

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ ФАЗОВОЙ РЕЛЬЕФОГРАФИИ С РЕГИСТРАЦИЕЙ СИГНАЛОВ СО СТОРОНЫ ПОДЛОЖКИ

В. А. Алехин и Ю. П. Гуцко

Определена светоотдача в зависимости от первичных параметров рельефографического процесса при записи сигналов со стороны подложки. Полученные аналитические выражения позволяют рассчитать и оптимизировать оптические характеристики. Показано, что при ньютоновской модели деформируемого слоя пространственно-частотная характеристика (ПЧХ) имеет максимум при значениях произведения пространственной частоты β и толщины слоя l равный 0.75. Для упруго-вязкого слоя это произведение равно 1.75. Полоса пропускания ПЧХ на уровне 0.7 от максимума составляет для ньютоновского слоя 1—1.5, а для упруго-вязкого слоя 1.3—1.8. Показано, что чувствительность упруго-вязкого слоя по сравнению с ньютоновским слоем в 2.25 раза ниже при оптимальных значениях βl . Оптимальная толщина деформируемого слоя составляет 0.28 и 0.12 от периода расстановки электродов для ньютоновского и упруго-вязкого слоя соответственно.

В системах фазовой рельефографии запись информации осуществляют обычно непосредственным нанесением заряда на свободную поверхность деформируемого слоя или путем расположения управляющих электродов с заданным распределением потенциала с некоторым зазором над свободной поверхностью слоя. Эти системы в настоящее время хорошо изучены и нашли практическое применение [1].

Основные недостатки этих систем — малый срок службы заряженных слоев и низкое разрешение в системах с незаряженными слоями. Они связаны с прин-

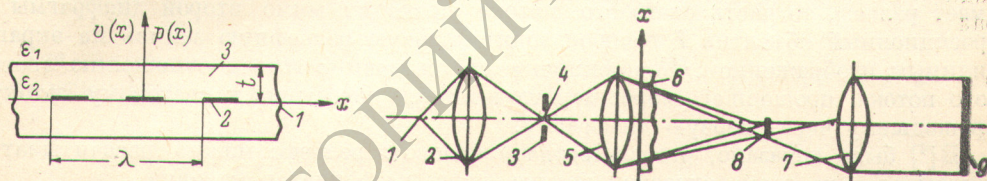


Рис. 1. Схема к расчету деформирующих сил.

Рис. 2. Оптическая схема шпирен-проектора.

ципальной необходимостью расположения устройства управления записью со свободной стороны деформируемого слоя.

Отмеченные недостатки устранены в предложенных в настоящее время системах фазовой рельефографии с регистрацией входных сигналов со стороны подложки [2].

В работах [2-5] рассмотрены электрический, механический и оптический этапы расчета систем фазовой рельефографии с регистрацией сигналов со стороны подложки.

Как известно [1], общей характеристикой любой рельефографической системы является светоотдача. Определение зависимости светоотдачи от первичных параметров рельефографического процесса проведено в данной работе. Установление связи между светоотдачей и первичными параметрами делает возможным сквозной расчет и оптимизацию систем фазовой рельефографии с регистрацией сигналов со стороны подложки.

С точки зрения расчета деформирующих сил все методы записи информации в рассматриваемых системах можно свести к расчетной схеме, показанной на рис. 1, в которой на подложке 1 с пространственным периодом λ расположены управляющие электроды 2, покрытые деформируемым слоем 3 толщиной l . Диэлектрическая проницаемость свободной ϵ — среды и деформируемого слоя равны соответственно ϵ_1, ϵ_2 .

Решение уравнения Лапласа для $U(x) = U_1 \cos \beta x$ позволяет определить напряженность электрического поля на границе раздела сред с ϵ_1 и ϵ_2 , а затем найти плотность нормальных и тангенциальных деформирующих сил в виде

$$p_n(x) = p_0 + p_1 \cos 2\beta x, \quad p_t = 0, \quad (1)$$

где

$$p_0 = 0.25 U_1^2 \epsilon_0 \epsilon_2 (\epsilon_1^2 - \epsilon_2^2) \beta^2 L, \quad (2)$$

$$p_1 = 0.25 U_1^2 \epsilon_0 \epsilon_2 (\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 \beta^2 L, \quad (3)$$

$$L = (\epsilon_1 \operatorname{sh} \beta l + \epsilon_2 \operatorname{ch} \beta l)^{-2}. \quad (4)$$

Под действием деформирующих сил на поверхности слоя возникает рельеф, глубина которого определяется формулой (2)

$$A(x, t) = \frac{U_1^2 \epsilon_0 \epsilon_2 (\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 \beta L F}{4(4G + \alpha \beta F)} (1 - e^{-\omega_m t}) \cos 2\beta x, \quad (5)$$

где G — равновесный модуль сдвига, α — поверхностное натяжение,

$$F = (\operatorname{sh} \beta l \operatorname{ch} \beta l - \beta l) / [\operatorname{ch}^2 \beta l + (\beta l)^2], \quad (6)$$

$$\omega_m = (4G + \alpha \beta F) / 2\mu \quad (7)$$

μ — вязкость деформируемого слоя.

Фазовую рельефную запись воспроизводят обычно шпирен-оптикой с щелевыми или круглыми диафрагмами. Типичная схема шпирен-проектора с круглыми диафрагмами показана на рис. 2. Изображение источника света 1 с помощью конденсора 2 проектируют на круглое отверстие первой диафрагмы 3. При плоскопараллельном нерельефном носителе 6 осветительный объектив 5 изображает отверстие 4 первой диафрагмы в виде круглого светового пятна радиуса r_1 на непрозрачной второй диафрагме 8 радиусом r_2 . При $r_2 > r_1$ вторая диафрагма полностью перекрывает световой поток на экран 9. Если носитель имеет рельеф, то часть светового потока проходит мимо второй диафрагмы и проекционный объектив 7 воспроизводит фазовую рельефную запись на экране видимым изображением. Коэффициент светоотдачи ρ равен отношению светового потока, прошедшего через первую и вторую диафрагмы к световому потоку, прошедшему через первую диафрагму.

В [4] было показано, что светоотдачу фазового рельефа можно рассчитывать, основываясь на геометрической оптике, если выполняется условие

$$a = \frac{2r_2 \lambda}{\lambda_c R} > 2 \div 3, \quad (8)$$

где $2r_2$ — диаметр второй диафрагмы, R — расстояние между носителем записи и диафрагмой 8, λ_c — длина волны света, $\lambda = 2\pi/\beta_1$ — пространственный период рельефа.

В геометрическом приближении можно считать, что, проходя через синусоидальный рельеф с глубиной $A(x, t)$ (5), световые лучи отклоняются на угол

$$\Psi(t) = (n_1 - 1) \frac{dA(x, t)}{dx}, \quad (9)$$

где n_1 — коэффициент преломления слоя.

Для шпирен-оптики, в которой $2r_1 = 2r_2$, в геометрическом приближении светоотдачу синусоидального рельефа с достаточной точностью можно аппроксимировать следующей формулой:

$$\rho = \frac{2}{\pi} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\pi}{2} \gamma, \quad (10)$$

где безразмерная величина

$$\gamma = \gamma(t) = \frac{(n_1 - 1) A(t) R \beta_1}{2r_2} \quad (11)$$

зависит от коэффициента преломления слоя n_1 , параметров шпирен-оптики R и r_2 , пространственной частоты рельефа $\beta_1 = 2\beta$ и амплитуды рельефа (5)

$$A(t) = \frac{U_1^2 \varepsilon_0 \varepsilon_2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 \beta L F}{4(4G + \alpha \beta F)} (1 - e^{-\omega_\alpha t}). \quad (12)$$

В динамике при изменении $\gamma(t)$ изменяется светоотдача ρ . Полученные выше выражения (10)–(12) позволяют проводить сквозной расчет систем фазовой рельефографии с регистрацией сигналов со стороны подложки и определять их пространственно-частотные характеристики (ПЧХ) в виде зависимостей светоотдачи от пространственной частоты входного сигнала.

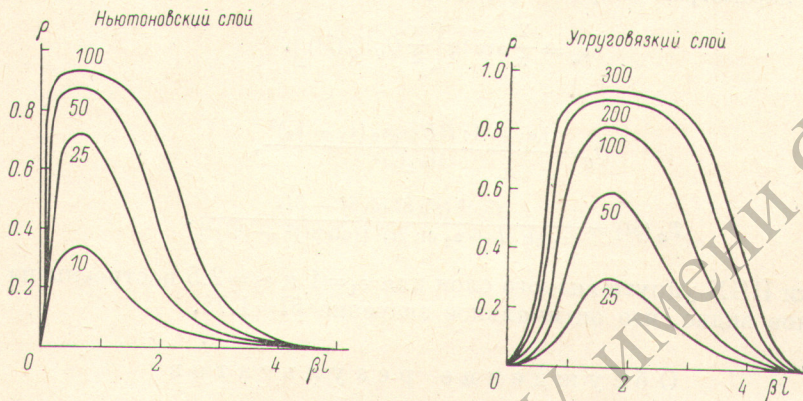


Рис. 3. Пространственно-частотные характеристики светоотдачи для ньютоновской модели деформируемого слоя при разных значениях параметра Q_α .

Рис. 4. Пространственно-частотные характеристики светоотдачи для упруго-вязкой модели деформируемого слоя при равных значениях параметра Q_α .

Для ньютоновской модели деформируемого слоя $4G < \alpha \beta F$. При этом из общего выражения для амплитуды рельефа (12) получим

$$A_\alpha(t) = U_1^2 \varepsilon_0 \varepsilon_2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 \frac{L}{4\alpha} (1 - e^{-\omega_\alpha t}), \quad (13)$$

где

$$\omega_\alpha = \frac{\alpha \beta F}{2\mu}.$$

В стационарном режиме ($t \rightarrow \infty$), используя (10)–(12), получим формулу для расчета светоотдачи ньютоновского слоя по первичным параметрам рельефографической системы

$$\rho = \frac{2}{\pi} \arctg \left[\frac{\pi}{2} Q_\alpha T_\alpha(\beta l) \right]. \quad (14)$$

В (14) безразмерный коэффициент

$$Q_\alpha = \frac{(n_1 - 1) R U_1^2 \varepsilon_0 \varepsilon_2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2}{4r_2 \alpha l} \quad (15)$$

определяет зависимость светоотдачи ньютоновского слоя от параметров шпирен-оптики, управляющего напряжения, электромеханических свойств деформируемого слоя. Второй безразмерный множитель

$$T_\alpha(\beta l) = \frac{\beta l}{(\varepsilon_1 \operatorname{sh} \beta l + \varepsilon_2 \operatorname{ch} \beta l)^2} \quad (16)$$

определяет зависимость светоотдачи от нормированной пространственной частоты βl .

Рассчитанные по формуле (14) ПЧХ для разных значений Q_α при $\varepsilon_1=1$, $\varepsilon_2=2.5$ представлены на рис. 3. Как видно из графиков, ПЧХ имеют максимум при оптимальном значении $\beta l \approx 0.75$.

Для упруго-вязкого слоя $4G > \alpha\beta F$. При этом для амплитуды рельефа из (12) получим

$$A_G(t) = \frac{U_1^2 \varepsilon_0 \varepsilon_2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 \beta L F}{16G} (1 - e^{-\omega_G t}) \cos 2\beta x, \quad (17)$$

где

$$\omega_G = 2G/\mu.$$

В стационарном режиме для расчета светоотдачи упруго-вязкого слоя по первичным параметрам получим формулу

$$\rho_G = \frac{2}{\pi} \arctg \left[\frac{\pi}{2} Q_G T_G(\beta l) \right], \quad (18)$$

где

$$Q_G = \frac{(n_1 - 1) R U_1^2 \varepsilon_0 \varepsilon_2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2}{16r_2 G l^2}, \quad (19)$$

$$T_G(\beta l) = \frac{(\beta l)^2 (\operatorname{sh} \beta l \operatorname{ch} \beta l - \beta l)}{(\varepsilon_1 \operatorname{sh} \beta l + \varepsilon_2 \operatorname{ch} \beta l)^2 [(\operatorname{ch} \beta l)^2 + (\beta l)^2]}. \quad (20)$$

Графики ПЧХ упруго-вязкого слоя для $\varepsilon_1=1$ и $\varepsilon_2=2.5$ построены на рис. 4. Из графиков видно, что оптимальное значение $\beta l=1.75$.

Обсуждение результатов

Полученные в настоящей статье аналитические выражения позволяют рассчитывать оптические характеристики рельефографических систем с регистрацией сигналов со стороны подложки по известным первичным параметрам входного электрического сигнала, шпирен-оптики, механическим и электрическим свойствам деформируемого слоя. Это дает возможность выявить влияние первичных параметров рельефографического процесса на его выходные характеристики и проводить оптимизацию рельефографической системы в целом.

Рассчитанные для характерных значений $\varepsilon_1=1$ и $\varepsilon_2=2.5$ ПЧХ позволяют сделать следующие выводы. ПЧХ ньютоновской модели деформируемого слоя ($4G \ll \alpha\beta F$) имеют максимум при значении $\beta l \approx 0.75$. Для упруго-вязкого слоя ($4G > \alpha\beta F$) оптимальное значение $\beta l \approx 1.75$.

Сравнение ПЧХ в стационарном режиме для ньютоновского и упруго-вязкого слоев показывает, что оптимальная толщина упруго-вязкого слоя, при которой ПЧХ имеет максимум

$$l_G^* = \frac{1.75}{\beta} = 0.28\lambda,$$

больше, чем оптимальная толщина ньютоновского слоя

$$l_\alpha^* = \frac{0.75}{\beta} = 0.12\lambda,$$

где λ — период потенциального рельефа.

Полоса пропускания ПЧХ на уровне $0.7 \rho_{\max}$ в безразмерных значениях βl для ньютоновских слоев с $10 < Q_\alpha < 50$ лежит в пределах $1 \div 1.5$, а для упруго-вязких слоев с $25 < Q_G < 100$ составляет $1.3 \div 1.8$.

При оптимальных значениях βl для получения одинаковой светоотдачи отношение коэффициентов Q_α и Q_G должно составлять 0.4. Тогда при одинаковых значениях ε_1 , ε_2 параметров оптики и выполнении условия $4G > \alpha\beta F$ упруго-вязкий и ньютоновский слой могут обеспечить одинаковую светоотдачу, если $U_{1c}/U_{1\alpha} > 2.25$. Таким образом, при оптимальных значениях βl чувствитель-

ность упруго-вязкого слоя к входному сигналу в 2.25 раза ниже чувствительности ньютоновского слоя.

Для расчета светоотдачи в нестационарных режимах выражения (14) и (18) следует интегрировать по времени с учетом характера изменения $A(t)$. В этом случае ПЧХ будут являться функциями βl и времени.

Литература

- [1] Ю. П. Гуцко. Фазовая рельефография. «Энергия», М., 1974.
- [2] Ю. П. Гуцко. ЖНиПФК, 22, 57, 1977.
- [3] Ю. П. Гуцко. ЖНиПФК, 22, 216, 1977.
- [4] В. А. Алехин, Ю. П. Гуцко. Опт. и спектр., 43, 978, 1977.
- [5] Ю. П. Гуцко, О. А. Сперанский, В. М. Волков. ЖНиПФК, 24, 382, 1979.

Поступило в Редакцию 9 марта 1981 г.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф.Скорины