

Effect of crystallinity on via hole characteristics in photosensitive glass for TGV

Yongjun Seo and Yoonsoo Han[†]

Semiconductor Solution Center, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Icheon 17303, Korea

(Received November 13, 2025)

(Revised December 3, 2025)

(Accepted December 3, 2025)

Abstract The advancement of Artificial Intelligence (AI), mobile, and Internet of Things (IoT) technologies has driven the demand for high integration, high-speed signal transmission, and fine patterning in semiconductor packaging. While organic substrates are commonly used, they present limitations in planarity, thermal/mechanical stability, and dielectric properties. Glass substrates offer superior characteristics, but their brittleness hinders fine-pattern processing, particularly in forming Through Glass Via (TGV). This study presents a TGV fabrication method using photosensitive glass based on Ce- and Ag-doped lithium aluminosilicate (LAS). Selective crystallization of lithium metasilicate (LMS) was achieved via UV exposure and thermal treatment, followed by hydrofluoric acid etching to form vias. Key process parameters were analyzed for their impact on via formation and quality, and the proposed process enhanced controllability over via morphology while offering practical insights into advanced packaging applications using photosensitive glass.

Key words Glass substrate, TGV, Photosensitive glass, Advanced packaging

TGV 형성을 위한 감광성 유리의 결정성이 비아홀 특성에 미치는 영향

서용준, 한윤수[†]

한국세라믹기술원 이천분원 세라믹중합솔루션센터, 이천, 17303

(2025년 11월 13일 접수)

(2025년 12월 3일 심사완료)

(2025년 12월 3일 게재확정)

요약 인공지능(AI), 모바일, 사물인터넷(IoT) 등 기술의 발전에 따라 반도체 패키징 분야에서는 고집적화, 고속 신호 전달, 미세 패턴 형성에 대한 수요가 증가하고 있다. 유기 기판은 널리 사용되고 있으나 평탄성, 열적·기계적 안정성, 유전 특성 측면에서 한계를 지닌다. 이에 비해 유리 기판은 우수한 특성을 제공하지만, 취성으로 인해 특히 관통 유리 비아(TGV)와 같은 미세 패턴 가공에 어려움이 있다. 본 연구에서는 Ce 및 Ag가 도핑된 리튬알루미노실리케이트(LAS) 기반 감광성 유리를 이용한 TGV 형성 공정을 제안하였다. 자외선 조사와 열처리를 통해 리튬메타실리케이트(LMS)를 선택적으로 결정화한 후, 이를 불산으로 식각하여 비아를 형성하였다. 주요 공정 변수들이 비아 형성과 품질에 미치는 영향을 분석한 결과, 제안된 공정은 비아 형상 제어를 개선하였으며 감광성 유리를 활용한 첨단 패키징 응용에 실용적인 시사점을 제공한다.

1. 서론

최근 인공지능(AI), 모바일, 사물인터넷(IoT) 등 첨단 기술의 발전에 따라 반도체 패키징 기술은 고집적화, 고속화, 대면적화, 미세패턴 정밀화를 요구받고 있다[1-4]. 이에 따라 패키지 성능을 결정짓는 핵심 구성요소인 기판 소재의 기술적 진보와 새로운 소재 도입이 중요한 과

제로 대두되고 있다[5].

기존에 널리 사용된 유기 기판은 저비용과 가공 용이성을 장점으로 하나, 평탄성, 열적 안정성, 기계적 강도, 유전 특성 등에서 한계를 보여 고성능 패키징 요구에 대응하기 어렵다[5,6]. 특히 낮은 평탄도와 영률(Young's modulus), 높은 열팽창계수(Coefficient of Thermal Expansion, CTE)는 고해상도 패턴 형성, 대면적 공정 안정성, 고속 신호 전송에 불리하게 작용한다.

이러한 문제를 극복하기 위한 대안으로 유리 기판이 주목받고 있다. 유리는 우수한 표면 평탄도, 낮은 유전

[†]Corresponding author
E-mail: corundum69@kicet.re.kr

손실, 높은 기계적 강도와 조절 가능한 CTE를 바탕으로 고속·고집적 패키징에 적합한 특성을 제공한다[4,7-9]. 다만, 유리는 취성이 강한 소재로 가공 시 균열 발생 가능성이 높아 공정 안정성이 중요한 기술 과제로 남아 있다[10,11].

특히 반도체 패키징용 유리 기판에는 칩과 외부 회로 간 수직 연결을 위한 TGV(Through Glass Via, 관통 유리 비아) 형성이 필수적이다. 이는 고밀도 배선과 고속 신호 전달을 위한 핵심 구조로, 고정밀·고신뢰성 공정 기술이 요구된다.

TGV 가공 방식으로는 레이저 드릴링 및 LIDE(Laser-Induced Deep Etching) 공정이 연구되어 왔으며[10,12,13], 본 연구에서는 감광성 유리를 활용한 TGV 형성 공정을 적용하였다. 감광성 유리는 자외선(UV) 조사에 의해 선택적 결정화가 가능하며, 이후 화학식각을 통해 정밀 패턴 형성이 가능하다[14-17].

본 연구의 목적은 감광성 유리를 이용한 TGV 형성 공정에서 자외선 조사 시간, Ag 클러스터 형성 온도, 결정화 온도와 같은 공정 조건이 가공 및 최종 비아 특성에 미치는 영향을 규명하고, 그 메커니즘을 해석하는 데 있다. 이를 위해 감광성 유리의 노광, 결정화 및 식각에 이르는 전 공정의 반응 메커니즘을 분석하고, 다양한 공정 인자가 TGV 형성에 및 품질에 미치는 영향을 실험적으로 평가하였다[14-16]. 본 연구는 감광성 유리 기반 TGV 공정 전반에 대한 공정 메커니즘 해석과 최적화에 실용적인 통찰을 제공한다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 상용 감광성 유리(MEG2, MICROFAB, Korea)를 $50 \times 50 \times 0.42$ mm 크기로 가공하여 사용하였다. 식각에는 불산(HF)(Chemitop, Korea)을 10 wt%로 희석하여 적용하였다. 감광성 유리와 포토마스크는 마스크 얼라이너(MDA-400S, MIDAS, Korea)에 장착하고, 진공 칩을 상승시켜 유리와 마스크를 밀착시킨 후 자외선(UV)을 1~5분간 조사하였다. 조사 광원은 200 W 수은등이며, 포토마스크는 $30 \mu\text{m}$, $20 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$ 크기의 홀 배열 패턴으로 구성되어 있다. 노광이 완료된 시편은 박스로에서 $3^\circ\text{C}/\text{min}$ 의 속도로 350°C 까지 가열 후 30분간 유지하여 은(Ag) 클러스터를 형성하였다. 이후 동일한 승온 속도로 $550\sim 630^\circ\text{C}$ 까지 추가 가열하여 리튬메타실리케이트(LMS) 상의 결정화를 유도하고, 로냉각으로 실온까지 냉각하였다. 결정화된 유리 시편은 10 wt% HF의 용액에 침지하여 식각하였고, 초음파 세척기(600 W, 48 kHz)를 활용하여 약 20분간 식각을 진행하였다. 조건에 따라 식각 시간은 최대 30분까지 연장되었다. 이후

시편은 흐르는 증류수로 30초간 3회 세척한 뒤, 질소 가스로 건조하였다.

형성된 TGV의 형상 및 치수는 3D 광학 프로파일러(VR-5000, Keyence, Japan)와 주사전자현미경(SEM, JSM-6390, Jeol, Japan)으로 분석하였다. 기판의 표면 및 측벽 조도는 레이저 현미경(LEXT OLS5100, Olympus, Japan)을 이용하여 측정하였다. 광학적 특성(투과율 및 흡광도)은 자외선-가시광선 분광광도계(V770, JASCO, Japan)를 통해 분석하였으며, 결정상 및 결정화 거동은 X선 회절 분석기(XRD, D8 ADVANCE, BRUKER, Germany)를 이용해 평가하였다. 결정화도(X_c)는 결정질 피크 면적(A_c)과 비정질 배경 면적(A_a)을 분리하여 다음 식(1)에 따라 계산하였다.

$$X_c(\%) = A_c / (A_c + A_a) \times 100 \quad (1)$$

피크 분리는 가우시안 함수 및 기준선 보정을 통해 수행하였다. 또한 마스크 패턴 크기에 따른 노광 세기 분포는 finite-difference time-domain(FDTD) 방법에 기반한 FullWAVE 시뮬레이션(RSoft Design Group, Synopsys, USA)을 통해 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. TGV 형성에 영향을 미치는 공정인자

3.1.1. 노광 시간이 TGV 형성에 미치는 영향

Figure 1의 (a~e)는 1~5분 동안 노광한 시편의 단면을 비교한 결과로, 1분 조건에서는 상부 표면에서만 식각이 진행되고 비아 형성은 관찰되지 않았다. 반면, 2분 이상 노광 시에는 비아 형성이 가능하였으며, $10 \mu\text{m}$ 패턴의 경우 최소 4분 이상 노광해야 후면까지 완전히 관통된 구조가 형성되었다. 1분 조건의 경우 식각된 측벽의 테이퍼가 약 86° 를 보이는 반면 비아가 형성된 2분 이상의 조건에서는 중앙이 얇은 모래시계형 프로파일을 보이며 측벽 테이퍼 각도는 약 $88\sim 89^\circ$ 를 보여 우수한 직각성을 보였다.

UV-Vis 분석 결과(Fig. 2, a)에서는 노광 시간이 증가할수록 $250\sim 300$ nm 영역에서 투과율이 감소하는 경향이 나타났으며, 이는 Ce^{3+} 이온이 자외선에 의해 Ce^{4+} 로 산화되며 해당 파장에서의 흡광이 증가한 결과로 해석된다[18,19]. 이 반응은 다음과 같이 표현된다:



방출된 전자는 Ag^+ 이온을 환원시켜 유리 내부에 미세한 Ag 입자를 형성하며[16,20], 이는 열처리 중 응집되어 LMS 결정의 핵생성원으로 작용한다[14,16-18].

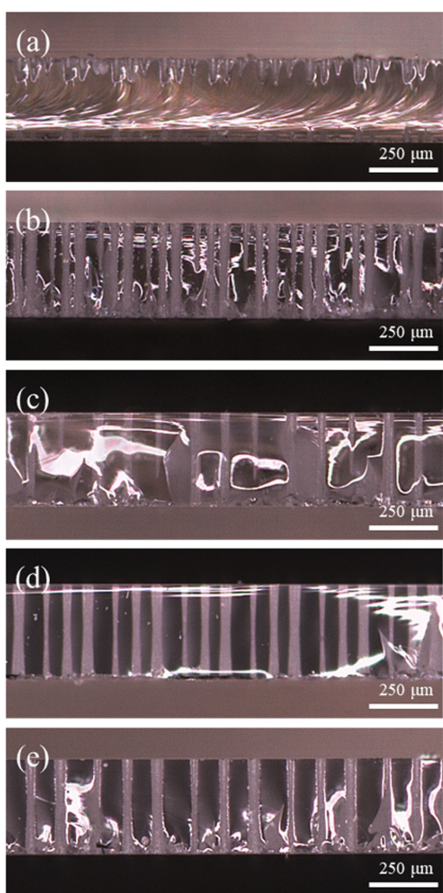


Fig. 1. TGV formation under different UV exposure times: (a) 1 min, (b) 2 min, (c) 3 min, (d) 4 min, (e) 5 min.

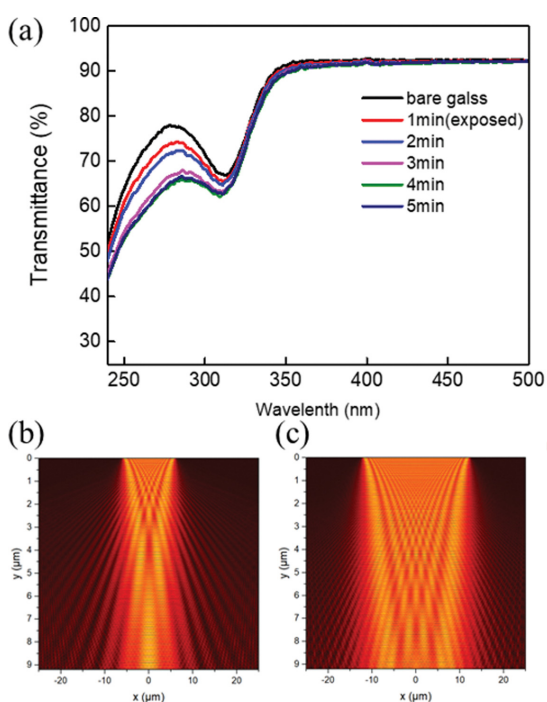


Fig. 2. (a) UV-Vis transmittance spectra with varying UV exposure times and (b-c) optical simulation results by mask pattern size: (b) 10 μm, (c) 20 μm.

노광 시간이 짧을 경우(예: 1분), 환원된 Ag의 양이 부족하여 클러스터 형성이 충분히 이루어지지 못하고, 이에 따라 결정화 또한 부족하여 비아가 관통되지 않는다. 반면, 노광 시간이 길어질수록 더 많은 Ag⁺ 이온이 환원되어 클러스터 및 결정화가 원활히 진행되며, 안정적인 비아 형성이 가능해진다.

또한, 10 μm 패턴의 경우 광학 시뮬레이션 결과(b, c)를 통해 구조적 원인이 설명된다. 마스크 패턴이 작을수록 가장자리에서의 회절 효과로 인해 하부에 도달하는 노광 세기가 감소하고, 이는 하부 영역에서 Ce³⁺ 산화 및 Ag⁺ 환원 반응을 저해하여 결정화 및 식각 반응성이 떨어지게 된다. 따라서 일반적인 패턴(≥ 20 μm)의 경우 최소 2분, 미세 패턴(10 μm)의 경우 4분 이상의 노광이 필요하다.

3.1.2. 결정화 온도가 TGV 형성에 미치는 영향

Figure 3, a-e는 550~590°C 범위에서 열처리된 감광성 유리 시편의 비아 형성 결과를 보여준다. 550°C 및 560°C에서는 표면에만 미세한 식각 흔적이 나타났으며,

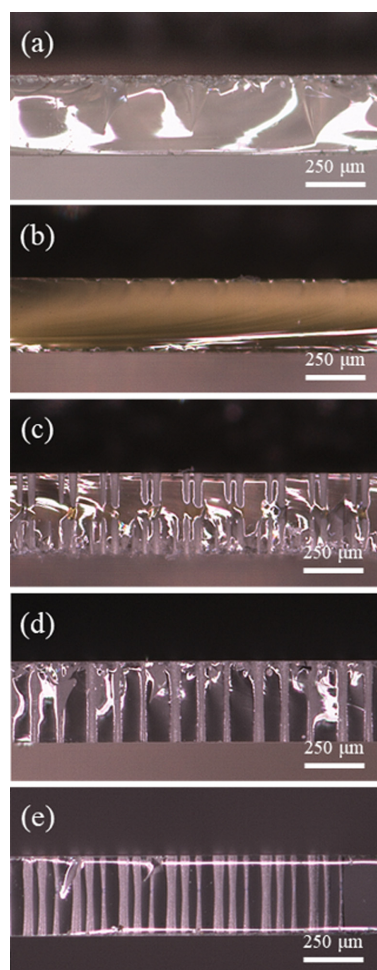


Fig. 3. TGV formation under different crystallization temperatures: (a) 550°C, (b) 560°C, (c) 570°C, (d) 580°C, (e) 590°C.

비아 관통은 관찰되지 않았다. 570°C에서는 일부 식각이 진행되어 비아 형성이 시작되었으나 완전한 관통은 이루어지지 않았고, 580°C 및 590°C에서는 안정적인 비아

형성이 확인되었다. 이때 관통되지 않은 비아는 86도의 측벽 기울기를 보이며 관통된 비아의 경우 88-89도의 측벽 기울기를 보였다, 또한 식각속도는 570°C에서 약

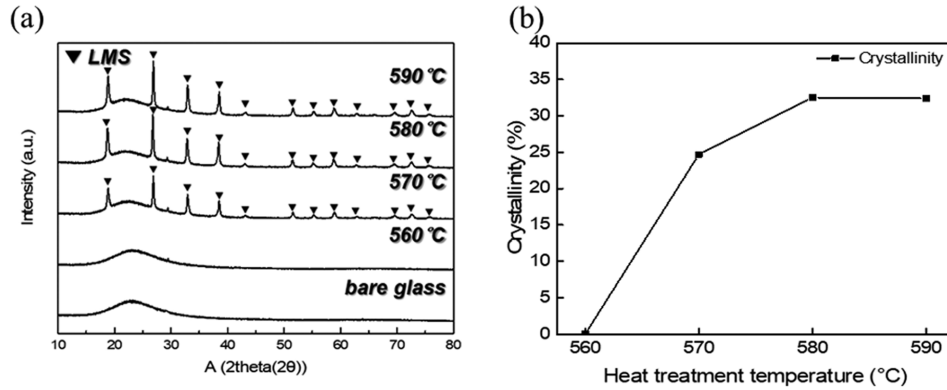


Fig. 4. (a) XRD patterns at different crystallization temperatures and (b) calculated degree of crystallinity from XRD analysis.

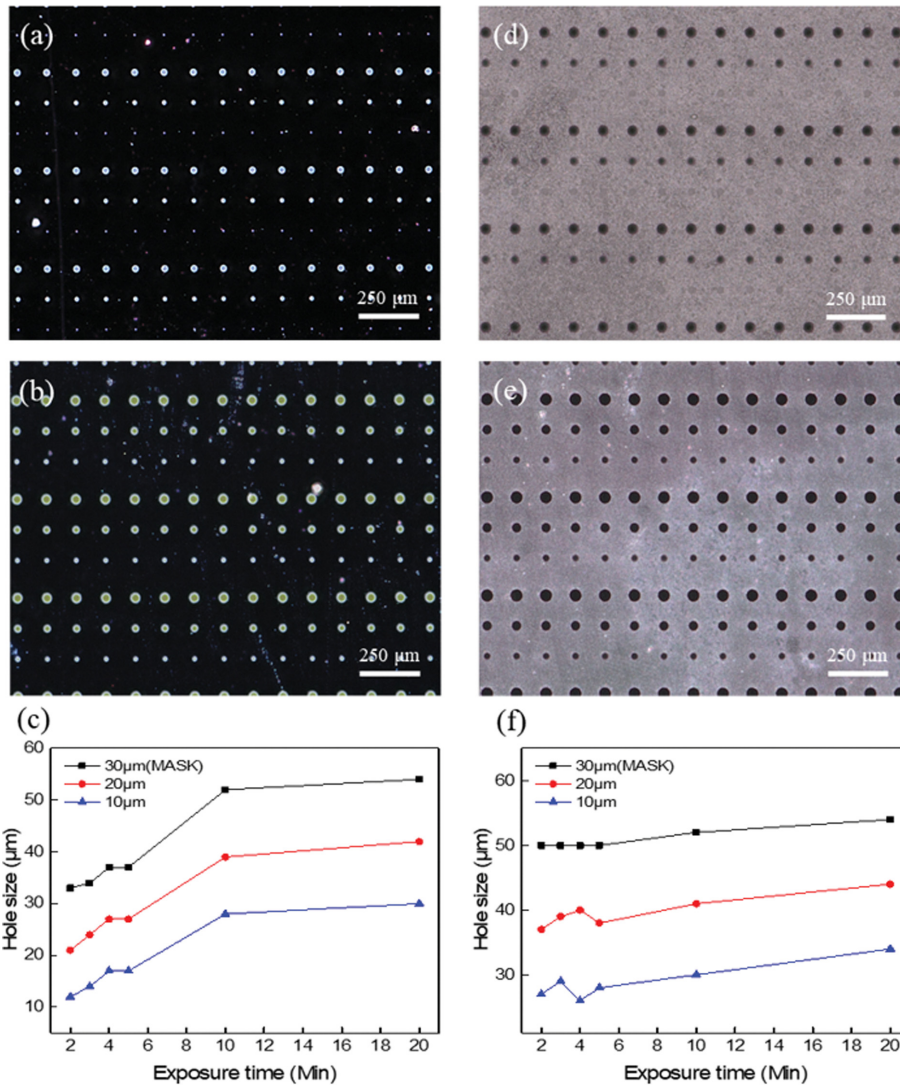


Fig. 5. (a, b) Optical images of crystallized regions after UV exposure for 2 min and 20 min, (c) variation of crystallized region diameter with exposure time, (d, e) optical images of etched regions after UV exposure for 2 min and 20 min, and (f) variation of etched via-hole diameter with exposure time.

9 $\mu\text{m}/\text{min}$ 에 불과했으나, 580°C 이상에서는 약 10.5 $\mu\text{m}/\text{min}$ 으로 증가하였다.

570°C 이상의 열처리 온도에서 LMS 결정화가 본격적으로 개시되었음을 XRD 분석 결과(Fig. 4, a)가 뒷받침한다. 560°C에서는 비정질 패턴만 관찰되었고, 570°C부터 LMS 결정 피크가 출현하였다. 이는 LMS 결정화가 핵생성에 필요한 임계 에너지를 초과해야만 개시된다는 점을 시사한다[20].

그래프(b)의 결정화도(Xc) 분석 결과에 따르면, 570°C에서 약 25%의 결정화도가 나타났고, 580°C 및 590°C에서는 약 32% 수준으로 포화 상태에 도달하였다. LMS 결정은 Li^+ 및 SiO_4^{4-} 이온의 열확산을 통해 성장하며 [16,20], 결정화도가 충분하지 않으면 HF에 대한 선택적 식각 반응성이 저하되어 비아 관통이 어렵다[21-23]. 570°C 조건에서는 LMS 결정화가 시작되어 식각은 일부 진행되었으나, 결정화도가 충분하지 않아 식각 속도가 저하

되어 동일조건에서 비아 관통이 이루어지지 않았다. 이 시편 역시 식각 시간을 추가로 부여하면 관통이 가능할 것으로 예상되지만, 불산 식각은 비정질 유리 기질에도 동시에 작용하여 비아홀 직경을 지속적으로 확대시키므로 패턴의 확장을 야기한다[22,23]. 따라서 식각 속도가 최대화되는 수준까지 결정화를 확보하는 것이 중요하며, 본 연구에서는 결정화도가 약 32%로 포화된 580°C 이상에서 안정적인 비아 형성이 가능함을 확인하였다.

3.2. TGV 치수에 영향을 미치는 공정인자

3.2.1. 노광 시간이 TGV 치수에 미치는 영향

Figure 5는 2~20분 동안 노광된 시편을 350°C에서 Ag 클러스터화하고 580°C에서 결정화한 후, 각각의 결정화 패턴 직경과 동일 시편의 식각(10 wt% HF, 20분) 후 비아 홀 직경을 측정된 결과이다.

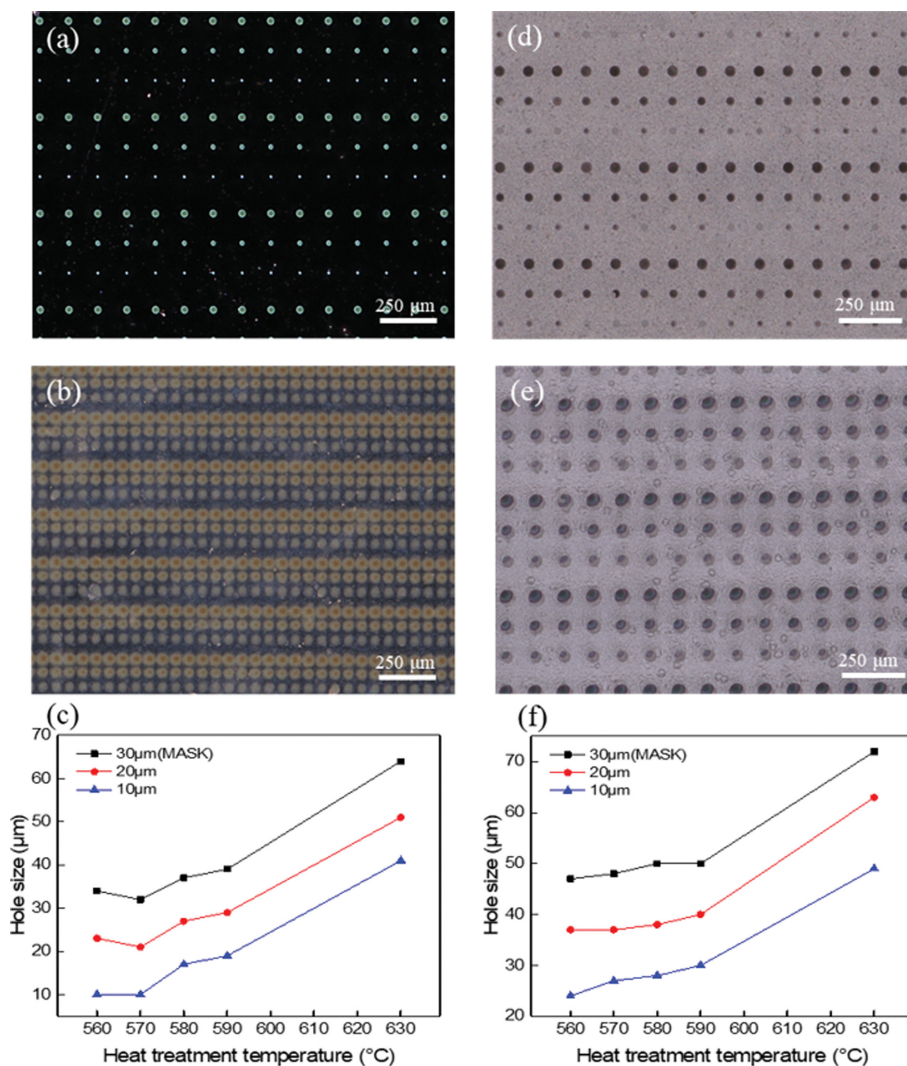


Fig. 6. (a, b) Optical images of crystallized regions after heat treatment at 580°C and 630°C, (c) variation of crystallized region diameter with crystallization temperature; (d, e) optical images of etched regions after heat treatment at 580°C and 630°C (f) variation of etched via-hole diameter with crystallization temperature.

노광 시간이 2~5분 구간에서는 패턴 크기 및 식각된 비아 홀 직경에서 큰 차이가 없었으나, 10분 이상 조건에서는 두 지름 모두 소폭 확장되는 경향이 나타났다. 이는 노광 시간이 증가함에 따라 광반응이 패턴 경계부까지 확장되고 이에따라 Ag^+ 이온의 환원 및 석출이 진행되어 결정화 영역이 확장된것으로 해석된다.

이러한 해석은 광학 시뮬레이션 결과(Fig. 2, c)에서도 확인된다. 짧은 노광 조건에서는 중심부에만 충분한 광량이 도달하지만, 노광 시간이 길어질수록 경계부까지 임계치 이상 노광되어 해당 영역에서도 Ce^{3+} 의 산화 및 Ag^+ 의 환원, 석출 반응이 유도된다. 그 결과 결정화 영역이 확장되며, 최종 식각 시 비아 홀 직경이 증가한다. 따라서 노광 시간이 2~5분 범위에서는 비아 홀 치수 변화가 거의 없으나, 10분 이상에서는 패턴 외곽 확장이 발생하여 비아 홀 크기가 증가하므로, 과도한 노광은 피하고 적절한 범위 내에서 노광 시간을 설정해야 한다. 기관의 최종 두께는 모든 조건에서 약 $400\ \mu\text{m}$ 로 유지되었으며, $20\ \mu\text{m}$ 및 $30\ \mu\text{m}$ 마스크 패턴에서는 2분의 노광 시 각각 약 10:1 및 8:1의 종횡비를 확보하였다. 또한 $10\ \mu\text{m}$ 패턴의 경우 최소 4분 노광 조건에서 약 13.3:1의 높은 종횡비가 달성되었다.

3.2.2. 결정화 온도가 TGV 치수에 미치는 영향

Figure 6은 5분간 노광한 샘플을 $560\sim 630^\circ\text{C}$ 의 결정화 온도로 열처리한 후, 결정화 패턴의 직경 및 식각 후 비아 홀 직경을 측정된 결과이다. 결정화 온도가 증가할수록

룩 LMS 결정화 영역이 확장되었으며, 이에 따라 식각된 비아 홀의 직경도 점차 증가하는 경향이 나타났다. 종횡비는 이전 파트에서 말한것과 동일한 $10\ \mu\text{m}$, $20\ \mu\text{m}$, $30\ \mu\text{m}$ 마스크 패턴에서 각각 약 13.3:1, 10:1 및 8:1의 종횡비를 보였다.

이러한 결과는 SEM 분석(Fig. 7)을 통해 구조적으로 설명할 수 있다. 해당 이미지는 노광 및 결정화 후 시편을 10초간 표면 식각한 단면으로, 파인 영역은 LMS 상이 존재했던 부분이며, 잔존 영역은 비정질 유리상으로 구성되어 있다. 고온 열처리 조건에서는 비노광 영역과 맞닿은 경계면에서 급격한 결정 성장이 발생하여 결정 크기가 커지고, 이로 인해 결정화 영역이 외곽으로 확장된 것으로 해석된다. 따라서 결정화 온도가 상승할수록 LMS 결정의 성장 범위와 크기가 증가하여 패턴 경계를 중심으로 식각 영역이 확대되고, 최종적으로 비아 홀 직경이 커지는 경향을 보인다. 본 연구에서는 안정적인 TGV 형성이 $580\sim 590^\circ\text{C}$ 범위에서 확인되었으며, 비아 치수의 정밀 제어를 위해 결정화 온도는 이 최소 요구 수준에서 유지되어야 한다.

3.2.3. 식각 시간에 따른 TGV 치수 변화

Figure 8은 5분간 노광 및 580°C 에서 결정화한 시편을 10 wt% HF 용액에 서로 다른 시간 동안 식각한 후, 비아 구조를 SEM으로 분석하고 직경을 측정된 결과이다. 식각 시간이 증가함에 따라 비아 홀 직경은 선형적으로 확장되는 경향을 보였으며, 이는 LMS 결정 영역

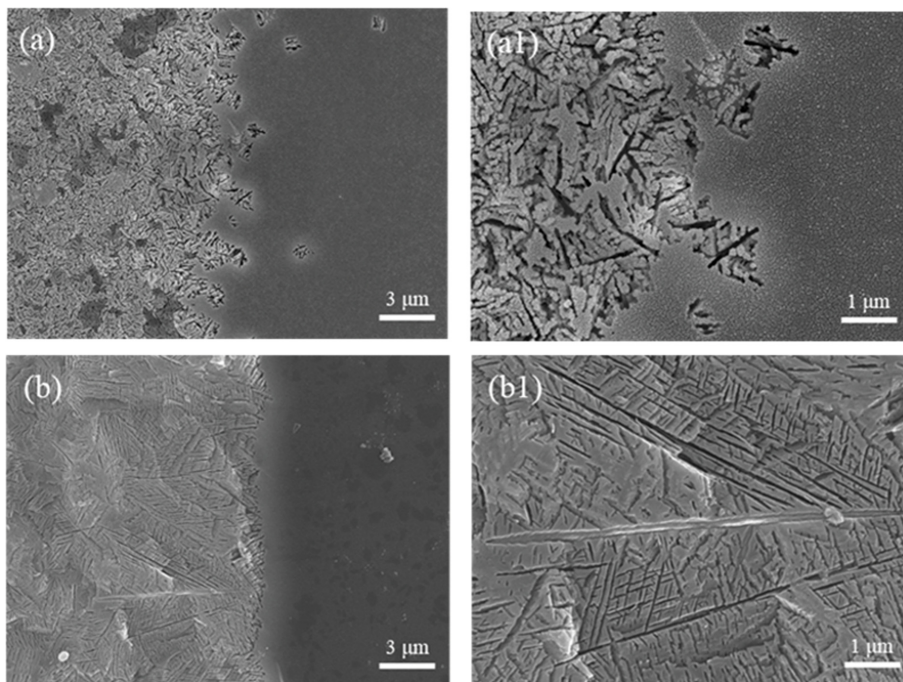


Fig. 7. SEM images of the boundary region between patterned and unexposed areas after crystallization at (a) 580°C and (b) 630°C , followed by 10-s etching; (a1, b1) show the corresponding enlarged views.

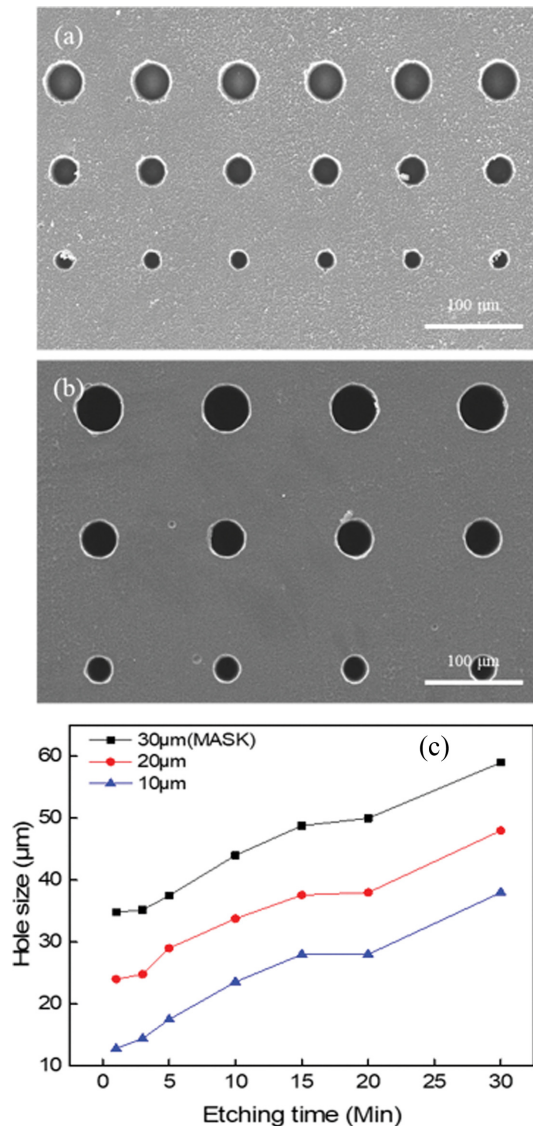


Fig. 8. (a, b) SEM images of via structures after etching for 5 min and 10 min, respectively; (c) variation of via-hole diameter as a function of etching time.

뿐만 아니라 인접한 비결정화 유리 영역이 함께 식각되었기 때문에 해석된다[22-24].

본 연구에서는 LMS와 비결정질 유리 간의 식각 선택비가 약 21:1로 확인되었으며, 식각이 진행됨에 따라 비아 홀 입구가 점차 확장되는 경향이 관찰되었다. 안정적인 비아 관통은 최소 20분 이상의 식각 조건에서만 구현되었으며, 이보다 짧은 시간에서는 비아가 완전히 형성되지 않았다. 이러한 결과는 식각 시간이 비아 홀의 직경 변화와 개구 신뢰성에 직접적인 영향을 미치는 핵심 인자임을 보여준다. 따라서 정밀한 TGV 형성을 위해서는 전처리 공정(노광, 결정화)을 통해 LMS 결정 영역의 식각 반응성을 극대화하고, 식각 시간은 가능한 최소 범위에서 제어함으로써 비아 홀 확장을 억제하고 설계 패턴의 재현성을 확보할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구는 감광성 유리를 이용한 TGV 구조 형성에서 노광 시간, 결정화 온도, 식각 조건이 비아 형성 및 품질에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다.

노광 시간은 결정화 반응 깊이에 영향을 주어 비아 홀 형성 여부와 직경을 결정하며, 과도한 노광은 패턴 확장을 유발할 수 있어 최소한의 반응 조건 설정이 필요하다. 결정화 온도는 LMS 결정 형성의 임계 조건으로, 580°C 이상에서 안정적인 비아 관통이 가능하였고, 패턴 확장을 억제하기 위해서는 가능한 낮은 온도 조건에서 열처리를 수행하는 것이 바람직하다. 식각 시간은 비아 홀 치수 및 관통 여부에 직접적으로 영향을 주며, 본 연구에서는 20분 이상이 안정적인 형성 조건으로 확인되었다.

본 연구에서 도출된 공정 조건은 고밀도 TGV 형성을 위한 기반 자료로 활용될 수 있으며, 향후 정밀 반도체 패키징 및 소형 전자소자 공정의 신뢰성 확보에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2024-00432244).

References

- [1] Wright, A. (2025, May 22). Worldwide IDC Global DataSphere forecast update, 2025-2029: Regional analysis (Report No. US53383425). IDC. <https://my.idc.com/getdoc.jsp?containerId=US53383425>.
- [2] Tom's Hardware, "TSMC mulls massive 1000W-class multi-chiplet processors with 40× the performance of standard models", Tom's Hardware (2024) 1.
- [3] R. Mahajan, R. Sankman, N. Patel, D.-W. Kim, K. Aygun, Z. Qian and D. Mallik, "Embedded multi-die interconnect bridge (EMIB) – A high density, high bandwidth packaging interconnect", Proc. IEEE Electron. Comp. Technol. Conf. 66 (2016) 557.
- [4] A.O. Watanabe, B.K. Tehrani, T. Ogawa, P.M. Raj, M.M. Tentzeris and R.R. Tummala, "Ultralow-loss substrate-integrated waveguides in glass-based substrates for millimeter-wave applications", IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol. 10 (2020) 531.
- [5] S. McCann, V. Smet, V. Sundaram, R.R. Tummala and S.K. Sitaraman, "Experimental and theoretical assessment of thin glass substrate for low warpage", IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol. 7 (2017) 178.
- [6] H. Ma, X. Gao and J.N. Reddy, "A microstructure-dependent Timoshenko beam model based on a modified couple stress theory", J. Mech. Phys. Solids 56

- (2008) 3379.
- [7] O. Ahmed, C. Okoro, S. Pollard and T. Jiang, "The effect of materials and design on the reliability of through-glass vias for 2.5D integrated circuits: A numerical study", *Multidiscip. Model. Mater. Struct.* 17 (2021) 451.
- [8] V. Sukumaran, T. Bandyopadhyay, Q. Chen, N. Kumbhat, F. Liu, R. Pucha and R.R. Tummala, "Design, fabrication and characterization of low-cost glass interposers with fine-pitch through-package-vias", *Proc. IEEE Electron. Comp. Technol. Conf.* 61 (2011) 583.
- [9] S.R. McCann, V. Sundaram, R.R. Tummala and S.K. Sitaraman, "Flip-chip on glass (FCOG) package for low warpage", *Proc. IEEE Electron. Comp. Technol. Conf.* 64 (2014) 2189.
- [10] L.A. Hof and J. Abou Ziki, "Micro-hole drilling on glass substrates—A review", *Micromachines* 8 (2017) 53.
- [11] J. Kim, I. Hwang, Y. Kim, J. Cho, V. Sundaram, R. Tummala and J. Kim, "Precise RLGC modeling and analysis of through glass via (TGV) for 2.5D/3D IC", *Proc. IEEE Electron. Comp. Technol. Conf.* 65 (2015) 254.
- [12] L. Brusberg, M. Queisser, C. Gentsch, H. Schröder and K.-D. Lang, "Advances in CO₂-laser drilling of glass substrates", *Phys. Procedia* 39 (2012) 548.
- [13] K.-H. Oh, M.K. Lee, S.G. Kim, H.T. Lim and S.H. Jeong, "Fabrication and application of high-aspect-ratio microchannels using laser-induced etching", *Proc. Korean Soc. Precis. Eng. Conf.* (2006) 659.
- [14] D. Hülsenberg, A. Harnisch and A. Bismarck, *Microstructuring of glasses*, Vol. 3 (Springer, Berlin, 2008) 1.
- [15] J.D. Williams, C. Schmidt and D. Serkland, "Processing advances in transparent Foturan® MEMS", *Appl. Phys. A* 99 (2010) 777.
- [16] S.D. Stookey, "Photosensitive glass", *Ind. Eng. Chem.* 41 (1949) 856.
- [17] U. Kreibig, "Small silver particles in photosensitive glass: Their nucleation and growth", *Appl. Phys.* 10 (1976) 255.
- [18] M. Lee and W. Kang, "Effects of UV irradiation on the crystalline phase with Li₂O-Al₂O₃-SiO₂-K₂O system", *J. Korean Ceram. Soc.* 34 (1997) 121.
- [19] Z. Ge, B. Xiong, Q. Li, X. Zhang and X. Yuan, "Spectral analysis study on the UV photosensitive properties and mechanisms of photo-thermo-refractive glass", *J. Non-Cryst. Solids* 658 (2025) 121128.
- [20] G.A. Sycheva, "Nucleation kinetics of lithium metasilicate in photosensitive lithium aluminosilicate glass", *Glass Phys. Chem.* 25 (1999) 501.
- [21] K. Ramamurthi, K.K. Lee and I.P. Herman, "Examination of the laser-induced variations in the chemical etch rate of a photosensitive glass ceramic", *Appl. Phys. A* 89 (2007) 97.
- [22] H. Park, J.H. Cho, J.H. Jung, P.P. Duy, A.H.T. Le and J. Yi, "A review of wet chemical etching of glasses in hydrofluoric acid based solution for thin film silicon solar cell application", *Curr. Photovolt. Res.* 5 (2017) 75.
- [23] U. Brokmann, C. Weigel, L.-M. Altendorf, S. Strehle and E. Rädlein, "Wet chemical and plasma etching of photosensitive glass", *Solids* 4 (2023) 213.
- [24] G.A.C.M. Spierings, "Wet chemical etching of silicate glasses in hydrofluoric acid based solutions", *J. Mater. Sci.* 28 (1993) 6261.