

УДК 621.315.61:534.2

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В КРИСТАЛЛАХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

© 2011 г. В. С. Гуревич¹, В. Е. Гапонов², В. И. Редкоречев³, Ю. Н. Захаров⁴¹ НПФ «Центр лазерных технологий», Казахстан² ООО «Криптон»,³ Институт прикладной физики, Узбекистан⁴ Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского

Разработана специализированная методика применения цифровой голографической интерферометрии для измерения параметров поверхностных акустических волн (ПАВ). При этом для обеспечения возможности регистрации двухэкспозиционных интерферограмм высокочастотных ПАВ в качестве источника излучения использовались пикосекундный импульсный лазер, а для повышения пространственного разрешения системы применяли увеличение изображения, поступающего на вход ПЗС-матрицы регистрирующей камеры. Достигнуты чувствительность и разрешающая способность, позволяющие проводить визуализацию и измерение параметров ПАВ, значения которых лежат далеко за пределами возможностей стандартных методов голографической интерферометрии.

Ключевые слова: поверхностные акустические волны, голографическая интерферометрия, цифровая голография.

Введение

Определение оптимальных условий формирования, распространения и отражения поверхностных акустических волн (ПАВ) позволяет существенно улучшить рабочие характеристики современных электронных устройств, работающих на данном физическом явлении. В большинстве работ, посвященных исследованию параметров ПАВ, применяют методы, основанные на регистрации косвенных параметров волны точечными детекторами в отдельных точках с последующим расчетным определением амплитудных, частотных и фазовых характеристик [1–3].

В то же время известно, что метод голографической интерферометрии (ГИ) обладает уникальными достоинствами именно с точки зрения визуализации и измерений поверхностных микродеформаций и в принципе позволяет визуализировать ПАВ одновременно на всей исследуемой поверхности, а также проводить прямые измерения параметров волны (длины волны, амплитуды, характера колебаний). Однако существующие голографические измерительные системы не обеспечивают временной и пространственной разрешающей способности, необходимой для визуализации и измерения параметров высокочастотных колебаний сверхмалой амплитуды, возникающих в ПАВ [4].

Ниже рассмотрены результаты теоретических и экспериментальных исследований по разработке специализированной голографиче-

ской аппаратуры и методики для измерения параметров ПАВ в твердых средах.

Теоретическое обоснование голографической методики измерений

Предельная продольная пространственная разрешающая способность метода (чувствительность интерферометра к перемещениям). Важнейшим фактором, ограничивающим возможность применения ГИ для измерения нанометровых перемещений поверхности, является чувствительность голографического интерферометра, оценка которой приведена ниже.

Принцип действия цифрового голографического интерферометра состоит в следующем. Излучение лазера делится на объектный пучок, освещающий объект, и опорный пучок, непосредственно поступающий на приемный сенсор цифровой видеокамеры. Объектный пучок освещает объект в направлении \mathbf{k}_i . Часть света, отраженная объектом в направлении \mathbf{k}_v , называемом «направление наблюдения», проходит через оптическую фокусирующую систему и формирует на приемном сенсоре камеры изображение объекта. Голограмма сфокусированного изображения формируется на ПЗС-матрице (ПЗС — приборы с зарядовой связью) цифровой камеры как результат интерференции между опорным и объектным пучками.

Пусть $R(x, y)$ — плоская опорная волна, а $U(x, y)$ — волна, исходящая

от объекта. Тогда интенсивность, зарегистрированная на ПЗС–матрице, может быть описана выражением [4]

$$I_H(x, y) = |R_H(x, y)|^2 + |U_H(x, y)|^2 + R_H(x, y)U_H^*(x, y) + R_H^*(x, y)U_H(x, y), \quad (1)$$

где «H» — индекс, обозначающий плоскость голограммы; «*» — индекс, обозначающий комплексное сопряжение. Интенсивность, описываемая уравнением (1), регистрируется на двухмерное электронное устройство, состоящее из рядов чувствительных ячеек–пикселей ($M \times N$ ячеек), имеющих размеры $\Delta x \times \Delta y$, что позволяет записать значение интенсивности в виде функции $I_H(m\Delta x, n\Delta y)$, где m и n — целые числа. Последние два члена уравнения (1) содержат информацию об амплитуде и фазе объектной волны. Эта информация может быть выделена с помощью пространственной фильтрации с использованием метода преобразования Фурье [2]. Путем применения преобразования Фурье к зарегистрированному массиву можно выделить и отфильтровать один из двух последних членов уравнения (1). Оба этих члена разделяются в Фурье–плоскости в результате небольшого наклона опорного пучка по отношению к объектному. После фильтрации и обратного преобразования Фурье получаем комплексную амплитуду объектного волнового фронта. Из полученной в цифровом виде комплексной амплитуды $U_H(m\Delta x, n\Delta y)$ может быть рассчитана фаза волнового фронта объектной волны:

$$\varphi_H(m\Delta x, n\Delta y) = \arctg \frac{\text{Im}[U_H(m\Delta x, n\Delta y)]}{\text{Re}[U_H(m\Delta x, n\Delta y)]}, \quad (2)$$

где Re и Im — действительная и мнимая часть комплексного числа соответственно.

Путем вычитания значений фаз объектного поля, рассчитанных для двух состояний объекта, можно получить значение разности фаз, которая позволяет рассчитать смещение точек объекта \mathbf{u} в направлении \mathbf{s} , возникшее в результате приложения нагрузки, по формуле

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{u} \cdot \mathbf{s}, \quad (3)$$

где λ — длина волны излучения лазера; \mathbf{s} — вектор чувствительности интерферометра, определяемый выражением $\mathbf{s} = \mathbf{k}_i - \mathbf{k}_v$; \mathbf{k}_i и \mathbf{k}_v — единичные векторы направления освещения и наблюдения соответственно.

Из выражения (3) следует, что максимальная чувствительность системы к перемещениям в направлении нормали к поверхности (которые имеют место в ПАВ), достигается при освещении и наблюдении по нормали ($|\mathbf{s}| = 2$). При этом каждая полоса на интерферограмме имеет цену $\lambda/2$ (где λ — длина

волны излучения лазера), чем и определяется базовая чувствительность интерферометра (для оптического диапазона — 350—200 нм на одну полосу). В случае, если перемещения поверхности не превышают значения $\lambda/2$, полосы на интерферограмме не образуются, но, несмотря на это, распределение фаз в объектных волнах для двух голограмм и их разность могут быть рассчитаны по информации, содержащейся в отдельных пикселях ПЗС–матрицы. Предельная чувствительность в рассматриваемом случае определяется минимальным смещением поверхности в направлении вектора чувствительности интерферометра, которая приводит к реакции измерительной системы.

Как следует из выражения (3) чувствительность собственно голографического метода обратно пропорциональна длине волны лазерного излучения, используемого для записи голограмм, которая известна с большой точностью (до ширины спектра, составляющей для голографических лазеров величину порядка десятков фм). Однако знание этого факта само по себе не позволяет судить о минимальном значении измеряемых перемещений.

При конкретной технической реализации голографической измерительной системы основным фактором, определяющим предельную чувствительность, является разрешающая способность измерительной системы, в которую входят ряд компонентов: регистрирующая ПЗС–матрица, платы компьютерной электроники и программное обеспечение. При использовании для регистрации и обработки голограмм цифровых устройств и программ 8–битового формата измерительная система в конечном итоге обеспечивает разбиение максимального значения смещений поверхности W_{\max} , рассчитанного из интерферограммы, на 256 градаций, и, таким образом, цена каждой градации составляет

$$\Delta W = \frac{W_{\max}}{256}. \quad (4)$$

Далее, исходная измерительная информация (поле перемещений) представляется в виде дискретно заданной функции двух переменных $W = F(m\Delta x, n\Delta y)$, где $\Delta x, \Delta y$ — размеры пикселя на изображении; m и n — порядковый номер пикселя в направлении соответствующих осей. При этом значение функции W неизменно в пределах площади каждого пикселя и кратно по величине ΔW . Из формулы (4) следует, что при уменьшении суммарного смещения объекта цена градации ΔW также уменьшается и достигает своего минимума в случае, когда на интерферограмме образуется одна полоса. Как было показано выше, при использовании оптической схемы интерферометра с нормальными направлениями освещения и наблюдения цена одной интерференционной полосы составляет $\lambda/2$. Исходя из этого цена градации или значение минимального смещения поверхности, которое приводит к реакции

системы (переход на соседнюю градацию), для этого случая может быть рассчитана по формуле

$$\Delta W_{\min} = \frac{0,5\lambda}{256}. \quad (5)$$

В связи с особенностями работы системы оцифровки данных, используемой в большинстве экспериментальных установок, при дальнейшем уменьшении суммарной величины смещений на интерферограмме (доли полосы) цена градации, рассчитанная из выражения (5), остается неизменной. Таким образом, смещения, которые по величине меньше данных расчетных значений, ни при каких условиях не приводят к реакции измерительной системы. Поэтому указанные величины могут рассматриваться в качестве максимальной предельной чувствительности измерительной системы для данной длины волны излучения лазера. Из формулы (5) следует, что теоретически предельная чувствительность метода при использовании для регистрации голограмм излучения ультрафиолетового диапазона составляет менее 1 нм. Однако выражение (1) не учитывает наличие спекл-шума, возникающего при отражении когерентного света от поверхности диффузноотражающих объектов. На практике предельная чувствительность может быть достигнута только при измерениях смещений объектов, имеющих зеркальную поверхность, при отражении от которой в объектной волне не образуется высокочастотная спекл-структура.

Временная разрешающая способность метода.

Другим важнейшим фактором, ограничивающим применение ГИ для исследования динамических процессов, является частота колебаний поверхности исследуемого объекта. В литературе приведены данные о применении цифровой ГИ для измерения колебаний на частотах до 100 кГц [5]. Сведения об использовании голографических методов для визуализации и измерения колебаний на более высоких частотах отсутствуют.

При получении интерферограммы вибрирующего объекта двухэкспозиционным методом осуществляется запись и интерферометрическое сравнение двух голограмм, одна из которых зарегистрирована в состоянии покоя, а вторая — после возбуждения колебаний в образце. При этом важнейшим параметром, определяющим контраст полос и саму возможность проведения измерений, является скважность k , определяемая как

$$k = \frac{T}{t}, \quad (6)$$

где T — период колебаний поверхности объекта; t — длительность экспозиции (продолжительность записи голограммы).

Известно, что для обеспечения возможности получения такой двухэкспозиционной интерферограммы колеблющейся поверхности при амплитудах колебаний на уровне длины волны лазерного излучения (и меньше) скважность должна иметь

значение не менее 10. При этом в случае стоячей волны экспозиция должна быть синхронизирована с моментом амплитудного отклонения вибрирующей поверхности [6].

В типовых голографических интерферометрах с лазером непрерывного излучения длительность экспонирования ПЗС-матрицы устанавливается программным способом и лежит в диапазоне 1/15—1/20000 с, т. е. $k = 10$ может быть обеспечена для частот колебаний, не превышающих 2 кГц. При использовании такой системы при частотах колебаний поверхности объекта, имеющих место в ПАВ (до 1 ГГц), скважность будет иметь значения много меньше единицы.

При $k \ll 1$ происходит усреднение интенсивности объектной волны за время экспонирования вибрирующего объекта. Сравнение такой голограммы с голограммой, зарегистрированной в состоянии покоя, приводит к образованию так называемой квазиби-нарной интерферограммы [7], по которой невозможно проводить визуализацию и измерение параметров колебаний с амплитудой меньше $\lambda/2$, так как на интерферограмме не образуется соответствующего градиента интенсивности.

Таким образом, из теоретических представлений можно сделать вывод, что типовой голографический интерферометр не позволяет проводить визуализацию и измерение параметров колебаний на частотах мегагерцового диапазона вследствие значительной длительности экспозиции. Для обеспечения необходимых значений скважности при частотах колебаний до 1 ГГц (период колебаний 1 нс) длительность экспозиции не должна превышать 100 пс.

Поперечная пространственная разрешающая способность. Исходя из того, что перемещения (деформации) поверхности объекта, вызванные ПАВ, приводят к образованию малых флуктуаций фазы отраженной световой волны в одном направлении, можно предположить, что интерферограмма колебаний поверхности образца будет представлять собой систему параллельных полос низкого контраста, перпендикулярных к направлению распространения ПАВ. В случае использования для записи голограмм оптической схемы с коэффициентом увеличения $1\times$, период градиента фазы на интерферограмме (шаг полос) будет равен длине волны ПАВ.

Поскольку голограммы регистрируют на ПЗС-матрицу, то единичным элементом разрешения в этом случае является пиксел ПЗС-матрицы, размер которого для типовых камер высокого разрешения составляет не менее 5 мкм.

Известно, что для обеспечения принципиальной возможности записи подобной структуры на ПЗС-матрицу интервал дискретизации (размер пиксела) должен быть как минимум в 2 раза меньше шага полос на интерферограмме [4].

Легко подсчитать, что при скорости звука в кристалле ниобата лития 4000 м/с это условие соблюдается вплоть до частоты ПАВ 400 МГц, при

которой на длину волны приходится 2 пиксела. При более высоких частотах условие Найквиста не выполняется. Кроме того, слишком малое количество пикселей, приходящееся на длину волны для частот ПАВ в области 10—400 МГц, очевидно, также недостаточно для получения гладкой огибающей поля виброперемещений, что является определяющим для измерений параметров волны (длины и амплитуды). Поэтому для измерения параметров высокочастотных ПАВ необходимо использовать увеличение изображения на входе ПЗС-матрицы.

Необходимо также отметить, что задача измерения поля виброперемещений в ПАВ является по своей сути противоречивой. Так, если для визуализации ПАВ на всей поверхности образца необходимо обеспечить максимально возможную зону обзора (минимальный коэффициент увеличения изображения), то для получения наибольшей точности измерения параметров ПАВ необходимо применять максимальное увеличение, что ведет к сужению области поверхности объекта, регистрируемого за одну экспозицию.

Для преодоления указанного противоречия и обеспечения максимальной универсальности измерительной установки может быть использована комбинированная двухступенчатая система увеличения изображения.

1. Оптическое увеличение изображения при записи голограмм на входе ПЗС-матрицы с регулируемым коэффициентом увеличения в диапазоне $2\times$ — $10\times$. Это позволит обеспечить, с одной стороны, визуализацию ПАВ на максимально возможном участке поверхности, а с другой — подготовить достаточно подробный массив информации для последующих измерений параметров ПАВ.

2. Компьютерное увеличение масштаба изображения с коэффициентом до $20\times$, позволяющее оператору после визуализации ПАВ выделить, увеличить и обработать интересующий фрагмент интерферограммы с получением максимально точных значений параметров (длины волны и амплитуды ПАВ) в интересующей области поверхности образца.

Методика проведения эксперимента

В качестве объекта исследований использовали макетный образец, представляющий собой пластину из ниобата лития размером $50 \times 50 \times 3 \text{ мм}^3$. Полировка поверхности — односторонняя. Возбуждение ПАВ в образце и контроль отклика осуществляли с помощью встречно-штырьевых преобразователей (ВШП) D1—D8, нанесенных на поверхность образца методом литографии. Эскиз образца представлен на рис. 1.

В качестве источника излучения в экспериментальной установке (рис. 2) использовали пикосекундный импульсный лазер с пассивной синхронизацией мод на алюмоиттриевом гранате. Резонатор задающего генератора 2 лазера выполнен по схеме вывода одиночного импульса длительностью 50 пс. Длина волны излучения основной гармоники — $1,063 \text{ мкм}$,

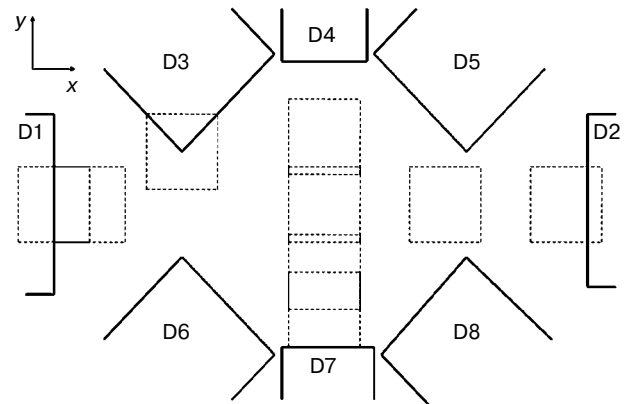


Рис. 1. Эскиз объекта измерений с указанием положения ВШП D1—D8.
Пунктиром обозначены зоны проведения измерений

диаметр пучка — $1,5 \text{ мм}$. Излучение задающего генератора усиливается в двухпроходном оптическом усилителе 3. На выходе усилителя энергия излучения в импульсе составляла $2\text{—}3 \text{ мДж}$. Диаметр пучка — 2 мм , длина когерентности — $3\text{—}5 \text{ м}$. Излучение с выхода усилителя 3 направляется на нелинейный кристалл калий титанил фосфата (КТР) 4 толщиной 2 мм , в котором излучение на длине волны $1,063 \text{ мкм}$ с эффективностью 30% преобразуется во вторую гармонику ($0,532 \text{ мкм}$). Далее для получения третьей гармоники с длиной волны $0,354 \text{ мкм}$ излучение подается на кристалл дигидрофосфата калия (КДР) 5 и светофильтр УФС 6, который отсекает

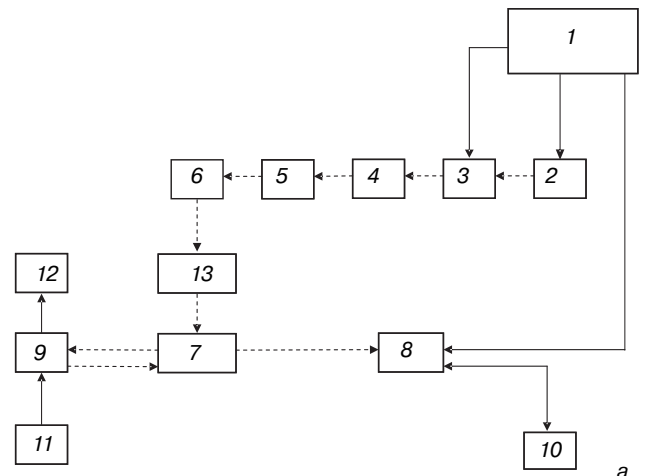


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки (а) и общий вид цифрового голографического интерферометра (б)

излучение на длинах волн 1,063 и 0,532 мкм. Затем излучение на длине волны 0,354 мкм с помощью коллиматора 13 преобразуется в параллельный пучок с регулируемым диаметром и подается в голографический интерферометр 7 и далее на исследуемый образец 9 и ПЗС-камеру 8. Синхронизация работы ПЗС-камеры с моментами излучения импульсов лазера осуществляется по сигналу, который приходит от блока накачки лазера 1 в момент начала поджига ламп накачки и запускает камеру в ждущем режиме. После экспонирования кадр запоминается на установленное время. Работа ПЗС-камеры контролируется управляющим компьютером 10, который снабжен специальным программным обеспечением для записи голограмм, расчета и расшифровки цифровых голографических интерферограмм. Возбуждение ПАВ в образце осуществляли с помощью генератора 11, контроль наличия ПАВ и выбор резонансной частоты — с помощью осциллографа 12. Сплошными стрелками на рис. 2 обозначены электрические связи, пунктирными — оптические.

Измерения проводили в следующей последовательности.

1. **Сборка и настройка измерительной установки.** Параметры оптической схемы подбирали экспериментально до достижения оптимальных условий записи голограмм. Возбуждение ПАВ осуществляли путем подачи электрического сигнала от высокочастотного генератора на ВШП D1. Настройку на резонанс проводили по максимальному значению сигнала на экране осциллографа, подключенного к ВШП D2. Измеренное значение резонансной частоты составило $f_0 = 17$ МГц. Измерения проводили с использованием стандартных приборов (осциллограф Tektronix TDS 303 2B, генератор ГЗ-19А и Г-102А).

2. **Запись голограмм образца.** В состоянии покоя (без нагрузки) запись голограмм осуществляли с использованием импульсного лазера с длительностью импульса 50 пс на длине волны излучения $\lambda_3 = 0,354$ мкм. Последующую запись серии голограмм в состоянии возбуждения на резонансной частоте выполняли с интервалом между экспозициями 5—30 с. Голограммы образца в нагруженном состоянии для каждой зоны измерений (см. рис. 1) записывали при возбуждении на резонансной частоте при напряжении 10—15 В в двух режимах:

- контакты ВШП D2—D8 замкнуты накоротко (режим КЗ);
- согласующая нагрузка на ВШП D2—D8 — 50 Ом.

С целью получения интерферограмм во всех зонах измерений, указанных на рис. 1, образец после записи каждой серии голограмм для выбранной зоны последовательно смещался в своей плоскости с помощью прецизионной двухкоординатной подвижки, после чего осуществляли запись голограмм следующей зоны.

3. **Получение и количественная расшифровка (анализ) цифровых двухэкспозиционных голографиче-**

ских интерферограмм. Интерферограммы получали посредством специализированной компьютерной программы обработки голограмм, осуществляющей интерферометрическое «сравнение» двух голограмм с последующим расчетом полей перемещений. При этом из двух голограмм сравнения одна — голограмма объекта в состоянии покоя, другая — в состоянии возбуждения.

4. **Наложение интерферограмм на соответствующие зоны поверхности образца** (рис. 3) с целью анализа общей картины распространения ПАВ по поверхности образца.

Экспериментальные результаты

На рис. 3 показан конечный результат визуализации ПАВ, полученный путем обработки серии интерферограмм при увеличении системы $2,7\times$ (размер зоны записи $3,25 \times 3,25$ мм²) и позволяющий судить о характере распространения ПАВ по всей поверхности образца. Из анализа представленных результатов можно сделать следующие выводы:

– ПАВ распространяются в ограниченной зоне, представляющей участок поверхности образца в виде полосы протяженностью от ВШП D1 до ВШП D2, ширина которой примерно равна ширине расстояния («горла») между крайними точками ВШП D3—D6;

– волновой фронт ПАВ является плоским и остается параллельным выходной кромке возбуждающего ВШП D1 на всем протяжении, вплоть до входной кромки ВШП D2;

– методика сканирования поверхности образца, при которой перемещение образца от зоны к зоне осуществляется с помощью двухкоординатной подвижки, обеспечивает принципиальную возможность визуализации и измерения параметров ПАВ по всей поверхности изделия путем «стыковки» интерферограмм.

С целью проверки возможности увеличения зоны обзора за один цикл регистрации и, как следствие, снижения количества циклов записи, необходимых для визуализации всей поверхности образца, была проведена экспериментальная съемка центральной части образца в масштабе 1,5 : 1. При этом раз-

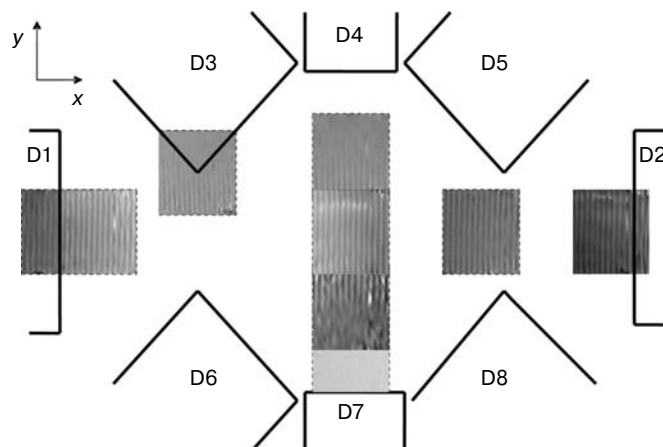


Рис. 3. Визуализация ПАВ на поверхности образца

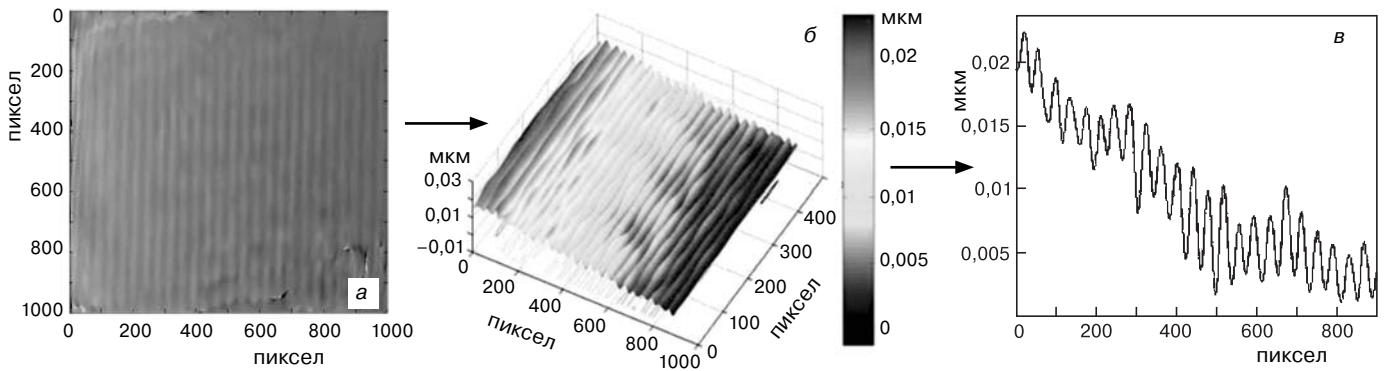


Рис. 4. Визуализация ПАВ в центральной зоне на фоне термических деформаций: а — интерферограмма; б — восстановленное поле перемещений; в — вертикальное сечение поля перемещений в плоскости волнового вектора (а, б — увеличение 1,5× (1000 × 1000 пикселей по горизонтальным осям соответствуют 6 × 6 мм²); б, в — по вертикальной оси смещение поверхности в мкм)

мер одновременно регистрируемой сцены составил 6 × 6 мм². Полученные интерферограммы показали, что пространственное разрешение ПЗС-матрицы обеспечивает четкую визуализацию ПАВ при этом увеличении на заданной частоте колебаний. Для проверки качества записи была также выполнена количественная расшифровка интерферограмм, в ходе которой выявлено наличие наклона поверхности как целого вследствие термического расширения образца (рис. 4) и измерены основные параметры ПАВ. Измеренные значения хорошо согласуются с расчетными (рис. 5).

Для определения характера ПАВ («стоячая» — «бегущая») выполнено сравнение функций перемещений одного и того же участка поверхности образца, рассчитанных по интерферограммам, зарегистриро-

ванным в различные произвольные моменты времени. При этом в случае стоячей волны расположение пучностей (максимумов функции перемещений) на поверхности образца должно оставаться неизменным во времени. Результат такого сравнения для возбуждения в режиме КЗ свидетельствует о наличии стоячей волны (рис. 6). На графиках рис. 6 видно, что в моменты регистрации смещения поверхности, вызванные ПАВ, находятся в противофазе, но местоположение пучностей остается неизменным, что свидетельствует о наличии стоячей волны.

Заключение

С помощью экспериментов по визуализации и измерению параметров высокочастотных акустиче-

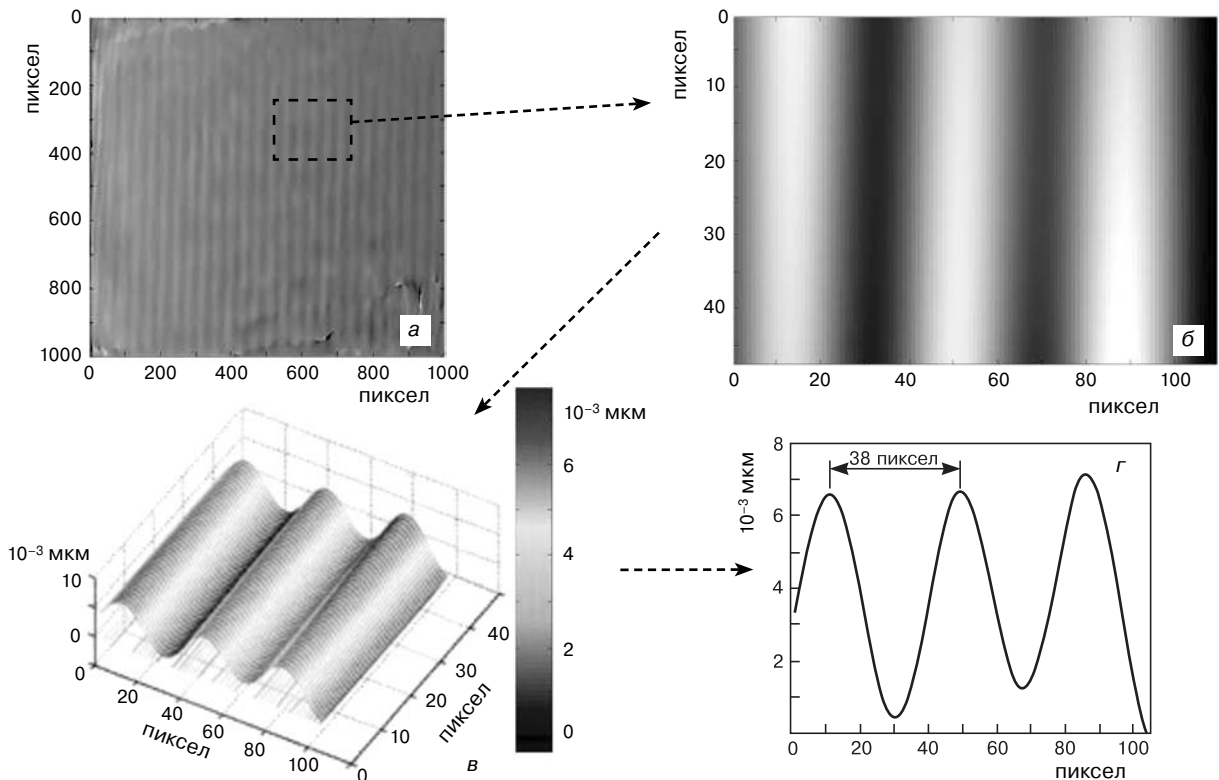


Рис. 5. Результаты измерения параметров ПАВ в центральной зоне при возбуждении от ВШП D1 на частоте 17 МГц в режиме КЗ: а — интерферограмма; б — цифровое увеличение выделенной на интерферограмме (а) области; в — восстановленное поле перемещений; г — вертикальное сечение поля перемещений в направлении волнового вектора. Увеличение — 1,5× (цена пикселя при составляет 6 мкм). Длина ПАВ — 38 пикселей × 6 мкм = 240 мкм, амплитуда ПАВ 3 — 3,5 нм

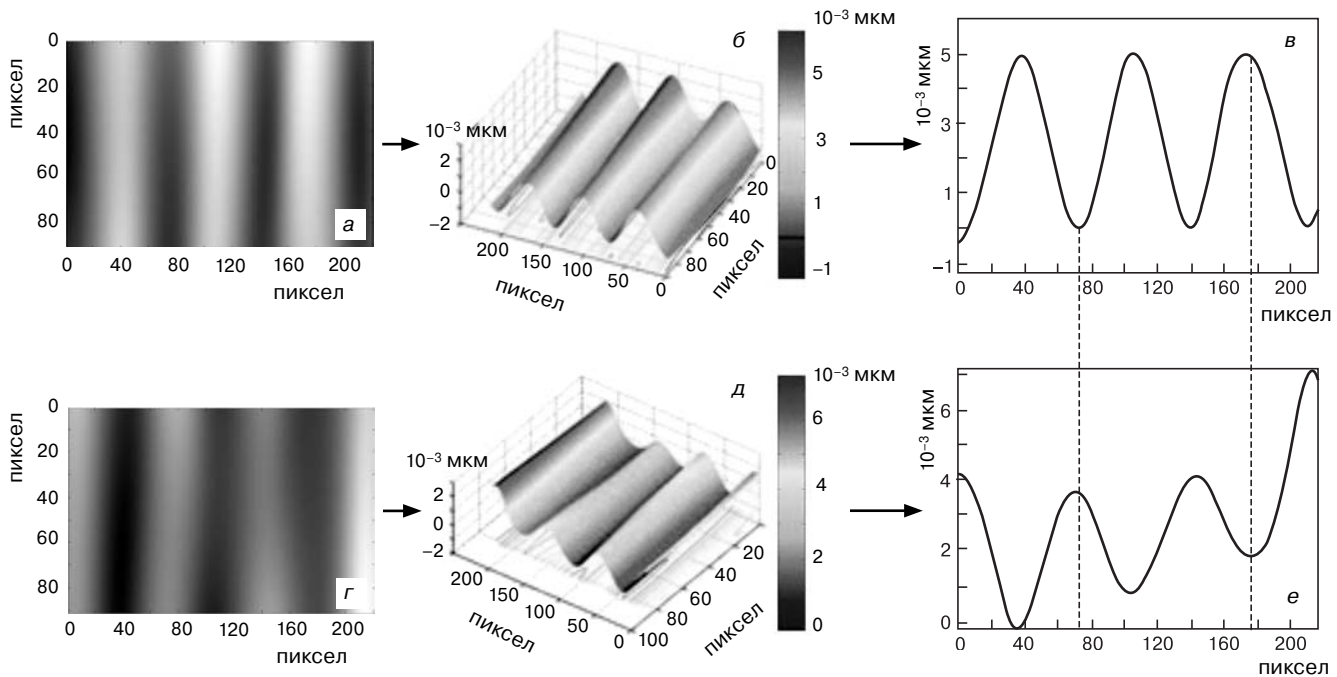


Рис. 6. Проверка характера ПАВ в режиме КЗ путем сравнения функции перемещений поверхности для одного и того же участка образца в различные произвольные моменты времени: а, г — интерферограммы; б, д — восстановленное поле перемещений; в, е — вертикальное сечение восстановленного поля перемещений. Момент регистрации, соответствующий верхнему ряду рисунков, отличается от момента регистрации нижнего ряда на случайную величину

ских волн в кристалле ниобата лития, выполненных методом цифровой ГИ показано, что при принятии специальных мер этот метод обеспечивает следующие показатели:

- чувствительность к перемещениям на уровне менее 1 нм;
- временную разрешающую способность, обеспечивающую измерение быстротекущих деформаций на частотах как минимум до десятков МГц (потенциально до 5 ГГц);
- пространственную разрешающую способность, позволяющую проводить измерения на микроплощадках размером порядка десятков микрометров (в экспериментах — $50 \times 50 \text{ мкм}^2$).

Выявлено, что указанные значения предельных характеристик метода цифровой ГИ намного превосходят общепринятые в традиционной ГИ границы применимости метода.

Показано, что полученные экспериментально значения предельных характеристик чувствительности и разрешающей способности метода цифровой ГИ могут быть существенно улучшены путем принятия дополнительных мер. В частности, для улучшения предельной чувствительности за счет использования для регистрации цифровых голограмм лазеров УФ-диапазона; а также камер и программного обеспечения, позволяющих при оцифровке изображений получить большее число градаций. А для повышения временной разрешающей способности можно использовать импульсные лазеры фемтосекундного диапазона. С точки зрения улучшения пространственной разрешающей способности можно применять для записи голограмм ПЗС-матриц

с большим количеством и меньшими размерами пикселей.

На основании результатов исследования можно утверждать, что цифровая ГИ является перспективным когерентно-оптическим методом измерения параметров высокочастотных ПАВ. Полученные авторами результаты могут быть положены в основу создания промышленной технологии и ряда измерительных приборов, которые обеспечат уникальные возможности при решении широкого круга задач в области разработки электронных компонентов на ПАВ.

Библиографический список:

1. **Комоцкий, В. А.** Измерение отражений поверхностных акустических волн от периодической структуры методом лазерного зондирования / В. А. Комоцкий, С. М. Окоп // Вестник РУДН. Сер. Физика. – 2002. – Т. 10, № 1. – С. 144–147.
2. **Долбищенко, В. В.** Обобщенная структура аппаратных средств измерения параметров поверхностных акустических волн / В. В. Долбищенко, Е. В. Деркаченко, В. В. Данилов // Матер. Междунар. научно-практ. конф. «Современные информационные и электронные технологии». – Одесса, 2005. – С. 274.
3. **Бирюков, Д. Ю.** Применение лазерной интерферометрии для бесконтактного измерения скорости волн Рэлея в оптическом стекле / Д. Ю. Бирюков, А. П. Владимиров, П. С. Еремин, А. Ф. Зацепин, В. С. Кортов, А. А. Митрохин // XVII Российская научно-технич. конф. «Не разрушающий контроль и диагностика» – Екатеринбург : Урал, 2005.
4. **Schnars, U.** Digital holography / U. Schnars, W. Jüpter – Springer, 2005. – 164 p.
5. **Deason, V. A.** Imaging of acoustic waves in sand / V. A. Deason, K. L. Telchow, S. Watson. – Idaho Falls (US), 2003. Preprint. INEEL/CON-03-00022, August, 2003. – P. 8.
6. **Островский, Ю. И.** Голографическая интерферометрия / Ю. И. Островский, М. М. Бутусов, Г. В. Островская. – М. : Наука, 1977.
7. **Borza, D.** Vibration amplitude field estimation based on high-resolution time-averaged interferograms / D. Borza // Proc. of SPIE. – 2006. – V. 6341. – P. 6341241-6.