



Doctoral Thesis

## Numerical modeling of 3D integrated water cooling of electronic chip stacks

**Author(s):**

Alfieri, Fabio

**Publication Date:**

2013

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-009910080> →

**Rights / License:**

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

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 21202

NUMERICAL MODELING OF  
3D INTEGRATED WATER COOLING OF  
ELECTRONIC CHIP STACKS

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH  
for the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES

presented by  
**FABIO ALFIERI**  
MSc ETH in Mechanical Engineering

born December 30, 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

The feasibility and potential of integrated water cooling of 3D stacks of chips is investigated in this dissertation through numerical modeling of the related thermofluidic phenomena. The chip stack is conceived to consist of many similar layers containing microcavities with several microchannels or micropin fin type cooling structures with the goal of enhancing the heat transfer performance. The present thesis was primarily dedicated to the detailed numerical investigation of this concept with experimental support (done by others) for validation.

A detailed numerical simulation of an entire chip stack is computationally prohibitive due to the multiscale complexity of the problem, which may require billions of computation nodes. For this reason the microcavities with various heat transfer enhancement microstructures are modeled as a porous medium under thermal non-equilibrium. Initially, fully developed values for permeability and heat transfer coefficient, defined as a function of Reynolds number and Prandtl number, are extracted from steady state simulations of a representative part of the microcavity; for the case of a cavity with micropin fins, the detailed geometry consists of a row of pins. The resulting permeability and heat transfer coefficients are inserted in the porous medium model to capture the thermal non-equilibrium between the solid and liquid parts of the medium. The approach enabled the simulation of the chip stack under several different hydrothermal conditions. Numerical results of the chip stack are validated against measurements from a three-dimensional chip stack simulator showing good agreement.

The detailed simulations of the flow through microchannels and rows of inline cylinders also highlight the importance of the entrance region. Both the hydrodynamic and thermal boundary layer developments are shown to have a strong effect on the results. Therefore, these entrance effects are subsequently included in the porous medium model, through local permeability and heat transfer coefficient, in order to improve the accuracy of the predicted velocity and temperature fields within the chip stack. With the improved model, the thermal performance of microchannel and micro pin-fin structures is compared and the latter performs better, with up to a 20% increase in the Nusselt number, at all operating conditions investigated.

Performance enhancement is also observed in hydrothermal measurements of flow across heated cylinder arrays, which showed an abrupt increase in heat transfer for high enough Reynolds numbers, at the expenses of higher pressure losses. Further detailed investigations revealed the reason to be the transition from a steady flow to unsteady vortex shedding regime. For the three-dimensional case, where the cylinders are highly confined, the vortex shedding mechanism and

the parameters determining the transition are not well understood. For three-dimensional chip stacks, this confinement and the related wall effects are expected to play a major role. Therefore, the hydrothermal characteristics of the two- and three-dimensional flow around a single cylinder as well as across multiple cylinders is investigated by focusing on the effect of lateral, longitudinal and vertical confinement. The results show that the vortex shedding regime could be used to improve chip cooling.

In the last part of the of investigation, several other strategies are unraveled to enhance the thermal performance of the integrated cooling approach. For example, varying the shape or the position of heat transfer enhancement structures is found to be very important in deciding the thermal performance. In real microprocessors, the heat dissipation is not uniformly distributed and the different positioning of the cores (hot-spots) leads to various cooling needs. Therefore, the effect of both inhomogeneous hot-spot distribution and cylinder size variation is also investigated. Results reveal that chips with the hot-spots placed closer to the inlet or split in multiple smaller cores operate with lower maximum temperature and also benefit from better temperature uniformity. Increase in the pin diameter is found to be additional strategy that could be employed to address the problem of heat transfer enhancement at the hot-spots.

In summary, the thesis pieces together a science base for the design of the hydrothermal optimization needed for chip cooling using integrated heat enhancement microstructures. In the process, it also furnishes several important aspects of the novel fundamental physics involved in flows across strongly confined arrays cylinders.

# Sommario

Nella presente tesi di dottorato, metodi numerici per la modellazione di fenomeni fisici, sia termici che fluidodinamici, vengono utilizzati per investigare le potenzialità del raffreddamento ad acqua di processori tridimensionali (chip stack). Il chip stack è costituito da molteplici piani al cui interno sono presenti micrometriche cavità o specifiche strutture ottimizzate per ottenere il maggior trasferimento di calore e di conseguenza garantire il miglior raffreddamento possibile del sistema. I risultati numerici ottenuti negli studi qui presentati sono supportati da evidenze sperimentali divulgate da diversi collaboratori.

La simulazione numerica del fenomeno di raffreddamento di un intero chip stack è notevolmente proibitiva a causa dell'elevato numero di nodi necessari per effettuare il calcolo. Per ovviare a questo problema, le microcavità sono modellizzate come mezzo poroso in non equilibrio termico. Inizialmente, i coefficienti di permeabilità e di scambio termico a regime sviluppato, entrambi funzione sia del numero di Reynold che di Prandtl, sono estratti da simulazioni in regime stazionario di una parte rappresentativa del dominio che nella sua totalità è costituito da una serie di cilindri allineati nel micro canale. I coefficienti così calcolati vengono successivamente utilizzati come parametri del mezzo poroso al fine di modellizzare il non equilibrio termico tra le parti solide e liquide del sistema. Questo approccio è caratterizzato da un'elevata versatilità e permette la modellizzazione numerica di svariate condizioni idrotermiche del chip stack. La convalida sperimentale mediante l'uso di strutture tridimensionali, conferma l'accuratezza del modello numerico presentato.

Le simulazioni dettagliate della fluidodinamica all'interno dei microcanali evidenziano l'importanza della parte iniziale del dominio dove il flusso è in regime di sviluppo. Lo sviluppo di entrambi gli strati limite, sia termico che idrodinamico, condiziona notevolmente il trasporto di calore e quindi il successivo raffreddamento del chip stack. Questi effetti in ingresso vengono quindi inclusi nel modello poroso mediante l'uso di coefficienti di permeabilità e scambio termico locali, al fine di migliorare l'accuratezza del modello computazionale. Per quest'ultimo modello, le prestazioni termiche relative allo scambio di calore, ben rappresentate dal numero di Nusselt, delle strutture cilindriche sono più alte del 20% rispetto a quelle dei microcanali, indipendentemente dalle condizioni operative.

L'implementazione nel modello di micro cilindri riscaldati permette un ulteriore miglioramento delle prestazioni termiche, soprattutto in condizioni caratterizzate da un elevato numero di Reynolds a discapito di maggiori perdite di pressione. Ulteriori dettagliati studi rivelano che la

causa di tale miglioramento è dovuto alla transizione del flusso da stazionario ad instabile con la conseguente formazione di vortici.

Negli studi effettuati modellizzando l'intero dominio tridimensionale, caratterizzato da un notevole restringimento delle strutture cilindriche presenti nel micro canale, i parametri che causano la sopracitata transizione del flusso non sono completamente compresi. In queste condizioni geometriche, l'effetto del confinamento delle strutture associato agli effetti alla parete solida, ricopre un ruolo importante nella stima numerica delle prestazioni termiche del sistema. Di conseguenza viene investigato l'effetto del confinamento laterale, longitudinale e verticale sul campo termo-fluidodinamico sia in prossimità di un singolo cilindro, sia nell'intero dominio costituito da una schiera di elementi cilindrici. I risultati ottenuti mostrano chiaramente che il regime instabile caratterizzato dalla presenza di vortici garantisce un miglior raffreddamento del chip stack.

Nella parte conclusiva della tesi, vengono presentate svariate strategie per migliorare ulteriormente la performance di raffreddamento. Tra queste troviamo la modifica della forma e del posizionamento delle micro strutture, strategia che si è dimostrata molto efficace per ottimizzare il processo di raffreddamento. Per simulare la realtà operativa dei microprocessori, viene investigato l'effetto di una disomogenea distribuzione delle fonti di calore (hot-spots). I risultati presentati evidenziano che è possibile ottenere una distribuzione omogenea della temperatura all'interno dei microprocessori non solo posizionando gli hot-spots nella parte iniziale del canale, ma anche scomponendo le fonti di calore in nuclei di dimensioni più ridotte. Un'ulteriore strategia presentata per modificare la performance di raffreddamento, in particolare nelle vicinanze di punti ad alta dissipazione di calore, consiste nel variare il diametro delle strutture intra canali. Concludendo, la tesi qui presentata, costituisce una base scientifica per lo sviluppo, progettazione e realizzazione di strutture di raffreddamento integrate nei microprocessori e chiarisce diversi aspetti della fisica fondamentale inerenti alla dinamica di un flusso trasversale ad una serie di cilindri altamente confinati.