

УДК 537.533.79:537.632.636:53.098:620.186:544.032.53

## ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ КАНАЛИРОВАНИИ КИЛОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

© 2020 г. М. Н. Шипко<sup>1</sup>, \*, М. А. Степович<sup>2</sup>, А. Л. Сибирев<sup>3</sup>, О. С. Мельникова<sup>1</sup>,  
А. И. Смирнова<sup>4</sup>, Н. В. Усольцева<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина”, Иваново, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Калужский государственный университет имени К.Э. Циолковского”, Калуга, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Ивановский государственный химико-технологический университет”, Иваново, Россия

<sup>4</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Ивановский государственный университет”, Научно-исследовательский институт наноматериалов,  
Иваново, Россия

\*E-mail: michael-1946@mail.ru

Поступила в редакцию 18.02.2020 г.

После доработки 16.03.2020 г.

Принята к публикации 27.03.2020 г.

Каналирование киловольтных электронов, проходящих через изотропный мицеллярный раствор поверхностно-активного вещества, использовано для изучения влияния слабых импульсов магнитного поля на ближний порядок в расположении молекулярных ассоциатов. Установлено, что магнитоимпульсная обработка этого раствора приводит к возникновению ближнего порядка мицеллярных структур. Полученные результаты указывают на возможность использования каналирования низкоэнергетических электронов для изучения особенностей влияния магнитоимпульсной обработки на ближний порядок в расположении атомов или молекулярных ассоциатов.

DOI: 10.31857/S0367676520070273

### ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению каналирования низкоэнергетических электронов через нанокристаллические и аморфные магнитные материалы связан с возможностью выяснения механизмов изменения их структурной организации на микро- и макроуровне после физических воздействий [1]. Известно, что магнитные свойства таких материалов зависят от позиционного порядка в расположении атомов, определяющего специфику их электронных состояний, и который может изменяться в процессе технологической обработки или при эксплуатации устройств на их основе [2]. Эти изменения можно фиксировать с определенной степенью достоверности с помощью электронной микроскопии, малоуглового нейтронного исследования, рентгеновских исследований и других методов [1]. Полученные указанными методами данные о структурной организации аморфных магнитных сплавов не всегда позволяют судить о взаимосвязи между параметрами ближнего порядка и основными или экзотическими свойствами материалов [1]. Учитывая, что

ближний порядок в аморфных средах весьма чувствителен к низкоэнергетическим воздействиям, представляет интерес выяснить особенности его изменения при слабых магнитоимпульсных воздействиях, которые испытывают магнитные материалы при их эксплуатации. Наиболее отчетливо изменения ближнего порядка при таких воздействиях могут проявляться в упорядочивающихся водных растворах поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые являются прекрасными моделями для изучения многих коррелированных процессов в аморфных материалах [3].

Действительно, коллоидные растворы ПАВ являются привлекательными объектами для изучения зависимости их физико-химических параметров от их структурной организации [4]. По данным физико-химических и структурных исследований, такие растворы и жидкокристаллические среды представляют совокупность молекулярных ассоциатов с различным позиционным порядком в их пространственном расположении [4]. Этот порядок связан с особенностями кооперативных взаимодействий элементов среды, ко-

торые легко изменяются под влиянием физико-химических воздействий. В результате этих воздействий при определенной концентрации раствора в нем образуются молекулярные ассоциаты, мицеллы, форма и позиционный порядок которых зависит от концентрации поверхностно-активных веществ (ПАВ) и параметров внешнего воздействия. Поэтому в таких веществах можно наблюдать обширный класс электрических и магнитных эффектов, связанных с полиморфными превращениями. В частности, как показали результаты выполненных ранее исследований, в таких растворах проявляется эффект магнитоимпульсной обработки (МИО), обусловленной активацией ассоциативно-диссоциативных процессов [4]. Активация этих процессов связана с наличием в мицеллярном растворе постоянно действующих каналов, параметры которых изменяются в зависимости от параметров МИО. Механизм таких изменений остается малоизученным в связи с отсутствием достоверных сведений об особенностях существующих каналов. До настоящего времени подобная информация получена методом каналирования ионов и, в меньшей степени, электронов в кристаллах [5] и биологических жидкостях [6]. Учитывая, что в жидких средах магнитохимические эффекты значимо проявляются лишь в результате переноса заряда электронами, представляет интерес исследование процессов каналирования электронов [7]. Более того, весьма интересно выяснение влияния позиционного порядка мицелл на угловое и энергетическое распределение каналируемых электронов.

Целью настоящей работы является применение метода каналирования низкоэнергетических электронов для изучения особенностей трансформации ближнего порядка в расположении молекулярных ассоциатов в изотропном растворе ПАВ после его МИО.

#### МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РАСТВОРА

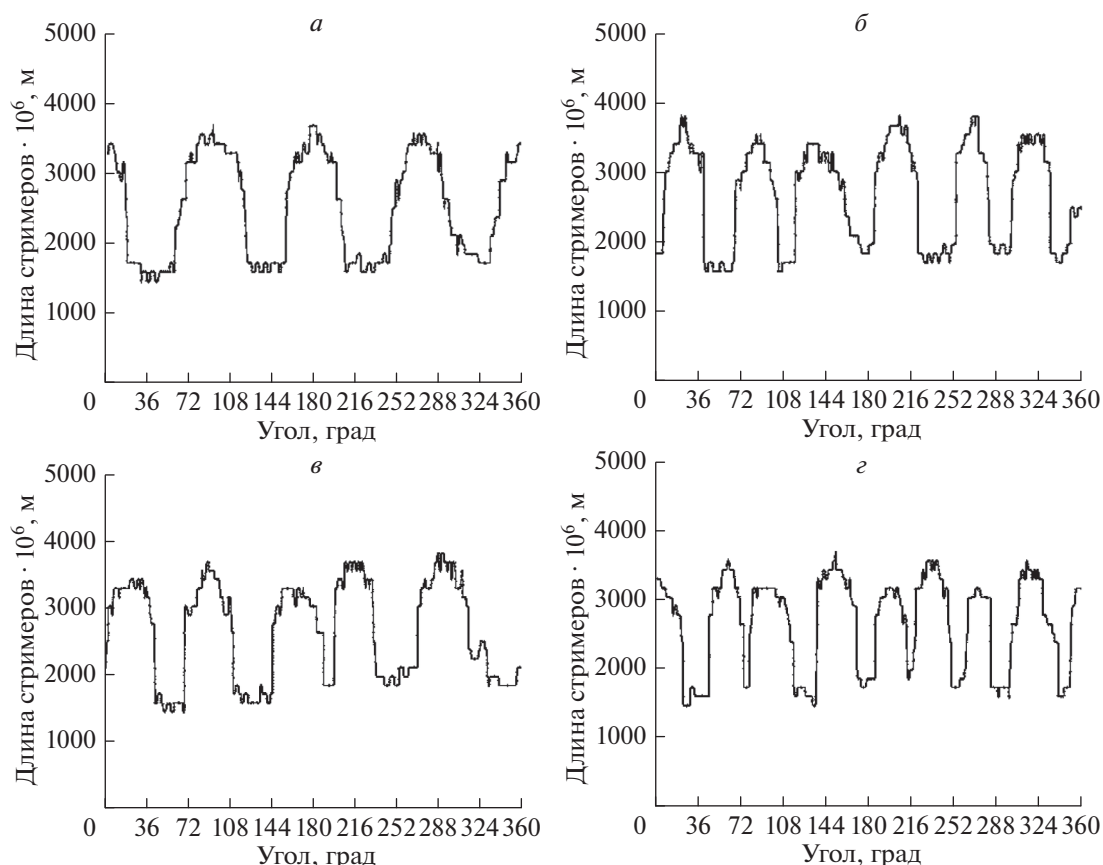
В качестве объектов исследования были выбраны водные растворы ПАВ – цетилтриметиламмония бромистого,  $[(C_{16}H_{33})N(CH_3)_3]Br$ , (ЦТАБ) с концентрацией 5.09 мМ, со специфической формой молекулярных ассоциатов (мицелл) [4]. На раствор воздействовали магнитными импульсами амплитудой 100 Э. Длительность импульса составляла 0.1–0.2 с, длительность паузы между импульсами – 1–2 с.

Для изучения углового и энергетического распределения электронов, проходящих через раствор, использовали прибор “ГРВ-камера”, устройство и возможности которого подробно описаны в [8, 9]. Параметрический анализ картин каналирования низкоэнергетических электронов через исследуемые растворы ЦТАБ и полученных с помощью ГРВ-камеры позволил получить угловое распределение электронов, которое воспроизводит стерео-

графические проекции направлений облегченного движения электронов (каналов), сформированных молекулярными комплексами жидкости [9]. Последующая обработка картин углового распределения электронов с помощью специальной программы и программы GDV Scientific Laboratory позволяет получить распределение электронов по энергиям. В результате по угловому и энергетическому распределению электронов можно судить о количестве и особенностях каналов облегченного движения электронов и, как следствие, о характере ближнего порядка в расположении молекулярных ассоциатов в упорядочивающемся растворе после его МИО. Полученные данные были использованы для выяснения особенностей трансформации ближнего порядка в расположении мицелл после магнитоимпульсной обработки раствора.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве примера влияния МИО на ближний порядок в расположении мицелл на рис. 1 приведено угловое распределение электронных лавин после прохождения электронов через раствор ЦТАБ после его обработки небольшим количеством магнитных импульсов (2–10). Отчетливо видно, что на картинах углового распределения электронов наблюдается различное количество максимумов интенсивности электронных лавин. После воздействия 2 магнитных импульсов наблюдается 4 максимума углового распределения электронов, которые характеризуются близкими параметрами. С учетом специфики ближнего порядка в расположении мицелл в этом растворе, определенного рентгеноструктурным методом [4], наличие четырех максимумов можно связать с наличием четырех эквивалентных плоскостей, которые свойственны кубической модификации ближнего порядка в пространственном расположении мицелл [10]. Вариации параметров стереографических проекций таких плоскостей после магнитной обработки раствора различным числом импульсов свидетельствуют о формировании нескольких полиморфных модификаций кубической упаковки сферических мицелл. Действительно, при попадании электронов в упорядоченный раствор, направление их скоростей должно соответствовать малоиндексному направлению ближнего порядка в расположении мицелл. При кубической упаковке мицелл направлениями облегченного движения могут быть направления [100], [110] и [111], которые совпадают с плоскостями (100), (110) и (111) [10, 11]. В результате по количеству максимумов углового распределения электронов можно судить об изменении характера ближнего порядка в расположении мицелл. Наличие плоскостей с наиболее плотной упаковкой мицелл способствует формированию специ-



**Рис. 1.** Угловое распределение стримеров при каналировании киловольтных электронов через каплю изотропного мицеллярного раствора цетилтриметиламмония бромистого концентрации 5.09 мМ после его обработки различным количеством импульсов магнитного поля: 2 (а); 5 (б); 10 (в); 15 (з) импульсов.

фического внутреннего электрического поля, образующего каналы облегченного движения электронов. Учитывая, что ширина канала зависит от характера ближнего порядка, размеров мицелл и кристаллографического направления, можно идентифицировать наблюдаемые максимумы с направлением движения электронов в растворе с кубической модификацией ближнего порядка. Наименьшей шириной обладают каналы, совпадающие с направлением [100], а наибольшей – с направлением [110] [12]. По изменению положений максимумов распределений, их ширине и количеству можно судить об изменении позиционного порядка и размеров мицелл [13]. В частности, после воздействия 10 магнитных импульсов на раствор, изменение количества и ширины максимума указывает на изменение геометрических размеров мицелл и ближнего порядка в их расположении. Действительно, в отсутствии внешнего воздействия в равновесном состоянии наблюдается относительно устойчивое распределение мицелл по размерам, форме и числу агрегации [14]. При магнитоимпульсном воздействии наблюдается уменьшение ширины и количества максимумов углового

распределения электронов, указывающих на изменение числа агрегаций мицелл и, как следствие, на уменьшение их размеров. Следовательно, при малой длительности воздействия магнитного поля наблюдается разрушение мицелл. С увеличением длительности воздействия (см. рис. 1) наблюдается сдвиг максимумов углового распределения электронов, уменьшение интенсивности и увеличение их количества, что может быть связано с увеличением размеров мицелл в результате их самосборки. Таким образом, под влиянием магнитного поля ускоряются ассоциативно-диссоциативные процессы, способствующие кратковременному перераспределению внутреннего электрического поля, вызывающего изменение размеров мицелл и их позиционного порядка [15]. Можно предположить, что наблюдаемые изменения размеров и положения мицелл также связано с гидратацией и дегидратацией молекулярных ассоциатов ПАВ под действием импульсного магнитного поля [16]. Для реализации этих процессов напряженность электрического поля канала должна превышать  $10^5$  В/м [17]. Только в таком поле возможен отрыв молекулярных комплексов от гидратного окру-

жения и, как следствие, появляется возможность их присоединения к мицеллам. В свою очередь магнитное поле способствует таким процессам в результате влияния на среду комплекса сил электромагнитной природы, а также квантовых эффектов, обусловленных воздействием магнитного поля на спиновую систему электронов, связанных с молекулярными комплексами [18].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования показали, что магнитоимпульсная обработка изотропного мицеллярного раствора ЦТАБ при концентрации 5.09 мМ приводит к формированию индуцированного данным воздействием упорядочения, отражающегося в возникновении ближнего порядка. Изменение ближнего порядка мицелл при увеличении числа магнитных импульсов проявляется в изменении количества и пространственного расположения каналов облегченного движения электронов вследствие изменений размеров и позиционного порядка молекулярных ассоциатов. Полученные результаты указывают на возможность использования каналирования низкоэнергетических электронов для изучения характера упорядочения в мицеллярных растворах и, как следствие, в аморфных магнитных материалах, весьма чувствительных в проявлении зонных эффектов, обеспечивающих изменение спиновых электронных состояний.

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-03-00271), РФФИ и правительства Ивановской области (проект № 18-43-370012), а также РФФИ и правительства Калужской области (проект № 18-41-400001).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Глезер А.М., Молотилов Б.В.* Структура и механические свойства аморфных сплавов. М.: Металлургия, 1992.
2. *Шипко М.Н., Тихонов А.И., Степович М.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 8. С. 1090; *Shipko M.N., Tikhonov A.I., Stepovich M.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. № 8. P. 988.
3. *Шипко М.Н., Степович М.А., Сибирев А.Л. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 8. С. 1058; *Shipko M.N., Stepovich M.A., Sibirev A.L. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. № 8. P. 956.
4. *Усольцева Н.В.* Жидкие кристаллы: лиотропный мезоморфизм. Иваново: Ивановский гос. ун-т, 2011. 316 с.
5. *Похил Г.П., Тулинов А.Ф.* // Поверхность. Рентген-, синхротрон. нейтрон. исслед. 2005. № 3. С. 59.
6. *Высоцкий В.И., Карлаш А.Ю.* // Поверхность. Рентген-, синхротрон. нейтрон. исслед. 2010. № 12. С. 64.
7. *Рябов В.А.* Эффект каналирования. М.: Энергоатомиздат, 1994. 239 с.
8. *Коротков К.Г., Орлов Д.В., Величко Е.Н.* // Изв. вузов. Приборостр. 2011. Т. 54. № 12. С. 40.
9. *Коротков К.Г.* Принципы анализа в ГРВ биоэлектрографии. СПб: Реноме, 2007. 286 с.
10. *Шаскольская М.Л.* Кристаллография. М.: Высшая школа, 1976. 391 с.
11. *Шульга Н.Ф., Сыщенко В.В., Тарновский А.И.* // Поверхность. Рентген-, синхротрон. нейтрон. исслед. 2016. № 4. С. 103.
12. *Каплин В.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 2. С. 205.
13. *Шипко М.Н., Усольцева Н.В., Сибирев А.Л. и др.* // Жид. крист. Практик. исп. 2018. Т. 18. № 1. С. 47.
14. *Fernandes P.R.G., Mukai H., Honda B.S.L., Shibli S.M.* // Liquid Crystals. 2006. V. 33. № 3. P. 367.
15. *Hartmann H.A., Kirsch G.E., Drawe J.A.* // Science. 1991. V. 251. P. 942.
16. *Hegermann J., Overbeck J., Schrempp H.* // Microbiology. 2006. V. 152. № 9. P. 2831.
17. *Клеман М., Лаврентович О.Д.* Основы физики частично упорядоченных сред: жидкие кристаллы, коллоиды, фрактальные структуры, полимерные биологические объекты. М.: Физматлит, 2007. 680 с.
18. *Steven Rick W.* // AIP Conf. Proc. 1999. V. 492. P. 114.