

Ю.К. Стишков

ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ПРИ ПОМОЩИ НЕЛИНЕЙНОГО ОПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

*НИИ радиофизики СПбГУ,
ул. Ульяновская д.1, 198904, г. С-Петербург, Россия*

1. Введение

Для исследования ЭГД-процессов многие исследователи использовали оптические методы, связанные с изменением оптических свойств жидкости в процессе ЭГД-течения за счет джоулева либо внешнего нагрева жидкости. Изучая оптические характеристики различных областей заряженной жидкости можно получить новую информацию о поведении жидких диэлектриков в сильных электрических полях. В отличие от метода визуализирующих включений, при использовании которого неизбежно внесение в жидкость инородных примесей, в случае использования оптических методов исследования и малых тепловых возмущениях внешнее воздействие на исследуемую среду практически неощутимо.

2. Нелинейные оптические эффекты

Настоящая работа посвящена применению оптикоэлектродинамического эффекта [1, 2] для исследования ЭГД-процессов.

Одной из основных причин нелинейного взаимодействия света со средой является изменение диэлектрической восприимчивости среды под действием проходящей световой волны. Самодефокусировка света связана с нелинейным расплыванием высокоинтенсивного светового пучка, распространяющегося в нелинейной среде, показатель преломления которой уменьшается с ростом интенсивности поля. Так, например, лазерный луч, проходя через среду, нагревает ее, что приводит к изменению свойств среды: она становится подобна тепловой отрицательной (рассеивающей) линзе, в результате чего луч лазера расфокусируется. Угол дефокусировки лазерного луча, весьма малой мощности (10 мВт), при просвечивании слоя трансформаторного масла толщиной 0,1 м достигает 10^{-3} рад. Теоретический анализ эффекта тепловой самодефокусировки, приведенный в [1], определяет выражение для максимального угла дефокусировки лазерного луча в виде

$$\beta_m = \frac{l}{n} \frac{\partial n}{\partial r} = \frac{A \rho_0 \alpha (n^2 + 2)^2 W r_0}{12 \pi n^2 \lambda}, \quad (1)$$

где W – мощность лазера; n – показатель преломления; r_0 – радиус лазерного луча; ρ_0 – плотность среды; α – коэффициент объемного расширения; λ – коэффициент теплопроводности. Считается, что распределение интенсивности света в нормальном сечении луча однородно. В реальных лазерах чаще всего имеет место гауссово распределение амплитуды. В отличие от случая, рассмотренного в [1], когда максимальное значение угла дефокусировки достигалось при $r=r_0$, в пучке с гауссовым распределением интенсивности максимальное значение угла дефокусировки β_m смещено внутрь луча и в результате этого для любого угла дефокусировки $\beta < \beta_m$ имеются два луча, интерференция которых дает кольцевую структуру нормального сечения луча в дальней зоне.

3. Исследование ЭГД-процессов при помощи нелинейного оптического эффекта

Кювета с жидкостью представляет кубический сосуд из органического стекла размерами $10 \cdot 10 \cdot 10 \text{ см}^3$ с торцевыми стенками из оптического стекла. Электрическое поле создается электродами – алюминиевым проводом над плоской медной пластиной, размещенными в кювете (рис. 1). Межэлектродное расстояние может изменяться в пределах от 1 до 18 мм. Исследования проводились в трансформаторном масле в смеси с бутанолом в соотношении 1:10 – жидкости, где ЭГД процессы изучены наиболее полно. Луч лазера ЛГ-52 (мощностью 5 мВт) пропускается через кювету параллельно цилиндрическому электроду и падает на матовый экран Э, установленный на базовом расстоянии l_1 от кюветы. Геометрические яркостные характеристики пятна на экране исследуются при помощи телекамеры и системы обработки телевизионного изображения, состыкованной с ЭВМ. Мощность лазера измеряется измерителем мощности и энергии лазерного излучения. Высокое напряжение в диапазоне (0,1–30) кВ создается при помощи ВВУ и генератора сигналов специальной формы (меандр, пила). Угол дефокусировки, а также яркостные характеристики изображения луча на экране определяются путем последующей компьютерной обработки изображения пятна на экране. Одной из основных причин снижения степени дефокусировки лазерного луча, прошедшего через слабопроводящую жидкость, подверженную воздействию электрического поля в системе неизолированных электродов, является ЭГД течение, приводящее к изменению механизма теплопроводности от молекулярного к конвективному. Как отмечалось ранее, при мощности 5–10 мВт нормальное сечение луча на экране представляет систему из двух интерференционных колец с темной сердцевинкой.

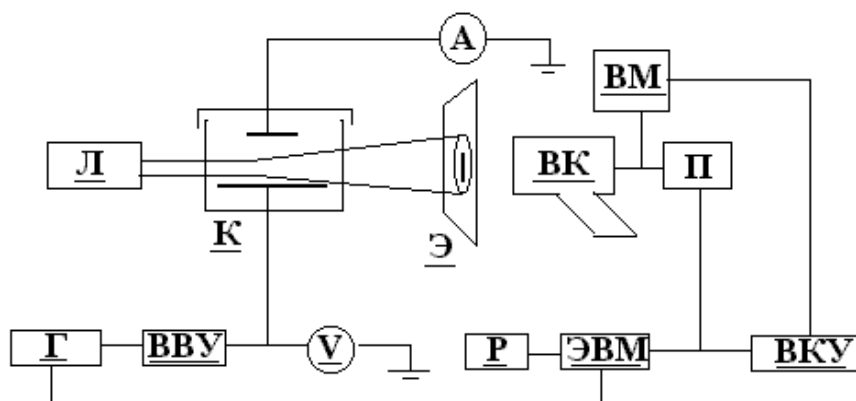


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

4. Результаты исследования при наличии ЭГД-течения

На рис. 2 (в порядке слева направо) приведены последовательные во времени стадии изменения геометрических и яркостных характеристик луча при включении электрического напряжения 2 кВ (вверху), 4 (в середине) и 8 кВ (внизу). Длительность кадра составляет 0,04 с. Как видно из фотографий и наблюдений, воздействие до пороговых напряжений не приводит к изменению размеров и структуры луча. В послепороговой области воздействие электрического поля весьма существенно и очень быстро нарастает с ростом приложенного напряжения. Следует заметить, что при помощи нелинейного оптического эффекта можно весьма точно определить пороговое напряжение. Это связано с тем, что механизм теплопроводности, определяющий угол дефокусировки луча, изменяется с молекулярного на конвективный. Непосредственно в послепороговой области (см. рис. 2, вверху) воздействие электрического поля слабо. Через 0,12 с после подачи напряжения верхняя, ближняя к электроду часть кольцевой структуры затемняется и истончается. В последующие 2–3 с этот процесс весьма ощутим, а затем происходит восстановление первоначально симметричной кольцевой структуры поперечного сечения луча. При повышении напряжения до 4 кВ время воздействия снижается и в течение 0,08 с кольцевая структура вырождается в светлое круговое овальное пятно неправильной формы. По центру пятна проходит (на кадре 3 в верхней части, на кадре 4 в нижней части пятна) темная полоса. Далее (кадры 5–9) пятно обрезано в нижней части. В установившемся режиме (кадр 10) круговая симметрия восстанавливается, однако диаметр пятна близок к диаметру луча, не прошедшего жидкость (эффект дефокусировки очень мал). При отключении напряжения (см. рис. 3) картина иная, в течение 4–10 с без изменения внутренней структуры

пятна происходит медленное плавное восстановление диаметра кольца до первоначальных размеров.

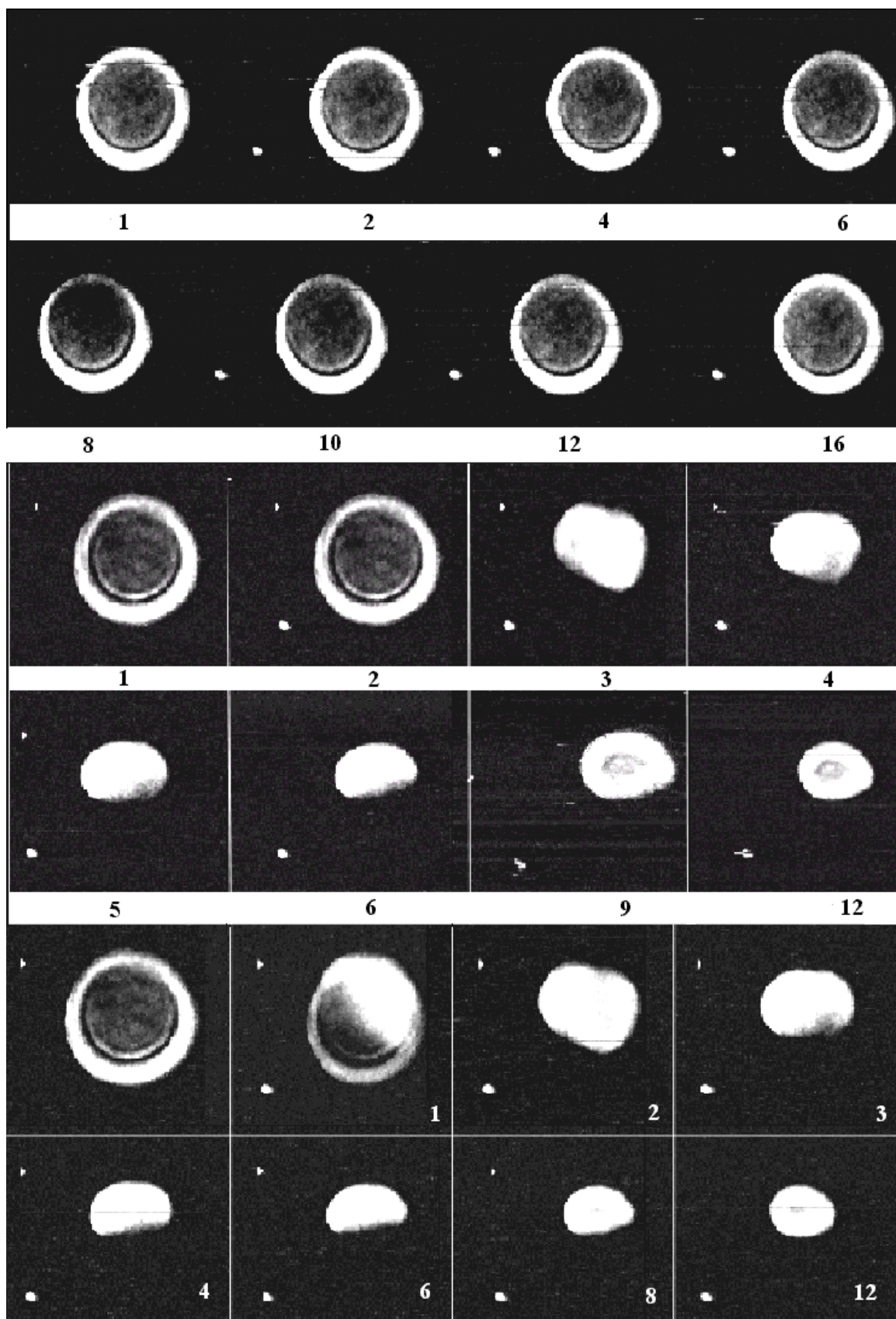


Рис. 2. Видеокдры луча в режиме ЭГД-течения (2, 4, 8 кВ).

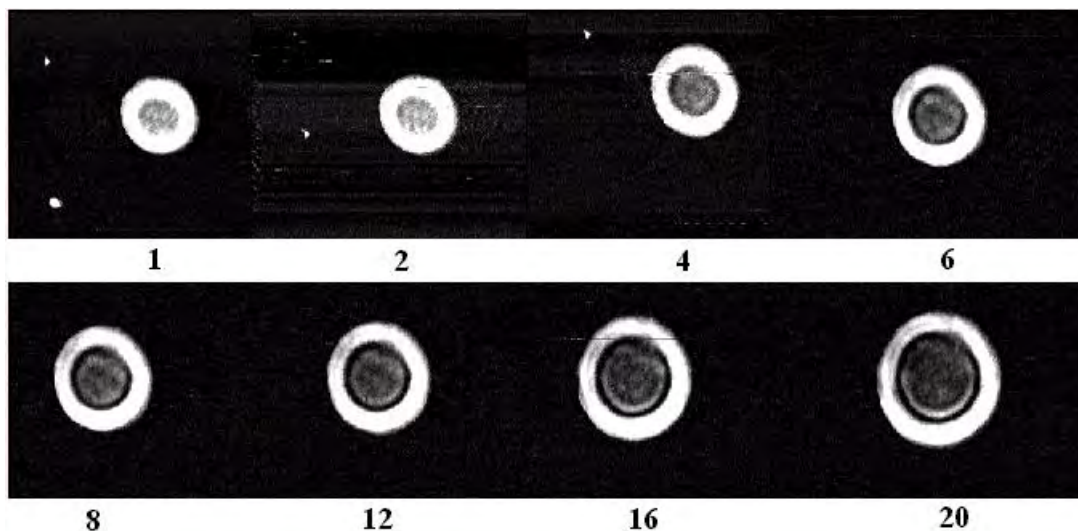


Рис. 3. Выключение напряжения.

Теория нелинейного оптического эффекта в движущейся среде [3] основана на изменении механизма теплопроводности с молекулярного на конвективный и разработана для случая одномерного бокового обдува области локализации лазерного луча. Вклад конвективного механизма теплообмена оценивается, как обычно, при помощи числа Пекле. При малых числах Пекле вклад конвективного механизма мал, а при больших вынос тепла из области, просвечиваемой лучом, становится существенным, в среде появляется оптический клин и пучок смещается на угол, обратно пропорциональный скорости обдува. Таким образом кольцевая структура пятна переходит в эллиптическую. Как видно из анализа рис. 2 и 3, в случае ЭГД-течений картина иная.

5. Структурные особенности заряженной жидкости

При помощи чисто гидродинамического фактора невозможно объяснить все особенности ОЭГД эффекта, изложенные в [2]: невозможно объяснить механизм длительной релаксации пятна при отключении напряжения, не поддается интерпретации ярко выраженная анизотропия свойств жидкости на периферийных участках ЭГД ячейки, остается непонятной природа оптической анизотропии в центре ЭГД завихрений, где скорость ЭГД течения очень мала. Единственной причиной, способной объяснить эти особенности, является возможное молекулярное структурирование жидкости электрическим объемным зарядом.

В [5–7] отмечалось, что некоторые характерные особенности электролитов и жидких диэлектриков, появляющиеся в электрическом поле, вероятно, связаны с процессами структурирования жидкости под влиянием электрического объемного заряда. Многочисленные исследования посвящены структурным особенностям электролитов, в которых подробно рассматриваются так называемые сольватные оболочки (в случае неводных растворов электролитов) и гидратационные оболочки (в водных растворах электролитов), а также различные модели описания “ионных атмосфер” [8]. В результате процесса сольватации в растворе должны присутствовать не свободные ионы, а ионы с сольватной оболочкой. Еще в 1954 году Бокрис и Конвей установили, что подобные структуры, как правило, содержат первичную и вторичную оболочки. В первую включены молекулы растворителя, прочно связанные с ионом и перемещающиеся вместе с ним. Во вторичную оболочку входят все молекулы воды, состояние которых отличается от их состояния в чистом растворителе. Для многих электрохимических процессов важно знать, сколько молекул растворителя входит во внутреннюю сольватную оболочку. Сольватные оболочки содержат весьма ограниченное количество молекул, как правило, порядка одного-двух десятков [9].

Наряду с сольватацией и гидратацией ионов большое внимание уделялось изучению “ионной атмосферы”. Основная идея построения “ионной атмосферы” принадлежит Дебаю и Гюккелю, предположившим, что в растворе сохраняется присущее кристаллам распределение ионов, при котором каждый из них окружен преимущественно ионами противоположного знака. Однако в растворах, в отличие от кристаллов, тепловое движение ионов приводит к тому, что они не сохраняют своего фиксированного положения в узлах кристаллической решетки, а

располагаются вокруг выбранного центрального иона в виде сферы, причем непрерывно обмениваясь местами друг с другом. Все ионы раствора равноправны, каждый из них окружен “ионной атмосферой” и в то же время каждый центральный ион входит в состав “ионной атмосферы” какого-либо другого иона. Размер “ионной атмосферы” ограничен радиусом Дебая.

Принято считать, что в электролитах нет пространственно распределенного заряда. Размеры сольватных оболочек малы ввиду отсутствия избыточного объемного заряда, “ионная атмосфера” ограничивает размер сольватных оболочек.

В случае обычных незаряженных изотропных жидкостей со стержневидными молекулами с помощью рентгенографического анализа Стюартом были обнаружены группировки с упорядоченным расположением молекул, названные “сиботаксическими группами” или “роями” [6]. Образование “сиботаксических групп” согласуется с теорией Френкеля, в которой жидкость по своему строению находится ближе к кристаллам, чем к газам и сохраняет так называемый “ближний порядок”, то есть вблизи каждой молекулы наблюдается некоторое упорядоченное расположение соседей. Причем для жидкостей со стержнеобразными молекулами с увеличением длины молекул упорядоченность возрастает.

Характерными особенностями слабопроводящих сред является наличие электрического объемного заряда и малая проводимость. Возможно, структуры в таких средах формируются из имеющихся в жидкости сиботаксических групп, формирующим центром которых является ион, образующий облако электрического объемного заряда и укрепляющий существующую в жидкости сиботаксическую структуру. Молекулярная теплопроводность заряженной структурированной среды, которая связана с показателем преломления, может существенно отличаться от подобной характеристики изотропной незаряженной жидкости. Поэтому в случае заряженной жидкости угол дефокусировки лазерного луча зависит от плотности электрического объемного заряда и при наличии неоднородной плотности заряда в различных направлениях может наблюдаться анизотропия нелинейных оптических свойств заряженной жидкости.

6. Результаты исследований в частично-изолированной системе электродов

Далее изложены результаты экспериментов в частично изолированной системе электродов, позволяющей устранить влияние гидродинамического фактора на эффект нелинейной дефокусировки лазерного луча, сохранив фактор структурирования жидкости электрическим объемным зарядом. Экспериментальное исследование проводилось в системе электродов: неизолированный электрод (открытый), представляющий собой алюминиевый провод – изолированный электрод (закрытый), представляющий медную проволочку, покрытую полиэтиленовой трубкой. Проводимость полиэтилена в области высоких напряжений не менее 10^{-16} (Ом·м)⁻¹, что, по крайней мере, на четыре порядка меньше, чем проводимость исследуемой смеси трансформаторного масла с бутанолом. Подобная система электродов дает возможность сохранить инжекцию электрического объемного заряда в жидкость, устранив ЭГД течения и тем самым исключив воздействие конвективного механизма теплообмена на эффект нелинейной дефокусировки лазерного луча. Частично изолированная система электродов характеризуется отсутствием сквозного тока через жидкость. Отсутствие ЭГД течения проверялось методом визуализирующих частиц с помощью пузырьков воздуха диаметром около 10 мкм. Столь маленькие пузырьки в течение длительного времени остаются практически неподвижными и позволяют судить о наличии или отсутствии гидродинамических процессов в жидкости.

В системе с изолированным высоковольтным электродом при включении напряжения электрический объемный заряд инжектируется в жидкость, причем фронт объемного заряда в неподвижной жидкости распространяется от неизолированного электрода к изолированному путем миграции. После прохождения через жидкость фронта электрического заряда облако отрицательного заряда концентрируется преимущественно вокруг изолированного электрода, а поток заряда через жидкость ослабевает. Нестационарный процесс, как показывают расчеты, может длиться достаточно долго, в течение времени, по порядку величины соответствующем характерному времени молекулярной диффузии. Переходные процессы при включении напряжения исследовались в различных областях межэлектродного промежутка (у изолированного, у неизолированного электродов, в середине межэлектродного промежутка). Основной характеристикой нелинейного оптического эффекта является изменение угла дефокусировки лазерного луча. На рис. 4 приведены последовательные стадии нелинейного электрооптического эффекта в системе частично изолированных электродов после включения напряжения. Переходной процесс в рассматриваемом случае имеет выраженные индивидуальные особенности. Это, прежде всего,

выраженный нестационарный характер, ярко выраженная анизотропия свойств жидкости, длительная релаксация (порядка 4 часов), переход на некоторых стадиях от эффекта дефокусировки лазерного луча к фокусировке. Экспериментально установлено, что эффект снижения степени дефокусировки лазерного луча в частично изолированной системе электродов носит пороговый характер. При изменении напряжения до некоторого порогового значения электрическое поле не изменяет угол дефокусировки лазерного луча, тогда как при $U > U_{\text{пор}}$ уменьшение угла дефокусировки становится ощутимым. Рассмотрим рис. 4. В данном эксперименте было подано напряжение $U = 4-5$ кВ, продолжительность процесса составила примерно 4 часа. Из рисунка видно, что в процессе релаксации изменяется форма пятна, от кольцевой к серповидной и происходит разворот серповидной структуры пятна против часовой стрелки, в ходе которого, примерно к середине процесса форма пятна, в целом серповидная, претерпевает изменения. Серп теряет симметрию, изменяется в линейных размерах, при этом сильно изменяется интенсивность светового луча в различных участках среды. Причину этого процесса следует искать в изменении теплопроводности в различных участках неоднородно заряженной жидкости, попадающей в область распространения лазерного луча. При этом согласно формуле (1) показатель преломления среды обратно пропорционален коэффициенту теплопроводности λ , который в свою очередь зависит от локальной плотности объемного заряда в жидкости. Обычно в экспериментах по ЭГД эффектам скорость ЭГД течений в 10–20 раз выше скорости миграции ионов. Как видно из рис. 2, в неизолированной системе электродов (при наличии ЭГД течений) скорость изменения угла дефокусировки была также более чем на порядок выше, чем в экспериментах в неподвижной жидкости (рис 4). Таким образом, изменение механизма теплопроводности заряда от конвективного к миграционному сопровождается уменьшением скорости изменения угла дефокусировки и появлением сильно выраженной анизотропии нелинейного показателя преломления. Из численных экспериментов с ЭГД системами известно, что для них характерна выраженная неоднородность в распределении объемного электрического заряда, особенно в приэлектродных областях, что должно привести к выраженной анизотропии угла дефокусировки лазерного луча, особенно заметной в неоднородных электрических полях и в частично изолированной системе электродов. Следует отметить, что одним из фундаментальных свойств незаряженной жидкости является изотропность ее механических, теплофизических и оптических свойств. Появление анизотропии оптических свойств в электрическом поле является свидетельством нарушения однородности заряженной среды за счет появления в ней надмолекулярных структур.

7. Компьютерная обработка экспериментальных данных

Для обработки фотографий, в среде MatCad была разработана программа, преобразующая изображение луча в матрицу значений яркости. Для анализа процесса воздействия ЭГД-течений программа проводит некоторые вычисления: из матрицы значений каждого последующего кадра вычитается матрица значений предыдущего кадра. В программе предусмотрена возможность анимации полученных данных. На рис. 5 в порядке сверху вниз представлены поверхностные графики последовательности кадров видеозаписи, изображенные на рис. 2 в середине для напряжения 4 кВ. Левая последовательность фигур представляет преобразованный ряд кадров (номера кадров указаны в подрисуночной надписи), правая последовательность фигур получена путем вычитания матриц значений яркости двух последующих кадров. Таким образом правая последовательность фигур отражает изменения поля яркости луча за время между двумя соседними кадрами (длительность кадра -0,04 с). Как видно из последовательности фигур (рис. 5) наиболее существенные изменения происходят непосредственно после включения напряжения, за время не превышающее 0,04 с, то есть происходит преобразование первоначально кольцевой структуры дефокусированного луча в овальную с одновременным уменьшением характерного размера пятна. За последующее время изменения более плавные и заключаются в постепенном восстановлении кольцевой структуры (кадр 12), при меньшем радиусе. На промежуточных стадиях, как видно из кадров правого ряда, происходят существенные блуждания центра симметрии фигуры.

На рис. 6 приведены поверхностные графики яркости луча в режиме частично-изолированных электродов. Графики в порядке сверху вниз соответствуют видеокадрам рис. 4. В левом ряду результаты прямого преобразования видеок кадров в поверхностный график яркости, в правом ряду результаты, полученные путем вычитания матриц значений яркости двух последующих кадров. Таким образом правая последовательность фигур отражает

изменения поля яркости луча за время между двумя соседними кадрами, номера которых указаны в подрисуночной подписи.

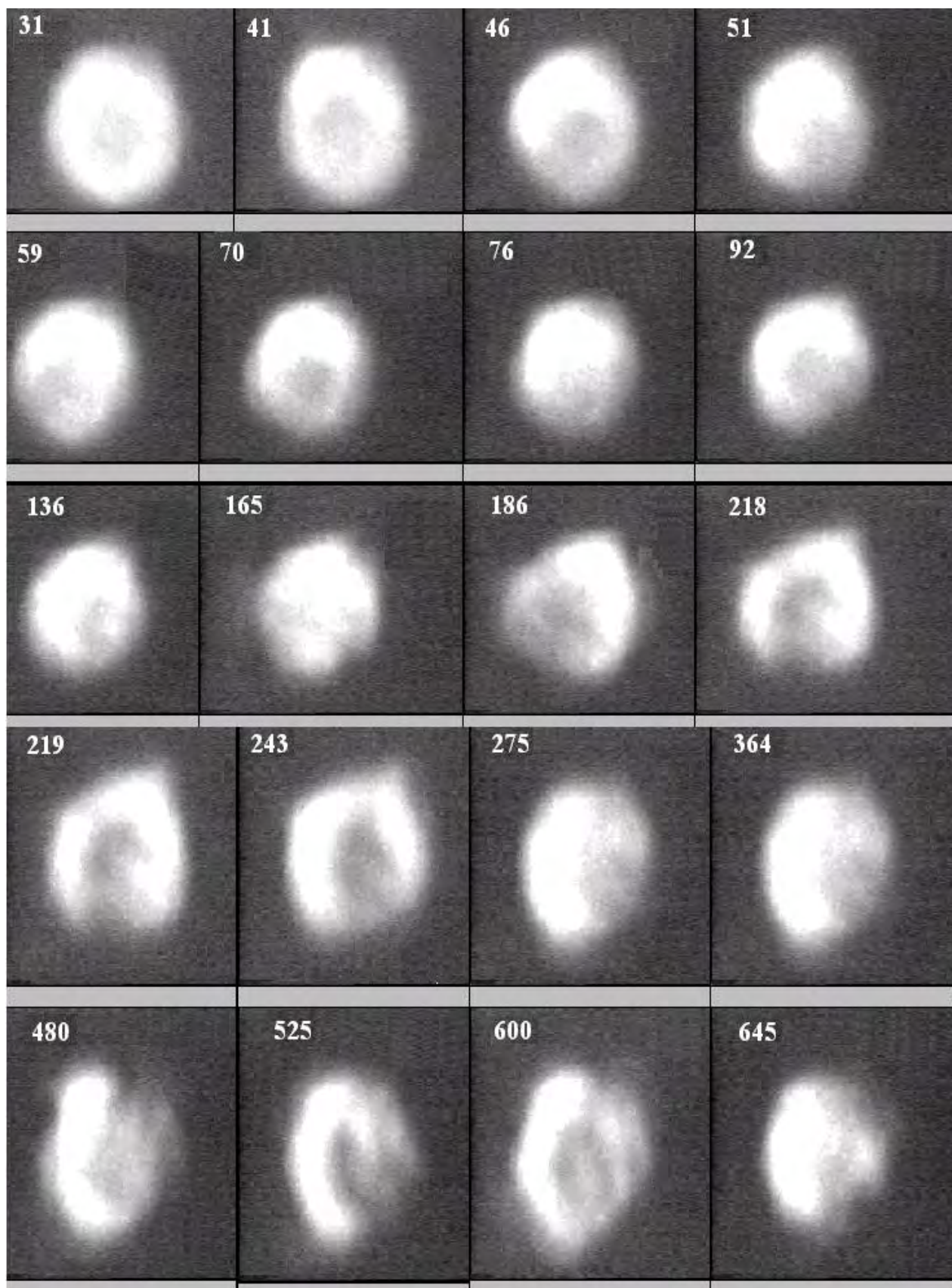
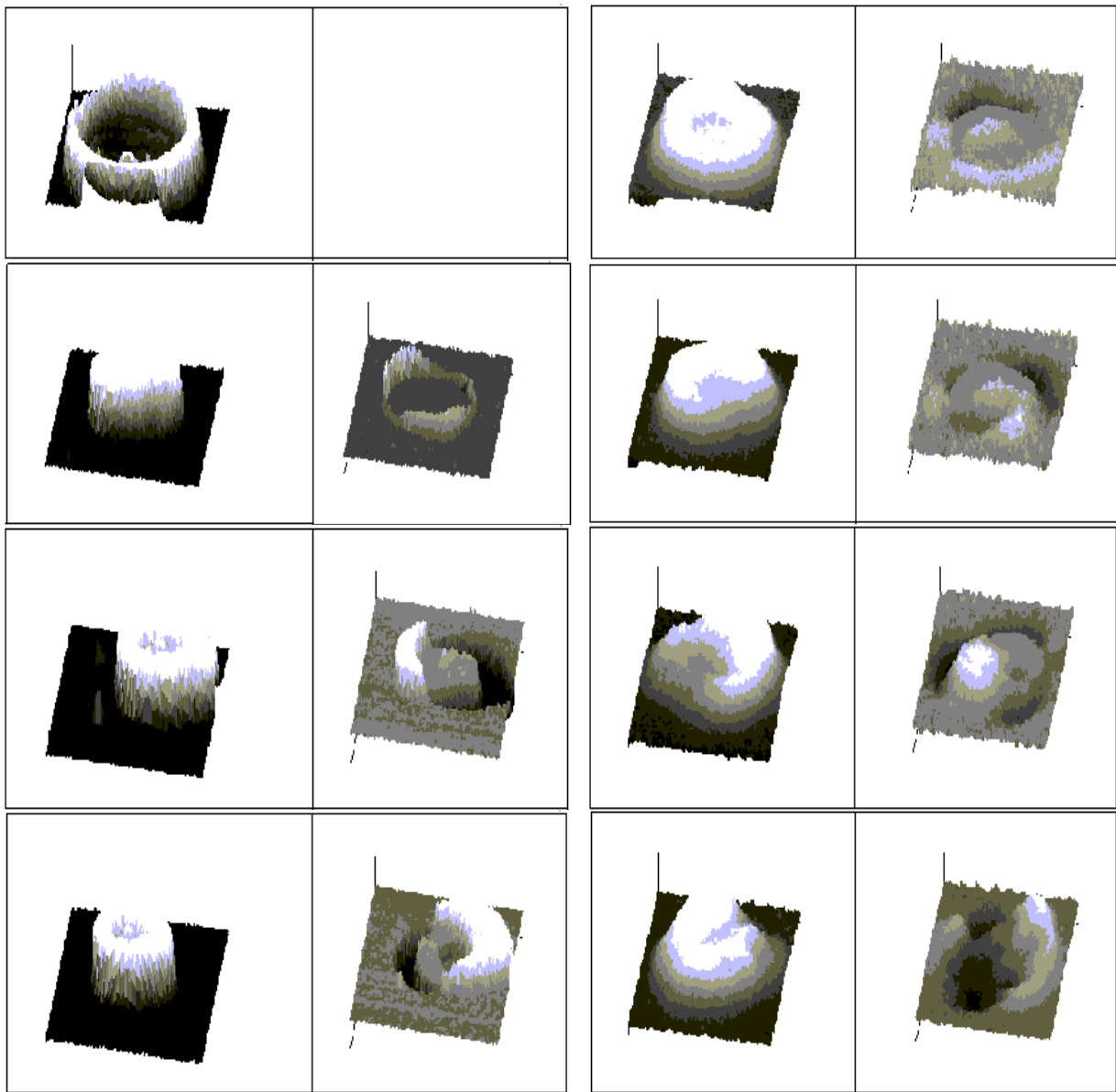


Рис. 4. Частично-изолированные электроды, включение напряжения к.30, длительность кадра 0,04 с.



*Рис. 5. Поверхностные графики яркости луча.
Кадры 2, 3, 5, 9, 12 рис 2, $U = 4$ кВ.*

*Рис. 6. Поверхностные графики яркости
луча. Кадры 31, 41, 61, 92, 186.*

Одним из фундаментальных свойств жидкости является изотропность ее физических свойств. Под воздействием сильного электрического поля жидкость становится оптически анизотропной, в жидкости появляется электрический объемный заряд и возникают ЭГД течения. Это определяет два возможных физических механизма реализации нелинейного ОЭГД эффекта: гидродинамический и структурный (образование надмолекулярных структур в поле ионов, образующих электрический объемный заряд).

Анализ экспериментальных результатов по нелинейному электрооптическому эффекту в системе частично изолированных электродов, позволившей устранить гидродинамический фактор, выявил ряд характерных особенностей: а) изменение нелинейных оптических свойств жидкости при включении напряжения включает быструю и медленную стадии; б) релаксация нелинейных оптических свойств при отключении напряжения включает также быструю и медленную стадии, время релаксации достигает нескольких часов. Сопоставительный анализ нелинейного ОЭГД эффекта в системе неизолрированных электродов с электрооптическим эффектом в частично изолированной системе электродов позволил установить взаимосвязь основных особенностей эффектов с механизмами распространения объемного электрического заряда в жидкости при включении и выключении напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Картошкин П.Б., Миротворский В.О., Стишков Ю.К. Нелинейный оптико-электрогидродинамический эффект в жидких диэлектриках // Вестник С.-Петербургского ун-та, Сер. 4. 1994. Вып. 4. С. 10–16.
2. Картошкин П.Б., Миротворский В.О., Стишков Ю.К. Нелинейный оптико-электрогидродинамический эффект в жидких диэлектриках // Электронная обработка материалов. 1995. № 2.
3. Сухоруков А.П. Дифракция световых пучков в нелинейных средах. Соросовский образовательный журнал, 1996, 5. С. 85–92.
4. Stishkov Y.K. Space charge influence on non-linear beam defocusing. 1998 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Atlanta, OMNIPRESS USA. Vol. I. P. 170–174.
5. Labjwski M., Skrodzaka E. Theoretical and Experimental evaluations of electric field effect on the ultrasonic wave velocity in carbon tetrachloride // Acustica. 1989. V. 68. № 1. P. 26–32.
6. Скрышевский А.Ф. Структурный анализ жидкостей и аморфных тел // М., 1980.
7. Полторак О.М. Термодинамика в физической химии. М., 1991.
8. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. М., 1969.
9. Чижик В.И. Ядерная магнитная релаксация / Уч. пособие. Л., 1991.
10. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. Л., 1975.

Поступила 20.01.2000

Summary

A new method of investigation for high voltage processes in liquid dielectrics by means of non linear optical effect is established. Non linear optical effect suggests warm defocusing of laser beam, passing through the area of liquid dielectric, which is located in strong electrical field. Two cases are described in the paper: in first case electrohydrodynamic currents are defining processes, which appear in liquid under high voltage. In the second case, the change of the defocusing level of the laser beam is a consequence of structurization-by-the-space-charge of ions. Ions are forming cloud of electrical space charge. Described method has high sensitivity and allows to identify the edge of EHD-currents formation. The paper describes results of computer processing of video raw for non linear optico electrohydrodynamic effect.

С.О. Ширяева, Ю.Б. Кузьмичев, А.С. Голованов, Д.Ф. Белоножко

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ КЕЛЬВИНА-ГЕЛЬМГОЛЬЦА ПРИ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЕ ВЕРХНЕЙ СРЕДЫ

*Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова,
ул. Советская, 14, г. Ярославль, 150000, Россия*

Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца заряженной границы раздела двух идеальных несмешивающихся жидкостей различных плотностей, каждая из которых заполняет полубесконечное пространство, а верхняя жидкость движется с постоянной скоростью U параллельно границе раздела, представляет интерес в связи с многочисленными приложениями в технической физике и химической технологии [1–8] и в этой связи достаточно подробно

© Ширяева С.О., Кузьмичев Ю.Б., Голованов А.С., Белоножко Д.Ф., Электронная обработка материалов, 2000, № 2, С. 25–33.