

平成 26 年 4 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656129

研究課題名(和文) ナノ構造体による毛管凝縮現象の解明

研究課題名(英文) Investigation of dynamics of capillary condensation caused by nano structure

研究代表者

杉井 康彦 (Sugii, Yasuhiko)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90345108

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：小型でかつ高性能なマイクロヒートパイプや潜熱回収型熱交換器の開発のため、マイクロ管路内のナノ構造体による毛管凝縮の熱流動現象の評価法を検討した。

電子線描画装置、ドライエッチング装置および集束イオンビーム加工観察装置を用いて、ガラス基板とシリコン基板の加工法を検討し、基板上に直径500nm程度の円錐形の細孔の形成に成功した。環境制御型SEMを用いて、作成したナノ構造体の間に凝縮する水の可視化計測法を開発した。低真空・水蒸気雰囲気下で観察ステージを冷却することにより、凝縮した水を観察することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：In order to develop a high efficiency micro heat pipe, a novel visualization technique for capillary condensation caused by nano structure was developed. Nano structure was fabricated on glass and silicon substrate by utilizing nano fabrication technique. Condensed water in nano structure was visualized by the use of environmental scanning electron microscope.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：毛管凝縮 ナノ構造体 凝縮速度 熱工学 可視化

1. 研究開始当初の背景

従来、沸騰による熱の吸収と凝縮による熱の放出を利用した交換器が研究開発され、実用化している。マイクロ化によるスケール効果による熱交換器の小型化、高性能化や、水蒸気の潜熱を高効率で回収する潜熱回収型熱交換器が研究開発されており、さらなる高効率化、装置の小型化が求められている。

これまでに、気体が臨界点以下で毛管と接したとき液体となって凝縮する毛管凝縮を利用した熱交換器が研究されているが、それらの流路やフィンのサイズは、数 mm~数百 μm である。小型化・高効率化のためには、nm のスケールのナノ構造体による毛管凝縮現象を理解し、積極的に活用することが求められている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、小型でかつ高性能なマイクロヒートパイプや潜熱回収型熱交換器の開発のため、マイクロ流路内のナノ構造体による毛管凝縮の熱流動現象を明らかにすることである。ナノサイズの構造体により、蒸気の液体への凝縮の促進が起こり、凝縮による熱の放出が可能である。一方、高い濡れ性により、毛管現象によって外部駆動無しに液体の輸送が可能となる。そのためには、凝縮量とナノ構造体による圧力損失の増大との釣合いが重要である。そこで、ナノ加工装置を用いて複数の大きさのナノ構造体をマイクロ流路内に作成し、そのサイズと毛管凝縮量の関係や毛管現象により生じる水の挙動を計測し、そのメカニズムを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) ナノ構造体の作成法の検討

4 大学ナノ・マイクロファブ리케이션コンソーシアムにて所有しているクリーンルーム、スパッタリング装置、電子線描画装置、集束イオンビーム加工観察装置およびドライエッチング装置などを用いて、ガラス基板・シリコン基板にナノピラーおよびナノ細孔などのナノ構造体の作成方法を検討する。

(2) 凝縮水の可視化計測法の開発

ミラウ型光干渉法や環境制御型走査型電子顕微鏡などを用いたナノ構造体により凝縮した水の可視化計測法を開発する。ナノ構造体に湿度を制御した水蒸気を導入し、ペルチェ素子により観察ステージの温度の制御を行う。特に、湿度、蒸気圧と温度を制御して、空間分解能の最適化をはかり、計測精度の向上を目指す。

(3) 毛管凝縮のダイナミクスの可視化計測

開発した凝縮水の計測法を用いて、ナノ構造体のサイズ、飽和蒸気圧などによる毛管凝縮のダイナミクスを詳細に調べる。調べた結果を、従来の理論であるケルビンの式との比較を行う。また、凝縮水の量およびマイクロ

熱伝対により計測したガラス表面温度から、凝縮により放出される熱量を求め、ナノ構造体による毛管凝縮熱伝達を明らかにする。

(4) まとめと評価

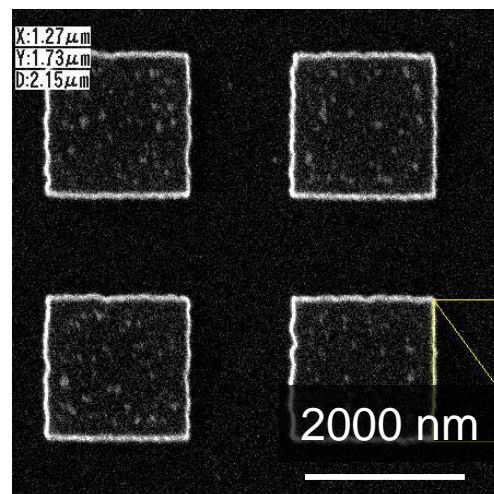
本研究で得られた実験結果のデータベース化を行いナノ空間における熱流動の特性をまとめて公開を行っていく。本研究で開発した計測法やソフトウェアを公開する。

4. 研究成果

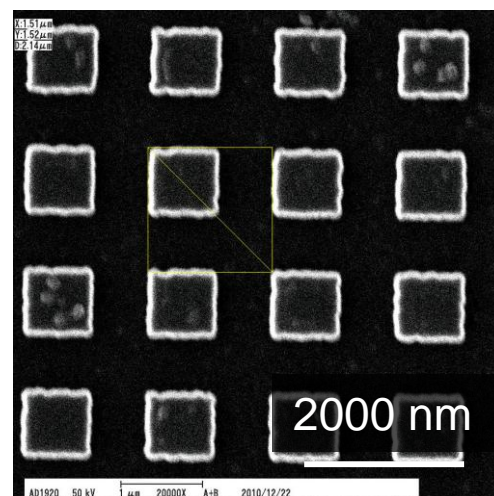
(1) ナノ構造体の作成法の検討

4 大学ナノ・マイクロファブ리케이션コンソーシアムにて所有しているクリーンルーム、スパッタリング装置、電子線描画装置、マスクアライナー、集束イオンビーム加工観察装置およびドライエッチング装置などを用いたガラス基板およびシリコン基板上へのナノ構造体の作成方法を検討した。

ガラス基板上に、サイズ、間隔を 10~2000nm と変化させた 4 種類のナノピラーを作成することができた。



(a) 2000nm



(b) 500nm

図 1 ナノピラー

集束イオンビーム加工観察装置の加工条件の検討を行い、ガラス基板およびシリコン基板に直径 500nm 程度の円錐形の細孔を作成することができた。図 2 に作成したナノ細孔の電子顕微鏡画像を示す。円錐の深さを 200~1000nm 程度と変化させること、つまり円錐の角度を変化させることができた。原子間力顕微鏡、電子顕微鏡および光干渉型表面形状測定装置を用いて、作成したナノ構造体の形状を計測し、加工精度の検証を行い、十分な精度であることが確認できた。

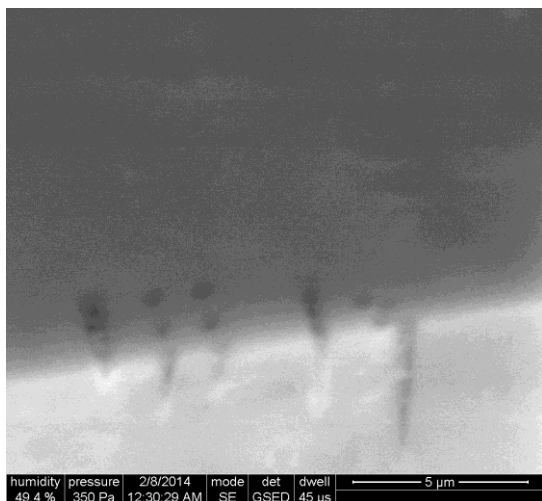


図 2 ナノ細孔

(2) 凝縮水の可視化計測法の開発

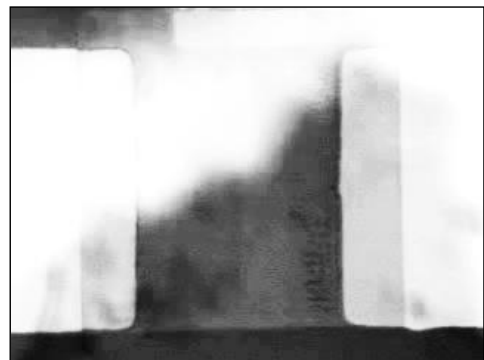
ナノ構造体の間に凝縮する水のダイナミクスを調べるため、ミラウ型光干渉法および環境制御型環境制御型走査型電子顕微鏡を用いた可視化計測法を検討した。

光学顕微鏡と高感度カメラを用いた可視化計測法では、ナノピラー間に凝縮した水の観察が可能であったが、空間解像度が不十分なため、十分な精度が得られなかった。図 3 に得られた凝縮水の可視化画像を示す。

ミラウ型光干渉法では、上下のガラス基板による屈折およびピラーによる散乱光の影響が大きく、十分な計測精度が得られなかった。

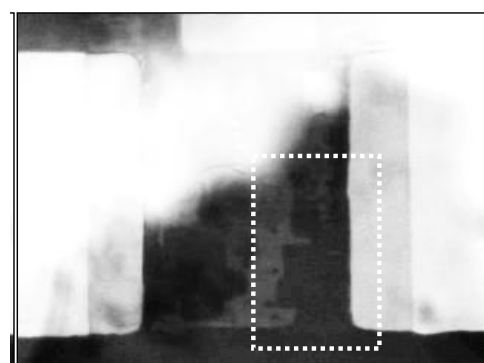
環境制御型走査型電子顕微鏡を用いた可視化計測法では、観察条件の最適化を行うことにより、低真空状態において、湿度を制御した水蒸気をチャンバーに導入し、ペルチェ素子により観察ステージの温度の制御することによって生じる凝縮水を観察することが可能となった。

Before introduction of saturated vapor



(a)水蒸気の導入前

4 hours after introduction



Condensed water

(b)水蒸気の導入後

図 3 凝縮した水の可視化

(3) 毛管凝縮のダイナミクスの可視化計測

作成したナノピラーを有するマイクロ流路に純水を導入し、ヒータにより加熱して蒸気を発生させ、蒸気が上面の 4 種類のナノ構造体で凝縮する様子を光学顕微鏡と高感度カメラを用いて可視化し、凝縮速度を計測した。なお、ピラーの間で凝縮した水による屈折率が変化することから、凝縮水の量を推定した。得られた計測結果から、マイクロスケール構造体での凝縮速度に比較して、ピラー間隔が 500nm 程度から凝縮速度が上昇をはじめ、250nm の間隔では約 2 倍程度になることが確認できた。このことから、ナノ構造体によって凝縮が促進されることが明らかになった。

環境制御型走査型電子顕微鏡を用いた可視化計測法では、シリコン基板上では凝縮が生じず、ガラス基板上で凝縮が生じ、液滴が成長する様子が可視化できたが、凝縮速度の定量化には至っていない。

(4) まとめと評価

本研究で得られた実験結果をまとめ、今後、学会などで発表していく予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

- ①K. Jang, K. Iseki, A. Kogo, Y. Xu, K. Mawatari, Y. Sugii, T. Kitamor, A Flat Heat Pipe System Contained Capillary Condensation and Vapor-Liquid Coexisting Process Based on Extended Nanopillar, IUPAC International Congress on Analytical Sciences 2011 (ICAS 2011), Kyoto, Japan, 2011/5/22-26
- ②井関 恵三, 杉井 康彦, 北森 武彦, 拡張ナノ空間における蒸気圧と温度を制御した毛管凝縮速度の測定, 第 23 回化学とマイクロ・ナノシステム研究会, 2011/6/10-11、千葉大学西千葉キャンパス

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

取得年月日 :

国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉井 康彦 (SUGII, Yasuhiko)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号 : 90345108

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :