다. 고농도로 도핑된 영역 ($> 10^{18}\text{ions}/\text{cm}^3$)은 도핑 농도가 낮은 영역 혹은 도핑되지 않은 부분에 비해 불산/질산 용액에 의해서 쉽게 제거되었고 이를 이용하여 도핑 농도가 낮은 실리콘 패턴을 관찰할 수 있었다. 선택적으로 도핑된 비정질 실리콘 박막에 레이저 에너지 밀도 $200\text{mJ}/\text{cm}^2$ 로 조사할 때, 고농도 도핑영역에서 붕소이온이 도핑농도가 낮은 영역의 방향으로 $0.1\mu\text{m}$ 씩 확산되어, 습식 식각 후에 도핑 농도가 낮은 다결정 실리콘 패턴의 폭이 수축되었음을 관찰할 수 있었다. 레이저 에너지 밀도가 $300\text{mJ}/\text{cm}^2$ 로 증가하면, 다결정 실리콘 패턴의 폭이 넓어지게 되고, 약 500nm 의 폭을 갖는 유기부분을 볼 수 있다. 넓어진 패턴은 엑시머 레이저에 의해 주입된 이온의 확산이 활발히 일어나고 이로 인해 붕소 이온이 주입된 영역 가장자리에서 도핑 농