

Оптическое пропускание пленок стандартного и восстановленного оксида графена при обработке эрбиевым лазером с варьированием плотностей энергии

М. Е. Ильин^{1,2}, Н. В. Каманина^{1,2,3}✉

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

³ АО «НПО Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова», Санкт-Петербург, Россия

✉ nvkamanina@mail.ru

Аннотация. Проводилось исследование оптического пропускания тонких пленок стандартного и восстановленного оксида графена. ИК-спектры в диапазоне 1000...2400 нм были измерены для двух образцов. Пленки подвергались облучению эрбиевым лазером на длине волны 1.54 мкм с длительностью импульса 90 нс при плотностях энергий от 30 до 350 мДж/см². Были определены уровни проходящей через образцы энергии и пороговые энергии, вызывающие разрушение материала. Полученные результаты позволяют оценить возможность использования тонких пленок на основе графена в качестве оптического ограничителя в электронных устройствах для обеспечения безопасности восприятия излучения глазом человека и чувствительных к излучению компонентов оптико-электронных схем.

Ключевые слова: оксид графена, ИК-спектр, оптическое ограничение, эрбиевый лазер, свойства поверхности

Для цитирования: Ильин М. Е., Каманина Н. В. Оптическое пропускание пленок стандартного и восстановленного оксида графена при обработке эрбиевым лазером с варьированием плотностей энергии // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 8. С. 5–12. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-8-5-12.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: Исследование частично поддержано за счет гранта Российского научного фонда № 24-23-00021, https://rscf.ru/prjcard_int?24-23-00021.

Благодарность. Авторы выражают признательность коллегам по отделу «Фотофизика наноструктурированных материалов и устройств» АО НПО «ГОИ им. С. И. Вавилова», сотрудникам кафедры «Фотоника» СПбГЭТУ «ЛЭТИ», а также сотрудникам отдела перспективных разработок ПИЯФ – Курчатовский институт за плодотворные дискуссии на лабораторных семинарах и помощь в работе.

Optical Transmittance of Standard and Reduced Graphene Oxide Films under Erbium Laser Treatment with Varying Energy Densities

M. E. Ilin^{1,2}, N. V. Kamanina^{1,2,3}✉

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² Petersburg Nuclear Institute Physics of National Research Center «Kurchatov Institute», Gatchina, Russia

³ JSC «Research and Production Corporation S. I. Vavilova, Saint Petersburg, Russia

✉ nvkamanina@mail.ru

Abstract. The optical transmittance of thin films of standard and reduced graphene oxide was investigated. The IR spectra of two samples in the range of 1000...2400 nm were measured. The films were irradiated with an erbium laser at a wavelength of 1.54 μm with an impulse duration of 90 ns at energy densities from 30 to 350 mJ/cm^2 . The levels of energy passing through the samples and the threshold energies causing material destruction were determined. The obtained results can be used to evaluate the possibility of using graphene-based thin films as an optical limiter in electronic devices to ensure the safety of radiation perception by the human eye and radiation-sensitive components of optoelectronic circuits.

Keywords: graphene oxide, IR spectrum, optical limiting, erbium laser, surface properties

For citation: Ilin M. E., Kamanina N. V. Optical Transmittance of Standard and Reduced Graphene Oxide Films under Erbium Laser Treatment with Varying Energy Densities // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 8. P. 5–12. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-8-5-12.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Funding: The research was partially supported by a grant from the Russian Science Foundation № 24-23-00021, https://rscf.ru/prjcard_int?24-23-00021.

Acknowledgments. The authors express their gratitude to colleagues in the Department of Photophysics of Nanostructured Materials and Devices of JSC NPO GOI named after S. I. Vavilov, employees of the Department of Photonics of SPbETU LETI, as well as employees of the Department of Advanced Developments of the PIAF-Kurchatov Institute for fruitful discussions at laboratory seminars and assistance in their work.

Введение. В настоящее время крайне актуальна задача поиска новых сред и создание современных устройств, способных пропускать слабые световые потоки (для их регистрации), но ограничивать интенсивные световые поля (для ограничения оптического излучения, падающего на чувствительные компоненты оптико-электронных схем и биологические объекты). Такие устройства получили название ограничителей лазерного излучения – оптических лимитеров. К ним предъявляется ряд требований, а именно: высокое пропускание малоинтенсивного излучения – на уровне не менее 50 %; высокая поглощающая способность при одноступенчатом прохождении для интенсивных световых полей; технологичность в исполнении; невысокая стоимость, что необходимо для массового производства. Классические материалы с фуллеренами и углеродными нанотрубками

вполне пригодны для реализации поставленных условий [1]–[5]. Однако для расширения материалovedческой базы данных, а также для выяснения дополнительных механизмов, ответственных за поглощение излучения с высокой плотностью энергии, полезно рассмотреть новые материалы, в том числе на основе инновационных систем: графена, оксида графена (ОГ), восстановленного оксида графена (ВОГ).

Параллельно с успехами в получении графена при исследовании 2D-материалов в 2004 г. [6] интерес начал вызывать оксид графена – двумерный (или трехмерный) наноразмерный материал, представляющий собой лист графена, содержащий на базальной плоскости и краях листа кислородосодержащие функциональные группы. Типы функциональных групп и отношение атомов углерода к кислороду могут варьироваться и за-

висят от процессов получения материала. Связь атомов углерода с кислородом вызывает переход от sp^2 - к sp^3 -гибридизации, перевода материал из проводящего состояния в состояние диэлектрика [7]. Восстановление ОГ позволяет приблизиться к оптико-электрическим свойствам графена. Таким образом, оксид графена представляет собой полупроводник с подстраиваемой шириной запрещенной зоны [8], что позволяет использовать его в качестве материала для полупрозрачных проводящих контактов в оптоэлектронике. Восстановление оксида графена возможно несколькими способами: термически, химически, используя стандартную литографию [9].

Стандартный оксид графена обладает относительно неплохим уровнем смачивания и растворимости в водных и спиртосодержащих растворах [10]. Он отличается высоким уровнем пропускания (свыше 80 %) и высоким сопротивлением. Возможность эффективно наносить материал на поверхности различной шероховатости открывает пути к созданию и изучению тонких пленок на основе оксида графена.

Восстановленный оксид графена имеет низкий коэффициент пропускания (20–30 %) и сопротивление порядка 40...100 кОм. Ранее было установлено, что для восстановления ОГ требуется плотность энергии воздействия порядка микроджоулей на сантиметр в квадрате при фемтосекундном режиме работы лазера [11]. При этом наблюдалось изменение значения нелинейного поглощения из-за перестройки структуры материала и увеличения отношения sp^2/sp^3 -связей. Восстановленный оксид графена показывает более сильные нелинейные и линейные оптические ограничения, чем стандартный ОГ, ввиду его повышенной кристалличности и сопряженности [12].

Одна из главных проблем внедрения оксида графена в качестве полупрозрачных проводящих материалов – это компромисс между пропусканием и сопротивлением получаемой пленки. Даже если добиться восстановления оксида графена с отношением C/O в 4–5 %, сопротивление и пропускание будут явно уступать чистому графеновому контакту ввиду наличия структурных дефектов в кристаллической решетке [13]. Наименьшее сопротивление, которое нам удалось получить, – 5...10 кОм при пропускании в 10–15 %. С другой стороны, стандартный оксид графена с пропусканием в 80–90 % обладает сопротивлением порядка десятка-сотен мегаом, увеличивая толщину восстанавливаемой пленки, уменьшая сопротив-

ление и, соответственно, пропускание. Компромисс состоит в выборе оптимальных параметров пропускания-сопротивления пленки.

Постановка задачи. В [10] уже описан способ получения пленок оксида графена на стеклянных и ИТО-подложках и результаты смачивания материала на них. В данной статье требовалось сравнить коэффициенты пропускания в ИК-области от 1000 до 2400 нм и определить изменение в пропускании заранее приготовленных стандартного и восстановленного ОГ. Также рассматриваются способность материала к ограничению воздействия излучения на длине волны 1.54 мкм плотностями энергии импульса от 30 до 350 мДж/см² и повреждения, наносимые пленкам в процессе облучения. Необходимо учитывать, что плотность энергии на три порядка превышает требуемую для восстановления материала, поэтому особое внимание уделяется изменениям параметров пропускания стандартного ОГ при воздействии лазерными импульсами.

Описание исследования. Использовался оксид графена, произведенный оригинальной модификацией метода Хамерса–Оффермана в ООО «НаноТехЦентр» (Тамбов, Россия) с массовой долей компонентов: углерод – 57.6 %, кислород – 40.2 %, сера – 2.2 %. Пленки наносились методом спин-коутинга на стеклянные подложки с параметрами свободной энергии: дисперсионный компонент $\gamma_s(d) = 45.8...48.3$ мДж/м², полярный компонент $\gamma_s(p) = 10.7...11.0$ мДж/м². Образец со стандартным оксидом графена наносился на всю площадь подложки с объемом капли около 150...200 мкл, после чего подложка раскручивалась в спин-коутере до 2700 об/с. Описанный цикл повторялся несколько раз, полученная толщина пленки оценивалась при помощи эллипсометрии и составила 300...400 нм. В данном случае оксид графена восстанавливался при нагреве подложки до температуры 240 °С в течение 10 мин. После одного цикла нанесения пленки спин-коутингом проводится термическая обработка; для достижения оптимальных значений сопротивления (до 400 кОм) процесс нанесения и обработки повторяется несколько раз. Для получения образца с восстановленным оксидом графена формировалось 5 слоев, полученная толщина была измерена методами спектрофотометрии и эллипсометрии и составила 50...60 нм.

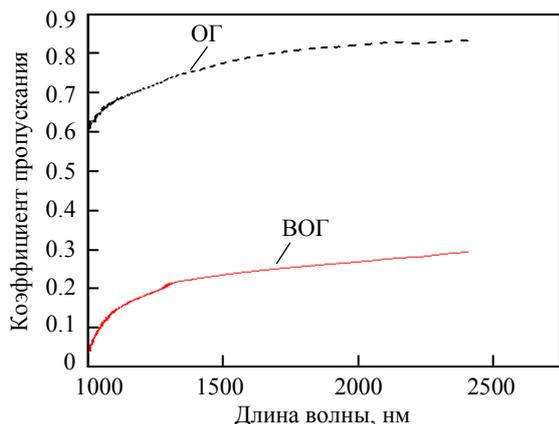


Рис. 1. Зависимости пропускания от длины волны для стандартного и восстановленного ОГ
Fig. 1. Transmittance dependences on wavelength for standard and reduced GO

ИК-спектры полученных образцов были измерены для оценки пропускания в диапазоне длин волн 1000...2500 нм с помощью ИК-спектрометра Фурье ФСМ 1211. Полученные результаты представлены на рис. 1. Спектры для ОГ и ВОГ имеют схожий характер, но для второго образца пропускание на длине волны 1.54 мкм сильно ниже (50 %).

Для получения данных по оптическому ограничению образцов использовался эрбиевый лазер на

длине волны 1.54 мкм с шириной импульса 90 нс. Принципиальная схема установки представлена на рис. 2. Изменение плотности энергии, проходящей через образец, осуществляется фильтрами, подложка с пленкой располагается между фильтрами и детектирующим устройством. Соотношение между энергией источника и детектируемой энергией определяется следующим уравнением [14]:

$$E_{out} = E_{srs} T_{filt} T_{smp} = E_{in} T_{smp},$$

где E_{srs} – энергия источника излучения; T_{filt} – пропускание фильтра; T_{smp} – пропускание образца; E_{in} – энергия до прохождения образца; E_{out} – детектируемая энергия. E_{in} представляет собой энергию, непосредственно падающую на образец (с учетом фильтра), и введена для регистрирования зависимости от воздействующей энергии, а не от той, что выходит из источника и претерпевает ограничение на фильтре.

Площадь S пятна лазера составила 0.03926 см². Плотность энергии импульса W рассчитывается по формуле

$$W = E/S,$$

где E – энергия излучения; S – площадь пятна излучения лазера.

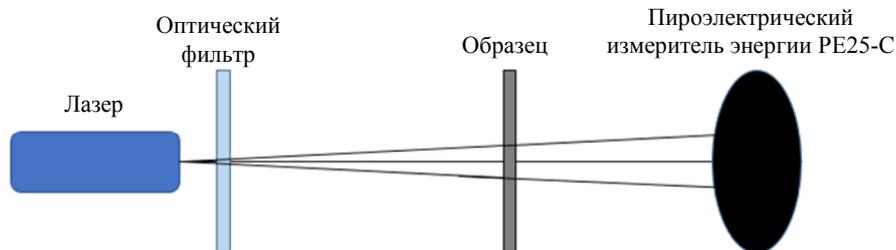


Рис. 2. Принципиальная схема установки
Fig. 2. Schematic diagram of the setup

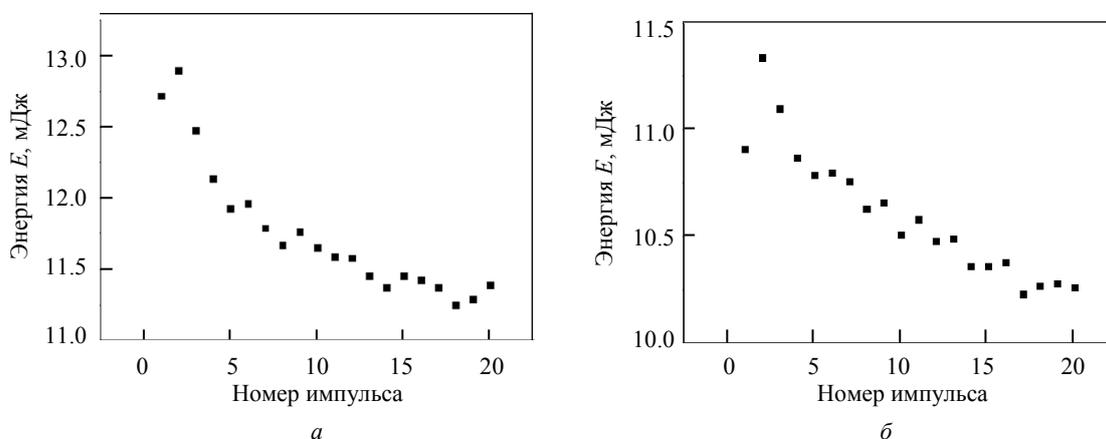


Рис. 3. Изменение энергии источника излучения от номера импульса:
а – без фильтров; б – проходящий через стекло
Fig. 3. Variation in the radiation source energy from the pulse number:
а – without filters; б – passing through glass

Заметим, что при сопоставлении плотностей энергий следует учитывать уменьшение энергии импульсов лазера. На рис. 3 представлена зависимость энергии источника излучения от номера импульса без фильтров (рис. 3, *а*) и со стеклянной подложкой (рис. 3, *б*). Фактические измерения показывают, что разница в регистрируемых энергиях между первым и последним импульсом составляет $\approx 10\%$ и такие потери при прохождении энергии через образец можно считать допустимыми.

Обсуждение результатов. На рис. 4 представлен интегральный график зависимостей выходящей плотности от входящей и значений плотностей от порядкового номера импульса для стандартного оксида графена. Изменение выходящей плотности имеет линейную зависимость от входящей, т. е. от прямого эффекта ограничения излучения не наблюдается. При увеличении входящей

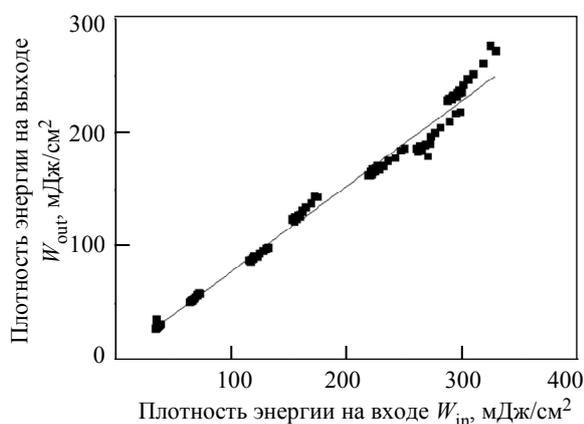


Рис. 4. Зависимости выходящей плотности энергии от входящей для стандартного ОГ

Fig. 4. Dependences of the output energy density on the input energy density for standard GO

плотности энергии замечается увеличение энергии, поглощаемой образцом. Поглощаемая энергия идет в основном на нагрев и локальное термическое восстановление материала.

Для восстановленного оксида графена зависимость выходящей плотности от входящей также носит линейный характер (рис. 5, *а*). Однако если при значениях W_{in} до 150 мДж/см² значения плотности энергии W_{out} имеют небольшой разброс, то при повышении W_{in} наблюдается отклонение отдельных значений W_{out} от среднего. Это связано с пробоем пленки при повышенных плотностях энергий – слой углерода прожигается с каждым импульсом лазера до момента насыщения и образуется пятно площадью 0.03926 см². Микроскопическое изображение границы сохранившегося материала и пробитой области представлено на рис. 5, *б*. Можно заметить, что помимо крупных хлопьев после обработки лазером остается тонкий слой восстановленного оксида графена, об этом также свидетельствует сравнение значений прошедшей энергии для стекла и пленки обработанного материала. Несмотря на видимый пробой поверхности, продолжает наблюдаться небольшое ограничение энергии излучения.

Более детально момент разрушения восстановленного оксида графена можно заметить на рис. 6. Пороговая плотность энергии, при которой наблюдается увеличение пропускания более чем на 10% за три импульса, соответствует 170 мДж/см². При ее увеличении прирост выходной плотности энергии ярко выражен и составляет $\sim 29\%$ за 12 импульсов. Насыщение после разрушения объясняется отводом энергии в структуре; подводимых

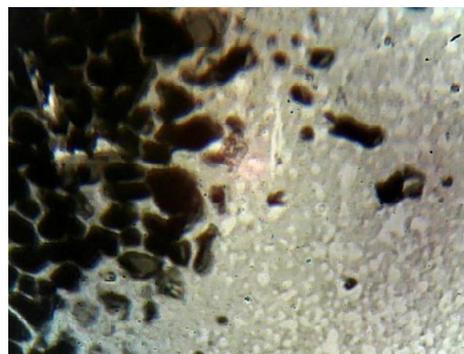
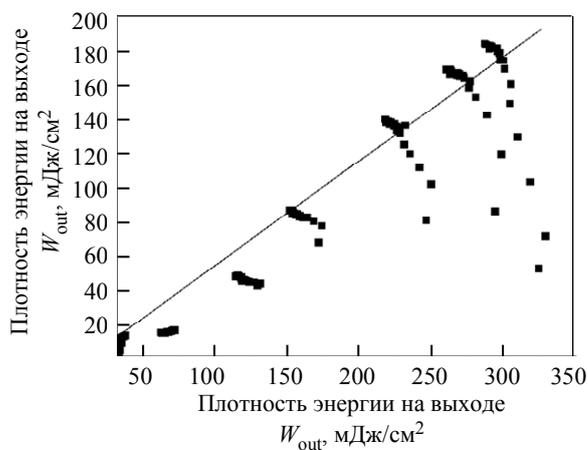
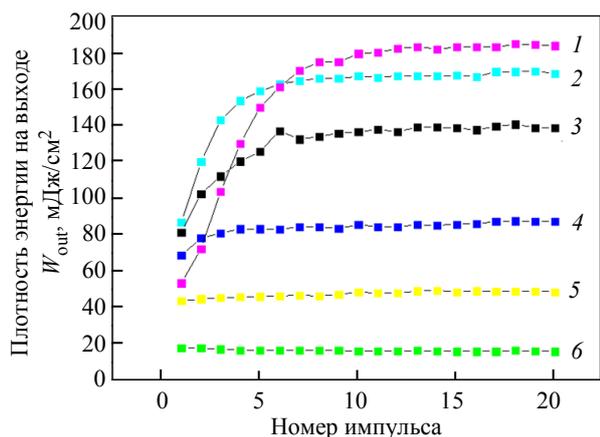


Рис. 5. Зависимость выходящей плотности энергии от входящей для ВОГ (*а*); микроскопический снимок пробитой области пленки (*б*)

Fig. 5. Dependence of the output energy density on the input energy density for reduced GO (*a*); microscopic image of the punctured region of the film (*b*)



Плотность энергии на входе W_{in} , мДж/см²:
1 – 299; 2 – 271; 3 – 227; 4 – 159; 5 – 119; 6 – 65.9

Рис. 6. Сравнение выходящих плотностей энергии от номера импульса

Fig. 6. Comparison of output energy densities from the pulse number

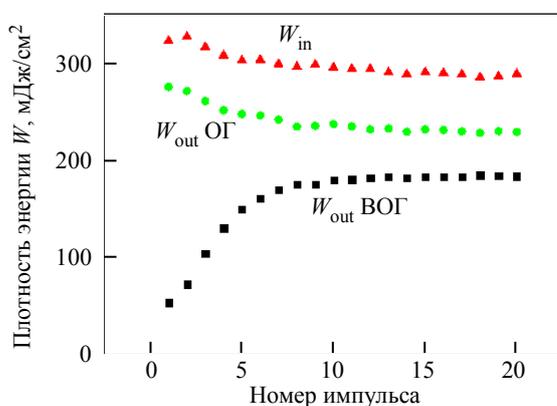


Рис. 7. Зависимости выходящих плотностей энергии для стандартного и восстановленного ОГ с кривой входной плотности энергии (а);

микроскопическое изображение поврежденной области стандартного ОГ (б)
Fig. 7. Dependence of the output energy densities for standard and reduced GO with input energy density curve (a); microscopic image of the damaged region of standard GO (b)



импульсов недостаточно для дальнейшего разрушения материала. Чем больше плотность энергии, тем больше пробивается пленка и выше выходящая плотность энергии.

Для аналогичного увеличения пропускания стандартного оксида графена требуется большее количество циклов импульсной обработки – энергия уходит на локальное восстановление материала и не рассеивается на структуре (оксид графена – хороший теплопроводник). На рис. 7, а представлено сравнение пропускаемых плотностей энергий в зависимости от номера импульса лазера для обоих образцов при плотности энергии источника от 300 мДж/см². Видно, что одного цикла

недостаточно для разрушения материала, и плотность энергии изменяется, как на источнике. На рис. 7, б представлена пробитая область на пленке при 10 циклах обработки лазером.

Выводы и заключение. Подводя итоги проведенного исследования, можно заключить:

1. При увеличении плотности энергии источника излучения зависимость выходящей плотности остается линейной в рамках одного цикла обработки (20 импульсов) как для стандартного, так и для восстановленного оксида графена

2. Пороговая плотность энергии источника излучения, при которой наблюдается пробой восстановленного оксида графена, равна 159 мДж/см²; этого достаточно для увеличения пропускания на 16 %. При входящей плотности энергии 299 мДж/см² пропускание материала увеличивается в 3.8 раз за счет больших повреждений материала.

3. Для пробития стандартного оксида графена требуется намного больше затраченной энергии (10 циклов обработки для аналогичного показателя пропускания). Это связано с локальным восстановлением материала и активным отводом тепла по структуре.

4. В качестве энергетического ограничителя с большим запасом прочности можно рассмотреть частично восстановленный оксид графена – его пропускание будет зависеть от степени восстановления, при этом запас прочности будет выше, чем у полностью восстановленного материала.

Список литературы

1. Concentration and wavelength dependence of the effective third-order susceptibility and optical limiting of C60 in toluene solution / S. Couris, E. Koudoumas, A. A. Ruth,

S. Leach // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 1995. Vol. 28, no. 20. P. 4537–4554. doi: 10.1088/0953-4075/28/20/015.

2. Nonlinear optical properties of fullerenes / F. Kajzar, C. Taliani, R. Zamboni, S. Rossini, R. Danieli // *Synthetic Metals*. 1996. Vol. 77, no. 1–3. P. 257–263.
3. Фуллерены: Структурные, физико-химические и нелинейно-оптические свойства / В. П. Белоусов, И. М. Белоусова, В. П. Будтов, В. В. Данилов, О. Б. Данилов, А. Г. Калинин, А. А. Мак // *Оптический журн.* 1997. Т. 64, № 12. С. 3–37.
4. Kamanina N. V. Mechanisms of optical limiting in π -conjugated organic system: Fullerene-doped polyimide // *Synthetic Metals*. 2002. Vol. 127, no. 1–3. P. 121–128. doi: 10.1016/S0379-6779(01)00598-7.
5. Kamanina N. V., Plekhanov A. I. Mechanisms of optical limiting in fullerene-doped π -conjugated organic structures demonstrated with polyimide and COANP molecules // *Optics and Spectroscopy*. 2002. Vol. 93, no. 3. P. 408–415. doi: 10.1134/1.1509823.
6. Electric field effect in atomically thin carbon films / K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov // *Sci.* 2004. Vol. 306 (5696). P. 666–669. doi: 10.1126/science.1102896.
7. Lundie M., Šljivančanin Ž., Tomić S. Electronic and optical properties of reduced graphene oxide // *J. of Materials Chemistry C*. 2015. Vol. 3, iss. 29. P. 7632–7641. doi: 10.1039/c5tc00437c.
8. First principles study on optical response of graphene oxides: From reduced graphene oxide to the fully oxidized surface / F. Nasehnia, M. Seifi, E. Mehran, Lima S. Mohammadpour // *Comp. Mat. Science*. 2016. Vol. 114. P. 112–120. doi: 10.1016/j.commatsci.2015.12.010.
9. Optical properties of graphene oxide and reduced graphene oxide determined by spectroscopic ellipsometry / S. Schöche, N. Hong, M. Khorasaninejad, A. Ambrosio, E. Orabona, P. Maddalena, F. Capasso // *App. Surface Sci.* 2017. Vol. 421. P. 778–782. doi: 10.1016/j.apsusc.2017.01.035.
10. Ilin M. E., Toikka A. S., Kamanina N. V. Solvent Effective engineering for spin-coating of graphene oxide for liquid crystal devices // *Conf. Russian of Young Researchers in Electr. and Electronic Eng. (ElCon)*. Saint Petersburg, 2024. P. 702–704. doi: 10.1109/ElCon61730.2024.10468470.
11. In Situ third-order non-linear responses during laser reduction of graphene oxide thin films towards on-chip non-linear photonic devices / X. Zheng, B. Jia, X. Chen, M. Gu // *Advanced Mat.* 2014. Vol. 26, no. 17. P. 2699–2703. doi: 10.1002/adma.201304681.
12. Feng M., Zhan H., Chen Y. Nonlinear optical and optical limiting properties of graphene families // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 96, iss. 3. P. 033107. doi: 10.1063/1.3279148.
13. Graphene oxide as a chemically tunable platform for optical applications / K. P. Loh, Q. Bao, G. Eda, M. Chhowalla // *Nature Chemistry*. 2010. Vol. 2, iss. 12. P. 1015–1024. doi: 10.1038/nchem.907.
14. Ландсберг Г. С. Оптика: учеб. пособие для вузов. М.: Физматлит, 2003. 848 с.

Информация об авторах

Ильин Матвей Евгеньевич – студент гр. 0204 СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; старший лаборант научной группы «Фотофизика» отдела оптических и информационных технологий отделения перспективных разработок ПИЯФ НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина, Россия.

E-mail: ilin_matwei@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0000-3113-7761>

Каманина Наталия Владимировна – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры фотоники СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; зав. лабораторией фотофизики сред с нанобъектами / зав. отделом «Фотофизика наноструктурированных материалов и устройств» ГОИ им. С. И. Вавилова; ведущий научный сотрудник ПИЯФ НИЦ «Курчатовский институт», руководитель научной группы «Фотофизика», Гатчина, Россия.

E-mail: nvkamanina@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2903-2685>

References

1. Concentration and wavelength dependence of the effective third-order susceptibility and optical limiting of C60 in toluene solution / S. Couris, E. Koudoumas, A. A. Ruth, S. Leach // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 1995. Vol. 28, no. 20. P. 4537–4554. doi: 10.1088/0953-4075/28/20/015.
2. Nonlinear optical properties of fullerenes / F. Kajzar, C. Taliani, R. Zamboni, S. Rossini, R. Danieli // *Synthetic Metals*. 1996. Vol. 77, no. 1–3. P. 257–263.
3. Fullereny: Strukturnye, fiziko-himicheskie i nelinejno-opticheskie svojstva / V. P. Belousov, I. M. Belousova, V. P. Budtov, V. V. Danilov, O. B. Danilov, A. G. Kalincev, A. A. Mak // *Opticheskij zhurn.* 1997. Т. 64, № 12. С. 3–37. (In Russ.).
4. Kamanina N. V. Mechanisms of optical limiting in π -conjugated organic system: Fullerene-doped polyimide // *Synthetic Metals*. 2002. Vol. 127, no. 1–3. P. 121–128. doi: 10.1016/S0379-6779(01)00598-7.
5. Kamanina N. V., Plekhanov A. I. Mechanisms of optical limiting in fullerene-doped π -conjugated organic structures demonstrated with polyimide and COANP molecules // *Optics and Spectroscopy*. 2002. Vol. 93, no. 3. P. 408–415. doi: 10.1134/1.1509823.

6. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films / K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov // *Sci.* 2004. Vol. 306 (5696). P. 666–669. doi: 10.1126/science.1102896.

7. Lundie M., Šljivančanin Ž., Tomić S. Electronic and optical properties of reduced graphene oxide // *J. of Materials Chemistry C*. 2015. Vol. 3, iss. 29. P. 7632–7641. doi: 10.1039/c5tc00437c.

8. First principles study on optical response of graphene oxides: From reduced graphene oxide to the fully oxidized surface / F. Nasehnia, M. Seifi, E. Mehran, Lima S. Mohammadpour // *Comp. Mat. Science*. 2016. Vol. 114. P. 112–120. doi: 10.1016/j.commatsci.2015.12.010.

9. Optical properties of graphene oxide and reduced graphene oxide determined by spectroscopic ellipsometry / S. Schöche, N. Hong, M. Khorasaninejad, A. Ambrosio, E. Orabona, P. Maddalena, F. Capasso // *App. Surface Sci.* 2017. Vol. 421. P. 778–782. doi: 10.1016/j.apsusc.2017.01.035.

10. Ilin M. E., Toikka A. S., Kamanina N. V. Solvent Effective engineering for spin-coating of graphene oxide

for liquid crystal devices // *Conf. Russian of Young Researchers in Electr. and Electronic Eng. (ElCon)*. Saint Petersburg, 2024. P. 702–704. doi: 10.1109/ElCon61730.2024.10468470.

11. In Situ third-order non-linear responses during laser reduction of graphene oxide thin films towards on-chip non-linear photonic devices / X. Zheng, B. Jia, X. Chen, M. Gu // *Advanced Mat.* 2014. Vol. 26, no. 17. P. 2699–2703. doi: 10.1002/adma.201304681.

12. Feng M., Zhan H., Chen Y. Nonlinear optical and optical limiting properties of graphene families // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 96, iss. 3. P. 033107. doi: 10.1063/1.3279148.

13. Graphene oxide as a chemically tunable platform for optical applications / K. P. Loh, Q. Bao, G. Eda, M. Chhowalla // *Nature Chemistry*. 2010. Vol. 2, iss. 12. P. 1015–1024. doi: 10.1038/nchem.907.

14. Landsberg G. S. *Optika. Ucheb. posobie: dlja vuzov*. M.: Fizmatlit, 2003. 848 s. (In Russ.).

Information about the authors

Matwei E. Ilin – student gr. 0204 of Saint Petersburg Electrotechnical University; Senior laboratory assistant of the Photophysics Group of the Optical and Information Technology, Advanced Research Department, PINP, National Research Center «Kurchatov Institute», Gatchina, Russia.

E-mail: ilin_matwei@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0000-3113-7761>

Natalia V. Kamanina – Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Photonics, Saint Petersburg Electrotechnical University; Head of the Laboratory of Photophysics of Environments with Nanoobjects / Head of the Department «Photophysics of nanostructured materials and devices», Vavilov State Optical Institute; part-time Leading Researcher at PINP, National Research Center «Kurchatov Institute», the Head of the Photophysics Group, Gatchina, Russia.

E-mail: nvkamanina@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2903-2685>

Статья поступила в редакцию 26.04.2024; принята к публикации после рецензирования 08.06.2024; опубликована онлайн 24.10.2024.

Submitted 26.04.2024; accepted 08.06.2024; published online 24.10.2024.
