

레이저 증착에 의한 미세 패턴 형성

Micro patterning using laser-assisted chemical vapor deposition

LG전자 생산기술원 *김창재, 이재영, 송민규, 조창현, 강형식

1. 서론

최근 디지털 TV, LCD 모니터, 휴대폰 등과 같은 FPD(Flat Panel Display) 산업의 급속한 성장과 발전으로 TFT-LCD(Thin Film Transistor-Liquid Crystal Display) 수요가 급증하고 있으며, 세대가 발전함에 따라 소요되는 유리 기판의 크기 또한 점점 증가하고 있다. TFT-LCD의 경우 높은 생산 단가 때문에, 많은 픽셀을 구성하는 미세 회로 중 일부에 결함이 발생했을 경우 TFT-LCD 기판을 폐기하는 대신 회로수정을 통해 정상제품으로 복원함으로써 생산성을 향상시켜 원가 절감을 이루는 것이 요구된다. TFT-LCD의 회로결함은 크게 개방되어야 할 회로가 단락된 경우와 연결되어야 할 회로가 개방된 경우로 나눌 수 있다. TFT-LCD의 회로결함 수정은 반도체 공정을 이용하는 기법보다 레이저를 이용하는 기법이 더 효과적이다. 단락된 회로의 경우 레이저 어블레이션을 통해 단락된 위치의 회로를 제거함으로써 비교적 쉽게 수정이 가능하나, 개방형 결함의 경우 어블레이션 공정에 이어 전도성 재료를 공급하여 단선된 회로를 연결하는 공정이 필요하므로 보다 복잡한 공정이 요구된다. 일반적으로 개방형 회로결함은 마이크로미터 크기의 영역에 국소적으로 발생하므로 마스크 없이 원하는 영역내에 마이크로미터 크기의 미세한 물질을 증착시킬 수 있는 레이저 증착법(LCVD: Laser-assisted Chemical Vapor Deposition)을 이용할 수 있다[1].

레이저 증착은 열분해성 또는 광분해성 반응에 의해 증착이 진행되는데 다른 CVD 공정이나 PVD(Physical Vapor Deposition) 공정으로는 증착이 어려운 금속물질을 다양한 재질 위에 직접적으로 용이하게 증착시킬 수 있다는 점과 우수한 증착 결합도, 전기 저항도(resistivity), 순도 등의 장점을 갖추고 있다. 이러한 장점으로 인해 미세 회로수정(circuit repair)이나 마스크수정(mask repair), 마이크로 구조물 제조 등에의 응용을 위한 많은 연구가 이루어져 왔다[2-5]. 특히 전자 회로결함의 수정에 응용될 수 있는 금속물질의 직접묘화(direct writing)에 대한 연구는 꾸준히 이루어지고 있는데, 전반적인 연구의 관심은 생성된 증착물 특성(deposit morphology, deposition rate)이며 이에 영향을 미치는 인자로는 반응물질(precursor or reaction gas), 레이저 빔 특성(파장, 출력), 이송속도 및 기질(substrate material) 등이 보도되어 있다[6-10]. 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-LCD 회로 중 개방 결함이 있을 경우, 레이저 증착을 통해 결함을 수정하는 장비의 개발을 목적으로 레이저 증착 공정에 관한 연구를 수행하였고, 다양한 증착물질과 기질에 대한 연구가 이루어졌다. 분석 및 평가는 증착물의 적합성에 대한 판정기준이 되는 증착물의 형상, 접착성, 전기적 특성에 대해 이루어졌고, 이를 기반으로 한 반응 메커니즘은 광분해 반응과 열분해 반응을 동시에 수반하는 복합형 메커니즘이라 할 수 있다.

2. 실험방법

실험장치는 반응 에너지원인 레이저와 레이저를 반응부로 전달하는 광학계, 반응 물질을 이송하는 가스계, 반응이 일어나는 반응부, 반응이 일어나는 기질(substrate)을 이송시키는 이송계로 구성되며, Fig.1에 실험장치의 개략도가 나타나 있다.

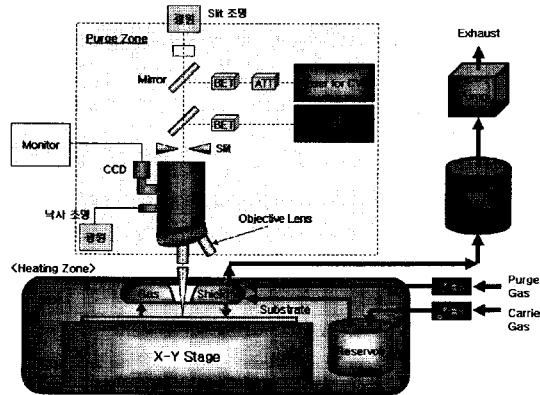


Fig.1 Schematic diagram of the experimental system

본 실험에서는 반응을 활성화시키기 위한 에너지원으로 351nm 파장(wavelength: λ)을 가지는 Nd:YLF 레이저를 사용하였고, TEM₀₀ 모드(mode)에서 운용되어 가우시안(Gaussian) 분포에 근사한 에너지밀도(Intensity)를 갖는다. 조사된 레이저는 파워조절기(Attenuator) 및 빔확대기(Expander)를 지나고 슬릿을 통해 빔 크기가 $\square 25\mu\text{m}^2$ 이하로 조절되어 대물렌즈를 통과한다. 대물렌즈를 통과하며 집속된 빔은 가공부에 도달하게 된다. 가공부에는 조명용 광원을 사용하고 CCD 카메라를 통해 가공 상황을 영상을 통해 실시간으로 관찰이 가능하다.

반응물로는 W, Mo, Cr, ... 등의 금속원료를 사용하였고, 금속원료는 헥사카보닐기와 결합된 X(CO)₆ 재료를 이용하였다. 가스계에서는 금속원료를 반응재료로 사용하기 위해 일정한 온도를 가열하여 승화시키고 이를 이송가스를 이용하여 정확한 유량 조절을 통해 반응부로 전달한다. 이송가스로는 아르곤가스를 사용하였고, 승화된 원료는 이송되는 과정에서 다시 응고되지 않아야 한다. 반응부는 반응물질이 외부로 유출되지 않도록 가스 커튼을 형성하는 개방형 챔버를 적용하였다. Fig.2에 개방형 챔버에 대한 시뮬레이션 결과를 볼 수 있다. 반응부에 도달한 반응물질은 증착물을 형성하게 되는데, 반응에 참여하지 못한 미반응물질은 배기계를 통해 빠져나가며 이때 유해한 물질이 외부로 유출되지 않도록 하였다. 개방형 챔버를 사용함으로써 Glass가 모두 챔버 내로 삽입되는 진공 챔버형 장비에 비해 장비 크기, 장비 단가, 생산성 증가 등의 장점을 얻을 수 있다.

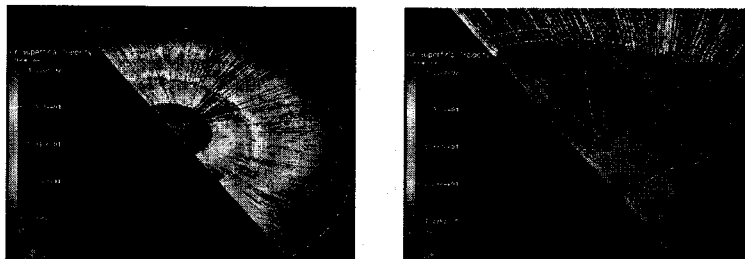
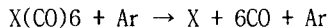


Fig.2 Streamline of Gas Shield by Simulation

가공 대상물은 100um의 평탄도를 가지는 chuck 위에 놓여지며, 스테이지가 X,Y축으로 이동되며 가공속도를 제어한다. 반응부에 승화되어 도달한 반응물질은 레이저 에너지에 의해 분해되며 광반응을 일으켜 가공 대상물에 증착물이 생성되고, 이후 광반응과 열반응이 혼합되어 증착물이 성장해 나간다. 증착물은 아래식과 같은 반응을 통해 형성된다[9].



본 실험은 증착 특성에 영향을 미치는 인자인 레이저 파워, 속도, 반응물질 등을 변화시키며 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

증착 특성에 영향을 미치는 인자들의 효과를 연구하는 것은 증착 품질 향상과 반응 메커니즘을 파악하는 데 있어 중요하며, 이를 통해 실질적으로 산업현장에 적용될 조건 선정이 가능해진다.

증착 특성은 반응 에너지원인 레이저의 주파수, 파장, 파워(power) 등의 조건에 의해 크게 변화하게 되는데, Fig.3에서는 레이저 파워의 변화에 따른 텅스텐 증착패턴의 형상을 나타낸다. 레이저 파워가 적정 power에 비해 낮을 경우 증착물에 알갱이와 더불어 띠형상을 보이게 된다. 증착물의 형성은 반응물질이 레이저에 의해 분해(decomposition)되고 분해된 증착물질이 기질(substrate)에서 핵화(nucleation)되고 성장(growth)을 시작하는 과정을 거치게 되는데, 이때 파워가 낮다면 분해된 증착을 위한 물질의 기질위에 쌓이나 성장과 결합을 위한 충분한 에너지를 공급받을 수 없기 때문에 알갱이 형태로 남게 된다. 또한 띠(stripe)형상은 이송부에서의 이송시 장치의 이동 정도(resolution)에 의해 성장에 있어 중첩 효과를 보이기 때문이라고 추정할 수 있다. 이러한 형상은 레이저 파워가 낮을 때뿐만 아니라 유량비가 큰 경우에도 발생하게 된다. 레이저 파워가 적정 파워에 비해 높다면 우측 하단의 그림에서와 같이 터짐 현상이 발생하게 된다. 레이저 파워가 높아짐에 따라 터짐 현상은 더욱 강해지는데 이처럼 단면이 터지는 도랑(trench) 형상이 나타나는 원인에 대한 뚜렷한 메커니즘은 규명되어 있지는 않지만 높은 온도에서 발생하는 역반응과 레이저 빔에 의한 증착물의 식각 및 중심부에서의 용융에 의한 것이라고 추정할 수 있다[1]. 적정한 파워를 가지는 경우 양호한 표면형상이 관찰되는데, 패턴의 주변부에 알갱이 등의 잔여물이 남아있게 된다.

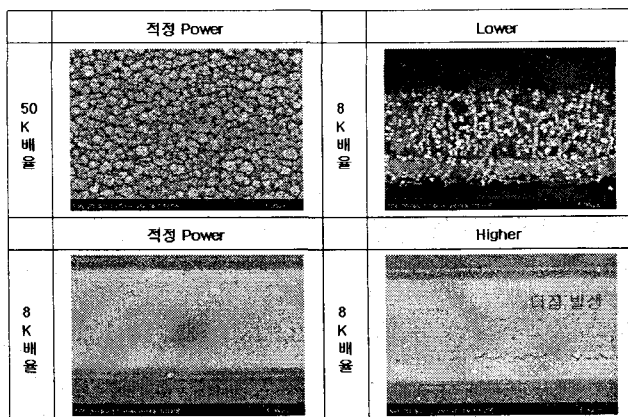


Fig.3 Surface morphology of the tungsten patterns with various laser power

Fig.4는 증착 이동속도(scan speed)와 증착회수(scan number)에 따른 텅스텐 증착물의 형상을 나타낸다. 이동속도가 증가할수록 입자(grain)의 크기가 감소하는 것을 볼수 있으며, 동일

속도에서의 증착회수가 입자의 크기를 좌우한다. 즉 증착회수가 많아질수록 입자의 크기가 커진다. Fig.5는 속도별 파워 변화에 따른 높이의 영향에 대한 그래프이다. 속도가 증가할수록 높이가 낮아지며, 동일 속도에서 일정 파워 구간에서 높이가 증가됨을 알 수 있다. Fig.4와 Fig.5를 볼 때 이동속도가 증가할수록 입자의 크기는 작아지며 총 성장 시간이 동일하면 입자의 크기와 높이가 동일하다는 것을 알 수 있다. 즉 입자의 성장은 레이저에의 노출시간에 의존한다.

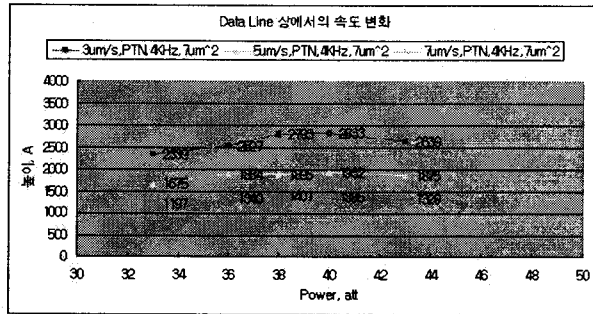


Fig.4 Height graph of the deposited micro tungsten patterns by direct writing with various scan speed

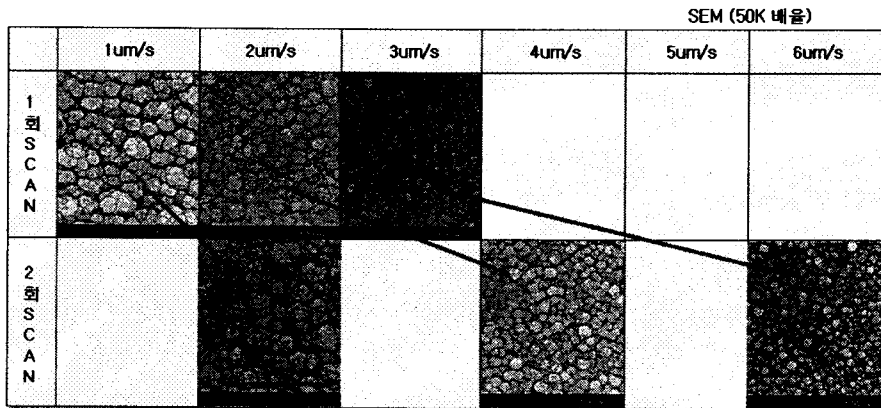
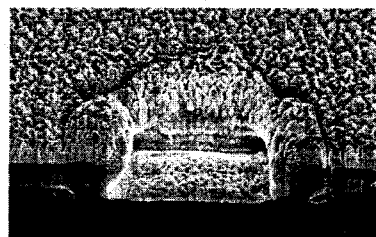
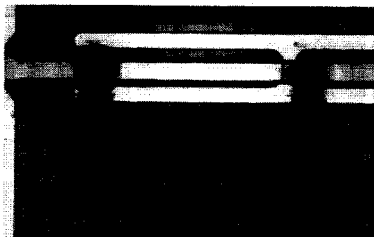


Fig.5 Grain size of the tungsten patterns with respect to scan number for scan speed
 상기의 결과에서 증착물 위나 증착물 주변에서 있는 알갱이들은 광반응에서 발생하는 현상이고, 레이저에 노출되는 시간에 의존하여 성장이 이루어지고 레이저 파워가 적정 파워를 넘어설 때 도랑(trench) 형상으로 반응되는 것은 열반응에 의한 현상으로 추정되며, 본 연구에서의 반응메커니즘은 광반응에 의한 분해와 핵(nucleation)이 형성되고 광반응과 열반응의 복합적인 메커니즘에 의해 성장(growth)이 이루어지는 것으로 추정된다.



(a)Microscope image and (b) FIB picture for contact hole

Fig.6 LCD repair on the LCD pattern glass

Fig.6은 실제 LCD pattern glass에서 텅스텐(tungsten)을 이용하여 repair를 실시한 이미지와 FIB(Forced Ion Beam) 단면형상을 나타낸다. 이는 실제 양산(mass production) 산업현장에 적용된 것과 같은 것이며, 접착력이 우수하고 전기적 저항도 $1\Omega \cdot \mu\text{m}$ 이하의 우수한 특성을 나타낸다.

	LCVD (line, hole) + Cut (hole)	LCVD (line)
50배율 가공 (접착)		
높이		

Fig.7 Image and height of the molybdenum patterns on the LCD pattern glass
(scan speed: $7\mu\text{m/s}$, scan number: 2)

Fig.7은 몰리브덴(Molybdenum)을 이용한 LCVD repair 결과에 대한 이미지이며, 증착 이송속도 $7\mu\text{m/s}$, 증착회수 2회의 조건으로 실험하였다. 텅스텐 증착과 비교할 때 동일한 이송속도와 증착회수에 대해 높은 증착높이를 얻을 수 있다. 양호한 형상, 접착력, 전기저항을 가지는 몰리브덴 증착물의 경우, 동일 높이로 증착된 텅스텐에 비해 높은 증착속도를 구현할 수 있다. Fig.8은 실제 양산에 적용된 것과 동일한 물질인 몰리브덴으로 증착시킨 회로 위에서의 패턴(Pattern)과 접촉구(contact hole)에서의 FIB 단면에 대한 이미지이며, 전체적으로 양호한 형상의 contact hole의 형성과 균일한 입자의 성장이 이루어졌다.

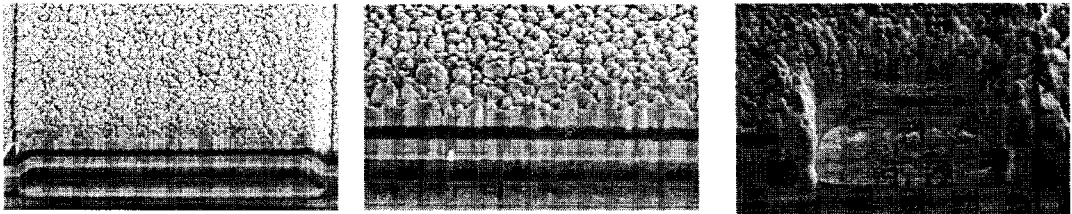


Fig.8 FIB pictures of the molybdenum patterns repaired on the LCD pattern glass
(scan speed: $7\mu\text{m/s}$, scan number: 2)

4. 결론

본 연구에서는 레이저 증착에 의한 미세 패턴 형성을 통해 TFT-LCD의 개방형 회로 결함을 보수하는 공정을 개발하였고, 개발 결과를 실제 양산을 위한 생산현장에 적용할 수 있는 장비로 구현하는 작업을 실시하였다. 실제 장비에의 응용을 위해 개방형 챔버를 사용하였고, 가스 흐름에 대한 시뮬레이션을 통해 챔버를 제작하였다. 증착물의 형상과 전기적 특성을 레이저 파워와 이송속도, 반응물질 등의 변화에 따라 조사하였고, 이에 의해 형상 및 특성을 조절이 가능하였다. 증착물의 형성에 대한 메커니즘은 광반응에 의한 증착 개시와 광반응과 열반응의

복합 반응에 의해 성장이 이루어지는 것으로 보인다. 이러한 결과를 통해 형상, 접착성, 전기적 특성 등에 있어 우수한 증착물을 생산할 수 있었고, Fig.9의 이미지에 나타난 실제 TFT-LCD 생산산업현장에 필요한 레이저 증착을 이용한 결함 수정 장비를 개발하였다.

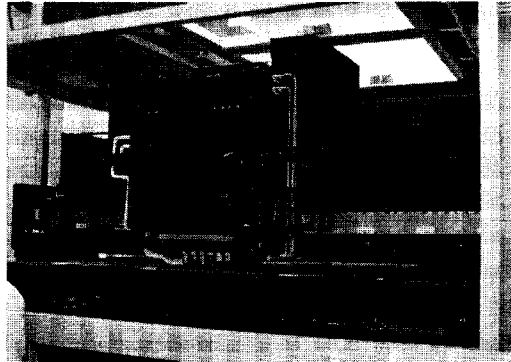


Fig.9 Picture of system for the mass production

5. 참고문헌

- [1] D. Bauerle, "Laser Processing and Chemistry" 2nd, Springer-Verlag, pp.337-393, 1995.
- [2] S.I.Han, S.H.Jeong, "Laser-assisted chemical vapor deposition to directly write three-dimensional microstructures", Journal of Laser Applications 16(3), pp.154-159, 2004.
- [3] Thomas H. Baum, Paul B Comita, "Laser-induced chemical vapor deposition of metals for microelectronics technology", Thin solid Films, Vol.218, pp.80-94, 1992.
- [4] K. Williams, J Maxwell, "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] K. L. Bjorklund, M. Boman, "Containerless fabrication of tungsten single crystals using laser CVD for field emission applications", Appl. Phys. A Vol 75. pp. 493-496, 2002.
- [6] Michel Meunier., Ricardo Izquierdo., Maleck Tabbal, Stephane Evoy., Patrick Desjardins., Marie-Helene Bernier., Joan Bertomeu., Nada Elyaagoubi., Marc Suys., Edward Sacher., Arthur yelon., "Laser induced deposition of tungsten and copper", Materials Science and Engineering B45 pp.200-207, 1997.
- [7] Kordas K., Remes J., Leppavuori S., Nanai L., " Laser-assisted selective deposition of nickel patterns on porous silicon substrates", Applied surface science, Vol 178, pp.93-97, 2001
- [8] H. H. Gilgen and R. M. Osgood, "Direct writing of metal conductors with near-uv light", Appl. Phys. B, Vol.42, pp.55-66, 1987
- [9] S. D. Allen, A. B. Tringubo, "Laser chemical vapor deposition of selective area Fe and W films", J. Appl. Phys, Vol. 54, No. 3, pp. 1641-1643, 1983
- [10] Y. Nambu, Y. Morishige, and S. Kishida, "High speed laser direct writing of tungsten conductors from W(CO)6", Appl. Phys. Lett. 56(25), pp.2581-2583, 1990.