

Автор выражает благодарность Э. А. Аринштейну за полезные обсуждения рассматриваемой проблемы.

Работа выполнена при поддержке Минобразования РФ, грант УР 01.01.002.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бэкстер Р. Точно решаемые модели в статистической механике. М., 1985. 486 с.
2. Шулепов Ю. В., Аксененко Б. В. Решеточный газ. Киев, 1981. 268 с.
3. Yang C. N., Lee T. D. Statistical theory of equations of state and phase transitions. 1. Theory of condensation // Phys. Rev. 1952. Vol. 87. P. 404-409.
4. Назин Г. И., Пилипенко В. А. Изучение фазовых переходов методом производящего функционала. Тюмень, 1987. 22 с. Деп. в ВИНТИ № 4882-В87.

**Борис Антонович БЕЗУГЛЫЙ** —  
доцент кафедры радиофизики  
физического факультета,  
кандидат физико-математических наук;  
**Александр Анатольевич ФЕДОРЦ** —  
ассистент кафедры радиофизики  
физического факультета,  
кандидат физико-математических наук

УДК 532.22

## **ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА**

*АННОТАЦИЯ. В жидком слое на твердой подложке лазерным пучком индуцируется термокапиллярное углубление. Исследована интерференционная картина в виде концентрических колец, которая наблюдается на экране, помещенном в поперечное сечение отраженного от углубления лазерного пучка. Установлено, что эволюция диаметра отклика с начала облучения слоя лазерным импульсом или непрерывным пучком зависит от энергии импульса или мощности пучка. На основе этой зависимости предложен метод измерения и контроля энергетических параметров лазерного пучка.*

*In a liquid layer on a solid substrate the thermocapillary depression is induced by a laser beam. The interference fringe in the form of concentric rings on a screen placed in the cross section of reflected laser beam is studied. It was found, that the evolution of the diameter of this interference picture from the moment of irradiation by a laser pulse or continuous beam depends on the energy of pulse or power of beam. By using this dependence the method of measuring or control of energetic parameters of the laser beam is proposed.*

**Введение.** Устойчивый интерес к термокапиллярным эффектам, индуцируемым излучением лазера, вызван их доминирующей ролью в ряде жидкостных технологий, связанных с обработкой материалов [1-3]. В большинстве работ решались теплофизические и гидродинамические задачи определения поля температур, скоростей [4-6] и профиля термокапиллярной деформации свободной поверхности жидкости [7, 8].

Менее изучен термокапиллярный отклик [7-10] — интерференционная картина в виде концентрических колец, которая наблюдается на экране, расположенном в по-

перечном сечении лазерного пучка, отраженного от термокапиллярного углубления. Его можно наблюдать, используя как сам индуцирующий углубление пучок, так и слабый, не влияющий на углубление, пробный пучок. Размер, форма и распределение интенсивности отклика зависят более чем от десятка параметров системы «жидкий слой / подложка» и лазерного пучка. Идея применения свойств отклика для создания ряда новых методов лазерной диагностики жидкостей и их слоев, выдвинутая и экспериментально обоснованная в [7], получила развитие в [11-14].

В работе [7] установлено что, для слоев сильно поглощающей излучение жидкости (о-ксилол, окрашенный антрахиноновым ярко-синим жировым) толщиной  $h = 190 \dots 500$  мкм диаметр  $D_s$  стационарного отклика<sup>1</sup> линейно возрастает с увеличением мощности пучка (He-Ne лазер,  $\lambda = 633$  нм,  $P = 1.6 \dots 8$  мВт), а наклон зависимости уменьшается по мере утолщения слоя.

В настоящей работе исследована зависимость  $D_s$  в случае поглощаемого жидкостью инфракрасного пучка (CO<sub>2</sub> лазер,  $\lambda = 10.6$ ) мощностью до 450 мВт, а также эволюция диаметра отклика с начала облучения слоя непрерывным пучком или одиноким импульсом He-Ne лазера в системе «прозрачный слой / поглощающая подложка», которая обеспечивает широкую спектральную чувствительность.

Схема эксперимента. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1а.

Здесь: 1 — индуцирующий конвекцию пучок, 2 — ослабитель, 3 — электромеханический затвор, 4 — поворотное зеркало, 5 — кювета, 6 — слой жидкости на подложке, закрепленной на плавающей платформе — 7, 8 — датчик измерителя мощности ИМО-2. В экспериментах с ИК пучком и для исследования эволюционных зависимостей дополнительно использовали пробный лазерный пучок — 9, который направляли на слой зеркалом — 10. Отраженный от свободной поверхности слоя пучок — 11 (пучок отклика) проецировали на экран — 12. На рисунке 1б показаны используемые в дальнейшем величины:  $L$  — расстояние от слоя до экрана, на котором наблюдают отклик;  $d_1$  — диаметр индуцирующего углубление пучка;  $\gamma$  — угол собственной расходимости лазерного пучка;  $\beta$  — угол расходимость пучка отклика;  $r$  — радиус линии перегиба углубления. На этой линии изменяется направление кривизны углубления, и угол между касательной к поверхности углубления и горизонталью достигает максимального значения. Попадающие на линию перегиба лучи определяют расходимость пучка отклика и, следовательно, его диаметр.

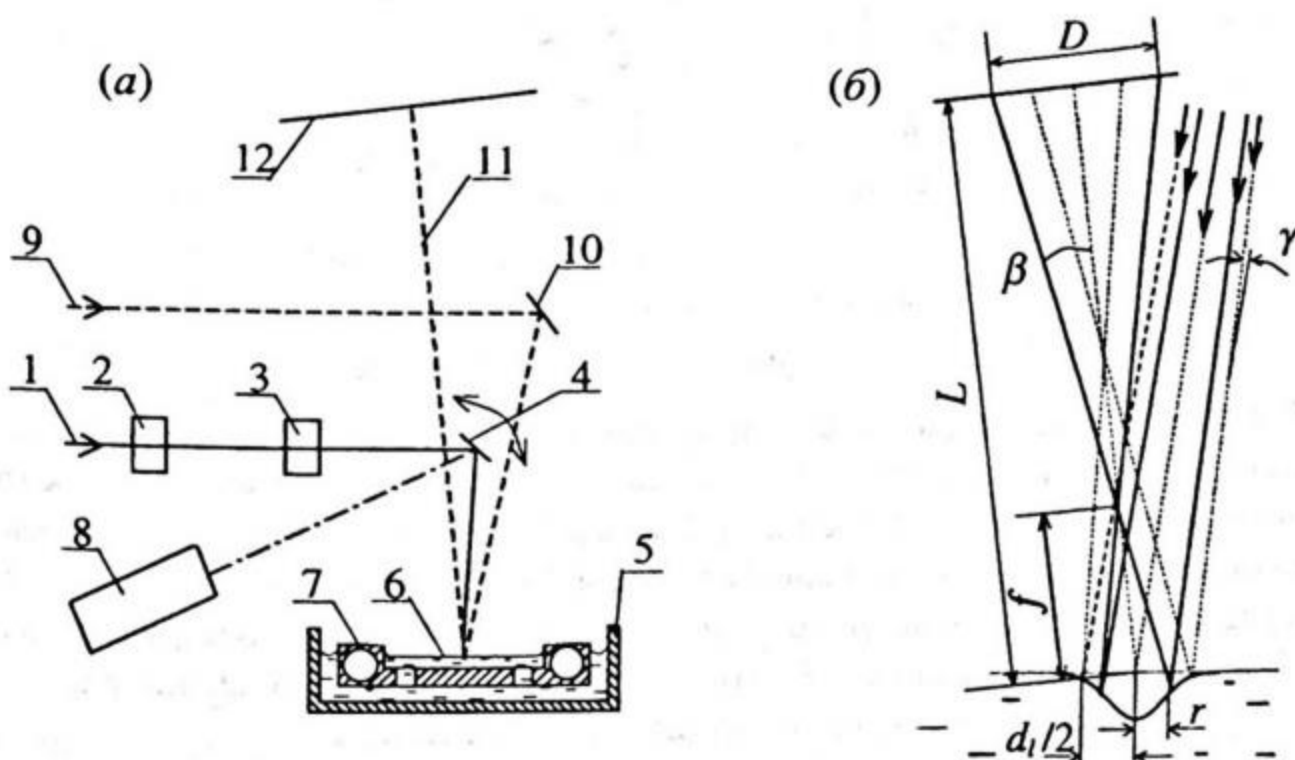


Рис. 1. Схема установки (а). Геометрия углубления и пучков (б)

<sup>1</sup> При плоскопараллельном слое жидкости отклик имеет форму круга.

Суть методики эксперимента состояла в измерении стационарного диаметра, или эволюции диаметра отклика, при контролируемой мощности индуцирующего пучка. В случае стационарного отклика диаметр измеряли штангенциркулем. При этом, погрешность, связанная в основном с некоторой размытостью границы отклика, составляла  $\pm 0.5$  мм.

В экспериментах по эволюционным зависимостям видеозаписи отклика, полученные с помощью видеокамеры Panasonic RX 10, вводили в компьютер, затем кадрилировали с частотой 15 кадров в секунду и обрабатывали в графическом редакторе Adobe Photoshop 5.5. В этом случае погрешность удавалось снизить примерно до  $\pm 0.1$  мм. Мощность во всех экспериментах контролировали с точностью определяемой техническими характеристиками ИМО-2.

**Зависимость стационарного отклика от мощности непрерывного лазерного пучка.** Зависимости  $D_s$  от мощности пучка приведены на рис. 2. Здесь, зависимости 1 и 2 получены для следующих условий: индуцирующий пучок He-Ne лазера ЛГН-111,  $\lambda = 0.63$  мкм, пучок отклика от индуцирующего лазера, слой прозрачной жидкости (октан) на поглощающей подложке. Зависимость 3 получена для индуцирующего пучка CO<sub>2</sub> лазера,  $\lambda = 10.6$  мкм, 90 % излучения которого поглощалось в приповерхностном слое жидкости (вазелиновое масло) толщиной 430 мкм при общей толщине слоя  $h = 3.8$  мм. Для наблюдения отклика использовали пробный пучок юстировочного He-Ne лазера,  $P = 0.4$  мВт,  $\lambda = 0.63$  мкм.

Минимальное значение  $D_s$  (рис.2) определяется размером отклика, удобным для измерений, а максимальное значение ограничено разрывом жидкого слоя (зависимость 1) или мощностью используемых лазеров (зависимости 2 и 3).

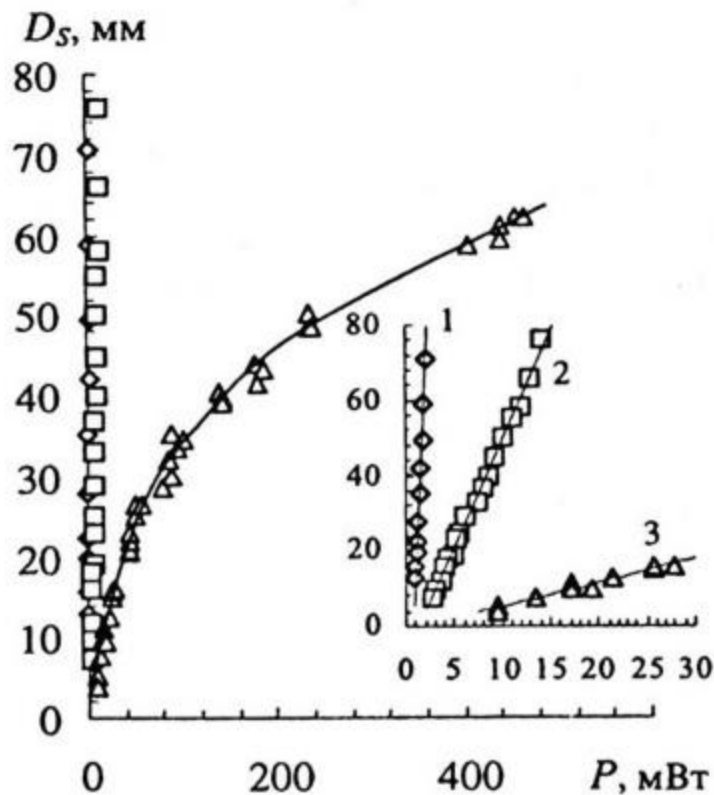


Рис. 2. Зависимость диаметра стационарного отклика от мощности индуцирующего пучка. Часть графика при малых значениях мощности показана с увеличенным (путем 10-кратного растяжения по оси абсцисс и 2-го сжатия по оси ординат) разрешением. Эбонитовая подложка,  $L = 70$  см. Зависимости 1 и 2 — слои октана толщиной  $h = 200$  и  $500$  мкм соответственно; индуцирующий He-Ne лазер, отклик от индуцирующего пучка; 3 — вазелиновое масло  $h = 3.8$  мм, индуцирующий пучок CO<sub>2</sub> лазера, отклик от пробного пучка He-Ne лазера

Анализируя [7] и рис.2, отметим следующие важные, с точки зрения разработки нового метода измерения мощности, особенности зависимостей  $D_s$  от  $P$ : а) для любой системы «жидкий слой / подложка» существует некоторый диапазон мощностей, в котором проявляется сильная зависимость  $D_s$  от  $P$ ; в измерениях эту зависимость можно использовать как калибровочную; б) диапазон измерений можно изменять,

варьируя такие свойства системы, как толщина слоя и вязкость жидкости. Утолщение слоя, так же как и повышение вязкости, расширяет диапазон измерений и смещает его в область более высоких мощностей, при этом чувствительность<sup>1</sup> отклика несколько снижается. Например (рис.2), для слоя октана ( $\mu = 0.55 \cdot 10^{-3}$  Па·с при 20°C) толщиной 200 мкм диапазон измерений составляет (1...2.2) мВт, чувствительность 1270 % от  $D_{s0}$  на 1 мВт, для слоя же октана толщиной 300 мкм диапазон измерений уже составляет (2.6...14) мВт, чувствительность 143 % от  $D_{s0}$  на 1 мВт. Для толстого слоя,  $h = 3.8$  мм, относительно вязкого ( $\mu \approx 30 \cdot 10^{-3}$  Па·с при 20 °C) вазелинового масла диапазон измерений достигает уже (9...450) мВт, но линейный характер зависимости сохраняется лишь при малой мощности пучка. Чувствительность снижается с ростом мощности с 15 % от  $D_{s0}$  на 1 мВт до примерно 1.2 % от  $D_{s0}$  на 100 мВт.

Для выяснения влияния на  $D_s$  диаметра лазерного пучка,  $d_l$  варьировали, меняя расстояние от источника излучения до слоя. Наблюдаемое уменьшение  $D_s$  по мере расширения пучка (рис. 3), связано с градиентной природой термокапиллярного механизма конвекции [2]. Благодаря этому, отклик нечувствителен к обычной (с малыми градиентами интенсивности) фоновой засветке.

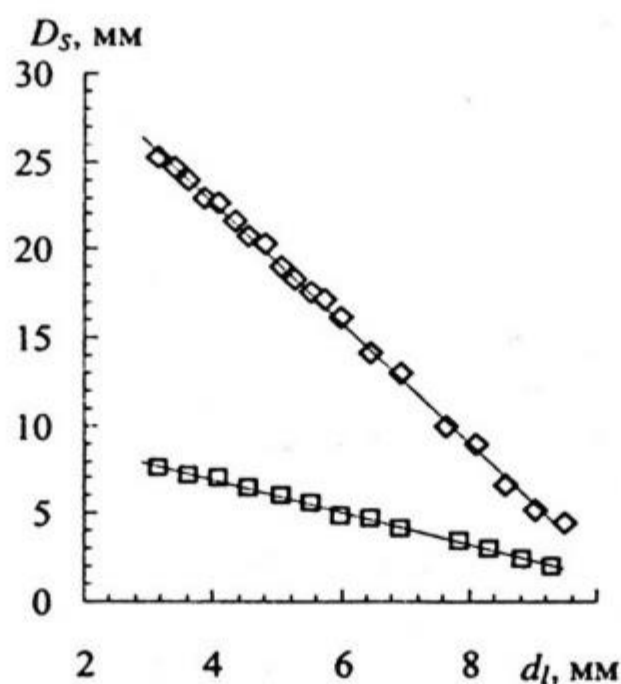


Рис. 3. Зависимость диаметра стационарного отклика от диаметра индуцирующего пучка на слое октана:  $L = 70$  см,  $P = 2.6$  мВт, ромбические и квадратные маркеры —  $h = 450$  и 500 мкм соответственно

Из рис.3 также следует, что использовать отклик от индуцирующего (он же измеряемый) пучка можно лишь при условии идентичности таких параметров измеряемого и калибровочного пучков, как расходимость и диаметр на слое. Это ограничение снимается фокусировкой измеряемого пучка на слой в пятно заданного диаметра и использованием пробного лазерного пучка.

Зависимость эволюции отклика от мощности непрерывного лазерного пучка или энергии одиночного импульса. Логично предположить, что мощность пучка должна отражаться на эволюции отклика с начала облучения слоя. Для исследования этого вопроса, в установку (рис.1) были внесены следующие дополнения: индуцирующий пучок фокусировали линзой в плоскости слоя в пятно диаметром 2 мм, для регистрации отклика использовали видеокамеру, а на экран были помещены табло электронного секундомера и масштабная шкала. Кроме этого, с помощью зеркал пучок отклика (от пробного пучка с диаметром в плоскости слоя  $\sim 15$  мм) разделяли

<sup>1</sup> Чувствительность отклика определим как  $(\Delta D_s / \Delta P) \cdot D_{s0}^{-1} \cdot 100\%$ , где  $D_{s0}$  — минимальный, используемый для измерений, диаметр (в нашем случае  $D_{s0} = 4$  мм). Отсюда единица измерения чувствительности: % от  $D_{s0}$  на единицу мощности.

на две половинки, которые попадали на экран пройдя разный оптический путь ( $L=165$  и  $278$  см). Это позволяло определять расходимость пучка отклика.

На рис.4а показаны зависимости диаметра отклика (в сечении  $L = 278$  см) от времени с начала облучения слоя. Зависимости 1, 2, 3, 4, 5 и 6 отвечают мощности пучка 10.7, 8.5, 5.3, 4.2, 3.3 и 2.6 мВт соответственно. Их участки вблизи  $t = 0$  не показаны, как малоинформативные<sup>1</sup>. Горизонтальные штрихи в правой части рис.4а показывают диаметры откликов после стационаризации ( $t > 60$  с). На рис. 4б приведены соответствующие рис.4а зависимости вида  $r(t)$ , вычисленные по диаметрам отклика уже в двух сечениях пучка.

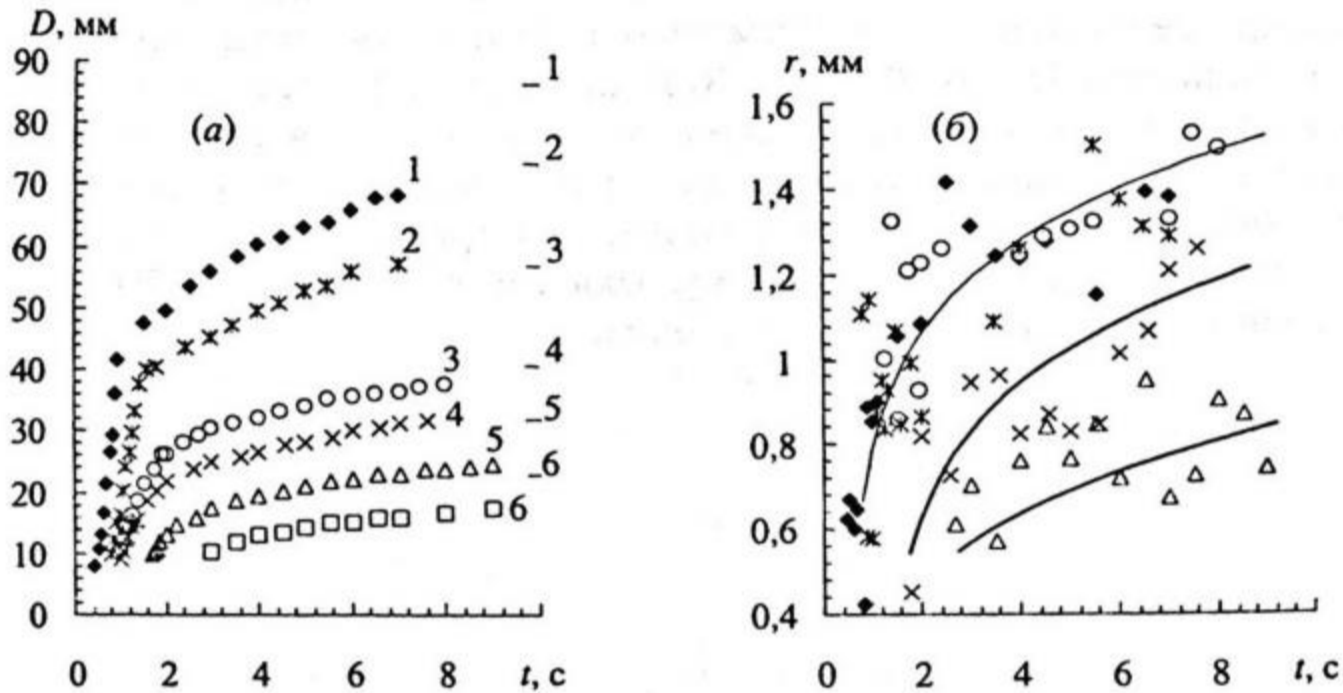


Рис. 4. Эволюция (а) диаметра отклика и (б) радиуса линии перегиба углубления с начала облучения слоя непрерывным пучком He-Ne лазера. Соответствующие друг другу зависимости на рис.3а и 3б показаны одинаковыми маркерами.

Эбонитовая подложка, бензиловый спирт,  $h = 300$  мкм

Из рис. 4 видно, что: а) практически с первых секунд эволюционные зависимости для разной мощности пучка четко разделены и, следовательно, время измерения мощности по ним может быть на порядок меньше, чем время измерения по стационарному отклику. Примеры эволюционных параметров отклика, которые можно использовать для измерений, показаны на рис.5; б) при мощности пучка свыше 5.3 мВт зависимости  $r(t)$  совпадают в пределах погрешности вплоть до выхода углубления на стационар: при  $P = 5.3, 8.5$  и  $10.7$  мВт,  $r_s = 2.0, 1.8$  и  $1.9$  мм соответственно. (К сожалению, относительно небольшая погрешность  $\pm 0.1$  мм измерения  $D$  приводит к погрешности  $r$  порядка  $\pm 0.2$  мм, т.е.  $\sim 20\%$  от радиуса индуцирующего пучка). В то же время соответствующие им зависимости  $D(t)$  четко выражены. Это можно объяснить тем, что, начиная с некоторой критической мощности, радиальные размеры углубления «навязываются» распределением интенсивности лазерного пучка, а изменение мощности влияет лишь на глубину термокапиллярной деформации. В условиях эксперимента выполнялось соотношение  $r_s \cong d_l$  и, в принципе, для измерений можно было ограничиться пробным пучком с диаметром на слое 5...6 мм.

Для исследования эволюции диаметра отклика при импульсном воздействии использовали непрерывный пучок He-Ne лазера, из которого с помощью электромеханического затвора формировали одиночные прямоугольные импульсы заданной

<sup>1</sup> В начале развития углубления его фокус некоторое время находится за плоскостью экрана либо вблизи нее. В этот период на экране наблюдается отклик небольшого диаметра и с размытой границей. Как следствие, погрешность составляет десятки процентов от диаметра откликов.

(в интервале 0.7...3.2 с) длительности. Их энергию  $W$  изменяли в пределах от 4 до 35 мДж, регулируя мощность  $P$  пучка и длительность  $\tau$  импульсов.

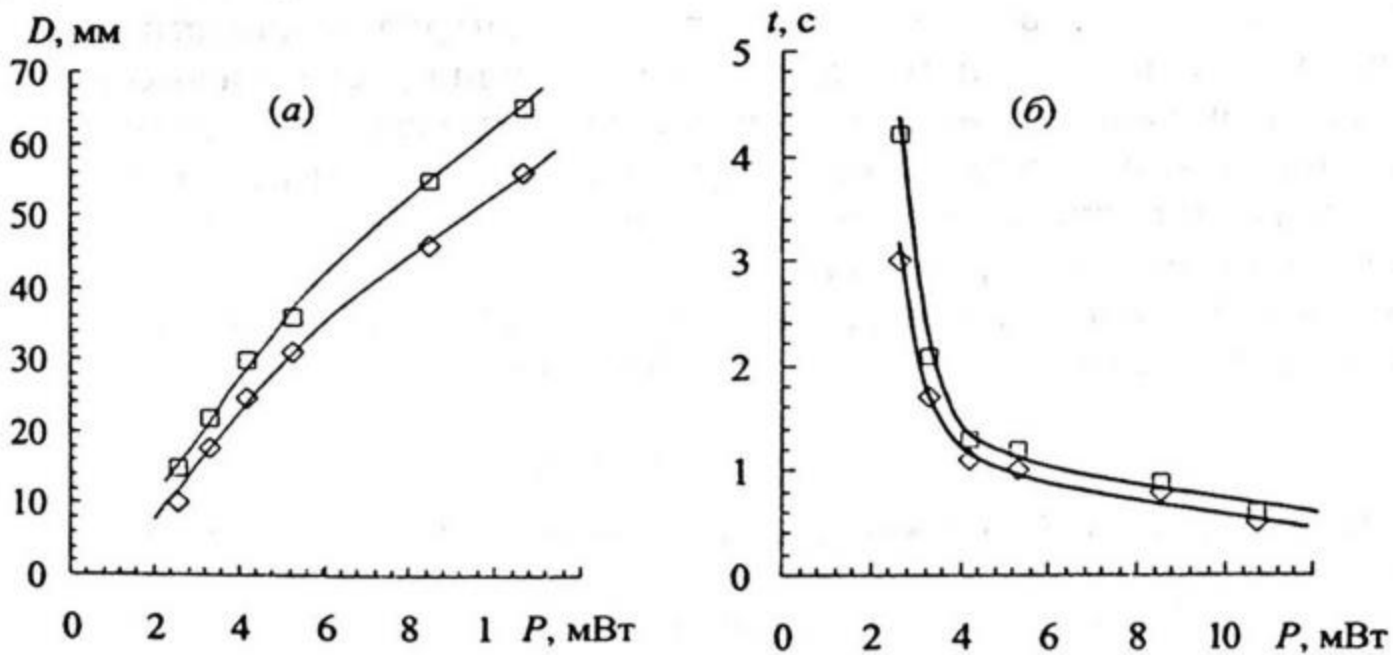


Рис. 5. Примеры зависимостей эволюционных параметров отклика от мощности. Диаметр отклика спустя 3 (□) и 6 (◇) сек. с начала облучения (а); время с начала облучения по достижении откликом диаметра 10 (□) и 14 (◇)мм (б)

Выявлена (рис.6) линейная зависимость максимально достигаемого откликом диаметра  $D_{max}$  от энергии  $W$  импульса (переменные параметры толщина  $h$  слоя и длительности  $\tau$  импульса). Уменьшение  $\tau$  приводит к увеличению наклона зависимости  $D_{max}(W)$ , т.е. при одинаковой энергии значение  $D_{max}$  больше для более короткого импульса, что связано с чувствительностью отклика к градиенту интенсивности индуцирующего пучка.

В случае фиксированной толщины слоя зависимости сходятся при некотором значении энергии  $W^*$ . Это можно объяснить исходя из того, что для термокапиллярного деформирования поверхности слоя необходимо воздействие с энергией выше уровня  $W^*$ , определяемого диссипативными свойствами системы «жидкий слой / подложка». Действительно, с утолщением слоя, когда усиливается рассеяние энергии пучка в объеме жидкости, повышается и  $W^*$  (рис. 6).

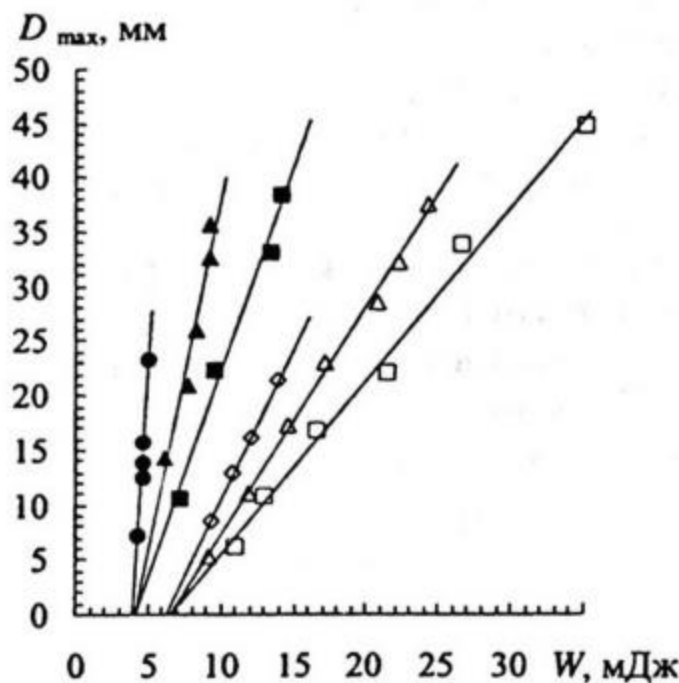


Рис. 6. Зависимость максимально достигаемого откликом диаметра от энергии одиночного импульса. Зачерненные маркеры соответствуют слою бензилового спирта  $h = 450$  мкм, светлые — 500 мкм. Круглые, ромбические, треугольные и квадратные маркеры отвечают импульсам длительностью 0.7, 1.2, 2.2. и 3.2 секунд соответственно

Таким образом, измерение энергии одиночных импульсов возможно при условии контроля их длительности, что не сопряжено с усложнением измерительного устройства и может проводиться системой считывания отклика.

**Заключение.** Установлено, что эволюция с начала облучения слоя лазерным импульсом или непрерывным пучком и стационарный диаметр отклика зависят от энергетических параметров пучка. На основе этих зависимостей разработан нечувствительный к фоновой засветке метод измерения и контроля мощности непрерывного лазерного пучка и энергии импульсов, сочетающий простоту и высокую чувствительность. Показано что, изменяя свойства системы «жидкий слой / подложка», используемой в новом методе в качестве чувствительного элемента, можно в широком пределе управлять диапазоном измеряемой мощности. Метод открывает возможность для изготовления простых и надежных устройств — эталонных кювет — для экспресс-контроля энергетических и геометрических параметров лазерного пучка.

Работа поддержана грантом РФФИ № 01-01-652-а.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Боровский И. Б., Городский Д. Д., Шарафеев И. М., Морящев С. Ф. Массоперенос при обработки поверхности металлов непрерывным лазерным излучением // Доклады Академии наук СССР. 1982. Т. 263. № 3. С. 616-618.
2. Веденов А. П., Гладуш Г. Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. М., 1985. 450 с.
3. Сейдгазов Р. Д., Сенаторов Ю. М. Термокапиллярный механизм глубокого проплавления материалов лазерным излучением // Квантовая электроника. 1988. № 3. С.622-624.
4. Альварес-Суарес Ю. С., Рязанцев В. М., Шевцова В. М. Теоретическое и экспериментальное исследование конвекции в слое жидкости при локальном нагреве // Прикладная механика и техническая физика. 1990. № 2. С. 53-57.
5. Гладуш Г. Г., Дробязко С. В., Лиханский А. И., Лобойко А. И., Сенаторов Ю. М. Термокапиллярная конвекция при лазерном нагреве поверхности // Квантовая электроника. 1998. № 5. С. 439-442.
6. Антонова Г. Ф., Гладуш Г. Г., Косырев Ф. К. и др. Развитие многовихревого течения расплава нержавеющей стали при лазерном воздействии на поверхность // Квантовая электроника. 1998. № 5. С. 443-446.
7. Безуглый Б. А. Капиллярная конвекция, управляемая тепловым действием света и ее применение в способах регистрации информации: Дис. ... канд. ф.-м. наук, М., 1983. 270 с.
8. Низовцев В. В. Капиллярная конвекция в жидком слое при лазерном облучении // Инженерно-физический журнал. 1988. № 1. С. 85-91.
9. Da Costa G., Calatroni J. Self-holograms of laser induced surface depression in heavy hydrocarbons // Appl. Opt. 1978. № 15. С. 2381-2385.
10. Визнюк С. А., Суходольский А. Т. О термокапиллярном самовоздействии лазерного излучения в тонких слоях поглощающей жидкости // Квантовая электроника. 1988. № 4. С. 767-770.
11. А.с. СССР № 1242764, 4 G 01 N 11/16, БИ № 25, 1986.
12. Патент РФ № 2163712, 7 G 01 J 1/00, БИ № 6, 2001.
13. Патент РФ № 2165071, 7 G 01 B 11/06, БИ № 10, 2001.
14. Патент РФ № 2165073, 7 G 01 C 9/18, БИ № 10, 2001.