

Актуальные исследования кинетики записи голограмм с использованием формфактора

А. Ю. Мешалкин¹, С. А. Шойдин²

¹ Институт прикладной физики, Кишинев, Молдова

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

Показано, что найденное несколько лет назад ограничение дифракционной эффективности фазовых голограмм с Брэгговским механизмом дифракции, вызванное перекрёстным взаимодействием нелинейной экспозиции по полю голограмм и нелинейной зависимостью дифракционной эффективности от экспозиции, распространяется и на дифракцию Рамана-Ната. Экспериментально подтверждено проявление формфактора в регистрирующей среде на основе многослойной структуры ХСП и в азополимерах. Показано как формфактор, ограничивающий информационную ёмкость голограмм, может быть использован в задачах измерения кинетики разрабатываемых голографических материалов (Патент RU2734093C1). Приводится ряд работ, показывающих актуальность предложенного метода.

Ключевые слова: Голография, Дифракционная эффективность, Энтропия, Формфактор, Динамический диапазон фотоотклика.

Цитирование: Мешалкин, А. Ю. Актуальные исследования кинетики записи голограмм с использованием формфактора / А. Ю. Мешалкин, С. А. Шойдин // HOLOEXPO 2022:

XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 306–312.

Введение

Интерес к оптическим явлениям, в которых присутствует дифракция света, берущий свое начало в 1666 году, когда Франческо Гримальди показал огибание светом препятствий (выходом в область геометрической тени) и назвавший данное явление дифракцией не только не ослабевает до сих пор, но и находит всё новые применения в силу обнаружения его новых проявлений, в частности при взаимовлиянии двух нелинейных эффектов, дифракционной эффективности (ДЭ) и распределения интенсивности по полю голограммы. Этот эффект был обнаружен в [1, 2] при наблюдении отклонения экспериментальной кинетики ДЭ от теоретической зависимости для дифракции Брэгга на пропускание, при этом первый пик ДЭ был смещен в область большей экспозиции и максимально высокое достижимое значение ДЭ не достигало 100%, как показано на рис. 1а. Позже, аналогичный эффект был замечен [3, 4] и в голограммах с дифракцией Рамана-Ната [5] (рис. 1б).

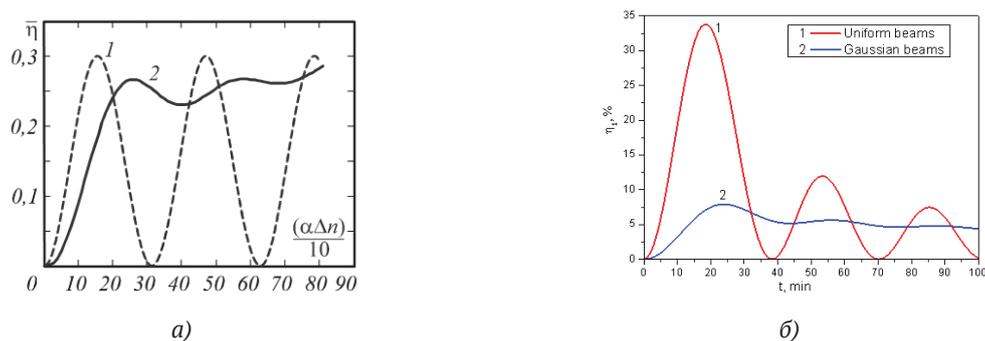


Рис. 1. Дифракционная эффективность:

- а) брэгговских голограмм равномерных пучков – кривая 1 – для удобства сравнения нормированная на максимальное в пределах графика значение кривой 2), представляющей собой кинетику согласно [6] $\eta_1 = \sin^2(\Delta\varphi/2)$, $\Delta\varphi = 2\pi/\lambda(\Delta nd)$, λ – длина волны падающего на решетку света, Δn – глубина модуляции показателя преломления решетки, d – толщина слоя решетки, в сравнении со средней ДЭ голограммы гауссовых пучков (кривая 2);
- б) голограмм Рамана-Ната ($\eta_m = J_m^2(\Delta\varphi/2)$ [5], где $\Delta\varphi = 2\pi/\lambda(2\Delta d)$, Δd – глубина поверхностного рельефа), где кинетика ДЭ первого порядка от экспозиции для голограмм, записанных равномерными пучками (кривая 1) и гауссовыми пучками (кривая 2)

Следует отметить, что данное явление похоже на известные эффекты проявления фактора формы полей, как в гравитационном взаимодействии [7, 8], так и в ядерных взаимодействиях [9–11]. Оно также наблюдается и в работах по голографии других авторов, хотя и не всегда бывает ими обнаружено.

Так, в работе [12] показано, что при достижении эффекта перемодуляции, дифракционная картина начинает структурироваться, как показано на рис. 2. При записи решетки гауссовыми пучками после достижения первого пика интенсивности ДЭ происходит дальнейшее уменьшение интенсивности в центре пятна с образованием кольцеобразной структуры. При этом дифракционная эффективность всей решетки отличается от дифракционной эффективности равномерной решетки и сильно зависит от неравномерности гауссового пятна и/или отношения диаметров записывающего/считывающего пучков. Из сравнения графиков рисунка 2б и 1а видно, что данная закономерность описывается формфактором голограммы.

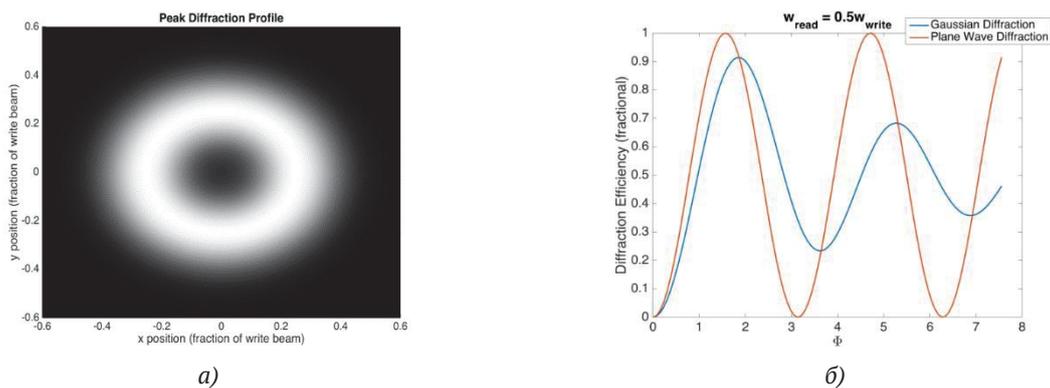


Рис. 2. а) Изображение дифракционного порядка решетки с перемодуляцией;
 б) Зависимость дифракционной эффективности для равномерной решетки и гауссовой решетки [12]

Также, в работе [13] авторы показали запись пиксельных («DotMatrix») голограмм на азополимерных слоях с различной интенсивностью пучка записи. Как видно на рис. 3, в зависимости от интенсивности пучка, каждый пиксель голограммы, исследованный с помощью атомно-силового микроскопа, трансформируется из пикселя с гауссовым распределением модуляции поверхности, в пиксель с провалом в центре пятна, определяющим фактор формы.

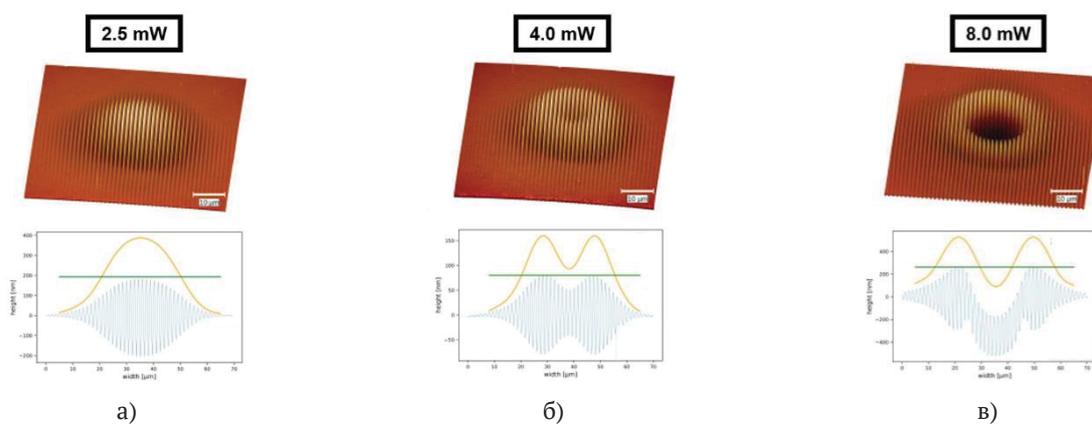


Рис. 3. Изображения пикселей записанной голограммы с различной интенсивностью пучка записи: а) 2,5 мВт; б) 4,0 мВт, и в) 8,0 мВт

В работе [14] эффект формфактора наблюдается при записи поляризационных решеток на слоях фоточувствительных халькогенидных стекол. Как видно на рис. 4а, в процессе записи поляризационных решеток гауссовыми пучками формируется кольцеобразная структура, состоящая из чередующихся светлых и темных колец. Данная картина аналогична дифракционной картине рельефной решетки, записанной на халькогенидных многослойных структурах, с помощью гауссового пучка, в структуре которой вследствие формфактора наблюдается кольцеобразная структура (рис. 4б).



Рис. 4. а) Изображение дифракционного пятна решетки, записанной на слое халькогенидного стеклообразного полупроводника [14];

б) Изображение дифракционного пятна первого порядка решетки, записанной на многослойной структуре стеклообразного полупроводника с помощью гауссовых пучков [15]

Аналогичные результаты можно увидеть и в работах [16–22].

Казалось бы, что обнаруженный эффект формфактора голограмм, который значительно снижает дифракционную эффективность голограмм, чем ограничивает их энтропию и требует увеличения экспозиции либо интенсивности записывающих пучков для достижения максимального значения ДЭ, в дальнейшем будет избегаться экспериментаторами, либо будут учитывать его влияние. Однако в полученном патенте [23] влияние формфактора голограммы было предложено для экспресс анализа величины динамического диапазона фазового фотоотклика голографического материала в случае дифракции Брэгга и Рамана-Ната, что может быть использовано для неразрушающего и бесконтактного определения диапазона фотоотклика голографического материала и кинетики его формирования непосредственно в процессе записи голограмм. Данный метод позволяет в процессе одной экспозиции достаточно точно оценить глубину фазовой модуляции исследуемого фоточувствительного материала, и использовать эти данные для сравнения и применения этого материала в качестве голографической регистрирующей среды.

В работе [24] показано, что увеличение количества рассматриваемых дифракционных порядков для анализа фазового фотоотклика позволяет увеличить точность измерения в k раз (рис. 5), где k – количество дифракционных порядков (от $\lambda/2$ (π радиан) для одного дифракционного порядка до $\lambda/20$ ($\pi/10$ радиан) для 10 порядков).

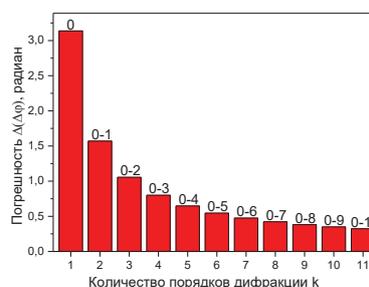


Рис. 5. Зависимость погрешности измерения от количества исследуемых порядков k (до 11).

Видно, что точность нового дифракционного метода экспериментального измерения кинетики ДЭ новых голографических материалов сравнима или превосходит точность классических интерференционных методов.

Список источников

- [1] **Shoydin, S. A.** Requirements to Lasers and Form Factor of Holograms / S. A. Shoydin // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2014. – Vol. 23. – №. 4. – P. 287-294. – ISSN 1060-992X.
- [2] **Shoydin, S. A.** A method of achieving the maximum diffraction efficiency of holograms based on optimizing the formfactor / S. A. Shoydin // Comput. Opt. – 2016. – Vol. 40. – № 4. – P. 501–507. <http://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-4-501-507>.
- [3] **Мешалкин, А. Ю.** Формфактор голограмм в режиме дифракции Рамана-Ната / А. Ю. Мешалкин, С. А. Шойдин // HOLOEXPO 2019: XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – С. 279–289. ISBN 978-5-7038-5251-4.
- [4] **Shoydin S. A.** Formfactor of a hologram on a chalcogenide glassy semiconductor and azopolymer / S. A. Shoydin, A. Yu. Meshalkin, M. S. Kovalev // Optical Materials Express. – 2020. – Т. 10. – № 8. – С. 1819-1825. <https://doi.org/10.1364/OME.399017>.
- [5] **Goodman, J. W.** Introduction to Fourier Optics. 2nd Edition / J. W. Goodman. – New York: McGraw-Hill, 1988. – 441 p.
- [6] **Kogelnik, H.** Coupled wave theory for thick hologram gratings / H. Kogelnik // The Bell System Technical Journal. – 1969. – Т. 48. – № 9. – С. 2909-2947. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01198.x>.
- [7] **Знаменский, В. В.** Общий курс полевой геофизики: Учебник для вузов / В. В. Знаменский. – Ленинград: Недра, 1989. – 520 с. ISBN:5-247-00666-6.
- [8] **Миронов, В. С.** Курс гравиразведки. 2-е изд., перераб. и доп. / В. С. Миронов. – Ленинград: Недра, 1980. – 543 с.
- [9] **Фейнман, Р. Ф.** Квантовая механика и интегралы по траекториям / Р. Ф. Фейнман, А. Хибс; пер. с англ. Ю. Л. Обухова и Э. М. Барлита; под ред. В. С. Барашенкова. – Москва: Мир, 1968. – 384 с.
- [10] **Вест, А. Р.** Химия твердого тела. Теория и приложения: В 2-х ч. Ч. 1 / А. Р. Вест; пер. с англ. А. Р. Кауля и И. Б. Куценка; под ред. Ю. Д. Третьякова. – Москва: Мир, 1988. – 558 с. ISBN:5-03-000056-9.
- [11] **Биленькая, С. И.** Электромагнитный формфактор протона и тяжёлые гипотетические частицы / С. И. Биленькая, С. М. Биленький, Ю. М. Казаринов, Л. И. Лapidус // Письма в ЖЭТФ. – 1974. – Т. 19. – Вып. 9. – С. 613-616.
- [12] **Sullivan, A. C.** Holographic analysis of photopolymers / A. C. Sullivan, M. D. Alim, D. J. Glugla, R. R. McLeod // Proc. SPIE 10233, Holography: Advances and Modern Trends V. – 2017. – Vol. 10233. – № 2. – P. 102330B. <https://doi.org/10.1117/12.2265865>.
- [13] **Stolz, D.** One-step fabrication of surface relief dot-matrix holograms using supramolecular azopolymer thin films / D. Stolz, J. Strobel, M. Leven, L. Kurlandski, H. Abourahma, D. J. McGee // Proc. SPIE 11710, Practical Holography XXXV: Displays, Materials, and Applications. – 2021. – Vol. 11710. – № 2. – P. 1171008. <https://doi.org/10.1117/12.2582763>.
- [14] **Golub, P.** Director modulation of nematic liquid crystal on photosensitive chalcogenide surface / P. Golub, Yu. Kurioz, N. Sheremet, M. Trunov, and Yu. Reznikov // Molecular Crystals And Liquid Crystals. – 2018. – Vol. 661. – P. 25–37. <https://doi.org/10.1080/15421406.2018.1460235>.

- [15] **Shoydin, S. A.** Formfactor of a hologram on a chalcogenide glassy semiconductor and azopolymer / S. A. Shoydin, A. Yu. Meshalkin, M. S. Kovalev // *Optical Materials Express*. – 2020. – Т. 10. – № 8. – С. 1819–1825. <https://doi.org/10.1364/OME.399017>.
- [16] **Gallego, S.** Overmodulation effects in volume holograms recorded on photopolymers / S. Gallego, M. Ortuño, C. Neipp, C. García, A. Beléndez, I. Pascual // *Optics Communications*. – 2003. – Vol. 215. – № 4. – P. 263–269. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(02\)02244-7](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(02)02244-7).
- [17] **Sullivan, A. C.** Holographic analysis of photopolymers / A. C. Sullivan, M. D. Alim, D. J. Glugla, R. R. McLeod // *Proc. SPIE 10233, Holography: Advances and Modern Trends V*. – 2017. – Vol. 10233. – P. 102330B. <https://doi.org/10.1117/12.2265865>.
- [18] **Ciapurin, I. V.** Modeling of Gaussian beam diffraction on volume Bragg gratings in PTR glass / I. V. Ciapurin, L. B. Glebov, V. I. Smirnov // *Proc. SPIE 5742, Practical Holography XIX: Materials and Applications*. – 2005. – Vol 5742. <https://doi.org/10.1117/12.591215>.
- [19] **Sabel, T.** *Volume Holography: Novel Materials, Methods and Applications* / T. Sabel, M. C. Lensen. – Rijeka: IntechOpen, 2022. – 518 p.
- [20] **Jelken, J.** Solving an old puzzle: fine structure of diffraction spots from an azo-polymer surface relief grating / J. Jelken, C. Henkel and S. Santer // *Appl. Phys.* – 2019. – Vol. 125. – № 11. – P. 218. <https://doi.org/10.1007/s00340-019-7331-8>.
- [21] **Jelken, J.** Polarization controlled fine structure of diffraction spots from an optically induced grating / J. Jelken, C. Henkel, and S. Santer // *Appl. Phys. Lett.* – 2020. – Vol. 116. <https://doi.org/10.1063/1.5140067>.
- [22] **Sobolewska, A.** On the long time holographic grating recording process in azo-polymer / A. Sobolewska and S. Bartkiewicz // *Appl. Phys. Lett.* – 2009. – Vol. 95. <https://doi.org/10.1063/1.3232223>.
- [23] **Патент RU2734093C1.** Способ экспресс анализа величины динамического диапазона фотоотклика фазового голографического материала / С. А. Шойдин, А. Ю. Мешалкин. Российская Федерация, МПК G03H 1/00, G01M 11/00; заявл. 07.04.2020; опубл. 12.10.2020, Бюл. № 29.
- [24] **Мешалкин, А. Ю.** Дифракционный способ измерения динамического диапазона фотоотклика голографического фазового материала / А. Ю. Мешалкин, С. А. Шойдин // *HOLOEXPO 2020: XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов*. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. – С. 235-245. ISBN:978-5-7038-5516-4.

Actual research on the kinetics of hologram recording using a form factor

A. Y. Meshalkin¹, S. A. Shoydin²

¹ Institute of Applied Physics, Chisinau, Moldova

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

It is shown that the limitation of the diffraction efficiency of phase holograms with the Bragg diffraction mechanism found several years ago, caused by the cross-interaction of nonlinear exposure over the hologram field and the nonlinear dependence of the diffraction efficiency on exposure, extends to Raman-Nath diffraction. The manifestation of the form factor in the recording medium based on the multilayer structure of CGS and in azopolymers has been experimentally confirmed. It is shown how the form factor limiting the information capacity of holograms can be

used in the tasks of measuring the kinetics of holographic materials being developed (Patent RU2734093C1). A number of papers are presented showing the relevance of the proposed method.

Keywords: Holography, Diffraction efficiency, Entropy, Formfactor, Photoresponse dynamic range.