

레이저를 이용한 차세대 평판 디스플레이 공정

김광열[†]

부산대학교, 하이브리드소재 솔루션 국가핵심 연구센터

Laser Microfabrications for Next-Generation Flat Panel Display

Kwang-Ryul Kim[†]

National Core Reserach Center for Hybrid Materials Solution,
Pusan National University, Busan 609-735, South Korea

(2007년 6월 28일 받음, 2007년 7월 11일 최종수정본 받음)

Abstract Since a pattern defects “repair” system using a diode pumped solid state laser for Flat Panel Display (FPD) was suggested, a lot of laser systems have been explored and developed for mass-production micro-fabrication process. A maskless lithography system using 405 nm violet laser and Digital Micromirror Device (DMD) has been developed for PDP and Liquid Crystal Display (LCD) Thin Film Transistor (TFT) photolithography process. In addition, a “Laser Direct Patterning” system for Indium Tin Oxide (ITO) for Plasma Display Panel(PDP) has been evaluated one of the best successful examples for laser application system which is applied for mass-production lines. The “heat” and “solvent” free laser microfabrications process will be widely used because the next-generation flat panel displays, Flexible Display and Organic Light Emitting Diode (OLED) should use plastic substrates and organic materials which are very difficult to process using traditional fabrication methods.

Key words Laser Direct Patterning, Maskless Lithography, Digital Micromirror Device(DMD), Flat Panel Display.

1. 서 론

반도체 및 MEMS 공정 기술의 발전 및 대형 평판 디스플레이(Flat Panel Display)의 수요증가에 따라 평판 디스플레이 공정 기술도 눈부시게 발전을 거듭하고 있다.¹⁾ 기존의 플라즈마 디스플레이 패널(Plasma Display Panel), 액정 디스플레이(Liquid Crystal Display)와 더불어 전자 종이(E-paper), 플렉시블 디스플레이(Flexible Display), 레이저 디스플레이(Laser Display) 등 차세대급 디스플레이 디바이스(Device)의 연구가 활발히 진행되고 있으며 이를 구현하기 위한 공정 개발의 노력도 계속되고 있다.²⁻⁵⁾ 평판 디스플레이 공정은 기존의 공정과 마찬가지로 세정, 감광물질 도포, 노광, 현상, 식각, 감광 물질 제거 등의 과정으로 원하는 배선 및 패턴을 형성하고 있으나, 공정 수를 줄이거나 노광 공정 시 포토마스크를 없애는 등의 공정원가 절감 노력이 계속되고 있다.⁶⁻¹⁰⁾ 예를 들면, 액정 디스플레이 컬러 필터(Color Filter) 공정에 잉크젯 프린팅 방법 또는 롤 프린팅 방법을 이용하는 등 직접 패터닝(Direct Patterning) 공정법들이 개발되고 있으며 특

히 적외선 레이저를 이용한 플라즈마 디스플레이의 투명 전극(Indium Tin Oxide) 직접 패터닝 법은 기존 다섯 가지 공정을 단 한가지로 줄이는 효과를 나타내고 있다.

초정밀 레이저 기술은 지난 30여 년간 꾸준히 발달되어 왔으며 레이저 용접 및 절단 등에 사용되면서 그 수요가 점점 증대 되었으나 상대적으로 고가의 장비 가격, 열에 의한 표면 손상 및 깨끗하지 않은 가공면 등 문제점으로 산업 전반에 걸쳐 폭 넓게 사용되지 못하고 일부에만 이용이 되고 있었다. 그러나 약 10 여년 전부터 사용되기 시작한 반도체 마킹용 레이저 장비를 필두로 IT 산업 전반에 걸쳐 주목을 받기 시작하면서 많은 발전을 이루었다. 특히 일본의 한 업체에서 평판 디스플레이 패턴 공정상의 오류에 의해 발생한 결함을 수정(Repair) 할 수 있는 레이저 결함 수정 장비를 개발하면서 레이저가 많은 주목을 받으며 IT 산업의 전방에 나서게 되었다. 그 후 다양한 종류의 패턴 결함 수정 장비가 개발되었고 액정 디스플레이(LCD) 박막 트랜지스터(TFT) 공정용 저온 폴리실리콘(Low Temperature Poly Silicon) 장비를 비롯하여 대형 및 고가의 레이저 공정 장비가 활발히 개발되었다. 특히 2006년 LG전자의 플라즈마 디스플레이용 투명전극(Indium Tin Oxide) 레이저 직접 패터닝(Laser

[†]Corresponding author
E-Mail : drkkim@pusan.ac.kr (K. - R. Kim)

Direct Patterning) 공정용 장비는 세계 레이저의 역사를 새로 쓰게 되는 계기를 마련하였다.²¹⁾

본 논문은 레이저와 재료간의 상호 작용을 고려하여 가공능력이 우수한 레이저 미세 가공에 대해 소개하고, 차세대 디스플레이 공정에서 유용하게 이용될 수 있는 레이저를 이용한 마스크리스 노광 및 레이저 직접 패터닝법에 대해 자세히 기술하고자 한다. 또한 차세대 플라스틱 기판을 이용한 디스플레이 공정에 있어서 필수 불가결한 엑시머 레이저를 이용한 건식 패터닝 방법에 대해서도 논의하고자 한다.

2. FPD 공정에서의 레이저 이용

2.1 고체 레이저를 이용한 FPD 공정

기존에 아르프등을 이용하여 에너지 펌핑을 했던 레이저에 비해 다이오드를 에너지 펌핑에 이용한 다이오드 펌핑 고체 레이저(Diode Pumped Solid State Laser)는 레이저의 빔 품질이 좋아서 미세 가공용으로 많이 이용되고 있다. 또한 레이저의 파장이 짧을 경우 열 영향을 적게 받아서 상대적으로 깨끗한 가공 표면을 얻을 수가 있으므로 주파수를 두배 또는 세배, 즉 파장을 기존 1064 nm 를 1/2 또는 1/3 로 줄여서 이용하고 있다. 대표적으로 사용되는 레이저로는 Nd:YLF 레이저, Nd:YAG 레이저, Nd:YVO4 레이저 등으로 포토마스크의 수정(Repair), 평판 디스플레이 패턴 결함 수정(리페어) 등에 사용된다. 또한 기존 반도체 마킹기와 유사한 형태로, 유리기판을 가공할 수 있는 고체 UV 레이저와 스캐너를 이용하여 PDP 공정 중 각 판넬에 ID(Identification)를 표시하는 ID 마킹 장비가 있다. 반도체 마킹 장비가 패키징 후 칩 위에 ID를 마킹 하는 반면 PDP의 경우에는 Fig. 1과 같이 유리기판 내부에 마킹을 한다. 이로 인해 마킹면 오염에 대한 걱정이 없고 표면에 레이저를 조사했을 시 발생가능한 크랙을 예방할 수 있다. 이러한 양산 공정 역시 고출력의 고체 UV 레이저가 개발됨으로 인해 가능해졌다. 평판 디스플레이 공정에서 고체레이저

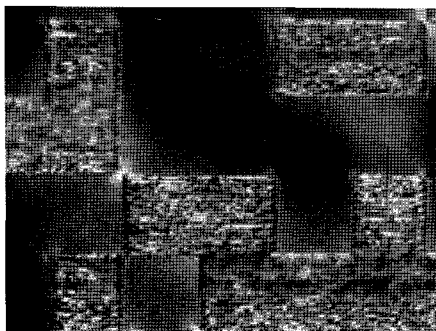


Fig. 1. PDP inside glass laser marking.

를 이용한 또 하나의 대표적인 예는 FPD 패턴 결함 수정기(Repair) 장치이다. FPD 패널의 배선 공정 후 쇼트(Short) 결함은, 532 nm 파장을 갖는 고체 그린(Green) 레이저 등으로 쇼트가 난 부분을 레이저 어블레이션(ablation) 현상을 이용해 제거해 준다. 또한 패턴 오픈(open) 결함이 발생한 부분은 페이스트 레플리카(Paste Replica)와 레이저 경화(Curing) 또는 레이저를 이용한 금속막의 CVD 기법등을 이용하여 수정이 가능하다. 레이저 패턴 결함 수정기는 배선 오픈과 쇼트 결함 이외에도 핀홀(Pin Hole) 등 기존에 완벽하게 수정하지 못했던 부분들까지 그 영역을 넓혀가고 있다.

2.2 기체 레이저를 이용한 FPD 공정

기체 레이저 중 대표적인 것들로 CO₂ 레이저와 엑시머 레이저를 들 수 있다. 특히 고출력의 CO₂ 레이저는 기존에는 금속의 용접 및 절단 등에 사용되었는데 최근에 평판 디스플레이용 유리기판을 절단하는데 이용되면서 그 가치를 더욱 높이고 있다. 금속 절단은 레이저로 직접 이루어지는 반면, 레이저를 이용한 유리기판 절단은 다음과 같은 과정을 거친다. 평판 디스플레이용 유리는 소다라임(Sodalime) 또는 보로실리케이트(Borosilicate)등을 주로 사용하는데 초점을 맞춘 CO₂ 레이저를 이용하여 유리기판을 국부적으로 가열하고 레이저 빔 바로 뒤에 액체 또는 기체 냉각제를 이용하여 급격하게 냉각시킴으로써 열 충격(Thermal Shock)을 발생시킨다. 이상의 과정으로 블라인드 크랙(Blind Crack)을 형성시킨 후 브레이킹(Breaking) 공정을 통해 절단을 시킨다.¹¹⁾ 레이저를 이용한 유리기판의 절단은 기존의 다이아몬드 휠을 이용하였을 경우보다 절단면이 깨끗하고 유리 부스러기를 발생시키지 않는 장점이 있다. 또한 현재의 LCD 유리기판이 점점 얇아지는 경향이 있는데 이 경우 레이저를 이용한 절단 방법은 더욱 더 유용할 것으로 생각된다. 엑시머 레이저는 157 nm 파장의 F₂ 레이저, 193 nm 파장의 ArF, 248 nm 의 KrF 레이저 그리고 308 nm 파장의 XeCl 레이저까지 다양하게 산업 전반에 이용이 되고 있다. 특히 KrF 와 ArF 레이저의 경우에는 나노미터의 미세 선폭을 형성하기 위한 반도체 노광 장비의 노광 소스로 주로 이용이 되고 있으며 KrF 의 경우 폴리머 재료의 가공 능력이 우수하기 때문에 잉크젯 프린트 헤드의 노즐부를 가공하거나 유기 EL 등에 사용되는 유기 박막의 패터닝 장비에 이용이 되고 있다.¹²⁾

가장 짧은 파장을 갖는 F₂ 레이저의 경우 기존의 ArF 노광소스를 대체하여 반도체 45 nm 공정 이하에 적용가능성을 검토하고 있다. 엑시머 레이저 중에서 현재 가장 평판 디스플레이 공정에 많이 응용되고 있는 레이저는 308 nm 의 파장을 갖는 XeCl 레이저이다. 이 레이저는 LCD 박막 트랜지스터 TFT(Thin Film Resistor) 공정 중

비정질 실리콘(a-Si)을 다결정 실리콘(p-Si)으로 변화시킬 수 있는 LTPS(Low Temperature Poly Silicon) 공정에 주로 이용이 되고 있다.¹³⁾ 폴리실리콘 박막 트랜지스터의 경우 비정질 실리콘의 경우보다 높은 전자 이동도를 실현할 수 있는 장점이 있다. 이러한 특성을 이용하여 액정 디스플레이 기판에 화소와 구동회로를 함께 제작할 수 있게 됨으로써 생산성과 신뢰성이 크게 향상될 수 있게 되었다. Fig. 2의 샘플들은 한국의 코닉 시스템의 협조를 얻어 제작했으며, 308 nm XeCl 엑시머 레이저를 라인빔 형태로 만들어서 스캐닝 하면서 에너지를 조사하는 방법을 통해 만들어진 것이다.²²⁾ 현재 LTPS의 90% 이상이 엑시머 레이저를 이용하여 만들어지고 있다.

2.3 반도체 레이저를 이용한 FPD 공정

장치 자체의 크기가 작고 소비전력이 적으며 고품질과 고출력을 제공할 수 있는 반도체 레이저를 이용한 디스플레이는 R(Red), G(Green), B(Blue) 레이저 자체를 광원으로 이용하는 레이저 디스플레이에 이용되면서 그 수요가 폭발적으로 증가할 것으로 예상된다. 레이저 디스플레이에 광원으로 사용되는 레이저 이외에 405 nm 보라색 레이저는 차세대 평판 디스플레이 공정에 이용되는 마스크리스 노광기의 노광 소스로 활용되고 있다.¹⁰⁾ 또한 808 nm의 열 영역의 파장 대를 갖는 레이저는 대형 유기EL의 Black Matrix와 R, G, B 패터닝 공정에 사용되는 레이저 열 전사법(Laser Induced Thermal Imaging)에 이용되고 있으며 평판 디스플레이의 유리기판 합착 공정에도 이용 가능성이 연구되고 있다. 또한 저가의 고출력 반도체 레이저가 계속 개발됨에 따라 기존의 고체 및 기체 레이저가 반도체 레이저로 많이 대체되리라 예상된다.

3. 레이저를 이용한 차세대 FPD 공정

3.1 레이저 마스크리스 노광법

반도체 및 평판 디스플레이용 포토마스크는 제작에 많

은 시간이 걸릴 뿐 아니라 단순 소모품으로 공정상 많은 비용이 소요된다. 특히 평판 디스플레이의 차세대 라인들이 초대형 유리기판을 지향하고 있어서 공정 비용 절감이 요구되고 있다. 포토마스크를 사용하지 않고 노광을 하는 마스크리스 노광 공정은 노광원으로 405 nm 보라색(Violet) 레이저 다이오드를 사용한다. 레이저는 기존의 노광램프에 비해 직진성이 좋아서 마스크리스 노광 광학 엔진의 조명부를 작게 만들 수 있으며 노광 시 발생할 수 있는 노광 패턴 얼룩(Mura) 등을 제어하는데 매우 유리하다. 마스크리스 노광 장치의 핵심은 405 nm 레이저 조명부 및 DMD(Digital Micromirror Device)를 포함한 광학 엔진부, 그리고 엔진내부의 DMD의 이미지를 빠르고 정확하게 제어할 수 있는 이미지 프로세싱 보드 그리고 스마트하게 이들을 통합하여 복잡한 포토마스크 패턴등을 구현할 수 있는 이미지 제어 소프트웨어라 할 수 있다. 물론 나노 정밀도의 스테이지 기술도 정밀 스캐닝법 노광에 얼룩을 만들지 않게 하기 위한 필수불가결한 구성요소라 하겠다. 마스크리스 노광법의 시스템 개략 구성은 다음의 Fig. 3과 같다.

405 nm 레이저로부터 광 파이버를 통해 이송된 레이저 에너지는 광학엔진 내부로 들어가서 DMD에 균일하게 투사되어 조명부로서의 역할을 한다. 이미 DMD에 만들어진 노광용 패턴은 조명부에서 조사된 레이저 빛에 반사되어 대상물 표면으로 투사된다. 일반적으로 노광은 DMD이미지 프레임이 고속으로 움직이고 이에 따라 스테이지도 동기화되어 같이 움직이는 방식으로 진행된다. 패턴용 DMD의 이미지 프레임의 속도에 따라 노광의 속도가 결정 되기 때문에 이 속도를 높여려는 노력이 계속되고 있다. 마스크리스 노광은 기존의 노광 공정은 다르게 노광원의 파장을 365 nm 파장의 I line이나 436 nm 파장의 G line을 쓰지 않고 405 nm 근방의 레이저 파장을 이용한다. 또한 기존의 노광은 포토마스크 등 원하는 패턴이 만들어져 있는 마스크를 사용하여 패턴을 하는 반면에 마스크리스 노광법은 DMD를 이용하여 노광하고자 하는 패턴을 형성하고 이를 광학엔진 내부의 프

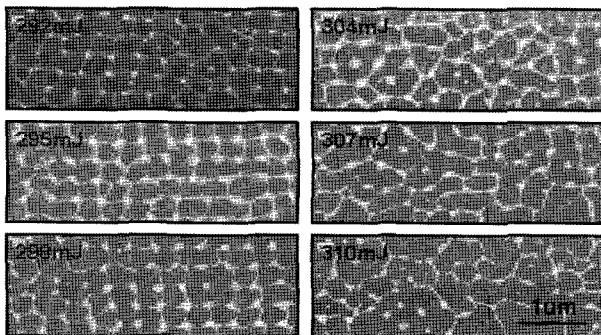


Fig. 2. Poly-silicon sample using LTPS process.

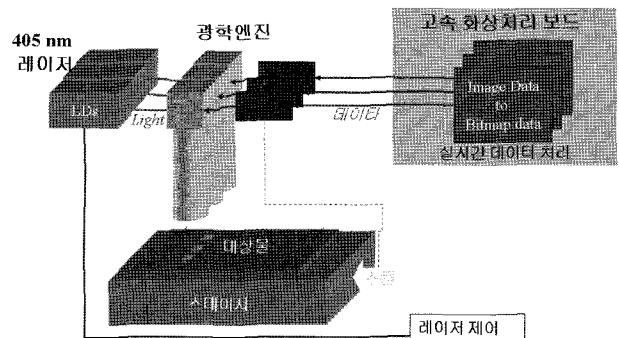


Fig. 3. System Configurations for Maskless Lithography.

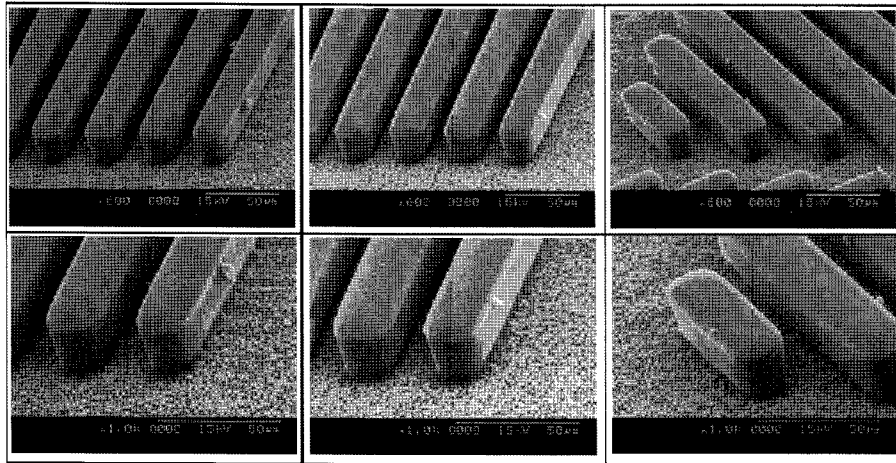


Fig. 4. Line/Space 20 μm DER Test Pattern.

로젝션 렌즈를 이용하여 대상물 표면에 투사시킨다.

이 방법을 이용하면 이론적으로는 노광이 필요한 모든 어플리케이션(Application)에 적용이 가능하다. 하지만 광학엔진 제작 및 고속 이미지 프로세스 보드의 경제적인 요인과 광학적 한계를 생각하면 Line & Space 5 μm 이상이 일반적인 것으로 판단된다. 위의 Fig. 4는 구리 플레이트 위에 두께 20 μm 감광 필름(Dry Film Resist)을 열과 압력으로 적층(Lamination) 하고 이를 마스크리스 노광법으로 패터닝한 결과이다. 패턴은 Line & Space 20 μm 짜리를 이용했으며, 보는 바와 같이 아주 깨끗한 패턴이 만들어졌다. 405 nm의 파장대를 이용하면서 고속 노광 요구 특성상 감광 필름의 감도가 아주 높은 특수한 감광 필름을 이용했다. 405 nm 감광 필름 또는 감광액(Photoresist)은 이미 몇몇 일본 업체는 물론 국내 업체들에서도 개발되어 양산에도 적용되고 있다. 이러한 마스크리스 노광법은 국내의 PDP 양산에 적용된 바가 있으며 일본에서는 반도체 패키징용 PCB의 노광에 이용이 되고 있다.

3.2 레이저 직접 패터닝 법

레이저 직접 패터닝법은 E-Beam 등을 이용해서 포토 마스크 위에 직접 그리는 방법을 포함한다.¹⁴⁻¹⁶⁾ 주로 저속에서 프로토(Proto) 타입의 패터닝 또는 마스크제작에 주로 이용이 되었으나 최근에는 고출력 레이저의 등장으로 양산적용도 가능하게 되었다. 현재 평판 디스플레이용 초대형 포토마스크를 제작하는 데에는 AOM(Acousto Optic Modulator)와 AOD(Acousto Optic Deflector) 그리고 413 nm 부근 파장대의 레이저를 이용하고 있고 차세대 제품으로 DMD와 레이저를 이용하여 패턴을 제작하는 기술이 테스트되고 있다. 레이저 직접 패터닝법도 마스크리스 방법을 이용하고 있으며 포토마스크 비용을 절감하고 공정수를 줄이는데 많은 공헌을 하고 있다. 특

히 PDP의 ITO 전극은 상판 유리기판에 바로 도포되어 있어서 고출력 레이저를 이용하여 패터닝하기에 매우 적당한 대상물이라 할 수 있다. Fig. 5는 고출력 적외선 레이저를 이용한 투명 전극(ITO) 직접 패터닝을 위한 시스템의 구성도 예이다. 400~800 W 급의 고출력 적외선 레이저를 투명 전극막 제거(Ablation) 에너지원으로 이용하고 광균질기(Homogenizer)등 다양한 광학계를 이용하여 가우시안(Gaussian) 형태의 레이저 빔을 사각형태의 에너지가 균일한 빔으로 만들어서 이를 PDP TV의 투명 전극 패턴 형태를 만들어 줄 수 있는 픽셀 마스크를 통과시켜서 반복된 형태의 패턴을 만들어 준다. 이를 초정밀 스캐너를 이용하여 빠른 속도로 PDP 유리기판에 스캐닝하면서 패터닝 작업을 한다. 물론 모든 PDP 회사들이 Fig. 5의 방법을 똑같이 이용하고 있지는 않지만 기본적으로는 비슷한 형태의 시스템을 이용하고 있다. 그러나 이러한 패터닝 원리를 액정 디스플레이 또는 차세대 유기 EL 및 플렉시블 디스플레이에 응용하기는 스캐너의 기계적 정밀도 등을 고려할 때 적당하지 않다. 또한 적외선 레이저는 유기박막의 패터닝에 적합하지 않기 때문에 좀더 파장이 짧은 레이저를 이용할 필요가 있다.

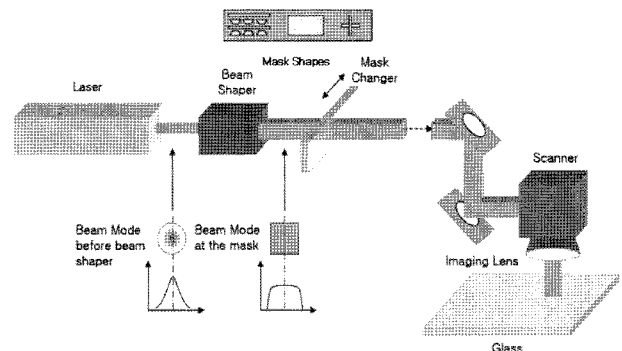


Fig. 5. System Configurations for ITO Direct Patterning.

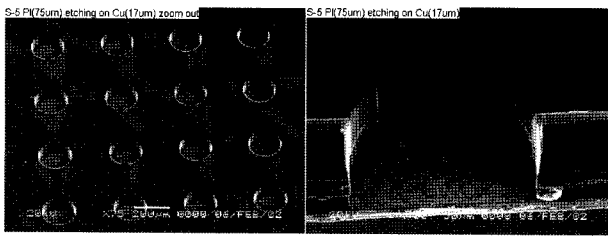


Fig. 6. Polymer Microfabrications using Excimer Laser.



Fig. 7. PR Laser Direct Patterning Sample using Excimer Laser (L/S = 5 μm).

Fig. 6에서 보는 바와 같이 엑시머 레이저를 이용하면 대부분의 유기 재료를 깨끗하게 패터닝을 할 수 있다.¹⁷⁻¹⁹⁾

위와 같은 테스트들은 MEMS 공정을 위해 많이 개발되었고 이를 평판 디스플레이 공정에 이용하면 많은 이점이 있으리라 생각된다. 차세대 디스플레이 중 가장 핵심으로 떠오르고 있는 플렉시블 디스플레이는 유리기판 대신 플라스틱 기판을 이용한다. 이러한 기판은 잘 휘어지는 특성을 가지는 대신 공정 정밀도상 유리 기판에 비해 많은 새로운 문제를 야기시킬 수 있다.²⁰⁾ 특히 플라스틱 기판은 열과 솔벤트에 약하기 때문에 기판의 변형으로 인해 공정상 어려움을 겪을 수 있다. 현재는 유리 기판에 플라스틱 기판을 접착시켜 공정을 진행 시킨 후 맨 마지막에 유리기판에서 떼어내는 방법으로 플렉시블 디스플레이를 제작하고 있지만 레이저를 이용한 직접 패터닝법을 이용하면 롤(Roll) 상의 플라스틱 기판에 직접 패터닝이 가능하게 되어 양산성이 우수해지리라 판단된다. 또한 엑시머 레이저는 유기 EL 등 유기 박막의 패터닝에도 사용될 수 있다. 이를 구현하기 위해 안정된 파워를 제공하는 엑시머 레이저 이외에 균일한 레이저 빔을 만들어 줄 수 있는 광학계와 미세 패턴들을 정확하게 패터닝하기 위한 초정밀 스테이지 등이 필요하다. Fig. 7은 248 nm 파장의 KrF 엑시머 레이저와 초정밀 시스템을 이용하여 L/S 5 μm 패터닝을 구현한 샘플이다. 하부는 금속막이며 상부는 감광성 PR 이 매우 얇게 도포

되어 있다. 레이저 패터닝시 발생가능한 오염물질 제거는 주로 흡입(suction) 이나 불어내는(Blow-up) 장치를 달아서 최소화 시킬 수 있다. 차세대 디스플레이 공정 중 유기막을 사용하는 경우 직접 패터닝법은 매우 유용한 미래 공정으로 이용될 수 있으며 반도체 또는 금속 박막의 미세 패터닝에도 레이저는 유용하게 사용될 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 레이저 패턴 결함 수정기(Repair)와 저온 폴리실리콘 공정 등 평판 디스플레이 공정에 혁신을 가져온 레이저를 이용한 기술에 대해 고찰하였다. 평판 디스플레이에의 레이저응용은 레이저 기술 및 공정 기술의 급격한 발전을 가져왔고 공정원가 절감에 크게 공헌하였다. 차세대 디스플레이는 FED(Field Emission Display)와 같이 현재의 PDP 나 LCD에 비해 월등한 성능을 자랑하는 기술이 채택되고 유기 EL 또는 유기TFT 기술을 이용한 롤 형태(Roll Type)의 플렉시블 디스플레이(Flexible Display)가 주류가 되리라 생각된다. 이러한 미래의 공정을 예측하여 공정원가를 줄이기 위해 레이저를 이용한 마스크리스 노광 및 직접 패터닝 방법이 개발되고 있으며, 향후 양산에 이용 가능한 주요 기술을 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 레이저와 DMD를 이용한 레이저 마스크리스 노광 기술은 고가의 대형 FPD포토마스크 비용을 줄이고자 개발되고 있다. 향후 PDP 5세대 또는 LCD 9세대에서는 초대형의 유리기판이 사용될 것이고, PDP의 경우 하판의 감광성 격벽 공정에, 그리고LCD의 경우 박막트랜지스터 공정에 이 기술이 적용될 경우 뛰어난 공정 비용 절감 효과를 얻을 수 있으리라 예상된다. 이미 본문에서 제시한 바와 같이 L/S 20 μm의 깨끗한 노광 결과를 얻었고 조만간 삼성과 LG의 차세대 FPD 양산 공정에 적용되리라 판단된다.

2. 엑시머 레이저를 이용한 레이저 직접 패터닝 공정은 유기 EL이나 유기물을 이용한 플렉시블 디스플레이의 공정 중 유기 박막의 정밀한 직접 패터닝을 위해 개발되고 있다. 이는 차세대 플렉시블 공정이 플라스틱 기판에서 행해짐에 따라 열과 솔벤트(Solvent)에 약한 기존 공정을 대체하고 롤(Roll) 공정에 적용하여 양산성을 높이기 위함이다. 현재 L/S 5 μm 이내의 미세 패터닝 기술이 개발되었고 향후 플렉시블 디스플레이의 양산 공정에 필연적인 기술로 이용되리라 생각된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터 사업(R15-2006-022-01001-0)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. S. T. Kim, Proceedings of IMID/IDMC, Keynote Address (2006).
2. S. H. Kwon, S. G. Lee, W. K. Cho, B. G. Ruy, B. M. Song, Proceedings of Society of Information Display, 1838 (2006).
3. A. Suzuki, Proceedings of IMID/IDMC, 521 (2006).
4. G. Niven, A. Mooradian, Proceedings of Society of Information Display, 1904 (2006).
5. A. Kahn, I. Shiyankovskaya, T. Schneider, J. W. Doane, Proceedings of Society of Information Display, 1728 (2006).
6. T. R. Groves, D. Pickard, B. Rafferty, N. Crosland, D. Adam, G. Schubert, Microelectronic Engineering, **61**, 28 (2002).
7. K. Chan, Z. Feng, R. Yang, W. Mei, Proceedings of SPIE, **4985**, 37 (2003).
8. R. F. Pease, Microelectronic Engineering, **78**, 381 (2005).
9. C. Liu, X. Guo, F. Gao, B. Luo, X. Duan, J. Du, C. Qiu, Proceedings of SPIE, 5645, 307 (2005).
10. K. R. Kim, I.T. Park, H. W. Kim, Y. W. Lee, C. H. Cho, H. S. Kang, S. K. Hong, S. B. Lee, Proceedings of ICALEO, M807 (2005).
11. O. Streit, Proceedings of IMID/IDMC, 337 (2006).
12. K. R. Kim, S. C. Ko, H. K. Park, Korean Society for Precision Engineering Spring Conference, 932 (2002).
13. L. Herbs, R. Paetzel, F. Simon, B. Fechner, Proceedings of IMID/IDMC, 540 (2006).
14. B. J. Grenon, H. C. Hamaker, P. D. Buck, Microelectronic Engineering, **27**, 225 (1995).
15. S. Harry, Microelectronic Engineering, **35**, 177 (1997).
16. K. Peng, F. Zhang, G. Wu, W. Gu, X. Sun, N. Kang, Q. Pu, Z. Ding, Microelectronic Engineering, **61**, 277 (2002).
17. E. C. Harvey, P. T. Rumsby, Proceedings of SPIE, **3223**, 2332 (1997).
18. N. H. Rizvi, SPIE Conference on Design, Test and Microfabrication of MEMS and MOEMS, **3680**, 546 (1999).
19. K. Callewaert, Y. Martele, L. Breban, K. Naessens, P. Vandaele, R. Baets, G. Geuskens, E. Schacht, Applied Surface Science, 208 (2003).
20. L. Zhou, A. Wanga, S. C. Wu, J. Sun, S. Park, T. N. Jackson, Appl. Phys. Lett., **88**, 083502 (2006).
21. K. R. Kim, H. S. Kang, H. K. Hong, Korean Information Display Society Workshop for Next Generation FPD Manufacturing Systems, Invited (2005).
22. D. H. Kim and D. J. Kim, Proceedings of IMID/IDMC, 647 (2006).