



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2016년10월28일  
(11) 등록번호 10-1670429  
(24) 등록일자 2016년10월24일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
G03F 1/00 (2006.01) G03F 1/50 (2012.01)  
(21) 출원번호 10-2014-0188670  
(22) 출원일자 2014년12월24일  
심사청구일자 2014년12월24일  
(65) 공개번호 10-2016-0078042  
(43) 공개일자 2016년07월04일  
(56) 선행기술조사문헌  
KR1020080023303 A\*  
\*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자  
한밭대학교 산학협력단  
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX  
(72) 발명자  
이정봉  
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX  
류광기  
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX  
(74) 대리인  
추혁

전체 청구항 수 : 총 11 항

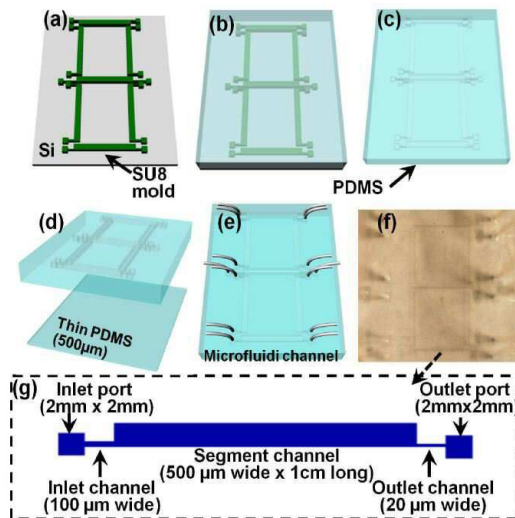
심사관 : 심병로

(54) 발명의 명칭 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크 및 이의 제조방법

(57) 요약

본 발명은 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크 및 이의 제조방법에 관한 것으로서, 중공을 형성시킨 투광성기관과, 중공에 충전된 마이크로 유체와, 마이크로 유체를 가변시키는 가변자를 포함한다. 본 발명에 따르면, 패턴을 가변시킬 수 있으므로 다양한 포토마스크로의 이용이 가능하다.

대표도 - 도5



이 발명을 지원한 국가연구개발사업  
과제고유번호 ITAHB616130110010001000100100  
부처명 미래창조과학부  
연구관리전문기관 정보통신산업진흥원  
연구사업명 해외인재 스카우팅 사업  
연구과제명 나노·바이오융합 SoC 개발  
기 여 율 1/1  
주관기관 연구사업지원팀  
연구기간 2014.02.11 ~ 2015.02.10

---

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

중공을 형성시킨 투광성기관;

상기 중공에 충전되며 전자기장에 의해 이동되는 마이크로 유체; 및

상기 마이크로 유체를 가변시켜 상기 마이크로 유체에 의해 형성되는 패턴을 가변시키는 가변자를 포함하는 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크.

#### 청구항 2

제1항에 있어서,

상기 가변자는 전자기장을 형성할 수 있는 장치이며, 상기 마이크로 유체는 액체금속인 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크.

#### 청구항 3

제2항에 있어서,

상기 액체금속은 갈륨화합물인 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크.

#### 청구항 4

제1항 내지 제3항 중의 어느 한 항에 있어서,

상기 마이크로 유체에 형성되는 산화막을 제거하는 산화막 제거기를 상기 투광성기관 또는 상기 중공에 대응하게 형성시키는 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크.

#### 청구항 5

제4항에 있어서,

상기 투광성기관은 PDMS(polydimethylsiloxane)인 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크.

#### 청구항 6

제5항에 있어서,

상기 산화막 제거기에서는 염산의 공급이 이루어지는 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크.

#### 청구항 7

제1항에 있어서,

상기 가변자는,

상기 마이크로 유체를 공급 및 배출할 수 있는 투광성기관에 연결된 튜브; 및

상기 튜브에 연결된 펌핑수단을 포함하는 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크.

### 청구항 8

제7항에 있어서,

상기 튜브는 공급튜브와 배출튜브를 포함하는 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크.

### 청구항 9

제8항에 있어서,

공급튜브측에 형성되는 공급채널의 폭과 배출튜브측에 형성되는 배출채널의 폭을 서로 다르게 구성하는 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크.

### 청구항 10

제1투광성기판에 중공을 형성하는 단계;

상기 제1투광성기판에 제2투광성기판을 결합시키는 단계;

상기 중공에 전자기장에 의해 이동되는 마이크로 유체를 충전하고 밀봉시키는 단계;

상기 마이크로 유체를 가변시키는 가변자를 형성시키는 단계를 포함하고,

상기 마이크로 유체의 가변에 대응하여 패턴이 가변되는 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크의 제조방법.

### 청구항 11

기판 상에 포토레지스트를 도포하는 단계;

상기 포토레지스트에 중공을 패터닝하는 단계;

제1투광성기판의 재료를 이용하여 중공 형상의 역상을 복제하여 제1투광성기판을 제작하는 단계;

상기 제1투광성기판에 상기 중공에 이르는 홀을 형성시키는 단계;

상기 제1투광성기판에 제2투광성기판을 접합시키는 단계;

상기 제1투광성기판에 형성된 홀에 튜브를 연결하는 단계; 및

상기 튜브에 마이크로 유체를 공급 및 배출하는 펌핑수단을 연결하는 단계를 포함하고,

상기 마이크로 유체의 공급 및 배출에 따라 패턴이 가변되는 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크의 제조방법.

### 발명의 설명

#### 기술 분야

[0001] 본 발명은 포토마스크 및 이의 제조방법에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 투광성기판에 형성된 중공에 마이크로 유체를 주입하여 패턴을 형성 및 가변시키는 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크 및 이의 제조방법에 관한 것이다.

#### 배경 기술

[0002] 반도체 제작 공정 중 가장 중요한 공정의 하나인 리소그래피 기술은 무어(Moore)의 법칙에 따라 계속 작아지는

최소 배선폭(feature size)을 구현하기 위해 혁신적 기술들이 제안되고 있으며, 현재 projection printing, absorbance modulation 리소그래피, 나노 임프린트 리소그래피 등의 기술이 이용되고 있다. 이러한 리소그래피 기술은 포토마스크에 의한 빛의 투과(transparent) 또는 차광(opaque)을 통해 바이너리(binary) 패턴으로 구현된다. 그런데, 기존 리소그래피 기술은 포토마스크 제작이 완료되면 수정이 불가능한 "수동적" 포토마스크라는 단점이 있다.

[0003] 이러한 수동적 포토마스크의 한계를 뛰어 넘는 새로운 시도들이 제안되고 있다. 즉, 포토마스크를 기울이거나 회전시킨 상태에서 노광을 하거나[1], 포토마스크 자체를 액츄에이터로 움직이며 노광하거나[2], 마이크로 채널에 빛을 흡수하는 염료를 주입하여 노광하는 기술들이 제안된 바 있다[3]. 이러한 시도들은 포토마스크에서 포토레지스트(photoresist)로 전사(transfer)되는 패턴의 두께를 필요에 따라 변화시키는 준 3차원 리소그래피로 응용되고 있다.

[0004] 한편, 평면상의 바이너리(binary) 패턴을 원하는 대로 움직이며 구현하는 "가변" 리소그래피를 구현하려는 최초의 시도는 액정패널을 포토마스크로 응용한 것이다[4]. 그런데, 이 기술은 투과되는 자외선의 에너지 도즈(dose)(120 mJ/cm<sup>2</sup>)와 차광되는 에너지 도즈(93 mJ/cm<sup>2</sup>)의 차이가 크지 않아 이상적 포토마스크의 특성과는 거리가 먼 결과를 나타내고 있다.

### 선행기술문헌

#### 특허문헌

- [0005] (특허문헌 0001) 대한민국 공개특허공보 제10-2005-0060548호(공개일 2005.06.22.)  
 (특허문헌 0002) 대한민국 공개특허공보 제10-2012-0007573호(공개일 2012.01.25.)

#### 비특허문헌

- [0006] (비특허문헌 0001) [1] M. Han, W. Lee, S.-K. Lee, S.S. Lee, "3D microfabrication with inclined/rotated UV lithography," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 111, pp. 14-20, 2004.  
 (비특허문헌 0002) [2] Y. Hirai, Y. Inamoto, K. Sugano, T. Tsuchiya, and O. Tabata, "Moving mask UV lithography for three-dimensional structuring," Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 17, p.199, 2007.  
 (비특허문헌 0003) [3] C. Chen, D. Hirdes, A. Folch, "Gray-scale photolithography using microfluidic photomasks," Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 100, pp. 1499-1504, February 18, 2003 2003.  
 (비특허문헌 0004) [4] Q. Peng, C. Zhou, Z. Cui, S. Liu, Y. Guo, B. Chen, J. Du, Y. Zeng, "Real-time photolithographic technique for fabrication of arbitrarily shaped microstructures," Optical Engineering, vol. 42, pp. 477-481, 2003.

### 발명의 내용

#### 해결하려는 과제

- [0007] 따라서, 본 발명은 상기한 종래 기술의 문제점을 해결하기 위해 이루어진 것으로서, 본 발명의 목적은 투광성기판에 주입되거나 주입된 마이크로 유체를 가변자로 조절하여 가변 패턴을 형성시킬 수 있도록 하는 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크 및 이의 제조방법을 제공하는데 있다.

#### 과제의 해결 수단

- [0008] 상기와 같은 목적을 달성하기 위한 본 발명의 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크는, 중공을 형성시킨 투광성 기관; 중공에 충전된 마이크로 유체; 및 마이크로 유체를 가변시키는 가변자를 포함하는 것을 특징으로 한다.
- [0009] 상기 가변자는 전자기장을 형성할 수 있는 장치일 수 있으며, 상기 마이크로 유체는 액체금속일 수 있다. 상기 액체금속은 갈륨화합물일 수 있다.
- [0010] 상기 마이크로 유체에 형성되는 산화막을 제거하는 산화막 제거기를 상기 투광성기관 또는 상기 중공에 대응하게 형성시키는 것이 바람직하다. 이 때, 상기 투광성기관은 PDMS(polydimethylsiloxane)인 것이 바람직하다. 상기 산화막 제거기에서는 염산의 공급이 이루어지는 것이 바람직하다.
- [0011] 상기 가변자는, 상기 마이크로 유체를 공급 및 배출할 수 있는 투광성기관에 연결된 튜브; 및 상기 튜브에 연결된 펌핑수단을 포함할 수 있다. 상기 튜브는 공급튜브와 배출튜브를 포함하는 것이 바람직하다. 이 때, 공급튜브측에 형성되는 공급채널의 폭과 배출튜브측에 형성되는 배출채널의 폭을 서로 다르게 구성하는 것이 바람직하다.
- [0012] 한편, 본 발명의 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크의 제조방법은, 제1투광성기관에 중공을 형성하는 단계; 상기 제1투광성기관에 제2투광성기관을 결합시키는 단계; 상기 중공에 마이크로 유체를 충전하고 밀봉시키는 단계; 및 상기 마이크로 유체를 가변시키는 가변자를 형성시키는 단계를 포함하는 것을 특징으로 한다.
- [0013] 그리고, 본 발명의 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크의 제조방법은, 기관 상에 포토레지스트를 도포하는 단계; 상기 포토레지스트에 중공을 패터닝하는 단계; 제1투광성기관의 재료를 이용하여 중공 형상의 역상을 복제하여 제1투광성기관을 제작하는 단계; 상기 제1투광성기관에 상기 중공에 이르는 홀을 형성시키는 단계; 상기 제1투광성기관에 제2투광성기관을 접합시키는 단계; 상기 제1투광성기관에 형성된 홀에 튜브를 연결하는 단계; 및 상기 튜브에 마이크로 유체를 공급하는 펌핑수단을 연결하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 한다.

**발명의 효과**

- [0014] 상술한 바와 같이, 본 발명에 의한 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크 및 이의 제조방법에 따르면, 패턴을 가변시킬 수 있으므로 다양한 포토마스크로의 이용이 가능하다.

**도면의 간단한 설명**

- [0015] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 의한 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크의 구성도이다.
- 도 2는 본 발명의 일 실시예에 의한 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크의 제조방법을 나타낸 흐름도이다.
- 도 3은 본 발명의 다른 실시예에 의한 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크의 제조방법을 나타낸 흐름도이다.
- 도 4의 본 발명에서 7-segment 마이크로 채널을 이용한 가변 포토마스크의 동작원리를 개념적으로 나타낸 도면이다.
- 도 5는 본 발명의 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크를 제작하는 개념도이다.
- 도 6은 본 발명의 가변 포토마스크 실증 실험의 예이다.
- 도 7은 본 발명에서 패턴이 전사된 포토레지스트를 각 섹터마다 비교한 사진이다.
- 도 8은 본 발명에서 노광시 섹터가 변화되는 이유를 설명한 도면이다.
- 도 9는 본 발명의 액체금속 포토마스크와 전사된 포토레지스트의 영상을 제시한다.
- 도 10은 본 발명에서 액체금속의 자외선 차광 특성을 대비한 그래프이다.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

- [0016] 이하, 본 발명의 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크 및 이의 제조방법에 대하여 첨부된 도면을 참조하여 상세히 설명하기로 한다.
- [0017] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 의한 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크의 구성도이다.
- [0018] 도 1을 참조하면, 본 발명의 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크는, 중공(S)을 형성시킨 투광성기관(1)과, 중공(S)에 충전된 마이크로 유체(2)와, 마이크로 유체(2)를 가변시키는 가변자(3)를 포함한다.
- [0019] 여기서, 가변자(3)는 전자기장을 형성할 수 있는 장치일 수 있다. 이에, 마이크로 유체(2)는 액체금속을 이용하여야 한다. 또한, 액체금속이 전자기장에 의해 이동이 가능하도록 충전량을 조절하는 것이 바람직하다. 그리고, 액체금속의 이동에 대응하여 다양한 패턴이 형성될 수 있도록 중공(S)은 3차원으로 형성될 수 있다.
- [0020] 한편, 가변자(3)는 충전된 마이크로 유체(2)를 공급 및 배출할 수 있는 투광성기관(1)에 연결된 튜브 및 튜브에 연결된 펌핑수단일 수 있다. 이 때, 튜브의 형성을 위해, 투광성기관(1)은 상부기관 및 하부기관으로 이루어지는 것이 바람직하다. 즉, 상부기관 또는 하부기관 중에서 어느 하나의 기관에 튜브가 관통되도록 연결하여 마이크로 유체(2)를 공급 및 배출할 수 있도록 하는 것이 바람직하다. 이 때, 튜브는 공급튜브와 배출튜브를 각각 형성시키는 것이 바람직하며, 공급튜브측에 형성되는 공급채널의 폭과 배출튜브측에 형성되는 배출채널의 폭을 서로 다르게 구성하여 공급과 배출의 비율을 조절하는 것이 더욱 바람직할 것이다. 바람직하게는 공급채널의 폭이 배출채널의 폭보다 큰 것이 바람직할 것이다.
- [0021] 여기서, 가변자(3)가 튜브 및 펌핑수단일 경우, 중공(S) 및 중공(S)과 연결된 튜브 내부가 진공상태가 아닐 수 있으므로 마이크로 유체(2)의 산화를 고려하여 마이크로 유체(2)에 형성되는 산화막을 제거하는 산화막 제거기(미도시)를 투광성기관(1) 또는 투광성기관(1)의 중공(S)에 대응하게 형성시키는 것도 바람직하다. 한편, 산화막 제거기를 이용할 경우, 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크는 액츄에이터 등을 이용하여 마이크로 유체의 자중에 의한 가변이 가능할 수 있다.
- [0022] 그러면, 여기서 상기와 같이 구성된 포토마스크의 제조방법에 대해 설명하기로 한다.
- [0023] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 의한 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크의 제조방법을 나타낸 흐름도이다.
- [0024] 도 2를 참조하면, 제1투광성기관에 중공을 형성한다(S1).
- [0025] 제1투광성기관에 제2투광성기관을 결합시킨다(S2).
- [0026] 중공에 마이크로 유체를 충전하고 밀봉한다(S3). 이 때, 충전 및 밀봉 과정은 마이크로 유체의 산화막 형성을 방지하기 위해 진공에서 이루어질 수 있다.
- [0027] 여기에 마이크로 유체를 가변시키는 가변자를 형성시킨다(S4). 이 때, 가변자는 전자기장을 형성할 수 있는 장치이면 된다. 이에, 마이크로 유체는 액체금속을 이용하여야 한다. 또한, 액체금속이 전자기장에 의해 이동이 가능하도록 충전량을 조절하는 것이 바람직하다. 그리고, 액체금속의 이동에 대응하여 다양한 패턴이 형성될 수 있도록 중공은 3차원으로 형성될 수 있다.
- [0028] 한편, 가변자는 제1투광성기관 및 제2투광성기관을 결합한 결합체의 3축 이동이 가능한 액츄에이터일 수 있다. 이는 자중에 의해 마이크로 유체를 이동시키기 위한 것이다.
- [0029] 도 3은 본 발명의 다른 실시예에 의한 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크의 제조방법을 나타낸 흐름도이다.
- [0030] 도 3을 참조하면, 산화막이 형성된 기관 상에 포토레지스트를 도포한다(S11).
- [0031] 포토레지스트에 중공용 패턴을 형성한다(S12).
- [0032] 제1투광성기관의 재료를 이용하여 중공용 패턴의 역상을 복제하여 제1투광성기관을 제작한다(S13).
- [0033] 제1투광성기관의 중공에 이르는 홀을 형성시킨다(S14). 이 때, 홀은 공급홀 및 배출홀을 형성시킬 수 있다.
- [0034] 제1투광성기관에 제2투광성기관을 접합시킨다(S15).
- [0035] 제1투광성기관에 형성된 홀에 튜브를 연결한다(S16). 튜브는 공급튜브와 배출튜브를 각각 형성시킬 수 있다.

- [0036] 튜브에 마이크로 유체를 공급하는 펌핑수단을 연결한다(S17).
- [0037] 한편, 공급튜브에서 중공을 연결하는 공급채널의 폭과 배출튜브에서 중공을 연결하는 배출채널의 폭은 서로 다르게 구성하는 것이 바람직하다. 바람직하게는 공급채널의 폭이 배출채널의 폭보다 큰 것이 바람직하다. 이는 중공에 액체금속을 주입할 때 배출채널로 액체금속이 너무 쉽게 빠져나가지 않도록 하기 위한 것이다.
- [0038] [실시예]
- [0039] 본 발명은 자외선 투과 폴리머의 일종인 PDMS(polydimethylsiloxane)에 마이크로 채널을 형성하고 그 채널에 자외선 차광 특성이 있는 갈륨화합물 액체 금속을 주입/제거하여 갈륨화합물의 위치를 능동적으로 변화시킴으로써 바이너리(binary) 패턴에 변화를 줄 수 있는 능동형 가변 포토마스크와 이를 이용한 리소그래피에 관한 것이다.
- [0040] 본 실시예에서는 가변 포토마스크 구현을 위해 PDMS(polydimethylsiloxane)를 이용하여 7-segment 형태의 마이크로 채널을 제작하고, 각각의 세그먼트 채널에 필요에 따라 갈륨화합물 액체금속을 주입 또는 제거하여 숫자 0에서 9까지를 능동적으로 가변시키는 경우를 예시하기로 한다. 반도체 노광 공정에 사용되는 i-line(365 nm)과 g-line(435 nm) 자외선 영역에서 PDMS는 약 93%의 투과율을 보이는 반면에 갈륨화합물이 주입된 PDMS 채널은 1% 미만의 투과율을 나타낸다. 이러한 가변 포토마스크를 이용한 리소그래피로 구현 가능한 최소 배선평(feature size)을 찾기 위해 다양한 선폭의 직선 패턴과 말발굽 형태의 패턴, 텍사스 주 지도 형태의 패턴의 노광을 통한 전사를 구현하는 경우를 예시하기로 한다.
- [0041] 도 4의 (a)는 7-segment 마이크로 채널을 이용한 가변 포토마스크의 동작원리를 개념적으로 보여주고 있다. 먼저 갈륨화합물의 일종인 갈린스탄(Galinstan)(갈륨, 인듐, 주석의 화합물)을 7-segment 채널의 일부에만 선택적으로 주입하여 숫자 '2'를 구현하고 있다. 이 포토마스크를 이용하여 실리콘 기판 위에 도포된 포지티브 포토레지스트(positive photoresist)에 바로 리소그래피를 하면 포토레지스트에 바로 숫자 '2'의 패턴을 전사할 수 있다. 숫자 '2'에서 다시 선택적으로 일부 세그먼트 채널의 액체금속을 제거/주입함으로써 숫자 '3'을 구현하고, 이를 포토레지스트에 전사할 수 있다. 이러한 동작 원리를 통하여, 도 4의 (b)에서와 같이, '0'에서 '9'까지의 숫자를 능동적으로 가변시키는 것이 가능하다.
- [0042] 이어서, 마이크로 유체 기반 가변 포토마스크의 제조방법에 대해 설명한다.
- [0043] PDMS 7-segment 마이크로 채널의 제작은 일반적으로 사용되고 있는 SU-8 몰딩 기법을 사용한다. 도 5에 도시된 바와 같이 먼저, 산화막이 형성된 실리콘 기판 위에 약 25 um 두께의 SU-8 2025 포토레지스트를 스핀 코팅으로 도포한다. 도포된 포토레지스트는 65°C 2분간, 95°C에서 3분간, 다시 65°C에서 2분간 진행되는 3단계 열처리 공정을 거친다. 그 후 140 mJ/cm<sup>2</sup>의 노광 에너지를 통한 자외선 노광으로 7-segment 마이크로 채널 형상을 패터닝하고, 노광후 열처리 공정으로 상기한 3단계 열처리 공정을 동일하게 진행한다(도 5의 (a)). 이와 같이 형성된 SU-8 패턴 위에 PDMS를 붓고 24시간 동안 상온 처리를 한다(도 5의 (b)). 24시간 후 PDMS를 SU-8 몰드에서 벗겨 내면 마이크로 채널 형상의 역상(inverse image)이 복제된다(도 5의 (c)). 복제된 PDMS 채널의 입출력 단에 구멍을 뚫고난 후, 산화 플라즈마 과정을 통하여 500 um 두께의 또 다른 패턴되지 않은 PDMS 층을 복제된 PDMS 층과 접합시킨다(도 5의 (d)). 이어서, PTFE 튜브를 마이크로 채널에 연결한다(도 5의 (e)). 이렇게 제작된 7-segment 마이크로 채널은 일례로서 폭 500 um, 길이 1 cm이다(도 5의 (f)). 각각의 마이크로 채널은 폭 100 um의 입력단과 폭 20 um의 출력단이 있다(도 5의 (g)). 입력단과 출력단 채널의 폭은 의도적으로 비대칭적으로 설계되었는데 이는 직선 채널에 액체금속을 주입할 때에 출력단으로 액체금속이 너무 쉽게 빠져나가지 않도록 하기 위한 것이다. 입력단과 출력단의 중단부에는 PTFE 튜브가 연결되는 2 mm x 2 mm 크기의 정사각형 포트가 있다. 액체금속의 주입/제거에는 PTFE 튜브에는 주사기가 연결되어 있고, 주사기는 주사기 펌프(syringe pump)로 제어할 수 있다.
- [0044] 이와 같이 제작된 PDMS 7-segment 마이크로 채널을 이용하여 실시간 가변 포토마스크의 가능성 여부를 확인하기로 한다.

[0045] PDMS 7-segment 마이크로 채널은 진공 패키징이 되어 있는 것이 아닐 수 있으므로 갈륨화합물 액체 금속을 주입하는 과정에서 액체금속은 공기와 접촉될 수 있고, 이에 액체금속 표면에 산화막이 형성되게 된다. 이러한 산화막은 마이크로 채널 벽에 달라붙는 점착성이 강해 액체금속의 주입/제거에 많은 문제점을 야기하게 된다. 이를 해결하기 위해 액체금속을 주입/제거하기 직전에 PDMS 7-segment 마이크로 채널 기판을 염산이 저장된 PDMS에 올려 놓아 염산의 PDMS를 통한 확산에 의한 화학반응으로 산화막을 제거한다. 이에 액체금속이 점착성을 갖지 않는 진정한 액체 상태가 되어 자유로이 주입/제거가 가능해진다. 염산 확산을 통한 산화막 제거에 대한 내용은 [D. Kim, P. Thissen, G. Viner, D.-W. Lee, W. Choi, Y.J. Chabal, J.-B. Lee, "Recovery of Nonwetting Characteristics by Surface Modification of Gallium-Based Liquid Metal Droplets Using Hydrochloric Acid Vapor," ACS Applied Materials & Interfaces, vol. 5, pp. 179-185, 2013.], [G. Li, M. Parmar, D. Kim, J.-B. Lee, D.-W. Lee, "PDMS based coplanar microfluidic channels for the surface reduction of oxidized Galinstan," Lab on a Chip, vol. 14, pp. 200-209, 2014.]에 자세히 기록되어 있으므로 상세한 설명은 생략하기로 한다.

[0046] 가변 포토마스크 실증 실험으로서, 도 6의 (a)와 같이, 갈린스탄을 특정한 채널에서 주입/제거함으로써 숫자 7에서 9, 9에서 4로 가변한다. 먼저 4개의 채널에 액체금속을 주입하여 숫자 7을 구현한 후, 중앙의 채널에 액체금속을 추가로 주입하여 숫자 9를 구현한다. 액체금속의 평균 주입 속도는 일레로서 초당 1.25 cm 이며, 유량은 분당 10 uL 이다. 액체금속의 평균 제거 속도는 초당 3.34 cm 이고 유량은 분당 25 uL 이다. 본 실시예에서 제시한 포토마스크의 채널 길이가 1 cm이므로 채널에 액체금속을 주입/제거하는데 소요되는 시간이 1초 미만임을 알 수 있으며, 산화막이 제거된 액체금속 상태이므로 채널 내벽에 찌꺼기가 남아 있지 않음을 확인할 수 있다. 도 6의 (b)는 실증 실험을 진행하면서 가변적으로 구현된 숫자 7, 9, 4의 포토마스크 영상이다. 가변 포토마스크의 패턴을 포토레지스트에 전사하는 실험을 하기 위해서 Shipley 1813 포토레지스트를 1.3 um 두께로 실리콘 웨이퍼 위에 스핀 코팅하고, 115℃에서 1분간 열처리 한 후, 120 mJ/cm<sup>2</sup>의 에너지로 자외선 노광한다. 노광 후 MF-319 현상액을 이용하여 1분간 현상하여 도 6의 (c)와 같은 숫자 7, 9, 4 각각의 전사 패턴을 얻을 수 있다.

[0047] 한편, 가변 포토마스크를 이용한 리소그래피의 최소 배선폭(feature size)을 알아내기 위해 선폭이 다양한 여러 선형 채널을 상기한 SU-8 공정을 이용하여 제작한다. 선폭으로, 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100, 250, 500 um를 사용한다. 이 가운데 액체금속을 5 um 이하 선폭의 채널에 주입하는 것이 불가능하였는데 이는 갈륨화합물 액체금속의 표면장력이 매우 높기 때문에 벌어지는 현상으로 해석 가능하다. 결과적으로 이 실험을 통해 구현 가능했던 최소 선폭은 10 um이다. 도 7은 액체금속이 주입된 포토마스크와 노광 공정을 통하여 패턴이 전사된 포토레지스트를 각 선폭마다 1:1로 비교한 영상이다.

[0048] 액체금속 포토마스크와 전사된 포토레지스트의 선폭을 측정할 결과는 [표 1]과 같다. [표 1]에서와 같이, 500 um 선폭을 제외하면 액체금속 포토마스크의 선폭 W<sub>1</sub>이 목표 선폭 W 보다 약간 크며, 선폭이 좁아질수록 목표 선폭에서 벗어나는 편차가 커지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 PDMS가 기계적으로 유연한 특성을 지니고 있어서 좁은 선폭의 마이크로 채널에 액체금속을 주입할 때 약간의 기계적 변형이 일어나기 때문인 것으로 분석된다.

표 1

Target Width (W) (μm)	Liquid metal Galinstan® width in channel (W <sub>1</sub> )			Patterned S1813 width (W <sub>2</sub> )			
	Average value (μm)	Error bar (±)	Deviation from 'W' (%)	Average value (μm)	Error bar (±)	Deviation from 'W' (%)	Deviation from 'W <sub>1</sub> ' (%)
10	11.63	0.92	14.01	9.98	2.65	0.20	14.19
25	26.95	0.82	7.24	26.11	0.64	4.44	3.12
50	52.10	1.52	4.03	51.75	2.22	3.50	0.67
100	100.81	2.66	0.80	100.33	1.05	0.33	0.48
250	250.24	1.12	0.10	248.64	2.39	0.54	0.64
500	496.57	1.37	0.70	494.06	3.24	1.19	0.51

[0049]

[0050] 또한, 전사된 포토레지스트의 선폭  $W_2$ 가 액체금속 포토마스크의 선폭  $W_1$ 보다 약간 작으며, 목표 선폭에서의 최대 편차가 각 4.44%, 14.19%에 이르는 것을 확인할 수 있다. 이러한 편차는 본 실험의 노광이 프레넬(Fresnel) 회절에 따른 근접(proximity) 노광이므로 발생하는 필연적인 결과이다. 본 실험에 사용된 노광이 근접 노광인 이유를 도 8에 표현하고 있는데, 여기서  $g$ 는 액체금속 포토마스크 하단과 포토레지스트 상단 간의 간격인데 본 실험의 포토마스크는 500 um 두께의 PDMS를 기관으로 사용하고 그 위에 채널을 형성하여 이 간격이 500 um이 된다. 도 8에서  $W_1$ ,  $W_2$ 는 액체금속 포토마스크 선폭, 포토레지스트 선폭이고  $i_s$ 는 포토레지스트 표면에서의 광 강도(intensity)를 나타낸다. 노광시 포토마스크에 입사되는 평면파가 마스크를 통과하면서 마스크 에지(edge) 부분에서 발생된 회절 현상 때문에 빛이 격이게 되고, 이 때문에 포토마스크의 선폭 바깥쪽으로 노광이 되어 양성 포토레지스트인 경우 패턴 선폭이 좁아지게 된다.

[0051] 한편, 여러 선폭의 직선 마스크와 더불어 본 발명의 포토마스크의 유용성을 실증하기 위해 말발굽 형태와 텍사스 지도 형태의 패턴 전사 실험도 진행한다. 말발굽 형태 채널의 선폭은 25 um, 텍사스 지도의 크기는 1.53 mm x 1.24 mm 이며, 도 9에 액체금속 포토마스크와 전사된 포토레지스트의 영상을 제시한다.

[0052] 그리고, 액체금속의 자외선 차광 특성을 검증하기 위해 i-line(365 nm)과 400 nm 자외선 파장을 이용하여 측정 실험을 진행한다.

[0053] 실험에 이용된 시료는 5 mm 두께의 PDMS 단층, 5 mm 두께의 PDMS + 갈린스탄 액체금속 + 500 um 두께의 PDMS 삼중층, 보편적으로 사용되는 유리기관 포토마스크의 크롬 차광층 이다. 도 10에 도시된 바와 같이, i-line 자외선은 PDMS 단층에서 93.6%의 투과율을 갖는 반면, PDMS/액체금속/PDMS 삼중층에서는 0.62%의 투과율을 나타내고 있다. 400 nm 자외선에서도 거의 유사한 결과를 나타내며, 96.24%, 0.22%의 투과율을 각각 나타내고 있다. 이 실험 결과는 액체금속이 매우 유용한 자외선 차광 재료임을 실증한다.

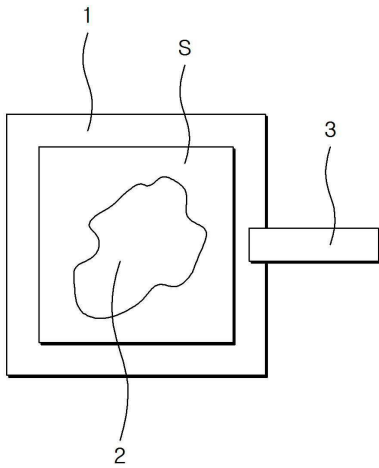
[0054] 이상에서 몇 가지 실시예를 들어 본 발명을 더욱 상세하게 설명하였으나, 본 발명은 반드시 이러한 실시예로 국한되는 것이 아니고 본 발명의 기술사상을 벗어나지 않는 범위 내에서 다양하게 변형 실시될 수 있다.

**부호의 설명**

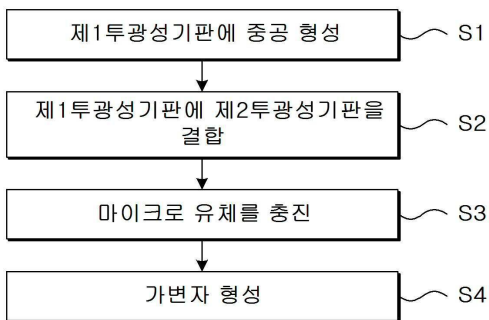
- [0055] 1 : 투광성기관
- 2 : 마이크로 유체
- 3 : 가변자

도면

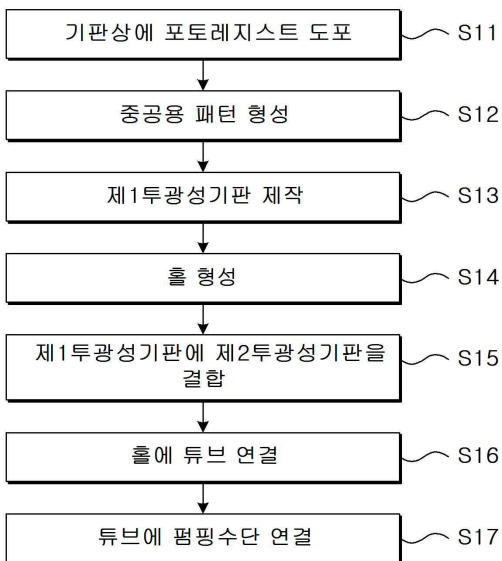
도면1



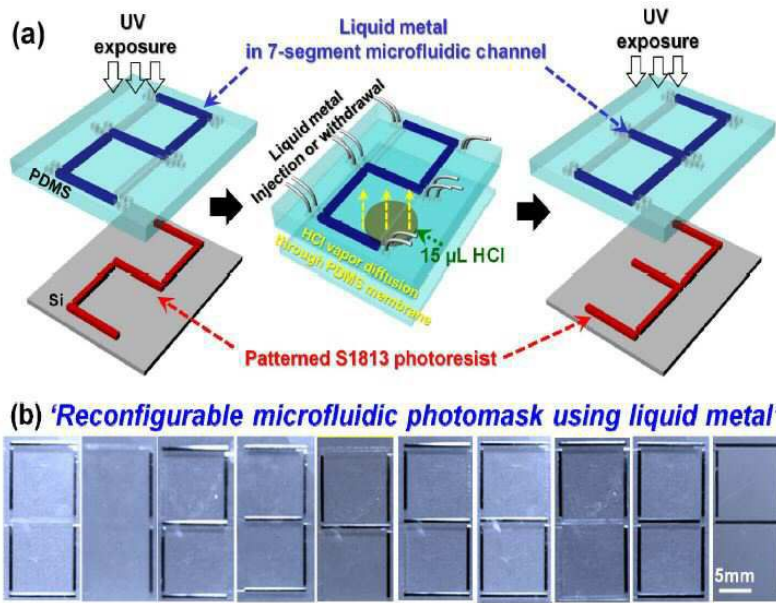
도면2



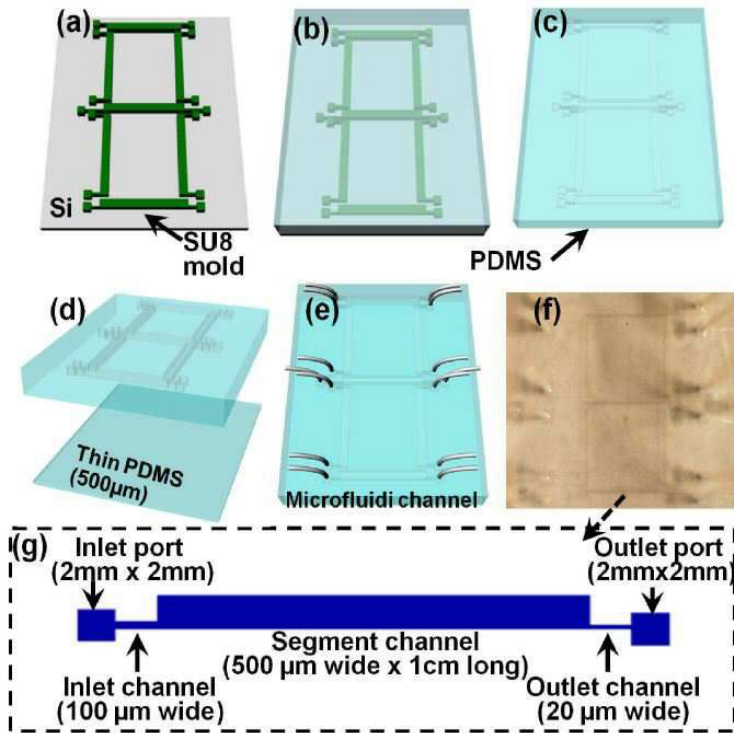
도면3



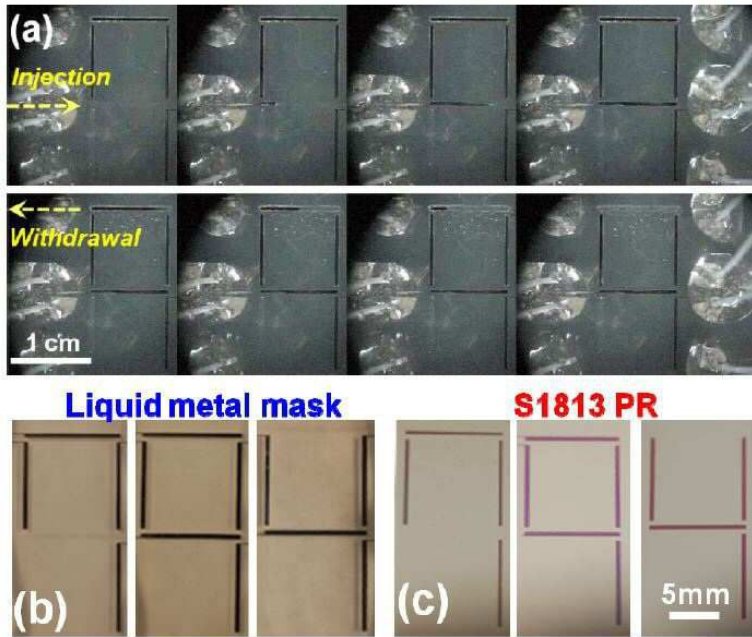
도면4



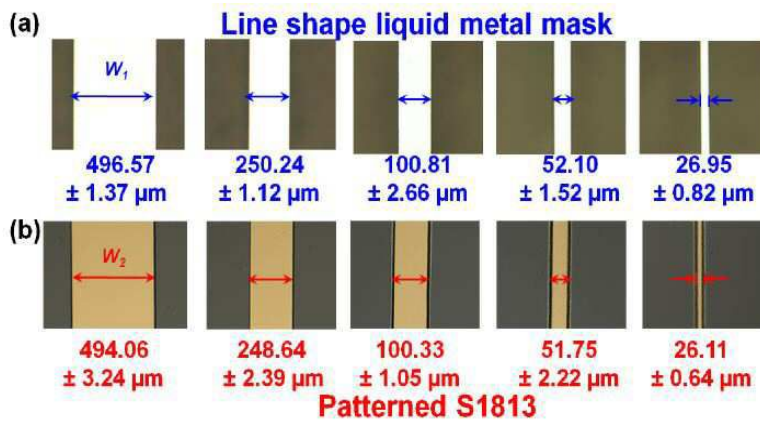
도면5



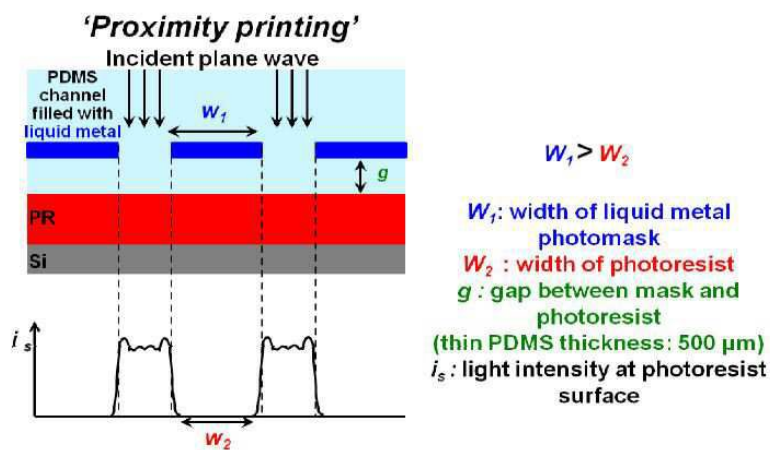
도면6



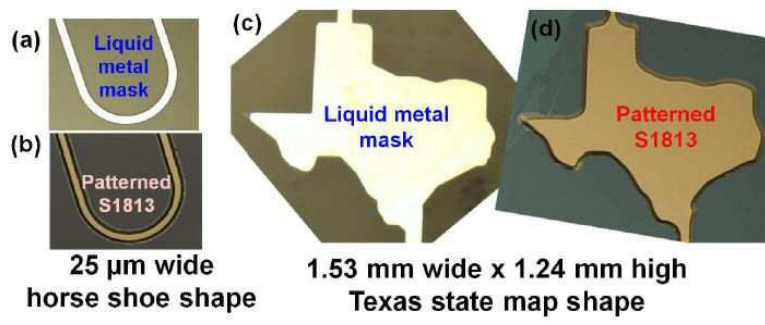
도면7



도면8



도면9



도면10

