

ной толщине слоя $As_2S_3(Ag)$ в интерференционных минимумах. Модуляция толщины этого слоя возможно вызывает модуляцию суммарной толщины пленки с образованием периодического поверхностного рельефа. Для дальнейшего изучения структуры СР и механизма переноса массы при их росте следует провести исследования спектральных характеристик облученных пленок и кинетики развития СР.

Эксперименты по наблюдению СР указывают на необходимость их учета как шумовых решеток при формировании голографических решеток монохроматическим излучением в области прозрачности As_2S_3 , а также при изучении различных фотоанизотропных эффектов [3], возникающих при облучении халькогенидных пленок поляризованным светом с $h\nu < E_g$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андриеш А. М., Пономарь В. В., Смирнов В. Л. и др. Использование халькогенидных стекол в интегральной и волоконной оптике (обзор) // Квантовая электроника.—1986.—13, № 6.
2. Любин В. М. Фотоструктурные превращения в халькогенидных стеклообразных полупроводниках // Автометрия.—1988.—№ 4.
3. Любин В. М., Тихомиров В. К. Фотоиндуцированный дихроизм в пленках халькогенидных стеклообразных полупроводников // ФТТ.—1990.—32, № 6.
4. Костышин М. Т., Романенко П. Ф., Стронский А. В. и др. О влиянии толщины слоя металла на процесс записи голографических решеток в светочувствительных системах $As_2Se_3-As_2S_3-Ag$ // Укр. физ. журн.—1986.—31, № 1.
5. Zakery A., Slingert C. W., Ewen P. I. S. et al. Chalcogenide gratings produced by the metal dissolution effect // J. Phys. D.—1988.—21, N 10.—P. 78.
6. Агеев Л. А., Блоха В. Б., Милославский В. К. Свойства периодических структур, фотоиндуцированных в тонкопленочной системе $AgCl-Ag$ // Укр. физ. журн.—1985.—30, № 4.
7. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами.—М.: Изд-во иностр. лит., 1961.
8. Агеев Л. А., Ассаад Н., Милославский В. К. и др. Самозарождающиеся фотоиндуцированные периодические структуры в пленках светочувствительных материалов при наклонном падении лазерного излучения // Оптика и спектроскопия.—1990.—68, вып. 3.
9. Хансперджер Р. Интегральная оптика.—М.: Мир, 1985.
10. Kahnt H., Schirrmeister F., Feltz A. Model of photostimulated diffusion of Ag in amorphous chalcogenides // Phys. Stat. Sol. (a).—1988.—108, N 1.—P. 149.
11. Костышин М. Т., Касярун О. П., Кудрявцев А. А. Моделирование процесса фотолегирования в системе полупроводник — металл на основе представления о ее трехслойной структуре // Укр. физ. журн.—1987.—32, № 7.
12. Kumar W., White K. Thermal aging effects in vitreous As_2S_3 films // Thin Solid Films.—1986.—135, N 1.—P. L13.
13. Zakery A., Zekak A., Ewen P. I. S. et al. Optical constants of Ag photodoped As—S amorphous films // J. Non-Cryst. Sol.—1989.—114, N 1.—P. 109.
14. Suptitz P., Fischer A. Lateral diffusion of photodoped silver in amorphous $Ge_{0,25}Se_{0,75}$ layers // Phys. Stat. Sol. (a).—1984.—82, N 1.—P. 157.

Поступила в редакцию 29 апреля 1991 г.

УДК 621.378 : 681.33

Л. А. Борыняк, Е. А. Краснопецев, А. В. Логинов, А. А. Штыгашев
(Новосибирск)

ПАНОРАМНЫЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ОБЪЕКТОВ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ФОРМЫ

Разработаны панорамные интерферометры для контроля формоизменения поверхности тел вращения. При необходимости можно регистрировать и выделять отдельно нормальные и внутриплоскостные компоненты вектора перемещения деформируемой поверхности. Приведены метрология и примеры контроля деформаций цилиндрических оболочек.

4 Автометрия № 2, 1992 г.

Исследование деформированного состояния объектов связано с измерением перемещений. Интерферометры широко применяются там, где величина перемещений соизмерима с длиной световой волны. Очевидно, что регистрация и обработка информации одновременно по всей поверхности объекта устраняют ряд проблем, связанных со стыковкой фрагментарных результатов.

Основными элементами разработанных интерферометров являются: усеченный зеркальный конус, в котором закрепляется объект, голограмма, на которой регистрируется информация о перемещениях, кольцевые зеркала, с помощью которых фильтруется необходимая информация. Рассматриваются объекты, имеющие осесимметричную форму.

1. Голографический интерферометр. Схема интерферометра представлена на рис. 1. Основной его частью является коническое зеркало 2 с углом при вершине 2θ . Объект освещается коллимированным пучком лазерного излучения с плоским волновым фронтом через фотопластинку 3. Свет, отражаясь от зеркального конуса 2, попадает на поверхность оболочки 1 и при диффузном рассеянии после вторичного отражения от конуса 2 регистрируется на голограмме 3. При получении голограммы методом двух экспозиций или реального времени регистрируются в неявном виде значения вектора перемещения $D(x, y, z)$ для всех точек исследуемой поверхности.

Составляющие вектора перемещения D вдоль осей Ox и Oz равны соответственно u и w . При диффузном отражении падающего луча, задаваемого единичным вектором освещения e , (рис. 2), можно всегда выделить лучи I и II, несущие информацию об u и w . Луч I, задаваемый вектором e_1 , после отражения от зеркала падает на голограмму параллельно оптической оси системы. Луч II, задаваемый вектором e_2 , распространяется под углом α к оси.

Для определения u и w необходимо решить две задачи — разработать алгоритмы расшифровки интерферограмм и связать координаты объекта с координатами панорамного изображения.

1.1. Геометрические соотношения. В параксиальном приближении устанавливаются прямая и обратная связи между координатами изображения развертки боковой поверхности тел вращения $\{r_T^{(i)}, \varphi_T^{(i)}\}_{i=1}^N$ и координатами поверхности исследуемого объекта $\{x_p^i, y_p^i, z_p^i\}_{i=1}^N$, сфотографированного в лучах I и II. Схема фотографирования в лучах I представлена на рис. 3, в лучах II — на рис. 4.

1.2. Пример геометрических преобразований. На рис. 5 представлены изображения цилиндрической поверхности объекта в лучах I и II. Видно, что замкнутые линии ортогональной сетки, нанесенной на боковую поверхность объекта, преобразуются без искажений. Линии сетки вдоль образующей цилиндра претерпевают некоторые искажения, которые обусловлены несовершенством объектива. Оценка погрешностей данных преобразований показала, что в лучах I при обратном преобразовании угловая погрешность, связанная с геометрией установки, равна погрешности измерения угловых величин. Для

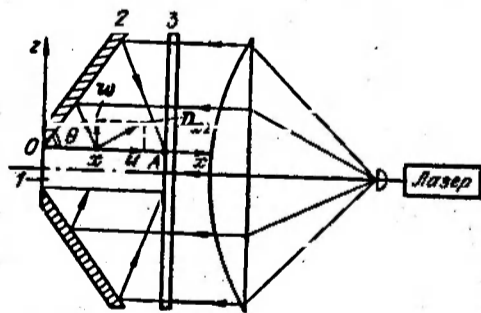


Рис. 1. Схема регистрации голограммы:
1 — цилиндрическая оболочка, 2 — коническое зеркало,
3 — голограмма

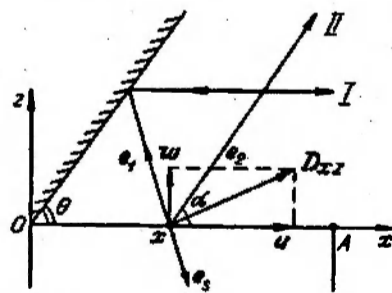


Рис. 2. Ориентация единичных векторов освещения и наблюдения

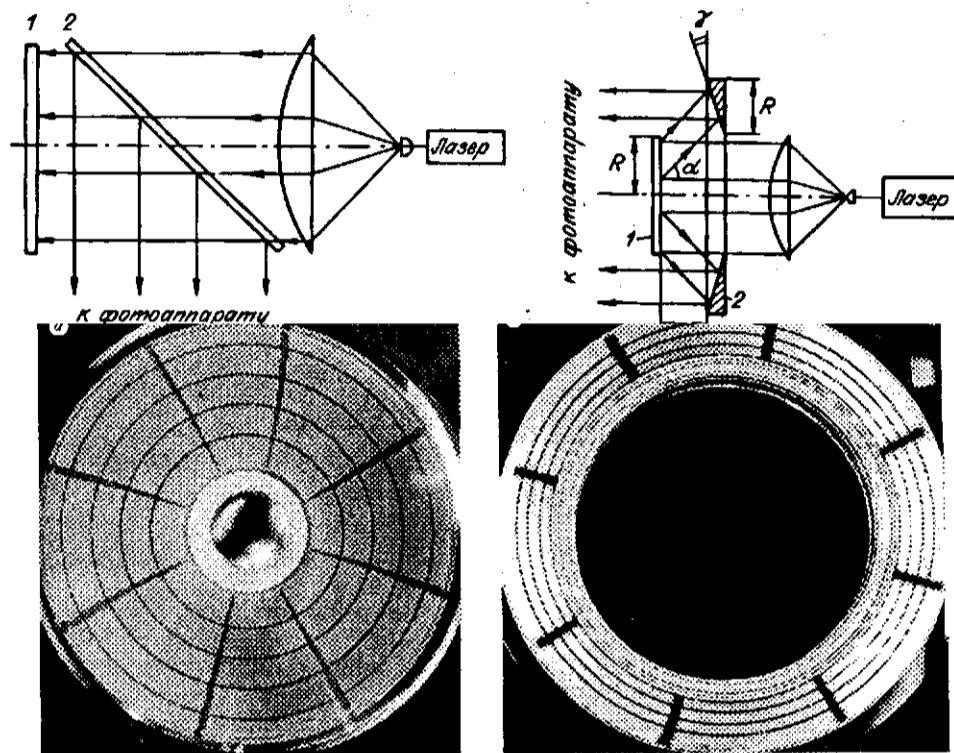


Рис. 5. Изображения развертки боковой поверхности цилиндра, сфотографированные в лучах I (а) и II (б)

радиальных компонент графики приведенных погрешностей представлены на рис. 6. Для цилиндрической поверхности $\Delta r_p = \Delta r_T$. Приведенная погрешность $(\Delta z_p / \beta \Delta r_p)$ восстановления z-компоненты точек боковой поверхности равна $\sqrt{2} \operatorname{ctg} \theta$.

На рис. 7 представлена зависимость методической погрешности обратного преобразования координат для цилиндрической поверхности в лучах II. Результаты исследований позволяют сделать заключение о том, что предложенные схемы интерферометров надежно устанавливают взаимное соответствие координат при прямых и обратных преобразованиях.

1.3. *Расшифровка голографических интерферограмм.* В результате диффузного отражения падающий луч, задаваемый единичным вектором e_s , преобразуется в отраженный, идущий вдоль единичного вектора наблюдения e_k (см. рис. 2). Интерференция света, отраженного каждой точкой оболочки до и после деформации, определяет на голограмме системы полос. Уравнение разности хода $\Delta = (e_k - e_s)D$ для полос имеет вид [1, 2]

$$(e_k - e_s)D = n_k \lambda, \quad k = 1, 2, \quad (1)$$

где n_k — абсолютный порядок полосы, проходящей через некоторую точку оболочки, наблюдаемой в направлении e_k ; D — вектор перемещения этой точки.

Наблюдение интерферограммы в лучах I осуществляется с использовани-

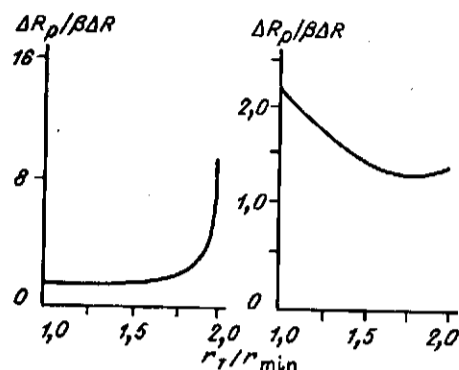


Рис. 6. Зависимость погрешности обратного преобразования сферической и конической оболочек

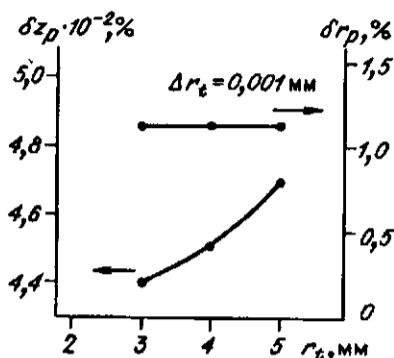


Рис. 7. Относительные погрешности δz_p , δr_p определения координат z_p , r_p точки p боковой поверхности цилиндра:

r_t — радиус-вектор точки T изображения объекта, Δr_t — приборная погрешность измерения радиуса-вектора r_t

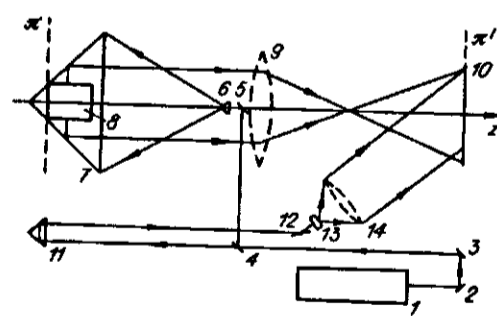
ем пространственной фильтрации в соответствии со схемой, изображенной на рис. 3. При решении той же задачи для лучей II используются схемы оптической фильтрации, изображенные на рис. 4.

С целью увеличения длины исследуемых объектов рассматривался вариант $\theta < 45^\circ$. В этом случае для обеспечения освещения по нормали к поверхности исследуемого объекта и возможности наблюдения отраженного диффузного излучения предлагается наносить на поверхность конуса дифракционные радиальные решетки.

2. Панорамный спекл-интерферометр. Актуальна задача регистрации информации преимущественно о внутриплоскостных перемещениях. Ниже рассмотрен интерферометр, позволяющий регистрировать панорамную спеклограмму боковой поверхности оболочки.

2.1. Схема интерферометра и алгоритм расшифровки интерферограммы. Голографический спекл-интерферометр состоит из осветительной части 1—6, 11—14 и оптической 7—10 (рис. 8). Расширенный лазерный пучок света падает на боковую поверхность объекта, и после диффузного отражения в плоскости π формируется распределение амплитуд $u(x, y, 0)$. Данное распределение амплитуд является входным сигналом для оптической системы 7—10 (см. рис. 8), которая формирует в плоскости π' , сопряженной с π , распределение амплитуд $u(x, y, z)$.

Анализ спеклограммы в методе двух экспозиций с использованием оптической фильтрации показывает, что изображение объекта промодулировано спеклами, размеры которых определены размерами отверстия в диафрагме, и распределение интенсивности в плоскости регистрации отфильтрованной интерферограммы промодулировано полосами равной интенсивности:



$$J_r(x, y, z) = \cos^2 \left[\frac{\pi}{\lambda f} (x_a \Delta x + y_a \Delta y) \right]$$

Данное выражение является основным в методе двух экспозиций, здесь f — фокусное расстояние фильтрующего

Рис. 8. Схема панорамного спекл-интерферометра:
1 — лазер; 2, 3, 5, 12 — поворотные зеркала; 4 — распределитель пучка; 6 — микрообъектив; 7 — конус; 8 — объектив; 9 — линза; 10 — фотопластина; 11 — призма

объектива; x_d, y_d — координаты фильтрующего отверстия; $\Delta x, \Delta y$ — компоненты регистрируемого вектора перемещения в плоскости l .

3. Эксперимент. Эффективность рассмотренных методов и метрологические возможности интерферометров оценивались на примере исследования деформаций замкнутой цилиндрической оболочки.

Определялись перемещения поверхности оболочки, подвергнутой осевому сжатию. Цилиндрическая оболочка изготовлена из оргстекла, наружный диаметр оболочки 27 мм, длина образующей 41 мм, толщина стенки 1 мм, усилие сжатия 50 Н. Голограмма диаметром 110 мм получена методом двух экспозиций в панорамном интерферометре (см. рис. 1) с $\theta = 45^\circ$.

На рис. 9 представлены интерферограммы, наблюдаемые в направлении $\alpha = 45^\circ$ в плоскости сечения оболочки по образующей A и B . Из данных интерферограмм следует, что для боковой поверхности оболочки функция $n_2(x)$ вдоль линий A и B является линейной. Для угла наблюдения $\alpha = 24^\circ$ получено экспериментальное значение производной абсолютного порядка полосы $C_s = 2,09 \cdot 10^{-4}$, теоретическое значение $C_t = 2,04 \cdot 10^{-4}$.

На рис. 10 приведена панорамная интерферограмма, зарегистрированная посредством оптической фильтрации голограммы с использованием схемы наблюдения на рис. 4. Существенный вклад в $n_2(x)$ дает перемещение $u(x)$, нарастающее с ростом x . Функция n_2 меняется монотонно и для сжатия $n_2 \leq 0$. На рис. 11 представлена интерферограмма, ответственная только за перемещение $w(x)$. Функция $n_1(x)$ регистрируется с использованием схемы, приведенной на рис. 3. При определении абсолютных значений порядка интерференционных полос использовалось правило: изменение угла наблюдения

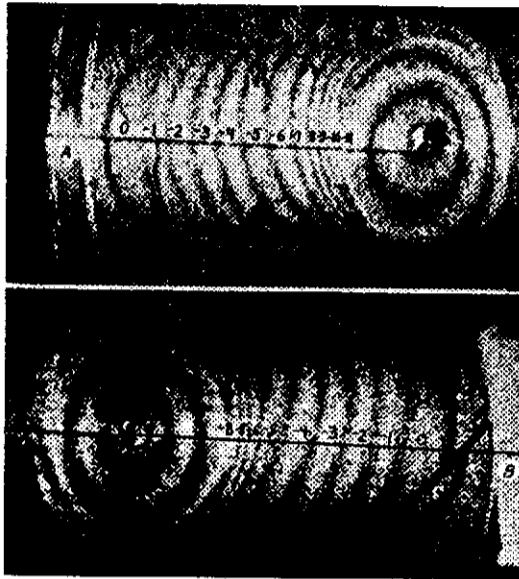


Рис. 9. Интерферограммы деформированного состояния оболочки, подвергнутой осевому сжатию

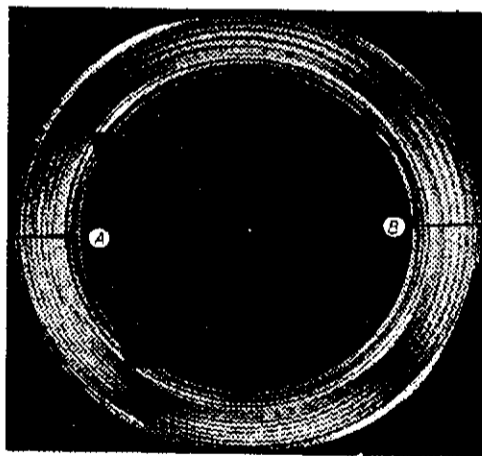


Рис. 10. Интерферограмма, наблюдаемая в лучах II

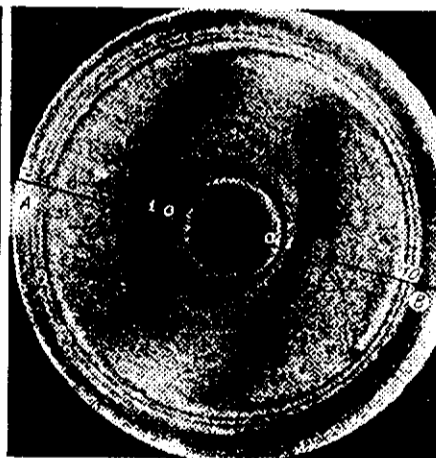


Рис. 11. Интерферограмма, наблюдаемая в лучах I

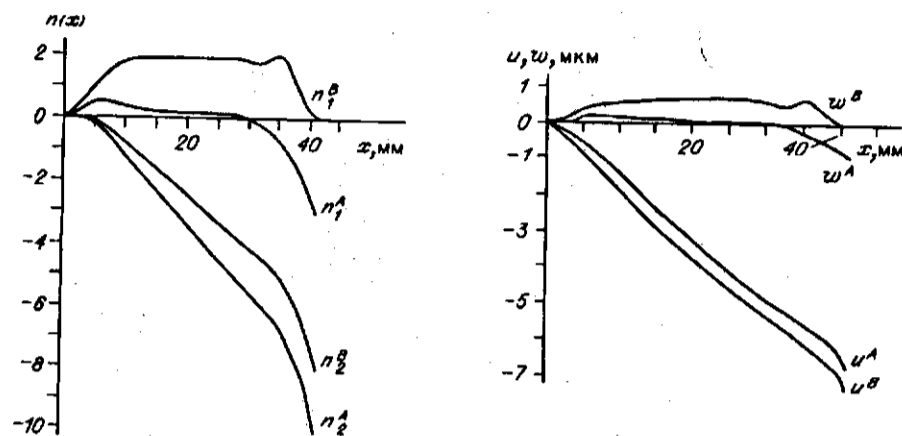


Рис. 14. Вид деформирования центрального сечения оболочки, подвергнутой осевому сжатию

сохраняет номера этих полос. Так, при изменении угла α от 45 до 90° полосы перемещаются от основания оболочки, сходя с нее частично (линия A) или полностью (линия B). Графики зависимости положения светлых и темных полос на линиях A и B даны на рис. 12. Значения $u(x)$ и $w(x)$, вычисленные с использованием (1), представлены на рис. 13. На рис. 14 изображен характер деформирования диаметрального сечения оболочки вдоль линий A и B, который вытекает из интерферограмм рис. 10 и 11.

ВЫВОДЫ

Разработанные панорамные интерферометры позволяют с достаточной для инженерных расчетов точностью определять компоненты вектора перемещения одновременно для всей исследуемой поверхности.

При этом в зависимости от поставленной задачи на стадии постановки эксперимента можно регистрировать либо только внутриплоскостные перемещения, либо нормальные. Рассмотренные схемы не исключают регистрации полного вектора перемещений с последующим выделением оптической фильтрацией отдельных компонент. Это расширяет возможности использования оптических методов контроля в практических исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жилкин В. А., Борыняк Л. А. Исследования деформированного состояния замкнутой круговой цилиндрической оболочки методом голографической интерферометрии // Механика деформируемого тела и расчет транспортных сооружений. — Новосибирск: НИИЖТ, 1982.
2. Жилкин В. А., Устименко А. П., Борыняк Л. А. Исследование деформированного состояния тонкостенных круговых цилиндрических оболочек с помощью панорамного интерферометра // Прикладная механика. — 1986. — 22, № 12.

Поступила в редакцию 8 октября 1991 г.