



Hot Spot 열전 냉각 기술

한승우 책임연구원 (한국기계연구원 나노융합시스템연구본부)

1. 서론

마이크로 시스템 (Microsystem), 나노전자부품 (Nano electronics), 멀티칩 패키지 (Multi-chip packaging) 등 기술의 발달과 마이크로프로세서를 비롯한 고집적회로의 처리속도가 비약적으로 향상 되고 선폭이 감소함에 따라 첨단전자제품의 발열량이 커지고 이를 효율적으로 제거하는 기술이 요구되고 있다 [1,2].

열전냉각소자는 소형으로 제작이 가능하며, 응답속도가 빠르고, 신뢰성이 높으며, 기계적으로 움직이는 부분이 없으므로 진동과 소음이 없다는 장점을 가지고 있다.

그러나 기존의 벌크제조기법으로 만들어지는 열전냉각소자는 고집적회로에 적용하기 어려움이 있다. 반면 박막 열전소재를 이용하면 작은 영역의 국부적인 Hot spot에 대한 냉각이 가능해짐으로써 열전냉각소자의 박막화에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 또 한 가지 큰 장점으로는 마이크로 열전냉각소자를 칩 패키지의 내부에 삽입함으로써 직접적으로 능동냉각 (Active cooling)을 할 수 있다 것이다

2. 일반적인 열전냉각 설계

그림 1에는 열전냉각소자를 이용한 냉각의 원리

를 보여준다.

P, N 열전반도체로 구성된 열전소자에 전류를 가해주면 전류의 크기에 비례하여 한쪽의 접합부에서는 흡열, 다른 한쪽에서는 발열이 일어난다. 이를 Peltier 효과라고 부르며, 열전냉각의 원리가 된다. 이 때 저온부에서의 냉각열량 (Cooling flux)은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_c = (S_p - S_n)IT_c - K(T_h - T_c) - \frac{1}{2}I^2R \quad (1)$$

여기서 S_p , S_n 는 p와 n-type 제백계수 (Seebeck coefficient), I 는 전류, T_c 와 T_h 는 저온부와 고온부의 온도, K 는 냉각소자의 열전도율 (Thermal conductance), R 은 냉각소자의 저항이다.

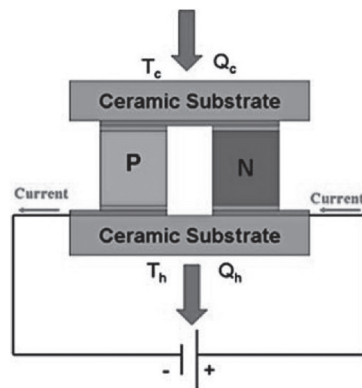


그림 1. 열전냉각의 원리.



그리고 $dq/dl = 0$ 가 되는 최대 냉각열량은 식(2)와 같다.

$$q_{max} = \frac{1}{2} \frac{(S_p - S_n)^2 T_c^2}{R} - K(T_h - T_c) \quad (2)$$

또한 $q_{max} = 0$ 가 되는 냉각소자의 두께방향에 대한 최대 온도차는 식(3)과 같다.

$$\Delta T_{max} = \frac{(S_p - S_n)^2 T_c^2}{2KR} = \frac{ZT_c^2}{2} \quad (3)$$

여기서, $S_p = -S_n = S$, 성능 지수 (Figure of merit)

$$Z = \frac{(S_p - S_n)^2}{KR} \rho$$

ρ는 전기저항 (Electrical resistivity),

κ는 열전도도 (Thermal conductivity)이다. 따라서 최대 온도차는 ZT값이 클 때 얻을 수 있다.

고온부와 저온부의 온도가 같을 때 열전냉각소자의 저온부에서의 단위면적당 최대 냉각열량은 식(4)와 같다.

$$q_{max}'' = \frac{q_{max}}{2A} = \frac{S^2 T_c^2}{2\rho d} \quad (4)$$

여기서 d는 열전요소 (Element)의 높이, A는 열전 요소의 면적을 나타낸다. 최대 냉각열량은 냉각소자의 두께와 반비례함을 알 수 있다. 따라서 Hot spot과 같이 급격히 냉각열량을 증가시켜야 할 경우 박막소재를 이용한 마이크로 열전냉각소자의 필요성이 대두되게 된다.

3. Hot spot 열전냉각의 응용사례

마이크로 열전냉각소자를 이용하여 Hot spot 냉각을 시도한 연구결과들이 활발히 보고되고 있다. 여기서는 초격자 열전박막을 이용하여 제작된 마이크로 열전냉각소자, 벌크 실리콘을 이용하여 제작된 마이크로 열전냉각소자, LED 냉각을 위한 마이크로 열전냉각소자에 대한 사례를 소개하고자 한다.

3.1 초격자 열전박막을 이용한 칩 냉각

GaAs 기판 위에 MOCVD (Metal-organic chemical vapour deposition)을 이용하여 증착한 p-type Bi₂Te₃/Sb₂Te₃와 n-type Bi₂Te₃/Bi₂Te_{2.83}Se_{0.17}의 초격자 열전박막을 이용하여 마이크로 열전냉각소자를 제작하였다 [3]. 마이크로 냉각소자는 3.5 x 3.5 mm의 크기에 두께가 약 100 μm로써 7 x 7 p-n 열전 요소로 구성되었다. 사용된 초격자 열전박막 소재의 ZT값은 약 2 이상이다.

제작된 마이크로 냉각소자는 그림 2와 같이 테스트 칩 위에 설치하여 냉각을 실시하였다. 테스트 칩은 중앙부에 인위적으로 Hot spot을 구현하기 위하여 소형 히터 (Heater)를 포함하도록 MEMS 공정을

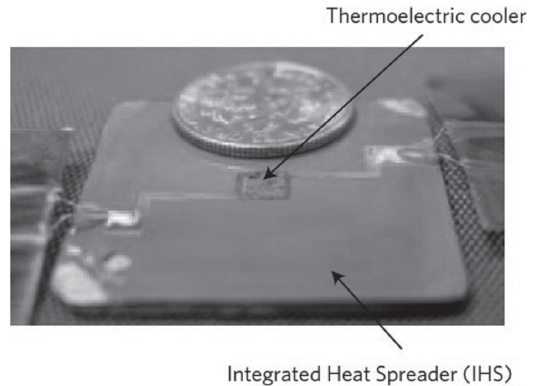


그림 2. 마이크로 열전냉각소자가 설치된 테스트 칩.

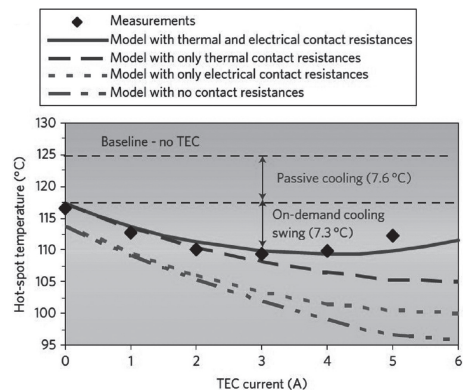


그림 3. 초격자 열전박막을 이용한 마이크로 냉각소자 실험 및 해석 결과.

이용하여 제작되었다.

3 A의 전류를 흘려주었을 때 14.9 °C의 냉각이 이루어졌으며, 냉각열량은 약 1250 W/cm²이었다. 그림 3과 같이 실험결과는 여러 가지 해석 모델을 이용하여 비교하였으며, 전기적 접촉저항과 열적 접촉저항을 모두 고려하였을 때 그 결과가 잘 일치하였다. 또한 12개의 마이크로 냉각소자에 대해 실험하여 재현성 있는 결과를 확보하였다.

3.2 실리콘 마이크로 열전냉각소자

단결정 실리콘은 핵심적인 반도체 소재이므로 실리콘 열전냉각소자가 Hot spot 냉각에 적용된다면 반도체 공정 호환성에 의한 장점은 상당히 클 것이다. 실리콘 (p-type)은 제백계수가 450 μV/K, 전기저항이 35 μΩ m로써 열전재료로써의 좋은 특성을 가지나, 열전도도가 150 W/mK로써 크게 높아 ZT값은 0.012를 갖는다. 이는 일반적인 벌크소재 Bi₂Te₃ (p-type)의 ZT값인 0.7 보다 크게 못 미친다 [4].

P-type boron이 도핑 (Doping)된 벌크 실리콘을 이용하여 마이크로 열전냉각소자를 제작하였다 [5]. 제작공정은 건식 식각 (Dry etch), 리소그래피 (Lithography), 증착 (Evaporation) 등을 이용하였다. 제작된 냉각소자는 그림 4에 보여주며, 크기는 40 μm x 40 μm이다. 마이크로 냉각소자는 0.2 A의 전류를 흘려주었을 때 약 1.2°C의 냉각을 나타내었으며, 냉각열량이 580 W/cm²이었다.

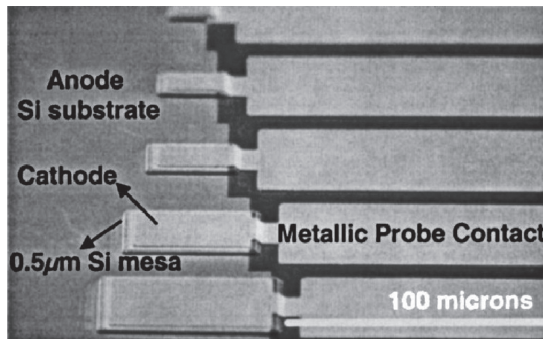


그림 4. 실리콘 마이크로 열전냉각소자.

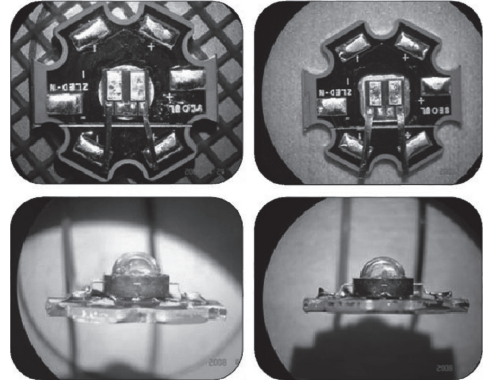


그림 5. 마이크로 열전냉각소자가 장착된 LED 소자.

3.3 LED cooling

고출력 LED의 접합부 온도 (Junction temperature)는 LED 소자의 성능과 내구성에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 소형, 고출력화 되고 있는 LED의 기술동향에 따라 발생하는 열문제의 해결책으로 마이크로 열전냉각소자가 고려되고 있다.

그림 5는 마이크로 열전냉각소자가 장착된 LED 소자를 보여준다 [6]. LED 소자에 0에서 1 A까지 전류를 흘려주고 기본적인 패키지를 한 LED와 마이크로 냉각소자를 내장한 패키지의 LED에 대한 접합부 온도를 측정 평가하였다. 두 경우 모두 기판의 온도는 25°C를 유지하도록 온도를 조절하였다. 이때 두 LED의 접합부 온도의 차이는 약 5~25°C까지 나타났다.

4. 결론

반도체와 나노기술의 발달에 따라 전자제품은 더욱 소형화되고, 고성능화되고, 집적화되고 있다. 여기에 따른 발열 문제는 해결해야 할 매우 중요한 도전과제로써 지속적인 연구가 이루어져야 할 분야이다. 이러한 상황에서 열전박막소재를 이용한 마이크로 냉각기술은 하나의 중요한 대안으로써 관심이 집중되고 있다. 이와 더불어 나노기술을 접목하여 기존의 열전재료에 대한 성능을 향상시키는 기술과



실리콘 등을 나노구조로 제조함으로써 값싸고 안정적으로 소재를 확보하고자 하는 기술 등이 병행하여 발전함에 따라 본 기술에 대한 가치는 더 할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

참고 문헌

[1] D. H. Kim, G. H. Lee, 2004, “ New Technology of Thermoelectric Cooling Device,” Machinery and Materials, Vol. 39, p95

[2] Luciana W.da Silva, Massuod Kaviany, International Journal of Heat and mass Transport, Vol. 47, pp. 2417-2435, 2004

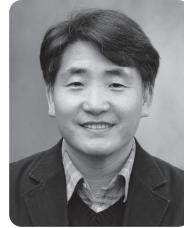
[3] Ihtesham Chowdhury, Ravi Prasher, Kelly Lofgreen, Gregory Chrysler, Sridhar Narasimhan, Ravi Mahajan, David Koester, Randall Alley and Rama Venkatasubramanian, Nature Nanotechnology, Vol. 4, pp. 235-238, 2009

[4] Rowe D. M. CRC Handbook of Thermoelectrics, Boca Raton, FL: CRC Press, 1995

[5] Zhang Y., Shakouri A., and Zeng G., Applied Physics Letters, Vol. 85, No. 14, pp. 2977-2979, 2004

[6] LED Journal, September/October, 2008

저|자|약|력|



성 명 : 한승우

◆ 학 력

- 1986년 부산대학교 공과대학 기계공학과 공학사
- 1990년 부산대학교 대학원 기계공학과 공학석사
- 2006년 부산대학교 대학원 기계설계공학과 공학박사

◆ 경 력

- 1990년 - 1990년 삼성항공산업주식회사 사원
- 1991년 - 현재 한국기계연구원 나노융합시스템 연구본부 책임연구원
- 2007년 - 현재 과학기술연합대학원대학교(UST) 교수
- 2007년 - 현재 부산대학교 겸임교수

