

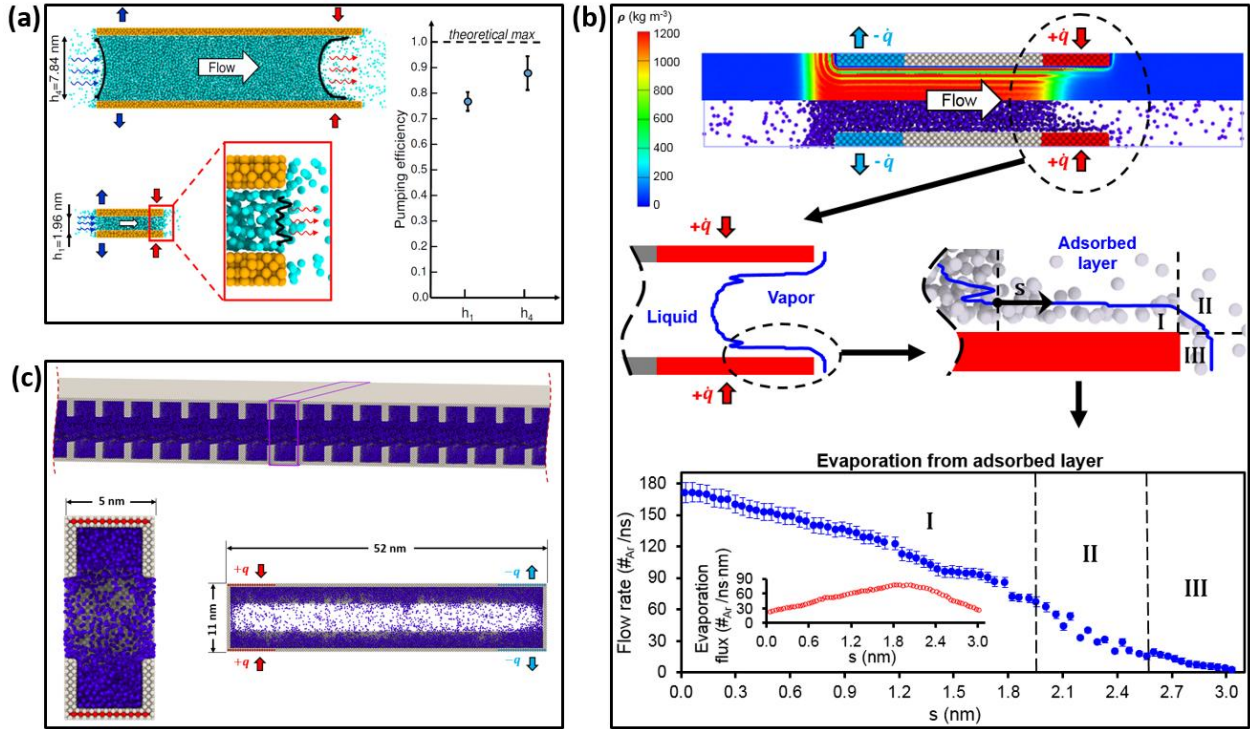
First Steps in Phase-change based Chip-level Cooling at Nanoscale (Faz Değişimi Temelli Nano-ölçekli Çip-seviyesi Soğutmada İlk Adımlar)

Abstract: Passive thermal spreaders such as heat pipes, vapor chambers and capillary pumping loops, are widely used in thermal management of high heat flux devices for many years due to their ability of removing high heat loads with small temperature differences. While the thermal conductivity of standard metal coolers is approximately 100-500 W/m·K, effective thermal conductivities of heat pipes, which utilize phase-change heat transfer, can reach up to 50,000 W/m·K. Micro-fabrication techniques enabled the fabrication of micro-scale grooves on semiconductors, which resulted in the integration of micro-scale heat spreaders to the electronic components. Recent advances in fabrication techniques, on the other hand, enabled the production of nano- and ångström-scale capillaries and cavities, which renders the manufacturing of nanoscale heat spreaders possible. However, with scale reduction, interfacial and surface forces dominate over body forces. Eventually, the fluid cannot be treated as a continuous media since its molecular nature and atomistic interactions become increasingly important in determining the transport phenomena. While the research on molecular/atomic scale modeling of phase-change has been usually focused on the evaporation from flat nano-thin-film structures, steady evaporation from a nanoscale meniscus confined in a capillary conduit has not been modeled yet due to the absence of a suitable configuration enabling the formation of a stationary evaporating meniscus. As the first step of my recent research, a phase-change driven continuous flow nanopump, which operates at nearly isothermal conditions, is constructed. The pump is regulated by simultaneous cooling and heating at the opposite ends of the channel. The unique configuration allowed precise detection of isothermal and phase changing liquid/vapor interfaces, which enabled the direct observation of meniscus structures formed between the walls of the capillary. Using this computational setup, we discovered that phase-change induced molecular scale mass diffusion mechanism replaces the capillary pumping in the absence of meniscus structures. In the second part of the research, the recent experiments reporting mysterious evaporation rates from nanoscale conduits, corresponding to evaporation fluxes that are one to two orders of magnitude larger than the kinetic theory limit, are investigated. Meticulous simulations revealed the existence of lateral momentum transport within and associated net evaporation from adsorbed liquid layers, which are long believed to be at the equilibrium established between equal rates of evaporation and condensation. Contribution of evaporation from the adsorbed layer increases the effective evaporation area, rendering the excessively estimated evaporation flux values below the kinetic theory limit. The last part of the research was the computational construction of a nanoscale passive heat spreader, which can possibly address the needs for the thermal management of NEMS devices, using molecular dynamics. The nanoscale heat spreader (heat pipe) was composed of nano-grooves and its performance was evaluated based on different operating parameters such as the filling ratio and heat load. Moreover, evaluation of size effect on the thermal performance was made by comparing proportionally scaled heat pipes. Simulation results revealed that efficient operation of nano-grooved heat pipes depends not only on the proper selections of filling ratio and heat load, but also on the geometrical parameters such as cross sectional dimensions and aspect ratio of the groove. The modeling strategy proposed opens an opportunity for computational experimentation of nanoscale heat pipes.

Özet: Isı boruları, buhar odaları, kapiler pompalama döngüleri vb. pasif ısı dağıtıcıları, yüksek ısı yüklerini küçük sıcaklık farklarıyla taşıyabilmeleri nedeniyle, yüksek ısı akısına sahip cihazların ısıl yönetiminde uzun yıllardır kullanılmaktadır. Standart metal soğutucuların ısıl iletkenliği yaklaşık olarak 100-500 W/m·K iken, faz değişim ısı transferini kullanan ısı borularının efektif ısı iletkenlikleri 50,000 W/m·K'e kadar ulaşabilir. Gelişen mikro-imalat teknikleri, yarı iletkenler üzerinde düzgün mikro oluklar açılmasını sağlayarak, mikro-ölçekteki ısı dağıtıcılarının elektronik bileşenlere doğrudan entegre edilebilmesini sağlamıştır. Diğer taraftan, imalat tekniklerindeki son gelişmeler, nano- ve ångström-ölçeklerde kılcal kanalların üretilmesini sağlamış ve bu durum nano-ölçekte ısı borularının üretilebilmesinin önünü açmıştır. Ancak, ölçeklerin giderek azalması, arayüzey ve yüzey kuvvetlerinin ataletsel kuvvetleri domine etmesine yol açmaktadır. Sonuç olarak, akışkan, sürekli-ortam yaklaşımını kullanarak modellenememeye başlandığı için, akışkanın moleküler yapısı ve akışkanın içindeki atomistik etkileşimler, kütle ve ısı taşınım fenomeninin belirlenmesinde giderek daha önemli hale gelmektedir. Faz değişiminin moleküler/atomik ölçekte modellenmesi üzerine yapılan araştırmalar genellikle düz nano-incelikte film yapılarından buharlaşmaya odaklanmışken, kılcal bir kanal içinde oluşmuş nano-ölçekte bir menisküsün sürekli buharlaşması, bunu sağlayacak uygun bir konfigürasyonun şu ana kadar bulunamamasından dolayı, henüz modellenebilmiş değildi. Araştırmanın ilk adımı olarak, yaklaşık olarak sabit sıcaklıkta çalışan, faz değişimi tarafından tahriklenen, sürekli akışa sahip bir nano-pompa tasarlanmıştır. Pompanın çalışması, kanalın karşı uçlarında eşzamanlı soğutma ve ısıtma ile düzenlenmiştir. Bu özel konfigürasyon, sabit sıcaklıkta faz değiştiren sıvı/buhar arayüzlerinin hassas bir şekilde tespit edilmesine izin vererek, kılcal kanalın duvarları arasında oluşan menisküs yapılarının doğrudan gözlemlenmesini sağlamıştır. Bu hesaplama düzeneği kullanılarak, faz değişiminin neden olduğu moleküler ölçekli

kütle difüzyon mekanizmasının, menisküs yapılarının yokluğunda, kılcal pompalamanın yerini aldığı keşfedilmiştir. Araştırmanın ikinci bölümünde, nano-ölçekli kanallarda, kinetik teori tarafından öngörülen maksimum buharlaşma sınırından çok daha yüksek buharlaşma oranlarını rapor eden şaşırtıcı güncel deneysel çalışmalar incelenmiştir. Yürütülen titiz simülasyonlar, uzun yıllardır buharlaşma ve yoğuşma arasında kurulan denge ile adsorbe olduğuna inanılan adsorbe-sıvı-tabakasının, bilinenin aksine net bir buharlaşma oranına sahip olduğunu ortaya koymuştur. Adsorbe-sıvı-tabakasının buharlaşmaya olan bu katkısı ise, etkin buharlaşma alanını arttırdığı için, kinetik teori sınırının üstünde tahmin edilen ısı akısı değerlerini normal sınırlara çekmektedir. Araştırmanın son kısmı, NEMS (nano-elektro-mekanik-sistem) cihazlarının termal yönetimine yönelik ihtiyaçları karşılayabilecek, nano-ölçekli bir pasif ısı dağıtıcısının simülasyon ortamında oluşturulması idi. Nano-ölçekli ısı dağıtıcısı (ısı borusu) nano-oluklardan oluşturulmuş ve performansı, doldurma oranı ve ısı yükü gibi farklı çalışma parametrelerine göre değerlendirilmiştir. Ayrıca, ısı performans üzerindeki *boyut-etkisinin* değerlendirilmesi, orantılı olarak ölçeklendirilmiş ısı boruları karşılaştırılarak yapılmıştır. Simülasyon sonuçları, nano-oluklu ısı borularının verimli çalışmasının sadece doldurma oranı ve ısı yükünün uygun seçimlerine değil, aynı zamanda oluğun kesit boyutları ve en-boy oranı gibi geometrik parametrelere de bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Önerilen modelleme stratejisi, nano-ölçekli ısı borularının sayısal olarak deneylerinin yapılabilmesinin kapısını açmıştır.

GraphicalAbstract / Grafiksel Özet



(a) Kapiler bir yapının duvarları arasında oluşmuş buharlaşma ve yoğuşma menisküs arayüzlerinin incelenmesi için faz değişimi ile tahriklenen bir nano-pompa tasarlanmıştır. Boyutun küçülmesiyle, kapiler pompalamanın yerini moleküler difüzyon mekanizmasının aldığı keşfedilmiştir. (b) Uzun yıllardır buharlaşma ve yoğuşma arasında kurulan denge ile adsorbe olduğuna inanılan adsorbe-sıvı-tabakasının içinde, bilinenin aksine momentum iletimi olduğu ve bu tabakadan net bir buharlaşma meydana geldiği keşfedilmiştir. (c) Nano-oluklardan oluşan bir pasif ısı dağıtıcısının (ısı borusunun) teorik modellemesi yapılmış ve çalışma koşullarına bağlı (doldurma oranı ve ısı yükü vb.) performans analizleri icra edilmiştir.