

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОСИСТЕМ

С.А. Балтийский<sup>1</sup>, И.П. Гуров<sup>1</sup>, С. Де Никола<sup>2</sup>,  
Д. Коппола<sup>3</sup>, П. Ферраро<sup>4</sup>, А. Финицио<sup>2</sup>

Рассмотрены принципы цифровой голографии на основе цифровой записи и восстановления информации об амплитуде и фазе измерительной волны, характеризующей исследуемый объект, и особенности практической реализации методов цифровой голографии. Представлены примеры использования методов цифровой голографии для высокоточного анализа геометрических характеристик микроэлектромеханических систем (МЭМС) с получением трехмерной реконструкции топографии поверхности микроструктур в квазистатическом и динамическом режимах. Обсуждаются возможности бесконтактной диагностики характеристик микросистем в процессе изготовления и функционирования.

### Введение

В течение последних двух десятилетий физические свойства материала кремния использовались в многочисленных приложениях. В дополнение к его традиционному широкому использованию в технологиях элементной базы электроники кремний стал широко применяться в микромеханике и оптике, в частности, при объединении электронных, оптических, механических элементов, датчиков, микроприводов на общей кремниевой подложке [1]. Новая технология получила название технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) и микрооптоэлектромеханических систем (МОЭМС) и позволяет получать микросистемы с высокой степенью интеграции и широкими функциональными возможностями при высоком быстродействии.

Характерная особенность технологии МЭМС/МОЭМС состоит в формировании специальных микроструктур, таких как мембраны, микрорычаги, перекладины, микромостики и т.п.), что позволяет получать уникальную и очень гибкую функциональность. Во многих приложениях

---

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики

<sup>2</sup> Sergio De Nicola, Andrea Finizio, Istituto di Cibernetica del CNR, 'E Caianiello', Italy

<sup>3</sup> Giuseppe Coppola, Istituto per la Microelettronica e i Microsistemi del CNR, Italy

<sup>4</sup> Pietro Ferraro, Istituto Nazionale di Ottica Applicata-Sezione di Napoli, Italy

эти микроструктуры функционируют в сложных режимах. Микроструктуры ведут себя очень различно в отличие от макроструктур, поскольку эффекты атомных и поверхностных взаимодействий, которые обычно пренебрежимо малы для макроструктур, могут иметь в микроструктурах определяющее значение. Создание надежных количественных моделей и технических средств контроля, способных предсказать полное поведение микросистем в процессе изготовления и во время функционирования, представляет актуальную задачу. Иными словами, требуются надежные методы и средства неразрушающего бесконтактного контроля микросистем, которые, с одной стороны, позволили бы избежать дефектов в процессе изготовления и, с другой стороны, обеспечивали бы возможность корректировать режимы функционирования при работе микросистем, в том числе в динамическом режиме.

Бесконтактные оптические методы широко используются при неразрушающем контроле и в оптической метрологии. Наиболее чувствительными и точными являются интерферометрические и голографические методы, которые предоставляют очень мощный инструментальный бесконтактного контроля в процессе изготовления и функциональной отладки микросистем. Методы многоволновой интерферометрии, основанные на анализе картин полос, которые содержат информацию об объекте, объединенные с методами широкопольной микроскопии, обеспечивают высокоточные измерения различных важных характеристик, таких как трехмерный рельеф поверхности, показатель преломления, механические напряжения и локальные смещения поверхности, вызванные внешними механическими и тепловыми нагрузками. В настоящее время различные виды интерферометров успешно используются для упомянутых приложений, однако некоторые недостатки ограничивают их потенциальные возможности.

В наиболее широко применяемых интерферометрах оптическая разность хода (ОРХ) измеряется с привлечением широко известного метода фазового сдвига (см., например, [2, 3]). Метод фазового сдвига требует использования дополнительного оптического элемента, способного обеспечивать высокоточные изменения фазы в одном из плеч интерферометра. Фаза интерференционных полос, и следовательно ОРХ, восстанавливается при цифровой обработке набора данных, включающих по крайней мере три зарегистрированные интерферограммы с известными взаимными фазовыми сдвигами, что затрудняет возможность последовательного анализа данных в реальном времени и представляет один из главных недостатков метода фазового сдвига.

В последние годы получил развитие метод цифровой голографии, позволяющий преодолеть указанный недостаток [4-10]. Цифровая голография основана на записи голограмм в электронной форме при помощи видеокамер на основе приборов с зарядовой связью (видеокамеры ПЗС) или комплементарных структур металл-окисел-полупроводник (видеокамеры КМОП) с последующей количественной реконструкцией амплитуды и фазы измерительной волны. Метод цифровой голографии основывается на регистрации только одного видеокадра, представляющего распределение интенсивности при интерференции отраженной от объекта (или проходящей) измерительной волны с опорной волной. Информация об исследуемом объекте извлекается в результате обработки цифровой голограммы. Техника цифровой голографии может быть эффективно использована для неразрушающего контроля микросистем МЭМС/МОЭМС.

## 1. Принцип цифровой голографии

В процессе записи цифровой голограммы исследуемый трехмерный объект размещается на расстоянии  $d$  от видеокамеры и освещается измерительной волной когерентного источника излучения. Отраженная объектом волна складывается с опорной волной, и интенсивность оптического поля регистрируется при помощи видеокамеры. В результате получают цифровую голограмму, содержащую информацию об объекте.

При реконструкции изображения записанная голограмма  $I(x, y)$  может рассматриваться как пропускающий транспарант, на котором "дифрагирует" виртуальная опорная волна  $R(x, y)$ , задаваемая в виде численной модели. Для получения искомой отраженной объектной волны в цифровой голографии применяется численный расчет распространения оптического поля в форме произведения  $R(x, y) I(x, y)$  от плоскости голограммы  $(x, y)$  до плоскости восстановления изображения объекта  $(\xi, \eta)$ .

Численное восстановление изображения объекта из записанной цифровым образом голограммы проводится в соответствии со скалярной теорией дифракции в приближении Френеля для интеграла дифракции Рэлея-Зоммерфельда [4-10]. При этом восстановленное дифрагированное поле  $Q(\xi, \eta)$  в плоскости изображения  $(\xi, \eta)$  на расстоянии  $d$  от плоскости голограммы может быть представлено в параксиальном приближении следующим образом:

$$Q(\xi, \eta) = \frac{1}{i\lambda d} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(x, y) I(x, y) \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda d} \left[ (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 \right]\right] dx dy, \quad (1.1)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения.

Уравнение (1.1) можно записать в форме, более удобной в вычислительном отношении, через двумерное преобразование Фурье произведения  $R(x, y)I(x, y)w(x, y)$ , где третий сомножитель  $w(x, y)$  представляет функцию изменения фазы,

$$w(x, y) = \frac{1}{i\lambda d} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right]. \quad (1.2)$$

При этом уравнение (1.1) принимает вид

$$Q(\xi, \eta) = \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2)\right] \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(x, y) I(x, y) w(x, y) \exp[-i2\pi(xv_{\xi} + yv_{\eta})] dx dy. \quad (1.3)$$

В уравнении (1.3)  $v_{\xi}$  и  $v_{\eta}$  – пространственные частоты, соответствующие пространственным координатам  $\xi$  и  $\eta$  в плоскости реконструкции, которые связаны с длиной волны  $\lambda$  и расстоянием  $d$  следующими простыми отношениями

$$v_{\xi} = \frac{\xi}{\lambda d}, \quad v_{\eta} = \frac{\eta}{\lambda d}. \quad (1.4)$$

Двумерное дискретное представление голограммы на прямоугольном растре форматом  $N \times M$  точек  $(n, m)$  определяется выражением

$$I(n\Delta x, m\Delta y) = I(x, y) \text{rect}\left(\frac{x}{N\Delta x}, \frac{y}{M\Delta y}\right) \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta(x - n\Delta x, y - m\Delta y), \quad (1.5)$$

где  $\delta(x, y)$  обозначает двумерную дельта-функцию Дирака,  $n, m$  – целые числа, произведение  $N\Delta x \times M\Delta y$  задает область голограммы,  $\text{rect}(x, y)$  – функция прямоугольной формы, равная единице, когда заданная точка лежит внутри области, и нулю в остальных случаях. В уравнении (1.5)  $\Delta x$  и  $\Delta y$  обозначают шаги дискретизации, т. е. расстояния между соседними пикселями видеоматрицы в горизонтальном и вертикальном направлениях (предполагается, что пиксели расположены без зазоров, тогда шаг дискретизации равен размеру пиксела).

При введенных обозначениях алгоритм дискретной реконструкции изображения (1.3) принимает вид

$$Q(r\Delta v_\xi, s\Delta v_\eta) = \exp[i\pi\lambda d(r^2\Delta v_\xi^2 + s^2\Delta v_\eta^2)] \times \\ \times \Delta x \Delta y \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} I(n\Delta x, m\Delta y) R(n\Delta x, m\Delta y) w(n\Delta x, m\Delta y) \times \quad (1.6) \\ \times \exp\left[-i2\pi\left(\frac{rn}{N} + \frac{sm}{M}\right)\right].$$

Соотношение (1.6) позволяет вычислять матрицу комплексных чисел форматом  $N \times M$ , представляющую восстановленное поле, при помощи алгоритма дискретного двумерного быстрого преобразования Фурье (БПФ). Согласно известным свойствам дискретного преобразования Фурье, интервалы дискретизации по частоте определяются как  $\Delta v_\xi = 1/N\Delta x$  и  $\Delta v_\eta = 1/M\Delta y$ , и размеры пикселей в плоскости реконструкции изображения равны  $\Delta\xi \times \Delta\eta = \lambda d/N\Delta x \times \lambda d/M\Delta y$ .

## 2. Особенности записи и реконструкции изображений в цифровой голографии

Процесс дискретизации оптического поля при записи цифровой голограммы должен удовлетворять условиям теоремы отсчетов Котельникова-Шеннона, чтобы обеспечить возможность точной реконструкции изображения объекта. В частности, значения интенсивности в пределах шага полос интерференционной картины должны быть зарегистрированы по крайней мере двумя пикселями видеокамеры.

Заметим, что в приближении Френеля-Кирхгофа реконструкция голограммы с размерами  $M\Delta x \times N\Delta y$  представляет реконструированное изображение с иными размерами  $M\Delta\xi \times N\Delta\eta$ . Следовательно, результаты реконструкции зависят от характеристик используемой ПЗС или КМОП видеокамеры: числа пикселей и размера пикселей, а также от длины волны лазерного источника и расстояния реконструкции  $d$ . Кроме этого, использование при вычислениях интеграла Френеля-Кирхгофа ограничивает достигаемое разрешение, причем это ограничение оказывается особенно серьезным, когда пытаются получить лучшее разрешение, подобно повышению разрешения в микроскопии, где абберации, внесенные объективом микроскопа и другими оптическими элементами являются неизбежными, и составляющие с высокими пространственными частотами дифрагируют под большими углами. При этих условиях интеграл Френеля-Кирхгофа может составлять основу алгоритма для численной реконструкции изображений, однако требуется

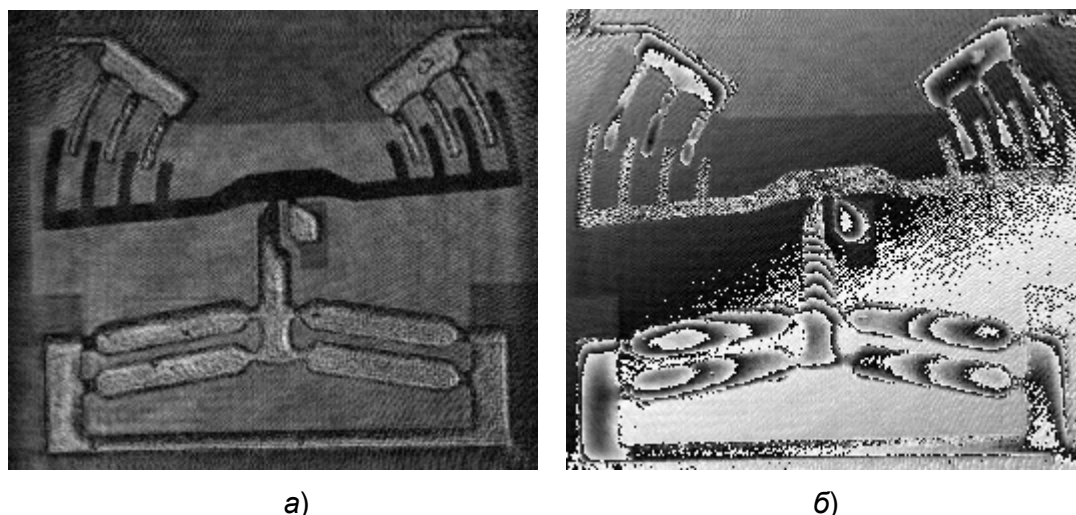
использовать важное преимущество цифровой голографии, заключающееся в возможности управлять фазой восстановленного изображения, чтобы удалить и/или компенсировать нежелательные отклонения волнового фронта [8, 28-32].

Возможность получать в цифровой форме значения восстановленного комплексного оптического поля позволяет одновременно определять интенсивность и распределение фазы поля. В случае контроля характеристик МЭМС/МОЭМС цифровая обработка голограмм, зарегистрированных при отражении измерительной волны от объекта, обеспечивает восстановление значений фазы  $\varphi(n, m)$  комплексного поля  $Q(n, m)$  и соответствующего рельефа поверхности  $h(n, m)$  из следующего простого соотношения

$$h(n, m) = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi(n, m) = \frac{\lambda}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}[Q(n, m)]}{\operatorname{Re}[Q(n, m)]}, \quad (2.1)$$

где  $\operatorname{Im}$  и  $\operatorname{Re}$  – мнимая и действительная часть восстановленного оптического поля, соответственно.

На рис. 1 показан пример реконструкции амплитуды и фазы поля, характеризующего исследуемый элемент МЭМС [22]. Сравнение рис. 1, а-б наглядно иллюстрирует дополнительную информацию об объекте, содержащуюся в полученных значениях фазы.



**Рис. 1.** Пример микроструктуры МЭМС: амплитудное изображение (а) и значения приведенной фазы  $\varphi(n, m)$  (б)

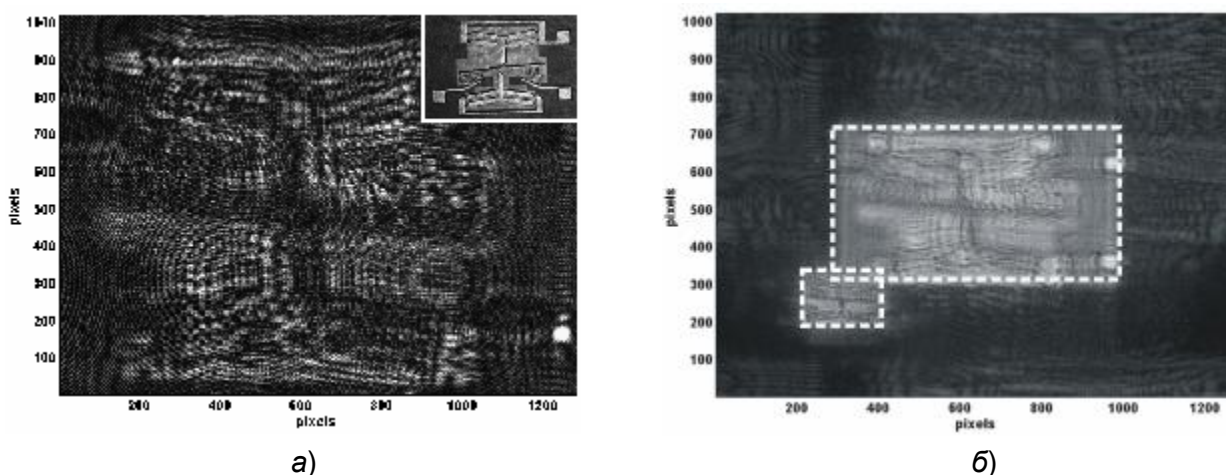
Поскольку распределение фазы в (2.1) вычисляется через функцию арктангенса, значения восстановленной фазы находятся (с учетом знаков числителя и знаменателя в (2.1)) в интервале  $[-\pi, \pi]$ , т. е. распределение фазы "свернуто" в этот диапазон в виде разрывной функции, если

отклонения рельефа превышают  $\lambda/2$ . Для разрешения неоднозначности восстановления значений полной фазы, соответствующей отклонениям рельефа, превышающим  $\lambda/2$ , используются специальные методы развертывания фазы (см., например, [17-21]).

Возможность обрабатывать в цифровой форме восстановленный рельеф  $h(n,m)$  позволяет сравнивать характеристики поверхности в двух различных рабочих состояниях микросистемы. Иными словами, если  $Q_1(n,m)$  и  $Q_2(n,m)$  – значения восстановленного комплексного волнового поля, полученные из двух голограмм, которые зарегистрированы в двух различных состояниях объекта, то изменения фазы  $\Delta\varphi_{1-2} = \varphi_1 - \varphi_2$ , и соответствующие изменения профиля поверхности  $\Delta h_{1-2}$  вычисляются как [23-27]:

$$\begin{aligned} \Delta h_{1-2}(m,n) &= \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi_{1-2}(m,n) = \\ &= \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\operatorname{Re}[Q_2(m,n)]\operatorname{Im}[Q_1(m,n)] - \operatorname{Im}[Q_2(m,n)]\operatorname{Re}[Q_1(m,n)]}{\operatorname{Re}[Q_2(m,n)]\operatorname{Re}[Q_1(m,n)] + \operatorname{Im}[Q_2(m,n)]\operatorname{Im}[Q_1(m,n)]}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

На рис. 2, а показан пример голограммы микроэлемента, изготовленного при использовании специальной технологии микрообработки. Изображение исследуемой микроструктуры выделено в виде вставки на рис. 2, а.



**Рис. 2.** Зарегистрированная цифровая голограмма (форматом 1024×1280 пикселей) микроэлемента, изображение которого отмечено на вставке (а) и три составляющие, полученные в процессе реконструкции при использовании внеосевой схемы записи (б). Выделенный на рисунке (б) малый светлый прямоугольник представляет область искомого мнимого изображения, большой прямоугольник – область действительного изображения, неравномерная фоновая составляющая (нулевой порядок дифракции) распределена по всему полю изображения

Восстановленное изображение представлено на рис. 2, б и содержит три компонента: нулевой порядок дифракции, или фоновую составляющую, распределенную на всем поле восстановленных значений амплитуды, мнимое изображение, представляющее точную копию волнового фронта объектной волны, и действительное изображение, соответствующее сопряженному изображению (или "изображению двойнику"). Эти три составляющие накладываются, если опорная и объектная волны коллинеарны (в схеме осевой записи голограммы).

Известны несколько методов устранения неинформативной фоновой составляющей и изображения-двойника для извлечения только мнимого изображения, характеризующего исследуемый объект (см., например, [11-16]). Многие из этих методов требуют регистрации и обработки более чем одной голограммы. Как отмечалось выше, это может быть серьезным недостатком при контроле динамических характеристик МЭМС/МОЭМС в реальном времени.

Альтернативный подход основывается на введении небольшого угла между направлениями распространения объектной и опорной волн в схеме внеосевой записи голограмм. При этом три составляющие при дифракции распространяются вдоль различных направлений и, как видно из рис. 2, б, могут быть разделены (офигурованы) в пространственной области реконструкции изображения.

### **3. Методики бесконтактного контроля МЭМС**

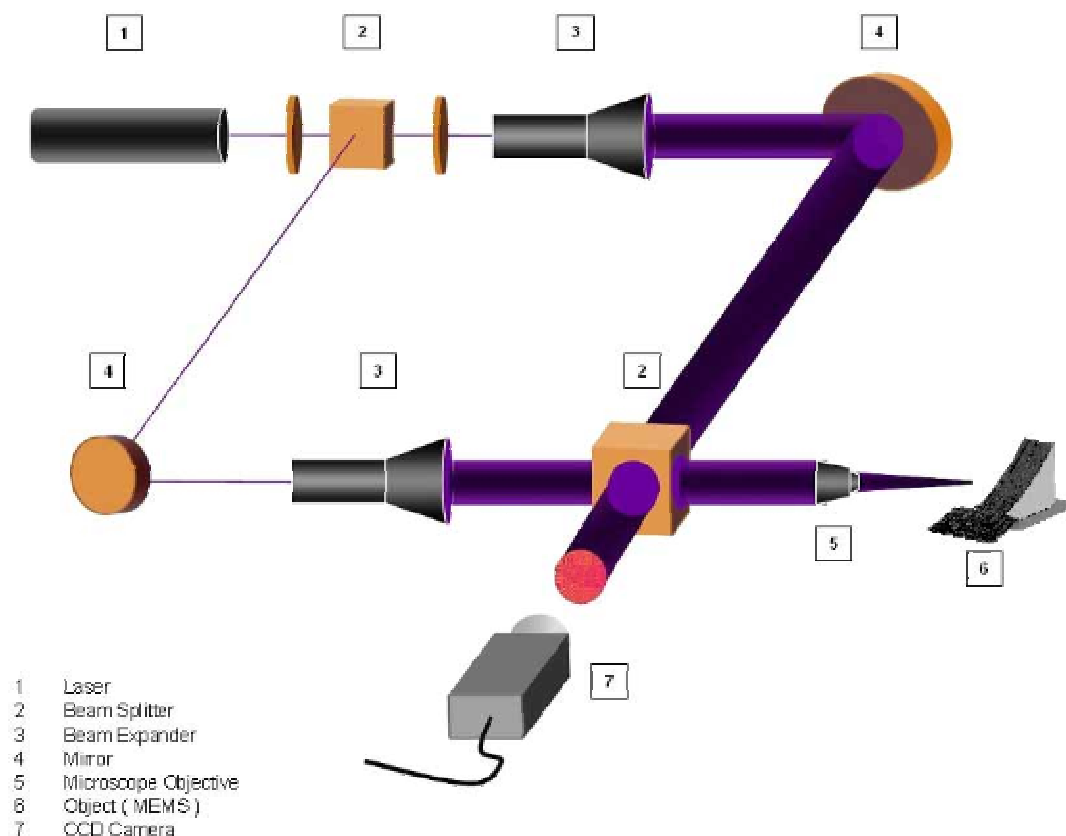
В предыдущем разделе рассмотрены операции восстановления распределения фазы волнового поля объекта с получением количественного отображения значений фазы изображений в когерентной микроскопии. Следовательно, цифровая голография с восстановлением распределения фазы может непосредственно использоваться в метрологических приложениях и, в частности, для количественной оценки микроструктуры и морфологии поверхности в технологии МЭМС/МОЭМС.

Отметим, что в настоящее время доступны другие интерферометрические методы трехмерного отображения объектов, позволяющие измерять малые смещения и профиль поверхности. Методы голографической интерферометрии, проекции полос, спекл-интерферометрии обеспечивают бесконтактное получение полной информации о координатах, деформациях, напряжениях, колебаниях исследуемых поверхностей. Однако многие из этих методов не позволяют обеспечить компенсацию влияния оптических аберраций и/или прямое определение полного трехмерного отображения объекта через вычисление сложного волнового фронта при записи единственного видеокadra



[23-25, 31]. Методы цифровой голографии, основанные на записи одного видеокadra с последующей реконструкцией волнового поля объекта, имеют преимущество, которое заключается в сокращении требуемого времени регистрации данных и снижении влияния внешних дестабилизирующих факторов, таких как изменения температуры, давления, механическая нестабильность.

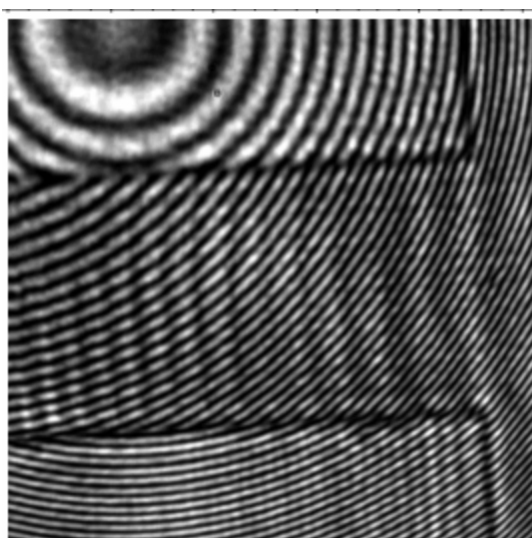
На рис. 3 показана схема экспериментальной голографической установки для записи цифровых голограмм МЭМС с различной геометрией и формой микроэлементов, таких как перемычки микрорычагов, мембраны, микромостики и др. Установка относится к оптическим системам, работающим в режиме отражения измерительной волны от объекта, однако может быть легко модифицирована применительно к контролю характеристик прозрачных объектов.



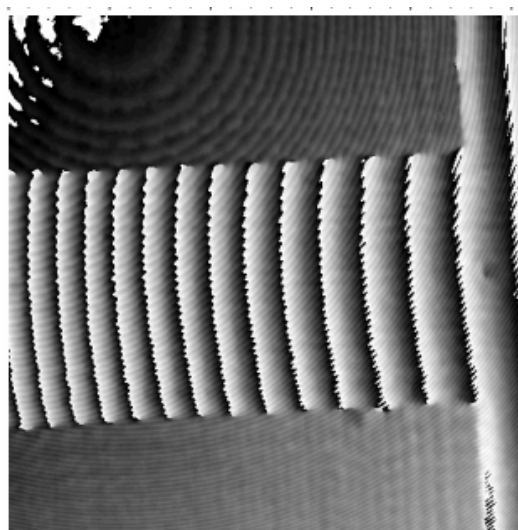
**Рис. 3.** Схема установки для записи цифровых голограмм: 1 – лазер; 2 – светоделитель; 3 – расширители пучка; 4 – поворотные зеркала; 5 – микрообъектив; 6 – исследуемый объект (МЭМС); 7 – видеокамера

Установка представляет собой интерферометр Маха-Цендера, в котором первый светоделитель используется для формирования объектной и опорной волн из монохроматического когерентного излучения источника с длиной волны  $\lambda$ . Обе волны должны иметь одинаковую поляризацию для

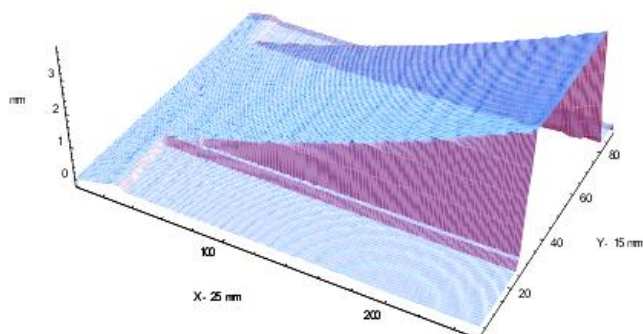
получения наибольшего контраста интерференционных полос в записанной голограмме. Голограмма формируется при помощи второго светоделителя, на выходе которого происходит сложение опорной волны с волной, отраженной от поверхности МЭМС. Кроме этого, второй светоделитель позволяет устанавливать требуемый малый угол между направлениями распространения объектной и опорной волн в режиме записи внеосевых голограмм. Установка использовалась, например, для формирования и регистрации голограммы, показанной на рис. 4, *a*, при решении задачи бесконтактного контроля геометрических характеристик кремниевых микрорычагов (кантиверов).



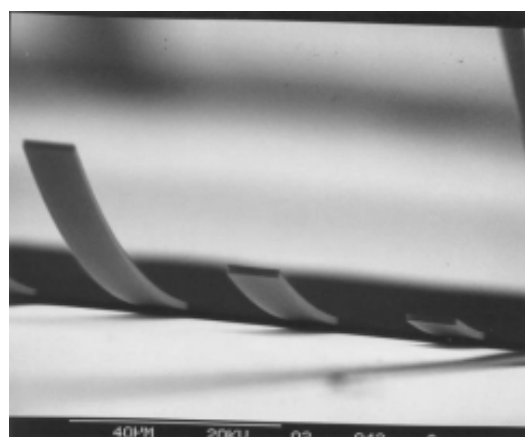
*a)*



*b)*



*в)*



*г)*

**Рис. 4.** Голограмма кремниевого кантивера (*a*), восстановленные значения приведенной фазы (*b*), результат количественного восстановления геометрической формы (*в*) и изображение микрорычагов МЭМС, полученное при помощи сканирующего электронного микроскопа (*г*)

На голограмме можно заметить круговые полосы, обусловленные переналожением параболического отклонения волнового фронта при распространении объектной волны, отклонений волнового фронта, внесенных собственно исследуемым объектом и плоской опорной волны. Параболический фазовый множитель учитывает, в частности, искривление волнового фронта, вносимое оптической линзой (обычно объективом микроскопа), устанавливаемой между объектом и видеокамерой. Очевидно, что влияние этих отклонений волнового фронта должно быть устранено, чтобы получить точную реконструкцию профиля поверхности исследуемого объекта.

Можно использовать различные подходы, чтобы устранить влияние параболического отклонения фазы в плоскости восстановленного изображения [27-33]. При этом обычно требуется наличие достаточно широких плоских областей с зеркальным отражением на поверхности МЭМС, чтобы определить и компенсировать параболическое искривление волнового фронта, вносимое оптической системой.

Пример устранения влияния параболического отклонения волнового фронта и восстановления значений фазы, характеризующих исследуемый объект, показан на рис. 4, б. Отклонения фазы  $\varphi(n,m)$  на рис. 4, б построены относительно фазы голограммы рис. 4, а для расстояния до плоскости реконструкции  $d = 100$  мм. На рис. 4, в иллюстрируется восстановленная геометрическая морфология исследуемого элемента МЭМС.

### 3.1. Контроль характеристик МЭМС в квазистационарном режиме

Как было показано в предыдущих примерах, амплитудные изображения восстанавливаются хорошо сфокусированными. Очевидно, что эти изображения могут быть получены при точном знании различных параметров, таких как фокусное расстояние объектива микроскопа, расстояние между объектом и объективом микроскопа и расстояние между плоскостью голограммы и объективом микроскопа.

В ряде случаев может быть затруднительно предварительно измерить некоторые из этих параметров. Цифровая голография обеспечивает возможность осуществить численную реконструкцию без точного априорного знания всех перечисленных параметров. В частности, реконструкцию изображений можно выполнить для различных значений расстояния  $d$  до плоскости реконструкции при визуальной оценке качества фокусировки изображения по аналогии с механическим перемещением объектива микроскопа в традиционной микроскопии. Однако если для некоторого объекта требуется дополнительное увеличение размера

изображения некоторых областей, то в установке рис. 3 должны использоваться сменные микробиообъективы с различным увеличением.

Известно, что чем выше степень увеличения  $\mu$  объектива, тем меньше глубина фокусировки. Следовательно, если образец испытывает даже очень малые смещения  $\delta$  вдоль оптической оси (например, из-за эффекта теплового расширения), то происходит очень большое изменение  $\Delta d = -\mu^2 \delta$  расстояния до плоскости изображения, и изображение может быть зарегистрировано расфокусированным. При этом требуемое амплитудное изображение в плоскости фокусировки и/или изображение фазового контраста могут быть получены при соответствующем изменении расстояния реконструкции  $d$  в численном расчете с учетом поправки  $\Delta d$ . Уточнение расстояния до плоскости реконструкции может быть выполнено автоматически, что позволяет проводить контроль динамических характеристик МЭМС.

Поскольку осевое смещение  $\delta$  вызывает изменение фазы  $\Delta\varphi = 4\pi\delta/\lambda$ , в зарегистрированной интерференционной картине, представляющей голограмму, оказывается возможным контролировать изменение фазы на плоском участке поверхности МЭМС, чтобы определить смещение  $\Delta d$ . Таким образом, при уточнении расстояния реконструкции  $d$  возможно точное восстановление значений амплитуды и фазы изображения объекта. Отметим, что рассмотренная методика дает хорошие результаты, если смещение микроструктуры является медленным по сравнению с частотой кадров видеокамеры.

Если обозначить начальное расстояние между объектом и плоскостью видеокамеры как  $d_0$ , то уточненное расстояние реконструкции  $d'(t_i)$  для каждой голограммы, зарегистрированной в момент  $t_i$ , может быть рассчитано согласно следующему соотношению:

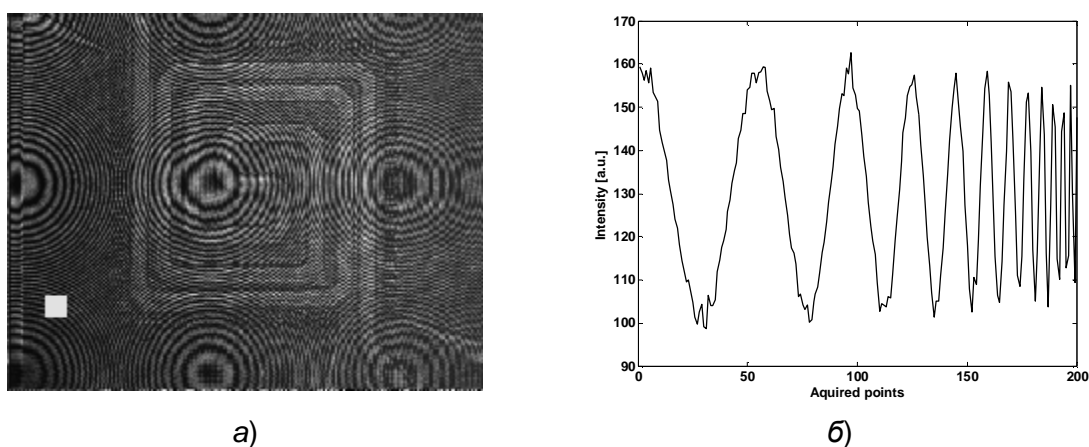
$$d'(t_i) = d_0 + \Delta d(t_i) = d_0 - \mu^2 \delta(t_i) = d_0 - \mu^2 \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi(t_i), \quad (3.1)$$

где значения  $t_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , определяются установленной частотой кадров видеокамеры.

На рис. 5, а показан пример амплитудного изображения, численно реконструированного из записанной голограммы микронагревателя. Микронагреватель представляет собой резистор, который размещен поверх мембраны, изготовленной с использованием специальной технологии микрообработки [35, 36]. В этой структуре требуемые значения температуры устанавливаются за счет управления током через резистор в соответствии с эффектом Джоуля, причем тепловой поток распространяется главным образом над резистором. В рабочем режиме температура может достигать примерно  $700^\circ\text{C}$ , и изменение температуры

вызывает деформацию не только самой структуры, но и механической подложки. Для того, чтобы выполнить диагностику микронагревателя в режиме реального времени, требуется измерять изменение фазы объектной волны, вызванное тепловым расширением микроструктуры.

На рис. 5, б приведен пример интерференционного сигнала, обусловленного изменениями фазы объектной волны на плоском участке поверхности, отмеченном на рис. 5, а небольшим светлым квадратом. Этот сигнал может быть получен при высокой частоте видеокадров, поскольку интересующий участок включает лишь небольшое число пикселей.



**Рис. 5.** Амплитудное изображение микронагревателя, полученное из цифровой голограммы (а) и интерферометрический сигнал, зарегистрированный на плоском участке, отмеченном в виде светлого квадрата на рис. 5, а и связанный с изменением фазы интерференционных полос (б)

В результате обработки сигнала рис. 5, б (например, при использовании известного алгоритма восстановления фазы аналитического сигнала с использованием преобразования Фурье), несложно вычислить изменение фазы  $\Delta\phi$  с последующей подстановкой в формулу (3.1), что позволяет найти правильные значения расстояния реконструкции  $d'(t_i)$  для каждой из голограмм и, следовательно, обеспечить восстановление сфокусированного амплитудного изображения и распределения фазы, характеризующего МЭМС.

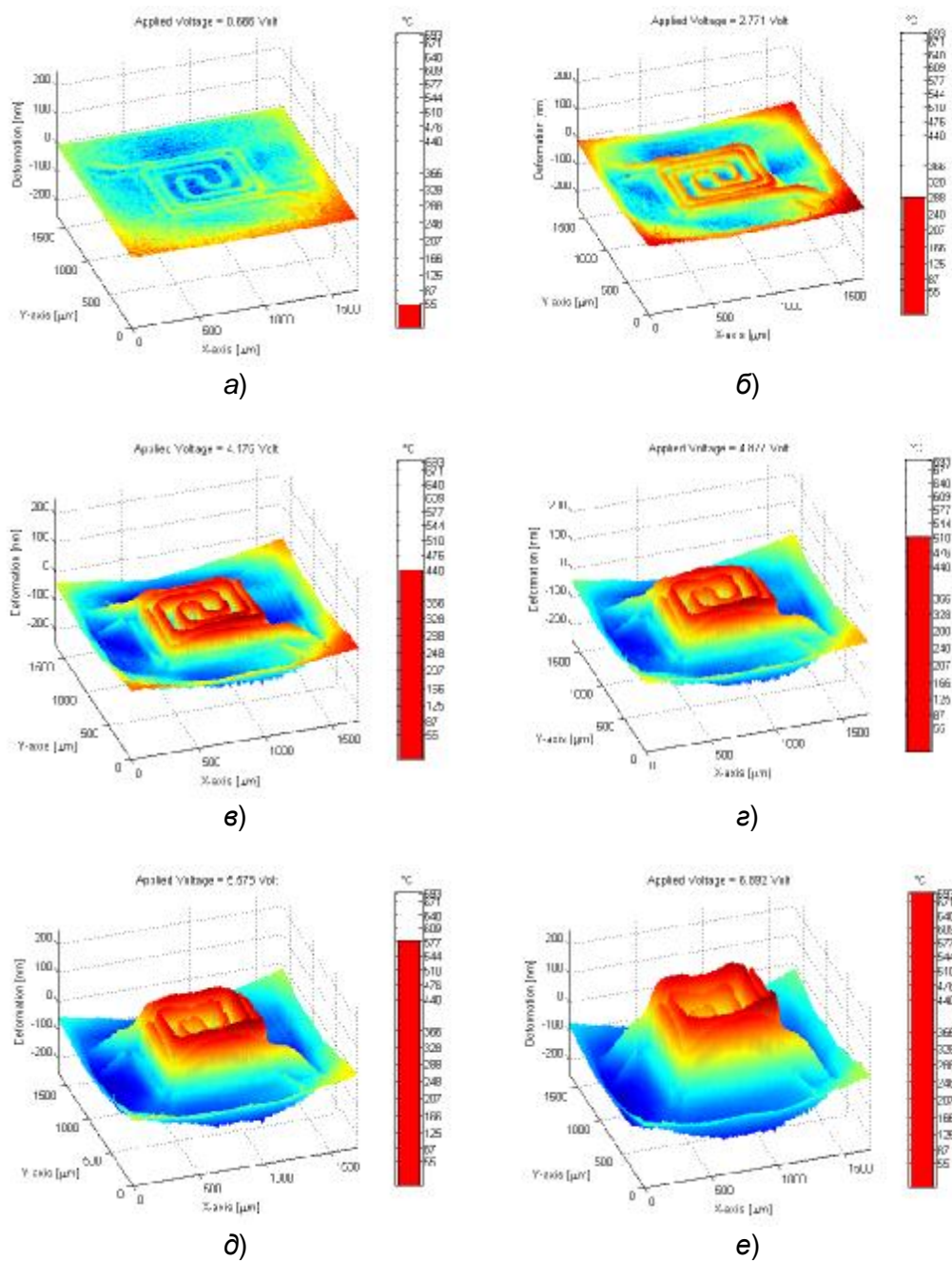
Критерий оценки качества восстановленных изображений может быть определен на основе вычисления энтропии изображения согласно следующему выражению [38]

$$H(d(t_i)) = - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{I(d(t_i); n, m)}{E(d(t_i))} \log_2 \left[ \frac{I(d(t_i); n, m)}{E(d(t_i))} \right], \quad (3.2)$$

где

$$E(d(t_i)) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I(d(t_i);n,m), \quad (3.3)$$

$I(d(t_i);n,m)$  – интенсивность в пикселе  $(n,m)$  изображения, восстановленного на расстоянии  $d(t_i)$ . Энтропия  $H(d(t_i))$  достигает минимума для сфокусированного изображения.



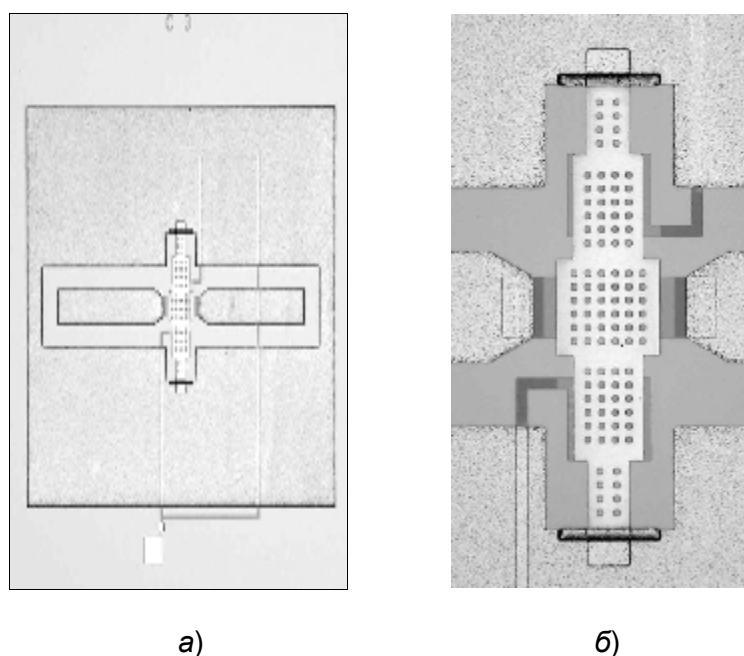
**Рис. 6.** Восстановление эволюции трехмерной деформации мембраны МЭМС с микронагревателем при обработке последовательности цифровых голограмм

Таким образом, применяя процедуру контроля фокусировки, можно получить последовательность восстановленных сфокусированных изображений в автоматическом режиме, как иллюстрируется на рис. 6. На рисунке ясно видны деформации мембраны, на которой нанесен микронагреватель, с увеличением температуры. Восстановленные карты деформаций, показанные на рис. 6, являются трехмерным представлением деформации на всей поверхности микронагревателя.

### 3.2. Контроль характеристик МЭМС в динамическом режиме

Деформации поверхности вследствие изменения температуры в рассмотренной выше МЭМС являются медленными, поскольку обусловлены инерционными тепловыми эффектами. Однако метод может быть применен также для контроля МЭМС, построенных на основе быстрых изменений профиля поверхности.

Наглядный пример представляет МЭМС, функционирующая в микроволновом диапазоне частот в качестве выключателя шунта для копланарного волновода (см. рис. 7). На рис. 7, б показан контролируемый движущийся микроэлемент (микромостик) в увеличенном масштабе.



**Рис. 7.** Пример структуры МЭМС для радиочастотного диапазона: выключатель шунта для копланарного волновода (а) и детали подвижного микромостика (б)

Когда требуемое напряжение постоянного тока прикладывается между микромостиком, изготовленным из золота, и копланарным волноводом, мостик испытывает воздействие электростатической силы и



опускается на плоскость волновода (выключенное состояние). При снятии приложенного напряжения электростатическая сила исчезает, и мостик возвращается к начальному положению и включает волновод [40-41].

Рассмотренный выше метод цифровой голографии был применен для контроля геометрических характеристик микромостика: вертикального перемещения и формы поверхности в рабочем режиме. Для этого к МЭМС прикладывали линейно нарастающее электрическое напряжение и записывали серию голограмм. Для записи голограмм использовалась специальная быстродействующая КМОП видеокамера с высокой частотой кадров (500 кадров/с).

На рис. 8 показаны примеры реконструкции положения и формы поверхности при обработке трех зарегистрированных голограмм с восстановлением фазы и профиля поверхности элемента МЭМС.

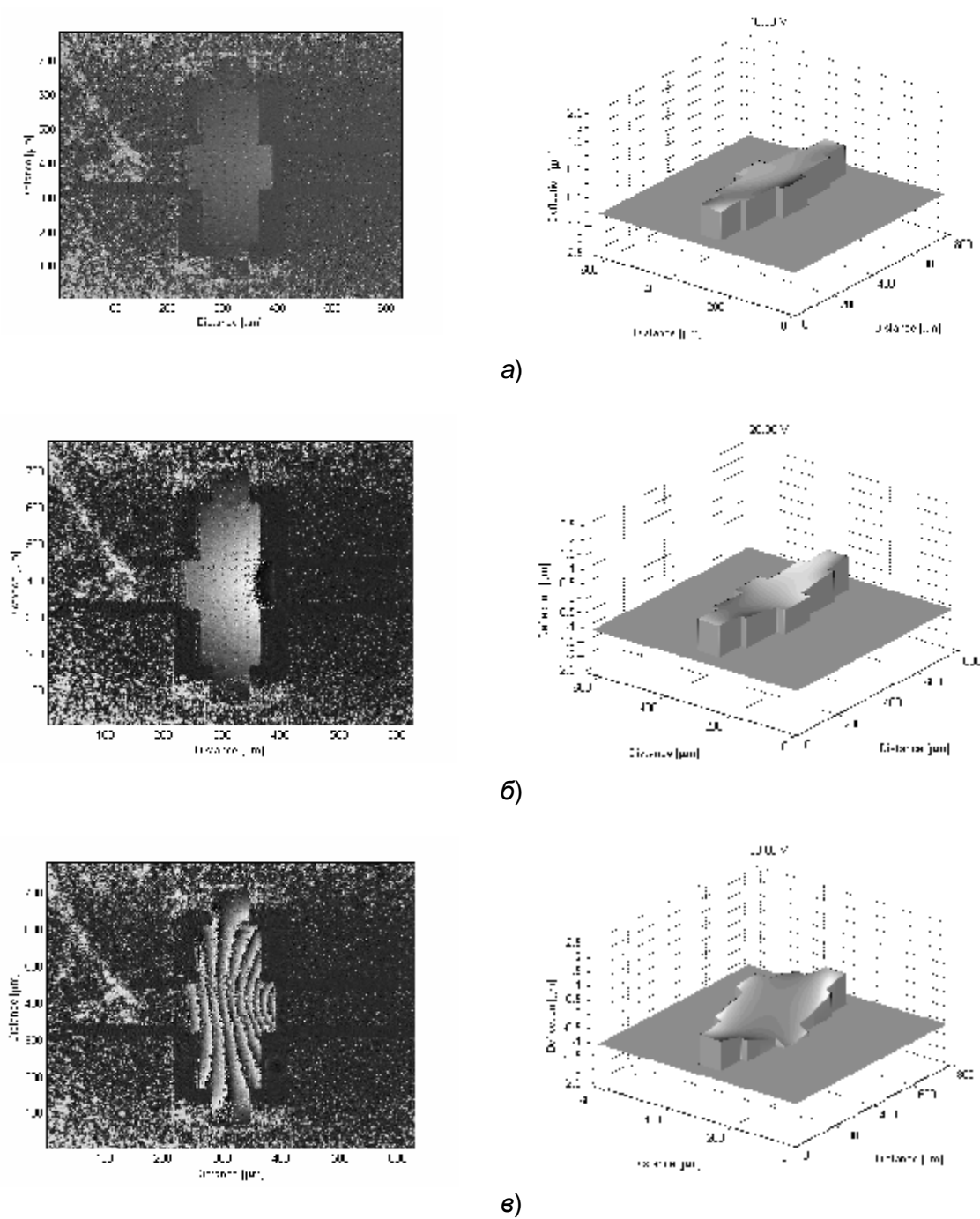
Полученные результаты представляют значительный интерес при совершенствовании технологии МЭМС, поскольку в процессе исследования МЭМС была выявлена асимметрия в деформации формы микромостика. Такие отклонения формы сложно контролировать иными методами, такими как построение эквивалентной модели электрической цепи.

## **Заключение**

Цифровая голография основывается на фундаментальных принципах когерентной оптики и современных достижениях электронной техники и компьютерных технологий. При этом предоставляются широкие возможности для исследования различных объектов оптическими методами с разрешающей способностью, определяемой малой длиной волны оптического излучения, характеристиками оптической системы и регистрирующей системы на основе многоэлементных приемников излучения.

Методы цифровой голографии могут быть эффективно использованы для анализа с высокой точностью геометрических характеристик МЭМС/МОЭМС с получением трехмерной реконструкции топографии поверхности микроструктур. При этом удастся выявить недостатки технологии изготовления МЭМС/МОЭМС, количественно оценить влияние эффектов механических напряжений, граничных условий и других факторов, определяющих механические режимы МЭМС в процессе функционирования.





**Рис. 7.** Восстановленные отклонения фазы и соответствующее трехмерное представление поверхности приводимого в действие микроустройства при трех различных значениях приложенного напряжения: 10 В (а), 20 В (б) и 30 В (в)

Поскольку голограмма закодирована в цифровой форме, возможно определение интенсивности отраженного излучения и управление фазой восстановленного волнового фронта. Это позволяет компенсировать влияние различных видов aberrаций и устанавливать расстояние до плоскости реконструкции изображения в автоматическом режиме фокусировки.

## Благодарности

Авторы выражают признательность С. Магро и Г. Е. Спото, сотрудникам группы Оптоэлектроники, био- и наносистем СТМикроэлектроникс, Катания (Италия), Р. Массagnani и R. Marcelli, сотрудникам Института микроэлектроники и микросистем, за предоставленную возможность использования экспериментальных образцов МЭМС.

## Список литературы

1. *Microsystem design /S.D. Senturia*, ed. London: Kluwer–Academic, 2001.
2. *Брунинг Дж.Х.* Интерферометры со сканированием интерференционных полос. В кн.: Оптический производственный контроль /Под ред. *Д. Малакары.* М.: Машиностроение, 1985. С. 321-345.
3. *Васильев В.Н., Гуров И.П.* Компьютерная обработка сигналов в приложении к интерферометрическим системам. СПб: БХВ–Санкт-Петербург, 1998. С. 153-167.
4. *Schnars U., Jueptner W.* Digital Holography. Digital hologram recording, numerical reconstruction, and related techniques. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
5. *Балтийский С.А., Гуров И.П., Де Никола С., Коппола Д., Ферраро П.* Современные методы цифровой голографии. В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики /Под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 91-117.
6. *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982.
7. *Rastogi P.K.* Holographic interferometry. Berlin: Springer-Verlag, 1994.
8. *Kreis T.M., and Jüptner W.P.O.* Principles of digital holography. In: Proc. Fringe'97 /Jüptner W.P.O., and Osten W., eds. Berlin: Academic Verlag, 1997. P. 353-363.
9. *Ferraro P., De Nicola S., Coppola G.* In: Controlling image reconstruction process in digital holography /B. Javidi, ed. New York: Springer, 2006.
10. *Ferraro P., De Nicola S., Coppola G.* In: Digital holography and three-dimensional display: principles and applications /T.C. Poon, ed. New York: Springer, 2006.
11. *Kreis T.M. and Jüptner W.P.O.* Suppression of the DC term in digital holography //Opt. Eng. 1997. V. 36. P. 2357-2360.
12. *Takaki Y., Kawai H., and Ohzu H.* Hybrid holographic microscopy free of conjugate and zero-order images //Appl. Opt. 1999. V. 38. P. 4990-4996.
13. *Yamaguchi I. and Zhang T.* Phase-shifting digital holography //Opt. Lett. 1997. V. 22. P. 1268-1270.
14. *Lai S., King B. and Neifeld M.A.* Wave front reconstruction by means of phase-shifting digital in-line holography //Opt. Commun. 2000. V. 173. P. 155–160
15. *Cuche E., Marquet P., and Depeursinge C.* Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography //Appl. Opt. 2000. V. 39. P. 4070-4075.
16. *Liu C., Li Y., Cheng X., Liu Z., Bo F., and Zhu J.* Elimination of zero-order diffraction in digital holography //Opt. Eng. 2002. V. 41. P. 2434-2437.
17. *Schnars U. and Juptner W.* Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction //Appl. Opt. 1994. V. 33. P. 179-181.
18. Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software /D.C. Ghiglia and M.D. Pritt, eds. New York: Wiley, 1998.
19. *Hung K.M. and Yamada T.* Phase unwrapping by regions using least-squares approach //Opt. Eng. 1998. V. 37. P. 2965-2970.

20. Baldi A. Two-dimensional phase unwrapping by quad-tree decomposition //Appl. Opt. 2001. V. 40. P. 1187-1194.
21. Aiello L., Riccio D., Ferraro P., Grilli S., Sansone L., Coppola G., De Nicola S., Finizio A. Green's formulation for robust phase unwrapping in digital holography //Opt. Lasers Eng. 2007. V. 45. P.750-755.
22. Baltiysky S., Gurov I., De Nicola S., Ferraro P., Finizio A., Coppola G. Characterization of microelectromechanical systems by digital holography method //Imag. Sci. J. 2006. V. 54. P. 103-110.
23. Lei X., Xiaoyuan P., Asundi A.K., Jianmin M. Hybrid holographic microscope for interferometric measurement of microstructures //Opt. Eng. 2001. V. 40. P. 2533-2540.
24. Lei X., Xiaoyuan P., Jianmin M., Asundi A.K. Studies of digital microscopic holography with applications to microstructure testing //Appl. Opt. 2001. V. 40. P. 5046-5051.
25. Seebacker S., Osten W., Baumbach T., Juptner W. The determination of material parameters of microcomponents using digital holography //Opt. Lasers Eng. 2001. V. 36. P. 103-126.
26. Nilsson B., and Carlsson T. Simultaneous measurement of shape and deformation using digital light-in-flight recording by holography //Opt. Eng. 2000. V. 39. P. 244-253.
27. Osten W., Baumbach T., and Juptner W. Comparative digital holography //Opt. Lett. 2002. V. 27. P. 1764-1766.
28. Stadelmaier A. and Massig J. H. Compensation of lens aberrations in digital holography //Opt. Lett. 2000. V. 25. P. 1630-1632.
29. Pedrini G., Schedin S., and Tiziani H.J. Aberration compensation in digital holographic reconstruction of microscopic objects //J. Mod. Opt. 2001. V. 48. P. 1035 – 1041.
30. De Nicola S., Ferraro P., Finizio A., and Pierattini G. Wave front reconstruction of Fresnel off-axis holograms with compensation of aberrations by means of phase-shifting digital holography //Opt. Lasers Eng. 2002. V. 37. P. 331-340.
31. Grilli S., Ferraro P., De Nicola S., Finizio A., Pierattini G., and Meucci R. Whole optical wavefields reconstruction by digital holography //Opt. Expr. 2001. V. 9. P. 294-302.
32. De Nicola S., Ferraro P., Finizio A., and Pierattini G. Correct-image reconstruction in the presence of severe anamorphism by means of digital holography //Opt. Lett. 2001. V. 26. P. 974-976.
33. Cuche E., Marquet P., and Depeursinge C. Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms //Appl. Opt. 1999. V. 38. P. 6994-7001.
34. Ferraro P., De Nicola S., Finizio A., Coppola G., Grilli S., Magro C., Pierattini G. Compensation of the inherent wave front curvature in digital holographic coherent microscopy for quantitative phase-contrast imaging //Appl. Opt. 2003. V. 42. P. 1938-1946.
35. Chung G.S. Fabrication and characterization of micro-heaters with low-power consumption using SOI membrane and trench structures //Sens. Actuators A, Phys. 2004. V. 112. P. 55-60.
36. Dori L., Maccagnani P., Cardinali G.C., Fiorini M., Sarago I., Guerri S., Rizzoli R., and Sberveglieri G. In: Proc. 11th Eurosensors Conf., Warsaw, Poland. 1997. V. 1. P. 289.
37. Coppola G., Striano V., Ferraro P., De Nicola S., Finizio A., Pierattini G., and Maccagnani P. A nondestructive dynamic characterization of a microheater through digital holographic microscopy //J. Microelectromechanical Syst. 2007. V. 16. P. 659-667.
38. Shannon C.E. A mathematical theory of communication //Bell Syst. Tech. J. 1948. V. 27. P. 379-423.

39. *Striano V., Coppola G., Ferraro P., Alfieri D., De Nicola S., Pierattini G., Finizio A., Marcelli R., Maccagnani P.* In: *Fibres and optical passive components*, IEEE/LEOS Conf. Proc. 2005. P. 97.
40. *RF MEMS: theory, design and technology /G.M.Rebeiz, ed.* Hoboken: Wiley Interscience, 2003.
41. *Marcelli R., Bartolucci G., Minucci G., Margesin B., Giacomozzi F., and Vitulli F.,* Lumped element modelling of coplanar series RF MEMS switches //Electr. Lett. 2004. V. 40. P. 1272- 1274.
42. *Мерцц Л.* Интегральные преобразования в оптике. М.: Мир, 1969.
43. *Ferraro P., Grilli S., Alfieri D., De Nicola S., Finizio A., Pierattini G., Javidi B., Coppola G., Striano V.* Extended focused image in microscopy by digital Holography //Opt. Expr. 2005. V. 13. P. 6738-6749.