

Apresentação do Artigo:

International Journal of Heat and Mass Transfer
68 (2014) 703-715

Flow boiling phenomena in a single annular flow regime in microchannels (I): Characterization of flow boiling heat transfer

Fanghao Yang, Xianming Dai, Yoav Peles, Ping Cheng, Jamil Khan, Chen Li

disponível online 17 outubro 2013

Ebulição convectiva em microcanais:

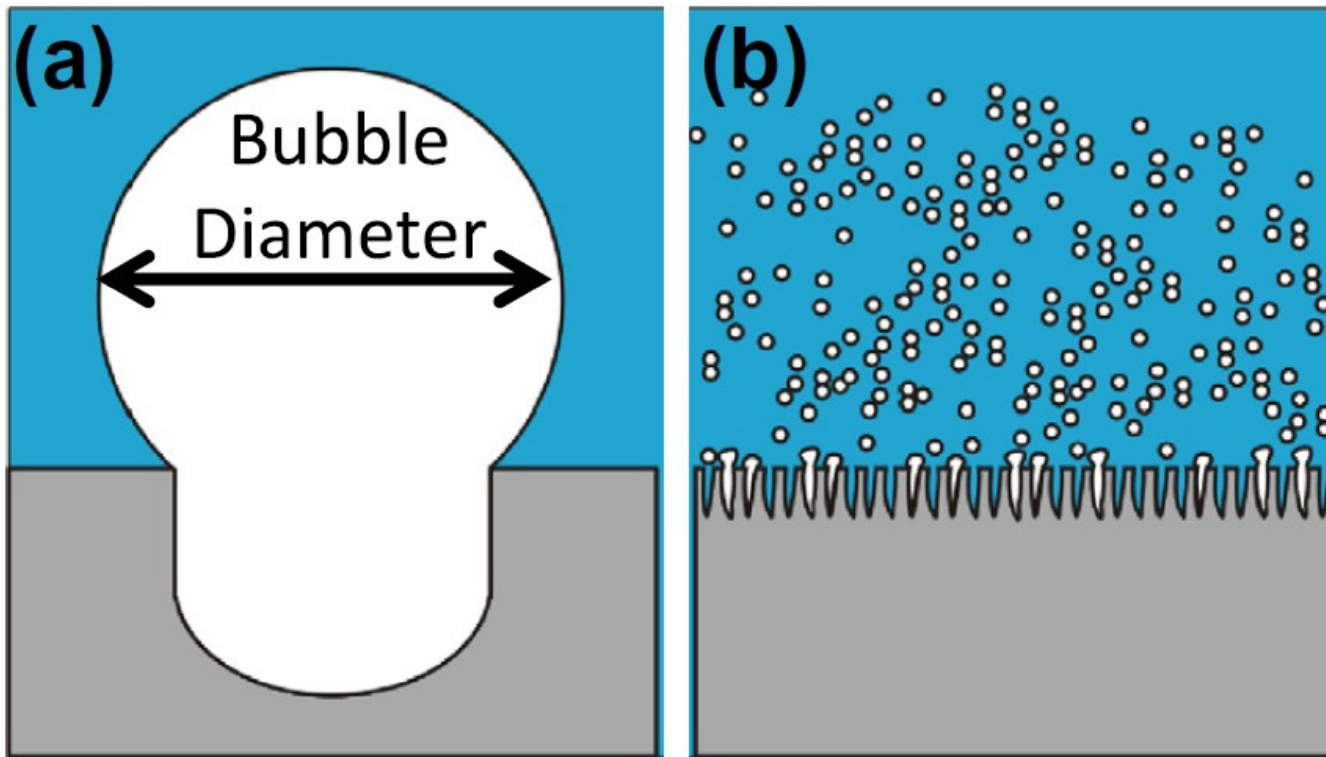
- Vantagens para uma série de aplicações, entre elas:
 - refrigeração microeletrônica de alta potência
 - trocadores de calor compactos
 - reatores químicos

- Compreensão dos mecanismos de transferência de calor bifásicos, das instabilidades do escoamento bifásico, e dos mecanismos de CHF

- Várias técnicas:
 - micro cavidades reentrantes
 - estruturas microporosas
 - nanoestruturas
 - restritores de entrada (IRs)
 - micro jatos, etc.

- Nenhuma técnica por manipulação ou controle do regime de escoamento bifásico

- **Microcanais:** microfabricados em substratos de silício por corrosão úmida ou corrosão iônica reativa profunda (DRIE)
- Várias cavidades artificiais de nucleação
 - Nano estruturas (1D): nano fios (NWs) e nano tubos de carbono (CNTs)
 - Aumento do HTC e CHF: densidade de sítios de nucleação e molhabilidade
- **Nova superfície de ebulição:** engenhada com poros submicrométricos cercados por poros em nano escala
- Microcanais com essas superfícies nas paredes internas
 - escoamento anular único desde as condições de ONB até CHF
- **Estudo experimental:** transferência de calor em ebulição convectiva de água deionizada (DI) no regime de escoamento anular único



(a) Desenho esquemático do tamanho da bolha em **microcanais de parede “lisa”**

(b) Desenho esquemático do tamanho da bolha em **microcanais SiNW**

- A densidade de sítios de nucleação pode ser drasticamente aumentada em cavidades **bi-porosas** formadas em superfícies de ebulição nano-estruturadas
- As cavidades em **microescala** podem ser ativadas por moléculas de vapor geradas em cavidades em **nanoescala**, durante todo o processo de ebulição

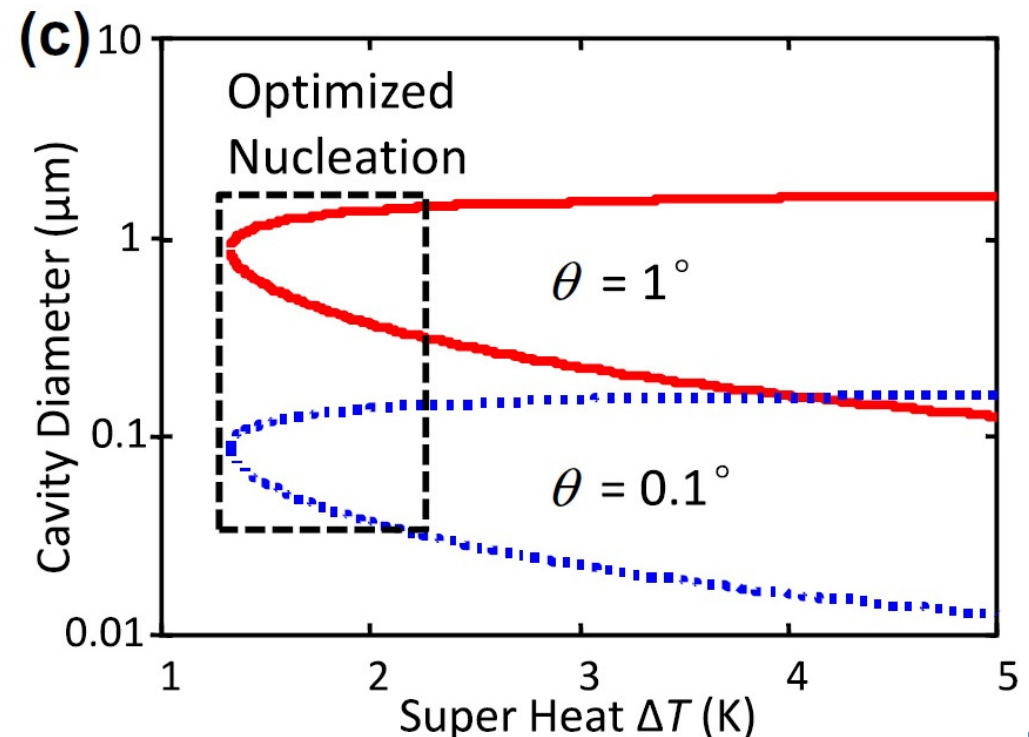
➤ O tamanho da cavidade de nucleação foi otimizado para melhorar o HTC, reduzindo o grau de superaquecimento

❖ A faixa de diâmetro de abertura da cavidade ativa estimada pela equação:

$$D_{c \max, \min} = \frac{\delta_t \sin \theta}{2(1 + \cos \theta)} \cdot \left(\frac{\Delta T}{\Delta T + \Delta T_{sub}} \right) \cdot \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{8\sigma_f(\Delta T + \Delta T_{sub})T_{sat}(1 + \cos \theta)}{\rho_v h_{fg} \delta_t \Delta T^2}} \right]$$

❑ Assumindo ângulos de contato aparentes entre $0,1^\circ$ e 1° para água em superfícies super hidrofílicas

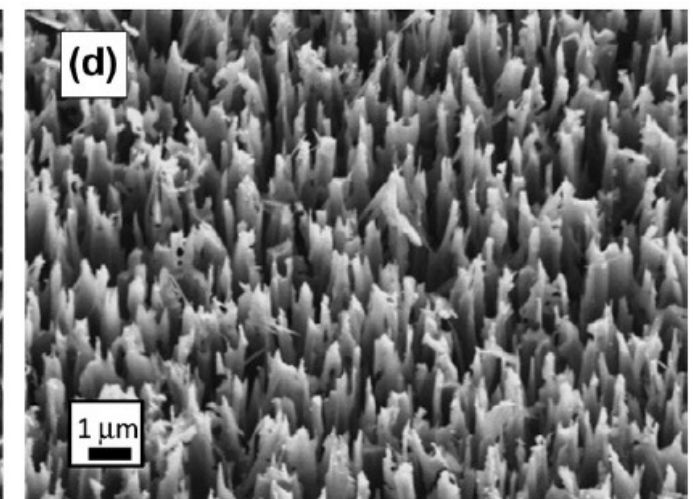
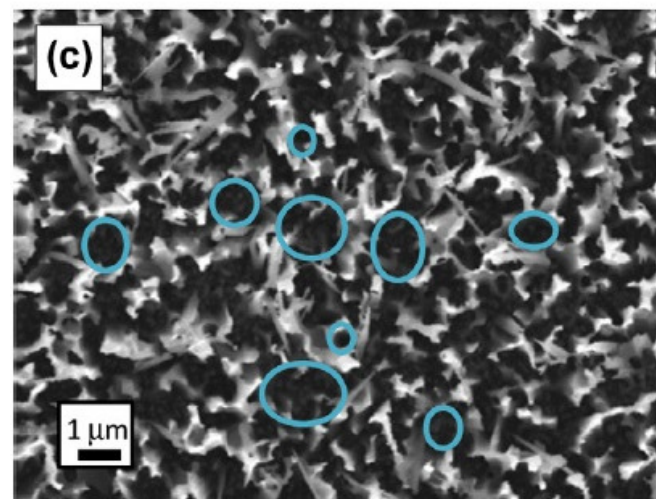
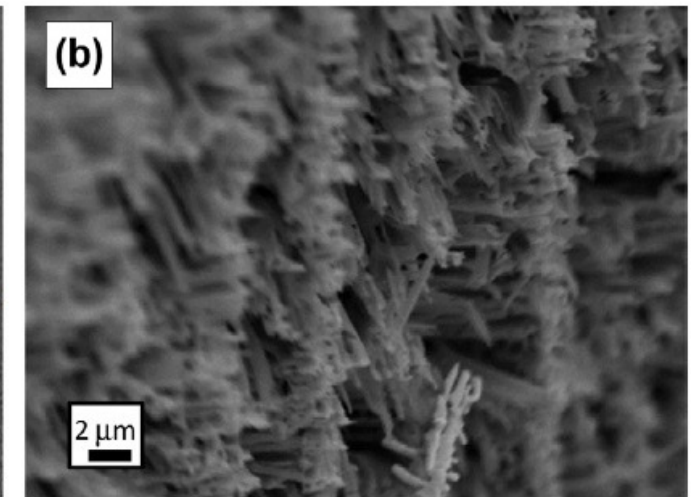
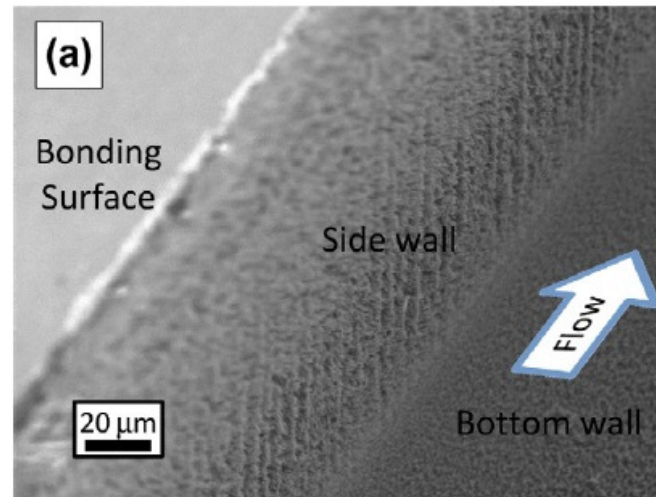
❑ Estimado a faixa ideal de tamanho da cavidade de nucleação entre 100 e 2000 nm



- Paredes internas dos microcanais quase uniformemente cobertas por SiNWs
- SiNWs: diâmetro 20 nm e comprimento 5 μm

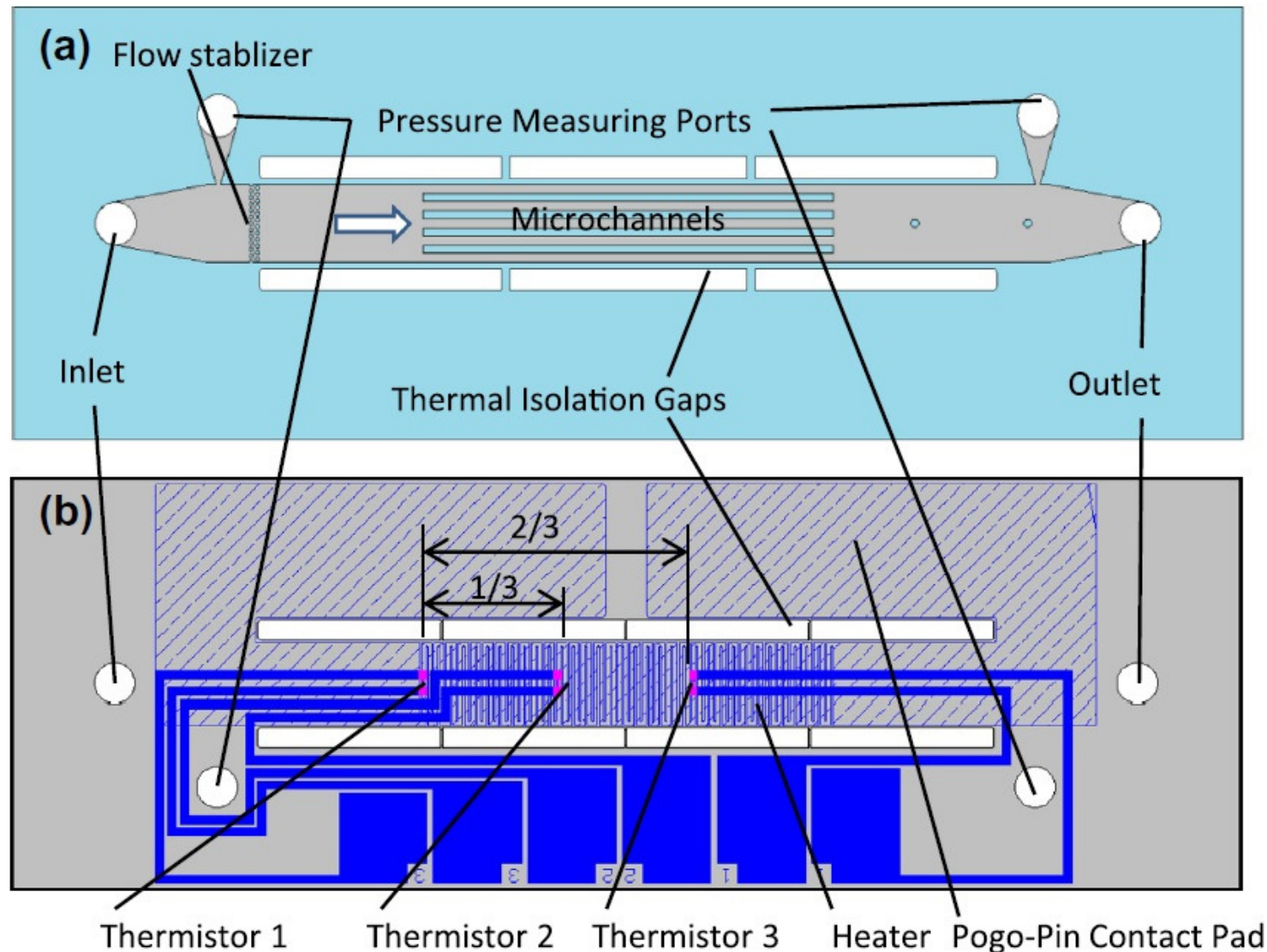
Objetivo:

- Melhorar a ebulição nucleada
- Induzir o fluxo capilar
- Induzir a evaporação em filme fino

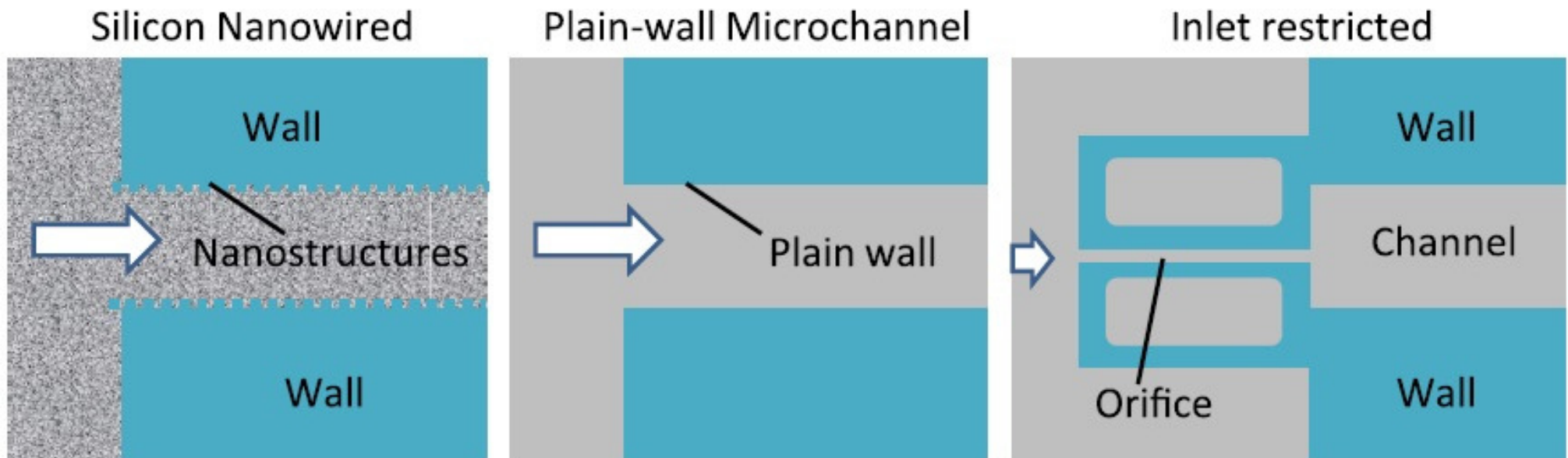


Projeto de microdispositivos:

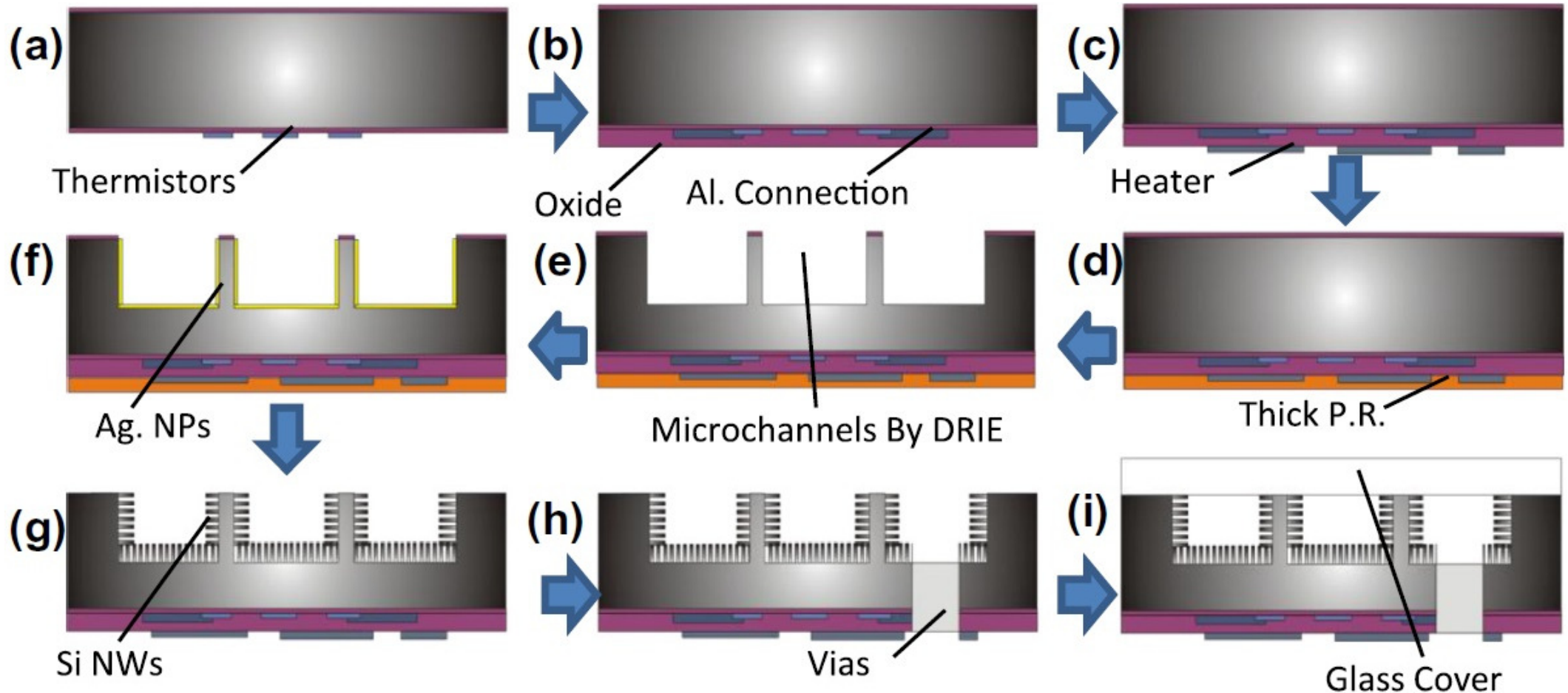
- Composto por 5 microcanais paralelos retos ($W 200\mu\text{m} \times H 250\mu\text{m} \times L 10\text{mm}$)



- ❖ Três tipos de configurações de microcanais com dimensões quase idênticas
- ❖ Comparação com microcanais de parede simples com e sem IRs (W 20 μ m x H 250 μ m x L 400 μ m)



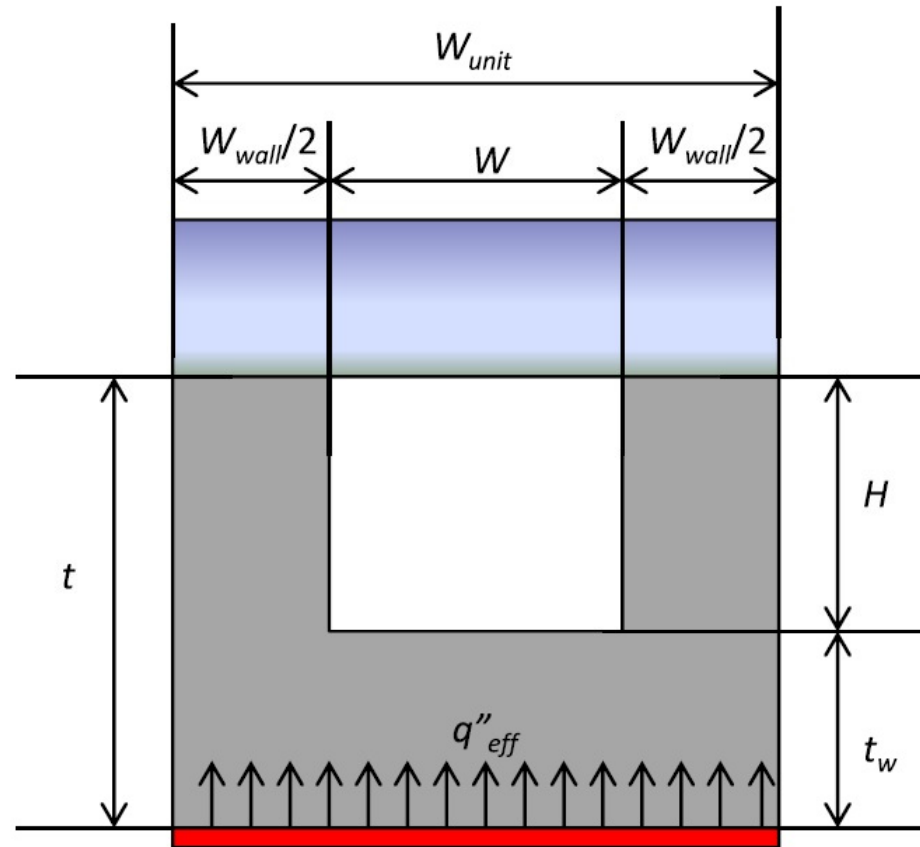
Processo de fabricação do microdispositivo a partir de uma bolacha de silício



Cinza: silício; Azul: metal; Roxo: óxido de silício; Laranja: photoresist; Branco: vidro

Medições de dados e redução

- Fluido de trabalho: água deionizada sub-resfriada ($\sim 40^\circ\text{C}$)
- Sistema de teste construído e calibrado em trabalhos anteriores



W_{unit} (μm)	W_w (μm)	W (μm)	H (μm)	t_w (μm)	t (μm)
400	180	220	250	250	500

- Temperatura do aquecedor, calculado como função linear da resistência (coeficiente pré-calibrado)

$$T = K(R - R_{ambient}) + T_{ambient}$$

- Calor efetivo de mudança de fase:

$$P_{eff} = P - \dot{Q}_{loss} - \dot{Q}_{subcooled} \quad \text{onde,} \quad P = V \times I. \quad \text{e} \quad \dot{Q}_{subcooled} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T_{sub},$$

- Qualidade do vapor de saída do escoamento bifásico:

$$\chi_e = P_{eff} / (h_{fg} \cdot \dot{m} \cdot A_c)$$

- Temperatura da parede:

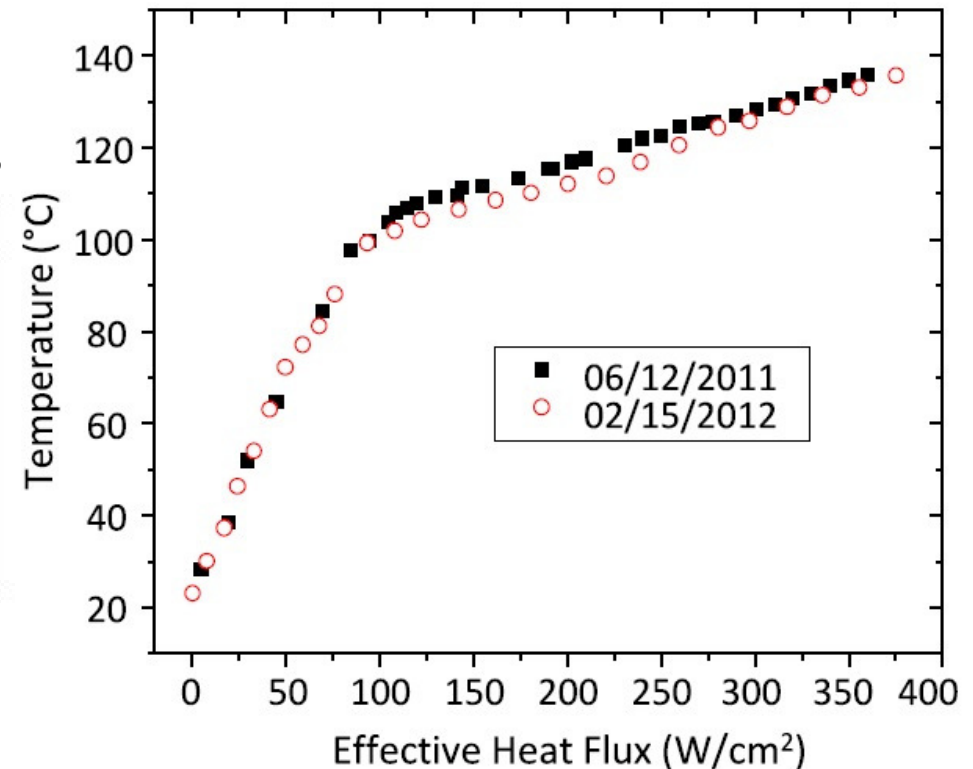
$$T_{wall} = T - q''_{eff} \cdot t_w / (k_s \cdot A_{eff}) \quad \text{onde,} \quad q''_{eff} = P_{eff} / A_{eff}, \quad \text{e} \quad A_{eff} = 5 \cdot W_{unit} \cdot L,$$

- Coeficiente de transferência de calor:

$$h_{2\phi} = \frac{q''_{eff} \cdot W_{unit}}{(T_{wall} - T_{sat})(W + 2 \cdot \eta \cdot H)} \quad \text{onde,} \quad \eta = \frac{\tanh(m \cdot H)}{m \cdot H} \quad \text{e} \quad m = \sqrt{\frac{2h_{2\phi}}{k_s \cdot W_w}}$$

Incertezas das variáveis e parâmetros medidos

Name of variables	Errors
Mass flux, G	0.05%
Voltage on the heater, V	0.10%
Current on the heater, I	0.10%
Ambient temperature, T_{ambient}	0.5 °C
Electrical power on the heater, P	0.20%
Electrical resistance, R	0.20%
Average temperature, \bar{T}	0.8 °C
Heat transfer coefficient, h_{fp}	2.20%



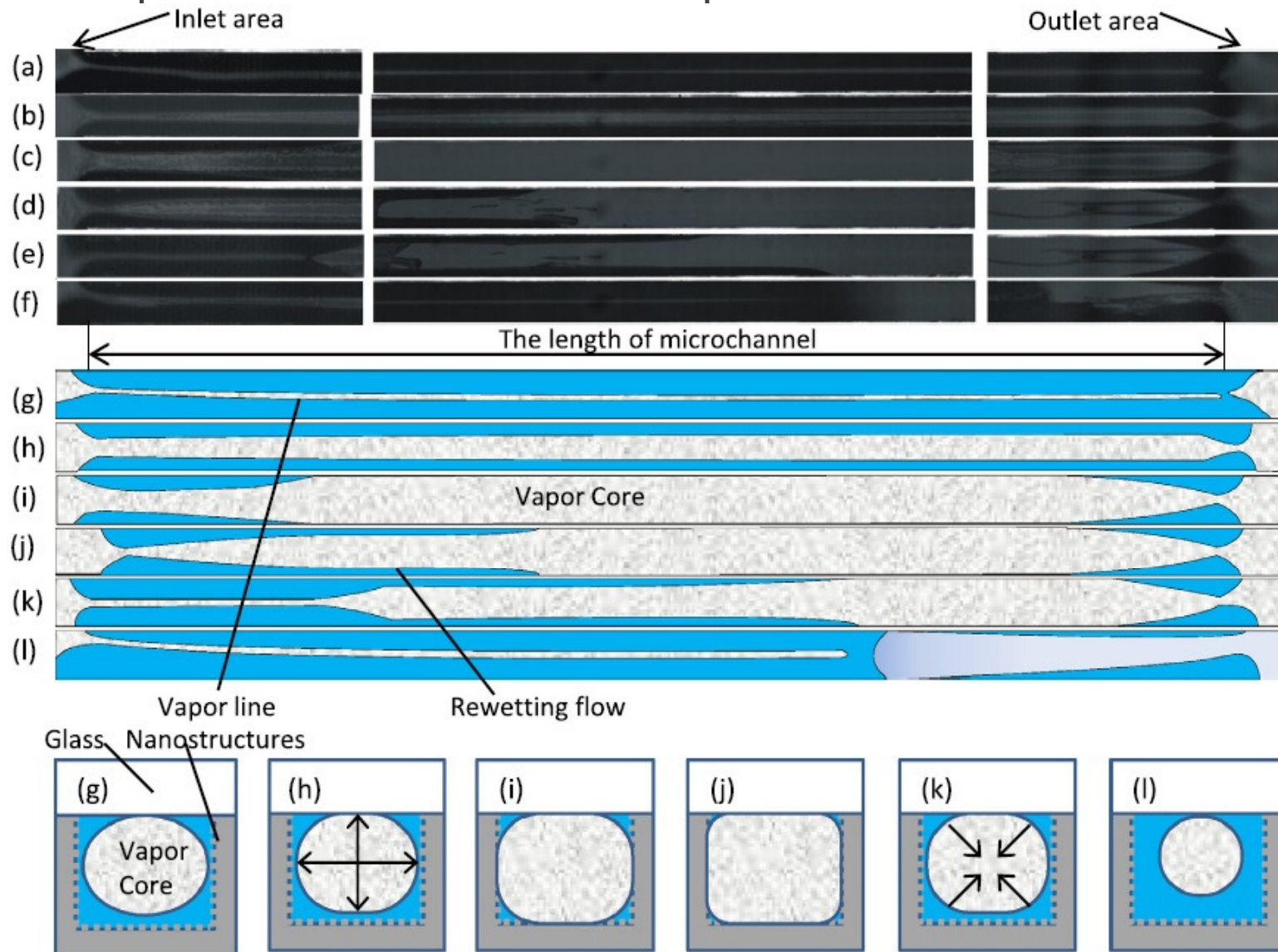
- ❖ As curvas de ebulição foram repetidas dentro de 8 meses para um fluxo mássico de $303 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e quase se sobrepuseram (conforme figura)
- ❖ Pode-se notar uma ligeira redução das temperaturas da parede após 8 meses. O maior tempo de oxidação pode ter resultado em SiNWs mais hidrofílicos.

Regime de ebulição convectiva anular único:

- Comportamento alterado pela redução do tamanho de bolha para nano ou submicrométrico
- escoamento anular único é induzido pelos SiNWs super hidrofílicos nas paredes internas dos microcanais
- Neste novo regime, um núcleo de vapor no centro dos canais aumenta e encolhe periodicamente, devido aos fluxos de re-umedecimento com frequência maior que 24 Hz
- As características do novo regime são favoráveis para a transferência de calor e massa
- O re-umedecimento rápido, devido ao fluxo capilar nas interfaces bi-porosas super hidrofílicas, pode aumentar significativamente as condições de CHF
- Aumento ainda maior do HTC por introduzir a evaporação em filme fino e a renovação do filme líquido

Resultados e discussões

- Caracterização do fluxo anular único em microcanais ativado por SiNWs
- Ilustração esquemática do núcleo de vapor visto em corte transversal



Resultados e discussões

Curvas de ebulição para vários fluxos mássicos:

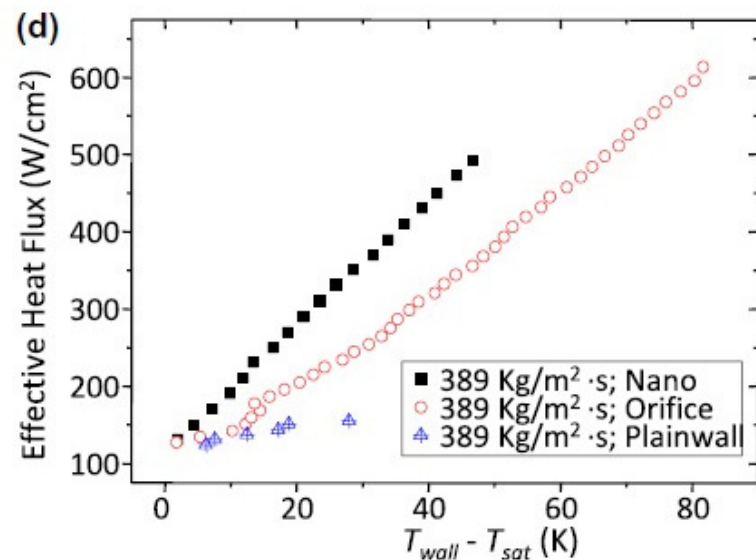
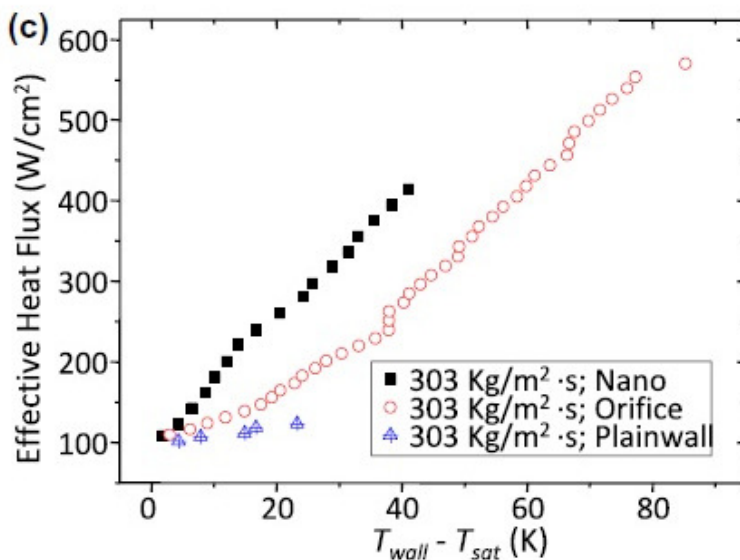
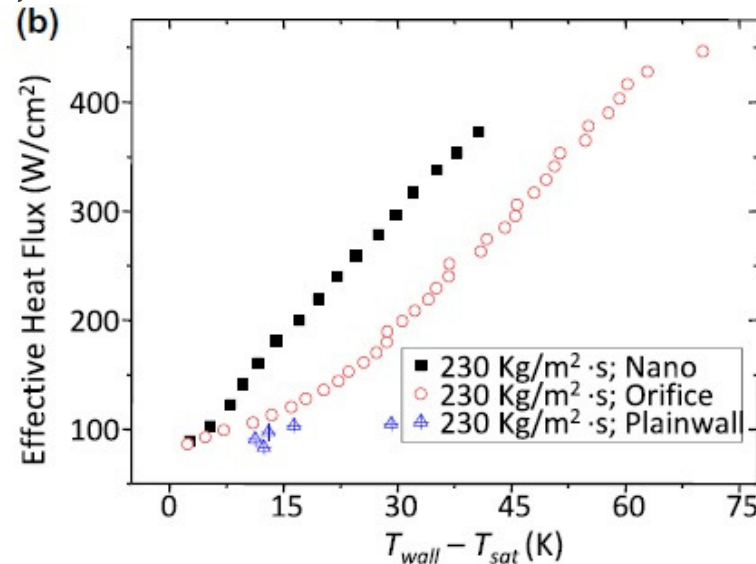
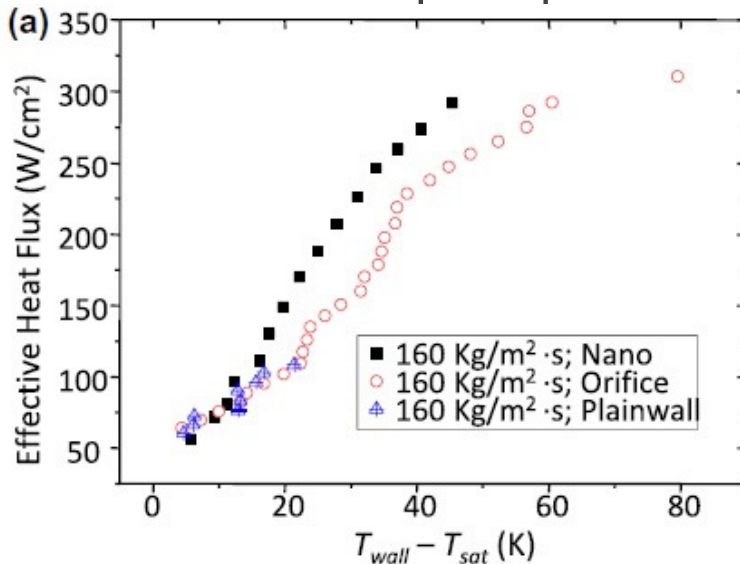
Para um dado superaquecimento, o fluxo de calor em microcanais SiNW foi o maior

dentre os três.

Por exemplo:

para $\Delta T = 28\text{K}$ e

$G = 389\text{ kg/m}^2\text{s}$



Plain-wall: 155 W/cm^2

IRs: 240 W/cm^2

SiNW: 350 W/cm^2

Resultados e discussões

HTC médio versus Superaquecimento para vários fluxos mássicos:

O HTC foi drasticamente aumentado em até 326% em comparação com microcanais

de paredes lisas.

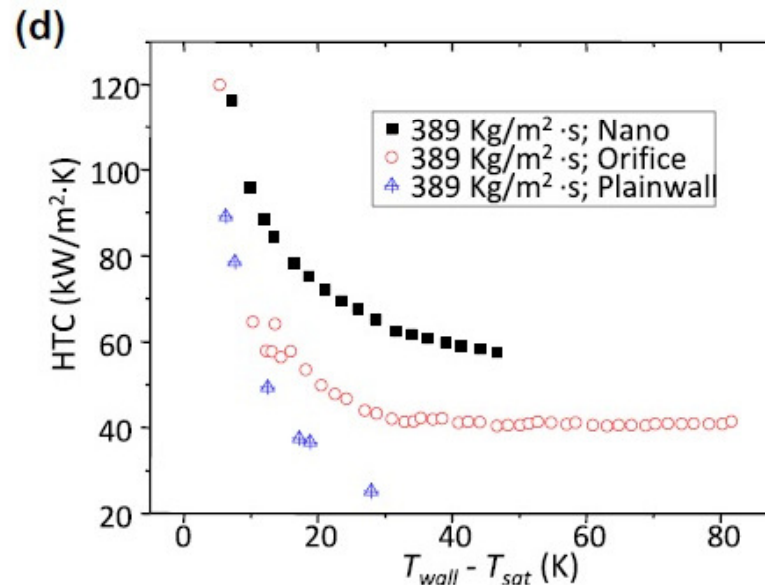
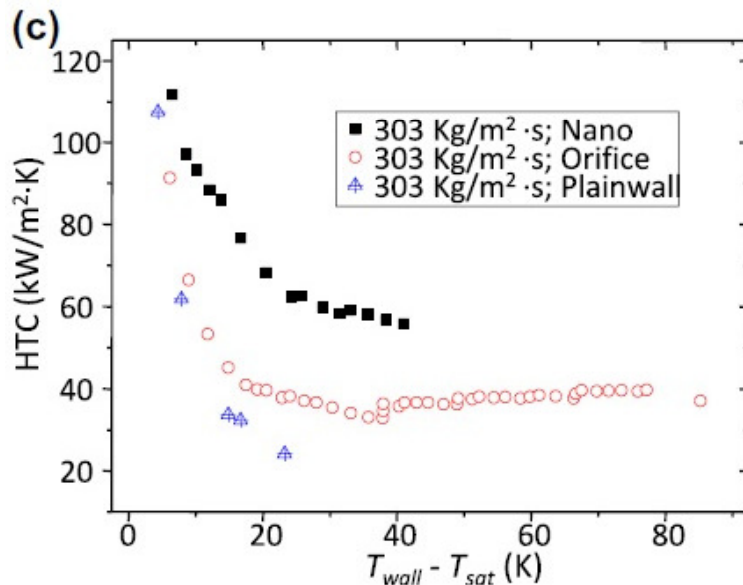
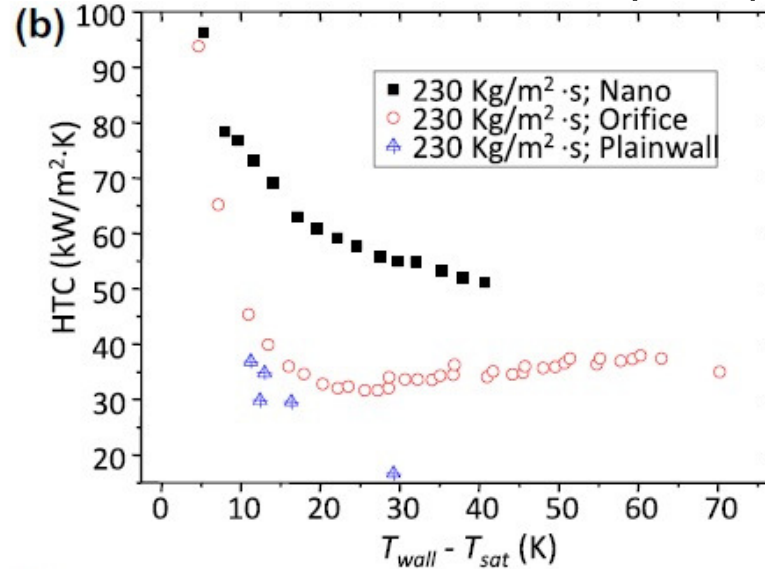
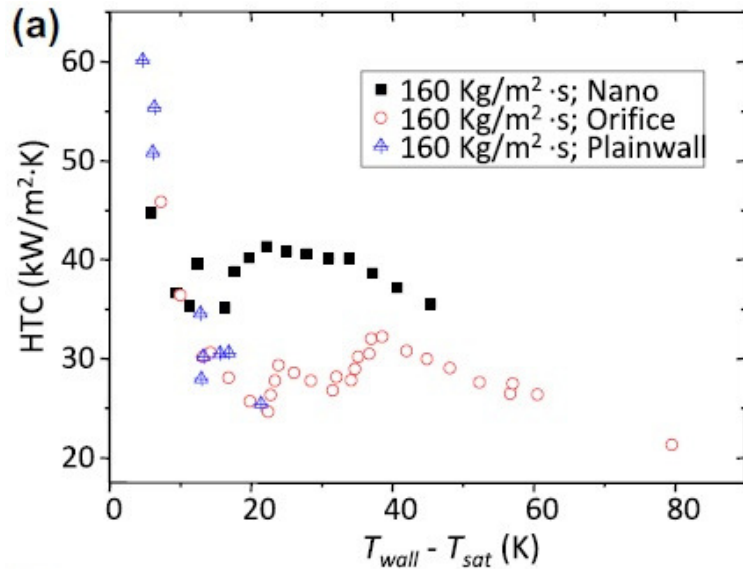
Por exemplo:

para $\Delta T = 28\text{K}$ e

$G = 389\text{ kg/m}^2\text{s}$

Liso: $25,2\text{ kW/m}^2\text{K}$

SiNW: $65,2\text{ kW/m}^2\text{K}$

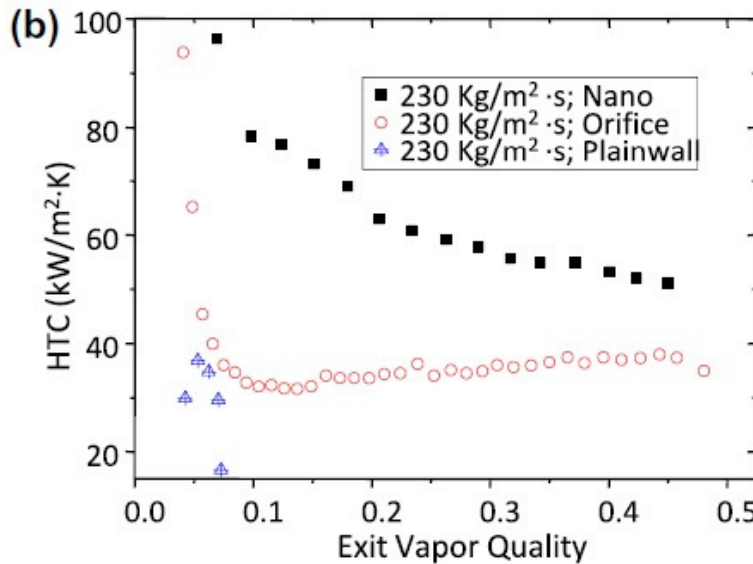
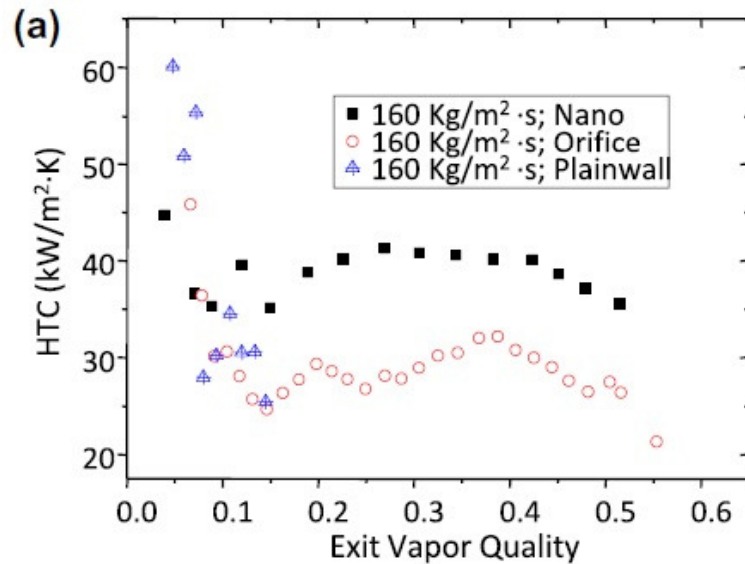


Resultados e discussões

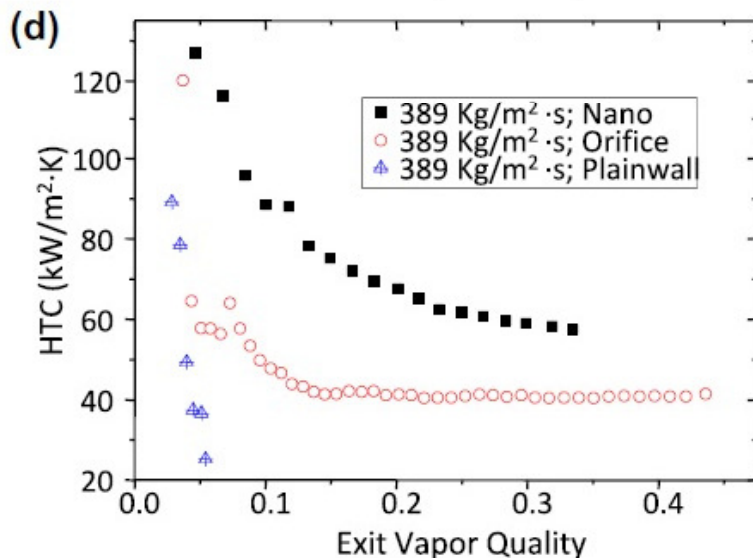
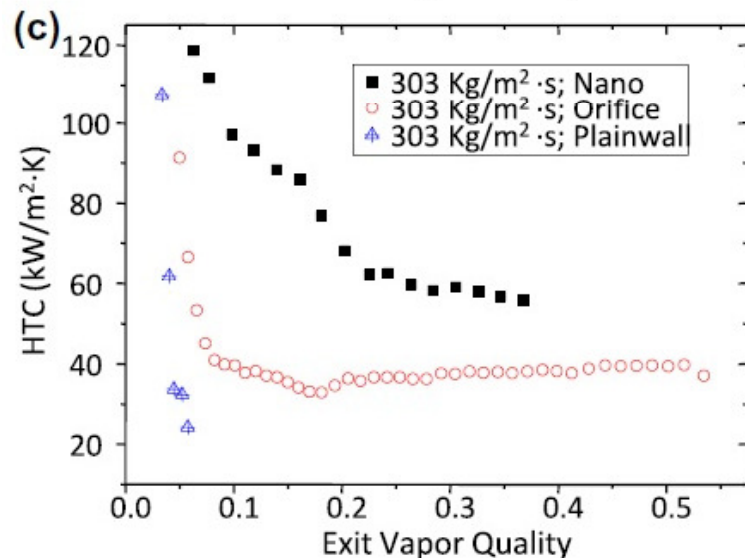
HTC médio versus Qualidade da saída de vapor para vários fluxos mássicos:

Microcanais de paredes lisas não podem operar com títulos elevados ($<0,1$) devido ao

prematureo CHF.



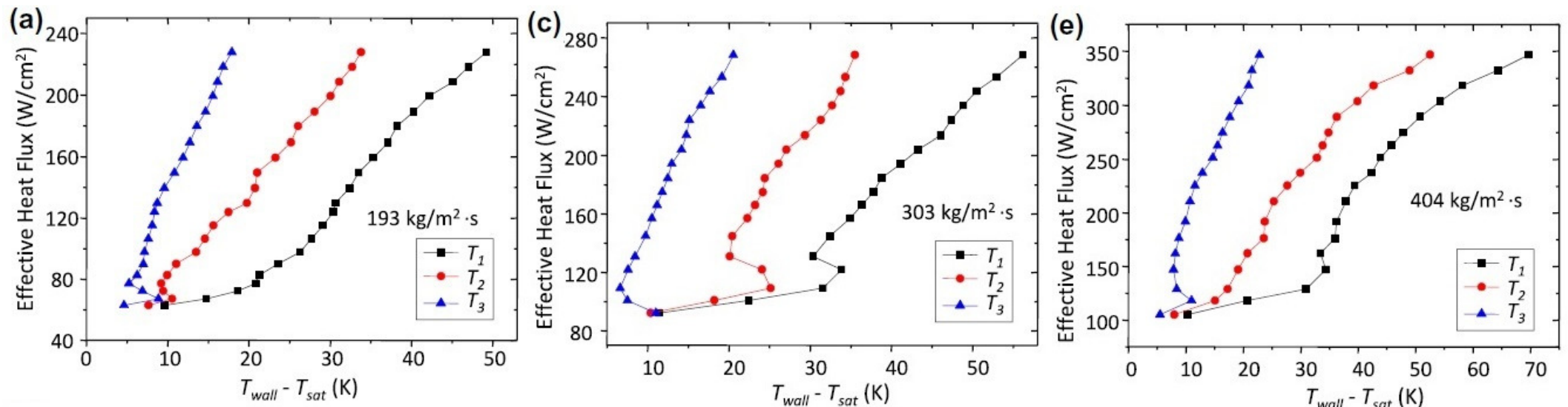
Microcanais com IRs admitem títulos elevados como 0,55, mas tem HTC máximo de 40 kW/m²K



Microcanais com SiNW podem operar com título até 0,52, e oferecem elevados HTC de até 60 kW/m²K

Coeficiente de Transferência de Calor Local:

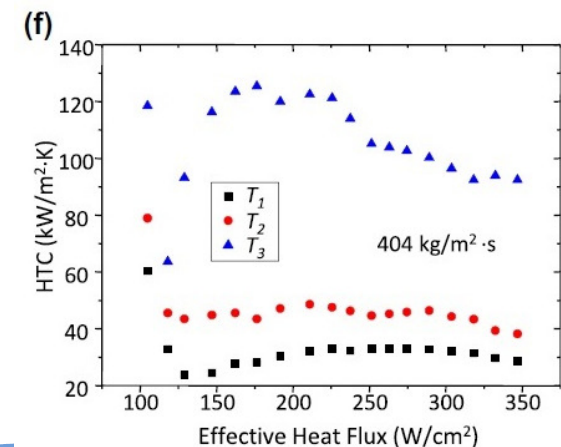
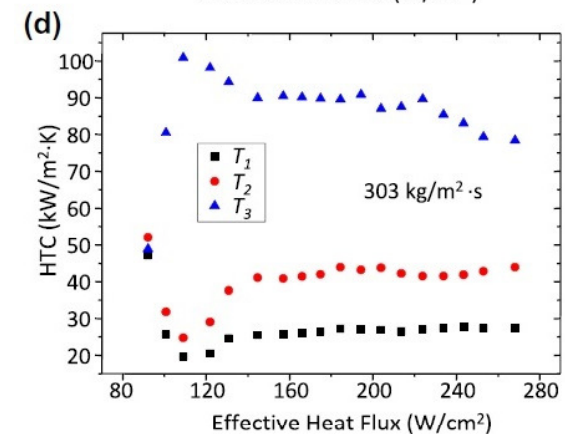
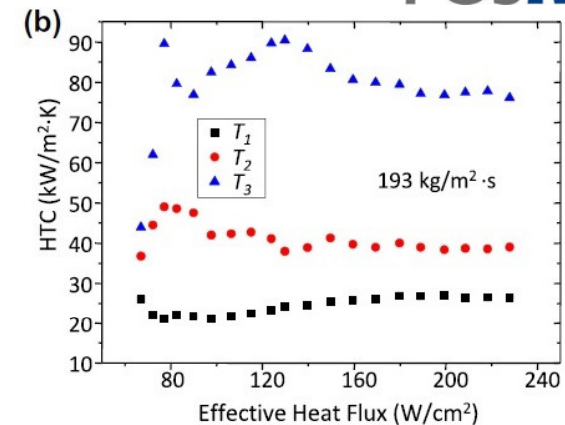
- A dependência do HTC local é consistente com a distribuição de espessura da película de líquido, sugerindo melhora significativa com a evaporação em filme fino
- A histerese na região de início de nucleação foi observada em todos os locais. Assim, ebulição nucleada é o modo básico de transferência de calor nos microcanais SiNW



Resultados e discussões

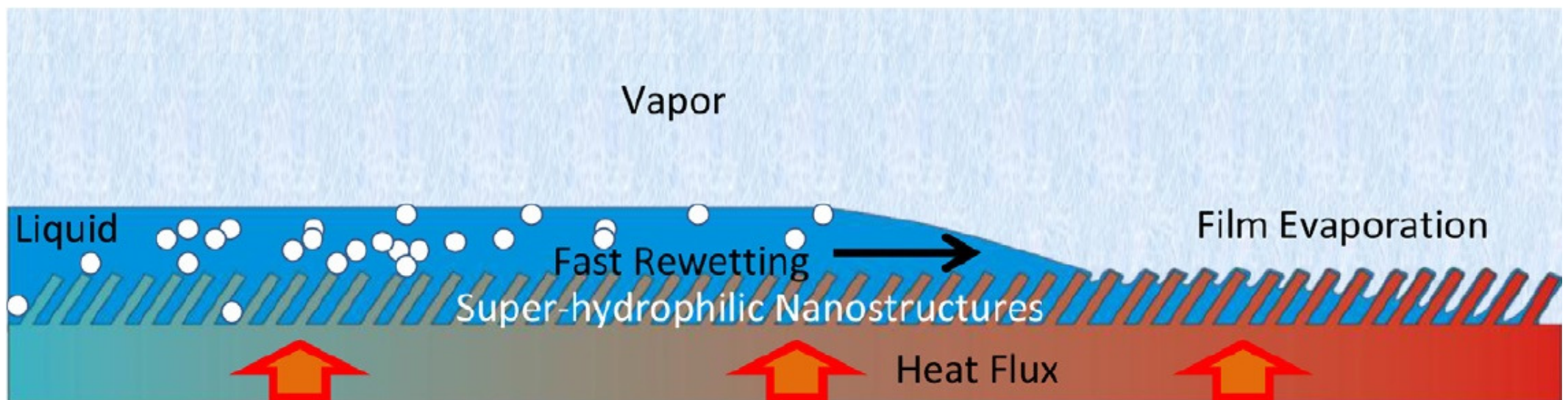
Coeficiente de Transferência de Calor Local:

- O HTC perto da entrada foi sempre mais baixo, pois a região de entrada é dominada pela convecção monofásica e pela ebulição nucleada
- O maior HTC após a região de entrada pode ser atribuído ao aumento da ebulição nucleada, a evaporação em filme fino, e renovação da película líquida induzida pela capilaridade no fluxo anular único
- O HTC na posição T3 foi 90% mais elevado do que na posição T2, e 150% maior do que na entrada (T1)
- O HTC local atingiu um valor máximo de até 125,4 kW/m²K com fluxo mássico de 404 kg/m²s



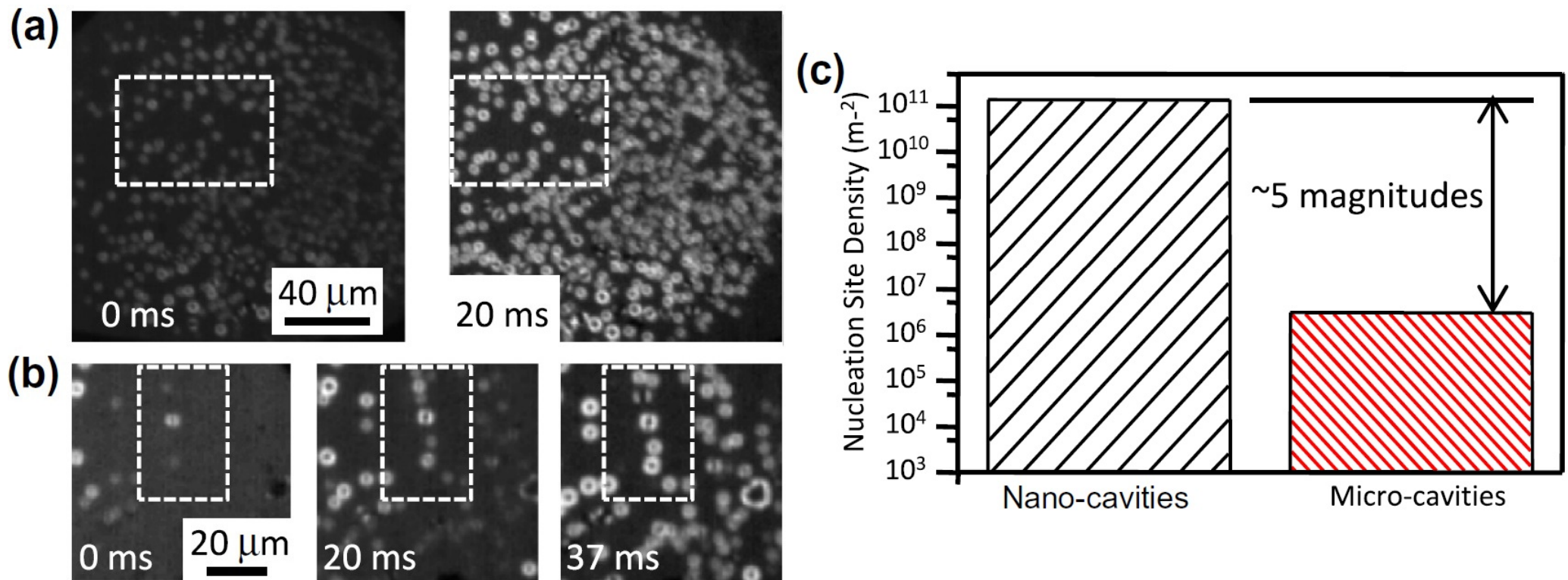
Modos de Transferência de Calor:

- A ebulição nucleada é um importante mecanismo de transferência de calor em todo o processo de ebulição. Contudo, em microcanais SiNW pode se limitar a certas áreas de baixo título
- A evaporação de película fina é igualmente importante em títulos moderados e altos, o que aumenta significativamente o HTC em ebulição convectiva nos microcanais SiNW
- A alta frequência de re-umedecimento induzida pelos SiNWs super hidrofílicos cria uma rápida renovação do filme líquido



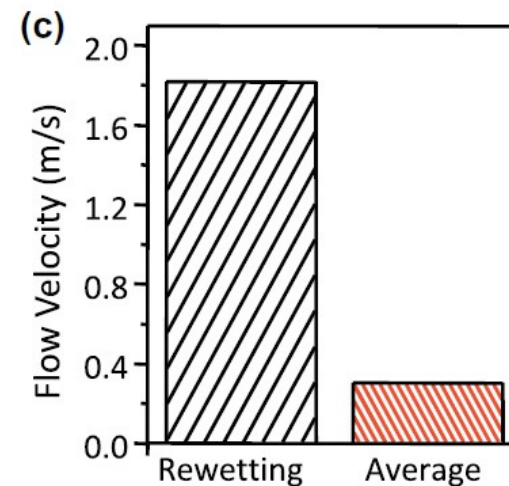
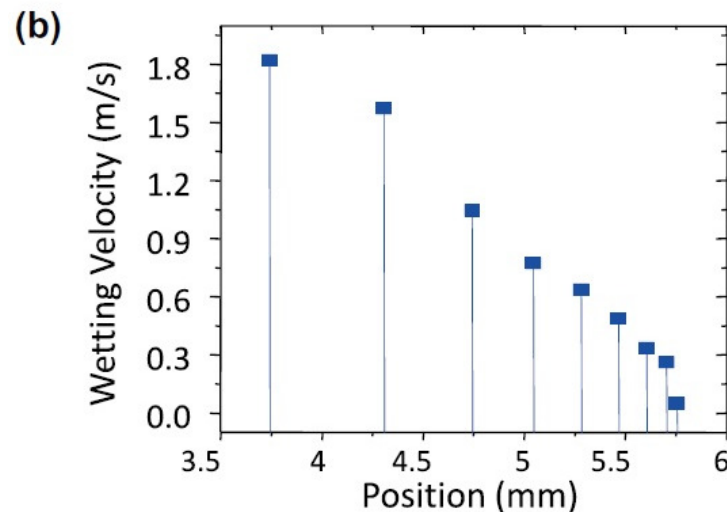
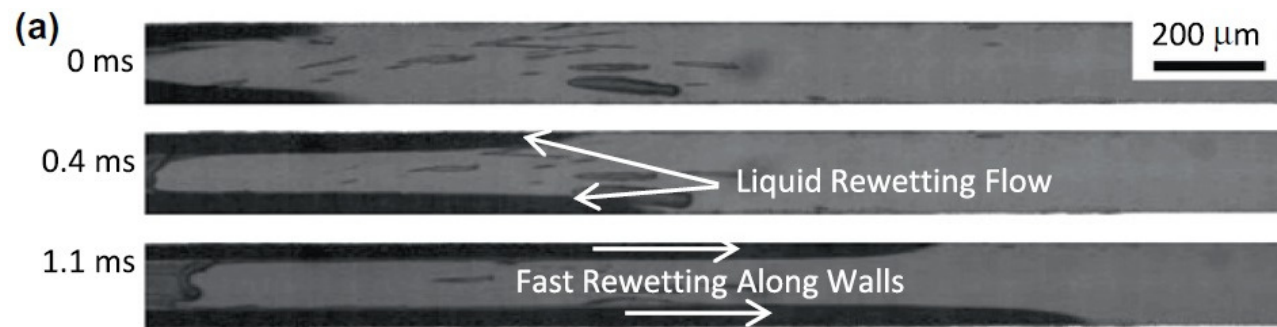
Melhoria da Ebulição Nucleada:

- Diâmetro de bolhas menores que $5 \mu\text{m}$ (SiNW em microcanais)
- Grande aumento da densidade de sítios de nucleação
- Densidade de sítios de nucleação ativos $\sim 10^{10}\text{m}^{-2}$
- Melhor molhabilidade da superfície e redução do tamanho das cavidades



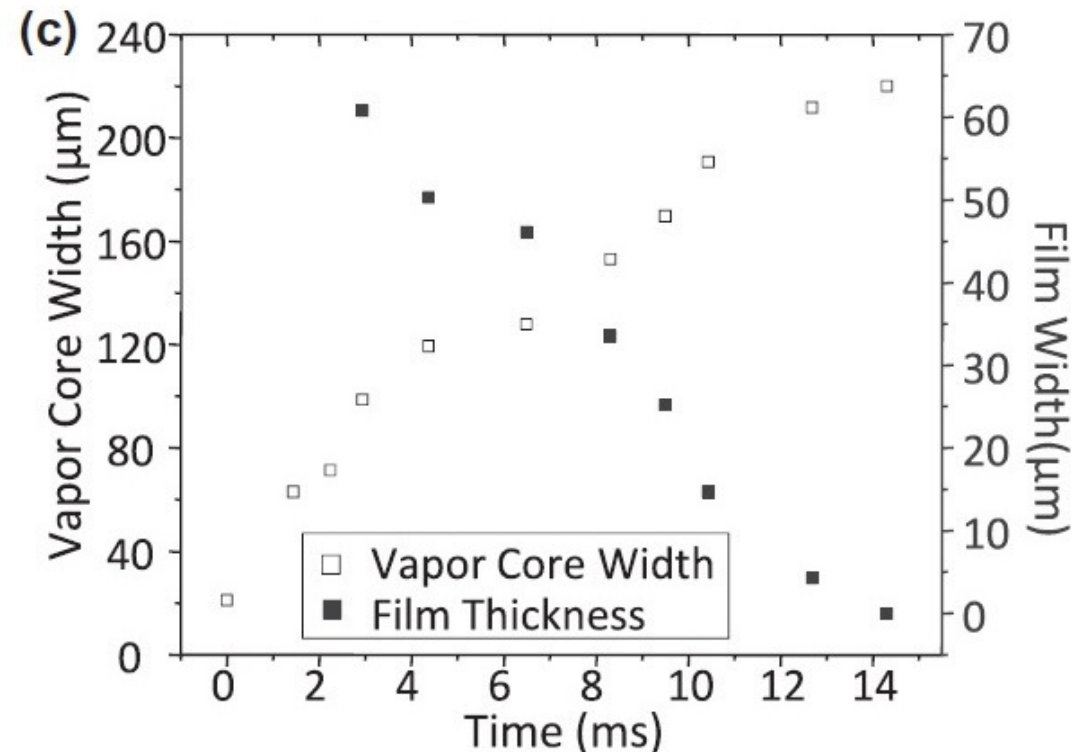
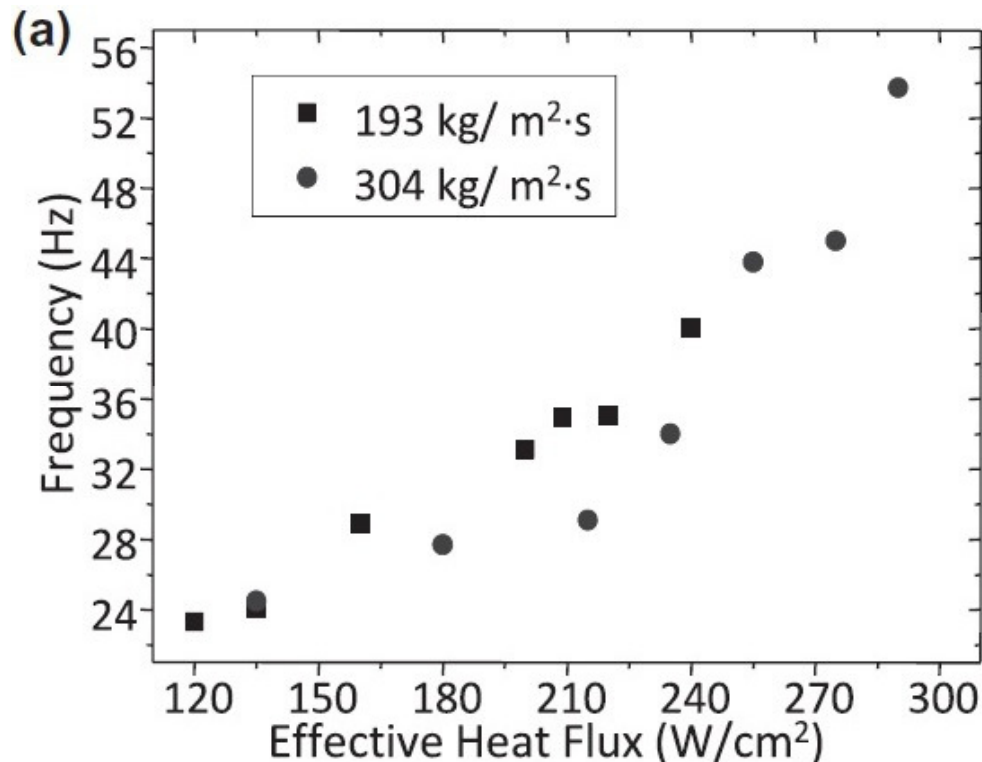
Promoção da evaporação em filme fino e renovação do filme líquido:

- Evidência da rápida renovação do filme líquido (a)
- A velocidade de re-umedecimento ao longo do comprimento do canal (b)
- A velocidade de renovação de líquido é aproximadamente 5x mais rápido do que a velocidade média do escoamento (c)



Promoção da evaporação em filme fino e renovação do filme líquido:

- O tamanho do núcleo de vapor e a espessura da película de líquido aumentam e diminuem periodicamente com uma frequência elevada
- O filme fino foi gerado e prolongou-se ao longo do comprimento do microcanal em um curto período de tempo (~ 10 ms)



- ✓ Ebulição convectiva drasticamente melhorada em microcanais com SiNWs
- ✓ Caracterizado sistematicamente a ebulição convectiva no novo regime de escoamento
- ✓ Identificados três modos de transferência de calor no novo regime
 - ebulição nucleada
 - a evaporação em filme fino
 - as renovações de filmes líquidos
- ✓ Melhor HT na ebulição nucleada pela alta densidade de sítios ativos devido a engenhada superfície SiNW
- ✓ Os SiNWs super hidrofílicos promovem a evaporação em filme fino e a renovação do filme líquido em todo o microcanal
- ✓ Demonstrado o processo de transferência de calor e a estrutura do fluxo no escoamento anular único