

УДК 532.529.2

Исследование динамики разрыва тонких слоев жидкости в условиях точечного нагрева и образования капельного кластера*

Ю.В. Люлин, С.Е. Спесивцев, И.В. Марчук, О.А. Кабов

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет*

E-mail: lyulin@itp.nsc.ru

Экспериментально исследована динамика разрыва горизонтальных слоев различных жидкостей (этанол, вода) толщиной 300 мкм в условиях точечного нагрева со стороны подложки. Определены основные стадии процесса разрыва слоев жидкости и измерено время формирования сухого пятна, составившее 7,85 с для этанола при тепловом потоке 12,6 Вт/см² и 0,13 с — для воды при тепловом потоке 117 Вт/см². Обнаружено, что для обеих рабочих жидкостей перед разрывом слоя жидкости возникает остаточный слой в области точечного нагрева. Показано, что наряду с термокапиллярным эффектом испарение является одним из основных факторов, влияющих на динамику разрыва слоя жидкости и формирование сухого пятна.

Ключевые слова: локальный нагрев, горизонтальный слой, сухие пятна, испарение, термокапиллярный эффект, фазовые переходы.

Исследование теплоотвода от локального источника тепла в настоящее время является одной из сложнейших и наиболее востребованных задач в теплофизике, поскольку прямым образом связано с проблемой охлаждения микроэлектронного оборудования. Известно, что средняя плотность теплового потока, выделяемая на поверхности чипов серийно выпускаемых компьютеров и других электронных устройств, в настоящее время достигает 100 Вт/см² при площади поверхности от 100 мкм² до нескольких сотен квадратных миллиметров. При этом существуют ограниченные области относительно малого размера, где плотность теплового потока может превышать среднее значение на несколько порядков и достигать 1 кВт/см² [1], что зависит от конструктивных особенностей компьютерных чипов, где ядра процессоров являются источниками возникновения «горячих» пятен. К одним из перспективных методов охлаждения электронного оборудования относятся технологии, использующие процессы с фазовым превращением, например, испарение тонкого слоя жидкости, движущегося в плоском микроканале под действием потока газа [2]. В этом случае основным механизмом теплоотвода является интенсивное испарение, что позволяет достигать интенсивного транспорта тепла за счет скрытой теплоты парообразования. Динамика испарения и соответственно теплоотвод от источника

* Работа выполнена при поддержке РФФ (проект 15-19-20049).

теплоты существенным образом зависят от условий в тонком слое жидкости [3]. В частности, разрыв слоя жидкости за счет действия термокапиллярных сил и интенсивного испарения приводит к резкому ухудшению тепловода от локального источника тепла [4]. Таким образом, возникает необходимость в определении условий, при которых происходит разрыв слоя жидкости и образование сухих пятен. Целью настоящей работы является исследование динамики разрыва слоев различных жидкостей (этанол, вода) при нагреве от точечного источника тепла.

Исследования проводились на экспериментальном стенде, детальное описание которого приведено в работе [5]. Жидкость из шприцевого насоса поступает в рабочий участок, где формируется открытый в атмосферу горизонтальный слой жидкости. В центре этого слоя со стороны металлической подложки происходит точечный нагрев. Диаметр нагревательного элемента составляет 1,6 мм. Относительная влажность и температура окружающего воздуха измеряются с помощью термогигрометра Testo 645 с погрешностью 2 % и 0,1 °C соответственно. С помощью высокоточного шприцевого насоса подбирается такой расход жидкости, при котором обеспечивается постоянный уровень жидкости с учетом испарения. Для визуализации поверхностных деформаций и регистрации разрыва использовалась оптическая шпирен-система со скоростной видеокамерой Photron FASTCAM 675K-M3 (скорость 5000 к/с при разрешении 640×640 пикселей и масштабе 25 мкм/пикселей). Поверхность подложки подвергалась абразивной обработке шлифпорошком с размером частиц 50 мкм. Шероховатость поверхности подложки определялась с помощью профилометра «Micro Measure 3D station», среднее ее значение составило $R_a = 327$ нм. Наступающий краевой угол на рабочей поверхности в области нагрева определялся методом сидячей капли (Юнга–Лапласа) [6] при комнатной температуре 25 ± 2 °C и составил $\theta_1 = 6 \pm 1$ ° для этанола и $\theta_2 = 76 \pm 1$ ° для воды.

Исследования проводились при атмосферном давлении, температуре окружающей среды 28 ± 2 °C и относительной влажности воздуха 25 ± 3 %. В качестве рабочих жидкостей использовались этанол (95 % (масс.), ГОСТ Р 51723-2001) и сверхчистая вода. Для очистки воды использовалась система Merck Millipore Direct-Q 3 UV, которая позволяет получать воду типа I (сверхчистая вода). Высота слоя жидкости составляла 300 мкм. Для обеих рабочих жидкостей измерялась плотность критического теплового потока, при которой происходит разрыв слоя жидкости. Значение плотности критического теплового потока для этанола равняется $12,6$ Вт/см² при температуре наконечника нагревателя $37,1$ °C, для воды оно составляет 117 Вт/см² при температуре наконечника нагревателя 133 °C.

Обнаружено, что для обеих рабочих жидкостей разрыв слоя происходит по одному сценарию [5]. Вначале возникает термокапиллярная деформация слоя над областью точечного нагрева (рис. 1а, 1б). Дальнейшее утончение приводит к формированию остаточного слоя жидкости в области точечного нагрева подложки (рис. 1с) [7]. Затем остаточный слой жидкости испаряется до критической толщины, при которой происходит разрыв слоя (рис. 1д). После разрыва вся область нагрева интенсивно осушается и образуется круглое сухое пятно (рис. 1е). Следует отметить, что процесс точечного нагрева слоя воды сопровождается образованием капельного кластера [3, 8] над областью нагрева. Капельным кластером называют гексагональную структуру из микрокапель конденсата с характерным диаметром $20 \div 200$ мкм, левитирующих на расстоянии, сопоставимом с диаметром капель, над свободной поверхностью горизонтального слоя интенсивно испаряющейся жидкости. При этом разрыв слоя происходит на расстоянии порядка 1 мм от центра подложки. Возможной причиной смещения разрыва слоя жидкости к краю области нагрева является капельный кластер, стабилизирующий слой жидкости на площади, которую он закрывает. Как следует из работы [3], на поверхности микрокапель кластера происходит конденсация пара, концентрация пара вблизи межфазной поверхности уменьшается. Испарение под капельным кластером интенсифицируется, о чем свидетельствует снижение температуры на поверхности жидкости под кластером [3]. Можно

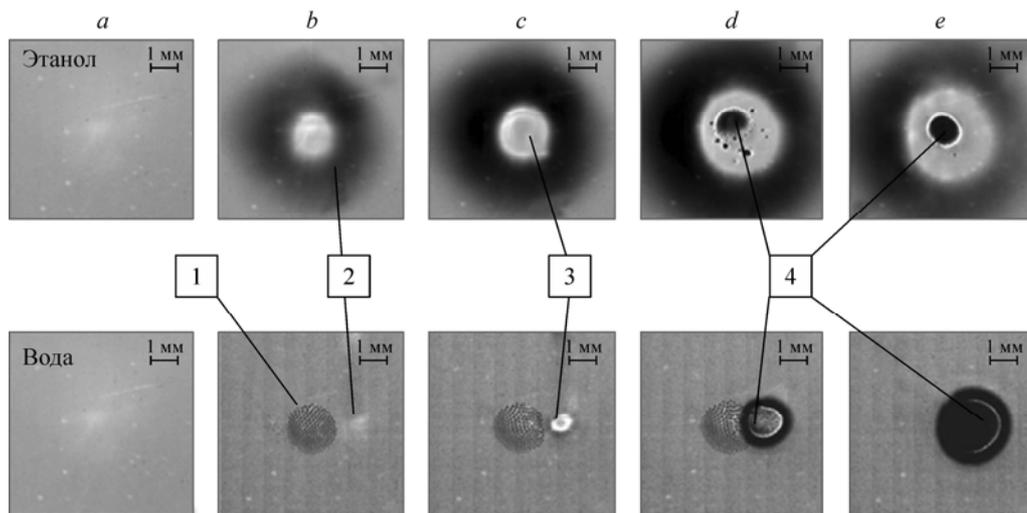


Рис. 1. Динамика разрыва слоя жидкости при точечном нагреве.

Жидкости — этанол и вода, высота слоя — 300 мкм; 1 — капельный кластер, 2 — термокапиллярная деформация, 3 — остаточный слой, 4 — сухие пятна.

предположить, что и градиенты температуры на поверхности жидкости под кластером снижаются. В то же время на границе капельного кластера в области нагрева поверхностный градиент температуры может возрастать, что и приводит к разрыву слоя жидкости на некотором расстоянии от центра нагревательного элемента. При использовании в качестве рабочей жидкости этанола образование остаточного слоя и его разрыв происходят строго над нагревательным элементом в центре подложки.

В представленной работе была измерена средняя скорость образования сухого пятна для двух рабочих жидкостей, которая определялась как отношение характерного радиуса образовавшегося сухого пятна ко времени его формирования в области нагрева. Время формирования сухого пятна считается от момента разрыва остаточного слоя до его полного испарения. Средняя скорость образования сухого пятна составляет 0,06 мм/с для этанола и 5,15 мм/с для воды. Время формирования сухого пятна для рабочей жидкости этанол составляет 7,85 с, для воды — 0,13 с. Разница в скоростях разрыва может быть обусловлена разной удельной теплотой парообразования жидкостей и, соответственно, интенсивностью испарения остаточного слоя, которая также напрямую зависит от плотности теплового потока и температуры подложки. Также на эту разницу оказывает влияние отличие физических свойств рабочих жидкостей — краевых углов смачивания и коэффициентов поверхностного натяжения [9]. Как было отмечено выше, при использовании воды в качестве рабочей жидкости наблюдается существование капельного кластера над областью нагрева с последующим его падением и образованием капиллярных волн (рис. 2) [8]. Капли, образующие кластер, удерживаются над поверхностью слоя за счет интенсивного испарения в области нагрева, и падение отдельных капель начинается после разрыва остаточного слоя (рис. 2c, 2d). Явление капельного кластера детально исследовалось в работах [3, 8].

Авторами проведены эксперименты по измерению критического теплового потока и визуализации динамики разрыва тонких слоев этанола и воды с помощью шпирен-метода. Обнаружено, что для разрыва слоя воды требуется плотность теплового потока, на порядок превышающая критическую плотность теплового потока для слоя этанола той же толщины. При этом времена и характерные скорости разрыва отличаются на два порядка, что напрямую связано с различием в критических тепловых потоках и скоростях

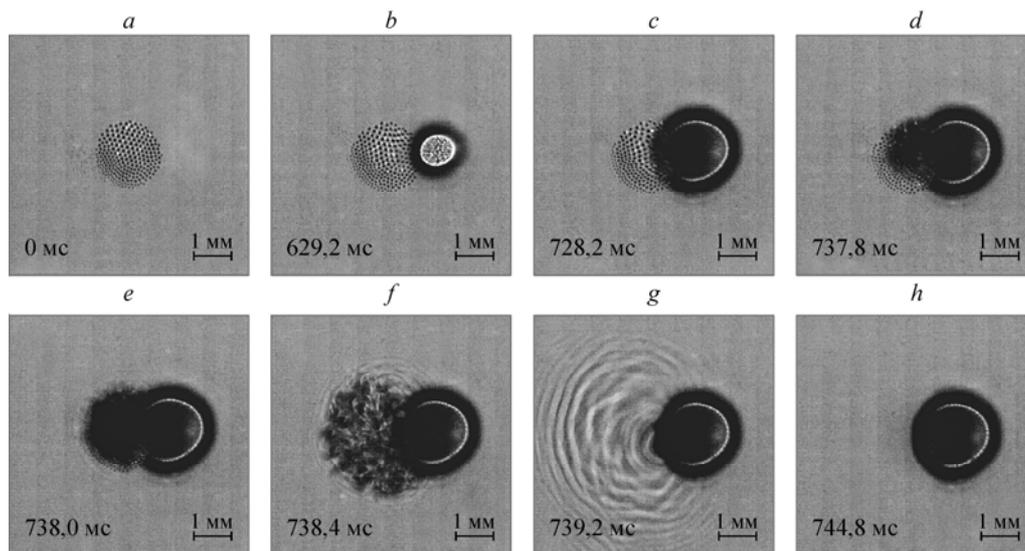


Рис. 2. Визуализация капельного кластера и динамики разрыва (высота слоя — 300 мкм).

испарения, а также с различием в краевых углах смачивания и коэффициентах поверхностного натяжения. В работе экспериментально подтверждено образование остаточного слоя перед разрывом слоя жидкости в области точечного нагрева. При использовании воды в качестве рабочей жидкости наблюдалось формирование капельного кластера над областью точечного нагрева подложки. Наряду с термокапиллярным эффектом испарение является одним из основных факторов, влияющих на разрыв остаточного слоя жидкости и формирование сухого пятна в области точечного нагрева.

Список литературы

1. Mahajan R., Chiu C., Chrysler G. Cooling a microprocessor chip // Proceedings of the IEEE. 2006. Vol. 94, No. 8. P. 1476–1486.
2. Kabov O.A., Zaitsev D.V., Cheverda V.V., Bar-Cohen A. Evaporation and flow dynamics of thin, shear-driven liquid films in microgap channels // Experimental Thermal and Fluid Sci. 2011. Vol. 35, No. 5. P. 825–831.
3. Fedorets A.A., Marchuk I.V., Kabov O.A. Coalescence of a droplet cluster suspended over a locally heated liquid layer // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2013. Vol. 1, No. 1. P. 51–62.
4. Zaitsev D.V., Kabov O.A. An experimental modeling of gravity effect on rupture of a locally heated liquid film // Microgravity Sci. Technol. 2007. Vol. XIX, No. 3/4. P. 174–177.
5. Люлин Ю.В., Спесивцев С.Е., Марчук И.В., Кабов О.А. Исследование динамики разрыва горизонтального слоя жидкости с точечным нагревом со стороны подложки // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, № 21. С. 22–29.
6. Марчук И.В., Чеверда В.В., Стрижак П.А., Кабов О.А. Определение поверхностного натяжения и контактного угла смачивания по форме поверхности осесимметричных пузырей и капель // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 3. С. 311–317.
7. Zaitsev D.V., Rodionov D.A., Kabov O.A. Study of thermocapillary film rupture using a fiber optical thickness probe // Microgravity Sci. Technol. 2007. V. XIX, No. 3/4. P. 100–103.
8. Федорен А.А., Марчук И.В., Стрижак П.А., Кабов О.А. Капиллярные волны при коалесценции микрокапель со слоем жидкости // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 4. С. 535–538.
9. Maltsev L., Kabov O. Criterion for dry spot development in isothermal liquid film on a horizontal substrate // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 84. P. 00024-1–00024-5.

Статья поступила в редакцию 21 марта 2017 г.,
после доработки — 22 мая 2017 г.