

Microscale thermofluidics in integrated water cooling of 3D electronic chips

Doctoral Thesis

Author(s):

Renfer, Adrian

Publication date:

2013

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-009900656>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Diss. ETH No. 21203

MICROSCALE THERMOFLUIDICS
IN INTEGRATED WATER COOLING OF
3D ELECTRONIC CHIPS

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by

Adrian Renfer

MSc in Nanosciences University Basel

born July 20, 1984
citizen of Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Dimos Poulikakos, examiner

Dr. Bruno Michel, co-examiner

Dr. Manish K. Tiwari, co-examiner

2013

Abstract

This dissertation investigates the heat transfer and fluid dynamics in microscale heat sinks for high-performance, integrated water cooling of electronic 3D chip stacks. The integrated cooling is envisaged to be done using microcavities etched into each layer of a chip stack. The aim is to provide a detailed experimental framework, which assesses the cooling performance of microfluidic cavities and provides a guideline for strong improvements through fundamental thermofluidic investigation. For this purpose, microcavity chips simulating a single layer out of a 3D chip were populated with micropin fins, which mimic electrical connections between the vertical chip layers. The micropin fins were confined in cavities with vertical dimensions as small as $100\ \mu\text{m}$ and up to 4420 pins in a cavity of $1\ \text{cm}^2$, arranged in different array configurations. It is proposed to operate such microfluidic heat sinks in a flow regime characterized by unsteady microvortex-induced flow fluctuations, which show remarkably superior thermal characteristics, for efficient cooling of high-density electronics. The following well planned investigations have helped us reach that proposition. First the hydrodynamic nature of microscale flows across arrays of micropin fins is elucidated to understand the thermodynamic observations and to exploit the hydrothermal properties for chip cooling. The microflows show an unsteady pattern characterized by vortex shedding from the row of pins. Quantitative flow data were obtained by the instantaneous fluid velocity pattern using microparticle image velocimetry. Following this, qualitative pathline flow visualization and frequency measurements are used to study the dynamics of microflows past micropin fin arrays. The amplitude of the flow fluctuations is observed to increase in the downstream direction. This amplification mechanism triggered vortex shedding at the outlet row of pins, with the location of shedding moving upstream for higher Reynolds numbers. In fact, geometry-specific critical Reynolds numbers are determined which mark the onset of enhanced fluid mixing and featuring transversal flow fluctuations. The resulting fluctuating flow impinges onto the pins and leads to an abrupt rise in the pressure drop across the chip cavity. This outcome clearly identifies the flow regime transition. Additionally, the timescale of

post-transition fluctuations is extracted from dynamic pressure measurements, reaching values as high as 13 kHz. The compact nature of the microcavities strongly confined the flow vertically between the cavity walls leading to higher fluctuation frequencies and delay of the shedding onset. Measurements on arrays with a smaller streamwise distance between the pins, i.e. higher longitudinal confinement, also showed a similar effect on the flow frequency. Finally, surface infrared thermometry for chip temperature and instantaneous fluid temperature measurements performed using micron-resolution laser induced fluorescence were applied to understand the thermal implications of the vortex-induced microscale flow fluctuations. Cooling high-density electronics with such unsteady, fluctuating flows reduced the chip temperature non-uniformity threefold while enhancing the heat transfer up to 230%. After accounting for the pumping power spent to sustain the fluctuations, an effective peak performance of 190% was achieved. The accomplishments markedly advance the state-of-the-art in thermal management using integrated water cooling which is a necessity towards the realization of next generation 3D electronic chips.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Doktorarbeit werden die Wärmeübertragung und die Strömungsmechanik in Mikroköhlern untersucht. Diese Köhler sind speziell zur Kühlung von vertikal gestapelten Computerprozessoren, sogenannten 3-dimensionalen (3D) Chips entwickelt worden. Das Köhlkonzept basiert auf einer integrierten Hochleistungs-Wasserköhlung, und besteht aus einem Netzwerk von mikroskopisch kleinen Hohlräumen, welche die entstehende Wärme zwischen den einzelnen Schichten eines 3D Chips abtransportieren. Der Mikroköhler repräsentiert dabei eine einzelne Schicht eines 3D Chips, um die physikalischen Prozesse im Detail analysieren zu können. Das Ziel dieser Arbeit ist die auftretenden thermohydrodynamischen Effekte in den Hohlräumen zu beobachten und Ihren Einfluss auf die Köhlleistung zu quantifizieren. Die Resultate der experimentellen Untersuchungen bilden die Grundlage um die Leistung und die Effizienz der integrierten Wasserköhlung zu verbessern. Die Hohlräume im Innern des Mikroköhlers sind mit bis zu 4420 mikroskopisch kleinen Stützen bestückt, verteilt auf einer Fläche von 1cm^2 . Diese Stützenverbunde imitieren die elektrischen Verbindungen zwischen den gestapelten Mikroprozessoren. Auf Grund der geringen Bauhöhe der Mikroköhler, fließt das Köhlwasser durch bis zu $100\ \mu\text{m}$ schmale Hohlräume. Im Folgenden wird eine Methode vorgeschlagen, die Mikroköhler in einem dynamischen Strömungsbereich zu betreiben. In diesem hydrodynamischen Bereich entstehen Wirbel auf mikroskopischer Ebene und bringen die Wasserströmung im Mikroköhler zum fluktuieren. Untersuchungen zeigen, dass die entstehenden Mikrowirbel und die assoziierten Strömungsschwankungen hervorragende thermische Eigenschaften aufweisen um extrem kompakte elektronische Komponenten effizienter zu köhlen. Um die thermodynamischen Beobachtungen zu verstehen, werden zuerst die hydrodynamischen Besonderheiten der Strömung entlang eines Verbundes von mikroskopischen Stützen erklärt. Die Dynamik des Strömungsfeldes wird mit Hilfe von qualitativen Visualisierungen der Strömungslinien und mit dynamischen Druckmessungen analysiert. Diese Messungen der Strömungsfrequenz zeigen, dass der Wasserfluss mit bis zu $13\ \text{kHz}$ fluktuiert. Um die Fliessgeschwindigkeit in den Hohlräumen

auch quantitativ zu bestimmen, werden die Bewegungen des Strömungsfeldes mit extrem kurzen Lichtpulsen quasi eingefroren. Die Resultate zeigen die Entstehung des instabilen Strömungsfeldes durch wiederholte Ablösung von Mikrowirbeln innerhalb des Stützenverbundes. Die Amplitude der Strömungsschwankungen nimmt bei konstanter Geschwindigkeit in Flussrichtung zu und die Verwirbelungen starten zuerst am Auslass des Stützenverbundes. Wird die Durchflussrate (bzw. Reynolds Zahl) erhöht, verschiebt sich die Front der Verwirbelungen stromaufwärts. Tatsächlich existiert, abhängig von der Anordnung der Stützen, eine kritische Reynolds Zahl, welche den Beginn der fluktuierenden Querströmungen markiert und zu einer verstärkten Vermischung des Wassers führt. Durch die Strömungsschwankungen wird der gemittelte Druck auf die Mikrostützen grösser, was zu einem abrupten Anstieg des totalen Druckabfalls gemessen über die Chip-Länge führt. Diese Druckerhöhung identifiziert eindeutig den Übergang zwischen statischem und zeitabhängigem Strömungsfeld. Durch die kompakte Bauweise der Hohlräume wird die Strömung zwischen den vertikalen Wänden stark eingeengt, welches einerseits die Frequenz der Fluktuationen erhöht und andererseits den Beginn der Verwirbelungen verzögert. Messungen an Mikroköhlern mit einem kleineren Abstand zwischen den Mikrostützen in Strömungsrichtung, d.h. mit höherer longitudinaler Beschränkung, zeigen eine vergleichbare Erhöhung der Strömungsfrequenz. Schliesslich geben Infrarotmessungen während eines Heizvorganges Aufschluss über die Verteilung der Oberflächentemperaturen auf dem Mikroköhler. Diese Ergebnisse liefern in Kombination mit instantanen Visualisierungen der Wassertemperatur im Innern des Mikroköhlers, ein umfassendes Bild der thermodynamischen Auswirkungen von wirbelinduzierten mikroskopischen Strömungsfluktuationen. Die Kühlung von extrem kompakten elektronischen Komponenten mittels fluktuierenden Strömungsfeldern verbessert die gleichmässige Temperaturverteilung um das 3-fache, bei gleichzeitiger Erhöhung der Wärmeübertragung von bis zu 230%. Nach Berücksichtigung der erhöhten Pumpleistung, welche benötigt wird um die Fluktuationen zu generieren, wird eine maximale Erhöhung der effektiven Kühlleistung von 190% erreicht. Die Ergebnisse dieser Arbeit ermöglichen neue Ansätze und helfen dabei die Entwicklung von modernsten Temperaturregelungsverfahren mit integrierter Wasserkühlung weiter voranzutreiben. Eine effiziente, integrierte und somit skalierbare Wasserkühlung ist ein Schlüsselement um die nächste Generation von Mikroprozessoren als 3D Chips zu realisieren.