

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ НАГРЕВА ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ФОТОИНДУЦИРОВАННОЙ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИИ

АННОТАЦИЯ

Предложен простой способ измерения температуры подложки с помощью точечного контактного термодатчика в зоне облучения при фотовозбуждении термокапиллярной конвекции. Установлена линейная зависимость температуры от мощности индуцирующего пучка. Зависимость температуры на поверхности подложки от толщины слоя имеет минимум. Такое поведение можно объяснить существованием застойной зоны термокапиллярного вихря. Показана независимость результатов измерения температуры от типа и размера датчика в диапазоне 0...5 К относительно температуры термостата.

1. ВВЕДЕНИЕ

Температура – важная величина, определяющая развитие и существование термокапиллярной (ТК) конвекции. На сегодняшний день в арсенале экспериментатора есть множество методов и приборов для ее измерения и контроля, однако макронаправленность большинства из них затрудняет измерения в капиллярных объектах. Контактные методы вносят тепловые и механические возмущения в исследуемую среду. Например, измерение температуры в тонких ($h < 1$ мм) слоях пропанола с помощью термодатчика медь-константан (диаметр проводника 200 мкм) вносит непоправимые искажения из-за утечки тепла по металлическим проводникам, суммарная толщина которых порядка толщины слоя, а теплопроводность превосходит в $\lambda_{Cu} / \lambda_{Pr} \approx 2600$ раз (коэффициенты теплопроводности меди $\lambda_{Cu} = 401$ Вт/(м·К) и пропанола $\lambda_{Pr} = 0.154$ Вт/(м·К) [1]).

Бесконтактные методы требуют достаточно сложного и дорогого оборудования и к тому же применимы далеко не во всех случаях. Использование тепловизоров и радиационных термометров основано на измерении интенсивности излучения от исследуемого объекта, что требует подбора определенных материалов и веществ для проведения эксперимента: подложка должна излучать как абсолютно черное тело в диапазоне длин волн, который в состоянии принимать датчик, а находящийся на ней слой жидкости должен быть прозрачным в этом диапазоне длин волн [2].

Полуконтактные методы, использующие термочромные жидкие кристаллы или теплочувствительные краски, не дают высокой точности измерений и к тому же инерционны [2].

Лучше всего подходят методы, специально разработанные для микрофлюидики, например PIV с люминесцирующими [3] или с жидкокристаллическими трассерами [4]. Они также требуют специ-

ального оборудования, которое доступно далеко не всем.

В связи с этим измерение температуры в капиллярных объектах является сложной задачей. Ее решение применительно к ТК конвекции в тонких слоях жидкостей позволит глубже понять природу ТК вихря, используемого в качестве основы для многих методов лазерной диагностики жидкостей [5-8], а также для управления каплями и микропотоками в микрофлюидике [9].

В данной работе представлены результаты измерения температуры подложки контактным точечным термодатчиком в зоне облучения при индуцировании лазерным пучком ТК конвекции в тонких слоях прозрачных жидкостей, полученные с помощью нового компенсационного подхода [10]. Его суть состоит во внедрении датчика в подложку, что оставляет жидкий слой механически невозмущенным, а возмущение теплового поля за счет кондуктивного теплоотвода компенсируется легко контролируемым радиационным подводом тепла от возбуждающего лазера. О полной компенсации, а следовательно, и о равенстве температур свидетельствует равенство диаметров ТК откликов в случае подложки без датчика и при его наличии для одинаковой толщины слоя жидкости и температуры окружающей среды.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве датчика для измерений выбрали термодатчик медь-константан, обладающую высоким значением коэффициента Зеебека ($S = 38.75$ мкВ/К при 0 °С) и приемлемой точностью абсолютного измерения температуры ($\pm (0.5...1)$ К) [2].

Схема эксперимента показана на рис.1. В дне кюветы (6), на которой находится слой прозрачной жидкости (8), просверлено сквозное отверстие диаметром около 500 мкм, позволяющее внедрить в него термодатчик (9). Для фиксации термодатчика заливали эпоксидной смолой (11) так, чтобы спай находился на уровне дна кюветы. Сигнал термодатчика регистрировали милливольтметром (10). После установки термодатчика ее прокалибровали в термостате по ртутному термометру с ценой деления 0.5 °С.

В кювете с термодатчиком создавали слой жидкости, толщину которого выставляли по калиброванным проволочкам (7), используя эталон 265 мкм [5]. Микрометрическим тrenaжником (12) контролировали горизонтальность слоя. Для повышения точности эксперимент проводили по двухлучевой схеме [6]: один лазерный пучок мощностью 5...20 мВт

возбуждает конвекцию, другой (пробный) с мощностью менее 1 мВт считывает информацию о ТК углублении.

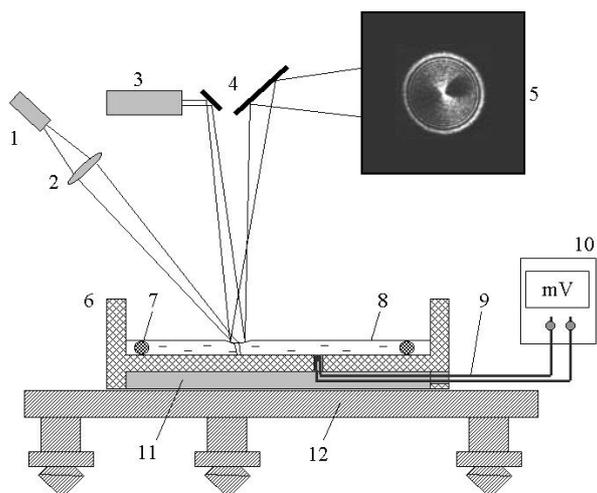


Рис. 1. Схема эксперимента

Мощность пробного пучка выбирают такой, чтобы он не оказывал заметного влияния на конвекцию. Так как ТК отклик от возбуждающего пучка несет в себе информацию только от центральной части ТК углубления, диаметр пробного пучка в плоскости слоя за счет собственной расходимости увеличивают до 3...4 диаметров возбуждающего пучка. В этом случае он перекрывает все ТК углубление, а его отклик отражает всю картину искривления поверхности жидкости. Использование пробного лазера с гауссовым распределением пучка позволяет получить четкий однородный ТК отклик.

В нашем случае возбуждающим лазером (1) служил полупроводниковый лазерный модуль ($\lambda = 660$ нм, $P = 20$ мВт). Его пучок фокусировали системой линз (2) так, что диаметр пятна на подложке составлял около 1 мм. Для считывания использовали He-Ne лазер (3) мощностью $P = 0.3$ мВт с пучком диаметром 8 мм в плоскости слоя, направляя его пучок системой зеркал (4). На экране (5) штангенциркулем измеряли диаметр ТК отклика от пробного лазера и строили его зависимость от мощности излучения индуцирующего лазера как при нагреве подложки на расстоянии 2 см от термопары (конфигурация пучков, показанная на рис.1), так и при проецировании пучков точно на термопару. Оптические пути пробного пучка лазер – слой жидкости и слой жидкости – экран равны соответственно 3.7 м и 3.5 м.

Как и следовало ожидать, в случае проецирования пучков на термопару диаметр ТК отклика был существенно меньше из-за отводимого ею потока тепла (рис.2).

Температуру подложки в отсутствие термопары в зоне нагрева определяли следующим образом. Выбираем некий диаметр отклика D_1 . Ему соответствует мощность лазерного пучка P_1 в отсутствие термопары (1 случай) и P_2 непосредственно на термопаре (2 случай). Разница мощностей $P_2 - P_1$ показывает отток тепла в термопару.

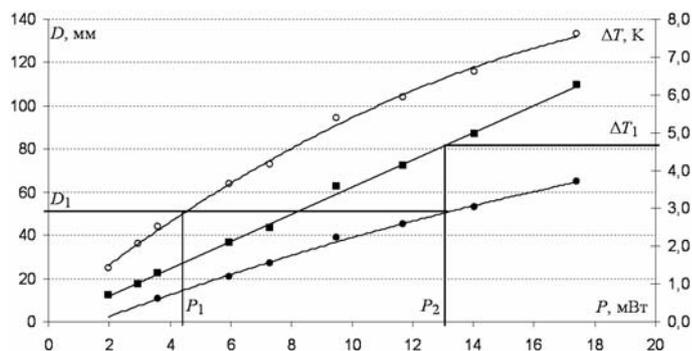


Рис. 2. Зависимости диаметров ТК отклика от мощности вне термопары (○), на термопаре (●), а также изменения температуры от мощности (■) (изопропанол, толщина слоя 665 мкм)

Диаметр ТК отклика является функцией ряда параметров установки и слоя (собственная расходимость и оптический путь пробного лазерного луча от поверхности слоя жидкости до экрана, мощность и диаметр индуцирующего пучка в точке падения на слой, толщина слоя жидкости, коэффициенты поглощения и теплопроводности подложки), свойств жидкости (вязкость, теплопроводность, объемное расширение, поверхностное натяжение) [5, 6]. Температура окружающей среды не меняется, поэтому параметры одной и той же жидкости для рассматриваемых случаев одинаковы. В процессе проведения эксперимента изменяются только три параметра установки: мощность индуцирующего пучка, а также коэффициенты поглощения и теплопроводности, различные для материала подложки и сплава термопары. Поглощение определяет преобразование энергии лазерного пучка в тепло, а теплопроводность - скорость его распространения в подложке, и их изменение можно в определенной мере компенсировать подбором мощности пучка, так как в совокупности они непосредственно влияют только на тепловое поле в подложке. При распространении тепла в жидкость тепловое поле усредняется. В свою очередь, ТК конвекция развивается благодаря градиенту температуры на поверхности жидкости, а не на подложке, что позволяет пренебречь различием тепловых полей на поверхности подложки и термопары.

Кривизна ТК углубления влияет не только на диаметр, но и на внутреннюю структуру ТК отклика, изменения которой в процессе проведения эксперимента не наблюдалось. Поэтому при равенстве диаметров ТК откликов развивающиеся в рассматриваемых случаях ТК вихри, а также температуры подложки и термопары в зоне облучения считались одинаковыми. Изменение температуры подложки относительно температуры окружающей среды, зафиксированное термопарой при ее нагреве излучением лазера мощностью P_2 , равняется ΔT_1 . Таким образом, изменение температуры подложки в отсутствие термопары при мощности P_1 равняется ΔT_1 . Восстанавливая таким путем температуры подложки для различных мощностей лазерного пучка, получаем зависимость изменения температуры на подложке в зоне нагрева от мощности лазерного излучения.

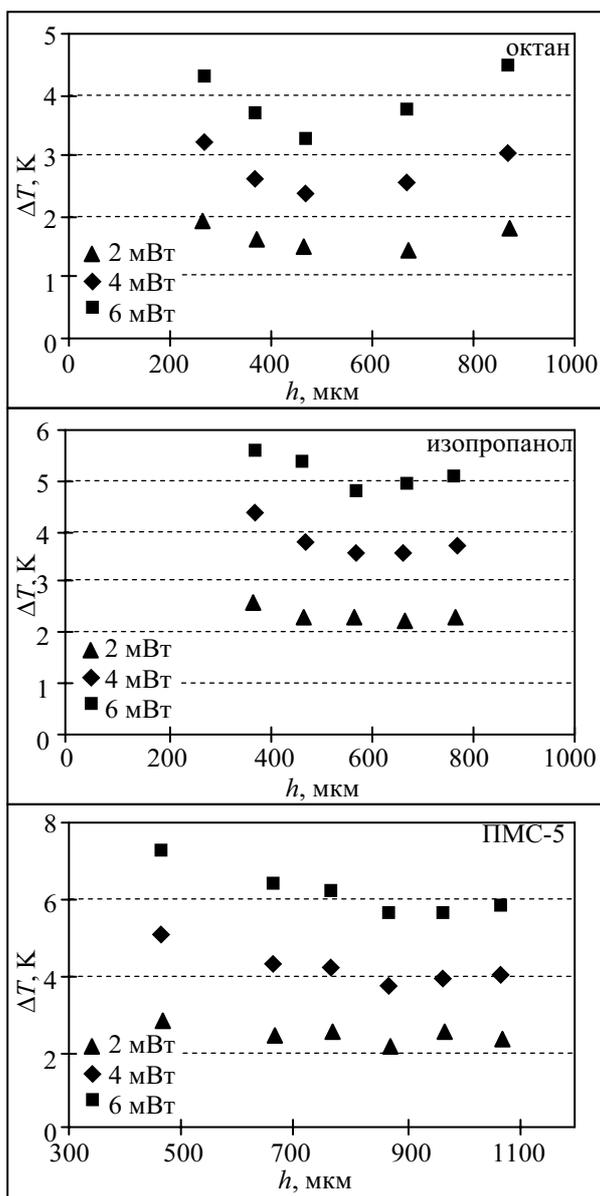


Рис. 3. Зависимости температуры подложки от толщины слоя для жидкостей с различными вязкостями

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены зависимости изменения температуры подложки в отсутствие термопары от мощности лазерного излучения для различных значений мощности индуцирующего пучка и толщины слоя в случае трех жидкостей: октан (0.56 сСт), изопропанол (2.99 сСт) и полидиметилсилоксан ПМС-5 (5.1 сСт). Эксперименты с ПМС-10 (10.2 сСт) и ПМС-20 (20.2 сСт) также дали аналогичные зависимости. Их сложный характер можно объяснить взаимным влиянием двух конкурирующих процессов. При повышении толщины: а) увеличивается объем ТК вихря, а следовательно, и количество энергии на его поддержание, и температура подложки падает; б) растет застойная зона ТК вихря, скорости течения в которой много меньше типичных скоростей ТК вихря, следовательно, в этой области основным является кондуктивный пе-

ренос тепла, заведомо менее эффективный, чем конвективный, и температура подложки растет. Кроме того, деинтенсификация конвекции ведет к уменьшению конвективной составляющей теплообмена. Как видно из рисунка, при увеличении толщины слоя для одинаковой мощности индуцирующего лазера температура подложки в зоне облучения понижается до некоторой минимальной величины, и основной вклад в ее уменьшение вносит увеличение объема ТК вихря, тогда как рост застойной зоны незначителен. По положению минимума температуры можно судить о толщине слоя, при которой теплоотвод от подложки в жидкость наиболее эффективен. При дальнейшем увеличении толщины основное влияние на температуру будет оказывать тепловое сопротивление растущей застойной зоны.

Для выяснения влияния размеров и материала датчика на характер развивающегося ТК вихря провели проверочные эксперименты с разными датчиками. Использовались 1) термопара медь-константан, диаметр спая 0.72 мм, диаметр провода 0.25 мм, коэффициент Зеебека, определенный калибровкой в диапазоне 8...50 °С, равен 37.4 мкВ/К; 2) термопара медь-константан, диаметр спая 0.53 мм, диаметр провода 0.12 мм, коэффициент Зеебека равен 36.8 мкВ/К; 3) NTC – термистор EPCOS B57540G, размеры датчика 0.8×0.8×1.4 мм, сигнальные провода Fe-Ni с медным покрытием, диаметром 0.15 мм, зависимость $T(R) = 80.383 \times \exp(-0.1168R)$, $[T]$, °С, $[R]$, кОм.

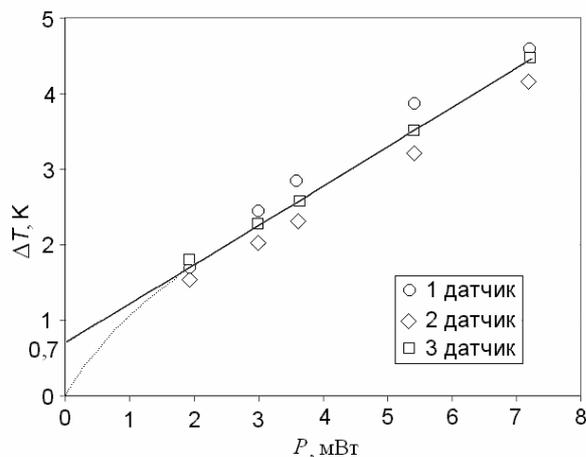


Рис. 4. Сравнение значений температур, снятых разными датчиками: прямая линия – тренд по среднему значению для трех датчиков

Чтобы учесть различия коэффициентов поглощения лазерного излучения используемых датчиков, их чувствительные элементы и участок подложки, предназначенный для измерения, были покрыты слоем черного цапонлака. Контрольные измерения показали, что при нанесении одинакового объема лака образуется слой толщиной (50 ± 5) мкм, практически полностью поглощающий излучение возбуждающего лазера. Так как теплопроводности лака и жидкостей близки (для ПМС $\lambda = 0.14 \dots 0.16$ Вт/(м·К), для основного компонента

цапонлака - акрила $\lambda = 0.15 \dots 0.2$ Вт/(м·К) [1]), а ТК вихрь имеет вблизи подложки застойную зону, слой лака вследствие его малой толщины можно считать частью этой зоны. Поэтому в дальнейшем его тепловым сопротивлением пренебрегали.

Увеличение линейных размеров датчиков ведет к уменьшению значений диаметров откликов за счет увеличения теплового потока в датчик. При этом температура контрольной точки – спая или кристалла – также уменьшается. Сравнение температуры проводилось для трех жидкостей (ПМС-5, ПМС-10 и ПМС-20) и двух толщин (865 и 1165 мкм). Для иллюстрации на рис.4 показаны температуры после пересчета для ПМС-10 с толщиной слоя 865 мкм. Данные для разных датчиков совпадают с учетом погрешности ($\pm 0,5$ К), и коррелируют с данными, полученными ранее. Это означает, что потери тепла в датчике и различия в коэффициентах поглощения компенсируются увеличением мощности индуцирующего лазера. Поэтому в первом приближении, когда не учитывается возмущение датчиком теплового поля в подложке, можно считать, что предложенный подход к измерению температуры подложки в зоне нагрева не зависит от размеров и материала датчика, если размер его чувствительного элемента приблизительно равен диаметру пучка индуцирующего лазера.

При снижении мощности лазерного пучка до нуля изменение температуры должно быть нулевым. Экстраполяцией средних значений по трем датчикам для нулевой мощности получаем изменение температуры 0.7 К (рис. 4). Так как в области малых температур существует переход от кондуктивного переноса тепла к преимущественно конвективному – образование термокапиллярного вихря, это несоответствие можно объяснить увеличением теплоотвода, а следовательно, и уменьшением температуры подложки в зоне нагрева за счет конвективных течений. Следовательно, при малых мощностях должен наблюдаться нелинейный участок зависимости температуры от мощности индуцирующего лазера (рис.4, тонкая линия).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен простой подход, позволяющий оценить изменение температуры подложки с помощью точечного контактного термодатчика в зоне облучения при фотовозбуждении ТК конвекции. Проведены оценки изменения температуры подложки для набора жидкостей с различными вязкостями, ее значения при мощности индуцирующего лазера до 8 мВт для различных жидкостей достигают 7.5 К. Установлено, что зависимость температуры подложки от толщины слоя имеет минимум, наличие которого можно объяснить следующим образом. Падение температуры на поверхности подложки в области малых толщин предположительно связано с

увеличением объема ТК вихря и, следовательно, увеличением расхода энергии на его поддержание. По положению минимума можно судить о толщине слоя с наиболее эффективным теплоотводом от подложки. При дальнейшем росте толщины в придонном слое основным механизмом переноса тепла становится кондуктивный, и вследствие его малой эффективности по сравнению с конвективным механизмом температура подложки растет. Сравнение температур, оцененных с помощью нескольких датчиков разных типов, показало, что в приближении, когда возмущение датчиком теплового поля в подложке не учитывается, а размер его чувствительного элемента приблизительно равен диаметру пучка индуцирующего лазера, предложенный подход к измерению температуры подложки в зоне нагрева не зависит от размеров и материала датчика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Физические** величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
2. **Childs P.R.N., Greenwood J.R., Long C.A.** Review of temperature measurement // Rev. Sci. Instrum. 2000. 71. P. 2959–2978.
3. **Allison S.W., Gillies G.T., Rondinone A.J., Cates M.R.** Nanoscale thermometry via the fluorescence of YAG:Ce phosphor particles: measurements from 7 to 77°C. // Nanotechnology. 2003. 14. P. 859–863.
4. **Aleksic J., Szymczyk J.A., Leder A., Kowalewski T.A.** Experimental Investigations on Thermal, Thermocapillary and Forced Convection in Czochralski Crystal Growth Configuration. //Computational Methods and Experimental Measures. 2001. X. P. 627-636.
5. **Безуглый Б. А.** Капиллярная конвекция, управляемая тепловым действием света, и ее применение в способах регистрации информации: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 1983.
6. **Федорев А.А.** Фотоиндуцированный термокапиллярный эффект и его применение для измерения свойств жидкостей: Дисс. канд. физ.-мат. наук. Тюмень: ТГУ, 2002.
7. **Тарасов О.А.** Бесконтактная диагностика жидкостей и их слоев на основе термокапиллярного эффекта, индуцированного пучком лазера. Дисс. канд. физ.-мат. наук. Тюмень: ТюмГУ, 2004.
8. **Чемоданов С.И.** Эволюция фототермокапиллярного эффекта и разработка методов лазерной диагностики жидкостей на его основе: Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Тюмень: ТюмГУ, 2006.
9. **Безуглый Б.А. Иванова Н.А.** Манипуляция газовым пузырьком в ячейке Хеле-Шоу с помощью пучка света. // ПЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 19. С. 71–74.
10. **Безуглый Б.А. Флягин В.М.** Контактное измерение температуры подложки в зоне облучения при фотоиндуцированной термокапиллярной конвекции в тонком слое прозрачной жидкости // ПЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 15. С. 82–87.