

## 고열유속 소자를 위한 칩 레벨 액체 냉각 연구

박만석<sup>1</sup> · 김성동<sup>2</sup> · 김사라은경<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>서울과학기술대학교 NID융합기술대학원, <sup>2</sup>서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

### Study of Chip-level Liquid Cooling for High-heat-flux Devices

Manseok Park<sup>1</sup>, Sungdong Kim<sup>2</sup> and Sarah Eunkyung Kim<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National Univ. of Science and Technology,  
232 Gongneung-ro Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

<sup>2</sup>Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology,  
232 Gongneung-ro Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

(Received May 14, 2015; Corrected June 16, 2015; Accepted June 23, 2015)

**초 록:** 고성능 소자의 전력밀도가 증가함에 따라 소자의 열 관리는 주요 핵심 기술로 부각되었고, 기존의 heat sink 나 TIM(thermal interface material)으로는 소자의 열 문제를 해결하는데 한계가 있다. 이에 최근에는 열 유속(heat flux)을 증가시키고자 액체 냉각 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 본 연구에서는 TSV(through Si via)와 microchannel을 이용하여 칩 레벨 액체 냉각 시스템을 제작하고 시스템의 냉각 특성을 분석하였다. TSV와 microchannel은 Si 웨이퍼에 DRIE(deep reactive ion etching)을 이용하여 공정하였고, 3가지 다른 형상의 TSV를 제작하여 TSV 형상이 냉각 효율에 미치는 영향을 분석하였다. TSV와 microchannel 내 액체흐름 형상은 형광현미경으로 관찰하였고, 액체 냉각에 대한 효율은 실온에서 300°C까지 시편을 가열하면서 적외선현미경을 이용하여 온도를 측정 분석하였다.

**Abstract:** Thermal management becomes a key technology as the power density of high performance and high density devices increases. Conventional heat sink or TIM methods will be limited to resolve thermal problems of next-generation IC devices. Recently, to increase heat flux through high powered IC devices liquid cooling system has been actively studied. In this study a chip-level liquid cooling system with TSV and microchannel was fabricated on Si wafer using DRIE process and analyzed the cooling characteristics. Three different TSV shapes were fabricated and the effect of TSV shapes was analyzed. The shape of liquid flowing through microchannel was observed by fluorescence microscope. The temperature differential of liquid cooling system was measured by IR microscope from RT to 300°C.

**Keywords:** Liquid Cooling, Heat Flux, Thermal Management, Microchannel, TSV

## 1. 서 론

고성능 소자의 수요 증가 및 3차원 적층 기술 상용화로 인해 전력 밀도는 증가하고, 열 유속(Heat flux)이 매우 높아지고 있으며, 소자 두께의 감소로 인해 발열 원(Hot spot) 발생 확률은 더 높아지고 있다. 열 관리는 소자의 성능과 신뢰성에 영향을 주는 주요 변수이기 때문에 열 관리 문제는 반드시 해결되어야 할 핵심 과제이다. 특히 최근 3차원 적층 구조에서 열 관리는 핵심 사항으로 인식되고 있다.<sup>1,2)</sup> 이러한 열 관리 문제 해결을 위한 방법으로

는 TIM(Thermal Interface material)이나 Graphite 등의 nanocomposite과 같은 재료 연구가 활발히 진행되고 있으며,<sup>3-6)</sup> 액체 냉각이나 heat pipe 같은 시스템 연구도 진행되고 있다.<sup>7-9)</sup> 또한 thermal Si via와 같이 3차원 적층 기술로 각광 받고 있는 TSV(through Si via) 기술을 이용한 연구들도 진행되고 있다.<sup>10-12,22)</sup>

TIM, heat spreader, heat sink와 같은 passive 또는 active air-cooling 시스템은 구조가 비교적 간단하고, 저비용으로 제작이 가능하며, 신뢰성이 확보된 구조로 소자 냉각 방법으로 주로 사용되어 왔다. 그러나, 100 W/cm<sup>2</sup> 이상

<sup>†</sup>Corresponding author

E-mail: eunkyung@seoultech.ac.kr

© 2015, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

의 전력 밀도를 가지는 고성능 고밀도 소자의 냉각 방법으로는 부적합한 실정이다. Air-cooled heat sink를 보완하기 위한 방법으로 microchannel heat sink를 대안으로 제시한 연구도 진행되었다.<sup>13-17)</sup> 하지만, 이 방법 역시 TIM이 열 전달 장애 요소로 작용하고, TIM에 대한 재료 연구가 병행되어야 하는 단점이 있다. Thermal Si via 방법은 Si 보다 높은 열전도율을 가진 Cu를 이용하여 발열 원주위에 thermal Si via를 형성하는 방법으로서, Cu로 충전된 thermal Si via가 발열 원 발생 시 주변으로 열을 분배 또는 배출 시키는 기능을 한다.<sup>10)</sup> 그러나 직접적인 냉각 효과를 기대하기 보다는 발열 원으로부터 열 분배 목적으로 사용함이 적당하므로 냉각 효율을 높일 수 있는 구조가 함께 병행되어야 한다. 현재 상용화된 3차원 적층 기술 중 PoP(Package on Package) 구조에 liquid cooling heat sink, fluidic TSV, 그리고 microchannel을 이용하여 packaging된 칩과 칩 사이에 냉매를 흘림으로써 냉각 시키는 방법도 발표되었다.<sup>18,19)</sup> 이 구조는 carrier 설계에 크게 좌우되며, 냉매를 차단하는 밀폐(Hermetic sealing)에 대한 어려움뿐 아니라, PoP 구조의 제품 시장이 줄어들고 있어 응용 분야에 제한이 있는 점 역시 단점으로 지적되고 있다.<sup>12)</sup> TSV와 microchannel을 이용한 또 다른 연구는 액체 유동을 위한 fluidic TSV와 전기적 배선 역할을 위한 electrical TSV를 칩에 직접 제작 가능한 방법으로서 칩과 근접한 거리에 fluidic TSV와 microchannel을 제작함으로써 냉각 효율이 우수하다고 보고되고 있다.<sup>20,21)</sup> 이러한 칩 레벨 액체 냉각 시스템의 경우 TSV 수와 지름 그리고 microchannel의 두께에 따라 성능의 차이가 크므로 구조적 최적화 작업이 선행되어야 하는 단점이 있다. 그러나 위에서 설명한 다양한 냉각 시스템에 비하여 칩 레벨 액체 냉각 방법은 냉각 효율이 매우 뛰어나기 때문에 관심의 대상이 되고 있다.

본 연구에서는 Si 웨이퍼에 TSV와 microchannel을 이용한 칩 레벨 액체 냉각 유로를 제작하여 액체 냉각 시스템의 제조 공정을 확보하는 것을 목표로 하였다. TSV 형태(scalloped TSV, straight TSV, trapezoidal TSV)에 따른 냉각 효율을 관찰하였고, 또한 제작된 액체 냉각 시스템의 온도에 따른 열 특성 및 유동 특성을 분석하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 TSV와 microchannel을 이용한 칩 레벨 액체 냉각 시스템의 제작과 냉각 효율 검증을 진행하였다. 유로 형성은 6인치 Si 웨이퍼에 건식 식각을 활용하였다. TSV는 scalloped 형태, straight 형태, 그리고 trapezoidal 형태로 3가지 경우를 제작하였고, microchannel은 serpentine 모양으로 길게 제작하였다. TSV 직경은 50 μm과 100 μm로 하고, 깊이는 100 μm으로 제작하였으며, microchannel의 폭과 깊이는 각각 50 μm, 100 μm으로 제작되었다. TSV와 microchannel 형성이 완료된 웨이퍼는 microchannel 내 액체 흐름 및 온도에 따른 상(Phase) 변화를 관찰하기 위해 유리 웨이퍼와 anodic bonding을 통해 sealing되었다. Anodic bonding의 상부와 하부 척(chuck) 온도는 380°C이었으며, 1000 mbar 가압 상태에서 전압 1000V를 인가하여 본딩하였다. Anodic bonding 후 TSV가 노출되도록 웨이퍼 후면에 연마(grinding)를 실시하였다. 주입액체는 실린지 펌프(Syringe pump)와 내경 1mm 튜브를 이용하여 주입하였으며, 시편과 튜브 연결은 PDMS 패드를 이용하여 제작하였다. Microchannel의 layout은 Fig. 1에서 볼 수 있으며, 공정 순서와 최종 제작된 형상은 Fig. 2에 나타내었다. 또한, 3가지 다른 형태의 TSV(scalloped TSV, straight TSV, trapezoidal TSV)를 제작하여 TSV 형태에 따른 냉각 효율을 관찰하였다.

제작된 시편의 TSV와 microchannel은 SEM(scanning electron microscope)을 이용하여 단면 형상을 확인하였으며, 열원(Heat source)로는 ceramic heater를 사용하여 상온에서 300°C까지 가열하였다. Ceramic heater 전원은 별도의 전원 인가 장치를 설치하여 전압 제어를 하였으며,

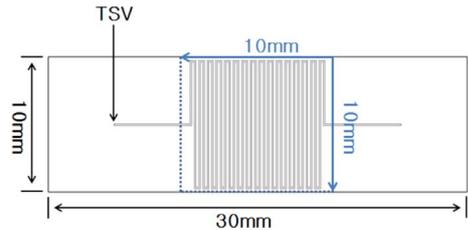


Fig. 1. TSV and microchannel design.

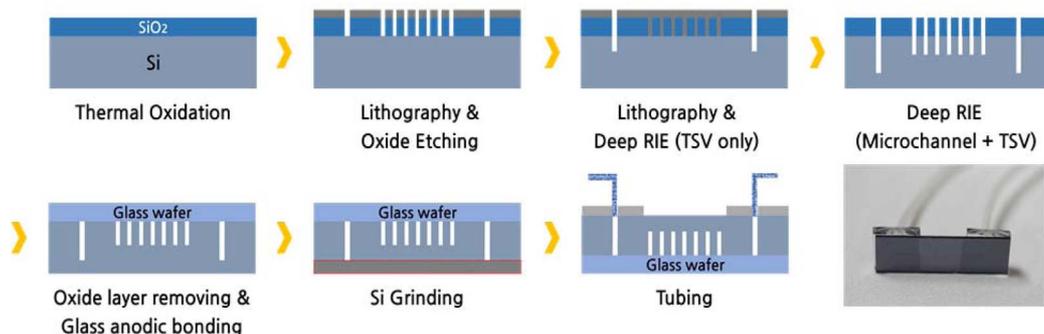


Fig. 2. Fabrication flow of on-chip liquid cooling system.

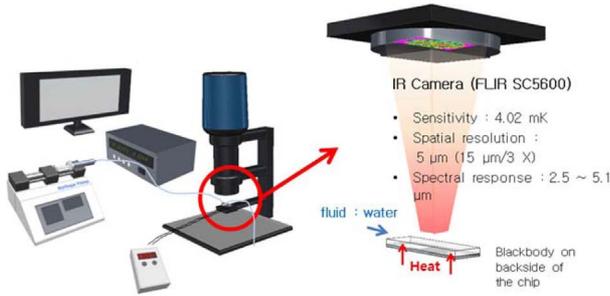


Fig. 3. Schematics of IR measurement setup.

ceramic heater로부터 방사되는 적외선을 차단하고, 정확한 IR(infrared) 측정을 위해 carbon black body를 시편 표면에 도포하여 측정하였다. 온도 변화 측정을 위한 IR 측정은 적외선 현미경을 이용하였으며, Fig. 3에 setup을 나타내었다. 그리고 가열 시 액체 상태 변화 관측은 형광현미경을 이용하여 측정하였다. 냉각 액체로는 DI(de-ionized) water를 이용하였으며, 액체 주입 속도를 50  $\mu\text{l}/\text{min}$ 부터 150  $\mu\text{l}/\text{min}$ 까지 변화를 주어 주입 속도에 따른 변화를 측정하였다. 또한 microchannel 내 열 배출 효과를 관찰하기 위해 압력강하(Pressure drop)를 측정하였으며, 이는 압력 센서를 이용하여 시편의 액체 주입구(inlet)와 배출구(outlet) 간 압력 차를 계산하였다.

### 3. 결론 및 고찰

Fig. 4에 liquid flow rate에 따른 압력강하(pressure drop)의 측정 값과 계산 값을 나타내었다. 계산 값은 아래 공식에 의해서 구하였으며, inlet과 outlet의 tube와 TSV 부분을 제외하고 microchannel 내 압력강하만 계산하였다. 계산 값이 측정 값보다 낮게 나왔으나, 차이가 작은 이유는 본 실험에 사용된 시편의 구조에서는 대부분의 압력강하가 microchannel 내에서 발생하였기 때문이다. 압력강하는 liquid input flow rate이 증가할수록 크게 나타나

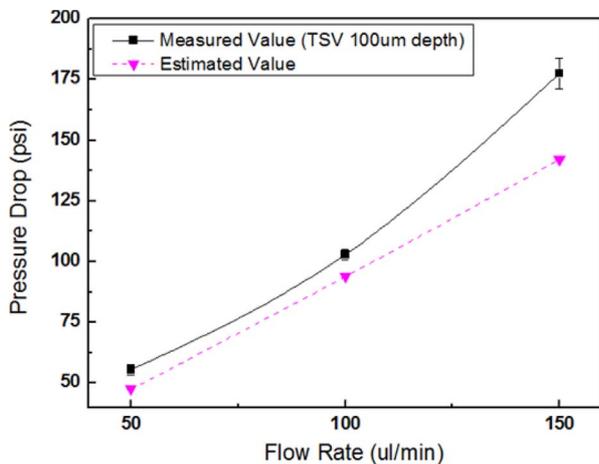


Fig. 4. Comparison between measured pressure drop and estimated pressure drop.

Table 1. Temperature measured after liquid cooling at different heating temperatures

| Heating Temp. | Flow Rate                    | TSV diameter     |                   |
|---------------|------------------------------|------------------|-------------------|
|               |                              | 50 $\mu\text{m}$ | 100 $\mu\text{m}$ |
| 100°C         | 0 $\mu\text{l}/\text{min}$   | 97°C             | 97°C              |
|               | 50 $\mu\text{l}/\text{min}$  | 91°C             | 89°C              |
|               | 100 $\mu\text{l}/\text{min}$ | 88°C             | 86°C              |
|               | 150 $\mu\text{l}/\text{min}$ | 85°C             | 82°C              |
| 200°C         | 0 $\mu\text{l}/\text{min}$   | 196°C            | 195°C             |
|               | 50 $\mu\text{l}/\text{min}$  | 182°C            | 180°C             |
|               | 100 $\mu\text{l}/\text{min}$ | 178°C            | 176°C             |
|               | 150 $\mu\text{l}/\text{min}$ | 174°C            | 173°C             |
| 300°C         | 0 $\mu\text{l}/\text{min}$   | 289°C            | 287°C             |
|               | 50 $\mu\text{l}/\text{min}$  | 281°C            | 276°C             |
|               | 100 $\mu\text{l}/\text{min}$ | 279°C            | 271°C             |
|               | 150 $\mu\text{l}/\text{min}$ | 272°C            | 268°C             |

는 것으로 관찰되었다. Table 1에서 보듯이 TSV 지름 50  $\mu\text{m}$  시편과 지름 100  $\mu\text{m}$  시편 모두 DI Water의 input flow rate이 증가할수록 냉각 성능에 더 효과가 있는 것으로 확인되었다. 그리고, 100  $\mu\text{m}$  시편에서 액체 냉각으로 인한 온도 강하가 크게 나타났는데, 이는 지름이 크면 같은 유압에서 물 유속이 높아지고 microchannel내 열 배출 향상에 도움을 주기 때문이다. 냉매 유속이 클수록 냉각 효율이 향상되는 것으로 확인되었으며, 이는 냉매 유속을 조절하는 펌프시스템이 액체 냉각 시스템의 열 배출에 매우 중요함을 의미한다.

$$\Delta P = \frac{2(fR_c)\gamma vL}{D_h^2}$$

f : friction factor

$R_c$  : Reynolds number

$\gamma$  : viscosity of water

v : velocity of water

L : length of microchannel

$D_h$  : hydraulic diameter of microchannel

가열온도(heating temperature)에 따른 액체 냉각 효과를 Table 1에 나타내었다. 가열온도가 200°C의 경우에서 냉각 전후의 온도 차(temperature differential)가 가장 크게 나타났으며, 50  $\mu\text{l}/\text{min}$ 의 경우 가열온도 100°C, 200°C, 300°C에서 온도 차는 각각 6°C, 14°C, 그리고 8°C로 관찰되었다. Liquid flow rate이 증가할수록 온도 차는 더욱 증가하였고, 150  $\mu\text{l}/\text{min}$ 의 경우 가열온도 200°C에서 온도 차가 22°C로 가장 높게 측정되었다. 가열온도 200°C에서 가장 큰 온도 차가 나타난 것은 two-phase cooling 현상이 나타났기 때문이다. Fig. 5의 형광현미경 분석에 의하면 가열온도 200°C의 경우에서 bubble과 slug가 발생하면서 two-

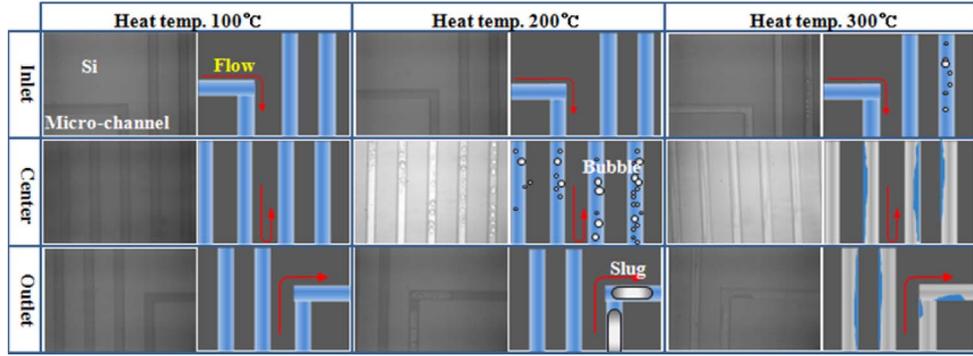


Fig. 5. Shapes of liquid flowing through microchannel.

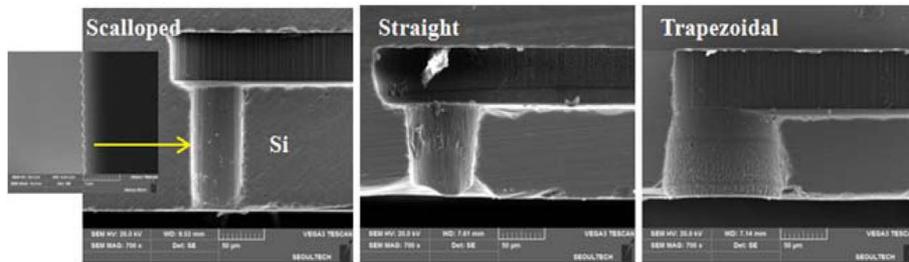


Fig. 6. Cross sectional view of different TSVs (SEM image).

phase cooling 현상이 나타났음을 보여주고 있다. 가열 온도 100°C의 경우는 single-phase cooling 현상으로 나타났으며, 가열 온도 300°C의 경우는 많은 양의 액체가 microchannel 앞부분에서 빠르게 증발되면서 microchannel 뒷부분에서는 액체의 흐름이 제한되어 있음이 관찰되었다. 액체 냉각의 효율을 높이기 위해서는 냉매의 선택이 매우 중요하며 소자의 최고 온도를 기준으로 two-phase cooling 현상이 일어나는 냉매를 선택하는 것이 바람직하다.

3가지 다른 형태의 TSV(scalloped TSV, straight TSV, trapezoidal TSV)를 건식 식각을 이용하여 제작하였고, 각 TSV 형태의 단면은 Fig. 6에서 보여주고 있다. Scalloped TSV는 bosch 공정으로, straight TSV는 non-bosch 공정으로 제작되었다. Trapezoidal TSV는 two-step(straight and then taper etching) bosch 공정을 이용하였다. TSV 형태에 따른 냉각 효과는 Fig. 7에 나타내었다. TSV 형상 중

scalloped TSV와 straight TSV의 냉각 효율은 큰 차이 없는 것으로 나타났으며, trapezoidal TSV의 경우 scalloped TSV와 straight TSV 보다 냉각 효율이 큰 것으로 확인되었다. 이는 scalloped TSV와 straight TSV의 경우 TSV 지름이 100 μm, 깊이가 100 μm로 동일한 상태로서, TSV의 깊이가 매우 짧아 TSV의 sidewall 표면 형상이 냉각 효율에 영향을 미칠 정도로 크지 않기 때문으로 사료되며, trapezoidal TSV의 경우 TSV 입력 부분의 지름이 커 물 유속을 다소 증가시키는데 도움이 되어 냉각 효율을 높이는 것으로 보인다.

#### 4. 요약

본 연구에서는 Si 웨이퍼에 TSV와 microchannel을 이용한 칩 레벨 액체 냉각 시스템을 구성하고, TSV의 지름과 TSV 형태에 따른 냉각 효율을 비교하였다. 액체 유동

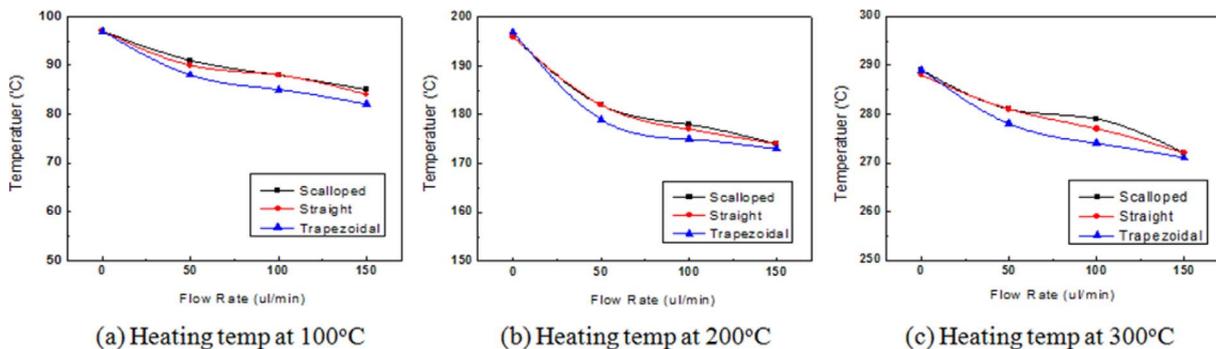


Fig. 7. Effect of TSV shapes on liquid cooling efficiency.

시 압력 강하는 input flow rate이 증가할수록 큰 압력 강하가 발생하였으며, flow rate이 빠를수록 그리고 TSV 지름이 클수록 냉각 효율이 좋은 것으로 확인되었다. 200°C 가열 시 microchannel 내에서 two-phase 현상에 의한 기화가 발생하여 열에너지가 흡수됨에 따라 냉각 효율이 뛰어난 것으로 확인되었다. 액체 냉각의 효율을 높이기 위해서는 냉매의 선택이 매우 중요하며 소자의 최고 온도를 기준으로 two-phase cooling 현상이 일어나는 냉매를 선택하는 것이 매우 중요하다 하겠다. TSV 형태의 경우 깊이가 짧아 sidewall에 의한 효과는 없었으나, 유속에 영향을 주는 입력 부분의 지름이 큰 trapezoidal TSV의 경우 냉각 효율을 높이는 것으로 나타났다.

### 감사의 글

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NSF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (No. 2014029237).

### References

1. V. Venkatadri, B. Sammakia, K. Srihari, and D. Santos, "A Review of Recent Advances in Thermal Management in Three Dimensional Chip Stacks in Electronic Systems", *Journal of Electronic Packaging*, 133(4), 041011 (2011).
2. G. Huan, M. Bakir, A. Naeemi, H. Chen, and J. D. Meindl, "Power delivery for 3D chip stacks: physical modeling and design implication", *Electrical Performance of Electronic Packaging (EPEPS)*, Atlanta, GA, 205, IEEE (2007).
3. A. J. McNamara, Y. Joshi, and Z. M. Zhang, "Characterization of nanostructured thermal interface materials: A review", *Int. J. Therm. Sci.*, 62, 2 (2012).
4. J. Xu and T. S. Fisher, "Enhancement of thermal interface materials with carbon nanotube arrays", *Int. J. Heat and Mass Trans.*, 49(9-10), 1658 (2006).
5. Sara N. Paisner, "Nanotechnology and mathematical methods for high-performance thermal interface material", *Global SMT & Package*, 36 (2008).
6. A. Hamdan, A. McLanahan, R. Richards, and C. Richards, "Characterization of a liquid-metal microdroplet thermal interface material", *Exp. Therm. and Fluid Sci.*, 35(7), 1250 (2011).
7. J. Darabi, K. Ekula, "Development of a chip-integrated micro cooling device", *Microelectron. J.*, 34(11), 1067 (2003).
8. Y. M. Hung and Q. Seng, "Effects of deometric design on thermal performance of star-groove micro-heat pipes", *Int. J. Heat and Mass Trans.*, 54(5-6), 1198 (2011).
9. M. Park, S. Kim, and S. E. Kim, "TSV Liquid Cooling System for 3D Integrated Circuits", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 20(3), 1 (2013).
10. J. Ayala, A. Sridhar, V. pangracious, D. Atienza, and Y. Leblebici, "Through silicon vias-based grid for thermal control in 3D chips", *Nano-net*, 90 (2009).
11. C. Abbei, Y. Feng, B. Goplen, H. Mogal, T. Zhang, K. Bazargan, and S. Sapatnekar, "Placement and Routing in 3D Integrated Circuits", *Design & Test of Computers*, 22(6), 520 (2005).
12. B. Goplen and S. Sapatnekar, "Thermal Via Placement in 3D ICs", *Proc. International symposium on Physical design (ISPD)*, New York, NY, 167 (2005).
13. H. Y. Zhang, D. Pinjila, T. N. Wong, and Y. K. Joshi, "Development of liquid cooling techniques for flip chip ball grid array packages with high flux heat dissipations", *IEEE Trans. Comp. Packag. Tech.*, 28(1), 127 (2005).
14. G. Upadhyya, M. Munch, P. Zhou, J. Hom, D. Werner, and M. McMaster, "Micro-scale liquid cooling system for high heat flux processor cooling applications", *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (STMMS)*, Dallas, TX, 116, IEEE (2006).
15. J. Li and G. P. Peterson, "Geometric optimization of a micro heat sink with liquid flow", *IEEE Trans. Comp. Packag. Tech.*, 29(1), 145 (2006).
16. X. Wei and Y. Joshi, "Stacked microchannel heat sinks for liquid cooling of microelectronic components", *J. Electron. Packag. Trans.*, 126(1), 60 (2004).
17. S. C. Mohapatra and D. Loikits, "Advances in liquid coolant technologies for electronics cooling", *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (STMMS)*, 354, IEEE (2005).
18. T. Chen and S. V. Garimella, "Flow boiling heat transfer to a dielectric coolant in a microchannel heat sink", *IEEE Trans. Comp. Packag. Tech.*, 30(1), 24 (2007).
19. N. Khan, L. H. Yu, T. S. Pin, S. W. Ho, V. Kripesh, D. Pinjala J. H. Lau, and T. K. Chuan, "3-D Packaging With Through-Silicon Via (TSV) for Electrical and Fluidic Interconnections", *IEEE Components, Packaging and Manufacturing Technology (CPMT)*, 3(2), 221 (2013).
20. B. Dang, M. S. Bakir, and J. D. Meindl, "Integrated thermal-fluidic I/O interconnects for an on-chip microchannel heat sink", *Electron Device Letters (EDL)*, 27(2), 117, IEEE, (2006).
21. M. Bakir, C. King, D. Sekar, H. Thacker, B. Dang, G. Huang, A. Naeemi, and J. D. Meindl, "3D Heterogeneous Integrated Systems: Liquid Cooling, Power Delivery, and Implementation", *Custom Integrated Circuits Conference (CICC)*, San Jose, CA, 663, IEEE (2008).
22. J. Ma, S. E. Kim, and S. Kim, "The effects of Cu TSV on the thermal conduction in 3D stacked IC", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 21(3), 63 (2014).