

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-05-50-62

УДК 535.421, 535.417

Дифракционная эффективность и эффект формфактора голограмм (обзор)

АЛЕКСЕЙ ЮРЬЕВИЧ МЕШАЛКИН¹, СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ШОЙДИН²✉¹Институт прикладной физики, Молдавский государственный университет, Кишинев, Молдова²Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия¹alexei.meshalkin@ifa.md<https://orcid.org/0000-0003-0971-140X>²shoydin@ssga.ru<https://orcid.org/0000-0002-2186-7928>

Аннотация

Предмет исследования. Влияние эффекта формфактора на дифракционную эффективность голограмм в различных голографических материалах. **Цель работы.** Обзор публикаций, посвященных анализу дифракционной эффективности двухмерных и трехмерных голограмм в зависимости от формы пучков записывающего излучения. **Метод.** Голографическое экспонирование фоточувствительных сред позволяет зарегистрировать сформированную интерференционную картину в среде в виде периодической модуляции показателя преломления, поверхностного рельефа, коэффициента оптического поглощения либо других параметров. Измерение и анализ дифракционной эффективности показал ее зависимость как от степени модуляции регистрирующей среды, так и от формы пучка записывающего излучения. **Основные результаты.** По результатам обзора можно сделать вывод о важности учета перекрестного взаимодействия двух нелинейных эффектов — нелинейности дифракционной эффективности и нелинейности экспозиции по полю голограммы. Проявления этого перекрестного эффекта были замечены давно, но часто объяснялись другими причинами. Его некоторая «скрытность» может быть объяснена проявлением только при наличии одновременно двух указанных нелинейностей с наличием в них локальных максимумов. Во всех остальных случаях эффект формфактора исчезает. Показаны области проявления эффекта формфактора в голографических экспериментах как эффекта, порождающего ограничения основных «силовых» параметров голограмм, таких как дифракционная эффективность и оптимальная экспозиция. Проявление эффекта формфактора является имманентно присущим голографической записи сложных изображений, поскольку его нельзя устранить полностью, а можно только ослабить на начальном участке экспозиции. **Практическая значимость.** Наряду с перечисленными выше ограничительными свойствами эффект формфактора позволяет с высокой точностью измерять кинетику голограмм прямо в процессе их записи без привлечения дополнительного сложного оборудования, что было запатентовано. Его влияние может быть значительным: формфактор в голографии нельзя отнести к малым поправкам основного результата. Он проявляется в основных «силовых» характеристиках аналогично фундаментальному проявлению формфактора в гравитационных взаимодействиях тел неправильной формы или в межтомных взаимодействиях.

Ключевые слова: голография, интерференция, голографические интерференционные полосы, дифракция Брэгга, дифракция Рамана–Ната, дифракционная эффективность, формфактор

Благодарность: экспериментальная работа проводилась при финансовой поддержке Национального агентства по исследованиям и разработкам Республики Молдова в рамках научных проектов № 20.80009.5007.03 и № 21.80013.5007.1М.

Ссылка для цитирования: Мешалкин А.Ю., Шойдин С.А. Дифракционная эффективность и эффект фактора формы голограмм (обзор) // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 5. С. 50–62. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-05-50-62>

Код OCIS: 090.1760

Diffraction efficiency and the formfactor effect of holograms (review)

ALEXEI YU. MESHALKIN¹, SERGEY A. SHOYDIN²✉

¹*Institute of Applied Physics, State University of Moldova, Chisinau, Moldova*

²*Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia*

¹*alexei.meshalkin@ifm.md*

<https://orcid.org/0000-0003-0971-140X>

²*shoydin@ssga.ru*

<https://orcid.org/0000-0002-2186-7928>

Abstract

Subject of study. Influence of the formfactor effect on the diffraction efficiency of holograms in various holographic materials. **Aim of study.** To review publications on the analysis of the diffraction efficiency of two-dimensional and three-dimensional holograms depending on the shape of the recording beams. **Method.** Holographic exposure of photosensitive media makes it possible to register the formed interference pattern in the medium in the form of periodic modulation of the refractive index, surface relief, optical absorption coefficient, or other parameters. The measurement and analysis of the diffraction efficiency showed its dependence both on the degree of modulation of the recording medium and on the shape of the recording beams. **Main results.** Based on the results of the review, it can be concluded that it is important to take into account the cross interaction of two nonlinear effects — the nonlinearity of the diffraction efficiency and the exposure nonlinearity over the hologram field. Manifestations of this cross-effect have been noticed and by other authors, but often explained by other reasons. Its some non-detectability and hidden effect can be explained by the manifestation only in the presence of two indicated nonlinearities simultaneously with the presence of local maxima in them. In all other cases the formfactor effect disappears. The areas of manifestation of the formfactor effect in holographic experiments are shown, as an effect that generates restrictions on the main "power" parameters of holograms, such as diffraction efficiency and optimal exposure. The manifestation of the formfactor effect is immanent in the holographic recording of complex images, since it cannot be eliminated completely, but can only be weakened in the initial section of the exposure. **Practical significance.** Along with the indicated restrictive properties, the formfactor effect makes it possible in-situ measuring the kinetics of holograms recording with high accuracy, without involving additional complex equipment. This method was patented. Its influence can be significant; the formfactor in holography cannot be attributed to small corrections of the main result. It manifests itself in the main, "power" characteristics, similar to the fundamental manifestation of the formfactor in the gravitational interactions of irregularly shaped bodies or in interatomic interactions.

Keywords: holography, interference, holographic interference fringes, Bragg diffraction, Raman–Nath diffraction, diffraction efficiency, formfactor

Acknowledgment: the experimental work was carried out with the financial support of the National Agency for Research and Development of the Republic of Moldova within the framework of scientific projects № 20.80009.5007.03 and № 21.80013.5007.1M.

For citation: Meshalkin A.Yu., Shoydin S.A. Diffraction efficiency and the formfactor effect of holograms (review) [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 5. P. 50–62. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-05-50-62>

OCIS code: 090.1760

ВВЕДЕНИЕ

Области применения дифракционной оптики достаточно широки: от биотехнологии до лазерной печати, от обработки материалов до бесконтактной экспертизы технической оптики и оптической метрологии. Благодаря включению дифракционных оптических элементов в траекторию распространения лазерного пучка можно гибко контролировать профиль пучка и при необходимости менять его в соответствии с требованиями приложения. Штрихи, нанесенные на поверхность решетки, или дифракционная структура в оптическом материале действуют подобно оптическому маршрутизатору. Технические особенности и методы изготовления дифракционной оптики открывают широкий спектр проектирования и реализации микрорельефов. Нанесением определенного профиля на решетку можно воплотить практически любую идею трансформации волнового фронта. Дифракционная оптика по свойствам подобна преломляющим оптическим компонентам, а значит, может применяться в качестве более компактного и бюджетного их аналога.

Даже простейшие элементы дифракционной оптики, являющиеся самой каноничной и распространенной моделью оптического прибора для наблюдения, изучения и использования явления дифракции, очень сложны в изготовлении классическим нарезным способом. Нарезные методы изготовления решеток требуют длительной подготовки: до 20 часов холостого хода для стабилизации всех узлов машины и до 7 суток непосредственного нарезания поверхностного профиля, хотя время нанесения одного штриха решетки составляет 2–3 с. Требование высокой точности нарезки дифракционных решеток и трудность их массового изготовления требуют поиска более технологически простых методов изготовления и репликации. Разрабатываемые технологии создания прецизионных копий (реплик) эталонных рельефных решеток позволяют массово мультиплицировать решетки с пониженной стоимостью. Другие профили решеток, более сложные, например пилообразные, дающие максимальную дифракционную эффективность (ДЭ), еще более трудны в изготовлении и в основном недоступны классическим нарезным технологиям.

Другим методом изготовления решеток является голографический, позволяющий опти-

ческим бесконтактным методом сформировать решетку в фоточувствительной среде. С помощью данного метода, а именно проецируя интерференционную картину двух лазерных когерентных лучей на фоточувствительную среду, формируется голографическая дифракционная решетка за счет модуляции оптических параметров среды (показателя поглощения или преломления, толщины слоя и др.). Такие решетки могут иметь более сложные формы, образуя различные дифракционные оптические элементы, включая киноформы, спектральные селекторы, голографические фокусирующие элементы с особыми свойствами, разные оптические элементы, зачастую не имеющие аналогов в классической оптике. Основным критерием качества, или эффективности, такой решетки является ДЭ, определяемая как отношение интенсивности дифрагированного пучка к интенсивности падающего на решетку пучка. При этом зависимость ДЭ от модуляции оптических параметров определяется как типом формируемой решетки (объемная или плоская), так и типом модулируемого параметра среды и его значения (амплитудная, фазовая, смешанная амплитудно-фазовая, рельефно-фазовая). Характер ДЭ существенно зависит как от параметров материала и решетки, записанной в материале (показатель преломления и коэффициент поглощения материала, степень модуляции показателя преломления, толщина слоя, период, глубина и форма профиля решетки), так и от длины волны падающего света. Ввиду того что при голографической записи решеток формируется синусоидальная форма профиля (из-за синусоидального распределения интенсивности в интерференционной картине), дифракция света на решетках с таким профилем может быть сведена к двум предельным случаям: к режиму дифракции Рамана–Ната (для тонких решеток) и Брэгга (для объемных по критерию Клейна [2] решеток). Аналитическую зависимость ДЭ тонких решеток впервые представили Раман и Нат в работе [3], в честь которых и был назван данный режим дифракции. Для объемных решеток данную зависимость получил Когельник в предложенной теории связанных волн [4], в которой рассматривается дифракция света на трехмерной дифракционной решетке с простой структурой, образованной двумя плоскими волнами.

Дифракция здесь выражена не только качественно, но и количественно — зависимостью ДЭ объемной голограммы от таких параметров, как глубина модуляции коэффициентов преломления и поглощения света, толщина фоточувствительного слоя, интенсивность и направление опорного и объектного пучков при получении голограммы. В каждом режиме дифракции можно еще выделить режимы дифракции на пропускание и отражение. Для всех этих режимов определены аналитические зависимости ДЭ (η_m) дифракционного порядка m от параметров решетки (глубина фазовой модуляции $\Delta\varphi$ (в радианах), фотостимулированная модуляция показателя преломления Δn , глубина профиля поверхностного рельефа Δd , периода решетки Λ) и длины волны падающего света λ [5].

Режим дифракции Рамана–Ната

- в проходящем свете $\eta_m = J_m^2(\Delta\varphi/2)$ [5], где J_m — функция Бесселя m -порядка. В случае поверхностно-рельефной решетки $\Delta\varphi = (2\pi/\lambda)[\Delta d(n-1)]$, в случае фазовой решетки с модуляцией показателя преломления $\Delta\varphi = (2\pi/\lambda)(\Delta n d)$, где λ — длина волны считывающего излучения, n — показатель преломления фоточувствительного слоя, d — толщина фоточувствительного слоя.

- в отраженном свете $\eta_m = J_m^2(\Delta\varphi/2)$ [5], где $\Delta\varphi = (2\pi/\lambda)(2\Delta d)$.

Режим дифракции Брэгга

- в проходящем свете $\eta_1 = \sin^2(\Delta\varphi/2)$ [6], где $\Delta\varphi = (2\pi/\lambda)(\Delta n d)$.

- в отраженном свете $\eta_1 = \tanh^2(\Delta\varphi/2)$ [7], где \tanh — гиперболический тангенс, $\Delta\varphi = (2\pi/\lambda)(\Delta n d)$.

Как видно из рис. 1, значения ДЭ при дифракции Брэгга в проходящем свете и дифракции Рамана–Ната претерпевают периодическое изменение, варьируясь от минимального до максимального значений (100% в случае дифракции Брэгга и 33,8% — дифракции Рамана–Ната). В то же время дифракция Брэгга в отраженном свете достигает максимального значения (100%) и с дальнейшим увеличением глубины фазовой модуляции не претерпевает изменений, оставаясь максимальной. Следует отметить, что всякий раз, когда аргумент функций $\sin^2(\Delta\varphi/2)$ или $J_m^2(\Delta\varphi/2)$ является их корнем, соответствующий дифракционный порядок исчезает полностью.

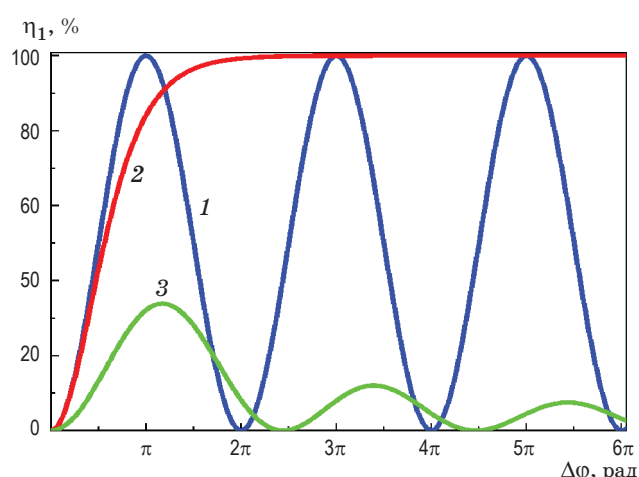


Рис. 1. Зависимости ДЭ первого порядка η_1 для всех типов дифракции от глубины фазовой модуляции $\Delta\varphi$. 1 — дифракция Брэгга в проходящем свете, 2 — дифракция Брэгга в отраженном свете, 3 — дифракция Рамана–Ната в проходящем свете

Fig. 1. Dependences of the first order diffraction efficiency η_1 for all types of diffraction on the phase modulation depth $\Delta\varphi$. (1) Bragg diffraction in transmitted light, (2) Bragg diffraction in reflected light, (3) Raman–Nath diffraction in transmitted light

Цель работы — обзор публикаций, посвященных анализу дифракционной эффективности двухмерных и трехмерных голограмм в зависимости от формы пучков записывающего излучения.

ЭФФЕКТ ФОРМФАКТОРА ГОЛОГРАММЫ

Несмотря на довольно длительное изучение кинетики ДЭ различных голографических материалов, особенно активно развивающихся в последнее время, только в 2016 г. [8, 9] было предложено объяснение характера экспериментально-наблюдаемой кинетики ДЭ, отличной от теоретической зависимости ДЭ дифракции Брэгга в проходящем свете. На рис. 2 приведены полученная экспериментально и теоретическая кинетики ДЭ при записи объемных брэгговских голограмм, где наблюдаются как смещение первого пика ДЭ в область большей экспозиции, так и значительное снижение максимально достижимого значения ДЭ.

Из сравнения кривых 1 и 2 видно, что они имеют почти одинаковый вид вплоть до точки первого максимума так, что при смещении кривой 2 влево вверх для совмещения их первых максимумов кривые 1 и 2 практически

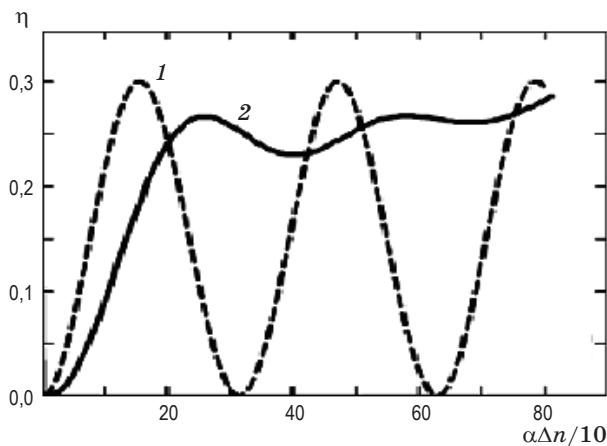


Рис. 2. Кривые кинетики ДЭ брэгговских голограмм однородных пучков теоретическая (1), уменьшенная в 3,33 раза для удобства сравнения, и голограммы, записанной гауссовыми пучками (2), [8]. Параметр α здесь учитывает толщину фоточувствительного слоя и геометрию записи в объемном голографическом материале. В экспериментах он был одинаков в обоих случаях

Fig. 2. The diffraction efficiency kinetics of (1) Bragg holograms of homogeneous beams theoretical, reduced by 3.33 times for convenience of comparison, and of a (2) hologram recorded Gaussian beams [8]. Here, the parameter α takes into account the thickness of the photosensitive layer and the recording geometry in the bulk holographic material.

In experiments, α was the same in both cases

совпадают. Это послужило основанием отображать на самом важном участке — от нуля до первого максимума, кинетику роста ДЭ голограммы, записываемой гауссовыми пучками так же, как она выглядит для плоских пучков $\eta = \Omega \sin^2[\Psi(\Delta\varphi/2)]$, но только с корректирующими коэффициентами проекционных трансформаций Ψ и Ω . Коэффициент Ψ был назван формфактором — аналогично фактору формы объектов сложной формы при гравитационном взаимодействии. Его влияние ограничивает и максимально достижимые значения ДЭ $\Omega = \eta_{\max}$. Формфактор Ψ равен отношению экспозиций, при которых ДЭ достигает максимума при равномерном поле записи (E_{unif}), и нелинейного (E_{nonlin}), т.е. $\Psi = E_{\text{unif}}/E_{\text{nonlin}}$.

Для брэгговских голограмм, записанных гауссовыми пучками, данный параметр составил $\Psi = 0,6$ [9]. Оценка влияния формфактора позволяет уточнить достигаемую максимальную среднюю ДЭ голограмм в практических применениях.

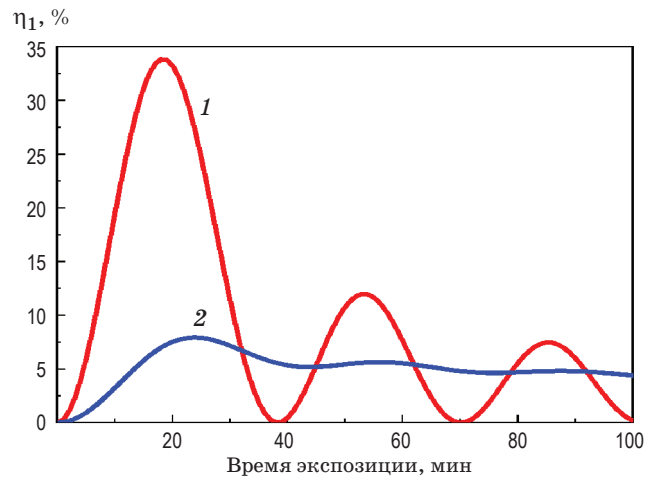


Рис. 3. Зависимости ДЭ первого порядка двухмерных (тонких) решеток от времени экспозиции, записанных равномерными (1) и гауссовыми (2) пучками

Fig. 3. Dependences of the first-order diffraction efficiency on exposure time for two-dimensional (thin) gratings, recorded by (1) uniform and (2) Gaussian beams

В последующих работах [10, 11] зависимость ДЭ от формфактора голограмм была продемонстрирована и для случая дифракции Рамана–Ната (как в пропускании, так и в отражении), при этом параметр Ψ составил 0,75 [11]. На рис. 3 приведены экспериментальные кинетики ДЭ голограмм, записанных равномерными и гауссовыми пучками.

Необходимо подчеркнуть, что явление зависимости ДЭ от равномерности модулируемого параметра голограммы, названное первыми его исследователями эффектом формфактора голограммы, наблюдается и в работах других авторов.

ОБСУЖДЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ «ФОРМФАКТОР»

Так, например, в работе [12] показано, что экспериментально-наблюдаемая ДЭ объемных голограмм достигает только 90% с дальнейшим снижением эффективности. Зависимость, приведенная на рис. 4, была получена на фотополимере с высокой модуляцией показателя преломления ($\Delta n = 0,0077$) и объясняется авторами эффектом перемодуляции, при котором дальнейшее увеличение модуляции показателя преломления приводит к снижению ДЭ. Максимальное значение ДЭ, равное 90%,

как раз может быть объяснено проявлением эффекта формфактора.

Достигнутые высокие значения ДЭ, очевидно, объясняются локализацией измерений у авторов [12] в области небольшого центрального участка гауссовой голограммы.

Наблюдение влияния формфактора на голографическую запись также можно увидеть

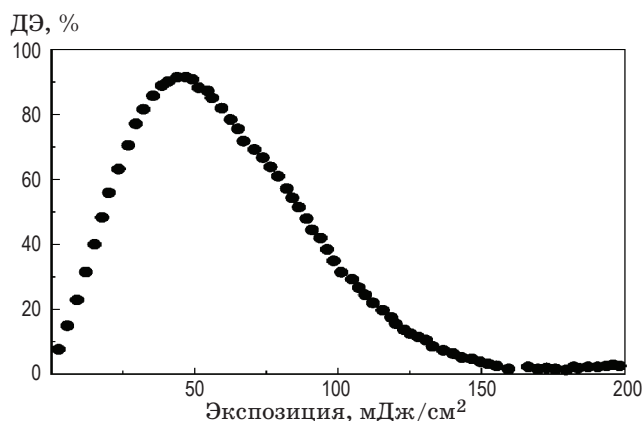


Рис. 4. Экспериментально-наблюдаемая зависимость ДЭ толстой решетки от экспозиции [12]

Fig. 4. Experimentally observed dependence of the diffraction efficiency of a thick grating on exposure [12]

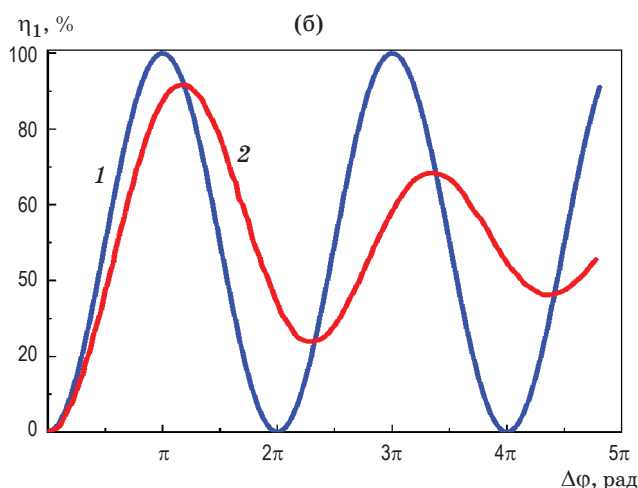
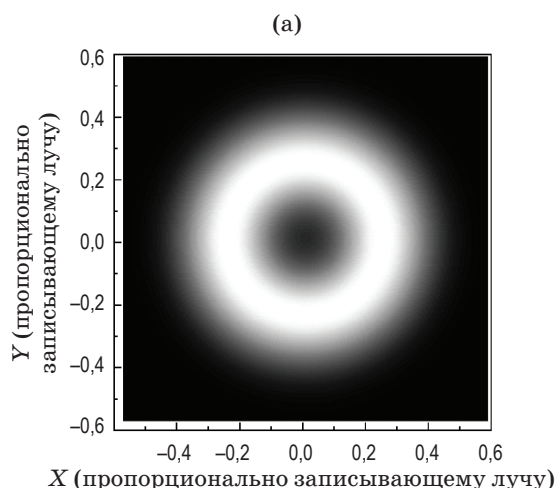


Рис. 5. Дифракционная картина решетки и кинетика изменения ДЭ при достижении эффекта перемодуляции. Фотография дифракционного порядка записанной решетки при достижении эффекта перемодуляции (а), зависимости дифракционной эффективности от глубины фазовой модуляции при записи решеток равномерными (1) и гауссовыми (2) пучками [13] (б). Диаметр пучка считывания составлял половину от диаметра пучка записи

Fig. 5. The diffraction pattern of the grating and the kinetics of the change in the diffraction efficiency upon reaching the overmodulation effect. (a) A photograph of the diffraction order of the recorded grating when the overmodulation effect is achieved, (b) the dependences of the diffraction efficiency on the depth of phase modulation when recording gratings with (1) uniform and (2) Gaussian beams [13]. The read beam diameter was half that of the write beam

в работе [13], где при достижении эффекта перемодуляции дифракционная картина начинает «структурироваться» с образованием кольцеобразной структуры (рис. 5). Приведено сравнение кинетик записи решеток гауссовыми и равномерными пучками и показано, что ДЭ «гауссовой» решетки отличается от ДЭ «равномерной» решетки и сильно зависит от неравномерности гауссова пятна и/или отношения диаметров записывающего/считывающего пучков. Данное сравнение также доказывает влияние формфактора голограмм на ДЭ.

В работе [14] авторы исследуют эффективность дифракции Брэгга в зависимости от экспозиции в случае гауссовых пучков, где также отмечают, что в соответствии со степенью неравномерности пучка по полю (гауссов пучок) ДЭ может сильно снижаться, что также объясняется формфактором голограммы.

В работе [15] проведена экспериментальная запись голографических объемных решеток с пятью различными экспозициями (от 300 до 600 мДж/см²). Методом латерального сканирования ДЭ считывающим пучком, составляющим 1/6 диаметра записывающего пучка, было выявлено, что при экспозиции выше 330 мДж/см² происходит перемодуляция ДЭ,

что позволяет с помощью однократной записи гауссовым пучком оценить фотоотклик материала. Как видно из рис. 6, при экспозиции выше 330 мДж/см^2 в дифракционном пятне появляется провал интенсивности в центре, обусловленный эффектом формфактора.

В публикациях [16, 17] продемонстрирована динамика эволюции ДЭ тонких рельефных решеток, записанных на азополимере. Как видно из рис. 7, наблюдается структурирование дифракционной картины (рис. 7б) при различной экспозиции и соответствующих значениях ДЭ и глубины профиля рельефа. На начальном этапе (5 мин) наблюдается рост глубины рельефа и ДЭ, при этом дифракционное пятно достаточно яркое по всей площади. На втором этапе (25 мин) глубина рельефа продолжает расти, однако ДЭ при этом уже падает, а в дифракционном пятне появляется провал в центре. На третьем этапе (45 мин) глубина рельефа по-прежнему растет, ДЭ выходит из нижнего пика и начинает расти, а в дифракционном пятне появляется второй центральный пик (второе кольцо).

В работе [18] приведены результаты регистрации пиксельных голограмм в фоточувствительных слоях на основе азополимеров.

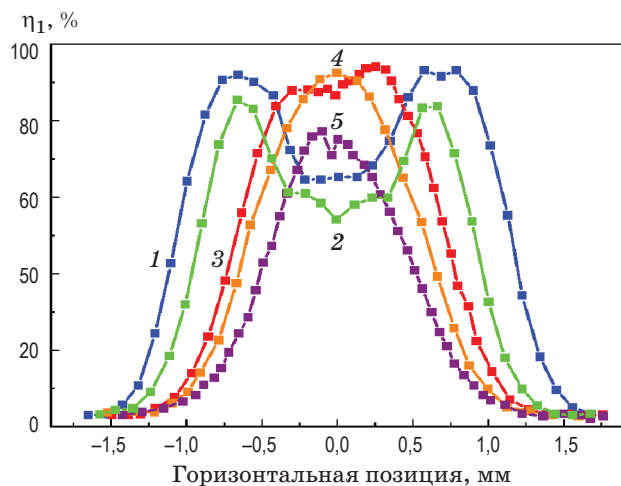


Рис. 6. Латеральное сканирование ДЭ решеток, записанных при экспозициях 600 (1), 430 (2), 360 (3), 330 (4), 300 (5) мДж/см^2 [14]. Диаметры записывающего и считывающего пучков составляли 3,0 и 0,5 мм соответственно

Fig. 6. Lateral scanning of the diffraction efficiency of gratings recorded at exposures (1) 600, (2) 430, (3) 360, (4) 330, and (5) 300 mJ/cm^2 [14]. The diameters of the recording and reading beams were 3.0 and 0.5 mm respectively

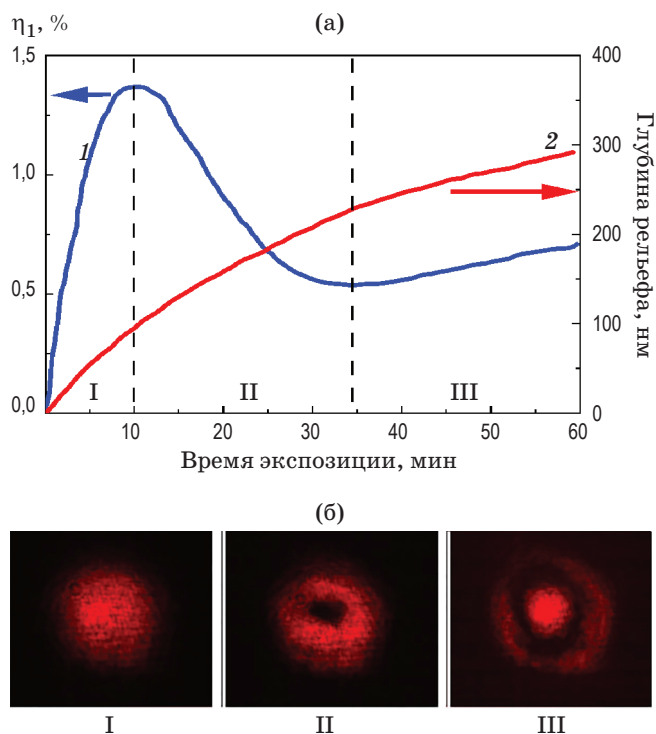


Рис. 7. Эволюция дифракции первого порядка решетки. Кинетика эволюции ДЭ (1) и глубины рельефа (2) в процессе записи рельефных решеток (а). Штриховыми линиями разграничены зоны изменения структуры дифракционных порядков (зоны I, II, III). Фотографии дифракционных картин первого порядка дифракции решетки, записанной при времени экспозиции 5 мин (зона I, гауссов профиль), 25 мин (зона II, структура бублика) и 45 мин (зона III, кольцеобразная структура) [16] (б)

Fig. 7. Evolution of the diffraction of the first order of the grating. (a) Kinetics of the evolution of (1) the diffraction efficiency and (2) relief depth during the recording of surface relief gratings. Dashed lines delimit the zones of changes in the structure of diffraction orders (zones I, II, III). (b) Photographs of first order diffraction patterns of grating diffraction recorded at 5 min (zone I, Gaussian profile), 25 min (zone II, donut structure) and 45 min (zone III, saturn-like structure) [16]

Методом атомно-силовой микроскопии поверхности решеток (рис. 8) было показано, что в зависимости от интенсивности записывающих пучков каждый пиксел голограммы трансформируется из пиксела с гауссовым распределением модуляции поверхностного рельефа (при меньшей интенсивности) в пиксел с провалом интенсивности в центре пятна (при большей интенсивности).

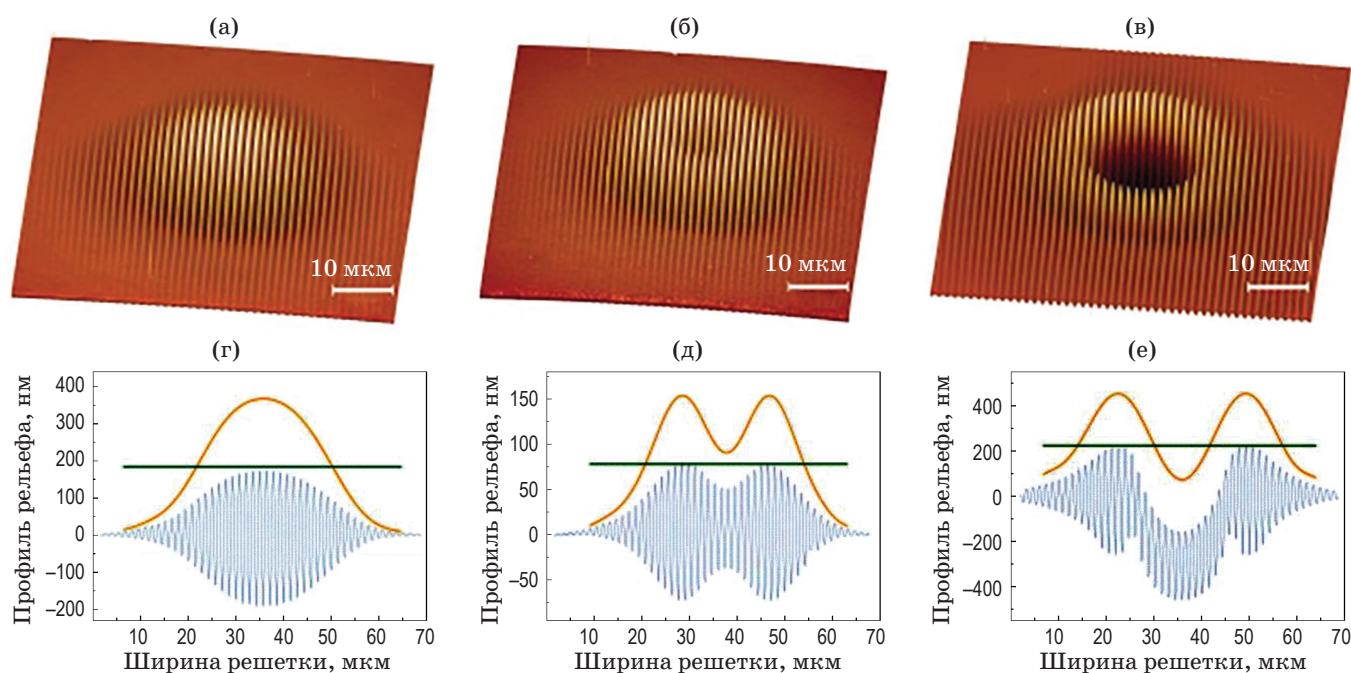


Рис. 8. Изображения поверхностей рельефа (а–в), полученные методом атомно-силовой микроскопии, и профили пикселей (г–е) голограммы, записанной при оптической мощности пучка 2,5 (а, г), 4,0 (б, д) и 8,0 (в, е) мВт [18]. Мощность пучка 2,5 мВт соответствует освещенности 130 Вт/см^2 на поверхности пленки

Fig. 8. (а–в) Pixel images obtained by atomic force microscopy and (г–е) profiles of the recorded hologram with optical power of recording beam (а, г) 2.5, (б, д) 4.0, and (в, е) 8.0 mW [18]. 2.5 mW of optical power corresponds to illumination 130 W/cm^2 at the film surface

В публикации [19] приведена экспериментальная кинетика ДЭ рельефной решетки, записанной на азополимере (рис. 9а). Такую сложную картину эволюции ДЭ авторы объясняют одновременным формированием трех различных фазовых решеток с разными соответствующими параметрами. Анализ данной зависимости с учетом эффекта формфактора позволяет предположить формирование только одной решетки, а именно рельефно-фазовой с гауссовым распределением модуляции глубины рельефа. Моделирование кинетики ДЭ такой решетки (рис. 9б) дает хорошее совпадение с экспериментальной кривой, представленной на рис. 9а, что позволяет сделать вывод о присутствии эффекта формфактора в этой голографической записи.

В публикации [20] описано влияние эффекта формфактора на запись поляризационных решеток в слоях фоточувствительных халькогенидных стекол. Наблюдаемая кольцеобразная структура дифракционного пятна, состоящая из чередующихся светлых и темных колец (рис. 10а) [20], аналогична дифрак-

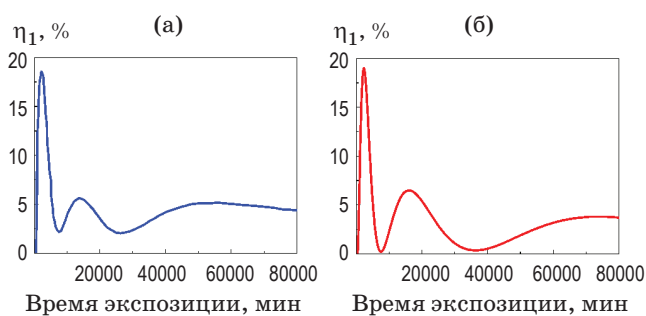


Рис. 9. Кинетики ДЭ рельефной решетки, записанной на азополимере [19], экспериментальная (а) и смоделированная с учетом формфактора гауссова профиля модуляции глубины рельефа (б)

Fig. 9. The diffraction efficiency kinetics of a relief grating written on an azopolymer [19], (а) experimental and (б) simulated with allowance for the formfactor of the relief depth modulation profile of Gaussian grating

ционному пятну тонкой рельефной решетки (рис. 10б) [11]. Структурирование дифракционных пятен решеток, записанных гауссовыми пучками, является следствием влияния эффекта формфактора [11].

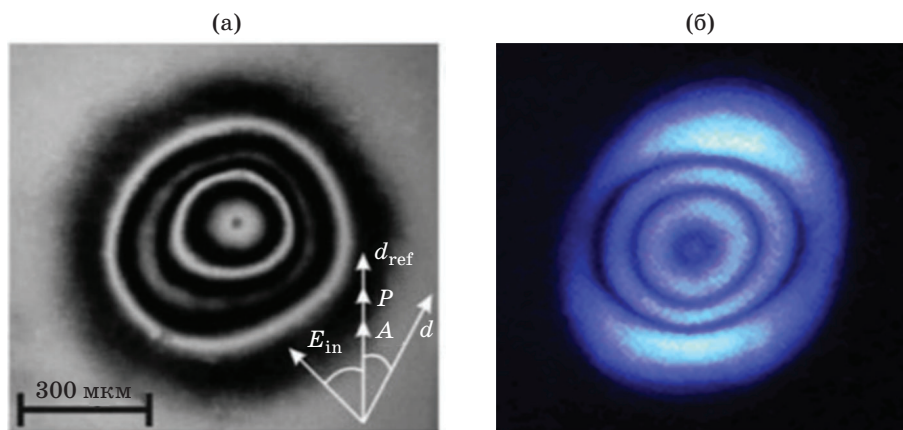


Рис. 10. Дифракционные пятна решеток, записанных на слое халькогенидного стеклообразного полупроводника [20] (а) и на многослойной структуре стеклообразного халькогенидного полупроводника [11] (б)

Fig. 10. Gratings diffraction spots recorded on (a) a layer of a chalcogenide glassy semiconductor [20] and (б) a multilayer structure of a glassy chalcogenide semiconductor [11]

В работе [21] приведена оценка влияния количества линий решетки (или заполнения голограммы решетками) на среднюю ДЭ. Рассмотренный пример (резкое обрушение решетки по полю голограммы) является вырожденным случаем эффекта формфактора, найденного в работе [8] и расширенного в [10], но проявляющегося особым образом. В этом вырожденном варианте формфактора, когда решетка ограничена по полю голограммы и одинакова по амплитуде, наблюдаются ограничение максимальной ДЭ и замедленная кинетика ее роста, как в классическом формфакторе, но отсутствуют ненулевые значения в первом и последующих спадах ДЭ после максимумов.

Как видно, наблюдаемый в результатах работ целого ряда авторов эффект формфактора голограмм приводит к таким недостаткам, как значительное снижение ДЭ голограмм и необходимость увеличения экспозиции голографической записи для достижения ее максимального значения. Это объясняет попытки экспериментаторов избежать влияния данного эффекта путем использования равномерных пучков записывающего излучения. Однако в полученном патенте [22] на основе эффекта формфактора был предложен метод экспресс-анализа динамического диапазона фазового фотоотклика голографических материалов непосредственно в процессе записи как двумерных, так и трехмерных голограмм. Это особенно актуально при исследовании но-

вых разрабатываемых регистрирующих сред, для которых диапазон фотоотклика является наиважнейшим параметром. Данный метод, являющийся неразрушающим и бесконтактным, в процессе всего одной экспериментальной записи без применения дорогостоящего и сложного оборудования создает возможность достаточно точно оценить диапазон фазовой модуляции исследуемого фоточувствительного материала. Это позволяет сделать выводы о перспективности применения исследуемого материала в качестве голографической регистрирующей среды.

В работе [23] демонстрируется возможность увеличения точности анализа фазового фотоотклика путем увеличения количества рассматриваемых дифракционных порядков. При рассмотрении количества дифракционных порядков k точность измерения увеличивается в k раз и составляет $\lambda/2$ (π рад) в случае одного дифракционного порядка и до $\lambda/20$ (π/10 рад) в случае 10 порядков дифракции (рис. 11). Такая точность измерения сравнима с точностью классических интерференционных методов.

Фактически, предложенный метод является очень удобным экспресс-методом, почти не требующим дополнительного оборудования, но дающим высокую точность измерений.

Эффект формфактора не только объясняет, почему при записи голограмм иногда приходится экспонировать голограммы больше расчетного времени для достижения первого

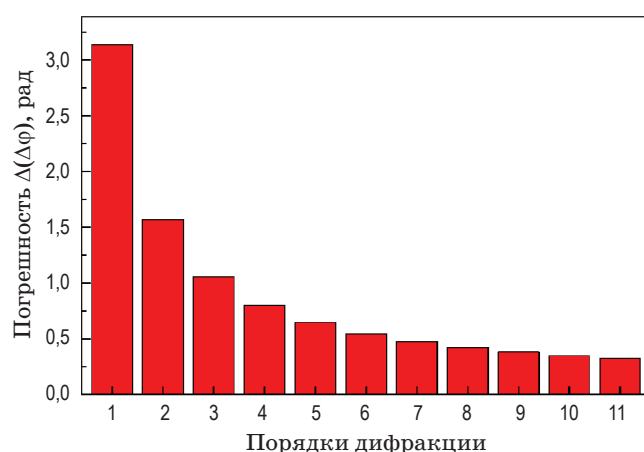


Рис. 11. Погрешности измерения фазового фотоотклика в зависимости от количества исследуемых дифракционных порядков (от 1 до 11)

Fig. 11. Dependence of the measurement errors on the number of studied orders (up 1 to 11)

максимума ДЭ, и при этом максимальная ДЭ как в режиме дифракции Когельника, так и в режиме Рамана–Ната никогда не достигает расчетных максимальных значений.

Эффект формфактора появляется иногда неожиданным образом, например, не только при записи голограмм, регистрируемых гауссовыми пучками, но и при записи любыми пучками сложной формы. Так, при записи сложных, многофакторных изображений (рис. 12), сформированных реальными объектами, имеющими в силу центральной предельной теоремы гауссову гистограмму распределения яркости, формфактор оказывается близким к формфактору гауссовых пучков [24].

Это означает, что требуемое увеличение экспонирования и ограничение максимально достижимой ДЭ (рис. 13) при записи гологра-

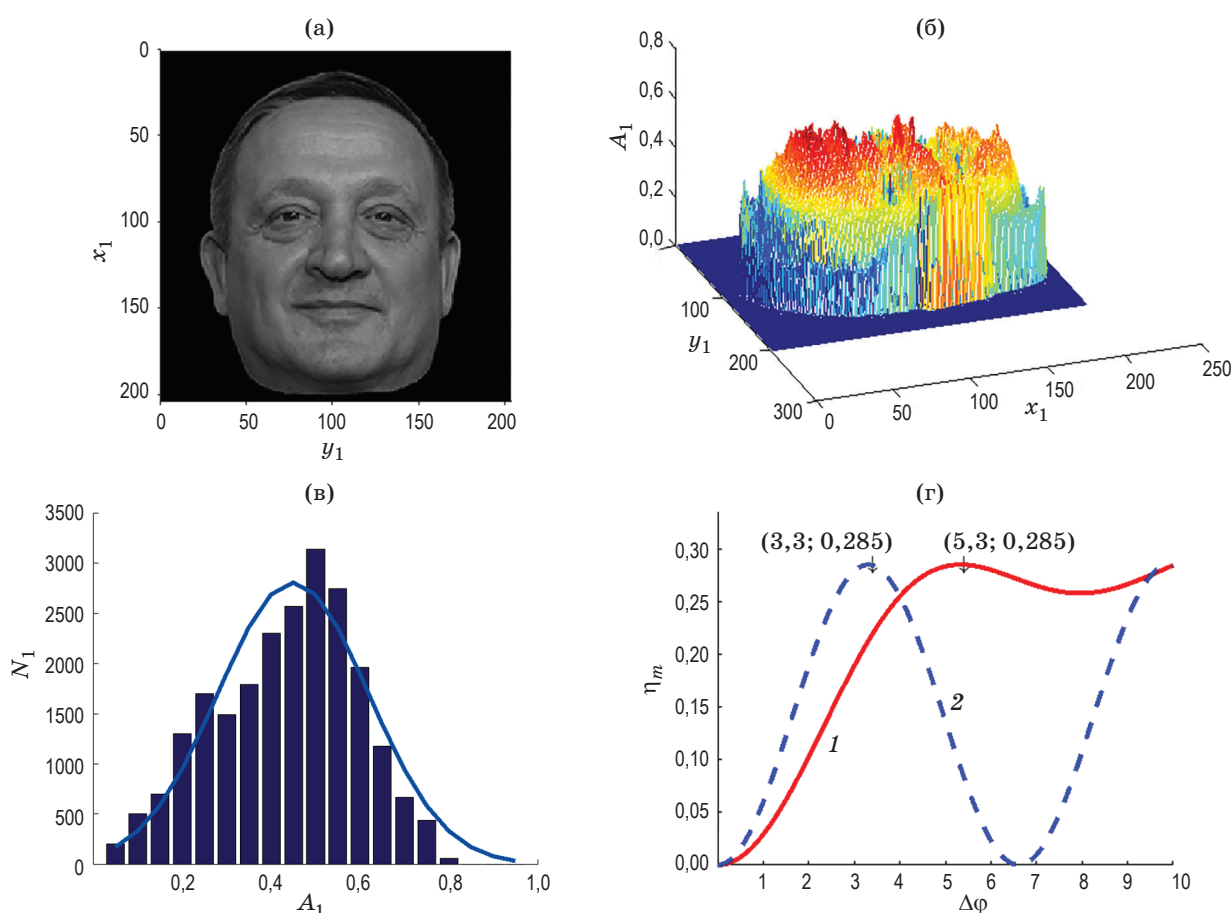


Рис. 12. Формфактор сложных изображений. Изображение в оттенках серого (а), карта яркости монохромного изображения (A_1 — яркость пикселей) (б), гистограмма яркости изображения (N_1 — число пикселей) (в), кинетика ДЭ (η_m) в нормировке от 0 до 1 в зависимости от фазового фотоотклика $\Delta\varphi$ (г)

Fig. 12. Formfactor of complex images. (a) Image in grayscale, (б) grayscale depth of a monochrome image — brightness map (A_1 — pixel brightness), (в) image brightness histogram (N_1 — number of pixels), (г) kinetics of diffraction efficiency (η_m), normalized from 0 to 1, depending on the phase photoresponse $\Delta\varphi$

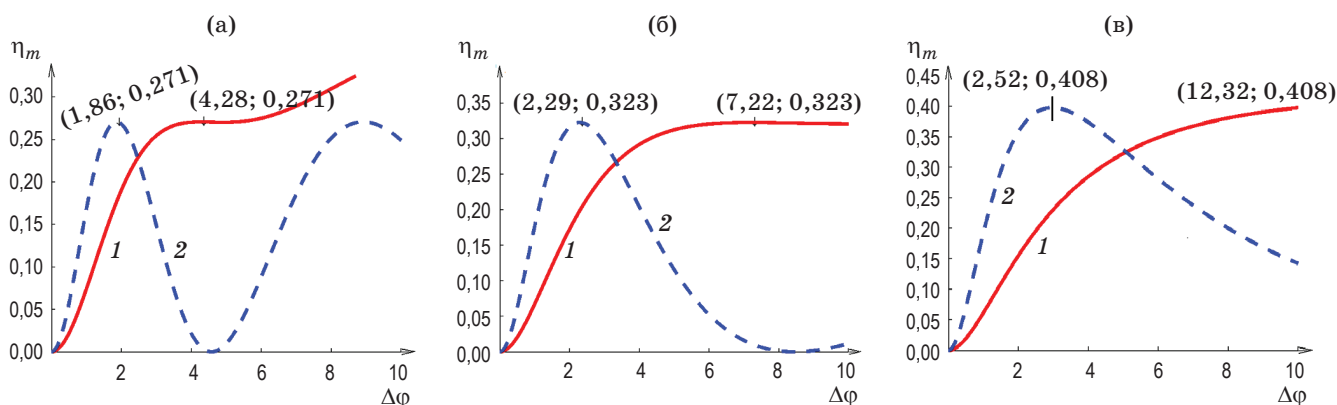


Рис. 13. Средние ДЭ голограмм гауссовых пучков (1) и равномерных по полю пучков (2) при увеличении нелинейности фотоотклика от (а), к (б) и далее к (в)

Fig. 13. The average diffraction efficiencies efficiency of holograms of (1) Gaussian beams and of (2) uniform beams over the field with an increase in the nonlinearity of the photoresponse from (a), to (б), and then to (в)

фических портретов и других сложных изображений является имманентным свойством таких голограмм.

Кроме этого, эффект формфактора объясняет не понятый ранее эффект, когда с ростом нелинейности фотоотклика голографического материала средняя ДЭ голограмм не падает, а наоборот, даже растет. Объясняется это большим вкладом локальной ДЭ на участке роста, приближающемся к локальному максимуму [25].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поскольку эффект формфактора в голографии, как и в гравиметрии или атомной физике [26, 27], проявляется только при перекрестном взаимодействии как минимум двух нелинейных эффектов, влияющих на «силовые параметры», он не всегда заметен. Действительно, если записывать голограмму исключительно равномерным, как в модели Когельника, пуч-

ком или записывать исключительно на линейном участке роста ДЭ, то эффект формфактора пропадает. Однако перечисленные выше примеры показывают его нетривиальное проявление в некоторых случаях, когда он объясняет ряд непонятных ранее эффектов, часть из которых уже используется на практике. Из обзора литературы видно, что описанные эффекты, вызванные проявлением формфактора, представляют значительный практический интерес. Вероятно, в настоящей работе представлены не все интересные проявления этого дважды нелинейного эффекта, который влияет не только на ДЭ и оптимальную экспозицию, не только проявляется при записи голограмм сложных, не гауссовых, объектов, не только приводит к увеличению ДЭ с ростом нелинейности фотоотклика голографического материала, но, очевидно, влияет и на информационную емкость голограмм, их энтропию, что без сомнения требует отдельного исследования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Багбая И.Д. К истории дифракционной решетки // УФН. 1972. Т. 108. № 2. С. 335–337. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0108.197210g.0335>
2. Klein W.R. Theoretical efficiency of Bragg devices // Proc. IEEE. 1966. V. 54. P. 803–804. <https://doi.org/10.1109/PROC.1966.4866>
3. Nath N.S.N. The diffraction of light by high frequency sound waves: Generalised theory // Proc. Indian Acad. Sci. (Math. Sci.). 1936. V. 4. P. 222–242. <https://doi.org/10.1007/BF03036083>

LIST OF REFERENCES

1. Bagbaya I.D. On the history of the diffraction grating [in Russian] // Soviet Physics Uspekhi. 1973. V. 15. № 5. P. 660–661. <https://doi.org/10.1070/PU1973v015n05ABEH005039>
2. Klein W.R. Theoretical efficiency of Bragg devices // Proc. IEEE. 1966. V. 54. P. 803–804. <https://doi.org/10.1109/PROC.1966.4866>
3. Nath N.S.N. The diffraction of light by high frequency sound waves: Generalised theory // Proc. Indian Acad. Sci. (Math. Sci.). 1936. V. 4. P. 222–242. <https://doi.org/10.1007/BF03036083>

4. Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings // *Bell Syst. Tech. J.* 1969. V. 48. P. 2909–2947. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01198.x>
5. Goodman J.W. Introduction to Fourier optics. 2nd ed. N.Y.: McGraw-Hill, 1988. 441 p. P. 82.
6. Goodman J.W. Introduction to Fourier optics. 2nd ed. N.Y.: McGraw-Hill, 1988. 441 p. P. 340.
7. Goodman J.W. Introduction to Fourier optics. 2nd ed. N.Y.: McGraw-Hill, 1988. 441 p. P. 343.
8. Shoydin S.A. Requirements to lasers and formfactor of holograms // *Opt. Mem. Neural Networks*. 2016. V. 25. P. 95–101. <https://doi.org/10.3103/S1060992X16020053>
9. Shoydin S.A. A method of achieving the maximum diffraction efficiency of holograms based on optimizing the formfactor // *Comput. Opt.* 2016. V. 40. № 4. P. 501–507. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-4-501-507>
10. Мешалкин А.Ю., Шойдин С.А. Формфактор голограмм в режиме дифракции Рамана–Ната // Тез. докл. XVI междунар. конф. по голографии и прикладным оптическим технологиям HOLOEXPO-2019. Санкт-Петербург, Россия. 2019. С. 279–289.
11. Shoydin S.A., Meshalkin A.Y., Kovalev M.S. Formfactor of a hologram on a chalcogenide glassy semiconductor and azopolymer // *Opt. Mater. Exp.* 2020. V. 10. № 8. P. 1819–1825. <https://doi.org/10.1364/ome.399017>
12. Gallego S., Ortuno M., Neipp C., et al. Overmodulation effects in volume holograms recorded on photopolymers // *Opt. Commun.* 2003. V. 215. P. 263–269. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(02\)02244-7](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(02)02244-7)
13. Sullivan A.C., Alim M.D., Glugla D.J., et al. Holographic analysis of photopolymers // Event: SPIE Optics + Optoelectronics. Prague, Czech Republic. 2017. V. 10233. <https://doi.org/10.1117/12.2265865>
14. Ciapurin I.V., Glebov L.B., Smirnov V.I. Modeling of Gaussian beam diffraction on volume Bragg gratings in PTR glass // *Proc. SPIE*. 2005. V. 5742. <https://doi.org/10.1117/12.591215>
15. Sabel T., Marga C.L. Volume holography: Novel materials, methods and applications // in *Holographic materials and optical systems*. Eds. by Naydenova I., Nazarova D., Babeva T. / London: IntechOpen, 2017. <https://doi.org/10.5772/67001>
16. Jelken J., Henkel C., Santer S. Solving an old puzzle: Fine structure of diffraction spots from an azopolymer surface relief grating // *Appl. Phys. B*. 2019. V. 125. P. 218. <https://doi.org/10.1007/s00340-019-7331-8>
17. Jelken J., Henkel C., Santer S. Polarization controlled fine structure of diffraction spots from an optically induced grating // *Appl. Phys. Lett.* 2020. V. 116. P. 051601. <https://doi.org/10.1063/1.5140067>
18. Stolz D., Strobelt J., Leven M., et al. One-step fabrication of surface relief dot-matrix holograms using supramolecular azopolymer thin films // *Proc. SPIE*. 2021. V. 11710. P. 1171008. <https://doi.org/10.1117/12.2582763>
19. Sobolewska A., Bartkiewicz S. On the long time holographic grating recording process in azopolymer // *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 95. P. 123302. <https://doi.org/10.1063/1.3232223>
20. Golub P., Kurioz Yu., Sheremet N., et al. Director modulation of nematic liquid crystal on photosensitive chalcogenide surface // *Molecular Cryst. Liquid Cryst.* 2018. V. 661. P. 25–37. <https://doi.org/10.1080/15421406.2018.1460235>
4. Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings // *Bell Syst. Tech. J.* 1969. V. 48. P. 2909–2947. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01198.x>
5. Goodman J.W. Introduction to Fourier optics. 2nd ed. N.Y.: McGraw-Hill, 1988. 441 p. P. 82.
6. Goodman J.W. Introduction to Fourier optics. 2nd ed. N.Y.: McGraw-Hill, 1988. 441 p. P. 340.
7. Goodman J.W. Introduction to Fourier optics. 2nd ed. N.Y.: McGraw-Hill, 1988. 441 p. P. 343.
8. Shoydin S.A. Requirements to lasers and formfactor of holograms // *Opt. Mem. Neural Networks*. 2016. V. 25. P. 95–101. <https://doi.org/10.3103/S1060992X16020053>
9. Shoydin S.A. A method of achieving the maximum diffraction efficiency of holograms based on optimizing the formfactor [in Russian] // *Comput. Opt.* 2016. V. 40. № 4. P. 501–507. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-4-501-507>
10. Meshalkin A.Y., Shoydin S.A. Form factor of holograms in the Raman–Nath diffraction mode [in Russian] // Abstracts of the XVI International. Conf. Holography and Appl. Opt. Technol. — HOLOEXPO-2019. St. Petersburg, Russia. 2019. P. 279–289.
11. Shoydin S.A., Meshalkin A.Y., Kovalev M.S. Formfactor of a hologram on a chalcogenide glassy semiconductor and azopolymer // *Opt. Mater. Exp.* 2020. V. 10. № 8. P. 1819–1825. <https://doi.org/10.1364/ome.399017>
12. Gallego S., Ortuno M., Neipp C., et al. Overmodulation effects in volume holograms recorded on photopolymers // *Opt. Commun.* 2003. V. 215. P. 263–269. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(02\)02244-7](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(02)02244-7)
13. Sullivan A.C., Alim M.D., Glugla D.J., et al. Holographic analysis of photopolymers // Event: SPIE Optics + Optoelectronics, 2017. Prague, Czech Republic. V. 10233. <https://doi.org/10.1117/12.2265865>
14. Ciapurin I.V., Glebov L.B., Smirnov V.I. Modeling of Gaussian beam diffraction on volume Bragg gratings in PTR glass // *Proc. SPIE*. 2005. V. 5742. <https://doi.org/10.1117/12.591215>
15. Sabel T., Marga C.L. Volume holography: Novel materials, methods and applications // in *Holographic Materials and Optical Systems*. Eds. by Naydenova I., Nazarova D., Babeva T. / London: IntechOpen, 2017. <https://doi.org/10.5772/67001>
16. Jelken J., Henkel C., Santer S. Solving an old puzzle: Fine structure of diffraction spots from an azopolymer surface relief grating // *Appl. Phys. B*. 2019. V. 125. P. 218. <https://doi.org/10.1007/s00340-019-7331-8>
17. Jelken J., Henkel C., Santer S. Polarization controlled fine structure of diffraction spots from an optically induced grating // *Appl. Phys. Lett.* 2020. V. 116. P. 051601. <https://doi.org/10.1063/1.5140067>
18. Stolz D., Strobelt J., Leven M., et al. One-step fabrication of surface relief dot-matrix holograms using supramolecular azopolymer thin films // *Proc. SPIE*. 2021. V. 11710. P. 1171008. <https://doi.org/10.1117/12.2582763>
19. Sobolewska A., Bartkiewicz S. On the long time holographic grating recording process in azopolymer // *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 95. P. 123302. <https://doi.org/10.1063/1.3232223>
20. Golub P., Kurioz Yu., Sheremet N., et al. Director modulation of nematic liquid crystal on photosensitive chalcogenide surface // *Molecular Cryst. Liquid Cryst.* 2018. V. 661. P. 25–37. <https://doi.org/10.1080/15421406.2018.1460235>

21. Meshalkin A., Losmanschii C., Cazac V., et al. Analysis of diffraction efficiency of phase gratings in dependence of grooves number // 2020 Internat. Conf. Information Technol. and Nanotechnol. (ITNT). Samara, Russia. May 26–29, 2020. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ITNT49337.2020.9253317>
22. Шойдин С.А., Мешалкин А.Ю. Способ экспресс анализа величины динамического диапазона фотоотклика фазового голографического материала // Патент РФ № RU2734093C1. 2020. Бюл. № 29.
23. Мешалкин А.Ю., Шойдин С.А. Дифракционный способ измерения динамического диапазона фотоотклика голографического фазового материала // Тез. докл. XVII междунар. конф. по голографии и прикладным оптическим технологиям — HOLOEXPO-2020. Москва, Россия. 08–09 сентября 2020. С. 235–245.
24. Шойдин С.А., Трифанов А.В. Формфактор голограмм сложных изображений // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42. № 3. С. 362–368. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2018-42-3-362-368>
25. Shoydin S.A. Effect of photo-response nonlinearity on the diffraction efficiency of holograms // Optoelectron. Instrument. Proc. 2019. V. 55. P. 28–31. <https://doi.org/10.3103/S8756699019010059>
26. Знаменский В.В. Общий курс полевой геофизики: учебник для вузов. Л.: Недра, 1989. 520 с. ISBN: 5-247-00666-6
27. Биленькая С.И., Биленький С.М., Казаринов Ю.М., Лapidус Л.И. Электромагнитный формфактор протона и тяжелые гипотетические частицы // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 19. № 9. С. 613–616.
21. Meshalkin A., Losmanschii C., Cazac V., et al. Analysis of diffraction efficiency of phase gratings in dependence of grooves number // 2020 Internat. Conf. Information Technol. and Nanotechnol. (ITNT). Samara, Russia. May 26–29, 2020. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ITNT49337.2020.9253317>
22. Shoydin S.A., Meshalkin A.Y. Method for express analysis of the magnitude of the dynamic range of the photoresponse of a phase holographic material // Patent RU №RU2734093. 2020. Bul. № 29.
23. Meshalkin A.Y., Shoydin S.A. Diffraction method for measuring the dynamic range of the photoresponse of a holographic phase material [in Russian] // Abstracts of the XVII Internat. Conf. Holography and Appl. Opt. Technol. HOLOEXPO-2020. Moscow, Russia. September 08–09, 2020. P. 235–245.
24. Shoydin S.A., Trifanov A.V. Form-factor of the holograms of composite images [in Russian] // Computer Optics. 2018. V. 42. № 3. P. 362–368. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2018-42-3-362-368>
25. Shoydin S.A. Effect of photo-response nonlinearity on the diffraction efficiency of holograms // Optoelectron. Instrument. Proc. 2019. V. 55. P. 28–31. <https://doi.org/10.3103/S8756699019010059>
26. Znamenskiy V.V. General course of field geophysics: Textbook [in Russian]. Leningrad: Nedra Publ., 1989. 520 p. ISBN: 5-247-00666-6
27. Bilen'kaya S.I., Bilen'kiy S.M., Kazarinov YU.M., Lapidus L.I. Electromagnetic form factor of the proton and heavy hypothetical particles [in Russian] // Pis'ma v ZHETF. 1974. V. 19. № 9. P. 613–616.

АВТОРЫ

Алексей Юрьевич Мешалкин — научный сотрудник, Институт прикладной физики, Кишинев, MD-2028, Молдова; Scopus ID: 8646524300; <https://orcid.org/0000-0003-0971-140X>; alexei.meshalkin@ifa.md

Сергей Александрович Шойдин — кандидат физико-математических наук, доцент, Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, 630108, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-2186-7928>; shoydin@snga.ru

AUTHORS

Alexei Yu. Meshalkin — Researcher, Institute of Applied Physics, Chisinau, MD-2028, Moldova; Scopus ID: 8646524300; <https://orcid.org/0000-0003-0971-140X>; alexei.meshalkin@ifa.md

Sergey A. Shoydin — PhD, Associate Professor, Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, 630108, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-2186-7928>; shoydin@snga.ru

Статья поступила в редакцию 22.12.2022
Одобрена после рецензирования 15.02.2023
Принята к печати 26.03.2023

The article was submitted to the editorial office 22.12.2022
Approved after review 15.02.2023
Accepted for publication 26.03.2023