

- [1] Knight J.R., Effer D., Evans P.R. // Sol. St. Electron. 1965. V. 8. P. 178-187.
- [2] Alferov Z.I., Garbuzov D.Z. et. al. // Kristall und Technik, 1967. V. 2. P. 541-548.
- [3] Жиляев Ю.В., Маркарян Г.Р. и др. // ФТТ. 1986. Т. 28. № 9. С. 2688-2695.
- [4] Голубев В.Г., Жиляев Ю.В. и др. // ФТП. 1987. Т. 21. № 10. С. 1771-1776.
- [5] Жиляев Ю.В. Разработка методов получения гетероструктур в системах *GaP-GaAs*, *AlAs-GaAs*. Автореф. канд. дис. Л., 1971. 18 с.
- [6] Холлап Л., Холлейс Дж., Брайс Дж. В сб.: Актуальные проблемы материаловедения, в. 2. / Под ред. Э. Калдиса. М., 1983. С. 7-239.
- [7] Lang D.V. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 7. P. 3032-3032.
- [8] Goto G., Yanagisawa C. et. al. // Appl. Phys. Lett. 1973. V. 23. N 3. P. 150-151.
- [9] Sah C.T., Forbes L. et. al. // Sol. St. Electr. 1970. V. 13. N 6. P. 759-783.
- [10] Hübik P., Smid V. et. al. // Cryst. proper. and Prepar. 1987. V. 12. P. 167-172.
- [11] Ботнарюк В.М., Жиляев Ю.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 2. С. 181-185.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию
26 сентября 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 17, вып. 2

26 января 1991 г.

07; 12

© 1991

АДАПТИВНЫЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СТУПЕНЧАТЫХ СУБМИКРОННЫХ СМЕЩЕНИЙ

Ю.О. Барменков, Н.М. Кожевников

Применение динамических голограмм позволяет осуществить адаптивную пространственно-временную стабилизацию рабочей точки оптических интерферометров (ОИ) [1, 2]. При использовании таких ОИ для измерения ступенчатых субмикронных смещений требуется высокочастотная фазовая модуляция опорного пучка (ФМОП),

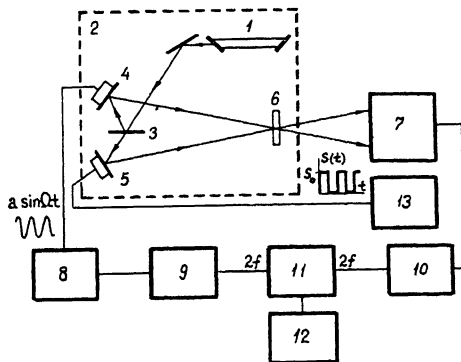


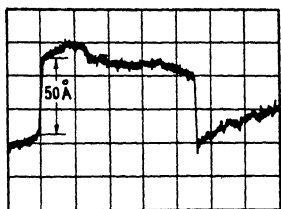
Рис. 1. Структурная схема интерферометра. 1 - лазер, 2 - виброизолированное основание, 3 - полупрозрачная пластинка, 4, 5 - зеркала, 6 - фоторефрактивная пленка, содержащая БР, 7 - дифференциальное фотоприемное устройство, 8 - генератор синусоидального напряжения, 9 - удвоитель частоты, 10 - селективный усилитель, 11 - синхронный детектор, 12 - осциллограф, 13 - генератор прямоугольных импульсов.

обеспечивающая уменьшение влияния низкочастотных шумов [3, 4]. При этом в зависимости от положения рабочей точки ОИ информационный сигнал регистрируется на частоте первой или второй гармоники ФМОП. В настоящей работе рассмотрен адаптивный ОИ для измерения субмикронных смещений, реализованный на основе слабонелинейных сред, содержащих бактериородопсин (БР) [5] и обладающих локальным керровским фотооткликом.

Схема ОИ приведена на рис. 1. Коллимированное линейно-поляризованное излучение лазера ЛГН-207Б (1) ($\lambda = 0.63$ мкм, мощность 1,6 мВт) направляется в интерферометр, собранный на массивном виброизолированном основании 2. После прохождения полупрозрачной пластинки 3 световые пучки отражаются от зеркал 4, 5 и направляются на фоторефрактивную полимерную пленку 6, содержащую БР. Выходящие из пленки пучки регистрируются дифференциальным фотоприемным устройством (ДФПУ) 7 (коэффициент подавления синфазного сигнала ≥ 40 дБ). Опорное зеркало 4 наклеено на пьезопреобразователь, к которому подводится гармоническое напряжение с частотой $f = 20$ кГц от генератора 8. Прямоугольные импульсы с регулируемой амплитудой, поступающие на пьезопреобразователь зеркала 5, обуславливают смещение этого зеркала, подлежащее измерению. Для регистрации усиленного сигнала второй гармоники применяется синхронное детектирование с визуализацией амплитуды сигнала на экране осциллографа 12.

На рис. 2 показана характерная осциллограмма выходного сигнала, из которой видно, что пороговая чувствительность измерения амплитуды ступенчатых смещений составляет $\lesssim 5 \text{ \AA}$. Низкочастотный

Рис. 2. Осциллограмма выходного сигнала. Скорость развертки 0.5 с/дел.



дрейф постоянного уровня выходного сигнала обусловлен недостаточно эффективной адаптацией ОИ к случайным фазовым флуктуациям, однако при измерении быстрых (ступенчатых) смещений объекта

работоспособность ОИ вполне удовлетворительна.

Для анализа предельной чувствительности измерений рассмотрим преобразование сигнала модуляции оптической разности фаз $\Delta\varphi = s(t) + \alpha \sin \Omega t$, $s(t)$ – ступенчатая функция (см. рис. 1), в модуляцию интенсивностей $\Delta I_{\pm 1}$ световых пучков, записывающих динамическую фазовую голограмму в слабонелинейной ($\Delta\epsilon \ll 1$, $\Delta\epsilon$ – изменение диэлектрической проницаемости) фоторефрактивной среде с локальным инерционным откликом ($\Omega\tau \gg 1$, τ – время записи) [1, 6]. Легко показать, что в приближении постоянной накачки ($I_{\pm 1}(z) = I_{-1}(z) = I_0 \exp(-\alpha z / \cos \theta)$, α – коэффициент поглощения, 2θ – угол схождения пучков, z – координата, направленная в глубину среды) выражение для $\Delta I_{\pm 1}$ имеет вид

$$\Delta I_{\pm 1}(z, t) = \pm K \left\{ \left[J_0(\alpha) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\alpha) \cos 2n \Omega t \right] e^{-t/\tau} \sin s_0 + 2 \left[1 - (1 - \cos s_0) e^{-t/\tau} \right] \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(\alpha) \sin (2n+1) \Omega t \right\}, \quad (1)$$

где $K = (k\Delta\epsilon/\alpha) J_0(\alpha) I_0 \exp(-\alpha z / \cos \theta) [1 - \exp(-\alpha z / \cos \theta)]$, $k = 2\pi/\lambda$, $J_{2n}(\alpha)$ – функции Бесселя.

Из (1) следует, что при $s_0 \ll 1$ амплитуды вторых гармоник противофазных колебаний интенсивностей выходных пучков описываются формулой

$$I_{2\Omega} = m I_0 \exp(-\alpha z / \cos \theta), \quad (2)$$

где $m = (2k\Delta\epsilon/\alpha) J_0(\alpha) J_2(\alpha) s_0 \exp(-t/\tau) [1 - \exp(-\alpha z / \cos \theta)]$.

В режиме ограничения дробовыми шумами отношение сигнал/шум (SNR) на выходе ДФПУ с полосой пропускания фильтра Δf на начальной стадии процесса перезаписи голограммы ($t \ll \tau$) определяется выражением

$$SNR = \frac{m^2 s_0^2 \exp(-\alpha z / \cos \theta)}{q \Delta f}, \quad (3)$$

где q - заряд электрона, S - токовая чувствительность фотодиодов, P_0 - мощность оптического излучения. Приравняв $SNR = 1$, из формулы (3) находим пороговое значение амплитуды

$$S_0^* = \frac{\alpha \sqrt{q \Delta f}}{2k \Delta \epsilon J_0(\alpha) J_2(\alpha) \sqrt{S P_0 \exp(-\alpha z / \cos \theta)} (1 - \exp(-\alpha z / \cos \theta))}. \quad (4)$$

Подставив в (4) значения $\Delta \epsilon \approx 10^{-6}$, $J_0(\alpha) J_2(\alpha) = 0.12$, $\theta = 15^\circ$, $\alpha = 10 \text{ мм}^{-1}$, $z = 100 \text{ мкм}$, $S = 0.3 \text{ А/Вт}$, $P_0 = 0.8 \text{ мВт}$, $\Delta f = 200 \text{ Гц}$, находим $S_0^* \approx 4 \cdot 10^{-3}$ рад. Этому значению соответствует смещение зеркала $\Delta l^* = S_0^* \lambda / 4\pi = 2 \text{ \AA}$, что хорошо согласуется с указанной выше экспериментальной оценкой.

Таким образом, даже в случае слабонелинейной среды рассмотренный адаптивный ОИ для измерения субмикронных смещений имеет пороговую чувствительность, сравнимую с теоретическим предельным значением. Возможно, более перспективными для таких ОИ являются фоторефрактивные кристаллы силленитов [7], которые даже в отсутствие внешнего электрического поля обладают значительной нелокальной нелинейностью ($\Delta \epsilon \sim 10^{-5} - 10^{-4}$) и достаточным быстродействием ($\sim 10^{-3}$ с), а регистрация сигнала в этом случае осуществляется на частоте основной гармоники ФМОП ($J_0(\alpha) J_1(\alpha) = 0.34$). Легко показать, что предельное значение пороговой чувствительности при этом может оказаться на два-три порядка лучше, чем при использовании БР.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Барменков Ю.О., Зосимов В.В., Кожевников Н.М., Липовская М.Ю., Лямшев Л.М. // Оптика и спектроскопия. 1988. Т. 64. В. 6. С. 1339-1343.
- [2] Степанов С.И. В кн.: Оптическая голография с записью в трехмерных средах. Л.: Наука, 1989. С. 64-74.
- [3] Коронкевич В.П., Ханов В.А. Современные лазерные интерферометры. Новосибирск: Наука. 1985. 182 с.
- [4] Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 336 с.
- [5] Севолодов Н.Н. Биопигменты- фоторегистраторы: фотоматериал на бактериородопсине. М.: Наука, 1988. 224 с.
- [6] Винецкий В.Л., Кухтарев Н.В., Сокин М.С. // Квантовая электроника. 1977. Т. 4. № 2. С. 420-425.
- [7] Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации. Л.: Наука, 1983. 270 с.