

## ПРИМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ГОЛОГРАММ С ЗАПИСЬЮ В ПОГЛОЩАЮЩИХ ГАЗАХ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ МАЛОИНТЕНСИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

*А. М. Березинская, А. М. Духовный*

Изучены процессы голографирования зеркальных и диффузно рассеивающих объектов по традиционной оптической схеме и с применением импульсного оптического усилителя изображений на основе динамических голограмм в поглощающих газах. В результате исследования величин контраста восстановленных изображений и дифракционной эффективности голограмм в области низких интенсивностей регистрируемого излучения было установлено, что использование рассматриваемого типа усилителя для усиления объектных пучков позволяет расширить диапазон регистрируемых интенсивностей и чувствительность голографического метода записи изображений на галондосеребряные среды более чем на два порядка.

Использование динамических голограмм (ДГ) в качестве голографических усилителей изображений (ГУИ) объектов [1—3] позволяет решить по крайней мере две задачи при регистрации маломощных световых потоков. Первая — это увеличение эффективности использования лазерной энергии, что эквивалентно снижению требований к чувствительности регистрирующего фотоприемника или интенсивности излучения лазера как источника освещения объекта. Это достигается перераспределением части освещающего объект пучка в пучок накачки (опорный) ДГ, которая расположена между объектом и фоторегистратором, с последующей перекачкой энергии объектному пучку вследствие взаимодействия волн в ДГ [4]. Такой способ регистрации оптического сигнала от объекта не требует дополнительных затрат энергии, которые имели бы место с применением лазерного усилителя, например, и при определенных условиях может оказаться энергетически более выгодным, чем при освещении объекта всем лазерным пучком. Проиллюстрируем это. Пусть  $\Phi_{\text{л}}$  — поток энергии лазера;  $\alpha$  ( $\alpha < 1$ ) — коэффициент энергетических потерь в канале объектного пучка;  $k$  ( $k < 1$ ) — коэффициент, определяющий часть излучения, направляемую в пучок накачки;  $\eta$  — эффективность преобразования пучков ДГ, характеризующая долю пучка накачки, передаваемую объектной волне в ДГ;  $S$  — площадь фотоприемника. Тогда освещенность фотоприемника при традиционном способе измерения сигнала, т. е. в отсутствие ГУИ, будет  $E = (1 - \alpha) \cdot \Phi_{\text{л}} / S$ , а в случае применения ГУИ  $E_{\Gamma} = \eta \cdot k \cdot \Phi_{\text{л}} / S$ . Отношение

$$\beta = E_{\Gamma} / E = \frac{\eta \cdot k}{1 - \alpha} \quad (1)$$

характеризует величину выигрыша в освещенности фоторегистратора при усилении объектной волны, и этот выигрыш имеет место при условии  $\beta > 1$  или  $\eta \cdot k > 1 - \alpha$ , т. е. только при наличии потерь объектного пучка, с увеличением которых выигрыш становится более значительным, а следовательно, использование ГУИ будет наиболее эффективным при усилении малоинтенсивных оптических сигналов. Достигнутые на практике величины эффективностей преобразования  $\eta = 0.5 - 0.6$  [5], коэффициент  $k$  желательно иметь по величине как можно ближе к единице, однако сверху он ограничивается величиной потока объектного пучка  $\Phi_{\text{об}} = (1 - \alpha)(1 - k)\Phi_{\text{л}}$ , который должен быть, очевидно, больше уровня собст-

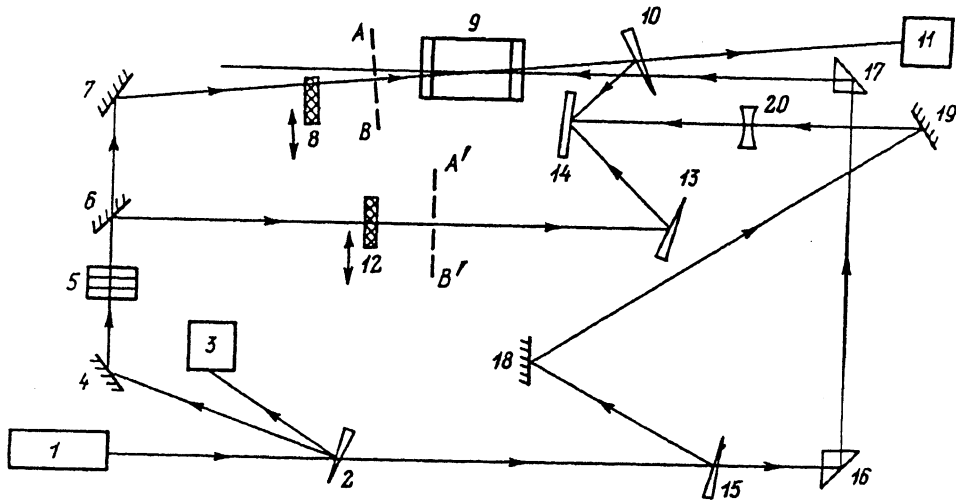


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента.

1 — импульсный лазер; 2, 10, 13, 15 — стеклянные клины; 3, 11 — измерители для лазерной дозиметрии ИЛД-2М; 4, 7, 18, 19 — полностью отражающие зеркала; 5 — светофильтры; 6 — полупрозрачное зеркало; 8, 12 — диффузные экраны; 9 — ювега со смесью газов; 14 — фотопластинка для записи голограмм; 16, 17 — призмы; 20 — отрицательная линза.

венных шумов ГУИ. Потери света в канале объектного пучка могут быть вызваны различными причинами, в том числе малыми прозрачностями или коэффициентами отражения объектов, диффузным характером рассеяния света от них и т. д.

Во втором, наиболее актуальном на практике случае, потери могут быть весьма значительными в силу того, что пучок рассеивается от исследуемого объекта в большой телесный угол и не попадает на регистрирующее устройство, имеющее ограниченные размеры. Использование ГУИ позволяет основную часть энергии объектного пучка усилить в полосе пространственных частот ГУИ, обеспечивающей наиболее полное попадание излучения на фотоприемник. Оценки показывают, что  $\beta$  в этом случае может достигать величин более одного порядка.

Вторая задача, которую позволяет решать ГУИ — это снижение минимально возможного уровня регистрируемого оптического сигнала, что становится возможным при условии более низкой интенсивности собственных шумов ГУИ по сравнению с шумами регистрирующего устройства. Пример решения этой задачи был продемонстрирован в [6], где ГУИ на фоторефрактивном кристалле использовался в качестве предусилителя лазера на парах меди.

Перспективными для целей импульсного усиления оптического излучения являются ДГ в газах с тепловой нелинейностью, что обусловлено возможностью высокоэффективного преобразования (свыше 50%) изображений зеркальных и диффузно рассеивающих объектов [5, 2–3], малыми величинами фазовых аберраций объектного пучка, вносимых ДГ, в достаточно широком интервале параметров записи голограмм [7], а также сравнительно низким уровнем собственных шумов ДГ, составлявшим менее  $10^{-8}$  пучка накачки в телесном угле  $10^{-2}$  ср и по крайней мере на два порядка меньшим типичной величины шума для широко распространенных фоторегистрирующих сред на основе галлоидосеребряных эмульсий [8]. Это связано с тем, что если при регистрации оптического сигнала в фотослое наблюдается шумовое излучение, связанное с рассеянием света на поверхностном рельефе фотослоя, зернистой структуре эмульсий, неоднородностях оптических элементов и интермодуляционные шумы [9, 10], то в случае записи тепловых ДГ в газах первые два типа отмеченных шумов для ДГ неактуальны. Далее, следует учесть, что шумы ДГ обусловлены рассеянием пучка накачки на

усилением шума в поле накачки преимущественно в противоположном накачке направлении [8], а это допускает возможность усиления светового импульса при больших значениях отношения сигнал/шум в направлениях, отличных от точно встречного; в то же время подобная отстройка сигнала от шума путем изменения геометрии регистрации изображений на фотоэмульсию практически исключена из-за большеуглового (десятьки градусов) характера рассеяния света на зернах эмульсий и оптических элементах установки [9, 10]. Наиболее заметно преимущество тепловых ДГ в газах перед галоидосеребряными фотоэмульсиями с точки зрения параметра сигнал/шум должно проявиться при голографическом способе регистрации изображений объектов на такие фотоэмульсии, так как в этом случае уровень шумов в восстановленном голограммой изображении определяется опорным пучком, в то время как при фотографическом на несколько порядков меньшим по интенсивности объектным пучком. Из вышесказанного следует целесообразность использования тепловых ДГ в качестве оптического усилителя для расширения диапазона регистрируемых интенсивностей галоидосеребряными фотоматериалами, что актуально, в частности, при голографировании объектов в неразрушающем контроле. В предлагаемой работе приводятся результаты сравнительного исследования процесса голографирования зеркальных и диффузно рассеивающих объектов с использованием ГУИ на основе записи ДГ в поглощающих газах и в его отсутствие.

Оптическая схема эксперимента приведена на рис. 1. Источником излучения служил одномодовый лазер на неодимовом стекле с преобразованием во вторую гармонику ( $\lambda = 0.53$  мкм), обеспечивавший генерацию импульсов длительностью 25—30 нс. Диаметр лазерного пучка составлял 4 мм. Нестационарная запись отражательных ДГ осуществлялась вырожденными по частоте пучками с углом схождения  $\Theta = 177.5^\circ$  в газовой смеси окислов азота и ксенона [5, 11], заполнявшей кювету длиной 5 см с прозрачностью используемой смеси на длине волны второй гармоники 40%. Плотность энергии пучка накачки в экспериментах не изменялась и составляла  $w_{\text{нак}} = 0.35$  Дж/см<sup>2</sup>. Голографическая запись усиленных ГУИ и неусиленных изображений объектов осуществлялась одновременно на промышленных фотопластинках ВРП, широко используемых для целей голографии в зеленой области спектра [12]. Объектные пучки формировались идентичными диффузными экранами 8 и 12, расположенными на равных расстояниях от голограммы 14, причем экран 8 устанавливался таким образом, чтобы исключалось попадание на него прошедшего кювету пучка накачки, либо использовались плоские волны в отсутствие экранов. На экране устанавливался репер в виде креста из проволоки толщиной 0.3 мм. Полупрозрачное зеркало 6 обеспечивало равенство интенсивностей пучков перед диффузными экранами. Оба объектных пучка направлялись клиньями 10 и 13 на различные участки фотопластинки 14 под разными углами к опорному пучку, что позволяло избежать появления дополнительных изображений при восстановлении голограммы, затрудняющих проведение корректных измерений ее дифракционной эффективности (ДЭ) и контраста восстановленных изображений. Опорный пучок на голограмму 14 формировался с помощью оптического клина 15, зеркал 18 и 19 и отрицательной линзы 20. Плотность энергии пучка в плоскости фотопластинки 14 составляла  $2 \cdot 10^{-4}$  Дж/см<sup>2</sup>, что обеспечивало получение максимума ДЭ при восстановлении голограмм. Голографические изображения восстанавливались излучением гелий-неонового лазера и строились линзой с требуемым увеличением. Критерием исчезновения изображения при восстановлении в случае наличия диффузного экрана являлось исчезновение репера в изображении, а в случае восстановления плоской волны — исчезновение в фокальной плоскости линзы светового пятна малого размера, характерного для сфокусированной плоской или сферической волн, при этом в обоих случаях в плоскости изображений и дальней зоне наблюдалась типичная для когерентных шумов спекловая картина поля. Контраст восстановленного изображения ( $\gamma$ ) рассчитывался из соотношения  $\gamma = (I_c - I_{\text{ш}})/(I_c + I_{\text{ш}})$ , где интенсивность шума  $I_{\text{ш}}$  измерялась в перекрестии репера

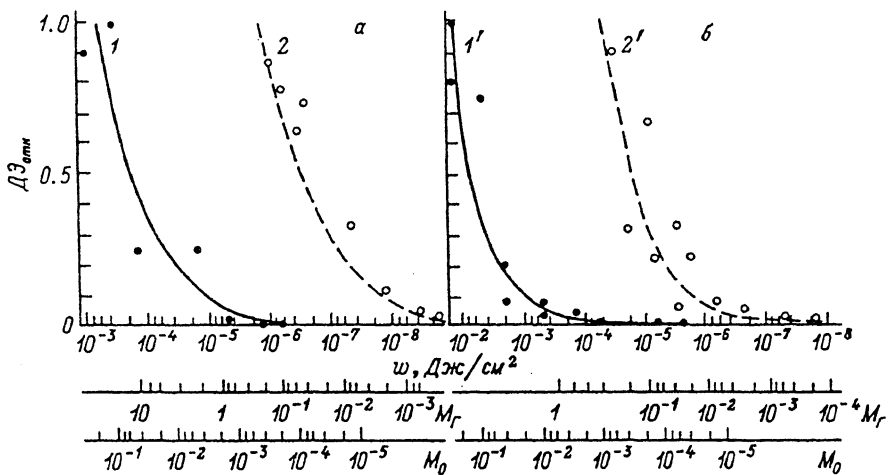


Рис. 2. Зависимость нормированной дифракционной эффективности голограмм от плотности энергии объектного пучка при записи изображений зеркальных (а) и диффузно рассеивающих (б) объектов без усиления (1, 1') и с усилением (2, 2') объектного пучка.

Сплошные линии — эксперимент, штриховые — расчет;  $M_Г$ ,  $M_0 = w_{\text{объект}}/w_{\text{опорн}}$  — соотношения пучков на голограмме в случаях без ГУИ и с его применением соответственно.

в восстановленном изображении, а  $I_c$  — интенсивность восстановленного изображения вблизи перекрестия.

Результаты сравнительного исследования ДЭ голограмм зеркальных и диффузно рассеивающих объектов с использованием ГУИ и в его отсутствие приведены на рис. 2. По оси ординат отложена относительная ДЭ, нормированная на максимальные значения  $DЭ_{\text{max}}$ , измеренные в каждом из рассматриваемых случаев. В наиболее интересных ситуациях усиления предельно низких по интенсивности пучков значения  $DЭ_{\text{отн}}$ , при которых восстановленные изображения еще выделялись на фоне шумов, находились в диапазоне  $DЭ_{\text{отн}} = 3-10 \cdot 10^{-3}$ , абсолютные значения ДЭ при этом составляли  $4-40 \cdot 10^{-2} \%$ . По оси абсцисс отложены значения плотности энергии объектного пучка в плоскостях А—В, А'—В' (см. рис. 1), ниже, на второй оси, отражены величины соотношений пучков  $M = w_{\text{объект}}/w_{\text{опорн}}$  на голограмме 14 (рис. 1): сверху на оси — для случая усиления излучения ГУИ ( $M_Г$ ) и внизу — без использования усилителя ( $M_0$ ). Нелинейность шкалы  $M_Г$  связана с зависимостью коэффициента усиления объектной волны  $K$  в ДГ от соотношения пучков  $M_{\text{ДГ}} = w_{\text{нак}}/w_{\text{объект}}$  на ее входе. По оси  $M$  легко найти  $K$ , имевшим место в экспериментах для данных значений  $w$ , который будет просто равен отношению  $K = M_Г/M_0$ , а также величину эффективности преобразования  $\eta$ , которая в условиях экспериментов равна  $\eta = M_Г/M_0 M_{\text{ДГ}}$ . Штриховые кривые 2, 2' получены путем расчета с использованием экспериментальных кривых 1, 1' и расчетных коэффициентов усиления [3] для условий экспериментов. Как видно из графиков данные эксперимента соответствуют расчету, что согласуется с выводом работы [7] о возможности использования усиленного тепловой ДГ излучения для эффективной записи голограмм в обычных регистрирующих средах в широком диапазоне изменений параметров ДГ. Из рис. 2 нетрудно видеть, что благодаря использованию ГУИ для усиления изображений при голографировании зеркальных и диффузно рассеивающих объектов существенно расширяется диапазон регистрируемых фотопластинкой ВРП интенсивностей объектного пучка — более чем на два порядка во всем исследованном диапазоне его плотностей энергии  $w$ . Из приведенных графиков можно

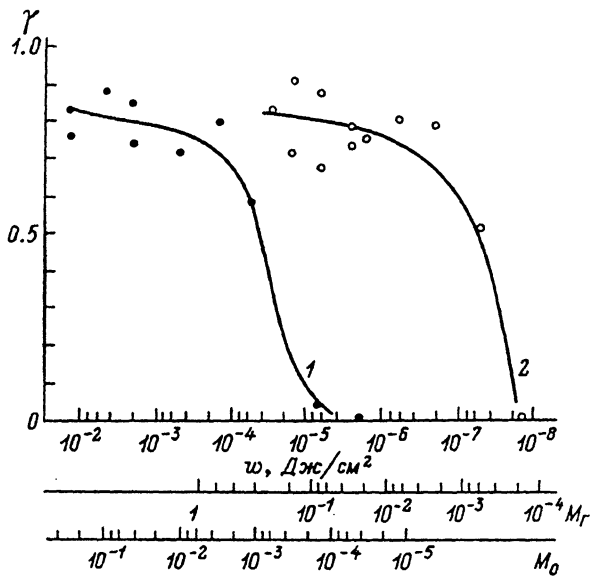


Рис. 3. Экспериментальная зависимость контраста восстановленного изображения от плотности энергии объектного пучка при записи голограмм диффузно рассеивающих объектов в случаях без усиления (1) и с усилением (2) объектного пучка.

$M_0, M_\Gamma$  — то же, что и на рис. 2.

определить величину  $\beta$  (1) для различных значений  $\omega$ . Так, для случая плоских волн (рис. 2, а) и  $\omega_1 = 10^{-4}$  Дж/см<sup>2</sup> коэффициент  $k$  был равен 0.92 (деление лазерного пучка на объектный и пучок накачки обеспечивалось клином 2 (рис. 1)), коэффициент  $\varepsilon = 0.993$  и связан был с поглощением в светофильтрах 5 и потерями на отражение зеркала 6, эффективность преобразования пучков ДГ составляла в этих условиях  $\eta = 0.1$  и  $\beta_1 = 13$ . Эта величина, количественно отражающая выгоду использования ГУИ при голографировании объектов на фотопластинки ВРП, означает в данном случае, что голографическая регистрация малоинтенсивных изображений с приемлемой дифракционной эффективностью становится возможной на фотопластинках с чувствительностью, более чем на порядок меньшей, чем у пластинок ВРП. При  $\omega_2 = 10^{-5}$  Дж/см<sup>2</sup> коэффициент потерь  $\varepsilon$  увеличивается по сравнению с предыдущим случаем, составляя величину  $\varepsilon = 0.9993$ , и, несмотря на заметное снижение значения  $\eta$ , которая была равна здесь 0.015,  $\beta_2 = 20$ , т. е. эффективность использования лазерной энергии с помощью ГУИ в соответствии с (1) возросла в 1.5 раза. Заметим, что при оптимизации условий усиления изображений ГУИ, к чему мы не стремились в проведенных экспериментах, эффективность преобразования пучков ДГ может быть существенно повышена и, следовательно, увеличится  $\beta$ .

На рис. 3 по оси ординат отложен контраст восстановленного голограммой изображения диффузно рассеивающего объекта, оси абсцисс те же, что и на рис. 2. Из рисунка следует, во-первых, что отношение значений  $\omega^{пр}$  и  $\omega^{дпр}$ , соответствующих предельно низким контрастам восстановленного изображения, которые еще можно было измерить в случаях записи изображений без ГУИ и при его участии, соответственно составляло  $\omega^{пр}/\omega^{дпр} = 160-200$ . Это означает, что применение ГУИ при голографической регистрации изображений на фотопластинку ВРП позволило более чем на два порядка снизить уровень интенсивности излучения, который может зарегистрировать данный фотоматериал. И, во-вторых, контраст восстановленных изображений в обоих рассматриваемых случаях был

примерно равный по величине при одинаковых соотношениях пучков на голограмме ( $M_T = M_0$ ), что свидетельствует о пренебрежимо малом вкладе в восстановленное изображение собственных шумов используемой ДГ по сравнению с аналогичным вкладом самих пластинок ВРП и согласуется с выводом [8] о возможности применения импульсных тепловых ДГ для повышения чувствительности методов регистрации оптических сигналов на галогосеребряные среды.

Таким образом, результаты работы показали возможность значительного расширения интервала регистрируемых интенсивностей при помощи импульсного ГУИ с тепловыми ДГ в своей основе на примере голографической записи изображений галогосеребряным фотоматериалом, что позволило повысить чувствительность метода регистрации изображений использовавшимся в исследованиях фотослоем более чем на два порядка. Очевидно, что оптический усилитель на тепловых ДГ может быть полезен не только при регистрации сигнала на галогосеребряные слои, но и на иные регистрирующие среды.

В заключение авторы выражают признательность А. Л. Чураеву за полезное обсуждение результатов работы.

#### Список литературы

- [1] Березинская А. М., Духовный А. М. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 24. С. 2259—2263.
- [2] *Berezinskaya A., Dukhovnyi A.* // SPIE proc. 1989. Vol. 1238. P. 80—84.
- [3] Березинская А. М., Духовный А. М. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 12. С. 105—107.
- [4] Винецкий В. Л., Кухтарев Н. В., Одулов С. Г., Соскин М. С. // УФН. 1979. Т. 129. № 1. С. 113—137.
- [5] Березинская А. М., Духовный А. М., Стаселько Д. И. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 15. С. 905—909.
- [6] Земсков К. И., Казарян М. А., Люксютов С. Ф. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 48. Вып. 4. С. 187—189.
- [7] Березинская А. М., Духовный А. М. // Тез. докл. VI Всесоюз. конф. по голографии. Витебск, 1990. С. 90—91. ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 11. С. 134—139.
- [8] Березинская А. М., Духовный А. М., Михальченко А. П., Чураев А. Л. // Тез. докл. VI Всесоюз. конф. по голографии. Витебск, 1990. С. 89—90.
- [9] Стаселько Д. И., Чураев А. Л. // Опт. и спектр. 1986. Т. 61. Вып. 3. С. 591—597.
- [10] Стаселько Д. И., Чураев А. Л. // Опт. и спектр. 1986. Т. 61. Вып. 4. С. 828—834.
- [11] Березинская А. М., Духовный А. М., Стаселько Д. И. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 1. С. 94—101.
- [12] Ворзобова Н. Д., Гребенишкова А. А. // Проблемы оптической голографии. Л., 1981. С. 43—49.

Поступило в Редакцию  
24 апреля 1991 г.