

ИЗБРАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ XXXII ШКОЛЫ ПО ГОЛОГРАФИИ. ЧАСТЬ IV PROCEEDINGS OF THE XXXII SCHOOL ON HOLOGRAPHY. PART IV

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-2-211-217

УДК 535.421: 778.38

Полимерная композиция с фенантренхином для записи рельефных голографических решеток Владимир Васильевич Могильный¹, Эдгар Арменович Храмцов²✉, Алексей Петрович Шкадаревич³

^{1,2} Белорусский государственный университет, Минск, 220030, Республика Беларусь

^{2,3} Научно-производственное унитарное предприятие «Научно-технический центр «ЛЭМТ» БелОМО», Минск, 220114, Республика Беларусь

¹ mogilny@bsu.by, <https://orcid.org/0000-0002-4864-2016>

² hramtsovea@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-5384-3867>

³ shkad@lemt.by, <https://orcid.org/0000-0002-7248-7706>

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрено образование периодических рельефов толщины слоев фоточувствительного полимера после записи в них голографических решеток и стимулирования деформаций материала обратимой пластификацией в нерастворяющей жидкости. **Метод.** Исследование выполнено для композиции сополимер с боковыми антраценовыми группами — фенантренхинон. Фенантренхинон передает энергию электронного возбуждения молекулам кислорода, поступающим через открытую поверхность полимерного слоя, которые затем вызывают окисление антраценовых фрагментов. Голографические решетки с периодом 2–5 мкм записаны с помощью лазерного излучения с длиной волны 532 нм в слоях толщиной около 1 мкм. Фоторельефы сформированы в процессе последующего набухания полимерного слоя в среде углеводородного проявителя. **Основные результаты.** По спектрам электронного поглощения исследовано фотосенсибилизированное окисление антраценовых групп нового полимера под действием оптического излучения в спектральном диапазоне 408–532 нм. Показано, что приближение длины волны возбуждения к максимуму длинноволнового поглощения фенантренхинона (410 нм) позволяет увеличить чувствительность слоя материала в 15 раз по сравнению со слоями с метиленовым синим в качестве фотосенсибилизатора. Экспериментально установлено, что амплитуда слабых периодических рельефов деформационной природы (высота менее 0,01 мкм), возникающих непосредственно после записи голографических решеток, в процессе обработки слоя жидким углеводородом многократно увеличивается. Ее максимальная величина достигает 25 % толщины регистрирующего слоя. Предположительно, деформация неоднородно облученного слоя стимулируется переводом полимерного материала в высокоэластичное состояние при его набухании. Фоторельефы стабильны после высушивания. Их прочность может быть увеличена фотосшиванием материала в результате фотодимеризации остаточных антраценовых групп при однородном облучении светом с длиной волны 365 нм. Несинусоидальность фоторельефа снижает достижимую при полном отражении дифракционную эффективность до значений менее 0,20. **Практическая значимость.** Исследованная полимерная композиция может быть использована для формирования рельефно-фазовых дифракционных оптических элементов излучением в сине-зеленой области спектра, обеспеченной рядом мощных лазерных источников.

Ключевые слова

сенсибилизированное фотоокисление, фенантренхинон, антрацен, полимерный фотоматериал, рельефная голографическая дифракционная решетка

Ссылка для цитирования: Могильный В.В., Храмцов Э.А., Шкадаревич А.П. Полимерная композиция с фенантренхином для записи рельефных голографических решеток // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 2. С. 211–217. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-2-211-217

Polymer composition with phenanthrenequinone for recording relief holographic gratings

Uladzimir V. Mahilny¹, Edhar A. Khramtsou^{2✉}, Alexei P. Shkadarevich³

^{1,2} Belarusian State University, Minsk, 220030, Republic of Belarus

^{2,3} Scientific-Production Unitary Enterprise “Scientific and Technical center “LEMT” BelOMO”, Minsk, 220114, Republic of Belarus

¹ mogilny@bsu.by, <https://orcid.org/0000-0002-4864-2016>

² hramtsova@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-5384-3867>

³ shkad@lemt.by, <https://orcid.org/0000-0002-7248-7706>

Abstract

The formation of periodic reliefs of the thickness of photosensitive polymer layers after recording holographic gratings in them and stimulating material deformations by reversible plasticization in a non-solvent liquid is considered. The phenomenon was studied for the composition of a copolymer with side anthracene groups — phenanthrenequinone. Phenanthrenequinone transfers the energy of electronic excitation to oxygen molecules entering through the open surface of the polymer layer which then cause the oxidation of anthracene fragments. Holographic gratings with a period of 2–5 μm were recorded by laser radiation at a wavelength of 532 nm in layers about 1 μm thick. The photoreliefs were formed during the subsequent swelling of the layer in the medium of a hydrocarbon developer. The photosensitized oxidation of the anthracene groups of the new polymer under the action of optical radiation in the spectral range 408–532 nm was studied using the electron absorption spectra. It is shown that approaching the excitation wavelength to the long-wavelength absorption maximum of phenanthrenequinone (410 nm) makes it possible to increase the sensitivity of the material layer by a factor of 15 compared to layers with methylene blue as a photosensitizer. It has been experimentally established that the amplitude of weak periodic reliefs of a deformation nature (height less than 0.01 μm), which appear immediately after the recording of holographic gratings, increases many times during the treatment of the layer with liquid hydrocarbon. Their maximum value reaches 25 % of the thickness of the recording layer. Presumably, the deformation of the inhomogeneously irradiated layer is stimulated by the transfer of the polymer material into a highly elastic state during its swelling. Photoreliefs are stable after drying. Their strength can be increased by photocrosslinking the material as a result of photodimerization of residual anthracene groups under uniform irradiation with light at a wavelength of 365 nm. The non-sinusoidality of the photorelief reduces the diffraction efficiency achievable with total reflection to values less than 0.20. The studied polymer composition can be used to form relief-phase diffractive optical elements by radiation in the blue-green region of the spectrum, provided by a number of high-power laser sources.

Keywords

sensitized photooxidation, phenanthrenequinone, anthracene, polymeric photographic material, relief holographic diffraction grating

For citation: Mahilny U.V., Khramtsou E.A., Shkadarevich A.P. Polymer composition with phenanthrenequinone for recording relief holographic gratings. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 2, pp. 211–217 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-2-211-217

Введение

Фотоиндуцированные деформации известного с 1970-х годов объемного голографического материала реоксан [1–4], были сведены к минимуму применением полимерной матрицы — полиметилметакрилата. Полимерная основа рассматриваемого в настоящей работе антраценсодержащего материала [5, 6] гораздо более пластична. По сравнению с аналогами, это приводит к образованию на поверхности достаточно толстых (около 10 мкм) слоев терморелаксационных фоторельефов, как при фотоокислении, так и при фотодимеризации боковых антраценовых групп макромолекул. Высота фоторельефа невелика и составляет десятые доли процента толщины слоя [6, 7]. Результаты терморелаксации в полимерной среде существенно зависят от ее пластичности, т. е. от близости температуры процесса к температуре стеклования материала, что объясняется возникновением сдвиговых напряжений при рельефообразовании. Уменьшение напряжений в материале с достаточно низкой температурой стеклования или при замедлении процесса рельефообразования позволяет увеличить амплитуду фоторельефа для более высоких пространственных частот, т. е. увеличить разрешающую способность [8]. Если причина рельефо-

образования — низкомолекулярные фотопродукты с увеличившимся в результате фотопревращения молекулярным объемом, повышение пластичности среды облегчает их диффузию [9], т. е. запускает процесс диффузионной деградации фоторельефа. Последняя быстро ускоряется с ростом пространственной частоты и не позволяет существенно увеличить разрешение при терморелаксации фотоиндуцированных напряжений в пластичном полимерном материале [8].

Диффузионная деградация формирующегося фоторельефа устраняется, если фоточувствительные молекулярные структуры и их фотопродукты присоединены к макромолекулам, например, в виде боковых групп, как в случае исследуемого антраценсодержащего полимера. Тем не менее, терморелаксационные фоторельефы на поверхности его слоев не достигают существенной амплитуды. Росту амплитуды препятствуют высокие значения пороговых напряжений вынужденной пластичности [10], благодаря которой возникает деформация. На основе такого предположения для повышения эффективности рельефообразования в настоящей работе использована обратимая пластификация тонких (около 1 мкм) слоев после записи голографических решеток путем набухания материала в жидкой нерастворяющей среде и последующего высушивания. Первоначально

такой способ был применен для усиления рельефных голографических решеток в слоях фотосшиваемых полимеров с боковой бензальдегидной группой [11, 12]. Эффект усиления решеток получен также для композиции на основе антраценсодержащего сополимера [13]. Лазерное излучение с длиной волны 633 нм поглощалось молекулами фотосенсибилизатора (метиленовый синий), который генерировал синглетный кислород, окисляющий антраценовые группы макромолекул. Амплитуда возникавшего после набухания в углеводородной среде фоторельефа составила 15–20 % толщины слоя. Из-за недостаточно хорошей совместимости с полимером содержание фотосенсибилизатора составляло не более 0,1 мас.%, что ограничило фоточувствительность и затруднило запись голографических структур значительной площади.

С целью поиска путей повышения фоточувствительности полимерной композиции на основе антраценсодержащего полимера, а также для смещения области чувствительности в сине-зеленый спектральный диапазон, в котором излучают многие лазеры, используемые в голографии, выполнено исследование формирования голографических рельефов. В качестве фотосенсибилизатора применен фенантренхинон, который известен как фоточувствительный компонент объемных голографических материалов с диффузионным усилением. Первоначально он использовался в качестве фотосенсибилизатора синглетного кислорода в составе объемного голографического материала реоксан [14]. Отметим, что фотопродукты фенантренхинона инициируют деформацию расширения полимерной матрицы [15], как и продукты фотоокисления боковых антраценовых групп рассматриваемого сополимера [6]. Существенная особенность реоксана заключается в возможности изменения диапазона его чувствительности в пределах всей видимой области спектра путем выбора соответствующего фотосенсибилизатора. Настоящая работа является развитием такого способа формирования спектральной области чувствительности применительно к рельефообразующим голографическим материалам.

Материалы и методы

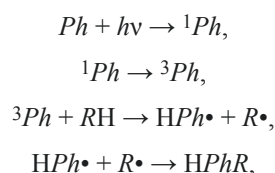
Полимерная основа материала представляет собой сополимер, включающий звенья с боковыми фрагментами в виде монозамещенного антрацена и фотонейтральные звенья. В результате выполненной оценки температуры стеклования материала получена величина 338 К, что примерно на 40 К ниже, чем у полиметилметакрилата — основы реоксана [6]. Приближение температуры стеклования исследуемого материала к комнатной температуре, при которой происходит фотоокисление, обеспечивает более интенсивную диффузию атмосферного кислорода через поверхность слоя.

Слои композиции фенантренхинон — антраценсодержащий полимер толщиной около 1 мкм нанесены на стеклянные подложки центрифугированием раствора компонентов.

Фенантренхинон отличается от ранее применявшегося метиленового синего более эффективными

фотопревращениями. На рис. 1 приведен спектр электронного поглощения слоя полиметилметакрилата, содержащего 6 мас.% фенантренхинона, на кварцевой подложке (кривая 1). В пределах 380–480 нм в спектре проявляется полоса средней интенсивности природы $\pi\pi^*$ -типа. Для длины волны более 480 нм оптическое поглощение определяется низкоинтенсивной полосой $n\pi^*$ -типа. Под действием излучения в пределах этого спектрального диапазона поглощение деградирует, и в области ниже 370 нм появляются полосы фотопродуктов (кривая 2).

Наблюдаемое изменение спектров соответствует схеме основной фотореакции — фотодегидрирования триплетно-возбужденным фенантренхиноном полимерной матрицы и образования присоединенных к макромолекуле фотопродуктов со структурой замещенного фенантрена согласно схеме:



где Ph — фенантренхинон; $h\nu$ — квант поглощаемого света; 1Ph и 3Ph — фенантренхинон в синглетном и триплетном возбужденных состояниях; RH — макромолекула — донор водорода; $HPh\cdot$ — семихиноновый радикал; $R\cdot$ — макрорадикал; $HPhR$ — макромолекула с присоединенным к ней фотопродуктом фенантренхинона.

За фотопревращениями антраценовых групп следили по убыванию интенсивности длинноволновой полосы поглощения образцов ($\lambda_{\max}$ около 368 нм), регистрируемой спектрофотометром «Specord M40». Фотопревращение материала проводили излучением лазеров $\lambda = 408$ и 532 нм и светодиода $\lambda_{\max} = 465$ нм.

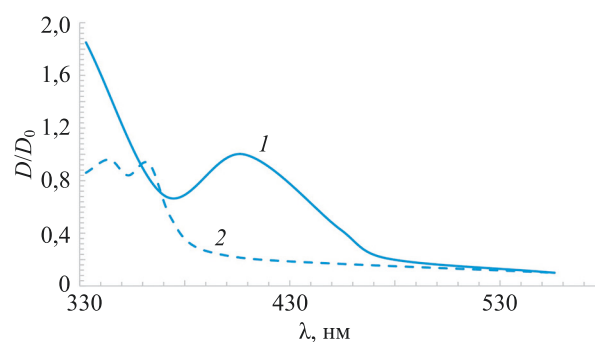


Рис. 1. Спектры поглощения полимерного слоя с фенантренхиноном до (кривая 1) и после (кривая 2) лазерного облучения на длине волны $\lambda = 532$ нм.

D — текущая оптическая плотность; D_0 — оптическая плотность в максимуме длинноволнового поглощения

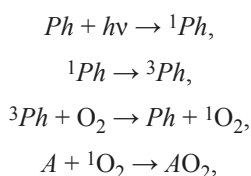
Fig. 1. Absorption spectra of the polymer layer with phenanthrenequinone before (curve 1) and after (curve 2) laser irradiation at a wavelength of $\lambda = 532$ nm

D is the current optical density, D_0 is the optical density at the long-wavelength absorption maximum

Голографические решетки с периодом $d = 2\text{--}5$ мкм записывали по симметричной схеме лазерным излучением $\lambda = 532$ нм. Наблюдения фоторельефов выполняли с помощью микроинтерферометра МИИ-4.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены спектры электронного поглощения фоточувствительного слоя в процессе воздействия лазерного излучения с $\lambda = 532$ нм. В исходном спектре видна полоса антраценовых звеньев (340–415 нм) и длинноволновое поглощение фенантренина (более 415 нм). Воздействие облучения привело к их деградации, отражающей фотопревращения поглощающих центров обоих типов. Поскольку длина волны возбуждающего света лежит далеко за пределами области поглощения антраценовых звеньев, а электронно-возбужденные молекулы фенантренина не взаимодействуют с ними, то фотоокисление — наиболее вероятная причина расходования антраценовых структур. Механизм оптической записи в этом случае основан на сенсibilизированном фотоокислении и подобен описанному в работе [6]. В данном случае процесс развивается по следующей схеме:



где A — антраценовая группа; AO_2 — ее пероксид; 1O_2 — синглетный кислород.

Подобный вывод подтверждается и максимальной величиной изменения показателя преломления $\Delta n = 0,02$, измеренной экспериментально и соответствующей аналогичному параметру из работы [6].

При небольшой толщине слоя диффузия атмосферного кислорода через поверхность слоя достаточно

эффективна, чтобы восполнить снижение его концентрации при фотоокислении. Этому способствует и невысокая скорость возбуждения фенантренина на используемой длине волны света. Из рис. 2 следует, что коэффициент поглощения фенантренина для $\lambda = 532$ нм многократно ниже, чем в максимуме (около 410 нм). Следовательно, скорость поглощения света может быть увеличена в соответствующее число раз, если для возбуждения фотореакции использовать излучение с длиной волны более близкой к максимуму поглощения фенантренина. При высокой скорости образования триплетно-возбужденного фенантренина возможно проявление дефицита кислорода в слое при экспонировании.

На рис. 3 приведены зависимости относительной оптической плотности в максимуме длинноволновой полосы антраценовых групп от экспозиционной дозы при экспонировании слоев композиции излучением различной длины волны. Они показывают, что в целом уменьшение длины волны ведет к росту скорости фотореакции, однако, это приращение явно многократно ниже увеличения коэффициента поглощения. Если при переходе от $\lambda = 532$ нм к $\lambda = 465$ нм происходит существенный рост скорости фотоокисления, то дальнейшее увеличение длины волны (408 нм) приводит к увеличению скорости примерно на 20 %, при этом скорость поглощения света возрастает минимум в три раза.

Слабое влияние увеличивающейся скорости поглощения на фотоокисление возможно связано с дефицитом кислорода из-за его быстрого расходования. Это подтверждено ростом эффективности фотопревращения под действием излучения с $\lambda = 408$ нм вблизи максимума поглощения фенантренина (рис. 3, кривые 3, 4) при уменьшении интенсивности. Фоточувствительность по фотопревращению антраценовых групп на 50 % $S_{0,5} = H_{0,5}^{-1}$, где $H_{0,5}$ — соответствующая экспозиционная доза составила: 0,08 см²/Дж для $\lambda = 532$ нм; 0,83 и 1,49 см²/Дж для $\lambda = 408$ нм при

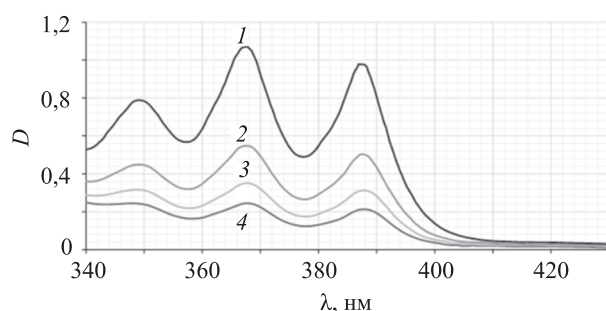


Рис. 2. Спектры поглощения пленки антраценсодержащего полимера с 6 мас.% фенантренина до (кривая 1) и после воздействия лазерного излучения с $\lambda = 532$ нм (кривые 2–4). Экспозиционная доза, Дж/см²: 11,5 (кривая 2); 26,8 (кривая 3); 49,7 (кривая 4)

Fig. 2. Absorption spectra of an anthracene-containing polymer film with 6 wt.% phenanthrenequinone before (1) and after exposure to laser radiation with $\lambda = 532$ nm (2–4). Exposure dose 11.5 (2), 26.8 (3), 49.7 J/cm² (4)

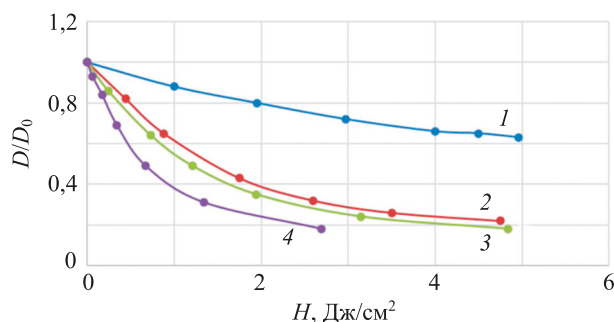


Рис. 3. Зависимости относительной интенсивности длинноволновой полосы антраценовых групп от экспозиционной дозы в процессе экспонирования излучением с длинами волн и освещенностями: 532 нм при 25,5 мВт/см² (кривая 1); 465 нм при 24,2 мВт/см² (кривая 2); 408 нм при 24,2 мВт/см² (кривая 3) и 1,4 мВт/см² (кривая 4)

Fig. 3. Dependences of the relative intensity of the long-wavelength band of anthracene groups on the exposure dose during exposure to radiation: $\lambda = 532$ nm at illumination 25.5 mW/cm² (1); 465 nm at illumination 24.2 mW/cm² (2); 408 nm at illumination 24.2 mW/cm² (3) and 1.4 mW/cm² (4)

интенсивностях 24,2 и 1,4 мВт/см² соответственно. Выполнена оценка по данным работы [3] для $\lambda = 633$ нм (фотосенсибилизатор метиленовый синий) и получено значение фоточувствительности $S_{0,5} \approx 0,09$ см²/Дж, которое приблизительно в 15 раз меньше чувствительности для $\lambda = 408$ нм при низкой интенсивности излучения.

Через несколько минут после записи голографической решетки на ее поверхности появлялась слабая дифракция зондирующего лазерного пучка $\lambda = 633$ нм, что предположительно связано с образованием терморелаксационного фоторельефа. Отметим, что наличие поверхностного рельефа с помощью МИИ-4 не зафиксировано. В процессе обработки слоя с решеткой углеводородным проявителем происходило набухание полимерного материала, появлялся рельеф (рис. 4), амплитуда L рельефа увеличивалась. На рис. 5 представ-

лена зависимость усредненной амплитуды фоторельефа L от времени проявления.

Процесс проявления фоторельефа для композиции с фенантренхином значительно более длителен по сравнению с ранее исследованными слоями, в которых фотосенсибилизатором служил краситель метиленовый синий [13], в то же время можно отметить большую амплитуду фоторельефа, которая равна 0,24 мкм. Более длительное проявление может быть связано с фотоприсоединением продуктов фотовосстановления фенантренхинона к макромолекулам. Появляющиеся в результате дополнительные боковые группы со значительным молекулярным объемом могут замедлять движение сегментов макромолекул при релаксации фотоиндуцированных механических напряжений в процессе проявления. Образованию фоторельефа большей амплитуды может способствовать вклад в расширение материала фотопродуктов фенантренхинона, а также удаление при проявлении непрореагировавшего фенантренхинона преимущественно из областей, минимально освещенных при экспонировании. Удаление непрореагировавшего фенантренхинона было установлено экспериментально по его спектрам поглощения.

Измеренная дифракционная эффективность при отражении лазерного излучения от поверхности описанных решеток составила 15–20 % в расчете на интенсивность отраженного пучка. Эта величина согласуется с результатами расчета дифракционной эффективности голографической рельефной решетки с идеально отражающей поверхностью [16]. При высоте синусоидального рельефа 0,24 мкм расчетная дифракционная эффективность около 25 %. Более низкие экспериментальные значения, связанные с несинусоидальностью фоторельефа (рис. 4) и несовершенством его поверхности.

Выполнено тестирование возможности фотодимеризации остаточных антраценовых групп в сформированных голографических решетках с целью фотосшивания материала и упрочнения решеточной структуры. Показано, что даже полное фотопревращение антраценовых звеньев под действием ультрафиолетового излучения $\lambda = 365$ нм не приводит к деградации рельефных решеток.

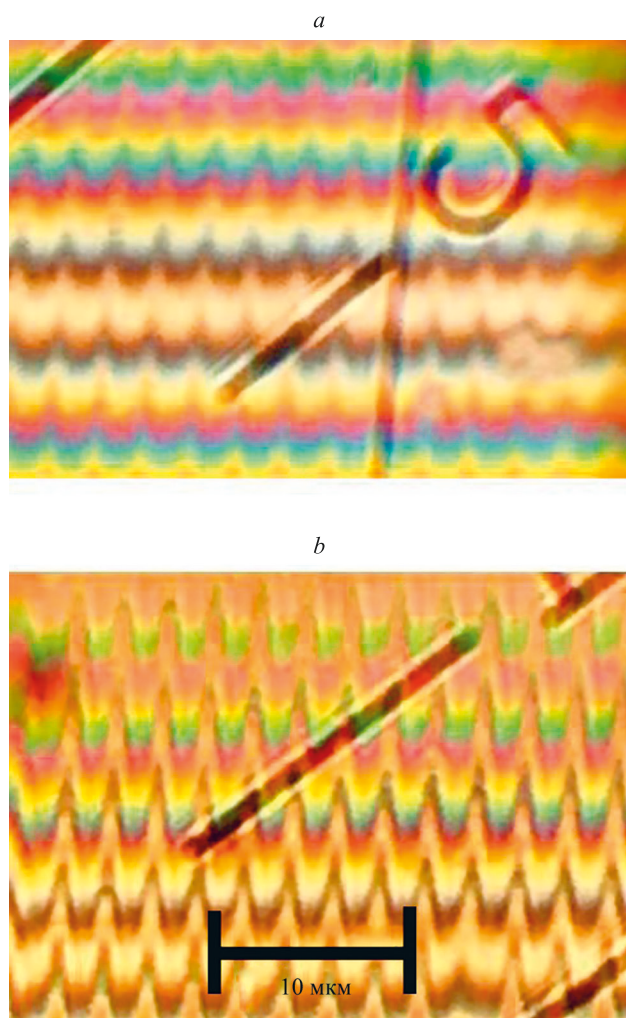


Рис. 4. Увеличение амплитуды поверхностного фоторельефа при проявлении в течение 20 мин (а) и 75 мин (б). Содержание фенантренхинона в материале 6 мас.%, длина волны записывающего излучения 532 нм, период решетки $d = 4,5$ мкм

Fig. 4. An increase in the amplitude of the surface photorelief during development for 20 (a) and 75 min (b). The content of phenanthrenquinone in the material is 6 wt.%, the wavelength of the recording radiation is 532 nm, the grating period $d = 4.5$ μm

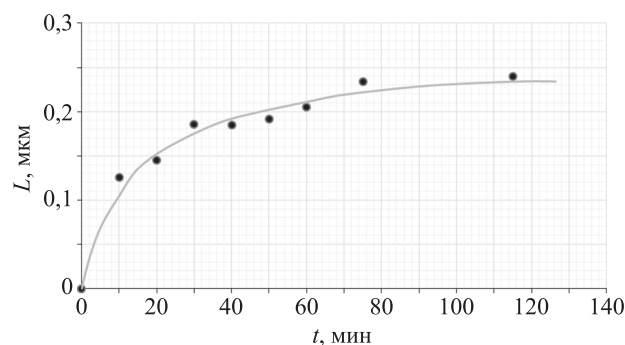


Рис. 5. Зависимость амплитуды фоторельефа от времени проявления

Fig. 5. Dependence of the amplitude of the photorelief vs. the time of development

Заключение

Фотосенсибилизированное окисление нового антраценсодержащего полимера атмосферным кислородом в тонких слоях эффективно осуществлено в присутствии фенантренина. Смещение длины волны возбуждения к максимуму длинноволнового поглощения фенантренина (около 410 нм) позволяет увеличить чувствительность материала в слое толщиной около 1 мкм в 15 раз по сравнению со слоями с метиленовым синим

в качестве фотосенсибилизатора. Поверхностные фоторельефы получены после записи голографических решеток лазерным излучением в пределах длинноволнового поглощения фенантренина в процессе обработки жидким углеводородом. Их максимальная амплитуда составила около 25 % толщины регистрирующего слоя. Несовершенство поверхности и несинусоидальность фоторельефа снижают дифракционную эффективность, достижимую при 100 % отражении света, до значений менее 0,20.

Литература

References

1. Суханов В.И., Лашков Г.И., Петников А.Е., Ащеулов Ю.В., Резникова И.И., Черкасов А.С. Запись фазовых голограмм на органическом полимерном материале с дисперсией, изменяющейся вследствие триплет-сенсibilизированных процессов // Оптическая голография: сборник статей / под ред. Ю.Н. Денисюка. Л.: Наука, 1979. С. 24–42.
2. Суханов В.И. Фазовые голограммы в регистрирующих средах с дисперсионной рефракцией // Успехи физических наук. 1986. Т. 148. № 3. С. 541–542.
3. Лашков Г.И. Перенос энергии с участием триплетных состояний в фазовой регистрации света // Успехи физических наук. 1986. Т. 148. № 3. С. 539–541.
4. Суханов В.И., Вениаминов А.В., Рыскин А.И., Никоноров Н.В. Разработки ГОИ в области объемных регистрирующих сред для голографии // Сборник трудов Всероссийского семинара «Юрий Николаевич Денисюк-основоположник отечественной голографии». СПб.: ГУ ИТМО, 2007. С. 262–276.
5. Могильный В.В., Станкевич А.И., Храмов Э.А. Полимерный материал для прямой записи фазовых объемных голограмм в «красной» области спектра // Сборник научных трудов IX Международной конференции по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2020. С. 651–652.
6. Могильный В.В., Станкевич А.И., Храмов Э.А., Шкадаревич А.П. Объемный голографический материал для красной области спектра на основе полимера с боковыми антраценовыми группами // Журнал прикладной спектроскопии. 2021. Т. 88. № 1. С. 159–165.
7. Могильный В.В., Станкевич А.И., Храмов Э.А., Шкадаревич А.П. Фоторефрактивный и рельефообразующий голографический материал // Сборник научных трудов XI Международной конференции по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2022. С. 629–630.
8. Могильный В.В., Грицай Ю.В., Ковалев С.В. Периодические поверхностные фоторельефы в стеклообразных и высокоэластичных полимерах // Журнал технической физики. 1999. Т. 69. № 8. С. 79–83.
9. Вениаминов А.В., Лашков Г.И., Ратнер О.Б., Шелехов Н.С., Бандюк О.В. Голографическая релаксометрия как метод исследования диффузионных процессов в полимерных регистрирующих средах // Оптика и спектроскопия. 1986. Т. 60. № 1. С. 142–147.
10. Ферри Д. Вязкоупругие свойства полимеров. М.: Издательство иностранной литературы, 1963. 535 с.
11. Mahilny U.V., Trofimova A.V. A new mechanism of stable optical birefringence recording under polarized UV radiation in photocrosslinking polymeric materials // Journal of Optics. 2011. V. 13. N 10. P. 105601. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/13/10/105601>
12. Могильный В.В., Станкевич А.И. Усиление голографических рельефных решеток, записанных в слоях фотосшиваемых полимеров // Сборник научных трудов VIII Международной конференции по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. С. 273–274.
13. Могильный В.В., Станкевич А.И., Храмов Э.А., Шкадаревич А.П. Фотоокисление антраценсодержащих полимеров атмосферным кислородом для объемно-фазовой и рельефо-фазовой голографической записи // Материалы 14-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом». Мн.: БГУ, 2021. С. 325–329.
14. Sukhanov V.I., Lashkov G.I., Petnikov A.E., Ashcheulov Yu.V., Reznikova I.I., Cherkasov A.S. Recording of phase holograms on an organic polymeric material with a dispersion that changes due to triplet-sensitized processes. *Optical Holography. Collected Papers*. Ed. by Yu.N. Denisjuk. Leningrad, Nauka, 1979, pp. 21–42. (in Russian)
15. Sukhanov V.I. Phase holograms in recording media with dispersive refraction. *Soviet Physics Uspekhi*, 1986, vol. 29, no. 3, pp. 289–290. <https://doi.org/10.1070/pu1986v029n03abeh003214>
16. Lashkov G.I. Energy transport involving triplet states in phase recording of light. *Soviet Physics Uspekhi*, 1986, vol. 29, no. 3, pp. 288–289. <https://doi.org/10.1070/pu1986v029n03abeh003207>
17. Sukhanov V.I., Veniaminov A.V., Ryskin A.I., Nikonorov N.V. JSC SOI developments in the field of volumetric recording media for holography. *Proc. of the All-Russian Seminar "Yuri Nikolaevich Denisjuk — the founder of domestic holography"*. St. Petersburg, ITMO, 2007, pp. 262–276. (in Russian)
18. Mahilny U.V., Stankevich A.I., Khramtsov E.A. Polymeric material for direct recording of phase volume holograms in "red" spectral range. *Collection of research papers of the IX International Conference Photonics and Information Optics*. Moscow, NRNU MEPhI, 2020, pp. 651–652. (in Russian)
19. Mahilny U.V., Stankevich A.I., Khramtsov E.A., Shkadarevich A.P. Volume holographic material for red spectral range based on polymer with anthracene side groups. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2021, vol. 88, no. 1, pp. 146–152. <https://doi.org/10.1007/s10812-021-01153-z>
20. Mahilny U.V., Stankevich A.I., Khramtsov E.A., Shkadarevich A.P. Photorefractive and relief-forming holographic material. *Collection of research papers of the XI International Conference Photonics and Information Optics*. Moscow, NRNU MEPhI, 2022, pp. 629–630. (in Russian)
21. Mogil'nyi V.V., Gritsai Yu.V., Kovalev S.V. Periodic surface photoreliefs in glassy and hyperelastic polymers. *Technical Physics*, 1999, vol. 44, no. 8, pp. 941–944. <https://doi.org/10.1134/1.1259410>
22. Veniaminov A.V., Lashkov G.I., Ratner O.B., Shelekhov N.S., Bandyuk O.V. Holographic relaxometry as a method of studying diffusion processes in polymer recording media. *Optics and Spectroscopy*, 1986, vol. 60, no. 1, pp. 87–91.
23. Ferry J.D. *Viscoelastic Properties of Polymers*. New York — London, 1961.
24. Mahilny U.V., Trofimova A.V. A new mechanism of stable optical birefringence recording under polarized UV radiation in photocrosslinking polymeric materials. *Journal of Optics*, 2011, vol. 13, no. 10, pp. 105601. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/13/10/105601>
25. Mahilny U.V., Stankevich A.I. Intensification of holographic relief gratings recorded in layers of photo-crosslinking polymers. *Collection of research papers of the VIII International Conference Photonics and Information Optics*. Moscow, NRNU MEPhI, 2019, pp. 273–274. (in Russian)
26. Mahilny U.V., Stankevich A.I., Khramtsov E.A., Shkadarevich A.P. Photooxidation of anthracene-containing polymers with atmospheric oxygen for volume-phase and relief-phase holographic recording. *Proc. of the 14th International Conference "Interaction of Radiation with Solids"*, Minsk, BSU, 2021, pp. 325–329. (in Russian)
27. Veniaminov A.V., Mahilny U.V. Holographic polymer materials with diffusion development: Principles, arrangement, investigation, and

14. Вениаминов А.В., Могильный В.В. Голографические полимерные материалы с диффузионным проявлением: принципы, компоновка, исследования и применения // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 115. № 6. С. 143–167. <https://doi.org/10.7868/S0030403413120209>
15. Mahilny U.V., Marmysh D.N., Tolstik A.L., Matusevich V., Kowarschik R. Phase hologram formation in highly concentrated phenanthrenequinone–PMMA media // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. 2008. V. 10. N 8. P. 085302. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/10/8/085302>
16. Настас А.М., Иову М.С. Исследование влияния глубины рельефа на дифракционную эффективность отражающей и пропускающей рельефно-фазовых дифракционных решеток // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 7. С. 133–134.
- applications. *Optics and Spectroscopy*, 2013, vol. 115, no. 6, pp. 906–930. <https://doi.org/10.1134/S0030400X13120199>
15. Mahilny U.V., Marmysh D.N., Tolstik A.L., Matusevich V., Kowarschik R. Phase hologram formation in highly concentrated phenanthrenequinone–PMMA media. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2008, vol. 10, no 8, pp. 085302. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/10/8/085302>
16. Nastas A.M., Iovu M.S. Analysis of the effect of relief depth on the diffraction efficiency of reflection and transmission phase-relief diffraction gratings. *Technical Physics*, 2015, vol. 60, no. 7, pp. 1077–1078. <https://doi.org/10.1134/s106378421507018x>

Авторы

Могильный Владимир Васильевич — доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Белорусский государственный университет, Минск, 220030, Республика Беларусь, [sc 6603923315](https://orcid.org/0000-0002-4864-2016), <https://orcid.org/0000-0002-4864-2016>, mogilny@bsu.by

Храмцов Эдгар Арменович — руководитель группы, Научно-производственное унитарное предприятие «Научно-технический центр «ЛЭМТ» БелОМО», Минск, 220114, Республика Беларусь; аспирант, Белорусский государственный университет, Минск, 220030, Республика Беларусь, [sc 57222551048](https://orcid.org/0000-0002-5384-3867), <https://orcid.org/0000-0002-5384-3867>, hramtsovea@gmail.com

Шкадаревич Алексей Петрович — доктор физико-математических наук, академик, директор, Научно-производственное унитарное предприятие «Научно-технический центр «ЛЭМТ» БелОМО», Минск, 220114, Республика Беларусь, [sc 6601958570](https://orcid.org/0000-0002-7248-7706), <https://orcid.org/0000-0002-7248-7706>, shkad@lemt.by

Authors

Uladzimir V. Mahilny — D.Sc. (Physics & Mathematics), Full Professor, Belarusian State University, Minsk, 220030, Republic of Belarus, [sc 6603923315](https://orcid.org/0000-0002-4864-2016), <https://orcid.org/0000-0002-4864-2016>, mogilny@bsu.by

Edhar A. Khramtsov — Head of Group, Scientific-Production Unitary Enterprise “Scientific and Technical center “LEMT” BelOMO”, Minsk, 220114, Republic of Belarus; PhD Student, Belarusian State University, Minsk, 220030, Republic of Belarus, [sc 57222551048](https://orcid.org/0000-0002-5384-3867), <https://orcid.org/0000-0002-5384-3867>, hramtsovea@gmail.com

Alexei P. Shkadarevich — D.Sc. (Physics & Mathematics), Academician, Director, Scientific-Production Unitary Enterprise “Scientific and Technical center “LEMT” BelOMO”, Minsk, 220114, Republic of Belarus, [sc 6601958570](https://orcid.org/0000-0002-7248-7706), <https://orcid.org/0000-0002-7248-7706>, shkad@lemt.by

Статья поступила в редакцию 01.09.2022
Одобрена после рецензирования 17.01.2023
Принята к печати 17.03.2023

Received 01.09.2022
Approved after reviewing 17.01.2023
Accepted 17.03.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»