

論文97-34D-1-6

# 엑시머 레이저를 이용하여 동시에 형성된 실리콘 산화막과 다결정 실리콘 박막

## (Silicon Oxide and Poly-Si Film Simultaneously Formed by Excimer Laser)

朴喆民\*, 閔炳赫\*, 全宰弘\*, 柳俊錫\*, 崔弘錫\*, 韓民九\*

(Cheol-Min Park, Byung-Hyuk Min, Jae-Hong Jun, Juhn-Suk Yoo, Hong-Seok Choi, and Min-Koo Han)

### 요 약

저온 공정으로 제작되는 다결정 실리콘 박막 트랜지스터의 게이트 절연막과 다결정 실리콘 활성층을 동시에 형성시키는 공정을 제안하고 제작하였다. 본 논문에서 제안된 방법은 엑시머 레이저의 에너지를 이용하는 것으로서, 레이저가 조사되는 동안에 비정질 실리콘에 이온 주입법으로 함유되어 있던 산소 이온은 활성화 에너지를 갖게 되어 실리콘 원자와 반응하여 실리콘 산화막을 생성하고 하부에 존재하는 비정질 실리콘은 결정화가 이루어져 다결정 실리콘으로 형질이 변화하게 된다. 제작된 박막의 특성은 AES, TEM, AFM 등 다양한 분석 장비를 이용해 분석되었고, 아울러 절연막의 전기적인 특성을 관찰하였다. 실험 결과는 양질의 실리콘 산화막과 매우 깨끗한 그레인 내부 구조를 갖는 다결정 실리콘, 그리고 산화막과 다결정 실리콘 간의 예리한 계면을 얻을 수 있음을 보여주고 있다. 다결정 실리콘 박막과 산화막 사이의 계면 거칠기(roughness)도 역시 우수하여 제안된 방법으로 박막 트랜지스터를 제작할 경우 소자 특성의 향상이 예상된다.

### Abstract

A new method to form the gate oxide and recrystallize the polycrystalline silicon(poly-Si) active layer simultaneously is proposed and fabricated successfully. During the irradiation of excimer laser, the poly-Si film is recrystallized, while the oxygen ion impurities injected into the amorphous silicon(a-Si) film are activated by laser energy and react with silicon atoms to form SiO<sub>2</sub>. We investigated the characteristics of the sample fabricated by proposed method using AES, TEM, AFM. The electrical performance of oxide was verified by ramp up voltage method. Our experimental results show that a high quality oxide, a poly-Si film with fine grain, and a smooth and clean interface between oxide and poly-Si film have been successfully obtained by the proposed fabrication method. The interface roughness of oxide/poly-Si fabricated by new method is superior to film by conventional fabrication so that the proposed method may improve the performance of poly-Si TFTs.

### I. 서 론

다결정 실리콘을 이용한 박막 트랜지스터는 높은 전

류와 전계 이동도 때문에 AMLCD (Active Matrix Liquid Crystal Display) 등의 응용 분야에 활용 범위가 확대 되고 있다. 저온에서 제작되는 다결정 실리콘 박막 트랜지스터의 전기적 특성의 개선은 다결정 실리콘 박막으로 구성되어 있는 활성층의 전기적인 특성 뿐만 아니라 게이트 절연막의 특성 개선이 매우 중요한 역할을 하는 것으로 알려지고 있다<sup>[1][2]</sup>. 현재

\* 正會員, 서울대학교 工科大学 電氣工學部

(School of Electrical Engineering, Seoul National University)

接受日字:1996年10月29日, 수정완료일:1997年1月18日

저온 공정에서 주로 게이트 절연막의 제조 공법으로 상압 화학 기상 증착 (Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition, APCVD) 이나 플라즈마 화학 기상 증착 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD) 법이 이용되어 왔다<sup>13)</sup>. 다결정 실리콘 박막 트랜지스터의 게이트 절연막은 절연막 자체의 낮은 누설전류, 높은 절연 파괴 강도, 그리고 다결정 실리콘 박막 활성층과의 좋은 계면 특성 등의 성질이 요구 된다. 그러나, 이들 화학 기상 증착법으로 제작된 절연막의 특성은 고성능 다결정 실리콘 박막 트랜지스터에 사용되기에는 한계가 있다. 다결정 실리콘 활성층의 재결정화 공정 또한 다결정 실리콘 트랜지스터의 특성을 향상 시키는 중요한 변수라고 알려져 있다<sup>14)</sup>.

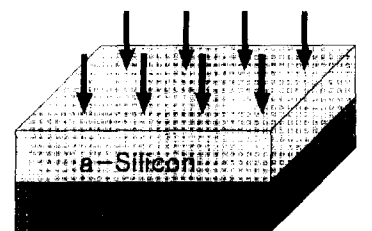
엑시머 레이저를 이용한 다결정 실리콘 활성층의 재결정화는 저렴한 가격의 유리 기판을 사용하여 제작되는 저온 다결정 실리콘 박막 트랜지스터의 응용에 매우 기대되는 공정이다<sup>15)</sup>. 그러나 엑시머 레이저를 이용하여 재결정된 다결정 실리콘 박막의 표면에 사용되는 레이저의 에너지가 증가할 수록 표면 거칠기(roughness) 정도가 증가되어서 제작된 다결정 실리콘 박막 트랜지스터의 전계 이동도가 영향을 받는 것으로 알려져 있다<sup>16)</sup>. 따라서, 표면의 거칠기도 (roughness)가 적으면서도 전기적인 특성이 우수한 다결정 실리콘 활성층과 낮은 누설전류, 높은 절연 파괴 강도, 그리고 다결정 실리콘 박막 활성층과의 좋은 계면 특성을 갖는 절연막의 제작이 동시에 요구 되고 있다<sup>17) 18)</sup>.

본 연구에서는 XeCl 엑시머 레이저를 산소 이온이 주입되어 있는 비정질 실리콘 박막에 조사 함으로써 게이트 절연막을 제작함과 동시에 비정질 실리콘 박막을 다결정 실리콘 박막으로 재결정화 하는 공정을 제안하였다. 조사된 엑시머 레이저 에너지는 비정질 실리콘에 주입된 산소 이온을 활성화 시켜서 실리콘 원자와 반응을 일으키게 하여 실리콘 산화막을 생성하게 된다. 반응 후 전파되는 레이저의 열에너지에 의해서 비정질 실리콘 박막은 다결정 실리콘 박막으로 재결정 된다. 본 연구의 실험 결과를 살펴보면 위에 언급한 게이트 절연막의 모든 조건을 충족 시키는 양질의 실리콘 산화막과 내부의 결함이 없고 우수한 그레인 구조를 가진 다결정 실리콘 박막이 구현되었음을 알 수 있다. 계면의 거칠기도가 우수하고 예리하게 구분되는 경

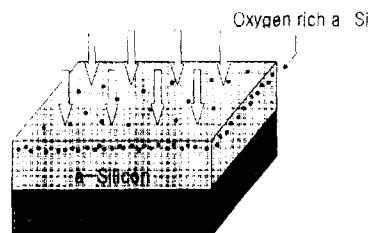
계가 다결정 실리콘과 실리콘 산화막의 사이에서 형성된 것도 알 수 있다.

## II. 실험

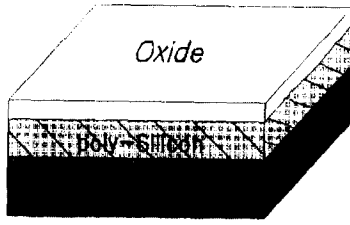
본 연구에서 제안된 실리콘 산화막과 다결정 실리콘 박막을 동시에 제작하는 공정은 아래와 같다. 3000 Å 두께의 비정질 실리콘 박막이 저압 화학 기상 증착 (Low Pressure Chemical Vapor Deposition, LPCVD) 방법으로 550°C 에서 증착 되었다.  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$  도우즈의 산소 이온이 10 keV 의 에너지로 비정질 실리콘 박막 위에 이온 주입 (Ion Implantation) 되었고 위에 서술한 공정이 그림 1 (a) 에 도시되어 있다. 그 후 그림 1(b)에서 처럼 254  $\text{mJ/cm}^2$  부터 371  $\text{mJ/cm}^2$  까지의 에너지 밀도를 갖는 엑시머 레이저 조사가 수행되었다. 레이저의 에너지는 산소 이온이 포화 되어 있는 비정질 실리콘 박막에 흡수 되어 산소 이온과 실리콘 원자를 반응 시켜서 실리콘 산화 막을 생성하는 열에너지의 공급원이 된다. 이어서, 흡수된 레이저 에너지의 열에너지는 비정질 실리콘을 재결정화 하여서 다결정 실리콘으로 형상을 바꾸어 놓는 역할을 하여 다결정 실리콘 상부에 실리콘 산화막이 한번에 형성되는 Oxide-on-Polysilicon 구조를 가지게 된다(Fig. 1(c)). 본 연구에서 제안되고 제작된 새로운 실리콘 산화막은 아래에서는 편의상 LI2Ox (Laser Induced Implanted Oxide) 라고 명칭 하였다.



(a)

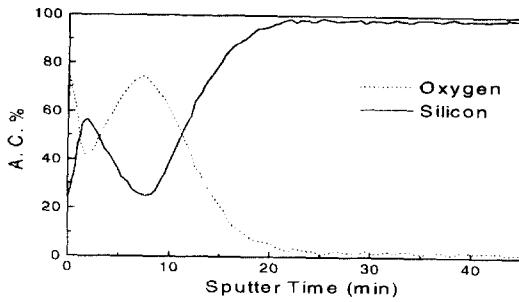


(b)

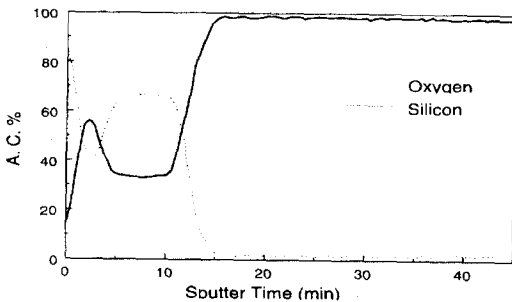


(c)

그림 1. 제안된 박막 제조법의 공정 개략도  
Fig. 1. The schematic process flow of proposed method.



(a)



(b)

그림 2. 제작된 박막의 산소 이온과 실리콘 원자의 ASE(Auger Electron Spectroscopy)를 이용하여 분석한 분포도  
(a) 레이저를 조사하기 이전의 초기 박막  
(b) 레이저를 조사한 후 생성된 산화막과 다결정 실리콘 박막

Fig. 2. The Oxygen and Silicon atomic concentration of the oxygen ion implanted amorphous silicon film.(Auger)  
(a) before excimer laser irradiation  
(b) after excimer laser irradiation

### III. 결과 및 고찰

그림 2에서는 이온 주입된 산소 이온의 농도 분포를

엑시머 레이저 조사 이전과 이후의 경우에 대한 Auger Electron Spectroscopy (AES) 분석 자료를 보여 주고 있다. 그림 2(a)에 나타나 있는 것은 레이저 조사 이전의 산소 이온 농도 분포이다. 산소 이온 농도의 최대치는 분석에 쓰이는 아르곤 스퍼터의 식각 시작 시간 8분 후에 나타나고 있고 분포 곡선의 모양은 전형적인 가우스 함수 (gaussian distribution)를 나타내고 있다. 그림 2(b)는 에너지 밀도  $324 \text{ mJ/cm}^2$ 의 엑시머 레이저를 조사한 후 조사한 시편의 AUGER 분석 자료이다. 보이는 바와 같이 산소의 농도는 식각 시작 이후 5분부터 11분 사이에서는 일정한 농도 치를 띄고 있고 이것은 실리콘 산화막 내의 실리콘과 산소의 화학비 (stoichiometry ratio)가 일반적으로 생성되는  $\text{SiO}_2$  산화막과 같이 산소 : 실리콘의 비율이 2:1인 것을 알 수 있다. 또한, 그림 2(a)와 그림 2(b)를 비교해 보면 산소 원자의 분포가 자동적으로 안정적인  $\text{SiO}_2$  산화막의 분포를 이루는 방향으로 재분포된 것을 알 수 있다. 따라서 레이저 에너지의 도움을 받아서 반응한 실리콘 원자와 산소 원자의 생성물인 실리콘 산화막은 안정된 특성을 갖고 있고 아래 쪽에 위치한 다결정 실리콘 박막과 예리한 계면을 이루고 있을 것이라는 예측을 할 수 있다.

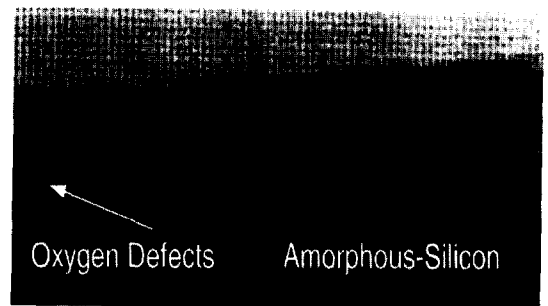


그림 3. 산소 이온 주입 후 레이저가 조사되지 않은 시편의 TEM 사진. 산소 이온 주입에 따른 조직내부의 결함이 발견된다

Fig. 3. TEM Image of the virgin sample which was not irradiate by laser. The defects due to the oxygen implantation is observed.

본 연구에서 제안된 방법으로 제작된  $\text{Li}^2\text{Ox}$ 와 다결정 실리콘 박막의 투과 전자 현미경 (Transmission Electron Microscope, TEM) 사진이 그림 3, 그림 4 및 그림 5에 보여지고 있다. 그림 3의 사진은 산소 이온 주입 후 엑시머 레이저 조사를 하지 않은 초기 시

편의 단면이다. 그림 4와 그림 5은 각각  $254 \text{ mJ/cm}^2$ 와  $371 \text{ mJ/cm}^2$ 의 에너지 밀도를 가지는 엑시머 레이저를 3번 조사한 시편의 사진 들이다. TEM사진에서 새로운 산화막의 두께는  $500 \text{ \AA}$ 으로 확인 되었다.

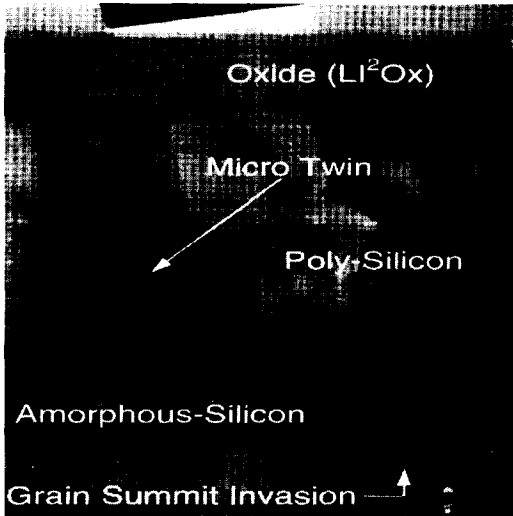


그림 4. 제작된  $\text{Li}^2\text{Ox}$  와 다결정 실리콘의 단면 TEM사진. 조사된 레이저의 에너지는  $254 \text{ mJ/cm}^2$ 이다. 다결정 실리콘 그레인 내부에 Micro twin이 발견되고, 미처 결정화가 이루어지지 않은 비정질 실리콘도 관찰된다. 실리콘 기판으로 침입해 들어간 다결정 실리콘의 마루(summit)는 다결정 실리콘의 성장이 비정질 실리콘의 내부로부터 시작되었음을 알려주는 증거이다. TEM사진에서 새로운 산화막의 두께는  $500 \text{ \AA}$ 으로 확인 되었다.

Fig. 4. TEM Image of fabricated  $\text{Li}^2\text{Ox}$  and poly-Si. The sample irradiated with laser energy density of  $254 \text{ mJ/cm}^2$ . Micro twin and a-Si which was not recrystallized are observed. The summit of poly-Si grain invades silicon wafer. The thickness of fabricated  $\text{Li}^2\text{Ox}$  is  $500 \text{ \AA}$ .

그림 3에서는 보이는 바와 같이 주입된 산소 이온들에 의해서 발생된 내부의 공핍이나 조직 구조의 파괴 등으로 추정되는 내부의 결함을 관찰 할 수 있다. 그러나, 그림 5의 사진에서는 매우 우수한 조직의 다결정 실리콘 박막이 비정질 실리콘 막으로부터 형성이 되었고 불완전한 다결정 실리콘 조직 내부에 존재하고 있다고 보고 되는 micro twins 와 같은 미세 결함 구조도 발견되지 않음을 관찰 하였다<sup>19)</sup>.

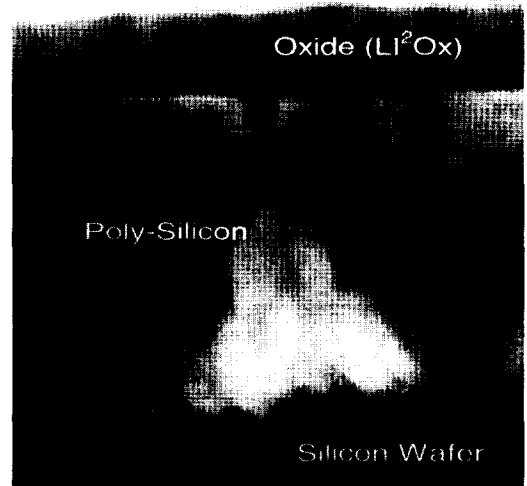


그림 5. 제작된  $\text{Li}^2\text{Ox}$  와 다결정 실리콘의 단면 TEM사진. 조사된 레이저의 에너지는  $371 \text{ mJ/cm}^2$ 이다. 완전히 재결정화가 이루어진 다결정 실리콘과 다결정 실리콘과 제작된 산화막간의 뚜렷한 계면을 관찰 할 수 있다. TEM사진에서 새로운 산화막의 두께는  $500 \text{ \AA}$ 으로 확인 되었다.

Fig. 5. TEM Image of fabricated  $\text{Li}^2\text{Ox}$  and poly-Si. The sample irradiated with laser energy density of  $371 \text{ mJ/cm}^2$ . The  $\text{Li}^2\text{Ox}$ , fully recrystallized poly-Si, and clean interface of  $\text{Li}^2\text{Ox}$  and poly-Si is observed. The thickness of fabricated  $\text{Li}^2\text{Ox}$  is  $500 \text{ \AA}$ .

다결정 실리콘 박막 하부의 기판으로 사용된 실리콘 기판 과 다결정 실리콘과의 계면으로부터 상부에 위치한  $\text{Li}^2\text{Ox}$  층과의 계면까지 완전히 재결정화가 이루어진 다결정 실리콘 박막 역시 확인 할 수 있다. 그림 2(b)에서 예측된 바와 같이 예리하고 깨끗한 계면이 다결정 실리콘 박막과  $\text{Li}^2\text{Ox}$  사이에 형성되었음 또한 그림 5에서 이를 확인 할 수 있다. 에너지 밀도,  $254 \text{ mJ/cm}^2$ 의 엑시머 레이저를 3번 조사한 시편의 단면 사진 (그림 4)에서도 비교적 예리한  $\text{Li}^2\text{Ox}/\text{poly-Si}$  계면을 관찰할 수 있다. 그림 4에서는 다결정 실리콘 그레인 내부에 결함인 micro twins이 관찰 되고, 재결정화가 충분히 이루어지지 못해서 잔류하게 된 비정질 실리콘 층이 보인다. 다결정 실리콘의 그레인의 성장 시작이 비정질 실리콘 막의 중앙부로부터 시작되었다는 증거로 보이는 다결정 실리콘 그레인의 마루(summit)가 관찰 된다. 다결정 실리콘 그레인의 마루

(summit)는 기판으로 사용된 실리콘 기판으로 침투해 들어간 모습을 보이고 있다. 그림 4에서 관찰했듯이 본 실험에서는  $254 \text{ mJ/cm}^2$ 의 레이저 에너지 밀도가  $\text{Li}_2\text{Ox}$  아래의 비정질 실리콘을 모두 다결정 실리콘으로 재결정화하기에는 부족한 것으로 보인다.

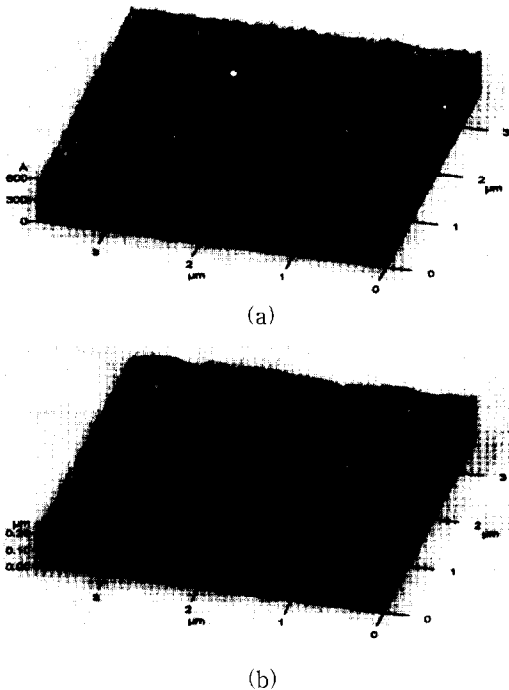


그림 6. 제안된 방법에 의해 제작된 다결정 실리콘과 산화막의 AFM 방법에 의한 계면 분석 (a) 조사된 레이저의 에너지는  $283 \text{ mJ/cm}^2$ . 계면의 유효 거칠기(rms surface roughness)  $23 \text{ \AA}$ . (b) 일반적인 방법으로 레이저에 의해 재결정화가 이루어진 다결정 실리콘 박막의 표면 거칠기 사진. 조사된 레이저의 에너지는  $283 \text{ mJ/cm}^2$ . 계면의 유효 거칠기(rms surface roughness)  $111 \text{ \AA}$ .

Fig. 6. The AFM image of interface between poly-Si and  $\text{Li}_2\text{Ox}$  fabricated by new method.

(a) Laser energy density is  $283 \text{ mJ/cm}^2$ . The rms surface roughness of the interface is  $23 \text{ \AA}$ . (b) The AFM image of surface morphology of poly-Si recrystallized from a-Si by conventional method. Laser energy density is  $283 \text{ mJ/cm}^2$ . The rms surface roughness of poly-Si is  $111 \text{ \AA}$ .

그림 6은 제작된  $\text{Li}_2\text{Ox}$ 와 다결정 실리콘 사이의 계면을 AFM (Atomic Force Microscope) 으로 분석한 그림이다. 그림 6(a)의 사진은 제안된 방법으로 제

작된 다결정 실리콘 박막과 실리콘 산화막 ( $\text{Li}_2\text{Ox}$ )의 계면 AFM 분석 자료이고 그림 6(b)는 일반적인 방법으로 레이저를 이용해서 재결정화된 다결정 실리콘 박막 표면의 AFM 사진이다. 두 가지 시편 모두 조사된 엑시머 레이저의 에너지 밀도는  $283 \text{ mJ/cm}^2$  이고 3 번씩 조사 되었다.

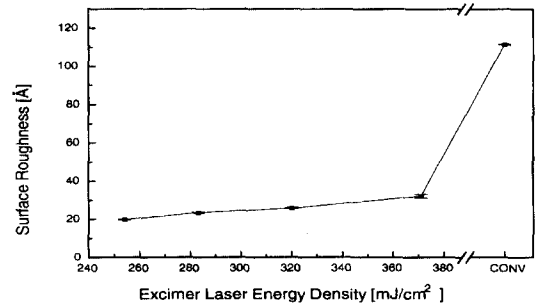


그림 7. 제안된 방법과 일반적인 방법간의 표면 거칠기도 비교

Fig. 7. The rms value of interface between poly-Si and oxide( $\text{Li}_2\text{Ox}$ ) by new fabrication method.

새로운 방법으로 제작된 시편의 다결정 실리콘 박막과 실리콘 산화막 ( $\text{Li}_2\text{Ox}$ )의 계면 AFM 분석 자료에서 유효 (Root Mean Square, RMS) 계면 거칠기 (roughness) 정도는  $23 \text{ \AA}$ 으로 조사되었다. 반면에 일반적인 방법으로 재결정화가 이루어진 다결정 실리콘 표면의 거칠기 정도는  $111 \text{ \AA}$ 으로 새로운 방법으로 제작된 것 보다 4배 이상의 거칠 정도를 보였다. 위의 자료를 보면 새로운 방법에 의해서 제작된 박막의 계면의 상태가 월등히 우수해 질 것을 알 수 있다.

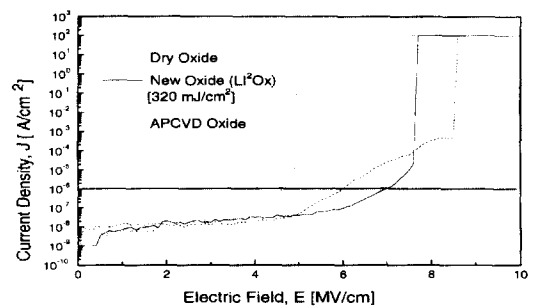


그림 8. 제작된 산화막( $\text{Li}_2\text{Ox}$ )과 APCVD 산화막, 그리고 다결정 실리콘으로부터 성장한 열산화막의 절연 파괴 전계 비교

Fig. 8. The oxide breakdown electric field in  $\text{Li}_2\text{Ox}$ , APCVD oxide, and thermal dry oxide grown from poly-Si.

제작된 실리콘 산화막의 전기적인 특성을 조사 하기 위해서 절연 파괴 전계를 측정하였다<sup>10)</sup>. 그림 8에서는 현재 널리 쓰이는 APCVD 실리콘 절연막, 다결정 실리콘으로부터 성장 시킨 열 산화막, 그리고 제안된 방법으로 제작된  $Li^2O_x$ 의 파괴 특성을 비교 도시 하고 있다. 새로운  $Li^2O_x$  절연막의 특성이 열 산화막이나 APCVD 실리콘 절연막에 비해서 월등히 개선된 것을 알 수 있다. 새로이 제안된 실리콘 산화막의 Fowler-Nordheim tunneling 영역은 현재 저온 공정 다결정 실리콘 박막에서 널리 사용되고 있는 APCVD 산화막 이나 고온 공정에서 사용되는 다결정 실리콘으로부터 성장 시킨 열 산화막 등에 비해서 비교적 높은 전계에서 관찰 되고 있다 (그림 8). 이것은 다결정 실리콘과 산화막 사이의 계면 거칠기도가 좋은 제안된 공정에서 계면에서의 전계 집중 효과가 완화되는 것으로 고찰할 수 있다. 절연 파괴 전계의 기준치는 누설 전류 밀도를 기준으로  $10^{-6} A/cm^2$  설정 했으며  $Li^2O_x$  경우에 최대 절연 파괴 전계가  $7 MV/cm$ 를 넘는 것으로 조사 되었고 이 때에 엑시머 레이저의 에너지 밀도는  $320 mJ/cm^2$  이었다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 양질의 실리콘 산화막( $Li^2O_x$ )과 다결정 실리콘 박막을 제작하는 방법을 제안 하였고 제작 하는 데 성공 하였다. 매우 깨끗하고 예리한 계면이  $Li^2O_x$ 와 다결정 실리콘 박막 사이에 형성되었음을 TEM 사진과 AES 자료 분석을 통해서 확인할 수 있었다. 다결정 실리콘 박막의 내부 구조에 결함이 없이 결정화된 것 또한 확인하였다. AFM을 이용한 다결정 실리콘 박막과 절연막과의 계면 거칠기도가 일반적인 공법에 비해서 현저히 향상되었다. 제작된 실리콘 산화

막( $Li^2O_x$ )의 절연 파괴 특성을 조사해 보았을 때 절연 파괴 전계  $7 MV/cm$ 가 얻어졌고 이 때의 레이저 에너지 밀도는  $320 mJ/cm^2$  이었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] J. Im, H. J. Kim, and M. O. Thomplson, Appl. Phys. Lett., **63**, p. 1969, 1993
- [2] T. Noguchi, H. Tsukamoto, T. Suzuki, and H. Masuya, Extended Abstract of SSDM, p. 620, 1991
- [3] A. Mimura, T. Suzuki, N. Konishi, T. Suzuki, and K. Miyata, IEEE Elec. Dev. Lett., **9**, p. 290, 1988
- [4] K. Sera, F. Okumura, H. Uchida, S. Itoh, S. Kaneko, and K. Hotta, IEEE Trans. Elec. Dev., **36**, 1989
- [5] K. Shimizu, K. Nakamura, M. Higashimoto, S. Sugaira and M. Matsumura, Jpn. J. Appl. Phys., **32**, p. 452, 1993
- [6] K. Takechi, H. Uchida, and S. Kaneko, Proc. : Mat. Res. Soc. Symp., **258**, p. 955 1992
- [7] Y. Nishi, T. Funai, H. Izawa, T. Fujimoto, H. Morimoto, and M. Ishii, Jpn. J. Appl. Phys., **31**, p. 4570, 1992
- [8] M. C. Jun, Y. S. Kim, M. K. Han, J. W. Kim, and K. B. Kim, Appl. Phys. Lett., **66**, p. 2206, 1995
- [9] D. Meakin, J. Stoemenos, P. Migliorato, and N. A. Economou, J. Appl. Phys., **61**, p. 5031, 1987
- [10] A. Berman, 1981 IEEE Proc. Int. Rel. Phys. Symp., P. 204, 1981

#### 저 자 소 개

朴 喆 民(正會員) 第 33卷 A編 7號 參照

閔 炳 赫(正會員) 第 33卷 A編 7號 參照

全 宰 弘(正會員)

1972년 7월 12일생. 1995년 서울대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정 재학중

柳 俊 錫(正會員)

1971년 9월 21일생. 1995년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정 재학중

崔 弘 錫(正會員) 第 33卷 A編 6號 參照

韓 民 九(正會員) 第 33卷 A編 7號 參照