

06:07  
©1995

## ШИРОКОПОЛОСНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ФАЗОМОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА НЕСТАЦИОНАРНОЙ ФОТОЭДС

*И.А.Соколов, В.В.Куликов, М.П.Петров*

В настоящее время большой практический интерес представляют лазерные системы для измерения малых ( $\leq 0.1$  мкм) вибраций поверхностей различных технических объектов. Особый интерес представляет их использование в системах неразрушающего контроля [1]. Однако, как правило, подобные устройства, являющиеся высокочувствительными интерферометрами [2], требуют сложных систем автоподстройки (стабилизации рабочей точки), компенсации амплитудных шумов лазера и специального профиля волнового фронта, отраженного от исследуемой поверхности луча.

В работах [3,4] было показано, что эти проблемы во многих случаях могут быть успешно решены с помощью адаптивных фотоприемников основе эффекта нестационарной фотоЭДС [5,6]. Но приведенные ранее исследования ограничивались сравнительно низкими частотами колебаний ( $\leq 50$  кГц) и проводились для непрерывного режима возбуждения колебаний, хотя развитие импульсных лазерных методов неразрушающего контроля требует использования импульсов с длительностью порядка микросекунд и меньше [1].

Целью настоящей работы является определение оптимальных условий функционирования адаптивного фотоприемника на основе GaAs:Сг в условиях импульсной ( $\tau \simeq 1-5$  мкс) высокочастотной ( $f \simeq 40$  МГц) фазовой модуляции интерференционной картины, образованной плоским опорным световым пучком и сигнальным спекл-полем. Данные исследования могут найти применение в системах ультразвукового контроля и для регистрации поверхностных акустических волн.

Выражение для амплитуды сигнала на выходе адаптивного фотоприемника при частоте фазовой модуляции  $\omega = 2\pi f$  и малых значениях амплитуды фазовой модуляции

$\Delta \ll 1$  имеет вид [5]:

$$J^\omega = \frac{m^2 \Delta}{2} \frac{\sigma_0 E_D}{1 + K^2 L_D^2} \frac{-i\omega/\omega_0}{1 + i\omega/\omega_0}, \quad (1)$$

где  $m$  — контраст интерференционной картины;  $K = 2\pi/\Lambda$  — пространственная частота ( $\Lambda$  — период интерференционной картины);  $L_D$  — диффузионная длина переноса носителей;  $\sigma_0$  — средняя фотопроводимость;  $E_D = K k_B T/e$  — диффузионное поле ( $k_B$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура,  $e$  — заряд электрона);  $\omega_0 = 1/\tau_M(1 + K^2 L_D^2)$  — частота среза,  $\tau_M$  — максвелловское время релаксации;  $\Delta$  — амплитуда фазовой модуляции, связанная с амплитудой вибрации  $\delta l$  соотношением  $\Delta = \frac{4\pi}{\lambda} \delta l$  ( $\lambda$  — длина волны лазерного излучения). Из формулы (1) видно, что при  $\omega \geq \omega_0$  выходной электрический сигнал не зависит от частоты фазовой модуляции  $\omega$ .

Как показано в [7], при оптимальной схеме приемного тракта (равенство выходного сопротивления фотоприемника и входного сопротивления усилителя), максимальное отношение сигнал/шум определяется как

$$S/N = \frac{1}{8\sqrt{2}} \left( \frac{g_0 V}{\Delta f} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $V$  — объем образца,  $\Delta f$  — полоса пропускания приемного тракта,  $g_0$  — средняя скорость фотогенерации носителей.

Эксперименты по исследованию нестационарной фото-ЭДС проводились по схеме, представленной на рис. 1. Пучок когерентного света от гелий-неонового лазера ЛГ 215-1 ( $\lambda = 0.63$  мкм,  $P = 40$  мВт) направлялся на светодели-тель 2, формирующий опорный и сигнальный пучки. Последний после прохождения отрицательной линзы 3 попал на объектив "Гелиос-40-2" 4 с фокусным расстоянием  $F = 85$  мм, на апертуре которого имел диаметр  $D' = 1$  см. С его помощью он фокусировался на диффузный рассеиватель (пластинка из дюрала). Рассеянная спекл-картина соби-ралась тем же объективом 4 и после отражения от второго светодели-теля проектировалась на образец полуизолирующего GaAs:Cr с характерными размерами  $1 \times 10 \times 2$  мм. Фазо-вая модуляция осуществлялась с помощью электрооптиче-ского модулятора МЛ102 синусоидальным или импульсным сигналами от генераторов ГЗ-56 и Г5-4Б соответственно.

В рассматриваемой схеме диффузный рассеиватель на-ходился на расстоянии  $L = 15$  см от объектива, при этом

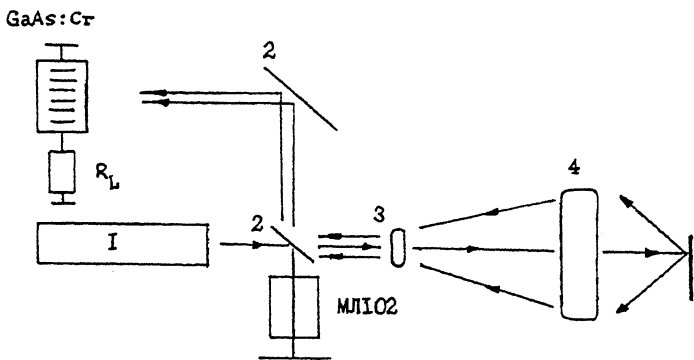


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для наблюдения эффекта нестационарной фотоЭДС: 1 — лазер, 2 — светоделитель, 3, 4 — линза и объектив "Гелиос-40-2".

минимальный размер светового пятна на его поверхности был равен  $\approx 12$  мкм.

Угол, под которым вводился опорный пучок ( $P_R = 15$  мВт), был выбран больше, чем угловая расходимость сигнала спекл-поля ( $P_S = 0.3$  мВт) [3]. В результате на каждом отдельном спекл-пятне на поверхности фотопроводника формировалось несколько полос интерференционной картины с пространственной частотой  $\Lambda^{-1} \approx 15-20$  лин/мм.

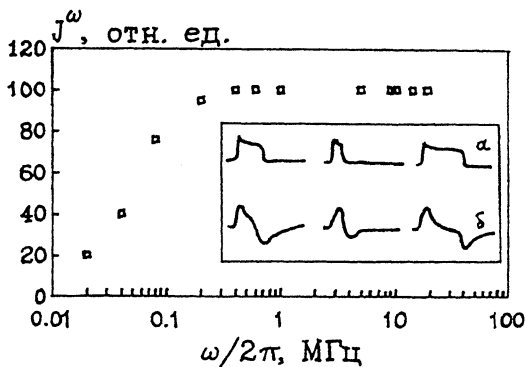


Рис. 2. Частотная передаточная характеристика эффекта нестационарной фотоЭДС ( $\text{GaAs:Cr}$ ,  $\lambda = 0.63$  мкм,  $P = 40$  мВт,  $\Delta = 0.3$  рад). На вставке осциллограммы детектируемых импульсов длительностью 3, 1, 5 мс: а — напряжение, подаваемое на модулятор, б — выходной электрический сигнал, снимаемый с адаптивного фотоприемника на основе  $\text{GaAs:Cr}$  ( $R_L = 15$  кОм).

Нами была исследована зависимость амплитуд фотоЭДС ( $J^\omega$ ) от частоты фазовой модуляции  $\omega$  (рис. 2). Важнейшей особенностью частотной передаточной характеристики является наличие линейно нарастающего участка до характерной частоты среза  $\omega_0/2\pi \simeq 100$  кГц, определяемой скоростью формирования пространственного заряда в объеме фотопроводника. При дальнейшем увеличении частоты модуляции, вплоть до 40 МГц, сигнал нестационарной фотоЭДС оставался частотно-независимым. Верхний предел модулирующих частот определяется величиной среднего времени жизни носителей заряда в полуизолирующем GaAs:Cr. Экстраполяция зависимости сигнала в область больших частот позволяет оценить верхний предел частоты модуляции величиной  $\leq 1$  ГГц (для среднего времени жизни носителей  $\simeq 1$  нс) [7].

Была также исследована зависимость амплитуды выходного электрического сигнала от амплитуды фазовой модуляции сигнального спекл-пучка (рис. 3). При подаче синусоидального ( $\omega/2\pi = 200$  кГц) или импульсного ( $\tau = 1$  мкс) напряжения амплитудой 120 В электрооптический модулятор амплитуда фазовой модуляции сигнального пучка была  $\simeq 1$  рад, что соответствует амплитуде смещения  $\simeq 0.05$  мкм. При отношении сигнал/шум  $\simeq 100$  в выходном электрическом сигнале и полосе регистрации сигнала 200 кГц минимальная амплитуда смещения, которая может быть зарегистрирована, равна  $50 \text{ \AA}$  (что эквивалентно смещению  $0.02 \text{ \AA}$  в полосе регистрации 1 Гц).

Типичные осциллограммы детектируемых импульсов приведены на рис. 2 (вставка). При длительности модули-

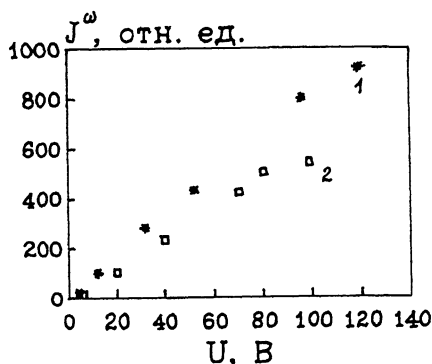


Рис. 3. Зависимость амплитуды сигнала нестационарной фотоЭДС от амплитуды фазовой модуляции (напряжения, подаваемого на электрооптический модулятор) (GaAs:Cr,  $\lambda = 0.63$  мкм,  $P = 40$  мВт; 1 —  $\omega/2\pi = 100$  кГц,  $R_L = 33$  кОм; 2 —  $\tau = 1$  мкс,  $R_L = 15$  кОм).

рующего импульса, большей времени релаксации  $\tau_{sc}$  объемного заряда в исследуемом полупроводнике GaAs:Cr, фотоприемник осуществляет их дифференцирование, в результате чего передаются лишь фронты импульсов. Варьируя интенсивность падающего на кристалл света, можно осуществлять изменение сопротивления GaAs:Cr в широких пределах, в результате чего может обеспечиваться оптимальное согласование фотоприемника с системой регистрации сигнала [7]. В наших экспериментах регистрация сигнала фотоЭДС осуществлялась в режиме тока короткого замыкания при сопротивлении кристалла, намного большем, чем сопротивление нагрузки.

Таким образом, адаптивные фотоприемники на основе GaAs:Cr позволяют регистрировать малые ( $50\text{Å} - 0.05\text{ мкм}$ ) высокочастотные колебания реальных объектов, способны работать со сложными волновыми фронтами, в том числе со спекл-полями. Из-за отсутствия постоянного тока через фотоприемник он является нечувствительным к амплитудным шумам лазера.

Описанные исследования оказались возможны благодаря частичной поддержке Международного научного фонда. Грант № NUJ000.

#### Список литературы

- [1] Andersen S.G. // Laser Focus World. 1989. V. 29. P. 15-16.
- [2] Forward R.L. // Phys. Rev. D. 1978. V. 17. P. 379-390.
- [3] Соколов И.А., Степанов С.И., Трофимов Г.С. // Акустический журнал. 1991. Т. 37. С. 998-1004.
- [4] Stepanov S.I., Sokolov I.A., Trofimov G.S., Vlad V.I., Popa D., Apostol I. // Opt. Lett. 1990. V. 15. P. 1239-1241.
- [5] Петров М.П., Степанов С.И., Трофимов Г.С. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 15. С. 916-921.
- [6] Petrov M.P., Sokolov I.A., Stepanov S.I., Trofimov G.S. // J. Appl. Phys. 1990. V. 68. P. 2216-2225.
- [7] Sochava S.L., Stepanov S.I. // J. Appl. Phys. 1994. V. 75. P. 2941-2944.
- [8] Stepanov S.I. // Appl. Opt. 1994. V. 33. P. 915-921.

Физико-технический  
институт им. А.Ф. Иоффе  
РАН  
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию  
25 января 1995 г.