

# Голографический интерферометр для определения деформационных полей перемещений в изделиях микроэлектроники

**В последние годы широкое и эффективное применение получила голографическая интерферометрия с использованием лазера, дающего световые волны с высокой степенью когерентности.**

**Леонид Борыняк,  
д. ф.-м. н., профессор**

**Юрий Непочатов**

nepandrey@yandex.ru

## Введение

Данный метод является совокупностью оптических измерений с характерным масштабом, равным длине световой волны. В его основе лежит явление интерференции двух когерентных волн, когда одна волна обусловлена исходным, невозмущенным состоянием объекта, а вторая — измененным. По полученной интерференционной картине полос можно определить количественные характеристики исследуемого объекта. Два состояния относятся к разным моментам времени, но их можно восстановить одновременно, если они записаны на одну голограмму методом двух экспозиций. Голографическая интерферометрия сравнивает два отличающихся состояния объекта и поэтому является дифференциальным методом. Отсюда следует, что физические факторы, одинаково действующие на обе когерентные волны, не оказывают влияния на интерференционную картину. В результате метод мало чувствителен к дефектам неизменных элементов, используемых в оптической схеме. Для практического применения интерферометрии достаточна теория интерференционных полос, основанная на геометрическом подходе, когда расчетные формулы выводятся в рамках геометрической оптики.

## Постановка задачи

В настоящее время широкое распространение имеют гибридные интегральные схемы (ГИС) СВЧ диапазона, представляющие собой сочетание пленочных и навесных элементов на диэлектрической подложке, прикрепленной к металлическому основанию, расположенному в герметичном корпусе.

Основой конструкции ГИС СВЧ является диэлектрическая подложка (аморфная, поликристаллическая или монокристаллическая), на которой размещаются пленочные пассивные и навесные активные и пассивные элементы. Подложка обеспечивает не только размещение этих элементов, но и сама является функциональной частью ГИС СВЧ, так как величина емкостных и индуктивных связей и гео-

метрических размеров микрополосковых линий определяются диэлектрической постоянной материала и толщиной подложки. Для получения пленочных элементов на отполированные диэлектрические подложки осаждают в вакууме проводящие и резистивные слои, из которых методом фотолитографии формируют многослойную металлизационную систему ГИС СВЧ.

Технологический процесс изготовления ГИС СВЧ состоит из нескольких основных этапов:

- а) подготовки диэлектрической подложки;
- б) последовательного формирования на подложке слоев резисторов, контактных площадок, проводников, защитных слоев;
- в) лазерной подгонки по номиналам тонкопленочных резисторов;
- г) ультразвукового или лазерного сверления отверстий или выполнения углублений в подложке;
- д) установки навесных компонентов схемы с использованием микросварки и пайки;
- е) пайки диэлектрических подложек к металлическим основаниям;
- ж) сборки и герметизации.

По мере выполнения перечисленных процессов в элементах ГИС СВЧ возникают термомеханические напряжения, которые вызывают концентрацию напряжений вокруг отверстий и углублений в подложках после сверления, приводят к деградации тонкопленочных элементов, отслоениям и растрескиваниям подложек и обрывам внутрисхемных межсоединений.

Поэтому необходимой и актуальной задачей создания ГИС СВЧ является повышение эксплуатационной надежности. Важнейшим этапом в решении этой задачи при проектировании и в производстве ГИС СВЧ является определение напряжений, деформаций и перемещений по всей поверхности элементов и узлов после выполнения технологических процессов, основу которых составляют тепловые и механические воздействия и нагрузки.

Кроме того, в последние годы быстрыми темпами развивается силовая электроника, для нужд которой разрабатываются и производятся мощные транзи-

сторы с целью их использования в различных областях электронной техники:

- в качестве силового ключа;
- в выходных каскадах высококачественных усилителей мощности низкой частоты;
- в устройствах коммутации многоканальных систем, во вторичных источниках питания;
- в схемах управления электродвигателей;
- в системах электронного зажигания двигателей внутреннего сгорания.

Основная часть приложенного к мощным транзисторам напряжения падает на *p-n*-переходе и, следовательно, на нем выделяется подавляющая часть электрической мощности, рассеиваемой прибором. При этом прямо пропорционально теряемой в нем мощности выделяется тепло. Возникает проблема отвода тепла и охлаждения прибора. Улучшить охлаждение мощных транзисторов возможно за счет применения в конструкции корпуса материалов с высокой теплопроводностью, к числу которых относятся медь и алюминий. Однако КТР этих материалов в 2–3 раза отличаются от КТР кремния, что приводит к возникновению термомеханических напряжений в кристалле мощного транзистора и его разрушению. С целью уменьшения термомеханических напряжений возникает задача выбора оптимального варианта конструкции корпуса с точки зрения отвода тепла и технологии крепления кристалла в корпусе, что возможно при наличии метода одновременной визуализации картины теплового поля и оценки деформаций кристалла мощного транзистора и корпуса полупроводникового прибора.

### Принципиальные положения голографической интерферометрии

Характерной особенностью перечисленных выше изделий микроэлектроники является широкое использование планарных конструкций с планарными элементами с плоскими диффузно-отражающими поверхностями. Наиболее подходящим методом для такого класса деталей при точных измерениях полей малых перемещений точек поверхности при приложении механических и тепловых нагрузок является метод голографической интерферометрии, который позволяет регистрировать и осуществлять прямые измерения разностей оптических длин интерферирующих волн с точностью до  $\lambda/10$ , где  $\lambda$  — длина волны света. В методе двойной экспозиции, когда на голограмме в различные моменты времени регистрируются два состояния изделия, восстановленные изображения интерферируют; образуется голографическая интерферограмма. На результирующем восстановленном изображении изделия появляются интерференционные полосы, характеризующие изменение объекта между экспозициями. Голографические измерения по принципу действия являются многоступенчатым процессом: вначале регистрируется голограмма объекта, затем восстанавливается его изображение, а количественная информация получается в результате обра-

ботки полученного изображения. Способ регистрации и последующего восстановления изображения объекта основан на интерференции двух волн: волны отраженной, или прошедшей через изделие, и когерентной с ней опорной волны с известным распределением фаз. Образовавшаяся интерференционная картина регистрируется на фотопластинке. Проявленная фотопластинка с зарегистрированной интерференционной картиной называется голограммой. Для восстановления исследуемого объемного изображения на голограмму необходимо направить волну, совпадающую с опорной волной для записи. Восстановленное изображение, являющееся точной копией световых волн, отраженных от исследуемого изделия, обладает всеми свойствами изображения, которые присущи оригиналу [1].

#### Методы голографической интерферометрии

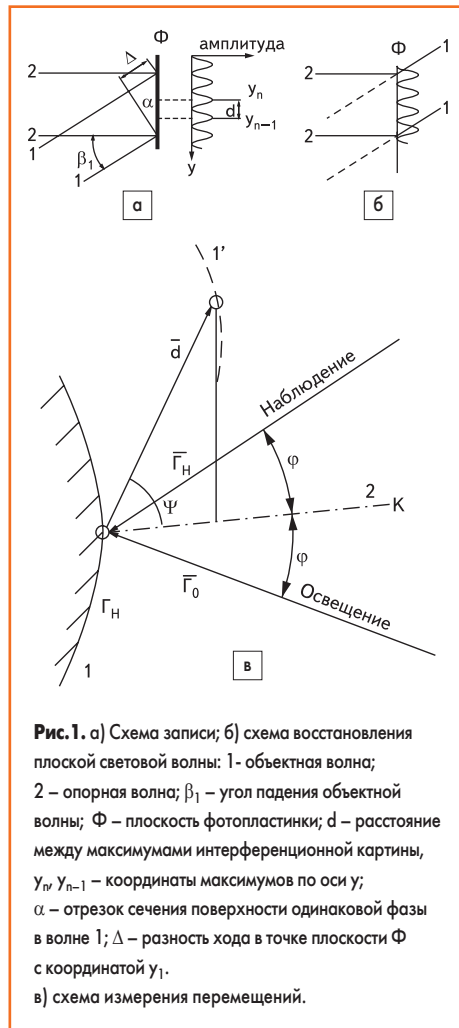
Основными методами получения интерферограмм являются [1]:

1. Метод двойной экспозиции, когда нагружаемый объект исследования голографируется с одинаковой экспозицией дважды (до и после приложения нагрузки) на одну и ту же фотопластинку до ее проявления, при этом два записанных состояния объекта восстанавливаются так, как если бы существовали одновременно, и образующаяся картина интерференции идентична получаемой с применением обычного интерферометра.
2. Метод реального масштаба времени, когда объект голографируется в исходном состоянии, голограмму после проявления с высокой степенью точности устанавливают на прежнее место или проявляют в месте экспонирования, при этом объект, подвергаемый динамической или статической нагрузке, освещают тем же световым пучком и сквозь голограмму наблюдают в реальном масштабе времени получаемые картины полос интерференции.

На рис. 1 представлены схемы регистрации (рис. 1а) и восстановления голограммой световых волн, отраженных от поверхности объекта (рис. 1б), и схема измерения перемещений в пространстве (рис. 1в).

Получаемый от лазера пучок монохроматического света с помощью светоделителя расщепляется на два пучка: объектный и опорный. Объектный пучок рассеивается на объекте голографирования и в плоскости фотопластинки вновь встречается с опорным. Голограмма представляет собой фотографическую запись картины, образующейся при интерференции объектного и опорного пучков при их совмещении в плоскости светочувствительного слоя фотопластинки. Полученная по голограмме картина не похожа на оригинал объекта, и зарегистрированные интерференционные полосы не видны невооруженным глазом вследствие очень малого шага между ними. Однако голограмма содержит всю информацию об объекте, необходимую для его наблюдения в трех измерениях.

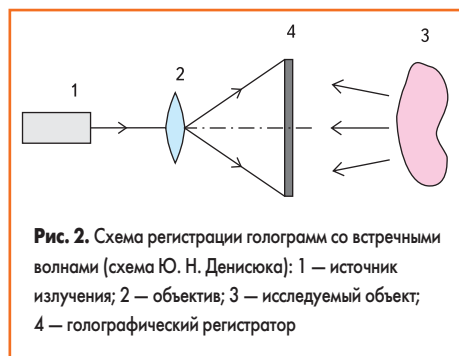
Голографическая интерферометрия обладает определенными преимуществами перед



**Рис. 1.** а) Схема записи; б) схема восстановления плоской световой волны: 1 – объектная волна; 2 – опорная волна;  $\beta_1$  – угол падения объектной волны;  $\Phi$  – плоскость фотопластинки;  $d$  – расстояние между максимумами интерференционной картины,  $y_n, y_{n-1}$  – координаты максимумов по оси  $y$ ;  $\alpha$  – отрезок сечения поверхности одинаковой фазы в волне 1;  $\Delta$  – разность хода в точке плоскости  $\Phi$  с координатой  $y_1$ . в) схема измерения перемещений.

традиционными методами: исследует сразу весь объект бесконтактным методом; имеет одинаковую во всех точках высокую чувствительность; дает дополнительные возможности для определения абсолютных порядков интерференционных полос, связанные с их наблюдением по всей поверхности и с возможностью следить за их перемещением при изменении угла наблюдения; фиксирует всю первичную информацию на одной фотопластине; использует простые алгоритмы преобразования интерференционной картины в поле деформаций.

На практике реализовать метод голографической интерферометрии удалось успешно только там, где исследовался прогиб поверхности объекта. Измерение внутрисекторных перемещений являлось проблемной задачей. Для ее решения был предложен контактный метод регистрации голограмм Ю. Н. Денисюка [2]. В данной работе он раз-



**Рис. 2.** Схема регистрации голограмм со встречными волнами (схема Ю. Н. Денисюка): 1 – источник излучения; 2 – объектив; 3 – исследуемый объект; 4 – голографический регистратор

вит применительно к исследованию деформаций изделий микроэлектроники. На рис. 2 представлена схема регистрации голограмм со встречными волнами, которую разработал Ю. Н. Денисюк.

Метод был выбран по следующим соображениям:

1. С его помощью можно получить информацию о средних деформациях по всему полю исследуемой поверхности.
2. Пороговая чувствительность метода по деформациям на базе 5 см составляет около  $10^{-5}$ .
3. Чувствительность метода регулируется схемой эксперимента и зависит только от угла наблюдения.
4. Данный метод позволяет получать достоверные результаты, доведенные до числа по деформациям при исследовании плоских участков деформируемых поверхностей.
5. Возможность использования метода при повышенных температурах в производственных условиях.
6. Голограммы, полученные по схеме Ю. Н. Денисюка, позволяют восстанавливать изображение с помощью источника, имеющего сплошной спектр, то есть в белом свете.

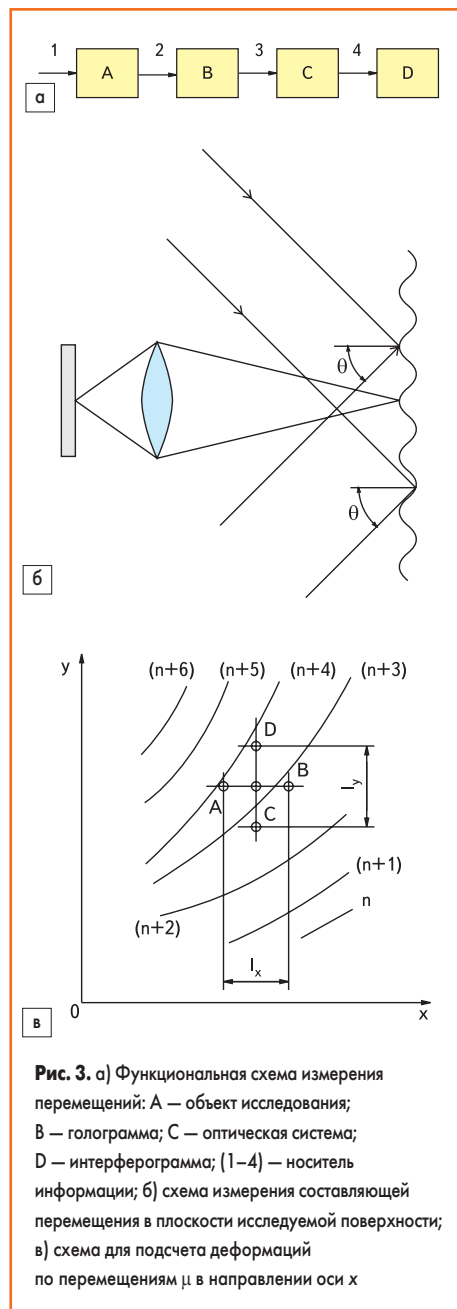
**Общая характеристика схемы определения перемещений точек деформируемой поверхности с использованием разработанного интерферометра**

Анализ оптического метода определения перемещений точек деформируемой поверхности с использованием голографического способа регистрации информации позволяет построить общую функциональную схему измерительной системы (рис. 3). Схема включает в себя объект исследования А, голограмму В, оптическую систему С, интерферограмму D и носитель информации — свет в виде лучей 1–4. Представим общую характеристику элементов схемы.

Объектом исследования А (рис. 3а) являются точки на деформируемой поверхности изделия. С помощью когерентного излучения (1–4) информация о перемещениях регистрируется и восстанавливается на голограмме В и затем преобразуется оптической системой С в интерферограмму D. Информация о деформациях выделяется после обработки интерференционных картин. Основой для их расшифровки являются физические соотношения, связывающие перемещения точек поверхности с параметрами интерферограммы.

**Определение компонент пространственного перемещения точки деформируемой поверхности**

После получения интерферограммы D (рис. 3а) производится ее расшифровка по картине интерференционных полос. При наложении в пространстве волновых фронтов, отраженных от деформируемой и недеформируемой поверхности, осуществляется их



**Рис. 3.** а) Функциональная схема измерения перемещений: А — объект исследования; В — голограмма; С — оптическая система; D — интерферограмма; (1–4) — носитель информации; б) схема измерения составляющей перемещения в плоскости исследуемой поверхности; в) схема для подсчета деформаций по перемещениям  $\mu$  в направлении оси  $x$

интерференционное сравнение. Расшифровка наблюдаемых интерференционных картин позволяет вычислить компоненты вектора перемещения каждой точки деформируемой поверхности [1]. Порядки  $n$  интерференционных полос, наблюдаемых на восстановленном изображении объекта, связаны с перемещением его поверхности из положения 1 в положение 1' (рис. 1в) следующим соотношением:

$$\vec{d}(\vec{r}_0 + \vec{r}_n) = \lambda n$$

или

$$2d \cos \varphi \cos \psi = \lambda n,$$

где  $\vec{d}$  — вектор перемещения точки поверхности;  $\vec{r}_0$  и  $\vec{r}_n$  — единичные векторы освещения и наблюдения;  $\lambda$  — длина волны лазерного излучения.

Следовательно, интерферограмма определяет проекцию перемещения на биссектрису 2-го угла между направлениями освещения и наблюдения. Если они почти нормальны к поверхности, то измеряется перемещение по нормали. Можно измерить перемещения и под

углом к нормали, если освещение и наблюдения осуществляются под углом к ней, но при этом чувствительность соответственно снизится.

Чтобы определить все три компоненты перемещения точки поверхности в пространстве, необходимо получить для них систему из трех уравнений. По методике, изложенной в работах [1–3], наблюдения интерференционных картинок полос, восстановленных с одной и той же голограммы, и подсчет сдвига полос, проходящих через точку измерения, проводят по трем направлениям.

Погрешность указанных измерений определяется погрешностями нахождения углов освещения и наблюдения, а также порядка полосы  $n$ . Погрешность первого вида резко возрастает при угле  $\varphi$ , близком к  $90^\circ$ , и при совпадении направлений освещения и наблюдения равна нулю. Погрешность определения порядка полосы связана с наличием шума в изображении диффузно-рассеивающих объектов, и составляет  $1/20$ – $1/10$  полосы интерференции. Порог чувствительности зависит от минимально различимой доли полосы и составляет приблизительно  $0,05$  мкм.

Счет полос интерференции проводят от нулевой полосы. Ее находят с учетом того, что полоса не меняет своего положения при изменении угла наблюдения, по неподвижной точке поверхности объекта с помощью искусственно введенной эластичной связки наблюдаемого объекта с неподвижной точкой. Определяемые малые перемещения, вызываемые деформацией рассматриваемой зоны объекта, могут накладываться на значительные перемещения всего объекта. Для устранения в картине полос интерференции этого нежелательного эффекта применялась оптическая компенсация перемещения объекта или его отдельной зоны, которая осуществляется перемещением голограммы с изменением угла падения освещающего пучка с помощью поворачиваемого зеркала.

Повысить чувствительность измерительной системы в 10 раз и более можно соответствующим изменением между двумя экспозициями фазы в опорном или объектном пучке. Так как при больших градиентах перемещений частота интерференционной картины полос возрастает и контрастность ее падает, верхний предел по градиентам измеряемых перемещений ограничен 6–15 мкм/мм. Снижение чувствительности при измерении больших перемещений осуществляется путем получения полос муара, возникающих при многопозиционной голографической интерферометрии.

Точность измерения перемещений зависит главным образом от точности определения расстояния между центрами полос, которая при обычных условиях оценивается в 2–3%. Деформации, получаемые дифференцированием графика перемещений, имеют погрешность в пределах  $\pm 10\%$ . Нижний предел измеряемых перемещений ограничен размерами отдельных зерен изображения и обычно составляет 3–4 мкм; верхний предел зависит от размера высвечиваемой зоны и практически оценивается долями миллиметра.

**Определение деформаций и напряжений**

Относительные деформации  $\epsilon$ , по которым известными способами могут быть подсчитаны напряжения и усилия в сечениях, определяются с применением дифференцирования по измеренным полям линейных перемещений, вызванных деформациями. Если измерены перемещения  $w$  по нормали к поверхности детали (например, прогибы), то деформацию можно найти только косвенным путем с использованием дифференциальной или числовой зависимости между измеренными перемещениями и искомыми деформациями, которая должна быть известна. Например, в случае изгибаемого бруса или пластинки  $\epsilon_x = z_0 d^2 w / dx^2$ , где  $x$  — направление оси бруса или линии на поверхности пластинки;  $z_0$  — расстояние от нейтрального слоя до рассматриваемой точки. Линейные перемещения в плоскостях, касательных к поверхности деформируемой детали, могут быть измерены с применением спекл-фотографии или разработанных для этой цели схем голографической интерферометрии [2]. По одной из них одновременно экспонируются две голограммы под равными углами  $\theta$  к нормали (с обеих сторон) поверхности. Перемещение в плоскостях, касательных к поверхности по линиям их пересечения с плоскостью наблюдения, определяют из выражения:

$$s = (\lambda/2) (n_1 - n_2) / \sin \theta,$$

где  $n_1$  или  $n_2$  — порядок полос на каждой голограмме. При освещении по двум направлениям с одинаковыми углами  $\theta$  к нормали и при одной голограмме образуется картина муара с полосами, порядок которых равен  $(n_1 - n_2)$ . Схема спекл-фотографии, приведенная на рис. 3б, зависит только от поперечного перемещения, лежащего в плоскости освещающих пучков. Для измерений в реальном масштабе времени по этой схеме проявленную спеклограмму возвращают в ее держатель, и она действует как теневой экран, препятствуя при неподвижном объекте прохождению света от зон со светлыми пятнами. Спекл-картина деформированной поверхности уже не совпадает со своим теневым изображением: происходит вычитание интенсивностей, и при наблюдении сквозь голограмму будут видны интерференционные полосы. Порядок полосы  $n$  связан с величиной указанного перемещения  $s$  зависимостью  $2s \sin \theta = \lambda n$ . Вычитание двух спекл-картин может осуществляться автоматически, если использовать телевизионную регистрирующую систему, выбирая размеры зерен изображения, разрешаемые камерой. Если разрешение телевизионного экрана 50 линий/мм, то это ограничивает верхний порог измеряемых деформаций величиной  $17 \times 10^{-5}$ , однако изменением схемы измерений его можно повысить до  $170 \times 10^{-5}$ . Контраст результирующей картины полос повышается введением высокочастотного фильтра, задерживающего низкочастотную фоновую интенсивность. Окончательный сигнал может быть записан на видеоманитофоне, что обеспечит регистрацию

в реальном масштабе времени. Указанные методы, использующие двойное освещение, применимы, если поверхность плоская. Минимальное определяемое перемещение соответствует одной полосе интерференции, и для повышения чувствительности вводится наклон фронта волны одного из освещающих пучков, что дает возможность отсчета долей полосы. Минимальное измеряемое на поверхности удлинение порядка  $0,1 \lambda$  соответствует при базе 10 мм чувствительности по относительной деформации, равной  $1 \times 10^{-5}$ .

Дифференцирование, необходимое для определения относительных деформаций по измеренным перемещениям, в простых случаях выполняют графически по группам точек. Для приближенной оценки деформаций применяют наложение оригинала и копии полученной картины полос перемещений с небольшим сдвигом или поворотом и наблюдают полосы муара, определяющие соответствующие производные. Если получены картины полос, дающие линейные перемещения  $u$  и  $v$  в направлениях осей  $X$  и  $Y$  в плоскости, касательной к поверхности детали, то относительные линейные деформации  $\epsilon_x$  и  $\epsilon_y$  и относительные сдвиги  $\gamma_{xy}$  в любой выбранной точке могут быть подсчитаны на основании известных зависимостей:

$$\epsilon_x = du/dx; \epsilon_y = dv/dy; \gamma_{xy} = du/dy + dv/dx.$$

Например, по картине полос, дающей перемещения  $u$  (рис. 3в), при усреднении на базах  $l_x$  и  $l_y$  находят для точки  $O$ :

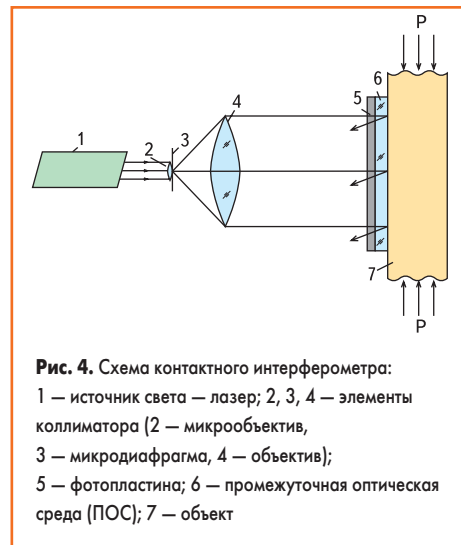
$$\epsilon_x = (u_B - u_A) / l_x = ((n_B - n_A) \lambda) / (l_x 2 \sin \theta);$$

$$\epsilon_y = (u_D - u_C) / l_y = ((n_D - n_C) \lambda) / (l_y 2 \sin \theta).$$

Здесь  $u_A, u_B, u_C, u_D$  — перемещения точек  $A, B, C, D$ ;  $n_A, n_B, n_C, n_D$  — соответствующие им порядки полос интерференции.

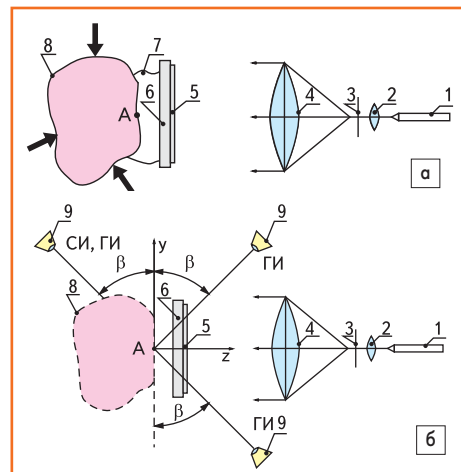
**Описание конструкции контактного голографического интерферометра**

Запись голограммы — это регистрация интерференционной картины световой волны, где расстояния между соседними деталями изображения меньше длины волны практически в 2 раза, поэтому колебания элементов оптической схемы записи должны быть на порядок меньше. Самое чувствительное к вибрациям звено в интерферометре включает в себя объект и фотопластинку. Следовательно, крепление этих элементов друг относительно друга должно быть особенно надежным. Второе по чувствительности к смещениям звено — линза для расширения лазерного пучка, третье, значительно менее чувствительное — сам лазер. Для получения на голограмме четкой записи интерференции опорного и объектного пучков во время экспозиции должно быть обеспечено неизменное относительное положение исследуемого объекта и узлов измерительной схемы с точностью до порядка долей длины волны света. В противном случае происходит потеря контраста фиксируемой голограммы и ухудшается качество восстановленного изображения.



**Рис. 4.** Схема контактного интерферометра: 1 — источник света — лазер; 2, 3, 4 — элементы коллиматора (2 — микрообъектив, 3 — микродиафрагма, 4 — объектив); 5 — фотопластинка; 6 — промежуточная оптическая среда (ПОС); 7 — объект

Регистрация голограмм во встречных пучках, которую предложил Ю. Н. Денисюк, при экспериментальном исследовании деформированного состояния изделий микроэлектроники в производственных условиях ограничена влиянием вибрации, смещений и поворотов исследуемых объектов как жесткого тела. Вибрации объекта вызывают колебания свободной, незакрепленной фотопластинки относительно поверхности объекта, что искажает информацию о перемещениях точек деформируемой поверхности. Для устранения этих ограничивающих факторов нами предложена конструкция интерферометра с контактным голографическим способом записи информации (рис. 4). При этом регистрирующая среда прикрепляется к объекту посредством промежуточной оптической среды (ПОС). В качестве ПОС выбран материал, имеющий модуль сдвига меньший, чем модуль сдвига подложки регистрирующей среды и модуль сдвига материала изделия. В этом случае влияние перемещений точек деформируемой поверхности объекта на изменение линейных размеров регистрирующей среды мало, что и позволяет реализовать схему голо-



**Рис. 5.** Схемы регистрации и восстановления голограмм: а) схема регистрации голограмм; б) схема восстановления голограмм: 1 — лазер; 2 — микрообъектив; 3 — микродиафрагма; 4 — линза; 5 — фотозульсия; 6 — стеклянная подложка; 7 — ПОС; 8 — исследуемый объект; 9 — фотокамеры для регистрации интерферограмм

графического интерферометра и получать интерферограммы методом двойной экспозиции и реального времени. При использовании метода двойной экспозиции фотопластинку экспонируют дважды при различных уровнях нагрузки (рис. 5а). Схема получения интерферограмм с восстановленных голограмм показана на рис. 5б.

В методе реального времени в момент 1-й экспозиции регистрируются световые волны, отраженные от поверхности объекта, находящегося в некотором начальном состоянии. После 1-й экспозиции осуществляется фотохимическая обработка фотопластинки и затем наблюдаются интерферограммы, возникающие при сложении световых волн, восстановленных голограммой, и световых волн, отраженных от деформируемой поверхности объекта микроэлектроники.

Контактный интерферометр работает следующим образом. Пучок монохроматического когерентного света, испускаемого лазером 1, расширяется посредством микрообъектива 2 и широкоугольной линзы 4. Диафрагма 3 служит для создания равномерной освещенности и помещается в фокусе линзы 2. Расширенный коллимированный пучок падает сначала на сэндвич, состоящий из фоторегистрирующей эмульсии фотопластины 5 и оптически прозрачного герметика СКТН 6. Пройдя через этот набор сред и отразившись от поверхности исследуемого образца 7, пучок интерферирует со светом, пришедшим к фоторегистрирующей среде с другой стороны (на рис. 4 — слева). Зарегистрированная таким образом интерференционная картина несет информацию о приобретенной разности хода интерферирующих лучей, возникающей в результате прохождения одного из них через неоднородную фазовую среду. Разность хода определяется, в основном, прозрачным стеклом фотопластины, так как его толщина во много раз превосходит толщину фотоземли и герметика СКТН, вместе взятых. Оптически прозрачный герметик СКТН, с помощью которого к исследуемому образцу крепится фотопластина, служит жесткой базой интерферометра. Исследуемый образец 7 устанавливается так, чтобы нормаль к его поверхности совпадала с направлением волнового вектора освещающего пучка. Далее исследуемый образец освещали дважды — до и после нагружения. Сделав первую экспозицию в течение 10 секунд, нагружали образец и затем выполняли вторую экспозицию, равную первой. При этом на фотоземли регистрируется две интерференционные картины, соответствующие свободному и нагруженному состояниям деформированного образца. Складываясь, эти интерференционные картины дают семейство линий, являющихся геометрическим местом точек постоянных значений, пропорциональных сумме главных деформаций ( $\epsilon_x + \epsilon_y$ ), когда интерферограмма наблюдается по нормали к поверхности объекта.

Далее, разгрузив образец, вынимали его из зажимов и, отделив фотопластину от поверхности исследуемого образца, обрабатывали ее в проявителе и фиксирующем растворе, как это принято в стандартном процессе обработ-

ки фотоматериалов. Все операции, начиная с приклейки фотопластины и до окончания процесса проявления, производили в затемненном помещении при слабом освещении его зеленым светом.

Для регистрации восстановленного с голограммы изображения интерференционной картины применяли зеркальный фотоаппарат «Зенит-Е» с объективом «Телемар-22». В качестве источника света использовали осветитель с конденсатором из комплекта оптического сканера ОСК-3. Регистрацию интерферограммы осуществляли на фотопленку «Микрат-300». Фотоаппарат жестко закрепляли на специальном штативе как можно ближе к осветителю или точно по нормали к направлению волнового вектора (при использовании полупрозрачного зеркала). Поворачивая кольцо расстояний на объективе, фокусировали его на поверхность исследуемого образца. Проверку правильности фокусировки осуществляли посредством проведения контрольной съемки. Для определения экспозиции (при постоянной диафрагме, равной 8) выполняли пробную съемку 8–10 кадров с различными выдержками. Меняя время проявления, добивались достаточного почернения фотопленки при минимальных экспозициях. Далее производили последовательную фотосъемку по 6–8 кадров интерференционных картин каждого вида. В этом случае исключались из рассмотрения случайные искривления полос, вызванные воздушными потоками или другими помехами. Процесс фотосъемки проводили, наблюдая за интерференционными картинками через видоискатель фотоаппарата. Затем печатали фотографии интерферограмм с таким масштабным коэффициентом, при котором частота линий на фотографии не превышала значения 1 линия/см. На обратной стороне каждой фотографии указывались тип изделия и геометрические размеры образца, величина и характер приложенной нагрузки, а также результаты определения величин сумм главных деформаций по выбранным сечениям. Для измерения отдельных внутриплоскостных компонент деформаций интерферограммы наблюдались с 2-х симметричных относительно нормали направлений (рис.5б) и затем осуществляли расшифровку по методу, изложенному в работе [2].

### Результаты исследований с использованием контактного голографического интерферометра

#### Исследования деформаций элементов конструкций ГИС СВЧ

Деформации элементов конструкций ГИС СВЧ исследовались после выполнения следующих технологических процессов [4]:

- ультразвуковая прошивка отверстий в керамических подложках;
- припайка керамических подложек с отверстиями к металлическим основаниям-пьедесталам
- термообработка керамических подложек с отверстиями, припаянных к металлическим основаниям-пьедесталам.

### Ультразвуковая прошивка отверстий в керамических подложках

Эксперимент по решению первой задачи осуществлялся следующим образом. На подложку из поликора вакуумным термическим напылением последовательно осаждались слои хрома, меди и никеля общей толщиной 3–6 мкм. Затем на подложке с помощью кремнийорганической полимерной композиции СКТН закреплялась фотопластинка ЛОИ-2 и осуществлялась ее 3-часовая выдержка при комнатной температуре в темноте. После этого производилась засветка системы «подложка — фотопластинка» излучением газового лазера ЛГ-38 ( $\lambda=0,6328$  мкм) при полихроматической засветке. Прошивка отверстий осуществлялась на ультразвуковой установке в производственных условиях. После сверления подложки система «подложка — фотопластинка» экспонировалась второй раз. Затем проводилось проявление и закрепление фотопластины. В результате получилась голограмма, зарегистрировавшая два состояния поверхности керамики. После освещения голограмма восстанавливает 2 волновых фронта света, соответствующие двум состояниям поверхности керамики. Если в процессе сверления отверстия не происходит необратимых изменений состояния керамики, то волновые фронты тождественны друг другу и оба восстановленных изображения поверхности совпадают. Когда происходит необратимый процесс деформации, то восстановленный второй волновой фронт отличается от первого. На голограмме появятся интерференционные полосы, ответственные за данное изме-

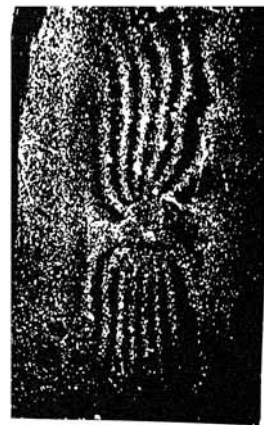


Рис. 6. Интерферограмма

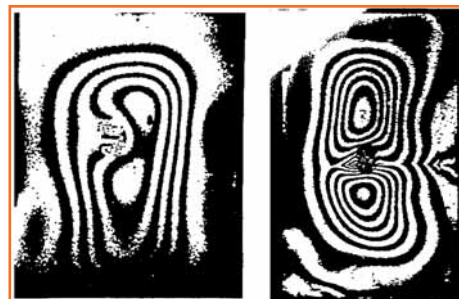


Рис. 7. Интерферограмма

нение формы. Расшифровав интерферограмму, можно получить информацию об остаточных деформациях. На рис. 6 и 7 в качестве примера приведены интерферограммы, полученные при сверлении керамических подложек. Они свидетельствуют о наличии остаточных напряжений и деформации изделий вокруг отверстий. По данным интерферограмм сделана оценка расположения остаточных напряжений в пластинах и коэффициента их концентрации в области отверстий. Исследованы различные формы отверстий, их взаимная ориентация, расположение с целью минимизации остаточных напряжений [4].

### Припайка керамических подложек с отверстиями к металлическим основаниям-пьедесталам

Контроль осуществлялся следующим образом. На керамической подложке с нанесенными слоями металлизации хром / медь / сплав «олово-висмут» и приклеенной к фотопластинке, засвеченной излучением газового лазера, производилась ультразвуковая прошивка отверстий, после чего половина



Рис. 8. Деформации

подготовленных таким образом соединений подвергалась процессу пайки подложки к пьедесталу. После охлаждения фотопластинка засвечивалась второй раз. Затем фотопластинка проявлялась, закреплялась, промывалась и сушилась. После восстановления голограммы можно наблюдать деформации, обусловленные припайванием подложки к пьедесталу (рис. 8). Таким образом, оценивалось влияние процесса пайки на перераспределение остаточных напряжений в подложке после ее пайки к пьедесталу.

### Термообработка керамических подложек с отверстиями, припаянных к металлическим основаниям-пьедесталам

В этом случае на соединение керамическая подложка / пьедестал крепилась голограмма. Регистрировалось состояние соединения при различных температурах. Эксперимент проводился в соответствии с описанной выше методикой. На рис. 8 представлены голограммы деформированных подложек при нагреве до 100 °С. Нагрев до такой температуры позволял оценить температурную деформацию по всему полю подложки.

### Выбор конструкции корпуса для мощных СИТ-транзисторов

В экспериментах по выбору варианта корпуса для СИТ-транзисторов КП919 А, Б использовались серийно изготавливаемые корпуса типов КТ-9Б, КТ-9Г, КТ-9Д (ПАЯО. 336. 004. ТУ), состоящих из никелированных «ножки» и колпачка. В свою очередь, «ножка» представляла собой у корпуса:

- КТ-9Б — стальной фланец толщиной 1,6 мм, к которому диффузионной сваркой присоединен медный растекатель толщиной 2,0 мм;
- КТ-9Д — стальной фланец толщиной 1,0 мм, к которому диффузионной сваркой присоединен медный растекатель толщиной 2,0 мм;
- КТ-9Г — стальной фланец толщиной 1,6 мм, к которому диффузионной сваркой присоединен медный растекатель толщиной 2,0 мм с прикрепленной к нему также диффузионной сваркой молибденовой шайбой толщиной 0,7 мм.

Для решения задачи выбора конструкции корпуса на обратную сторону кремниевых пластин диаметром 100 мм со сформированными транзисторными структурами напыляли слои хрома (0,03–0,05 мкм), меди (7–8 мкм) и далее гальваническим методом осаждали слой сплава олово/висмут (9–12 мкм), после чего проводили скрайбирование пластин и их ломку на единичные кристаллы размером 3×5 мм. Полученные таким образом кристаллы с помощью низкотемпературного припоя ПОС-61 в колпачковой печи в атмосфере сухого водорода припайвали к основаниям («ножкам») упомянутых выше корпусов, после чего на установке ЭМ-423М осуществляли ультразвуковую сварку соединительных алюминиевых проводников диаметром 200 мкм с одной стороны к контактным площадкам на кристаллах, а с другой — к выводам на «ножках» корпусов. С помощью кремний-органической полимерной композиции СКТН к «ножкам» с установленными кристаллами приклеивалась фотопластинка ПЭ-2 и осуществлялась выдержка ее при комнатной температуре в темноте в течение трех часов. После этого осуществлялась засветка полученной системы «корпус полупроводникового прибора — фотопластинка» излучением газового лазера ЛГ-38 ( $\lambda = 0,6328$  мкм) при полихроматической засветке. Далее прибор включался в следующий режим:

Узатвор-сток <math>\leq -35 В; Узатвор-исток <math>< 40 В;  
Уистока = 20 В; I <math>< 1 А.

После подачи напряжений на СИТ-транзистор и выдержки в указанном режиме в течение 10 минут для достижения стационарного теплового режима, система «фотопластинка — корпус полупроводникового СИТ-транзистора» экспонировалась второй раз. После проявления и закрепления фотопластинки получали голограмму, на которой были зафиксированы 2 состояния СИТ-транзистора. При последующем освещении голограмма восстанавливала 2 волновых фронта света, соответ-

ствующих двум состояниям СИТ-транзистора. Дальнейшее преобразование изображения на голограмме с помощью оптической системы в интерферограмму позволило получить картину интерференционных полос, представляющую собой результат сложения волновых фронтов, отраженных от недеформированной поверхности СИТ-транзистора, находящегося в отключенном состоянии, и от деформированной поверхности прибора, включенного в рабочий режим. В интерференционных полосах в неясном виде закодирована информация о пространственно-временных распределениях физических параметров. При обработке интерференционной картины выделялась информация о деформациях. Основой для расшифровки интерференционной картины явля-

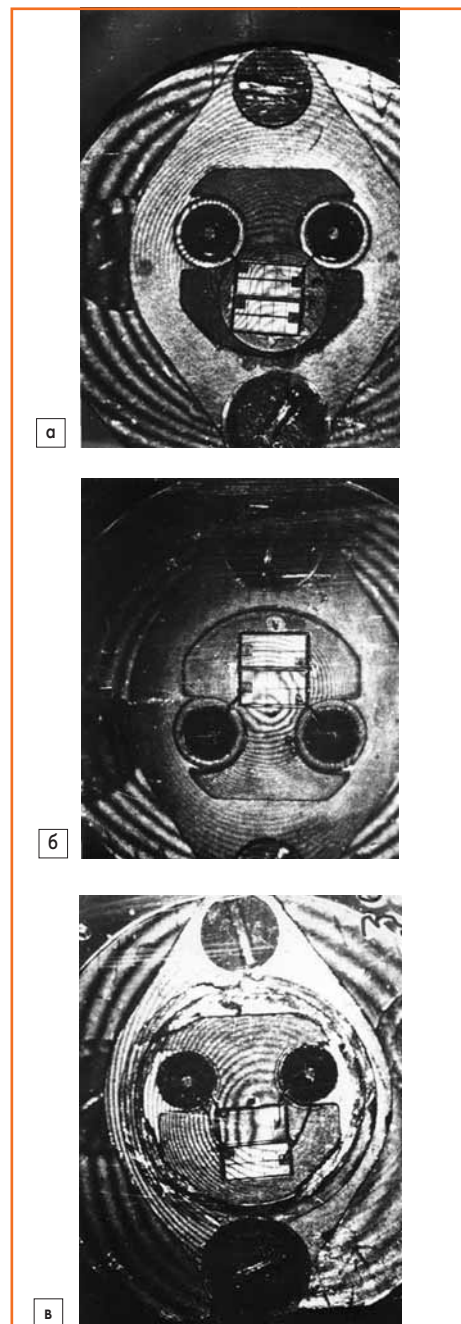


Рис. 9. Интерферограммы СИТ-транзистора с двумя кристаллами в корпусах:

- а) КТ-9Г;
- б) КТ-9Д;
- в) КТ-9Б

**Таблица. Результаты расчетов**

Тип корпуса	Максим. напряжение, кг/мм <sup>2</sup>	В 1-м кристалле, кг/мм <sup>2</sup>	Во 2-м кристалле, кг/мм <sup>2</sup>	Rt при Tср. источника, °С/Вт	Rt при Tмакс. источника, °С/Вт
КТ 9Б	1,44	0,5	0,2	1,12	1,48
КТ 9Д	2,12	1,62	0,16	0,75	1,14
КТ 9Г	1,92	0,98	0,3	1,15	1,47

лись физические соотношения, связывающие перемещение точек деформируемой поверхности с параметрами интерферограммы. Полученные интерферограммы (рис. 9) содержат количественную меру — число интерференционных полос. Расшифровку и определение деформаций осуществляли по методике, изложенной в [2].

По числу полос интерференционных картин и их формам оценивали механизм изменений деформаций корпуса. Наименее механически напряженным является корпус КТ-9Б, но наименьшим тепловым сопротивлением обладает корпус КТ-9Д, который механически наиболее нагружен. Расчет теплового сопротивления корпусов был проведен методом упрощенных эквивалентов [5]. Результаты расчетов приведены в таблице.

На основании сопоставления полученных данных по тепловому сопротивлению и механическим напряжениям в кристаллах, рассчитанным на основании интерферограмм, для применения в конструкциях СИТ-транзисторов типа КП 919 А, Б был выбран корпус КТ-9Б.

#### **Отработка технологии припайки кристаллов к корпусам КТ-9Б**

С помощью предложенной конструкции интерферометра отработывалась технология сборки кристаллов в корпусах СИТ-транзисторов КП 919 А, Б и исследовалось качество припайки кристаллов. Для обеспечения припайки кристаллов использовался низкотемпературный припой ПОС-61 в виде пластины толщиной 30 мкм. Однако такая прокладка припоя, помещенная между «ножкой» и кристаллом, не обеспечивала необходимого качества припайки. Из полученных интерферограмм деформаций кристаллов было видно, что кристалл припаялся к «ножке» либо только одним краем, либо имел пустоты (непропаи) в паяном шве под кристаллом. Припайка кристаллов одним краем происходила в силу того, что выбранный температурный режим (температура нагрева и время выдержки) оказались недостаточным для получения сплошного паяного шва. Поэтому для обеспечения «сплошности» паяного шва было предложено изменить режим пайки и дополнительно ввести еще одну стадию — предварительной выдержки сборочных узлов при температуре 300 °С в течение 20 мин. Это позволило добиться равномерности шва под всей поверхностью кристаллов, но не решило проблемы пустот (непропаев). По данным интерферограмм и анализа паяных швов было установлено, что образование непропаев связано с наличием окисной пленки на поверхности припойных пластин. Этот недостаток был устранен, когда было предложено ис-

пользовать припой ПОС-61 в виде стержней, которые устанавливались рядом с кристаллом, чтобы после их расплавления в зону с паяным кристаллом за счет капиллярного эффекта затягивался чистый припой, а все окислы оставались бы за пределами кристалла.

Проведенные исследования интерферограмм показали, что резкое изменение частоты интерференционных полос, их локальные изгибы и несимметричное расположение, малые значения и неравномерное распределение напряжений характерны для некачественной припайки кристаллов. В то же время хорошо припаянный кристалл имеет симметричные интерферограммы без локальных изгибов и меньшие значения механических напряжений, чем у плохо припаянного кристалла.

В конструкции СИТ-транзисторов КП 919А и КП 919Б использовались кристаллы больших размеров. В процессе отработки технологии пайки с использованием интерферометра было установлено, что с ростом размеров кристалла резко падает процент выхода годных приборов. Поэтому было предложено изменить конструкцию прибора и вместо одного кристалла размером 6,3×8,4 мм использовать 2 кристалла размером 6,3×4,2 мм, что позволило повысить процент выхода годных на сборочных операциях.

#### **Закключение**

Разработан высокочувствительный голографический интерферометр для измерения деформаций и напряжений, возникающих после выполнения различных физических и механических операций в ответственных конструктивных элементах изделий микроэлектроники с использованием контактного способа регистрации голограмм Ю. Н. Денисюка. Впервые для стабилизации положения голограммы относительно поверхности объекта микроэлектроники и создания интерференционных преобразователей между голограммой и объектом вводилась промежуточная оптическая среда (ПОС). Радикальное отличие этого способа от бесконтактного заключается в том, что разработанные на его базе приемы и методы измерения деформационных перемещений позволили разделить вклад различных составляющих в полный набег фазы на всех стадиях формирования интерферограммы. Закрепление голограммы с использованием ПОС образует оптический преобразователь, в котором исключен фазовый набег при перемещении голограммы относительно лазерного источника света. На голограмме регистрируется информация только о деформационных перемещениях, увеличива-

ется чувствительность интерферометра к измерению внутрислойных перемещений, что существенно повышает точность измерения этих перемещений. Число элементов, необходимых для реализации такого оптического преобразователя, сведено к минимуму. Это существенно расширило диапазон измеряемых деформаций и позволило применить высокочувствительный метод голографической интерферометрии в производственных условиях.

#### **Выводы**

1. Использование для закрепления фотопластины к исследуемому объекту микроэлектроники низкоимпульсной, оптически прозрачной, резиноподобной полимерной среды, остающейся изотропной и не изменяющей своих физических параметров при различных механических и тепловых воздействиях, позволило исключить влияние вибраций на элементы интерферометра, уменьшить вклад в фазовый набег перемещений нормальных к поверхности объекта и увеличить чувствительность интерферометра к внутрислойным перемещениям объектов.
2. Разработанный голографический интерферометр можно использовать для измерения деформации элементов конструкций ГИС СВЧ после выполнения различных технологических процессов, для решения задачи выбора конструкции корпуса СИТ-транзистора, а также для отработки технологии низкотемпературной припайки кристаллов к корпусам мощных СИТ-транзисторов и для проведения контроля технологических процессов их сборки, что подтверждено результатами экспериментов, проведенных в реальных производственных условиях.

#### **Литература**

1. Островский Ю. И., Бутусов М. М., Островская Г. В. Голографическая интерферометрия. М.: Наука. 1977.
2. Борыняк Л. А., Герасимов С. И., Жилкин В. А. Практические способы записи и расшифровки интерферограмм, обеспечивающих необходимую точность определения компонент тензора деформаций // Автотметрия. 1982. № 1.
3. Голографические неразрушающие исследования / Пер. с англ.; под ред. Р. Эрф. М.: Машиностроение. 1979.
4. Борыняк Л. А., Величко А. А., Непочатов Ю. К. Применение метода голографической интерферометрии для оценки остаточных деформаций в подложках гибридных интегральных модулей СВЧ // Материалы Российской науч.-тех. конференции «Информатика и проблемы коммуникаций». Новосибирск. 2000.
5. Захаров А. Л., Асвадунова Е. И. Применение метода упрощенных эквивалентов для расчета тепловых сопротивлений сложных транзисторных структур // «Полупроводниковые приборы и их применение». Вып. 20/ Под ред. Я. А. Федотова. М.: Советское радио. 1968.