

УДК 532.63

Влияние структуры черного кремния на капиллярное растекание жидкости*

В.С. Сердюков^{1,2}, Е.А. Вячеславова³, А.И. Баранов³, И.В. Владыко^{1,2},
О.А. Володин¹

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

³Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова

E-mail: volodin_o@mail.ru

Представлены результаты экспериментального исследования капиллярного растекания жидкости по созданному методом криогенного плазмохимического травления супергидрофильным поверхностям черного кремния различной морфологии. Было подготовлено пять образцов капиллярных поверхностей, различающихся характеристиками микроструктур, включая две гибридные поверхности, комбинирующие микроструктурирование разной высоты. Исследована морфология поверхностей и характеристики их смачивания водой, включая число Wi , характеризующее капиллярное впитывание жидкости. Обнаружено, что большая высота микроструктур приводит к лучшему растеканию жидкости. Максимальные значения числа Wi достигаются на гибридных поверхностях с большей плотностью «высоких» микроструктур. Продemonстрирована перспективность использования гибридных капиллярных поверхностей для повышения величины критического теплового потока при кипении воды.

Ключевые слова: супергидрофильная поверхность, капиллярная поверхность, черный кремний, плазмохимическое травление, повышение КТП.

Введение

Наблюдаемое развитие высокопроизводительных устройств, таких как вычислительные модули дата-центров, устройства авиационной, космической и силовой электроники, топливные элементы и другие, в ближайшее время потребует отведения огромных тепловых мощностей вплоть до $10^3 - 10^5$ Вт/см² [1]. Существующие традиционные однофазные теплообменные системы даже при достижении их максимальной эффективности не могут быть использованы для отвода такого количества тепла. По этой причине использование двухфазных систем, в том числе основанных на кипении теплоносителя, является одним из наиболее перспективных методов для безопасного охлаждения и термостабилизации различных высокопроизводительных устройств [2].

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 23-29-10092) и Правительства Новосибирской области (соглашение № р-48).

Однако процесс кипения ограничен по интенсивности теплопередачи критическим тепловым потоком (КТП), достижение которого, как правило, выводит теплообменную поверхность из строя. Несмотря на то что исследования, направленные на интенсификацию теплообмена и повышение КТП при кипении, проводятся уже достаточно давно, их актуальность при текущем темпе развития технологий только возрастает. Анализ посвященных этому вопросу работ показывает, что подавляющее большинство из них связано с модификацией теплообменной поверхности на микро- и наномасштабе [3–6]. В частности, многими авторами было показано, что с помощью управления такими свойствами поверхности, как смачивание, пористость и шероховатость, удастся заметно повысить интенсивность теплообмена и КТП, а также снизить температурный порог закипания и стабилизировать характер кипения. Однако наряду с колоссальным количеством успешно апробированных методов модификации поверхности для повышения эффективности кипения, поиск наиболее простых и надежных из них, а также разработка новых методов сегодня продолжают.

Кроме того, одной из главных проблем при разработке и проектировании модифицированных теплообменных поверхностей остается выбор оптимальных параметров поверхности (смачивание, пористость, шероховатость, структура на микро- и наномасштабе и др.) для достижения максимальной эффективности теплообмена и КТП при кипении жидкости. Несмотря на то что сегодня в литературе существуют некоторые модели, описывающие влияние различных свойств поверхности на интенсивность теплообмена и критический тепловой поток при кипении жидкости, многие вопросы остаются открытыми [7]. Связано это с тем, что подавляющее большинство методов модифицирования поверхности позволяет варьировать различные параметры поверхности, зачастую в комплексе. Например, активно разрабатываются и создаются поверхности с мультимасштабными структурами, поверхности с откликом на изменение того или иного параметра системы и другие поверхности, которые обладают специфическими морфологией и смачиваемостью. В результате появляется необходимость постоянного обновления имеющихся и создания новых моделей с учетом указанных характеристик.

Ярким примером является проблема теоретического описания развития кризиса пузырькового кипения и учет влияния свойств поверхности на величину КТП. Так, в работе [8] было отмечено, что уже в 2018 г. в литературе было представлено более 1000 эмпирических и полуэмпирических корреляций для расчета величины КТП при кипении жидкости, что связано в том числе с необходимостью анализа свойств поверхности с учетом этой величины. В частности, несмотря на то что классический гидродинамический подход к описанию кризиса кипения, предложенный Кутателадзе и Зубером в 1950-е годы [9, 10], достаточно точно предсказывает величину КТП для широкого ряда жидкостей и традиционных технических поверхностей, он не может быть использован для поверхностей, характеризующихся (супер-) гидрофильными или (супер-) гидрофобными свойствами. По этой причине рядом авторов были предложены новые подходы к описанию кризиса кипения с учетом свойств поверхности [11, 12]. В 2001 г. Кандликаром [13] была предложена модель, учитывающая влияние свойств смачивания поверхности на величину КТП при кипении. Модель успешно описывает многочисленные экспериментальные данные ряда авторов и продолжает оставаться одной из наиболее цитируемых и используемых для расчета величины КТП при кипении.

Однако, как было показано в других работах, при кипении жидкости на капиллярно-пористых поверхностях, характеризующихся контактным углом смачивания менее 10° (так называемые супергидрофильные поверхности), модель Кандликара, как правило,

Рис. 1. Зависимость критического теплового потока при кипении насыщенной воды в условиях свободной конвекции от контактного угла смачивания поверхности.
1 — [9, 10], 2 — [13], 3 — [14], 4 — [15], 5 — [16], 6 — [17].

показывает заниженные относительно экспериментальных данных результаты [14–17] и не может быть использована для их описания (рис. 1). Как было показано исследователями, связано это с улучшенным подтоком жидкости под паровые конгломераты при использовании пористых и капиллярных поверхностей, что приводит к замыванию сухих пятен в предкризисном режиме и соответствующему повышению величины КТП при кипении.

В работе [18] на основе экспериментальных данных по величине КТП при кипении воды на поверхностях с различными характеристиками капиллярного впитывания была предложена модель КТП, учитывающая безразмерный параметр (число Wi), отвечающий за процесс растекания жидкости по капиллярам поверхности. Число Wi может быть определено исходя из анализа объема жидкости, поступающего из капилляра заданного диаметра в структурированную поверхность:

$$Wi = \frac{\dot{V}_{wick}'' \rho_{ж}}{\rho_n^{1/2} [\sigma g (\rho_{ж} - \rho_{п})]^{1/4}}. \quad (1)$$

Здесь $\dot{V}_{wick}''$ — объем жидкости, впитывающийся в поверхность за секунду, m^3/c ; $\rho_{ж}$, $\rho_{п}$ — плотность жидкости и пара, m^3/c ; σ — коэффициент поверхностного натяжения, N/m ; g — ускорение свободного падения, m/c^2 .

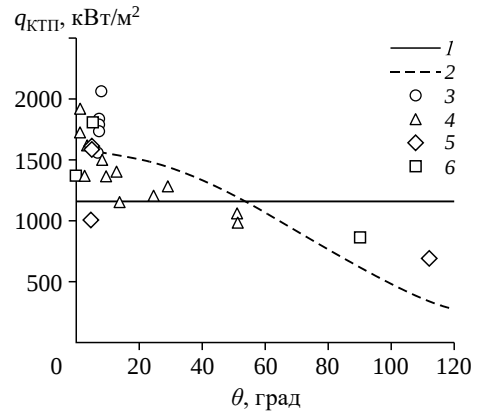
Анализ полученных данных по зависимости КТП от числа Wi показал, что они могут быть обобщены следующим выражением:

$$q_{КТП} = q_{КТП,КЗ} (1 + Wi), \quad (2)$$

где $q_{КТП,КЗ}$ — величина критического теплового потока, полученная с помощью модели Кутателадзе – Зубера.

Сопоставление опытных данных работы [19] показало, что модель (2) может быть использована не только для случая кипения воды, но и для хорошо смачивающих жидкостей. Однако, как отмечают авторы данной модели, для более точного описания теплообмена и КТП при кипении жидкости в широком диапазоне варьирования капиллярного всасывания требуются дальнейшие экспериментальные исследования. Это в том числе говорит о необходимости разработки новых методов создания капиллярно-пористых теплообменных поверхностей, позволяющих варьировать в широком диапазоне характеристики капиллярного растекания жидкости и за счет их высоких значений достигать максимальных величин КТП при пузырьковом кипении жидкости.

Целью настоящей работы было исследование влияния морфологии капиллярных поверхностей микроструктурированного плазмохимическим травлением кремния (так называемый черный кремний) на характеристики капиллярного растекания, применительно к задаче повышения КТП при кипении жидкости.



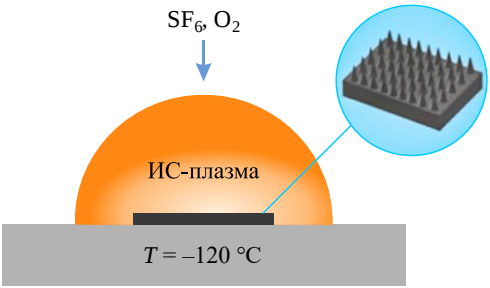


Рис. 2. Схема процесса криотравления черного кремния.

Методика эксперимента

В качестве образцов для изготовления рабочих участков в экспериментах были использованы круглые подложки из кристаллического кремния *p*-типа проводимости диаметром 100 мм и толщиной 460 мкм. Модификация поверхностей проводилась с помощью метода криогенного сухого плазмохимического травления в газовой среде SF₆/O₂. В процессе плазмохимического травления (ПХТ) происходит бомбардировка поверхности кремния радикалами SF_x (0 ≤ *x* ≤ 5), образовавшимися в результате диссоциации молекул SF₆, с образованием летучих соединений SiF_x и SiO_xF_y. При температурах выше –100 °С проявляется изотропное поведение травления. При понижении температур (менее –100 °С) происходит конденсация молекул SiO_xF_y на охлажденной поверхности кремниевой подложки, что формирует пассивационный слой, препятствующий процессу травления. При ПХТ активные радикалы SF_x имеют строгое направление движения под действием тянущего поля плазмы, в результате достигается высокая анизотропия травления. При достаточно низкой температуре и высоком содержании кислорода в газовой смеси начинается режим перепассивации и образование черного кремния. Схема процесса криотравления черного кремния представлена на рис. 2, более подробно методика создания поверхностей черного кремния описана в работах [20–24].

Плазмохимическое травление подложек кремния проводилось на установке PlasmaLab System 100 ICP380. Данная система оснащена двумя источниками высокой частоты: источником индуктивно связанной плазмы (ICP) и источником с емкостной связью (ССР), соединенным со столиком-подложкодержателем. Вакуумная камера откачивается высокопроизводительным турбомолекулярным и сухим насосами. Установка имеет несколько газовых магистралей (SF₆, O₂, Ar, CHF₃ и др.), позволяющих варьировать газовую смесь в рабочей камере. Кроме того, установлена линия подачи сжиженного азота, что дает возможность получать температуру до –150 °С.

В работе было создано пять образцов черного кремния с различными геометрическими характеристиками, полученными за счет варьирования времени обработки образца и состава газовой смеси SF₆/O₂. Параметры синтеза для изготовленных поверхностей

Таблица

Параметры синтеза и основные геометрические характеристики изготовленных образцов черного кремния

Образец	Поток SF ₆ /O ₂		Время обработки, с		Высота структур, мкм		Примечание
S-1	45/15		220		2,3		Варьирование высоты структур
360			5,0				
600			5,6				
S_hyb-1	50/9	45/15	720	480	~ 14,8	~ 5,1	Гибридные поверхности (структуры с двумя различными длинами)
S_hyb-2			600	600	~ 13,7	~ 3,6	

приведены в таблице. Морфология изготовленных образцов была изучена с помощью метода растровой электронной микроскопии (РЭМ) (микроскоп Carl Zeiss «SUPRA 25»). РЭМ-изображения образцов приведены на рис. 3.

В первую очередь за счет изменения времени обработки было получено три образца с различной высотой микроструктур (S-1, S-2, S-3). Как видно на РЭМ-изображениях, морфология этих образцов черного кремния представляет собой равномерно распределенные микроструктуры конусообразной формы одной высоты. Структуры расположены достаточно близко друг к другу, образуя капилляры переменного сечения. На следующем этапе исследования были созданы гибридные образцы (S_hyb-1, S_hyb-2), представляющие собой микроструктуры различной высоты. Такая морфология была достигнута за счет травления в две стадии. На первой стадии были созданы высокие структуры, после чего было проведено повторное травление для образования слоя из структур меньшей высоты. При повторном травлении часть первичных структур была стравлена, в итоге более высокие структуры имеют не всегда одинаковую форму, а их распределение по поверхности неоднородно.

Как показал анализ смачивания, проведенный методом сидячей капли на установке KRUSS DSA-100, все изготовленные образцы обладают супергидрофильными свойствами ($\theta_{CA} < 10^\circ$). Ключевое различие в их свойствах, принципиально важное для задач по кипению жидкости, связано именно с капиллярным растеканием.

Анализ характеристик капиллярного растекания выполнен с использованием экспериментального стенда, схема которого представлена на рис. 4. Стенд состоит из моторизованной трансляционной платформы с расположенной на ней анализируемой поверхностью, а также вертикально установленного капилляра из тефлона (внутренний

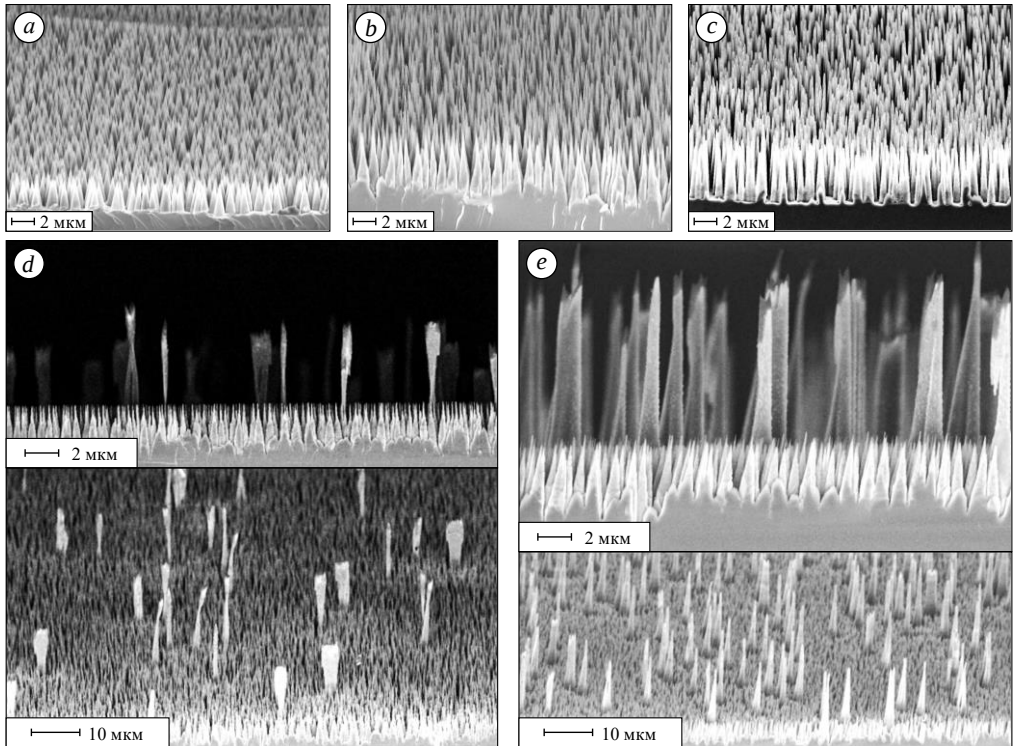


Рис. 3. РЭМ-изображения изготовленных образцов черного кремния. S-1 (a), S-2 (b), S-3 (c), S_hyb-1 (d), S_hyb-2 (e).

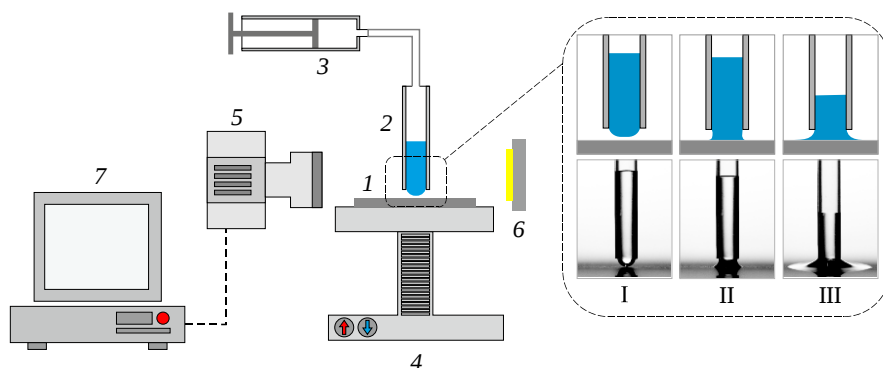


Рис. 4. Принципиальная схема экспериментального стенда для исследования капиллярного растекания и стадий I–III процесса.

1 — анализируемый образец, 2 — прозрачный капилляр, 3 — заполненный воздухом шприц, 4 — моторизованная трансляционная платформа, 5 — высокоскоростная камера, 6 — источник света, 7 — персональный компьютер для записи видеоданных.

диаметр 1,5 мм), заполненного дистиллированной водой и подсоединенного к шприцу, заполненному воздухом. Шприц необходим для формирования и контроля положения висячей полусферической капли (I). Как только капля касается поверхности, начинается процесс растекания жидкости, который можно описать последовательным прохождением двух стадий (см. рис. 4). Первая стадия (II) характеризуется быстрым проникновением жидкости в структуру поверхности, увеличением контактной линии смоченной площади и уменьшением высоты жидкости в капилляре. После нескольких миллисекунд форма мениска жидкости в основании капилляра уже не меняется, достигая площади A_w . Продолжающееся всасывание жидкости означает начало второй стадии (III), которая характеризуется на порядок меньшей скоростью растекания жидкости по сравнению с предыдущей.

Для определения необходимых параметров капиллярного растекания в экспериментах проводилась видеосъемка с частотой 2000 кадр/с (камера Phantom VEO 410L). Опытные данные анализировались с использованием алгоритма автоматизированной обработки изображений, выполненного в среде Python. Поступивший в капилляр объем жидкости был рассчитан как изменение объема в капилляре при уменьшении высоты столба жидкости при известной постоянной величине поперечного сечения капилляра от момента касания висячей каплей анализируемой поверхности:

$$V_{\text{wick}}'' = \frac{1}{A_w} \left(\frac{dV}{dt} \right)_{t=0}. \quad (2)$$

Результаты исследований

На рис. 5а приведен пример обработки результатов по капиллярному растеканию для поверхности черного кремния (S-3). В этом случае скорость всасывания была определена как угол наклона прямой, аппроксимирующей данные $V_{\text{wick}}(t)$ методом наименьших квадратов. Полученные в результате обработки данных по выражению (1) значения W_i для изготовленных поверхностей приведены на рис. 5б. Для каждой поверхности было проведено по шесть экспериментов, между которыми исследуемая поверхность тщательно просушивалась с помощью сжатого газа. Статистический разброс результатов измерений от среднего в каждой серии составил до 15 %. Погрешность определения

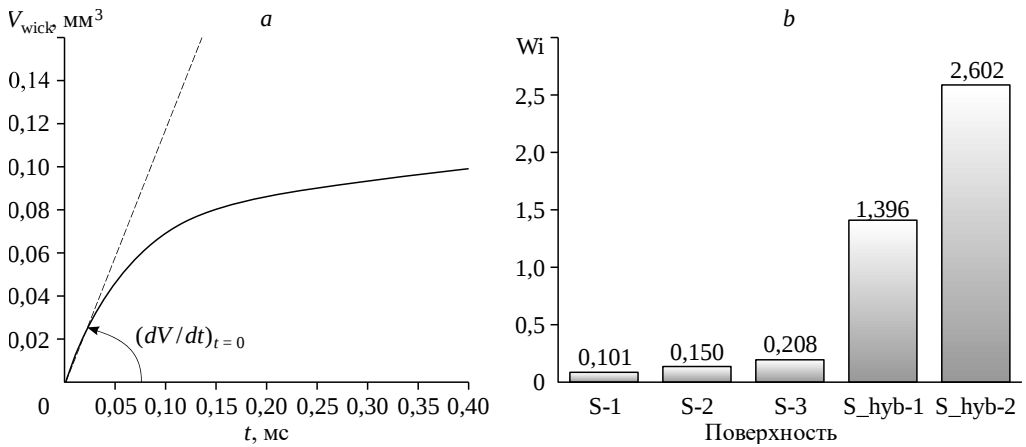


Рис. 5. Определение параметров капиллярного растекания жидкости на основе экспериментальных данных (а) и значения числа Wi для изготовленных поверхностей черного кремния (б).

числа Wi включала неточность определения границ смоченной зоны и неточность в определении временных характеристик растекания и составила не более 5 %.

Анализ полученных данных показывает, что изготовленные поверхности характеризуются достаточно широким диапазоном числа Wi , что важно для дальнейшего анализа влияния этой величины на особенности теплообмена и развития кризисных явлений при кипении жидкости. Кроме того, гибридные поверхности демонстрируют наибольшие значения числа Wi , что также говорит о высоком потенциале разработанных поверхностей для задач по кипению жидкости. Из результатов для поверхностей S-1, S-2, S-3 следует, что большая высота микроструктур соответствует лучшему растеканию жидкости (большему значению Wi), что, по-видимому, связано с большей площадью капилляров поверхности. В свою очередь, обе разработанные гибридные поверхности имеют существенно более высокие значения Wi , чем поверхности с равномерным слоем из микроструктур. Учитывая, что высота «основного» слоя микроструктур для гибридных поверхностей (5,1 мкм для S_hyb-1 и 3,6 мкм для S_hyb-2) лежит в диапазоне высот микроструктур поверхностей S-1, S-2 и S-3 (2,3–5,6 мкм), очевидно, что основное влияние на повышенную способность к растеканию жидкости на таких поверхностях оказывает именно наличие более высоких структур. Одна из возможных причин заметного роста числа Wi — это дополнительное растекание жидкости вбок по поверхности благодаря высоким структурам, в результате чего происходит дополнительное проникновение жидкости в основной капиллярный слой сверху, а не только сбоку, как в случае структур одной высоты. Однако для более точного ответа на этот вопрос необходимо проведение дальнейших экспериментов, в том числе с привлечением численного моделирования процесса растекания жидкости по капиллярно-пористой поверхности заданной геометрии.

Для того чтобы продемонстрировать высокую перспективность изготовленных поверхностей для решения задачи повышения КТП при кипении жидкости, был проведен расчет величины КТП для поверхностей черного кремния согласно модели Рахмана [18]. На рис. 6 представлены рассчитанные по модели (2) значения относительного критического теплового потока ($q_{КТП}/q_{КТП, КЗ}$, где $q_{КТП, КЗ}$ — величина КТП согласно модели Кутателадзе–Зубера) для полученных в работе значений Wi , а также опытные данные других авторов [18, 19, 25, 26].

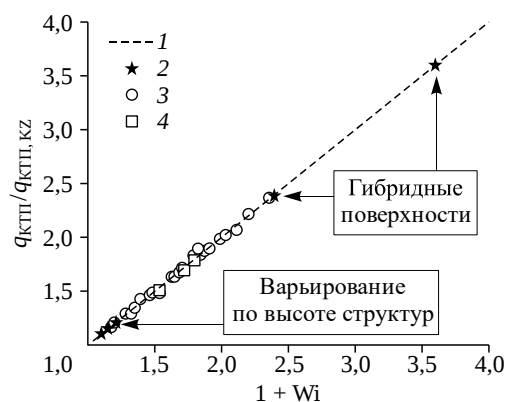


Рис. 6. Зависимость относительного критического теплового потока от характеристик растекания жидкости при использовании капиллярно-пористых поверхностей.

1 — расчет по модели (2) [18],
2 — расчет по (2) для изученных поверхностей,
3 — [18, 19, 25], 4 — [15].

Из представленных на рис. 6 данных видно, что для гибридных поверхностей отношение КТП/КТП_{КЗ} достигает 3,6, что соответствует величине КТП при кипении воды в условиях свободной конвекции

более 4000 кВт/м². Такие значения КТП приближаются к максимальным из экспериментально найденных величин и, в случае их действительного достижения в запланированных авторами экспериментах по кипению, полученные результаты будут обладать безусловной практической и фундаментальной значимостью. Ближайшей задачей авторов является проведение экспериментов по кипению насыщенной воды с использованием ранее успешно апробированных методик высокоскоростной видео- и термографической съемки [17, 27] на представленных в настоящей работе поверхностях черного кремния.

Заключение

Отработана методика микроструктурирования кремния методом криогенного сухого плазмохимического травления с целью создания супергидрофильных капиллярных поверхностей с различной морфологией, включая гибридные поверхности. Создано пять различных образцов капиллярных поверхностей, изучена их морфология и характеристики смачивания водой, включая число Wi.

Обнаружено, что большая высота микроструктур приводит к лучшему растеканию жидкости по поверхности. Гибридные поверхности характеризуются высокими значениями числа Wi (вплоть до 2,6), при этом максимальные значения числа Wi достигаются при наибольшей плотности «высоких» микроструктур гибридных поверхностей.

Показано, что, согласно модели Рахмана [18], при использовании гибридных поверхностей черного кремния величина КТП при кипении воды может достигать рекордных значений порядка 4 МВт/м².

Список литературы

1. Mudawar I. Recent Advances in high-flux, two-phase thermal management // ASME. J. Thermal Sci. Eng. Appl. 2013. Vol. 5, No. 2. P. 021012-1–021012-15.
2. Ebadian M.A., Lin C.X. A review of high-heat-flux heat removal technologies // ASME. J. Heat Transfer. 2011. Vol. 133, No. 11. P. 110801-1–110801-11.
3. Surtaev A.S., Serdyukov V.S., Pavlenko A.N. Nanotechnologies for thermophysics: Heat transfer and crisis phenomena at boiling // Nanotechnol. Russia. 2016. Vol. 11. P. 696–715.
4. Benam B.P., Sadaghiani A.K., Yağcı V., Parlak M., Sefiane K., Koşar A. Review on high heat flux flow boiling of refrigerants and water for electronics cooling // Int. J. Heat Mass Transfer. 2021. Vol. 180. P. 121787-1–121787-16.
5. Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н. Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59, №. 2. С. 280–312.

6. **Mori S., Utaka Y.** Critical heat flux enhancement by surface modification in a saturated pool boiling: A review // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2017. Vol. 108. P. 2534–2557.
7. **Ягов В.В.** Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях. М.: Издат. дом МЭИ, 2014. 542 с.
8. **Xie S., Beni M.S., Cai J., Zhao J.** Review of critical-heat-flux enhancement methods // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2018. Vol. 122. P. 275–289.
9. **Кутателадзе С.С.** Гидродинамическая теория изменения режима кипения жидкости при свободной конвекции // *Изв. АН СССР. Отд.-ние техн. наук*. 1951. № 4. С. 529–536.
10. **Zuber N.** On the stability of boiling heat transfer // *Trans. Am. Soc. Mech. Engineers*. 1958. Vol. 80, No. 3. P. 711–714.
11. **Кириченко Ю.А., Черняков П.С.** К определению первого критического теплового потока на плоских нагревателях // *Инж.-физ. журн.* 1971. Т. 20, № 6. С. 982–987.
12. **Ramilison J.M., Sadasivan P., Lienhard J.H.** Surface factors influencing burnout on flat heaters // *J. Heat Transfer*, ASME (Amer. Soc. Mech. Engineers, Series C). 1992. Vol. 114, No. 1. P. 287–290.
13. **Kandlikar S.G.** A theoretical model to predict pool boiling CHF incorporating effects of contact angle and orientation // *J. Heat Transfer*. 2001. Vol. 123, No. 6. P. 1071–1079.
14. **Chen R., Lu M.C., Srinivasan V., Wang Z., Cho H.H., Majumdar A.** Nanowires for enhanced boiling heat transfer // *Nanoletters*. 2009. Vol. 9, No. 2. P. 548–553.
15. **Ahn H.S., Sinha N., Zhang M., Banerjee D., Fang S., Baughman R.H.** Pool boiling experiments on multiwalled carbon nanotube (MWCNT) forests // *J. Heat Transfer*. 2006. Vol. 128, No. 12. P. 1335–1342.
16. **O'Hanley H., Coyle C., Buongiorno J., McKrell T., Hu L.W., Rubner M., Cohen R.** Separate effects of surface roughness, wettability, and porosity on the boiling critical heat flux // *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 103, No. 2. P. 024102-1–024102-5.
17. **Serdyukov V., Vladiko I., Starinskiy S., Rodionov A., Shukhov Y., Malakhov I., Safonov A., Surtaev A.** Pool boiling performance on the textured hemi-wicking surfaces fabricated by nanosecond laser ablation // *Appl. Therm. Eng.* 2023. Vol. 228. P. 120472-1–120472-13.
18. **Rahman M.M., Olceroglu E., McCarthy M.** Role of wickability on the critical heat flux of structured superhydrophilic surfaces // *Langmuir*. 2014. Vol. 30, No. 37. P. 11225–11234.
19. **Rahman M.M., McCarthy M.** Boiling enhancement on nanostructured surfaces with engineered variations in wettability and thermal conductivity // *Heat Transfer. Eng.* 2017. Vol. 38, No. 14–15. P. 1285–1295.
20. **Vyacheslavova E.A., Morozov I.A., Kudryashov D.A. et al.** Study of cryogenic unmasked etching of “black silicon” with ar gas additives // *ACS Omega*. 2022. Vol. 7. P. 6053–6057.
21. **Kondratev F.M., Morozov I.A., Vyacheslavova E.A. et al.** Silicon nanowire-based room-temperature multi-environment ammonia detection // *ACS Appl. Nano Mater.* 2022. Vol. 5. P. 9940–9949.
22. **Uvarov A.V., Gudovskikh A.S., Baranov A.I. et al.** Plasma-deposited multilayer gap/si p-i-n structure for tandem silicon-based solar cells // *ACS Appl. Energy Mater.* 2022. Vol. 5. No. 5. P. 5374–5380.
23. **Baranov A.I., Kudryashov D.A., Uvarov A.V. et al.** Study of schottky diodes based on an array of silicon wires obtained by cryogenic dry etching // *Tech. Phys. Lett.* 2022. Vol. 48. P. 23–26.
24. **Gudovskikh A.S., Kudryashov D.A., Baranov A.I. et al.** Impact of interface recombination on quantum efficiency of a-Si:H/c-Si solar cells based on Si wires // *Physica Status Solidi (A) Applicat. Mater.* 2021. Vol. 218, No. 22. P. 2100339-1–2100339-8.
25. **Rahman M.M., King S.M., Olceroglu E., McCarthy M.** Nucleate boiling on biotemplated nanostructured surfaces // *In ASME Int. Mech. Eng. Congress and Exposition*. 2012. Vol. 45233. P. 2801–2808.
26. **Ahn H.S., Jo H.J., Kang S.H., Kim M.H.** Effect of liquid spreading due to nano/microstructures on the critical heat flux during pool boiling // *Appl. Phys. Lett.* 2011. Vol. 98. P. 071908-1–071908-4.
27. **Serdyukov V., Starinskiy S., Malakhov I., Safonov A., Surtaev A.** Laser texturing of silicon surface to enhance nucleate pool boiling heat transfer // *Appl. Therm. Eng.* 2021. Vol. 194. P. 117102-1–117102-5.

*Статья поступила в редакцию 19 декабря 2023 г.,
после доработки — 26 февраля 2024 г.,
принята к публикации 13 июня 2024 г.*