



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2015년02월06일
(11) 등록번호 10-1489900
(24) 등록일자 2015년01월29일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

G21D 5/08 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2014-0007552

(22) 출원일자 2014년01월22일

심사청구일자 2014년01월22일

(56) 선행기술조사문헌

US20100238636 A1

US20140012106 A1

Jinsol Je. et. al., "Design, Fabrication, and Characterization of Liquid Metal Microheaters", Journal of Microelectromechanical systems, Vol 23, No. 5(2014.10.)

Michael D. Dickey. et. al., "Eutectic Gallium-Indium (EGaIn): A Liquid Metal Alloy for the Formation of Stable Structures in Microchannels at Room Temperature", Adv. Funct. Mater., Vol 18(2008.)

(73) 특허권자

서강대학교산학협력단

서울특별시 마포구 백범로 35 (신수동, 서강대학교)

(72) 발명자

이정철

서울 강남구 선릉로 221, 204동 1202호 (도곡동, 도곡렉슬아파트)

계진솔

서울 양천구 목동남로4길 6-23, 201동 1005호 (신정동, 목동2차우성아파트)

(74) 대리인

지현조

전체 청구항 수 : 총 20 항

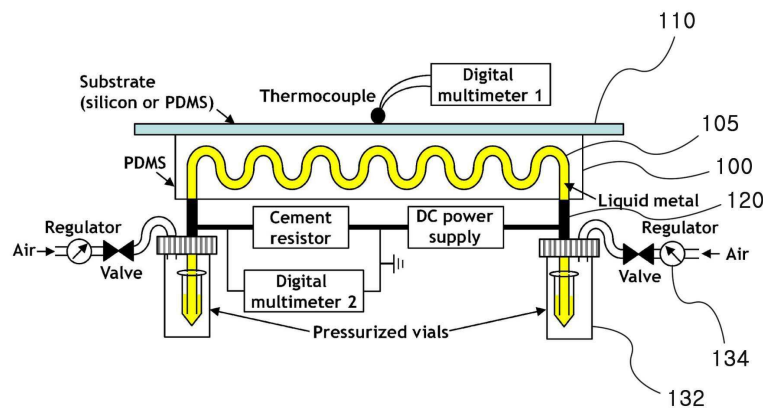
심사관 : 오규환

(54) 발명의 명칭 액체금속 회로장치 및 그 제어방법

(57) 요약

액체금속 회로장치는, 액체회로를 위한 마이크로 채널이 형성되는 액체금속 수용체, 액체회로를 외부와 연결하기 위한 전극부, 및 온도 변화에 따른 마이크로 채널 및 액체금속 간의 열팽창 체적의 차이를 보상하기 위해 마이크로 채널로 액체금속을 교류시키는 액체금속 공급부를 포함할 수 있다.

대표도 - 도5



특허청구의 범위

청구항 1

액체금속을 이용하여 제공되는 액체회로를 구성하는 액체금속 회로장치에 있어서,

상기 액체회로를 위한 마이크로 채널이 형성되는 액체금속 수용체;

상기 액체회로를 외부와 연결하기 위한 전극부; 및

온도 변화에 따른 상기 마이크로 채널 및 상기 액체금속 간의 열팽창 체적의 차이를 보상하기 위해 상기 마이크로 채널로 액체금속을 교류시키는 액체금속 공급부;

를 포함하는 것을 특징으로 하는 액체금속 회로장치.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 액체금속 수용체에는 상기 마이크로 채널의 양 쪽 단부와 각각 연통되는 제1 포트 및 제2 포트가 형성되며,

상기 전극부는 상기 제1 포트 및 상기 제2 포트에 각각 장착되어 상기 마이크로 채널에 채워진 상기 액체금속으로 전류를 공급하기 위한 제1 전극 및 제2 전극을 포함하는 것을 특징으로 하는 액체금속 회로장치.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 제1 전극 및 상기 제2 전극 중 적어도 어느 하나는 중공으로 제공되어 상기 마이크로 채널과 연통되는 것을 특징으로 하는 액체금속 회로장치.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 액체금속은 상기 중공을 통해서 상기 마이크로 채널로 공급되는 것을 특징으로 하는 액체금속 회로장치.

청구항 5

제3항에 있어서,

상기 액체금속 공급부는,

상기 마이크로 채널 외부에서 상기 마이크로 채널로 공급되는 상기 액체금속을 수용하고, 상기 중공을 통해서 상기 마이크로 채널과 연통되는 액체금속 보관부; 및

상기 액체금속 보관부의 내압을 높여 상기 액체금속을 상기 마이크로 채널 내부로 유입시키는 레귤레이터 밸브 (regulator valve);

를 포함하는 것을 특징으로 하는 액체금속 회로장치.

청구항 6

제2항에 있어서,

상기 액체금속 공급부는,

상기 제1 전극 및 상기 제2 전극 사이에서 상기 마이크로 채널과 연통되는 액체금속 보관부; 및

상기 액체금속 보관부의 내압을 높여 상기 액체금속을 상기 마이크로 채널 내부로 유입시키는 레귤레이터 밸브 (regulator valve);

를 포함하는 것을 특징으로 하는 액체금속 회로장치.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 액체금속 수용체는 탄성중합체(elastomer)를 포함하는 것을 특징으로 하는 액체금속 회로장치.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 액체금속 수용체는 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane; PDMS)을 포함하는 것을 특징으로 하는 액체금속 회로장치.

청구항 9

제1항에 있어서,

상기 마이크로 채널의 폭, 길이, 및 높이 중 적어도 어느 하나를 조절하여 상기 마이크로 채널 내에 채워지는 상기 액체금속의 저항을 조절하는 것을 특징으로 하는 액체금속 회로장치.

청구항 10

제1항에 있어서,

상기 액체금속이 상기 전극부로부터 전류를 공급받아 발열하는 경우,

상기 액체금속 수용체에 접합되어 열을 방출하는 서브기판을 더 포함하는 것을 특징으로 하는 액체금속 회로장치.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 서브기판은 실리콘 서브기판을 포함하는 것을 특징으로 하는 액체금속 회로장치.

청구항 12

액체금속을 이용하여 제공되는 액체회로를 구성하는 액체금속 회로장치의 제어방법에 있어서,

상기 액체회로를 위한 마이크로 채널이 형성되는 액체금속 수용체 및 상기 액체회로를 외부와 연결하기 위한 전극부를 제공하고, 상기 마이크로 채널로 액체금속을 교류시키는 액체금속 공급부를 이용하여 온도 변화에 따른 상기 마이크로 채널 및 상기 액체금속 간의 열팽창 체적의 차이를 보상하는 것을 특징으로 하는 액체금속 회로장치의 제어방법.

청구항 13

제12항에 있어서,

상기 액체금속 수용체에는 상기 마이크로 채널의 양 쪽 단부와 각각 연통되는 제1 포트 및 제2 포트가 형성되며,

상기 전극부는 상기 제1 포트 및 상기 제2 포트에 각각 장착되어 상기 마이크로 채널에 채워진 상기 액체금속으로 전류를 공급하기 위한 제1 전극 및 제2 전극을 포함하는 것을 특징으로 하는 액체금속 회로장치의 제어방법.

청구항 14

제13항에 있어서,

상기 제1 전극 및 상기 제2 전극 중 적어도 어느 하나는 중공으로 제공되어 상기 마이크로 채널과 연통되는 것을 특징으로 하는 액체금속 회로장치의 제어방법.

청구항 15

제14항에 있어서,

상기 액체금속은 상기 중공을 통해서 상기 마이크로 채널로 공급되는 것을 특징으로 하는 액체금속 회로장치의 제어방법.

청구항 16

제14항에 있어서,

상기 액체금속 공급부는,

상기 마이크로 채널 외부에서 상기 마이크로 채널로 공급되는 상기 액체금속을 수용하고, 상기 중공을 통해서 상기 마이크로 채널과 연통되는 액체금속 보관부; 및

상기 액체금속 보관부의 내압을 높여 상기 액체금속을 상기 마이크로 채널 내부로 유입시키는 레귤레이터 밸브 (regulator valve);

를 포함하는 것을 특징으로 하는 액체금속 회로장치의 제어방법.

청구항 17

제13항에 있어서,

상기 액체금속 공급부는,

상기 제1 전극 및 상기 제2 전극 사이에서 상기 마이크로 채널과 연통되는 액체금속 보관부; 및

상기 액체금속 보관부의 내압을 높여 상기 액체금속을 상기 마이크로 채널 내부로 유입시키는 레귤레이터 밸브 (regulator valve);

를 포함하는 것을 특징으로 하는 액체금속 회로장치의 제어방법.

청구항 18

제12항에 있어서,

상기 액체금속 수용체는 탄성중합체(elastomer)를 포함하는 것을 특징으로 하는 액체금속 회로장치의 제어방법.

청구항 19

제12항에 있어서,

상기 마이크로 채널의 폭, 길이, 및 높이 중 적어도 어느 하나를 조절하여 상기 마이크로 채널 내에 채워지는 상기 액체금속의 저항을 조절하는 것을 특징으로 하는 액체금속 회로장치의 제어방법.

청구항 20

제12항에 있어서,

상기 액체금속이 상기 전극부로부터 전류를 공급받아 발열하는 경우,

상기 액체금속 수용체에 접합되어 열을 방출하는 서브기판을 더 포함하는 것을 특징으로 하는 액체금속 회로장치의 제어방법.

명세서

기술분야

본 발명은 액체금속을 이용한 액체금속 회로장치 및 그 제어방법에 대한 것으로서, 액체금속을 보다 안정적으로 사용할 수 있는 액체금속 회로장치 및 그 제어방법에 관한 것이다.

배경기술

[0001]

- [0002] 낮은 용융 온도를 가지는 액체금속은 실온 근처에서 유동적 거동을 보이는 액체로 존재한다. 액체금속은 높은 표면 장력 그리고 낮은 점도와 같은 유체의 고유한 성질 외에도, 높은 열 및 온도 전도도를 가져 온도 감지 및 제어 장치, 열 인터페이스 재료, 및 핵융합로 냉각 등의 전통적인 산업 분야에 널리 사용되기 적합하다. 일 예로, Journal of the British Institution에 발표된 M. P. Johnson의 ‘Some aspects of moderate precision temperature control in communication engineering’ (Volume 8, Pages 250-259)에 수은에 대한 온도 조절이 언급되고 있고, Fusion Engineering and Design에 발표된 H. U. Borgstedt와 H. Glasbrenner의 ‘Development of a direct insulation layer for a self-cooled liquid metal fusion reactor blanket’ (Volume 27, 1 March 1995, Pages 659?662)에 자체-냉각 액체금속(a self-cooled liquid metal)이 언급된다.
- [0003] 잘 알려진 액체금속으로는 수은(Hg)이나 원자로 냉각충전재로 주로 사용되는 공융(eutectic)상태의 나크(NaK) 등이 있다. 다만, 액체금속의 독특한 성질에도 불구하고, 높은 독성 또는 반응성은 액체금속의 사용을 제한하고 있다. 특히, 나크는 대기와 접촉하면 화재를 일으킬 수 있어 완전히 밀폐된 용기 안에서만 사용이 가능하다.
- [0004] 최근에는, 덜 유해하고 보다 안정적인 공융갈륨인듐(EGaIn) 및 공융갈륨인듐주석(EGaInSn)과 같은 갈륨에 기반을 둔 공융 합금이 고려되고 있다.
- [0005] 하지만, 액체금속의 유해성이나 반응성을 떠나 여전히 액체금속은 포장된 상태가 아니면 형상을 유지시키기 어렵고, 이에 반드시 안정적인 포장 구조와 함께 사용되어야 한다.
- [0006] 액체금속을 위한 포장 구조는 탄성이 없는 재질로 구성될 수도 있지만, 플렉서블 안테나, 고탄성 압력 및 스트레인 센서 등과 같은 액체금속 기반의 유연한 디바이스를 구성할 경우 신축성 있는 포장 구조를 접목할 수 있다.
- [0007] 다만, 포장 구조의 신축성 여부를 떠나 액체금속과 포장 구조 간에 빈 공간(void)이 발생할 경우, 액체 금속의 성질을 안정적으로 유지하기 어려운 문제가 발생한다. 특히, 액체금속을 발열체로 사용하는 경우, 포장 구조와 액체금속 간의 열팽창 체적 차이로 인하여 빈 공간이 발생할 수 있고, 이로 인하여 액체금속이 초기의 안정적이고 예측 가능한 발열 성능을 유지할 수 없다.
- [0008] 이런 상황에서도 액체금속 기반의 히터장치에 대한 보고를 거의 찾아 볼 수 없으며, 이에 액체금속 기반의 히터장치에서 신뢰성 있는 전기적 연결을 확립하기 위한 노력이 시급한 실정이다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0009] 본 발명은 수은이나 나크와 같이 높은 독성이나 반응성을 갖는 액체금속을 안정적으로 사용할 수 있는 포장 구조를 접목한 액체금속 회로장치 및 그 제어방법을 제공한다.
- [0010] 본 발명은 플렉서블 안테나, 고탄성 압력 및 스트레인 센서 등과 같은 액체금속 기반의 유연한 디바이스를 구성하기 위하여 신축성 있는 포장 구조를 접목할 수 있는 액체금속 회로장치 및 그 제어방법을 제공한다.
- [0011] 액체금속과 포장 구조 간에 빈 공간이 발생할 경우, 액체 금속의 성질이 안정적으로 유지되지 않는다. 따라서, 본 발명은 상기 빈 공간의 발생을 차단하여 액체금속의 성질을 안정적으로 유지할 수 있는 액체금속 회로장치 및 그 제어방법을 제공한다.
- [0012] 특히, 액체금속을 발열체로 사용하는 경우, 포장 구조와 액체금속 간의 열팽창 체적 차이로 인하여 빈 공간이 발생할 수 있고, 이로 인하여 액체금속을 기반으로 하는 히터장치에서 초기의 안정적이고 예측 가능한 발열 성능을 유지할 수 없다. 따라서, 본 발명은 액체금속 기반의 히터장치에서 신뢰성 있는 전기적 연결을 확립할 수 있는 액체금속 회로장치 및 그 제어방법을 제공한다.

과제의 해결 수단

- [0013] 본 발명의 예시적인 일 실시예에 따르면, 액체금속을 이용하여 제공되는 액체회로를 구성하는 액체금속 회로장치가 개시된다. 액체금속 회로장치는, 액체회로를 위한 마이크로 채널이 형성되는 액체금속 수용체, 액체회로를 외부와 연결하기 위한 전극부, 및 온도 변화에 따른 마이크로 채널 및 액체금속 간의 열팽창 체적의 차이를 보상하기 위해 마이크로 채널로 액체금속을 교류시키는 액체금속 공급부를 포함할 수 있다.

- [0014] 여기서, 마이크로 채널로 액체금속을 교류시킨다는 의미는 마이크로 채널로 액체금속을 주고 받는 (communication)다는 의미로 사용되며, 예를 들어, 마이크로 채널 내에 빈 공간이 발생할 경우, 액체금속을 주입하고, 반대로 액체금속의 체적증가가 마이크로 채널의 체적증가 이상이 되는 경우 액체금속이 자연적으로 또는 강제로 배출되는 경우를 모두 포함할 수 있다.
- [0015] 액체금속이 마이크로 채널 내에 수용되어 외부와 밀폐된 상태를 유지하기 때문에 액체금속으로서 수은이나 나크와 같이 높은 독성이나 반응성을 갖는 액체금속을 안정적으로 사용할 수 있다.
- [0016] 또한, 액체금속을 밀폐시키는 액체금속 수용체와 액체금속 사이에 빈 공간이 발생하여도 액체금속 공급부에서 지속적으로 액체금속을 마이크로 채널 내로 공급하여 액체금속이 빈 공간에 의해서 연결이 끊어지거나 부분적으로 두꺼워지거나 얇아지지 않아 액체금속의 성질을 안정적으로 유지시킬 수 있다.
- [0017] 특히, 전극부를 통해서 액체금속으로 전류를 공급하는 경우, 열팽창 체적의 차이로 인한 빈 공간이 발생할 수 있겠으나, 액체금속 공급부에서 지속적으로 액체금속을 마이크로 채널 내로 공급하여 액체금속을 통한 전기적 연결의 신뢰성이 크게 향상된다. 따라서, 액체금속을 발열체로 사용하는 히터장치에서 초기의 안정적이고 예측 가능한 발열 성능을 유지할 수 있다.
- [0018] 한편, 액체금속 수용체에는 마이크로 채널의 양 쪽 단부와 각각 연통되는 제1 포트 및 제2 포트가 형성될 수 있으며, 전극부는 제1 포트 및 제2 포트에 각각 장착되어 마이크로 채널에 채워진 액체금속으로 전류를 공급하기 위한 제1 전극 및 제2 전극을 포함할 수 있다.
- [0019] 이때, 제1 전극 및 제2 전극 중 적어도 어느 하나는 중공으로 제공될 수 있고, 중공을 갖는 전극은 마이크로 채널과 연통된다. 이러한 경우, 액체금속은 상기 중공을 통해서 마이크로 채널로 공급될 수 있다.
- [0020] 또한, 액체금속 공급부는, 마이크로 채널 외부에서 마이크로 채널로 공급되는 액체금속을 수용하고, 상기 중공을 통해서 마이크로 채널과 연통되는 액체금속 보관부, 및 액체금속 보관부의 내압을 높여 액체금속을 마이크로 채널 내부로 유입시키는 레귤레이터 밸브(regulator valve)를 포함할 수 있다.
- [0021] 액체금속 공급부는 중공으로 제공되는 제1 전극이나 제2 전극을 통해서 액체금속을 마이크로 채널 내부로 유입시킬 수 있고, 경우에 따라서, 중공의 전극을 통하지 않고, 직접 마이크로 채널로 액체금속을 유입시킬 수도 있다. 구체적으로, 이러한 액체금속 공급부는, 제1 전극 및 상기 제2 전극 사이에서 마이크로 채널과 연통되는 액체금속 보관부, 및 액체금속 보관부의 내압을 높여 액체금속을 마이크로 채널 내부로 유입시키는 레귤레이터 밸브를 포함할 수 있다.
- [0022] 액체금속 수용체는 고무와 같이 탄성이 좋은 고분자 화합물을 통칭하는 탄성중합체(elastomer)를 이용하여 제조될 수 있고, 연성이 좋은 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane; PDMS)을 이용하여 제조될 수 있다.
- [0023] 또한, 마이크로 채널의 폭, 길이, 및 높이 중 적어도 어느 하나를 조절하여 마이크로 채널 내에 채워지는 액체금속의 저항을 조절할 수 있다. 따라서, 액체금속 회로장치를 히터 디바이스로 사용하는 경우, 마이크로 채널의 형상 조작만으로 간단하게 발열 성능을 조절할 수 있다.
- [0024] 액체금속이 전극부로부터 전류를 공급받아 발열하는 경우, 액체금속 수용체에 접합되어 열을 방출하는 서브기판을 더 포함할 수 있다. 액체금속 수용체로부터 바로 방열시키는 경우보다 온도 구배가 일정한 서브기판을 통해서 방열시킬 수 있다.
- [0025] 또한, 굴곡이 생겨도 무관하도록 서브기판으로 PDMS 서브기판(PDMS substrate)을 사용할 수 있고, 그렇지 않은 경우에는 열 전도도가 보다 뛰어난 실리콘 서브기판을 서브기판으로 사용할 수도 있다.
- [0026] 또한, 본 발명에 따른 다른 실시예에 따르면, 액체금속을 이용하여 제공되는 액체회로를 구성하는 액체금속 회로장치의 제어방법이 개시된다. 액체금속 회로장치의 제어방법은, 액체회로를 위한 마이크로 채널이 형성되는 액체금속 수용체 및 액체회로를 외부와 연결하기 위한 전극부를 제공하고, 마이크로 채널로 액체금속을 교류시키는 액체금속 공급부를 이용하여 온도 변화에 따른 마이크로 채널 및 액체금속 간의 열팽창 체적의 차이를 보상할 수 있다. 여기서, 외부는 외부장치, 예를 들어 전극부를 통해서 전류를 공급하는 전원 공급부를 포함할 수 있다.

발명의 효과

- [0027] 본 발명에 따른 액체금속 회로장치 및 그 제어방법에 따르면 액체금속이 마이크로 채널 내에 수용되어 외부와

밀폐된 상태를 유지하기 때문에 액체금속으로서 수은이나 나크와 같이 높은 독성이나 반응성을 갖는 액체금속을 안정적으로 사용할 수 있다.

[0028] 또한, 액체금속을 포장하는 액체금속 수용체와 액체금속 사이에 빈 공간이 발생하여도 액체금속 공급부에서 지속적으로 액체금속을 마이크로 채널 내로 공급하여 액체금속의 성질을 안정적으로 유지시킬 수 있다.

[0029] 특히, 전극부를 통해서 액체금속으로 전류를 공급하는 경우, 열팽창 체적의 차이로 인한 빈 공간이 발생할 수 있겠으나, 액체금속 공급부에서 지속적으로 액체금속을 마이크로 채널 내로 공급하여 액체금속을 통한 전기적 연결의 신뢰성이 크게 향상된다. 따라서, 액체금속을 발열체로 사용하는 히터장치에서 초기의 안정적이고 예측 가능한 발열 성능을 유지할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0030] 도 1은 마이크로 히터의 사시도이다. 구체적으로, 도 1(a)는 PDMS 서브기판을 적용한 마이크로 히터고, 도 1(b)는 산화 실리콘 서브기판을 적용한 마이크로 히터다.

도 2에서는 시뮬레이션에서 서로 다른 폭(width)과 길이(length)를 가지는 마이크로 채널 3가지 디자인의 온도 윤곽을 보여준다.

도 3은 입구 전극 및 출구 전극으로서 솔리드 전극 또는 중공 전극을 사용하여 마이크로 히터를 제작하는 단계를 설명하기 위한 도면이다.

도 4는 솔리드 전극을 갖는 마이크로 히터의 구성도이다.

도 5 중공 전극을 갖는 마이크로 히터의 구성도이다.

도 6은 다양한 온도에서 솔리드 및 중공 전극을 갖는 마이크로 히터의 광학 사진이다.

도 7은 온도에 따른 솔리드 및 중공 전극을 갖는 마이크로 히터의 전기 저항을 도시한다.

도 8에는 스텝 전압을 입력하여 실리콘 및 PDMS 서브기판의 마이크로 히터의 시간에 따른 전열 특성이 도시된다.

도 9(a) 및 도 9(b)에는 실리콘 및 PDMS 서브기판 마이크로 히터의 저항(resistance) 및 전압(power)이 각각 도시된다.

도 10에서는 3가지 서로 다른 마이크로 히터의 평균에 의해서 표준화되는 전기 저항 히스토그램(histograms of electrical resistances)을 보여준다.

도 11은 실리콘 및 PDMS 서브기판의 마이크로 히터에 각각 3.6 및 2.0W의 안정된 상태의 전압이 제공될 때, 마이크로 히터의 온도 윤곽을 보여준다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0031] 이하 첨부된 도면들을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예를 상세하게 설명하지만, 본 발명이 실시예에 의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다. 참고로, 본 설명에서 동일한 번호는 실질적으로 동일한 요소를 지칭하며, 이러한 규칙 하에서 다른 도면에 기재된 내용을 인용하여 설명할 수 있고, 당업자에게 자명하다고 판단되거나 반복되는 내용은 생략될 수 있다.

[0032] 본 실시예에서는 액체금속을 이용한 액체금속 회로장치가 마이크로 히터로서 적용되는 경우를 설명하고, 마이크로 히터의 안정적인 발열성능을 유지하기 위하여 마이크로 히터를 제어하는 방법에 대해서 상세하게 설명하며, 더불어 마이크로 히터에 대한 다양한 디자인, 제조, 및 특성에 대해서 살펴본다.

[0033] 먼저, 개략적으로 마이크로 히터의 제조방법을 언급하면, 액체금속을 기반으로 하는 마이크로 히터는 실리콘 또는 PDMS 서브기판에 마이크로 채널이 형성되는 PDMS 액체금속 수용체를 접합하고, 액체금속으로서 공용갈륨인듐 (EGaIn)을 마이크로 채널로 주입하여 간단하게 제조할 수 있다.

[0034] 마이크로 히터의 특성을 알아보기 위하여 가열 시 마이크로 히터의 체적변화를 고려하면서 솔리드 전극(soild slectrode)과 중공 전극을 적용한 경우를 살폈으며, 마이크로 채널로 액체금속이 교류 가능하게 가압 셋업된 중공 전극은 솔리드 전극보다 긴 시간 안정적인 전기적 접촉을 보였다. 여기서, 중공 전극(hollow electrode)은 내부가 비어 있어 액체금속이 전극을 통해서 마이크로 채널과 교류될 수 있는 구조를 갖는 전극을 지칭하는 것

이고, 솔리드 전극은 액체금속의 교류가 어려운 비 중공 구조의 일반적인 로드(rod)형 전극을 지칭할 수 있다.

- [0035] 보다 높은 열전도율에 때문에 실리콘 서브기판의 액체금속히터들은 PDMS 서브기판의 액체금속히터들보다 보다 좋은 온도 균일성을 보이지만, 마이크로 히터를 굴곡진 개체에 적용해야 할 때, 실리콘 서브기판의 액체금속히터보다 PDMS 서브기판의 액체금속히터가 유연하고 변형적인 이유로 더욱 적합하다.
- [0036] 잘 알려진 액체금속으로 수은(Hg)이나 원자로 냉각중전체로 주로 사용되는 공융(eutectic)상태의 나크(NaK) 등이 있지만, 높은 독성 또는 반응성에 의해서 사용이 제한되고 있고, 특히, 나크는 대기와 접촉하면 화재를 일으킬 수 있어 완전히 밀폐된 용기 안에서만 사용이 가능하다.
- [0037] 본 발명에 따르면 액체금속이 마이크로 채널 내에 수용되어 외부와 밀폐된 상태를 유지하기 때문에 액체금속으로서 수은이나 나크와 같이 높은 독성이나 반응성을 갖는 액체금속을 안정적으로 사용할 수 있다. 더욱이, 액체금속의 유해성이나 반응성을 떠나 여전히 액체금속은 포장된 상태가 아니면 형상을 유지시키기 어려워 액체금속 수용체가 반드시 필요하다.
- [0038] 액체금속의 포장을 위한 액체금속 수용체는 탄성이 없는 재질로 구성될 수도 있지만, 플렉서블 안테나, 고탄성 압력 및 스트레인 센서 등과 같은 액체금속 기반의 유연한 디바이스를 구성할 경우 액체금속 수용체 및 서브기판은 신축성 있는 재료로 제공될 수 있다.
- [0039] 유연한 디바이스를 구성하거나 신축성 있는 포장을 제공하기 위해서 PDMS 및 백금-촉매 폴리실록산(Ecoflex)과 같은 실리콘 탄성중합체(고무와 같이 탄성이 좋은 고분자 화합물을 통칭)를 사용할 수 있고, 이를 이용해 제작된 유연한 디바이스에는 소프트한 멤리스터(Memristor), 다이오드, 플렉서블 안테나, 고탄성 압력 및 스트레인 센서, 부드러운 인공 피부 등이 있다.
- [0040] 액체금속은 실리콘 고무 기반의 액체금속 수용체의 마이크로 채널로 주입되며, 신축성을 더 향상하기 위해 열가소성 탄성중합체가 적용될 수 있다. 또한, 유연성 외에도 탄성중합체에 액체금속 주입을 통해서 액체금속 회로장치를 제공함으로써, 액체금속의 두께나 높이 폭 등의 조절이 매우 간단하다는 장점이 있다.
- [0041] 다만, 이렇게 간단하고 폭 넓게 사용될 수 있는 액체금속 기반의 액체금속 회로장치가 마이크로 히터로 사용되는 경우 온도 변화에 따른 마이크로 채널 및 상기 액체금속 간의 열팽창 체적의 차이가 발생하고, 특히, 마이크로 채널 내에 빈 공간이 발생하는 경우, 신뢰성 있는 전기적 연결을 기대하기 어려워진다. 이는 미세한 온도 제어가 필요한 곳에 마이크로 히터의 적용이 어려운 문제를 가져올 수 있다.
- [0042] 본 발명에서는 마이크로 채널 및 상기 액체금속 간의 열팽창 체적의 차이를 보상하기 위하여 마이크로 채널로 액체금속을 교류시키는 액체금속 공급부를 제공함으로써 이러한 문제를 해결한다.
- [0043] 참고로, 액체금속에서 발열하는 경우, 액체금속 수용체로부터 바로 열이 방출되는 것보다 온도 구배가 뛰어나도록 마이크로 채널을 갖는 액체금속 수용체에 산화 실리콘 서브기판이나 PDMS 서브기판 등과 같은 발열판으로서 서브기판을 분딩할 수 있다.
- [0044] 이하, 마이크로 히터의 다양한 디자인, 제조, 및 그 특성에 대해 설명한다. 먼저, 3가지 디자인에 따른 마이크로 히터의 온도 분포 및 균일성을 비교한다.
- [0045] 도 1에 도시되는 마이크로 히터는 마이크로 채널이 패터닝 된 PDMS 액체금속 수용체, 서브기판, 마이크로 채널에 채워지는 액체금속, 및 PCB(printed circuit board) 및 아크릴 플레이트(acrylic plate)로 구성되는 마이크로 히터 마운트(microheater mount)로 구성된다. 액체금속으로는 EGaIn을 사용한다. 도 1(a)에는 PDMS 서브기판이 도 1(b)에는 산화 실리콘 서브기판이 사용된다.

[0046] 아래 [표 1]을 참조하면, 마이크로 채널의 높이는 100 μ m으로 고정되지만, 길이나 폭은 변형을 준다.

	디자인 1	디자인 2	디자인 3
마이크로 채널의 길이(mm)	277.1	432.3	1423.7
마이크로 채널의 폭(μ m)	500	350	100
저항(resistance; Ω)	1.81	4.04	46.50
전압(voltage; V)	1.31	2.04	6.76
파워(power; W)	0.940	1.03	0.982
평균 온도(mean temp), T_{AVG} ($^{\circ}$ C)	64.16	67.44	66.13
온도의 표준편차(STDEV of temp), T_{STDEV} ($^{\circ}$ C)	6.93	6.76	7.09
T_{STDEV}/T_{AVG}	0.108	0.100	0.107
주입 압력(injection pressure; kPa)	7.58	13.43	101.01

[0047] [표 1] 서로 다른 디자인의 마이크로 히터들의 비교
 [0048]

[0049] 저항(resistance)은 액체금속인 EGaIn의 저항이며, 주입 압력은 액체금속을 마이크로 채널로 주입할 시의 압력을 의미하고, 최대 온도는 75 $^{\circ}$ C 안쪽으로 조절하였다. 참고로, 마이크로 채널의 양 단부로 노출되는 EGaIn의 입구 포트 및 출구 포트를 제외하고는 모든 외부 표면은 대류 냉각($h=28W/m^2K$)에 노출되고 전기적으로 절연될 수 있다. 또한, 외부 표면은 단열 상태로 간주하고, 한쪽 포트로는 직류 전압이 연결되고, 다른 포트는 접지된다.

[0050] 참고로, 입구 및 출구 포트가 전체적인 열 전달 영역 중 0.01%보다 작은 비율을 가지는 것으로 볼 때, 입구 및 출구 포트를 통한 제한적인 열 전달은 무시한다.

[0051] 설계 단계에서 PDMS 서브기판의 마이크로 히터의 시뮬레이션에 사용된 재료 특성이 [표 2]에 정리되며, 온도가 작은 범위 내에서 조절되기 때문에 재료의 온도 의존성은 무시될 수 있다.

	PDMS	EGaIn	PCB	Acrylic plate
전기 전도도(S/m)	8.33×10^{-13}	3.40×10^{6a}	1.47×10^{-14}	6.25×10^{-14}
열 전도도(W/m·K)	0.30	41.8	0.17	0.20

[0052] [표 2] 설계 단계에서 PDMS 서브기판의 마이크로 히터 시뮬레이션에 사용된 재료 특성
 [0053]

[0054] 도 2에서는 시뮬레이션에서 서로 다른 폭(width)과 길이(length)를 가지는 마이크로 채널 3가지 디자인의 온도 윤곽을 보여준다. 도 2는 마이크로 히터 상부에서의 온도 윤곽이다.

[0055] 구체적으로, 디자인 1(design 1)은 큰 온도 구배, 최저 평균 온도, 및 평균 온도에서 상대적으로 가장 큰 표준편차를 갖는다. 디자인 2 및 3은 액체금속의 액체회로가 부재하여 주변 영역보다 약간 낮은 온도를 갖는 디자인 2의 중앙 영역을 제외하고 유사한 온도 등고선을 보여준다. 사실, 디자인 2는 디자인 3보다 더 높은 평균 온도 및 더 작은 온도 표준 편차를 갖는다.

[0056] 3가지의 디자인에 대한 상세한 마이크로 히터의 비교는 [표 1]에서 확인할 수 있고, 도 2를 통해서 일반적으로 마이크로 채널이 길고 좁아질수록 획득되는 온도는 더욱 균일해짐을 확인할 수 있다. 다만, 길고 좁아지는 마이크로 채널은 유체의 압력을 증가시켜 액체금속을 내부로 주입하기 위한 압력도 증가한다. 이에 최대 평균 온도, 온도의 표준 편차, 및 액체금속 주입을 위한 압력을 고려하면, 디자인 2가 가장 히터로서 적합할 것으로 고려된다.

[0057] 도 3은 입구 전극 및 출구 전극으로 솔리드 전극 및 증공 전극을 사용하여 마이크로 히터를 제작하는 단계를 설명하기 위한 도면이다.

[0058] 이하, 간단하게 액체금속 수용체를 제작하는 과정을 먼저 설명한다. 먼저, PDMS 모형 몰드(PDMS replica molding)를 위한 마스터(master)를 만들기 위해, 네거티브 포토레지스트(negative photoresist)(본 실시예에서는 SU-8 100을 사용)는 깨끗한 4인치 실리콘 웨이퍼 상에 30초동안 3000rpm으로 스핀-코팅된다.

[0059] 그리고, 포토레지스트 용액이 코팅된 실리콘 웨이퍼(silicon wafer)는 65 $^{\circ}$ C에서 10분, 95 $^{\circ}$ C에서 30분 동안 소성된다.

- [0060] 그리고 나서, 실리콘 웨이퍼는 각각 30초 동안 자외선($\lambda = 405\text{nm}$, 20 mW/cm^2)에 노출되고, 65°C 및 95°C 에서 각각 10 및 30분 동안 다시 소성된다.
- [0061] 노광 소성 후, 실리콘 웨이퍼를 10분간 포토레지스트 현상액에 노출시키고 탈 이온수로 세척한다.
- [0062] 마지막으로, 실리콘 웨이퍼는 2분 동안 180°C 에 하드-소성을 시행하여 PDMS 모형 몰드를 위한 마스터를 완성한다. 모든 소성 공정(baking processes)은 핫플레이트 상에서 수행한다.
- [0063] 포토레지스트(SU-8 pattern)의 초기 목표 두께는 $100\mu\text{m}$ 이나, 프로필로미터(profilometer)(Dektak XT, Bruker)로 최종 측정된 포토레지스트의 두께는 $90\mu\text{m}$ 였다.
- [0064] 완성된 마스터 상에 베이스(base)와 경화촉매제(curing agent)(Sylgard 184)를 10:1의 비율로 준비된 PDMS를 마스터 상에 붓고, 진공 챔버에서 30분동안 탈기시켰다.
- [0065] 그 후, PDMS 모형 몰드를 위한 마스터 위에 부어진 PDMS를 1시간 동안 95°C 에서 소성하고, 마스터 위에서 PDMS 모형 몰드를 면도날로 절단하여 분리하여 도 3의 'A' 단계에 표시되는 PDMS 모형 몰드를 획득한다. 입구 포트 및 출구 포트는 도 3의 'B' 단계에 표시되는 것처럼 PDMS 모형 몰드를 편집하여 제공한다.
- [0066] 최종적으로 마스터에서 분리된 PDMS 모형 몰드는 길이 26mm, 폭 26mm, 및 두께 4mm이다.
- [0067] 상기 PDMS 모형 몰드는 산소 플라즈마(CUTE-MP/R, FEMTO SCIENCE)에 처리되고, 도 3의 'C' 단계에 표시되는 것처럼, 산화 실리콘 서브기판 또는 얇은 PDMS 서브기판 중 어느 하나에 접합된다.
- [0068] 상하 양쪽 면에 300nm 두께의 실리콘 다이옥사이드를 갖는 산화 실리콘 서브기판은 대략 $500\mu\text{m}$ 두께를 가지고, 상기 PDMS 서브기판은 $650\mu\text{m}$ 의 두께를 갖는다. 실리콘 서브기판을 산화처리 하는 이유는 산화층이 실리콘 서브기판을 통해서 전류가 누설되는 것을 방지할 수 있기 때문이다.
- [0069] 마지막으로, 마이크로 채널에 액체금속을 주입하면 마이크로 히터가 완성된다. 이하, 입구 포트 및 출구 포트에 장착되는 전극으로 솔리드 및 중공 전극을 적용하는 경우를 각각 설명한다.
- [0070] 솔리드 전극 구성의 경우에서, 도 3의 'D1' 단계에 도시되는 것처럼, 액체금속인 EGaIn은 주사기를 통해서 마이크로 채널 내로 주입될 수 있고, 그 후에 도 3의 'E1' 단계에 도시되는 것처럼, 2개의 솔리드 전극이 입구 및 출구 포트에 삽입된다.
- [0071] 반면에, 중공 전극 구성의 경우에서, 도 3의 'D2' 단계에 도시되는 것처럼, 2개의 중공 전극은 2개의 포트에 먼저 삽입되고, 도 3의 'E2' 단계에 도시되는 것처럼, 액체금속인 EGaIn이 상기 삽입된 전극을 통해서 마이크로 채널로 주입될 수 있다.
- [0072] 이하, 솔리드 및 중공 전극을 갖는 마이크로 히터의 실험 설정 및 절차에 대해서 언급한다.
- [0073] 마이크로 히터는 상하좌우로 이동 가능한 동축 스테이지에 설치될 수 있고, 제작된 도립현미경을 통해서 액체금속이 채워진 마이크로 채널을 광학적으로 모니터링할 수 있게 하였다. 열전대를 공간상에 고정하고 마이크로 히터를 고정된 x-y축 이송장치를 프로그래밍을 통해 구동하여 스캐닝함으로써, 기관의 온도를 맵핑한다.
- [0074] 도 4는 솔리드 전극을 갖는 마이크로 히터의 구성도이며, 도 5 중공 전극을 갖는 마이크로 히터의 구성도이다.
- [0075] 참고로, 마이크로 히터의 기본 구성은 마이크로 채널(105)이 형성된 PDMS 액체금속 수용체(110), 액체금속 수용체(110)에 접합되는 서브기판(110)이고, 도 5와 같이, 입구 및 출구 포트에 중공 전극(120)이 장착되는 마이크로 히터의 경우, 액체금속을 마이크로 채널로 교류시키기 위한 액체금속 공급부가 추가된다. 구체적으로, 액체금속 공급부는 중공 전극(120)의 중공을 통해서 마이크로 채널(105)과 연통되는 액체금속 보관부(132) 및 액체금속 보관부(132)의 내압을 높여 상기 액체금속을 상기 마이크로 채널(105) 내부로 유입시키는 레귤레이터 밸브(regulator valve)(134)를 갖는다.
- [0076] DC 전압(DC Voltage)이 DC 전원(IPS-12B05, VUPOWER)에 의해서 5.1Ω 의 시멘트 저항(cement resistor)과 직렬로 연결되는 마이크로 히터에 공급되는 동안, 마이크로 히터를 통한 전압과 전류는 직류 전원 서플라이(DC power supply) 및 디지털 멀티미터 1(Digital multimeter 1)(34401A, Agilent)에 의해서 모니터링되고, 마이크로 히터 기관의 국부적 온도는 다른 디지털 멀티미터 2(2000, Keithley)에 의해서 모니터링 되었다.
- [0077] 도 5에 도시되는 중공 전극 구성의 경우, 전자 압력 조절기(electronic pressure regulator), 및 데이터 수집 보드(data acquisition board)(MyDAQ, National Instruments)와 디지털 출력 모듈(digital output

module)(USB-9472, National Instruments)을 통한 PC에 의해서 컨트롤 되는 레귤레이터 밸브(134)는 액체금속 보관부(132)에 압력을 가하여 필요하다면 액체금속으로 채워진 마이크로 채널 내로 액체금속을 추가로 공급한다.

- [0078] 각각의 마이크로 히터는 핫플레이트에서 가열되면서 광학 검사 및 저항 측정이 다양한 온도에서 수행되었으며, 마이크로 히터가 주변과 열평형에 도달한 후에, 각 온도에서 체류 시간은 20분이었다.
- [0079] 도 6 및 7은 마이크로 히터의 광학 사진 및 마이크로 히터의 측정된 전기 저항을 나타낸다.
- [0080] 가열 시, 도 6의 첫 행에 도시된 바와 같이, 약 50°C에서 솔리드 전극 구성의 마이크로 히터의 마이크로 채널에서 빈 공간이 발생하기 시작한다. 그리고, 온도가 더 증가함에 따라서, 빈 공간의 수나 크기가 더 증가하는 경향을 보인다.
- [0081] 대조적으로, 도 6의 둘째 행에 도시된 바와 같이, 중공 전극 구성의 마이크로 히터에서는 빈 공간이 관찰되지 않는다. 이는 중공 전극을 통해서 지속적으로 액체 공급부에 의한 액체금속의 교류가 발생하기 때문이다. 참고로, 솔리드 전극을 사용하더라도 입구 전극 및 출구 전극 사이에서 마이크로 채널과 연통되는 액체금속 보관부를 연결하고, 액체금속 보관부의 내압을 높이는 레귤레이터 밸브를 장착한다면, 중공 전극과 마찬가지로 빈 공간 발생을 억제시킬 수 있을 것이다.
- [0082] 여하튼 빈 공간의 존재 여부는 액체금속의 저항에 지대한 영향을 미치는 것으로 관찰된다. 구체적으로, 도 7에 도시되는 바와 같이, 마이크로 채널에 부분적으로 형성된 빈 공간은 연속적인 액체금속에 의한 액체회로가 끊어지며, 마이크로 히터 전기 저항의 두드러진 증가를 가져온다.
- [0083] 도 7을 살펴보면, 중공 전극을 갖는 마이크로 히터의 저항이 선형적으로 증가는 반면, 솔리드 전극을 갖는 마이크로 히터의 저항은 온도에 따라서 급속하게 증가한다. 또한, 솔리드 전극을 갖는 마이크로 히터의 저항은 시간 의존성을 나타낸다. 마이크로 히터 온도가 100°C로 더 장시간 유지되면, 2시간 후 솔리드 전극을 갖는 마이크로 히터의 저항은 3.25에서 438(약 135배)증가하고, 결국 무한대로 증가한다.
- [0084] 빈 공간이 형성되는 이유는 PDMS($3.0 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$)의 열 팽창 계수(thermal expansion coefficient; TEC)가 갈리움(gallium) 및 인듐(indium)(실온에서 각각 $1.8 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ and $3.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$)과 같은 액체금속의 열 팽창 계수보다 더 크기 때문이다.
- [0085] 정확한 EGaIn의 열팽창계수를 모른다 할지라도, 아마도 대부분의 액체 금속들은 $\sim 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 수준의 열팽창계수를 가질 것으로 예측할 수 있다.
- [0086] 즉, PDMS 및 EGaIn의 열팽창계수의 차이는 솔리드 전극을 갖는 마이크로 히터의 마이크로 채널에서 빈 공간을 가져올 것으로 예측할 수 있다.
- [0087] 이때, 도 5에 도시되는 바와 같이, 액체금속 공급부와 같은 가압 설정을 갖는 중공 전극은 마이크로 히터의 넓어진 마이크로 채널로 지속적으로 추가의 EGaIn이 공급될 수 있고, 이것은 중공 전극의 마이크로 히터에서 빈 공간이 발생되지 않는 이유이다.
- [0088] 반면에, 도 4에 도시되는 마이크로 히터와 같이 추가적인 액체금속이 공급되지 않는 경우에는 빈 공간 발생이 필연적으로 따른다.
- [0089] 도 8에는 스텝 전압 입력을 사용하여 실리콘 및 PDMS 서브기판의 마이크로 히터의 시간에 따른 전열 특성이 도시된다.
- [0090] 스텝 전압 입력에 따른 시간에 따른 특성을 알아보기 위해서, DC 전압 서플라이가 켜지면 서브기판 중심의 로컬 온도 및 각 마이크로 히터의 저항이 즉시 측정된다.
- [0091] 도 5는 3.23 및 2.42V의 단위 스텝 전압(unit step voltages)이 실리콘 및 PDMS 서브기판의 마이크로 히터에 각각 공급될 때, 2개의 서로 다른 기판 상의 마이크로 히터의 가열 및 냉각 사이클을 보여준다. 800초 후, 각각의 마이크로 히터의 온도는 안정적인 영역에 도달한다. 안정적인 영역에서 전력 소모는 실리콘 서브기판의 마이크로 히터가 3.6W, PDMS 서브기판의 마이크로 히터가 2.0W이다.
- [0092] 도 9(a) 및 도 9(b)에는 실리콘 및 PDMS 서브기판 마이크로 히터의 저항(resistance) 및 전압(power)이 각각 도시된다.

[0093] DC 전압은 시멘트 저항과 직렬로 연결되는 마이크로 히터에 1부터 9V까지 적용했으며, 전압은 1V씩 증가시키면서, 시간 간격을 15분으로 설정한다. 측정은 6회 반복하여 이루어졌고, 도 9(a) 및 도 9(b)는 각각의 서브기판의 중심부에서 온도 대비 전기 저항 및 전력 소모를 보여준다.

[0094] 도 9(a) 및 도 9(b)를 살펴보면, 실리콘 및 PDMS 서브기판 마이크로 히터의 온도 대비 저항의 기울기는 선형이고, 기울기는 각각 8.50×10^{-4} 및 $2.86 \times 10^{-3} \Omega / ^\circ\text{C}$ 이다.

[0095] 일반적인 고체상태의 저항은 아래 수식(1)의 관계를 갖는다.

$$R(T_m) = \frac{\rho(T_m)l(T_m)}{w(T_m)h(T_m)} = \frac{\rho_0(1+\alpha T_m)l_0(1+\beta T_m)}{w_0(1+\beta T_m)h_0(1+\beta T_m)}$$

[0096]

[0097] 상기 기울기(slope; dR/dT)는 수식(1)에 의해서 간단하게 근사된다. 여기서, T_m 은 가열하는 저항의 평균온도, ρ_0 는 실온에서 EGaIn의 비저항(resistivity), l_0 , w_0 , 및 h_0 는 각각 실온에서 마이크로채널의 길이(length), 폭(width), 높이(height)를 나타내고, α 는 EGaIn의 저항온도계수(temperature coefficient of resistivity; TCR)이고, β 는 PDMS의 선형 열팽창계수(linear TEC)이다. C_1 을 PDMS와 실리콘의 열팽창계수의 비를 나타내는 1 보다 작은 상수라 할 때, 실리콘을 기판으로 사용하는 마이크로히터의 경우에 수식(1)에서의 β 는 $C_1\beta$ 로 대체할 수 있다. 또한 T를 마이크로히터 표면의 중앙 온도라 하고 T_m 과 T의 비례관계($T_m=C_2T$)를 이용하면 도 9(a)에서의 기울기는 다음 수식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dR}{dT} = \frac{d}{dT} \frac{\rho(T)l(T)}{w(T)h(T)} \approx C \frac{\rho_0 l_0}{w_0 h_0} (\alpha - \beta)$$

[0098]

[0099] 여기서, EGaIn와 PDMS의 저항온도계수는 상수라고 가정하였다. 또한, PDMS를 기판으로 사용하는 마이크로히터에서는 $C_1=1$ 이며 실리콘을 사용하는 마이크로히터의 경우 1보다 작다. 또한 PDMS를 기판으로 사용하는 마이크로히터의 경우에 실리콘을 기판으로 사용하는 히터보다 온도 구배가 더 크므로 C_2 가 더 작다. 그러므로 일반적인 고체상태의 저항에 대한 식으로는 관찰된 도 9(a)의 액체 금속 저항의 거동을 설명할 수 없다.

[0100] 또한, 실리콘 서브기판의 마이크로 히터는 실리콘의 높은 열 전도성에 기인한 높은 평균 온도 때문에 부분적으로 PDMS기판의 마이크로 히터보다 보다 많은 전력을 소비한다.

[0101] 마이크로 히터의 장시간 안정성을 확인하려면 마이크로 히터의 전기 저항을 보다 긴 시간 동안 측정해야 한다. 도 10에서는 3가지 서로 다른 마이크로 히터의 평균에 의해서 표준화되는 전기 저항 히스토그램(histograms of electrical resistances)을 보여준다. 각각의 측정은 실온에서 3시간 동안 이루어졌다.

[0102] 가우스 피팅 표준편차(1σ)(Standard deviations from the Gaussian fittings)는 실리콘 서브기판에서 솔리드 전극을 갖는 마이크로 히터, 실리콘 서브기판에서 중공 전극을 갖는 마이크로 히터, 및 PDMS 서브기판에서 중공 전극을 갖는 마이크로 히터 각각에서 0.72×10^{-4} , 2.02×10^{-4} , 및 3.39×10^{-4} 이다.

[0103] 중공 전극을 갖는 실리콘 서브기판 상의 마이크로 히터가 가장 폭 좁은 히스토그램을 나타내고, 이를 통해서 중공 전극을 갖는 실리콘 서브기판 상의 마이크로 히터가 장시간 작동에 가장 안정적이라고 할 수 있다.

[0104] 대조적으로, 중공 전극을 갖는 PDMS 서브기판 상의 마이크로 히터가 가장 불안정한 상태이며, 이것은 PDMS 서브기판의 마이크로 히터가 실리콘 서브기판의 마이크로 히터보다 더 저항 변동이 많을 것을 보여주는 도 5에서도 예측할 수 있다.

[0105] 다만, PDMS의 유연성 때문에, PDMS기판의 마이크로 히터가 쉽게 변형될 수 있고, PDMS 서브기판의 마이크로 히터는 평평하지 않은 표면에 가열 어플리케이션에도 잘 적용될 수 있다.

[0106] 온도 구배 정도 즉, 온도 균일성을 조사하기 위해, 마이크로 히터의 온도 필드를 측정하였으며, 스캐닝 열 현미경(Scanning thermal microscopy)을 모방한 방법을 이용하여 마이크로 히터 기판의 온도 윤곽을 획득할 수 있다.

[0107] 온도 스캐닝 영역은 마이크로 히터를 25mm*25mm로 구획하고, 서브기판의 X 및 Y 방향에서 모두 1mm로 셋팅되고,

전체 625 포인트에서 온도가 측정된다. 측정 값은 시뮬레이션과 비교하였다. 설계 단계에서는 마이크로 채널의 목표 높이가 100 μ m였지만, 제작된 마이크로 히터에서 마이크로 채널의 측정된 높이는 90 μ m이다. 따라서 온도 균일성을 검증하기 위한 시뮬레이션에서는 실제 실험에 사용된 PDMS 서브기판의 마이크로 히터에서 마이크로 채널의 높이인 90 μ m를 이용하였다.

[0108] PDMS 및 실리콘 서브기판 마이크로 히터의 EGaIn의 전기 전도도를 제외하고, [표 2] 및 [표 3]의 재료 특성이 시뮬레이션에 사용된다.

[0109] 측정과 시뮬레이션의 보다 나은 비교를 위해서, 도 9(a)의 경사에서 추출된 EGaIn의 전기 전도도 및 마이크로 채널의 형상이 사용되었다.

[0110] 아래 수식(3)과 같이, 실리콘 및 PDMS 서브기판 마이크로 히터의 EGaIn의 전기 전도도는 온도에 의존적이다.

$$\sigma_{Si}(T) = (2.08 \times 10^{-10}(T - 273.15) + 1.93 \times 10^{-7})^{-1} \text{ and}$$

$$\sigma_{PDMS}(T) = (6.20 \times 10^{-11}(T - 273.15) + 2.06 \times 10^{-7})^{-1}$$

[0111]

[0112] 하나는 PDMS 서브기판의 마이크로 히터, 다른 하나는 실리콘 마이크로 히터이다. 다른 재료들의 온도에 의존하는 열 물리 및 열 특성은 정확한 정보를 알기 어렵기 때문에 유한 요소 시뮬레이션에서 제외하였다.

	실리콘	실리콘 다이옥사이드
전기 전도도(S/m)	4.35*10 ⁻¹⁴	1.0*106
열 전도도(W/m·K)	150	1.4

[0113]

[표 3] 시뮬레이션을 위한 실리콘 및 실리콘 다이옥사이드의 재료 특성

[0114]

[0115] 도 11은 실리콘 및 PDMS 서브기판의 마이크로 히터에 각각 3.6 및 2.0 W의 안정된 상태의 전압이 제공될 때, 마이크로 히터의 온도 윤곽을 보여준다. 구체적으로, 측정된 마이크로 히터의 열 전대는 도 11의 왼쪽에 시뮬레이션된 마이크로 히터의 열 전대는 오른쪽에 그 온도 윤곽이 도시된다.

[0116] 일반적으로, 측정(measurement) 및 시뮬레이션(simulation)의 온도 윤곽은 서로 일치한다. 다만, 시뮬레이션과 비교할 때, 측정된 온도 윤곽이 살짝 압착되어 있다. 이것은 측정 시 마이크로 히터를 고정하기 위한 홀더나 간격에 의한 영향으로 예측할 수 있다.

[0117] 결론적으로, 실리콘 서브기판의 마이크로 히터는 PDMS기판의 마이크로 히터보다 더 많은 전력을 소비하지만, 보다 균일한 온도 장은 실리콘의 높은 열 전도성 때문에 실리콘 마이크로 히터에서 관찰되었다.

[0118] 이상 마이크로 히터에 기반한 액체금속의 디자인, 제조, 및 특성을 살펴보았다.

[0119] 결론적으로, PDMS 또는 산화 실리콘 서브기판이 마이크로 채널을 가지는 PDMS 모형 몰드 즉, 액체금속 수용체에 접합되는 서브기판으로 사용되고, 제작된 액체금속 수용체 내에 EGaIn의 주입으로 마이크로 히터의 제작이 완료된다.

[0120] 솔리드 및 증공 전극 구성은 둘 다 산화 실리콘 또는 PDMS 서브기판에 사용될 수 있었고, 서브기판의 재질에 상관없이 가열 시 열에 의한 마이크로 히터의 부피 변화가 발생하였다.

[0121] 다만, 솔리드 전극에 빈 공간이 형성되는 경우, 빈 공간은 크게 전기저항을 높이고, 마이크로 히터의 수명에 영향을 줄 수 있으나, 이 문제는 가압 셋팅과 증공의 전극 구성에 의해 해결되었다.

[0122] 다만, 실리콘의 강도와 높은 열 전도성 때문에, 실리콘 서브기판의 마이크로 히터는 PDMS 서브기판의 마이크로 히터보다 안정적이고 온도 균일성이 높다. 하지만, PDMS 서브기판의 마이크로 히터는 실리콘 서브기판의 마이크로 히터보다 최고 온도에 도달하는데 더 작은 전력 소모를 가진다.

[0123] 또한, 평탄하지 않은 곳에 적용할 경우, 유연한 PDMS기판의 마이크로 히터가 실리콘 서브기판의 마이크로 히터보다 더 사용이 적합하다.

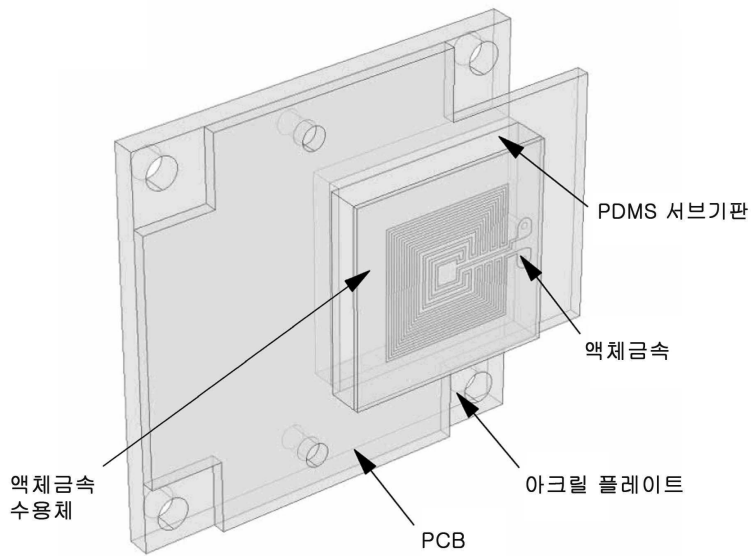
[0124] 상술한 바와 같이, 본 발명의 바람직한 실시예를 참조하여 설명하였지만 해당 기술분야의 숙련된 당업자라면 하기의 청구범위에 기재된 본 발명의 사상 및 영역으로부터 벗어나지 않는 범위 내에서 본 발명을 다양하게 수정 및 변경시킬 수 있음을 이해할 수 있을 것이다.

부호의 설명

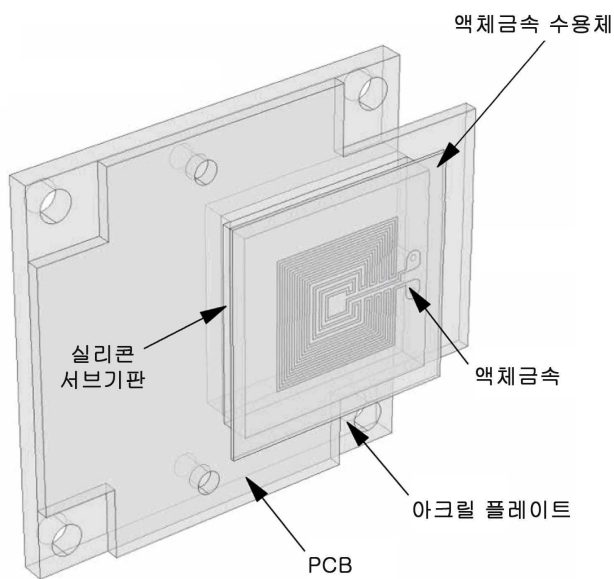
- [0125] 105 : 마이크로 채널 110 : 액체금속 수용체
 120 : 중공 전극 132 : 액체금속 보관부
 134 : 레귤레이터 밸브

도면

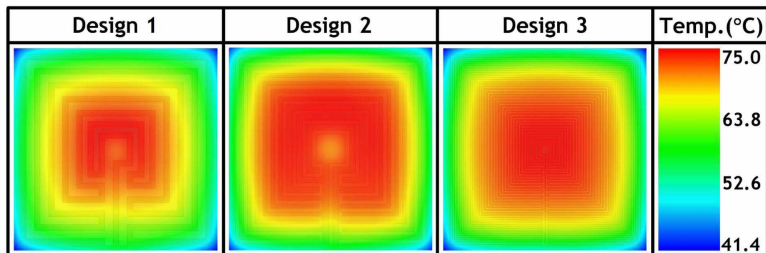
도면1a



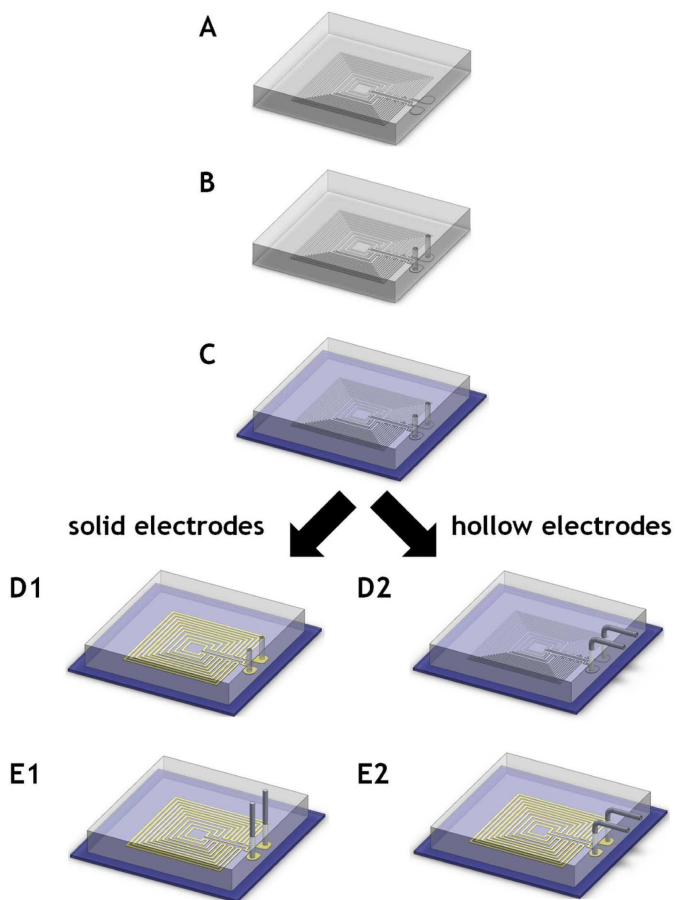
도면1b



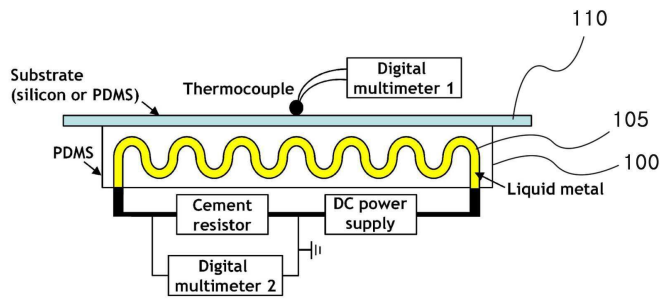
도면2



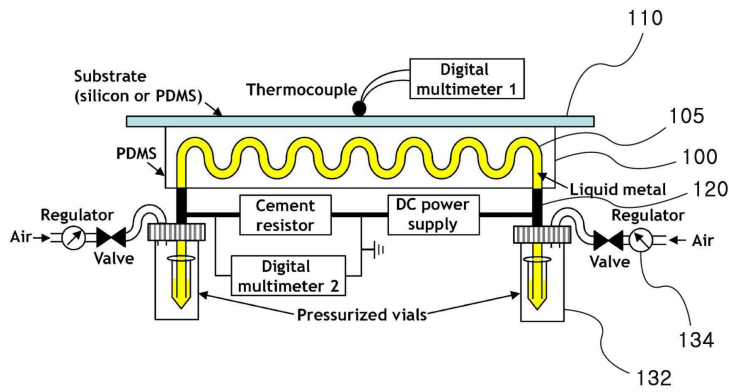
도면3



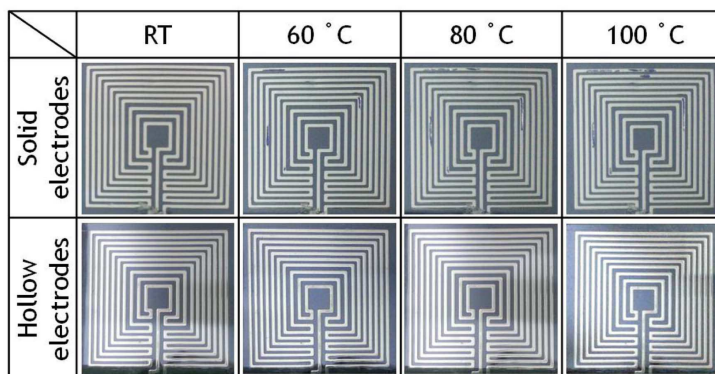
도면4



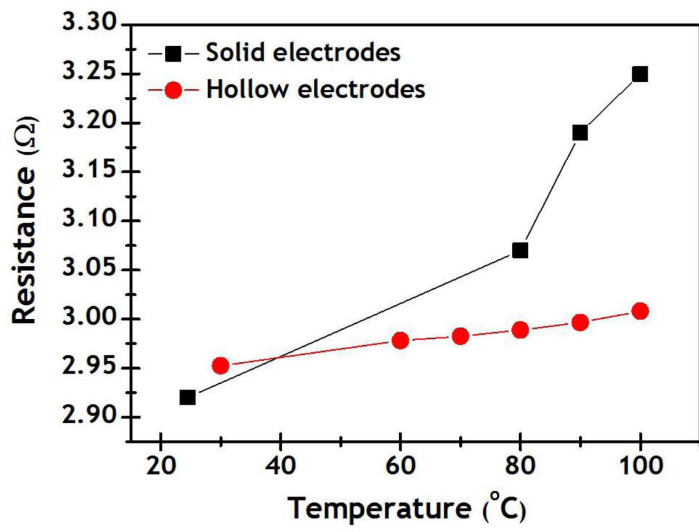
도면5



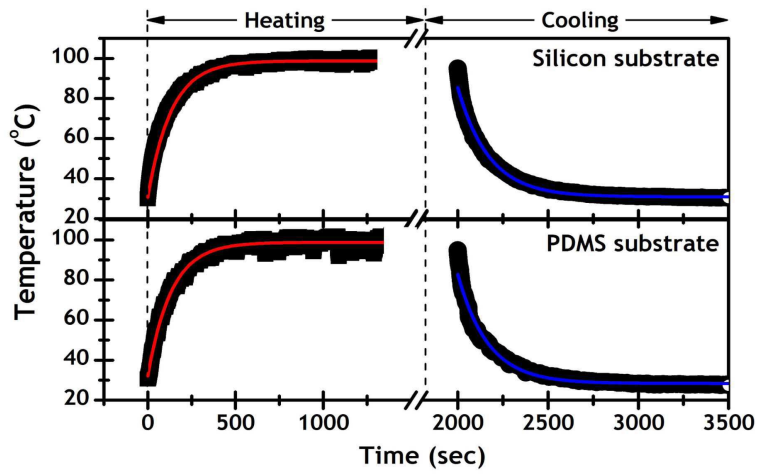
도면6



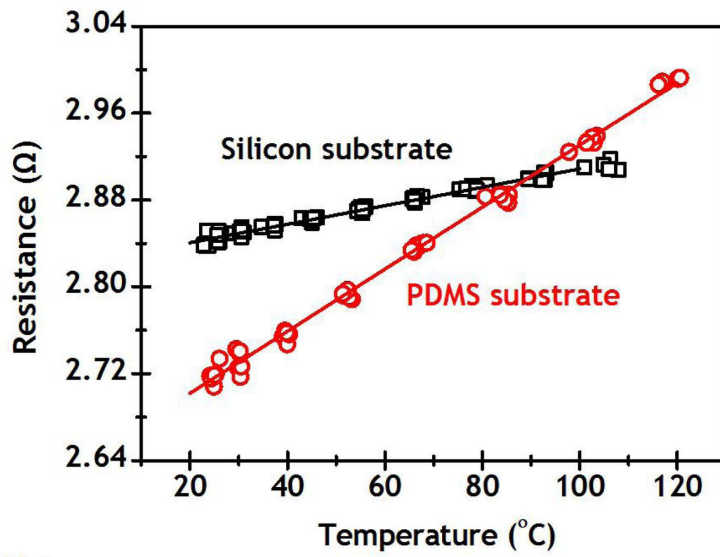
도면7



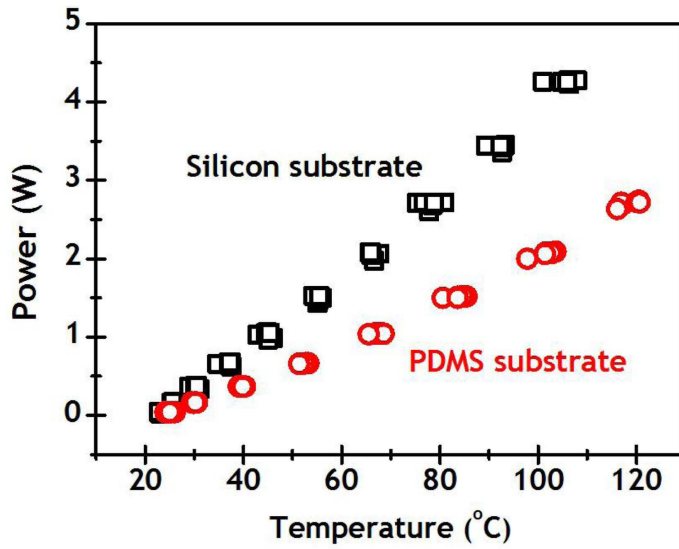
도면8



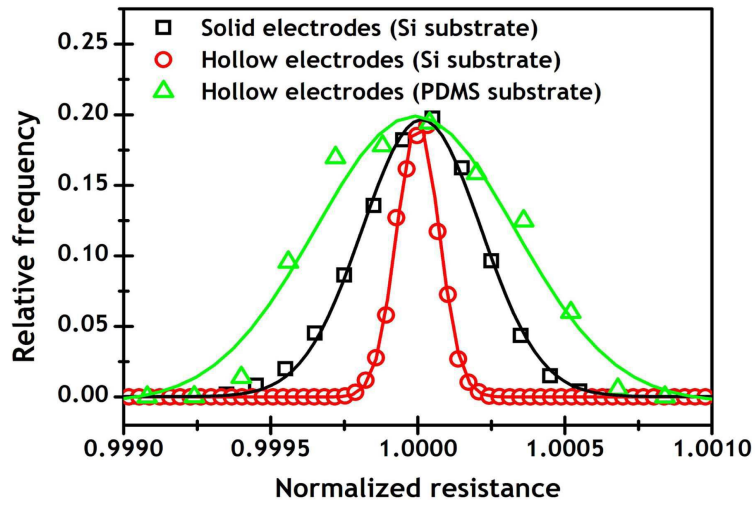
도면9a



도면9b



도면10



도면11

