

УДК 536.248.2

Интенсификация теплообмена и повышение критического теплового потока при кипении на бифильной поверхности кремния*

**И.П. Малахов, В.С. Сердюков, А.И. Сафонов,
А.А. Родионов, С.В. Старинский, А.С. Суртаев**

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

E-mail: surtaevas@gmail.com

Статья посвящена экспериментальному исследованию теплообмена и развитию кризиса при кипении на бифильной поверхности кремния, созданной с помощью комплекса методов, включая химическое осаждение из газовой фазы и лазерное текстурирование. Показано, что использование бифильной поверхности с предложенной конфигурацией гидрофобных зон на супергидрофильном основании приводит одновременно к интенсификации теплообмена на 60 % и повышению критического теплового потока на 76 % по сравнению с немодифицированной поверхностью.

Ключевые слова: кипение, бифильная поверхность, интенсификация теплообмена, критический тепловой поток.

Развитие устройств с высокой интенсивностью тепловыделения, например, высокопроизводительных компьютерных чипов, силовых установок, инверторов электромобилей и т.д. привело к необходимости отводить немислимые ранее тепловые потоки вплоть до $10^3 - 10^5$ Вт/см² [1]. Существующие традиционные однофазные теплообменные системы даже при достижении их максимальной эффективности уже не могут быть использованы для отвода такого количества тепла. Использование двухфазных систем, в том числе основанных на кипении теплоносителя, является одним из наиболее перспективных методов для безопасного, надежного охлаждения и термостабилизации. По этой причине ведется активный поиск и апробация способов повышения эффективности кипения.

На сегодняшний день подавляющее большинство методов интенсификации теплообмена и повышения критических тепловых потоков (КТП) при кипении жидкости основаны на модификации теплообменной поверхности. Одним из наиболее перспективных и обсуждаемых подходов является использование поверхностей и покрытий с различными свойствами смачивания. В частности, известно, что использование гидрофобных

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18–79–10119п).

поверхностей (угол смачивания $\theta > 90^\circ$) позволяет существенно снизить температуру начала кипения и в ряде случаев повысить коэффициент теплоотдачи (КТО) в области низких тепловых потоков [2]. Однако существенным недостатком такого подхода является заметное снижение КТП и ранний переход к режиму пленочного кипения. В свою очередь, уменьшение контактного угла смачивания вплоть до супергидрофильного состояния ($\theta < 5^\circ$) приводит к повышению величины КТП при кипении жидкости [3, 4]. По этой причине в последнее время внимание исследователей направлено на использование так называемых бифильных поверхностей, представляющих собой гидрофобные (или супергидрофобные) участки на гидрофильном (или супергидрофильном) основании. Такие поверхности позволяют объединить вышеописанные преимущества гидрофобных и гидрофильных свойств и одновременно добиться повышения КТО и КТП [5, 6]. Тем не менее актуальным остается поиск наиболее технологичных методов создания бифильных поверхностей, а также их оптимальных конфигураций. Цель представленной работы заключается в исследовании теплообмена и развития кризиса кипения воды на бифильной поверхности, созданной на кремниевой подложке с помощью методов химического осаждения (HWCVD) и лазерной абляции.

Для исследования теплообмена и локальных характеристик при кипении использовалась установка, подробное описание которой приводилось в работе [3]. Данная установка позволяет одновременно проводить высокоскоростную термографическую съемку с нижней стороны нагревателя, регистрируя нестационарное поле температур, а также высокоскоростную видеосъемку с его боковой стороны для исследования динамики парообразования. В качестве теплоотдающей поверхности была использована подложка из монокристаллического кремния размером $46 \times 36 \text{ мм}^2$ и толщиной 460 мкм с напыленным с обратной стороны тонкопленочным нагревателем из оксида индия-олова (ИТО) толщиной 1 мкм и площадью $20 \times 20 \text{ мм}^2$.

Бифильная поверхность создавалась с помощью комплекса методов в три этапа. На первом этапе подложка из кремния ($S_q = 0,61 \text{ мкм}$) обрабатывалась методом лазерной абляции [3] для придания супергидрофильных свойств поверхности, а также для повышения адгезии при дальнейшем нанесении гидрофобного материала. На втором этапе на поверхность текстурированного кремния (среднеквадратичное отклонение профиля $S_q = 0,95 \text{ мкм}$) наносилось гидрофобное фторполимерное покрытие методом химического осаждения из газовой фазы (HWCVD) [7]. На заключительном этапе для создания заданной конфигурации бифильной поверхности проводилось удаление фторполимерной пленки с помощью лазерного луча, последовательно проходящего по всей поверхности кроме отмеченных гидрофобных участков. Анализ смачивания показал, что поверхность, покрытая фторполимером, имеет контактный угол 130° (рис. 1а), в то время как модифицированная лазером поверхность обладает супергидрофильными свойствами с характерным углом смачивания $< 5^\circ$ (рис. 1б). Конфигурация созданной бифильной поверхности имела следующие параметры: квадратные гидрофобные пятна со стороной $d = 500 \text{ мкм}$ располагались в узлах треугольной сетки со стороной $l = 4 \text{ мм}$ (рис. 1с). Основным критерием при выборе конфигурации было условие $l > D_{\text{отр}}$ (где $D_{\text{отр}}$ — отрывной диаметр паровых пузырей), поскольку слияние паровых пузырей может приводить к образованию крупных паровых конгломератов и снижению критического теплового потока. В качестве рабочей жидкости в экспериментах использовалась деионизированная вода, очищенная с помощью установки Milli-Q Synergy. Эксперименты выполнялись при атмосферном давлении в условиях насыщения. Высокоскоростная видеосъемка

динамики парообразования проводилась с помощью камеры Phantom VEO410 (частота съемки — 4000 Гц, разрешение — 0,09 мм/пикс.). Запись температурного поля ИТО-нагревателя проводилась с помощью высокоскоростной термографической камеры FLIR T650sc с частотой 1500 Гц и разрешением 0,18 мм/пикс. Следует отметить, что для бифильной поверхности было проведено несколько серий экспериментов при увеличении и понижении тепловой нагрузки. Их сравнение показало, что вид кривых кипения не меняется со временем, что свидетельствует о сохранении свойств использованных поверхностей.

Как показал анализ кадров высокоскоростной визуализации (рис. 2а), для бифильной поверхности, уже начиная с величины теплового потока $q = 21 \text{ кВт/м}^2$, наблюдается непрерывная генерация паровых пузырей на всех гидрофобных участках, что связано с понижением температуры начала кипения при увеличении контактного угла смачивания [2]. В то же время, на немодифицированной поверхности кремния (рис. 2b) режим развитого пузырькового кипения начинается при заметно больших тепловых нагрузках ($q > 90 \text{ кВт/м}^2$). Кроме того, парообразование на бифильной поверхности характеризуется заметным увеличением плотности потока отрывающихся пузырей по сравнению с немодифицированной поверхностью при близких тепловых потоках, что связано со значительным увеличением плотности центров парообразования за счет присутствующих на поверхности искусственных гидрофобных участков с непрерывной генерацией пузырей, повышением частоты отрыва пузырей (на 10–15 %) и снижением их отрывных диаметров (на 30 %). Такое изменение динамики парообразования при кипении на бифильной поверхности безусловно оказывает положительный эффект на интенсивность теплообмена, что и демонстрируют температурные измерения, описание которых представлено ниже.

Сравнение усредненных по времени кадров высокоскоростной термографии показывает, что для бифильной поверхности (рис. 2с) температурное поле более однородно. Это обусловлено равномерным распределением центров нуклеации (темные области — «холодные» пятна на термограммах) по сравнению с базовой (немодифицированной) поверхностью (рис. 2d). При этом конфигурация центров парообразования при указанных

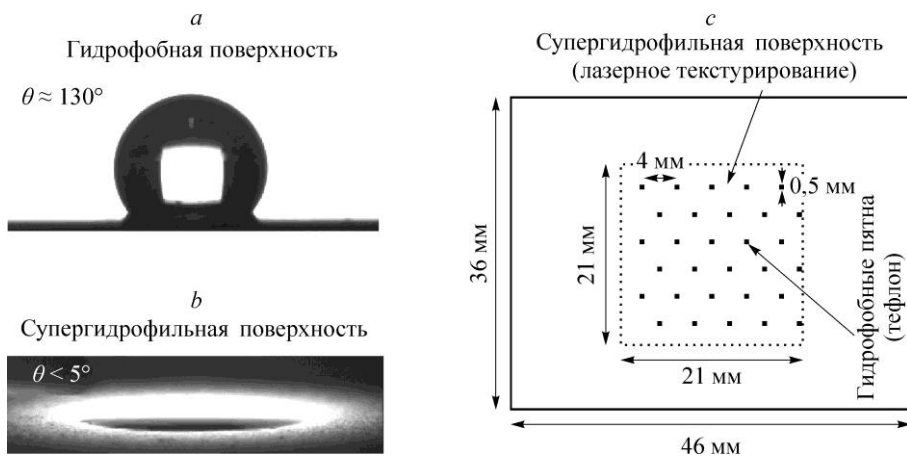


Рис. 1. Углы смачивания на гидрофобном покрытии из тефлона (а), на текстурированной лазером поверхности кремния (b) и конфигурация бифильной поверхности на подложке из кремния (с).

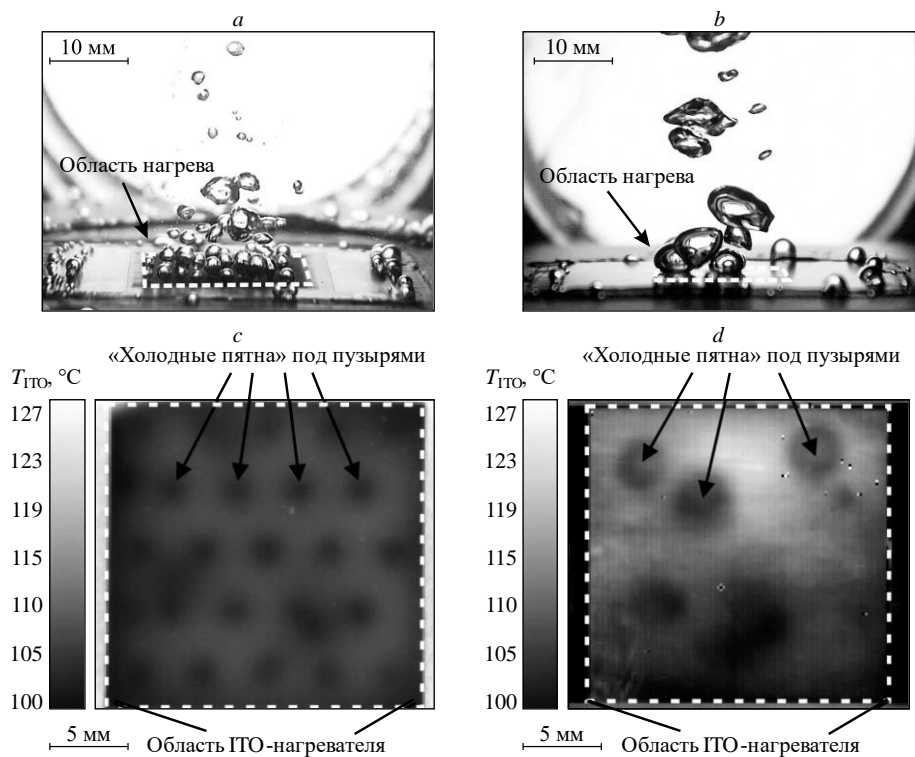
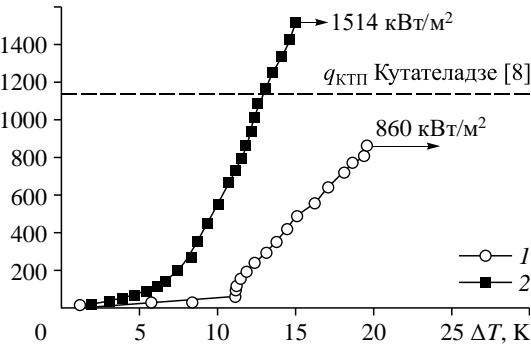


Рис. 2. Кадры кипения воды при $q = 90 \text{ кВт/м}^2$ на бифильной (а) и базовой (б) поверхностях кремния, а также усредненные по времени поля температур нагревателя ($q = 172 \text{ кВт/м}^2$) с бифильной поверхностью теплообмена (с) и немодифицированным кремнием (д).

тепловых потоках полностью соответствует заданной конфигурации гидрофобных пятен на бифильной поверхности (рис. 1с).

На рис. 3 представлены кривые кипения для базовой и бифильной поверхностей. Сравнительный анализ показывает, что для бифильной поверхности наблюдается значительное снижение температуры начала кипения, а также снижение интегральной температуры в среднем на 5–7 К по сравнению с немодифицированным кремнием в режиме развитого пузырькового кипения, что свидетельствует о повышении коэффициента теплоотдачи до 60 %. Полученные кривые также показывают, что при кипении на бифильной поверхности величина КТП (1514 кВт/м^2) на 76 % превышает величину КТП для базовой поверхности (860 кВт/м^2), а также величину КТП для воды, рассчитанную по гидродинамической модели кипения С.С. Кутателадзе [8].



Наблюдаемое значительное повышение КТП связано в первую очередь с эффектом капиллярного всасывания [3, 9] за счет наличия обширных супергидрофильных зон с иерархической пористой

Рис. 3. Кривые кипения воды при атмосферном давлении на немодифицированном кремнии (1) и бифильной поверхности (2).

микронаноструктурой, формирующейся при лазерной абляции, обеспечивающей эффективное замыкание нестационарных сухих пятен.

Таким образом, продемонстрировано, что предложенная конфигурация бифильной поверхности, реализованная с использованием комплекса методов лазерного текстурирования и HWCVD, позволяет одновременно существенно снизить температуру начала кипения, повысить интенсивность теплообмена и величину критического теплового потока по сравнению с немодифицированным кремнием. Более того, предварительные тесты демонстрируют повторяемость кривых кипения в различных сериях опытов, что свидетельствует об устойчивости бифильной поверхности и перспективности использования вышеуказанных методов управления свойствами смачивания для модификации кремния, являющегося основным материалом современной микро-нанозлектроники.

Список литературы

1. **Mudawar I.** Recent advances in high-flux, two-phase thermal management // J. Thermal Sci. and Engng Applications. 2013. Vol. 5, No. 2. P. 021012–021026.
2. **Surtaev A., Koşar A., Serdyukov V., Malakhov I.** Boiling at subatmospheric pressures on hydrophobic surface: Bubble dynamics and heat transfer // Intern. J. Thermal Sci. 2022. Vol. 173. P. 107423–107434.
3. **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 // Applied Thermal Engng. 2023. Vol. 228. P. 120472–120485.
4. **Yao Z., Lu Y. W., Kandlikar S. G.** Effects of nanowire height on pool boiling performance of water on silicon chips // Intern. J. Thermal Sciences. 2011. Vol. 50, No. 11. P. 2084–2090.
5. **Lim D. Y., Bang I. C.** Controlled bubble departure diameter on biphilic surfaces for enhanced pool boiling heat transfer performance // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 150. P. 119360–119367.
6. **Chinnov E., Khmel S., Vladimirov V., Safonov A., Semionov V., Emelyanenko K., Emelyanenko A., Boinovich L.** Boiling Heat Transfer Enhancement on Biphilic Surfaces // Energies. 2022. Vol. 15, No. 19. P. 7296–7314.
7. **Safonov A., Sulyaeva V., Gatapova E., Starinskiy S., Timoshenko N., Kabov O.** Deposition features and wettability behavior of fluoropolymer coatings from hexafluoropropylene oxide activated by NiCr wire // Thin Solid Films. 2018. Vol. 653. P. 165–172.
8. **Кутателадзе С.С.** Гидродинамическая теория изменения режима кипения жидкости при свободной конвекции // Изв. АН СССР. Отд-ние технических наук. 1951. № 4. С. 529–536.
9. **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.

*Статья поступила в редакцию 28 ноября 2023 г.,
после доработки — 10 января 2023 г.,
принята к публикации 21 ноября 2023 г.*