

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ
OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-529-537

УДК 535.92; 535.34; 535.399

Органо-неорганические светопоглощающие композиты
для ближней инфракрасной области спектраСергей Константинович Евстропьев¹, Валерий Михайлович Волюнкин²,
Дмитрий Владимирович Булыга³✉, Вячеслав Александрович Островский⁴,
Константин Николаевич Макаров⁵, Константин Владимирович Дукельский⁶,
Григорий Сергеевич Полищук⁷^{1,2,3,6,7} АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация^{4,5} АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Троицк, 108840, Российская Федерация¹ evstropiev@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0160-8443>² vvolynkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6325-1507>³ dmbulyga@yandex.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-8861-2527>⁴ ostrovskiy@triniti.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9114-2116>⁵ makarov@triniti.ru, <https://orcid.org/0009-0004-3280-3489>⁶ kdukel@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1627-7499>⁷ g.polishchuk@optrotech.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9358-6040>

Аннотация

Введение. В работе выполнен синтез и проведено исследование структуры и свойств органо-неорганических оксида меди (CuO) и магнетит (Fe₃O₄)-содержащих эпоксидных композитов, поглощающих излучение в ближней инфракрасной области спектра. **Метод.** Синтез композитов осуществлен введением микропорошков CuO и Fe₃O₄ в жидкую эпоксидную композицию с последующей гомогенизацией смеси и ее полимеризацией. Исследование структуры и свойств органо-неорганических композитов проведено методами оптической микроскопии, инфракрасной спектроскопии, оптической спектроскопии, исследованием микротвердости материалов. **Основные результаты.** По данным, полученным на основании инфракрасных спектров поглощения, введение оксидных частиц снижает степень отверждения эпоксидного полимера на 20–28 %. Fe₃O₄-содержащие композиты демонстрируют относительно низкое (до 4,2 %) отражение света в спектральном диапазоне 1000–1100 нм, что соответствует проведенным оценочным расчетам. При введении микропорошков CuO и Fe₃O₄ в состав эпоксидного полимера его микротвердость может быть увеличена от 120 до 160 МПа. **Обсуждение.** Полученные в работе экспериментальные результаты могут служить основой для разработки органо-неорганических композиционных материалов для лазерной техники, поглощающих излучение в ближней инфракрасной области спектра.

Ключевые слова

поглощение света, композит, эпоксидная смола, микропорошок

Ссылка для цитирования: Евстропьев С.К., Волюнкин В.М., Булыга Д.В., Островский В.А., Макаров К.Н., Дукельский К.В., Полищук Г.С. Органо-неорганические светопоглощающие композиты для ближней инфракрасной области спектра // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 4. С. 529–537. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-529-537

Organic-inorganic light-absorbing composites for near infrared part of spectrumSergey K. Evstropiev¹, Valery M. Volynkin², Dmitry V. Bulyga³✉, Vyacheslav A. Ostrovskii⁴,
Konstantin N. Makarov⁵, Konstantin V. Dukelskii⁶, Grigoriy S. Polishchuk⁷^{1,2,3,6,7} JSC “Research and Production Corporation S.I. Vavilova”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation^{4,5} AO “GNTs RF TRINITY”, Troitsk, 108840, Russian Federation¹ evstropiev@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0160-8443>² vvolynkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6325-1507>³ dmbulyga@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8861-2527>⁴ ostrovskiy@triniti.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9114-2116>⁵ makarov@triniti.ru, <https://orcid.org/0009-0004-3280-3489>⁶ kdukel@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1627-7499>⁷ g.polishchuk@optrotech.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9358-6040>**Abstract**

Synthesis and study on structure and properties of organic-inorganic composites based on epoxy resin, CuO and Fe₃O₄ absorbing light in infrared part of spectrum was performed. The composites synthesis was performed by introduction of CuO and Fe₃O₄ micropowders into liquid epoxy composition with subsequent homogenization of the mixture and polymerization. The study on structure and properties of organic-inorganic composites was performed by methods of optical microscopy, infrared and visible spectroscopy, study on microhardness. According to the IR spectroscopy data, introduction of oxide particles leads to decrease in epoxy polymer degree of calcification. The composites containing Fe₃O₄ show relatively low light reflection until 4.2 % in the spectral range of 1000–1100 nm that corresponds to the theoretical estimation data. Incorporation of CuO and Fe₃O₄ micropowders into the epoxy polymer leads to an increase in microhardness from 120 to 160 MPa. Obtained experimental data can serve as the base for development of IR-absorbing organic-inorganic composites for laser technology.

Keywords

light absorption, composite, epoxy resin, micropowder

For citation: Evstropiev S.K., Volynkin V.M., Bulyga D.V., Ostrovskii V.A., Makarov K.N., Dukelskii K.V., Polishchuk G.S. Organic-inorganic light-absorbing composites for near infrared part of spectrum. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 4, pp. 529–537 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-529-537

Введение

Органо-неорганические композиты на основе органических полимеров используются в различных оптических приложениях [1–7]. Композиции на основе эпоксидных полимеров обладают высокими механическими свойствами [3, 8–11], демонстрируют высокую адгезию к поверхности различных материалов [9, 12] и могут быть модифицированы различными функциональными компонентами [1–5]. Различные органо-неорганические композиции на основе эпоксидных полимеров были использованы в работах [2–5] для создания светопоглощающих оптических материалов.

Известными недостатками органических полимеров, существенно ограничивающими их применение в мощных лазерных системах, являются низкие термостабильность и теплопроводность [6], а также небольшая микротвердость, существенно затрудняющая обработку их поверхности. Для устранения перечисленных недостатков и других функциональных характеристик органических полимерных материалов в их состав вводят различные модифицирующие неорганические компоненты [1–8, 13–15].

Одними из наиболее термостойких и твердых органических полимеров являются материалы на основе эпоксидных смол [16]. Термостойкость и микротвердость эпоксидных полимеров может быть дополнительно повышена при введении в их состав оксидных модификаторов. Так, введение оксида меди (CuO) в состав композитов на основе эпоксидных полимеров используется для улучшения их функциональных ха-

рактеристик [12, 13, 17, 18]. В работе [12] показано, что добавки CuO повышают механическую прочность на сжатие композитов и их термостабильность. В [13] отмечено, что при введении в эпоксидный полимер 5 масс.% CuO температура термического разложения материала увеличивается на 28 °С. Значительное (более чем в три раза) увеличение теплопроводности эпоксидного материала наблюдалось в работе [18] при введении в его состав 25 масс.% CuO. Кроме того, известно, что CuO обладает высоким поглощением в видимом диапазоне электромагнитного спектра [19–21]. Ширина запрещенной зоны этого материала составляет около 1,45 эВ [19, 20]. В [19, 22] исследованы спектральные свойства кристаллов CuO различной дисперсности и показано, что этот оксид может быть использован в качестве поглотителя солнечной энергии [19] или насыщаемого поглотителя в лазерных системах [22].

Другим оксидным светопоглощающим материалом, используемым в оптических приложениях, является магнетит (Fe₃O₄) [3, 23–25]. Спектральные свойства коллоидных растворов Fe₃O₄ в спектральном диапазоне 400–1050 нм исследованы в [23]. В этой работе по экспериментальным данным оптической анизотропии магнитных коллоидов проведено определение комплексного показателя преломления наноразмерного Fe₃O₄ и осуществлено сопоставление полученных результатов с данными известных научных работ. Приведенные в [23] результаты свидетельствуют о существенном разбросе исследованных данных о показателях преломления и поглощения Fe₃O₄.

Цель работы — синтез и исследование спектральных и механических свойств органо-неорганических композитов, обладающих существенным светопоглощением в ближней инфракрасной (ИК) области электромагнитного спектра. В работе использован эпоксидный полимер с различным содержанием добавок микропорошков CuO и Fe₃O₄.

Материалы и методы

В настоящей работе использована эпоксидная смола марки ЭД-22¹ (Химэкс Лимитед, Россия) как полимерная основа композитов. В качестве отвердителя эпоксидной смолы применен полиоксипропиленамин (Джеффамин Д-230) (альфа-(2-аминометилэтил)-омега-(2-аминометилэтокси) поли[окси-(метил-1,2-этан-диил)] (Huntsman Holland BV, Netherlands). В состав полимерной матрицы введен трибутилфосфат в качестве пластификатора. Выбор этих исходных материалов для синтеза полимерной матрицы обусловлен их высокой чистотой, однородностью и воспроизводимостью свойств получаемого материала. Используемая в работе эпоксидная полимерная композиция включала: ЭД-22 — 72 масс.%; Джеффамин Д-230 — 23 масс.%; трибутилфосфат — 5 масс.%

Для создания композитов, поглощающих излучение в ближней ИК области спектра, в состав полимерной композиции были введены добавки порошков CuO и Fe₃O₄. На микрофотографиях порошков (рис. 1) видно, что они состоят из частиц неправильной формы, имеющих размер несколько десятков микрон.

Полученные композиты представляли собой твердые монолитные материалы черного цвета с гладкой, зеркально отражающей свет поверхностью. Данные оптической микроскопии (рис. 1, c) свидетельствуют о наличии на поверхности композитов тонкой пленки эпоксидного полимера.

На первом этапе синтеза выполнено изготовление полимерной композиции путем добавления Джеффамина ДТ-230 и трибутилфосфата к ЭД-22. Полимерные композиции перемешивались вручную в течение 10 мин, затем в них добавлялись порошки оксидов. После тщательного ручного перемешивания в течение 5 мин композиция заливалась в силиконовые формы и выдерживалась при температуре 20 °С в течение трех суток для полного завершения процессов полимеризации. Химический состав синтезированных композитов приведен в табл. 1. Было синтезировано по одному образцу каждого состава.

Выполнено исследование спектров отражения полученных композитов с помощью спектрофотометра Perkin Elmer 900 UV/VIS/NIR (PerkinElmer, inc., США). ИК спектры поглощения композитов определены на фурье-спектрометре Bruker Alpha (Bruker Optik GmbH, Германия).

Измерение микротвердости композитов по Виккерсу осуществлено на микротвердомере ПМТ-3. При

¹ ГОСТ 10587-84. Смолы эпоксидно-диановые не отвержденные. Технические условия. Введен 01.01.1989. М.: Издательство стандартов, 1989. 20 с.

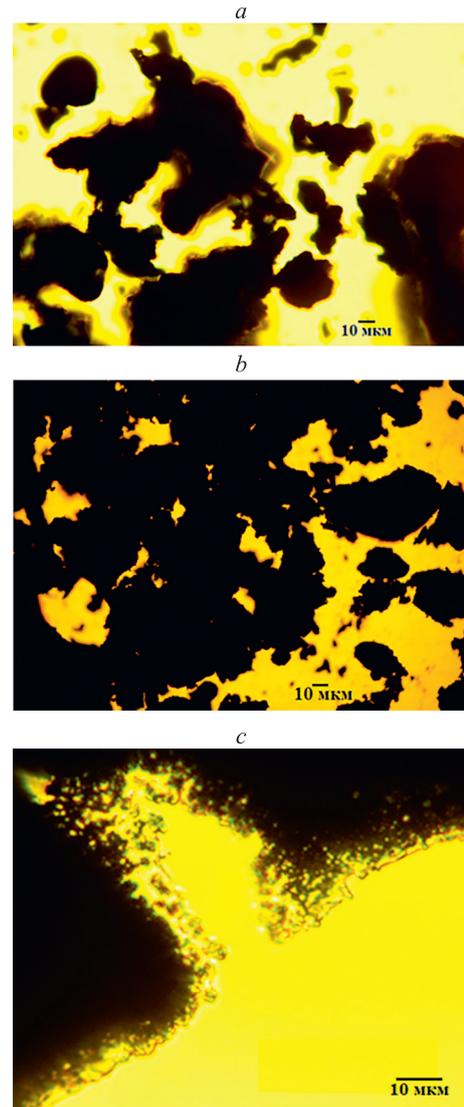


Рис. 1. Микрофотографии порошков CuO (a); Fe₃O₄ (b) и скола Fe₃O₄-содержащего эпоксидного композита (c)

Fig. 1. CuO (a); Fe₃O₄ (b) and Fe₃O₄-containing epoxy composite chip (c) micrographs

Таблица 1. Химический состав композитов на основе эпоксидной смолы, содержащих добавки порошков CuO и Fe₃O₄

Table 1. Chemical composition of epoxy-based composites containing CuO and Fe₃O₄ powders additions

Наименование образца	Компоненты, масс.%		
	Эпоксидная полимерная композиция	CuO	Fe ₃ O ₄
CuO-1	96,8	3,2	—
CuO-2	91,7	8,3	—
CuO-3	75,0	25,0	—
CuO-4	55,6	44,4	—
Fe ₃ O ₄ -1	97,7	—	2,3
Fe ₃ O ₄ -2	97,1	—	2,9
Fe ₃ O ₄ -3	93,5	—	6,5
Fe ₃ O ₄ -4	90,0	—	10,0
Fe ₃ O ₄ -5	56,2	—	43,8

измерениях продолжительность приложения нагрузки составила 10 с, а определение размеров отпечатка индентора выполнено сразу после снятия нагрузки. Микротвердость материалов рассчитана по формуле:

$$H_V = 1,854 \cdot P/d^2,$$

где P — нагрузка на индентор; d — длина диагонали остаточного отпечатка индентора.

Результаты и обсуждения

Исследованы спектры ИК поглощения CuO - и Fe_3O_4 -содержащих эпоксидных композитов (рис. 2). Спектры были зарегистрированы с использованием модуля нарушенного полного внутреннего отражения, который не позволяет получить абсолютные значения коэффициента поглощения. Полученные значения интенсивности полос зависят от силы прижатия образца к призме, поэтому величина, отложенная по оси Y дана в относительных единицах.

При анализе спектров видно, что наблюдаются многочисленные пики, характерные для оксидных полимеров. Данные по идентификации пиков в спектрах ИК поглощения ЭД-22 и композитов на ее основе описаны во многих научных работах [26, 27]. В спектральном диапазоне $2900\text{--}3600\text{ см}^{-1}$ наблюдаются пики, соответствующие колебаниям OH -групп (около 3470 см^{-1}), CH в эпоксидном (оксирановом) цикле (3057 см^{-1}) и CH в алифатических и ароматических углеводородах ($2870\text{--}2970\text{ см}^{-1}$) [26, 27]. Также в спектрах наблюдаются характеристические пики деформационных колебаний связей оксиранового цикла C-O при 916 см^{-1} , C-O-C при 824 см^{-1} , $-\text{C-H}$ при 3057 см^{-1} [19]. В области $500\text{--}1000\text{ см}^{-1}$ заметны также пики, соответствующие колебаниям CH_2 групп (около 767 см^{-1}) [1] и связи Fe-O в Fe_3O_4 (552 см^{-1}) и Cu-O (521 см^{-1}) в CuO [3, 4, 19].

Общий вид спектров ИК поглощения исследуемых композитов соответствует известным спектрам оксидных полимеров [27] и оксидных композитов, содержащих добавки Fe_3O_4 [28]. Отметим небольшое

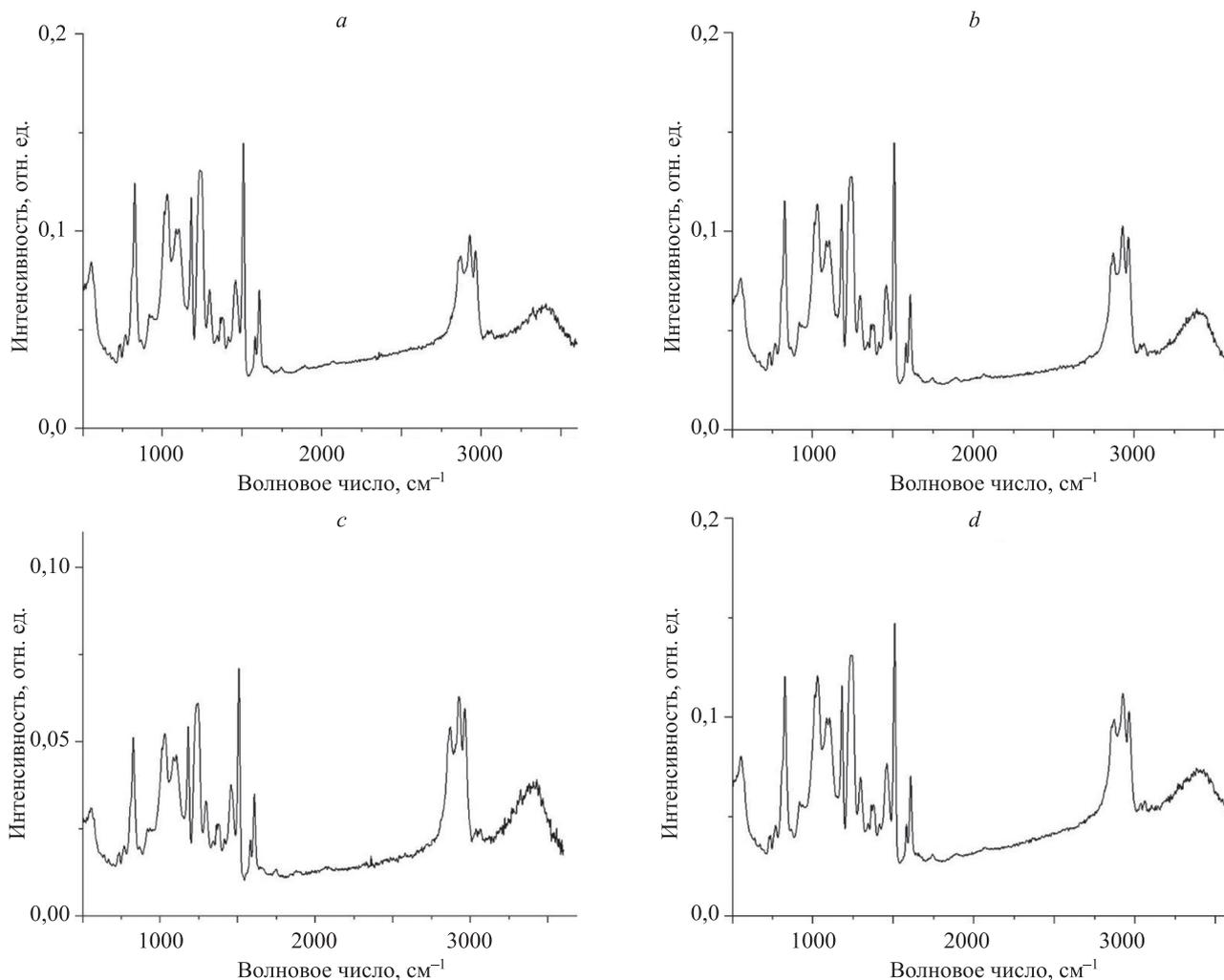


Рис. 2. Спектры инфракрасного поглощения композитов: Fe_3O_4 -содержащие эпоксидные композиты, включающие 10 масс.% Fe_3O_4 (a) и 2,3 масс.% Fe_3O_4 (b); CuO -содержащие эпоксидные композиты, имеющих в составе 3,2 масс.% CuO (c) и 25,0 масс.% CuO (d)

Fig. 2. Infrared absorption spectra of composites: Fe_3O_4 -containing epoxy composites with 10 mass % of Fe_3O_4 (a) and 2.3 mass % of Fe_3O_4 (b); CuO -containing epoxy composites with 3.2 mass % of CuO (c) and 25 mass % of CuO (d)

отличие в относительной интенсивности отдельных пиков на спектрах поглощения эпоксидного полимера и композитов на его основе. Соотношение пиков, характерных для колебаний различных структурных групп в полимерном материале, может быть использовано для оценки особенностей его строения. Так, соотношение интенсивностей ($K = I_{915}/I_{1362}$) полос поглощения колебаний связи С–О в эпоксидном цикле при 915 см^{-1} (I_{915}) и алифатического фрагмента –CH₂– при 1362 см^{-1} (I_{1362}) использовалось в работе [27] в качестве оценочного критерия степени отверждения ЭД-22.

В неотвержденной ЭД-22 значение K составило около 1,27 и при полимеризации материала эта величина уменьшилась до 0,5–0,92, в зависимости от типа использованного аминного отвердителя [27]. Полученные в настоящей работе экспериментальные результаты показали, что после полимеризации смолы без модифицирующих добавок при применении в качестве отвердителя Джеффамина Д-230 величина K равна 0,83. Значения K в синтезированных CuO- и Fe₃O₄-содержащих эпоксидных композитах после их полимеризации при комнатной температуре варьировались в диапазоне 0,92–1,07, что заметно больше, чем для смолы без модификаторов. Это явление может объясняться тем, что микрочастицы оксидов, распределенные в объеме материала, пространственно разделяют компоненты полимеризующегося материала и, таким образом, несколько снижают степень отверждения ЭД-22.

На рис. 3 приведены спектры полного отражения CuO- и Fe₃O₄-содержащих эпоксидных композитов. Видно, что в видимой части спектра (длина волны $\lambda = 600\text{--}700\text{ нм}$) величина измеренного коэффициента отражения R от CuO-содержащих композитов со-

ставляет 5–9 % и уменьшается при увеличении содержания CuO. В области длин волн порядка 850 нм наблюдается существенное увеличение отражения света от поверхности композитов, что определяется границей оптической прозрачности CuO (ширина запрещенной зоны микронных частиц CuO составляет 1,43–1,45 эВ [20]). В ближней ИК области спектра значения R CuO-содержащих композитов увеличиваются до 14,5–25 %. В диапазоне 1150–1200 нм на спектрах видны два небольших пика поглощения эпоксидного полимера.

Синтезированные Fe₃O₄-содержащие эпоксидные композиты характеризуются существенно более низким отражением света (4,3–5,0 %) во всем исследованном спектральном диапазоне, чем CuO-содержащие композиты. При этом при возрастании содержания Fe₃O₄ до 10,0 масс.% наблюдается уменьшение значений R , а при дальнейшем увеличении содержания Fe₃O₄ до 43,8 масс.% отражение света от поверхности композита возрастает.

На основании экспериментальных данных о показателях преломления и поглощения монокристаллического Fe₃O₄ в спектральном диапазоне 1000–1050 нм, приведенных в [23] (показатели преломления и поглощения Fe₃O₄: $n_M = 2,5$; $\kappa_M = 0,4$), проведены оценочные расчеты величин зеркального отражения света от поверхности композитов [29]:

$$R = \frac{(n_k - n_{cp})^2 + \kappa^2}{(n_k + n_{cp})^2 + \kappa^2}, \quad (n_k = \text{Re}(n'_k), \kappa = \text{Im}(n'_k)),$$

где n'_k — комплексный показатель преломления композитов; Re — действительная часть комплексного числа; Im — мнимая часть комплексного числа. Оценка значе-

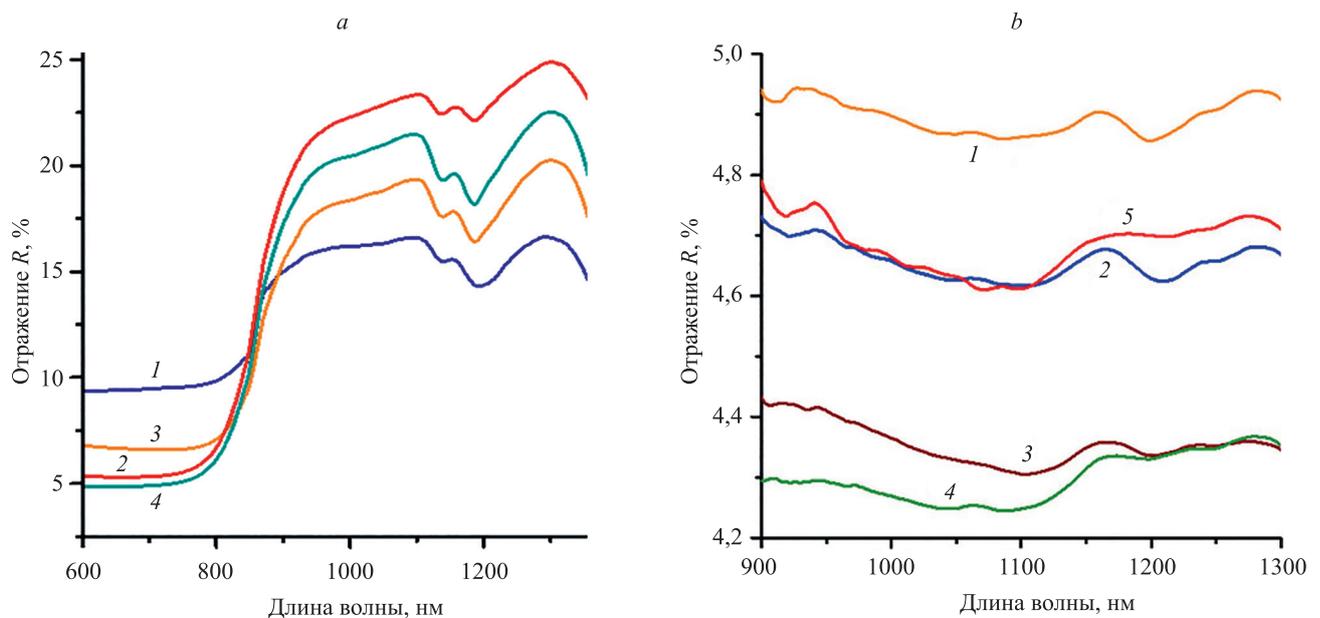


Рис. 3. Спектры отражения CuO-содержащих композитов, масс.-%: 3,2 (кривая 1); 8,3 (кривая 2); 25,0 (кривая 3); 44,4 (кривая 4) (a) и Fe₃O₄-содержащих эпоксидных композитов, масс.-%: 2,3 (кривая 1); 2,9 (кривая 2); 6,5 (кривая 3); 10,0 (кривая 4); 43,8 (кривая 5) (b)

Fig. 3. Reflection spectra of CuO-containing composites, wt.-%: 3.2 (curve 1); 8.3 (curve 2); 25.0 (curve 3); 44.4 (curve 4) (a) and Fe₃O₄-containing epoxy composites, wt.-%: 2.3 (curve 1); 2.9 (curve 2); 6.5 (curve 3); 10.0 (curve 4); 43.8 (curve 5) (b)

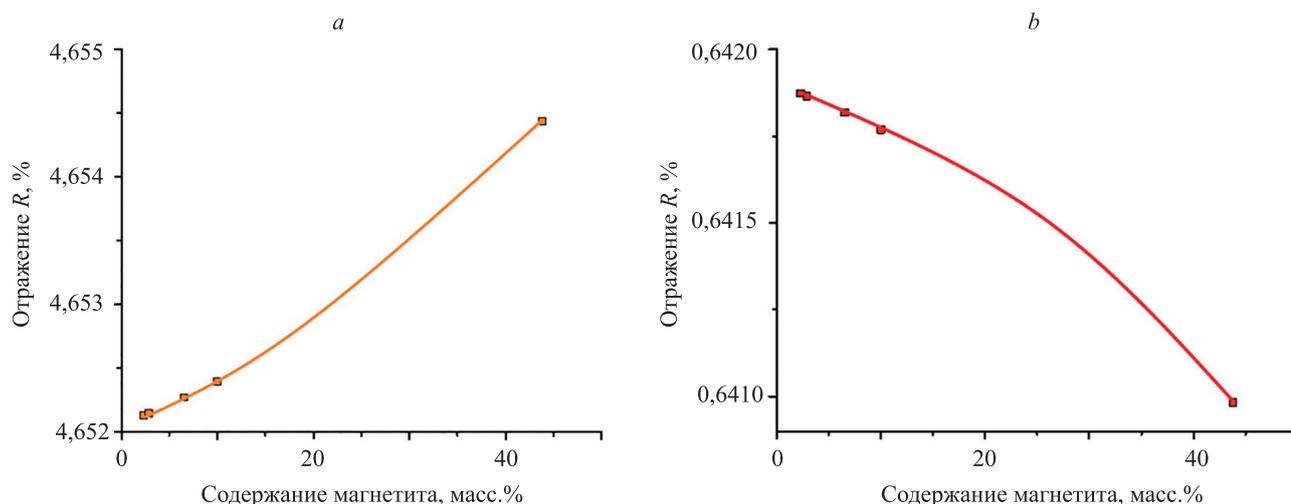


Рис. 4. Оценочные расчетные зависимости коэффициента зеркального отражения света R на границах Fe_3O_4 -содержащих композит–воздух (а) и композит–АИГ (б) в зависимости от содержания в композите Fe_3O_4

Fig. 4. Estimated calculated dependences of the specular light reflection coefficient R at the Fe_3O_4 -containing composite-air (a) and Fe_3O_4 -containing composite-YAG (b) interfaces as a function of the Fe_3O_4 content in the composite

ний n'_k композитов выполнена в предположении объемной аддитивности показателя преломления [29]:

$$n'_k = (n_M - ik_M)\omega + n_3(1 - \omega),$$

где n_3 — показатель преломления ЭД-22 ($n_3 = 1,55$); ω — объемная доля Fe_3O_4 в композите.

На рис. 4 приведены результаты оценочных расчетов зависимостей коэффициента зеркального отражения света R ($\lambda = 1040$ нм) на границах Fe_3O_4 -содержащих композит–воздух (рис. 4, а) и композит–АИГ (алюмоиттриевый гранат) в зависимости от содержания в композите Fe_3O_4 . Наблюдаемые на рисунке небольшие изменения значений R невелики. Сопоставление расчетных величин R (рис. 4, а) на границе композит–воздух с экспериментальными данными (рис. 3, б) показывает их близость. Отметим, что получены относительно невысокие расчетные значения R на границе раздела композит–АИГ, составляющие величину порядка 0,64 %.

Напомним, что экспериментальные данные (рис. 3) по отражению света от поверхности CuO - и Fe_3O_4 -содержащих эпоксидных материалов получены для композитов, в которые оксидные модификаторы вводились в форме коммерческих порошков с довольно крупными частицами микронного размера. Можно предположить, что при использовании оксидных нанопорошков возможно дополнительное уменьшение отражения света как за счет введения в состав композитов большего содержания этих компонентов, так и при изменении их спектральных свойств при возрастании дисперсности. Так, например, в работе [19] показано, что поглощение света нанокристаллическим CuO в спектральной области 1000–1100 нм значительно выше, чем у крупных частиц.

Исследования микромеханических свойств полученных композитов показали, что введение оксидных порошков в эпоксидную композицию привело к заметному возрастанию микротвердости композитов.

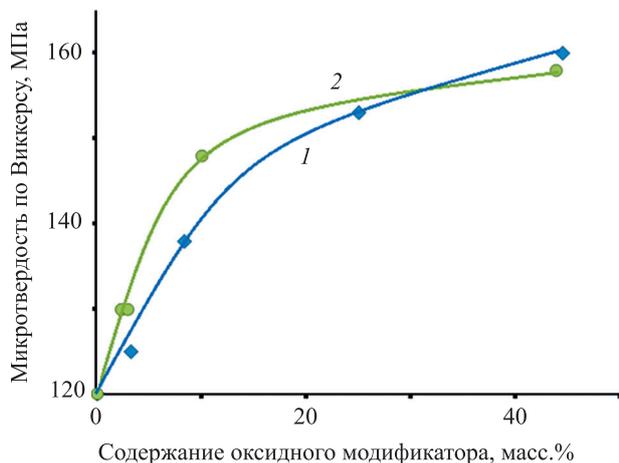


Рис. 5. Зависимость микротвердости по Виккерсу композитов от содержания оксидного модификатора CuO (кривая 1); Fe_3O_4 (кривая 2). Погрешность — 1 МПа

Fig. 5. Dependence of Vickers microhardness of composites on the content of oxide modifier CuO (curve 1); Fe_3O_4 (curve 2). The estimated error is about 1 MPa

Микротвердость эпоксидного полимера без добавок получена 120 МПа и увеличивалась до 158–160 МПа при введении в композит до 44 масс.% оксидов (рис. 5). Значения микротвердости в синтезированных в настоящей работе композитов близки к значениям других органо-неорганических материалов на основе эпоксидных полимеров, полученных в [3].

Заключение

При введении микропорошков оксида меди и оксида железа в эпоксидные полимеры сформированы композиты, обладающие существенным светопоглощением в ближней инфракрасной области спектра и повышенной, по сравнению с чистым полимером, микротвердостью, достигающей 160 МПа. По данным, полученным на

основании инфракрасных спектров поглощения, введение оксидных частиц снижает степень отверждения эпоксидного полимера на 20–28 %. Относительно низкое (до 4,2 %) отражение света демонстрируют в спектральном диапазоне 1000–1100 нм композиты, содер-

жащие оксид железа, что соответствует проведенным оценочным расчетам. Полученные в работе органо-неорганические композиты могут быть перспективны в качестве светопоглощающих в ближней инфракрасной области материалов для лазерной техники.

Литература

1. Ting T.H. Synthesis, characterization of Fe_3O_4 /polymer composites with stealth capabilities // *Results in Physics*. 2020. V. 16. P. 102975. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.102975>
2. Kulagina A.S., Sandulenko A.V., Volynkin V.M., Evstropiev S.K. Synthesis and nonlinear optical properties of vanadium-doped plasticized epoxy polymer composites // *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2021. V. 4. N 2. P. 324. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00227-y>
3. Волюнкин В.М., Евстропьев С.К., Булыга Д.В., Морковский А.В., Пашин С.С., Дукельский К.В., Бурдин А.В., Бондаренко И.Б. Оптические композиты на основе органических полимеров и полупроводниковых пигментов // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2022. Т. 22. № 1. С. 10–17. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-1-10-17>
4. Киселев В.М., Бурчинов А.А., Волюнкин В.М., Евстропьев С.К., Матвеевцев А.В. Светопоглощающие композиционные покрытия на основе оксидных полых микросфер и сульфида свинца // *Оптический журнал*. 2015. Т. 82. № 12. С. 60–64.
5. Belousova I.M., Videnichev D.A., Volynkin V.M., Evstropiev S.K., Kislyakov I.M., Murav'ova T.D., Rakov E.G. Nonlinear optical limiters of pulsed laser radiation based on carbon-containing nanostructures in viscous and solid matrices // *Polymers for Advanced Technologies*. 2014. V. 25. N 9. P. 1008–1013. <https://doi.org/10.1002/pat.3343>
6. Безродный В.И., Тихонов Е.А. Полимерный пассивный модулятор добротности // *Квантовая электроника*. 1986. Т. 13. № 12. С. 2486.
7. Mironov L.Yu., Evstropiev S.K. Temperature-sensitive luminescent photopolymer activated by europium β -diketonate complexes // *Optical Engineering*. 2019. V. 58. N 2. P. 027113. <https://doi.org/10.1117/1.OE.58.2.027113>
8. Нацик В.Д., Фоменко Л.С., Лубенец С.В. Исследование ползучести и стеклования эластомеров методом микроиндентирования: эпоксидная смола и нанокompозиты на ее основе // *Физика твердого тела*. 2013. Т. 55. № 5. С. 940–952.
9. Farzanehfar N., Taheri A., Rafiemanzelat F., Jazani O.M. High-performance epoxy nanocomposite adhesives with enhanced mechanical, thermal and adhesion properties based on new nanoscale ionic materials // *Chemical Engineering Journal*. 2023. V. 471. P. 144428. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144428>
10. Usay Ş., Yaykaşlı H., Acer D.C. Microhardness and thermal resistance of epoxy composites reinforced with graphene nanoparticle doped carbon nanotubes // *Journal of NanoScience in Advanced Materials*. 2022. V. 1. N 1. P. 6–11. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7464972>
11. Sun T., Fan H., Wang Z., Liu X., Wu Z. Modified nano Fe_2O_3 -epoxy composite with enhanced mechanical properties // *Materials & Design*. 2015. V. 87. P. 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.177>
12. Nazarzade S., Ghorbani H.R. Synthesis of CuO/Epoxy nanocomposites for the preparation of antifungal coating // *Nanomedicine Journal*. 2019. V. 6. N 2. P. 142–146. <https://doi.org/10.22038/NMJ.2019.06.0009>
13. Mahadeva Raju G.K., Madhu G.M., Dinesh Sankar Reddy P., Karthik K.V. Mechanical and thermal properties of epoxy polymer composites reinforced with CuO // *YMER*. 2021. V. 20. N 12. P. 272–280.
14. Chen Y., Zhang D., Wu X., Wang H., Zhang C., Yang W., Chen Y. Epoxy/ α -alumina nanocomposite with high electrical insulation performance // *Progress in Natural Science: Materials International*. 2017. V. 27. N 5. P. 574–581. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2017.09.003>
15. Singh S.K., Singh S., Kumar A., Jain A. Thermo-mechanical behavior of TiO_2 dispersed epoxy composites // *Engineering Fracture Mechanics*. 2017. V. 184. P. 241–248. <https://doi.org/10.1016/j.engfractmech.2017.09.005>

References

1. Ting T.H. Synthesis, characterization of Fe_3O_4 /polymer composites with stealth capabilities. *Results in Physics*, 2020, vol. 16, pp. 102975. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.102975>
2. Kulagina A.S., Sandulenko A.V., Volynkin V.M., Evstropiev S.K. Synthesis and nonlinear optical properties of vanadium-doped plasticized epoxy polymer composites. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2021, vol. 4, no. 2, pp. 324. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00227-y>
3. Volynkin V.M., Evstropiev S.K., Bulyga D.V., Morkovsky A.V., Pashin S.S., Dukelskiy K.V., Bourdine A.V., Bondarenko I.B. Optical composites based on organic polymers and semiconductor pigments. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 10–17. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-1-10-17>
4. Kiselev V.M., Burchinov A.A., Volynkin V.M., Matveentsev A.V., Evstropiev S.K. Composite light-absorbent coatings based on hollow oxide microspheres and lead sulfide. *Journal of Optical Technology*, 2015, vol. 82, no. 12, pp. 824–826. <https://doi.org/10.1364/jot.82.000824>
5. Belousova I.M., Videnichev D.A., Volynkin V.M., Evstropiev S.K., Kislyakov I.M., Murav'ova T.D., Rakov E.G. Nonlinear optical limiters of pulsed laser radiation based on carbon-containing nanostructures in viscous and solid matrices. *Polymers for Advanced Technologies*, 2014, vol. 25, no. 9, pp. 1008–1013. <https://doi.org/10.1002/pat.3343>
6. Bezrodnyĭ V.I., Tikhonov E.A. Polymer passive Q switch. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1986, vol. 16, no. 12, pp. 1642–1645. <https://doi.org/10.1070/QE1986v016n12ABEH008515>
7. Mironov L.Yu., Evstropiev S.K. Temperature-sensitive luminescent photopolymer activated by europium β -diketonate complexes. *Optical Engineering*, 2019, vol. 58, no. 2, pp. 027113. <https://doi.org/10.1117/1.OE.58.2.027113>
8. Natsik V.D., Fomenko L.S., Lubenets S.V. Investigation of the creep and glass transition of elastomers by the microindentation method: epoxy resin and related nanocomposites. *Physics of the Solid State*, 2013, vol. 55, no. 5, pp. 1020–1033. <https://doi.org/10.1134/s1063783413050260>
9. Farzanehfar N., Taheri A., Rafiemanzelat F., Jazani O.M. High-performance epoxy nanocomposite adhesives with enhanced mechanical, thermal and adhesion properties based on new nanoscale ionic materials. *Chemical Engineering Journal*, 2023, vol. 471, pp. 144428. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144428>
10. Usay Ş., Yaykaşlı H., Acer D.C. Microhardness and thermal resistance of epoxy composites reinforced with graphene nanoparticle doped carbon nanotubes. *Journal of NanoScience in Advanced Materials*, 2022, vol. 1, no. 1, pp. 6–11. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7464972>
11. Sun T., Fan H., Wang Z., Liu X., Wu Z. Modified nano Fe_2O_3 -epoxy composite with enhanced mechanical properties. *Materials & Design*, 2015, vol. 87, pp. 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.177>
12. Nazarzade S., Ghorbani H.R. Synthesis of CuO/Epoxy nanocomposites for the preparation of antifungal coating. *Nanomedicine Journal*, 2019, vol. 6, no. 2, pp. 142–146. <https://doi.org/10.22038/NMJ.2019.06.0009>
13. Mahadeva Raju G.K., Madhu G.M., Dinesh Sankar Reddy P., Karthik K.V. Mechanical and thermal properties of epoxy polymer composites reinforced with CuO. *YMER*, 2021, vol. 20, no. 12, pp. 272–280.
14. Chen Y., Zhang D., Wu X., Wang H., Zhang C., Yang W., Chen Y. Epoxy/ α -alumina nanocomposite with high electrical insulation performance. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2017, vol. 27, no. 5, pp. 574–581. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2017.09.003>
15. Singh S.K., Singh S., Kumar A., Jain A. Thermo-mechanical behavior of TiO_2 dispersed epoxy composites. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, vol. 184, pp. 241–248. <https://doi.org/10.1016/j.engfractmech.2017.09.005>

16. Чурсова Л.В., Панина Н.Н., Гребенева Т.А., Кутергина И.Ю. Эпоксидные смолы, отвердители, модификаторы и связующие на их основе. СПб.: Профессия, 2020. 576 с.
17. Ong H.R., Khan Md.M.R., Ramli R., Yunus R.M. Effect of CuO nanoparticle on mechanical and thermal properties of palm oil based alkyl/epoxy resin blend // *Procedia Chemistry*. 2015. V. 16. P. 623–631. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2015.12.101>
18. Bindal P., Shrivastava A. Study of thermal conductivity enhancement of epoxy with copper oxide(CuO) // *International Journal for Research in Engineering Application & Management*. 2018. V. 4. N 8. P. 81. <https://doi.org/10.18231/2454-9150.2018.1057>
19. Сухоруков Ю.П., Гижевский Б.А., Мостовщикова Е.В., Ермаков А.Е., Тугушев С.Н., Козлов Е.А. Нанокристаллический CuO-материал для селективных поглотителей солнечной энергии // Письма в Журнал технической физики. 2006. Т. 32. № 3. С. 81–89.
20. Сухоруков Ю.П., Лошкарева Н.Н., Москвин А.С., Самохвалов А.А. Спектры поглощения монокристаллов CuO в области фундаментальной полосы и природа оптической щели в оксидах меди // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1995. Т. 108. № 5. С. 1821–1830.
21. Welegergs G.G., Akoba R., Sacky J., Nuru Z.Y. Structural and optical properties of copper oxide (CuO) nanocoatings as selective solar absorber // *Materials Today: Proceedings*. 2021. V. 36. N 2. P. 509–513. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.298>
22. Al-Masoodi A.H.H., Abdulghafoor O.B., Alani I.A.M., Ahmed M.H.M., Al Masoodi Ab.H.H., Harun S.W. Passively Q-switched pulses from ytterbium-doped fiber laser (YDFL) using copper oxide (CuO) nanoparticles as a saturable absorber // *Optical Materials Express*. 2020. V. 10. N 11. P. 2896–2908. <https://doi.org/10.1364/OME.403713>
23. Ерин К.В. Определение комплексного показателя преломления наноразмерного магнетита по данным оптической анизотропии магнитных коллоидов // Неорганические материалы. 2022. Т. 58. № 4. С. 421–431. <https://doi.org/10.31857/S0002337X22040042>
24. Wang X., Wang Y.G., Mao D., Li L., Chen Z.D. Passively Q-switched Nd:YVO₄ laser based on Fe₃O₄ nanoparticles saturable absorber // *Optical Materials Express*. 2017. V. 7. N 8. P. 2913–2921. <https://doi.org/10.1364/OME.7.002913>
25. Chen G., Yang Y., Tian M., Li C., Huang Y., Lv M. Passively Q-switched mode-locked ytterbium-doped fiber laser based on an Fe₃O₄-nanoparticle saturable absorber // *Optical Materials Express*. 2020. V. 10. N 2. P. 588–596. <https://doi.org/10.1364/OME.383188>
26. González M.G., Cabanelas J.C., Baselga J. Applications of FTIR on epoxy resins — identification, monitoring the curing process, phase separation and water uptake // *Infrared Spectroscopy — Materials Science, Engineering and Technology*. InTech, 2012. P. 261–284. <https://doi.org/10.5772/36323>
27. Рудаков О.Б., Хорохордина Е.А., Глазков С.С., Хорохордин А.М., Губин А.С. Контроль отверждения эпоксидной смолы по содержанию свободного бисфенола А методом ТСХ // Аналитика и контроль. 2017. Т. 21. № 2. С. 135–143. <https://doi.org/10.15826/analitika.2017.21.2.004>
28. Wu Z., Chen J., Li Q., Xia D.-H., Deng Y., Zhang Y., Qin Z. Preparation and thermal conductivity of epoxy resin/graphene-Fe₃O₄ composites // *Materials*. 2021. V. 14. N 8. P. 2013. <https://doi.org/10.3390/ma14082013>
29. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. С. 57.
16. Chursova L.V., Panina N.N., Grebeneva T.A., Kutergina I.Iu. *Epoxy Resins, Hardeners, Modifiers and Binding Agents Based on Them*. Saint Petersburg, Professija Publ., 2020, 576 p. (in Russian)
17. Ong H.R., Khan Md.M.R., Ramli R., Yunus R.M. Effect of CuO nanoparticle on mechanical and thermal properties of palm oil based alkyl/epoxy resin blend. *Procedia Chemistry*, 2015, vol. 16, pp. 623–631. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2015.12.101>
18. Bindal P., Shrivastava A. Study of thermal conductivity enhancement of epoxy with copper oxide(CuO). *International Journal for Research in Engineering Application & Management*, 2018, vol. 4, no. 8, pp. 81. <https://doi.org/10.18231/2454-9150.2018.1057>
19. Sukhorukov Yu.P., Gizhevskii B.A., Mostovshchikova E.V., Yermakov A.Ye., Tugushev S.N., Kozlov E.A. Nanocrystalline copper oxide for selective solar energy absorbers. *Technical Physics Letters*, 2006, vol. 32, no. 2, pp. 132–135. <https://doi.org/10.1134/s1063785006020131>
20. Sukhorukov Yu.P., Loshkareva N.N., Samokhvalov A.A., Moskvina A.S. Absorption spectra of CuO single crystals near the absorption edge and the nature of the optical gap in copper oxides. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1995, vol. 81, no. 5, pp. 998–1002.
21. Welegergs G.G., Akoba R., Sacky J., Nuru Z.Y. Structural and optical properties of copper oxide (CuO) nanocoatings as selective solar absorber. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 36, no. 2, pp. 509–513. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.298>
22. Al-Masoodi A.H.H., Abdulghafoor O.B., Alani I.A.M., Ahmed M.H.M., Al Masoodi Ab.H.H., Harun S.W. Passively Q-switched pulses from ytterbium-doped fiber laser (YDFL) using copper oxide (CuO) nanoparticles as a saturable absorber. *Optical Materials Express*, 2020, vol. 10, no. 11, pp. 2896–2908. <https://doi.org/10.1364/OME.403713>
23. Eerin K.V. Determination of the complex refractive index of nanoparticulate magnetite from optical anisotropy data for magnetic colloids. *Inorganic Materials*, 2022, vol. 58, no. 4, pp. 403–413. <https://doi.org/10.1134/s0020168522040045>
24. Wang X., Wang Y.G., Mao D., Li L., Chen Z.D. Passively Q-switched Nd:YVO₄ laser based on Fe₃O₄ nanoparticles saturable absorber. *Optical Materials Express*, 2017, vol. 7, no. 8, pp. 2913–2921. <https://doi.org/10.1364/OME.7.002913>
25. Chen G., Yang Y., Tian M., Li C., Huang Y., Lv M. Passively Q-switched mode-locked ytterbium-doped fiber laser based on an Fe₃O₄-nanoparticle saturable absorber. *Optical Materials Express*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 588–596. <https://doi.org/10.1364/OME.383188>
26. González M.G., Cabanelas J.C., Baselga J. Applications of FTIR on epoxy resins — identification, monitoring the curing process, phase separation and water uptake. *Infrared Spectroscopy — Materials Science, Engineering and Technology*. InTech, 2012, pp. 261–284. <https://doi.org/10.5772/36323>
27. Rudakov O.B., Khorokhordina E.A., Glazkov S.S., Khorokhordin A.M., Gubin A.S. Control of the epoxy resin curing process according to the free bisphenol A content by TLC. *Analytics and Control*, 2017, vol. 21, no. 2, pp. 135–143. (in Russian). <https://doi.org/10.15826/analitika.2017.21.2.004>
28. Wu Z., Chen J., Li Q., Xia D.-H., Deng Y., Zhang Y., Qin Z. Preparation and thermal conductivity of epoxy resin/graphene-Fe₃O₄ composites. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 8, pp. 2013. <https://doi.org/10.3390/ma14082013>
29. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*. Cambridge University Press, 1959.

Авторы

Евстропьев Сергей Константинович — доктор химических наук, начальник отдела, АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, [sc 6507317768](https://orcid.org/0000-0002-0160-8443), [https://orcid.org/0000-0002-0160-8443, evstropiev@bk.ru](mailto:evstropiev@bk.ru)

Вольнкин Валерий Михайлович — кандидат химических наук, старший научный сотрудник, АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, [sc 6601999426](https://orcid.org/0000-0002-6325-1507), [https://orcid.org/0000-0002-6325-1507, vvolyнкиn@yandex.ru](mailto:vvolyнкиn@yandex.ru)

Булыга Дмитрий Владимирович — младший научный сотрудник, АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, [sc 57217158694](https://orcid.org/0000-0001-8861-2527), [https://orcid.org/0000-0001-8861-2527, dmbulyga@yandex.ru](https://orcid.org/0000-0001-8861-2527)

Authors

Sergey K. Evstropiev — D.Sc. (Chemistry), Head of Department, JSC “Research and Production Corporation S.I. Vavilova”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, [sc 6507317768](https://orcid.org/0000-0002-0160-8443), [https://orcid.org/0000-0002-0160-8443, evstropiev@bk.ru](mailto:evstropiev@bk.ru)

Valery M. Volynkin — PhD (Chemistry), Senior Researcher, JSC “Research and Production Corporation S.I. Vavilova”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, [sc 6601999426](https://orcid.org/0000-0002-6325-1507), [https://orcid.org/0000-0002-6325-1507, vvolyнкиn@yandex.ru](mailto:vvolyнкиn@yandex.ru)

Dmitry V. Bulyga — Junior Researcher, JSC “Research and Production Corporation S.I. Vavilova”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, [sc 57217158694](https://orcid.org/0000-0001-8861-2527), [https://orcid.org/0000-0001-8861-2527, dmbulyga@yandex.ru](https://orcid.org/0000-0001-8861-2527)

Островский Вячеслав Александрович — начальник лаборатории, АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Троицк, 108840, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0000-9114-2116>, ostrovskiy@triniti.ru

Макаров Константин Николаевич — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Троицк, 108840, Российская Федерация, [sc 7006042620](https://orcid.org/0009-0004-3280-3489), <https://orcid.org/0009-0004-3280-3489>, makarov@triniti.ru

Дукельский Константин Владимирович — доктор технических наук, заместитель генерального директора, АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, [sc 6602633236](https://orcid.org/0000-0002-1627-7499), <https://orcid.org/0000-0002-1627-7499>, kdukel@mail.ru

Полищук Григорий Сергеевич — кандидат технических наук, временный генеральный директор, АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, [sc 25926044900](https://orcid.org/0009-0005-9358-6040), <https://orcid.org/0009-0005-9358-6040>, g.polishchuk@optrotech.ru

Vyacheslav A. Ostrovskii — Head of Laboratory, AO “GNTs RF TRINITI”, Troitsk, 108840, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0000-9114-2116>, ostrovskiy@triniti.ru

Konstantin N. Makarov — PhD (Physics & Mathematics), Leading Researcher, AO “GNTs RF TRINITI”, Troitsk, 108840, Russian Federation, [sc 7006042620](https://orcid.org/0009-0004-3280-3489), <https://orcid.org/0009-0004-3280-3489>, makarov@triniti.ru

Konstantin V. Dukelskii — D.Sc., Deputy General Director, JSC “Research and Production Corporation S.I. Vavilova”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, [sc 6602633236](https://orcid.org/0000-0002-1627-7499), <https://orcid.org/0000-0002-1627-7499>, kdukel@mail.ru

Grigoriy S. Polishchuk — PhD, Acting General Director, JSC “Research and Production Corporation S.I. Vavilova”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, [sc 25926044900](https://orcid.org/0009-0005-9358-6040), <https://orcid.org/0009-0005-9358-6040>, g.polishchuk@optrotech.ru

*Статья поступила в редакцию 16.05.2024
Одобрена после рецензирования 04.06.2024
Принята к печати 18.07.2024*

*Received 16.05.2024
Approved after reviewing 04.06.2024
Accepted 18.07.2024*



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»