

УДК 535.4; 681.787

Исмаилов Джапар Авазович

кандидат технических наук,

зав. лаб. «Информационные технологии»

Институт Сейсмологии НАН КР, 720071, Кыргызстан, Бишкек

Исмаилов Джапар Авазович

техникалык илимдердин кандидаты,

«Информациалык технология» лабораториясынын жетекчиси

Сейсмология институту НАН КР, 720071, Кыргызстан, Бишкек

Ismailov Dzhapar Avazovich

Candidate of Technical Sciences,

head of laboratory of «Information technology»

The Institute of Seismology NAS KR, 720071, Kyrgyzstan, Bishkek

Кулиш Татьяна Эдуардовна

научный сотрудник,

лаб. «Информационные технологии»

Институт Сейсмологии НАН КР, 720071, Кыргызстан, Бишкек

Кулиш Татьяна Эдуардовна

илимий кызматкер,

«Информациалык технология» лабораториясы

Сейсмология институту НАН КР, 720071, Кыргызстан, Бишкек

Kulish Tatyana Eduardovna

Researcher,

laboratory of «Information technology»

The Institute of Seismology NAS KR, 720071, Kyrgyzstan, Bishkek

Жумалиев Кубанычбек Мырзабекович

академик НАН КР,

лаб. «Информационные технологии»

Институт Сейсмологии НАН КР, 720071, Кыргызстан, Бишкек

Жумалиев Кубанычбек Мырзабекович

Кыргыз Республикасынын Улуттук илимдер академиясынын академиги,

«Информациалык технология» лабораториясы

Сейсмология институту НАН КР, 720071, Кыргызстан, Бишкек

ZhumalievKubanychbek Myrzabekovich

Academician of NAS KR,

laboratory of «Information technology»

The Institute of Seismology NAS KR, 720071, Kyrgyzstan, Bishkek

ВЫБОР ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ЗАПИСЫВАЮЩЕГО МАТЕРИАЛА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Аннотация. Рассматривается один из перспективных методов исследования в области неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния объектов - голографическая интерферометрия. Он позволяет контролировать дефекты материала на малом участке деформирования и не требует разрушения исследуемых объектов.

Ключевые слова: Голограмма, интерферометрия, регистрирующая среда, фотопластина, лазер.

ГОЛОГРАФИЯЛЫК ЖАЗЫП АЛУУ МАТЕРИАЛЫН БУЗУУСУЗ СЫНОО ЫКМАЛАРЫН КОЛДОНУУ ЧӨЙРӨСҮНӨ ЖАРАША ТАНДОО

Аннотация. Объекттердин чыңалуу-деформациялык абалын кыйратпастан текшерүү тармагында келечектүү изилдөө методдорунун бири – голографиялык интерферометрия каралат. Ал кичинекей деформация зонасында материалдык кемчиликтерди көзөмөлдөөгө мүмкүндүк берет жана изилденүүчү объекттерди жок кылууну талап кылбайт.

Негизги сөздөр: Голограмма, интерферометрия, жазуу чөйрөсү, фотопластинка, лазер.

SELECTION OF HOLOGRAPHIC RECORDING MATERIAL DEPENDING ON THE SCOPE OF APPLICATION OF NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS

Abstract. The one of the most promising methods in the field of non-destructive testing of the stress-strain state of objects is holographic interferometry. It allows you to control the material defects on a small part of deformation and does not require the destruction of the objects.

Keywords: Hologram, interferometry, high-resolution recording medium, photographic plate, laser.

Развитие голографической науки и ее практические результаты в значительной степени зависят от состояния разработки светочувствительных голографических материалов, свойства которых определяют конкретную область их применения в голографии. В связи с этим в докладе последовательно рассмотрены результаты разработки необратимых и обратимых светочувствительных регистрирующих сред для изобразительной голографии, изготовления голографических оптических элементов (ГОЭ) и применения в информационных фото технологиях.

Галогенид-серебряные мелкозернистые фотоматериалы представляют для голографии особый интерес в силу их наибольшей светочувствительности по сравнению с другими голографическими регистрирующими средами, высокой разрешающей способности и широкого диапазона спектральной чувствительности, обеспечиваемой фотосенсибилизаторами. Размер микрокристаллов галогенида серебра в таких эмульсионных материалах обычно составляет 10–100 nm, что позволяет получать регистрирующие среды с разрешающей способностью до 7000 mm^{-1} .

Слои бихромированной желатины отличаются от многих голографических регистрирующих сред тем, что они обеспечивают получение голограмм высокого оптического качества с высокой величиной дифракционной эффективности (ДЭ). Они остаются привлекательными для изготовления ГОЭ, особенно больших размеров, используемых в частности для изготовления селективных концентраторов фотовольтаических и фотохимических преобразователей солнечной энергии. Слои бихромированной желатины, содержащие нитрат серебра, оказались пригодными для получения голографическим методом фотонных кристаллов, допированных серебром, изготовления рельефных голографических решеток, используемых в лазерах с распределенной обратной связью. В слое на основе рыбной желатины и бихромата аммония впервые в реальном времени излучением аргонового лазера ($\lambda = 458 \text{ nm}$) получены голограммы с ДЭ около 14%. Они, однако, имеют низкое разрешение (264 mm^{-1}).

В настоящее время голография в трехмерных регистрирующих средах нашла применение в различных областях науки и техники, в частности в изобразительной голографии, в создании голограммных отражательных фокусирующих элементов, в записи и последующем считывании информации с чрезвычайно большой емкостью, в динамической голографии и др. Объемные регистрирующие среды также успешно используются в голографической интерферометрии.

Нами предложен способ получения наложенных двухэкспозиционных интерферограмм в объемных регистрирующих средах [1]. Способ получения голографических интерферограмм может быть реализован как на плоских регистрирующих средах, так и в объемных регистрирующих средах, когда двухэкспозиционные голографические интерферограммы записываются в них в виде наложенных голограмм. При создании устройств на основе описанного способа к характеристикам регистрирующих материалов для регистрации наложенных двухэкспозиционных интерферограмм с целью изучения того или иного процесса изменения объекта с определенной скоростью и длительностью предъявляется ряд требований.

Характеристиками регистрирующего материала, представляющими наибольший интерес с этой точки зрения являются: предел емкости записи, дифракционная эффективность, светочувствительность и разрешающая способность.

Известно, что регистрирующие среды условно разделяются на плоские и объемные. Критерий перехода от двумерных к трехмерным регистрирующим средам определяется соотношением Клейна [2]

$$P \geq 1,6 \frac{d^2}{\lambda} \quad (1)$$

где P – толщина регистрирующего слоя;

d – расстояние между интерференционными полосами;

λ – длина волны излучения в регистрирующей среде.

Запись наложенных голограмм возможна на плоских носителях, однако с ростом количества наложенных голограмм, дифракционная эффективность восстановленного изображения с каждой голограммы уменьшается как $\frac{1}{N^2}$, понижается отношение сигнал/шум в плоскости изображения, а также значительную трудность представляет необходимость отклонения опорного пучка на большие углы вследствие их низкой угловой селективности [3].

С точки зрения записи наложенных голограмм гораздо большими потенциальными возможностями обладают объемные регистрирующие среды. Благодаря высокой угловой селективности объемных голограмм в одном и том же объеме регистрирующей среды возможно наложение большого числа голограмм от 100 до 1000.

Процесс записи наложенных голограмм плоской волны в объемных регистрирующих средах исследован в работе [4]. Более подробное изложение для фазовых и амплитудных голограмм приведено в [5]. В частности, в этой работе приведены соотношения определяющие предел емкости записи наложенных голограмм. Этим параметром в нашем случае определяется количество записываемых наложенных голограмм объекта в разных его состояниях и это, в свою очередь, позволяет установить длительность процесса изменения исследуемых объектов с большими оптическими возмущениями. Количество наложенных голограмм определяется следующим образом. Поскольку ненагруженное и последующее, нагруженное состояния объекта экспонируются по одному разу, а остальные состояния по два раза, то чтобы получить голографические интерферограммы n -нагруженного состояния необходимо сделать $2n$ экспозиций. В двухэкспозиционной интерферометрии, в результате интерференции двухволн образуется картина, интенсивности максимумов которой равна интенсивности волны, восстановленной однократно экспонированной голограммой. Поэтому $2n$ -экспозиции можно рассмотреть как n -наложенные голограммы с требуемой дифракционной эффективностью.

Наиболее важной характеристикой регистрирующих сред в определении предела записи является дифракционная эффективность. Она для толстой синусоидальной поглотительной голограммы определяется формулой

$$\eta = \exp\left(-2\alpha \frac{d}{\cos\Theta_i}\right) \text{Sh}^2\left(\alpha_1 \frac{d}{2\cos\Theta_i}\right), \quad (2)$$

где α - средний коэффициент поглощения света;

α_1 - амплитуда модуляции поглощения;

d - толщина голограммы;

Θ_i - полуугол между объектным и опорным пучками внутри среды.

Максимальное значение дифракционной эффективности для рассмотренной голограммы достигается при $\frac{\alpha_1 d}{\cos\Theta_0} = \ln 3$ и равно $\eta_{\max} = 3,7\%$.

Дифракционная эффективность толстой синусоидальной фазовой голограммы дается следующим выражением

$$\eta = \sin^2\left(\frac{\pi n_1 \alpha}{\lambda \cos\Theta_{i1}}\right), \quad (3)$$

где n_1 – амплитуда модуляции показателя преломления.

Если в выражении (3) аргумент равен нечетному числу $\frac{\pi}{2}$, то

$$\eta_{\max} = 100\%$$

Как будет показано ниже, наибольшей потенциальной емкостью записи голографической информации обладают фазовые голограммы.

Предел емкости записи обычно рассматривается со следующих точек зрения:

1. Предел емкости записи наложенных фазовых голограмм, накладываемых динамическим диапазоном, в котором объемная голограмма представляется как диэлектрическая решетка без потерь, и показатель преломления среды Δn изменяются линейно связано с экспозицией. При таком предположении количество наложенных голографических интерферограмм определяется формулой

$$N_{\Phi} = \frac{\Delta n \cdot \pi \cdot d}{2(\arcsin(\eta))^{1/2} \cdot \lambda \cdot \cos(\theta_i)} \quad (4)$$

где λ – длина волны излучения в среде.

На рисунке 1 приведен график зависимости $N_{\Phi}(d)$ при $\lambda=0,5$, $\Theta_i = 20^\circ$, $\Delta n=10^{-3}$ и различных η .

Большое количество наложенных голограмм в толстых фазовых голограммах достигается за счет уменьшения дифракционной эффективности голограмм или увеличением толщины регистрирующих сред.

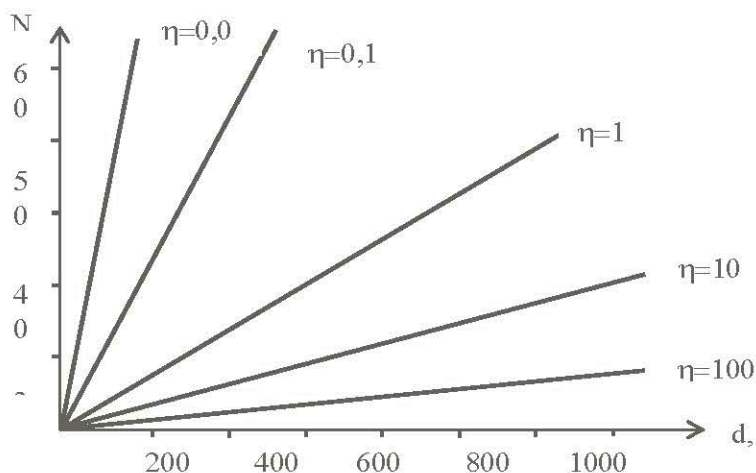


Рис. 1. Зависимость количества наложенных голограмм N от толщины голограммы d

1. Рассмотрим предел емкости записи наложенных голографических интерферограмм в случае поглощающих материалов. Пусть в процессе записи используется весь имеющийся диапазон поглощения $\Delta\alpha$ среды для записи. Тогда количество записываемых наложенных голографических интерферограмм определяется формулой

$$N_n = \frac{1}{3(3\eta)^{1/2}} \tag{5}$$

При $\eta=3,7\%$, т.е. предельно большом значении дифракционной эффективности записывается одна голограмма. На рисунке 2 приведен график зависимости $N_k(\eta)$.

Дифракционная эффективность каждой голограммы, записанная в поглощающих материалах в виде наложения падает как $\frac{1}{N^2}$, вследствие этого количество записываемых наложенных интерферограмм значительно ниже, чем в фазовых фотоматериалах.

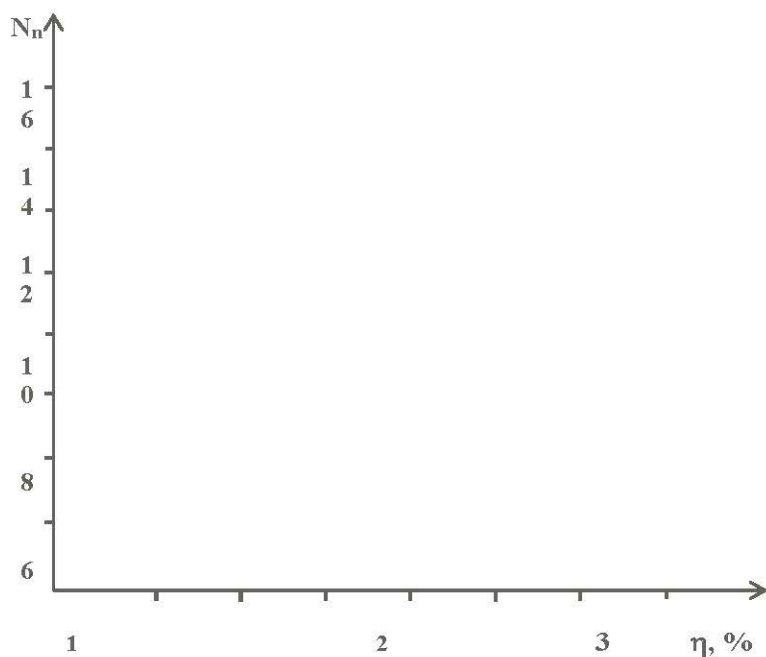


Рис. 2. Зависимость числа наложенных голографических интерферограмм от дифракционной эффективности каждой голограммы

1. Предел емкости записи наложенных голографических интерферограмм, связанный с угловой селективностью. Если все опорные пучки лежат в одной плоскости и диапазон углов опорного пучка вне материала для записи равен Φ , то полное число наложенных голографических интерферограмм равно

$$N_y = \frac{\Phi d}{A n L} \quad (6)$$

где d - толщина материала;

n - средний показатель преломления материала;

L - период решетки;

A - коэффициент угловой селективности, который для фазовых материалов равен $0,886 \div 0,799$ при $n=0 \div 100\%$, что соответствует увеличению n_1 от 0 до $\lambda \cos \theta_i / 2d$, и для поглощающих материалов $A=0,886 \div 0,895$ при $n=0 \div 3,7\%$, что соответствует увеличению α от 0 до $\ln 3 \cos \theta_i / d$

На рис. 3 приведен график зависимости числа наложенных голограмм от толщины $N_y(d)$ при $\Phi=30$, $\lambda=0,5$ мкм, $n=0,01$, $\theta=45$ (вне среды) $n=2,00$, $L = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} = 0,35$ мкм и $A=0,886$.

Из графика видно, что зависимость прямолинейная.

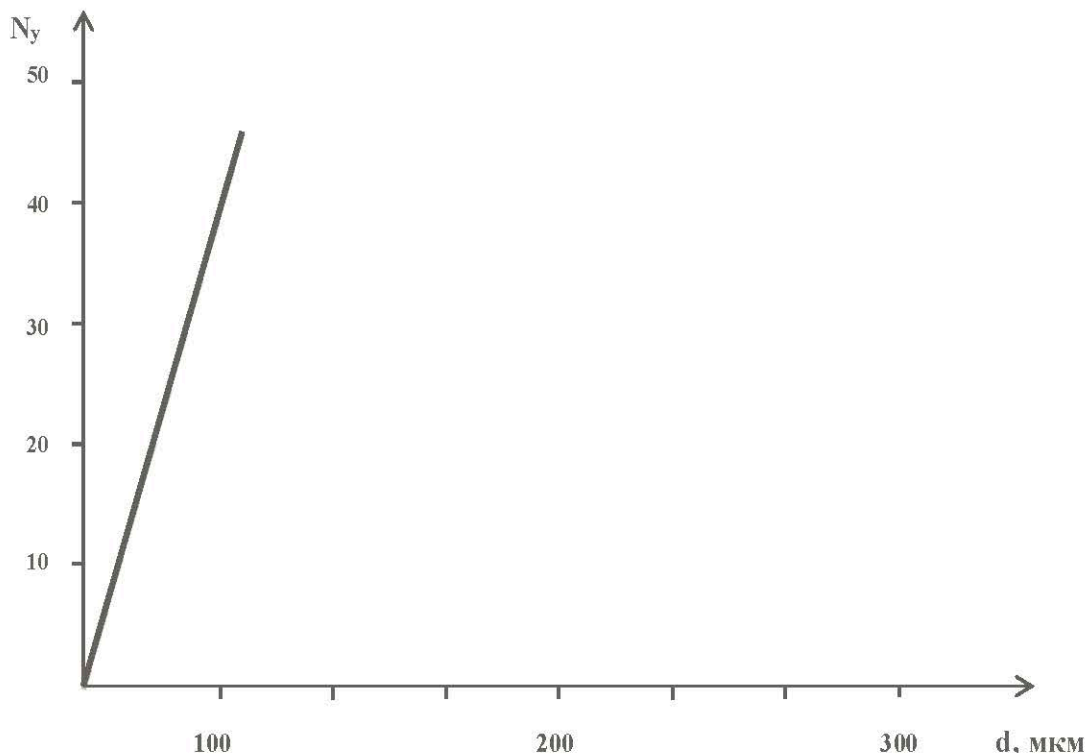


Рис. 3. Зависимость числа наложенных голографических интерферограмм, от толщины голограммы

4. Предел емкости записи наложенных голографических интерферограмм, связанный с взаимодействием соседних голограмм из-за случайного характера регистрируемой информации. При восстановлении наложенных голографических интерферограмм в пучок света, дифрагированный на одной из голограмм, вносится вклад от каждой из остальных голограмм. Количество восстанавливаемых наложенных интерферограмм при данном отношении сигнала шума (ОСШ) определяется формулой

$$N = \frac{d}{8\lambda(\text{ОСШ})^2} \quad (7)$$

Если ОСШ=5, при $d=1$ мм, можно записать 10 наложенных голографических интерферограмм.

Из проведенного анализа можно сделать вывод, что количество записываемых наложенных голографических интерферограмм максимально в толстых фазовых материалах, и оно существенно ограничивается с взаимодействием соседних голограмм из-за случайного характера регистрируемой информации.

Светочувствительность фотоматериалов является одним из важных параметров для записи в них наложенных двухэкспозиционных интерферограмм. Она определяет время экспонирования голограмм, это в свою очередь важно для выбора той или иной методики, чтобы исследовать изменяющиеся объекты с требуемой скоростью. Критерием чувствительности служит величина экспозиции, необходимая для достижения определенной дифракционной эффективности голограмм [6] и определяется формулой

$$E = \frac{\eta_{\tau} t_{\tau} P}{A} \quad (8)$$

где η_{τ} - эффективный коэффициент передачи энергии от лазера к фотоматериалу;

P - выходная мощность излучения лазера;

t_{τ} - время экспонирования;

A - площадь сечения пучка освещающего голограмму.

За время экспозиции t_{τ} максимальное изменение оптической длины пути предметного пучка от источника до голограммы в результате перемещения объекта не должно превышать $\lambda/2$. В противном случае интерференционная картина, образованная в результате сложения опорного и предметного пучка, окажется совершенно размытой. Максимальная допустимая скорость движения объекта оказывается в порядке [6]

$$v_{\text{gon}} = \frac{\lambda}{8\tau_{\tau}} \quad (9)$$

где λ -длина волны излучения лазера.

Подставляя выражение вместо τ_{τ} в (8) из (7) получим

$$v_{\text{gon}} = \frac{\lambda \eta_{\tau} P}{8EA} \quad (10)$$

На рис. 4 приведен график зависимости максимально допустимой скорости движения объекта от мощности лазерного излучения при $\lambda = 0,05 \text{ мкм}$, $A = 100 \text{ см}$, $\eta_t = 0,01$ и различных E_0 .

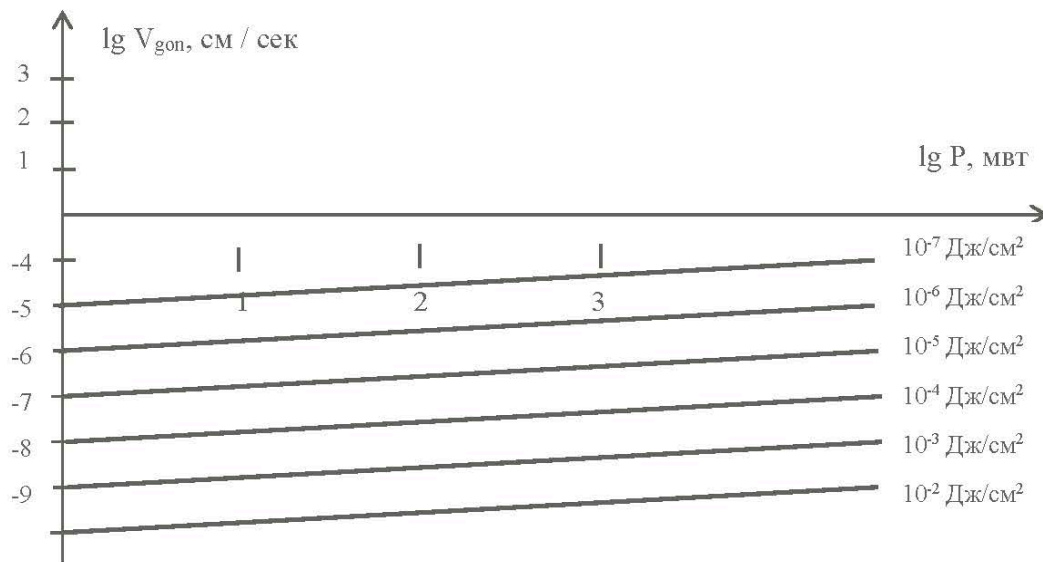


Рис. 4. График зависимости максимально допустимой скорости от мощности излучения лазера при различной E

Для удобства использован десятичный логарифмический масштаб. Оценим значение допустимой скорости объекта при регистрации наложенных голографических интерферограмм на фотоматериале ПЭ-2. Если в качестве источника излучения использовать аргоновый лазер ЛГ-106М, то при $E = 4000 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2}$, $A = 100 \text{ см}^2$ и $\eta_t = 0,1$ допустимая скорость составляет около $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ см/сек}$. Предложенный способ получения голографических интерферограмм к разрешающей способности регистрирующих сред предъявляет умеренное требование (1500-2000 лин/мм), когда голограмма записывается по двухлучевой схеме. При получении голограмм по методу Денисюка разрешающая способность должна быть не менее 5000 лин/мм. Пригодность конкретного фотоматериала для изучения того или иного процесса определяется его вышеприведенными характеристиками.

Литература

1. Исмаилов Д.А., Аккозиев И.А., Кулиш Т.Э., Хэ Чен Юй, Турдумаматов Т.Т. Метод голографической интерферометрии // Труды международного семинара «Голография и оптическая обработка информации», 2-4 сентября 1997. – С. 88-89.
2. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. - М.: Наука, 1977. - С. 336.
3. Запись серии двухэкспозиционных голографических интерферо-грамм на плоских регистрирующих средах // Наука и образование сегодня, № 7(30), 2018 г. / Исмаилов Дж.А., к.т.н., Кулиш Т.Э., н.с.
4. Abramson N., Bjelkhagen H. Industrial holographic measurements // Appl. Opt. - 1973. - V.12. - P.2792 - 2796.
5. Оптическая голография / Под. Ред. Г. Колфилда. Перевод с англ. - М.:Мир. - 1982. - С.735.
6. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография: Пер. с англ. - М.: Мир. - 1973. - 686 с.