

AMOLED 제조공정에 사용되는 Fine Metal Mask 용 얇은 Invar 합금의 진동자를 이용한 펄초 레이저 응용 홀 드릴링

최원석¹ · 김훈영¹ · 신영관^{1,2} · 최준하^{1,2} · 장원석¹ · 김재구¹ · 조성학^{1,2} · 최두선[†]

한국기계연구원 나노공정연구실^{1,†}

과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스학과²

Application of femtosecond laser hole drilling with vibration for thin Invar alloy using fine metal mask in AMOLED manufacturing process

Won-Suk Choi¹ · Hoon-Young Kim¹ · Young-Gwan Shin^{1,2} · Jun-ha Choi^{1,2} · Won-Seok Chang¹ ·

Jae-Gu Kim¹ · Sung-Hak Cho^{1,2} · Doo-Sun Choi[†]

Korea Institute of Machinery and Material(KIMM)^{1,†}

Korea University of Science and Technology(UST)²

(Received September 16, 2020 / Revised September 24, 2020 / Accepted September 30, 2020)

Abstract: One of display trends today is development of high pixel density. To get high PPI, a small size of pixel must be developed. RGB pixel is arranged by evaporation process which determines pixel size. Normally, a fine metal mask (FMM; Invar alloy) has been used for evaporation process and it has advantages such as good strength, and low thermal expansion coefficient at low temperature. A FMM has been manufactured by chemical etching which has limitation to controlling the pattern shape and size. One of alternative method for patterning FMM is laser micromachining. Femtosecond laser is normally considered to improve those disadvantages for laser micromachining process due to such short pulse duration. In this paper, a femtosecond laser drilling for thickness of 16 μm FMM is examined. Additionally, we introduce experimental results for controlling taper angle of hole by vibration module adapted in laser system. We used Ti:Sapphire based femtosecond laser with attenuating optics, co-axial illumination, vision system, 3-axis linear stage and vibration module. By controlling vibration amplitude, entrance and exit diameters are controllable. Using vibrating objective lens, we can control taper angle when femtosecond laser hole drilling by moving focusing point. The larger amplitude of vibration we control, the smaller taper angle will be carried out.

Key Words: Femtosecond laser machining, AMOLED display, Invar, Vibration, Processing control

1. 서론

디스플레이의 중요한 발전방향 중 하나는 높은 픽셀 밀도의 개발이다. 오늘날 스마트폰용 디스플레이는 인치당 픽셀이 보통 500 PPI 이상으로 제조된다. Fig. 1.에 PPI(Pixel Per Inch)에 따른 화면의 가독성 비교를 표시 하였다. 높은 PPI를 얻기 위해서 픽셀크기가 작아야 하며, 픽셀 하나의 크기를 결정하는 RGB(Red, Green, Blue) 서브픽셀의 크기가 중요

하며, RGB 서브픽셀은 증착공정에 의해 만들어진다. 이때, 일반적으로 증착 공정에는 미세 금속 마스크 (Fine Metal Mask: FMM)가 사용되며, 상온에서 강도가 좋고 열팽창 계수가 낮은 장점이 있는 Invar alloy로 제작된다¹⁾.

FMM 제조공정에서 홀 패턴은 화학적 에칭으로 제조되며, 이는 금속의 등방성에칭으로 인하여 두께보다 홀 직경을 작게 줄이는 것이 어렵다. 따라서 지금까지 두께를 줄여 마스크의 홀 직경을 감소시켰으나 금속박판 화학적 에칭의 기술적인 한계, 더 얇은 박판의 제조, 얇은 두께의 FMM의 내구도 문

1.† 교신저자: 한국기계연구원 나노공정연구실
E-mail: choids@kimm.re.kr

제, 처짐 문제 등 기술적인 벽에 도달한 상황이다. Fig. 2에 FMM의 능동형 유기발광다이오드(Active Matrix Organic Light Emitting Diode: AMOLED) 제조공정에서 RGB화소 증착에 사용되는 공정을 나타내었다.

본 논문에서는 나노초 레이저 비해 상대적으로 열 영향이 적은^{2,3)} 펄스 레이저와 초점위치를 연속적으로 변화시킬 수 있는 진동자를 결합하여 FMM의 제조 시 사용되는 16 μm 두께의 Invar 합금에 대하여 홀 가공 시 테이퍼 각도 제어, 가공형상의 제어 등 홀 드릴링 특성을 살펴본다.

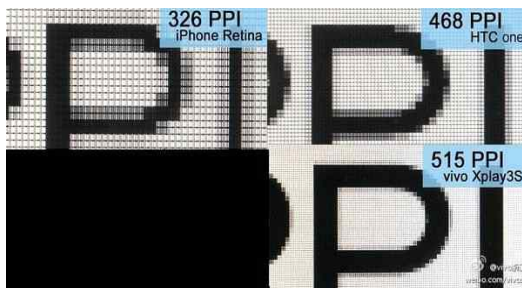


Fig. 1 Comparison of legibility of some PPI

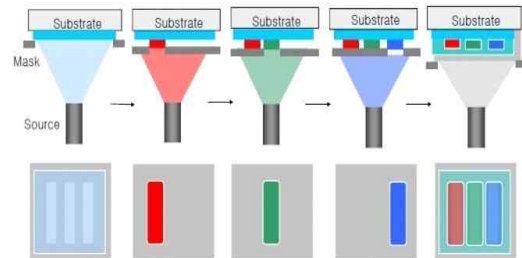


Fig. 2 RGB evaporation process of AMOLED production

2. 실험 셋업

실험 셋업은 빔 전송 광학계, 동축 비전 및 조명, 3축 스테이지, 진동자모듈과 Ti:Sapphire 기반 펄스 레이저를 사용하였다. 펄스 레이저에서 발진된 빔을 빔 전송 광학계를 통해 대물렌즈까지 전송되고, 대물렌즈로 샘플표면에 집속한다. 빔 전송 시, 온/오프를 제어하는 셔터가 있고, 펄스의 에너지를 조절하는 광학계를 통해 펄스 에너지를 조절한다. 진동자를 통해 대물렌즈의 초점위치를 연속으로 변화시키며, 3축 스테이지를 통해 가공위치를 제어한다. 동축조명과 비전을 통해 가공위치와 초점을 확인하

고, 가공상황을 실시간으로 모니터링 한다. Fig. 3에 진동자를 사용한 펄스 레이저 가공 시스템의 개략도를 나타내었다.

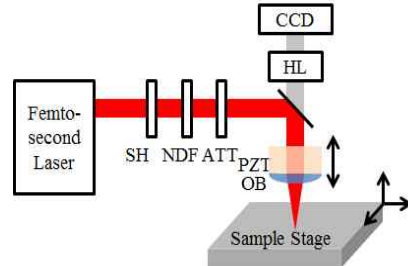


Fig. 3 Schematic of vibration assisted femtosecond laser machining system (SH: mechanical shutter, NDF: neutral density filter, ATT: attenuator, PZT: vibrator, OB: objective lens, HL: halogen lamp, CCD: image sensor)

진동자 모듈은 진동기와 대물렌즈, 평선 제너레이터, 증폭기 및 오실로스코프로 구성된다. 진동자에 대물렌즈가 부착되어 있으며 평선 제너레이터를 사용하여 진동자의 동작특성을 제어하여 초점위치를 제어 할 수 있다. Fig. 4에 진동자 모듈의 개략도를 나타내었다.

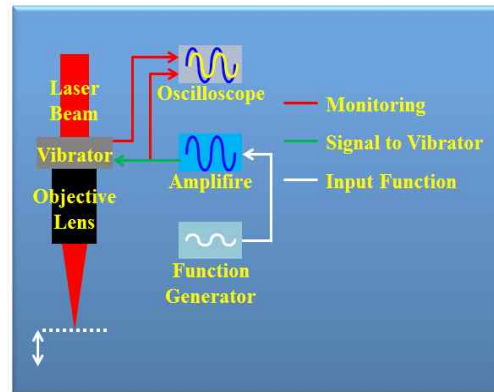


Fig. 4 Schematic of vibration module

실험에 사용된 샘플은 Invar36 이며, 니켈36%, 철 63%의 합금이다. 열팽창계수가 작아 상온수준에서 길이의 변화가 거의 없어 자동온도조절기, 측정장비, 레이저부품, 의료장비, 전력공급장치, 극저온 저장 및 운송장치에 사용된다. 이와 동시에 항복강도 240 MPa min, 인장강도 490 MPa min의 강도를 가지므로, 구조강으로도 좋은 강도를 가지고 있는 특성이 있다.

3. 실험결과 및 분석

실험시 공정조건은 1027 nm의 파장, 펄스폭 190 fs, 반복률 100 kHz, 펄스 수 8, 50X 대물렌즈를 사용하였고, 진동주파수는 50Hz로 고정한다. 여기서 진동자의 진폭에 따른 홀 가공의 특성을 보기 위한 실험에서 사용할 펄스에너지를 실험을 통해 구한다. 상기 서술한 공정변수를 사용하여 샘플표면에 초점을 정확히 맞추고 펄스에너지를 변화시켜가며 1발을 집중시켜 가공된 직경을 측정한다.

사용한 펄스에너지와 렌즈를 통해 fluence를 구하고 그때 가공된 가공 직경의 제곱을 하여 x축 세미 로그 그래프를 통해 집중된 fluence대비 가공 직경 변화의 경향을 본다. 이후 이 경향을 Liu의 논문⁴⁵⁾에서 제시한 상관관계를 적용하여 비선형 피팅(non-linear fitting)을 수행하고, 가공 직경의 제곱이 0이 될 때의 fluence값을 외삽을 통하여 구한다. 이때의 fluence값이 실험에서 사용한 레이저로 가공하였을 때 해당 재료의 실험적인 가공 임계값(ablation threshold)이다. Fig. 5.에 상기 서술한 fluence대비 가공 직경의 제곱 그래프와, 비선형 피팅과 외삽을 통해 계산한 가공 임계값을 나타내었다.

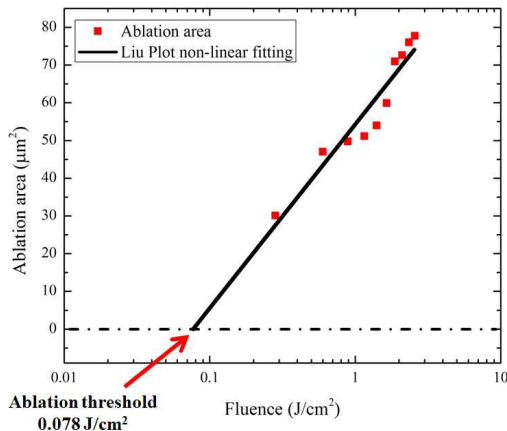


Fig. 5 Invar alloy ablation threshold calculation

Fig. 5.의 실험결과를 통해 계산한 가공 임계값의 약 10배의 펄스에너지가 샘플표면에 집중되도록 설정하여 사용하였고, 모든 조건은 동일하게 유지하고 진동자의 진폭만 조절하여 펄초 레이저 홀 드릴링 실험을 수행하였다. Fig. 6.에 진동자의 진폭에 따른 펄초 레이저 홀 드릴링 실험 결과를 나타내

었다.

Fig. 6의 결과를 통해 동일한 조건에서 진동자의 진폭을 제어하여 가공깊이를 조절 가능한 것을 알 수 있었으며, 이를 입구 및 출구 직경의 변화를 통해 확인할 수 있었다. 이 결과를 통해 가공깊이와 입출구 직경의 조절을 통하여 가공된 홀의 테이퍼 각도를 조절 할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 7.은 같은 가공조건과 서로 다른 최대 진동 진폭으로 가공한 홀의 테이퍼 각도를 가공된 홀의 단면을 FIB(Focused Ion Beam)를 통해 가공하여 촬영한 사진을 나타내었다. 파란색 선은 FIB촬영을 위한 백금 코팅과 Invar 합금 사이의 경계를 나타내며 코팅된 부분은 빨간색 원으로 나타내었다. 진동의 진폭이 증가함에 따라 테이퍼 각도가 증가함에 FIB를 통한 단면형상분석을 통해 알 수 있었다. 실험 조건에서 진동의 최대 진폭이 증가하면 테이퍼 각도가 증가한다. 최대진폭이 크면 렌즈의 초점이 재료의 표면에서 크게 벗어나므로 더 넓은 샘플의 표면이 가공되므로 입구 직경이 커지는 것으로 추측 된다.

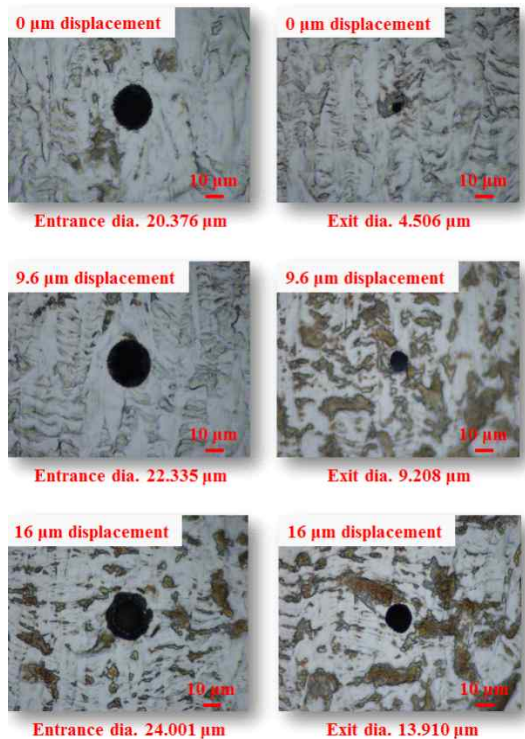


Fig. 6 Experimental result of vibration assisted femtosecond laser hole drilling

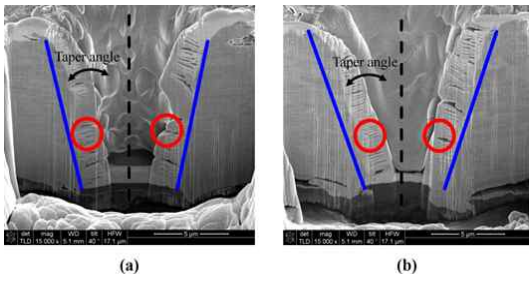


Fig. 7 Examples of cross-sectional images of the hole drilled by vibration-assisted femtosecond laser drilling: Taper angles (a): 10.03°, (b): 14.22°; vibration amplitudes (a): 1.4 μm , (b): 3.1 μm .

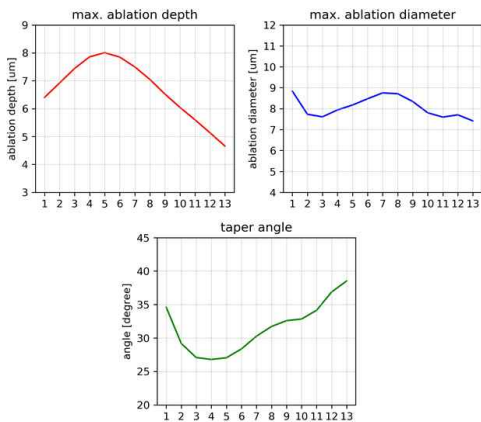


Fig. 8 Calculated taper angle with maximum ablation depth, maximum ablation diameter for various vibration amplitude (1~13 μm)

Fig. 8.은 Fig. 5.에서 계산한 가공 임계값의 약 4.8 배의 에너지를 사용하였고, 진동자의 최대진폭을 1~13 μm 으로 변화시켰으며, 이외의 조건은 동일하게 가공하였다. 이때 샘플이 관통되지 않았고, FIB를 통해 가공깊이와 가공 직경을 측정하여 테이퍼 각도를 계산하였다. 최대 진폭이 1 μm 인 진동을 사용하여 가공하면 테이퍼 각도가 약 35° 이다. 최대 진동 진폭이 증가함에 따라 테이퍼 각도는 감소하지만 테이퍼 각도는 최대 진폭 약 4 μm 에서부터 증가하는 경향이 있다. 최대 진동 진폭에 따라 가공 직경 변화보다 가공 깊이 변화가 더욱 크다. 그 이유는 이전 펄스에 의한 가공 깊이와 다음 펄스가 조사 될 면 사이의 차이가 작을수록 렌즈 초점면이 재료표면에 더 잘 맞게 되어 가공 깊이가 더 깊어지는 것으로 예상된다. Fig. 8.은 최대 진동 진폭에 대한, 최대 가공 깊이와 가공 직경의 변화에 의한 계산된 테이퍼 각도의 변화를 나타내었다.

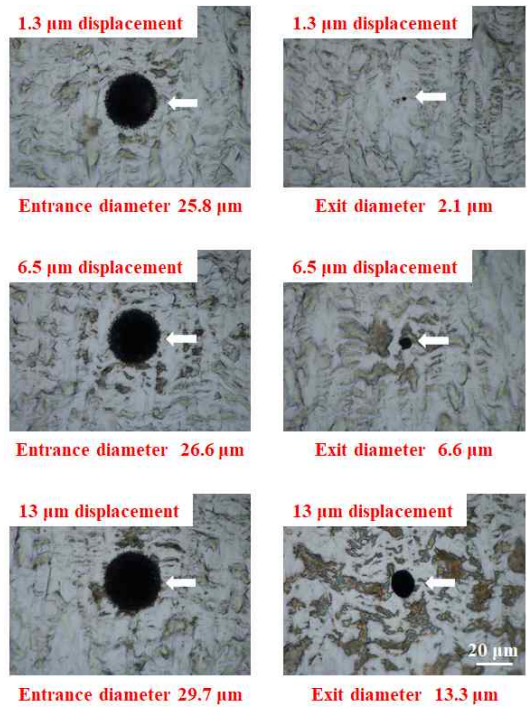


Fig. 9 Experimental result of vibration assisted femtosecond laser hole drilling with lower pulse energy and higher pulse number

또한, 위의 가공조건에서 펄스수를 두 배로 조사하여 샘플을 관통시켜 가공된 입구와 출구 직경변화를 관찰하였고, 이를 Fig. 9에 나타내었다. fluence, 펄스 수에 따라 진동의 진폭변화로 조절 가능한 테이퍼 각도의 범위가 변화하는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 진동자를 이용한 펨토초 레이저 홀 드릴링 시스템을 사용하여 박판 Invar36 합금에 대하여 홀 드릴링 시, 진동자의 진폭 변화만으로 31.8° ~ 43.9°로 홀 테이퍼 각도를 제어 할 수 있음을 확인하였다. 진동자의 진폭이 증가함에 따라 일반적으로 홀의 테이퍼 각도가 증가하는 경향이 있음을 확인하였다. 이는 진동자에 의해 대물렌즈의 초점위치가 재료의 내부방향으로 이동하기 때문에, 두 번째 펄스는 첫 펄스에 비해 재료의 표면 기준 집중된 직경이 커질 수밖에 없고 (디포커싱(defocusing)에 의한 효과), 이에 의해 첫 발에 의해

재료와 가공된 부분보다 크게 가공 된다 (재료의 수평면 기준). 한편, 첫 발에 의해 가공되어 재료가 제거된 깊이만큼 두 번째 펄스는 디포커싱 되는데 (레이저가 집중된 중앙 기준), 이를 진동자에 의해 대물렌즈가 재료의 두께방향으로 이동하여 상쇄하는 효과가 있어 가공깊이가 증가한다. 위 두 가지를 종합하면 진동자에 의해 입구 쪽 가공 직경이 증가하며, 가공깊이가 증가하는 것을 예상이 가능하고, 실험을 통해 확인하였다. 재료의 두께가 레이저에 의해 가공된 총 가공깊이보다 얇을 경우, 진동자의 진폭에 의해 출구 쪽 가공 직경도 변하는 현상을 확인하였다 (가공깊이의 증가에 기인함). 재료와 레이저의 상호작용, 레이저의 가공변수, 진동자의 가공변수 등에 따라 조절 가능한 테이퍼 각도가 달라질 것으로 예상된다. 그러나 모든 가공변수를 고정하고 진동자의 진폭만을 제어하여 테이퍼각도(가공깊이)를 제어할 수 있는 것은, 홀 직경을 유지하면서 테이퍼 각도를 조절해야 하는 FMM, 제조 엔진노즐 및 기타 나노/마이크로 가공에 유용하게 응용될 것이다.

참고문헌

- 1) F. Ono, Y. Hamatani, Y. Mukumoto, S. Komatsu, N. Ishikawa, Y. Chimi, A. Iwase, T. Kambara, C. Muller, and R. Neumann, "Modification of Fe-Ni Invar alloys by high-energy ion beams", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, USA, vol. 206, pp. 295-298, 2003.
- 2) C. Momma, S. Nolte, B.N. Chichkov, F. von Alvensleben, and A. Tunnermann, "Precise laser ablation with ultrashort pulses", Applied Surface Science, Netherlands, vol. 109-110, pp. 15-19, 1997.
- 3) B.N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben, and A. Tunnermann, "Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids", Appl. Phys. A: Material Science and Processing, Berlin, vol. 63, No. 2, pp. 109-115, 1996.
- 4) J.M. Liu, "Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot size", Optics Letters, 7, 1981.

- 5) J.M. Liu, R. Yen, H. Kurz, and N. Bloembergen, "Phase transformation on and charged particle emission from a silicon crystal surface induced by picosecond laser pulses", Applied Physics Letters, 39, 755 - 757, 1981.

저자 소개

최 원 석(Won-Suk Choi)

[정회원]



< 관심분야 >

펄초 레이저 가공 공정

- 2014년 03월~2019년 02월 : 한국과학기술연합대학원대학교 나노·메카트로닉스 학과 (공학박사)
- 2019년 03월~현재: 한국기계연구원 나노공정장비연구실, Post-Doc.

김 훈 영(Hoon-Young Kim)

[학생회원]



< 관심분야 >

펄초 레이저 가공 공정

- 2013년 09월~2018년 08월 : 한국과학기술연합대학원대학교 나노·메카트로닉스 학과 (공학박사)
- 2018년 09월~현재: 한국기계연구원 나노공정장비연구실, Post-Doc.

신 영 관(Young-Gwan Shin)

[학생회원]



< 관심분야 >

펄초 레이저 가공 공정

- 2015년 09월~2017년 08월 : 한국과학기술연합대학원대학교 나노·메카트로닉스 학과 (공학석사)
- 2017년 09월~현재: 한국과학기술연합대학원대학교 나노·메카트로닉스 학과, 박사과정

최 준 하(Jun-Ha Choi)



- 2013년 03월~2019년 02월 : 부산대학교, 광매카트로닉스공학과
- 2020년 09월~현재: 한국과학기술연합대학원대학교 나노·메카트로닉스 학과, 통합과정

< 관심분야 >
펄스초 레이저 가공 공정

조 성 학(Sung-Hak Cho)



- 1997년 04월~2000년 03월 : 일본 게이오대학 전기전자공학부 박사과정
- 2000년 04월~2000년 09월 : 일본 이화학연구소 (RIKEN) Post-Doc.
- 2000년 10월~2003년 08월 : 일본 이화학연구소 (RIKEN) 연구원
- 2003년 09월~현재 : 한국기계연구원, 나노공정장비연구실, 책임연구원

< 관심분야 >
펄스초 레이저 응용 극미세 가공/ 공정기술

장 원 석(Won-Seok Chang)



- 2001년 02월 : 한국과학기술원 기계공학 (공학박사)
- 2001년 03월~현재 : 한국기계연구원 나노공정장비연구실 책임연구원/연구실장
- 2007년 03월~현재: 과학기술연합대학원 나노메카트로닉스학과 교수

< 관심분야 >
레이저 비열 나노가공기술

최 두 선(Doo-Sun Choi)

[정회원]



- 2002년 02월 : 연세대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1990년 04월~현재 : 한국기계연구원 나노공정장비연구실, 책임연구원

< 관심분야 >
대면적 나노/마이크로 패턴 가공 및 성형기술

김 재 구(Jae-Gu Kim)



- 2007년 08월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 1994년 03월~현재 : 한국기계연구원 나노공정장비연구실, 책임연구원

< 관심분야 >
고에너지 빔 응용 나노가공 기술