

УДК 778.38

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЕСЦВЕЧИВАНИЯ НАНОКОМПОЗИТА «ДИФФЕН» ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

О. В. Андреева, С. А. Диденко, О. В. Бандюк, А. В. Обрезков

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет  
информационных технологий, механики и оптики,  
Санкт-Петербург, Россия

olga\_andreeva@mail.ru, didenkostas@yandex.ru

PACS 78.67.Sc

Проведено исследование процесса обесцвечивания образцов полимерного регистрирующего материала «Диффен», разработанного для целей объемной голографии. Основное внимание уделено определению зависимости пропускания образцов от времени обесцвечивания, для характеристики которой предложено использовать два основных параметра: характерное время обесцвечивания, определяющее длительность начальной, «быстрой» фазы процесса, и пропускание образца на длине волны обесцвечивания в стабильной фазе процесса. Продемонстрирована результативность такого подхода, позволяющего проводить сравнение результатов, полученных в различных условиях. Показано, что плотность мощности излучения (диапазон изменений  $0,2 \div 20$  мВт/см<sup>2</sup>) в интервале длин волн ( $405 \div 470$ ) нм независимо от длины волны и модификации образцов однозначно определяет характерное время обесцвечивания.

Полученные результаты могут быть использованы при выборе условий проведения процессов, связанных с обесцвечиванием образцов полимерных материалов с диффузионным усилением, содержащих фенантренхинон.

**Ключевые слова:** регистрирующая среда для объемной голографии, наноккомпозиты, фотообесцвечивание, светодиодные источники излучения.

### 1. Введение

Наноккомпозит «Диффен» относится к регистрирующим средам для объемной голографии, комплекс основных параметров которых включает высокую разрешающую способность — до нескольких тысяч линий на миллиметр. В связи с этим фотофизические и фотохимические процессы, протекающие при получении голограмм, имеют, как правило, наноразмерные масштабы, и их наблюдение и визуализация стандартными оптико-физическими методиками практически невозможна. Для изучения и характеристики процессов, протекающих в таких средах, необходимо применять методики, использующие сопоставление макропараметров, получаемых традиционными способами измерений, с величинами, которые характеризуют наноразмерные объекты и структуры.

Именно наличие установленных феноменологических закономерностей дает основание для верификации разрабатываемых и предлагаемых математических моделей и теоретических методов описания процессов, происходящих при синтезе образцов и получении голограмм в объемных регистрирующих средах — наноккомпозитах.

Изучение процесса обесцвечивания образцов материала «Диффен» находится в самом начале своего пути. Закономерности процесса обусловлены не только физическими

принципами, определяющими характер протекания процессов, но и условиями синтеза образцов и условиями проведения каждого этапа получения голограмм.

Результаты экспериментов, представленные в данной работе, и их анализ направлены на выявление основных закономерностей процесса обесцвечивания образцов материала, которые необходимы как для отработки режимов получения голограмм, так и для построения теоретических моделей записи и считывания информации в таких средах.

## 2. Объект исследования

«Диффен» является одной из модификаций полимерных светочувствительных сред на основе фенантренхинона, в которых реализован принцип диффузионного усиления [1–3]. Принципиальная схема получения голограмм на таких средах приведена на рис. 1а. Название «Диффен» (от слов ДИФфузионный и ФЕНантренхинон) позволяет выделить данный материал из ряда других модификаций полимерной среды с диффузионным усилением на основе фенантренхинона: разработчиками предложена технология получения материала, образцы которого имеют определенные голографические и физико-механические параметры, обусловленные режимом синтеза образцов и режимом получения голограмм [1,4,5].

Образцы материала «Диффен» (как и ряд других материалов данной группы) представляют собой твердый раствор фенантренхинона (ФХ) в полиметилметакрилате (ПММА) (рис. 1а, позиция 1). Светочувствительность материала обусловлена способностью ФХ при облучении присоединяться к полимеру, превращаясь в 9,10-дизамещенное производное фенантрена [2]. На рис. 1б (кривая 1) приведен спектр поглощения блочного образца (толщина 0,4 мм, концентрация ФХ  $8,5 \cdot 10^{-3}$  М) с явно выраженным максимумом поглощения при  $\lambda = 405 \div 410$  нм, который обусловлен наличием ФХ. Под действием излучения ФХ изменяет свою химическую структуру, а образовавшийся фотопродукт (семихиноновый радикал) присоединяется к молекуле ПММА и теряет свою подвижность. Спектр поглощения фотопродукта (ФП) отличается от спектра поглощения ФХ — максимум в видимой области исчезает (рис. 1б, кривая 4). Разница спектров поглощения ФХ и его фотопродукта обуславливает разницу их показателей преломления и определяет эффективность зарегистрированной голограммы скрытого изображения (без воздействия постэкспозиционной обработки) на данной длине волны (см. рис. 1а, позиция 2).

Процесс постэкспозиционного прогрева приводит к перераспределению концентрации неэкспонированных молекул ФХ равномерно по объему образца (рис. 1а, позиция 3), что обеспечивает усиление зарегистрированной интерференционной структуры, сформированной фотопродуктом, то есть происходит «проявление» голограммы. После фиксирования (рис. 1а, позиция 4) образец становится несветочувствительным и может быть использован для работы в видимой и ИК областях спектра. Таким образом, получение голограмм на данном материале включает следующие основные этапы:

- Регистрация голограммы излучением с длиной волны в диапазоне  $400 < \lambda < 530$  нм (рис. 1а, позиция 2);
- Прогрев образцов в течение 50 часов при температуре 50 °С (рис. 1а, позиция 3);
- Фиксирование голограммы некогерентным излучением с длиной волны в области поглощения ФХ (рис. 1а, позиция 4).

Образцы, которые получают путем блочной полимеризации между двумя формирующими пластинами (так называемые «блочные» образцы), имеют форму дисков диаметром от 20 мм до 60 мм с толщиной (0,4 ÷ 6,0) мм. Разработан режим получения образцов материала [6], позволяющий получать однородные, равномерно прокрашенные пленки размером более 10×10 см с толщиной от 80 мкм до 350 мкм, объемная концентрация ФХ

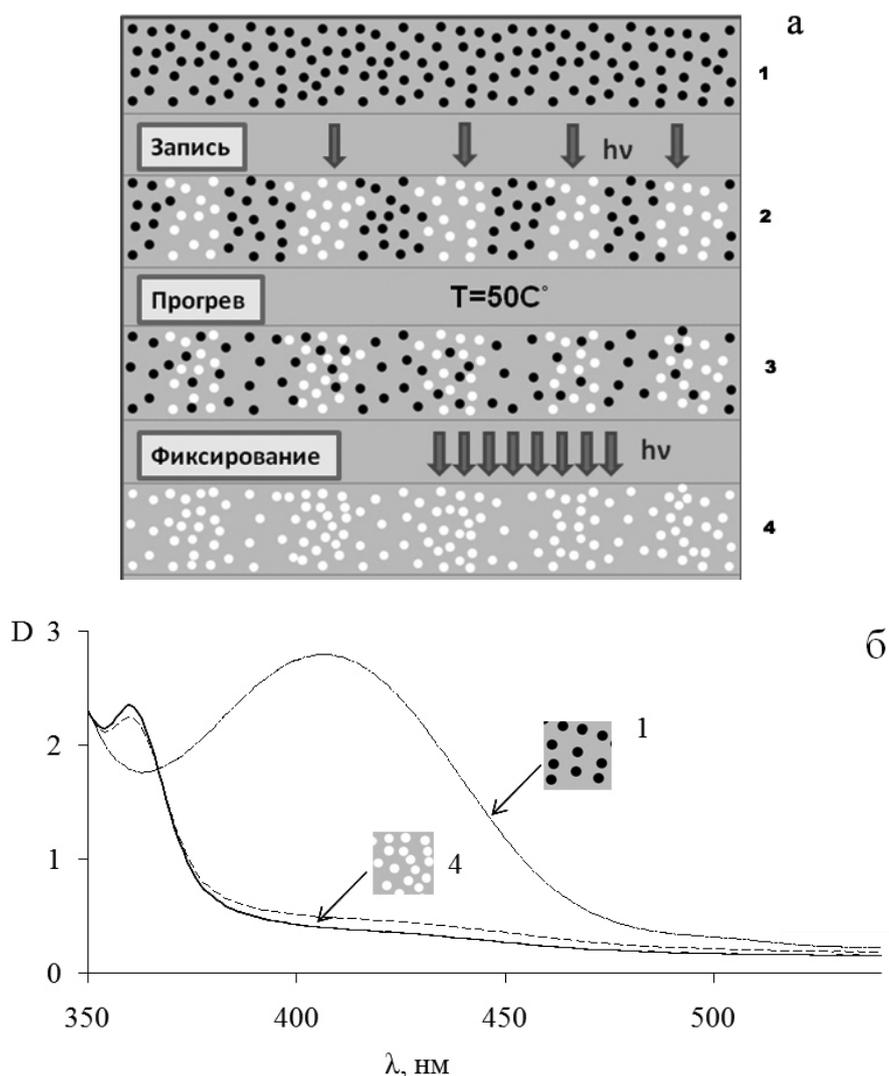


РИС. 1. а) схема, поясняющая процесс получения голограмм-решеток на материале «Диффен»: распределение молекул фенатренхинона (●) и фотопродукта (○) в объеме образца в исходном состоянии (1), после записи голограммы-решетки (2), после прогрева (3), после фиксирования (4); б) спектральная зависимость оптической плотности,  $D$ , исходного образца (1) и образца после фиксирования (4): условия фиксирования —  $\lambda = 470$  нм (сплошная линия),  $\lambda = 405$  нм (штриховая линия); толщина образца ( $T$ ) — 0,4 мм, плотность мощности обесцвечивающего излучения ( $E_0$ ) — 16 мВт/см<sup>2</sup>. Измерения оптической плотности проведены на спектрофотометре Evolution 300

в которых в несколько раз выше, чем в блочных образцах. Эластичность пленок позволяет вырезать из них образцы различной формы. Разработанная технология обеспечивает получение объемной концентрации ФХ в пленочных образцах в несколько раз выше, чем в блочных образцах.

Отметим основные особенности материала, обеспечивающие его применение в качестве высокоразрешающего светочувствительного нанокompозита для регистрации информации:

1. Разрешающая способность материала более  $3000 \text{ мм}^{-1}$  и ограничена размерами молекул ФХ и подвижностью молекул фотопродукта.
2. Область спектральной чувствительности материала  $370 \text{ нм} \div 530 \text{ нм}$ . Длинноволновая граница чувствительности определена экспериментально: при использовании излучения с длиной волны  $532 \text{ нм}$  удалось получить голограммы, эффективность которых не превышает  $1\%$  [5], в то время как при использовании излучения с  $\lambda = 514 \text{ нм}$  (ионный аргоновый лазер) успешно осуществляется запись высокоэффективных голограмм [4]. Коротковолновая граница указанной полосы поглощения определяется тем, что в области  $\lambda < 350 \text{ нм}$  значительный вклад в поглощение образца вносит матрица ПММА, и разделить парциальные вклады, вносимые матрицей и фенантрехиноном, не представляется возможным.
3. Возможность получения голограмм скрытого изображения и последующего их усиления в условиях неизменности интерференционной структуры, сформированной на этапе регистрации, что обеспечивает широкий динамический диапазон и возможность получения высокоэффективных наложенных голограмм [7].
4. Возможность получения образцов с толщиной от десятков микрон до нескольких миллиметров.
5. Функция передачи модуляции (частотно-контрастная характеристика) необычна по сравнению с традиционными светочувствительными материалами. В области низких пространственных частот (менее  $50 \text{ мм}^{-1}$ ) получение голограмм на данном материале невозможно; эффективность зарегистрированных голограмм увеличивается с увеличением пространственной частоты голограммы. Использование таких сред может быть весьма полезным при записи информации, требующей исключения низкочастотной составляющей пространственного спектра излучения.

Область длин волн  $\lambda > 530 \text{ нм}$  находится вне полосы поглощения ФХ и определяет спектральный диапазон прозрачности неэкспонированных регистрирующих сред данного типа, то есть, область видимого излучения, в которой образцы нечувствительны к воздействию излучения, даже если они содержат неэкспонированные молекулы ФХ в исходном состоянии.

### 3. Методика проведения эксперимента

Основной характеристикой процесса обесцвечивания исследуемых образцов материала «Диффен» в данной работе являлась зависимость изменения пропускания образца от времени воздействия излучения, оцениваемая на длине волны обесцвечивающего излучения. Получение данной зависимости производилось для разных условий проведения эксперимента, указанных в таблице 1 (см. также рис. 2), на экспериментальном стенде, принципиальная оптическая схема которого изображена на рис. 3а. Разработанный экспериментальный стенд позволяет производить замену источника излучения, в качестве которого были использованы три светодиода с различной длиной волны излучения и шириной спектра излучения от  $15 \text{ нм}$  до  $30 \text{ нм}$  (см. рис. 2а и табл. 2) в пределах области поглощения образцов (см. рис. 2б). Изменение плотности мощности обесцвечивающего излучения,  $E_0$ , падающего на образец, производилось регулировкой питания светодиодов.

Кассета для крепления исследуемого образца имела сопряжение с диафрагмой, выделяющей засвечиваемый участок диаметром  $5 \text{ мм}$  (см. рис. 3б). При обесцвечивании одного участка остальная часть образца оставалась неэкспонированной, не подвергаясь воздействию излучения, т.к. рассеяние в образцах практически отсутствует. На одном образце на различных его участках производились измерения требуемой (искомой) зависимости в различных условиях (см. табл. 1). Регистрация излучения производилась приемником

ТАБЛИЦА 1. Образцы материала «Диффен», использованные в работе, и условия проведения обесцвечивания

Номер п/п	Образцы				Условия обесцвечивания	
	Тип	Толщина	Дата изготовления	Концентрация ФХ (вес, %)	$\lambda_{max}$ , нм	$E_0$ , мВт/см <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7
1	Блочный	1,7 мм	окт. 2010 г.	0,7%	470	0,2÷20
2	Блочный	0,4 мм	окт. 2011 г.	0,7%	405, 470	0,4÷16
3	Блочный	1,2 мм	окт. 2008 г.	0,7%	455	7,5; 20
4	Блочный	0,7 мм	окт. 2008 г.	0,7%	455	7,2; 20
5	Пленочный	0,18 мм	июль 2010 г.	4,0%	405, 455, 470	2; 7,2; 20

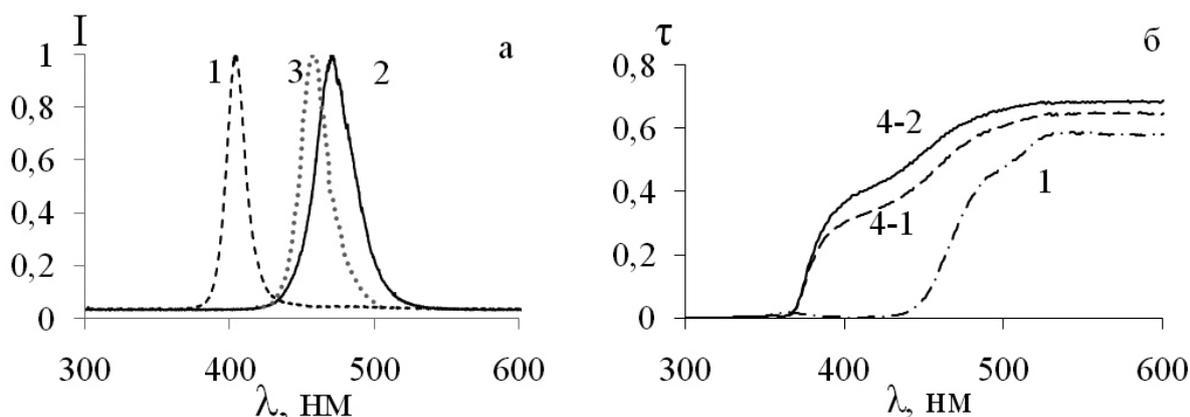


Рис. 2. а) спектры излучения светодиодов, используемых в качестве источников излучения различного спектрального состава:  $\lambda_{max} = 405$  нм (1), 470 нм (2), 455 нм (3); б) спектральная зависимость пропускания ( $\tau$ ) исходного образца (кривая 1) и образца после фиксирования в различных условиях: при  $\lambda_{max} = 405$  нм,  $E_0 = 16$  мВт/см<sup>2</sup> — штриховая линия, 4-1; при  $\lambda_{max} = 470$  нм,  $E_0 = 16,5$  мВт/см<sup>2</sup> — сплошная линия, 4-2; толщина образца 0,4 мм; обозначения кривых 1 и 4 соответствуют позициям рис. 1а. Измерения пропускания образцов проведены на спектрофотометре Evolution 300

излучения (ПИ), в качестве которого использовался измеритель мощности лазерного излучения фирмы «Orhir», включающий фотодиодный сенсор PD-300 и мультиметр NOVA-II, подключенный к компьютеру. Используемая программа позволяла проводить регистрацию данных в течение всего времени обесцвечивания образцов — от нескольких десятков минут до нескольких часов. В процессе исследования на данном стенде проводилось измерение мощности излучения на данной длине волны ( $P_\lambda$ ) в течение всего процесса обесцвечивания,  $t$ , —  $P_\lambda(t)$ . Как правило, зависимость  $P_\lambda(t)$  имеет вид, представленный на рис. 4а, типичный для данного процесса — быстрый рост мощности излучения за образцом в начальный период облучения и выход на уровень «насыщения», при котором, в зависимости

ТАБЛИЦА 2. Дополнительная информация об используемых светодиодах

№ п/п	$\lambda_{max}$ , нм	Информация изготовителя				Измерения авторов	
		Тип источника излучения	Рабочие параметры			Мощность излучения, мВт	Полуширина спектра излучения, нм
			Напряжение питания, В	Ток, мА	Температура		
1	405	на алюминиевой подложке	3,2	$\leq 350$	25 °С	8	15
2	455	на алюминиевой подложке	$\leq 4$	$\leq 350$	25 °С	30	22
3	470	в стеклянной колбе	$\leq 4$	$\leq 350$	25 °С	16	30

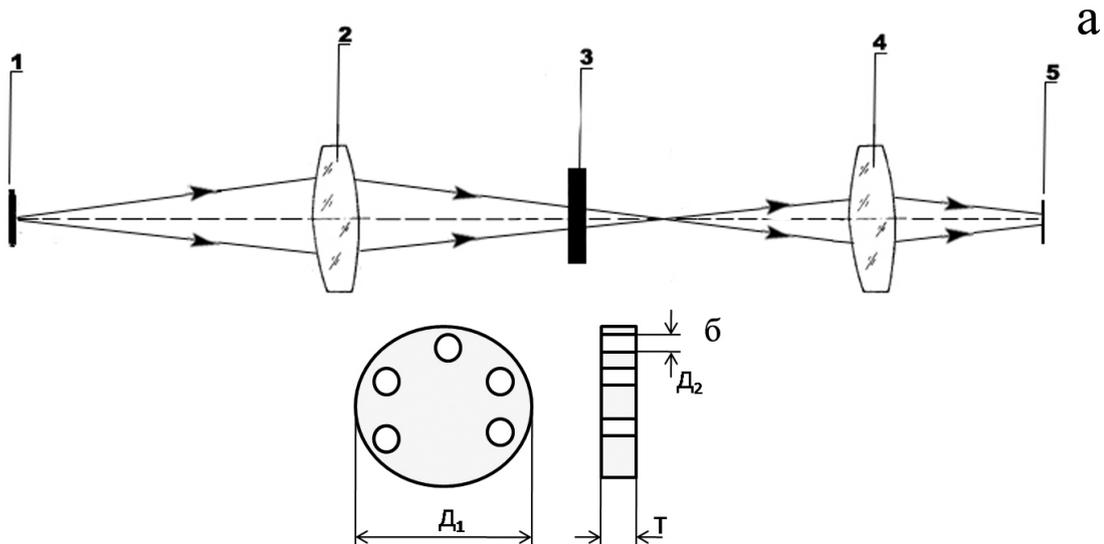


РИС. 3. а) оптическая схема стенда для исследования процесса обесцвечивания: 1 — источник излучения; 2, 4 — линзы; 3 — исследуемый образец; 5 — приемник излучения; б) вид исследуемого образца в двух проекциях:  $D_1$  — диаметр образца,  $D_2$  — диаметр засвеченного участка,  $T$  — толщина образца

от свойств образца и условий обесцвечивания, изменение мощности излучения, прошедшего образец либо практически не происходит, либо происходит очень медленно по сравнению с начальным периодом.

В качестве основных параметров при изучении процесса обесцвечивания кроме длины волны и спектрального интервала обесцвечивающего излучения использовалась плотность мощности излучения, освещающего образец:  $E_0 = P_\lambda/S$ , где  $P_\lambda$  — мощность излучения, падающего на поверхность образца,  $S$  — площадь поверхности исследуемого участка.

Состояние образца оценивалось по изменению его пропускания,  $\tau_\lambda$ , на данной длине волны:  $\tau_\lambda = (P_\lambda)_{\text{прош}}/(P_\lambda)_{\text{пад}}$ , где  $(P_\lambda)_{\text{прош}}$  — мощность излучения, прошедшего образец,

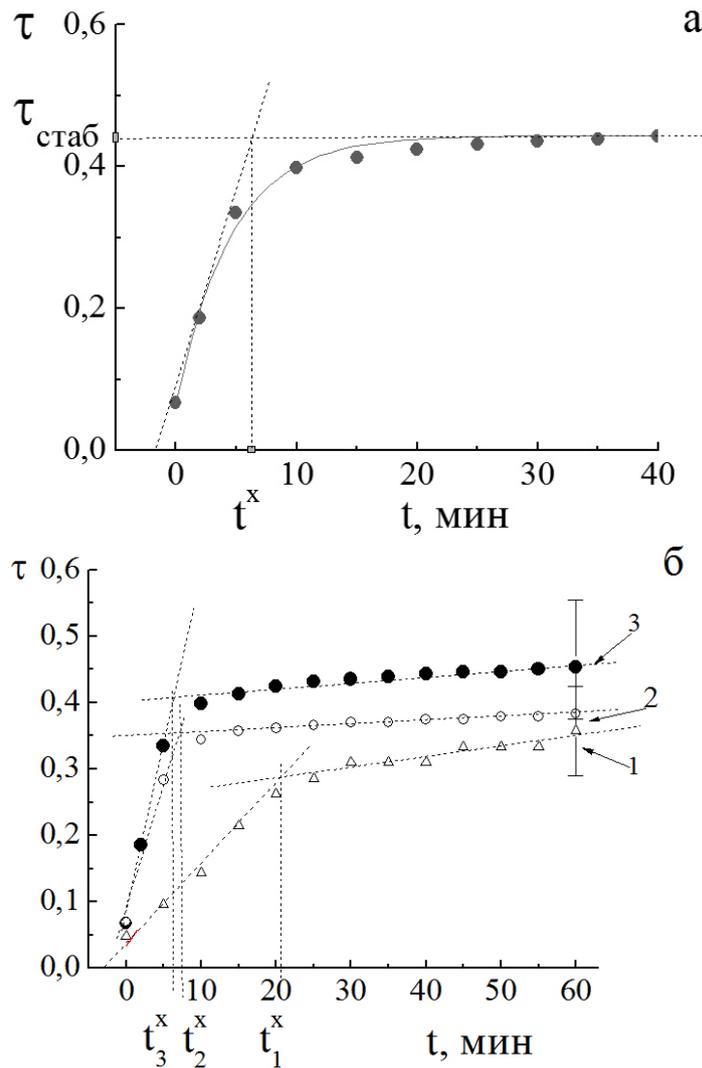


РИС. 4. Изменение пропускания образца ( $\tau$ ) в процессе обесцвечивания при использовании излучения с  $\lambda_{max} = 470$  нм: а) аппроксимация зависимости  $\tau(t)$  двумя прямыми (пунктир):  $t^x$  — характерное время обесцвечивания,  $\tau_{\text{стаб}}$  — пропускание образца в стабильном состоянии; б) зависимости, полученные при использовании разной плотности мощности обесцвечивающего излучения:  $E_0 = 2, 1$  мВт/см<sup>2</sup> (1), 7,6 мВт/см<sup>2</sup> (2), 8,8 мВт/см<sup>2</sup> (3). Толщина образца 1,7 мм

регистрируемая приемником излучения,  $(P_\lambda)_{\text{пад}}$  — мощность излучения, падающего на образец. Измерения  $(P_\lambda)_{\text{пад}}$  проводились в данной схеме в отсутствие образца — контроль осуществлялся до начала процесса и после его окончания.

#### 4. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Типичный вид зависимости, характеризующей изменение пропускания образцов при их обесцвечивании, представлен на рис. 4а: пропускание образца резко изменяется в начальный период процесса и затем выходит на максимальный уровень, характеризующий пропускание образца на данной длине волны в стабильном состоянии, которое в дальнейшем под действием излучения уже не изменяется. Для проведения сравнительного анализа

экспериментальных результатов, полученных при использовании различных образцов в различных условиях обесцвечивания такую зависимость удобно аппроксимировать двумя прямыми, как это показано на рис. 4а пунктиром. Первая пунктирная прямая определяет быстрый рост пропускания образца, характерный для начального периода обесцвечивания, и ее наклон к оси времени определяется скоростью преобразования молекул ФХ в ФП при данных условиях обесцвечивания, основными из которых являются длина волны,  $\lambda$ , и плотность мощности обесцвечивающего излучения,  $E_0$ . Вторая прямая характеризует поведение образца в достаточно стабильной фазе процесса, в продолжение которой под действием излучения практически не происходит изменений пропускания, либо эти изменения незначительны по сравнению с изменениями в начальной, «быстрой», фазе. Точка пересечения пунктирных аппроксимирующих прямых задает два параметра:  $t^x$  — характерное время обесцвечивания, определяющего длительность «быстрой» фазы процесса обесцвечивания, и  $\tau_{\text{стаб}}$  — пропускание образца в стабильной фазе процесса, при которой пропускание близко к максимально достижимым значениям пропускания образца при данной длине волны обесцвечивающего излучения.

Таким образом, типичный процесс обесцвечивания можно характеризовать двумя основными параметрами —  $\tau_{\text{стаб}}$  и  $t^x$ , что и было использовано при проведении дальнейших исследований для сравнения экспериментальных данных, полученных в разных условиях.

Изучение процесса обесцвечивания проводилось на основе анализа экспериментальных данных, представляемых зависимостью  $\tau(t)$ , полученной для разных образцов в различных условиях проведения обесцвечивания — см. таблицу 1. Одним из главных параметров, определяющих эти условия, является плотность мощности обесцвечивающего излучения —  $E_0$ .

На рис. 4б приведены три зависимости, полученные в процессе обесцвечивания образца толщиной 1,7 мм при использовании обесцвечивающего излучения одного спектрального состава, но различной мощности. Как видно, в данных условиях проявляется влияние плотности мощности излучения на достижение максимальных значений пропускания,  $\tau_{\text{стаб}}$ : при малых значениях плотности мощности обесцвечивающего излучения после начального быстрого изменения пропускания образца за период времени ( $t^x$ ), происходит дальнейший очень медленный рост пропускания образца. Таким образом, вторая аппроксимирующая пунктирная прямая может не быть параллельной оси времени, а составляет с ней небольшой угол. Как показал дальнейший анализ экспериментальных данных, полученных в различных условиях проведения процесса обесцвечивания, наклон данной аппроксимирующей прямой увеличивается с увеличением толщины образца и стремится к нулю при увеличении плотности мощности обесцвечивающего излучения.

Проведенные эксперименты показали, что параметр  $\tau_{\text{стаб}}$  зависит не только от плотности мощности излучения, но и ряда других параметров, таких как длина волны обесцвечивающего излучения и толщина образца. На рис. 5 приведены экспериментальные результаты, демонстрирующие зависимость  $\tau_{\text{стаб}}(E_0)$  при использовании обесцвечивающего излучения с  $\lambda_{\text{max}} = 470$  нм и  $\lambda_{\text{max}} = 405$  нм для образцов блочного типа различной толщины. Обнаружено, что в исследованном диапазоне  $0 < E_0 < 20$  мВт/см<sup>2</sup> стабильное пропускание,  $\tau_{\text{стаб}}$ , образца толщиной 0,4 мм выше, чем у образца толщиной 1,7 мм и не зависит от плотности мощности излучения, в то время как для образца толщиной 1,7 мм наблюдается увеличение  $\tau_{\text{стаб}}$  при увеличении  $E_0$ . Однако, при  $E_0 > 15$  мВт/см<sup>2</sup> в пределах погрешности измерения  $\tau_{\text{стаб}}$  одинакова для обоих образцов. Этот результат физически понятен, т.к. при определенной величине  $E_0$  все молекулы ФХ преобразуются в ФП, а пропускание образца на данной длине волны определяет не толщина образца (ПММА не обладает поглощением в видимой области спектра), а эффекты на поверхностях образца,

связанные с переотражением излучения на границах раздела и рассеянием на дефектах поверхности, которые напрямую не связаны с толщиной образца.

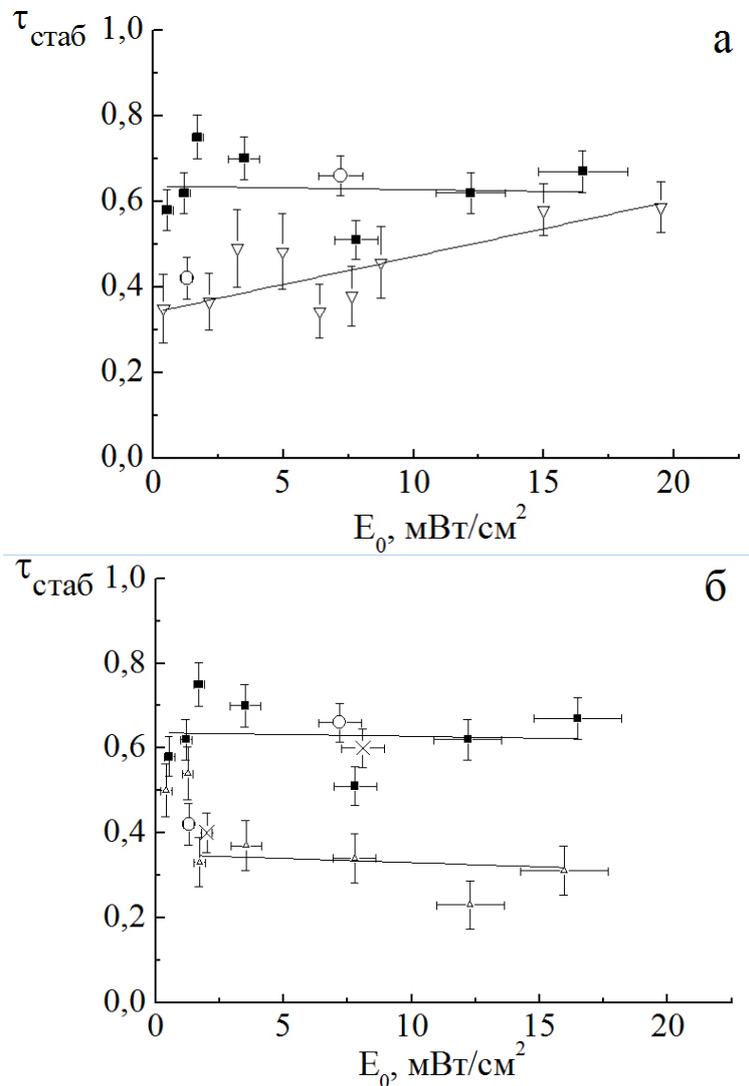


РИС. 5. Зависимость пропускания образцов различного типа в стабильном состоянии ( $\tau_{\text{стаб}}$ ) от плотности мощности излучения ( $E_0$ ): а) при использовании излучения с  $\lambda_{\text{max}} = 470$  нм и образцов блочного типа с различной толщиной; б) при обесцвечивании образца блочного типа излучением с различной длиной волны. Образец толщиной 0,4 мм при  $\lambda_{\text{max}} = 470$  нм (■), при  $\lambda_{\text{max}} = 405$  нм ( $\Delta$ ); образец толщиной 1,7 мм при  $\lambda_{\text{max}} = 470$  нм ( $\nabla$ ); образец пленочного типа толщиной 0,18 мм при  $\lambda_{\text{max}} = 470$  нм ( $\circ$ ), при  $\lambda_{\text{max}} = 405$  нм ( $\times$ ). Сплошные линии — аппроксимация методом наименьших квадратов для образцов блочного типа

Зависимость  $\tau_{\text{стаб}}$  от  $\lambda_{\text{max}}$  особенно заметно проявляется при использовании излучения, спектр которого находится вблизи максимума полосы поглощения образца — в коротковолновой области видимого спектра, как это видно из приведенных на рис. 5б экспериментальных данных. Разница в спектрах пропускания участков одного образца, обесцвеченных излучением с различной длиной волны, поясняет рис. 2б. При использовании обесцвечивающего излучения с  $\lambda_{\text{max}} = 405$  нм (рис. 2б, кривая 4–1) пропускание

полностью обесцвеченного образца в видимой области спектра ( $\lambda > 400$  нм) несколько меньше, чем при обесцвечивании излучением с  $\lambda_{max} = 470$  нм. Это свидетельствует о том, что при использовании излучения коротковолновой области спектра фотохимические реакции и фотопродукты преобразования фенантренхинона несколько отличаются от ситуации, при которой используется более длинноволновая область спектра. Авторы работы [2], специалисты по исследованию фотопревращений ФХ, не рекомендовали использовать для фиксации светочувствительных образцов излучение с  $\lambda < 430$  нм. Проведенные эксперименты подтвердили правильность данной рекомендации, которая важна для практического использования образцов материала «Диффен» — проведения фиксации голограммных оптических элементов.

Другой важный для практики параметр процесса обесцвечивания — характерное время обесцвечивания,  $t^x$ , определяющее время фиксации голограмм при их получении на образцах данного материала. Зависимость  $t^x(E_0)$ , демонстрирующая зависимость характерного времени обесцвечивания,  $t^x$ , от плотности мощности обесцвечивающего излучения,  $E_0$ , при различных условиях эксперимента и включающая все экспериментальные результаты, полученные при исследовании образцов на данном стенде, приведена на рис. 6. Очевидно, что указанная зависимость представляет собой (в пределах погрешности измерений) ярко выраженную феноменологическую закономерность, объединяющую все имеющиеся экспериментальные данные, полученные по единой методике при использовании образцов различного типа и светодиодных источников излучения различного спектрального состава (в пределах полосы поглощения, определяющей чувствительность исследуемых образцов). Данная закономерность может быть полезна при выработке режима фиксации голограмм, так как позволяет производить выбор оптимальных условий проведения фиксации для образцов любого типа и толщины, независимо от длины волны обесцвечивающего излучения.

## 5. Заключение

Проведено исследование процесса обесцвечивания образцов материала «Диффен» блочного и пленочного типов при использовании светодиодных источников излучения различного спектрального состава, находящегося в пределах полосы поглощения образцов.

Использован экспериментальный стенд и оптическая схема, позволяющие производить измерения и контролировать параметры образцов в течение длительного времени, а также обеспечивать возможность смены источника излучения и регулировку плотности мощности обесцвечивающего излучения при проведении экспериментов.

Предложено для характеристики процесса обесцвечивания использовать два параметра, определяющих важную для практики зависимость пропускания образца от времени его обесцвечивания: характерное время обесцвечивания,  $t^x$ , определяющее длительность начальной, «быстрой» фазы процесса; и пропускание образца на длине волны обесцвечивания в стабильной фазе процесса,  $\tau_{стаб}$ . Продемонстрирована результативность такого подхода, позволяющего проводить сравнение результатов, полученных в различных условиях.

Показано, что плотность мощности излучения (диапазон изменений  $0,2 \div 20$  мВт/см<sup>2</sup>) в интервале длин волн ( $405 \div 470$ ) нм независимо от длины волны и модификации образцов однозначно определяет характерное время обесцвечивания. Выявленная феноменологическая закономерность полезна при выборе условий проведения процессов, связанных с обесцвечиванием образцов полимерных материалов на основе ФХ, и может быть использована при разработке режимов записи и фиксации голограмм, полученных на образцах материала «Диффен», и при аналитическом описании процесса

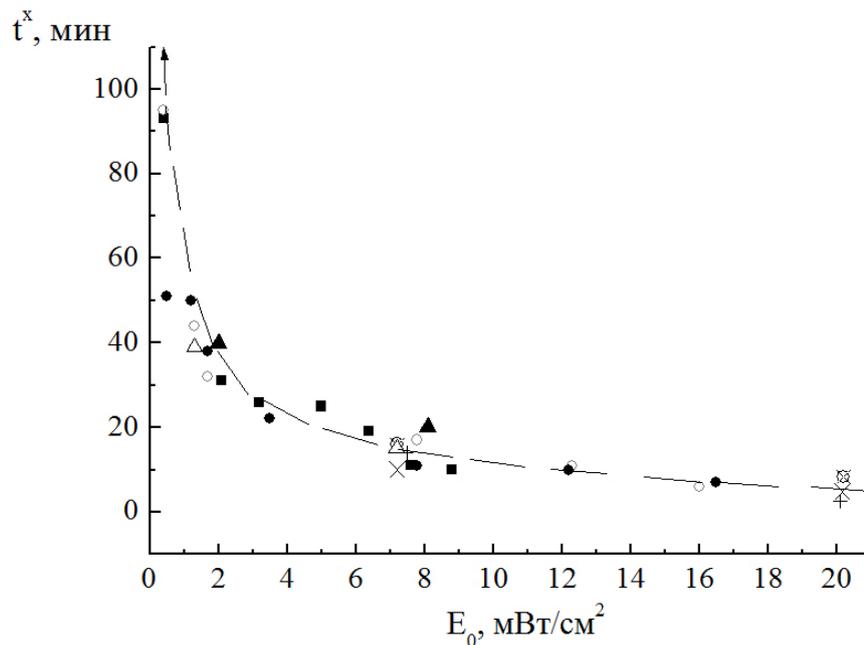


РИС. 6. Зависимость характерного времени обесцвечивания ( $t^x$ ) от плотности мощности излучения ( $E_0$ ) для исследованных образцов и использованных источников излучения. Блочные образцы:  $T = 0,4$  мм при  $\lambda_{max} = 405$  нм ( $\circ$ ), при  $\lambda_{max} = 470$  нм ( $\bullet$ );  $T = 0,7$  мм при  $\lambda_{max} = 455$  нм ( $\times$ );  $T = 1,2$  мм при  $\lambda_{max} = 455$  нм ( $+$ );  $T = 1,7$  мм при  $\lambda_{max} = 470$  нм ( $\blacksquare$ ); пленочный образец ( $T = 0,18$  мм) при  $\lambda_{max} = 405$  нм ( $\triangle$ ), при  $\lambda_{max} = 455$  нм ( $\otimes$ ), при  $\lambda_{max} = 470$  нм ( $\blacktriangle$ ). Пунктирная кривая демонстрирует характер процесса

получения голограмм на образцах полимерных материалов с диффузионным усилением, содержащих фенантренхинон.

## Литература

- [1] Andreeva O.V., Bandyuk O.V. Light-Sensitive Media-Composites for Recording Volume Holograms Based on Porous Glass and Polymer // Holograms – Recording materials and Applications. – 2011. – P. 45–70.
- [2] Черкасов А.С., Шелехов Н.С., Бандюк О.В. и др. Спектроскопические и фотохимические свойства фенантренхинона в кварцодных пористых стеклах // Оптика и спектр. – 1991. – Т. 71, № 2. – С. 344–350
- [3] Вениаминов А.В., Гончаров В.Ф., Попов А.П. Усиление голограмм за счет диффузионной деструкции противофазных периодических структур // Оптика и спектр. – 1991. – Т. 70, № 4. – С. 864–868.
- [4] Андреева О.В., Бандюк О.В., Парамонов А.А., и др. Объемные пропускающие голограммы в полимерной среде с фенантренхиноном // Оптический журнал. – 2000. – Т. 67, № 12. – С. 27–33.
- [5] Ионина Н.В., Андреева О.В., Бандюк О.В. Особенности записи голограмм в полимерной среде «Диффен» наносекундными лазерными импульсами // Оптический журнал. – 2005. – Т. 72, № 11. – С.91–92.
- [6] Андреева О.В., Бандюк О.В., Парамонов А.А., Андреева Н.В. Полимерный регистрирующий материал пленочного типа для голографии // Научно-технический вестник ИТМО. – 2006. – Вып. 34. – С. 34–37.
- [7] Андреева О.В., Бандюк О.В., Парамонов А.А., и др. Высокоэффективные мультиплексные голограммы на полимерном материале «Диффен» // Оптический журнал. – 2006. – Т. 73, № 9. – С. 60–63.