

03;07;12

Исследование образования приэлектродного объемного заряда в коллоидных растворах магнетита в жидких диэлектриках электрооптическим методом

© К.В. Ерин

Ставропольский государственный университет,
355009 Ставрополь, Россия
e-mail: exiton@inbox.ru

(Поступило в Редакцию 25 июня 2007 г.)

Исследована кинетика двойного лучепреломления в коллоидной системе магнетитовых частиц в керосине при воздействии импульсного электрического поля для случаев, когда луч света проходит вблизи поверхности электрода и в середине электрооптической ячейки. Обнаружено, что вблизи электрода нарастание эффекта двойного лучепреломления при включении поля имеет немонотонный характер. Полученный эффект интерпретирован образованием объемного заряда в приэлектродной области. По данным эксперимента оценены область локализации заряда и характерное время его образования.

PACS: 75.50.Mm, 42.68.Mj, 78.20.Ls

Введение

Процессы зарядообразования, электропроводимости и электроконвекции в жидких диэлектриках представляют значительный теоретический и экспериментальный интерес [1–3]. Понимание этих процессов особенно важно для исследования магнитных жидкостей (магнитных коллоидных систем на основе жидких диэлектриков). Это связано с тем, что при воздействии на магнитную жидкость электрического поля в последней наблюдаются такие эффекты, как образование и трансформация в поле различных упорядоченных структур из агрегатов частиц [4], сложный характер деформации микрокапельных агрегатов в электрическом поле [5], изменение цвета при отражении света от границы раздела электрод–магнитная жидкость [6], возбуждение в приповерхностном слое колебаний сложного вида [7], возбуждение в приповерхностном слое колебаний сложного вида [7], нарушение однородности в распределении электрического поля [8] и т.д. Трудности в интерпретации этих эффектов связаны с недостаточной информацией о природе проводимости и зарядообразования в приэлектродном слое, объеме магнитной жидкости и с изменением электрофизических свойств последней под действием поля. Классические методы исследования электрофизических свойств дисперсных систем, такие как измерение электропроводности и диэлектрическая спектроскопия, дают информацию лишь о объемных свойствах среды, заполняющей электрохимическую ячейку.

Для установления природы процессов, происходящих в приэлектродных слоях, необходимо делать различные, не всегда достаточно обоснованные, предположения о структуре и свойствах слоев. Использование оптических методов для изучения свойств приэлектродных слоев в магнитных жидкостях имеет широкие перспективы,

так как с помощью этих методов можно проводить измерения, аналогичные зондовым, и надежно фиксировать различие в свойствах магнитной жидкости в приэлектродном слое и объеме ячейки. В настоящей работе представлены результаты исследования кинетики образования приэлектродных слоев методом электрического двойного лучепреломления (ДЛП).

Экспериментальная часть

Для исследований электрического ДЛП использовалась оптическая установка, изображенная на рис. 1. Источником света был гелий-неоновый лазер ГН-2П, луч которого пропусклся через электрооптическую ячейку, помещенную между двумя скрещенными поляроидами. Ячейка с двумя плоскими алюминиевыми электродами, расположенными на расстоянии 3 мм друг от друга,

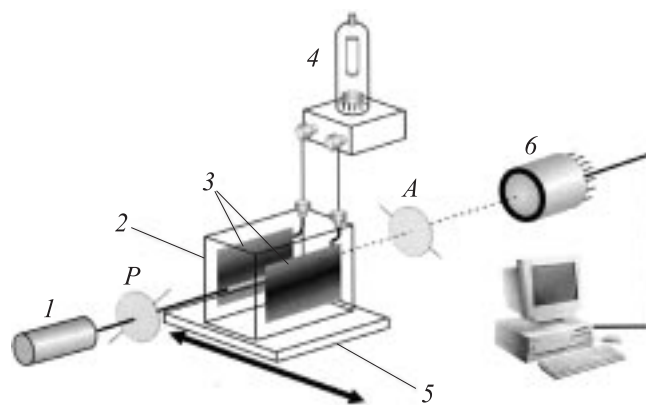


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — лазер, 2 — ячейка, 3 — электроды, 4 — формирователь импульсов высокого напряжения, 5 — подвижный столик, 6 — фотоэлектронный умножитель.

монтажировалась на подвижном столике таким образом, чтобы ее можно было перемещать поперек направления лазерного луча при помощи винта микрометрической подачи. Это позволяло направлять сфокусированный при помощи линзы (диаметром до 0.1 mm) луч лазера как вдоль каждого из электродов, так и на различных расстояниях от него. На электроды ячейки подавались импульсы высокого напряжения различной длительности от формирователя импульсов, изготовленного с применением высоковольтных электровакуумных триодов 6С40П. Регистрация сигнала ДЛП производилась при помощи фотоумножителя и аналого-цифрового преобразователя, встроенного в ЭВМ. Для обработки сигналов использовалась специально написанная программа, позволявшая выполнять многократные измерения с последующим усреднением результатов. Объектом исследований являлась магнитная жидкость типа магнетит в керосине в объемной концентрации твердой фазы 0.1%. Низкая концентрация магнетита была обусловлена необходимостью проведения оптических измерений в относительно толстых слоях. Такой концентрации образца добивались путем разбавления очищенным керосином исходной магнитной жидкости производства НИПИ Газпереработки (Краснодар) с концентрацией около 25%.

Основным параметром эффекта ДЛП является разность показателей преломлений необыкновенного и обыкновенного лучей $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$. При исследовании эффекта, как правило, измеряют интенсивность света, прошедшего через скрещенные поляризаторы, между которыми расположен двупреломляющий объект. Наиболее общая формула, описывающая интенсивность прошедшего света в этой конфигурации, предложена Г.Н. Хлебцовым [9]:

$$I = \frac{I_0}{2} (\exp(-\tau_{\parallel}) + \exp(-\tau_{\perp})) \times \left[\sin^2 \left(\frac{\delta}{2} \right) + \frac{\tau_{\parallel} - \tau_{\perp}}{16} \cos \delta \right], \quad (1)$$

где $\delta = \frac{2\pi l \Delta n}{\lambda}$ — разность фаз необыкновенного и обыкновенного лучей; l — длина пути света в ячейке; λ — длина волны света; τ_{\parallel} , τ_{\perp} — оптическая толщина среды для света, поляризованного вдоль и поперек поля соответственно. В случае, если дихроизмом системы можно пренебречь $\tau_{\parallel} = \tau_{\perp} = \tau$, формула (1) несколько упрощается:

$$I = I_0 \exp(-\tau) \sin^2 \frac{\delta}{2}. \quad (2)$$

Если изменение прозрачности системы под действием поля пренебрежимо мало, интенсивность света, прошедшего скрещенные поляризаторы, будет зависеть от разности фаз световых колебаний. Проведенные исследования показали, что в нашем образце в диапазоне электрических полей 0–2.5 MV/m изменением прозрачности в пределах ошибок эксперимента можно пренебречь, а разность фаз составляет достаточно малую величину.

При этом

$$I/I_0 \sim \Delta n^2. \quad (3)$$

Относительное значение разности показателей преломления рассчитывалось по измеренному экспериментально отношению интенсивностей прошедшего света при воздействии поля и в его отсутствие, с учетом паразитного ДЛП стенок электрооптической ячейки.

Результаты и их обсуждение

Исследование кинетики нарастания эффекта электрического ДЛП в импульсном электрическом поле показало, что в приэлектродном слое и в объеме ячейки характер нарастания эффекта при включении поля существенно разный. На рис. 2 показаны кривые нарастания эффектов для луча света, проходящего на различных расстояниях от электрода. В случае прохождения луча света вблизи электрода (т.е. через приэлектродный слой) (рис. 2, *a, b*) нарастание эффекта со временем происходит сложным немонотонным образом. По мере удаления луча от электрода (рис. 2, *c, d*) кривая нарастания эффекта принимает более простой монотонный вид, стремящийся к классической зависимости для электрооптических явлений в дисперсных системах [10].

Немонотонный характер увеличения ДЛП в приэлектродном слое при воздействии импульса электрического поля может быть объяснен образованием в приэлектродной области объемного заряда. Присутствующие в жидкой основе ионы, а также, вероятно, имеющие электрический заряд коллоидные частицы скапливаются в приэлектродных областях, образуя область объемного заряда. Благодаря наличию объемного заряда плотностью ρ в приэлектродной области изменяется значение напряженности электрического поля, согласно известному уравнению Пуассона:

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{4\pi\rho}{\varepsilon}. \quad (4)$$

Увеличение напряженности поля в приэлектродной области приводит к возрастанию эффекта ДЛП, который для случая слабых полей $\Delta n \sim E^2$ [10]. Однако образование объемного заряда происходит относительно медленно по сравнению со временем вращательной броуновской релаксации частиц, поэтому увеличение эффекта ДЛП, обусловленное объемным зарядом, происходит сложным образом. Первый максимум на кривой возрастания эффекта (рис. 2, *a*) соответствует ориентационному времени релаксации частиц и агрегатов, находящихся в жидкости. Это время составляет порядка 0.5 ms, что хорошо согласуется с данными [11]. По мере накопления свободного заряда в приэлектродном слое напряженность электрического поля в слое возрастает, и это приводит к существенному увеличению ДЛП. При достижении стационарной величины объемного заряда увеличение ДЛП прекращается, и эффект достигает насыщения. По времени, необходимому для

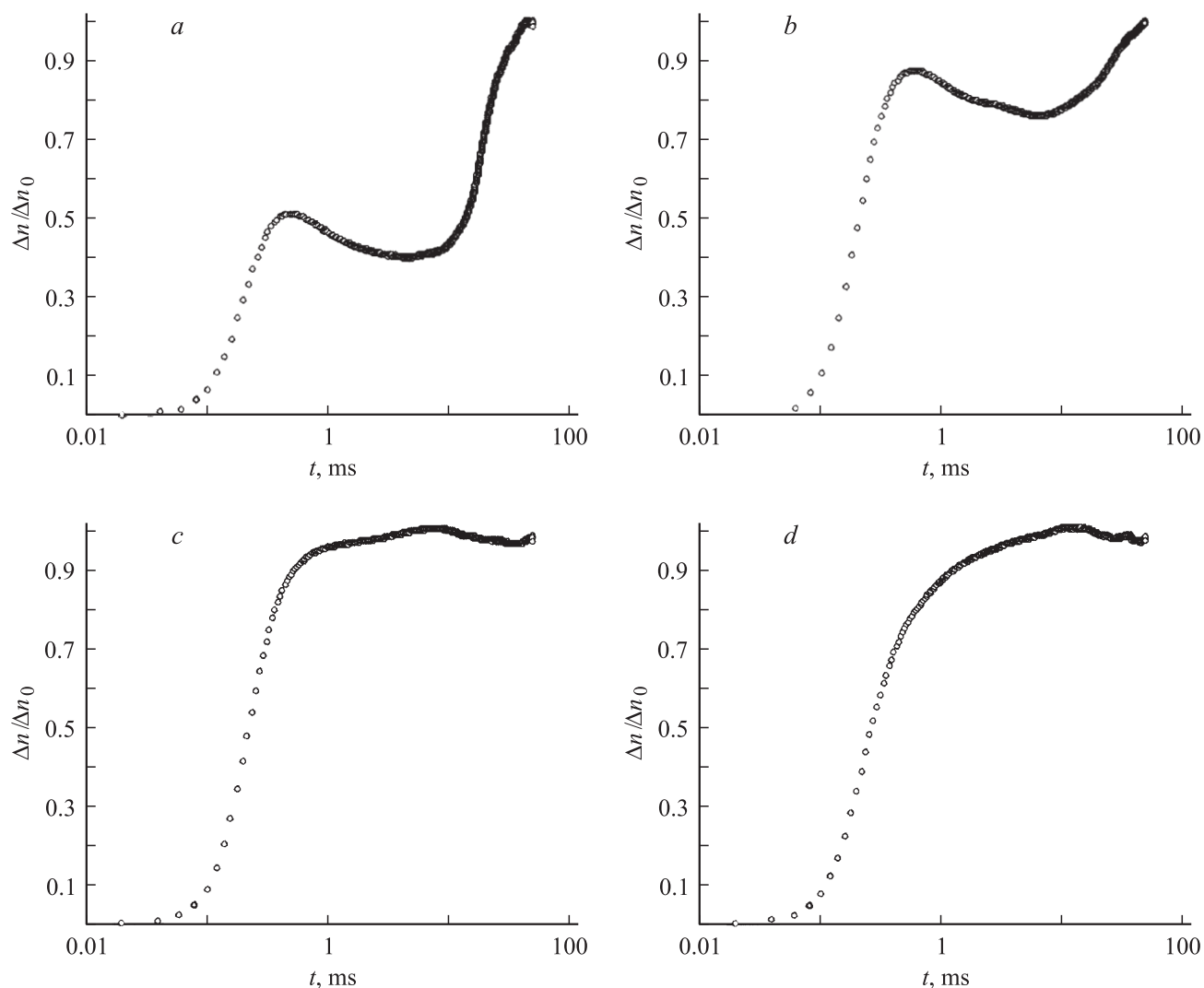


Рис. 2. Форма кривых нарастания эффекта ДЛП при включении электрического поля ($E = 0.8 \text{ MV/m}$) для лучей, проходящих на различных расстояниях от электрода: *a* — вдоль электрода; *b* — 0.1, *c* — 0.3; *d* — 1 mm.

достижения насыщения эффекта ДЛП в приэлектродной области (рис. 2, *a*), можно оценить характерное время образования объемного заряда. Оно составляет порядка 0.05–0.1 s. Наличие минимума на кривой возрастания эффекта может быть интерпретировано частичной экранировкой электрического дипольного момента частицы накапливающимися в приэлектродном слое свободными зарядами, а также накоплением вблизи поверхности электрода частиц магнетита, обладающих электрическим зарядом. По характеру кривых нарастания эффекта ДЛП, измеренных на различных расстояниях от электрода (рис. 2, *b–d*), можно оценить область локализации объемного заряда, которая составляет, по нашим данным, 0.2–0.3 mm (на расстоянии более 0.3 mm от электрода искажений в форме кривой нарастания эффекта ДЛП, обусловленных объемным зарядом, в пределах ошибки измерений не регистрируется). По данным работы [8], полученным по величине эффекта компенсации

оптической анизотропии в магнитных коллоидах в скрещенных электрическом и магнитном полях, эта величина имеет значение 0.25–0.4 mm.

Выводы

Методы электрического и магнитного двойного лучепреломления предоставляют большие возможности для исследования процессов проводимости и зарядообразования в жидких диэлектриках, содержащих магнитные коллоидные частицы. В частности, исследование кинетики электрического поля в магнитных коллоидных системах позволило уточнить область локализации объемного заряда в ячейке с магнитной жидкостью, которая оказалась в хорошем согласии с данными других экспериментов. Кроме того, было определено характерное время образования объемного заряда, знание которого позволит уточнить физические механизмы

электропроводности магнитных коллоидных систем на основе диэлектрических жидкостей.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по образованию в рамках ведомственной аналитической научно-технической программы „Развитие научного потенциала высшей школы“.

Список литературы

- [1] *Жакин А.И.* // УФН. 2003. Т. 173. Вып. 1. С. 51.
- [2] *Жакин А.И.* // УФН. 2006. Т. 176. Вып. 3. С. 289.
- [3] *Стишков Ю.К., Остапенко А.А.* Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках. Л.: ЛГУ, 1989. 176 с.
- [4] *Dikansky Yu.I., Nechaeva O.A.* // *Magnetohydrodynamics*. 2002. Vol. 38. N 3. P. 287.
- [5] *Диканский Ю.И., Нечаева О.А., Закиян А.Р.* // Коллоидн. журн. 2006. Т. 68. № 2. С. 161.
- [6] *Чеканов В.В.* // Тез. докл. V Всесоюзн. конф. по магнитным жидкостям. М.: МГУ, 1988. С. 126.
- [7] *Chekanov V.V., Pjuch P.M., Kandaurova N.V., Bondarenko E.A.* // *J. Magn. Magn. Matter*. 2005. Vol. 289. P. 155.
- [8] *Падалка В.В., Ерин К.В.* // Тез. докл. VII Междунар. конф. „Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей“. СПб: СПбГУ, 2003. С. 208.
- [9] *Хлебцов Н.Г.* Ослабление и рассеяние света в дисперсных системах с неупорядоченными, ориентированными и фрактальными частицами (теория и эксперимент). Автореф. докт. дис. Саратов, 1996. 556 с.
- [10] Электрооптика коллоидов / Под ред. С.С. Духина. Киев: Наук. думка, 1977. 200 с.
- [11] *Падалка В.В., Ерин К.В.* // Коллоидн. журн. 2001. Т. 63. № 3. С. 355.