미소구조물의 표면온도 측정 및 제어를 위한 다이오드 온도 센서 어레이 설계

한일영† · 김성진*

Diode Temperature Sensor Array for Measuring and Controlling Micro Scale Surface Temperature

Il Young Han, Sung Jin Kim

Key Words : Diode Temperature Sensor Array, Micro Scale Temperature Sensor, Diode Sensor

Abstract

The needs of micro scale thermal detecting technique are increasing in biology and chemical industry. For example, Thermal finger print, Micro PCR(polymer chain reaction), μTAS and so on. To satisfy these needs, we developed a DTSA(Diode Temperature Sensor Array) for detecting and controlling the temperature on small surface. The DTSA is fabricated by using VLSI technique. It consists of 32 × 32 array of diodes (1,024 diodes) for temperature detection and 8 heaters for temperature control on a 8mm × 8mm surface area. The working principle of temperature detection is that the forward voltage drop across a silicon diode is approximately proportional to the inverse of the absolute temperature of diode. And eight heaters (1KΩ) made of poly-silicon are added onto a silicon wafer and controlled individually to maintain a uniform temperature distribution across the DTSA. Flip chip packaging used for easy connection of the DTSA. The circuitry for scanning and controlling DTSA are also developed

기호설명

- I_o: 포화 전류(A)
- k: 볼츠만 상수(joules/kelvin)
- T: 절대 온도(K)
- q: 전자의 전하량(C)

1. 서 론

논문의 미세구조물에서의 열 및 물질 전달 현상은 MEMS 분야의 활발한 연구로 인해 최근 많이 연구되어 지고 있으며, μ-TAS 및 미세 화학공정, 생물 반응기, 미세 열교환기 및 마이크로 냉각장치의 설계 및 개발 등에 응용되고 있다. 특히 마이크로 구조물내에서의 빠른 가열과 냉각을 이용하는 마이크로 중합효소 연쇄 반응기(micro PCR) 또는 열적 지문센서는 대표적인 연구사례라고 할 수 있다.

이러한 마이크로 구조물의 열전달 현상을 측정하기 위해 사용되는 온도센서는 전기적 광학적인 방법들을 이용하지만[1], 대부분 사용하기 편리한 열전대(Thermocouple)를 이용하는 경우가 많다. 그러나 열전대의 비드 크기는 수백 마이크로미터 사이즈이기 때문에 마이크로 구조물에 부착시켜서 온도를 측정하는 것은 적합하지 못한 실정이다. 이러한 단점을 극복하기 위해 기존의 연구자들은 미세 전기저항 온도센서(micro RTD)를 이용하였다. 그러나 미세 전기저항 온도센서는 연결선이 길어짐에 따라 측정 오차를 유발하며, 이를 극복하기 위한 방법인 4 점 측정 방법을 이용하여 오차를 줄일 수 있으나, 온도센서 하나 당 4 개의 연결선과 패드가 필요하기 때문에 고집적 센서로 사용하기에는 어려운 점이 많이 있다.

† 한국과학기술원 기계공학과 대학원
E-mail : nyoung1@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3083 FAX : (042)869-8207
* 한국과학기술원 기계공학과

이를 개선하기 위해 미세 열전대 센서 어레이가 개발되어 미세 구조물의 온도 분포를 측정할 수 있게 되었다. 이 센서는 25 개의 열전대가 5mm × 5mm 의 웨이퍼 표면에 증착되어 있다. 만들기 쉽고 보편적인 열전대를 이용하기 때문에 열전대 계측장치와 호환이 되는 장점이 있다. 하지만 열전대의 특성상 센서 하나에 두개의 연결선과 두개의 패드가 필요하기 때문에 1,000 개의 집적된 온도센서가 필요할 경우 2,000 개의 연결선과 패드가 필요하게 되는 문제점이 발생하게 된다. 이것은 미소 저항 온도 센서 어레이(Micro RTD Array)에서도 나타나는 문제점으로 작은 영역에서 많은 지점의 온도 측정이 필요할 때는 열전대나 저항선을 사용하는 것이 실제적이지 못함을 알 수가 있다.

이러한 미세 전기저항 온도센서와 미세 열전대 센서 어레이의 단점을 극복하기 위해 본 연구에서는 MEMS 기술과 전자회로 및 제어기술을 응용하여 마이크로 시스템 내의 온도 측정 및 제어를 위한 DTSA(Diode Temperature Sensor Array)를 개발하고자 한다. 이 센서는 1,024 개의 다이오드 온도센서를 8mm × 8mm 에 고집적 시켰고, 각 다이오드의 온도신호를 측정하기 위한 스캐닝(Scanning) 방식을 이용하여 다이오드 연결에 필요한 패드를 64 개로 줄여 설계하였다. 스캐닝 방식은 흔히 사용되는 DRAM 의 메모리 셀을 연결하는 방식과 비슷하다.

많은 연구자들이 다이오드 센서에 관해 연구를 수행하였는데, 특히 Kim et al.[3.4.1]은 다이오드(Diode)를 어레이(Array)로 제작하여 비등 현상을 관찰하는데 적용하려고 하였다. 이 센서는 가로 32 개, 세로 32 개의 다이오드 어레이를 3.2mm × 3.2mm 에 집적하였으나, 온도를 측정하는데 있어서 제작상의 어려움으로 인해 16 개의 센서만 동작하는 것을 확인하는데 그쳤다. 그러므로 DTSA 는 그들의 연구를 보다 발전 및 확장시켜 마이크로 구조물 내의 온도 측정 및 제어에 사용되는 센서를 개발하는데 목적이 있다.

2. 다이오드 온도센서 어레이의 설계 및 제작

2.1 다이오드 온도 센서의 측정 원리

그림 1 에 보이는 바와 같이 다이오드의 일전 전류(일반적으로 1mA)를 인가하면 다이오드 양단 사이에 순방향 전압강하(Forward Voltage Drop)가 형성이 된다. 특히 다이오드 전류-전압 곡선(Diode I-V Characteristics Curve)에서 온도가 상승하면서 다이오드 특성의 변화가 생기게 되는데, 순방향 전압강하(Forward Voltage Drop)량이 온도가 상승하면서 V_{b1} 에서 V_{b2} 로 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 온도와 순방향 전압강하(Forward Voltage Drop) 사이의 상관관계를 이용하면 온도를 측정할 수 있게 되는 것이다. 보통 상온에서 순방향 전압강하는 0.7V 이며, 1°C의 온도상승 시 순방향 전압강하는 2mV 가량 줄어들게 된다. 그러나 이 값은 평균값을 의미하고 공정의 특성상 모든 다이오드 센서가 이와 똑같은 경향을 보이지는 않기 때문에 보정(Calibration)하는 작업이 필요하게 된다.

$$i_D = I_0 e^{qV/kT}$$

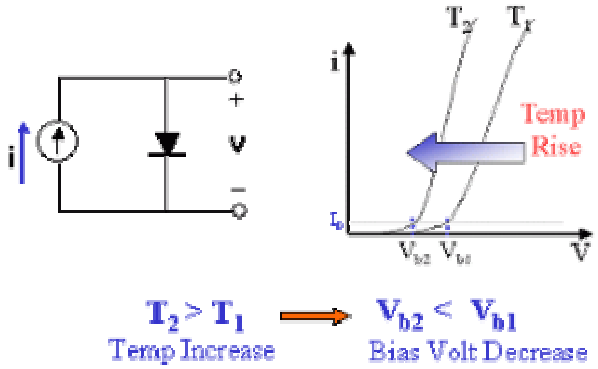

Fig. 1 The Working Principle of Diode Temperature Sensor

2.2 Diode Temperature Sensor Array(DTSA)의 설계

DTSA 를 제작하기 위해 다음과 같은 설계를 수행하였다. 그림 2 는 DTSA 의 단위 다이오드를 간단하게 표시한 그림이다. 그림 2(a)는 다이오드를 위에서 바라본 모습이며, 그림 2(b)는 다이오드의 단면을 보여 주는 그림이다. 다이오드 단면 그림에서 나타낸 바와 같이 실리콘 웨이퍼(Wafer)에 n-well 을 형성하고 P+와 N+를 도핑(Dopping)한 후 Metal 1 과 Metal 2 를 각각 행과 열방향으로 배치하였다. 마지막으로 폴리실리콘(Polysilicon)을 증착하여 히터(Heater)로 사용할 수 있게 하였다. 이를 상용 프로그램인 Cadence 를 이용하여 실제로 설계한 레이아웃(Layout)의 모습은 그림 3 과 같다.

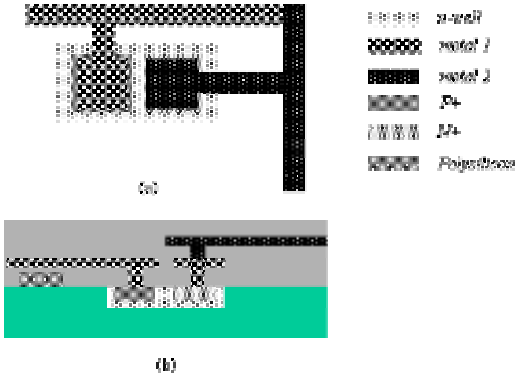

Fig.2 Schematic of a Single Diode in DTSA

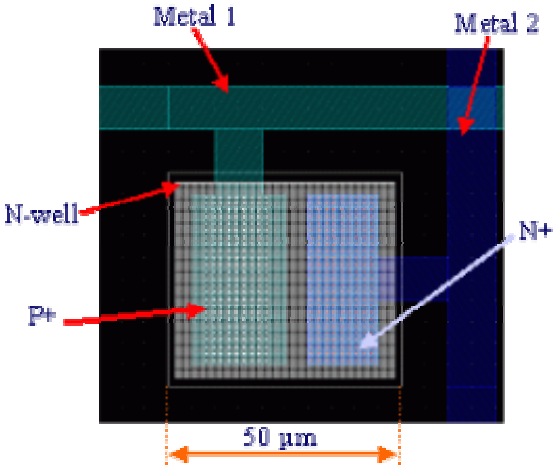

Fig.3 A Diode Layout Using Cadence Program

이러한 단위 다이오드 레이아웃(Layout)을 조합하여 32×32 다이오드 어레이(Array)를 설계하였다. 이 다이오드 어레이는 그림 4 에서와 같이 총 1,024 개의 다이오드 온도측정 센서를 8mm×8mm 영역 안에 배치하도록 설계가 되어 있으며, 8 개의 폴리실리콘 히터(Polysilcon Heater)를 증착하여 DTSA 의 온도를 균일하게 제어할 수도 있다. 각 히터의 저항은 약 1kΩ 으로 설계가 되어 있다. 또한 패드(Pad)의 크기는 600µm×600µm 로 설계되어 있어서 플립칩 패키징(Packaging)을 가능하게 설계하였다.

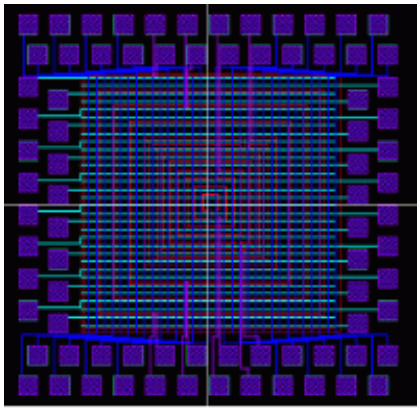

Fig.4 Diode Temperature Sensor Array Layout

2.3 DTSA 의 제작

DTSA 의 제작을 위해 Hynix 0.35µm 공정을 이용하였다. Hynix 0.35µm 공정은 4 층까지의 금속(4 Metal Layer)을 사용할 수 있으며, 게이트 길이(Gate Length)를 0.35µm 까지 줄일 수 있는 공정이다. 이 공정을 이용하여 위에서 설계한 DTSA 를 제작하였다. 그림 5 는 32×32 DTSA 가 제작된 칩을 나타내고 있다. 그림에 1,024 개의 다이오드는 그 크기가 작아서 육안으로 볼 수가 없으며, 사면에 2 줄의 연결 패드(Interconnection Pad)를 볼 수가 있다. 또한 Chip 내부에 사격형 모양의 띠를 볼 수 있는데 이것이 바로 폴리실리콘 히터(Polysilicon Heater)들이다. 다이오드의 형상을 보기 위해 DTSA 의 표면을 확대해 보면 그림 6 과 같다. 6 개의 작은 사각형들이 다이오드들이며, 넓은 선이 폴리실리콘(Polysilicon) 재질의 히터이다.

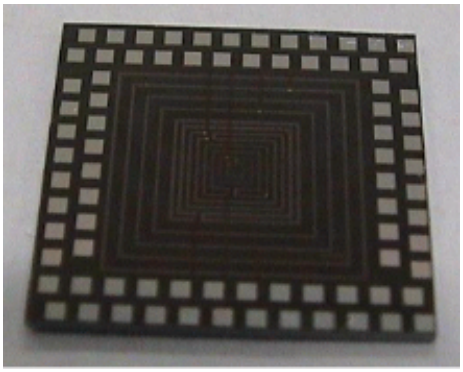

Fig.5 A Photograph of 32×32 DTSA

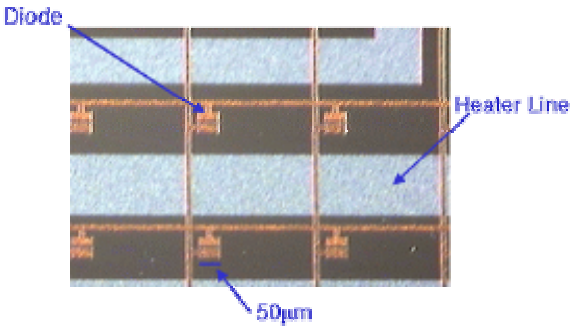

Fig.6 Junction Points of the DTSA

이렇게 제작된 DTSA 칩을 외부신호와 연결시키기 위해 그림 7 과 같이 플립 칩 패키징(Flip Chip Packaging)을 수행하였다. 이 패키징을 하기 위해 우선 DTSA 의 패드표면에 니켈(Ni)을 무전해 도금을 하여 UBM 을 형성한 후, 직경이 300μm 납구슬(Solder Ball)을 패드에 올려서 접합을 하게 된다. 그리고 DTSA 의 패드의 형상과 같은 PCB(Printed Circuit Board)를 제작하여 DTSA, 납구슬, PCB 를 고온에서 접합하여 DTSA 의 신호를 PCB 를 통해 외부의 신호계측기기와 연결하게 된다. 이 PCB 의 전체 크기는 50mm×50mm 이다.

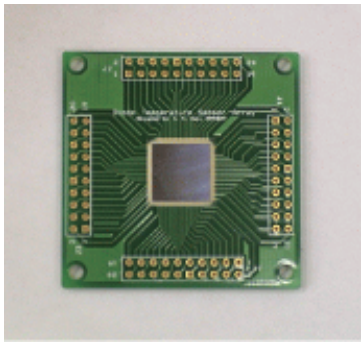

Fig.7 Photograph of Flip Chip Packaging

2.3 DTSA 구동회로 설계

1024 개의 다이오드 중에 하나의 다이오드를 선택하고 온도 신호를 받아내며 이 온도 신호를 분석하여 적절한 파워(Power)를 히터(Heater)에 공급하게 해주는 회로가 DTSA 의 구동 회로이다. 이 구동회로는 크게 Analog 회로, FPGA 회로, 데이터 수집보드로 나뉠 수 있다. 첫 번째는 Analog 회로로써 1mA 의 정전류를 발생시키며, 입력되는 5V 전압을 구동회로 내부에서 사용되는 3.3V 전원과 12V 전원으로 바꾸는 작업도 수행을 한다. 두 번째 회로는 FPGA 회로이다. 이 회로의 기능은 컴퓨터의 데이터 수집 보드에서 발생하는 디지털 신호를 받아 1,024 개의 다이오도 중에 어떤 다이오드의 신호를 받아야 하는지를 제어한다. 이 기능은 ALTER 회사의 EPM3064A 칩을 이용하여 구현하였다. 또한 PWM(Pulse Width Modulation)신호를 발생시키기 위해서 EPK10K10 칩을 이용하였다. 이 EPK10K10 칩은 데이터 수집보드의 신호를 받아 8 개의 PWM 신호를 발생한다. PWM 신호는 DTSA 칩 표면의 온도를 조절하는데 사용이 된다. 마지막으로 데이터수집보드는 National Instrument 사의 NI6052E 제품을 이용하였다. 또한 LABVIEW 프로그램을 이용하여 DTSA 표면의 온도를 가시화하는 프로그램을 작성하였다. 이러한 시스템의 개략도를 그림 8 에 나타내었다.

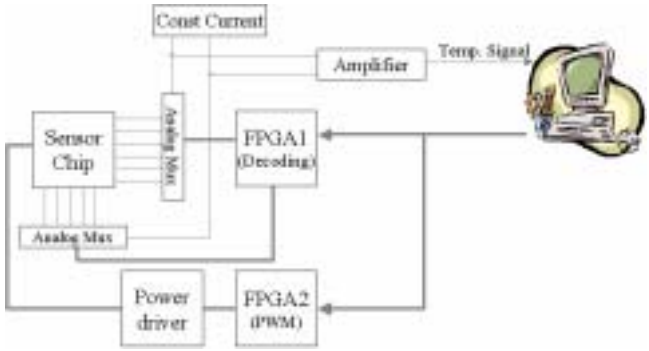

Fig.8 Schematic Design of Controlling DTSA System

2.4 DTSA 의 성능 테스트

DTSA 의 성능을 측정하기 위하여 온도와 다이오드의 순방향 전압강하(Forward Voltage Drop)를 측정하였다. DTSA 를 구동하기 위에서 설계한 구동회로를 연결하였다. 온도를 변화에 따른 순방향 전압강하를 알기 위해 DTSA 를 항온조에 넣고 온도를 변화시켰다. DTSA 의 성능을 평가하기 위해서 1,024 다이오드 중에 4 개만을 선정하였다. 그 결과는 그림 9 에 보이는 바와 같다. 그래프에서 보이는 바와 같이 20°C 90°C의 온도 범위에서 4 개의 다이오드 신호 모두 선형적인 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다. 다만 반도체 제작상의 문제로 인한 기준점이 다르기 때문에 각각의 다이오드에 맞는 상관식(Correlation)을 이용하여 보정하였다. 특히 기준점의 변화는 대략 80mV 이고, 이는 Kim

et al.에서도 80mV 의 기준점 변화가 있었기 때문에 크게 문제가 되지 않는다고 볼 수 있다.

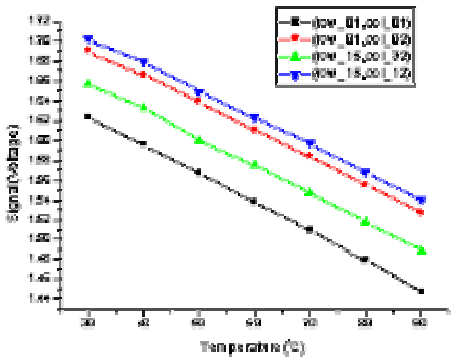

Fig.9 Test Results of 4 Diode in DTSA

위의 항온조를 이용한 온도 보정을 통해 각 다이오드의 상관식을 일차식으로 얻었고, 이를 통해 실제 DTSA 의 표면온도를 측정하였다.

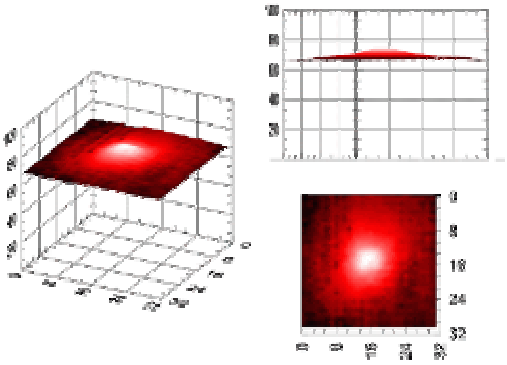

Fig.10 The Test of 0.84W power loading in the center of the DTSA

위의 그림 10 은 DTSA 의 정 중앙 히터에 0.84W 를 인가하였을 때 DTSA 의 1,024 개의 다이오드 온도 센서로부터 얻은 온도 데이터를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 각각의 온도 센서들이 잘 작동하는 것을 알 수가 있다.

3.결론

미소 구조물 표면의 온도를 측정하고 표면 온도를 제어할 수 있는 DTSA(Diode Temperature Sensor Array)를 개발하였다. DTSA 는 12mm ×12mm 영역에 32×32 어레이 (Array) 로 구성된 1,024 개의 다이오드 온도 센서를 부착하여 미세 영역의 온도를 측정할 수 있을 뿐만 아니라 표면에 내장된 8 개의 heater 를 이용해 DTSA 의 표면 온도를 원하는 온도로 제어할 수 있는 장치이다. 신호선의 연결을 위해 플립칩 페키징 (Flip Chip Packaging)을 하였으며, DTSA 의 온도신호를 받고 제어하는 회로를 제작하였다. 기본적인 성능 테스트 결과, 다이오드 신호와 온도간에 선형적인 관계를 확인하여 온도센서로 동작하는 것을 검증하였다.

후 기

본 연구는 국가 지정 연구실 사업(2-578)에서 수행된 결과이며 관계자 여러분께 감사 드립니다

참고문헌

[1] D. L. Blackburn, 2002, “Thermal measurement of semiconductor devices,” Thermal Challenges in Next Generation Electronic System, Int. Conference THERMS 2002, Santa Fe, New Mexico, USA, 13-16, Jan.

[2] S. P. Jang, S. J. Kim, 2003, “Experimental investigation of thermal characteristics for a microchannel heat sink subject to an impinging jet, using a micro-thermal sensor array,” Sens Actuators A. Vol.105, pp. 211-214.

[3] J. Kim, M. Whitten, R.W. Quine, T.S. Kalkur, 1998, “Design and development of a diode array for use in boiling heat transfer,” Journal of Japan Society of Microgravity Application, Vol. 15, pp. 202-207