

ЛИТЕРАТУРА

1. Нигматулин Р. Н. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
2. Антонов Я. К., Холмогоров А. П. и др. Гидродинамика полезных ископаемых. М.: Недра, 1995. 173 с.
3. Бекнев В. С., Шабаров А. Б. и др. Газовая динамика. Механика жидкости и газа. М.: МГТУ, 1997. 668 с.

**Б. А. БЕЗУГЛЫЙ,
С. В. ШЕПЕЛЕНКО,
О. А. ТАРАСОВ**

УДК: 532. 65 + 535. 8 681. 7

**АДАПТИВНОЕ
ОПТИЧЕСКОЕ
УСТРОЙСТВО
НА ОСНОВЕ ЖИДКОЙ
ЛИНЗЫ*)**

АННОТАЦИЯ. На основе эффекта светоиндуцированной концентрационно-капиллярной конвекции [6] получена жидкая варифокальная самоцентрирующаяся микролинза. Измерены зависимости ее основных параметров от интенсивности управляющего излучения. Предложены схемы адаптивных оптических устройств.

The liquid varifocal microlens was devised on the base of light-induced concentration-capillary effect. The dependencies of basic lens parameters on the operate radiation intensity were measured. The schemes of adaptive optical devices were suggested.

По-видимому, первым адаптивным оптическим элементом на основе жидкой поверхности можно считать параболическое ртутное зеркало во вращающемся цилиндрическом сосуде, которое было предложено Р. Вудом [1]. Позже Блок и Харвит [2] предложили использовать в качестве оптиче-

*) Данная статья представляет собой расширенное изложение доклада на Международном аэрокосмическом конгрессе IAC'97 и включена в труды конгресса, которые будут опубликованы в 1998 году на английском языке.

ского элемента свободную поверхность жидкости, деформированную светоиндуцированной термокапиллярной (ТК) конвекцией.

Из-за ядовитых паров ртути и ограничения ориентации оптической оси лишь направлением вектора ускорения силы тяжести такие зеркала не нашли применения.

Фотоиндуцированную пучком излучения ТК деформацию в качестве оптического элемента исследовали также Да Коста и Калатрони [3-5], Безуглый [6] и Визнюк [7]. К сожалению, использование диэлектрических поверхностей рефлекторных (катоптрических) элементов оптики неэффективно из-за их низкой отражательной способности.

До недавнего времени применение отражающих металлических поверхностей для построения адаптивных оптических элементов казалось единственно технически возможным. Наиболее удачным их применение оказалось в астрономии, где были созданы мембранные зеркала [8], управляемые электростатическими приводами.

О разработке адаптивных элементов в рефрактивной оптике каких-либо сведений найти не удалось. Одним из авторов данной статьи после открытия эффекта капиллярной конвекции, управляемой тепловым действием света [9,10] и обнаружения стационарного состояния "аномальной" капли [11], была высказана идея о применении такой капли в качестве адаптивного оптического элемента [6].

В настоящей работе выполнены предварительные экспериментальные оценки оптических характеристик микролинзы.

Экспериментальная установка и методика эксперимента

Экспериментальная установка (Рис. 1) включает точечный источник света 1 (ртутная лампа ДРШ-100-2), коллектор 2 (линза диаметром $D = 60$ мм с фокусным расстоянием $F = 90$ мм), кассету для ослабляющих фильтров 3, зеркало 4 и конденсор 5 (линза $D = 55$ мм, $F = 94$ мм), фокусирующий излучение в объем сборной кюветы 6 с исследуемым раствором. Кювета (Рис. 2) состоит из двух оптически прозрачных пластин, разделенных кольцевой тефлоновой прокладкой толщиной 3 мм и внутренним диаметром 35 мм. Пластины помещали между двумя дюралевыми дисками, которые стягивали винтами. Резиновые прокладки между пластинами и дисками обеспечивали равномерное прижимное давление. Чтобы предотвратить конденсацию паров на верхней пластине, на ее внешнюю поверхность было нанесено прозрачное проводящее покрытие, служившее в качестве электрического нагревателя. В микроскоп 7 наблюдали жидкую линзу, а также полученное с ее помощью изображение предмета. Для записи происходящих процессов (режимов образования капли, перестройки формы и самоцентрирования) использовали видеокамеру 8.

Мощность управляющего пучка изменяли с помощью фильтров, в качестве которых, с целью равномерного ослабления светового потока во всем спектре излучения, использовали набор прокалиброванных металлических сеток. Фильтры помещали в кассете 3. Таким образом, осуществлялось дискретное управление оптическими характеристиками капли.

Для приготовления смеси использовали (1) насыщенный при $t = 20$ °С раствор родамина G в ацетоне и (2) раствор родамина G в дистиллированной воде с концентрацией 7.3 г/л. Установлено, что изменение концентрации родамина G в растворах, входящих в состав смеси, влияет на процесс формирования и свойства микролинзы. При малых концентрациях родами-

на G процесс образования капли протекает менее интенсивно. Соотношение растворов выбирали из следующих соображений: при малом содержании водного раствора в смеси в случае стеклянной подложки образующаяся капля быстро пересыхает и малоподвижна, при большом содержании получается капля большого объема и формируется долго или вообще не образуется.

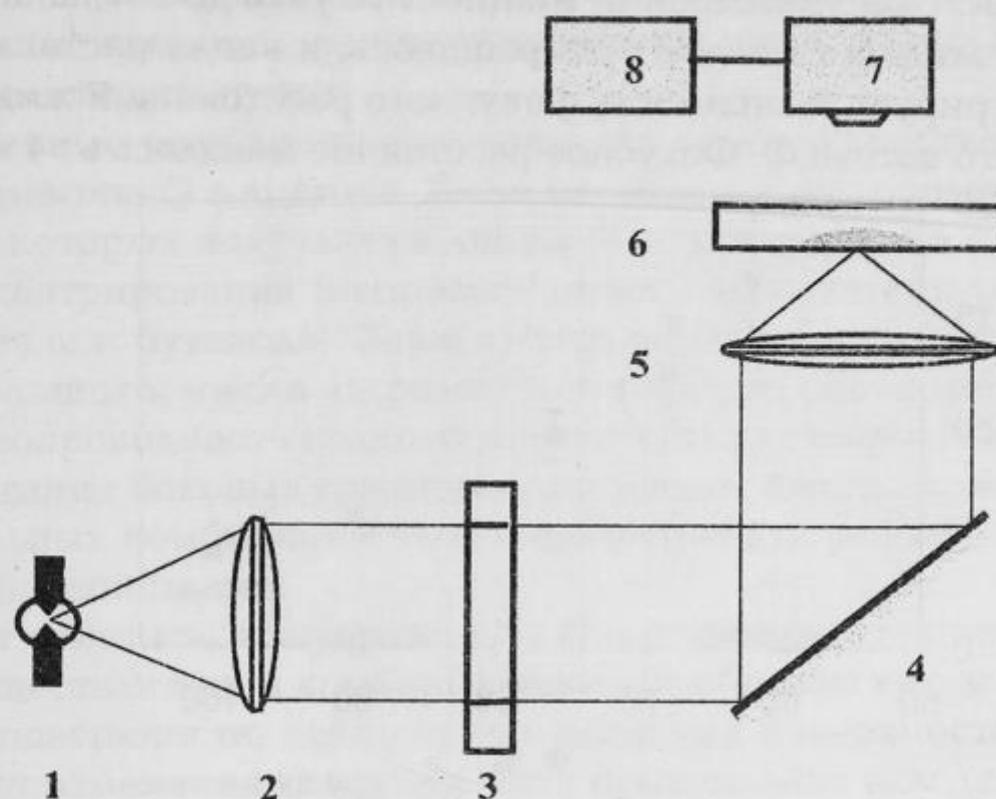


Рис. 1. Оптическая схема установки: 1 — источник света (ртутная лампа ДРШ-100-2 или НВО — 100); 2 — коллектор; 3 — кассета для ослабляющих фильтров; 4 — зеркало; 5 — конденсорная линза; 6 — кювета с экспериментальным раствором; 7 — микроскоп; 8 — видеокамера.

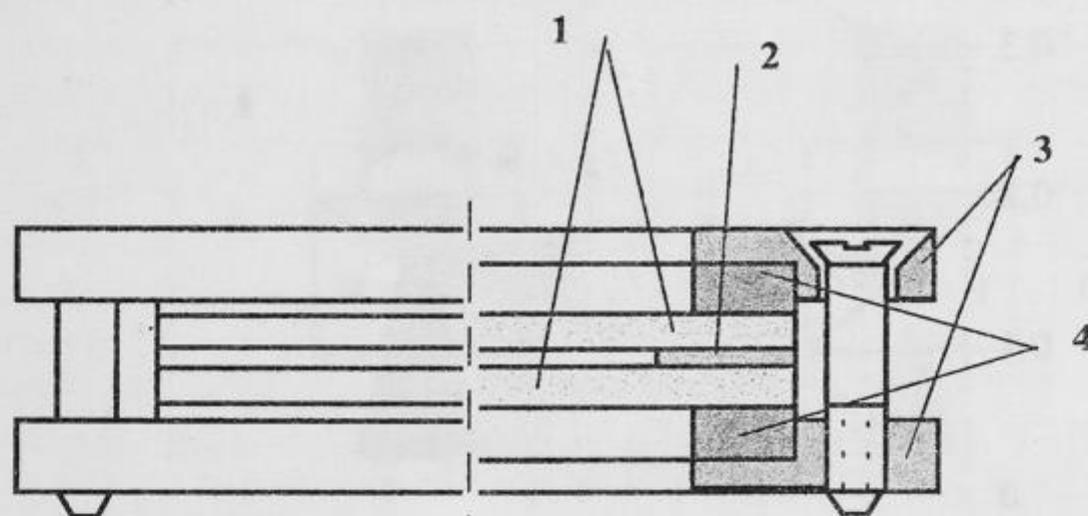


Рис. 2. Сборная кювета для проведения опытов с тонкими слоями растворов, ограниченными твердыми поверхностями: 1 — стеклянные плоскопараллельные пластины (верхняя — с металлическим напылением); 2 — тефлоновая прокладка; 3 — прижимные диски; 4 — амортизирующие резиновые прокладки.

Из теплофизических и физикохимических соображений следует ожидать, что на процесс образования капли должны влиять также свойства красителя (коэффициент экстинкции, тензоактивность, растворимость), растворителя (летучесть, вязкость, поверхностное натяжение, термический коэффициент поверхностного натяжения, температуропроводность), температуропроводность и смачиваемость подложки. Для данной кюветы опытным путем найдено оптимальное объемное отношение компонент смеси: $V_1:V_2 = 25:1$, а оптимальный объем V закачиваемого в кювету раствора составлял 0.4 мл. При уменьшении объема V капля получалась нестационар-

ной и высыхала, а при V значительно большем, чем 0.4 мл, капля не формировалась.

Результаты

Измерены зависимости основных параметров линзы от интенсивности излучения. Световой поток изменяли в пределах $(62 \div 100)\%$, что соответствует $(16 \div 25)$ лм. При уменьшении мощности пучка до 50%, центростремительное течение жидкости почти прекращалось, и капля растекалась.

Рис. 3 иллюстрирует зависимость фокусного расстояния F жидкой микролинзы от светового потока Φ . Фокусное расстояние менялось от 4 мм до 17 мм.

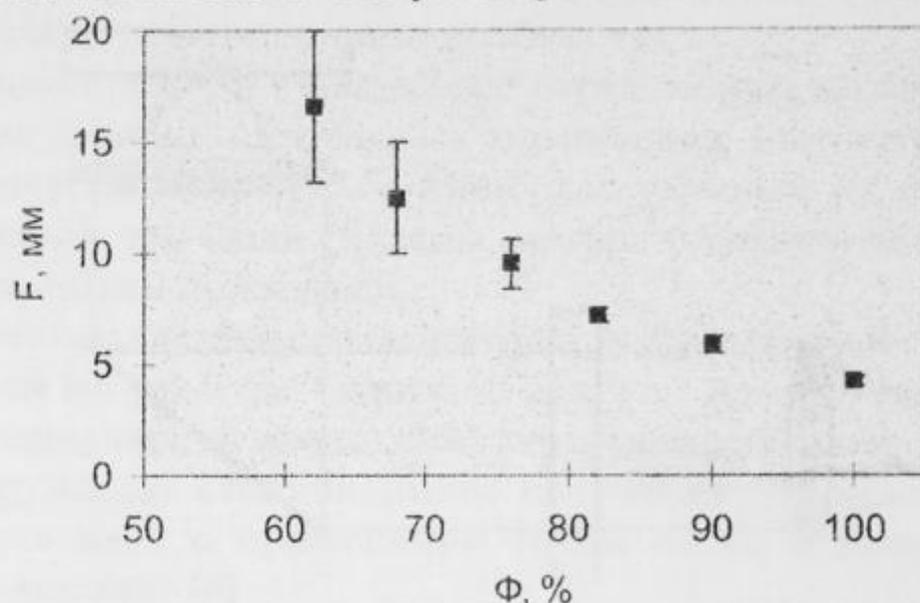


Рис. 3. Зависимость фокусного расстояния от светового потока.

Изменение Φ влияло и на величину диаметра капли. При уменьшении Φ диаметр линзы увеличивался и менялся в пределах от 1.1 мм до 2.3 мм. Зависимость относительного отверстия D/F от Φ показана на рис. 4.

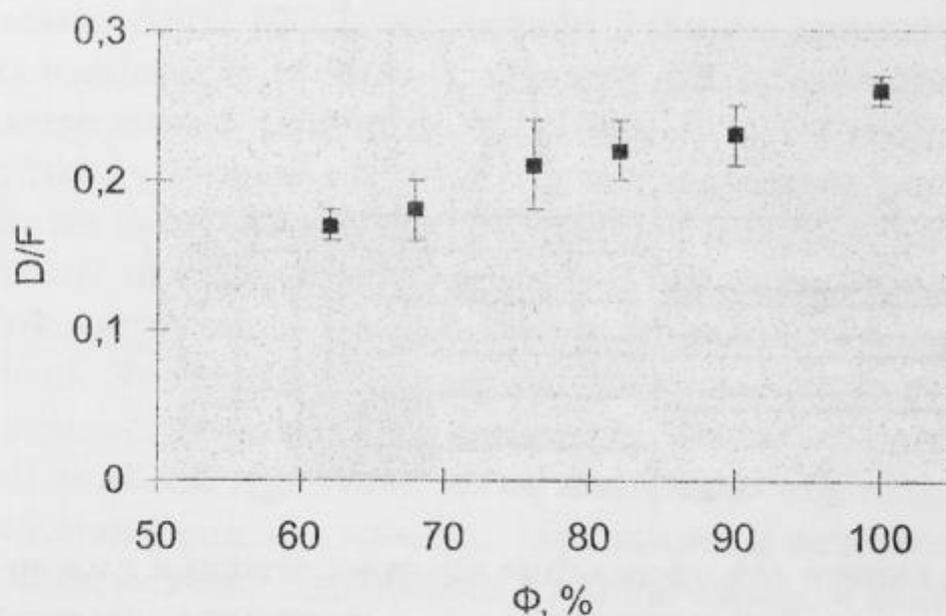


Рис. 4. Зависимость относительного отверстия линзы от светового потока.

В качестве оценки времени самоцентрирования было выбрано время перемещения капли в пучок при мгновенном смещении пучка на расстояние, равное его диаметру. На это требовалось в среднем $(5 \div 10)$ с. Здесь, минимальное значение соответствует интенсивности 100%, а максимальное 82%. Время полной перестройки линзы при изменении светового потока от 100% до 82% составляло $(3 \div 4)$ мин.

Аберрации микролинзы оценивали по фотографиям сетки с квадратными ячейками ($a = 1.7$ мм).

Обсуждение результатов и выводы

На основе полученных экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

- Подтверждена принципиальная возможность создания адаптивного оптического устройства (Рис. 5), основанного на жидкой самоцентрирующейся микролинзе. Такое устройство можно использовать в различных оптоэлектронных приборах, где необходимо бесконтактное управление оптическими параметрами.

- Основными недостатками микролинзы являются бочкообразная дисторсия и малые скорости самоцентрирования и отклика на изменение мощности управляющего пучка.

Приведенные результаты получены для смеси из растворов родамина G в воде и родамина G в ацетоне. Были проведены эксперименты и с другими смесями, в которых получаются линзы без дисторсии, но с меньшей скоростью самоцентрирования (например, смесь насыщенного раствора родамина G в ацетоне и бутанола). Зависимость характеристик микролинзы от довольно большого числа параметров (состав раствора, его вязкость, температуропроводность подложки, летучесть растворителя, объем камеры, угол смачивания боковых границ и т. д.) расширяет возможности при поиске оптимальных комбинаций этих параметров для разработки микролинз с требуемыми свойствами.

Следует отметить, что управление фокусным расстоянием f микролинзы может осуществляться и комбинированным образом как за счет изменения кривизны поверхности, вследствие изменения поверхностного натяжения, так и за счет изменения коэффициента преломления вследствие увеличения концентрации тензоактивного вещества. В перспективе возможен целенаправленный поиск добавок с высоким коэффициентом преломления для усиления последнего эффекта (например, монобромнафталин $n = 1.66$ или иодометилен $n = 1.74$ [12] и т. п.).

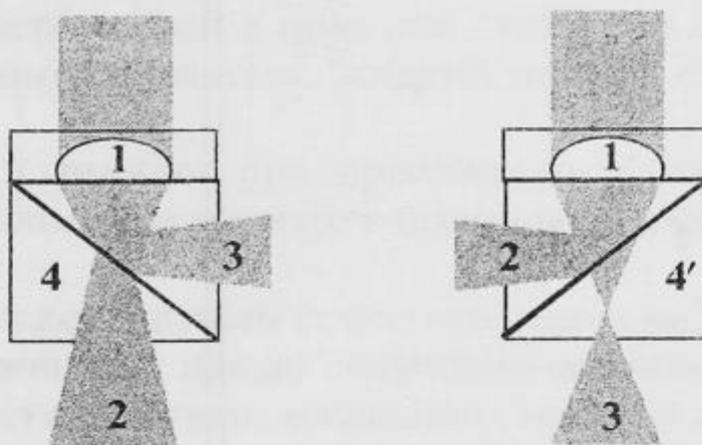


Рис. 5. Возможные оптические схемы адаптивного оптического устройства:

- 1 — линза; 2 — пучок, формирующий микролинзу (управляющий пучок);
- 3 — информационный (управляемый) пучок; 4 — зеркало, отражающее информационный пучок и пропускающее формирующий пучок; 4' — зеркало, отражающее формирующий пучок и пропускающее информационный пучок.

В заключение авторы хотят отметить, что их исследования выполнены без какой-либо финансовой поддержки как со стороны государственного бюджета, так и хоздоговоров. Авторы благодарят Г. Ф. Куцева за поддержку их участия в Международном аэрокосмическом конгрессе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wood R. // J. Astrophys. 1909. 29, p. 164.
2. Block M. J., Harwit M. // J. Opt. Soc. Am. 1958. 48, 7. P. 480-482.
3. Da Costa G., Calatroni J. // J. Appl. Opt. 1979. 18, 2. P. 233-235.
4. Da Costa G. // J. Phys. Lett. 1980. 80A, 4. C. 320-322.
5. Da Costa G. // J. Phys. Lett. 1980. 80A, 4. C. 323-324.

6. Безуглый Б. А. Канд. диссертация. Москва, МГУ, 1983. 270 с.
7. Визнюк С. Ф., Суходольский А. Т. // КЭ. 1988. 15, 4. С. 767-770.
8. Grosso R. P., Yellin M. // J. Opt. Soc. Am. 1977. 67. С. 399 — 406.
9. Bezuglyi B. A. // Hydromechanics and Heat/Mass Transfer in Microgravity. Rev. Proc. 1st Int. Symp. Hydromech. Heat/Mass Transfer Microgr., Perm-Moscow, Russia, 6-14 July 1991. Gordon & Breach Sci. Publ. Amsterdam. © 1992. P. 335-340.
10. Bezuglyi B. A. // IAC'94, Proc. Aerospace Congress, Moscow 15 — 19 August., 1994, Vol. 1, 1995. P. 261-266.
11. Безуглый Б. А., Низовцев В. В. // Вестн. МГУ, сер. 3. Физика. Астрономия. 1981. 22, 6. С. 37-41.
12. Федин Л. А., Барский И. Я. Микрофотография. Ленинград: Наука, 1971. 107 с.

**Б. А. БЕЗУГЛЫЙ,
О. А. ТАРАСОВ,
С. В. ШЕПЕЛЕНКО**

УДК: 532. 22

**ПРИМЕНЕНИЕ
ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО
ЭФФЕКТА
ДЛЯ КОНТРОЛЯ
ПЛОСКОСТНОСТИ
ЖИДКОЙ ПОВЕРХНОСТИ¹**

АННОТАЦИЯ. Представлены результаты экспериментальной работы по применению термокапиллярного (ТК) эффекта индуцированного тепловым действием лазерного излучения для контроля плоскостности поверхности жидкости.

The results of experimental research on the application of thermocapillary (TC) phenomenon induced by heat effect of laser beam for the control of liquid surface flatness are presented.

¹ Данная статья представляет собой расширенное изложение доклада на Международном аэрокосмическом конгрессе IAC'97 и включена в труды IAC'97, которые будут опубликованы в 1998 году на английском языке.