

레이저 직접표화법을 이용한 미세패턴 전도성 향상에 관한 연구

이봉구
영남이공대학교 기계계열

Improvement of Conductive Micro-pattern Fabrication using a LIFT Process

Bong-Gu Lee

Division of Mechanical Engineering, Yeungnam University College

요약 본 논문에서는 레이저 유도증착 공정을 사용하여 절연기판위에 미세패턴의 전도성 향상시켰다. 기존의 레이저 유도 증착의 공정에서 발생하는 높은 레이저빔 에너지로 인하여, 미세패턴의 낮은 증착밀도, 산화와 같은 문제점이 있다. 이러한 문제점을 폴리머 코팅층을 사용하여 증착정밀도와 전도성 향상하였다. 실리콘 웨이퍼 위에 미세패턴 증착을 위해서 크롬, 구리를 사용하였다. 본 연구에서는 다중펄스 방식의 레이저 빔을 금속박막에 조사하여 절연기판(insulating substrate: SiO₂) 위에 시드 층을 형성하고, 형성된 시드 층위에 무전해 도금을 적용하여 미세패턴 및 구조물을 제작하는 복합공정기술을 개발 하였다. 레이저빔의 다중 스캔방식으로 조사함으로써 레이저빔의 에너지가 증착 층의 증착밀도와 표면품위를 향상시키고, 미세전극 패턴으로 사용가능한 전기 전도성을 갖게 되었음 알 수 있었다. 레이저 직접표화법과 무전해 도금을 적용한 복합공정을 이용하여 미세전극을 증착 한 후 비저항을 측정한 결과 도금 전 저항이 6.4Ω, 도금 후의 저항이 2.6Ω으로 미세전극 패턴의 표면조각이 균일하고 증착되었다. 표면조각이 균일하고 치밀하게 증착되었기 때문에 전기 전도도가 약 3배정도 향상 되었다.

Abstract In this paper, the conductivity of the fine pattern is improved in the insulating substrate by laser-induced forward transfer (LIFT) process. The high laser beam energy generated in conventional laser induced deposition processes induces problems such as low deposition density and oxidation of micro-patterns. These problems were improved by using a polymer coating layer for improved deposition accuracy and conductivity. Chromium and copper were used to deposit micro-patterns on silicon wafers. A multi-pulse laser beam was irradiated on a metal thin film to form a seed layer on an insulating substrate(SiO₂) and electroless plating was applied on the seed layer to form a micro-pattern and structure. Irradiating the laser beam with multiple scanning method revealed that the energy of the laser beam improved the deposition density and the surface quality of the deposition layer and that the electric conductivity can be used as the microelectrode pattern. Measuring the resistivity after depositing the microelectrode by using the laser direct drawing method and electroless plating indicated that the resistivity of the microelectrode pattern was 6.4Ω, the resistance after plating was 2.6Ω, and the surface texture of the microelectrode pattern was uniformly deposited. Because the surface texture was uniform and densely deposited, the electrical conductivity was improved about three fold

Keywords : Additive process, electrical conductivity, Laser Induced Forward Transfer, Laser Direct Writing, Microdeposition, Micro-pattern,

본 논문은 2015학년도 영남이공대학교 연구조성비(과제번호:20152106)의 지원에 의한 것임.

*Corresponding Author : Bong-Gu Lee(Yeungnam University College)

Tel: +82-53-650-9212 email: positive@ync.ac.kr

Received January 20, 2017

Revised (1st March 30, 2017, 2nd April 3, 2017)

Accepted May 12, 2017

Published May 31, 2017

1. 서론

첨단산업의 발전과 더불어 전자부품의 극소화, 고성능화 그리고 집적화 추세가 확대되면서 이를 위한 고집적, 고정밀도의 가공기술이 요구되면서 미세패터닝 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2]. 현재 미세패턴 제조기술로 사용되고 있는 기술은 반도체공정을 기반으로 한 리소그래피 공정이지만 마스크 제작공정이 필요하기 때문에 시제품 혹은 다품종 소량 생산시 경제성에 문제점이 있다. 따라서 마스크 없이 레이저유도 증착(LIFT; Laser Induced Forward Transfer)을 이용하여 재료 표면에 미세패턴을 제조하는 기술이 제안되고 있다[3,4]. 현재 미세패턴 제조기술로 사용되고 있는 대표적인 방법으로 사진식각(photolithography) 기술과 스크린프린팅(screen printing)의 기술이 활용되고 있다. 이러한 기존의 공정들은 제품형상의 마스크를 사용하는 방법이기 때문에 다품종 소량생산, 시제품 개발에는 유연하게 대처할 수 있는 공정기술이 아니다. 따라서 시제품 및 다품종 소량생산을 하기 위해서는 별도의 마스크 제작공정이 요구되기 때문에 제작비가 높아지는 단점을 가지고 있다. 미세 패턴 제조 기술은 회로 제작기술, 기계부품의 미세 가공, 전자부품의 제조, 전도성 회로제작 등에 활용되고 있는 기술로서 공정의 종류에 따라 크게 제거공정(Subtractive), 적층공정(Additive) 그리고 복합공정(hybrid process)로 구분된다. 제거공정은 기판 표면에 전도성 박막을 미리 증착 한 후 필요하지 않는 부분만 제거하여 원하는 패턴을 제작하는 공정이다. 적층공정은 선택적으로 필요한 부분에만 전도층을 제작하는 공정으로써 제거공정과 비교하여 높은 공정의 유연성, 공정단계별 재료의 절감 등 많은 장점이 있는 공정으로 알려져 있으나, 국부적으로 필요로 하는 패턴을 형성하는 방법이기 때문에 대량생산에는 적합하지 못하고 다품종 소량생산 및 시제품 제작에 적용할 수 있는 공정이라 할 수 있다. 복합 공정(Hybride process)는 기판 전체에 전도층을 도포하고 전도층 위에 포토리소그래피 공정과 전해도금공정으로 패턴을 형성한 후에, 불필요한 금속 층을 에칭공정으로 제거하게 된다. 스크린 프린팅(screen printing) 공정은 100 μ m 이하의 선폭을 제작하는데 현재 기술적 어려움이 있고, 사진식각 공정은 서브 마이크로미터(sub-micrometer) 이하의 최소 선폭을 가지는 패턴을 제작 할 수 있으나, 패턴 형상 제작에 별도의 마스크

를 제작해야 되므로 공정의 유연성이 떨어지고, 소량생산에는 경제성이 낮다[5]. 이러한 기술적 문제점을 해결하기 위해서 반도체 및 정밀가공 분야에서는 레이저 직접 묘화법(Laser Direct Writing Method)을 이용한 미세패턴 기술을 적용하고 있다. 특히 레이저를 이용한 유도증착기술은 다품종 소량생산 그리고 시제품 제작에 유연성 있게 적용할 수 있는 대체 기술로서 활용도가 크게 기대된다. 그러나 기존의 LIFT공정은 레이저빔 에너지에 의해 기화되면서 증착 되는 공정이기 때문에, 증착된 미세패턴조직의 증착 밀도가 낮고 형상 정밀도가 떨어지고, 증착된 재료는 쉽게 산화 및 오염되기 쉬운 단점이 있다[6].

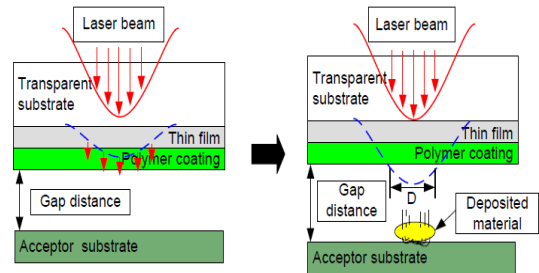


Fig. 1. LIFT process using polymer coating layer

현재까지 연구들은 대부분은 단펄스 레이저에 의한 시드패턴 형성에 관한 연구로 증착된 미세패턴은 실용화에 필요한 전도성을 갖지 못하며 다중펄스 방식에 의한 미세패턴 형성과 증착된 미세패턴의 전도성 향상과 형상정밀도 향상을 위한 레이저 복합공정 기술의 연구사례는 아직 미미한 실정이다. Fig.1은 폴리머 코팅층을 이용한 레이저 유도증착 직접묘화법 공정을 나타내었다. 본 연구에서는 다중펄스 방식의 레이저 빔을 금속박막에 조사하여 절연기판(insulating substrate: SiO₂) 위에 시드 층을 형성하고, 형성된 시드 층위에 폴리머 코팅을 하여 미세패턴 및 구조물을 제작하는 공정기술의 개발에 중점을 두었다. 다중펄스 방식으로 형성된 미세패턴의 시드 층은 증착밀도와 형상정밀도, 전기전도도를 향상을 시키는 새로운 복합공정을 개발하였다. 모든 실험은 고가의 진공장치가 필요 없는 대기 중에서 수행하였으며, 레이저 공정 변수들이 시드패턴 형성과 미치는 영향과 형성된 미세 전도성 패턴의 표면특성을 관찰하였다.

2. 전도성 미세패턴 공정

미세 패턴 제작공정은 한층, 한층(layer by layer)조사되는 멀티스캔 방식으로 레이저 빔을 금속박막에 조사하여 수용기판(acceptor substrate)위에 시드 층을 형성하는 미세패턴제작 방식으로 멀티스캔방식과 폴리머 코팅층을 이용하여 증착밀도를 증가하고 전기 전도도를 확보하였다.

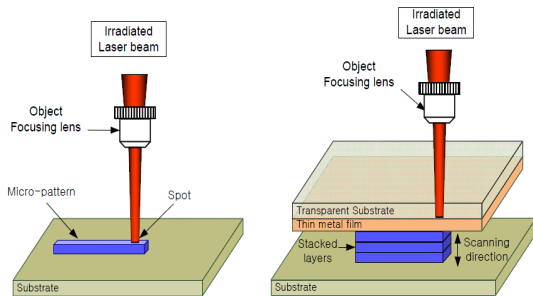
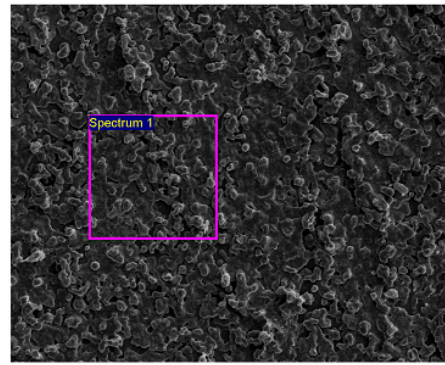
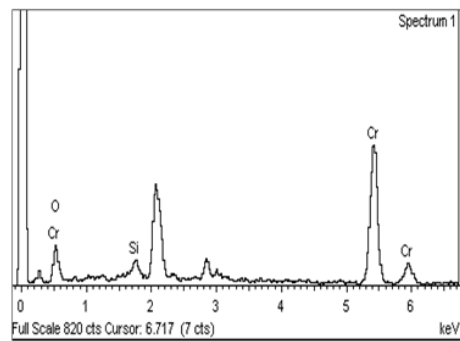


Fig. 2. Micro-pattern process using LIFT

Fig.2는 폴리머 코팅층과 LIFT 공정을 이용하여 미세패턴을 제조하는 공정을 도식적으로 보여주고 있다. 미세패턴을 제조하는 LIFT 공정은 집속된 레이저 빔이 투명기판을 투과하여 금속박막에 조사되면 레이저 빔의 빛에너지가 전도성 금속박막에 흡수되어 열전도에 의한 열분해반응으로 증착이 일어나는 것을 이용하였다. 증착된 시드 층은 레이저 빔의 에너지가 용발(ablation)을 일으키기 때문에 증착 되는 양보다 증발(evaporation)되는 양이 많아 증착율(deposition rate)이 떨어지고, 레이저 빔의 열로 금속박막의 물리적 특성이 변하는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 폴리머 코팅층을 이용하여 레이저 빔의 높은 에너지로 인한 금속층의 용발과 증착층의 산화와 오염을 방지하는 역할을 하게 된다. 레이저 빔이 코팅층에 조사되면 폴리머 코팅층의 결합을 분해하고 실리콘 웨이퍼에 증착된 금속층을 박리시키고, 레이저 빔의 파동에너지가 수용기판위에 증착되게 된다. 증착된 시드 표면의 정량적 성분 분석을 위해 에너지 분산형 스펙트로 메타(EDS: Energy Dispersive Spectrometer)를 사용하였다. Fig. 3(a),(b)는 실리콘 위에 LIFT공정으로 증착된 표면의 SEM사진과 EDX분석 결과이다. 증착된 시드층 표면의 성분 분석결과 산소 18.84%, 규소(Si) 3.98%, 크롬(Cr) 77.18% 성분이 검출되었다.



(a)



(b)

Fig. 3. SEM photography of chromium deposited (a) and (b) EDX spectrum of representative deposited surface

Table 1는 증착 표면의 분석결과이다. 증착 표면의 성분분석결과, 폴리머 코팅을 적용한 LIFT 공정으로 증착된 미세패턴 표면성분에는 금속박막 위에 코팅된 폴리머 구성성분인 탄소가 없는 것으로 미루어 폴리머 코팅 성분은 레이저 빔에 의한 열분해(Pyrolytic) 반응을 통하여 투명기판과 수용기판 사이에서 증발되어 수용기판에는 용융 금속만이 증착되는 것을 알 수 있었다.

Table 1. Component analysis on the deposition surface

Element	Weight %	Atomic %
O	6.81	18.84
Si	2.52	3.98
Cr	90.67	77.18

3. 실험 및 고찰

시드 층 형성은 LIFT 공정을 이용하여 금속박막에 집속된 레이저 빔의 열에너지가 금속박막의 열분해 반응을

유도하도록 하면서 조사된 레이저 빔의 스캔경로에 따라 선택적으로 절연기판 위에 증착할 수 있었다. 증착된 시드 층은 레이저 빔이 금속박막에 조사되면 레이저 조사 부위는 용융되어 물리적 특성이 변하게 되므로 전기적 비저항 값이 벌크(bulk) 상태보다 높아 기능성 전극이나 부품소자 개발에 어려움이 있었지만, 증착된 시드 층 위에 선택적 무전해 도금공정으로 충분한 전기 전도성을 갖게 되면 이를 극복 할 수 있음을 확인 할 수 있었다.

레이저 펄스 출력을 고정시키되, 초점의 위치가 금속 박막 표면에서 벗어나는 정도에 따라 박막에 조사되는 레이저 빔 사이즈(spot size)가 증가하게 되므로 레이저 펄스 에너지는 감소하게 된다. 이처럼, 레이저 빔 조사영역에서 금속박막을 증착하기 위한 레이저 펄스 에너지가 작용되는 범위까지는 기판 표면에 원하는 시드 층이 생성되거나 레이저 빔 조사강도가 약해지는 가장자리 부분에서는 생성되는 시드 층의 패턴 선폭이 감소하는 현상이 보여지고 있다.

이와 반대로, Fig. 4은 레이저 출력이 11.32J/cm² 이상 일 경우에는 중심부가 비어 있는 분화구(crater) 형태를 가진 미세패턴이 형성되었는데 이것은 레이저빔 에너지 분포밀도가 중심부에 가장 높기 때문에 높은 조사강도로 인하여 증착된 패턴이 재용발(reevaporation) 됨으로 일어난 현상으로 생각된다[7].

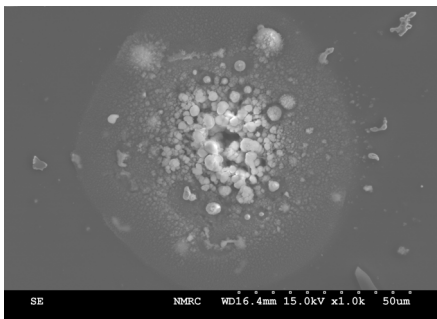


Fig. 4. SEM image of Cr droplet deposited pattern

레이저 출력이 금속 코팅박막을 용발 시키기에 충분한 경우 금속층은 레이저 빔이 조사되는 초기에 용발되며, 용발 이후 남은 펄스 지속시간동안 수용기판에 증착된 용착물에 흡수되어 재용발을 일으키게 된다. 이러한 현상은 레이저 빔 출력이 4W 이상에서 나타나며, 레이저 빔출력이 3W 이하인 경우에만 링모양의 미세패턴이 증착 되지 않고 전체 빔 조사 위치에 증착이 이루어지게

된다[8,9]. 이와 같이 동일한 크기의 시드 패턴을 증착하는데 필요한 레이저 출력이 355nm의 파장에서 동일한 출력으로 구리, 니켈 금속박막을 절연재료의 수용기판에 증착하여 비교해 본 결과 구리와 니켈 금속박막의 미세 패턴의 선폭차이를 보이는 것은 금속박막이 레이저 빔의 파장 355nm에서 재료의 흡수율 차이에 기인한 것으로 생각한다. 상대적으로 흡수율이 높은 경우, 전도성 미세 패턴이 크게 형성 되고 있으며, 용발 시의 높은 압력으로 인해 용발물의 분산각이 크게 나타나고 있다. 다중 스캔 방식에 의한 LIFT로 증착되는 미세패턴 선폭의 영향은 단발 펄스 방식에 의한 미세증착공정과는 많은 다른 특성을 가진다. 특히 단발 펄스 방식으로 증착된 시드 패턴 표면은 증착의 불균일성으로 인하여 표면형상 정밀도나 전기적 특성을 갖는 부품을 제조 할 수 없으며, 3차원 미세 구조물을 적층 할 수 없는 기술적 어려움이 있다고 할 수 있다.

Fig.5는 LIFT 방법으로 유리 기판 위에 증착한 구리 시드 층의 SEM 단면 사진으로 증착 두께는 약 20μm 을 나타내고 있다. 시드 층의 단면사진을 보면 단면조직은 용융 구리 금속간에 수많은 기공들로 인하여 조밀하지 않고, 결합도가 떨어지는 반면 무전해 도금후의 단면 조직은 전체가 기공들이 거의 확인되지 않고 치밀하고 균일하게 결합되어 있는 것으로 보이며 기판과의 결합력과 전도성도 향상되었음을 판단할 수 있다.

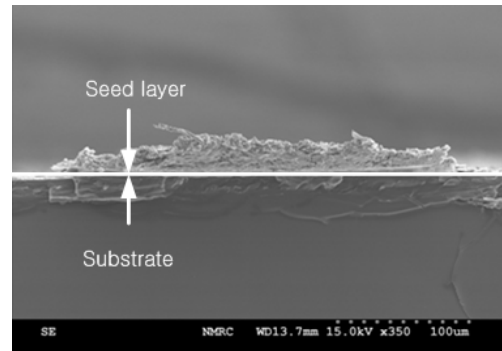


Fig. 5. Cross-sectional SEM micrographs of chromium deposited layer

Fig. 6 는 폴리머 코팅 층을 적용한 LIFT 방법으로 Al₂O₃ 세라믹 기판에 증착된 크롬 시드 층의 표면의 증착 후의 표면형상을 보여주고 있다. 크롬 박막과 레이저 빔의 열분해 반응으로 생성된 시드 증착 표면이 기존의

폴리머 코팅 층 없이 적용한 경우에는 불균일한 표면 형상을 보이다가 다중스캔 방식과 폴리머 코팅 층을 적용한 공정이 전체적으로 균일하고 일정한 형태의 표면을 형성하고, LIFT 방법으로 생성된 시드 층 사이의 기공 (porosity)이 레이저 직접 묘화법을 거치는 동안 조밀하고 균일하게 도금된 것을 SEM 사진을 통해 알 수 있다.

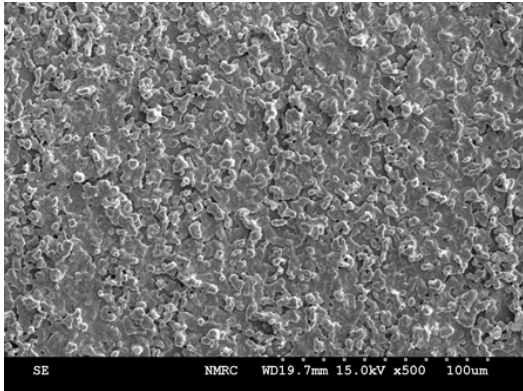


Fig. 6. SEM images of the seed pattern as deposited

레이저 유도증착표면의 구리시드 층의 표면성분을 EDS 측정한 결과, 레이저 유도 증착 후 SiO_2 기판 위에 증착된 구리 시드 층은 구리 63.18% 산소 36.87%의 조성비를 이루다가 다중스캔 방식과 폴리머 코팅 층을 적용한 경우 구리 85.23%, 산소 4.64%의 조성비로 측정되었다. 시드 층에 비해 상대적으로 금속 성분이 환원 석출되면서 증가하였다. 이 결과, 폴리머 코팅을 적용한 경우 도금 층의 성분분석을 통하여 시드 층 위에 산소 함유량이 감소되는 것은 레이저 유도증착으로 생성된 시드 층 사이의 기공(porosity)이 다중스캔방식을 레이저 빔의 진동에너지가 증착 층에 전달되면서 조밀하고 균일하게 도금되어 전기적 전도성 향상되었음을 판단 할 수 있다.

다중 스캔방식에 의한 LIFT로 증착되는 미세패턴 선 폭의 영향은 단발 펄스 방식에 의한 증착공정과는 상이한 특성을 가진다. 특히 단 펄스 스캔방식으로 증착된 시드 패턴표면은 증착의 불균일성으로 인하여 표면 형상정밀도나 전기적 특성을 지닌 전기전자 부품을 제조 할 수 없을 뿐만 아니라 3차원 미세 구조물을 적층 할 수 없다.

Fig. 7은 크롬, 구리 박막의 LIFT 공정으로 두께 $10\mu\text{m}$ 시드 패턴의 결정구조를 분석하고 결정의 방향성을 알아보기 위해 측정한 XRD 측정결과이다.

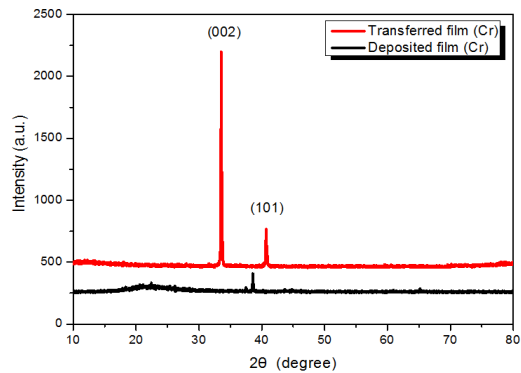


Fig. 7. XRD spectrum of the deposited seed layer(Cr) on the substrate

Fig. 7에서는 투명기판 위에 금속 박막을 증착 한 후 미세패턴의 증착 층은 살펴보았을 때, 결정구조 방향을 판단하는 피크의 변화가 없이 일정한 비정질 상태의 피크만 관찰되던 초기 금속 박막층과 달리 결정구조의 방향을 나타내는 피크의 변화가 일어난 것을 알 수 있는데 LIFT 공정에서 일어나는 재결정화 현상으로 인해 확인한 변화를 확인 할 수 있었다. 이것은 투명 기판 위에 금속층은 비정질 박막의 상태를 유지하는 반면, LIFT 공정의 미세패턴 증착 층은 결정화가 일어남을 알 수 있게 해주었다. 전기적 특성을 측정하기 위해 LIFT 공정으로 미세 전극 시드 층을 증착한 후 미세전극의 전압-전류값을 측정하였다.

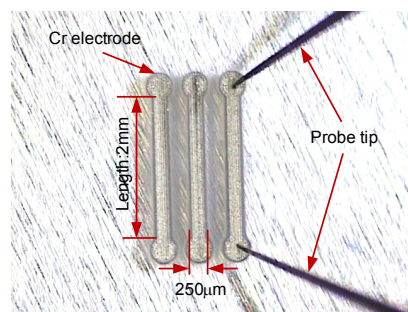


Fig. 8. Microelectrode on the si wafer surface

Fig. 8은 전기 전도성 측정을 위해 폭 $250\mu\text{m}$, 길이 2mm 의 직선형태의 전극패턴을 증착한 것으로 증착된 전극패턴에 전압을 인가했을 때 전류가 측정된 것이다. 실험결과 폴리머 코팅층을 적용한 레이저 유도증착 직접 묘화법을 이용한 경우가 기존의 LIFT 공정으로 증착된 시드 층의 경우보다 같은 전압을 인가하였을 때 더 큰

전류 값이 측정되었다. 전압, 전류 값을 바탕으로 저항 값을 계산한 결과 무전해 도금 전 저항이 6.4Ω 에서 도금 후의 저항이 2.6Ω으로 미세전극 패턴의 표면조직이 균일하고 치밀하게 증착되면 전기 저항이 감소하므로 전기 전도도가 약 3배정도 향상됨을 확인 할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 기존의 LIFT 공정보다 형상정밀도와 표면품위를 향상시키기 위한 방법으로 폴리머 코팅과 다중스캔방식을 적용하여 표면형상, 증착 밀도, 전기전도도를 향상시키는 새로운 레이저 유도증착 직접묘화법을 개발하였다. 시드 층을 증착하기 위해 폴리머 코팅을 이용한 LIFT공정으로 레이저 빔의 스캔경로에 따라 선택적으로 절연기판 위에 원하는 시드 층을 제조하였다. 이렇게 증착된 시드 층은 레이저 빔이 금속박막에 조사되면 레이저 조사부위는 용융되어 물리적 특성이 변하게 되므로 전기적 비저항 값이 벌크(bulk) 상태보다 높아 기능성 전극이나 부품소재 개발에 어려움이 있지만, 증착된 시드 층 위에 레이저빔의 다중 스캔방식으로 조사함으로써 레이저빔의 파동 에너지가 증착 층의 증착밀도와 표면품위를 향상시키고, 미세전극 패턴으로 사용가능한 전기 전도성을 갖게 되었을 알 수 있었다.

제작된 미세패턴의 전압, 전류 값을 바탕으로 저항 값을 측정한 결과 무전해 도금 전 저항이 6.4Ω 에서 도금 후의 저항이 2.6Ω으로 미세전극 패턴의 표면조직이 균일하고 치밀하게 증착되었다. 특히 구리, 크롬 등 금속박막의 시드패턴 및 3차원 미세 구조물 제조에 관한 응용 기술로써, 절연 기판 위에 멀티 스캔 방식으로 시드 패턴을 증착하여 마이크로미터 크기의 미세패턴과 3차원 미세구조물 증착을 가능하게 하였으며, 다양한 재료에 응용이 가능하고, 우수한 증착물 결합도 및 전기 전도성을 약 3배 정도 향상시켰다.

References

[1] H. Hidai, H. Tokura, "Direct Laser Writing of Aluminum and Copper on Glass Surfaces from Metal Powder." Appl. Surf. Sci. Vol. 174, No. 2, pp. 118-124, 2001.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(01\)00065-4](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(01)00065-4)

[2] D. J. Ehrlich, J. Y. Tsao, "Laser Microfabrication: Thin Film Process and Lithography" Academic press, Boston. Vol. 47, No. 2, pp. 207-208, 1989.

[3] J. Bohandy, B. F. Kim, F. J. Adrian, "Metal Deposition from a Supported Metal Film using an Excimer Laser" J. Appl. Phys. Vol. 60, No. 4, pp. 1538-1539, 1986.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.337287>

[4] H. Yamada, T. Sano, "Optimization of Laser induced Forward Transfer Process of Metal Thin Films". Appl. Surf. Sci. Vol. 198, pp. 411-415, 2002.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(02\)00351-3](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(02)00351-3)

[5] E. Laffery, J. Macauley, D. J. Mongey, K. F., P. V. Kelly, G. M. Crean, "Photo Assisted Metallization: Line Resolution Studies", Surface and Coating Technology, Vol. 100-101, pp.80-84, 1998.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(97\)00592-6](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(97)00592-6)

[6] B. G. Lee, "Deposition of micropattern using the Laser Direct Write Method with a polymer coating layer", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 15, No. 12, pp. 6980-6985, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.12.6980>

[7] B. G. Lee, J. H. Moon, "Microfabrication of Micro-Conductive patterns on Insulating Substrate by Electroless Nickel Plating", Kor. J. Met. Mater., Vol. 48, No. 1, pp. 90-100, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.3365/KJMM.2010.48.01.090>

[8] G. A. Krulik, N. Mandich, "Substitution of Hazardous For Non-hazardous Process Chemicals in the Printed Circuit Industry", Metal Finishing, Vol. 90, No. 25, pp. 49-51, 1992.

[9] D. P. Banks, C. Grivas, I. Zergioti, R. W. Eason, "Laser-Induced Forward Transfer-printing of focused ion beam pre-machined crystalline magneto-optic yttrium iron garnet micro-discs", Optics express, Vol. 20, No. 14, pp. 15171-15179, 2008.

이 봉 구(Bong-Gu Lee)

[정회원]



- 2003년 2월 : 연세대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2009년 2월 : 연세대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 2003년 7월 : 한국생산기술연구원 연구원
- 2009년 3월 ~ 2012년 2월 : 대림대학교 기계설계 교수
- 2012년 3월 ~ 현재 : 영남이공대학교 기계계열 교수

<관심분야>

초정밀 가공, CAD/CAM, 복합가공