

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-04-26-39

УДК 535-4;32.517.4; 551.501.816; 551.510.411

Высококочувствительное лазерное зондирование и структурная диагностика упорядоченных веществ, материалов, микро- и наносистем. Обзор

Яков Андреевич Фофанов^{1✉}, Владимир Владимирович Манойлов²

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

¹yakinvest@yandex.ru <https://orcid.org/0009-0004-2565-8834>²manoilov vv@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-3468-0628>

Аннотация

Предмет исследования. Лазерные поляризационно-оптические методы зондирования вещества. Актуальность этого направления исследований определяется необходимостью разработки и дальнейшего улучшения методов и средств для прецизионной диагностики материалов. **Цель работы.** Анализ возможностей и перспектив развития высококочувствительной лазерной поляризационно-оптической и структурной диагностики упорядоченных веществ, функциональных материалов, микро- и наносистем. **Методология работы.** Рассмотрено сканирующее просвечивание исследуемых объектов модулированным по поляризации лазерным излучением. Значительное внимание уделено при этом систематизации и обобщению представленных в работе результатов исследований. Описание экспериментальных данных для актуальных объектов и систем дополнено их сравнительным теоретическим анализом. **Основные результаты.** Исследована иерархия критериев сильных и слабых поляризационных откликов, которая охватывает весьма широкий и практически очень удобный диапазон измеряемого двулучепреломления от 1×10^3 до 1×10^{-4} угл. мин. Показано, что в этом диапазоне аналитическая шкала является линейной (пропорциональной), естественные шумы лазерного излучения не вносят существенных помех, а наблюдаемые поляризационно-оптические отклики обладают полезным для их анализа свойством аддитивности. Продемонстрировано эффективное применение развиваемых подходов для лазерного зондирования и диагностики широкого класса объектов и сред, например, оптических и лазерных материалов и элементов с повышенной оптической и структурной однородностью, кристаллических магнетиков, магнитных наножидкостей низких концентраций и т.д. Для магнитной наножидкости на основе магнетита в керосине поляризационные отклики зарегистрированы при рекордно малой минимальной объёмной концентрации 1×10^{-7} . Реализована принципиальная возможность разделения и сравнительного изучения быстрых случайных и относительно медленных технологических вариаций (приращений) поляризационных откликов исследуемых материалов и наносистем. **Практическая значимость.** Полученные результаты характеризуют высокую чувствительность и вполне приемлемую информативность рассмотренных методов лазерного зондирования вещества. Развиваемые подходы могут дать много новой информации о структурных особенностях и связанных с ними флуктуациях параметров веществ и функциональных материалов самого широкого применения. Они могут быть значительно расширены и далее, например, на исследования и диагностику биополимеров, биологических жидкостей, объектов иной природы и состава.

Ключевые слова: лазерное зондирование вещества, иерархия поляризационных откликов, оптоэлектроника, оптическое материаловедение, магнитооптика, магнитные наножидкости

Благодарность: работа выполнена по государственному заданию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-01157-23-00 в рамках темы FFZM-2022-0008 (номер гос. регистрации 122032300138-7).

Ссылка для цитирования: Фофанов Я.А., Манойлов В.В. Высококочувствительное лазерное зондирование и структурная диагностика упорядоченных веществ, материалов, микро- и наносистем. Обзор // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 4. С. 26–39. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-04-26-39>

Коды OCIS: 300, 200.3050, 260.0260, 250.0250, 120.0120, 230.0230, 230.0250, 210.0210, 140.0140, 260.5430, 120.4290, 160.4236, 210.3820, 280.4788.

High-sensitive laser probing and structural diagnostics of ordered substances, materials, micro- and nanosystems. Review

YAKOV A. FOFANOV¹✉, VLADIMIR V. MANOILOV²

Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

¹yakinvest@yandex.ru <https://orcid.org/0009-0004-2565-8834>

²manoilov vv@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-3468-0628>

Abstract

The subject of study is the laser polarization-optical methods for matter probing. The actuality of this area of research is determined by the need to develop and further improve the methods and means for precision diagnostics of materials. **The aim of study** is the analysis of the possibilities and prospects for the development of highly sensitive laser polarization-optical and structural diagnostics of ordered substances, functional materials, micro- and nanosystems. **Methodology of work.** The scanning transmission of the objects under study by polarization-modulated laser radiation is considered. Significant attention is paid to the systematization and generalization of the research results presented in the work. The description of experimental data for actual objects and systems is supplemented by their comparative theoretical analysis. **Main results.** A hierarchy of criteria for strong and weak polarization responses, which covers a very wide and practically very convenient range of measured birefringence from 1×10^3 arc. min up to 1×10^{-4} arc. min, has been studied. It is shown that in this range the analytical scale is linear (proportional), natural noise of laser radiation does not introduce significant obstacles, and the observed polarization-optical responses have the property of additivity, which is useful for their analysis. The effective application of the developed approaches for laser probing and diagnostics of a wide class of objects and media, for example, optical and laser materials and elements with increased optical and structural homogeneity, crystalline magnets, magnetic nanofluids of low concentrations, etc., has been demonstrated. For a magnetic nanofluid based on magnetite in kerosene, polarization responses were registered at a record low minimum volume concentration of 1×10^{-7} . The fundamental possibility of separating and comparatively studying fast random and relatively slow technological variations (increments) of polarization responses of the materials and nanosystems under study has been realized. **Practical significance.** The results obtained characterize the high sensitivity and quite acceptable information content of the considered methods of matter laser sensing. The approaches being developed can provide a lot of new data about the structural features and associated fluctuations in the parameters of substances and functional materials of wide application. They can be significantly expanded further, for example, to the research and diagnostics of biopolymers, biological fluids, objects of a different nature and composition.

Keywords: laser probing of matter, hierarchy of polarization responses, optoelectronics, optical materials science, magnetooptics, magnetic nanofluids

Acknowledgment: the work was carried out according to the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation № 075-01157-23-00 within the framework of the topic FFZM-2022-0008 (state registration number 122032300138-7).

For citation: Fofanov Ya.A., Manoilov V.V. High-sensitive laser probing and structural diagnostics of ordered substances, materials, micro- and nanosystems. Review [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 4. P. 26–39. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-04-26-39>

OCIS codes: 300, 200.3050, 260.0260, 250.0250, 120.0120, 230.0230, 230.0250, 210.0210, 140.0140, 260.5430, 120.4290, 160.4236, 210.3820, 280.4788.

ВВЕДЕНИЕ

Поляризационно-оптическое зондирование широко используется как средство изучения вещества [1–10]. Измерение оптического двулучепреломления является одним из способов контроля качества оптических, оптоэлектронных, голографических и многих других материалов [2, 7, 8]. В числе перспективных материалов находится и ряд кристаллов, которые по своим характеристикам дополняют традиционно более распространённые оптические материалы [7, 8]. Значительное повышение требований к качеству функциональных оптических материалов и элементов делает особенно актуальной проблему измерений и исследований малого двулучепреломления [8, 9].

Вместе с тем возможности традиционных методик оказываются в ряде случаев уже явно недостаточными для анализа качества материалов и элементов в современном оптическом и лазерном приборостроении. Использование для этих целей стационарных световых потоков ограничено наличием в измерительных трактах значительных флуктуаций технического характера [10]. Широко используемые методы эллипсометрии предназначены, главным образом, для исследования поверхностных структур и мало приспособлены для изучения объёмных поляризационных эффектов [11, 12]. Для систем с вращающимися оптическими элементами характерен значительный уровень помех, затрудняющих реализацию высокой чувствительности измерений.

В то же время, широкое применение прецизионных лазерных измерительных технологий в заметной степени ограничивается отсутствием необходимых для этого представлений о потенциальных возможностях методов зондирования вещества излучением с модуляцией поляризации. Подобное зондирование хорошо развито применительно к изучению различных молекулярных систем, поверх-

ностных структур и тонких плёнок [12–14], но его использование для исследования объёмных образцов оптических материалов и элементов освещено в литературе совершенно недостаточно. Высокочувствительное лазерное поляризационно-оптическое зондирование открывает перспективы изучения тонких особенностей магнитного поведения и флуктуаций структуры широкого класса материалов и веществ. Появляются новые возможности исследования микро- и наноструктурированных материалов, многих других актуальных объектов в оптоэлектронике, лазерной и магнитооптике, биомедицине, квантовой оптике [8, 9, 15–17]. Таким образом, актуальность дальнейшего развития этого направления исследований определяется в настоящее время необходимостью разработки современных прецизионных методов и средств диагностики материалов.

Целью настоящей работы является анализ возможностей и перспектив развития высокочувствительной лазерной поляризационно-оптической и структурной диагностики упорядоченных веществ, функциональных материалов, микро- и наносистем.

1. ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЙ

Краткая обобщённая схема установки для наблюдения и регистрации поляризационно-оптических откликов показана на рис. 1. Установка содержит лазер ($\lambda = 0,63$ мкм), модулятор и анализатор поляризации, а также систему регистрации [5, 8, 9, 15]. По принципу действия используемый фотоупругий модулятор поляризации представляет собой фазовую пластинку с гармонической модуляцией вносимой разности фаз $A(t)$ линейно поляризованных компонент E_x и E_y зондирующего лазерного излучения: $A(t) = A_0 \sin \Omega t$, где A_0 и Ω — соответственно амплитуда и частота

модуляции разности фаз. При этом поляризация лазерного излучения, прошедшего через модулятор, периодически плавно меняется: линейная, затем эллиптическая, круговая, снова линейная и т. д. и, таким образом, излучение становится модулированным по поляризации [4, 5, 18]. Исследуемые объекты (пробы) устанавливаются после модулятора поляризации. В случае необходимости к исследуемым объектам может прилагаться внешнее воздействие, например, с помощью магнитного поля H [9].

В анализаторе поляризации происходит детектирование состояния поляризации прошедшего через исследуемые образцы света с модуляцией поляризации. Для этого в обычном (одноканальном) случае лазерное излучение пропускается через поляризатор и поступает в фотоприёмное устройство (ФПУ), в котором осуществляется его оптическое детектирование. При этом в спектре интенсивности прошедшего через поляризатор излучения и соответственно в спектре фототока в ФПУ появляются компоненты на гармониках частоты модуляции поляризации. Некоторые из этих компонент несут информацию о поляризационных характеристиках исследуемых объектов [5, 9, 15]. Например, временная зависимость информативной компоненты спектра интенсивности на частоте первой гармоники, т.е. непосредственно на частоте модуляции поляризации имеет вид

$I_1(t) = [I_0 J_1(A_0) \sin\Delta \cos 2\psi] A_0 \sin \Omega t$. Здесь I_0 — интенсивность падающего на модулятор зондирующего лазерного излучения; $J_1(A_0)$ — функция Бесселя первого порядка; ψ — угол поворота главной оси индикатрисы исследуемого объекта (см. вкладку на рис. 1); $\Delta = (2\pi d/\lambda) \times (n_1 - n_2)$ — двулучепреломление исследуемого объекта; λ — длина волны зондирующего лазерного излучения; n_1, n_2 и d — главные показатели преломления и просвечиваемая толщина исследуемого объекта [8, 15, 18].

После фотодетектирования в ФПУ происходит предварительная селекция и усиление выбранной информативной компоненты спектра фототока, а также подавление обусловленных модуляцией поляризации неинформативных компонент. В результате первая гармоника на выходе ФПУ имеет вид: $U_1 = U_0 I_1(t)$, где U_0 — общий коэффициент усиления (передачи) ФПУ. Сигнал U_1 передаётся в систему регистрации, где осуществляется его основная селекция, усиление и фазовое радиочастотное детектирование на частоте Ω . Полученный в результате детектирования сигнал фазового детектора (напряжение) является аналитическим сигналом и поступает на контрольный аналоговый выход системы регистрации. Помимо аналогового выхода система регистрации имеет также цифровой выход, с которого оцифрованный аналитический сигнал (поляризационный отклик) поступает в компьютер.

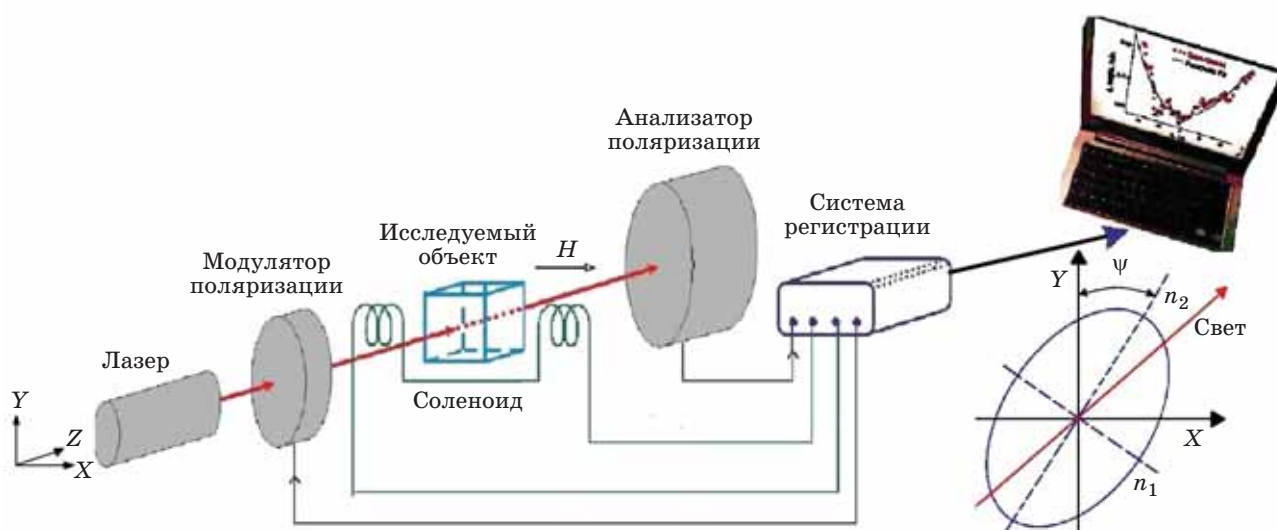


Рис. 1. Экспериментальная установка
 Fig. 1. Experimental setup

В результате аналитический сигнал установки, который для наглядности и краткости называется здесь также «поляризационным откликом φ », становится связанным с линейной оптической анизотропией (двулучепреломлением Δ) исследуемого объекта следующим соотношением:

$$\varphi = \varphi_0 \sin\Delta \cos 2\psi, \quad (1)$$

где φ_0 — масштабный множитель, пропорциональный интенсивности лазерного излучения и полному коэффициенту передачи всего оптоэлектронного тракта. Величина φ_0 находится в процессе калибровки [8, 9, 15].

Наряду с одноканальным фотодетектированием, описанная исследовательская установка (поляризационно-оптический анализатор — ПОА) позволяет выполнять дифференциальную регистрацию, при которой используется поляризационный делитель, а оптическое детектирование осуществляется двумя ФПУ [5]. Модуляция поляризации в оригинальном сочетании с дифференциальной схемой регистрации фотосигналов позволяет достигать пороговую чувствительность измерений, которая ограничена только естественными (фотонными, дробовыми) шумами зондирующего лазерного излучения [5, 15, 19].

2. СИЛЬНЫЕ И СЛАБЫЕ СИГНАЛЫ

В данном разделе рассмотрена иерархия критериев сильных и слабых поляризационных откликов (аналитических сигналов) в поляризационно-оптическом анализе вещества. При этом первый критерий связан с исследуемым объектом и в качестве меры малости (слабости) его оптической анизотропии (двулучепреломления) принято неравенство $\Delta \ll \Delta_{LSL}$, где $\Delta_{LSL} \approx 1 \times 10^3$ угл. мин. и использована аббревиатура LSL (linear scale limit), которая обозначает предел линейности шкалы [17]. Согласно соотношению (1), отклик φ становится в этом случае пропорциональным Δ , а соответствующие первому критерию образцы исследуемых объектов по определению обладают малой (слабой) анизотропией, то есть являются слабыми образцами в указанном здесь смысле. Критерий для слабых поляризационных откликов (слабых аналитических сигналов), соответствующих слабым образцам, опреде-

ляется при этом неравенством $\varphi \ll \varphi_{LSL}$, где величина φ_{LSL} может быть получена из соотношения (1) при $\Delta = \Delta_{LSL}$ [17].

Помимо линейности шкалы, у слабых поляризационных откликов имеется и другое полезное качество — аддитивность, которая также позволяет значительно упростить анализ экспериментальных данных, так как в этом случае общий отклик совокупности слабых образцов равен сумме их собственных слабых откликов [15, 17]. Здесь необходимо отметить, что представление об аддитивности соответствует скалярной или квазивекторной модели, которая не всегда учитывает в полной мере поляризацию зондирующего света. В результате расчёты на основе скалярной и векторной, учитывающей поляризацию, модели могут привести к разным результатам. Такое несоответствие обнаружено, например, при изучении взаимодействия когерентного излучения с резонансными ансамблями холодных атомов [20].

Второй фундаментальный критерий для сильных и слабых поляризационных откликов связан с квантовыми (фотонными) флуктуациями света, который рассматривается здесь как инструмент для исследований. Чтобы данные флуктуации не искажали результаты измерений, измеряемая анизотропия и соответствующие ей поляризационные отклики должны быть сильными по этому критерию, т. е. должны удовлетворять неравенствам $\Delta \gg \Delta_{SNL}$ и $\varphi \gg \varphi_{SNL}$, где Δ_{SNL} и φ_{SNL} — величина слабой (предельно малой) анизотропии и, соответственно, поляризационные отклики, обнаруживаемые на уровне фотонных (дробовых) шумов света (пороговая чувствительность, shot noise level — SNL [19]).

При построении третьего критерия принимаются во внимание технические флуктуации в системе регистрации, влияние которых рассмотрено на примере тепловых шумов. Чтобы тепловой шум системы регистрации не влиял на результаты измерений, необходимо, чтобы измеряемая анизотропия, а также соответствующие ей поляризационные отклики (аналитические сигналы) были сильными по третьему критерию, т. е. удовлетворяли неравенствам $\Delta \gg \Delta_{TNL}$ и $\varphi \gg \varphi_{TNL}$, где принята аббревиатура TNL — thermal noise level (уровень теплового шума). Таким образом, Δ_{TNL} и φ_{TNL} — это значения предельно малой анизо-

тропии и соответствующих ей слабых поляризационных откликов, сравнимых (сопоставимых) с техническими флуктуациями (тепловыми шумами) системы регистрации.

Характерным значениям мощности лазера 3 мВт; квантовой эффективности процесса фотоприёма 0,3; полосы пропускания $\Delta\nu = 1$ Гц и величины резистора в цепи фото-регистрации $R = 1000$ Ом соответствуют численные значения $\Delta_{SNL} = 1 \times 10^{-4}$ угл. мин; $\Delta_{TNL} = 3 \times 10^{-5}$ угл. мин, [5, 8, 15]. Рассмотренная иерархия критериев охватывает, таким образом, весьма широкий, составляющий семь порядков (от 1×10^3 угл. мин до 1×10^{-4} угл. мин.) диапазон измеряемого двулучепреломления и соответствующих поляризационно-оптических откликов (аналитических сигналов) [5, 17].

3. ПРЕЦИЗИОННЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ПРИЗМЫ ПВО И КРИСТАЛЛЫ ВЫСОКОГО ОПТИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА

Одним из примеров объектов, исследования которых показали эффективность развиваемых подходов и методов, являются призмы полного внутреннего отражения (ПВО), используемые в кольцевых резонаторах лазерных гироскопов [15]. Некоторые из подобных призм и схемы их лазерного поляризационно-оптического зондирования показаны на рис. 2. Призмы были изготовлены из плавленого кварца и установлены на основании из ситалла с помощью оптического контакта. При зондировании «на проход» осуществлялось ортогональное падение лазерного излучения на передние поверхности призм. В случае «наклонного падения» происходило ПВО на задних поверхностях призм, а на боковые поверхности лазерное излучение падало под углом Брюстера. На рис. 3 показаны экспериментальные зависимости поляризационных откликов φ от высоты зондирующего лазерного луча h от основания призмы. Кривая 1 получена при зондировании «на проход», кривая 2 соответствует «наклонному падению». Как видно, кривые 1 и 2 показывают явно немонотонные зависимости по сравнению с достаточно плавной зависимостью для свободной (незакреплённой) призмы (кривая 3).

Теоретический анализ переноса пробного лазерного излучения выполнен для оптической системы, содержащей оптические эле-

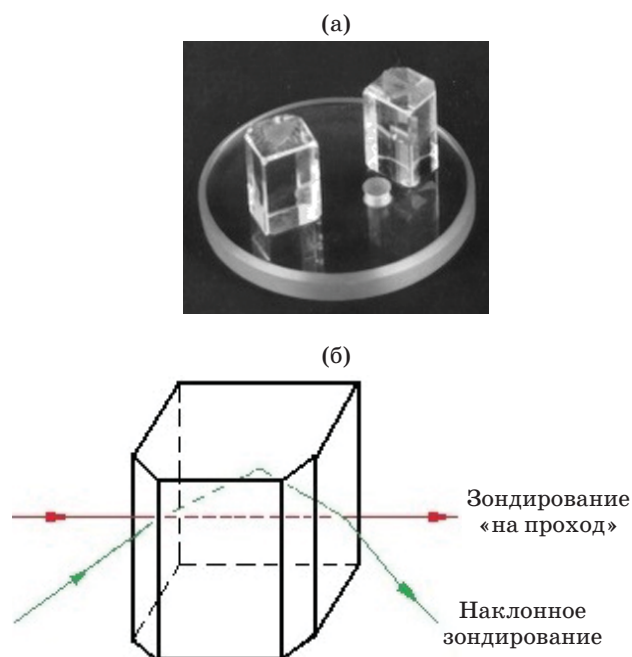


Рис. 2. Прецизионные лазерные призмы ПВО
Fig. 2. Precision laser TIR prisms

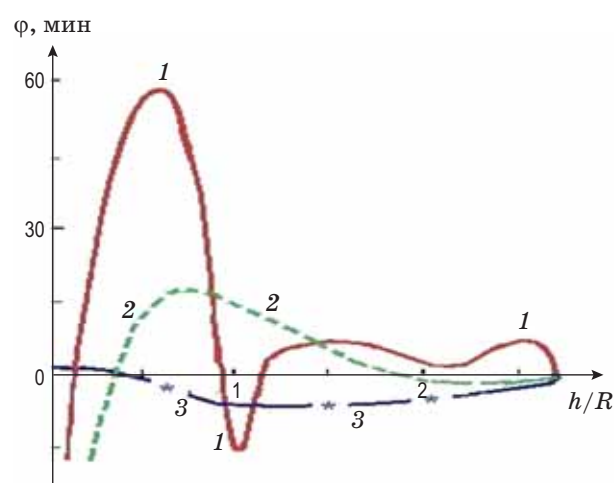


Рис. 3. Поляризационные отклики лазерных призм ПВО. Кривая 1 — зондирование «на проход», кривая 2 — «наклонное падение», кривая 3 — свободная (незакреплённая) призма

Fig. 3. Polarization responses of TIR laser prisms. Curve 1 — “pass probing”, curve 2 — “inclined incidence”, curve 3 — free (unfixed) prism

менты с параметрами $\Delta_1, \psi_1; \Delta_2, \psi_2$ и Δ_3, ψ_3 . Данные параметры характеризуют соответственно анизотропию исследуемого образца (призмы ПВО), вспомогательного юстировочного элемента и модулятора поляризации.

Анализ выполнен с использованием векторов и матриц Джонса [15]:

$$\mathbf{E}^{(\text{out})} = [\mathbf{T}(\Delta_1, \psi_1)\mathbf{T}(\Delta_2, \psi_2)\mathbf{T}(\Delta_3, \psi_3)]\mathbf{E}^{(\text{in})}, \quad (2)$$

где $\mathbf{E}^{(\text{out})}$ и $\mathbf{E}^{(\text{in})}$ — векторы Джонса входного и выходного излучения; $\mathbf{T}(\Delta_1, \psi_1)$, $\mathbf{T}(\Delta_2, \psi_2)$ и $\mathbf{T}(\Delta_3, \psi_3)$ — матрицы Джонса оптических элементов тракта. При выполнении анализа учтено, что величины Δ_1 и Δ_2 характеризуют слабую анизотропию (см. раздел 2). В результате для гармоник с частотой $(2k - 1)\Omega$, $k = 1, 2, \dots$ в спектре модуляции интенсивности выходного лазерного излучения получено следующее соотношение:

$$I_{2k-1}^{(\text{out})}(t) = (\Delta_1 \cos 2\psi_1 + \Delta_2 \cos 2\psi_2) J_{2k-1}[A_0 \sin(2k - 1)\Omega t] I_0, \quad (3)$$

где J_{2k-1} — функция Бесселя; A_0 и Ω — соответственно амплитуда и частота фазовой модуляции, I_0 — интенсивность падающего света. В эксперименте для получения отклика осуществлялась селекция и измерение амплитуды актуальной гармоники. Из соотношения (3) следует аддитивность аналитического сигнала (измеряемого отклика).

Матрицы Джонса исследуемых призм были построены для двух моделей. В плоской модели рассматривалась призма в виде пластины с приложенными к нижней её части и ортогональными её боковым поверхностям сжимающими силами. В цилиндрической модели призма имела вид цилиндра, к основанию которого приложены радиальные силы. В обоих случаях были получены качественно похожие зависимости [15].

Для примера на рис. 4 показаны расчётные кривые для цилиндрической модели. Кривая 1 соответствует зондированию «на проход», кривая 2 — «наклонному падению» (см. вставку на рис. 4). Видно хорошее соответствие характера теоретических зависимостей с результатами эксперимента (рис. 3). Вблизи основания величина откликов значительно возрастает. По мере удаления траектории зондирующего света от основания отклики уменьшаются, меняют знак, затем достигают максимума и после этого снова уменьшаются. Указанные особенности поведения откликов не связаны с какими-либо свойствами материала призм

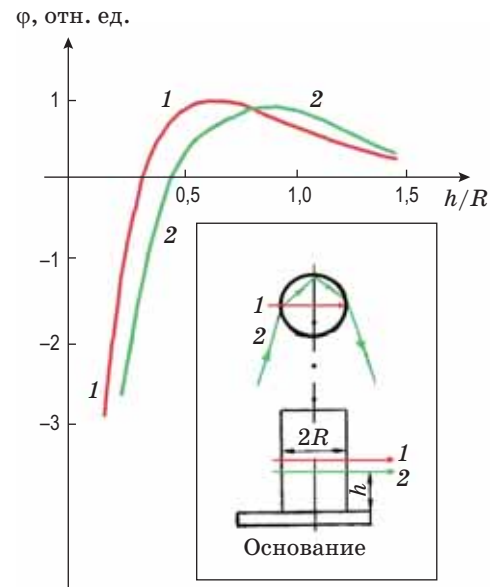


Рис. 4. Расчётные отклики для цилиндрической модели. Кривая 1 — зондирование «на проход», кривая 2 — «наклонное падение»

Fig. 4. Calculated responses for a cylindrical model. Curve 1 — “pass probing”, curve 2 — “inclined incidence”

(например, с полосами роста), так как для свободных призм характерны плавные зависимости (см. кривую 3 на рис. 3).

В работе [8] выполнено лазерное поляризационно-оптическое зондирование кристаллов флюорита высокого оптического качества. Получены и проанализированы поляризационно-оптические картины, количественно определено наблюдаемое двулучепреломление, а также определена кристаллографическая ориентация просвечиваемой плоскости. В исследуемых кристаллах впервые обнаружены характерные области малого структурного двулучепреломления.

С помощью развиваемых методов были исследованы слабые поляризационные отклики в лазерном излучении, рассеянном образцами из лейкосапфира, модифицированного методом пластической деформации. Показано, что возникающие при деформации изменения межатомных расстояний (постоянной кристаллической решётки) приводят к появлению в наблюдаемых откликах периодических зависимостей, определяемых наноструктурным характером модификации исследуемых кристаллов [21].

Полученные результаты демонстрируют, таким образом, высокую эффективность развиваемых методов и подходов для прецизионных исследований тонких особенностей оптической анизотропии прецизионных лазерных элементов и материалов.

4. ЛАЗЕРНАЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССА НАМАГНИЧИВАНИЯ МАГНИТОУПОРЯДОЧЕННОГО КРИСТАЛЛА

В некоторых приложениях большой интерес вызывает использование рассматриваемых подходов к исследованию веществ с малой прозрачностью в видимом диапазоне [9]. С этой целью в качестве модельного объекта был исследован монокристалл бората железа (FeVO_3), магнитная упорядоченность которого сохраняется в процессе его высокочувствительного поляризационно-оптического зондирования при комнатной температуре [9, 22].

Кристаллы бората железа представляют собой стопу из пластин (доменов) с хаотической ориентацией магнитных моментов (рис. 5). Домены разделены границами Нила и Блоха, которые могут перемещаться под воздействием поперечного магнитного поля. Возникающее при этом намагничивание кристалла сопровождается появлением поляризационных откликов (эффект Коттона–Мутона [17, 21–25]). Это хорошо видно на рис. 6, где показаны характерные зависимости поляризационных магнитооптических откликов монокристалла FeVO_3 от напряжённости поперечного магнитного поля при наблюдении на просвечивание (кривая 1, масштаб 1/100) и на отражение (кривая 2).

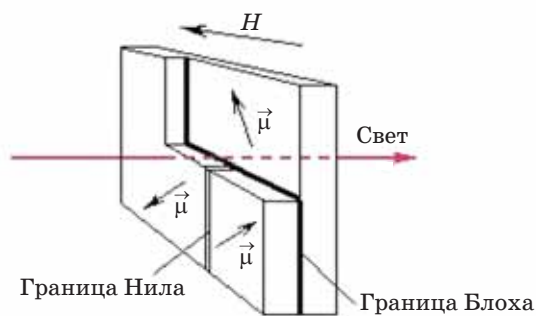


Рис. 5. Доменная структура кристалла бората железа (FeVO_3)

Fig. 5. Domain structure of iron borate crystal (FeVO_3)

При наблюдении «на просвечивание» помимо сравнительно плавных зависимостей были зарегистрированы характерные скачкообразные изменения откликов (рис. 7). Основной причиной данных особенностей являются, по-видимому, скачки Баркгаузена, обусловленные быстрым смещением границ и схлопыванием доменов [25, 26]. Численная оценка, учитывающая типичные размеры доменов, показывает, что подобные скачкообразные зависимости вполне могут быть зарегистрированы с помощью развиваемых методов [8]. Таким

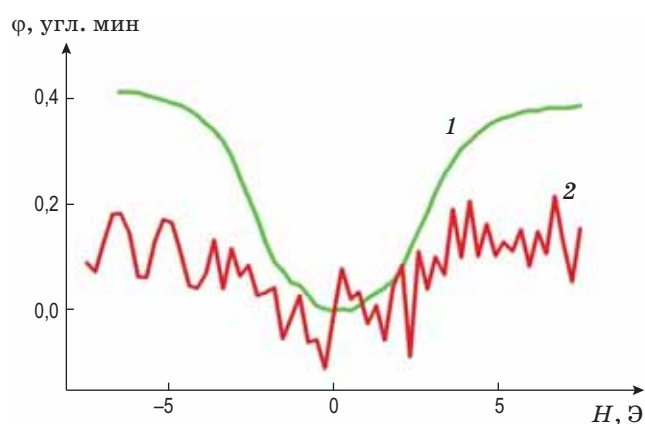


Рис. 6. Поляризационные магнитооптические отклики FeVO_3 . Кривая 1 — наблюдение на просвечивание (масштаб 1/100), кривая 2 — наблюдение на отражение

Fig. 6. Polarization magneto-optical responses of FeVO_3 . Curve 1 — observation for transmission (scale 1/100), curve 2 — observation for reflection



Рис. 7. Скачки в поляризационных откликах FeVO_3 . Кривая 1 — большие скачки, кривая 2 — маленькие скачки

Fig. 7. Jumps in polarization responses of FeVO_3 . Curve 1 — big jumps, curve 2 — small jumps

образом, описанные в этом разделе результаты показывают дополнительные возможности для изучения нестационарных процессов в оптических материалах.

5. ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА СЛАБЫХ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ ОТКЛИКОВ АНСАМБЛЕЙ НАНОЧАСТИЦ

Высококочувствительное лазерное зондирование и диагностика упорядоченных веществ и функциональных материалов со сравнительно слабыми магнитными свойствами вызывает в настоящее время заметный интерес. Наряду с описанными выше монокристаллами бората железа, такими объектами являются, например, магнитные наножидкости, которые находят широкое применение в различных технологиях, медицине и т.д. [16, 27–31]. Подобные жидкости представляют собой магнитные наносистемы, допускающие относительно несложное, но весьма необходимое во многих исследованиях и применениях прецизионное управление своими поляризационными и магнитооптическими характеристиками [32–37].

5.1. Особенности регистрации поляризационных откликов разбавленных магнитных наножидкостей

Хорошим модельным объектом для изучения магнитооптических откликов разбавленных наножидкостей является магнитная система из наночастиц магнетита в керосине [27, 28]. Исследования таких наносистем проводились ранее в относительно сильных (сотни эрстед) полях и для значительных (больших 10^{-3}) концентраций. В настоящее время становятся особенно актуальными исследования магнитооптических откликов магнитных наносистем для существенно меньших концентраций и полей [34–36]. В этих случаях вероятность появления различных структурных особенностей заметно уменьшается, что позволяет дополнить традиционные исследования магнитных наножидкостей изучением ансамблей отдельных, практически не взаимодействующих друг с другом наночастиц [31, 32].

Точки на рис. 8 характеризуют экспериментальную магнитную зависимость откликов магнитной наносистемы (наножидкости) «магнетит в керосине», находящейся в поперечном

магнитном поле (см. также рис. 1). Данная зависимость соответствует объёмной концентрации магнитной фазы 1% [31].

Очень похожие зависимости были зарегистрированы и в сериях опытов с наножидкостью такого типа в рекордно широком диапазоне концентраций $1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-2}$ [31, 32]. Наблюдаемое подобие магнитного поведения поляризационных откликов в указанном диапазоне концентраций послужило предпосылкой для проведения рассмотренного далее более детального количественного анализа полученных экспериментальных данных.

5.2. Аппроксимация магнитооптических откликов разбавленных наножидкостей

Полиномиальная аппроксимация экспериментальных данных показала, что в опытах со значительно разбавленными магнитными наножидкостями связь между аналитическими сигналами и напряжённостью магнитного поля является закономерной (неслучайной) (см. работу [38] и цитируемые в ней ссылки). При аналитической аппроксимации была минимизирована сумма $S(\alpha, \beta)$:

$$S(\alpha, \beta) = \sum_i^n [\varphi_i - \alpha F(\beta x_i)]^2, \quad (4)$$

где φ_i — поляризационные отклики; n — число точек; $\alpha F(\beta x_i)$ — модельная функция; α и β — варьируемые безразмерные параметры; x_i — переменная, пропорциональная H . Здесь функция $F(\mu H/kT)$, где μ — магнитный момент частиц; H — напряжённость поперечного магнитного поля, описывает отклик ансамбля магнитных наночастиц. Эта функция подробно рассмотрена в работах [39, 40], которые посвящены построению последовательной теории, описывающей магнитооптические свойства магнитных жидкостей.

Поиск минимума функции $S(\alpha, \beta)$, выполненный методом итерационных процедур и посредством решения системы нормальных уравнений, привел к количественно похожим результатам [38]. Кривая 1 на рис. 8 иллюстрирует магнитную зависимость поляризационных откликов $\varphi = \alpha_d F(\beta_d x)$, полученную в процессе аппроксимации показанных на этом же рисунке экспериментальных данных (точки). Далее привлеките внимание существование количественной связи минимизирующих значений параметров диагностики α_d

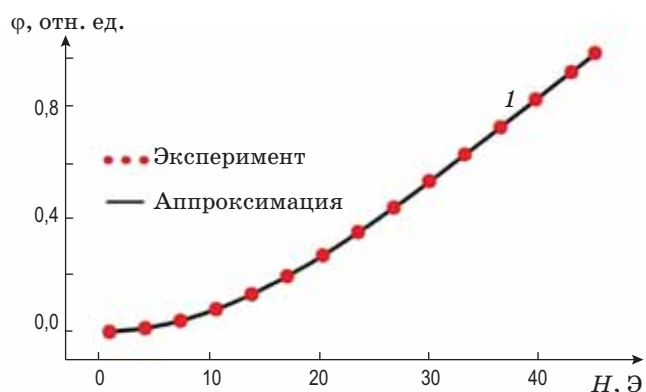


Рис. 8. Поляризационные отклики магнитной наносистемы «магнетит в керосине». Кривая 1 — аналитическая аппроксимация; точки — эксперимент

Fig. 8. Polarization responses of a magnetic nanosystem “magnetite in kerosene”. Curve 1 — analytical approximation; dots — experiment

и β_d с параметрами исследуемой наножидкости (см. соотношение (4)). Наличие такой связи означает, что в процессе описанной аппроксимации помимо диагностики (количественной характеристики) наблюдаемых поляризационных магнитооптических откликов была продемонстрирована и возможность диагностики собственно исследуемой магнитной наножидкости [38, 40].

5.3. Сравнительный анализ случайных и регулярных флуктуаций поляризационных откликов

В процессе развития методов поляризационно-оптической диагностики была исследована принципиальная возможность разделения и сравнительного анализа случайных и регулярных флуктуаций исследуемых поляризационных откликов [41]. С этой целью были определены вариации (относительные отклонения) параметров диагностики α_d и β_d от их прогнозируемых согласно используемой модели значений α_{pr} и β_{pr} :

$$\delta\alpha = (\alpha_d - \alpha_{pr})/\alpha_{pr}; \delta\beta = (\beta_d - \beta_{pr})/\beta_{pr}. \quad (5)$$

При вычислении параметров α_{pr} и β_{pr} было учтено, что параметр α_{pr} пропорционален концентрации и не зависит от поля, в то время как параметр β_{pr} не зависит ни от поля, ни от концентрации (см. соотношение (4)). При этом

исходные значения параметров α_{pr} и β_{pr} были определены по результатам аппроксимации для концентрации 1% [38].

На рис. 9 видно, что вариации для безразмерных параметров α и β заметно отличаются для разных концентраций, причём данное отличие характерно для обеих вариаций $\delta\alpha$ и $\delta\beta$. При анализе этих данных принято во внимание, что подготовка и исследования проб с разными концентрациями были выполнены со значительными сдвигами во времени [31, 41]. Вследствие этого в свойствах (параметрах) исследуемой наножидкости происходили неслучайные изменения, которые, как следует из соотношений (4) и (5), могли быть

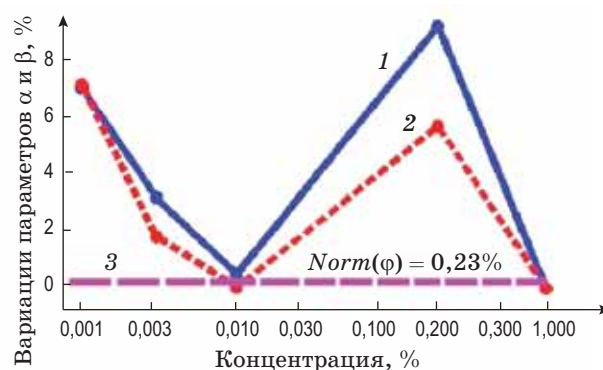


Рис. 9. Зависимости вариаций поляризационных откликов от концентрации. Кривая 1 — вариация $\delta\alpha$, кривая 2 — вариация $\delta\beta$, кривая 3 — $Norm(\varphi)$

Fig. 9. Dependences of variations in polarization responses on concentration. Curve 1 — variation $\delta\alpha$, curve 2 — variation $\delta\beta$, curve 3 — $Norm(\varphi)$

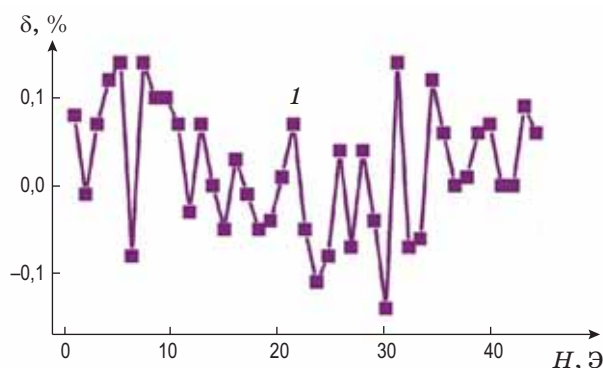


Рис. 10. Вариации откликов δ для одного скана. Кривая 1 — зависимость величины δ от напряжённости поперечного магнитного поля

Fig. 10. Response δ variations for one scan. Curve 1 — dependence of δ value on the strength of the transverse magnetic field

одной из причин медленных, от опыта к опыту, приращений вариаций $\delta\alpha$ и $\delta\beta$ [41].

На рис. 10 показаны типичные относительные вариации откликов δ , наблюдаемые в пределах единичных сканов. При анализе подобных зависимостей учитывалось, что длительность этих сканов обычно составляла около 10 мин и была значительно меньше временных интервалов между опытами. В результате характерные вариации откликов, показанные на рис. 10, определялись, главным образом, их случайными, сравнительно быстрыми флуктуациями [31, 41]. Уровень этих вариаций, вычисленный в терминах нормированной евклидовой нормы ($Norm(\varphi) = 0,23\%$), показан на рис. 9 линией 3 [41].

На рис. 9 можно легко увидеть, что достигнутый для некоторых концентраций минимальный уровень вариаций откликов сопоставим с уровнем их случайных флуктуаций. Так, значения $\delta\alpha$ и $\delta\beta$ для концентрации 0,01% очень малы ($\delta\alpha = 0,5\%$, $\delta\beta < 0,05\%$) и находятся на уровне случайных. При этом для концентраций 0,2% и 0,001% вариации $\delta\alpha$ и $\delta\beta$ существенно больше: $\delta\alpha = 8,9\%$, $\delta\beta = 5,5\%$ и соответственно $\delta\alpha = 6,8\%$, $\delta\beta = 6,9\%$. Такое значительное, более чем на порядок превышение уровня случайных флуктуаций говорит о регулярном, технологическом характере изменений (приращений) показанных на рис. 9 вариаций откликов для разных концентраций. Таким образом, рис. 9 иллюстрирует возможность разделения и сравнительного анализа быстрых случайных и регулярных технологических вариаций (флуктуаций) исследуемых поляризационных откликов [41].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем обзоре дано представление о перспективах развития и продемонстрированы новые возможности высокочувствительного лазерного поляризационно-оптического анализа и структурной диагностики упорядоченных веществ, материалов, микро- и наносистем. Рассмотрена иерархия критериев сильных и слабых поляризационных откликов (аналитических сигналов), которая определяет широкий, составляющий семь порядков, и удобный для исследований диапазон двулучепреломления от 1×10^3 угл. мин до 1×10^{-4} угл. мин. В этом диапазоне аналитическая шкала явля-

ется линейной, естественные флуктуации лазерного излучения и технические флуктуации в системе регистрации не искажают результаты поляризационно-оптического анализа, а наблюдаемые поляризационно-оптические отклики обладают свойством аддитивности.

Реализовано сканирующее зондирование монокристаллов флюорита и лейкосапфира высокого оптического качества и лазерных призм полного внутреннего отражения. При этом впервые обнаружены особенности слабых поляризационных откликов исследуемых образцов, определяемые их структурным двулучепреломлением и внешними воздействиями. Показано применение развиваемых подходов для исследования процессов намагничивания магнитоупорядоченных кристаллических магнетиков. При намагничивании монокристаллов бората железа экспериментально зарегистрированы сильные и быстрые приращения поляризационных откликов, обусловленные скачкообразными изменениями магнитной (доменной) структуры. Проведён последовательный теоретический анализ переноса модулированного по поляризации лазерного излучения через исследуемые объёмные образцы с малым двулучепреломлением.

Выполнено высокочувствительное лазерное зондирование магнитных наножидкостей низких концентраций — наносистем, магнетизм которых проявляется относительно слабо. Экспериментально установлено, что поляризационные отклики магнитной наножидкости «магнетит в керосине» пропорциональны концентрации магнитной фазы в диапазоне пяти порядков по концентрации. При этом впервые зарегистрирована и исследована магнитная зависимость поляризационных откликов для минимальной объёмной концентрации магнитной фазы 1×10^{-7} . Показана принципиальная возможность обнаружения, разделения и сравнительного изучения быстрых случайных и регулярных технологических вариаций слабых поляризационных откликов исследуемых объектов.

Полученные результаты в целом характеризуют высокую чувствительность и вполне приемлемую информативность развиваемых методов для исследований тонких особенностей флуктуаций структуры и оптической анизотропии для диагностики прецизионных оптических и лазерных функциональных эле-

ментов и материалов. Развиваемые подходы и методы могут быть расширены и далее применительно, например, к исследованиям упорядоченных, микро- и наноструктурированных

материалов, примесных центров и различных дефектов в оптических материалах и кристаллах, биологических жидкостей, объектов дрягой природы и структуры [20, 42].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аззам Р.М.А., Башара Н.М. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981. 583 с.
2. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М.: Наука, 1973. 576 с.
3. Александров Е.Б., Запасский В.С. Лазерная магнитная спектроскопия. Ленинград: Наука. Ленинградское отделение, 1986. 280 с.
4. Schellman J., Jensen H. P. Optical spectroscopy of oriented molecules // Chem. Rev. 1987. V. 87. P. 1359–1399. <https://doi.org/10.1021/cr00082a004>
5. Fofanov Ya.A. Threshold sensitivity in optical measurements with phase modulation // The Report of X Union Symposium and School on High-Resolution Molecular Spectroscopy. Proc. SPIE. 1992. V. 1811. P. 413–414.
6. Запасский В.С. Поляриметрия регулярных и стохастических сигналов в магнитооптике // Физика твердого тела. 2019. Т. 61. Вып. 5. С. 946–951.
7. Юшкин Н.П., Волкова Н.В., Маркова Г.А. Оптический флюорит. М.: Наука, 1983. 134 с.
8. Фофанов Я.А., Афанасьев И.И., Бороздин С.Н. Структурное двупреломление в кристаллах оптического флюорита // Оптический журнал. 1998. Т. 60. № 9. С. 22–25.
9. Фофанов Я.А., Плешаков И. В., Кузьмин Ю.И. Лазерное поляризационно-оптическое детектирование процесса намагничивания магнитоупорядоченного кристалла // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 1. С. 88–93.
10. Грищенко А.Е., Черкасов А.Н. Ориентационный порядок в поверхностных слоях полимерных материалов // УФН. 1997. Т. 167. № 3. С. 269–285.
11. Меркулов В.С. К обобщенной эллипсометрии сред // Оптика и спектроскопия. 2007. Т. 103. № 4. С. 646–648.
12. Acher O., Bigan E., Drevillon B. Improvements of phase-modulated ellipsometry // Rev. Sci. Instrum. 1989. V. 60(1). P. 65–77. <https://doi.org/10.1063/1.1140580>
13. Gupta V.K., Kornfield J.A., Ferencz A., Wegner G. Controlling molecular order in "Hairy-rod" Langmuir-Blodgett films: A polarization-modulation microscopy study // Science. 1994. V. 265(5174). P. 940–942. <https://doi.org/10.1126/science.265.5174.940>
14. Shindo Y., Kani K., Horinaka J., Kuroda R., Harada T. The application of polarization modulation method to investigate the optical homogeneity of polymer films // J. Plast. Film Sheeting. 2001. V. 17(2). P. 164–183. <https://doi.org/10.1106/1VGU-5D4Y-2KON-RBQF>
15. Sokolov I.M., Fofanov Ya.A. Investigations of the small birefringence of transparent objects by strong phase modulation of probing laser radiation // J. Opt. Soc. Am. A. 1995. V. 12. № 7. P. 1579–1588. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.12.001579>
16. Bitar A., Kaewsaneha C., Eissa M., Jamshaid T., Tangboriboonrat P., Polpanich D., Elaissari A. Ferrofluids: From preparation to biomedical applications // Jour-

REFERENCES

1. Azzam R.M.A., Bashara N.M. Ellipsometry and polarized light. Amsterdam, New York: North-Holland Pub. Co., 1977. 529 p.
2. Alexandrov A.Ya., Akhmetzyanov M.Kh. Polarizing-optical methods of mechanics of a deformable body. M.: Nauka, 1973. 576 p.
3. Alexandrov E.B., Zapassky V.S. Laser magnetic spectroscopy. Leningrad: Nauka. Leningrad branch, 1986. 280 p.
4. Schellman J., Jensen H. P. Optical spectroscopy of oriented molecules // Chem. Rev. 1987. V. 87. P. 1359–1399. <https://doi.org/10.1021/cr00082a004>
5. Fofanov Ya.A. Threshold sensitivity in optical measurements with phase modulation // The Report of X Union Symposium and School on High-Resolution Molecular Spectroscopy. Proc. SPIE. 1992. V. 1811. P. 413–414.
6. Zapasskii V.S. Polarimetry of regular and stochastic signals in magnetooptics // Physics of the Solid State. 2019. V. 61(6). P. 847–852. <https://doi.org/10.1134/S106378341905038X>
7. Yushkin N.P., Volkova N.V., Markova G.A. Optical fluorite. M.: Nauka, 1983. 134 p.
8. Fofanov Ya.A., Afanas'ev I.I., Borozdin S.N. Structural birefringence in crystals of optical fluorite // Journal of Optical Technology. 1998. V. 65. № 9. P. 700–702. elibrary Id 13304602 EDN LFDTQP
9. Fofanov Ya.A., Pleshakov I.V., Kuz'min Yu.I. Laser polarization-optical detection of the magnetization process of a magnetically ordered crystal // Journal of Optical Technology. 2013. V. 80. № 1. P. 64–67. <https://doi.org/10.1364/JOT.80.000064>
10. Grishchenko A.E., Cherkasov A.N. Orientation order in polymer surface layers // Phys. Usp. 1997. V. 40. P. 257–272. <https://doi.org/10.1070/PU1997v040n03ABEH000210>
11. Merkulov V.S. Generalized ellipsometry of anisotropic media // Optics and Spectroscopy. 2007. V. 103. Is. 4. P. 629–631. <https://doi.org/10.1134/S0030400X07100153>
12. Acher O., Bigan E., Drevillon B. Improvements of phase-modulated ellipsometry // Rev. Sci. Instrum. 1989. V. 60(1). P. 65–77. <https://doi.org/10.1063/1.1140580>
13. Gupta V.K., Kornfield J.A., Ferencz A., Wegner G. Controlling molecular order in "Hairy-rod" Langmuir-Blodgett films: A polarization-modulation microscopy study // Science. 1994. V. 265(5174). P. 940–942. <https://doi.org/10.1126/science.265.5174.940>
14. Shindo Y., Kani K., Horinaka J., Kuroda R., Harada T. The application of polarization modulation method to investigate the optical homogeneity of polymer films // J. Plast. Film Sheeting. 2001. V. 17(2). P. 164–183. <https://doi.org/10.1106/1VGU-5D4Y-2KON-RBQF>
15. Sokolov I.M., Fofanov Ya.A. Investigations of the small birefringence of transparent objects by strong phase modulation of probing laser radiation // J. Opt. Soc. Am. A. 1995. V. 12. № 7. P. 1579–1588. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.12.001579>
16. Bitar A., Kaewsaneha C., Eissa M., Jamshaid T., Tangboriboonrat P., Polpanich D., Elaissari A. Ferrofluids: From preparation to biomedical applications // Jour-

- nal of Colloid Science and Biotechnology. 2014. V. 3. № 1. P. 3–18. <https://doi.org/10.1166/jcsb.2014.1080>
17. Фофанов Я.А., Бардин Б.В. О поляризационных откликах объектов с малой оптической анизотропией // Научное приборостроение. 2016. Т. 26. № 1. С. 58–61. <https://doi.org/10.18358/np-26-1-i5861>
 18. Badoz J., Billardon M., Canit J.C., Russel M.F.J. Sensitive devices to determine the state and degree of polarization of a light beam using a birefringence modulator // Journal of Optics. 1977. V. 8. № 6. P. 373–384. <https://doi.org/10.1088/0150-536X/8/6/003>
 19. Клышко Д. Н., Масалов А. В. Фотонный шум: наблюдение, подавление, регистрация // УФН. 1995. Т. 165. № 11. С. 1249–1278.
 20. Kuraptsev A.S., Sokolov I.M., Fofanov Ya.A. Coherent specular reflection of resonant light from a dense ensemble of motionless point-like scatters in a slab geometry // Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 41. P. 1660141. <https://doi.org/10.1142/S2010194516601411>
 21. Fofanov Ya., Vetrov V., Ignatenkov B. Laser polarization-optical sounding of optical crystals and ceramics // IEEE Xplore Digital Library. ICLO. 2018. P. 406. <https://doi.org/10.1109/LO.2018.8435268>
 22. Diehl R., Jantz W., Nolang B.I., Wettling W. Growth and properties of iron borate FeBO_3 // Current Topics in Material Science. V. 11 / Ed. by Kaldis E. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1984. P. 241–387.
 23. Kurtzig A.J.J. Faraday rotation in birefringent crystals // Appl. Phys. 1971. V. 42. № 9. P. 3494–3498. <https://doi.org/10.1063/1.1660759>
 24. Саланский Н.М., Глозман Е.А., Селезнев В.Н. ЯМР и доменная структура в монокристалле FeBO_3 // ЖЭТФ. 1975. Т. 68. № 4. С. 1413–1417.
 25. Scott G.B. Magnetic domain properties of FeBO_3 // J. Phys. D: Appl. Phys. 1974. V. 7. P. 1574–1587. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/7/11/320>
 26. Рудяк В.М. Эффект Баркгаузена // УФН. 1970. Т. 101. № 3. С. 429–462.
 27. Scherer C., Figueiredo Neto A.M. Ferrofluids: Properties and applications // Braz. J. Phys. 2005. V. 35(3A). P. 718–727. <https://doi.org/10.1590/S0103-97332005000400018>
 28. Zhao Y., Lv R., Zhang Y., Wang Q. Novel optical devices based on the transmission properties of magnetic fluid and their characteristics // Opt. Lasers Eng. 2012. V. 50(9). P. 1177–1184. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.03.012>
 29. Agruzov P.M., Pleshakov I.V., Bibik E.E., Shamray A.V. Magneto-optic effects in silica core microstructured fibers with a ferrofluidic cladding // Applied Physics Letters. 2014. V. 104. № 7. P. 071108-4. <https://doi.org/10.1063/1.4866165>
 30. Zakinyan A.R., Dikansky Yu.I. Effect of microdrops deformation on electrical and rheological properties of magnetic fluid emulsion // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2017. V. 431. P. 103–106. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.09.057>
 31. Фофанов Я.А., Пешаков И.В., Прокофьев А.В. Исследование поляризационных магнитооптических откликов слабо концентрированной феррожидкости // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. Вып. 20. С. 66–72.
 32. Fofanov Ya.A., Pleshakov I.V., Prokof'ev A.V., Bibik E.E. Weak polarization-optical responses of diluted magnetic nanofluid probed by laser radiation with polarization modulation // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. 2021. V. 12 (1). P. 60–64. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2021-12-1-60-64>
 33. Fofanov Ya.A., Bardina B.V. On the polarization responses of the objects with a small optical anisotropy // Nauchnoe Priborostroenie. 2016. V. 26. № 1. P. 58–61. <https://doi.org/10.18358/np-26-1-i5861>
 34. Badoz J., Billardon M., Canit J.C., Russel M.F.J. Sensitive devices to determine the state and degree of polarization of a light beam using a birefringence modulator // Journal of Optics. 1977. V. 8. № 6. P. 373–384. <https://doi.org/10.1088/0150-536X/8/6/003>
 35. Klyshko D.N., Masalov A.V. Photon noise: observation, squeezing, interpretation // Phys.-Uspekhi. 1995. V. 38(11). P. 1203–1230. <https://doi.org/10.1070/PU1995v038n11ABEH000117>
 36. Kuraptsev A.S., Sokolov I.M., Fofanov Ya.A. Coherent specular reflection of resonant light from a dense ensemble of motionless point-like scatters in a slab geometry // Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 41. P. 1660141. <https://doi.org/10.1142/S2010194516601411>
 37. Fofanov Ya., Vetrov V., Ignatenkov B. Laser polarization-optical sounding of optical crystals and ceramics // IEEE Xplore Digital Library. ICLO. 2018. P. 406. <https://doi.org/10.1109/LO.2018.8435268>
 38. Diehl R., Jantz W., Nolang B.I., Wettling W. Growth and properties of iron borate FeBO_3 // Current Topics in Material Science. V. 11 / Ed. by Kaldis E. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1984. P. 241–387.
 39. Kurtzig A.J.J. Faraday rotation in birefringent crystals // Appl. Phys. 1971. V. 42. № 9. P. 3494–3498. <https://doi.org/10.1063/1.1660759>
 40. Salanski N.M., Glozman E.A., Seleznev V.N. NMR and the domain structure in FeBO_3 single crystal // Sov. Phys. JETP. 1975. V. 41. № 4. P. 704–706.
 41. Scott G.B. Magnetic domain properties of FeBO_3 // J. Phys. D: Appl. Phys. 1974. V. 7. P. 1574–1587. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/7/11/320>
 42. Rudyak V.M. The Barkhausen effect // Physics Uspekhi. 1971. V. 13. № 4. P. 461–479. <https://doi.org/10.1070/PU1971v013n04ABEH004681>
 43. Scherer C., Figueiredo Neto A.M. Ferrofluids: Properties and applications // Braz. J. Phys. 2005. V. 35(3A). P. 718–727. <https://doi.org/10.1590/S0103-97332005000400018>
 44. Zhao Y., Lv R., Zhang Y., Wang Q. Novel optical devices based on the transmission properties of magnetic fluid and their characteristics // Opt. Lasers Eng. 2012. V. 50(9). P. 1177–1184. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.03.012>
 45. Agruzov P.M., Pleshakov I.V., Bibik E.E., Shamray A.V. Magneto-optic effects in silica core microstructured fibers with a ferrofluidic cladding // Applied Physics Letters. 2014. V. 104. № 7. P. 071108-4. <https://doi.org/10.1063/1.4866165>
 46. Zakinyan A.R., Dikansky Yu.I. Effect of microdrops deformation on electrical and rheological properties of magnetic fluid emulsion // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2017. V. 431. P. 103–106. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.09.057>
 47. Fofanov Ya.A., Pleshakov I.V., Prokof'ev A.V., Bibik E.E. Investigation of polarization magneto-optic responses of a low-concentration ferrofluid // Technical Physics Letters. 2016. V. 42. № 10. P. 1054–1056. <https://doi.org/10.1134/S1063785016100205>
 48. Fofanov Ya.A., Pleshakov I.V., Prokof'ev A.V., Bibik E.E. Weak polarization-optical responses of diluted magnetic nanofluid probed by laser radiation with polarization modulation // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. 2021. V. 12 (1). P. 60–64. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2021-12-1-60-64>

33. Nepomnyashchaya E.K., Prokofiev A.V., Velichko E.N., Pleshakov I.V. Investigation of magneto-optical properties of ferrofluids by laser light scattering techniques // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. V. 431. P. 24–26. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.10.002>
34. Philip J., Laskar J.M. Optical properties and applications of ferrofluids — a review // *Journal of Nanofluids*. 2012. V. 1. № 1. P. 3–20. <https://doi.org/doi:10.1166/jon.2012.1002>
35. Candiani A., Konstantaki M., Margulis W., Pissadakis S. Optofluidic magnetometer developed in a microstructured optical fiber // *Optics letters*. 2012. V. 37. № 21. P. 4467–4469. <https://doi.org/10.1364/OL.37.004467>
36. Chi Chiu Chan, Peng Zu, Wen Siang Lew, Yongxing Jin, Yifan Zhang, Hwi Fen Liew, Li Han Chen, Wei Chang Wong, Xinyong Dong. Magneto-optical fiber sensor based on magnetic fluid // *Optics letters*. 2012. V. 37. № 3. P. 398–399. <https://doi.org/10.1364/OL.37.000398>
37. Davis H.W., Llewellyn J.P. Magnetic birefringence of ferrofluids: I. Estimation of particle size // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1979. V. 12(2). P. 311–319. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/12/2/018>
38. Фофанов Я.А., Манойлов В.В., Заруцкий И.В., Курапцев А.С. Статистический анализ данных высокочувствительного поляризационно-оптического зондирования магнитных наножидкостей // *Оптический журнал*. 2020. Т. 87. № 2. С. 36–43. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2020-87-02-36-43>
39. Скибин Ю.Н., Чеканов В.В., Райхер Ю.Л. Двойное лучепреломление в магнитной жидкости // *ЖЭТФ*. 1977. Т. 72. В. 3. С. 949–955.
40. Scholten P.C. The origin of magnetic birefringence and dichroism in magnetic field // *IEEE Trans. Magn.* 1980. V. 16(2). P. 221–225. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1980.1060595>
41. Фофанов Я.А., Манойлов В.В., Заруцкий И.В., Курапцев А.С. Лазерная диагностика слабых поляризационных откликов ансамблей наночастиц // *Известия РАН. Серия физическая*. 2022. Т. 86. № 6. С. 812–816. <https://doi.org/10.31857/S0367676522060126>
42. Weiss P., Cipris A., Kaiser R., Sokolov I.M., Guerin W. Superradiance as single scattering embedded in an effective medium // *Phys. Rev. A*. 2021. V. 103. № 2. P. 023702. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.103.023702>
- try, *Mathematics*. 2021. V. 12(1). P. 60–64. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2021-12-1-60-64>
33. Nepomnyashchaya E.K., Prokofiev A.V., Velichko E.N., Pleshakov I.V. Investigation of magneto-optical properties of ferrofluids by laser light scattering techniques // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. V. 431. P. 24–26. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.10.002>
34. Philip J., Laskar J.M. Optical properties and applications of ferrofluids — a review // *Journal of Nanofluids*. 2012. V. 1. № 1. P. 3–20. <https://doi.org/doi:10.1166/jon.2012.1002>
35. Candiani A., Konstantaki M., Margulis W., Pissadakis S. Optofluidic magnetometer developed in a microstructured optical fiber // *Optics letters*. 2012. V. 37. № 21. P. 4467–4469. <https://doi.org/10.1364/OL.37.004467>
36. Chi Chiu Chan, Peng Zu, Wen Siang Lew, Yongxing Jin, Yifan Zhang, Hwi Fen Liew, Li Han Chen, Wei Chang Wong, Xinyong Dong. Magneto-optical fiber sensor based on magnetic fluid // *Optics letters*. 2012. V. 37. № 3. P. 398–399. <https://doi.org/10.1364/OL.37.000398>
37. Davis H.W., Llewellyn J.P. Magnetic birefringence of ferrofluids: I. Estimation of particle size // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1979. V. 12(2). P. 311–319. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/12/2/018>
38. Fofanov Ya.A., Manoylov V.V., Zarutskii I.V., Kuraptsev A.S. Statistical analysis of the data of highly sensitive laser polarization-optical probing of magnetic nanofluids // *Journal of Optical Technology*. 2020. V. 87. № 2. P. 94–99. <https://doi.org/10.1364/JOT.87.000094>
39. Skibin Y.N., Chekanov V.V., Raikher Yu.L. Birefringence in ferromagnetic liquid // *Soviet Physics — JETP*. 1977. V. 45. № 3. P. 496–499. eLIBRARY ID: 19113218 EDN: OMLDXX
40. Scholten P.C. The origin of magnetic birefringence and dichroism in magnetic field // *IEEE Trans. Magn.* 1980. V. 16(2). P. 221–225. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1980.1060595>
41. Fofanov Y.A., Manoylov V.V., Zarutskiy I.V., Kuraptsev A.S. Laser diagnostics of weak polarization responses of nanoparticle ensembles // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2022. V. 86. № 6. P. 683–686. <https://doi.org/10.3103/S1062873822060120>
42. Weiss P., Cipris A., Kaiser R., Sokolov I.M., Guerin W. Superradiance as single scattering embedded in an effective medium // *Phys. Rev. A*. 2021. V. 103. № 2. P. 023702. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.103.023702>

АВТОРЫ

Яков Андреевич Фофанов — доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, 198095, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0009-0004-2565-8834>, yakinvest@yandex.ru

Владимир Владимирович Манойлов — доктор техн. наук, доцент, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, 198095, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID:6508332570, <https://orcid.org/0000-0002-3468-0628>, manoilov_vv@mail.ru

AUTHORS

Yakov A. Fofanov — D.Sci. in Physics and Mathematics, Chief Researcher, Institute for Analytical Instrumentation RAS, 198095, Saint-Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0009-0004-2565-8834>, yakinvest@yandex.ru

Vladimir V. Manoylov — D.Sci., Assistant Professor, Chief Researcher, Head of Laboratory, Institute for Analytical Instrumentation RAS, 198095, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID:6508332570, <https://orcid.org/0000-0002-3468-0628>, manoilov_vv@mail.ru