

## РЕГИСТРАЦИЯ И АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛОВОЙ СЕЛЕКТИВНОСТИ ГОЛОГРАММ В ФОТОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ

© 2022 г. Е. Ф. Пен<sup>a,b,\*</sup>, Н. Н. Вьюхина<sup>a</sup>, П. Е. Твердохлеб<sup>a,b</sup>, Е. В. Васильев<sup>c</sup>,  
Д. И. Деревянко<sup>c</sup>, В. В. Шелковников<sup>b,c</sup>, С. И. Алиев<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Институт автоматизирующей и электротехники СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

<sup>b</sup> Новосибирский государственный технический университет

Россия, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

<sup>c</sup> Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 9

\*e-mail: pen@iae.nsk.su

Поступила в редакцию 21.10.2021 г.

После доработки 08.11.2021 г.

Принята к публикации 10.11.2021 г.

Выполнена модернизация аппаратных и программных средств стенда для регистрации характеристик угловой селективности пропускающих и отражательных голограмм, что повысило информативность и точность измерений оптического сигнала. Получены и проанализированы экспериментальные данные характеристик угловой селективности для голографических решеток с произвольными значениями параметров записывающих пучков в толстослойных и тонких фотополимерах, это позволило выявить новые сведения о характере и степени неоднородности пространственной структуры исследованных голограмм. Даны рекомендации практического применения голографических фотополимерных материалов различных типов.

DOI: 10.31857/S0032816222020185

### ВВЕДЕНИЕ

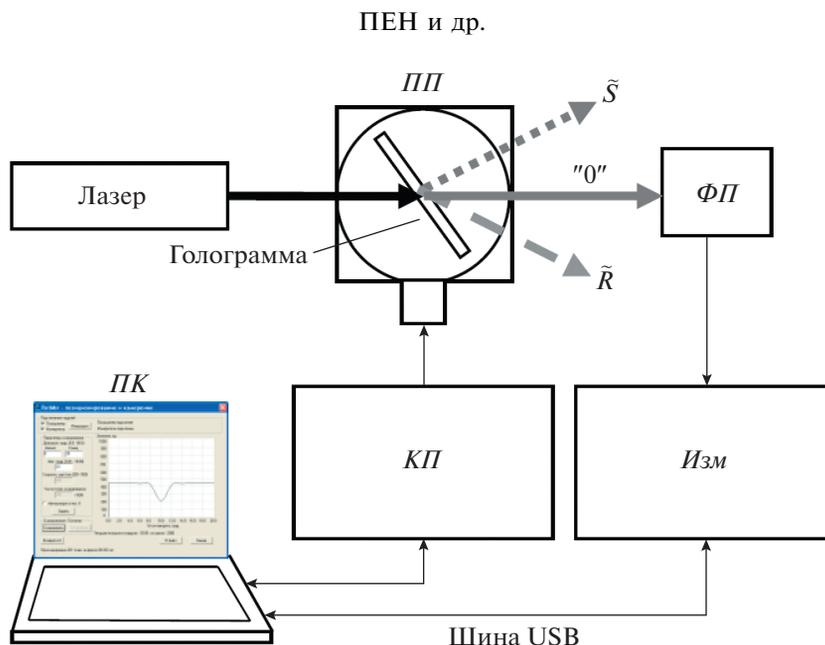
В настоящее время голографические фотополимерные материалы (г.ф.п.м.) получили широкое практическое распространение [1, 2] благодаря своим свойствам и характеристикам (отсутствию мокрых процессов постобработки, простоте использования, фотоиндуцированному изменению показателя преломления примерно равному 0.03, дифракционной эффективности пропускающих и отражательных голограмм порядка 90%).

Исследованиям свойств как г.ф.п.м., так и голограмм на их основе посвящен ряд работ [2–4], в которых описаны также методы и устройства для измерений дифракционной эффективности объемных пропускающих и отражательных голограмм, их угловой и спектральной селективности, степени усадки и т.д. При этом аппаратные и программные средства этих устройств представлены сжато.

Угловая селективность (у.с.) — зависимость интенсивности дифрагированного пучка света при отклонении угла падения восстанавливающего (зондирующего) излучения от параметров опорной волны при записи исследуемой голограммы [5]. Сведения об у.с. важны в различных

приложениях: в устройствах 3D-оптической памяти при определении количества наложенных голограмм с возможностями селективной (избирательной) записи/считывания информации; в дисплеях (например, в голографических прицелах) для оценки угла обзора восстановленного изображения; в сенсорах — при определении чувствительности к изменению измеряемой величины. У.с. также является важной характеристикой, раскрывающей оптические свойства внутренней пространственной структуры объемной голограммы, в частности неоднородность распределения изменений показателя преломления по ее глубине, характер и степень усадки г.ф.п.м. [4]. Поэтому помимо детальной и достоверной регистрации у.с. необходимо провести анализ полученных экспериментальных данных, в том числе сравнить с теоретическими ожиданиями, используя модели искажений структуры голограммы [6].

Ранее был разработан стенд для измерения у.с. фотополимерных голограмм, построенный по модульному принципу из компонентов Microflex с программным интерфейсом, выполненным в среде LabView [7]. С его помощью получены но-



**Рис. 1.** Структурная схема стенда для измерений угловой селективности голограмм. *ПП* – поворотная платформа, *КП* – контроллер позиционера, *ФП* – фотоприемник, *Изм* – измеритель, *ПК* – персональный компьютер.

вые экспериментальные данные о свойствах г.ф.п.м. [6], однако в настоящее время реализация канала связи с компьютером морально устарела, что вызывает проблемы совместимости с различными операционными системами, выявлены недоработки оптической системы и методики измерений (не учитывалась зависимость потерь света на его отражение при изменении угла падения зондирующего пучка в случае ТЕ-ориентации плоскости поляризации этого пучка).

Цель данной работы – модернизация аппаратных и программных средств стенда регистрации характеристик угловой селективности пропускающих и отражательных голограмм для расширения его функциональных возможностей и повышения точности измерений; получение и анализ экспериментальных данных (путем сопоставления с известными теоретическими моделями голограмм) для выявления особенностей исследуемых г.ф.п.м., а также выработка рекомендаций по их использованию.

## СОСТАВ СТЕНДА

На рис. 1 приведена структурная схема модифицированного стенда. Для зондирования голограмм используется лазерный модуль на основе диода Sanyo DL-3147-260 (длина волны 650 нм, мощность 5 мВт, нестабильность мощности менее 5%). Ориентация плоскости поляризации лазерного пучка и его интенсивность регулируются фазовой пластинкой и светофильтром (на рисунке не показаны). С целью уменьшения потерь света при его отражении на границе “воздух – го-

лограмма” выбрана ТМ-ориентация плоскости поляризации зондирующего пучка, что особенно важно при большом диапазоне углов сканирования этого пучка.

Исследуемая голограмма закрепляется на платформе, вращающейся вокруг вертикальной оси (нормали к плоскости рисунка) с помощью шагового двигателя. В зависимости от угла падения зондирующего пучка на голограмму на ее выходе формируются либо один пучок, не испытавший дифракции (так называемый нулевой порядок “0”), либо два пучка – нулевой “0” и дифрагированный, соответствующий восстановленным предметной волне  $\tilde{S}$  или опорной волне  $\tilde{R}$ , если для них выполняются условия Брэгга [5].

Поворотная платформа модели 8MR180-2 (Литва, Standa Ltd.) имеет полный угол поворота 360°. Платформа снабжена круговой шкалой, а шаговый двигатель имеет поворачивающийся диск для ручной предустановки начального положения при выключенном питании двигателя и используется в экспериментах для выставления начального угла сканирования. Двигатель подключен к контроллеру (модель 8SMC1-USBhF, Standa Ltd.) [8] и вместе они образуют круговой позиционер с разрешением 0.6' (0.01°) на полный шаг и скоростью вращения до 50°/с (5000 шагов/с). Позиционер также обеспечивает режим микрошагов с разрешением 1/2, 1/4, 1/8 шага, программируемые скорости перемещения, ускорения и замедления и другие возможности. Угол, предустановленный при выключенном питании двигателя, затем при включении питания принимается контроллером за нуль, и обработка всех за-

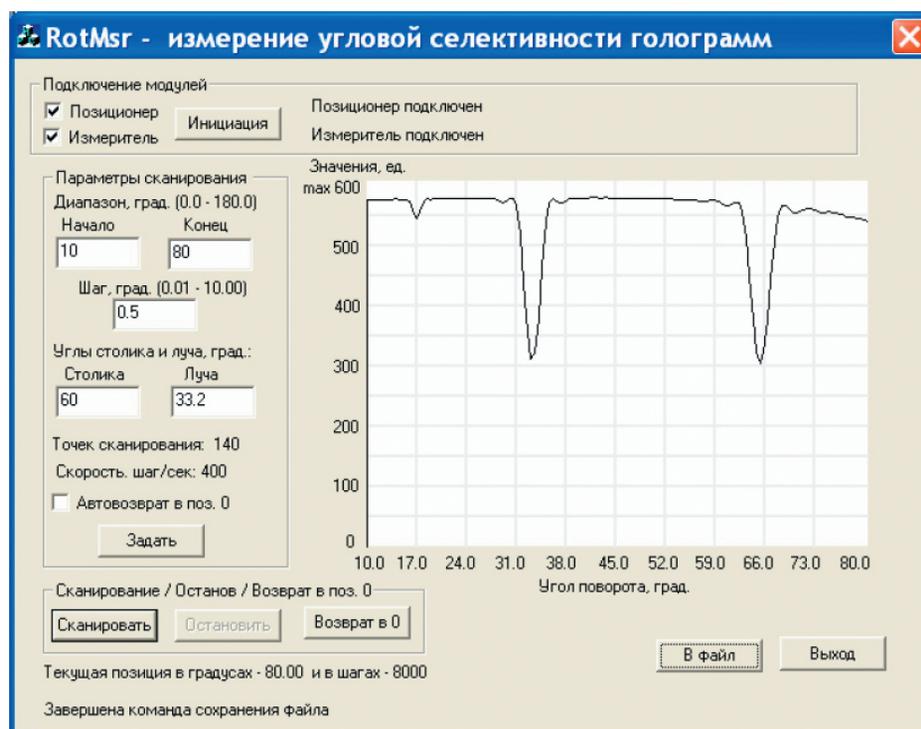


Рис. 2. Вид окна интерфейса приложения.

данных в программе углов (точек сканирования) ведется от этого значения.

В качестве фотоприемника используется фотодиод ФД-7К, имеющий фоточувствительный элемент  $\varnothing$  10 мм, область спектральной фоточувствительности 0.4–1.1 мкм, токовую фоточувствительность не менее 0.56 мкА/лк и темновой ток не более 5 мкА. Фотоприемник, трансимпедансный усилитель с диапазоном выходного напряжения сигнала 0–3 В и элементы стабилизации питающих напряжений размещены в металлическом корпусе.

Измеритель сигнала включает микроконтроллер ATmega8535 [9] с внутренним периферийным 10-разрядным аналого-цифровым преобразователем (а.ц.п.), имеющим точность  $\pm 2$  младших разряда, интегральную нелинейность 0.5 младшего разряда и время преобразования менее 260 мкс. Микроконтроллер управляет сбором данных и обменом с компьютером по интерфейсу USB, который реализуется микросхемой USB UART FT232R (производитель FTDI Ltd. [10]), имеющей буферы данных приема (256 байт) и передачи (128 байт), снижающие задержки при передаче данных. Для уменьшения уровня помех питание фотоприемника и микроконтроллера с а.ц.п. осуществляется от отдельного стабилизированного источника, кроме того, в измерителе установлен гальванический изолятор сигналов передаваемых команд и данных между контроллером и интер-

фейсом USB, что обеспечило уровень шумового сигнала менее 0.5%. Позиционер и измеритель подключаются к компьютеру как независимые устройства со своими драйверами USB для операционной системы компьютера: контроллер позиционера использует драйвер от фирмы Standa Ltd., а измеритель – драйвер от фирмы FTDI Ltd. Разработанный канал передачи команд управления оборудованием и данных измерений отличается простотой реализации, надежностью работы и дает возможность проведения разнообразных экспериментов (измерение пропускания или отражения света образцов г.ф.п.м. и подложек, определение угловых координат дифрагированных пучков и др.).

Разработано приложение (программа) для регистрации и отображения данных. На рис. 2 показано окно интерфейса программы. В начале работы выбор подключаемых модулей (“Позиционер”, “Измеритель”) определяет либо их совместную работу в режиме регистраций экспериментальных данных, либо работу одного из них в режиме настройки для быстрой визуальной оценки оптимальности конфигурации оптической системы и подстройки уровня измеряемого сигнала.

В начале эксперимента задаются параметры зоны сканирования (“Диапазон” и “Шаг”), predetermined значения углов позиционера и зондирующего пучка. В процессе сканирования поточно строится график зависимости сигнала

пропускания от угла поворота платформы с закрепленной на ней голограммой. В каждой точке сканирования делается четыре выборки а.ц.п. и вычисляется среднее значение этого измерения, что повышает точность регистрации данных. Предусмотрена возможность прерывания процесса сканирования и возврата в нулевую позицию. Также можно сохранить данные регистрации (кнопка “В файл”) в формате txt на диске для последующего документирования или обработки.

## МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Обычно [3, 4] измеряют интенсивность пучка восстановленной волны  $\tilde{S}$ , при этом фотоприемник, регистрирующий этот свет, должен “отслеживать” направление дифракции, которое в процессе измерений может изменяться вследствие нарушений брэгговских условий восстановления голограммы из-за усадки толщины фотополимера [4], что требует повторной настройки оптической системы. Кроме того, при обработке результатов у.с. и определении дифракционной эффективности голограммы необходимо измерять интенсивности двух пучков (как дифрагированного, так и прошедшего без дифракции), это обстоятельство можно отнести к недостаткам традиционного метода измерений у.с.

Отличием оптической схемы данного стенда от известных [2, 3] является измерение интенсивности света только одного пучка – прошедшего сквозь голограмму без дифракции. При этом в результате эксперимента можно получить информацию обо всех порядках дифракции. Описанная схема предложена и реализована нами в прежней версии стенда [7], а позже была применена другими исследователями, например, в работе [11].

При измерениях мы полагаем, что на входе участка г.ф.п.м. без голограммы интенсивность зондирующего пучка света равна  $I$ , тогда, с учетом потерь на поглощение излучения в материале  $t$  и его отражение  $r(\theta)$ , зависящее от угла падения света на границу раздела “воздух – г.ф.п.м.”, на выходе этого участка регистрируется интенсивность прошедшего света  $I_b(\theta) = Itr(\theta)$ . Для исследуемой голограммы это измерение делается неоднократно.

На участке фотополимера с голограммой на его выходе образуются пучки нулевого и первого порядков брэгговской дифракции с интенсивностями  $I_0(\theta)$  и  $I_1(\theta)$  соответственно. В случае отсутствия рассеяния света и неоднородностей в г.ф.п.м. должно соблюдаться соотношение

$$I_0(\theta) + I_1(\theta) = I_b(\theta). \quad (1)$$

Согласно принятому нами методу измерений у.с. регистрируется интенсивность  $I_0(\theta)$  пучка нулевого порядка дифракции, не меняющего своего

направления для голограмм с произвольными значениями углов падения записывающих пучков.

Ранее было отмечено, что измерения могут быть выполнены в выбранном интервале углов с различной степенью детализации.

Интересующее нас значение дифракционной эффективности голограммы по определению равно

$$\eta(\theta) = \frac{I_1(\theta)}{I_0(\theta) + I_1(\theta)} = \left(1 - \frac{I_0(\theta)}{I_b(\theta)}\right) \cdot 100\%. \quad (2)$$

На рис. 3а показан пример графика  $I_b(\theta)$  в случае ТЕ-поляризации зондирующего пучка (кривая 1), на котором видно, что в интервале углов  $-20^\circ < \theta < +60^\circ$  регистрируемый сигнал, характеризующий в основном потери света на френелевское отражение, сначала возрастает (при  $\theta \approx 0^\circ$  отражение минимально), а затем спадает. С целью снижения потерь света из-за его отражения в модифицированном стенде выбрана ТМ-поляризация зондирующего пучка света, при которой указанные потери света существенно уменьшились (кривая 2), что повысило долю полезного сигнала в диапазоне больших значений угла падения зондирующего пучка.

На рис. 3б изображен график сигнала  $I_0(\theta)$  в случае ТЕ-поляризации зондирующего пучка для пропускающей голографической решетки с углами падения предметного  $S$  и опорного  $R$  записывающих пучков  $\theta_S = 0$  и  $\theta_R = 32^\circ$  соответственно (в этом случае формируется так называемая “наклонная” решетка, поскольку изофазные плоскости интерференционной картины наклонены относительно нормали к поверхности голограммы). Когда зондирующий пучок находится в окрестности  $\theta = 0^\circ \pm 2.8^\circ$  и  $\theta = 32^\circ \pm 2.8^\circ$ , т.е. соблюдаются брэгговские условия дифракции [5] последовательно для каждого из записывающих пучков, сигнал  $I_0(\theta)$  резко уменьшается, что объясняется оттоком энергии зондирующего излучения в первый порядок дифракции.

Кроме основных экстремумов сигнала заметны боковые лепестки, обусловленные осциллирующим характером у.с. (пояснение этому явлению дано ниже), а также отчетливо видны дополнительные экстремумы (вторые порядки дифракции) в области  $\theta \approx -16^\circ$  и  $\theta \approx +51^\circ$ , свидетельствующие о нелинейном характере отклика г.ф.п.м. на гармоническую картину засветки при интерференции предметного и опорного пучков.

С учетом значений сигналов  $I_0(\theta)$  и  $I_b(\theta)$  по формуле (2) можно получить зависимость  $\eta(\theta)$ , вид которой для рассматриваемого примера показан на рис. 3в.

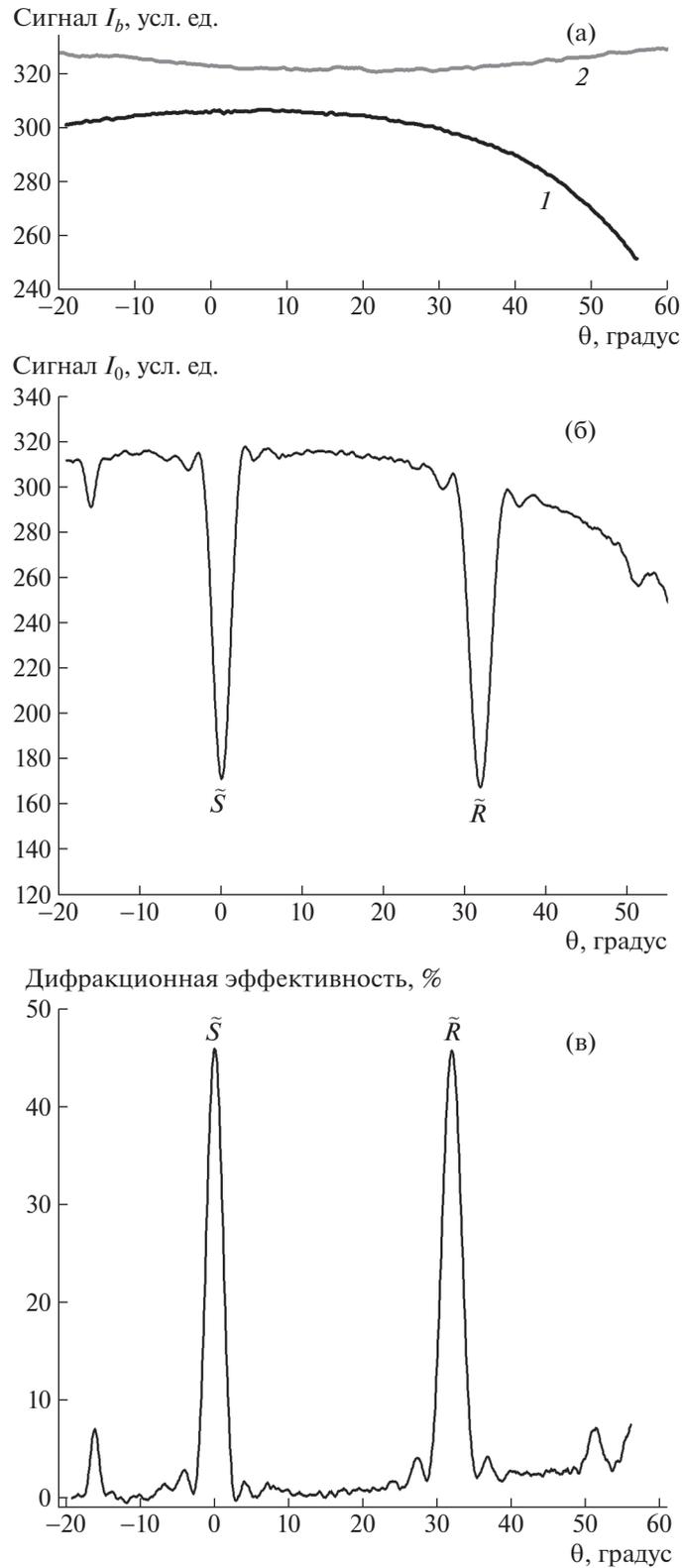


Рис. 3. Графики сигналов: а –  $I_b(\theta)$ , б –  $I_0(\theta)$ , в –  $\eta(\theta)$  – в зависимости от угла падения зондирующего пучка  $\theta$ .

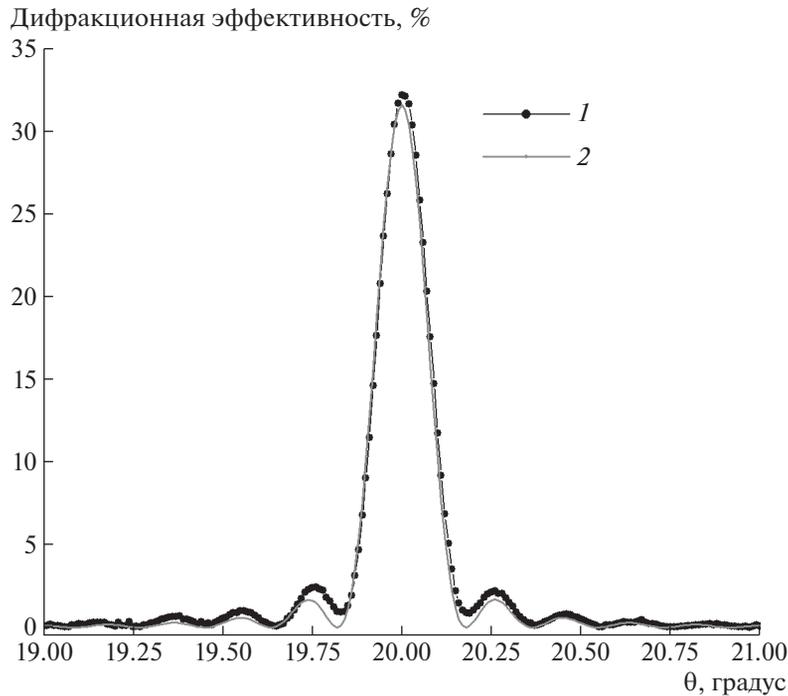


Рис. 4. Пример экспериментальной (1) и теоретической (2) характеристик угловой селективности пропускающей голографической решетки.

Теоретический вид характеристики угловой селективности объемной пропускающей чисто фазовой голограммы описывается формулами Когельника [5]:

$$\eta(\theta) = \frac{\sin^2(\xi^2(\theta) + v^2)^{1/2}}{(\xi^2(\theta) + v^2)}, \quad (3)$$

где

$$v = \frac{\pi \Delta n T}{\lambda_0 (C_R C_S)^{1/2}}, \quad \xi(\theta) = \frac{T \vartheta(\theta)}{2 C_S},$$

$$\vartheta(\theta) = (\theta - \theta_b) K \cos \theta_b, \quad C_S = C_R = \cos \theta_R,$$

$$K = 2\pi/d, \quad d = \frac{\lambda_0}{2\bar{n} \sin \theta_b}, \quad \theta_b = \frac{|\theta_R| + |\theta_S|}{2},$$

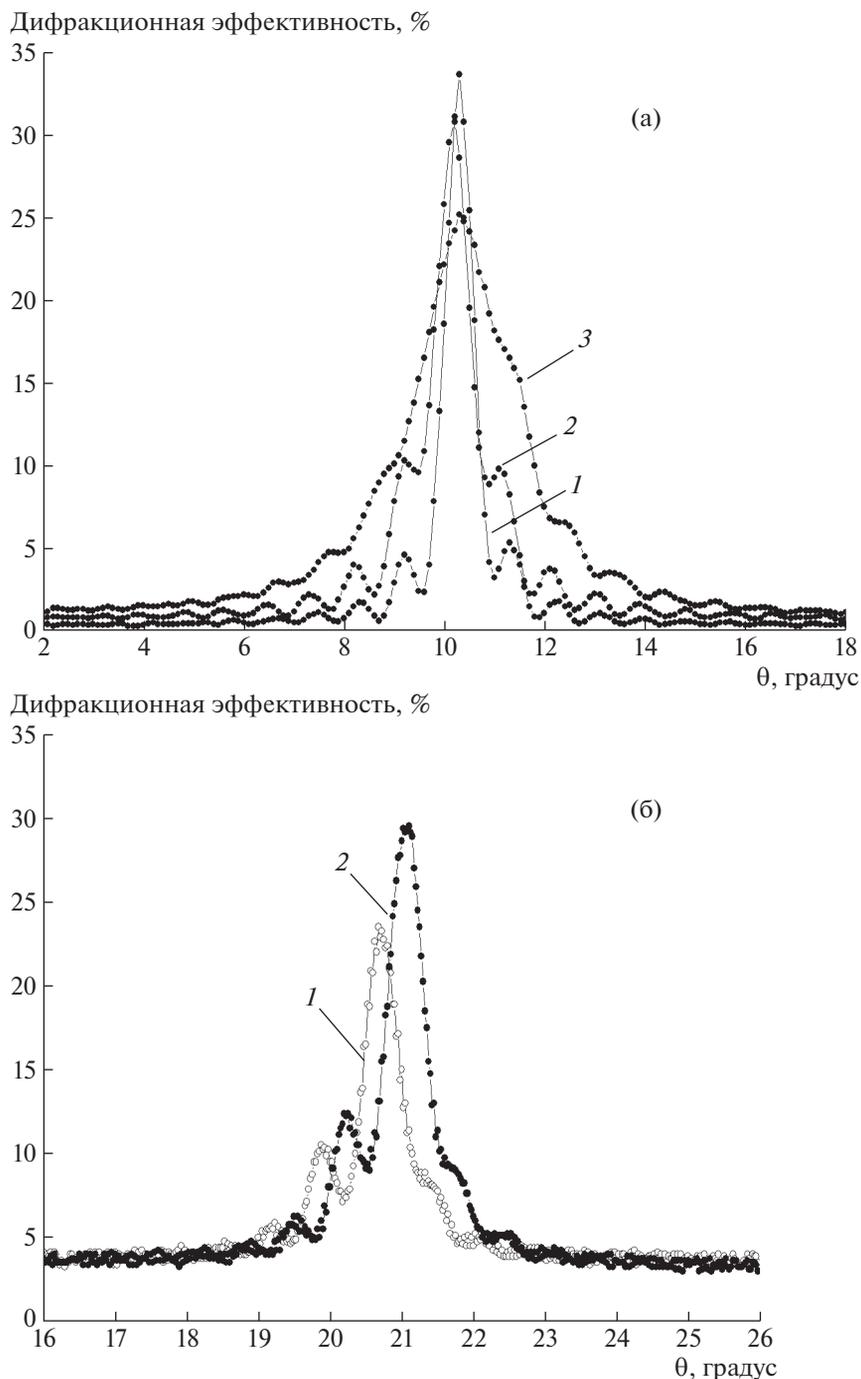
здесь  $\theta_b$  – угол Брэгга в среде;  $\theta$ ,  $\theta_R$ ,  $\theta_S$  – углы падения зондирующего, опорного и предметного пучков в среде;  $\lambda_0$  – длина волны в воздухе;  $\bar{n}$  и  $\Delta n$  – среднее значение и модуляция показателя преломления светочувствительной среды;  $T$  – толщина голограммы. Из формулы (3) следует, что характеристика у.с. имеет осциллирующий вид с огибающей кривой, зависящей от расстройки условий Брэгга.

Варьируя указанные параметры фотополимера и условия записи голограмм, можно сравнивать экспериментальные данные исследуемых характеристик с их теоретическими моделями.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Разработанные стенды использованы при исследовании свойств г.ф.п.м., изготовленных в Новосибирском институте органической химии СО РАН [12]. Изучались их экспозиционные, дифракционные, спектральные характеристики, степень усадки и однородности пространственной структуры голограмм. Значительный объем данных о свойствах фотополимера получен из анализа характеристик у.с. Так, например, на рис. 4 показана экспериментальная характеристика у.с. пропускающей голографической решетки (кривая 1), зарегистрированной на малоусадочных толсто-слойных г.ф.п.м. [13].

Запись голограмм проводилась с помощью He–Ne-лазера (длина волны 632.8 нм) по симметричной схеме с формированием ненаклонной голографической решетки при  $\theta_R = +20^\circ$ ,  $\theta_S = -20^\circ$ . Для сравнения приведена также теоретическая характеристика у.с. (кривая 2), рассчитанная по формулам (3) для величин  $T = 450$  мкм и  $\Delta n = 0.00026$ , обеспечивающих сходство кривых по критерию среднеквадратического отклонения с точностью примерно 5%. В отличие от рис. 3в, здесь показан диапазон сканирования зондирующего пучка, относящийся к области дифракции лишь одного пучка. Отчетливая картина боковых лепестков свидетельствует о том, что структура голографической решетки фактически однородна по всей глубине, проявления затухания света

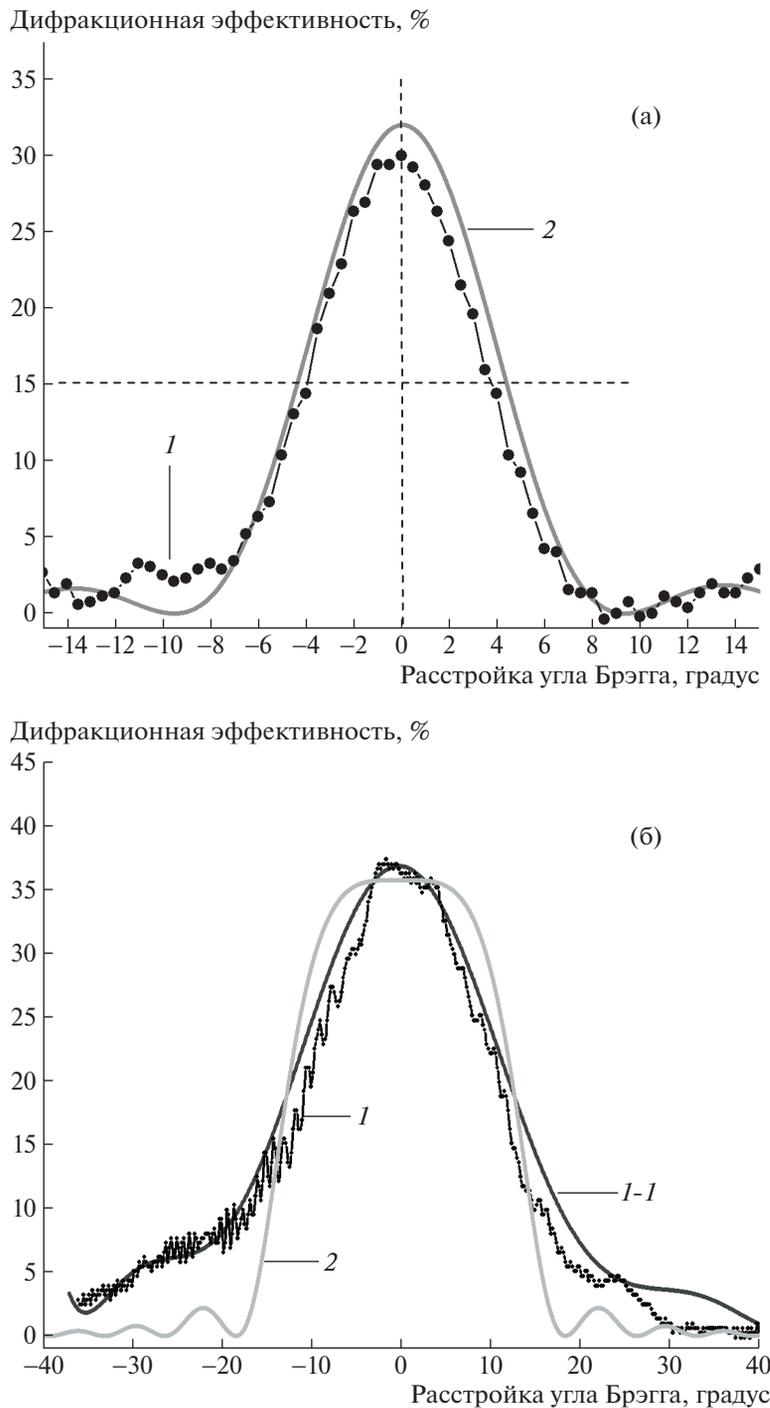


**Рис. 5.** Характеристики угловой селективности голограмм при различных значениях энергии записи: **а** – с ненаклонной решеткой (1 – 100 мДж/см<sup>2</sup>, 2 – 200 мДж/см<sup>2</sup>, 3 – 400 мДж/см<sup>2</sup>); **б** – с наклонной решеткой (1 – 120 мДж/см<sup>2</sup>, 2 – 200 мДж/см<sup>2</sup>).

внутри голограммы и усадки толщины регистрирующего слоя незначительны. Из рис. 4 также видно, что угловой интервал, в котором сосредоточен основной экстремум у.с., составляет примерно  $\pm 0.17^\circ$ . Это означает, что в диапазоне вариации угла падения опорного пучка от  $20^\circ$  до  $40^\circ$  количество наложенных голограмм с возможно-

стью их селективного считывания может превышать 50, что открывает перспективы применения г.ф.п.м. такого типа в 3D-оптической памяти.

На рис. 5а приведены характеристики у.с. пропускающих голограмм с ненаклонной решеткой, полученных на г.ф.п.м., отличающихся от описанных выше материалов лучшей светочувстви-



**Рис. 6.** Экспериментальные (*1*, *1-1*) и расчетные (*2*) графики контуров угловой селективности пропускающей (*а*) и отражательной (*б*) голограмм.

тельностью и большей амплитудой фотоиндуцированного изменения показателя преломления.

Видно, что по мере увеличения энергии записи от 100 до 200 мДж/см<sup>2</sup> (кривые *1* и *2* соответственно) величина дифракционной эффективности увеличивается, но вид характеристики угловой селективности резко меняется: минимумы

интенсивности исчезают (т.е. селективные свойства ухудшаются), контур характеристики уширяется, в ряде случаев наблюдается ее асимметрия. При увеличении энергии записи до 400 мДж/см<sup>2</sup> (кривая *3*) рост максимального значения дифракционной эффективности прекращается, периодический вид характеристики теряется, ее контур сильно

уширяется, селективные свойства полностью теряются. Значение угла Брэгга остается практически неизменным. Видно, что данные г.ф.п.м. не пригодны для использования в системах 3D-оптической памяти или иных приложениях (дисплеи, сенсоры), требующих высокой у.с. и ее воспроизводимости.

На рис. 5б показан график характеристики у.с. для голограммы с наклонной решеткой (углы падения предметного и опорного пучков в воздухе равны  $0^\circ$  и  $20^\circ$ ). Кривые 1 и 2 соответствуют энергии записи 120 и 200 мДж/см<sup>2</sup>. Установлено, что в этом случае происходит изменение угла Брэгга (увеличение с  $20.5^\circ$  до  $21^\circ$ ), и график у.с. приобретает несимметричный вид. Данный факт объясняется усадкой толщины регистрирующего слоя г.ф.п.м. из-за фотохимических процессов при записи и постобработке голограмм, при этом увеличивается степень наклона изофазных плоскостей голографической решетки. В целом, наблюдаемые искажения контура у.с. можно объяснить неоднородной усадкой г.ф.п.м. по глубине голограммы, приводящей к изменениям периода и направления вектора решетки [6].

В ряде приложений, таких как защитные голограммы, экраны дополненной реальности, голографические прицелы, востребованы тонкослойные фотополимеры [1, 2, 14]. На рис. 6а изображены экспериментальный и расчетный (кривые 1 и 2 соответственно) графики контура угловой селективности пропускающей голограммы, изготовленной с использованием г.ф.п.м. такого типа. Наилучшее сходство кривых получено при условии, что  $T \approx 10$  мкм и  $\Delta n \approx 0.012$ . Ширина контура на его полувысоте составила примерно  $9^\circ$ , что удовлетворяет требованиям, например, голографических коллиматорных прицелов [15]. Вместо значений угла падения зондирующего пучка на графиках указано отклонение от расчетного положения угла Брэгга для данной голограммы.

В отличие от известных стендов [2, 3], представленное в данной работе устройство позволяет измерять характеристики у.с. объемных не только пропускающих, но и отражательных голограмм, у которых дифрагированный пучок распространяется в обратном направлении относительно зондирующего излучения.

На рис. 6б показан пример такой характеристики: кривые 1, 1-1, 2 — соответственно экспериментальные данные, их аппроксимация полиномом седьмой степени и теоретический график, полученный по формулам [5], в предположении, что  $T \approx 10$  мкм и  $\Delta n \approx 0.014$ , длина волны записи  $\lambda_0 = 639$  нм,  $\theta_R = 0^\circ$ ,  $\theta_S = 180^\circ$ . Видно, что ширина контура у.с. значительно больше, чем у пропускающих голограмм, и на полувысоте составляет примерно  $25^\circ$ . Боковые лепестки кривой 1 сильно сглажены (в сравнении с теоретической кривой 2),

что обусловлено ранее упомянутыми искажениями пространственной структуры голографической решетки, в основном, из-за усадки г.ф.п.м. Частые осцилляции значений экспериментальных данных на этом графике можно объяснить паразитной интерференцией переотражений зондирующего пучка на границе “подложка — отражательная голограмма”.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена модернизация аппаратных и программных средств стенда для регистрации характеристик угловой селективности пропускающих и отражательных голограмм: реализован информативный интерфейс приложения для разных операционных систем компьютера, использован современный канал передачи команд управления оборудованием и данных измерений; отъюстирована ТМ-поляризация зондирующего излучения; в методике измерений полезного сигнала учтено изменение величины отражения света при варьировании угла падения зондирующего пучка. Получены и проанализированы экспериментальные данные характеристик угловой селективности для голографических решеток с произвольными значениями параметров записываемых пучков в толстослойных и тонких фотополимерах, в частности, установлено, что уширение и асимметрия контура у.с. в основном связаны с неоднородной усадкой г.ф.п.м. по глубине голограммы, приводящей к изменениям периода и направления вектора голографической решетки.

Стенд может быть использован при исследовании свойств новых регистрирующих материалов, в том числе фотополимерных, и голограмм на их основе, а также в образовательных проектах при изучении явлений дифракции света на объемных решетках.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках НИР “Развитие высокоинформативных оптических методов исследования состава и микроструктуры материалов и веществ” по государственному заданию № 121022000126-9 (проект АААА-А21-121011490013).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vorzobova N., Sokolov P. // *Polymers*. 2019. V. 11. № 12. P. 2020. <https://doi.org/10.3390/polym11122020>
2. Bruder F., Fäcke T., Rölle T. // *Polymers*. 2017. V. 9. № 10. P. 472. <https://doi.org/10.3390/polym9100472>
3. Sullivan A., Alim M., Glugla D., McLeod R. // *Proc. of SPIE*. 2017. V. 10233. P. 102330B. <https://doi.org/10.1117/12.2265865>

4. *Pandey N., Naydenova I., Martin S., Toal V.* // Optics Lett. 2008. V. 33. №. 17. P. 1981.  
<https://doi.org/10.1364/ol.33.001981>
5. *Kogelnik H.* // The Bell System Technical J. 1969. V. 48. № 9. P. 2909.  
<https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01198.x>
6. *Pen E.F., Rodionov M.Y., Shelkovnikov V.V.* // J. Optical Technology. 2006. V. 73. № 7. P. 475.  
<https://doi.org/10.1364/JOT.73.000475>
7. *Litvintsev V., Pen E., Slobodchikov L., Shelkovnikov V.* // Proc. of the IASTED International Conference “Automation, Control, and Information Technology”. 2002. P. 79.
8. [www.standa.lt/files/usb/8SMC1-USBhF%20User%20Manual.pdf](http://www.standa.lt/files/usb/8SMC1-USBhF%20User%20Manual.pdf)
9. [ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/doc2502.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/doc2502.pdf)
10. [ftdichip.com/products/ft232bl/](http://ftdichip.com/products/ft232bl/)
11. *Sáez J., Atencia J., Chemisana D., Collados M.* // Optics Express. 2016. V. 24 (6). P. A720.  
<https://doi.org/10.1364/OE.24.00A720>
12. *Шелковников В.В., Васильев Е.В., Русских В.В., Эктובה Л.В., Пен Е.Ф.* // Патент на изобретение № 2552351 РФ // Оpubл. 10.06.2015. Бюл. № 16.
13. *Shelkovnikov V.V., Russkikh V.V., Vasiliev E.V., Kovalevskii V.I., Pen E.F.* // J. Appl. Spectroscopy. 2005. V. 72. P. 599.  
<https://doi.org/10.1007/s10812-005-0119-0>
14. *Bruder F., Frank J., Hansen S., Lorenz A., Manecke X., Meisenheimer R., Mills J., Pitzer L., Pochorovski I., Rölle T.* // Proc. of SPIE. 2021. V. 11710. P. 1171003.  
<https://doi.org/10.1117/12.2578353>
15. *Бобринев В.И., Ковалев М.С., Одинокоев С.Б., Сагастьян Г.Р.* // Изв. вузов. Сер. Физика. 2015. Т. 58. № 10. С. 87.