

УДК 535.317.1

АНАЛИЗ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛОЖНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ,
ФОРМИРУЕМЫХ ОБЪЕМНЫМИ ГОЛОГРАММНЫМИ
ОПТИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Корешев С. Н., Семенов Г. Б.

Экспериментально исследуются пространственно-энергетические характеристики ложных изображений, под которыми понимаются восстановленные с голограммы пучки лучей, направления распространения которых отличаются от направления распространения пучка, соответствующего основному изображению. Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что основной и примерно равный вклад в интенсивность ложных изображений вносят зарегистрированные на голограмме паразитные структуры и внутренние переотражения пучков на стадии восстановления голограммы. Показано, что в случае синфазного сложения ложных изображений их интенсивность может достигать десятков процентов от интенсивности восстанавливающего пучка.

Разработка оптических систем, включающих в свой состав голограммные оптические элементы (ГОЭ), предопределяет необходимость исследования уровней интенсивности формируемых ГОЭ ложных изображений. Под ложными изображениями здесь понимаются восстановленные с голограммы пучки лучей, направления распространения которых отличаются от направления распространения пучка, формирующего основное изображение. К настоящему времени опубликован ряд работ, посвященных исследованию причин возникновения ложных изображений [1, 2]. В этих работах указано, что источниками ложных изображений являются внутренние переотражения восстановленного и восстанавливающего пучков в процессе восстановления голограммы, а также паразитными интерференционными структурами, обусловленные внутренними переотражениями объектного и опорного пучков в процессе регистрации голограммы. В [1] приведены результаты выполненного на основе теории связанных волн [3] анализа пространственно-энергетических характеристик изображений, обусловленных переотражениями пучков при восстановлении голограммы. Еще одной причиной возникновения ложных изображений является наклон изофазных поверхностей синусоидальных объемных решеток, приводящий к появлению четырех пространственно разделенных порядков дифракции света на этих решетках. В [4] приведена электродинамическая теория возмущений для дифракции света на объемных фазовых решетках, справедливая для голограмм с малой дифракционной эффективностью и позволяющая определить направление распространения и интенсивности всех четырех порядков дифракции объемной фазовой голограммы.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование пространственно-энергетических характеристик ложных изображений, обусловленных как внутренними переотражениями пучков, так и наклоном изофазных поверхностей объемной фазовой голограммы. Исследование проводилось с помощью отбеленных голограмм плоских волн, полученных на галогенидосеребряных слоях ПЭ-2 на длине волны 0.63 мкм. При этом исследование ложных изображений, обусловленных наклоном изофазных поверхностей голограммы, осуществлялось нами для отражательной голограммы, схема получения которой представлена на рис. 1. На этом рисунке цифрами 1 и 4 обозначены плоскопараллельные стеклянные пластины (толщиной 10 мм), установленные на иммер-

сии (диметилфталат) на стеклянную подложку 3 и светочувствительный слой 2. Буквами *A* и *B* обозначены направления распространения параллельных пучков, формирующих регистрируемое голографическое поле, а φ и φ_s — углы падения этих пучков на плоскость регистрации голограммы. Величины углов φ и φ_s при получении голограммы выбирались таким образом, чтобы исключить возможность интерференции пучков *A* и *B* с их отражениями от поверхностей раздела пластина—воздух в пределах апертуры голограммы \varnothing 6 мм. После усадки голограммы в процессе фотохимической обработки величины этих углов, т. е. углов Брэгга при восстановлении голограммы излучением с $\lambda=0.63$ мкм, в объеме голограммы составляли 20.4 и 154.4° соответственно. Дифракционная

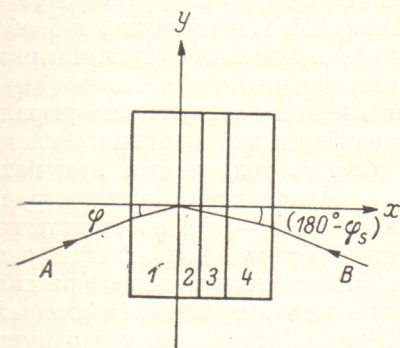


Рис. 1. Схема получения голограммы.

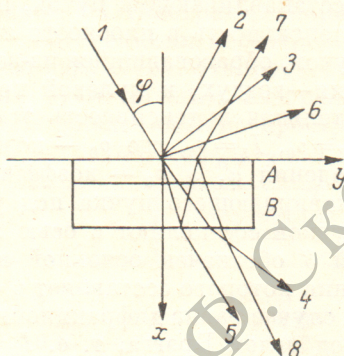


Рис. 2. Схема формирования ложных изображений, обусловленных переотражениями пучков на стадии восстановления голограммы.

эффективность голограммы при восстановлении под углом Брэгга была равна 68 %. При освещении голограммы параллельным пучком когерентного света она формировала, как это было описано в [4], четыре порядка дифракции: два — на отражение и два — на пропускание. В табл. 1 приведены теоретически рас-

Таблица 1

Угол падения восстанавливающего пучка, град	Угол дифракции, град	Относительная интенсивность, %	
		расчет	эксперимент
27.7	33.3	0.028	0.014
	22.4	0.029	0.042
22.2	27.5	0.029	0.03
	17.1	0.024	0.008
16.1	21.2	0.023	0.013
	11.2	0.015	0.013

считанные и измеренные в ходе эксперимента значения интенсивности пучков лучей, формируемых отражательной голограммой на пропускание, отнесенные к интенсивности восстанавливающего пучка лучей с $\lambda=0.63$ мкм. Отметим, что расчет интенсивности проводился с помощью выражений, приведенных в [4], при подстановке в них экспериментально найденных значений эффективной толщины голограммы $T=4.7$ мкм и произведения $n_1 T=0.2$ мкм, где n_1 — амплитуда модуляции показателя преломления. Измерение интенсивности пучков осуществлялось по схеме, аналогичной схеме записи. Отличие состояло лишь в том, что пучок *B* при этом перекрывался, а на границу раздела пластина—воздух накладывалась диафрагма, позволявшая отсечь пучки лучей, сформированные голограммой за счет внутренних переотражений. Приведенные в табл. 1 значения интенсивности свидетельствуют о возможности использования результатов [4] для оценки интенсивности ложных изображений, обусловленных на-

клоном изофазных поверхностей объемных фазовых голограмм с достаточно высокой дифракционной эффективностью (по крайней мере до 70 %).

Исследование интенсивности ложных изображений, формируемых голограммой вследствие внутренних переотражений восстанавливающего и восстановленного пучков, проводилось нами с помощью рассмотренной выше голограммы. При этом на стадии восстановления плоскопараллельные пластины 1 и 4 убирались, а голограмма освещалась плоской волной, падающей на ее поверхность под углом Брэгга. В этом случае она формировала 7 пучков лучей, пространственное распределение которых представлено на рис. 2. На этом рисунке буквами А и В обозначены эмульсионный слой и стеклянная подложка, а цифрой 1 — восстанавливающий пучок, падающий на голограмму под углом Брэгга φ . Его интенсивность в плоскости $x=0$ положим равной 1. Цифрами 2 и 5 обозначены пучок, образовавшийся из-за френелевского отражения от границы раздела эмульсия—воздух, и нулевой порядок дифракции голограммы соответственно. Относительная интенсивность этих пучков описывается следующими выражениями: $I_2 = \rho_0$, $I_5 = \sigma_0$, где ρ_0 — коэффициент отражения эмульсионного слоя при угле падения φ , а σ_0 — коэффициент пропускания голограммы при падении восстанавливающего пучка под углом Брэгга. Направления распространения этих пучков составляют с осью x углы, равные $(180^\circ - \varphi)$ и φ соответственно. Цифрой 3 обозначен основной восстановленный пучок, направление распространения которого составляет с осью x угол φ_1 . Его интенсивность в рассматриваемом случае равна дифракционной эффективности голограммы, восстанавливаемой под углом Брэгга, т. е. $I_3 = \eta_0$. Френелевское отражение этого пучка от границы раздела эмульсионный слой—воздух приводит к образованию дополнительного пучка лучей 4, распространяющегося под углом $(180^\circ - \varphi_1)$ к оси x . Интенсивность этого пучка $I_4 = \eta_0 \rho_1 \sigma_1$, где ρ_1 — коэффициент френелевского отражения эмульсионного слоя при угле падения пучка, равного φ_1 , а σ_1 — пропускание голограммы при угле падения восстанавливающего пучка $(180^\circ - \varphi_1)$. Дифракция этого пучка в объеме голограммы приводит к формированию пучка 6, распространяющегося в направлении, составляющем с осью x угол φ_2 , величина которого может быть определена исходя из векторных соотношений, представленных в [3]. Интенсивность этого пучка $I_6 = \eta_0 \rho_0 \eta_1$, где η_1 — дифракционная эффективность отражательной голограммы при ее освещении под углом $(180^\circ - \varphi_1)$. Френелевское отражение пучка 6 от границы раздела подложка—воздух обуславливает формирование пучка 7, распространяющегося в направлении, параллельном направлению распространения пучка 2. Его интенсивность $I_7 = \sigma_0 \rho_0 \sigma_2$, где σ_2 — пропускание голограммы при ее восстановлении под углом $(180^\circ - \varphi)$. Дифракция этого пучка на структуре голограммы обуславливает появление пучка лучей 8, распространяющегося под углом φ_3 к оси x . Отметим, что величина этого угла определяется аналогично величине угла φ_2 . Интенсивность этого пучка описывается выражением $I_8 = \sigma_0 \rho_0 \eta_2$, где η_2 — дифракционная эффективность голограммы при ее восстановлении под углом $(180^\circ - \varphi)$. Помимо рассмотренных выше пучков голограмма формирует еще ряд ложных изображений, обусловленных вторичными переотражениями пучков от границ раздела. Однако эти изображения здесь не анализируются, поскольку их интенсивность по крайней мере на порядок меньше интенсивности рассмотренных выше пучков. Следует отметить еще и тот факт, что указанные на рис. 2 пучки 4 и 8 распространяются в том же направлении, что и пучки лучей, обусловленные наклоном изофазных поверхностей отражательной голограммы. В табл. 2 приведены экспериментально полученные и рассчитанные значения интенсивности ложных изображений, обусловленных внутренними переотражениями восстанавливающего и восстановленного пучков в процессе восстановления голограммы. Отметим, что расчет интенсивности проводился с помощью приведенных выше выражений при подстановке в них экспериментально измеренных значений $\sigma_0 = 0.165$, $\sigma_1 = 0.67$, $\sigma_2 = 0.67$, $\eta_0 = 0.68$, $\eta_1 = 0.074$, $\eta_2 = 0.096$, $\rho_0 = 0.06$, $\rho_1 = 0.074$, $\rho_2 = 0.056$. В процессе измерения интенсивности ложных изображений, обусловленных переотражениями пучков на стадии реконструкции голограммы, мы не принимали никаких мер к устранению ложных изображений, обусловленных наклоном изофазных поверхностей отражательной голограммы, поэтому данные, приведенные в последнем столбце табл. 2, характе-

ризируют суммарный вклад обеих упомянутых выше причин формирования ложных изображений. Однако результаты измерений, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о том, что интенсивность ложных изображений, обусловленных наклоном изофазных поверхностей, намного (на 1—2 порядка) меньше интенсивности изображений, обусловленных переотражениями пучков. Таким образом, из сравнения данных, приведенных в табл. 1 и 2, можно сделать вывод о том, что основным источником ложных изображений, формируемых фазовой голографической решеткой, являются внутренние переотражения пучков на границах раздела эмульсионный слой—воздух и подложка—воздух.

Помимо рассмотренных переотражений существенный вклад в образование ложных изображений вносят зарегистрированные на голограмме паразитные интерференционные структуры, обусловленные внутренними переотражениями пучков, формирующих основную голограммную структуру. Направления распространения пучков лучей, соответствующих этим ложным изображениям, обычно совпадают с изображенными на рис. 2 направлениями распространения

Таблица 2

Номер пучка	Относительная интенсивность, %	
	расчет	эксперимент
4	3.3	3.5
6	0.3	0.35
7	0.7	0.8
8	0.1	0.1

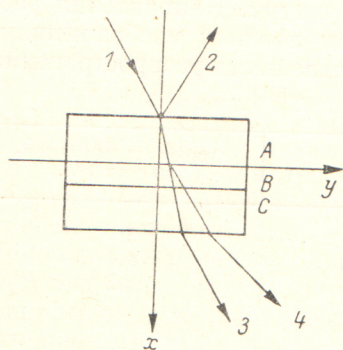
Таблица 3

τ	Относительная интенсивность, %
1	5
0.26	1.4
0.15	0.2

пучков лучей, обусловленных переотражениями на стадии восстановления голограммы. С целью определения вклада паразитных голограммных структур в интенсивность ложных изображений, нами были зарегистрированы отражательные голограммы, схема получения которых была близка к представленной на рис. 1 и отличалась от нее тем, что вместо плоскопараллельных пластин 1 и 4 использовались нейтральные светофильтры. Отметим, что толщина светофильтров и величины углов падения пучков на регистрирующую среду (18 и 13°) не приводили к пространным разделению формирующих голограмму пучков с их переотражениями от границ раздела светофильтры—воздух. Использование нейтральных светофильтров позволяло уменьшить интенсивность отраженных от границ раздела пучков лучей и тем самым позволяло варьировать величину отношения интенсивностей пучков, формирующих паразитные интерференционные картины, а следовательно, и дифракционную эффективность паразитных голограммных структур. Это объясняется тем, что отраженные от границ раздела светофильтры—воздух пучки лучей дважды проходили через светофильтры, следовательно, их интенсивность ослаблялась светофильтрами в $1/\tau^2$ раз, где τ — коэффициент пропускания светофильтра. Измерение интенсивности ложных изображений, обусловленных паразитными голограммными структурами, проводилось нами по схеме, представленной на рис. 3. На этом рисунке буквой А обозначен нейтральный светофильтр, наложенный на иммерсии на голограмму В, буквой С — плоскопараллельная подложка голограммы, а цифрами 1 и 3 — падающий на голограмму под углом Брэгга восстанавливающий пучок и пучок лучей, соответствующий нулевому порядку дифракции соответственно. Наличие светофильтра А с коэффициентом пропускания 0.15 позволяло в 44 раза ослабить интенсивность ложного изображения 4, обусловленного отражением восстановленного с голограммы пучка 2 от границы раздела светофильтр—воздух на стадии восстановления голограммы, и, как это следует из данных в табл. 2, довести уровень его относительной интенсивности до величины < 0.1 %. Благодаря этому мы смогли оценить вклад зарегистрированной на голограмме паразитной структуры в интенсивность ложного изображения, формируемого пучком 4. Результаты проведенных нами измерений интенсивности ложных изображений, формируемых голограммами, при регистрации которых использовались светофильтры различной плотности, приведены в табл. 3. Данные, приведенные в этой таблице, позволяют сделать следующие выводы:

интенсивность ложных изображений, обусловленных паразитными голограммными структурами, сравнима по величине с интенсивностью ложных изображений, возникающих вследствие внутренних переотражений пучков на стадии восстановления голограммы; использование при получении отбеленных фазовых отражательных голограмм нейтральных светофильтров с коэффициентом пропускания 0.15 позволяет примерно в 20 раз снизить интенсивность ложных изображений, обусловленных паразитными голограммными структурами.

В настоящей работе мы рассматривали вклад каждой из перечисленных выше причин формирования ложных изображений в отдельности. При оценке суммарной интенсивности ложных изображений, обусловленных одновременным присутствием наклона изофазных поверхностей голограммы, паразитных голограммных структур и внутренних переотражений на стадии восстановления необходимо



учитывать одинаковость направлений распространения и когерентность дополнительных пучков лучей, обусловленных всеми тремя вышеназванными факторами. Исключение составляет лишь +1 порядок дифракции на отражение отражательной голограммы, направление распространения которого не совпадает с направлениями распространения пучков лучей,

Рис. 3. Схема восстановления голограммы при исследовании вклада паразитных голограммных структур в интенсивность ложных изображений.

обусловленных внутренними переотражениями на стадиях получения и восстановления голограммы. Таким образом, на основании данных, приведенных в табл. 1—3, можно сделать заключение о том, что в неблагоприятных случаях, т. е. случаях синфазного сложения формируемых ГОЭ ложных изображений, относительная интенсивность последних может достигать десятков процентов, что, конечно же, не может не сказаться на эксплуатационных характеристиках приборов с ГОЭ.

Радикальным средством устранения ложных изображений, как показывает проведенное нами теоретическое и экспериментальное исследование, является использование ГОЭ с изофазными поверхностями, параллельными поверхности голограммы, т. е. ГОЭ, у которого отсутствует наклон изофазных поверхностей. Внутренние переотражения в таких голограммах сказываются лишь на их дифракционной эффективности [5], но не приводят к появлению ложных изображений. Однако следует отметить, что неоднородность толщины и клиновидность подложки таких ГОЭ все же может приводить к возникновению ложных изображений, обусловленных внутренними переотражениями пучков. При получении и использовании ГОЭ, обладающих наклоном изофазных поверхностей, необходимо принимать специальные меры, направленные на уменьшение интенсивности ложных изображений. В числе таких мер можно назвать: увеличение эффективной толщины регистрирующей среды, позволяющее уменьшить интенсивность ложных изображений, обусловленных наклоном изофазных поверхностей [4], и использование на стадиях получения и восстановления голограммы интерференционных или нейтральных светофильтров, позволяющих снизить интенсивность отраженных от границ раздела пучков и т. п.

Литература

- [1] Owen M. P., Ward A. A., Solyman L. — Appl. Opt., 1983, v. 22, N 1, p. 159—163.
- [2] Syms R. R. A., Solyman L. — Appl. Opt., 1983, v. 22, N 10, p. 1479—1496.
- [3] Kogelnik H. — The Bell system technical journal, 1969, v. 48, N 9, p. 2909—2947.
- [4] Константинов О. В., Романов Ю. Ф., Рыхлов А. Ф. — Опт. и спектр., 1979, т. 46, в. 5, с. 979—985.
- [5] Kogelnik H. — JOSA, 1967, v. 57, p. 431.

Поступило в Редакцию 24 мая 1985 г.