

52. Формфактор голограмм в режиме дифракции Рамана — Ната

А. Ю. Мешалкин¹, С. А. Шойдин²

¹ Институт прикладной физики, Кишинев, Молдова

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

В работе исследуется связь величины формфактора и дифракционной эффективности двумерных (тонких) голограмм, изображения на которых восстанавливаются в режиме дифракции Рамана — Ната. Проявление формфактора в регистрирующей среде на основе многослойной структуры халькогенидных стеклообразных полупроводников и в азополимерах было экспериментально показано для голографических решеток, записанных гауссовскими пучками. Значения рассчитанных формфакторов для толстых и тонких гауссовых голограмм дает основание считать эффект проявления формфактора одинаково применимым и близким по значениям для двух режимов дифракции: Брэгга и Рамана — Ната. Эффект формфактора голограмм был использован при определении динамического диапазона фотоотклика при изучении регистрирующих сред на основе многослойной структуры халькогенидных стеклообразных полупроводников и в азополимерах.

Ключевые слова: Формфактор, Голография, Рельефно-фазовые решетки, Дифракция Рамана — Ната.

Цитирование: 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. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 279–289.

Введение

Качество восстановленных голограмм зависит, прежде всего, от яркости восстановленного изображения, определяемого дифракционной эффективностью голограмм. Она, в свою очередь, определяется как условиями записи, так и типами голограмм, что, в значительной мере, определяет качество работы голографических приборов.

Локальная дифракционная эффективность по полю голограмм определяется глубиной модуляции голографической среды, полученной в результате интерференции предметного и опорного пучков. В работах [1–7] показана связь величины формфактора и максимально достижимой дифракционной эффективности объемных (толстых) голограмм, восстанавливаемых в условиях брэгговской дифракции и предложены методы снижения влияния формфактора и увеличения средней дифракционной эффективности голограмм.

В данной работе исследуется связь величины формфактора и дифракционной эффективности элементарных голограмм, представляющих собой голографические решетки, полученные в результате взаимодействия двух когерентных плоских волн. Для тонких фазовых решеток, восстановление на которых происходит в режиме дифракции Рамана — Ната, характерно наличие многих порядков дифракции [8], в отличие от объемных голограмм, дифракция на которых описывается в режиме Брэгга.

При этом ДЭ n -го порядка дифракции η_n для синусоидального фазового профиля голограммы описывается функцией Бесселя [9] в виде

$$\eta_n = J_n^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right), \quad (1)$$

где J_n — функция Бесселя первого рода n -го порядка, $\Delta\varphi$ — амплитуда фазового контраста, которая в случае рельефно-фазовой голограммы равна [10]

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n-1)h. \quad (2)$$

Здесь λ — длина волны считывающего света, n — показатель преломления материала среды, на которой записана голограмма, h — глубина профиля поверхности. При голографической записи решеток распределение интенсивности излучения преобразуется в пространственную фазовую модуляцию материала, за счет изменения толщины материала либо показателя преломления. В случае неравномерного распределения интенсивности при экспонировании, глубина фазового профиля решетки будет неравномерной по полю голограммы и варьируется согласно распределению интенсивности записывающего излучения. Для исследования влияния неоднородности освещения на ДЭ в процессе записи рельефных решеток были использованы нерасширенные пучки лазера, интенсивность которых по полю луча хорошо описывается гауссовой функцией. Интерференция таких лучей приводит к формированию интерференционной картины с гауссовым распределением глубины модуляции интенсивности. При использовании фоточувствительных регистрирующих сред для ряда материалов (азополимеры, халькогенидные стеклообразные полупроводники) облучение интерференционной картиной приводит к прямому формированию поверхностного рельефа, соответствующего интерференционной картине [11, 12]. Т. о. облучение данных материалов интерференционной картиной гауссовых пучков приводит к формированию рельефной голографической решетки с гауссовым распределением фазовой глубины профиля.

1. Моделирование формирования гауссовой решетки и дифракции света

Дифракция монохроматического света на такой гауссовой рельефной решетке была смоделирована путем использования алгоритма углового спектра [13]. Для этого была смоделирована гауссова решетка с фазовой модуляцией соответствующей функции Гаусса

$$\Delta\varphi(x, y) = A \exp\left(-\frac{r}{\omega}\right)^2, \quad (3)$$

где r — расстояние от оси решетки ($r^2 = x^2 + y^2$), а ω принято называть шириной или эффективным радиусом гауссова пучка, который равен расстоянию, на котором амплитуда фазовой модуляции убывает в e раз по сравнению с амплитудой фазовой модуляции на оси (Δ),

$$\Delta\varphi(\omega) = A/e. \quad (4)$$

На рисунке 1 схематически показана пространственная форма решетки (вдоль координаты x) с гауссовым распределением амплитуды фазовой модуляции при эффективном радиусе решетки $\omega = 1$. Как будет показано далее, на величину и кинетику ДЭ влияет и диаметр

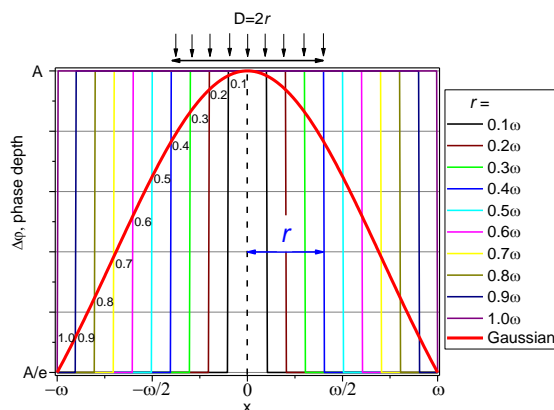


Рис. 1. Гауссовое распределение амплитуды фазовой глубины решетки при эффективном радиусе решетки равном $\omega = A/e$, и различных относительных радиусах считывающего пучка (от $0,1 \omega$ до $1,0 \omega$)

считывающего излучения. На рисунке 1 также показаны считывающие пучки с относительными радиусами от $0,1 \omega$ до $1,0 \omega$.

Анализ дифракционной эффективности для гауссовых решеток проводили по формуле $\eta_n = J_n^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right)$ (1), где J_n — функция Бесселя первого рода n -го порядка, $\Delta\phi$ — амплитуда фазовой модуляции. В виду того, что пространственная фазовая модуляция материала $\Delta\phi$ определяется распределением интенсивности излучения, неравномерность экспозиции по полю $E(x, y)$ приводит к неравномерной фазовой модуляции $\Delta\phi(x, y)$. Если принять, что фазовая модуляция $\Delta\phi(x, y)$ определяется соотношением

$$\delta\phi(x, y) \approx E(x, y), \tag{5}$$

где $E(x, y)$ — экспозиция, то выражение ДЭ можно переписать

$$\eta_n(x, y) = J_n^2(E(x, y)). \tag{6}$$

Средняя дифракционная эффективность первого порядка будет равна

$$\eta_m = \frac{1}{s} \iint J_1^2(E(x, y)) dx dy, \tag{7}$$

где s — площадь голограммы.

Принимая, что скорость модуляции фазового рельефа была линейной, была рассчитана ДЭ для решеток с гауссовым распределением экспозиции. При этом изменяли значение радиуса считывающего луча, что равносильно изменению площади считываемого участка голограммы. На рисунке 2 показана кинетика изменения ДЭ гауссовой решетки для разных радиусов считывающего луча r (от $0,1$ до $1,0$ к эффективному радиусу голограммы).

Здесь экспозиция E приводится в нормированных единицах так, что $E = 1$ изменяет фототклик голографического материала, приводя к росту аргумента под функцией Бесселя, равному одному радиану.

Величина формфактора Ψ определяет запаздывание по экспозиции достижения первого максимума дифракционной эффективности по сравнению с равномерной решеткой, и определяется по формуле

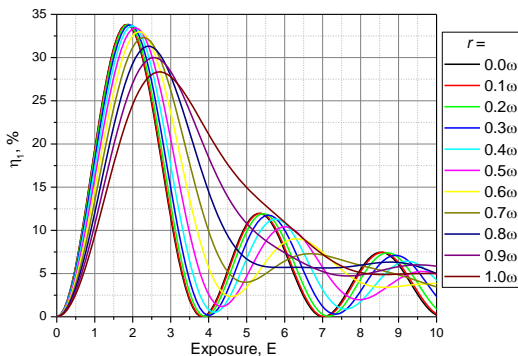


Рис. 2. Кинетика изменения дифракционной эффективности первого порядка Гауссовой решетки при увеличении экспозиции для разных диаметров считывающего пучка (от $r = 0,1 \omega$ до $1,0 \omega$) (см. рис. 1)

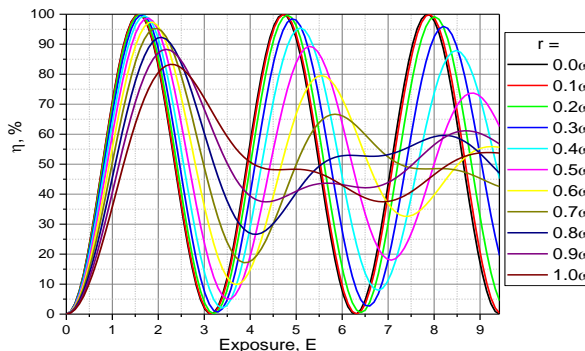


Рис. 3. Кинетика изменения дифракционной эффективности объемной гауссовой решетки при увеличении экспозиции для разных радиусов считывающего пучка (от $r = 0,1 \omega$ до $1,0 \omega$) (см. рис. 1)

Таблица 1. Значения найденного формфактора Ψ для разных радиусов считывающего пучка

	r										
r	0,0 ω	0,1 ω	0,2 ω	0,3 ω	0,4 ω	0,5 ω	0,6 ω	0,7 ω	0,8 ω	0,9 ω	1,0 ω
E_r	1,88	1,88	1,88	1,88	1,98	2,07	2,17	2,26	2,45	2,54	2,79
Ψ	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95	0,91	0,87	0,83	0,77	0,74	0,67

$$\Psi = E_{r_0} / E_r \tag{8}$$

где E_{r_0} — требуемая экспозиция для достижения максимума дифракционной эффективности в первом порядке равномерной (плоской) решетки ($r_0 = 0,0 \omega$), E_r — требуемая экспозиция для достижения максимума дифракционной эффективности в первом порядке гауссовской решетки.

Как видно, в этом случае кривая ДЭ описывается классическим выражением ДЭ тонких решеток, определяемая как квадрат функции Бесселя. При всех других диаметрах считывающего луча неравномерность экспозиции по полю приобретает доминирующее значение. Для всех этих случаев был рассчитан формфактор Ψ , как отношение экспозиции при достижении максимума ДЭ равномерной решетки, к экспозиции при достижении максимума ДЭ гауссовой решетки.

В таблице 1 приведены значения найденного формфактора для разных радиусов считывающего пучка.

Аналогичные расчеты были проведены и для случая объёмных брэгговских решеток, для которых дифракционная эффективность определяется как

$$\eta = \Omega \sin^2[\Psi f(E)]. \tag{9}$$

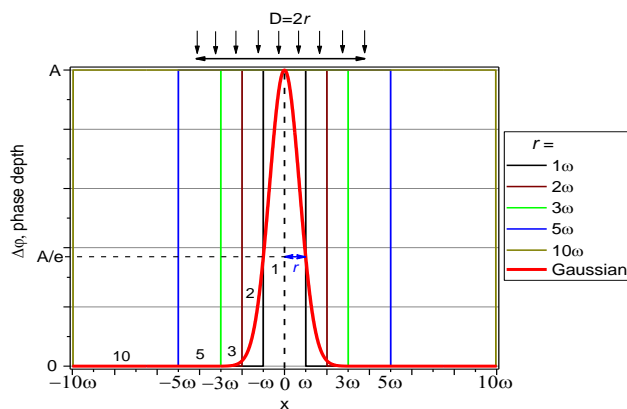


Рис. 4. Гауссовое распределения амплитуды фазовой глубины решетки и различные относительные радиусы считывающего пучка от 1ω до 10ω

Таблица 2. Значения найденного формфактора Ψ для разных радиусов считывающего пучка

		r										
r	$0,0 \omega$	$0,1 \omega$	$0,2 \omega$	$0,3 \omega$	$0,4 \omega$	$0,5 \omega$	$0,6 \omega$	$0,7 \omega$	$0,8 \omega$	$0,9 \omega$	$1,0 \omega$	
E_r	1,60	1,60	1,60	1,60	1,70	1,79	1,88	1,98	2,07	2,17	2,26	
Ψ	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	0,89	0,85	0,81	0,77	0,74	0,71	

Таблица 3. Значения найденного формфактора Ψ для разных радиусов считывающего пучка

		r					
r	$0,0 \omega$	1ω	2ω	3ω	5ω	10ω	
E_r	1,88	2,73	3,33	3,33	3,33	3,33	
Ψ	1,00	0,67	0,56	0,56	0,56	0,56	

На рисунке 3 показана кинетика изменения дифракционной эффективности объемной гауссовой решетки при увеличении экспозиции для разных радиусов считывающего пучка (см. рисунок 1).

В таблице 2 приведены значения найденного формфактора для разных диаметров считывающего пучка.

Аналогичные расчеты были проведены и для случая считывающего пучка $r > \omega$. На рисунке 4 схематически показана пространственная форма решетки (вдоль координаты x) с гауссовым распределением амплитуды фазовой модуляции и считывающие пучки с относительными радиусами от 1ω до 10ω ($r = 1 \omega, 2 \omega, 3 \omega, 5 \omega$ и 10ω).

На рисунке 5 показана кинетика изменения ДЭ гауссовой решетки для разных радиусов считывающего луча r (от 1ω до 10ω).

В таблице 3 приведены значения найденного формфактора для разных радиусов считывающего пучка.

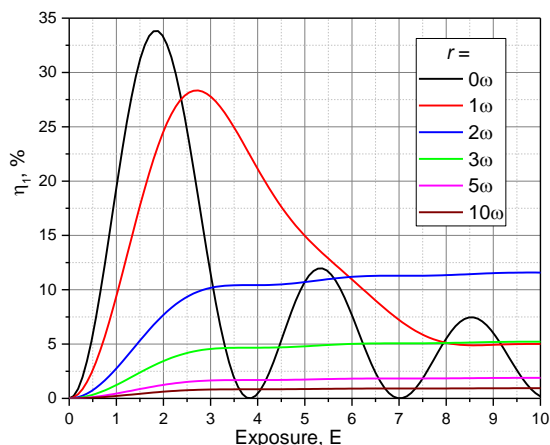


Рис. 5. Кинетика изменения дифракционной эффективности первого порядка Гауссовой решетки при увеличении экспозиции для разных диаметров считывающего пучка (от $r = 1 \omega$ до 10ω) (см. рис. 4)

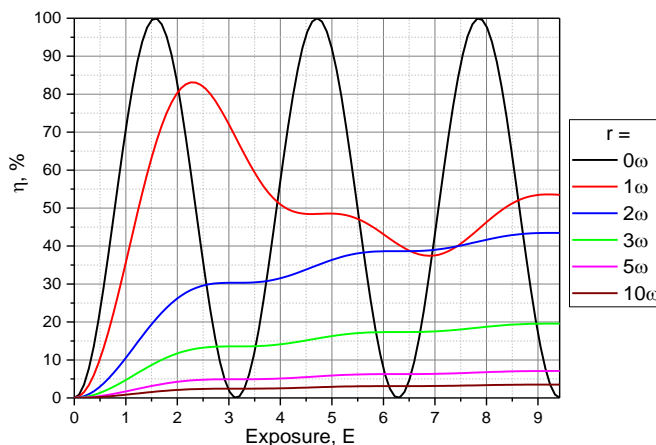


Рис. 6. Кинетика изменения дифракционной эффективности объемной гауссовой решетки при увеличении экспозиции для разных радиусов считывающего пучка (от $r = 1 \omega$ до 10ω) (см. рис. 4)

Таблица 4. Значения найденного формфактора Ψ для разных радиусов считывающего пучка

	r					
r	$0,0 \omega$	1ω	2ω	3ω	5ω	10ω
E_r	1,60	2,26	2,90	2,90	2,90	2,90
Ψ	1,00	0,71	0,55	0,55	0,55	0,55

Аналогичные расчеты были проведены и для случая объёмных брэгговских решеток. На рисунке 6 показана кинетика изменения дифракционной эффективности объемной гауссовой решетки при увеличении экспозиции для разных радиусов считывающего пучка (см. рисунок 4).

В таблице 4 приведены значения найденного формфактора для разных радиусов считывающего пучка.

Сравнение данных зависимостей для тонких и толстых решеток приведены на рисунке 7

Схожесть картин позволяет предположить единую природу зависимости ДЭ от неравномерности экспозиции, а именно: по гауссовому распределению, и соответственно величины формфактора.

2. Голографическая запись и восстановление гауссовых решеток

Голографические решетки с периодом $5,0 \text{ мкм}$ (200 л/мм) были записаны с помощью двух сходящихся лучей ($\lambda = 532 \text{ нм}$) по схеме Лейта-Упатниекса. Для записи использовались нерасширенные лучи с гауссовым распределением интенсивности по полю луча. Запись проводилась на многослойных структурах на основе халькогенидного стеклообразного полупроводника

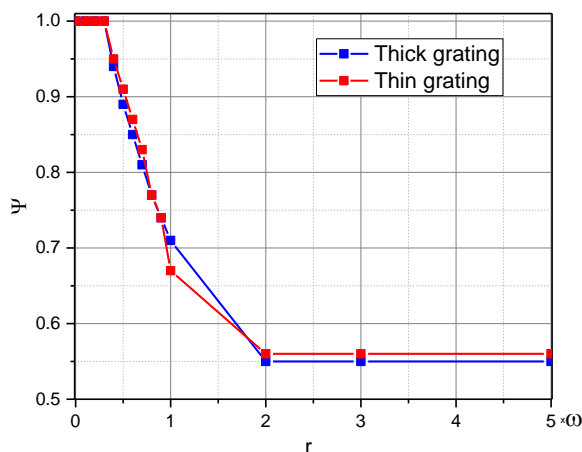
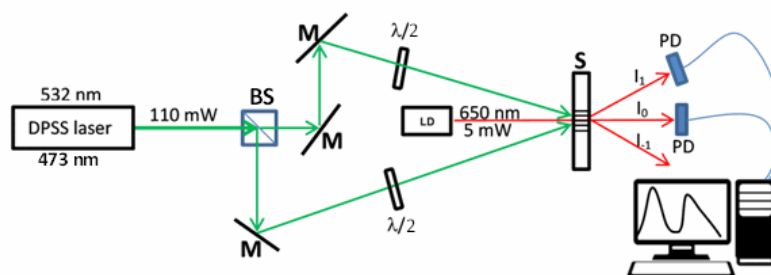


Рис. 7 Зависимость формфактора Ψ от радиуса считывающего пучка r для объёмной и тонкой решетки



DPSS laser — одномодовый (TEM_{00}) твердотельный лазер с диодной накачкой, BS — поляризационный светоделительный кубик, M — зеркала, $\lambda/2$ — полуволновые фазовые пластинки, LD — лазерный диод, S — регистрирующая среда, PD — кремниевые фотодиоды

Рис. 8. Голографическая схема записи рельефно-фазовых решеток

As_2S_3 -Se (толщиной 2 940 нм). Экспонирование многослойной структуры формируемой интерференционной картины приводит к формированию поверхностного рельефа, т. е. к формированию рельефно-фазовой дифракционной решетки. Дифракционная эффективность измерялась в первом дифракционном порядке на пропускание с помощью красной лазерной указки ($\lambda = 650$ нм, $P = 1$ мВт) при перпендикулярном падении считывающего луча. Интенсивность в первом нулевом дифракционных порядках регистрировалась с помощью кремниевых фотодиодов ФД-24к и системой электронного усиления сигналов. Радиус записывающих лучей равной интенсивности составлял около 1,0 мм, при этом диаметр считывающего луча варьировали с помощью фокусирующей линзы в пределах 0,1–4,0 мм.

На рисунке 8 приведена используемая схема для записи рельефно-фазовых решеток.

Экспонирование проводили в области чувствительности используемой регистрирующей среды на длине волны 532 нм. Углы схождения лучей в 6,1 градусов были выбраны для получения интерференционной картины с периодом 5,0 мкм. Полуволновые фазовые пластинки были выставлены таким образом, чтобы интерферирующие лучи имели линейную поляризацию под углом $+45^\circ$ и -45° к плоскости падения лучей.

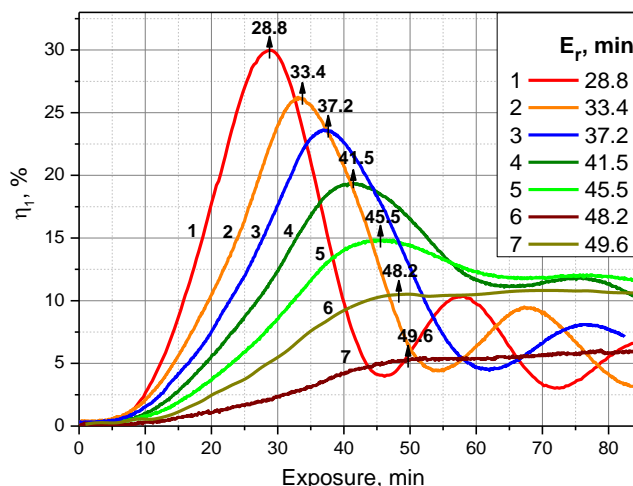


Рис. 9. Кинетика изменения дифракционной эффективности плоской гауссовой решетки при увеличении экспозиции для разных радиусов считывающего пучка (от 1 — максимально узкого — до 5 — покрывающего почти всю решетку). E_r — экспозиция при достижении максимума ДЭ для различных радиусов считывающего пучка

На рисунке 9 представлена кинетика изменения ДЭ решеток при одинаковых условиях записи и при различных диаметрах считывающего луча (от максимально узкого (1) до широкого, покрывающего почти всю решетку (5)). Также на рисунке 9 указана экспозиция при достижении максимума ДЭ для различных радиусов считывающего пучка.

3. Определение формфактора сформированных гауссовых решеток

Для определения формфактора Ψ зарегистрированных голограмм, определяемого как отношение экспозиции при достижении максимума ДЭ равномерной решетки (записанной равномерными по интенсивности лучами), к экспозиции при достижении максимума ДЭ гауссовой решетки (записанной лучами с гауссовым распределением интенсивности), необходимо провести голографическую запись решетки при равномерном распределении интенсивности в лучах — что существенно изменяет условия записи (освещенность ($\text{мВт}/\text{см}^2$)). Но как видно из рисунка 1, при уменьшении диаметра считывающего пучка неравномерность амплитуды фазовой модуляции решетки уменьшается, и при достаточно малом диаметре считывающего пучка решетку можно считать квази-однородной. В нашем случае диаметр считывающего пучка определяется возможностью линзы, установленной в считывающей лазерной указке.

В эксперименте была получена максимально-возможная степень фокусировки, для которой получен самый малый радиус считывающего пучка, и для которой исследуемый участок решетки можно считать квази-однородным. Кинетика ДЭ этого участка показана на рисунке 9, кривая 1. Построенные смоделированные кинетики ДЭ при формировании гауссовой решетки и экспериментально-полученные позволяют соотнести отношения радиусов считывающего пучка и решетки путем максимального совпадения двух кривых.

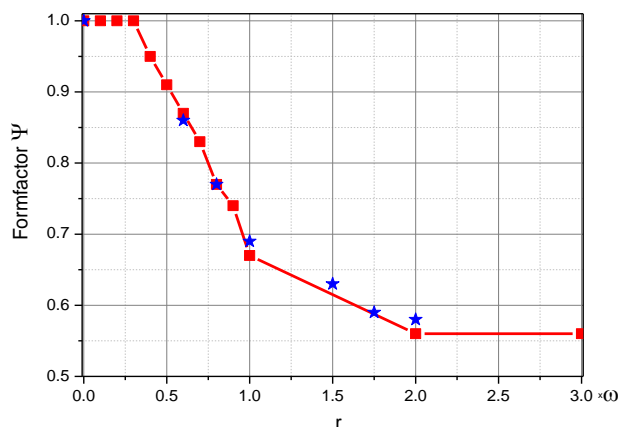


Рис. 10. Теоретически полученная и экспериментальная зависимость формфактора Ψ от радиуса считывающего пучка r

Таблица 5. Значения найденного формфактора Ψ для разных радиусов считывающего пучка

	r						
№	1	2	3	4	5	6	7
E_r	28,8	33,4	37,2	41,5	45,5	48,0	49,6
Ψ	1	0,86	0,77	0,69	0,63	0,59	0,58
r	0,0 ω	0,6 ω	0,8 ω	1,0 ω	1,5 ω	2,0 ω	3,0 ω

Исходя из полученного значения экспозиции для равномерной решетки были рассчитаны значения формфактора для гауссовских решеток при различных диаметрах луча, которые приведены в таблице 5. Сопоставляя полученные данные с теоретически полученной зависимостью формфактора Ψ от радиуса считывающего пучка r (рисунок 3), несложно оценить радиус считывающего луча r (приведены в таблице 5) и сопоставить экспериментальные данные с теоретическими. На рисунке 10 представлена теоретически полученная и экспериментальная зависимость формфактора Ψ от радиуса считывающего пучка r .

Экспериментальное значение формфактора Ψ тонкой гауссовой решетки, определяемое по формуле $\psi = E_{r0}/E_r$ где E_{r0} — требуемая экспозиция для достижения максимума дифракционной эффективности в первом порядке равномерной (плоской) решетки (или в случае использования узкого считывающего луча с радиусом $r = 0,1-0,3 \omega$, а E_r — требуемая экспозиция для достижения максимума дифракционной эффективности в первом порядке гауссовской решетки, было определено по экспериментально-полученной кинетики роста ДЭ гауссовой решетки, показанной на рисунке 11.

Исходя из соотношения $\psi = E_{r0}/E_r$ формактор тонкой решетки в режиме дифракции Рамана — Ната при записи гауссовыми пучками составляет $\Psi = 28,8 / 41,5 = 0,69$.

На рисунке 12 приведены рассчитанные кривые кинетики ДЭ гауссовой решетки и экспериментально-полученные при радиусах считывающего пучка от $r = 0,0 \omega$ до $r = 3,0 \omega$.

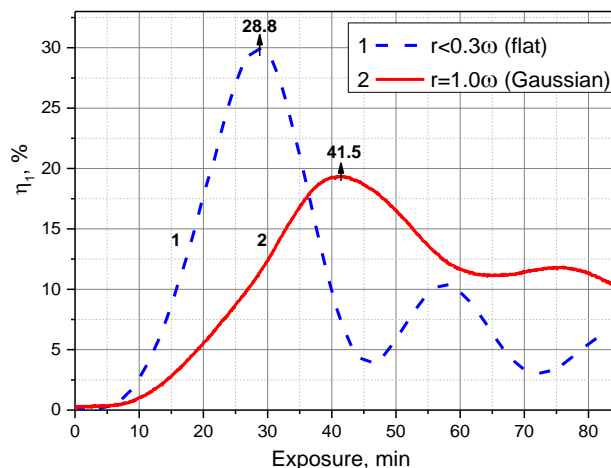


Рис. 11. Экспериментально-полученная кинетика ДЭ гауссовой решетки при радиусе считывающего луча $r < 0,3 \omega$ (кривая 1) и при радиусе считывающего луча $r = 1,0 \omega$ (кривая 2). На горбах кинетики ДЭ показана требуемая экспозиция до достижения первого максимума.

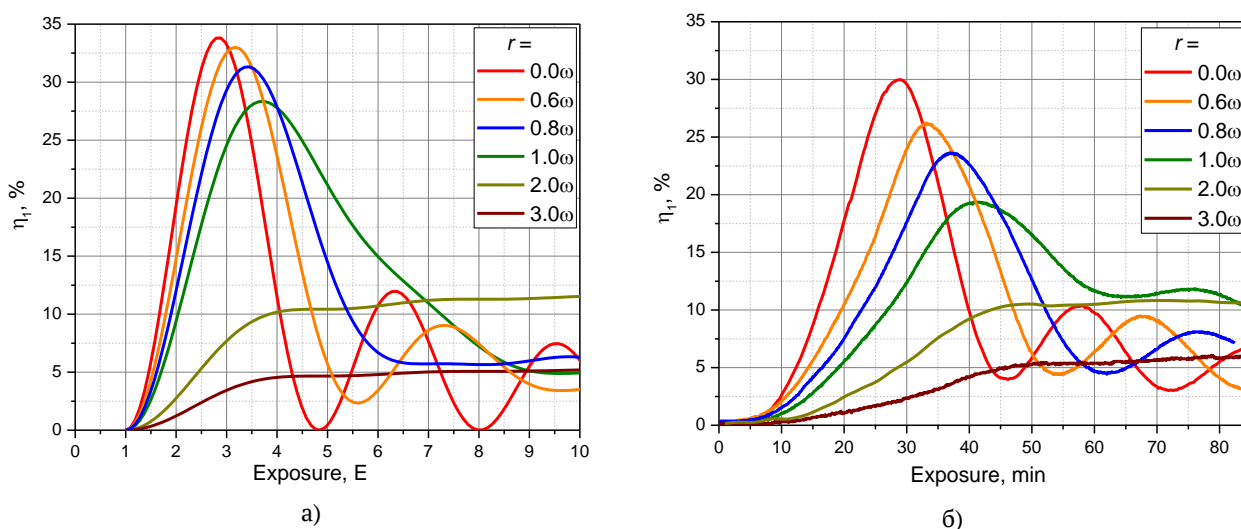


Рис. 12. Рассчитанные кривые кинетики ДЭ гауссовой решетки (а) и экспериментально-полученные (б) при радиусах считывающего пучка от $r = 0,0 \omega$ до $r = 3,0 \omega$

Заключение

1. Найден и численно определен эффект формфактора при записи гауссовыми пучками голограмм, описываемых дифракцией Рамана — Ната. Для гауссовых голограмм с шириной, определенной по уровню $1/e$, значение формфактора составляет 0,69.

2. Экспериментально подтверждено проявление формфактора в регистрирующей среде на основе многослойной структуры ХСП и в азополимерах.

3. Значения рассчитанных формфакторов для толстых и тонких гауссовых голограмм дает основание считать эффект проявления формфактора более универсальным, одинаково

применимым и близким по значениям для двух видов дифракции, дифракции Брэгга и дифракции Рамана — Ната.

4. Эффект формфактора голограмм был использован при определении динамического диапазона фотоотклика при изучении регистрирующих сред на основе многослойной структуры ХСП и в азополимерах.

Как показано, для гауссовых голограмм максимально достижимая дифракционная эффективность ограничивается эффектом формфактора, который присущ как для тонких решеток, так и для толстых. Полученный коэффициент увеличения оптимальной экспозиции позволяет добиться регистрации голограмм с максимальным значением ДЭ, что определяет качество работы голографических приборов.

Список источников

- [1] **Шойдин, С. А.** Дифракционная эффективность голограмм, записанных гауссовыми пучками // Интерэкспо Гео-Сибирь 2015. СибОптика. — 2015: сб. материалов междунар. науч. конф. — Новосибирск: Изд-во Сиб. ун-т геосистем и технологий. — 2015. — Том 5. — С. 71–76.
- [2] **Шойдин, С. А.** О требованиях к параметрам источника излучения для голографии // Лазеры. Измерения. Информация. 2013: сб. докл. — СПб.: Изд-во СПб. Политехнич. ун-та. — 2013. — Том 1. — С. 94–107.
- [3] **Шойдин, С. А.** Требования к лазерному излучению и формфактор голограмм // Оптический журнал. — 2016. — Том 83. — № 5. — С. 65–75.
- [4] **Шойдин, С. А.** Метод достижения максимальной дифракционной эффективности голограмм на основе оптимизации формфактора // Компьютерная оптика. — 2016. — Том 40. — № 4. — С. 501–507.
- [5] **Шойдин, С. А.** Влияние нелинейности фотоотклика на дифракционную эффективность голограмм / Автометрия. — 2019. — Том 55. — № 1. — С. 39–35
- [6] **Шойдин, С. А.** Формфактор голограмм сложных изображений / С. А. Шойдин, А. В. Трифанов // Компьютерная оптика. — 2018. — Том 42. — № 3. — С. 362–368.
- [7] **Шойдин, С. А.** Формфактор голограмм и модификация статистики / Национальная конференция с международным участием // С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев, «СибОптика-2018», г. Новосибирск, 23 апреля. — 2018. — в печати.
- [8] **Goodman, J. W.** Introduction to Fourier Optics. 2nd ed. — McGraw-Hill, 1996. — 441 p.
- [9] **De Jong, T. M.** Surface-relief and polarization gratings for solar concentrators / T. M. de Jong, D. K. G. de Boer, C. W. M. Bastiaansen // Optics Express. — 2011. — Vol. 19. — № 16. — P. 15127–15142.
- [10] **Cazac, V.** Surface relief and refractive index gratings patterned in chalcogenide glasses and studied by off-axis digital holography / V. Cazac, A. Meshalkin, E. Achimova, V. Abashkin, et.al. // Applied Optics. — 2018. — Vol. 57. — № 3. — P. 507–513.
- [11] **Meshalkin, A.** Direct photoinduced surface relief formation in carbazole-based azopolymer using polarization holographic recording / A. Meshalkin, S. Robu, E. Achimova, A. Prisacar, et.al. // J Optoelectron Adv M. — 2016. — Vol. 18. — № 9-1. — P. 763–768.
- [12] **Achimova, E.** Direct surface relief formation on As₂S₃-Se nanomultilayers in dependence on polarization states of recording beams / E. Achimova, A. Stronski, V. Abaskin, A. Meshalkin, et.al. // Optical Materials. — 2015. — Vol. 47. — P. 566–572.
- [13] **Matsushima, K.** Band-limited angular spectrum method for numerical simulation of free-space propagation in far and near fields / K. Matsushima, T. Shimobaba // Optics Express. — 2009. — Vol. 17. — № 22. — P. 19662–19673.