

03;07;12

## **Контактное измерение температуры подложки в зоне облучения при фотоиндуцированной термокапиллярной конвекции в тонком слое прозрачной жидкости**

© Б.А. Безуглый, В.М. Флягин

Тюменский государственный университет

E-mail: bezuglyi@utmn.ru

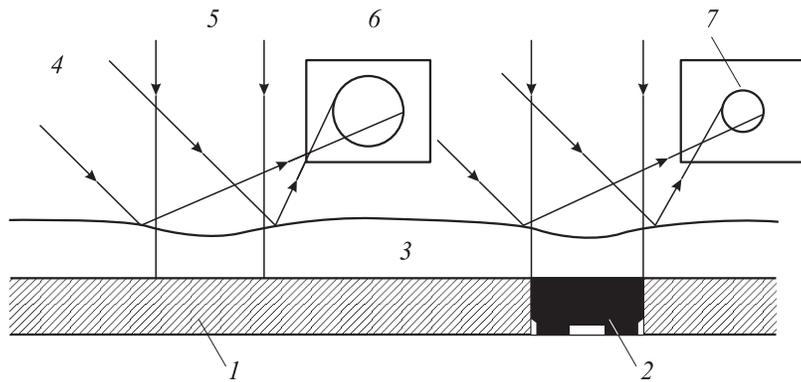
*Поступило в Редакцию 22 февраля 2006 г.*

Предложен новый подход к контактному измерению температуры в тонких слоях прозрачных жидкостей, основанный на явлении фотоиндуцированной термокапиллярной конвекции. Его суть состоит в том, что при возбуждении конвекции в разных точках однородного по толщине слоя равные диаметры термокапиллярных откликов означают одинаковые температуры подложки. За счет этого возможна компенсация тепловых потерь в контактном датчике температуры. На примере трех датчиков показана независимость результатов измерения от типа и размера датчика.

PACS: 07.20.Dt, 47.55.nb

Измерение температуры в зоне фотоиндуцированной термокапиллярной (ТК) конвекции в тонком (толщиной  $< 1$  mm) слое жидкости оказывается довольно сложной задачей. Контактные методы здесь малоприменимы, поскольку вносят возмущения в поля скоростей и температур, в то время как бесконтактные методы радиационной термометрии требуют дорогого оборудования [1]. Имеются также сведения о полуконтактной микромасштабной термометрии, предназначенной для специальных исследований [2,3].

В работе предлагается новый подход к измерению температуры подложки в зоне нагрева при возбуждении ТК-конвекции пучком лазера в слое прозрачной жидкости. Идея этого подхода восходит к работам [4,5], и ее суть состоит в сравнении диаметров ТК-откликов [6] жидкого слоя на обычной подложке и того же слоя на подложке со встроенным



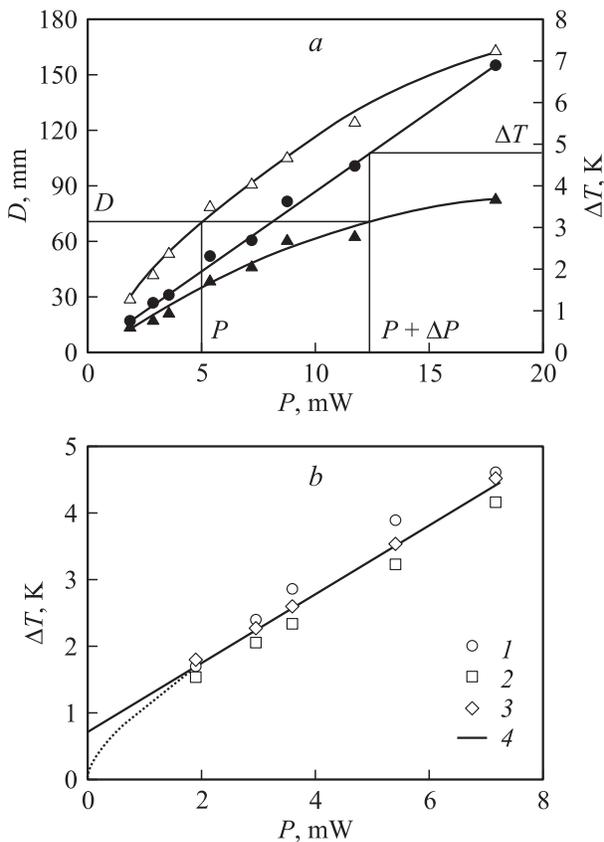
**Рис. 1.** Сравнение диаметров ТК-откликов, полученных на подложке и датчике: 1 — подложка, 2 — датчик, 3 — жидкость, 4 — пробный пучок, 5 — индуцирующий пучок, 6 — экран, 7 — ТК-отклик.

датчиком температуры (термопарой, термистором и пр.). Механически ТК-вихрь остается невозмущенным, и различие между приведенными случаями заключается только в изменении поля температур за счет разницы теплопроводностей материалов подложки и датчика: тепловой поток в металл сигнальных проводов будет понижать температуру, что приведет к уменьшению диаметра ТК-отклика (рис. 1). Компенсировав этот поток дополнительным подводом тепла за счет увеличения мощности индуцирующего пучка, добиваемся первоначального диаметра ТК-отклика. Тогда градиент температуры на поверхности жидкости, а следовательно, и температура датчика будут такими же, как и в случае обычной подложки. Таким образом, равенство диаметров ТК-откликов означает равенство температур подложки и датчика в зоне облучения. Это базовое положение данного подхода. Он позволяет измерять температуру подложки в зоне облучения для систем, в которых возможно существование ТК-конвекции.

Предложенный подход проверили для трех неиспаряющихся жидкостей с различными вязкостями: полидиметилсилоксан-5 (ПМС-5), ПМС-10 и ПМС-20 (5.1, 10.2 и 20.2 сСт соответственно). Источником индуцирующего конвекцию излучения служил полупроводниковый лазерный модуль ( $\lambda = 660 \text{ nm}$ ,  $P = 20 \text{ mW}$ ). Пучок лазера фокусировали так, чтобы диаметр пятна на подложке равнялся 1 мм. ТК-

отклики получали проецируя на экран отраженное от жидкости излучение пробного пучка с диаметром пятна в плоскости слоя 8 mm. Его создавал маломощный He–Ne-лазер ( $P = 0.3 \text{ mW}$ ), который не вносил обнаруживаемых искажений в конвекцию. В дно эбонитовой кюветы вмонтировали заподлицо три датчика: *a* — термопара медь–константан, диаметр спая 0.72 mm, диаметр провода 0.25 mm, коэффициент Зеебека, определенный калибровкой в диапазоне 8... 50°C, равен  $Z = 37.4 \mu\text{V/K}$ ; *b* — термопара медь–константан, диаметр спая 0.53 mm, диаметр провода 0.12 mm,  $Z = 36.8 \mu\text{V/K}$ ; *c* — NTC — термистор EPCOS B57540G, размеры датчика  $0.8 \times 0.8 \times 1.4 \text{ mm}$ , сигнальные провода Fe–Ni с медным покрытием диаметром 0.15 mm, зависимость  $T(R) = 80.383 \exp(-0.1168R)$ ,  $[T] = ^\circ\text{C}$ ,  $[R] = \text{k}\Omega$ . Чтобы исключить взаимное тепловое влияние датчиков, их расположили на расстоянии 25 mm друг от друга. Датчики подбирали так, чтобы диаметры чувствительных элементов (спай или кристалл) были примерно одинаковы и равнялись диаметру индуцирующего пучка. В этом случае нагрев слоя и подложки идет от чувствительного элемента и его температура будет самой высокой в системе. Чтобы устранить различие коэффициентов поглощения лазерного излучения эбонита и материалов датчиков (медь, константан, стекло), на участок подложки, предназначенный для измерения, и на датчики наносили пятно черного цапонлака, толщиной 50  $\mu\text{m}$  и диаметром 3 mm. В этом случае поглощение излучения происходит в слое цапонлака, и температура его поверхности будет отличаться от температуры датчика на некоторую величину  $\delta T$ . Так как значения теплопроводностей жидкостей и цапонлака близки, а у ТК-вихря в зоне нагрева у подложки существует застойная зона, слой цапонлака в силу его малой толщины можно считать частью этой зоны, поэтому величиной  $\delta T$  пренебрегали.

Эксперимент проводили по следующей схеме. В кювете создавали слой жидкости, толщину и горизонтальность которого контролировали методом калиброванных проволочек [4]. Снимали зависимость диаметра ТК-отклика от мощности индуцирующего пучка  $D(P)$ , проецируя пучки на покрытую цапонлаком подложку вдали от датчиков. Затем последовательно снимали те же зависимости, проецируя пучки на первый, второй и третий датчики, а также зависимости температуры датчиков от мощности индуцирующего пучка  $\Delta T(P)$  (здесь и далее  $\Delta T$  — разность между текущей температурой датчика и температурой окружающей среды).



**Рис. 2.** *a* — температура датчика (●) и диаметры ТК-откликов, полученные на датчике (▲) и на подложке (△). *b* — температуры подложки, восстановленные для разных датчиков (1, 2, 3), и среднее значение (4).

На рис. 2, *a* показана процедура восстановления температуры невозмущенной подложки для слоя ПМС-10 толщиной  $865\ \mu\text{m}$  с использованием первого датчика. Мощности  $P$  соответствует диаметр ТК-отклика  $D$ , полученный на подложке. На датчике такой же диаметр получаем при мощности  $P + \Delta P$ , где  $\Delta P$  — прибавка, компенсирующая тепловой поток в датчик. При этой мощности температура  $\Delta T$  датчика

известна. Тогда, согласно приведенному подходу, температура подложки при мощности индуцирующего лазера  $P$  также равна  $\Delta T$ . Восстанавливая таким образом температуру подложки для различных мощностей, получаем ее зависимость от мощности лазерного пучка.

На рис. 2, *b* показаны зависимости температуры от мощности для слоя ПМС-10 толщиной  $865 \mu\text{m}$ . Данные разных датчиков различаются не более  $\pm 0.5 \text{ K}$ . Это означает, что при таком подходе можно измерять температуру подложки в зоне облучения при фотоиндуцированной ТК-конвекции любыми точечными контактными датчиками температуры. Постоянное отклонение значений термопар от среднего, которое можно принять за систематическую ошибку, не проявляется для аналогичных зависимостей с другими толщинами слоя или вязкостями и связано с погрешностью измерения диаметров ТК-откликов и температур датчиков. Значения среднеквадратичных отклонений для первого, второго и третьего датчиков равны 0.26, 0.28 и 0.06 К соответственно, т. е. более точные результаты дал НТС-термистор.

При экстраполяции линейной зависимости  $T(P)$  (рис. 2, *b*) до пересечения с осью ординат при нулевой мощности получаем  $T = 0.7 \text{ K}$ . Одно из возможных объяснений этого поведения может быть таким: при малых мощностях, недостаточных для возбуждения конвекции, теплота распространяется в слой жидкости только кондуктивно, а при увеличении мощности, с возникновением ТК-конвекции, добавляется конвективный механизм теплопереноса, что снижает температуру подложки. Кроме того, часть накопленного жидкостью тепла преобразуется в кинетическую энергию ТК-вихря. Поэтому при стремлении мощности лазерного пучка к нулю должен наблюдаться нелинейный участок (рис. 2, *b*, пунктирная линия).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства образования и науки РФ по программе „Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 гг.)“.

## Список литературы

- [1] Childs P.R.N., Greenwood J.R., Long C.A. // Rev. Sci. Instrum. 2000. V. 71. P. 2959–2978.
- [2] Allison S.W., Gillies G.T., Rondinone A.J. et al. // Nanotechnology. 2003. V. 14. P. 859–863.

- [3] *Aleksic J., Szymczyk J.A., Leder A. et al. // Computational Methods and Experimental Measures. 2001. N X. P. 627–636.*
- [4] *Безуглый Б.А. Капиллярная конвекция, управляемая тепловым действием света, и ее применение в способах регистрации информации. Дис. канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 1983.*
- [5] *Безуглый Б.А. // ЖТФ. 1983. Т. 53. В. 5. С. 927–929.*
- [6] *Тарасов О.А. // Оптика и спектроскопия. 2005. Т. 99. № 6. С. 1006–1013.*