Письма в ЖЭТФ, том 104, вып. 3, с. 149 – 154

Увлечение поляритонов во вращающемся рубине

В. О. Гладышев[+], В. С. Горелик[+*1)], Д. И. Портнов[+], В. В. Филатов[+]

[+]Московский государственный технический университет им. Баумана, 105005 Москва, Россия

[*]Физический институт им. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 10 июня 2016 г.

Выполнены наблюдения люминесцентного светового следа во вращающемся кристалле рубина (Al_2O_3:Cr^{3+}) при его облучении когерентным электромагнитным излучением с длиной волны $\lambda = 532$ нм. Кристалл вращался в диапазоне частот от 2 до 200 Гц. Предложен метод определения времени жизни электронного возбужденного состояния ионов хрома по измерению длины дуги траектории светового пятна на поверхности вращающегося монокристалла рубина. Зарегистрирован "кометный след" внутри объема кристалла рубина, образующийся при прохождении излучения через вращающийся кристалл вблизи полосы поглощения вещества. Получено удовлетворительное согласие теории, основанной на анализе процесса движения поляритонов во вращающейся системе отсчета, с результатами экспериментальных исследований.

DOI: 10.7868/S0370274X16150029

Введение. Исследования закономерностей оптики движущихся сред, начиная с опытов Майкельсона и Физо, относятся к фундаментальным проблемам физики, связанным с принципом относительности и скоростью распространения оптического излучения в движущихся системах отсчета [1, 2]. Эти исследования имеют также большое практическое значение для контроля траектории космических аппаратов и движущихся устройств для их локализации в пространстве и установления характеристик движения. Особый интерес представляет исследование закономерностей распространения светового излучения в неинерциальных системах отсчета, в частности, во вращающихся оптически прозрачных телах. Исследования такого рода до настоящего времени проводились [3–6] в оптических материалах при зондировании лазерным излучением, длина волны которого была вдали от полос поглощения. В данной работе ставилась задача исследования оптических закономерностей во вращающемся диэлектрике при зондировании лазерным излучением, длина волны которого близка к полосе поглощения этого диэлектрика. В этом случае весьма существенной является дисперсия показателя преломления среды, движущейся в неинерциальной системе отсчета. В качестве объекта исследования нами был выбран монокристалл рубина, характеризующийся наличием интенсивной люминесценции в красной области спектра, а также присутствием поглощения и аномальной дисперсии показателя преломления в фиолетовой, зеленой и красной областях спектра [7–9].

Методика эксперимента. Образцы для исследования представляли собой ориентированные монокристаллы рубина в виде цилиндров длиной 5–8 мм и диаметром 10 мм. Кристаллографическая ось c совпадала с осью вращения z. При этом поверхности основания цилиндра были отполированы и параллельны друг другу. Принципиальная схема установки приведена на рис. 1. В качестве источника возбуждающего излучения использовался лазер на алюмоиттриевом гранате, генерирующий вторую оптическую гармонику ($\lambda = 532.0$ нм) и работающий в непрерывном режиме. Линза *2* фокусировала излучение лазера на вращающийся диск *3*, выполненный из рубина, наклеенного на вал электродвигате-

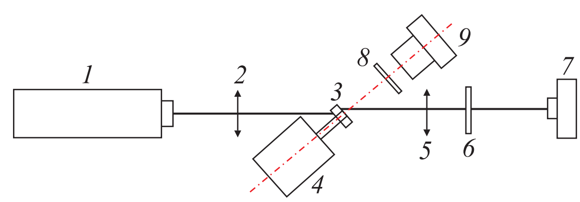

Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема экспериментальной установки: *1* – лазер на алюмоиттриевом гранате, генерирующий вторую оптическую гармонику; *2* – собирающая линза; *3* – диск из ориентированного кристалла рубина; *4* – электродвигатель; *5* – собирающая линза; *6* и *8* – красные светофильтры; *7* – фоторегистрирующее устройство (Spiricon BeamGage); *9* – цифровая фотокамера

1)e-mail: gorelik@sci.lebedev.ru

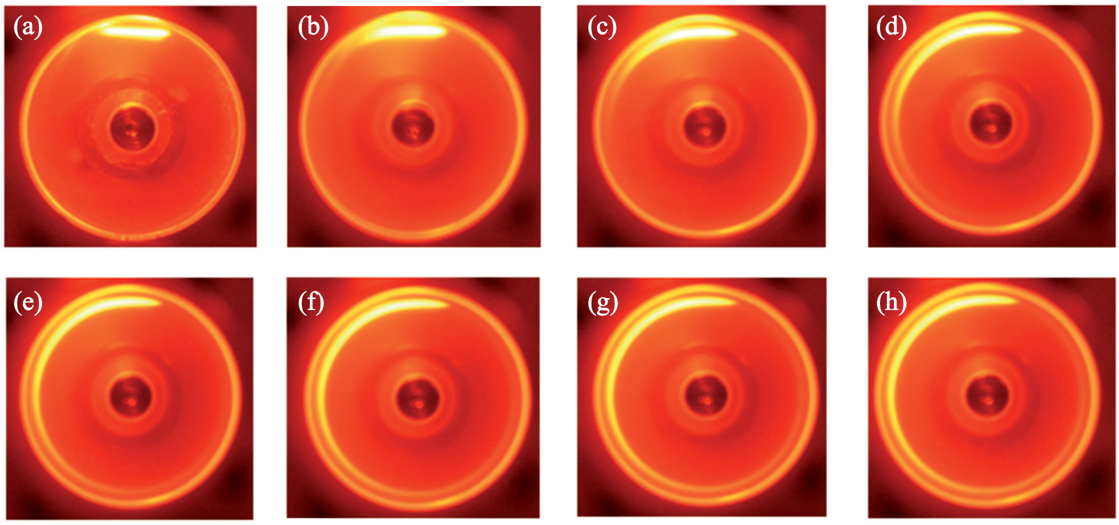

Рис. 2. (Цветной онлайн) Вид траектории лазерного луча во вращающемся кристалле рубина при различных частотах вращения ротора f: (a) – 0, (b) – 2.1, (c) – 5.0, (d) – 10.4, (e) – 16.4, (f) – 20 Гц, (g) – 23.3, (h) – 40.0 Гц

ля. С помощью линзы *5* вторичное излучение, возникающее в рубине, попадало на светофильтр *6* и фокусировалось в плоскости фоторегистрирующего устройства *7* (Spiricon Beam Gage).

Фокусировка излучения внутри материала рубинового диска позволяла усилить наблюдаемый эффект генерации поляритонов. Светофильтр *6* перед входом фоторегистрирующего устройства был необходим для того, чтобы в апертуру светочувствительной камеры попадало только излучение, вызванное возбуждением атомов рубина, и не попадало излучение, генерируемое лазером. Вторая оптическая гармоника лазера на алюмоиттриевом гранате с длиной волны 532 нм использовалась для возбуждения электронного состояния ионов хрома, введенных в матрицу кристаллов рубина. При прохождении зеленого излучения этого лазера через диск рубина можно было наблюдать траекторию распространения излучения красного цвета внутри образца, что связано с люминесцентными свойствами рубина [9]. Для анализа вида следа сфокусированного лазерного луча на поверхности вращающегося кристалла проводилось фотографирование передней грани кристалла с помощью цифрового фотоаппарата *7*. С помощью вращающегося устройства были исследованы оптические закономерности во вращающемся рубине при различных значениях угловых скоростей: от 2 до 200 Гц.

Результаты исследований. На рис. 2a–h приведен вид траектории лазерного луча во вращающемся кристалле рубина при различных угловых скоростях вращения.

Как видно из рис. 2, световая траектория на передней поверхности кристалла имеет вид дуги, длина которой изменялась при изменении скорости вращения кристалла. Как выяснилось, длина дуги следа лазерного луча на поверхности вращающегося кристалла рубина увеличивалась при возрастании скорости вращения. При дальнейшем увеличении угловой скорости вращения дуга трансформировалась в окружность.

В случае фотографирования рубинового диска с противоположной стороны (рис. 1) при вращении этого монокристалла формировалась фигура, имеющая форму “кометного хвоста” (рис. 3). С увеличе-

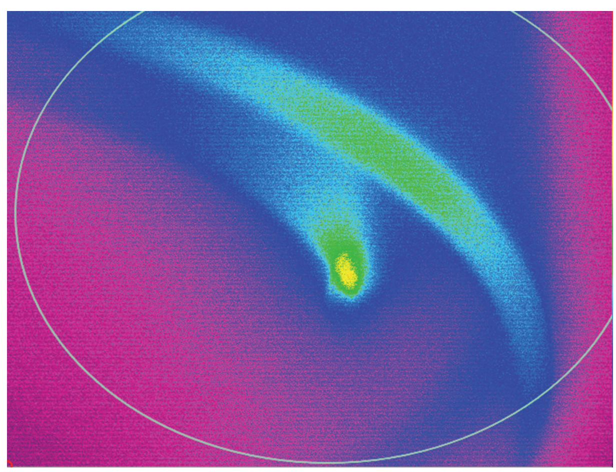

Рис. 3. (Цветной онлайн) Изображение траектории луча на задней поверхности вращающегося рубина, полученное на светочувствительной матрице *7* (рис. 1) при частоте вращения $f = 83$ Гц

нием скорости вращения площадь "кометного хвоста" возрастала.

Обсуждение результатов эксперимента. Наблюдаемый эффект формирования траектории луча в виде дуги на передней поверхности образца (рис. 2) обусловлен конечным временем жизни примесного электронного состояния иона хрома в рубине ($\lambda_r = 694.3$ нм), возбуждаемого при облучении кристаллов рубина зеленым лазерным излучением.

Из экспериментов известно, что время жизни атомов кристаллической решетки рубина в возбужденном состоянии (лазерного перехода R_l) длится порядка $\tau \approx 3.4$ мс [10].

Время жизни такого состояния также можно оценить на основе экспериментов с вращающимся рубином (рис. 2). Используя модель однократного кольцевого наложения излучения для интенсивности излучения в точке падения луча на поверхность кристалла, получим $I_1 = I_0(1 + \exp(-T/\tau))$, где I_0 – интенсивность излучения, создаваемого лазером, при входе в кристалл, T – период вращения диска и τ – время жизни возбужденного состояния. Здесь $I_0 \exp(-T/\tau)$ – интенсивность остаточного излучения через один оборот кристалла, т.е. через время T. Интенсивность в другой точке светового кольца, отстоящей по времени от точки падения на t равна $I = I_0 \exp(-t/\tau)(1+\exp(-T/\tau))$. Измеряя I_1, I, t, можно определить время жизни $\tau = t/\ln(I_1/I)$. Подставив экспериментальные данные, получим $\tau_{\text{exp}} \approx 5$ мс, что близко к значению τ, полученному при исследовании временных характеристик фотолюминесценции в рубине.

Формирование "кометного хвоста" (рис. 3) при вращении рубинового диска можно объяснить проявлением поляритонного эффекта [11–13]. В связи с этим мы приведем необходимые сведения из теории поляритонов, относящиеся к обсуждаемому кристаллу Al_2O_3:Cr^{3+}. Квантовое состояние, соответствующее возбуждению электрона внешней оболочки иона Cr^{3+}, проявляется в виде резкой малоинтенсивной полосы в спектре поглощения рубина на длине волны 694.3 нм. Обсуждаемое состояние является метастабильным и характеризуется очень малой силой осциллятора. Уравнение движения валентного электрона в поле электромагнитной волны можно представить в виде:

$$\ddot{u}_x = -\omega_r^2 u_x + eE_x. \qquad (1)$$

Здесь: u_x – смещение валентного электрона из положения равновесия; $\omega_r = 2\pi c/\lambda_r$ – частота резонансного перехода, соответствующая длине волны $\lambda_r = 694.3$ нм; e – заряд электрона; E_x – x-компонента напряженности электрического поля. При этом ось z вращения кристалла рубина совпадает с кристаллографической осью c этого кристалла.

Решение уравнения (1) в виде плоских монохроматических волн $E_x = E_x^{(o)} \exp i(k_z z - \omega t)$ совместно с уравнениями Максвелла приводит к следующему выражению для диэлектрической проницаемости среды:

$$n_x^2(\omega) = \varepsilon_x(\omega) = \varepsilon_\infty \left(\frac{\omega_l^2 - \omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2}\right)\left(\frac{\omega_{lr}^2 - \omega^2}{\omega_{0r}^2 - \omega^2}\right). \qquad (2)$$

В этой формуле учтены как дисперсионные свойства матрицы оксида алюминия (первый сомножитель), так и резонанс от частиц Cr^{3+} (вторая скобка). При этом $\varepsilon_\infty = 1$ – высокочастотная диэлектрическая проницаемость материала; $\omega_l = 2\pi c/\lambda_l$ – частота LO-моды для оксида алюминия ($\lambda_l = 70$ нм); $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$ – частота электронного резонанса в чистом Al_2O_3 ($\lambda_0 = 120$ нм [14]); $\omega_{0r} = 2\pi c/\lambda_{0r}$ и $\omega_{lr} = 2\pi c/\lambda_{lr}$ – частоты резонансных переходов в рубине ($\lambda_{lr} = 692.8$ нм, $\lambda_{0r} = 694.3$ нм).

Рассчитанный по соотношению (2) закон дисперсии показателя преломления $n(\omega)$ рубина представлен на рис. 4. При этом закон дисперсии $\omega(k_z)$ поляритонных волн в рубине в области резонанса ионов

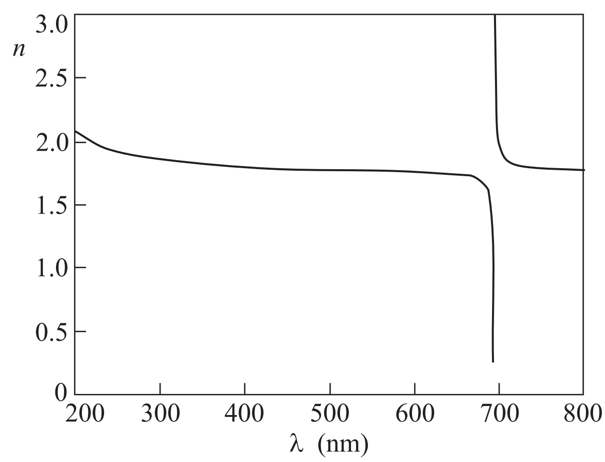

Рис. 4. Зависимость показателя преломления рубина n от длины волны λ

хрома задается в неявном виде следующим соотношением:

$$\omega^2 = \frac{c^2 k_z^2(\omega)}{\varepsilon_x(\omega)}. \qquad (3)$$

Графическая зависимость дисперсионных кривых поляритонов $\omega(k_z)$ в широкой области спектра представлена на рис. 5.

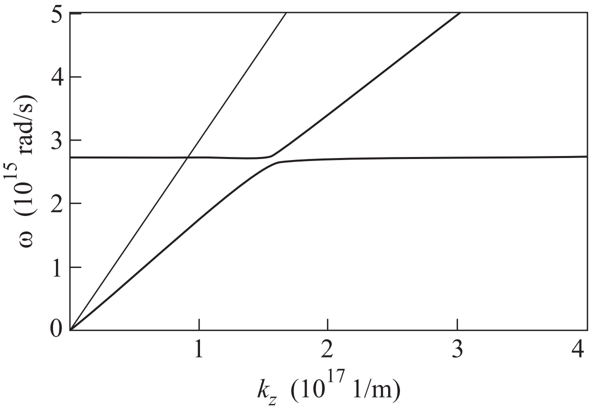

Рис. 5. Закон дисперсии (3) поляритонов в кристалле рубина. Для сравнения тонкой прямой линией показана дисперсионная зависимость для фотонов в вакууме

На основе установленного закона дисперсии поляритонов (3) можно рассчитать дисперсию групповой скорости $V_z(\omega)$ поляритонных волн в рубине:

$$V_z(\omega) = \left(\frac{dk_z(\omega)}{d\omega}\right)^{-1}. \tag{4}$$

Результаты расчетов групповых скоростей поляритонов по (4) представлены на рис. 6. Как видно из

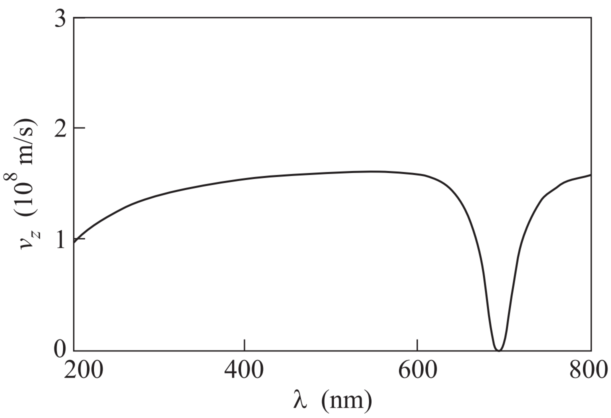

Рис. 6. Зависимость групповой скорости поляритонных волн от длины волны

этого рисунка, поляритоны, возникающие в результате возбуждения электронного перехода в ионах хрома в рубине с частотой ω_r ($\lambda_r = 694.3$ нм), характеризуются предельно малой скоростью движения относительно вращающейся системы координат: $V_x \approx 0$; $V_y \approx 0$; $V_z \approx 0$. При этом закон движения поляритонов, возникших внутри вращающегося рубинового кристалла на расстоянии ρ от оси вращения относительно лабораторной системы отсчета, имеет вид:

$$m\frac{d^2\rho}{dt^2} = m\omega^2\rho; \quad \frac{d\varphi}{dt} = \omega. \tag{5}$$

Здесь ρ – радиальная координата квазичастицы, а ω – угловая скорость вращения системы отсчета. С учетом условия равномерности вращения диска решение дифференциального уравнения (5) есть:

$$\rho(t) = \frac{1}{2}[\exp\omega t + \exp(-\omega t)]; \quad \varphi(t) = \omega t + \varphi_0. \tag{6}$$

При этом необходимо учесть, что электрон-поляритонная конверсия происходит в любой точке траектории диска в соответствии с временем жизни электрона в возбужденном состоянии. Поэтому внутри рубинового кристалла наблюдается след луча лазера в виде кольцевой полосы конечных размеров. Из расчетов следует, что при увеличении частоты вращения диска эта полоса превращается в кольцо, как показано на рис. 7. При этом в эксперименте должно наблюдаться целое семейство кривых, сливающихся в сплошной "кометный хвост". Результаты расчета траектории лазерного луча, полученные из (6), представлены на рис. 7 для различных частот вращения рубинового диска при фокусировке лазерного луча на расстоянии 5 мм от его оси.

Сравнение предсказаний теории с результатами эксперимента при частоте вращения диска 83 Гц можно произвести по рис. 7d и рис. 3. Как видно из этих рисунков, наблюдается удовлетворительное согласие теории с экспериментом.

В целом эксперименты, проведенные с вращающимся кристаллом рубина, имеют хорошее согласие с теорией люминесценции, согласуются с современными представлениями теории поляритонов и открывают новые возможности для изучения эффектов оптики движущихся сред в области аномальной дисперсии кристалла, где скорость поляритонных волн стремится к предельно малым значениям.

Заключение. Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований следов луча фотолюминесценции во вращающемся со скоростями от 2 до 200 Гц монокристалле рубина установлен вид траектории лазерного пятна на входной поверхности вращающегося кристалла, а также форма следов люминесцентного излучения внутри объема кристалла. В зависимости от скорости вращения образца рубина на передней поверхности вращающегося кристалла наблюдалась траектория в виде дуги конечной длины. При изменении скорости вращения наблюдалось изменение длины дуги траектории

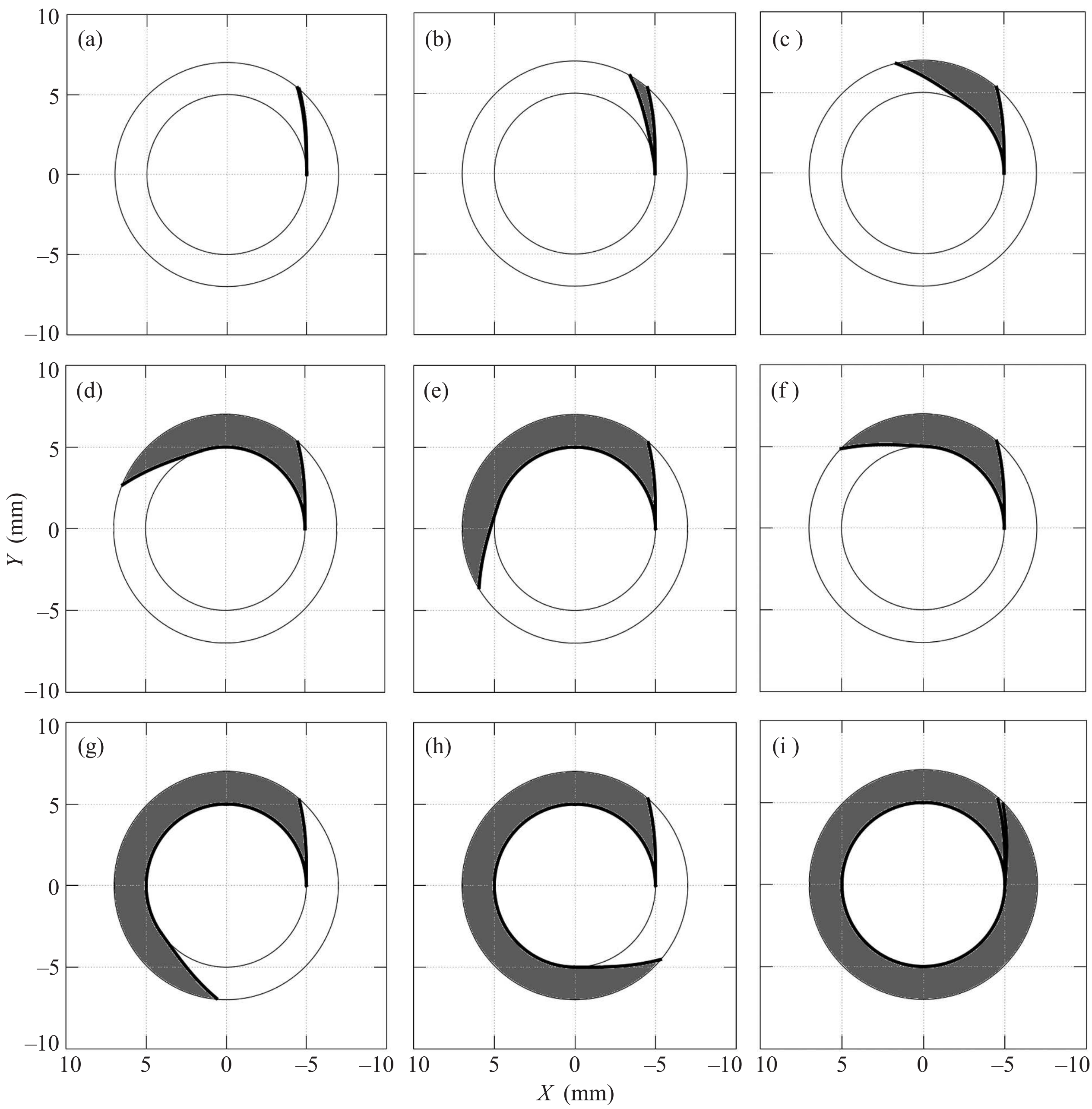

Рис. 7. Рассчитанные траектории "следов" движения поляритонов при различных частотах вращения диска: (a) – 1, (b) – 10, (c) – 50, (d) – 80, (e) – 100, (f) – 150, (g) – 200, (h) – 250, (i) – 330 Гц

на передней поверхности кристалла. При больших скоростях вращения дуга превращалась в окружность. Таким образом, по длине траектории люминесцентного следа на передней поверхности кристалла может быть определена угловая скорость вращения объекта.

На основе полученных при этом данных выполнена оценка времени жизни возбужденного коротковолновым излучением электронного состояния и получено удовлетворительное согласие с имеющимися экспериментальными данными. В результате предложен метод определения времени жизни возбужденного электронного состояния люминесцирующих сред по измерению формы и интенсивности люминесцентной траектории на передней грани поверхности кристалла.

Обнаружен "кометный след" при фотографировании внутренней области вращающегося кристалла. Получено качественное согласие наблюдаемой и рассчитанной форм траектории лазерного луча в объеме вращающегося кристалла рубина. Установленные закономерности траектории люминесцентного излучения в кристаллах рубина могут быть использованы для создания новых методов навигации и управления характеристиками приборов, движущихся в пространстве с переменной скоростью.

Авторы благодарят С.И. Макарова за помощь в изготовлении опытных образцов.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ # 16-02-00488 А и 16-08-00618 А.

1. M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics. Electromagnetic Theory of Propagation, interference and diffraction of light*, 7-th ed., Cambridge University Press (2003), p. 11.
2. A. J. Kox, J. Eisenstaedt (editors), *Universe of General Relativity, Einstein Studies*, Birkhauser, Boston, Bazel, Berlin (2005), p. 6, v. 11.
3. E. Wisniewski-Barker, G. M. Gibson, S. Franke-Arnold, R. W. Boyd, and M. J. Padgett, Optics Express **22**(10), 11690 (2014).
4. J. B. Götte, S. M. Barnett, and M. Padgett, Proc. R. Soc. London, A **463**, 2185 (2007).
5. V. O. Gladyshev, P. S. Tiunov, A. D. Leont'ev, T. M. Gladysheva, and E. A. Sharandin, Technical Physics **57**(11), 1519 (2012).
6. V. O. Gladyshev, D. I. Portnov, V. L. Kautz, and E. A. Sharandin, Optics and Spectroscopy **115**(3), 349 (2013).
7. T. H. Maiman, Nature **187**, 493 (1960).
8. T. H. Maiman, Phys. Rev. Lett. **4**(11), 564 (1960).
9. В. С. Горелик, Б. Г. Скуйбин, Н. А. Хусаинов, А. С. Борде, Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана, Естественные науки **5**, 32 (2014).
10. В. Л. Левшин, А. М. Салецкий, *Люминесценция и ее измерения. Молекулярная люминесценция*, изд-во МГУ (1989), 277 с.
11. О. С. Литвинов, В. С. Горелик, *Электромагнитные волны и оптика*, Сер. Физика в техническом университете, изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана (2006), p. 297.
12. В. С. Горелик, М. Г. Бурданова, Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Естественные науки **2**, 90 (2014).
13. В. С. Горелик, П. П. Свербиль, Неорганические материалы **51**(11), 1190 (2015).
14. M. J. Dodge, *Handbook of Laser Science and Technology*, CRC Press, Boca Raton, Washington D.C., London, N.Y. (1986), v. IV, Optical Materials, part 2, p. 30.