



УДК 004.94

М. Е. Гусев, И. Ю. Гусева, И. В. Алексеенко  
В. С. Гуревич, А. М. Исаев, В. И. Редкоречев

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ НАНОПЕРЕМЕЩЕНИЙ

*Проведена оценка предельной чувствительности цифровых голографических методов измерений поверхности перемещений. Проанализировано влияние степени дискретизации цифровых преобразователей сигналов на предельную чувствительность цифровых голографических измерений. Экспериментально исследованы параметры поверхностно-акустических волн с амплитудами колебаний менее 10 нм.*

*The estimation of limiting sensitivity of digital holographic methods of measurements of a surface of movings is lead}. Influence of a degree of digitization of hardware on limiting the sensitivity of digital holographic measurements is analysed. Parameters of surface – acoustic waves with amplitudes of fluctuations less than 10 nanometers are experimentally investigated.*

**Ключевые слова:** цифровая голография, голографическая интерферометрия, поверхностно-акустические волны (ПАВ), наноизмерения.

**Key words:** digital holography, holographic interferometry, nanometry, surface-acoustic wave (SAW).

#### Введение

В последние годы существенно возрос как научный, так и практический интерес к изучению процессов деформирования твердого тела, при которых перемещения поверхности лежат в нанометровом диапазоне. Смещения такой величины возникают при низком уровне нагрузки – как статической, так и динамической. В данной работе исследовалась форма поверхности объекта при высокочастотных колебаниях, вызванных поверхностными акустическими волнами Релея (ПАВ).

Одним из методов, который по своим принципам обеспечивает возможность выполнения измерений сверхмалых перемещений, является цифровая голографическая интерферометрия (ЦИИ). Теоретические расчеты показывают, что разрешающая способность и чувствительность современных фотоприемных ПЗС-матриц обеспечивают принципиальную возможность расчета разности фаз, соответствующих перемещениям порядка 0,5 нм [1]. Однако экспериментально голографическая методика визуализации полей наноперемещений на сегодня реализована только на частотах, не превышающих 100 кГц. При этом интерференционные картины имеют низкое качество и могут быть использованы только как средство визуализации [2].

Таким образом, на сегодняшний день предельные возможности экспериментальных голографической визуализации и измерения полей перемещений нанометрового уровня не исследованы.



### Теоретическое обоснование предельной чувствительности ЦГИ

Известно, что путем вычитания значений фаз объектного поля, рассчитанных из двух цифровых голограмм, можно получить значение разности фаз, которая зависит от смещения точек объекта  $d$  в результате приложения нагрузки в направлении  $s$  по формуле [1]

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} ds, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны излучения лазера;  $s$  — вектор чувствительности интерферометра, определяемый выражением  $s = k_i - k_v$ , где  $k_i$  и  $k_v$  — единичные векторы освещения и наблюдения, соответственно.

Из выражения (1) следует, что максимальная чувствительность системы к перемещениям в направлении нормали к поверхности (которые имеют место в ПАВ) достигается при освещении и наблюдении по нормали ( $|s| = 2$ ). При этом каждая полоса имеет цену  $\lambda/2$ , чем и определяется классическая чувствительность интерферометра (для оптического диапазона примерно 100–200 нм на одну полосу). В случае, если перемещения поверхности не превышают величины  $\lambda/2$ , полосы на интерферограмме не образуются, но распределение фаз в объектных волнах и их разность могут быть рассчитаны, так как в каждой из цифровых голограмм содержится информация о распределении фазы. Предельная чувствительность определяется величиной минимального смещения поверхности в направлении вектора чувствительности интерферометра, которая приводит к реакции измерительной системы после вычисления разности фаз двух цифровых голограмм.

Как следует из (1), чувствительность голографического метода обратно пропорциональна длине волны лазерного излучения, используемого для записи голограмм, которая известна с большой точностью (до ширины спектра, т.е. доли нанометров). Однако знание этого не позволяет судить о минимальной величине измеряемых перемещений.

При конкретной реализации цифровой голографической измерительной системы основными факторами, определяющим предельную чувствительность, являются:

- а) регистрирующая ПЗС-матрица,
- б) платы компьютерной электроники,
- в) программное обеспечение.

При использовании для регистрации и обработки голограмм цифровых устройств и программ 8-битового формата измерительная система обеспечивает разбиение максимальной величины смещений поверхности  $W_{max}$  на 256 градаций, и цена каждой градации составляет

$$\Delta W = W_{max} / 256. \quad (2)$$

Далее исходная измерительная информация представляется в виде дискретно заданной функции двух переменных  $W(x,y) = F(m\Delta x, n\Delta y)$ , где  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  — размеры пиксела ПЗС-матрицы, а  $m$  и  $n$  — порядковый номер пиксела в направлении соответствующих осей. При этом значение функции  $W$  неизменно в пределах площади каждого пиксела и



кратно по величине  $\Delta W$ . Из (2) следует, что при уменьшении величины суммарного смещения объекта цена градации  $\Delta W$  также уменьшается, и достигает своего минимума в случае, когда на интерферограмме образуется одна полоса. При использовании интерферометра с нормальными направлениями освещения и наблюдения цена интерференционной полосы составляет  $\lambda/4$ , где  $\lambda$  — длина волны излучения лазера. Цена градации, или величина минимального смещения поверхности, которая приводит к реакции системы (переход на соседнюю градацию), для этого случая рассчитывается из формулы

$$\Delta W_{min} = 0,5 \lambda / 256. \quad (3)$$

В связи с особенностями работы системы дискретизации данных при дальнейшем уменьшении суммарной величины смещений на интерферограмме (доли полосы) цена градации остается неизменной. Таким образом, смещения 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.

#### Экспериментальная проверка предельной чувствительности ЦГИ и точности измерений

Объектом измерений служил кристалл ниобата лития с плоской полированной (зеркально отражающей) поверхностью, в котором с помощью встречно-штыревого преобразователя возбуждались ПАВ со следующими расчетными параметрами:

- резонансная частота ПАВ — 14, 67 МГц,
- амплитуда ПАВ — 2–6 нм,
- длина волны ПАВ — 255 мкм.

Голографическая визуализация и измерение параметров ПАВ производились на фрагменте поверхности размером  $3,4 \times 3,4$  мм.

Контроль наличия ПАВ и установка резонансной частоты осуществлялись по максимальному значению амплитуды датчика сигнала на экране осциллографа.

В качестве источника регистрирующего излучения использовался импульсный лазер с длительностью импульса 50 пс, длина волны излучения лазера — 0,532 мкм; 0,354 мкм [3].

Коэффициент увеличения изображения — 1:2,5. Для длин волн использованного в экспериментах лазера предельная чувствительность согласно (3) составляет:

- для  $\lambda = 532$  нм —  $\Delta W_{min} = 1,039$  нм;
- для  $\lambda = 354$  нм —  $\Delta W_{min} = 0,69$  нм.

Экспериментальные результаты, представленные на рисунке 1, полностью согласуются с указанными расчетными значениями.

Повышение предельной чувствительности системы может быть обеспечено путем:

- уменьшения длины волны лазерного излучения;



— использования камеры и программного обеспечения, позволяющих получить большее число градаций (например, 10 -битовый формат, 1024 градации).

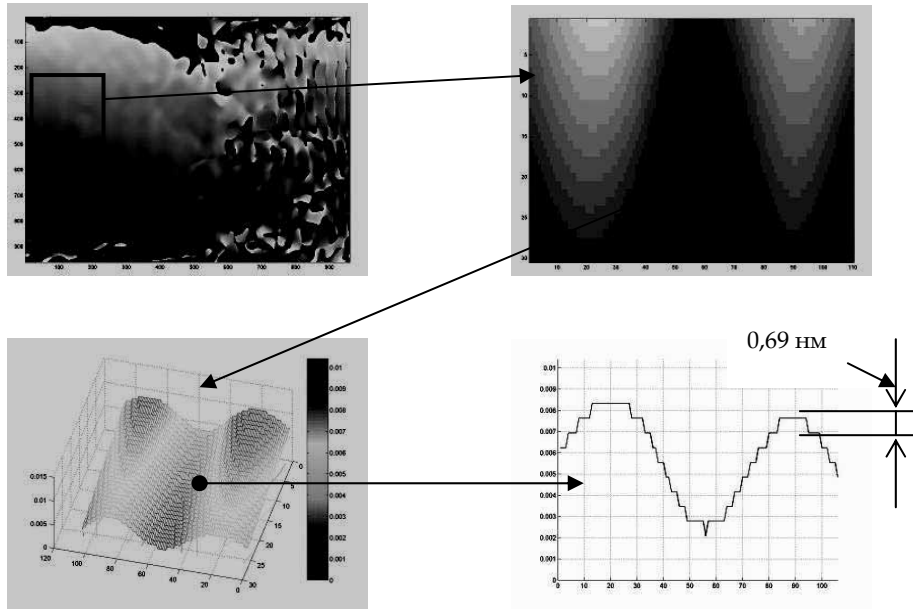


Рис. 1. Предельная чувствительность интерферометра на длине волны излучения лазера 354 нм

В связи с ограниченной чувствительностью (разрешающей способностью по перемещениям) измерительной системы зависимость перемещений, вызванных ПАВ, по координате получается в виде ступенчатой функции. За оценку абсолютной погрешности измерений амплитуды ПАВ в этом случае может быть принята величина максимальной предельной чувствительности, которая для длины волны излучения лазера 354 нм равна 0,69 нм (рис. 2).

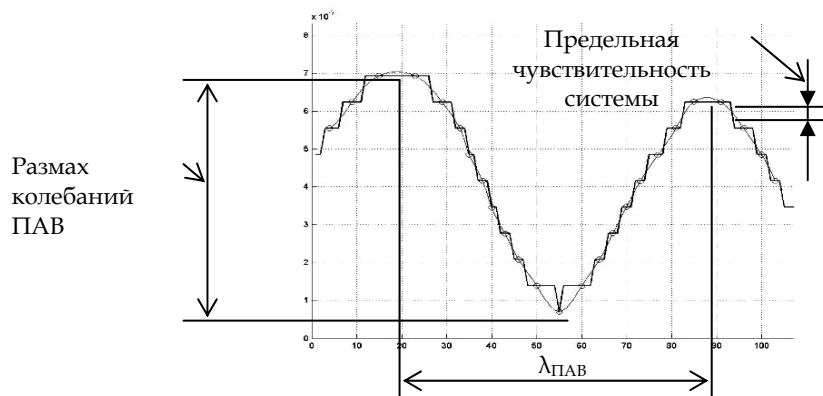


Рис. 2. К определению предельной чувствительности и погрешности измерений параметров ПАВ



Снижение погрешности измерений может быть достигнуто также путем аппроксимации ступенчатой функции гладкой (сплошная линия на рисунке 2 – кубическая сплайн-функция). Размах колебаний (расстояние между экстремумами аппроксимирующей функции по вертикальной оси) может быть измерен программным способом с большой точностью. Погрешность измерения будет определяться корректностью аппроксимации. Разработка соответствующих методов аппроксимации и оценка возникающих при этом погрешностей – предметы дальнейших исследований.

### Заключение

1. Теоретически обоснована и экспериментально проверена возможность измерения перемещений нанометрового диапазона с помощью ЦГИ.
2. Получены оценки предельной чувствительности и погрешности измерений.
3. Показаны пути повышения чувствительности и точности измерений.

### Список литературы

1. Schmars U., Jupter W. Digital holography. Springer, 2005.
2. Deason V.A., Telchow K.L., Watson S. Imaging of Acoustic Waves in Sand / INEELCON-03-00022. Idaho, 2003.
3. Редкоречев В.И., Кулагин И.А., Гуревич В.С., Гусев М.Е. и др. Цифровая пикосекундная трехцветная голографическая интерферометрия // Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 107, вып. 3. С. 433–437.

### Об авторах

Михаил Евгеньевич Гусев – канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

Ирина Юрьевна Гусева – ассист., Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

Игорь Владимирович Алексеенко – Институт технической оптики, Штуттгартский университет, Германия.

Вадим Семенович Гуревич – НПФ «Лазерные технологии», Казахстан.

Анри Молдабекович Исаев – НПФ «Лазерные технологии», Казахстан.

Вячеслав Иванович Редкоречев – НПО «Академприбор» АН Узбекистана.

### Authors

Mikhail Gusev – PhD, Ass. Prof., I. Kant Baltic Federal University (I. Kant Baltic Federal University), Kaliningrad.

Irina Guseva – Ass., I. Kant Baltic Federal University (I. Kant Baltic Federal University), Kaliningrad.

Igor Alexeenko – PhD, Ass. Prof., Institute of Technical Optics, Univ. of Stuttgart, Germany.

Vadim Gurevich – PhD, STC «Centre of Laser Technology», Almaty, Rep. of Kazakhstan.

Anri Issayev – PhD, Prof., STC «Centre of Laser Technology», Almaty, Rep. of Kazakhstan.

Vyacheslav Redkorechev – PhD, R&D Company «Akadempribor», Academy of Science, Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan.