

## Поляризационно-чувствительные регистрирующие среды для голографии на базе красителя–флуорофора lucifer yellow

© В.Г. Шавердова, С.С. Петрова, А.Л. Пурцеладзе, В.И. Тарасашвили, М.В. Тарасашвили

Лаборатория голографической записи и обработки информации, Институт кибернетики,  
Грузинский технический университет,  
0186 Тбилиси, Грузия  
e-mail: shaverdova@inbox.ru

Поступила в редакцию 26.07.2019 г.

В окончательной редакции 26.07.2019 г.

Принята к публикации 01.11.2019 г.

Созданы поляризационно-чувствительные голограммные среды на основе матриц из поливинилпирролидона и желатины, в состав которых были введены красители Lucifer Yellow и Coumarin 466. С использованием линейно поляризованного излучения лазера LSR 405 NL-50 ( $\lambda = 405 \text{ nm}$ ) в люминесцентном фотоанизотропно-гиротропном материале записана мультиплексная динамическая голограмма Денисюка. Методом поляризационно-люминесцентной голографии измерены фотоанизотропные характеристики пучка, соответствующего восстановленному мнимому изображению поля объекта. Измерены поляризационные спектры и спектры интенсивности фотолюминесценции восстановленного изображения в зависимости от состава регистрирующей среды. Показана возможность мультиплексной записи и наблюдения за несколькими изображениями анизотропно-гиротропного объекта одновременно, если они закодированы разными частотами эмиссии и (или) состоянием поляризации. Комбинирование неdestructивного поляризационно-люминесцентного голографического метода измерения с другими люминесцентными спектроскопическими методами значительно расширяет область применения данного метода, резко повышает общую информативность исследования.

**Ключевые слова:** голография, красители, регистрирующие среды, поляризация.

DOI: 10.21883/OS.2020.02.48966.238-19

### Введение

После появления основополагающих работ Ш.Д. Качашвили с предложением нового поляризационно-голографического метода записи значительно возросло применение голографии для решения различных научно-практических задач: 1) переработки оптической информации и создания систем оптической памяти; 2) коррекции излучения, генерируемого лазером со сложным распределением поляризации по фронту; 3) создания дифракционных элементов с переменным профилем анизотропии и гиротропии и т.д. [1–4].

Как известно, основная сущность нового поляризационно-голографического метода заключается в том, что в качестве голограммных сред используются светочувствительные материалы, приобретающие под воздействием поляризованного излучения анизотропию и гиротропию поглощения (эффект Ф. Вейгерта); это позволяет моделировать состояние поляризации суммарной волны. Зарегистрированная в подобной среде голограмма однозначно реконструирует векторное поле объекта. Отсюда следует, что вопрос о регистрирующей среде в поляризационной голографии является центральным, это определяет особый интерес и требования к регистрирующим материалам [5–7]. В работе [8] нами было предложено использовать в голографии среды, спектр

люминесценции которых дает отклик на состояние поляризации облучающего излучения.

Поляризационно-чувствительные люминесцентные регистрирующие среды обладают рядом преимуществ по сравнению с поглощающими средами, в частности:

- сверхвысокая чувствительность;
- высокая скорость отклика — процесс люминесценции происходит в наносекундной шкале времени, что позволяет с успехом использовать его в задачах динамической поляризационной голографии;
- высокое пространственное разрешение, что позволяет проводить исследования различных наноструктурных систем на микроскопическом уровне;
- совместимость с живыми организмами — исследования видимым люминесцентным светом не влияют на процессы, происходящие в живой клетке.

Использование поляризационно-чувствительных люминесцентных регистрирующих сред предполагает возникновение совершенно новых возможностей и направлений в голографии, новые пути регистрации и преобразования электромагнитных волн. Методами поляризационно-люминесцентной голографии могут решаться ранее недоступные для голографии задачи, в том числе связанные с исследованием молекулярных структур люминесцирующих веществ; мультиплексная запись и наблюдение за несколькими анизотропно-гиротропными объектами одновременно, если они закодирова-

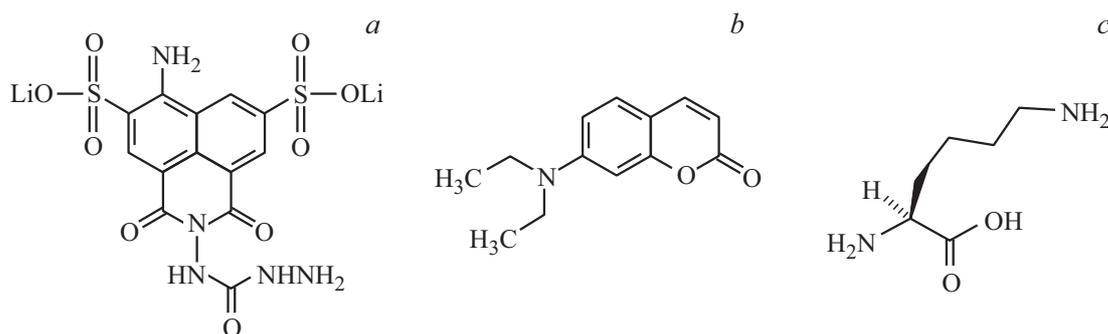


Рис. 1. Структурные формулы красителей Lucifer Yellow (a) и Coumarin 466 (b), аминокислоты лизина (c).

ны разными частотами эмиссии и (или) состоянием поляризации; возможность варьирования спектральным составом излучения как на стадии записи, так и на стадии считывания информации. Подобное обобщение голографического метода интересно как в научном отношении, так и с точки зрения возможности его использования в практике, поскольку с исследованием структур люминесцирующих анизотропно-гиротропных материалов связано решение большого числа разнообразных задач в медицине, астробиологии, геологии, минералогии и т.д. [9,10]. Методами поляризационно-люминесцентного голографического измерения авторами были исследованы поляризационно-люминесцентные характеристики разнообразных поляризационно-чувствительных люминесцентных сред; измерены поляризационные спектры и спектры фотолюминесценции (PhL) образцов в зависимости от их химической структуры, состава и состояния поляризации индуцирующего излучения. В частности, в работах [11] были исследованы битуминозные материалы — сырая нефть из различных буровых Сацхенинского месторождения и автомобильные бензины различных марок: AI-92, AI-95 и AI-98. Результаты исследования представляют интерес в нефтяной промышленности при диагностике нефтяных загрязнений, контроля качества углеводородных топлив и их идентификации. Как указывалось выше, получение новых высокочувствительных регистрирующих сред представляется весьма актуальным для решения задач поляризационно-люминесцентной голографии.

Целью данной работы являлось создание и исследование регистрирующих сред, в состав которых введены флуоресцирующие красители типа Lucifer Yellow и Coumarin 466. Они обладают выраженными эффектами векторных реакций и отвечают специфическим требованиям, необходимым для успешного решения задач поляризационно-люминесцентной голографии, в частности, имеют широкий спектральный диапазон поляризованной люминесценции, высокий квантовый выход, заметный стоксов сдвиг. Указанные красители широко применяются в качестве флуоресцентных маркеров и зондов для определения гормонов, лекарственных препаратов, наркотиков, в клинической химии, биологии и т.п. [12,13].

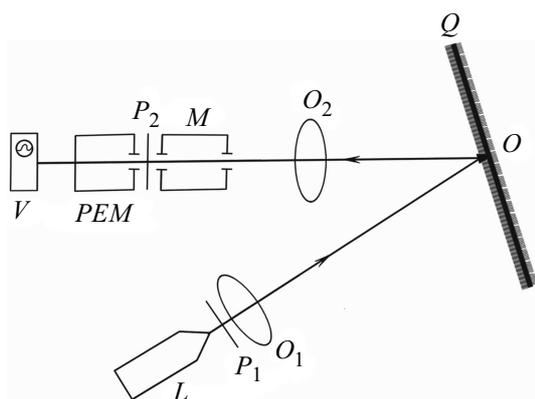
На наш взгляд, комбинирование неdestructивного и безопасного для исследования различных биологических систем поляризационно-люминесцентного голографического метода с аналогичными стандартными поляризационно-люминесцентными спектральными методами измерения резко повышает общую информативность исследования и значительно расширяет область применения данного метода.

## Материалы и методика измерений

В данной работе мы представляем регистрирующие композиции, в состав которых были введены красители Lucifer Yellow (структурная формула — рис. 1, a) и Coumarin 466 (рис. 1, b).

В одну из композиций была добавлена аминокислота лизин (рис. 1, c), спектр люминесценции которой представляет собой сложную по форме и широкую спектральную полосу, расположенную в интервале (310–500 nm). Красители Lucifer Yellow и Coumarin 466 вводились в один из пленкообразующих полимеров: поливинилпирролидон (PVP) и желатина (Jel). Результаты проведенных ранее исследований показали, что фотоанизотропные свойства регистрирующих сред зависят от структуры матрицы и красителя [14]. Матрица желатины относится к нейтральным, имеет форму глобулярного клубка с переменным значением свободного объема между отдельными сегментами макромолекулы желатины. Водорастворимые азокрасители, диссоциируя в водном растворе, могут присоединяться к молекулам желатины, имеющей амфотерные свойства, или же диффундировать внутри свободного объема между отдельными фрагментами молекулы желатины. PVP относится к химически активным матрицам. Его активность связана с наличием атома азота в пиррольном кольце молекулы, благодаря чему она приобретает способность к комплексообразованию с молекулами красителя.

В качестве метода исследования полученных фотоанизотропно-гиротропных люминесцентных сред был использован метод поляризационных спектров. С его помощью удастся определять взаимное расположение поглощающих и излучающих осцилляторов в молекулах,



**Рис. 2.** Оптическая схема голографического поляризационного спектрофлуориметра:  $L$  — лазер,  $P_1$  — линейный поляризатор (призма Глана),  $O_1$ ,  $O_2$  — объективы (коллиматоры),  $O$  — объект (плоское зеркало с внешним алюминированием),  $Q$  — динамическая поляризационно-люминесцентная голограмма,  $M$  — монохроматор;  $P_2$  — анализатор,  $PEM$  — фотоумножитель PMT-62,  $V$  — измерительное устройство.

а также устанавливать связь между симметрией молекул и степенью анизотропии индуцированной фотолюминесценции. Отметим также, что поляризационные спектры тесно связаны с химической структурой исследуемых веществ и в некоторых случаях могут быть более характерными, чем спектры поглощения и люминесценции.

Спектры поглощения получены на спектрофотометре Specord UV-VIZ, модифицированном для поляризационных измерений. Количественные измерения фотоанизотропных характеристик индуцированной поляризованной фотолюминесценции проводились на голографическом поляризационном спектрофлуориметре, собранном нами на основе монохроматора УМ-2. Установка давала возможность записи и реконструкции динамических поляризационных люминесцентных голограмм Денисюка; была снабжена поляризационными призмами Глана, что давало возможность проводить измерения фотоанизотропных и фотогиротропных характеристик индуцированной поляризованной люминесценции полученных сред для построения поляризационных спектров.

Схема голографического поляризационного спектрофлуориметра показана на рис. 2. На исследуемых образцах проведена серия экспериментов по поляризационной записи люминесцентных голограмм с использованием линейно поляризованного когерентного излучения лазера LSR 405 NL-50 ( $\lambda = 405 \text{ nm}$ ). На пути возбуждающего пучка устанавливался линейный поляризатор  $P_1$  (призма Глана). Голограммы записывались по классической оптической схеме, предложенной Ю.Н. Денисюком [15]. В качестве анизотропно-гиротропного объекта  $O$  служило плоское зеркало с внешним алюминированием — поляризующий оптический элемент, удовлетворяющий теоретическим условиям, необходимым для адекватной реконструкции векторного поля объекта [16]. Объект располагался непосредственно за пластинкой с

пробами образца на подложке и освещался линейно-поляризованным излучением лазера через слой голограммной среды  $S$ . Отраженные от объекта волны распространялись назад к этому же слою. В результате наложения падающего и отраженного излучений возникает система стоячих волн — интерференционное поле во встречных пучках, передающее все особенности волнового фронта объекта, т.е. динамическая поляризационно-люминесцентная голограмма Денисюка  $Q$  [17,18].

Пучок, соответствующий восстановленному мнимому изображению объекта, для поляризационного анализа проецировался на входную щель монохроматора  $M$ , откалиброванного по пропусканию и по длинам волн с точностью  $\pm 1 \text{ nm}$ . После прохождения монохроматора  $M$  (где происходит отбор длин волн из требуемого интервала спектра люминесценции и блокирование возбуждающих длин волн) он попадал на линейный поляризатор  $P_2$  (анализатор), имеющий возможность поворачиваться относительно электрического вектора возбуждающего излучения. Далее пучок люминесценции попадал на чувствительный фотоприемник PEM — PMT-62, откалиброванный по спектральной чувствительности и скомпенсированный по темновому току. Электрический сигнал с PMT поступал на измерительное устройство  $V$ , показания которого при различных положениях барабана УМ-2 и ориентациях анализатора  $P_2$  ( $0^\circ$  и  $90^\circ$ ) относительно электрического вектора возбуждающего излучения служили для построения поляризационных спектров люминесценции. Таким образом были получены спектры интенсивности индуцированной фотолюминесценции и поляризационные спектры: спектральные зависимости степени анизотропии люминесценции и коэффициента эллиптичности поляризации восстановленного с мультиплексных голограмм поля объекта (линейно поляризованного лазерного пучка) на разных частотах эмиссии регистрирующего материала. Степень анизотропии люминесценции восстановленного поля объекта рассчитывалась по формуле  $r = \frac{I_0 - I_{90}}{I_0 + 2I_{90}}$ , коэффициент эллиптичности поляризации восстановленного поля объекта — по формуле  $K_e = \frac{I_{90}}{I_0}$ . Здесь  $I_0$  и  $I_{90}$  — интенсивности взаимно перпендикулярно поляризованных компонент люминесценции восстановленного поля объекта.

В нашем эксперименте для поляризационного анализа пучка, соответствующего восстановленному мнимому изображению объекта, использовалась также поляризационно-голографическая дифракционная решетка анизотропного профиля. Оптическая схема установки, приведенная на рис. 2, при несложной модификации позволяет осуществить подобный анализ, а именно после прохождения монохроматора  $M$  пучок падал на поляризационно-голографическую дифракционную решетку анизотропного профиля, затем на линейный поляризатор  $P_2$  и на фотокамеру (решетка анизотропного профиля и фотокамера на схеме не показаны).

Как известно, дифракционные решетки анизотропного профиля способны разлагать поступающее на них излу-

чение на ортогональные (линейные и циркулярные) компоненты, направляя их соответственно в положительные и отрицательные порядки, что позволяет использовать решетки в оптических системах в качестве анализирующего элемента поляризации [19]. При считывании такой решетки эллиптически поляризованным светом, пучки +1 и -1-го порядков дифракции оказываются право- и лево-циркулярно поляризованными, а отношение их интенсивностей не зависит от ориентации эллипса поляризации падающего пучка и может служить мерой его эллиптичности. В нашем случае дифракционная решетка анизотропного профиля получена на высокочувствительном фотоанизотропно-гиротропном материале на базе органического красителя ПЧЖ, введенного в желатиновую матрицу.

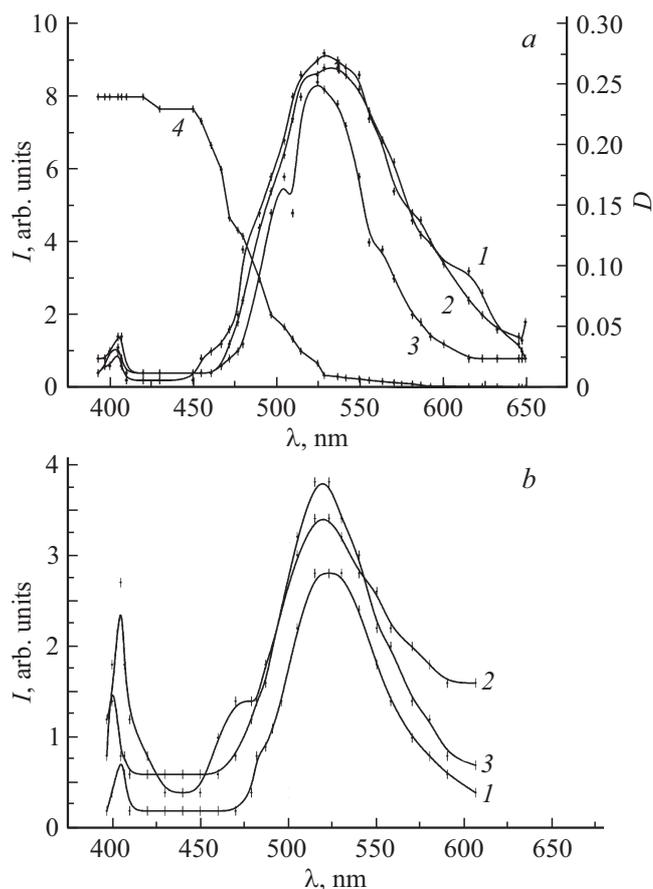
## Результаты и обсуждение

Были измерены спектры люминесценции и поляризационные спектры пучка восстановленного поля объекта с мультиплексных голограмм, зарегистрированных в различных поляризационно-чувствительных композициях и матрицах Jel и PVP. Спектры получены при одинаковых условиях записи мультиплексных поляризационно-люминесцентных голограмм с использованием линейно поляризованного излучения лазера LSR 405 NL-50 ( $\lambda = 405 \text{ nm}$ ,  $W = 30 \text{ mW}$ ).

В состав композиции № 1 вошли: высокоэффективный флуоресцирующий краситель Lucifer Yellow и лизин, в составе композиции № 2 к красителю Lucifer Yellow добавлялся краситель Coumarin 466. Для сравнения влияния введенных допантов на спектры излучения и поляризации в качестве эталона был использован краситель Lucifer Yellow (композиция № 3). Ингредиенты были введены в водорастворимые матрицы PVP и Jel.

На рис. 3 приведено спектральное распределение интенсивности поляризованной люминесценции восстановленного поля объекта, зарегистрированного в поляризационно-чувствительных композициях на основе матриц Jel (рис. 3, *a*) и PVP (рис. 3, *b*). На рис. 3, *a* приведен также спектр поглощения (кривая 4) композиции № 2, измеренный на спектрофотометре Specord UV-VIZ. Как видно из приведенного рисунка, стоксов сдвиг составляет  $\approx 125 \text{ nm}$ .

Приведенные рисунки демонстрируют наличие широкого спектра поляризованной люминесценции от 400 до 650 nm для всех композиций. Это объясняется тем, что  $\pi$ -электронная система красителей типа Lucifer Yellow очень разветвленная. Молекула содержит донорные группы и ионогенную дилитиевую группу. При возбуждении молекулы красителя длиной волны 405 nm происходят многочисленные электронные переходы с возбужденного уровня на основной, это благоприятствует как возникновению люминесценции, так и смещению ее в длинноволновую область спектра. Интенсивность

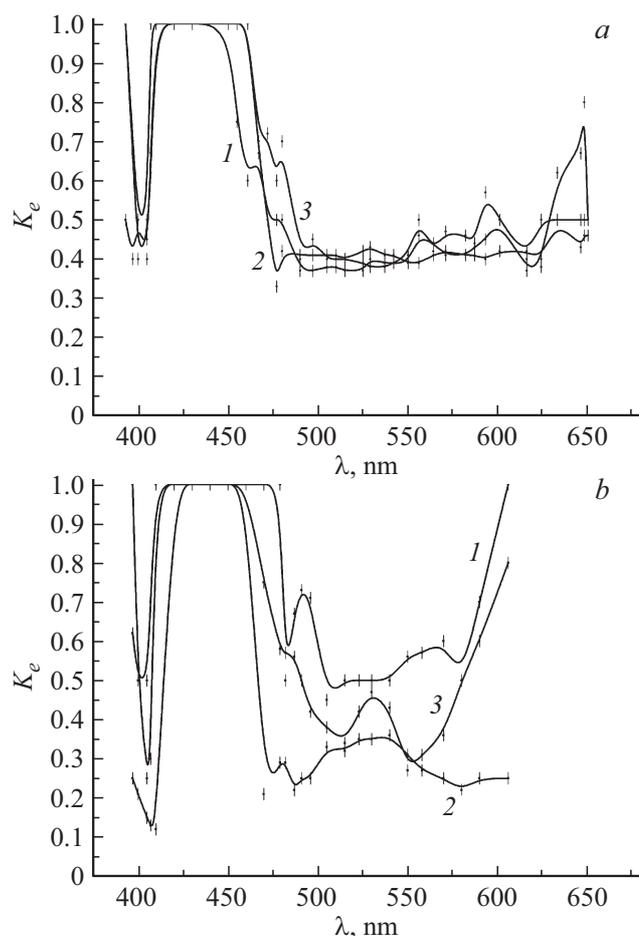


**Рис. 3.** Спектры интенсивности восстановленного поля объекта: композиция № 1 (1), композиция № 2 (2), эталонный образец № 3 (3); спектр поглощения композиции № 2 (4) в матрице Jel (*a*) и в матрице PVP (*b*).

люминесценции для всех образцов существенным образом зависит от типа матрицы. Интенсивность излучения в Jel приблизительно в 2 раза выше, чем в матрице PVP. Наблюдаемое тушение люминесценции в PVP матрице может быть связано с образованием комплекса с активной молекулой полимера [14].

На рис. 4 и 5 приведены измеренные поляризационные спектры восстановленного поля объекта для всех трех композиций в матрицах Jel (*a*) и PVP (*b*). На рис. 4 показано спектральное распределение коэффициента эллиптичности поляризации поля объекта (параметр —  $K_e$ ), на рис. 5 — спектральное распределение степени анизотропии люминесценции (параметр  $r$ ).

Как видно из приведенных рисунков, у поляризационных спектров восстановленного поля объекта (для всех трех композиций регистрирующих сред различного химического строения) в обеих матрицах Jel и PVP имеются спектральные области, для которых значения коэффициента эллиптичности поляризации поля объекта  $K_e \approx 1$ , а значения  $r \approx 0$ . Это означает, что в спектральном диапазоне  $\approx (420-460 \text{ nm})$  состояние поляризации восстановленного поля объекта отличается



**Рис. 4.** Коэффициент эллиптичности поляризации (параметр  $K_e$ ) восстановленного поля объекта: в матрице Jel (*a*) и в матрице PVP (*b*): композиция № 1 (*1*), № 2 (*2*), эталонный образец № 3 (*3*).

от состояния поляризации линейно поляризованного регистрирующего лазерного излучения, и превращается в циркулярно поляризованное. В длинноволновом диапазоне  $\approx 460\text{--}660\text{ nm}$ , состояние поляризации восстановленного поля объекта — эллиптически поляризовано ( $K_e \leq 1$ ,  $r \geq 0$ ).

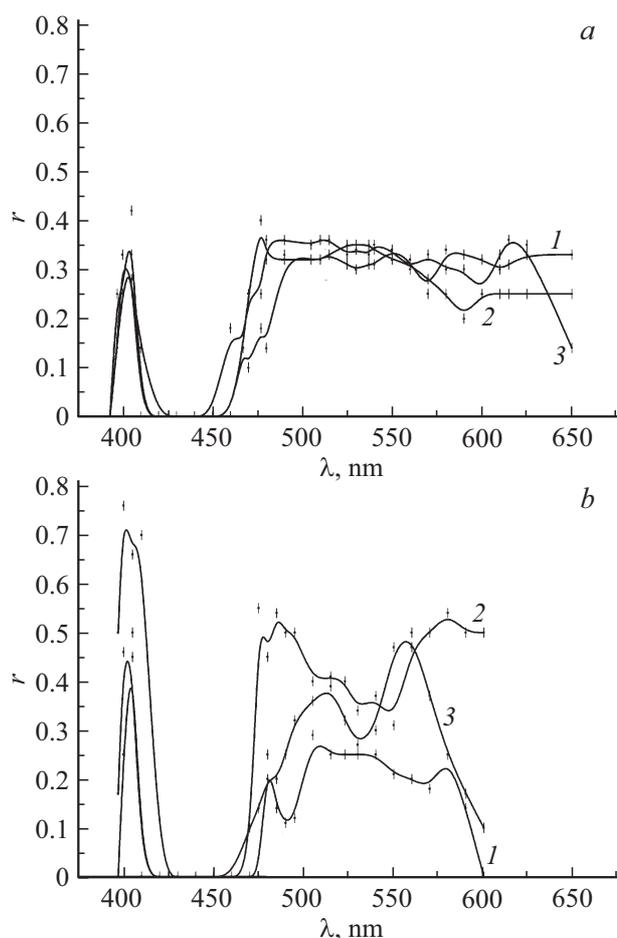
Наблюдаемые особенности характера наведенной поляризованным светом анизотропии PhL (состояние поляризации восстановленного поля объекта) могут быть интерпретированы с помощью модели анизотропного осциллятора [20]. Согласно этой модели, изменение состояния поляризации анизотропных излучающих осцилляторов при фиксированной длине волны возбуждающего света может быть истолковано с точки зрения раздельных осцилляторов поглощения и излучения.

Из приведенных рисунков видно также, что матрица Jel в пределах погрешности эксперимента не влияет на значения степени анизотропии люминесценции и коэффициента эллиптичности поляризации поля объекта. В матрице PVP заметен существенный разброс значений этих параметров в зависимости от химического

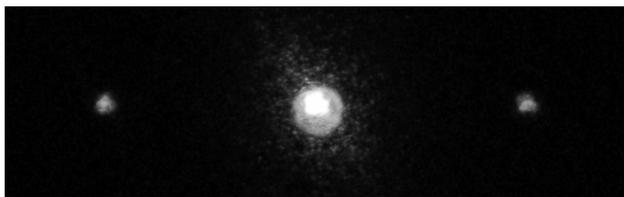
состава используемых композиций. Из теории известно, что степень анизотропии люминесценции уменьшается с увеличением симметрии молекул [21], поэтому по величине степени анизотропии можно судить о природе молекул красителя. Взаимное влияние донорных красителей Lucifer Yellow и Coumarin 466 с активной матрицей PVP (композиция № 2) может приводить к возникновению сложных комплексов [14], образуя более симметричную структуру, чем и вызвано уменьшение значений степени анизотропии люминесценции восстановленного поля объекта для данной композиции.

Опираясь на полученные результаты, показана возможность проведения записи и реконструкции, мультиплексных поляризационно-люминесцентных динамических голограмм на полученных регистрирующих материалах (композициях) почти во всей видимой спектральной области (414–700 nm).

Как указывалось выше, для поляризационного анализа пучка, соответствующего восстановленному мнимому изображению поля объекта, использовалась поляризационно-голографическая дифракционная решетка анизотропного профиля.



**Рис. 5.** Степень анизотропии люминесценции (параметр  $r$ ) восстановленного поля объекта в матрице Jel (*a*), в матрице PVP (*b*): композиция № 1 (*1*), композиция № 2 (*2*), эталонный образец № 3 (*3*).



**Рис. 6.** Картина дифракции восстановленного изображения волнового поля объекта на решетке анизотропного профиля (длина волны эмиссии  $\lambda = 593 \text{ nm}$ ;  $K_e \leq 1$ ,  $r \geq 0$ ).



**Рис. 7.** Картина дифракции изображения восстановленного волнового поля объекта на решетке анизотропного профиля (длина волны эмиссии  $\lambda = 450 \text{ nm}$ ;  $K_e \leq 1$ ,  $r \geq 0$ ).

На рис. 6 приводится картина дифракции восстановленного изображения волнового поля объекта на длине волны эмиссии  $\lambda = 593 \text{ nm}$  ( $K_e \leq 1$ ,  $r \geq 0$ ). В центре видно недифрагированное эллиптически поляризованное изображение восстановленного поля объекта (нулевой порядок дифракции). Слева и справа от него право- и лево-циркулярно поляризованные пучки, дифрагированные соответственно в  $+1$ -й и  $-1$ -й порядки. Это показывает, что состояние поляризации восстановленного поля объекта на длине волны эмиссии  $\lambda = 593 \text{ nm}$  ( $K_e \leq 1$ ,  $r \geq 0$ ) эллиптически поляризовано. В качестве голограммной среды служили образцы композиции № 2 в матрице PVP, имеющие наибольшие значения абсолютных величин степени анизотропии фотолюминесценции в интервале длин волн  $470\text{--}640 \text{ nm}$ .

На рис. 7 приведена картина дифракции изображения восстановленного волнового поля объекта на длине волны эмиссии  $\lambda = 450 \text{ nm}$  ( $K_e \leq 1$ ,  $r \geq 0$ ) на решетке анизотропного профиля. Как видно из приведенного рисунка, здесь полностью отсутствует след  $+1$ -го порядка дифракции и формируется только  $-1$ -й порядок дифракции. Это показывает, что состояние поляризации восстановленного поля объекта на длине волны эмиссии  $\lambda = 450 \text{ nm}$  отличается от состояния поляризации линейно поляризованного регистрирующего лазерного излучения и имеет циркулярную поляризацию. В качестве голограммной среды служили образцы композиции № 2 в матрице PVP. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными результатами и с теорией.

## Заключение

На основе матриц Jel и PVP получены люминесцентные поляризационно-чувствительные регистрирующие композиции, содержащие красители Lucifer Yellow и Coumarin 466, а также аминокислоту лизин, обладающих свойством поляризованной фотолюминесценции в широком спектральном диапазоне и выраженными эффектами векторных реакций.

Создан голографический спектрофлуориметр, дающий возможность записи и реконструкции мультиплексных динамических поляризационно-люминесцентных отражательных голограмм Денисюка, а также проведения количественных измерений поляризационно-люминесцентных параметров восстановленного поля объекта, зарегистрированного в полученных поляризационно-чувствительных люминесцирующих композициях.

Получены спектры поглощения и люминесценции для одной из композиций, показаны значительные величины стоксова сдвига.

Экспериментально показано, что при одинаковых условиях записи мультиплексных поляризационно-люминесцентных голограмм линейно поляризованным излучением лазера ( $\lambda = 405 \text{ nm}$ ,  $W = 30 \text{ mW}$ ) в регистрирующих композициях в зависимости от химического состава и матрицы Jel и PVP наблюдаются различия величин интенсивности поляризованной люминесценции (параметр  $I$ ), степени анизотропии поляризации люминесценции (параметр  $r$ ) и коэффициента эллиптичности (параметр  $K_e$ ) поляризации восстановленного поля объекта. Это позволяет судить о природе различных ингредиентов, входящих в состав композиций, а также о фотоанизотропных свойствах сред в зависимости от активности матрицы.

На полученных регистрирующих материалах (композициях) экспериментально показана возможность мультиплексной записи и наблюдения за несколькими изображениями анизотропно-гиротропного объекта одновременно, если они закодированы разными частотами эмиссии и (или) состоянием поляризации.

Необходимо продолжить исследования по оптимизации созданных сред путем введения дополнительных допантов, изменения кислотно-щелочного баланса матрицы, технологических режимов, а также работать над созданием новых композиций для получения высокоэффективных сред для поляризационно-люминесцентных голограмм. Кроме того, на наш взгляд, комбинирование неструктивного и безопасного для исследования различных биологических систем метода поляризационно-люминесцентной голографии с другими поляризационно-люминесцентными спектральными методами измерения резко повышает общую информативность исследования и значительно расширяет область применения данного метода.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] *Какичаивили Ш.Д.* // Открытия, изобретения. 1979. № 38.
- [2] *Тарасашвили В.И., Пурцеладзе А.Л.* // Опт. и спектр. 2007. Т. 103. № 6. С. 1046.
- [3] *Желтов А.Я., Степанов Б.И., Шавердова В.Г.* // ЖПС. 1990. Т. 52. С. 280.
- [4] *Пурцеладзе А.Л., Тарасашвили В.И., Шавердова В.Г., Петрова С.С.* // ЖПС. 2014. Т. 81. № 1. С. 65.
- [5] *Weigert F.* // Verhandl. Deutschen Physik. Ges. 1919. Bd. 21. S. 479.
- [6] *Какичаивили Ш.Д., Шавердова В.Г.* Фотоанизотропные и фотогиротропные явления в конденсированных средах и поляризационная голография. Тбилиси: Мецниереба, 1987. С. 48.
- [7] *Solano C., Lessard R.A.* // Appl. Opt. 1985. V. 24. N 12. P. 1776. doi 10.1364/AO.24.001776
- [8] *Шавердова В.Г., Петрова С.С., Пурцеладзе А.Л., Тарасашвили В.И., Оболашвили Н.З.* // Опт. и спектр. 2017. Т. 123. № 3. С. 458. doi 10.7868/S0030403417090288
- [9] *Бекбергенов Б.М., Житников В.Г.* // Антибиотики и химиотер. 1988. Т. 33. № 1. С. 72.
- [10] *Tarasashvili M.V., Alexidze N.G.* // Bioastronomy 2007: Molecules, Microbes and Extraterrestrial Life, Puerto Rico, ASP Conference Series. 2009. V. 420. P. 243. <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/2009ASPC..420..243T>
- [11] *Тарасашвили В.И., Петрова С.С., Пурцеладзе А.Л., Шавердова В.Г., Оболашвили Н.З.* // Опт. и спектр. 2018. Т. 125. № 4. С. 535. doi 10.21883/OS.2018.10.46707.18
- [12] *Smith D.S., Eremin S.A.* // Analytical and Bioanalytical Chem. 2008. V. 391. N 5. P. 1499. doi 10.1007/s00216-008-1897-z
- [13] *Еремин С.А.* // Биохимические методы анализа / Под ред. Дзангиева Б.Б.; М.: Наука, 2010. С. 368.
- [14] *Петрова С.С., Чичинадзе Н.М., Шавердова В.Г.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. № 2. С. 89.
- [15] *Денисюк Ю.Н.* // Опт. и спектр. 1963. Т. 15. № 4. С. 522.
- [16] *Пурцеладзе А.Л., Тарасашвили В.И., Шавердова В.Г., Петрова С.С.* // ЖПС. 2014. Т. 81. № 1. С. 65.
- [17] *Танин Л.В., Танин В.А.* // Мир голографии. 2017. Т. 3. № 1. С. 4.
- [18] *Толстик А.Л.* // Мир голографии. 2017. Т. 3. № 1. С. 24.
- [19] *Какичаивили Ш.Д., Шаталин И.Д.* // Фотоанизотропные и фотогиротропные явления в конденсированных средах и поляризационная голография. Тбилиси: Мецниереба, 1987. С. 72.
- [20] *Вавилов С.И.* Собр. соч. М., 1952. 129 с.
- [21] *Бабушкин А.А. и др.* Методы спектрального анализа. М.: МГУ, 1962. 509 с.