

論文2003-40SD-7-5

# 게이트 절연막의 O<sub>2</sub>플라즈마 처리에 의한 펜타센 OTFT의 성능 개선

## (Performance Enhancement due to Oxygen Plasma Treatment on the Gate Dielectrics of OTFTs)

李明源\*,金光賢\*,許泳憲\*,宋政根\*

(Myung-Won Lee, Kwang-Hyun Kim, Yong-Xian Xu, and Chung-Kun Song)

### 요약

펜타센 유기박막트랜지스터(OTFT)에서 게이트 절연막의 표면상태가 소자의 성능에 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 펜타센을 진공 증착하기전 게이트 절연막의 표면에 O<sub>2</sub>플라즈마 처리를 함으로써 OTFT의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. O<sub>2</sub>플라즈마 처리후 소자의 전계 이동도가 0.05cm<sup>2</sup>/V·sec로 나타났으며, 이는 처리전 보다 약 10배정도 향상된 것이다. 또한 O<sub>2</sub>플라즈마 처리는 게이트 절연막의 표면상태를 균일하게 하여 각 성능지수들의 표준편차가 감소하였다. 그리고 전계 이동도는 O<sub>2</sub>플라즈마에 노출되는 시간에 따라 증가하였는데 5분을 기점으로 다시 감소하였다. 따라서 O<sub>2</sub>플라즈마 처리시간은 5분이 최적인 것으로 판단된다.

### Abstract

In this paper, the plasma treatment on gate surface has been applied prior to deposition of pentacene and the effects on performance were investigated. The plasma treatment produced the mobility of 0.05cm<sup>2</sup>/V·sec which is 10 times larger than the non-treated. The resistance was also reduced from 400KΩ to 50KΩ. In addition, the standard deviation of performance parameters variation was reduced with the plasma exposure time, which implies that plasma treatment makes the gate surface states be uniform across the whole wafer area. The performance parameters were increased with the exposure time up to 5min, after which they degraded again. Therefore, the optimal exposure time was found to be 5min.

**Keyword** : Pentacene, Plasma, Mobility

### I. 서론

유기박막트랜지스터(OTFT)에 관한 연구는 1980년 이후부터 시작되었고, 근래에 들어 전 세계적으로 활발한 연구가 진행되고 있다. OTFT의 개발은 제작 공정이 간단하고, 비용이 저렴하며, 충격에 의해 깨지지 않고 구부러거나 접을 수 있는 전자 회로 기판이 미래의 산업에 필수적인 요소가 될 것으로 예상되고 있다. 특히, OTFT는 기존의 고체 실리콘 트랜지스터로써 실현할 수 없는 두루마리 디스플레이, 스마트카드, RF 태그

\* 正會員, 東亞大學校 電氣電子컴퓨터工學部  
(Dep. of Electrical & Electronics & Computer Eng., Dong-A University)

※ 본 논문은 과학기술부의 21세기 프론티어 연구개발 사업인 차세대정보디스플레이 기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

接受日字:2003年3月24日, 수정완료일:2003年7月5日

등의 응용분야의 핵심소자로 활용될 수 있기 때문에 활발한 연구가 수행되고 있다<sup>1, 3)</sup>.

OTFT의 성능은 주로 유기 활성박막의 결정도에 좌우된다. 결정도는 유기박막의 성장공정과 유기박막이 성장될 게이트 절연층의 표면상태에 큰 영향을 받기 때문에 박막성장공정 및 표면상태의 최적화에 연구가 집중되고있다<sup>4, 6)</sup>. 전계 효과 이동도(field effect mobility)는 펜타센의 결정도와 펜타센 박막과 게이트 절연막 사이의 계면 상태에 큰 영향을 받는다. 특히 전계 효과 이동도는 펜타센 박막 안에서의 산란 즉 입계(grain)경계 산란, 전자 산란, 불순물 산란, 그리고 게이트 절연막의 표면의 거칠기와 전위상태의 산란 등에 의해 결정되어진다. 그렇기 때문에, 이러한 산란의 요인들을 줄일수 있다면 이동도의 향상에 큰 효과를 얻을 수 있을것이다. 여기서 손쉽게 처리할 수 있는 방법은 펜타센을 정제하여 순도를 높이는 방법이 있으며, 게이트 절연막의 표면처리를 통해 보다 큰 입계를 얻음으로써 이동도를 향상시킬 수 있는 방법이 있다. 박막성장 이론에 의하면 큰 입계를 얻는 중요한 요인은 표면 에너지장벽에 의해 영향을 받는 게이트 절연막 표면에서 분자의 확산 길이를 크게 하는 것이다. 기존의 연구는 게이트 절연막 표면에 HMDS, OTS, PMMA등 유기물을 도포하여 표면상태를 변화시키는 방법을 시도하고 있다. 특히 OTS의 경우 이동도가  $1.5\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$  이상되는 우수한 결과를 보여주고 있다<sup>7-11)</sup>. 그러나 OTS는 자기조립(self-assembly)방식으로 제작되는데 이러한 방식은 습식 공정으로 OTFT를 용매에 24시간 정도 오랫동안 담가두어야 하는데, 이는 금속의 박피와 플라스틱 기판에 상당한 악영향을 미치는등 공정상 어려움이 많다.

본 논문에서는 SA와 같은 습식공정 대신에 펜타센이 증착 되기전 게이트 절연막 표면에  $\text{O}_2$ 플라즈마처리를 함으로써 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 플라즈마 처리 전후의 소자 성능지수들(parameter)을 비교하여 영향을 분석하였고, C-V특성곡선을 측정하여 계면 전하의 변화를 분석하였다.

## II. 소자제작 및 분석

Si에 열산화막을 600Å 성장시킨 웨이퍼를 기판으로 사용하였다. Au는 일함수가 크기 때문에 p-형 유기반도체인 펜타센에 쉽게 정공을 주입할수 있으므로 소스

와 드레인 전극으로 Au를 사용하였다. Au전극은 진공 증착하여 lift-off 공정으로 채널길이를 10 $\mu\text{m}$ , 20 $\mu\text{m}$ , 30 $\mu\text{m}$ , 40 $\mu\text{m}$ , 50 $\mu\text{m}$ 로 패턴을 제작하였다. 펜타센은 Aldrich에서 구입한 분말을 정제하지 않고 OMBD (organic molecular beam deposition)시스템으로 증착하였다. <그림 1>은 실험에 사용된 OTFT의 구조를 보여주고 있다.

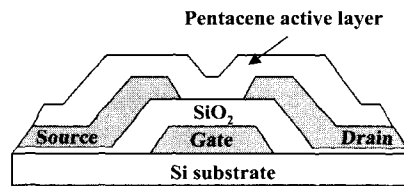


그림 1. 펜타센 OTFT의 구조  
Fig. 1. Structure of pentacene OTFT.

$\text{O}_2$ 플라즈마 처리는 RIE(reactive ion etching)시스템을 통해 펜타센을 진공증착하기 전에 수행하였다. ICP(inductive coupled power)전력 50W,  $\text{O}_2$  gas 유량은 10sccm 공정압력은 10mTorr를 사용하였고,  $\text{O}_2$ 플라즈마 처리시간은 1분에서 8분까지 노출시켜 소자의 성능을 분석하였다. 본 실험에서  $\text{O}_2$ 플라즈마 처리 효과는 처리시간에 따른 성능지수(parameter) 즉 이동도( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ ), Sub-threshold Slope(SS, V/dec), 문턱전압( $V_T$ ), On/Off 전류비 그리고 누설 전류( $I$ )를 측정하여 분석하였으며, 소자의 전기적 특성은 HP4155A로 측정하였다. 또한 C-V측정을 위해서 <그림 5>와 같이 전극의 면적이  $2.5 \times 10^{-3} \pi \text{cm}^2$ 인 MSIM 형태로 샘플을 제작하였다. 샘플들은 펜타센을 진공 증착하기전  $\text{SiO}_2$  표면을  $\text{O}_2$ 플라즈마로 1분에서 8분까지 처리한후 펜타센을 진공 증착시켜 C-V특성을 측정하였다.

$\text{O}_2$ 플라즈마 처리가 게이트 절연막 표면에 미치는 영향을 직접 분석하기 위하여 소스와 드레인 전극사이의 직렬저항  $R_T$ 를 구하여  $\text{O}_2$ 플라즈마 처리 전후의 값을 비교분석 하였다. 여기서 직렬저항  $R_T$ 는 채널저항과 소스와 드레인 접촉저항을 합한 것으로 표면상태의 변화를 반영하고 있다. 직렬저항  $R_T$ 는 OTFT의 이론적인 전류 방정식과 측정된 I-V 특성을 비교하여 추출할 수 있으며, 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$I_D = \frac{\mu C_0 W}{L} [(V_G - V_T)(V_D - R_T \cdot I_D) - \frac{1}{2} (V_D - R_T \cdot I_D)^2]$$

$$= \frac{\mu C_0 W}{L} [(V_G - V_T)V_D - \frac{1}{2} V_D^2] - \frac{\mu C_0 W}{L} [R_T(V_G - V_T - V_D)I_D + \frac{1}{2} R_T^2 \cdot I_D^2] \therefore R_T = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4B}}{2} \quad (1)$$

여기서,  $A = \frac{2(V_G - V_T - V_D)}{I_D}$ ,  $B = \frac{2CL}{\mu C_0 W \cdot I_D^2}$ ,

$C = \frac{\mu C_0 W}{L} [(V_G - V_T)V_D - \frac{1}{2} V_D^2] - I_D$  이다.  $R_T \cdot I_D$

는 RT에 의한 전압강하를 나타내며, 소스-드레인 전압은 이러한 전압강하를 고려하여  $(V_D - R_T \cdot I_D)$ 로 나타내었다. 식 (1)에서 첫항은 이상적인 TFT의 전류식이며, 둘째 항은 전압강하로 인한 전류 감소를 나타낸다.

### III. 결 과

<그림 2>에 플라즈마 처리 전후의 펜타센 OTFT의 전류-전압 특성을 비교하였다. 플라즈마 처리 후 전류는 처리 전에 비하여 약 20배정도 증가하였다. 그리고 삽입된 그림에서 보듯이 드레인 전압이 0V 가까운 영역에서 드레인 전류의 전압에 대한 증가율은 처리 후 급격히 증가하였다. 이것은 current crowding 현상이 줄어든 것으로 소스/드레인 전극의 접촉저항이 감소한 것을 의미한다. 또한, 플라즈마 처리 시간에 따라 특성이 달라졌다. 플라즈마 시간이 증가함에 따라 전류는 증가하였으나 5분 후부터 다시 감소하였다. 성능지수를 <표 1>에 정리하였다. 전계이동도는 처리 후 10배 증가하여 평균 0.05cm<sup>2</sup>/V.sec를 나타내었고, Sub-threshold Slope(SS)는 2V/dec에서 1V/dec 이하로 감소하여 개선되었음을 보여주었다. 문턱전압은 일관성

표 1. O<sub>2</sub>플라즈마 처리시간에 따른 펜타센 OTFT 성능지수

Table 1. Summary of performance parameters of pentacene OTFTs with respect to plasma exposure time.

Exposure time	Mobility (cm <sup>2</sup> /V·s)	SS(V/dec)	V <sub>T</sub> (V)	I <sub>on/off</sub>	Off-state current(A)
As-deposited	0.0055 ± 0.003	2.18 ± 0.82	2.54 ± 1.21	2.4 ± 0.6 × 10 <sup>4</sup>	2.2 ± 4.25 × 10 <sup>-10</sup>
1min	0.049 ± 0.023	0.88 ± 0.24	1.65 ± 2.7	3.22 ± 2.1 × 10 <sup>7</sup>	1.73 ± 1.6 × 10 <sup>-9</sup>
2min	0.044 ± 0.013	0.86 ± 0.30	2.16 ± 2.4	3.12 ± 2.4 × 10 <sup>7</sup>	3.46 ± 4.8 × 10 <sup>-9</sup>
4min	0.050 ± 0.038	1.14 ± 0.25	5.1 ± 0.77	4.58 ± 4.2 × 10 <sup>4</sup>	1.27 ± 0.85 × 10 <sup>-9</sup>
5min	0.051 ± 0.01	0.65 ± 0.09	0.34 ± 2.1	7.13 ± 3.3 × 10 <sup>6</sup>	8.05 ± 5.0 × 10 <sup>-11</sup>
6min	0.033 ± 0.005	0.70 ± 0.04	4.32 ± 1.8	1.37 ± 0.6 × 10 <sup>6</sup>	1.30 ± 0.9 × 10 <sup>-10</sup>
8min	0.011 ± 0.001	1.19 ± 0.40	5.62 ± 0.9	5.36 ± 2.3 × 10 <sup>4</sup>	2.06 ± 1.3 × 10 <sup>-10</sup>

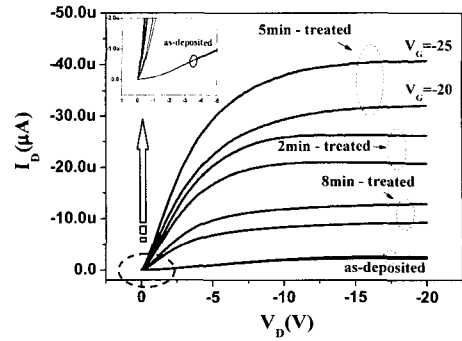


그림 2. O<sub>2</sub>플라즈마 처리 전후의 펜타센 OTFT의 I<sub>D</sub>-V<sub>D</sub> 관계 그래프

Fig. 2. I<sub>D</sub>-V<sub>D</sub> characteristics of the plasma-treated and the as-deposited OTFTs.

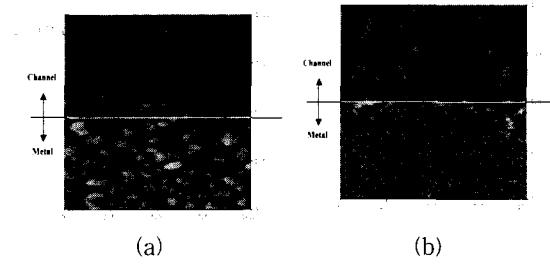


그림 3. 전극 주변의 펜타센 박막 AFM 사진 (a)처리 전 OTFT (b) O<sub>2</sub>플라즈마 처리후 OTFT

Fig. 3. AFM images of (a) the as-deposited and (b) the plasma-treated pentacene film.

없이 변화였고, 차단상태의 전류도 큰 변화를 보여 주지 않았다. 이러한 성능 개선의 원인은 <그림 3>의 펜타센 박막 표면의 AFM 사진을 살펴보면 알 수 있다. <그림 3(b)>의 플라즈마 처리 후의 펜타센의 입계가 <그림 3(a)>의 처리 전과 비교하여 커져있음을 볼 수 있다. 또한 금속 전극 위의 펜타센 입계가 처리 후 보다 조밀하게 성장되었는데 이러한 펜타센 입계 크기의 증가가 성능 개선의 요인인 것으로 생각된다. 왜냐하면 입계의 크기가 증가하면 입계경계밀도가 감소하고 입계경계산란(grain boundary scattering)이 감소하여 전계이동도가 증가하기 때문이다. 펜타센 박막 성장 메카니즘<sup>[12]</sup>에 의하면 기판 표면에서 펜타센 분자의 확산계수가 커야 큰 입계를 얻을 수 있다. 그리고, 확산계수는 기판 표면의 에너지가 작아야 증가하는데 표면 에너지를 직접 측정하지 않았지만 플라즈마 처리 후 입계가 증가한 것으로 미루어 표면 에너지가 감소한 것으로 추정된다. 식 (1)의 소스-드레인 사이의 저항은 전극의 접촉저항과 채널의 저항을 포함한 것으로 측정된 전류

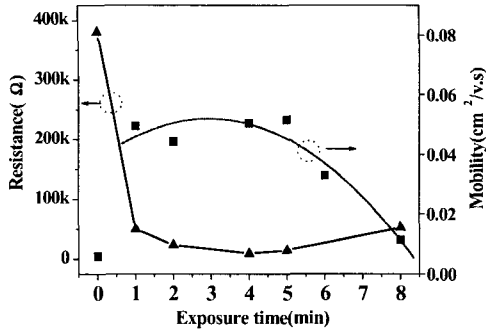


그림 4. O<sub>2</sub>플라즈마 처리시간에 따른 전계이동도와 저항의 변화

Fig. 4. The variation of field effect mobility and the resistance with respect to the oxygen plasma exposure time.

-전압 특성그래프로부터 추출하여 <그림 4>에 플라즈마 처리시간을 1분에서 8분까지 변화시키면서 나타내었다. 처리 전 400KΩ에서 처리 후 평균 50KΩ으로 감소하였고, 전계이동도와 유사한 경향을 나타내고 있다. 전계이동도는 플라즈마 처리 시간이 증가함에 따라 같이 증가하다가 5분을 기점으로 다시 감소하였다. 저항은 시간에 따라 감소하다가 5분을 기점으로 다시 증가하였다. 이것은 저항은  $R \sim \frac{1}{\mu_p}$  이므로 전계이동도와 반대의 경향을 나타내는 것이다. 플라즈마 처리시간을 1분에서 8분까지 변화시킬 때 5분에서 최적의 성능을 나타내었다. 즉 전계이동도가 0.05cm<sup>2</sup>/V.sec, SS는 0.65V/dec, 문턱전압이 0.34V, 전류점멸비가 7.13×10<sup>5</sup>이었다. 그리고, 유의할 점은 플라즈마 처리시간이 증가함에 따라 각 성능지수들의 편차가 감소한다는 점이다. 이것은 플라즈마 처리시간이 증가함에 따라 기판의 표면상태가 균일해짐을 의미하는 것이다. 이러한 개선은 플라즈마 처리에 의하여 표면에 남아 있는 찌꺼기가 제거되었고, 또한 표면의 전하상태가 변화한데 기인한다.

일반적으로 실리콘 산화막은 성장 매커니즘에 따라서 양전하(positive charge)가 10<sup>10</sup>~10<sup>12</sup> cm<sup>2</sup> 정도 포함되어있다. E'center 로 알려져 있는 O<sub>3</sub>=Si··Si=O<sub>3</sub>의 O<sub>2</sub> 분자 미결합에 의한 결함들이 양전하(ΔQ)로 나타난다. 이러한 양전하의 변화는 플라즈마의 상태와 노출되는 시간에 따라 다르게 나타난다<sup>11,12</sup>. 소프트 플라즈마에 의하면, 양전하는 최초 플라즈마 처리함에 있어 몇 분까지는 그 양이 줄어들다가 노출시간과 플라즈마 상태에 따라 다시 증가하게 된다. 이를 되돌아감(turn-

around effect)현상 이라 한다. <그림 4> 에서 이동도가 증가하다가 줄어드는 현상과, 저항이 줄다가 다시 커지는 현상, 그리고 <그림 5>에서 게이트 캐패시턴스와 게이트 전압의 관계곡선에서 보듯이 되돌아감 현상이 나타남을 보여주고 있으며, 이러한 "되돌아감" 효과는 표면의 전하상태가 변화한 것이라는 것도 <그림 5>의 C-V 특성곡선의 변화로부터 알 수 있었다. 되돌아감 현상을 고려해 볼 때, 본 논문에서는 실험을 통해 최적의 O<sub>2</sub>플라즈마 처리시간이 5분임을 확인 할 수 있었으며, 5분 이후의 O<sub>2</sub>플라즈마 처리에서는 이동도가 큰 폭으로 감소함을 알 수 있었다.

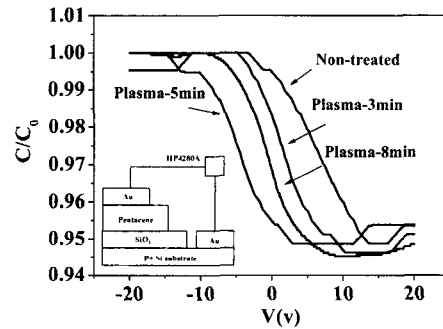


그림 5. O<sub>2</sub>플라즈마 처리시간에 따른 C-V 특성 변화  
Fig. 5. The variation of C-V characteristics with respect to the oxygen plasma exposure time.

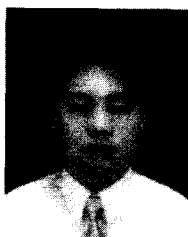
#### IV. 결 론

펜타센 OFET는 게이트 절연막 표면상태에 따라 크게 달라진다. 본 논문에서는 O<sub>2</sub> 플라즈마 전식공정으로 게이트 절연막 표면의 전하상태를 변화시켜서 성능을 개선하였다. 플라즈마 처리 후 모든 성능지수들은 처리 전과 비교하여 약 10배 개선되었다. 이것은 플라즈마 처리에 의하여 표면에 남아있는 찌꺼기의 제거와 함께 표면전하상태가 변하였고, 이로 인하여 펜타센 박막 성장시 펜타센 분자의 표면 확산계수가 증가하여 입계의 크기가 증가한 것이 주요 요인으로 생각된다. 성능지수들은 플라즈마 처리시간에 따라 변화하였고, 5분에서 최대 값에 도달한 후 다시 감소하였다. 즉 플라즈마 처리시간은 5분이 최적이며, 이 때 전계이동도는 0.05cm<sup>2</sup>/V.sec, SS는 0.65V/dec, 문턱전압이 0.34V, 전류점멸비가 7.13×10<sup>5</sup>이었다. 또한, 플라즈마 처리시간이 증가함에 따라 각 성능지수들의 편차가 감소하였고, 이것은 게이트 절연막 표면상태가 균일해졌음을 의미한다.

## 참고 문헌

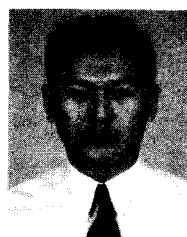
- [1] H.Klauk, D.J.Gundlach, J.A.Nichols, and T.N. Jackson, "Pentacene organic thin-film transistors for circuit and display applications" IEEE Trans. Electro Devices, Vol-46, p.1258, 1999.
- [2] C.D.Dimitrakopoulos, B.K.Furman, T.Graham, S.Hedge, S.Purusothaman, "Field-effect transistors comprising molecular beam deposited,  $\alpha$ ,  $\omega$ -de-hexyl-hexathienylene and polymeric insulator" Synth. Met., Vol-92, p.47, 1998.
- [3] I. Kymissis, C.D Dimitrakopoulos, S. Purushothaman, "High-performance bottom electrode organic thin-film transistors" IEEE Trans. Electron Devices 48 p.1060, 2001.
- [4] A.R.Brown, C.P.Jarret, D.M. de Leeuw, M.Matters, "Field-effect transistors made from solution processed organic semiconductors" Synth. Met., Vol-88, p.37, 1997.
- [5] Y.Lin, D.J.Gundlach, S.F.Nelson, and T.N. Jackson, "Stacked pentacene layer organic thin-film transistors with improved characteristics" IEEE Elect. Dev. Lett., Vol-18, p.606, 1997.
- [6] C.D.Dimitrakopoulos, A.R.Brown, and A.Pomp, "Molecular beam deposited thin films of pentacene for organic field effect transistor applications" J. Appl. Phys., Vol-80, p.2501, 1996.
- [7] A.Haran, D.H.Waldeck, R.Naaman, E.Moons, and D.Cahen, "The Dependence of Electron Transfer Efficiency on the Conformational Order in Organic Monolayers" Science, 263 (1994), 948.
- [8] M.Bruening, E.Moos, D.Cahen, and A.Shanzer, "Controlling the Work Function of CdSe by Chemisorption of Benzoic Acid Derivatives and Chemical Etching" J. Phys. Chem., 99 (1995), 8368.
- [9] D.J.Gundlach, Y.Lin, T.N. Jackson, S.F.Nelson, and D.G.Schlom, "Pentacene organic thin film transistors molecular ordering and mobility" IEEE Elect. Dev. Lett., Vol-18, No.3, pp. 87-89 (1997).
- [10] C.K.Song, B.W.Koo, S.B.Lee, and D.H.Kim, "Characteristics of Pentacene Organic Thin Film Transistors with Gate Insulator Processed by Organic Molecules" Jpn.J.Appl.Phys., 41 (2002), 2730.
- [11] C.K.song, "Effects of Hydrophobic Treatment on the Performance of Pentacene TFT" KIEE int.Trans.Electrophys. & Appl., 12C (2002) 136.
- [12] Frank-J. Meyer zu Heringdorf, M. C. Reuter & R. M. Trimp "Growth dynamics of pentacene thin films" Nature 412, p.517-520 (2001)
- [13] A. Paskaleva and E.Atanassova, "Bulk oxide charge and slow states in Si-SiO<sub>2</sub> structures generated by RIE-mode plasma" Microelectronics Reliability, Vol-40, p.2033, 2000.

## 저 자 소 개



李明源(正會員)

2002년 2월 : 동아대학교 전자공학과 졸업(공학사). 2002년 1월~현재 : 동아대학교 전자공학과 석사과정. <주관심분야 : Organic TFT를 기반으로 하는 EL 및 TFT-LCD display 응용>



許泳憲(正會員)

2003년 2월 : 동아대학교 전자공학과 졸업(공학석사). 2003년 3월~현재 : 동아대학교 전자공학과 박사과정. <주관심분야 : Organic TFT를 기반으로 하는 EL 및 TFT-LCD display 응용>



金光賢(正會員)

2002년 2월 : 동아대학교 전자공학과 졸업(공학사). 2002년 1월~현재 : 동아대학교 전자공학과 석사과정. <주관심분야 : Organic TFT를 기반으로 하는 EL 및 TFT-LCD display 응용>



宋政根(正會員)

1980년 2월 서울대학교 전자공학과 졸업 (공학사). 1984년 2월 서울대학교 전자공학과 대학원 졸업 (공학석사). 1992년 2월 University of Cincinnati Electrical & Engineering 졸업 (공학박사) 1993~현재 동아대학교 전자전기컴퓨터공학부 부교수 <주관심 분야 : 나노유기소자, 분자전자소자, MMIC >