

УДК 532.68:535.21

© 2006 г. Б. А. БЕЗУГЛЫЙ, Н. А. ИВАНОВА

СОЗДАНИЕ, ПЕРЕМЕЩЕНИЕ И СЛИЯНИЕ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ С ПОМОЩЬЮ ПУЧКА СВЕТА

Предложен новый принцип манипуляции дискретными каплями с использованием концентрационно-капиллярных сил, управляемых тепловым действием пучка света. Капли создавали пучком света в тонком слое поглощающего раствора и пленке этого раствора под воздушным пузырьком, находящимся в ячейке. Продемонстрировано перемещение пучком света как отдельной капли, так и капли в воздушном пузырьке. Впервые выполнено слияние двух капель на твердой подложке путем приведения их в контакт пучком света.

Ключевые слова: капли жидкости, капиллярные эффекты, микрофлюидика.

Манипуляция каплями объемами от 1 мкл до 1 пл на подложках, которая состоит из таких базовых операций, как дозирование капель, их перемещение и слияние, является основой химико-биологического анализа, выполняемого в лаборатории на чипе [1, 2].

Один из подходов к управлению каплями жидкости основан на использовании сил поверхностного натяжения, которые благодаря большому отношению площади свободной поверхности капли к ее объему в микромасштабе становятся доминирующими. Кроме того, зависимость поверхностного натяжения от скалярных полей (электрического потенциала, теплового и концентрационного) на поверхности раздела фаз предоставляет исследователю широкий выбор методов для выполнения манипуляций жидкостью.

Механизмы перемещения и деления микропорций жидкости по гидрофильным дорожкам под действием термокапиллярных сил, вызываемых локальным нагревом резистивными микронагревателями, внедренными в подложку, изучены в [3, 4]. Наиболее выдающиеся результаты достигнутые в этом направлении, представлены в табл. 1.

Поведение капель проводящей жидкости в ячейках с зазором 0.3 мм под действием электрокапиллярных сил исследовано в [5, 6]. Используя явление электрокапиллярности, выполнено дозирование капель, перемещение, их деление и слияние с более высоким, чем в [3, 4] быстродействием (табл. 1).

Однако несмотря на успехи у этих подходов имеются и недостатки, связанные с тем, что при снижении объема капель требуется как уменьшение площади нагревателей и электродов, так и увеличение их числа, что значительно усложняет технологию изготовления чипов. Эту проблему можно решить, используя пучки света в качестве прецизионного инструмента для управления течением жидкости в сверхмалых масштабах.

В [7] успешно манипулировали микролитровыми каплями воды на твердой подложке с помощью управляемых пучком лазера электрокапиллярных сил, т.е. эффекта оптоэлектросмачивания. Этот способ основан на управлении электрическим импедансом соединенных последовательно подложки, с находящейся на ней капель, и фотопроводящей пластины, расположенной под подложкой. В отсутствие излучения напряжение падает только на фотопроводящей пластине, и капля остается неподвижной. При облучении сопротивление фотопластины существенно уменьшается за счет генерации электронно-дырочных пар, и напряжение падает на подложке, что (как в [5, 6]) включает электрокапиллярный эффект, приводящий каплю в движение (табл. 1). Такое реше-

Таблица 1

Метод	Капля – среда	Объем, размеры	Скорость	создание/слияние/деление
ТК эффект; резистивные нагреватели по 40 мВт [4]	ПДМС – воздух	2–8 мкл	0.6–10 мм/с	Пипетка /нет данных/ 8 мкл : 2 = 4 мкл
ЭК эффект; рабочее напряжение 10–100 В [5, 6]	Додекан – воздух	1–4 мкл	26–56 мкм/с	Нет данных/слияние за 2.9 с/деление 700 нл : N, где N \cong 70
“Оптоэлектросмачивание” (65 мВт/см ²) [7]	Водный раствор 0.1 М КСl – силиконовое масло	3–900 нл	100 мм/с	
ТК эффект, управляемый лазерным лучом (10–200 мВт) [8]	DI вода и оливковое масло – воздух	1 мкл	7 мм/с	Нет данных
Управляемое светом смачивание (1 мВт/см ²) [9]	Вода – 1 деканол	1.7 мкл–14 пл	3 мм/с	Шприц /слияние за 33 мс/нет данных
КК эффект, управляемый пучком света (50–100 мВт) [11]	Оливковое масло и жидкие кристаллы – воздух	2 мкл	35–50 мкм/с	Нет данных
	Растворы I ₂ в ацетоне разных концентраций – собственный пар, воздух	Диаметр 0.1–1.5 мм; высота <10 мкм	до 1 см/с	Пучком света в слое/ нет данных/нет данных

Сокращения: ПДМС – полидиметилсилоксан; ТК – термокапиллярный, ЭК – электрокапиллярный, КК – концентрационно-капиллярный.

ние хотя и обеспечивает точный контроль электрокапиллярных сил, однако значительно усложняет конструкцию прибора.

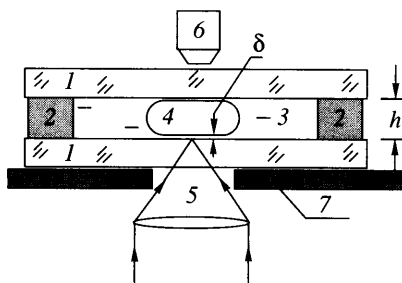
Недавно [8] показано движение и слияние капель окрашенной воды, находящихся в чашке Петри, заполненной 1-деканолом, под действием термокапиллярных сил, индуцированных нагревом поверхности одной из капель с помощью лазерного луча (табл. 1).

Управляемое светом перемещение капель по подложкам, покрытым светочувствительным слоем, содержащим азобензольные элементы, исследовано в [9]. Под действием излучения в слое происходит фотоизомеризация, в результате которой его поверхностная энергия меняется. При неоднородном распределении интенсивности пучка на поверхности слоя создается градиент поверхностной энергии. Таким образом, капля, помещенная на подложку с таким градиентом, приходит в движение. Скорость движения капель оливкового масла и жидких кристаллов объемом 2 мкл достигала 50 мкм/с (табл. 1).

Здесь сообщается о новом подходе, позволяющем с помощью пучка света создавать капли требуемого объема, перемещать их в заданное место и смешивать друг с другом. В основу предлагаемого подхода положено явление концентрационно-капиллярной конвекции, управляемой тепловым действием пучка света, открытой в [10–12].

От известных концентрационно-капиллярных течений (эффект “слезы крепкого вина” [13] или эффект Скогена [14]) это явление отличается способом локального изменения концентрации раствора, осуществляемым тепловым действием света, а также выбором системы в виде тонкого слоя раствора малолетучего тензоактивного¹ вещества в

¹ Вещество, с ростом концентрации которого поверхностное натяжение раствора повышается.



Фиг. 1. Микрофлюидное устройство в сечении: 1 – прозрачные пластины, 2 – тефлоновая пленка, 3 – микрополость с исследуемой жидкостью, 4 – воздушный пузырек, 5 – управляющий пучок, 6 – микроскоп и система сбора и обработки данных, 7 – столик микроскопа

летучем растворителе, поглощающего оптическое излучение и находящегося в замкнутом объеме [11].

При облучении слоя такого раствора пучком света сначала из-за уменьшения поверхностного натяжения, вызванного нагревом, происходит термокапиллярное растекание жидкости, сопровождающееся испарением летучей компоненты из зоны облучения. Процесс испарения вызывает накопление тензоактивного вещества, повышающего поверхностное натяжение раствора в зоне нагрева, что приводит к смене знаков касательных напряжений, действующих на поверхности $|\sigma_T \nabla T < \sigma_C \nabla C$, где σ_T и σ_C – тепловой и концентрационный коэффициенты поверхностного натяжения, ∇T и ∇C – градиенты температуры и концентрации. В результате центробежное термокапиллярное растекание сменяется центростремительным концентрационно-капиллярным стягиванием раствора в зону нагрева. Замкнутый объем дает те преимущества, что растворитель конденсируется обратно в раствор, позволяя сделать процесс циклическим. Конденсируясь за пределами проекции пучка света, растворитель понижает там поверхностное натяжение раствора, увеличивая тем самым концентрационный градиент $\nabla \sigma = \sigma_C \nabla C$.

Впервые создание капель из слоя насыщенного раствора йода в ацетоне и их перемещение пучком света показано в [11] (табл. 1).

2. Экспериментальная установка и методика. Моделью микрофлюидного устройства служила ячейка (фиг. 1), состоящая из двух стеклянных пластин, разделяемых сменными тефлоновыми пленками толщиной 10 и 50 мкм с прорезанным в них прямоугольным отверстием площадью около 2–4 см². Пленку помещали на одну из пластин, так что образовывался микрорезервуар, который заполняли исследуемой жидкостью с помощью микропипетки, а сверху накрывали другой пластиной. Затем эту конструкцию помещали между кольцевыми дисками из дюрала с резиновыми прокладками и стягивали винтами для обеспечения герметичности. Жидкость в микрополости распределялась так, что в ней оставались воздушные пузырьки разного диаметра D_0 , для которых выполняется отношение $h/D_0 \ll 1$, где h – зазор ячейки. Между пластинами ячейки и пузырьками всегда сохранялась смачивающая пленка толщиной $\delta \ll h$. Использовали также и беспузырьковое микрофлюидное устройство, где тефлоновую пленку заменяли кольцевым тефлоновым диском с $h = 3 \pm 0.1$ мм и внутренним диаметром 1.8 ± 0.1 см. Жидкость в ячейку вносили после сборки с помощью пипетки через отверстие в верхней пластине так, что на дне полости образовывался тонкий слой с $\delta < 10$ мкм.

Источником света служила ртутная лампа ДРШ-100, излучение которой фокусировали на смачивающую пленку в пятно диаметром $d = 0.6 \pm 0.1$ мм. При этом интенсивность прошедшего через стеклянную пластину пучка света в его фокальной плоскости составляла 350 мВт/мм² при его мощности около 100 мВт. Наблюдение за манипулируемой

Таблица 2

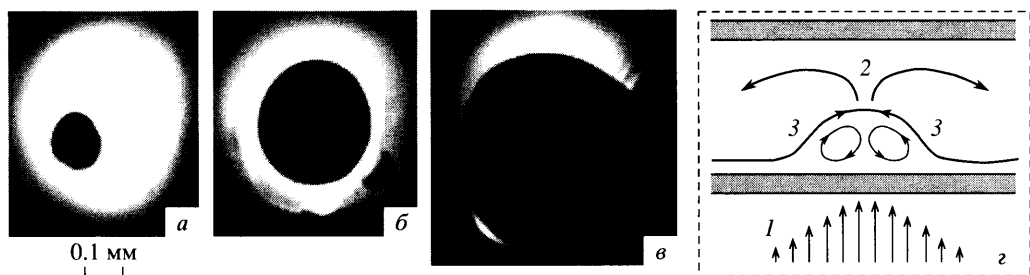
Жидкости	ρ , кг/м ³	σ , мН/м	μ , мН · с/м ²	p , кПа
Ацетон [15]	790	24.02	0.323	27
Этанол [15]	800	22.4	0.19	5.8
Бутанол [16]	810	27.18	2.95	0.67
Вода [15]	999	72.89	1.00	2.37

жидкостью вели через микроскоп МБС-10 с видеокамерой (560 лин/мм, 25 кадров/с), соединенной через тьюнер с компьютером для оцифровки аналогового видеопотока. Оцифрованное видео разрезали на кадры, которые затем обрабатывались. Исследуемыми жидкостями были растворы йода в этаноле, бутаноле и ацетоне, а также 10%-ная смесь дистиллированной воды в ацетоне, окрашенная родамином. Основные свойства жидкостей [15, 16] приведены в табл. 2. В силу малости коэффициентов поверхностного натяжения растворителей (табл. 2) влиянием поверхностно-активных загрязнений на течение жидкости пренебрегалось. Концентрация красителя подбиралась так, чтобы слой раствора толщиной 10 мкм поглощал от 30 до 40% мощности пучка.

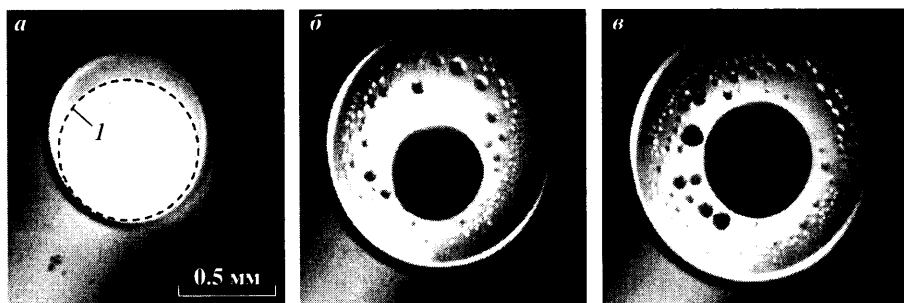
В процессе эксперимента ячейку с жидкостью располагали на предметном столике микроскопа так, чтобы пучок света проецировался через отверстие столика на смачивающую пленку раствора (фиг. 1). При изучении процессов перемещения и слияния капель ячейка смещалась относительно проекции пучка света на пленку. Для удобства, далее будет говориться о перемещении пучка света.

3. Результаты и их обсуждение. Создание капли. На фиг. 2, *a-v* приведены кадры формирования капли раствора йода в бутаноле в слое с $\delta < 10$ мкм при тепловом воздействии на него пучком света, а на фиг. 2, *г* показана схема процесса. Под действием градиента $\nabla\sigma$, вызванного испарением растворителя из зоны облучения, жидкость течет в зону облучения и формирует там обособленную каплю (фиг. 2, *a*). При облучении приток раствора из слоя в каплю, поддерживаемый потоком пара растворителя из капли (фиг. 2, *з*), увеличивает ее объем V_d , что наблюдается по росту ее видимого диаметра D_d (фиг. 2, *a-v*). Это увеличение объема происходит вследствие накопления малолетучего тензоактивного вещества и нелетучего красителя. Эффект накопления нелетучей примеси в капле предложено использовать для бесконтактного разделения смесей на компоненты [17]. Если жидкость содержит биологические объекты с размерами меньше δ , то они также будут аккумулироваться в капле, что представляет интерес в биотехнологии [18].

Создание капель на смачивающей пленке под воздушным пузырьком, находящимся в ячейке, позволяет решить проблему дисперсии реагентов в микроканалах [19]. На фиг. 3 представлена серия кадров капли, растущей в воздушном пузырьке за счет концентрационно-капиллярного потока раствора в центр пузырька, индуцированного тепловым действием пучка света на смачивающую пленку под этим пузырьком. В ходе экспериментов было замечено, что когда капля инжектируется из пузырька, то он принимает исходный размер, который имел до начала облучения. Исходя из этого, можно получить выражение для оценки объема V_d капли в пузырьке, считая его цилиндром высотой h , имеющим перед началом облучения объем $V_b(0) = \pi R_0^2 h$. Тогда объем пузырька с каплей записывается как $V_b(t) = \pi R_b^2 h$ или $V_b(t) = V_b(0) + V_d(t)$, откуда $V_d(t) = \pi h (R_b^2 - R_0^2)$, где R_0 – радиус пузырька в момент времени $t = 0$, а R_b – его радиус в произвольный момент t . Согласно этому выражению за время облучения $1 \leq t \leq 180$ с пленки раствора под пузырьком с $d/2 \leq D_0 \leq 2d$, объем капли достигает значения $0.2 \leq V_d \leq 80$ нл, что соответ-



Фиг. 2. Создание и рост капли в слое раствора (вид сверху): *a* – через 5 с после облучения; *б*, *в* – 15 и 37 с спустя от начала облучения; *г* – вид сбоку: 1 – пучок света, 2 – поток пара растворителя из капли, 3 – концентрационно-капиллярное течение в каплю

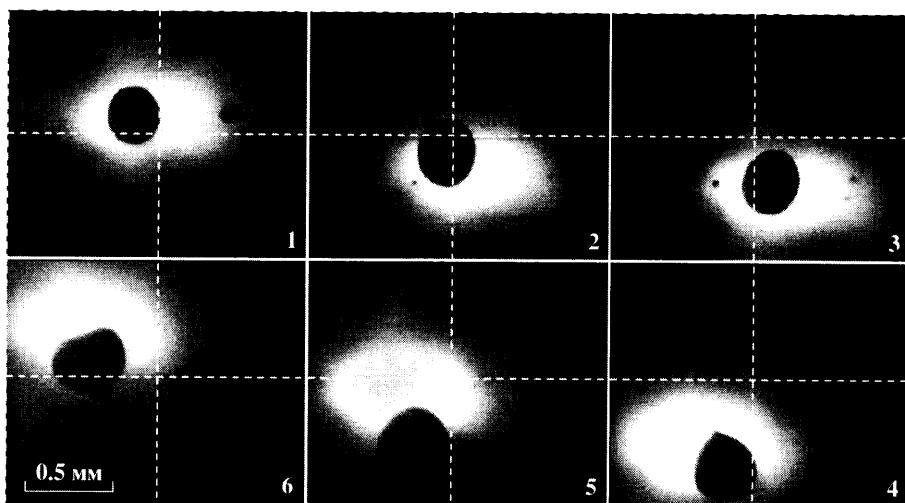


Фиг. 3. Формирование и рост капли в пузырьке ($D_0 \cong 1$ мм) (*a*–*в*), расположенном в ячейке с $h = 50$ мкм, заполненной раствором йода в этаноле (вид сверху): *a* – включение пучка света, 1 – граница проекции пучка; интервал между *a* и *в* около 170 с

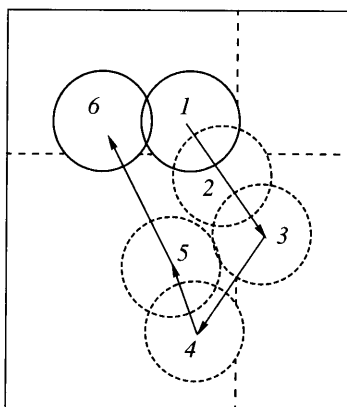
ствует объему капли-контейнера для реагентов в биохимическом анализе [18]. Например, объем капель на фиг. 3, *б*–*в* составляет около 30 и 50 нл за время облучения 141 и 170 с соответственно.

Одна из основных характеристик микрофлюидных процессов – их скорость протекания, определяющая пропускную способность микрофлюидного чипа. В данном подходе скорость роста капель при постоянной интенсивности пучка и толщине пленки под пузырьком зависит от его диаметра D_0 . Установлено, что в пузырьке малого диаметра $D_0 \leq d$ капля растет быстрее, чем в пузырьке с $D_0 > d$. Это обусловлено тем, что пленка жидкости под малым пузырьком толще, а граница раствора к капле ближе, что способствует притоку жидкости в каплю. Так, в пузырьках с $0.4 \leq D_0 \leq 0.6$ мм, зажатых в ячейке с $h = 10$ мкм, заполненной раствором йода в этаноле, капля быстро за $t \leq 1$ мин увеличивается в диаметре и перекрывает область проекции пучка света. Но в пузырьках с $D_0 > d$ капля растет медленнее, так как из-за испарения растворителя вязкость раствора в утонченной пленке увеличивается, препятствуя течению в зону облучения. Например, при $D_0 \geq 1$ мм диаметр капли достигает значения $D_d = d$ за время около 5 мин.

При длительном облучении капли, созданной в тонком слое или в пленке под большим пузырьком, наблюдается ее стационарное состояние $D_d = \text{const}$, что связано с наступлением динамического равновесия потоков пара и раствора. Температура нагреваемой пучком капли T_d выше температуры окружающего раствора T ($T_d > T$), а концентрация тензоактивного вещества C_d в капле из-за испарения растворителя превышает его концентрацию в исходном растворе, т.е. $C_d > C$. В стационарном состоянии парциальное давление пара p_d над каплей при температуре T_d равняется парциальному давлению



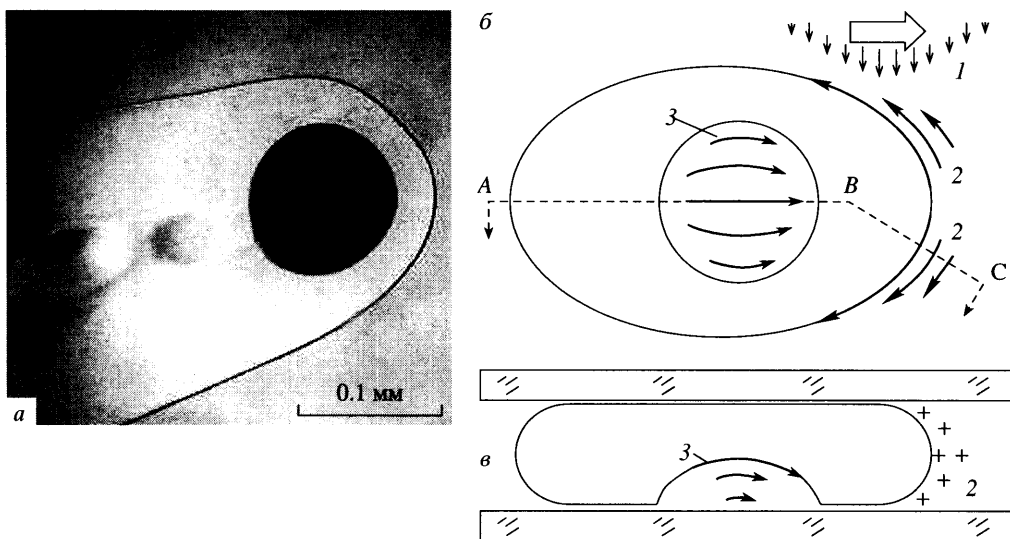
Фиг. 4. Перемещение капли пучком света; 1–6 – порядок кадров; интервал между кадрами 1 и 6 – около 8 с



Фиг. 5. Траектория движения капли, обозначения как фиг. 1

нию p над окружающим раствором: $p = p_d$. Откуда с учетом произведений этих неравенств и закона Рауля $p \sim T(1 - C)$ получим, что $C_d = (\Delta T + CT)/T_d \sim \Delta T/T_d$, где $\Delta T = T_d - T$ – перепад температуры. Таким образом, концентрация примеси в капле пропорциональна ΔT . Стало быть равновесие потоков обусловлено равновесием по давлению и стационарному состоянию по температуре.

Перемещение капли. После завершения процедуры создания капли требуемого объема ее можно перемещать в заданное место. Смещение пучка света относительно капли на расстояние до его диаметра создает в слое между зоной облучения и краем капли перепад ΔT , вызывающий там локальное испарение растворителя и рост концентрации тензоактивного вещества. В результате этого на поверхности капли появляется градиент $\nabla \sigma$, под действием которого жидкость перетекает в область повышенной концентрации, и вся капля приходит в движение, смещаясь в облучаемую зону. Постоянное смещение пучка света вызывает непрерывное движение капли за пучком. На фиг. 4 показан ряд последовательных положений капли, сформированной в слое ($\delta \leq 10$ мкм) смеси воды и ацетона, окрашенной родамином, при ее движении за пучком света, а на фиг. 5



Фиг. 6. Движение капли (а) насыщенного раствора иода в ацетоне в пузырьке за пучком света; механизм движения капли – вид сверху (б) и по ABC (в): 1 – пучок света (полая стрелка – направление движения пучка), 2 – термокапиллярное течение у поверхности пузырька, 3 – концентрационно-капиллярные потоки в капле, (+) – линии тока, входящие в плоскость фигуры

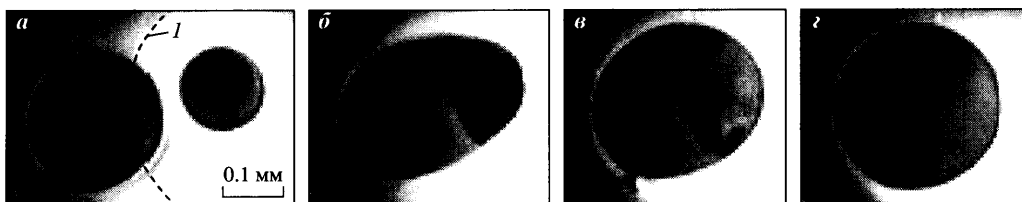
дана траектория ее движения. Из фиг. 4 (5, 6) видно, что диаметр капли, находящейся вне зоны действия пучка света, примерно в 1.5 раза больше, чем в ее пределах – (1–4), что объясняется растеканием капли из-за понижения $\nabla\sigma$, вызванного уменьшением испарения.

Для исследованных жидкостей скорости перемещения капель пучком света лежат в диапазоне величин от 0.1 мм/с до 1 см/с, где максимальные значения достигаются в ацетоне, а минимальные – в бутаноле и водном растворе. Это связано с тем, что вязкость ацетона, влияющая на подвижность капли, в 2 раза меньше, чем бутанола, и в 10 раз – воды, а давление насыщенных паров в 40 и 10 раз больше соответственно (табл. 2).

Обнаружено, что капли, инкапсулированные в воздушные пузырьки, тоже можно перемещать пучком света (фиг. 6, а). Здесь механизм движения сложнее, поскольку пузырек движется за пучком под действием термокапиллярных сил на его облучаемой боковой поверхности [20], а капля в пузырьке – под действием концентрационно-капиллярных сил (фиг. 6, б).

Слияние капель. Течение в микромасштабе, как правило, имеет ламинарный характер, поэтому смешивание жидкостей в лабораториях на чипе осуществляется только за счет диффузии, но этот процесс недостаточно эффективный [6, 19]. Интенсификация смешивания путем создания турбулентного режима течения требует большого расхода жидких реагентов, что противоречит основному требованию, предъявляемому к таким лабораториям – минимальное потребление реагентов. Эффект перемешивания капель при их слиянии может стать основой нового подхода к решению проблемы смешивания в микрофлюидике.

Впервые удалось продемонстрировать процесс слияния двух капель на твердой подложке с помощью пучка света, которое осуществлялось следующим образом. Сначала в пленку раствора проецировали пучок света, вызывая осесимметричное концентрационно-капиллярное течение, под действием которого формировалась первая капля. Затем пучок света резко смещали относительно капли на расстояние до 2–3 его диаметров и



Фиг. 7. Слияние двух капель (а–з): *l* – граница проекции пучка света на пленку раствора; интервал между первым и последним кадром – 0.36 с

формировали вторую каплю. При достижении второй каплей требуемого размера ее перемещали к первой капле. После приведения капель в контакт происходило их слияние.

Последовательность снимков процесса слияния капель диаметрами 130 и 200 мкм, созданных поочередно в пленке раствора иода в этаноле с концентрацией 60 г/л под воздушным пузырьком в ячейке с $h = 10$ мкм, показана на фиг. 7. Длительность процесса слияния в таком случае составляла 0.36 с, а в [6] смешивание двух капель объемами 1.4 мкл каждая, осуществляемое электрокапиллярным способом с помощью линейки электродов, занимало 4.6 с. Увеличение числа электродов и изменение их расположения под подложкой с целью повышения контроля позволило снизить время смешивания лишь до 2.9 с.

Процесс слияния капель сопровождается эффективным перемешиванием жидкости, поскольку в капле, ведомой пучком света, существует конвективный тороидальный вихрь, и это конвективное движение складывается с течением жидкости, обусловленным перетеканием капель друг в друга под действием растущего капиллярного давления капли-донора.

Заключение. Экспериментально продемонстрирована возможность использования явления концентрационно-капиллярной конвекции, управляемой тепловым действием пучка света, открытой Б.А. Безуглым еще более 30 лет назад как уникального инструмента для манипуляции каплями в микромасштабе. С использованием этого явления последовательно выполнены такие типы манипуляции жидкостью как создание капель из сплошной жидкой пленки и их перемещение, а также образование капли в воздушном пузырьке, зажатом в ячейке, и ее перемещение с пузырьком как целого. Впервые осуществлено слияние капель с последующим их перемешиванием за время на порядок меньше, чем электрокапиллярным способом.

Кроме того, все манипуляции выполнены без применения микронасосов и без создания сложной архитектуры подложек как в способе, основанном на оптоэлектросмачивании.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 04-01-00493).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jensen A., Lee A.* The science and applications of droplets in microfluidic devices // *Lab on Chip*. 2004. V. 4. № 1. P. 31, 32.
2. *Torkelli A.* Droplet based microfluidics on a planar surface: PhD thesis. Helsinki Univ. Technol., 2003. (URL: www.vtt.fi/inf/pdf) 194 p.
3. *Kataoka D.E., Troian S.M.* Patterning liquid flow on the microscopic scale // *Nature*. 1999. V. 402. № 6763. P.794–797.
4. *Darhuber A.A., Valentino J.P., Davis J.M., Troian S.M., Wagner S.* Microfluidics actuation by modulation of surface stresses // *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 82. № 4. P. 657–659.

5. Pollack M.G., Shenderov A.D., Fair R.B. Electrowetting-based actuation of droplets for integrated microfluidics // *Lab on Chip*. 2002. V. 2. № 2. P. 96–101.
6. Paik P., Vamsee K.P., Famula K., Richard B., Fair R.B. Rapid droplet mixers for digital microfluidic systems // *Lab on Chip*. 2003. V. 3. № 4. P. 253–259.
7. Chiou P.Yu., Moon H.J., Toshiyoshi H. et. al. Light actuation of fluid by optoelectrowetting // *Sensors and Actuators*. 2003. V. A 104. P. 222–228.
8. Kotz K.T., Noble K.A., Faris G.W. Optical microfluidics // *Appl. Phys. Lett.* 2004. V. 85. № 13. P. 2658–2660.
9. Ishimura K., Oh S.K., Nakagawa M. Light-driven motion of liquids on a photoresponsive surface // *Science*. 2000. V. 288. № 5471. P. 1624–1626.
10. Безуглый Б.А., Галашин Е.А., Дудкин Г.Я. О фотоконденсации иода // *Письма в ЖЭТФ*. 1975. Т. 22. № 2. С. 76–79.
11. Безуглый Б.А. Капиллярная конвекция, управляемая тепловым действием света и ее применение в способах регистрации информации: Дис. на соискание учен. степени канд. физ.-мат. наук. М., 1983. 267 с.
12. Bezuglyi B.A. Photoinduced solutocapillary convection: New capillary phenomenon // *Rev. Proc. 1st Intern. Symp. Hydromech. Heat/Mass Transfer Microgr. Berkshire: Gordon and Breach*, 1992. P. 335–340.
13. Thompson J. On certain curious motions observable at the surfaces of wine and other alcoholic liquors // *Phil. Mag. Ser. 4*. 1855. V. 10. P. 330–333.
14. Skogen N. Increase of surface tension of certain solutions when brought into contact with hot gases // *Amer. J. Phys.* 1958. V. 26. № 1. P. 25–27.
15. Faghri A. Heat pipe science and technology. Washington: Tylor and Franscis, 1995. 874 p.
16. Варгафтик Н.Б. Справочник по термодинамическим свойствам жидкостей. М.: Физматгиз, 1963. 708 с.
17. Безуглый Б.А., Иванова Н.А., Чанпаров Ф.Х. Способ разделения и дозирования компонентов бинарных смесей // *РФ Патент 2191055 // Б.И.* 2002. № 29.
18. He M.G., Sun C.H., Chiu D.T. Concentrating solutes and nanoparticles within individual aqueous microdroplets // *Anal. Chem.* 2004. V. 76. P. 1222–1227.
19. Tice J.D., Song H., Lyon A.D., Ismagilov R.F. Formation of droplets and mixing in multiphase microfluidics at low values of the Reynolds and the capillary numbers // *Langmuir*. 2003. V. 19. № 22. P. 9127–9133.
20. Безуглый Б.А., Иванова Н.А. Манипуляция газовым пузырьком в ячейке Хеле–Шоу с помощью пучка света // *Письма в ЖТФ*. 2002. Т. 28. № 19. С. 71–75.

Тюмень

Поступила в редакцию
7.VI.2005