

© А. А. ФЕДОРЕЦ<sup>1</sup>, В. В. ЧЕВЕРДА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тюменский государственный университет

<sup>2</sup>Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН  
fedorets\_alex@mail.ru, slava.cheverda@gmail.com

УДК 532.68

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ  
ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРЫВА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО  
СЛОЯ ВОДЫ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ  
КОНФОКАЛЬНОЙ МИКРОСКОПИИ\***

**THE STUDY OF THERMOCAPILLARY  
DEFORMATION AND RUPTURE  
IN HORIZONTAL WATER LAYER BY CONFOCAL  
LASER SCANNING MICROSCOPY**

Экспериментально исследован эффект термокапиллярной деформации и разрыва тонкого горизонтального слоя воды на сапфировой подложке с линейным резистивным нагревателем из оксида индия (в виде напыленной дорожки толщиной 0.5 мкм, шириной 0.5 и длиной 40 мм). Для высокоточных измерений толщины слоя применялся лазерный сканирующий конфокальный микроскоп. Установлено, что глубина термокапиллярной деформации увеличивается прямо пропорционально мощности нагрева. Выдвинуто предположение, согласно которому разрыв происходит после того, как в утончающемся слое жидкости под термокапиллярным углублением объемная плотность теплового потока достигает порогового значения, определяемого комплексом свойств жидкости и подложки.

*The effect of thermocapillary deformation and rupture of a thin horizontal water layer on the sapphire substrate with lineal resistance heater from indic oxide (in the form of deposited path with thickness of 0.5  $\mu\text{m}$ , width of 0.5 mm and length of 40 mm) is experimentally investigated. For high-precision measurements of the layer thickness, the laser scanning confocal microscope is applied. It is found that the depth of the thermocapillary deformation increases directly proportional to the heat capacity. It is suggested that the rapture occurs when in a thinning liquid layer under thermocapillary deepening space density of heat flow reaches a threshold value determined by a complex of liquid and substrate properties.*

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-38-50445).

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА.* Тонкий слой жидкости, локальный нагрев, микрофлюидика, технологий охлаждения микроэлектронных устройств, конвекция Марангони, термокапиллярный разрыв.

*KEY WORDS.* Thin layer of liquid, local heating, microfluidics, cooling technologies of microelectronic devices, Marangoni convection, thermocapillary rupture.

Эффекты Марангони [9], в частности термокапиллярные течения, играют важную роль во многих природных явлениях и технологических процессах. Традиционно большое внимание уделяется изучению механизмов, которые приводят к динамической деформации межфазной поверхности. К основным объектам таких исследований можно отнести [8] разнообразные системы с распределенными источниками тепла: цилиндрические жидкие мостики, прямоугольные и кольцевые слои с нагреваемой подложкой, боковой стенкой и т. п. Существенно меньше работ, в которых изучается тонкий горизонтальный слой жидкости с локальным источником тепла на дне [1, 5, 6, 7], но именно в такой постановке задача имеет прямое отношение к весьма актуальной для технологий охлаждения микроэлектронных устройств проблеме термокапиллярного разрыва слоя [2, 3, 10].

Для получения достоверных данных о геометрии термокапиллярной (ТК) деформации жидкой поверхности необходимы бесконтактные средства измерения, обеспечивающие пространственное разрешение не хуже нескольких мкм. Этим требованиям хорошо удовлетворяют оптические методы, основанные на явлении интерференции [5, 7], но их использование осложнено для относительно толстых (сотни мкм) слоев жидкости, когда глубина ТК деформации соизмерима с толщиной слоя. В данной работе ТК деформация слоя воды впервые исследовалась методом лазерной сканирующей конфокальной микроскопии.

Схема измерения приведена на рис. 1:

1 — объектив инвертированного лазерного сканирующего конфокального микроскопа Zeiss LSM 510 Meta;

2 — боковые стенки цилиндрической кюветы с внутренней полостью диаметром 40 мм (показано радиальное сечение);

3 — слой воды толщиной  $h_0$ ;

4 — дно кюветы из лейкосапфировой плоскопараллельной пластины толщиной  $h_b = 0.35$  мм;

5 — методом вакуумного напыления на дно нанесен линейный резистивный нагреватель из оксида индия (дорожка длиной  $H_y = 40$  мм, шириной  $H_x = 0.5$  мм и толщиной  $H_z = 0.5$  мкм);

6 — сканирующий лазерный луч микроскопа;

7 — покровное стекло. Нагреватель прозрачен в оптическом диапазоне и позволяет беспрепятственно сканировать межфазную поверхность «жидкость-газ» сквозь дно кюветы;

8 — область сканирования со сторонами  $L_x = 1.25$ ,  $L_y = 1.25$ ,  $L_z = 1.41$  мм охватывала три границы: «газ-сапфир» (G-S), «сапфир-жидкость» (S-L) и «жид-

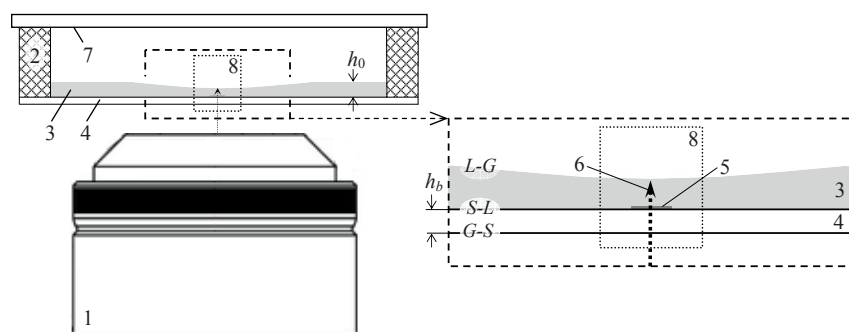


Рис. 1. Схема эксперимента

кость газ» (L-G), причем сторона Lx была ориентирована перпендикулярно оси линейного нагревателя.

Эксперименты проводились с ультрачистой деионизированной водой торговой марки MilliQ. Сканирование осуществлялось на длине волны 477 нм, размер скана — 128×128 пикселей. Время, затрачиваемое на послойное построение одного 3D-изображения, составляло 90 с, поэтому корректное измерение глубины ТК деформации было возможно лишь на стадии установившегося течения. В отдельных экспериментах применялся тепловизор Flir Titanium 570M (рабочий спектральный диапазон 3.7-4.8 мкм, матрица 640×512 пикселей, NETD < 25 мК).

Процедура измерения состояла в следующем. С помощью дозатора Ленпипет Степпер (относительная погрешность  $\pm 0.3\%$  от дозируемого объема) в чашку наливался заданный объем воды и, при выключенном нагревателе, определялась исходная толщина слоя  $h_0$ . Затем включался нагрев и через 100 с (задержка необходима для стационаризации режима течения) запускалось повторное сканирование — определялась толщина  $h_c$  слоя, деформированного термокапиллярным течением. Таким образом, глубина  $\Delta h_c$  термокапиллярной деформации равна разности  $h_0$  и  $h_c$  (рис. 2а).

При фиксированной толщине слоя  $h_0$  проводилась серия измерений, в ходе которой дискретно, с шагом в 10 В, повышалось напряжение питания нагревателя, одновременно измерялась сила тока в цепи, т. е. фактически контролировалась электрическая мощность  $P$  нагревателя. На некотором шаге происходил ТК разрыв слоя, и на этом серия завершалась.

Толщина слоя измерялась с применением стандартного программного обеспечения конфокального микроскопа (программа LSM Image Browser) с поправкой на коэффициент преломления воды. Даже на стадии установившегося течения, когда ТК деформация достигает максимальной глубины, межфазная поверхность «жидкость-газ» выглядит плоской (рис. 2а). Обусловлено это тем, что площадь теплового возмущения на поверхности слоя (рис. 2б) многократно превышала поле зрения микроскопа, и сканировалась наиболее плоская центральная область ТК деформации. Другой важный вывод из данных термографии

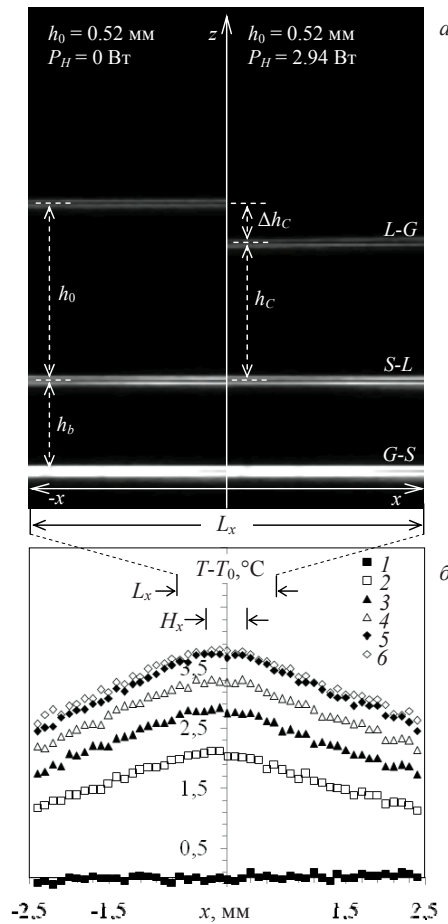


Рис. 2. а — вертикальное сечение в плоскости, перпендикулярной оси линейного нагревателя, полученное на основе 3D-изображения области сканирования. Левая половина — при выключенном нагреве, правая — при включенном; б — распределение температуры на поверхности слоя воды в сечении, перпендикулярном оси линейного нагревателя (здесь  $T_0$  — температура окружающего воздуха). Зависимости 1, 2, 3, 4, 5 и 6 характеризуют тепловое поле через 0, 5, 10, 15, 20 и 25 секунд с момента включения нагрева

состоит в том, что для стабилизации распределения температуры на поверхности слоя требуется порядка 25-30 с, что в несколько раз меньше времени задержки перед началом сканирования ТК деформации, отводимого на стационаризацию режима течения. Благодаря простой геометрии межфазной поверхности при повторных обмерах одного и того же 3D-изображения значения  $h_0$  и  $h_c$  воспроизводились с точностью до пикселя. С учетом шага сканирования по  $z$  это дает погрешность измерения толщины слоя  $\pm 3.5$  мкм.

Плотность теплового потока от нагревателя характеризует параметр  $q = P/S_H$ , где  $S_H = H_x \cdot H_y = 40$  мм<sup>2</sup> — площадь горизонтального сечения нагревателя.

Строго говоря,  $q$  дает лишь оценку сверху, поскольку потери на рассеяние тепла подложкой заведомо не учитываются. Также введем параметры:  $q_V = q/h_C$  — объемная плотность теплового потока в слое жидкости, покрывающем нагреватель и  $q_R$  — критическая плотность теплового потока, при которой происходит термокапиллярный разрыв слоя.

Экспериментальные результаты обобщены на рис. 3. При прочих равных условиях чем тоньше слой, тем больше глубина ТК деформации. В пределах погрешности эксперимента зависимости  $h_C(q)$  можно считать линейными (рис. 3а). Критическая плотность теплового потока возрастает пропорционально толщине слоя, попадая на экстраполированные участки зависимостей  $h_C(q)$ : при  $h_0 = 0.4$  мм,  $7.4 < q_R < 10.5$  Вт/см<sup>2</sup>, при  $h_0 = 0.46$  мм,  $10.5 < q_R < 14.7$  Вт/см<sup>2</sup>, при  $h_0 = 0.52$  мм,  $18.6 < q_R < 23.6$  Вт/см<sup>2</sup>. Полученные значения хорошо согласуются с результатами других исследований, например, по данным [2] ТК разрыв горизонтального слоя воды ( $h_0 = 0.52$  мм), покрывающего квадратный металлический нагреватель со стороной 10 мм, происходит при плотности теплового потока порядка 25 Вт/см<sup>2</sup>. Впрочем, прямое сравнение будет некорректным, т. к. системы существенно отличаются по таким ключевым, с точки зрения процесса ТК разрыва слоя, характеристикам, как коэффициент теплопроводности подложки и площадь нагревателя.

По мере истончения слоя придонное течение жидкости к нагревателю все более затрудняется, одновременно возрастет объемная плотность теплового потока. Положительная обратная связь должна приводить к самоусиливающемуся процессу увеличения глубины ТК деформации и разрыву слоя. Описывая термокапиллярный разрыв, традиционно оперируют таким параметром, как критическая плотность теплового потока  $q_R$  (рис. 3а). Те же экспериментальные данные, но в виде зависимостей  $h_C(q_V)$  (рис. 3б), позволяют предположить, что разрыв происходит, когда в жидкости под термокапиллярным углублением объемная плотность теплового потока достигает некоторого критического значения  $q_{VR}$ , которое не зависит от исходной толщины слоя\*. В частности, все экстраполированные участки зависимостей охватывают интервал  $600 < q_V < 740$  Вт/см<sup>3</sup> и, по нашему мнению, именно на этот интервал приходится  $q_{VR}$  для изученной системы.

Возможности для сужения диапазона неопределенности  $\Delta q_{VR}$  (за счет уменьшения шага, с которым изменяется мощность нагрева) в экспериментах с лазерным конфокальным микроскопом, к сожалению, весьма ограничены в силу длительности процедуры 3D-сканирования. Для детальной проверки предположения потребуются дополнительные исследования с применением методов, позволяющих измерять толщину слоя в режиме реального времени. Отдельный интерес представляет вопрос о том, как критический тепловой поток связан со свойствами жидкости, подложки и геометрией нагревателя.

\* Подразумеваются небольшие (десятые доли мм) вариации  $h_0$  при прочих равных условиях.

Непосредственно перед тем, как происходит разрыв слоя, его характерная толщина в области ТК деформации составляет  $\sim 0.2$  мм (рис. 3), т. е. на каждый квадратный мм площади нагревателя приходится примерно  $0,2 \text{ мм}^3$  жидкости. Чтобы испарить такое количество воды требуется  $\sim 0.5$  Дж энергии (теплота парообразования воды  $\sim 2.4 \text{ Дж/мм}^3$  [4]). При значениях  $q_V \sim 700 \text{ Вт/см}^3$  такая энергия выделяется нагревателем менее чем за секунду, и в случае легколетучих жидкостей испарение должно оказывать существенное влияние как на геометрию ТК деформации, так и на процесс термокапиллярного разрыва слоя.

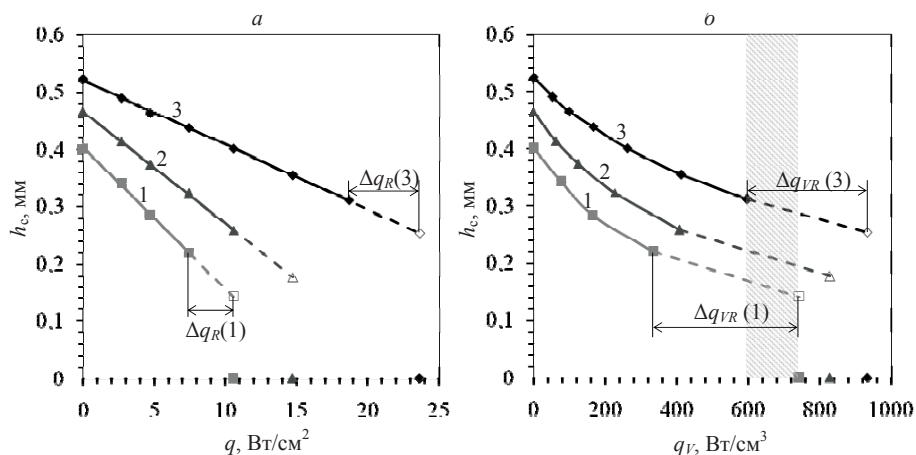


Рис. 3. Зависимости толщины слоя воды в области ТК деформации от плотности (а) и объемной плотности (б) теплового потока. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют значениям  $h_0 = 0.40, 0.46$  и  $0.52$  мм. Контурными маркерами показаны прогнозные значения  $h_c$  при линейной экстраполяции на основании данных рис. 3а

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безуглый Б. А. Лазерный метод измерения толщины тонкого слоя жидкости на твердой поверхности с помощью термокапиллярного отклика / Б. А. Безуглый, А. А. Федорец // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. № 9. С. 20-25.
2. Зайцев Д. В. Влияние смачиваемости подложки на разрыв локально нагреваемой пленки жидкости / Д. В. Зайцев, Д. П. Кириченко, О. А. Кабов // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. № 11. С. 79-85.
3. Люлин Ю. В. Исследование динамики разрыва горизонтального слоя жидкости с точечным нагревом со стороны подложки / Ю. В. Люлин, С. Е. Спесивцев, И. В. Марчук, О. А. Кабов // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. № 21. С. 22-29.
4. Ревкин С. Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара / С. Л. Ревкин, А. А. Александров. М.: Энергия, 1980. 425 с.
5. Федорец А. А. О возможности измерения температуропроводности жидкости по фотеконнограмме / А. А. Федорец, П. Ю. Бакин, Э. Э. Колмаков // Вестник ТюмГУ. 2009. № 6. С. 118-124.

6. Федорец А. А. Метод детектирования пороговой концентрации ароматических углеводородов в триэтиленгликоле / А. А. Федорец, А. А. Иванов, П. Ю. Бакин, Т. С. Даутов // Известия вузов. Нефть и газ. 2012. № 6. С. 81-84.
7. Calatroni J. Interferometric determination of the surface profile of a liquid heated by a laser beam / J. Calatroni, G. Da Costa // Optics Communications. 1982. Vol. 42. Pp. 5-9.
8. Riley R. J. Instability of thermocapillary-buoyancy convection in shallow layers / R. J. Riley, G. P. Neitzel // Journal of Fluid Mechanics. 1998. Part 1. Characterization of steady and oscillatory instabilities. Vol. 359. Pp. 143-164.
9. Scriven L. E. The Marangoni Effects / L. E. Scriven, C. V. Sternling // Nature. 1960. Vol. 187. Pp. 186-188.
10. Wedershoven H. M. J. M. Infrared laser induced rupture of thin liquid films on stationary substrates / H. M. J. M. Wedershoven, C.W. J. Berendsen, J. C. H. Zeegers, A. A. Darhuber // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 104. Pp. 054101-1–054101-4.

#### REFERENCES

1. Bezuglyj B. A., Fedorets A. A. Lazernyj metod izmerenija tolshhiny tonkogo sloja zhidkosti na tverdoj poverhnosti s pomoshh'ju termokapilljarnogo otklika [The Laser Method for Measuring the Thickness of a Thin Layer of Liquid on a Solid Surface Using Thermocapillary Response] // Pis'ma v ZhTF [Technical Physics Letters]. 2001. Vol. 27. No 9. Pp. 20-25. (In Russian)
2. Zajtsev D. V., Kirichenko D. P., Kabov O. A. Vlijanie smachivaemosti podlozhki na razryv lokal'no nagrevaemoj plenki zhidkosti [Influence of Substrate Wettability on the Rapture of Locally Heated Liquid Film] // Pis'ma v ZhTF [Technical Physics Letters]. 2015. Vol. 41. No 11. Pp. 79-85. (In Russian)
3. Ljulin Yu. V., Spesivtsev S. E., Marchuk I. V., Kabov O. A. Issledovanie dinamiki razryva gorizonta'nogo sloja zhidkosti s tochechnym nagrevom so storony podlozhki [The Study of the Rapture in the Horizontal Fluid Layer with Spot Heating from the Substrate Side] // Pis'ma v ZhTF [Technical Physics Letters]. 2015. Vol. 41. No 21. Pp. 22-29. (In Russian)
4. Revkin S. L., Aleksandrov A. A. Teplofizicheskie svojstva vody i vodjanogo para [Thermal Properties of Water and Water Steam]. M.: Energija [Energy], 1980. 425 p. (In Russian)
5. Fedorets A. A., Bakin P. Yu., Kolmakov E. E. O vozmozhnosti izmerenija temperaturoprovodnosti zhidkosti po fotekonogramme [On Possible Use of the Photoconogram for Measuring the Temperature Conductivity of Liquid] // Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta [Tyumen State University Herald]. 2009. No 6. Pp.118-124. (In Russian)
6. Fedorets A. A., Ivanov A. A., Bakin P. Yu., Dautov T. S. Metod detektirovanija porogovoj koncentracii aromaticheskikh uglevodorodov v trijetilenglikole [Method for Detection of Threshold Concentration of Aromatic Hydrocarbons in Triethylene Glycol] // Izvestija vuzov. Neft' i gaz [Higher Educational Institutions News. Oil and Gas]. 2012. No 6. Pp. 81-84. (In Russian)
7. Calatroni J., Da Costa G. Interferometric determination of the surface profile of a liquid heated by a laser beam // Optics Communications. 1982. Vol. 42. Pp. 5-9.

8. Riley R. J. Neitzel G. P. Instability of thermocapillary-buoyancy convection in shallow layers // *Journal of Fluid Mechanics*. 1998. Part 1. Characterization of steady and oscillatory instabilities. Vol. 359. Pp. 143-164.
9. Scriven L. E., Sternling C. V. The Marangoni Effects // *Nature*. 1960. Vol. 187. Pp. 186-188.
10. Wedershoven H. M. J. M., Berendsen C. W. J., Zeegers J. C. H., Darhuber A. A. Infrared laser induced rupture of thin liquid films on stationary substrates // *Appl. Phys. Lett.* 2014. Vol. 104. Pp. 054101-1–054101-4.

#### **Авторы публикации**

**Федорец Александр Анатольевич** — доктор технических наук, профессор кафедры микро- и нанотехнологий Тюменского государственного университета

**Чеверда Вячеслав Владимирович** — инженер-исследователь Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН

#### **Authors of the publication**

**Aleksandr A. Fedorets** — Dr. Sci. (Engin.), Professor at the Department of Micro- and Nanotechnologies, Tyumen State University

**Vyacheslav V. Cheverda** — Research Engineer, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of Russian Academy of Science