

SiO_xF_y/a-Si 구조에 엑시머 레이저 조사에 의해 불소화된 다결정 실리콘 박막 트랜지스터의 전기적 특성과 신뢰도 향상

論 文

48C-9-4

Passivation Effects of Excimer-Laser-Induced Fluorine using SiO_xF_y Pad Layer on Electrical Characteristics and Stability of Poly-Si TFTs

金天弘*·全宰弘*·柳俊錫*·韓民九**

(Cheon-Hong Kim · Jae-Hong Jeon · Juhn-Suk Yoo · Min-Koo Han)

Abstract - We report a new *in-situ* fluorine passivation method without ion implantation by employing excimer laser annealing of SiO_xF_y/a-Si structure and its effects on p-channel poly-Si TFTs. The proposed method doesn't require any additional annealing step and is a low temperature process because fluorine passivation is simultaneous with excimer-laser-induced crystallization. A *in-situ* fluorine passivation by the proposed method was verified from XPS analysis and conductivity measurement. From experimental results, it has been shown that the proposed method is effective to improve the electrical characteristics, specially field-effect mobility, and the electrical stability of p-channel poly-Si TFTs. The improvement is due to fluorine passivation, which reduces the trap state density and forms the strong Si-F bonds in poly-Si channel and SiO₂/poly-Si interface. From these results, the high performance poly-Si TFTs can be obtained by employing the excimer-laser-induced fluorine passivation method.

Key Words : polycrystalline silicon, thin film transistor, SiO_xF_y, stability, fluorine passivation, excimer laser annealing

1. 서 론

엑시머 레이저 어닐링(excimer laser annealing; ELA)을 이용한 다결정 실리콘 박막 트랜지스터(polycrystalline silicon thin film transistors; poly-Si TFTs)는 높은 전계 효과 이동도(field effect mobility)로 인해 화소부와 구동 회로부를 한 기판에 집적할 수 있기 때문에 능동 매트릭스 액정 디스플레이(active matrix liquid crystal displays; AMLCDs) 등에 유망한 소자로 각광 받고 있으며, 현재 소자의 특성을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다[1, 2]. 그러나, 다결정 실리콘 활성층(active layer)의 그레인 경계(grain boundary)와 그레인 내부에 존재하는 많은 결함(defects)들로 인한 트랩 상태(trap state)들이 poly-Si TFTs의 전기적 특성을 저하시킨다는 사실이 널리 알려져 있다[3, 4].

이 문제를 해결하기 위하여 다결정 실리콘 활성층의 트랩 상태 밀도를 감소시키거나[3-6] 그레인 크기를 증가시킴으로써[7] 소자 특성을 향상시키는 다양한 방법들이 제안되었다. 수소화(hydrogenation)는 트랩 상태들을 안정화(passivation)시키는 방법으로 널리 사용되고 있으나[3, 4], 약한 Si-H 결합이 전기적인 스트레스에 불안정하기 때문에 수소화된 poly-Si TFTs의 장시간 신뢰도(long-term

stability)가 개선되어야 한다[8, 9].

최근에 수소화 뿐만 아니라 다결정 실리콘 활성층으로의 불소(fluorine; F) 이온 주입이 트랩 상태 밀도를 감소시키는데 효과적인 방법이라고 보고되어 왔다[5, 6]. 더구나, 불소 이온 주입은 다결정 실리콘 채널과 게이트 산화막/다결정 실리콘 계면(SiO₂/poly-Si interface)에 Si-H 결합보다 강한 Si-F 결합을 형성함으로써 소자의 신뢰도를 향상시킬 수 있다고 보고되었다[5]. 그러나, 이온 주입 방법은 대면적의 기판에 적용하기 힘들고, 또한 주입된 불소 이온들을 활성화시키고 이온 주입 손상을 치유하기 위해 고온의 열처리가 필요한 단점이 있다[5, 6].

본 논문에서는 이온 주입이나 추가의 열처리 공정 없이 저온 공정으로 엑시머 레이저에 의해 불소화(fluorine passivation)시키는 새로운 방법을 제안한다. 제안된 방법은 SiO_xF_y/a-Si 구조에 엑시머 레이저를 조사하여 비정질 실리콘(amorphous silicon; a-Si) 박막의 다결정 실리콘 박막으로의 결정화와 불소화를 동시에 얻을 수 있는 방법이다. 제안된 방법으로 불소화된 p-채널 poly-Si TFTs를 제작하고 전기적 특성과 신뢰도를 조사하였다. 실험 결과들은 제안된 방법으로 다결정 실리콘 박막의 불소화가 성공적으로 이루어 졌으며, 제안된 방법이 소자의 전기적 특성과 신뢰도 향상에 효과적임을 보여준다.

2. 실험 방법

그림 1은 제안된 엑시머 레이저에 의한 불소화 방법의 개략도를 나타낸다. 제안된 방법에서 엑시머 레이저 어닐링을

* 準 會 員 : 서울대 電氣工學部 博士課程

** 正 會 員 : 서울대 電氣工學部 教授 · 工博

接受日字 : 1999年 5月 31日

最終完了 : 1999年 7月 26日

수행할 때, 불소화된 실리콘 산화막(fluorine-doped silicon oxide; SiO_xF_y)을 희생층(pad layer)으로 사용한다. $\text{SiO}_x\text{F}_y/\text{a-Si}$ 구조에 엑시머 레이저가 조사되면, 산화막은 광투과율이 높으므로 레이저 에너지는 대부분 비정질 실리콘 박막에 흡수되며 SiO_xF_y 박막은 불소 원자들의 확산원(diffusion source)으로 작용하게 된다. 흡수된 레이저 에너지에 의해 녹은 비정질 실리콘이 다결정 실리콘 박막으로 결정화되며, 동시에 불소 원자들이 SiO_xF_y 박막으로부터 확산되어 트랩 상태들을 안정화 시키게 되고, 결국 비정질 실리콘은 불소화된 다결정 실리콘 박막으로 변화된다. 제안된 방법은 결정화와 불소화 과정이 동시에 일어나기 때문에, 추가의 열처리 공정이 필요 없는 저온 공정이며 수소화와 같이 소자 제작이 끝난 후 플라즈마 처리를 하는 후처리 공정이 아닌 *in-situ* 공정이다.

XeCl Excimer Laser Irradiation

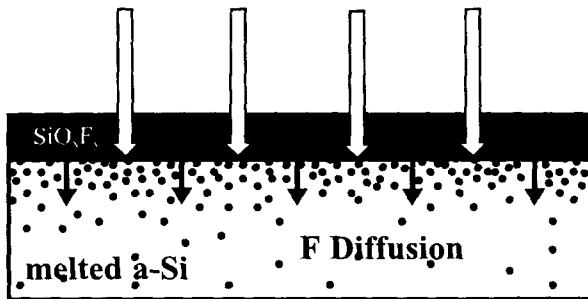


그림 1 제안된 엑시머 레이저에 의한 불소화 방법의 개략도.

Fig. 1 The schematic cross section of the proposed fluorine passivation method using excimer laser annealing.

제안된 방법의 poly-Si TFTs에 대한 불소화 효과를 조사하기 위해 p-채널 poly-Si TFTs를 제작하였다. 열산화된 실리콘 기판 위에 800 Å 두께의 비정질 실리콘 박막을 LPCVD (low pressure chemical vapor deposition) 방법으로 550 °C에서 증착하고 활성층을 정의한 후, 200 Å 두께의 SiO_xF_y 희생층을 TEOS (tetraethoxysilane), O_2 와 C_2F_6 를 이용하여 PECVD (plasma-enhanced chemical vapor deposition) 방법으로 390 °C에서 증착하였다[10]. 비교를 위하여, 같은 두께의 SiO_2 희생층이 C_2F_6 없이 같은 방법으로 증착되었다. 그리고, 250 mJ/cm^2 의 에너지 밀도를 갖는 XeCl 엑시머 레이저($\lambda=308 \text{ nm}$)를 $\text{SiO}_x\text{F}_y/\text{a-Si}$ 구조와 $\text{SiO}_2/\text{a-Si}$ 구조에 각각 조사하였다.

산화막 희생층들을 제거한 후, 결정화된 다결정 실리콘 박막의 표면 성분을 조사하기 위해 Mg K XPS (X-ray photoelectron spectroscopy) 분석과 불소 원자들이 다결정 실리콘의 결정화도(crystallinity)에 미치는 영향을 조사하기 위하여 자외선 반사도(UV reflectance) 분석을 $\text{SiO}_x\text{F}_y/\text{a-Si}$ 구조와 $\text{SiO}_2/\text{a-Si}$ 구조에 대해 각각 수행하였다. 또한, 알루미늄 전극 패턴을 정의하여 다결정 실리콘 저항($W/L=500 \mu\text{m}/90 \mu\text{m}$)을 제작하였다.

그 후, 1000 Å 두께의 게이트 TEOS-산화막과 2000 Å

두께의 몰리브덴(Molybdenum; Mo) 게이트 전극이 각각 PECVD와 스퍼터링(sputtering) 방법을 이용하여 증착되었다. 게이트 패턴을 정의한 후, 소오스와 드레인 전극을 형성하기 위해 B_2H_6 이온 샤워 도핑(ion shower doping)을 수행하고 400 °C에서 2시간 동안 열처리 하였다. 마지막으로, 5000 Å 두께의 PECVD 산화막 위에 알루미늄 전극 패턴을 정의한 후, 450 °C에서 30 분 동안 열처리하여 소자의 제작을 마쳤다.

3. 실험 결과 및 고찰

레이저 어닐링된 두 시편의 산화막 희생층들(SiO_xF_y , SiO_2)을 제거하고 Mg K X-ray를 이용하여 XPS (X-ray photoelectron spectroscopy) 분석을 수행하였다. 그림 2는 두 시편의 XPS 분석 결과를 보여준다.

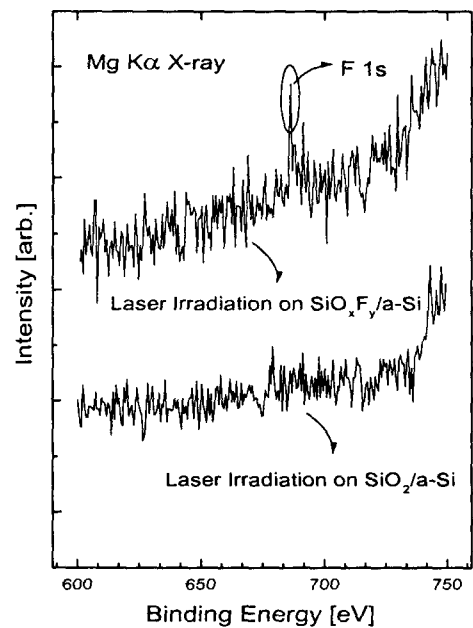


그림 2 $\text{SiO}_x\text{F}_y/\text{a-Si}$ 구조와 $\text{SiO}_2/\text{a-Si}$ 구조에 레이저 조사에 의해 결정화된 다결정 실리콘 박막들의 XPS 분석 결과.

Fig. 2 The XPS data of the poly-Si films crystallized by laser irradiation on $\text{SiO}_x\text{F}_y/\text{a-Si}$ and $\text{SiO}_2/\text{a-Si}$ structure, respectively.

$\text{SiO}_2/\text{a-Si}$ 구조에 레이저 조사에 의해 결정화된 다결정 실리콘 박막과 달리 $\text{SiO}_x\text{F}_y/\text{a-Si}$ 구조에 레이저 조사에 의해 결정화된 다결정 실리콘 박막에서는 결합 에너지(binding energy) 686 eV 부근에서 불소 원자에 대한 피크(F 1s)가 나타남을 알 수 있다. 이 XPS 분석 결과의 SNR (signal-to-noise ratio)이 충분히 높지 않기 때문에 다결정 실리콘 박막 내부에 함유된 불소의 함유량을 정량적으로 분석하기는 어려움에도 불구하고, 이 결과는 제안된 방법에 의해 불소 원자들이 다결정 실리콘 박막으로 성공적으로 확산

되었음을 보여준다.

SiO_xF_y/a-Si 구조와 SiO₂/a-Si 구조에 각각 레이저 조사를 통해 결정화된 다결정 실리콘 박막의 자외선 반사도가 그림 3에 나타나 있다. 데이터의 기준으로서 비정질 실리콘과 단결정 실리콘의 반사도를 함께 나타내었다. 박막의 결정화도(crystallinity)는 275 nm 근방의 피크를 적분하여 단결정 실리콘을 기준으로 계산하였다[11, 12]. SiO₂/a-Si 구조에 레이저 조사를 통해 결정화된 다결정 실리콘, 즉 불소가 함유되지 않은 다결정 실리콘의 결정화도는 73.8 %로서 SiO_xF_y/a-Si 구조에 레이저 조사를 통해 결정화된 불소가 함유된 다결정 실리콘의 결정화도(74.6 %)와 거의 비슷하다. 따라서, 불소 원자들이 다결정 실리콘의 결정화도에 미치는 영향은 거의 무시할 만하다.

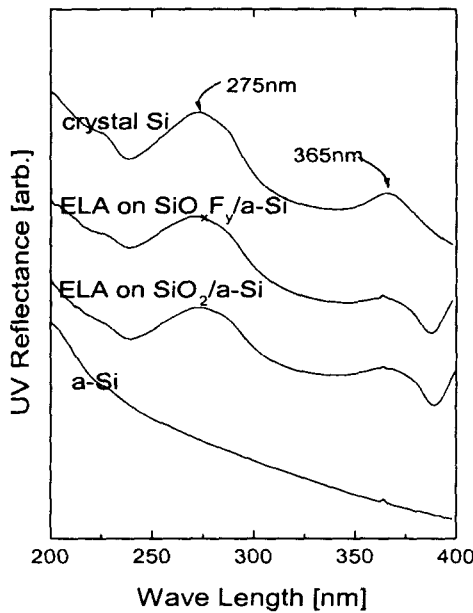


그림 3 SiO_xF_y/a-Si 구조와 SiO₂/a-Si 구조에 레이저 조사에 의해 결정화된 다결정 실리콘 박막들의 자외선 반사도 분석 결과. 비정질 실리콘과 단결정 실리콘은 기준 시편을 나타낸다.

Fig. 3 The UV reflectance data of the poly-Si films crystallized by laser irradiation on SiO_xF_y/a-Si and SiO₂/a-Si structure, respectively. Single crystal Si and a-Si represent reference samples.

또한, 제작된 저항들의 전기 전도도 측정 결과, 불소가 함유되어 있는 다결정 실리콘 박막의 전기 전도도($1.16 \times 10^{-5} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$)가 불소가 함유되지 않은 박막의 전기 전도도($2.07 \times 10^{-6} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$)보다 크게 향상되었다. 이 결과와 XPS 분석 결과로부터, 제안된 방법에 의해 다결정 실리콘 박막으로 확산된 불소 원자들이 트랩 상태들을 성공적으로 안정화(passivation) 시켰음을 알 수 있다. 즉, SiO_xF_y/a-Si 구조에 엑시머 레이저 어닐링을 수행하여 불소화된 poly-Si TFTs

를 제작할 수 있다.

그림 4는 제안된 방법으로 불소화된 소자와 불소화되지 않은 p-채널 소자의 전달 특성(transfer characteristics) 곡선을 나타낸다. 두 소자의 크기는 모두 W/L=10 μm/10 μm 이고, V_{DS}는 -0.1 V와 -10 V이다. 불소화된 소자의 문턱 이전(subthreshold) 특성과 on-상태(on-state) 특성은 불소화되지 않은 소자의 특성보다 개선되었음을 알 수 있다. 제안된 방법으로 불소화된 소자의 문턱 전압(threshold voltage)과 문턱 이전 스윙(subthreshold swing)이 불소화되지 않은 소자에 비해 각각 -11.4 V와 1.41 V/dec에서 -9.5 V와 1.19 V/dec로 개선되었다. 그러나, off-상태(off-state) 누설 전류(leakage current)는 거의 변화가 없다. 이러한 결과는 예전의 보고들과 일치하며[5], 불소화된 소자의 특성 향상은 주로 다결정 실리콘 채널과 게이트 산화막/다결정 실리콘 계면에 있는 트랩 상태들을 불소 원자들이 치유했기 때문이라고 분석된다[5]. 즉, 다결정 실리콘 채널과 게이트 산화막/다결정 실리콘 계면의 트랩 상태 밀도가 감소하여 문턱 전압과 문턱 이전 스윙이 감소되어 on-상태 구동 전류(drive current)가 증가하였다.

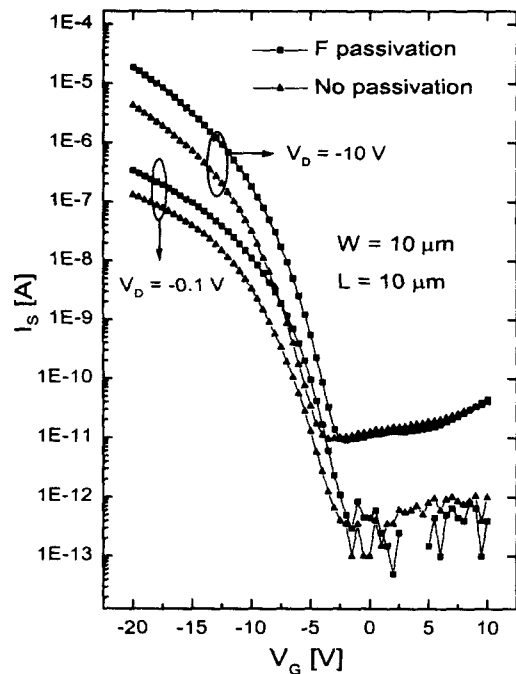


그림 4 불소화된 소자와 불소화되지 않은 소자의 전달 특성 곡선.

Fig. 4 The transfer characteristics of devices with and without *in-situ* fluorine passivation at V_{DS}=-0.1 V and -10 V.

수소화 효과와 불소화 효과를 비교하기 위해서 평행판 rf 플라즈마 반응기로 300 °C에서 2 시간 동안 수소화를 수행하였다. 수소화 전후의 p-채널 소자 전달 특성이 그림 5에 나타나 있다. 수소화가 불소화된 소자와 불소화되지 않은

소자 모두의 특성을 향상시킴을 알 수 있다. 또한, 수소화는 불소화와 달리 off-상태 누설 전류를 감소시킨다. $V_{GS}=10\text{ V}$ 에서 측정된 off-상태 누설 전류는 수소화 이전에 비해 대략 25 % 정도 감소했다.

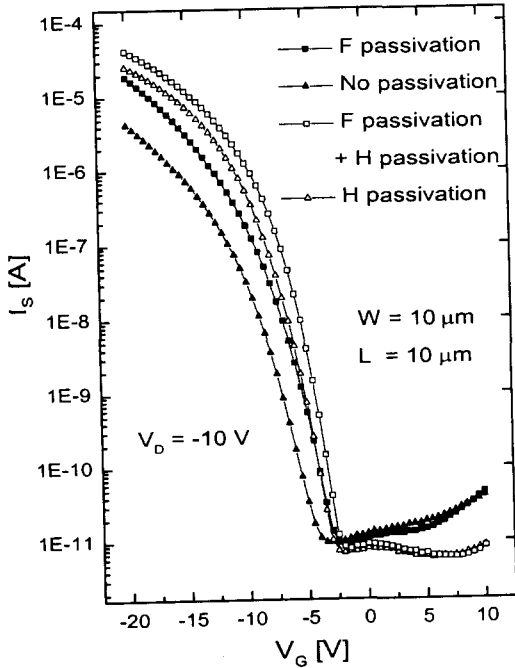


그림 5 불소화된 소자와 불소화되지 않은 소자의 수소화 전후의 전달 특성 곡선.

Fig. 5 The transfer characteristics of devices with and without *in-situ* fluorine passivation before and after hydrogenation at $V_{DS}=-10\text{ V}$.

표 1 불소화된 소자와 불소화되지 않은 소자의 수소화 전후의 소자 특성.

Table 1 The device parameters of devices with and without *in-situ* fluorine passivation before and after hydrogenation.

		$V_T(\text{V})$	$S(\text{V}/\text{dec})$	$\mu_p(\text{cm}^2/\text{Vs})$	$I_{off}(\text{pA})$
수소화 전	w/o F passivation	-11.4	1.41	8.5	40.2
	w/ F passivation	-9.5	1.19	17.5	45.4
수소화 후	w/o F passivation	-8.3	1.01	15.3	8.55
	w/ F passivation	-7.2	0.92	29.0	8.45

수소화 전후의 문턱 전압(V_T), 문턱 이전 스윙(S), 전계 효과 이동도(μ_p), off-상태 누설 전류(I_{off}) 등의 소자 특성이 표1에 요약되어 있다. Off-상태 누설 전류는 $V_{GS}=10\text{ V}$ 에서 측정되었다. 수소화가 off-상태 누설 전류를 효과적으로 감

소시키는 반면, 제안된 불소화는 소자의 전계 효과 이동도의 개선에 수소화보다 더 효과적임을 알 수 있다[5]. 수소화 후 불소화되지 않은 소자의 전계 효과 이동도는 $15.3\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 인 반면 불소화된 소자는 $29.0\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 이었다. 또한, 제안된 불소화 방법과 수소화를 병행하면 가장 좋은 특성을 얻을 수 있다.

불소화된 소자와 불소화되지 않은 p-채널 소자의 수소화 후의 전기적 신뢰도를 조사하기 위해서 전기적 스트레스 실험을 수행하였다. 스트레스 조건은 상온에서 $V_{DS}=-25\text{ V}$, $V_{GS}=-25\text{ V}$ 이다. 그림 6은 스트레스 시간에 대한 소자의 전계 효과 이동도 변화량($-\Delta V_T$)과 문턱 이전 스윙 변화량(ΔS)을 나타낸다.

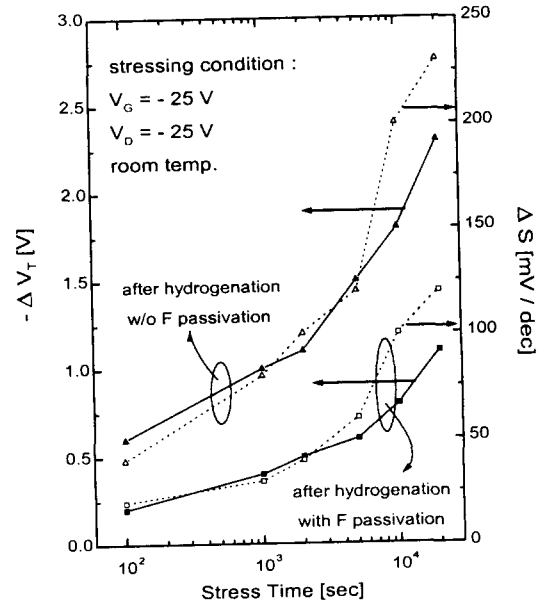


그림 6 스트레스 시간에 대한 문턱 전압 차이와 문턱 이전 스윙 차이의 변화. 스트레스 조건은 $V_{DS}=-25\text{ V}$, $V_{GS}=-25\text{ V}$ 이다.

Fig. 6 The threshold voltage shift and the subthreshold swing shift of devices as a function of stress time after devices were stressed at $V_{DS}=-25\text{ V}$, $V_{GS}=-25\text{ V}$.

제안된 방법으로 불소화된 소자의 전계 효과 이동도와 문턱 이전 스윙 열화(degradation) 현상이 불소화되지 않은 소자에 비해 매우 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 불소화된 소자의 수소화 후의 신뢰도가 불소화되지 않은 소자의 수소화 후의 신뢰도에 비해 월등히 개선되었다. 이는 불소화로 인해 다결정 실리콘 채널과 산화막/다결정 실리콘 계면에 Si-H 결합(4.2 eV)보다 결합 에너지가 큰 Si-F 결합(5.8 eV)이 Si-H 결합을 대신하여 형성됨으로써 전기적 스트레스에 안정하기 때문이다[5, 6].

따라서, 제안된 액시머 레이어에 의한 불소화 방법과 수소화를 병행함으로써 소자 특성과 신뢰도의 향상을 가져와 고성능 다결정 실리콘 박막 트랜지스터를 제작할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 이온 주입이나 추가의 열처리 공정 없이 저온에서 엑시머 레이저에 의해 불소화시키는 새로운 방법과 그것의 poly-Si TFTs에 대한 영향을 보고한다. 제안된 방법은 결정화와 불소화 과정이 동시에 일어나기 때문에 추가의 열처리 공정이 필요 없고 저온 공정이며 수소화와 같은 후처리 공정이 아니다. XPS 분석과 전기 전도도 측정을 통하여 제안된 방법으로 불소화가 이루어졌음을 확인하였고, 엑시머 레이저에 의한 불소화 방법이 p-채널 poly-Si TFTs의 소자 특성, 특히 전계 효과 이동도의 개선에 효과적임을 알 수 있었다. 또한, 불소화를 통해 다결정 실리콘 채널과 산화막/다결정 실리콘 계면에 결합 에너지가 큰 Si-F 결합이 형성되어 소자의 신뢰도가 월등히 향상되었다. 따라서, 제안된 엑시머 레이저에 의한 불소화 방법과 수소화를 병행함으로써 소자 특성과 신뢰도가 향상된 고성능 다결정 실리콘 박막 트랜지스터를 제작할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] A.G. Lewis, D.D. Lee and R.H. Bruce, Polysilicon TFT Circuit Design and Performance, IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 27, p.1833, 1992.
 [2] A.H. Firester, W.R. Roach and R.Stewart, Poly-Si TFT Devices and Their Application to LCDs", Japan Display 92, p. 557, 1992.
 [3] T. I. Kamins and P. J. Marcoux, Hydrogenation of Transistors Fabricated in Polycrystalline Silicon Films, IEEE Electron Device Lett., Vol. EDL-1, pp. 159-161, 1980.
 [4] I. W. Wu, T. Y. Huang, W. B. Jackson, A. G. Lewis and A. Ciang, Passivation Kinetics of Two Types of Defects in Polysilicon TFT by Plasma Hydrogenation, IEEE Electron Device Lett., Vol. EDL-12, pp. 181-183, 1991.
 [5] H. N. Chern, C. L. Lee and T. F. Lei, The Effects of Fluorine Passivation on Polysilicon Thin-Film Transistors, IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-41, No. 5, pp. 698-702, 1994.
 [6] J. W. Park, B. T. Ahn and K. Lee, Effects of F⁺ Implantation on the Characteristics of Poly-Si Films and Low-Temperature n-ch Poly-Si Thin-Film Transistors, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 34, Part 1, No. 3, pp. 1436-1441, 1995.
 [7] D. H. Choi, K. Shimizu, O. Sugiura and M. Matsumura, Drastic Enlargement of Grain Size of Excimer-Laser-Crystallized Polysilicon Films, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 31, Part 1, pp. 4545-4549, 1992.
 [8] S. Banerjee, R.Sundaresan, H. Shichijo and S. Malhi, Hot-Carrier Degradation of n-Channel Polysilicon MOSFETs, IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-35, pp. 152-157, 1988.

[9] I. W. Wu, W. B. Jackson, T. Y. Huang, A. G. Lewis and A. Ciang, Mechanism of Device Degradation in n- and p-Channel Polysilicon TFTs by Electrical Stressing, IEEE Electron Device Lett., Vol. EDL-11, pp. 167-170, 1990.
 [10] T. Usami, K. Shimokawa and M. Yosimaru, Low Dielectric Constant Interlayer Using Fluorine-Doped Silicon Oxide, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 33, Part 1, p. 408, 1994.
 [11] T. Noguchi, H. Hayashi and T. Oshima, Advanced Superthin Polysilicon Film Obtained by Si⁺ Implantation and Subsequent Annealing, J. Electrochem. Soc., Vol. 134, No. 7, p. 1771, 1987.
 [12] H. E. Bennett and J. O. Porteus, Relation Between Surface Roughness and Specular Reflectance at Normal Incidence, J. Opt. Soc. Am., Vol. 51, No. 2, p. 123, 1961.

저 자 소 개



김 천 홍 (金天弘)

1973년 10월 25일 생. 1996년 서울대 전기공학부 졸업. 1998년 동 대학교 대학원 전기공학부 졸업(석사). 현재 동 대학교 대학원 전기공학부 박사과정.
 Tel : (02) 880-7992
 E-mail : kch@emlab.snu.ac.kr

전 재 홍 (全宰弘)

전기학회논문지 제48C권 제5호 참조
 Tel : (02) 880-7992
 E-mail : jjh@emlab.snu.ac.kr

유 준 석 (柳俊錫)

전기학회논문지 제48C권 제5호 참조
 Tel : (02) 880-7992
 E-mail : jsyoo@emlab.snu.ac.kr

한 민 구 (韓民九)

전기학회논문지 제48C권 제5호 참조
 Tel : (02) 880-7248
 E-mail : mkh@emlab.snu.ac.kr