

레이저 국소증착을 이용한 TFT-LCD 회로수정 패턴제조

박종복* (광주과학기술원 대학원 기전공학과), 정성호 (광주과학기술원 기전공학과)

김창재, 박상혁, 신평은, 강형식 (LG 전자 생산기술원)

Laser-induced chemical vapor deposition of micro patterns for TFT-LCD circuit repair

Jongbok Park* (Dept. Mechatronics, GIST), Sungho Jeong (Dept. Mechatronics, GIST)

Changjae Kim, Pyung-Eun Shin, Sang-Hyuck Park, Hyoung-Shik Kang (LG-PRC)

ABSTRACT

In this study, the deposition of micrometer-scale metallic interconnects on LCD glass for the repair of open-circuit type defects is investigated. Although there had been a few studies Since 1980 s for the deposition of metallic interconnects by laser-induced chemical vapor deposition, those studies mostly used continuous wave lasers. In this work, a third harmonic Nd:YLF laser (351nm) of high repetition rates, up to 10 KHz, was used as the illumination source and $W(CO)_6$ was selected as the precursor. General characteristics of the metal deposit (tungsten) such as height, width, morphology as well as electrical properties were examined for various process conditions. Height of the deposited tungsten lines ranged from 35 to 500 nm depending on laser power and scan speed while the width was controlled between 3~50 μ m using a slit placed in the beam path. The resistivity of the deposited tungsten lines was measured to be below 1 Ω cm, which is an acceptable value according to the manufacturing standard. The tungsten lines produced at high scan speed had good surface morphology with little particles around the patterns. Experimental results demonstrated that it is likely that the deposit forms through a hybrid process, namely through the combination of photolytic and pyrolytic mechanisms.

Key Words : Laser-assisted chemical vapor deposition (LCVD: 레이저국소증착), Direct writing(직접묘사), Circuit repair (회로수정), LCD(액정표시장치), Tungsten deposition(텅스텐증착)

1. 서론

최근 디스플레이 산업의 급격한 성장과 발전에 따라 FPD(Flat Panel Display) 관련산업에 관심이 증가하고 있다. 특히 디지털 TV, LCD 모니터, 휴대폰 등과 같은 디스플레이 산업의 급속한 성장에 따라 TFT-LCD(Thin Film Transistor- Liquid crystal display) 수요가 급증하고 있으며, 이에 소요되는 유리 기판의 크기 또한 점점 증가하고 있다. 일반 IC(Integration Circuit)칩에 비하여 단가가 높은 TFT-LCD의 경우, 많은 픽셀을 구성하는 미세 회로 중 일부에 결함이 발생했을 때 TFT-LCD 기판을 폐기하는 대신 회로수정을 통해 정상제품으로 복원함으로써 생산성을 향상시키는 것이 요구된다. TFT-LCD의 결함은 크게 개방 되어야 할 회로가 단락된 경우와 연결되어야 할 회로가 개방된 경우로 나눌 수

있다. 먼저 단락된 회로의 경우 레이저 어블레이션 을 통해 단락된 위치의 회로를 제거함으로써 비교적 쉽게 수정이 가능하다. 그러나 개방형 결함의 경우 전도성 재료를 공급하여 단선된 회로를 연결하여야 하므로 보다 복잡한 공정이 요구된다. 보통 TFT-LCD 기판의 회로결함은 매우 작은 영역에 국소적으로 발생하므로 반도체 공정을 이용한 수정은 불가능하거나 매우 불합리하며, 다른 대안으로 마스크 없이 원하는 영역내에 마이크로미터 크기의 미세한 물질을 증착시킬 수 있는 레이저 국소증착법(LCVD: Laser-assisted Chemical Vapor Deposition)을 이용할 수 있다¹.

레이저 국소증착 공정은 PVD(Physical Vapor Deposition)공정으로는 증착이 어려운 금속물질을 다양한 재질 위에 용이하게 증착 시킬 수 있다는

점과 우수한 증착물 결합도, 전기 저항도(resistivity), 순도 등의 장점을 갖추고 있어 미세 회로수정(circuit repair)이나 마스크수정(mask repair), 더 나아가 직접적인 마이크로 3차원 구조물 제조 및 마이크로 전자소자 제조에의 응용을 위한 많은 연구가 이루어져 왔다^{2,6}. 특히 결함이 있는 전자 회로의 수정에 응용될 수 있는 금속물질의 직접묘사(direct writing)에 대한 연구는 지난 20년간 꾸준히 이루어지고 있으며, 전반적인 연구의 관심은 레이저 빔이 반응물질을 분해하는 과정에서 생성된 증착물의 특성 및 이에 영향을 미치는 인자로 반응물질(precursor or reaction gas), 레이저 빔의 파장, 출력, 이송속도 및 기질(substrate material) 등이 보고되고 있다^{7,13}. 그러나 연구에 따라 공정조건이 최종 증착물의 특성에 영향을 미치는 정도 및 증착 양상에 차이를 보이고 있어 특정 응용분야의 회로 패턴 수정에 적용하기 위해서는 보다 많은 연구가 요구된다.

본 연구에서는 TFT-LCD의 수많은 픽셀들의 회로 중 일부가 개방되었을 경우, 레이저 국소증착을 통해 미세한 금속도선을 증착시켜 원래의 회로로 수정 복구하는 장비개발을 목적으로 레이저 국소증착 공정에 관한 연구를 수행하고 증착물의 특성을 분석하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 장에서는 실험에 사용된 실험장치 및 실험방법을 소개한다. 실험장치는 레이저에서 나온 빛을 반응실로 인도하기 위한 광학계, 반응가스 제어부 및 반응 챔버와 이송계로 구성되며 각 부분에 대해서는 아래에서 설명한다. Fig 2는 실험 장치의 전체적인 구성을 간략히 나타내고 있다.

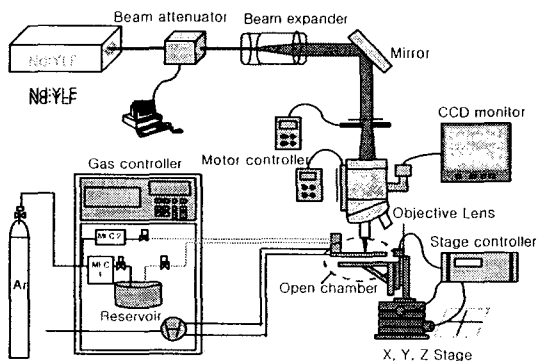


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

2.1 레이저 및 광학계

본 실험에서는 반응을 활성화시키기 위한 에너

지원으로써 351nm 파장을 가지며 높은 펄스 반복율(pulse repetition)을 가지는 Nd:YLF 레이저가 사용되었다. 레이저에서 나온 빔은 Fig. 2에서와 같이 PC에서 제어되는 빔 감쇄기(beam attenuator)를 거친 다음 빔 확대기(beam expander)를 지나 거울 및 슬릿의 광학계 헤드부를 통과 한 후 현미경용 대물렌즈를 통해 시편표면에 집속된다. 현미경용 렌즈는 저배율의 관찰용 렌즈와 고배율의 가공용렌즈 두 가지가 사용되었으며 사각 슬릿의 크기를 조절함에 따라 가공용 렌즈를 사용할 경우 시편표면에서 한 번이 약 3-50 μ m 크기의 초점을 얻을 수 있다. 이때 시편의 관찰을 위해 별도의 조명용 백색광원을 사용하였으며, 조명용 광원으로부터 조사된 빛은 대물렌즈를 통해 집속된 후 시편 표면에서 반사되어 렌즈를 통하여 CCD 영상 쪽으로 입력된다.

2.2 반응가스 제어부 및 반응챔버

본 실험에서는 텅스텐(W) 미세 금속 패턴을 얻기 위하여 반응물로 텅스텐카보닐[W(CO)₆]이 사용되었으며 반응물을 운반하기 위한 이송가스(carrier gas)로는 아르곤(Ar)이 사용되었다. 초기 고체상태인 텅스텐카보닐은 반응물 저장소(reservoir)에서 가열되어 승화되면 이송가스가 이동하면서 반응가스를 반응이 일어나는 챔버까지 이동시켜 준다. 이때 반응가스가 운반되는 경로상의 배관도 가열해주어 반응가스가 배관벽에 응결되는 것을 방지하도록 설계되었다.

LCVD 공정에서 원하는 증착 패턴을 얻기 위해서는 증착이 일어나는 도중에 이송계를 이용하여 레이저 초점을 시편상에서 원하는 패턴을 따라 이동 시켜야 한다. 이때 유해한 반응가스는 외부로의 유출이 차단되어야 한다. 일반적으로 작은 시편을 사용하는 실험실에서는 밀폐된 챔버를 사용하여 반응가스가 외부로 유출 되지 않게 하지만 LCD 유리기관의 경우 한 번의 크기가 1m 이상으로 커 밀폐된 챔버의 사용이 사실상 불가능 하며 이에 따라 개방형 챔버를 사용하였다. 개방형 챔버(open chamber)의 원리는 Fig. 2의 개방형 챔버부분에서 보듯이 스테이지 위에 놓여지는 시편표면과 챔버 바닥면간의 간격을 매우 작게 유지하면서 챔버 바닥면의 가운데 구멍을 통해 반응 가스를 공급하고, 반응가스가 주변으로 유출되는 것을 방지하기 위해 반응가스 공급구를 둘러싸고 있는 원형의 가스 흡입구를 통해 반응 후 가스를 흡입함으로써 누출을 차단하는 원리에 의하여 설계 되었으며, 헬륨가스를 이용한 누설 측정실험을 통해 가스 누설이 없음을 확인하였다. 실제 회로 수정 시스템에서 원하는 패턴을 따라 증착이 일어나도록 하기 위해서는 TFT-LCD 기판을 고정하고 레이저 헤드 및 챔버를

이송하지만 본 실험에서는 챔버를 고정하고 증착 중에 스테이지 위에 있는 시편을 이송하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 증착물의 형상 변화

본 절에서는 레이저 출력과 이송속도의 변화가 증착에 어떠한 영향을 주는지를 증착물의 형상을 중심으로 고찰 하였다. LCVD 연구에서 공정조건에 따른 형상변화는 증착물의 반응 매커니즘, 증착물 및 증착 특성을 알 수 있는 중요한 단서가 된다. 따라서 이러한 형상적인 측면에서의 분석 및 고찰은 LCVD 연구에서 기본적인이며 중요한 부분이라 하겠다.

이송속도를 $3\mu\text{m/s}$ 로 고정시키고 레이저 출력을 변화시켜가며 실험을 수행하였으며, Fig. 3 은 레이저 출력에 따른 증착물의 형상변화를 보여준다. 낮은 레이저 출력인 0.21mW (Fig. 3(a))의 조건에서는 증착물에 물결무늬가 보이는데 그 이유는 다음과 같이 생각된다. 실험에 사용된 이송계가 약 $1\mu\text{m}$ 간격으로 스텝핑 모터에 의해 움직이는데 한 위치에서 증착 후 다음 위치로 이동할 때 이전 증착부와 새로운 증착 영역 끝 단 사이에 약간의 중첩이 이루어지는 것으로 생각되며, 레이저 출력이 낮은 조건에서는 유리기판 상의 증착율이 매우 낮으므로 중첩된 부분과 중첩이 없이 증착된 부분 간에 두께 차이를 보이는 것으로 판단된다. 물결무늬 간격이 Fig. 3 (a)에서 보듯이 약 $1\mu\text{m}$ 인 점을 고려하면 이 판단이 근거 있음을 예상할 수 있다. 한편 Fig. 3 (a) 보다 레이저 출력이 높은 Fig. 3(b)의 경우는 레이저 출력이 이상적인 경우로써 이 조건에서도 증착물에 미세한 물결무늬 흔적은 볼 수 있으나 전체적으로 우수한 형상을 얻을 수 있었다. 앞의 두 경우 보다 높은 레이저 출력인 Fig. 3(c)와 (d)의 경우 가운데 부분이 갈라지는 현상이 나타나며 레이저 출력을 증가시킴에 따라서 각 조건의 오른쪽에 나와있는 3차원 영상(높이 방향 치수는 폭 방향에 비해 매우 과장 되어 있음)을 통하여 그 현상이 더욱 뚜렷해짐을 알 수 있다.

높은 레이저 출력에서 단면이 도랑(trench)형상을 나타내는 원인은 아직까지 정확히 설명되지 않고 있으나 Fig. 3(d)의 단면 형상을 보여주는 Fig. 4에서 유리표면 아래의 높이가 발견되는 점으로 미루어 보아 도랑형상이 나타나는 원인으로 높은 온도로 발생하는 역반응 및 레이저 빔에 의한 증착물의 예칭 가능성이 추정되며, 시편인 유리 표면 아래로 내려가는 현상은 높은 레이저 출력에 의하여 중심부에서의 온도가 유리의 변형온도인 $450\sim 500^\circ\text{C}$ 이상이 되어 용융된 것으로 추측된다.

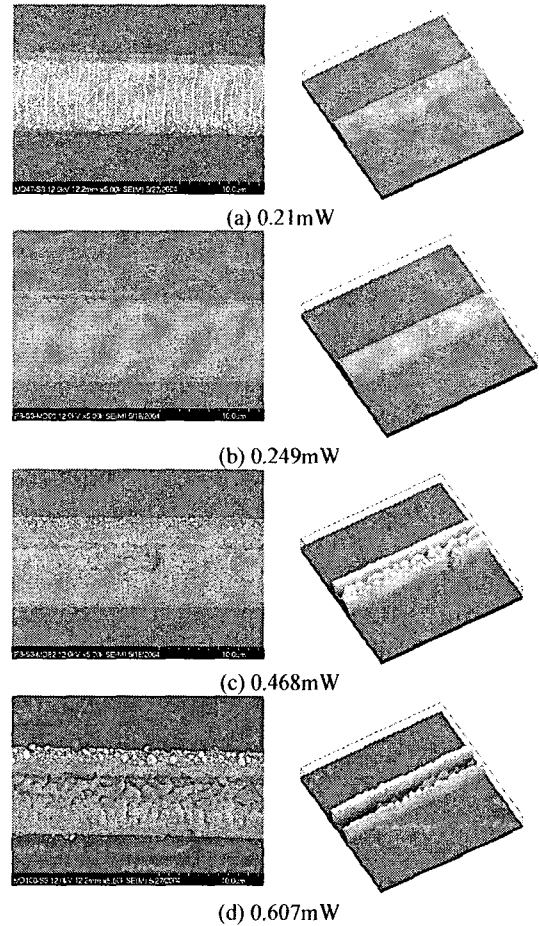


Fig. 3 SEM pictures and 3D images of the deposited micro tungsten patterns by direct writing with various laser power (Scan speed: $3\mu\text{m/s}$)

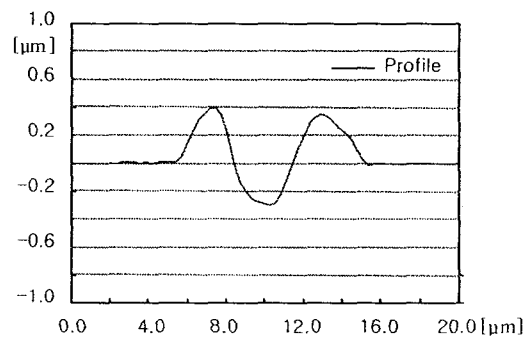


Fig. 4 Cross sectional profile of the tungsten pattern in Fig 3(d)

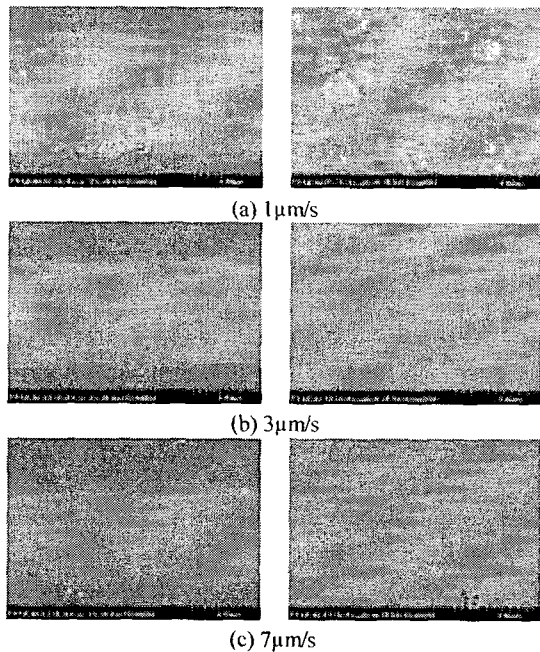


Fig. 5 Variation of surface morphology of the micro tungsten patterns with respect to scan speed (Pictures on the right are magnified view of the surface; Laser power: 0.249mw)

레이저 출력과 함께 중요한 공정 변수인 이송속도에 따른 증착특성을 살펴보기 위해 동일한 레이저 출력에 대하여 이송속도를 변화시켜 가면서 실험한 증착물의 사진을 보여주고 있다.

Fig. 5의 이송속도가 낮은 경우를 보면 표면 입자의 크기가 속도가 빠른 경우에 비해 상대적으로 큰 것을 알 수 있는데 그 이유는 다음과 같이 생각해 볼 수 있다. 우선 레이저 빔의 흡수가 거의 없는 유리 시편(<5%) 위에 증착이 일어나기 위해서는 일차적으로 광반응에 의해 증착물이 형성된 후, 이 입자들을 중심으로 증착층에서의 레이저 에너지 흡수증가에 따른 열반응 메커니즘을 통해 증착물이 최종두께로 성장한 것으로 생각된다. Fig. 6은 광반응의 증거가 되는 증착패턴 주변의 텅스텐 입자들을 보여주고 있는데 이를 통해 본 연구에서 증착시킨 증착물은 열반응과 광반응이 같이 일어나는 하이브리드 증착 매커니즘에 의해 생성되는 것으로 생각된다.

3.2 증착물의 높이와 선폭의 변화

레이저 출력이 증가함에 따라서 Fig. 7에서 보듯이 증착물의 높이가 비례적으로 증가되는 것을 볼 수 있으며, 속도가 낮은 영역에서는 레이저 출력에 따른 증착 두께의 변화가 더 큼을 볼 수 있다.

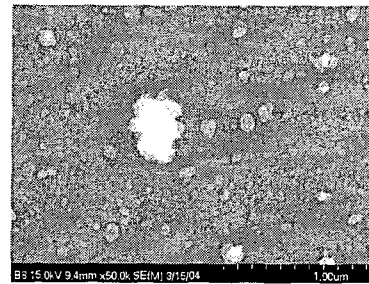


Fig. 6 Tungsten nano-particles deposited around the patterns

반면 속도가 높은 영역에서는 레이저 출력의 증가에 따른 증착 두께의 변화가 줄어들면서 거의 일정해지는 경향을 나타낸다. 한편 Fig. 8에서 이송속도에 대해 증착물의 높이가 반비례적으로 감소하는 것을 알 수 있는데 이에 따라 출력과 이송속도를 조절함으로써 높이 35~500 nm 사이에서 전체적으로 증착이 가능하며, 형상이 비교적 좋은 0.249mw, 3μm/s 에서 실제 TFT-LCD 수정 시 요구되는 높이인 약 150nm의 텅스텐 패턴을 얻을 수 있었다. 일반적으로 증착물의 폭은 속도가 증가함에 따라 선형적으로 감소하나 본 연구에서는 슬릿 크기를 조절하여 3~50μm 범위에서 원하는 선폭을 얻을 수 있음이 확인 되었다.

초점위치(focus position) 변화에 따른 증착물의 폭은 초점부근에서 가장 좁게 나오며 높이는 초점 약간 아래 부근에서 가장 높게 나오는 것을 알 수 있었다. 증착물의 높이는 전반적으로 초점이 시편 표면 보다 아래 있을 때 큰 것으로 나타났는데 이는 초점이 시편 아래에 있을 때 지속적으로 집속되는 레이저빔에 의해 표면아래에서 단위 부피당 국소적으로 더 많은 에너지를 흡수시킬 수 있어 초점이 시편 위쪽에 있을 때보다 상대적으로 더 높은 온도상승을 기대할 수 있는데 기인한 것으로 추측된다.

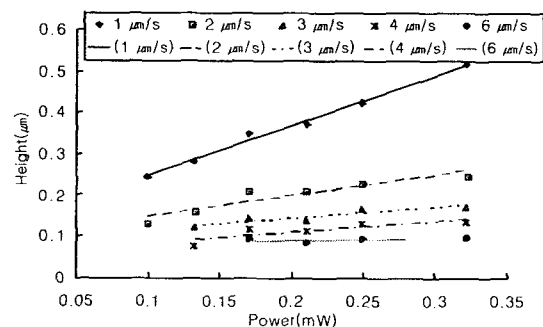


Fig. 7 Height of the micro tungsten patterns with respect to laser power for various scan speeds.

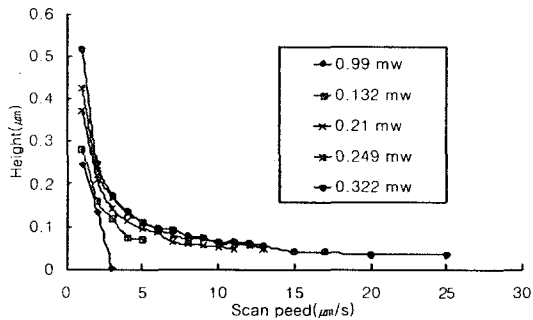


Fig. 8 Height of the micro tungsten patterns with respect to scan speed for various laser power.

3.3 증착물의 전기적 성질

Fig. 9 는 레이저 출력에 따른 전기적 성질과 증착물의 형상 변화를 나타내었다. 레이저 출력 0.3~0.6mW 에서 1(O- μ m) 이하의 값을 얻을 수 있으며, 이는 실제 TFT-LCD 회로 수정에서 요구하는 값을 만족하는 결과값에 해당된다. 레이저 출력이 0.3 mW 보다 낮아질 경우에는 저항값이 급격히 증가함을 볼 수 있으며, 레이저 출력을 0.3 mW 이상에서 지속적으로 증가시키기에 따라 저항값도 증가하는 것을 볼 수 있다. 한편 위 실험 결과를 보면 표면 형상이 가장 우수한 영역에서 전기적 성질이 가장 좋은 것은 아님을 알 수가 있다. 즉 표면 형상은 0.249mW 영역에서 좋게 나타나는 반면 전기 저항은 이보다 높은 0.322 mW 영역에서 가장 작게 나타난다. 따라서 실제공정에서는 좋은 형상이 나오는 조건하에서, 가능한 출력을 증가시켜야 한다는 결론을 얻을 수 있다.

증착 시 LCD 유리기판의 변형 온도 보다 높은 온도에서 증착이 이루어 질 경우 LCD 유리기판에 손상을 가하게 되므로 이보다 낮은 온도에서 증착이 이루어 져야 한다. 한편 $W(CO)_6$ 로부터 텅스텐 (W)을 증착시킨 CVD 공정에 따르면 375 켈 영역에서는 저항값이 큰(10 Ω - μ m 이상) β -phase 텅스텐이 증착 되며, 낮은 저항값을 가지는 α -phase 텅스텐을 얻기 위해서는 증착 온도를 900 켈 정도로 상승시켜야 되는 것으로 보고되고 있다¹⁴. 그러나 실제 본 실험에서 증착시킨 증착물은 증착온도가 LCD 유리의 변형온도인 450~500 $^{\circ}$ C 이하에서 증착이 이루어져야 하므로 레이저 출력을 증가시켜 증착온도를 상승시키는데 한계가 있다. 본 실험에서는 LCD 유리에 변형을 일으키지 않으면서 비교적 우수한 형상과 1 O- μ m 이하의 비저항 값을 가지는 영역이 발견되고 있으며 이러한 값은 실제 LCD 수정에 응용될 수 있음이 확인 되었다. 여기서 비저항 값은 저항값을 길이로 나눈 단위길이당 저항값을 계산한 후 증착물의 단면적을 곱하여 계산하였다.

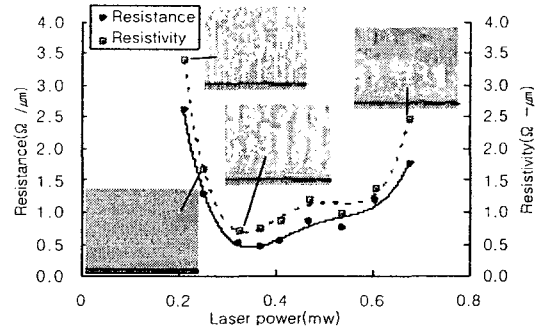


Fig. 9 Variation of electrical property and morphology with respect to laser power

4 결론

본 연구에서는 레이저국소증착 기법을 이용해 미세 텅스텐 패턴을 증착 시켰으며, 실제 수정장비에의 응용을 위하여 오픈 챔버 시스템을 사용하였다. 증착물은 광반응과 열반응이 같이 일어나는 하이브리드 증착 매커니즘에 의해 형성되는 것으로 생각되며, 증착물의 형상은 레이저 출력과 이송속도를 조절함으로써 제어가 가능하다. 한편 본 연구를 통해 시편에 손상을 주지 않는 비교적 낮은 온도에서 TFT-LCD 회로 수정시 요구되는 전기적 성질과 우수한 형상을 보이는 패턴을 제조하는데 성공하였다. Fig. 10 는 TFT-LCD 유리기판상의 원하는 위치에 직접 텅스텐 선을 증착시킨 모습을 보여주며 실제 TFT-LCD 회로 수정에 응용될 수 있음이 확인 되었다.

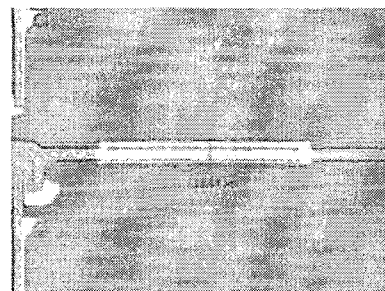


Fig. 10 Direct writing on the LCD pattern glass

참고문헌

1. Bäuerle, D., "Laser Processing and Chemistry," 2nd Ed. Springer-Verlag, pp. 337 - 393, 1995.
2. Han, S. I., Jeong, S. H., "Laser-assisted chemical vapor deposition to directly write three-dimensional microstructures," Journal of Laser Applications Vol.

- 16, pp. 154 - 159, 2004.
3. Baum, T. H., Comita, P. B., "Laser-induced chemical vapor deposition of metals for microelectronics technology," *Thin Solid Films*, Vol. 218, pp. 80 - 94, 1992.
 4. Williams, K., Maxwell, J., "Freeform Fabrication of Functional Microsolenoids, Electromagnets and Helical Springs Using High-Pressure Laser chemical Vapor Deposition," 20th IEEE international conference, pp. 232 - 237, 1999.
 5. Bjorklund, K. L., Boman M., "Containerless fabrication of tungsten single crystals using laser CVD for field emission applications," *Appl. Phys. A*, Vol. 75, pp. 493 - 496, 2002.
 6. Seppo Leppävuori, Janne Remes, Hannu Moilanen, "Utilisation of Cu(hfac)tmvs precursor gas in LCVD integrated circuit repair system," *Applied Surface Science*, Vol. 138, pp. 123 - 129, 1999.
 7. Black, J. G., Doran, S. P., Rothschild, M., and Ehrlich, D. J., "Low-Temperature laser deposition of tungsten by silane-and disilane-assisted reactions," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 56, No.11 pp.1072 - 1074, 1990.
 8. Meunier, Michel, Ricardo Izquierdo, Maleck Tabbal, Stéphane Evoy, Patrick Desjardins, Marie-Hélène Bernier, Joan Bertomeu, Nada Elyaagoubi, Marc Suys, Edward Sacher, Arthur yelon, "Laser induced deposition of tungsten and copper," *Materials Science and Engineering B*, Vol. 45, pp. 200 - 207, 1997.
 9. Kordás, K., Remes, J., Leppävuori S., Nánai L., "Laser-assisted selective deposition of nickel patterns on porous silicon substrates," *Applied surface science* Vol 178, pp. 93 - 97, 2001.
 10. Gilgen, H. H., Cacouris, T., Shaw, P. S., Krchnavek, R. R., and Osgood, R. M., "Direct writing of metal conductors with near-uv light," *Appl. Phys. B*, Vol. 42, pp. 55 - 66, 1987.
 11. Allen, S. D. and Tringubo A. B., "Laser chemical vapor deposition of selective area Fe and W films," *J. Appl. Phys.*, Vol. 54, pp. 1641 - 1643, 1983.
 12. Nambu, Y., Morishige, Y. and Kishida, S., "High-speed laser direct writing of tungsten conductors from W(CO)₆," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 56, pp. 2581 - 2583, 1990.
 13. Gluck, N. S., Wolga, G. J., "Mechanism of carbon and oxygen incorporation into thin metal films grown by laser photolysis of carbonyls," *J. Appl. Phys.*, Vol 61, pp. 998 - 1005, 1987.
 14. Lai Ken K., Lamb H. Henry, "Tungsten chemical

vapor deposition using tungsten hexacarbonyl microstructure of as-deposited and annealed films," *Thin solid Films*, Vol. 370, pp. 114 - 121, 2000.