

03

Исследование динамики разрыва горизонтального слоя жидкости с точечным нагревом со стороны подложки

© Ю.В. Люлин¹, С.Е. Спесивцев^{1,2}, И.В. Марчук^{1,3}, О.А. Кабов^{1,4}

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

² Новосибирский государственный университет

³ Новосибирский государственный аграрный университет

⁴ Томский политехнический университет

E-mail: lyulin@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 20 мая 2015 г.

Экспериментально исследовался разрыв тонких (0.3–0.7 mm), горизонтальных слоев жидкости (этанол) при локальном нагреве со стороны подложки, диаметр нагревателя 1.6 mm. Изучалось влияние толщины слоя жидкости и интенсивности нагрева на динамику разрыва. Визуализация и контроль слоя жидкости осуществлялись с помощью шпирен- и теневого методов. Определены основные стадии процесса разрыва и измерена средняя скорость формирования сухого пятна, которая составляет 0.2–4 mm/s и увеличивается при увеличении как толщины слоя, так и теплового потока. Показано, что одним из основных факторов, влияющих на динамику разрыва слоя жидкости и формирование сухого пятна в области локального нагрева, помимо термокапиллярного эффекта, является испарение.

Исследование теплоотвода от локального источника тепла становится в настоящее время одной из востребованных и сложнейших задач в теплофизике, поскольку прямым образом связано с проблемой охлаждения микроэлектронного оборудования [1]. Известно, что средняя плотность теплового потока на чипах серийно выпускаемых компьютеров и других электронных устройств в настоящее время достигает 200–300 W/cm². При этом площадь поверхности компьютерных чипов и других микроэлектронных устройств может составлять от 100 μm² до нескольких сотен mm². Несмотря на то что тепловыделение происходит на всей поверхности чипа, существуют ограниченные области относительно малого размера, где плотность теплового потока

может превышать среднее значение плотности теплового потока на несколько порядков [2]. Это происходит благодаря конструктивным особенностям компьютерных чипов, где существуют „горячие“ пятна, температура которых резко возрастает. Именно в этих „горячих“ пятнах имеет место наибольшее тепловыделение и увеличивается вероятность возникновения кризиса теплообмена, который может привести к ухудшению работы чипа вплоть до его разрушения [3]. Размер таких зон на чипах составляет от нескольких сотен μm до примерно 1–2 mm. Существует несколько подходов к решению задач теплоотвода от „точечных“ горячих зон, таких как: спрейное охлаждение, кипение в микроканалах, использование термоэлектрических модулей. Одним из перспективных методов отвода высоких тепловых потоков от электронного оборудования являются технологии, использующие процессы с фазовым превращением, например испарение тонкого слоя жидкости, движущегося в плоском микроканале под действием потока газа [4]. В данном случае основным механизмом теплоотвода от источника тепла является интенсивное испарение за счет скрытой теплоты парообразования. Динамика испарения и соответственно теплоотвод от источника теплоты существенным образом зависит от условий в тонком слое жидкости [5]. В частности, разрыв слоя жидкости за счет действия термокапиллярных сил и интенсивного испарения приводит к резкому ухудшению теплоотвода от локального источника тепла [6,7]. Таким образом, возникает необходимость в определении условий, при которых происходит разрыв слоя жидкости. Целью данной работы является исследование динамики разрыва горизонтального испаряющегося слоя жидкости при нагреве от точечного источника тепла.

Экспериментальные исследования проводятся на экспериментальном стенде, который представлен на рис. 1. Рабочая жидкость с помощью шприцевого насоса 1 подается в рабочий участок 2, где формируется горизонтальный слой жидкости 3 толщиной от 0.1–2 mm. Слой жидкости открыт в атмосферу и удерживается на поверхности рабочего участка за счет острой кромки по периметру подложки 4. В центре горизонтального слоя жидкости со стороны подложки происходит локальный нагрев. Рабочий участок состоит из фторопластового основания 5, металлической подложки 4 и нагревательного элемента 6. Фторопластовое основание имеет специальный вырез в верхней части для установки металлической подложки и сквозное отверстие по центру диаметром 1.5 mm. Металлическая подложка сделана из нержавеющей стали диаметром 50 mm и толщиной 1 mm. По центру подложки

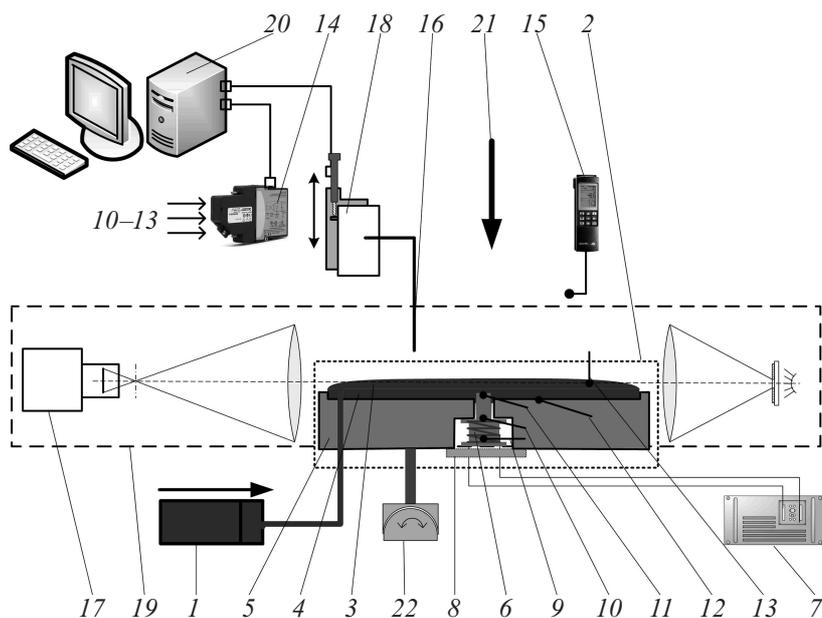


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

имеется глухое отверстие диаметром 1.6 mm и высотой 0.8 mm. Нагревательный элемент представляет собой латунный сердечник с круглым наконечником диаметром 1.6 mm и высотой 3 mm. Наконечник плотно вставляется в глухое отверстие подложки через фторопластовое основание. Для лучшего теплового контакта нагревателя и подложки используется термопаста. Расстояние между наконечником и верхней частью подложки составляет 0.2 mm. Источником теплоты нагревателя является нихромовая лента, намотанная на хвостовик сердечника. Мощность нагревательного элемента контролируется посредством источника питания 7. Сердечник нагревателя помещен в вырез основания с нижней стороны, и между нагревателем и основанием существуют воздушная прослойка в 2 mm. С нижней стороны нагревателя используется теплоизоляционный материал для минимизации теплопотерь 8. Температура измеряется термопарами 9–13 с помощью контрольно-измерительной системы NI 9214 14 и программного обеспечения Signal

Express с погрешность 0.1°C . Расположение термопар представлено на рис. 1. Влажность и температура воздуха измеряются с помощью термогигрометра Testo 645 15 с погрешностью 2% и 0.1°C соответственно.

Плотность теплового потока определяется двумя различными методами. Первый метод заключается в измерении перепада температур в двух различных сечениях по длине наконечника нагревателя. Для этого специально установлены две термопары 10 и 11 вдоль цилиндрической части наконечника, и тепловой поток рассчитывается по формуле

$$Q_1 = (\pi d^2/4)\lambda\Delta T/l,$$

где λ — теплопроводность нагревателя, $\text{W/m}\cdot\text{K}$; l — расстояние между двумя сечениями наконечника нагревателя, m ; d — диаметр наконечника нагревателя, m ; ΔT — перепад температур в двух сечениях по длине наконечника нагревателя, K . Второй способ заключается в определении мощности джоулевого тепла по формуле

$$Q_2 = UI,$$

где U — напряжение, V ; I — сила тока, A . Плотность теплового потока определялась как $q_i = Q_i/S$, где S — площадь сечения наконечника нагревателя, cm^2 . При увеличении теплового потока различие между методами увеличивается до 20%. Данное различие возникает вследствие теплопотерь, величина которых ожидаема для таких экспериментов. Далее основным методом для измерения плотности теплового потока является первый метод, как наиболее точный.

Высота горизонтального слоя жидкости в эксперименте поддерживается постоянной. Щуп 16 диаметром $100\ \mu\text{m}$ выставляется на заданное расстояние от поверхности подложки. С помощью высокоточного шприцевого насоса 1 подбирается такой расход жидкости, при котором обеспечивается постоянный уровень жидкости, учитывающий испарение, не превышающий положение щупа. Если высота слоя жидкости увеличивается, то происходит контакт со щупом, и образуется мениск жидкости. Момент соприкосновения жидкости и щупа мгновенно регистрируется на видеокамере 17. В эксперименте уровень жидкости поддерживался относительно щупа на $3\text{--}5\ \mu\text{m}$ ниже. Положение щупа определяется посредством прецизионной подвижки 18 и теневого метода 19, установленного сбоку рабочего участка. Диапазон передвижения щупа составляет $50\ \text{mm}$ с шагом $1\ \mu\text{m}$. Прецизионная подвижка подключена к персональному компьютеру 20 и управляется с помощью специального программного обеспечения. Наблюдение за поверхностью

горизонтального слоя и шупа осуществляется с помощью видеокамеры 17 теневого метода с разрешением 2592×1944 пикселей и областью обзора 4.3×5.8 mm. Для визуализации деформаций на поверхности жидкости и регистрации динамики разрыва горизонтального слоя использовался шпирен-метод 21 со скоростной камерой Phantom 3798M (скорость 2500 fps при разрешении 256×256 пикселей и областью обзора 7×7 mm). Рабочий участок устанавливался в горизонтальное положение с помощью гониометра 22 в двух плоскостях. Равновесный краевой угол смачивания на рабочей поверхности в области нагрева определялся методом сидящей капли (Юнга-Лапласа) [8] при комнатной температуре $25 \pm 2^\circ\text{C}$ и составлял $\theta = 8 \pm 1^\circ$.

Эксперименты проводились при атмосферном давлении, температуре и относительной влажности воздуха $28 \pm 2^\circ\text{C}$ и $25 \pm 3\%$ соответственно. Высота слоя жидкости изменялась от 300 до 700 μm . В качестве рабочей жидкости использовался этанол (95 mass%), ГОСТ Р 51723-2001). Диапазон температур нагревателя составлял $20\text{--}82^\circ\text{C}$. Плотность теплового потока изменялась от 0 до 120 W/cm^2 . Жидкость подавалась в рабочий участок со скоростью 0–200 $\mu\text{l}/\text{min}$.

В процессе эксперимента при заданном значении высоты слоя плотность теплового потока увеличивалась с малым шагом до критического значения, при котором происходит разрыв слоя жидкости и формирование сухого пятна в области локального нагрева. При образовании сухого пятна температура нагревателя резко возрастает, и наступает кризис теплообмена. В этот момент нагрев прекращается во избежание выхода из строя нагревательного элемента. В эксперименте исследовалось влияние толщины слоя жидкости на критический тепловой поток и динамику разрыва. Показано, что с увеличением толщины слоя жидкости критический тепловой поток увеличивается. Максимальная плотность критического теплового потока достигалась при толщине слоя 700 μm и составляла 120 W/cm^2 , температура нагревателя перед разрывом слоя жидкости 82.1°C .

На рис. 2 представлена визуализация динамики разрыва и образования сухого пятна. Обнаружено, что разрыв слоя жидкости происходит в несколько этапов. Вначале происходит утончение слоя жидкости над областью локального нагрева (рис. 2, *a*) за счет действия термокапиллярных сил [9] и испарения. Дальнейшее утончение приводит к образованию остаточного слоя жидкости в области локального нагрева подложки (рис. 2, *b*). Наличие остаточного слоя жидкости

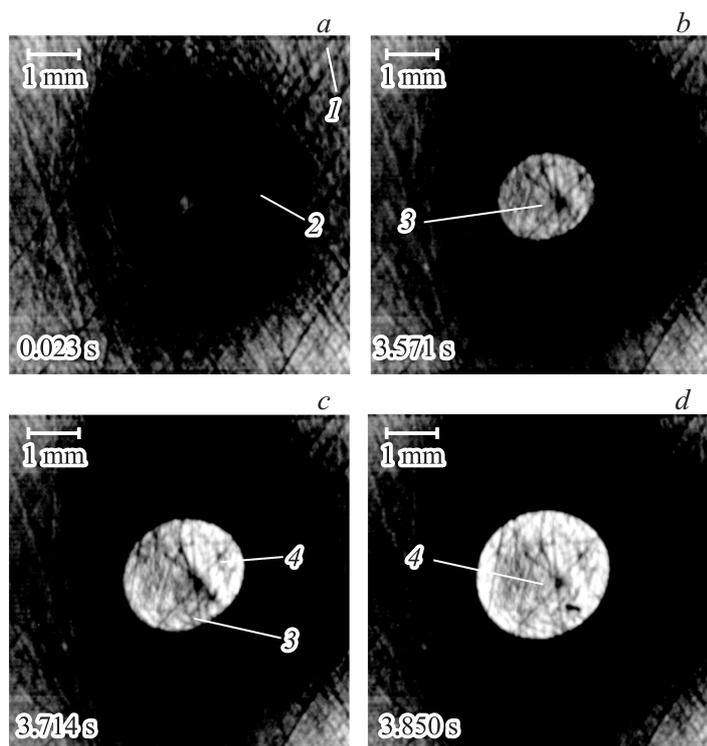


Рис. 2. Визуализация динамики разрыва и образования сухого пятна: 1 — недеформируемый слой жидкости; 2 — термокапиллярное углубление; 3 — остаточный слой; 4 — сухое пятно. Толщина слоя жидкости — $700\ \mu\text{m}$.

хорошо согласуется с данными, приведенными в [7]. Далее остаточный слой жидкости испаряется до критической величины, при которой возникает разрыв слоя жидкости (рис. 2, *c*). После разрыва вся область локального нагрева интенсивно осушается и формируется достаточно симметричное круглое сухое пятно (рис. 2, *d*). Необходимо отметить, что разрыв и соответственно образование сухих пятен возникают в различных местах остаточного слоя. Появляются островки жидкости, которые интенсивно испаряются.

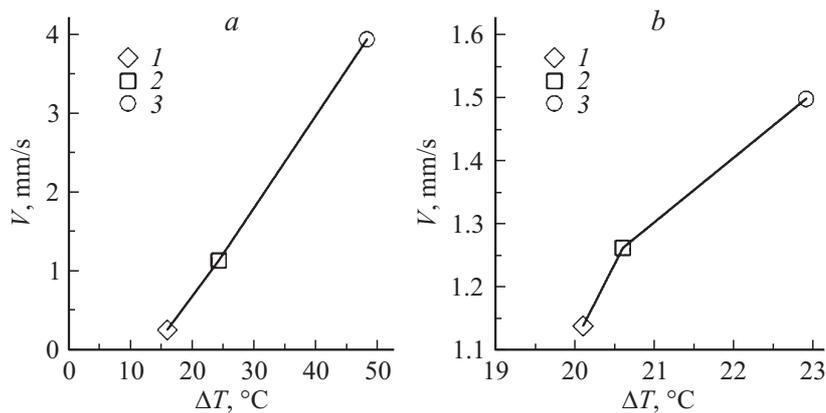


Рис. 3. Зависимость средней скорости формирования сухого пятна от радиального перепада температуры подложки. *a* — различная толщина слоя жидкости, μm : 1 — 300; 2 — 500; 3 — 700; *b* — различная интенсивность локального нагрева при толщине $500 \mu\text{m}$; W/cm^2 : 1 — 27.7, 2 — 29, 3 — 31.6.

На рис. 3 представлены зависимости скорости распространения сухого пятна от разности между температурой подложки в области нагрева и температурой подложки на удалении 15 mm от центра. Значения перепада температур измерены в момент, когда происходил разрыв для различных значений толщины слоя жидкости и различных мощностей нагрева, достаточных для разрыва. Средняя скорость распространения сухого пятна определялась как отношение характерного радиуса образовавшегося сухого пятна к времени, за которое происходит формирование сухого пятна в области нагрева. Время формирования сухого пятна считается от момента разрыва до полного испарения остаточного слоя жидкости. Время формирования сухого пятна для толщины слоя жидкости $300 \mu\text{m}$ составляет 3.0 s , для слоев 500 и $700 \mu\text{m}$ — 0.96 и 0.34 s соответственно. Средняя скорость изменяется от 0.25 до 3.94 mm/s . Обнаружено, что скорость формирования сухого пятна увеличивается с увеличением перепада температуры в радиальном направлении подложки. Для стекающей пленки жидкости по поверхности с локальным источником тепла при увеличении теплового потока и соответственно температуры подложки характерное время разрыва

остаточного слоя жидкости также уменьшается. Это объясняется тем, что в зависимости от изменяемых параметров температура поверхности нагрева увеличивается, и происходит более интенсивное испарение остаточного слоя жидкости. Таким образом, одним из главных факторов, влияющих на разрыв остаточного слоя жидкости и осушение области нагрева, является испарение.

Проведены эксперименты по измерению критического теплового потока и визуализации динамики разрыва в зависимости от толщины слоя жидкости с использованием шлирен-метода. Обнаружено, что при увеличении толщины слоя жидкости плотность теплового потока увеличивается. Показано, что перед разрывом слоя жидкости возникает остаточный слой в области локального нагрева. Скорость формирования сухого пятна увеличивается с ростом интенсивности локального нагрева. Одним из основных факторов, влияющих на разрыв остаточного слоя жидкости и формирование сухого пятна в области локального нагрева, является испарение, поскольку при осушении подложки возникают островки интенсивно испаряющейся жидкости.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (RFMEF16I614X0016).

Список литературы

- [1] *Bar-Cohen A., Wang P.* // J. Heat Transfer. 2012. V. 134. N 5. P. 051017.
- [2] *Mahajan R., Chiu C., Chrysler G.* // Proc. IEEE. 2006. V. 94. N 8. P. 1476.
- [3] *Watwe A., Viswanath R.* // Proc. Inter PACK'03. Maui, HA. July 6–11. Paper Inter Pack. 2003. P. 35044.
- [4] *Bar-Cohen A., Rahim E.* // Heat Transfer Eng. 2009. V. 30. N 8. P. 601–625.
- [5] *Федорец А.А., Марчук И.В., Кабов О.А.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 3. С. 45–50.
- [6] *Зайцев Д.В., Кириченко Д.П., Кабов О.А.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 11. С. 79–85.
- [7] *Zaitsev D.V., Rodionov D.A., Kabov O.A.* // Microgravity Sci. Technol. 2007. V. XIX-3/4. P. 100–103.
- [8] *Русанов А.И., Прохоров В.А.* Межфазная тензиометрия. СПб: Химия, 1994. 398 с.
- [9] *Marchuk I.V.* // J. Eng. Thermophysics. 2009. V. 18. N 3. P. 227–237.