

УДК 532.517.4

ЛАЗЕРНАЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА УПОРЯДОЧЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И СТРУКТУР

© 2020 г. Я. А. Фофанов^{1, *}, В. В. Манойлов¹, И. В. Заруцкий¹, А. С. Курапцев²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

“Институт аналитического приборостроения Российской академии наук”, Санкт-Петербург, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

“Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого”, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: yakinvest@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.09.2019 г.

После доработки 15.11.2019 г.

Принята к публикации 27.11.2019 г.

Рассмотрены основы высокочувствительной лазерной поляризационно-оптической диагностики. Показана принципиальная возможность применения развиваемых измерительных технологий для прогнозирования параметров, количественной характеристики и сравнения упорядоченных веществ, материалов и систем.

DOI: 10.31857/S0367676520030114

ВВЕДЕНИЕ

Перспективы развития и применения высокочувствительных оптических измерительных технологий ограничиваются во многих случаях отсутствием достаточно полных представлений о возможностях лазерного зондирования вещества [1–3]. В статье рассмотрены основные принципы лазерной поляризационно-оптической диагностики упорядоченных структур и наносистем. Одним из исследуемых объектов являются системы (ансамбли) магнитных наночастиц в жидкой матрице (магнитные наножидкости). Подобные наносистемы являются хорошими модельными объектами, развитие методов поляризационно-оптической диагностики которых актуально как в фундаментальном смысле, так и по причине их интенсивного использования в приложениях [4, 5].

Развиваемые подходы используются также при исследованиях другого упорядоченного объекта – бората железа. Этот магнитоупорядоченный материал интересен тем, что сочетает в себе возможность оптического зондирования в видимом диапазоне с магнитным порядком при комнатной температуре [3]. Поляризационно-оптическая диагностика бората железа показывает перспективы изучения объемных поляризационных эффектов и в других малопрозрачных средах.

ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА МАГНИТНЫХ НАНОЖИДКОСТЕЙ

Развиваемые методы лазерной поляризационно-оптической диагностики включают в себя, по-

мимо экспериментальных исследований, также и статистический анализ наблюдаемых поляризационных откликов. Указанные отклики регистрировались в процессе зондирования исследуемых объектов лазерным излучением с глубокой модуляцией поляризации [2]. Ранее было показано, что такой подход позволяет изучать широкий класс объектов и систем [6–8]. Достигнута пороговая, ограниченная только естественными (квантовыми) шумами пробного лазерного излучения, чувствительность регистрации слабых поляризационных откликов [2].

Основные исследования выполнены с наночастицами магнетита в керосине [9]. Управление оптической анизотропией исследуемой магнитной наножидкости осуществлялось посредством сканирования поперечного магнитного поля. На рис. 1 точками показаны поляризационные отклики φ (оптическое двулучепреломление, эффект Коттона–Мутона) для наножидкости с объемной концентрацией магнитных наночастиц 1% [9]. Данные представлены в зависимости от безразмерного параметра p , который пропорционален приложенному поперечному магнитному полю (см. далее соотношение (6)). Хорошо видно, что при $p < 1$ полученная зависимость похожа на параболу с дальнейшим насыщением отклика при увеличении p . Аналогичные результаты получены при аппроксимации поляризационных откликов, полученных в широком, составляющем три порядка диапазоне концентраций магнитных частиц [9].

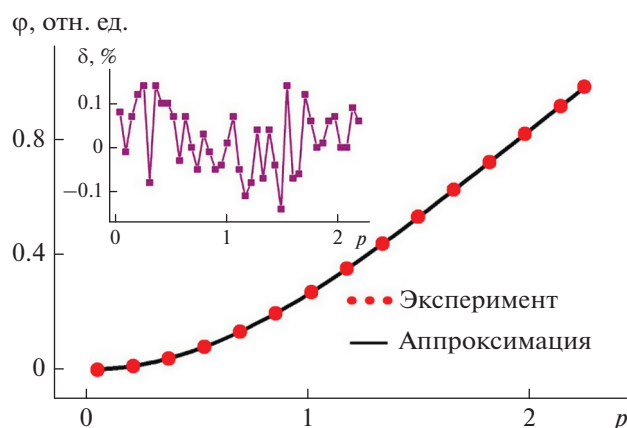


Рис. 1. Аппроксимация поляризационных откликов магнитной наножидкости.

Для аппроксимации зарегистрированных поляризационных откликов использовалась функция $\varphi^{(a)}(\alpha, \beta, x)$, имеющая следующий вид:

$$\varphi^{(a)}(\alpha, \beta, x) = \alpha F(p), \quad (1)$$

где функция $F(p)$ получена на основе модели ориентационной упорядоченности магнитных частиц во внешнем магнитном поле [10]. Безразмерный параметр p представим в следующем виде:

$$p = \beta x. \quad (2)$$

Величины α и β в формулах (1), (2) являются варьируемыми безразмерными параметрами, а значения вспомогательной независимой безразмерной переменной x определяются следующим соотношением:

$$x_i = i; \quad i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

где n – количество экспериментальных значений φ (число точек).

Аппроксимация экспериментальных данных была выполнена методом наименьших квадратов. При этом осуществлялся поиск значений параметров $\alpha = \alpha_d$ и $\beta = \beta_d$, при которых сумма квадратов отклонений $S(\alpha, \beta)$ поляризационных от-

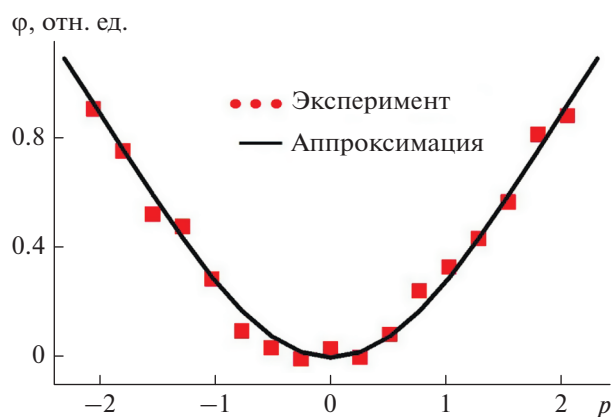


Рис. 2. Аппроксимация поляризационных откликов бората железа.

кликов φ_i от аппроксимирующей функции (1) принимает минимальные значения S_{min} :

$$S_{min} = S(\alpha_d, \beta_d), \quad (4)$$

$$S(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^n [\varphi_i - \varphi^{(a)}(\alpha, \beta, x_i)]^2. \quad (5)$$

Полученная на основе формул (1)–(5) аппроксимирующая зависимость $\varphi^{(a)}(\alpha_d, \beta_d, p)$ для найденных значений $\alpha_d = 4.28$ и $\beta_d = 0.054$ показана сплошной кривой на рис. 1. На рис. 2 показаны относительные отклонения δ аппроксимирующей кривой от экспериментальных данных. Как видно, указанные отклонения не превышают 0.25%. Аналогичные результаты получены и для других концентраций, (см. табл. 1), что говорит о надежности полученных экспериментальных данных и об адекватности используемой для аппроксимации (диагностики) модели.

Согласно используемой физической модели, параметр α_d определяется поляризационно-оптическими характеристиками магнитных частиц [10]. Найденные значения параметра β_d дают возможность, учитывая формулу (2), найти безразмерный параметр p , который, согласно использу-

Таблица 1. Диагностика магнитной наножидкости

| Концентрация, % | 1 | 0.2 | 0.01 | 0.003 | 0.001 |
|---------------------------------------|----------|-------|--------|-------|--------|
| α_{pr} (прогноз) | 4.28 | 0.86 | 0.043 | 0.013 | 0.0043 |
| α_d (диагностика) | 4.28 | 0.94 | 0.043 | 0.012 | 0.0040 |
| $\delta\alpha_{pr}$ (ошибка прогноза) | <0.0005% | 8.9% | 0.5% | 3.1% | 6.8% |
| β_{pr} (прогноз) | 0.054 | 0.054 | 0.054 | 0.054 | 0.054 |
| β_d (диагностика) | 0.054 | 0.051 | 0.054 | 0.055 | 0.058 |
| $\delta\beta_{pr}$ (ошибка прогноза) | <0.0005% | 5.5% | <0.05% | 1.8% | 6.9% |

емой модели, связан с физическими параметрами исследуемой магнитной жидкости следующим соотношением [10]:

$$p = \frac{\mu H}{kT}, \quad (6)$$

где μ – магнитный момент частиц; H – напряженность магнитного поля; k – постоянная Больцмана; T – температура;

Таким образом, найденные значения α_d и β_d дают численные значения соотношений между физическими параметрами исследуемой магнитной системы и их взаимосвязи с наблюдаемыми поляризационными откликами. В результате появляется возможность определения одних (неизвестных) физических параметров по зарегистрированным поляризационным откликам и значениям других (известных) параметров. Описанная здесь процедура поиска минимизирующих значений безразмерных параметров может быть отнесена, таким образом, к поляризационно-оптической диагностике, а найденные нами с помощью развиваемых подходов численные значения этих параметров дают количественную характеристику исследуемых магнитных жидкостей.

Помимо диагностики и количественной характеристики, развиваемые подходы дают также возможность прогнозирования параметров изучаемых магнитных систем. Согласно формуле (1), величина поляризационных откликов пропорциональна величине α , которая в свою очередь пропорциональна концентрации магнитных частиц [10]. В табл. 1 представлены прогнозируемые на этой основе значения α_{pr} для жидкостей с различной концентрацией магнитных наночастиц. Там же показаны и найденные описанным выше методом поляризационно-оптической диагностики значения α_d , а также относительные ошибки $\delta\alpha_{pr}$ прогнозируемых данных:

$$\delta\alpha_{pr} = (\alpha_d - \alpha_{pr})/\alpha_{pr}. \quad (7)$$

Согласно формулам (1)–(3) величина β не зависит от концентрации. Это было использовано для прогноза значений β , результаты которого были также проверены с помощью развиваемых методов диагностики. В табл. 1 представлены прогнозируемые значения β_{pr} , найденные в процессе диагностики значения β_d , и относительные погрешности прогнозируемых данных $\delta\beta_{pr}$, которые определены по формуле, аналогичной (7).

Из табл. 1 хорошо видно, что полученные в результате диагностики значения α_d увеличиваются с ростом концентрации магнитных наночастиц, а значения β_d не зависят от нее. Это дополнительно указывает на подобие анализируемых поляризационных откликов в широком диапазоне концен-

траций. Тем самым здесь еще раз подтверждается вывод о подобии поляризационных откликов магнитных наножидкостей, сделанный в работах [9, 11].

Из табл. 1 также можно видеть, что ошибки прогноза $\delta\alpha_{pr}$ и $\delta\beta_{pr}$ заметно отличаются для экспериментов с разными концентрациями. Наибольшие ошибки наблюдаются для концентраций 0.2% и 0.001%. При этом особенно важно, что данное отличие проявляется сразу по двум параметрам α_{pr} и β_{pr} . Так, для концентрации 0.2% $\delta\alpha_{pr} = 8.9\%$, $\delta\beta_{pr} = 5.5\%$, а для концентрации 0.001% $\delta\alpha_{pr} = 6.8\%$, $\delta\beta_{pr} = 6.9\%$. В то же время, например, для концентрации 0.01% ошибки прогноза значительно меньше: $\delta\alpha_{pr} = 0.5\%$, $\delta\beta_{pr} < 0.05\%$. Данное отличие ошибок прогноза может указывать на неслучайные особенности исследуемых объектов.

Наиболее вероятная причина неслучайных особенностей исследованных магнитных наножидкостей заключается в том, что пробы для экспериментов приготавливались из исходных образцов разных серий, параметры которых могли несколько различаться. В таком случае обнаруженные в процессе выполненного статистического анализа ошибки прогноза свидетельствуют еще об одном перспективном применении развиваемых методов, которое заключается в диагностике малых вариаций параметров исследуемых магнитных жидкостей.

АППРОКСИМАЦИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ОТКЛИКОВ БОРАТА ЖЕЛЕЗА

Другим очень интересным модельным объектом, исследования которого показывают перспективность развития высокочувствительной лазерной поляризационно-оптической диагностики, является борат железа $FeBO_3$. При отсутствии внешнего магнитного поля кристалл пред $FeBO_3$ представляет собой стопу пластинок (слоев), магнитные моменты которых ориентированы произвольным образом в плоскости, перпендикулярной зондирующему пучку. В результате суммарный поляризационный отклик такой системы близок к нулевому. Намагниченность кристалла в целом и соответствующие магнитооптические эффекты появляются вследствие перемещения границ и вращения намагниченности доменов при наложении поперечного магнитного поля. При этом в зависимости откликов от величины поля наряду с плавными изменениями наблюдаются нерегулярные скачки, связанные со скачкообразными перемещениями границ и схлопыванием доменов [3].

С целью изучения возможности применения развиваемых методов поляризационно-оптиче-

ской диагностики нами было выполнено усреднение наблюдаемых откликов по нескольким сканам (разверткам магнитного поля). При этом скачкообразные изменения откликов достаточно хорошо сглаживались, что дало возможность изучения регулярных поляризационных магнитоотических эффектов. Надо отметить, что борат железа обладает, как известно, заметным поглощением. Исследуемые образцы ослабляли интенсивность прошедшего лазерного излучения до 30 и более раз. Тем не менее, развиваемые методы высокочувствительного лазерного зондирования позволяли и в этих условиях надежно регистрировать поляризационные отклики [3]. На рис. 2 точками показан характерный отклик, усредненный по семи сканам, а сплошная кривая показывает результат аппроксимации, выполненной аналогично описанной выше аппроксимации откликов магнитной жидкости.

В данном случае мы тоже использовали при аппроксимации функцию $F(p)$, следующую из модели ориентационной упорядоченности [10]. Вследствие этого безразмерный параметр p можно понимать, как некоторую эффективную величину, характеризующую изучаемую упорядоченную систему. Например, этот параметр может характеризовать энергию взаимодействия доменной структуры с магнитным полем (см. формулу (7)). С учетом этого хорошо видно, что зависимости на рис. 1 и 2 очень похожи. В середине диапазона развертки поля параметр p равен единице, и, таким образом, выполненная поляризационно-оптическая диагностика указывает на определенное подобие магнитного поведения поляризационных откликов двух систем, обладающих заметно разными механизмами упорядоченности [3, 9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитые высокочувствительные методы лазерного зондирования вещества совместно с описанным здесь статистическим анализом полученных данных являются, по существу, основой лазерной поляризационно-оптической диагностики. Выполненные исследования позволяют говорить о накоплении и развитии основ статистического анализа базы больших данных, содержащей результаты поляризационно-оптической диагности-

ки магнитоупорядоченных веществ и материалов. Это в свою очередь открывает перспективы более широкого информационного подхода к дальнейшему развитию и применению высокочувствительных лазерных методов сравнительных исследований и поляризационной диагностики других веществ, материалов и систем [8]. К подобным объектам (системам) могут быть отнесены, например, различные неоднородности и дефекты в совершенных оптических кристаллах, ансамбли примесных центров в твердых телах, холодные атомные ансамбли и др. [8, 12–14].

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 075-00780-19-02 (тема № 0074-2019-0007) Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Badoz J., Billardon B.M., Canit J.C., Russel M.F.J. // J. Opt. 1977. V. 8. № 6. P. 373.
2. Fofanov Ya.A. // Proc. SPIE. 1992. № 1811. P. 413.
3. Фофанов Я.А., Пleshakov И.В., Кузьмин Ю.И. // Опт. журн. 2013. Т. 80. № 1. С. 88.
4. Bitar A., Kaewsaneha C. et al. // J. Coll. Sci. Biotech. 2014. V. 3. № 1. P. 3.
5. Nepomnyashchaya E.K., Prokofiev A.V., Velichko E.N., Pleshakov I.V. // J. Magn. Magn. Mater. 2017. V. 431. P. 24.
6. Sokolov I.M., Fofanov Ya.A. // J. Opt. Soc. Am. A. 1995. V. 12. № 7. P. 1579.
7. Fofanov Ya.A. // in book: Advances in optoelectronics research. Ed. Marcus R. Oswald. Nova Sci. Publ. Inc. USA, 2014. P. 75.
8. Fofanov Ya., Vetrov V., Ignatenkov B. // IEEE Xplore Digital Library. ICLO. 2018. P. 406.
9. Фофанов Я.А., Пleshakov И.В., Прокофьев А.В. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. № 20. С. 66.
10. Scholten P.C. // IEEE Trans. Magn. 1980. V. 16. № 2. P. 221.
11. Фофанов Я.А., Манойлов В.В., Заруцкий И.В. и др. // Науч. приборостр. 2018. Т. 28. № 1. С. 45.
12. Kuraptsev A.S., Sokolov I.M., Fofanov Ya.A. // Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 41. Art. 1660141.
13. Ларионов Н.В., Соколов И.М., Фофанов Я.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 3. С. 306; Lari-onov N.V., Sokolov I.M., Fofanov Ya.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. № 3. P. 251.
14. Фофанов Я.А., Соколов И.М., Пleshakov И.В. и др. // Науч. приборостр. 2019. Т. 29. № 3. С. 3.