

집속이온빔장치와 주사전자현미경을 이용한 박막 트랜지스터 구조불량의 3차원 해석

김지수*, 이석열, 이임수, 김재열
엘지 디스플레이 (주) 구미분석팀

Three Dimensional Reconstruction of Structural Defect of Thin Film Transistor Device by using Dual-Beam Focused Ion Beam and Scanning Electron Microscopy

Ji-Soo Kim*, Seok-Ryoul Lee, Lim-Soo Lee and Jae-Yeal Kim

Gumi Analysis Team, LG Display, Gumi, Gyeongbuk 730-726, Korea
(Received November 26, 2009; Accepted December 24, 2009)

ABSTRACT

In this paper we have constructed three dimensional images and examined structural failure on thin film transistor (TFT) liquid crystal display (LCD) by using dual-beam focused ion beam (FIB) and IMOD software. Specimen was sectioned with dual-beam focused ion beam. Series of two dimensional images were obtained by scanning electron microscopy. Three dimensional reconstruction was constructed from them by using IMOD software. The short defect between Gate layer and Data layer was found from the result of three dimensional reconstruction. That phenomena made the function of the gate lost and data signal supplied to the electrode though the Drain continuously. That signal made continuous line defect. The result of the three dimensional reconstruction, serial section, SEM imaging by using the FIB will be the foundation of the next advanced study.

Keywords : Three dimensional reconstruction, FIB, SEM, TFT-LCD

서 론

최근 멀티미디어 산업은 급속히 진행되어 산업전반에서 그 영역이 넓어지고 있으며, 특히 고화질의 평판 디스플레이에 대한 요구가 증가하고 있다. 여러 종류의 평판 디스플레이 산업에서 주축이 되는 기술은 비정질 실리콘 박막 트랜지스터 (Thin film transistor, TFT)를 스위칭 소자로 사용하는 박막 트랜지스터 액정표시장치 (Thin film transistor-liquid crystal display, TFT-LCD)로 생각되며, 박막 트랜지스터 소

자와 컬러필터의 고 해상도, 고 휘도를 목적으로 성능개선 연구가 활발히 진행 중이다(장, 1997; 김, 2001). 박막 트랜지스터는 반도체 공정으로 제작되기 때문에 발생하는 불량현상도 미시적인 거동을 하며 그 중에서도 공정 진행 중 유입된 이물에 의한 구조 변형 및 파괴, 증착 및 식각 작업 오류로 인한 박막형성 불량이 큰 비중을 차지하고 있다. 이러한 불량들은 TFT-LCD 패널 내에서 정상 픽셀과 대비하여 밝거나 어둡게 표시되기 때문에 작은 결함에도 불량현상이 육안으로 확인이 되는 디스플레이 장치 특성상 반드시 해결해야 하는 문제이다. 박막 트랜지스터는 발생하는 불량현상의

* Correspondence should be addressed to Ji-Soo Kim, Gumi Analytical Technology Team, LG Display, 642-3, Jinpyung-dong, Gumi-si, Gyeongsangbuk-do 730-726, Korea. Ph.: (054) 478-1136, Fax: (054) 478-5779, E-mail: ihaveidea@lgdisplay.com

크기가 nm~ μ m까지로 범위가 넓고, 고집적 다층박막으로서 표면 및 계면분석을 위한 고 분해능 영상이 요구되기 때문에 집속이온빔 가공장치(Dual-Beam Focused Ion Beam/Scanning Electron Microscopy, Dual-beam FIB/SEM)에 대한 관심이 높으며 더불어 많은 활용이 이뤄지고 있다. 또한 마이크로/나노 스케일에서의 재료의 단면관찰, 패턴의 절단 및 접합, 나노 구조체 제작, 극미소 영역에 대한 투과전자현미경(Transmission Electron Microscopy, TEM) 시료제작에 유용하게 사용되고 있다(Wu et al., 2003). 특히, 차세대 디스플레이 산업의 주축이 될 유기발광다이오드(OLED)의 다층 유기막 구조분석, 발광다이오드 칩(LED Chip; GaN)의 전위 분석, 전자종이 디스플레이(Electric paper display, EPD)의 다층박막 분석에서 반드시 필요한 장비로 판단된다.

최근 세계적으로 소프트웨어적 3차원 구조구현기법인 전자토폴로그래피(Electron tomography) 연구가 활발히 진행 중이며, 의·생물, 재료과학, 지질학 등 다양한 분야에서 시료의 구조적인 문제점을 해결하기 위해 사용하고 있다(Kim et al., 2008; Mun et al., 2009). 3차원 구조구현기법은 전자현미경으로 촬영된 일련의 연속적인 이미지를 소프트웨어적으로 연결해서 3차원 구조로 재형성시키는 연구로서 투과전자현미경법, 집속이온 가공법 등이 활용되고 있다(Groeber et al., 2003; Inkson et al., 2006). 하지만 국내 재료과학 분야에서는 아직 시작단계로 생각되며(Kim et al., 2008), 특히 집속이온빔 가공장치를 이용한 3차원 구조구현기법 연구는 충분히 이해할 수 있을 정도로 연구되지 않았으며 심도 있고 계획적인 연구를 수행할 필요가 있다고 판단되며, 3차원 분석기법 및 장비 활용영역의 확대라는 관점에서 연구가치가 높다고 생각된다. 이 논문에서는 TFT-LCD 패널에서 박막 트랜지스터의 구조가 파괴된 시료를 이용해서 집속이온빔 가공장치로써 2차원 영상을 얻었고, IMOD 소프트웨어를 이용하여 3차원 구조구현기법으로 막을 재구성하여 불량현상을 정확히 이해하고자 하였다.

실험 방법

1. 재료 및 장비

본 연구에서는 TFT-LCD 패널 중에서 가로-세로 선 전체가 빛나는 불량을 유발하는 박막 트랜지스터 소자에 대해서 분석하였고, TFT-LCD 패널은 Data 신호선과 Gate 신호선이 연결되어 3072×768의 픽셀로 구성되어 있다. TFT-LCD 불량 픽셀의 신호 확인을 위한 파형측정은 오실로스코프(Oscilloscope, 744A, Tektroniks, USA)를 사용하였다. 연속 절편법(Serial sectioning)과 단면이미지 촬영은 집속이온빔 가공장치(Dual-Beam FIB/SEM, 1540XB, Carl Zeiss,

Table 1. Dual-beam FIB/SEM parameters for imaging and simulations

Contents	SEM	FIB
Resolution	1.1 nm at 20 kV	7 nm at 30 kV
Magnification	20~900 K	600~500 K
Probe current	4 pA~20 nA	1 pA~50 nA
Voltage	0.1~30 kV	3~30 kV
Emitter	Thermal FE	Ga ⁺ liquid ion
Detectors	SE2, Inlens, BSD, STEM	SE2, Inlens

Germany)를 사용하였으며, 장비의 제원은 Table 1에 나타내었다. 3차원 구조구현을 위한 이미지 프로세싱 소프트웨어는 Colorado university Boulder laboratory의 IMOD를 사용하였다. 무료 다운로드 홈페이지 주소는 <http://bio.colorado.edu>이다.

2. 연속 절편법(Serial sectioning)과 이미지 작업

다층 촬영을 위해서 시편홀더의 기울기는 54° 이고, 주사 전자현미경과 집속이온빔 가공장치의 유센트릭 높이가 위치는 5 mm에서 맞추었다. 집속이온빔 가공장치는 가속전압 30 kV, 빔 전류는 50 pA~2 nA까지 변화시켰다. 1차적으로 빔 전류 2 nA에서 넓은 면적을 에칭시켰고, 관찰영역에서는 단면이미지와 시료손상을 최소화하기 위해서 빔 전류 50 pA에서 에칭하였다. 시료표면의 집속이온빔 가공장치 중 발생하는 표면 손상을 방지하기 위해서 백금(Pt)을 증착하였다. 백금 보호막은 표면손상 방지뿐만 아니라 식각속도(Etch rate) 차이에서 발생하는 워터폴 현상(waterfall effect)과 대전효과의 영향도 감소시켜 양질의 이미지를 얻는데 도움이 된다. 박막 트랜지스터의 집속이온빔 가공장치로 가공된 단면은 대전방지층이 없는 새로운 재료의 표면이 되며, 고전압에서 SEM이미지를 촬영하면 비전도성 Gate 절연막(SiNx)과 유리 기판에 의해 대전효과가 발생하게 된다. 주사전자현미경 가속전압을 변화시키면서 확인 한 결과 가속전압 2 kV에서 대전효과가 없어지고 깨끗한 이미지를 촬영할 수 있었다. 이것은 기판으로 사용하는 유리의 대전효과가 사라지는 2차전자 에너지 값(KeV)이 2 kV이기 때문으로 판단된다. 이미지 정렬은 데이터 수집 이후 소프트웨어에서 진행되지만 집속이온빔 가공도중에 리얼 스캔 주사전자현미경 이미지로 1차 정렬을 진행하였다. 현재 TFT-LCD 산업에서 널리 사용되고 있는 PECVD(Plasma enhanced chemical vapor deposition)공정으로 증착시킨 Gate 절연막은 극부영역 내에서 두께가 약 1 nm 이내의 편차를 가지고 있기 때문에(Lee et al., 2008) Gate 절연막 계면을 X축으로 설정하여 이용하였고, Y축은 백금 보호막 표면을 집속이온빔 가공장치로 가공한 선 모양의 흔적을 이용하였다. 이것은 집속이온 장치의 식각가공 과정을 주사전자현미경을 통해서 실시

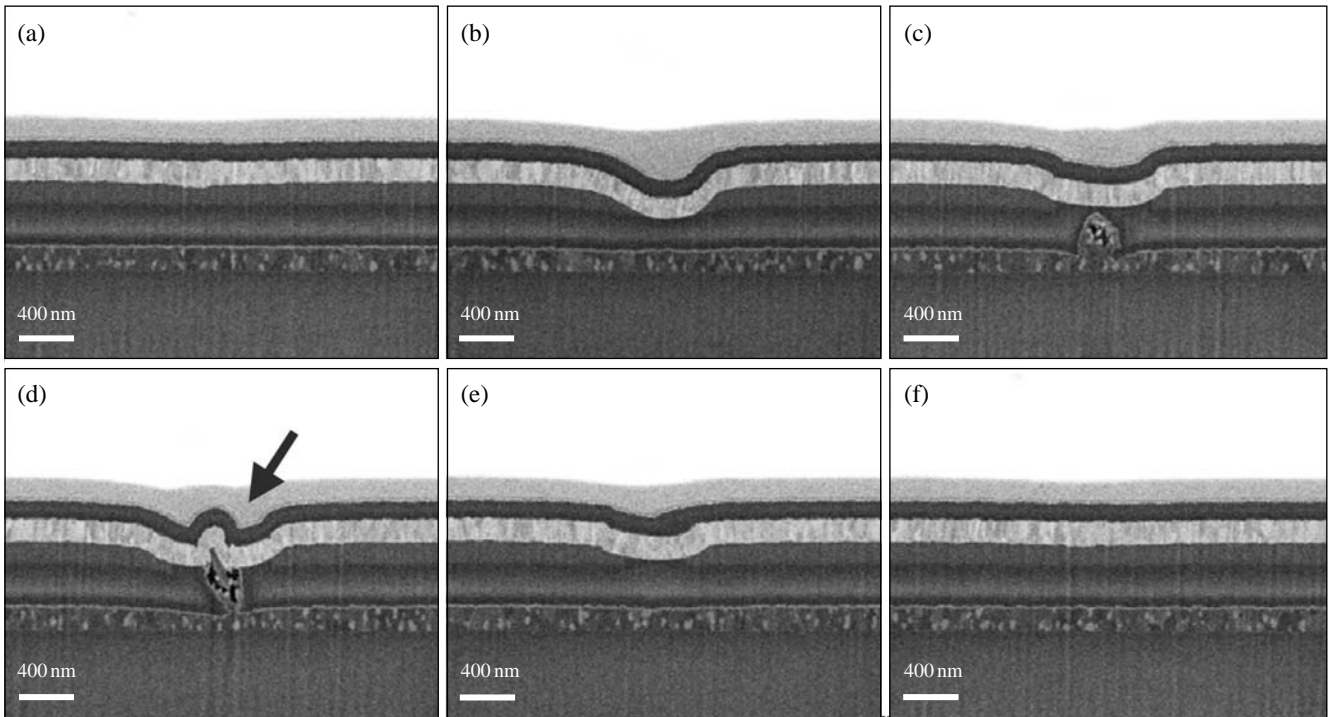


Fig. 1. 2D images of Cross-sectional dual-beam FIB/SEM after 1st alignment during serial sectioning (From (a) to (f)). The arrow mark shows the contact point between Data and Gate.

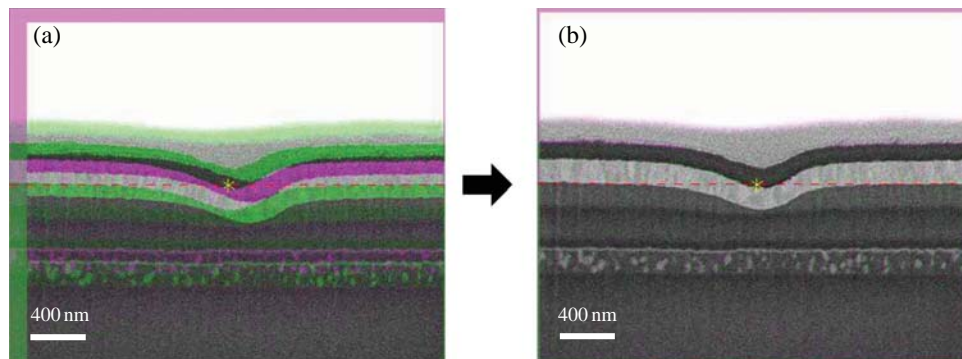


Fig. 2. Serial alignment of Stack files by Midas software (a) Before (b) After.

간으로 확인 할 수 있기 때문에 가능한 작업이다. 적층되는 2차원 이미지가 많을수록 집속이온빔 가공장치 가공으로 인한 체적변화를 최소화 할 수 있고, 정확도가 높은 구조구현을 할 수 있기 때문에 단층 가공간격은 20 nm로 진행하였고, 총 100장의 단면 이미지를 저장하였다. 단면가공 간격을 20 nm로 설정한 이유는, 집속이온빔 가공장치의 빔 분해능이 7 nm이고, 가공 중 발생하는 빔에 의한 시료 손상을 감안했을 때 규칙적이고 안정적인 가공두께의 최소 간격으로 판단되었기 때문이다. 그리고 단면 가공작업 중에 나타날 수 있는 이미지 왜곡에 대해서 실험 전 각각의 장비 및 빔

에 대해서 정렬을 완료하였다. Fig. 1은 연속절단 중 1차 이미지 정렬을 마친 2차원 단면이미지이며, (a)에서부터 (f) 순서로 진행하였다. Fig. 1-(d)에서 화살표시는 Data막과 Gate막의 접합 불량을 가리키고 있다.

3. 3차원 구조구현 (Three dimension reconstruction)

박막 트랜지스터의 주사전자현미경 단면이미지 파일은 시그윈(Cygwin) 소프트웨어에서 엠알씨(mrc) 파일로 변환하여 스택(stack) 파일로 제작하였다. 스택(Stack) 파일은 마

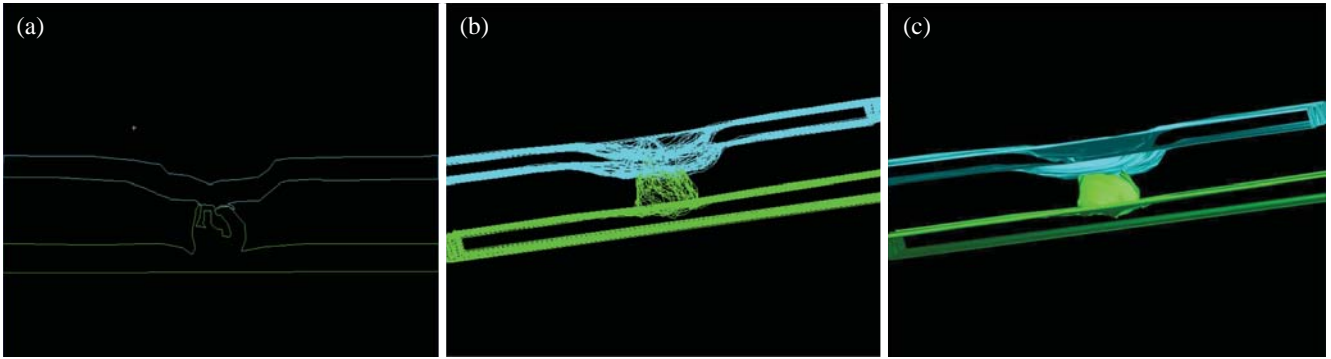


Fig. 3. The images of Image processing by 3dmod (a) contour drawing (b) meshing (c) 3D reconstruction.

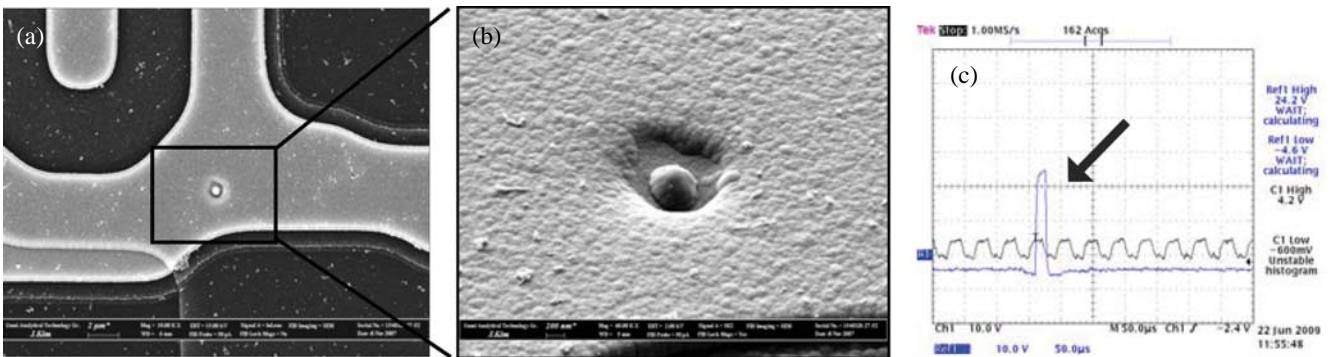


Fig. 4. View of defect (a) TFT device on NG Pixel (b) magnified image of swelling point (c) waveform data. The arrow mark shows the mixed data of Data and Gate.

이다스(Midas) 소프트웨어에서 회전, X축, Y축, 회전하면서 2차 이미지 정렬을 하였다. 정렬된 스택(stack)파일은 3디모드(3dmod) 소프트웨어에서 대상물을 구분하는 컨투어 드로잉(contour drawing)작업과 드로잉(drawing)된 대상물(objective)을 연결하는 메쉬(mesh)작업을 진행하였고, 메쉬(mesh)작업을 완료하여 3차원 구조구현 이미지를 확인하였다. Fig. 2는 마이더스 소프트웨어에서 연속 이미지 정렬 전/후를 보여주는 이미지이다. Fig. 3은 3dmod 소프트웨어에서 이미지 프로세싱을 실시한 이미지이다. (a)는 컨투어 드로잉 (b)는 드로잉된 2차원 이미지를 연결하는 메쉬작업 (c)는 메싱된 이미지를 3차원으로 재형성한 이미지이다.

결과 및 고찰

Fig. 4는 Data와 Gate선 불량(line defect)을 유발하는 픽셀의 박막 트랜지스터 표면이미지와 Data-Gate의 신호 특성을 보여주는 파형측정 그래프이다. 박막 트랜지스터 표면에서 돌기형태의 특이변형 형상을 관찰할 수 있는데 돌기형상의 크기는 600 nm이고, 불량 영역 전체크기는 약 2µm로

측정되었다. COF(Chip On Film) 영역에서 Data 입력신호를 오실로스코프를 이용하여 파형측정 측정결과, Data 신호와 Gate 신호가 혼합되어 나타나는 것을 확인할 수 있었다(화살표시 영역). 박막 트랜지스터는 Data와 Gate가 Gate절연막을 사이에 두고 상/하에서 교차되는 구조로서 구조적 문제는 Data와 Gate 두 막에 영향을 끼치기 때문에 가로-세로의 십자가 형태로 선 불량을 발생시킬 수 있으며, Fig. 1-(d)에서 Data와 Gate막의 접합되어 있는 구조적 문제를 확인할 수 있었다. Fig. 5는 이미지 프로세싱 작업이 완료된 3차원 구조구현 이미지를 각도 0°, 45°, 135°, 180°로 회전시키면서 관찰한 이미지이고, 전체이미지(e)는 45° 기울인 이미지이다. 3차원 이미지에서 Data막과 Gate막의 형상 및 불량 현상을 이해할 수 있었다. 3차원 해석 결과, Gate와 Data가 접합되어 있고, 접합된 영역은 원형으로 융기되어 있으며 주변으로 막이 함몰되어 있었다. Data와 Gate를 구분하는 Gate절연막(SiNx)뿐만 아니라 Data와 Gate사이에서 신호를 전달하는 반도체 비정질 실리콘(Si)막도 유실되어 있었다. Fig. 1-(d)에서 Data막은 변형된 Gate막 형상을 따라서 증착되어 있고, Gate막 이외의 막들은 안정적인 공정이 진행된 것으로 판단된다. Fig. 1-(d)에서 점으로 관찰되는

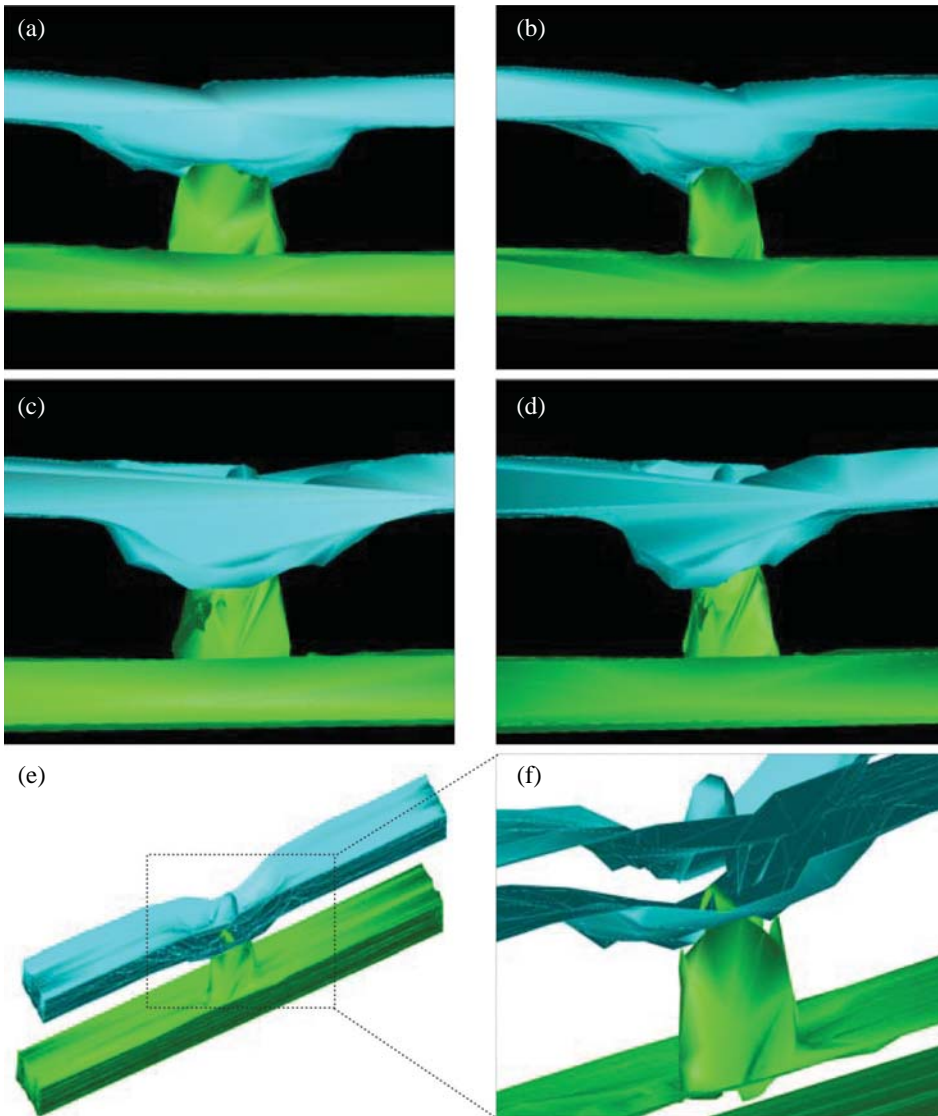


Fig. 5. The images of 3D reconstruction according to the rotation angle (a) 0° (b) 45° (c) 135° (d) 180° (e) Whole image of 3D reconstruction (f) Magnified image of short area.

Data-Gate 접합은 3차원 이미지에서 불량영역 전체가 접합되어 있으며, 그로 인해 용기된 것으로 확인되었다. 박막 트랜지스터에서 신호는 주기적/지속적으로 Data막을 통해서 입력되고, 입력된 신호는 Gate막의 ON/OFF 작용으로 Drain을 통해 투명전극으로 전달된다. 따라서 Fig. 5에서 관찰되듯이 Gate와 Data를 분리시키는 Gate절연막이 없고 두 막이 접합되면 입력되는 신호는 ON/OFF를 구분하지 못하고 Drain을 통해서 신호와 상관없이 투명전극에 계속적으로 전류를 공급하게 된다(권, 2003). 결과적으로 이 신호는 픽셀을 항상 밝게 빛나게 하며, 불량 박막 트랜지스터가 있는 픽셀을 교차하는 가로-세로 픽셀 선 전체에 동일한 문제를 야기하는 것으로 판단된다. 이 결과에 기인하여 Data-Gate 접합 불량은 Gate막 공정 이후 Gate절연막 증착 이전에 환경성 이물 또는 장비 내부 이물이 유입된 것으로 추정된다. 이 물의 상단에 Gate절연막 및 비정질 실리콘 막이 증착되고

Data막 증착 전 세정공정에 의해서 이물이 제거되면서 Gate절연막 및 비정질 실리콘막이 유실되어 Gate막 상부로 Data막이 증착되면서 Data막과 Gate막이 접합된 것으로 판단된다.

결 론

TFT-LCD 패널의 불량현상 중 Data선과 Gate선이 밝게 빛나는 선 불량(line defect)을 유발하는 박막 트랜지스터 시료에 대해서 집속이온빔 가공장치(Dual-beam FIB/SEM)와 IMOD 소프트웨어를 이용하여 3차원 구조구현(3D reconstruction) 연구를 하였다. 실험결과는 박막 트랜지스터 구성막 중 Gate절연막(SiNx)의 유실로 인해 Data막과 Gate막이 접합된 것이 확인되었고, 이 현상으로 인해서 픽셀의 ON/

OFF 기능이 상실되어 밝게 빛나는 불량이 발생한 것으로 나타났다. 본 연구에서 제시한 집속이온빔 장치에 의한 3차원 구조구현 자료는 2차원 단면이미지와 비교하여 많은 정보를 제공하였고 미시적인 거동에 대해서 3차원 해석으로 불량현상을 이해할 수 있었다.

사 사

이 논문을 위한 칼 자이스 SMT사업부 김상진이사, 강성만대리의 기술적 협조가 있었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 권오경: 고해상도 TFT-LCD 구동방법. 한국정보디스플레이학회지 4(6) : 16-20, 2003.
- 김정현: TFT-LCD의 고개구율 기술 동향. 한국정보디스플레이학회지 2(1) : 36-44, 2001.
- 장 진: 박막트랜지스터-액정디스플레이 (TFT-LCD: Thin-Film Transistor Liquid Crystal Display. 화학세계 37(7) : 25-28, 1997.
- Groeber MA, Haley BK, Uchic MD, Dimiduk DM, Ghosh S: 3D reconstruction and characterization of polycrystalline microstructures using a FIB-SEM system. *Materials Characterization* 57 : 259-273, 2006.
- Inkson B, Mulvihill M, Mobus G: 3D determination of grain shape in a FeAl-based nanocomposite by 3D FIB tomography. *Scripta Materialia* 45 : 753-758, 2001.
- Kim JG, Lee SH, Kweon HS, Jeong JM, Jeong WG, Lee SJ, Jou

HT, Kim YJ: Objective Aperture Effects for the Quantitative Analysis in Electron Tomography. *Korean J. Microscopy* 38 : 285-291, 2008.

Lee SR, Choi JH, Jhe JH, Lee LS, Ahn BC: Study of the hydrogen of SiNx film by Fourier transform infrared spectroscopy. *J Korean Vacuum Society* 17(3) : 215-219, 2008.

Mun JY, Lee KE, Han SS: Three dimensional reconstruction of cellular structure in drosophila retina using high voltage electron microscopy. *Korean J. Microscopy* 39(2) : 185-189, 2009.

Wu HZ, Roberts SG, Mobus G, Inkson B: Subsurface damage analysis by TEM and 3D FIB crack mapping in alumina and alumina/5vol.%SiC nanocomposites. *Acta Materialia* 51 : 149-163, 2003.

< 국문초록 >

TFT-LCD의 구조불량이 발생한 박막 트랜지스터에 대해서 집속이온빔 가공장치(Dual-beam FIB/SEM)를 이용하여 연속절편법(Serial sectioning)과 일련의 연속적인 2차원 주사전자현미경 이미지를 얻었고, IMOD 소프트웨어를 통해서 3차원 구조구현(3D reconstruction) 연구를 하였다. 3차원 구조구현 결과, Gate막과 Data막이 접합되어 있는 불량이 관찰되었다. 두 막이 접합되어서 ON/OFF 역할을 하는 Gate의 기능이 상실되었고, Data신호는 Drain을 통해서 투명전극에 전류를 공급하여 계속 빛나는 선불량(line defect)이 발생한 것으로 판단된다. 이 논문의 결과인 집속이온빔 가공장치(Dual-Beam FIB/SEM)를 이용한 3차원 구조구현 연구와 연속절편법, 주사전자현미경 이미지작업, 이미지 프로세싱에 대한 결과는 향후 연구의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.