

УДК 535.217, 544.523.1

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПРОЦЕСС НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАПИСИ ИНФОРМАЦИИ В ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНКАХ, СОДЕРЖАЩИХ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДНЫЕ МОЛЕКУЛ ХРОМОНОВ

Я.Ю. Фомичева, В.В. Захаров, А.Н. Сергеев, М.С. Степанова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
Адрес для переписки: afuerra@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 22.11.18, принята к печати 24.12.18
doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-87-94
Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Фомичева Я.Ю., Захаров В.В., Сергеев А.Н., Степанова М.С. Влияние температуры на процесс нелинейной записи информации в полимерных пленках, содержащих светочувствительные производные молекул хромонов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 1. С. 87–94. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-87-94

Аннотация

Предмет исследования. Исследовано влияние температуры на пороговые значения плотности энергии записи флуоресцентных меток излучением видимого диапазона длин волн при нелинейном фотопреобразовании производных молекул хромонов, а также на величину порогов и характер наблюдаемых разрушений светочувствительного материала. **Методика эксперимента.** В качестве образцов для исследования использовались пленки из полиметилметакрилата толщиной около 20 мкм с внедренными в них светочувствительными производными молекул хромонов. Запись люминесцентных меток в образцах полимерных пленок производилась с помощью твердотельного микрочип-лазера, работавшего в режиме пассивной модуляции добротности, с генератором второй гармоники. Длительность импульса генерации составляла 1 нс, длина волны – 532 нм. Управление температурой образца в диапазоне от 0 до 100 °С осуществлялось с помощью элемента Пельтье. Изображение записанных меток считывалось и анализировалось с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа. **Основные результаты.** Показано, что охлаждение исследуемой светочувствительной пленки с 25 °С до 0 в процессе записи приводило к снижению порогов разрушения материала полимерной матрицы. При нагреве образца с 25 °С до 100 наблюдалось снижение порога записи люминесцентной метки при фиксированной энергии и длительности записывающего импульса. **Практическая значимость.** На основании измеренных зависимостей сформулированы требования к системе термостабилизации в устройстве, предназначенном для нелинейной оптической записи архивной информации.

Ключевые слова

хромоны, запись информации, оптическая память, температурные зависимости, лазерно-индуцированное разрушение

Благодарности

Авторы работы выражают благодарность Левченко К.В. и Краюшкину М.М. за предоставленные для исследований образцы производных соединений хромонов, а также Барачевскому В.А., Кийко В.В. и Гагарскому С.В. за полезные обсуждения полученных результатов.

TEMPERATURE EFFECT ON NONLINEAR INFORMATION RECORDING PROCESS IN CHROMONE-BASED PHOTSENSITIVE MEDIA

Ya.Yu. Fomicheva, V.V. Zakharov, A.N. Sergeev, M.S. Stepanova

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
Corresponding author: afuerra@gmail.com

Article info

Received 22.11.18, accepted 24.12.18
doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-87-94
Article in Russian

For citation: Fomicheva Ya.Yu., Zakharov V.V., Sergeev A.N., Stepanova M.S. Temperature effect on nonlinear information recording process in chromone-based photosensitive media. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 87–94 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-87-94

Abstract

Subject of research. This paper focuses on the study of temperature effect on the threshold intensity values for fluorescent mark recording as well as on the features and threshold intensity values for photosensitive material damage during nonlinear phototransformation of chromone derivatives by visible light. **Method.** Photosensitive chromone derivative compound embedded into polymethyl methacrylate (PMMA) polymer films with 20 μm thickness on the glass substrate were used as samples. Fluorescent marks were recorded by diode pumped passively Q-switched microchip Nd:YAG laser with the second harmonic generation. The wavelength of recording laser pulse was 532 nm, pulse duration was equal to 1 ns. Sample temperature was controlled by Peltier element and was changed in the range of 0–100 °C. Recorded fluorescent marks were registered using confocal laser scanning microscope. **Main results.** It was shown that cooling of the sample from 25 °C to 0 leads to decreasing of laser induced damage of the sample. Heating of the sample from 25 °C to 100 leads to the decreasing of the threshold intensity for nonlinear recording of fluorescent mark and corresponding efficiency increase of photoinduced transformation process at the fixed energy and duration of laser pulse. **Practical relevance.** Requirements for thermal stabilization system in the device for nonlinear optical archive information recording can be specified based on acquired results.

Keywords

chromone, information recording, optical memory, temperature dependency, laser-induced damage

Acknowledgements

The authors are thankful to Levchenko K. V. and Krayushkin M. M. for provided chromone derivative samples and to Barachevsky V.A., Kiyko V. V. and Gagarskiy S. V. for valuable discussions.

Введение

К устройствам, предназначенным для архивного хранения информации, предъявляются повышенные требования по емкости и сроку хранения данных. Методы оптической записи позволяют записывать данные не только на поверхности диска, но и в его объеме, что делает их особенно интересными с точки зрения повышения емкости носителя информации [1]. Альтернативой современным оптическим носителям с отражающими информационными слоями являются многослойные флуоресцентные диски, в которых технически возможно использовать на несколько порядков больше информационных слоев. При воздействии излучения определенного спектрального диапазона в таких дисках возможно производить запись данных, а при воздействии возбуждающего флуоресценцию излучения – считывать люминесцентный сигнал [2].

Для повышения плотности хранения данных и максимального количества информационных слоев в многослойных флуоресцентных дисках реализуется нелинейный механизм записи. Регистрируемое изменение оптических свойств фоточувствительного материала происходит, когда плотность мощности излучения достигает определенного порогового значения, такой подход обеспечивает более точную локализацию воздействия записывающего излучения [2–4].

Одним из перспективных материалов для создания таких дисков являются фоточувствительные производные органических молекул – хромонов [5]. Данные соединения обеспечивают высокий уровень временной стабильности записанной люминесцентной метки. Ожидаемый срок хранения информации на дисках на основе светочувствительных производных хромонов составляет десятки лет [6].

В исходном состоянии фоточувствительные производные молекул хромонов не люминесцируют и могут необратимо преобразоваться в люминесцирующие: при воздействии излучения в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне спектра происходит разрыв химической связи в кольце с дальнейшим изменением конфигурации молекулы. На рис. 1 приведены спектры люминесценции и поглощения для исходного и трансформированного состояний соединения 2-(фуран-2-ил)-3-(тиофен-2-карбонил)-хромен-4-он (ЛНС-480). При воздействии записывающего излучения в данном соединении появляется полоса поглощения в области 400–450 нм, смещенная от полосы поглощения молекул в исходном состоянии. Таким образом, считывающее (возбуждающее люминесценцию) излучение не оказывает влияния на молекулы, находящиеся в исходном состоянии. Нелинейная запись люминесцирующих центров осуществляется короткими (пико- и наносекундными) импульсами излучения видимого диапазона спектра [4, 6].

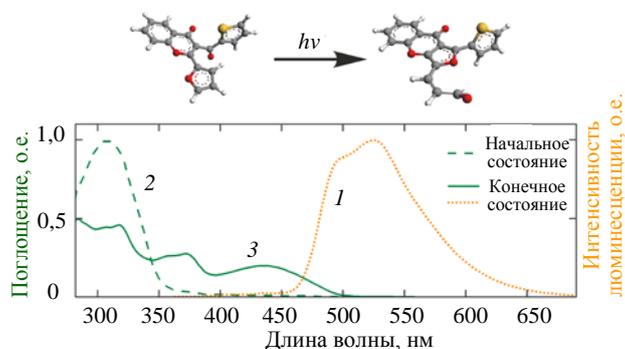


Рис. 1. Структура соединения ЛНС-480 и соответствующие ей спектр люминесценции 1 и нормированные спектры поглощения в исходном 2 и трансформированном 3 в результате поглощения фотона $h\nu$ состоянии

Важными параметрами конечного устройства являются температурный диапазон работы и требования к системе термостабилизации.

Как было показано, для фотохромных органических молекул диарилэтанов, предназначенных для использования в системах оптической памяти и фотопереключателях [7–9], квантовый выход фотопреобразования при однофотонном возбуждении может существенно зависеть от температуры образца в процессе записи.

Аналогичные эффекты могут наблюдаться и при двухфотонной записи для производных молекул хромонов. В таком случае изменение квантового выхода фотопреобразования будет сказываться на величине пороговой интенсивности излучения при записи.

В работах [4, 10] показано, что диапазон допустимых значений интенсивности воздействующего излучения, лежащий между порогом записи и порогом разрушения материала, довольно узок. Пороговые значения интенсивности могут меняться с изменением температуры, поэтому, чтобы найти допустимые диапазоны температуры и определить необходимость термостабилизации диска в записываемом устройстве, требуется исследовать эту зависимость.

Исследуемые образцы и методика эксперимента

В качестве образцов для исследования использовались тонкие пленки (около 20 мкм) из полиметилметакрилата (ПММА) и молекул светочувствительного соединения ЛНС-480.

Для приготовления образца ПММА растворялся в хлористом метиле в концентрации 40 мг/мл. Производные молекул хромонов добавлялись в полученный раствор в концентрации 2 мг/мл. Пленки наносились на предметное стекло методом полива из раствора и последующей медленной сушки в парах растворителя. После испарения летучего растворителя концентрация светочувствительных производных молекул хромонов в пленке составляла 5 масс. %.

Схема экспериментального стенда для изучения влияния температуры на процессы записи люминесцентных центров в соединении ЛНС-480 приведена на рис. 2.

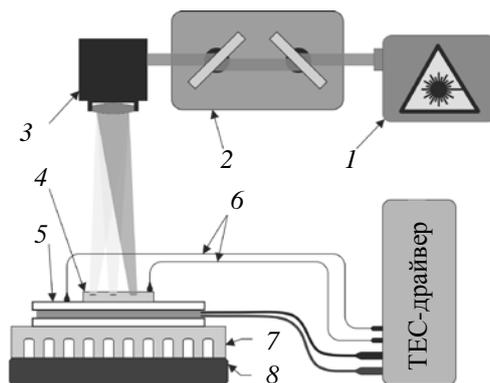


Рис. 2. Схема стенда: 1 – микрочиповый Nd:YAG-Cr:YAG-лазер с генератором второй гармоники (532 нм, 1 нс); 2 – френелевский ослабитель; 3 – система сканирования с линзой f -theta; 4 – образец; 5 – элемент Пельтье; 6 – NTC-термисторы; 7 – радиатор; 8 – вентилятор

Запись люминесцентных меток в образцах полимерных пленок производилась с помощью твердотельного микрочип-лазера Nd:YAG-Cr:YAG, работавшего в режиме пассивной модуляции добротности, с генератором второй гармоники на основе кристалла КТР. Длительность импульса генерации 1 нс, длина волны – 532 нм. Излучение лазера на основной длине волны 1064 нм отфильтровывалось с помощью дихроичных зеркал. Использование френелевского ослабителя 2 позволяло регулировать энергию в импульсе в диапазоне от 4,5 до 85 мкДж без изменения временной формы импульса.

Фокусировка и перемещение лазерного пучка в плоскости образца осуществлялись с помощью системы сканирования SCANgine 14, состоящей из двух гальванометров с закрепленными на них зеркалами и линзы f -theta ($f = 100$ мм) с плоским полем фокусировки. Управление температурой образца осуществлялось посредством термоэлектронного контроллера (ТЕС-драйвер в составе блока питания и управления диодной накачкой LDPPS 200) с элементом Пельтье (ТЕС1-12706), размещенным на радиаторе с воздушным охлаждением. Температура менялась от 0 до 100 °С с шагом 25 °С.

Записанный образец представлял собой прямоугольную матрицу $N \times M$ (рис. 3, а). На рис. 3, б приведена зависимость энергии в лазерном импульсе от номера строки. Система охлаждения включалась в промежутках между записью каждой строки для исключения вибраций, вызванных ее работой во время записи.

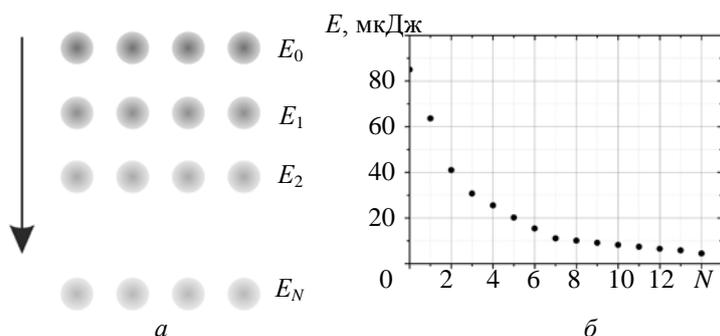


Рис. 3. Матрица записанных люминесцентных точек (а); зависимость энергии лазерного импульса E от номера строки N (б)

Контроль текущей температуры и равномерности нагрева осуществлялся с помощью двух NTC-датчиков температуры, подключенных к ТЕС-драйверу.

Регистрация люминесцентного сигнала от записанных меток была реализована при помощи лазерного сканирующего конфокального микроскопа Carl Zeiss LSM710. Использование такого микроскопа позволяет зарегистрировать сигнал люминесценции, измерить спектры люминесценции и размеры записанной метки. Для возбуждения люминесценции использовался аргоновый лазер с длиной волны 458 нм. Записанной считалась метка, для которой отношение люминесцентного сигнала в области записи к фону было не меньше двух.

Полученные результаты

Изображение записанных при комнатной температуре (25 °С) люминесцентных меток приведено на рис. 4. Цифрой на рисунке обозначен номер строки в матрице. Пороговое значение плотности энергии для записи люминесцентной метки $W_E=1 \text{ Дж/см}^2$. Разрушение пленки в используемом диапазоне энергий не наблюдалось (плотность энергии до 3 Дж/см^2).

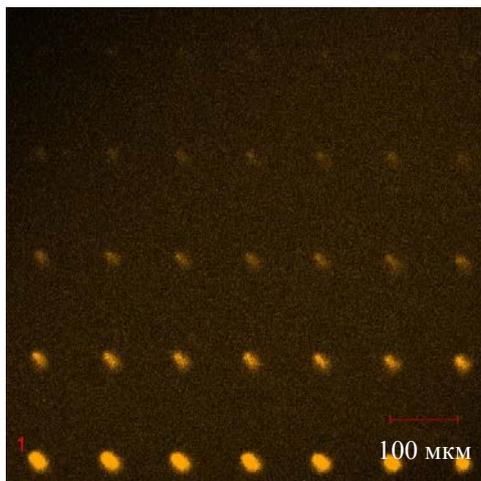


Рис. 4. Изображение люминесцентных меток

При снижении температуры образца во время записи до нуля пороговая плотность энергии для записи метки также составляла 1 Дж/см^2 , однако наблюдалось разрушение пленки при плотности энергии выше $1,3 \text{ Дж/см}^2$. Снижение порога разрушения обусловлено свойствами самой ПММА-матрицы. Соответствующие изображения записанных меток приведены на рис. 5, 6. Для значений плотности энергии выше $1,7 \text{ Дж/см}^2$ в области разрушения наблюдался характерный ореол растрескивания вокруг области воздействия. Средний диаметр ореола увеличивался с увеличением энергии в импульсе и при плотности энергии 3 Дж/см^2 достигал 180 мкм , что в три раза превышает диаметр пучка (по уровню $1/e^2$). На рис. 6 видно наложение каналов пропускания и люминесценции.

Повышение температуры образца приводило к снижению порога записи. На рис. 7 приведены изображения сигнала люминесценции меток, записанных при температуре образца 100 °С . Экспозиция возбуждающего люминесценцию излучения на приведенных изображениях подбиралась исходя из уровня интенсивности люминесцентного сигнала записанных меток. Как видно из рисунка, сигнал люминесценции записанной метки проявляется на 9-й строке матрицы, что соответствует плотности энергии $0,4 \text{ Дж/см}^2$.

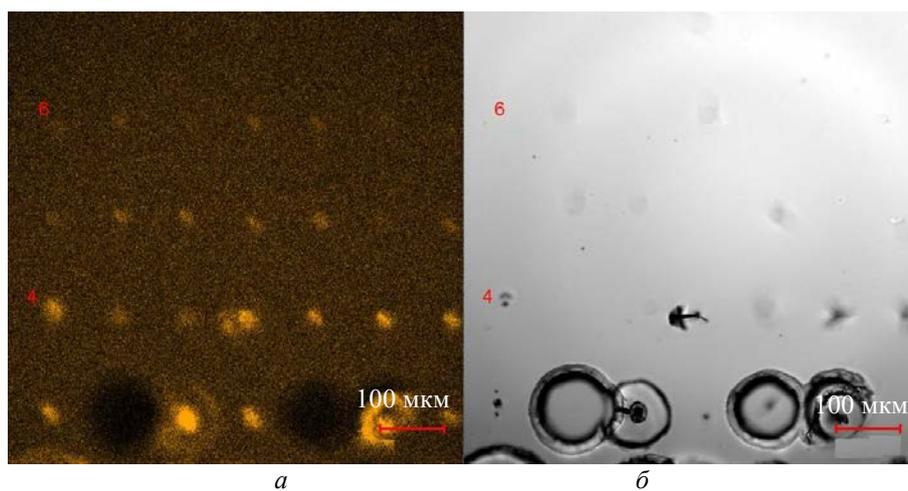


Рис. 5. Люминесцентное изображение (а) и изображение в проходящем свете (б) меток, полученные при помощи конфокального микроскопа Carl Zeiss LSM710

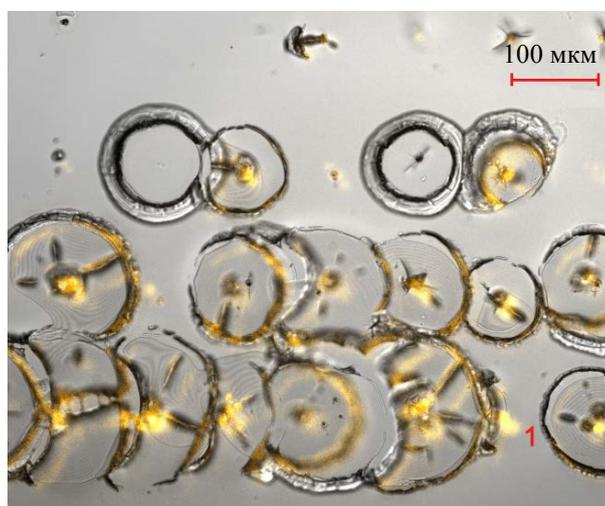


Рис. 6. Изображение лазерно-индуцированного разрушения полимерной матрицы образца

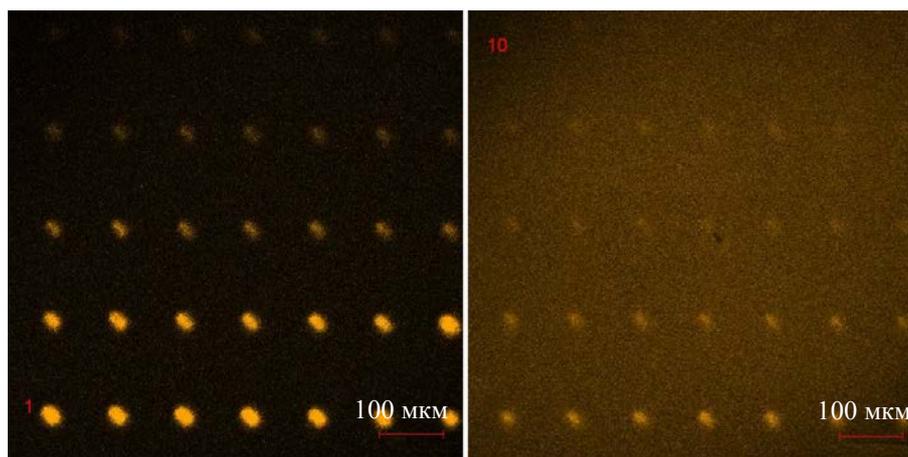


Рис. 7. Изображение считанного люминесцентного сигнала меток

На рис. 8 приведена полученная зависимость пороговой плотности энергии (W_E), достаточной для записи люминесцентной метки в образце, от температуры (T) для лазерного излучения с длиной волны 532 нм и длительностью 1 нс.

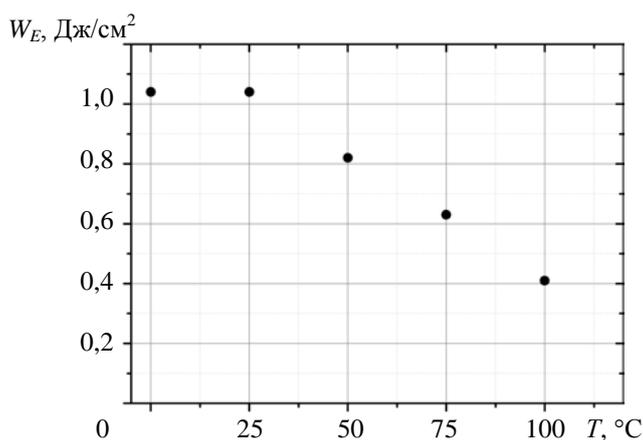


Рис. 8. Зависимость пороговой плотности энергии записи люминесцентной метки от температуры образца во время записи

Полученную зависимость можно объяснить небольшим потенциальным барьером в возбужденном состоянии молекулы (рис. 9). Аналогичный эффект наблюдался в некоторых соединениях диарилэтенов при однофотонном фотопреобразовании [7–9].

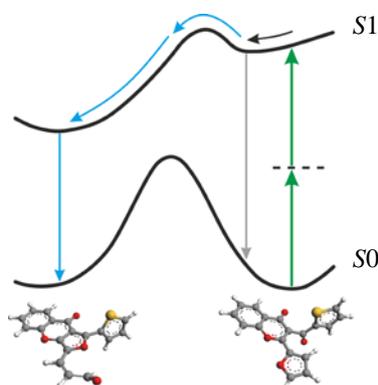


Рис. 9. Схематическое представление динамики возбуждения (S_0 – основное состояние молекулы, S_1 – возбужденное) и преобразования соединения ЛНС-480 на основе наблюдаемых температурных зависимостей

Для производных молекул хромонов существование такого барьера подтверждалось как при однофотонном возбуждении молекулы излучением УФ-диапазона, так и косвенно при нелинейной записи. Для однофотонного режима записи такой вывод делался из анализа динамики фотопреобразования молекулы методами фемтосекундной pump-probe спектроскопии [11]; для многофотонной записи – из сравнения величины пороговых значений интенсивности, необходимых для записи флуоресцентной метки, при различной длительности записывающего импульса [4].

Понижение температуры образца приводит к снижению вероятности того, что электрон сможет преодолеть потенциальный барьер в возбужденном состоянии S_1 и, следовательно, к снижению квантового выхода фотопреобразования.

Заключение

Таким образом, результаты эксперимента показали, что охлаждение в процессе записи люминесцентных центров в исследуемой пленке, содержащей светочувствительное соединение ЛНС-480, приводит к снижению порогов разрушения материала полимерной матрицы. Для лазерного импульса длительностью 1 нс с длиной волны 532 нм при превышении плотности энергии 1,7 Дж/см² разрушение сопровождается появлением характерного ореола растрескивания вокруг области воздействия. Средний диаметр ореола увеличивается с возрастанием энергии в импульсе и при плотности энергии 3 Дж/см² достигает 180 мкм, что в три раза превышает диаметр лазерного пучка. Существенного изменения порога записи люминесцентной метки при охлаждении образца с 25 °C до нуля не наблюдалось.

При нагреве образца с 25 °C до 100 °C наблюдалось снижение порога записи люминесцентной метки, соответствующее увеличению квантового выхода фотопреобразования. При изменении температуры образца с 25 °C до 100 °C порог записи снижается более чем в два раза (с 1 Дж/см² до 0,4). Наблюдаемое в эксперименте снижение порога в диапазоне температур 25–100 °C практически линейно, однако для достоверного определения характера зависимости требуется провести измерения с меньшим шагом изменения

энергии лазерного импульса и температуры образца.

Полученные результаты показали, что для записи люминесцентных меток в светочувствительных материалах на основе производных хромонов излучением лазера с длиной волны 532 нм с наносекундной длительностью импульса диапазон температур, в котором порог записи существенно ниже порога разрушения, составляет примерно 25–100 °С. Для обеспечения работы устройства вне указанного температурного диапазона может потребоваться система термостабилизации.

Литература

1. Dhomkar S., Henshaw J., Jayakumar H., Meriles C. Long-term data storage in diamond // *Science Advances*. 2016. V. 2. N 10. Art. e1600911. doi: 10.1126/sciadv.1600911
2. Kiyko V.V. Multi-Layer Optical Disc. Patent US8455079 B2. 2013.
3. Курбангаев В. Порошин Н., Малышев П., Шмелин П. Многослойные оптические носители информации флуоресцентного типа // *Фотоника*. 2012. V. 32. N 2. P. 74–81.
4. Ayt A.O., Barachevsky V.A., Duensing A., Fomicheva Y.Y., Gagarskiy S.V., Iglev H., Kiyko V.V., Krayushkin M.M., Sergeev A.N., Veniaminov A.V., Zakharov V.V. Thresholds for nonlinear recording of fluorescent centers in chromone-doped polymer films // *Optical and Quantum Electronics*. 2017. V. 49. N 2. P. 72. doi: 10.1007/s11082-017-0900-3
5. Krayushkin M., Levchenko K., Yarovenko V. Synthesis and study of photosensitive chromone derivatives for recording media of archival three-dimensional optical memory // *ARKIVOC*. 2008. V. 2009. N 9. P. 262. doi: 10.3998/ark.5550190.0010.916
6. Ayt A.O., Barachevsky V.A., Kobeleva O.I., Valova T.M., Gagarskiy S.V., Kiyko V.V., Sergeev A.N., Veniaminov A.V., Zakharov V.V., Krayushkin M.M., Iglev H. Two-photon recording of stable luminescent centers in chromone-doped polymer films // *Proc. Int. Conf. Laser Optics*. St. Petersburg, 2014. doi: 10.1109/LO.2014.6886252
7. Cox J.M., Walton I., Patel D., Xu M., Chen Y., Benedict J. The temperature dependent photoswitching of a classic diarylethene monitored by in situ X-ray diffraction // *The Journal of Physical Chemistry A*. 2015. V. 119. N 5. P. 884–888. doi: 10.1021/jp512488q
8. Dulic D., Kudernac T., Puzys A., Feringa B.L., van Wees B.J. Temperature gating of the ring-opening process in diarylethene molecular switches // *Advanced Materials*. 2007. V. 19. N 19. P. 2898–2902. doi: 10.1002/adma.200700161
9. Kudernac T., Kobayashi T., Uyama A., Uchida K., Nakamura S., Feringa B. Tuning the temperature dependence for switching in dithienylethene photochromic switches // *The Journal of Physical Chemistry A*. 2013. V. 117. N 34. P. 8222–8229. doi: 10.1021/jp404924q
10. Zakharov V.V., Veniaminov A.V., Ayt A.O., Barachevsky V.A., Fomicheva Y.Y., Gagarskiy S.V., Kiyko V.V., Sergeev A.N. Optical properties of chromone-class isomers in solution and polymer films studied by confocal microscope // *Proc. 8th Int. Conf. on Nanomaterials - Research and Application, NANOCON*. Brno, 2016. P. 143–148.
11. Гагарский С.В., Гребенников Е.П., Кийко В.В., Левченко К.С., Сергеев А.Н., Фомичева Я.Ю., Oberhofer K., Iglev H. Исследование переходного состояния и динамики фотохимических трансформаций молекул хромонов // *Оптика и спектроскопия*. 2018. Т. 125. № 4. С. 463–467. doi: 10.21883/OS.2018.10.46695.131-18

Авторы

Фомичева Яна Юрьевна – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57193091301, ORCID ID: 0000-0003-1680-9405, afuerra@gmail.com
Захаров Виктор Валерьевич – кандидат физико-математических наук, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 22936231300, ORCID ID: 0000-0001-9626-8543, viktor-zah@yandex.ru

References

1. Dhomkar S., Henshaw J., Jayakumar H., Meriles C. Long-term data storage in diamond. *Science Advances*, 2016, vol. 2, no. 10, art. e1600911. doi: 10.1126/sciadv.1600911
2. Kiyko V.V. Multi-Layer Optical Disc. *Patent US8455079 B2*, 2013.
3. Kurbangaeev V., Poroshin N., Malishev P., Shmelin P. Multilayer fluorescent type optical information-carrying medium. *Fotonics*, 2012, vol. 32, no. 2, pp. 74–81. (in Russian)
4. Ayt A.O., Barachevsky V.A., Duensing A., Fomicheva Y.Y., Gagarskiy S.V., Iglev H., Kiyko V.V., Krayushkin M.M., Sergeev A.N., Veniaminov A.V., Zakharov V.V. Thresholds for nonlinear recording of fluorescent centers in chromone-doped polymer films. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, vol. 49, no. 2, pp. 72. doi: 10.1007/s11082-017-0900-3
5. Krayushkin M., Levchenko K., Yarovenko V. Synthesis and study of photosensitive chromone derivatives for recording media of archival three-dimensional optical memory. *ARKIVOC*, 2008, vol. 2009, no. 9, pp. 262. doi: 10.3998/ark.5550190.0010.916
6. Ayt A.O., Barachevsky V.A., Kobeleva O.I., Valova T.M., Gagarskiy S.V., Kiyko V.V., Sergeev A.N., Veniaminov A.V., Zakharov V.V., Krayushkin M.M., Iglev H. Two-photon recording of stable luminescent centers in chromone-doped polymer films. *Proc. Int. Conf. Laser Optics*. St. Petersburg, 2014. doi: 10.1109/LO.2014.6886252
7. Cox J.M., Walton I., Patel D., Xu M., Chen Y., Benedict J. The temperature dependent photoswitching of a classic diarylethene monitored by in situ X-ray diffraction. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2015, vol. 119, no. 5, pp. 884–888. doi: 10.1021/jp512488q
8. Dulic D., Kudernac T., Puzys A., Feringa B.L., van Wees B.J. Temperature gating of the ring-opening process in diarylethene molecular switches. *Advanced Materials*, 2007, vol. 19, no. 19, pp. 2898–2902. doi: 10.1002/adma.200700161
9. Kudernac T., Kobayashi T., Uyama A., Uchida K., Nakamura S., Feringa B. Tuning the temperature dependence for switching in dithienylethene photochromic switches. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2013, vol. 117, no. 34, pp. 8222–8229. doi: 10.1021/jp404924q
10. Zakharov V.V., Veniaminov A.V., Ayt A.O., Barachevsky V.A., Fomicheva Y.Y., Gagarskiy S.V., Kiyko V.V., Sergeev A.N. Optical properties of chromone-class isomers in solution and polymer films studied by confocal microscope. *Proc. 8th Int. Conf. on Nanomaterials - Research and Application, NANOCON*. Brno, 2016, pp. 143–148.
11. Gagarskiy S.V., Grebennikov E.P., Kiyko V.V., Levchenko K.S., Sergeev A.N., Fomicheva Y.Y., Oberhofer K., Iglev H. Investigation of the transition state and dynamics of photochemical transformations of chromone molecules. *Optics and Spectroscopy*, 2018, vol. 125, no. 4, pp. 463–467. (in Russian) doi: 10.21883/OS.2018.10.46695.131-18

Authors

Yana Yu. Fomicheva – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57193091301, ORCID ID: 0000-0003-1680-9405, afuerra@gmail.com
Victor V. Zakharov – PhD, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 22936231300, ORCID ID: 0000-0001-9626-8543, viktor-zah@yandex.ru

Сергеев Андрей Николаевич – кандидат технических наук, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 7201446540, ORCID ID: 0000-0002-2002-9228, mg_phoenix@yahoo.com

Степанова Мария Сергеевна – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-4069-2764, mafa0002@gmail.com

Andrey N. Sergeev – PhD, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 7201446540, ORCID ID: 0000-0002-2002-9228, mg_phoenix@yahoo.com

Maria S. Stepanova – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-4069-2764, mafa0002@gmail.com