

УДК 621.378; 681.33

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОДЕФОРМАЦИЙ ОБЪЕКТОВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Л. А. Борыняк, Ю. К. Непочатов, Ю. Г. Пейсахович, Н. Ю. Петров

*Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Новосибирский государственный технический университет»,
630092, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: borynyak-leonid@mail.ru*

Представлены результаты исследования элементов твердотельной электроники методом голографической интерферометрии. Приведены примеры измерения термодформаций реальных изделий, контроля технологических процессов при производстве СИТ-транзисторов и гибридных интегральных схем сверхвысокой частоты.

Ключевые слова: голографическая интерферометрия, измерения термомеханических деформаций, твердотельная электроника, поляризационный метод контроля, тензометрия, силовая электроника.

Введение. Технологические процессы изготовления элементов и узлов микроэлектроники часто вызывают концентрацию напряжений, что приводит к отказу работы изделий. Эта проблема особенно актуальна для ответственных конструкций. В предлагаемой работе изложены оригинальные результаты исследований термомеханических деформаций в гибридных интегральных схемах (ГИС) СВЧ-диапазона и в мощных транзисторах силовой электроники методом голографической интерферометрии. Исследованию подлежали технические характеристики схемных решений, алгоритмы расшифровки интерферограмм, достоверность результатов измерения деформаций. Для решения этой задачи применялся накладной интерферометр [1], в котором голограмма прикреплялась к элементам твердотельной электроники с помощью прозрачной промежуточной оптической среды (ПОС).

Целью данной работы является создание метода измерения термодформаций объектов микроэлектроники с использованием голографической интерферометрии.

Схема контактного высокочувствительного голографического интерферометра, разработанного для измерения деформаций изделий микроэлектроники [2], представлена на рис. 1 (1 — источник света (лазер), 2–4 — элементы коллиматора (2 —

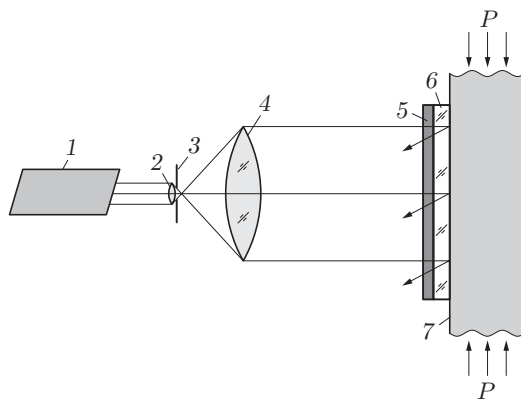


Рис. 1

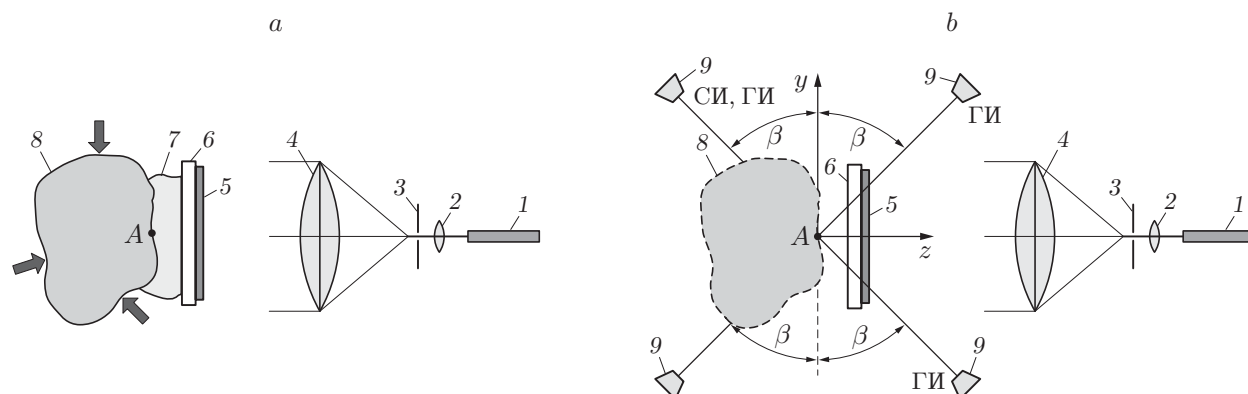


Рис. 2

микрообъектив, 3 — микродиафрагма, 4 — объектив), 5 — фотопластина, 6 — ПОС, 7 — объект). На рис. 2 приведены схемы регистрации (а) и восстановления (б) голограмм (1 — лазер, 2 — микрообъектив, 3 — микродиафрагма, 4 — линза, 5 — фотоэмульсия, 6 — стеклянная подложка, 7 — ПОС, 8 — исследуемый объект, 9 — фотокамеры для регистрации спекл- и голографических интерферограмм (СИ и ГИ)). Для статических задач использовался метод двойной экспозиции, для динамических — метод реального времени.

Расшифровка интерферограмм. В экспериментальных методах исследования отсутствуют физические приёмы прямого измерения напряжений. Перемещения точек поверхности деформируемых тел измеряются как прямыми, так и косвенными методами. Известные соотношения теории упругости твёрдого тела связывают эти перемещения с деформациями и напряжениями.

Для практического применения голографической интерференции при определении компонент перемещения точек поверхности деформируемых тел достаточно применить теорию формирования интерференционных полос, основанную на геометрическом подходе. Расчётные формулы выводятся в рамках классической оптики [3, 4].

Схема разложения вектора перемещения $\Delta \mathbf{r}$ элемента поверхности на компоненты \mathbf{u} , \mathbf{v} , \mathbf{w} изображена на рис. 3. На рис. 4 дана схема наблюдения интерферирующих лучей, исходящих из точек A и A' с одинаковой фазой волнового фронта (I — эмульсия, II —

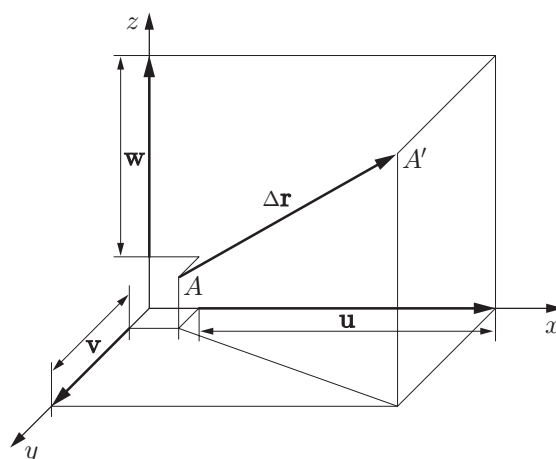


Рис. 3

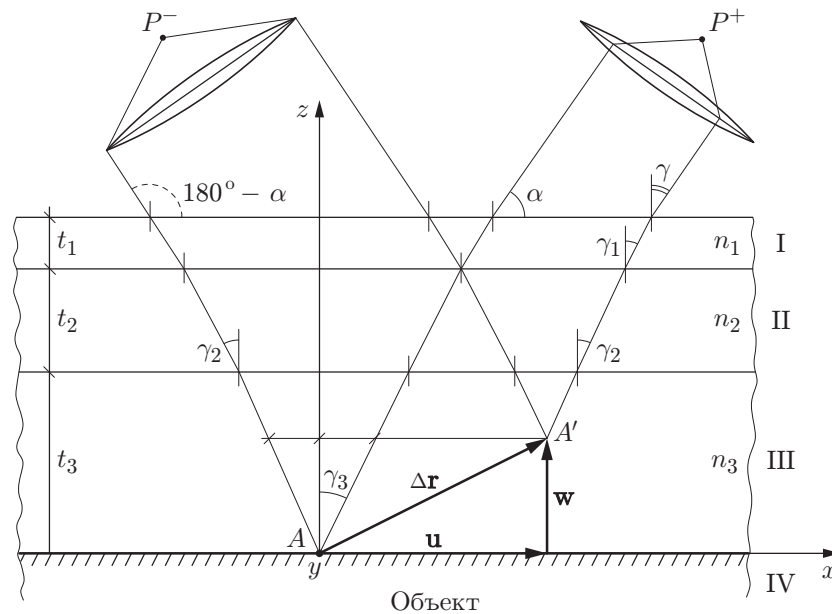


Рис. 4

стеклянная подложка, III — ПОС, IV — поверхность объекта; t_1, t_2, t_3 — толщины эмульсии, стекла, ПОС; γ — угол падения и наблюдения; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ — углы преломления лучей, отражённых точками A и A' ; P^+ и P^- — точки наблюдения). Разность фаз δ , вызванная деформацией и измеряемая наблюдателем, имеет вид

$$\delta = (\mathbf{K}_2 - \mathbf{K}_1)\Delta\mathbf{r}, \quad (1)$$

где $\delta = 2\pi N$, N — порядок интерференционной полосы, связанной с этой разностью фаз; \mathbf{K}_1 и \mathbf{K}_2 — волновые векторы, определяющие направление освещения и наблюдения, $|\mathbf{K}_1| = |\mathbf{K}_2| = 2\pi/\lambda$ (λ — длина волны лазерного излучения).

Для классической голографической интерферометрии отсюда следует выражение [3]

$$u \cos \alpha_s + v \cos \beta_s + w(\cos \gamma_s + 1) = N_s \lambda. \quad (1a)$$

Здесь α_s и β_s — углы вектора рассеяния $\mathbf{K}_2 - \mathbf{K}_1$, измеряемые от плоскости поверхности объекта; γ_s — от нормали к ней; z — направление нормали; s — направление наблюдения.

Для косвенного измерения $\Delta\mathbf{r}$ по данным интерферометрии производят вариацию величин, входящих в соотношение (1), и образуют систему уравнений, достаточную для определения компонент вектора $\Delta\mathbf{r}$ [3]. Однако точность результатов, получаемых на практике, при использовании классических методов голографической интерферометрии неудовлетворительная. Чтобы повысить точность измерения перемещений интерферометром [2], предлагается следующий алгоритм расшифровки интерферограмм. Объект освещается по нормали к поверхности, а регистрация интерферограмм осуществляется с четырёх направлений наблюдения, попарно симметричных относительно нормали [1]. Это позволяет снизить порядок системы разрешающих уравнений и перейти к уравнению с одним неизвестным. Суммируя уравнения вида (1a), определяем компоненту

$$u = (N_1 + N_2) \frac{\lambda}{2 \cos \alpha}, \quad (2)$$

по двум другим находим компоненту

$$v = (N_3 + N_4) \frac{\lambda}{2 \cos \beta}, \quad (3)$$

где α и β — углы наблюдения из точки P^- , измеряемые от плоскости объекта в плоскостях XZ и YZ ; (N_1, N_2) — порядок интерференционной полосы, связанной с точкой A при наблюдении её из точек P^- и P^+ в плоскости XZ под углами α и $180^\circ - \alpha$; (N_3, N_4) — порядок полосы при наблюдении её в плоскости YZ под углами β и $180^\circ - \beta$. Из уравнений для N_2 и N_1 [1, 2] можно получить следующее выражение для поперечной компоненты вектора деформации:

$$w = \left[\frac{N_1 - N_2}{2} \lambda - t_3 (n_3 - n'_3) \left(1 + \frac{1}{\cos \gamma_3} \right) \right] \left(\frac{n_3}{\cos \gamma_3} - \operatorname{tg} \gamma_3 \cdot \cos \alpha + n'_3 \right)^{-1}, \quad (4)$$

где n_3 — показатель преломления; t_3 — толщина ПОС до деформирования; n'_3 — показатель преломления ПОС после деформирования; γ_3 — угол наблюдения, отсчитываемый от нормали в оптической среде. Обозначения в выражениях (2)–(4) соответствуют обозначениям на рис. 4. Как видно из (4), величина w зависит от изменения параметров ПОС, поэтому необходимо исследовать их поведение в зависимости от деформаций и температуры среды.

Влияние температуры на изменение параметров ПОС. При оценке влияния изменения макроскопических параметров промежуточной оптически прозрачной среды на её показатель преломления и измеряемую разность фаз будем считать, что ПОС представляет собой тонкую пластину из изотропного диэлектрика, находящуюся в напряжённом состоянии из-за деформаций и нагрева.

Под действием упругих напряжений прозрачное изотропное вещество может стать оптически анизотропным. В результате фотоупругого эффекта происходит изменение формы индикатрисы показателя преломления ПОС от сферической

$$n_3^{-2} (x^2 + y^2 + z^2) = 1$$

к эллиптической

$$(n_3^{-2} + \Delta_1)x^2 + (n_3^{-2} + \Delta_2)y^2 + (n_3^{-2} + \Delta_3)z^2 + \Delta_4yz + \Delta_5xz + \Delta_6xy = 1, \quad (5)$$

$$\Delta_i = \sum_{j=1}^6 p_{ij} S_j, \quad (6)$$

где p_{ij} — элементы матрицы тензора упругооптических коэффициентов ($i, j = 1, 2, \dots, 6$), а S_j — элементы вектора-столбца из компонент тензора деформаций для изотропной среды

$$S_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} & \varepsilon_y & \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} & \gamma_{yz} & \varepsilon_z \end{pmatrix}, \quad \alpha, \beta = x, y, z,$$

в стандартных [5] укороченных обозначениях

$$(p)_{ij} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (p_{11} - p_{12})/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (p_{11} - p_{12})/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (p_{11} - p_{12})/2 \end{pmatrix}; \quad S_j = \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Параметры эллиптичности индикатрисы в соответствии с (6) представим выражениями

$$\Delta_1 = p_{11}\varepsilon_x + p_{12}(\varepsilon_y + \varepsilon_z); \quad \Delta_2 = p_{11}\varepsilon_y + p_{12}(\varepsilon_x + \varepsilon_z); \quad \Delta_3 = p_{11}\varepsilon_z + p_{12}(\varepsilon_x + \varepsilon_y); \quad (8)$$

$$\Delta_4 = \frac{1}{2}(p_{11} - p_{12})\gamma_{yz}; \quad \Delta_5 = \frac{1}{2}(p_{11} - p_{12})\gamma_{xz}; \quad \Delta_6 = \frac{1}{2}(p_{11} - p_{12})\gamma_{xy}.$$

В контактном голографическом интерферометре свет распространяется вдоль оси z , поэтому, пренебрегая малыми деформациями кручения $\gamma_{\alpha\beta}$, из третьего слагаемого в (5) получаем

$$\frac{1}{(n'_3)^2} = \frac{1}{n_3^2} + \Delta_3 = \frac{1}{n_3^2} + p_{11}\varepsilon_z + p_{12}(\varepsilon_x + \varepsilon_y), \quad (9)$$

откуда в линейном приближении имеем показатель преломления деформированной ПОС

$$n'_3 = n_3 - \frac{n_3^3}{2}\Delta_3 = n_3 - \frac{n_3^3}{2}[p_{11}\varepsilon_z + p_{12}(\varepsilon_x + \varepsilon_y)]. \quad (10)$$

Из выражений (1) и (4) видно, что малое изменение показателя преломления ПОС влияет на измеряемую разность фаз интерферирующих лучей, приводя к поправке интерференционных полос в единицах наблюдаемых порядков:

$$\Delta N \approx \frac{t_3}{\lambda} n_3^3 \Delta_3 \left(1 + \frac{1}{\cos \gamma_3}\right) = \frac{t_3 n_3^3}{\lambda} [p_{11}\varepsilon_z + p_{12}(\varepsilon_x + \varepsilon_y)] \left(1 + \frac{1}{\cos \gamma_3}\right). \quad (11)$$

Величина ΔN пропорциональна толщине t_3 слоя ПОС и обратно пропорциональна длине волны света λ ; зависимость ΔN от углов $\cos \gamma_3$ не существенна, поскольку они малы. В качестве промежуточной оптически прозрачной среды применяются резиноподобные полимеры. Оптические характеристики этих веществ обычно имеют значения $n_3 \sim 1-2$, $p_{11} \sim p_{12} \sim 0,1-0,3$ [6], поэтому при длине световой волны $\lambda = 0,6328$ мкм для слоя толщиной $t_3 = 1$ мм с продольными и/или поперечными деформациями $\varepsilon_z \sim \varepsilon_x \sim \varepsilon_y \sim 10^{-3}$ значения ΔN могут достигать величины $\Delta N \sim 0,1$ полосы.

Если нам известны не деформации, а приложенные к пластине ПОС силовые напряжения, то оценки их влияния производятся по аналогичной схеме. При этом для нахождения параметров эллиптичности индикатрисы вместо выражения (6) нужно воспользоваться выражением

$$\Delta_i = \sum_{j=1}^6 \pi_{ij} \Sigma_j,$$

где π_{ij} — элементы матрицы тензора пьезооптических коэффициентов ($i, j = 1, 2, \dots, 6$), а Σ_j — элементы вектора-столбца из компонент тензора напряжений для той же изотропной среды:

$$\Sigma_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix}, \quad \alpha, \beta = x, y, z.$$

Для такой среды матрица (π_{ij}) получается из матрицы $(p)_{ij}$ в (7), вектор-столбец Σ_j — из S_j в (7) и выражения для параметров Δ_i — из правых частей (8) заменами $p \rightarrow \pi$, $\varepsilon \rightarrow \sigma$, $\gamma \rightarrow \tau$ с отбрасыванием везде множителя $1/2 \rightarrow 1$ [5]. В пренебрежении же малыми сдвиговыми напряжениями $\tau_{\alpha\beta}$ имеем подобные (9)–(11) формулы, в правых частях которых следует произвести замену $p \rightarrow \pi$, $\varepsilon \rightarrow \sigma$. В частности, аналогично (11) будем иметь выражение для числа сдвинутых полос:

$$\Delta N \approx \frac{t_3}{\lambda} n_3^3 \Delta_3 \left(1 + \frac{1}{\cos \gamma_3}\right) = \frac{t_3 n_3^3}{\lambda} [\pi_{11} \sigma_z + \pi_{12} (\sigma_x + \sigma_y)] \left(1 + \frac{1}{\cos \gamma_3}\right). \quad (12)$$

Используемые характеристики упругой среды связаны между собой линейными соотношениями

$$p_{ij} = \sum_{k=1}^6 \pi_{ik} c_{kj}, \quad \pi_{ij} = \sum_{k=1}^6 p_{ik} s_{kj}$$

и законом Гука

$$S_i = \sum_{k=1}^6 s_{ik} \Sigma_k, \quad \Sigma_i = \sum_{k=1}^6 c_{ik} S_k,$$

где c_{ik} — константы упругой жёсткости, а s_{ik} — константы упругой податливости. По порядку величины обычно $s_{ik} \sim c_{ik}^{-1} \sim (0,1-10) \cdot 10^{-11}$ м²/Н.

Если деформации ПОС имеют тепловой характер, то их можно выражать через коэффициенты линейного расширения, характерные значения которых $\alpha \sim (1-10) \cdot 10^{-5}$ К⁻¹, что приводит к оценкам ΔN порядка 0,1 полосы.

При изменении температуры происходит также изменение индикатрисы, не связанное с деформациями и напряжениями, а определяемое температурным сдвигом резонансных частот и изменением формы полос поглощения в веществе. Это изменение характеризуется коэффициентами β_i температурного изменения показателя преломления при постоянной плотности ρ :

$$\beta_i = \left(\frac{\partial n_i}{\partial T} \right)_\rho$$

и может быть учтено добавкой $\Delta n_3 = \beta_3 \Delta T$ в формуле (10). Величины β_i обычно имеют значения $\pm(1-10) \cdot 10^{-6}$ К⁻¹ и возрастают с частотой света [7], т. е. $\Delta n_3 \sim 10^{-5}-10^{-3}$ при $\Delta T \sim 10-100$ К, а значит, при тех же $t_3 = 1$ мм и $\lambda = 0,6328$ мкм изменения также будут $\Delta N \sim 0,1$ полосы.

Экспериментальная оценка влияния изменения параметров ПОС на δ . *Влияние изменения линейных размеров базы интерферометра вследствие изменения температуры и подкрепляющего эффекта от ПОС.* Тестовые эксперименты с привлечением тензометрии и высокочувствительного муара показали наличие незначительного изменения базы интерферометра [8, 9]. Дополнительные технические решения в конструкции интерферометра [2], связанные с переходом от сплошной среды ПОС к среде в виде столбиков из ПОС, улучшили тепловой режим интерферометра посредством конвективного теплообмена в воздушных зазорах между поверхностью деформируемого объекта и голограммой и практически исключили воздействие деформаций поверхности объекта на стекло голограммы. Изгиб столбиков ПОС компенсирует влияние перемещений точек поверхности на жёсткую подложку голограммы. Этот технический приём повысил точность измерений путём уменьшения систематической погрешности, связанной с влиянием температуры и подкрепляющего эффекта.

Поляризационный метод контроля параметров ПОС. На поверхность объекта 7 (см. рис. 1) наносился зеркальный слой. Вместо голограммы 5 к объекту посредством ПОС закреплялось чистое стекло — подложка голограммы. Излучение от лазера 1 линейно поляризовано, вращением лазера вокруг оси достигалась различная ориентация поляризации падающего излучения. Реакция ПОС на механическое воздействие, деформирующее объект 7 (см. рис. 1) и ПОС в отражённом свете, наблюдалась с помощью фотокамер 9 (см. рис. 2), перед которыми устанавливались либо анализатор, либо пластинки, кратные $\lambda/4$ и $\lambda/2$. Эксперименты показали, что вплоть до предела упругих деформаций объекта 7 ПОС не проявляла себя как среда, обладающая поляризационным эффектом. Следовательно, вклад поляризационного эффекта ПОС в разность фаз интерферирующих лучей δ пренебрежимо мал.

Точность метода голографической интерферометрии и диапазон измеряемых перемещений с использованием накладного интерферометра исследованы в [10]. Методами сравнительного анализа измерения деформаций тензометрией, спекл-интерферометрией и голографического муара для одного и того же образца, подвергнутого осевому растяжению, установлено хорошее совпадение экспериментальных данных с расчётными значениями перемещений и деформаций. Расхождение не превышает 5 %. Диапазон измеряемых деформаций от 10^{-5} до 10^{-2} .

Примеры исследованных реальных изделий твердотельной электроники. *Исследование деформаций элементов конструкции ГИС СВЧ* проводилось после выполнения следующих технологических процессов [8]:

- 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 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 (синтетический каучук) закреплялась голограмма, на которой методом двух экспозиций регистрировалось формоизменение поверхности подложки после прошивки отверстий на ультразвуковой установке. На рис. 5, а, б представлены интерферограммы, отражающие перемещения w и u соответственно после прошивки одного из круговых отверстий. С использованием метода деструкции материала вычислялись остаточные напряжения в поликоровых подложках и были получены коэффициенты концентрации напряжений. Исследованы различные формы отверстий, их взаимная ориентация, расположение [11].

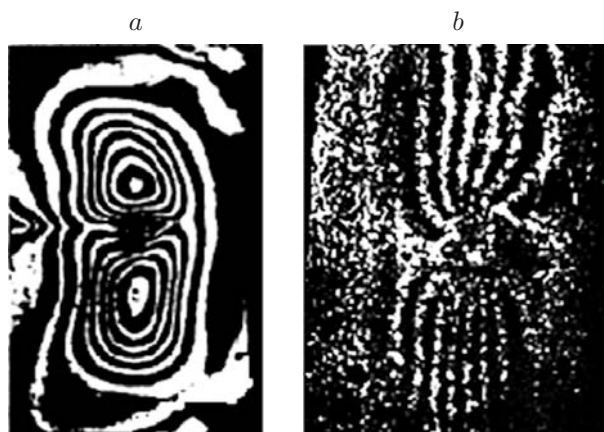


Рис. 5

Анализ процесса пайки керамических подложек к пьедесталу позволил оценить перераспределение остаточных напряжений в подложке и оптимизировать конструкцию изделий.

Изучено поле деформаций изделий ГИС СВЧ при однородном нагревании до 100 °С. Информация о термодформациях была учтена при разработке конструкции изделий.

Исследование 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, состоящие из никелированных ножек и колпачка. Ножка для корпуса представляла собой стальной фланец разной толщины (1,6, 1,6 и 1,0 мкм соответственно), к которому диффузионной сваркой присоединён медный растекатель толщиной 2,0 мм. К корпусу типа КТ-9Г прикреплена также диффузионной сваркой молибденовая шайба толщиной 0,7 мм.

Для решения задачи выбора конструкции корпуса на обратную сторону кремниевых пластин диаметром 100 мм со сформированными транзисторными структурами напылялись слои хрома (0,03–0,05 мкм), меди (7–8 мкм) и далее гальваническим методом осаждался слой сплава олово — висмут (9–12 мкм), после чего проводилось скрайбирование пластин и их ломка на единичные кристаллы размером 3 × 5 мм. Полученные таким образом кристаллы в колпаковой печи в атмосфере сухого водорода с помощью низкотемпературного припоя ПОС-61 припаивались к основаниям (ножкам) вышеупомянутых корпусов, затем на установке ЭМ-423М осуществлялась ультразвуковая сварка соединительных алюминиевых проводников диаметром 200 мкм с одной стороны с контактными площадками на кристаллах, а с другой — с выводами на ножках корпусов. К ножкам с установленными кристаллами с помощью кремнийорганической полимерной композиции СКТН прикреплялась голограмма, которая экспонировалась дважды: в начальном состоянии транзистора и в конечном после подачи напряжения.

В результате сопоставления полученных данных по тепловому сопротивлению и механическим напряжениям в кристаллах, рассчитанным на основании интерферограмм, для конструкций СИТ-транзисторов типа КП919 А, Б был выбран корпус КТ-9Б (рис. 6). Исследовались также технология припайки кристаллов к различным корпусам и качество посадки кристалла в зависимости от используемого припоя.

Низкотемпературный припой ПОС-61 применялся в виде пластин толщиной 30 мкм. Однако такая прокладка припоя, помещённая между ножкой и кристаллом, не обеспечивала необходимого качества припайки. Из полученных интерферограмм деформаций кристаллов было видно (см. рис. 6), что кристалл припаивался к ножке либо только одним краем, либо имел пустоты (непропаи) в паяном шве под кристаллом. Припайка кристаллов



Рис. 6

одним краем происходила в силу того, что выбранный температурный режим (температура нагрева и время выдержки) оказался недостаточным для получения сплошного паяного шва. Поэтому для обеспечения его сплошности было предложено изменить режим пайки и дополнительно ввести ещё одну стадию — предварительную выдержку сборочных узлов при температуре 300 °С в течение 20 мин, что позволило добиться равномерности шва под всей поверхностью кристаллов, но не решило проблемы пустот. По информации интерферограмм и из анализа паяных швов было выявлено, что образование непропаев связано с наличием окисной плёнки на поверхности припойных пластин. Этот недостаток был устранён при использовании припоя ПОС-61 в виде стержней, которые устанавливались рядом с кристаллом, чтобы после их расплавления в зону спаивания под кристаллом за счёт капиллярного эффекта затягивался чистый припой, а все окислы оставались за пределами кристалла.

Проведённые 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.

В конструкции СИТ-транзисторов КП919 А и КП919 Б использовались кристаллы больших размеров. В процессе отработки технологии пайки с помощью интерферометра установлено, что с ростом размера кристалла резко падает процент выхода годных приборов. Поэтому было предложено изменить конструкцию прибора и вместо одного кристалла размером 6,3 × 8,4 мм использовать два кристалла размером 6,3 × 4,2 мм, что дало возможность повысить процент выхода годных приборов на сборочных операциях.

Заключение. Эксперименты, проведённые в данной работе, позволили сделать вывод, что прикрепление фотопластинки к исследуемому объекту микроэлектроники с помощью низкомолекулярной, оптически прозрачной резиноподобной полимерной среды, остающейся изотропной и не изменяющей своих физических параметров при различных механических и тепловых воздействиях, дало возможность исключить влияние вибраций на элементы интерферометра, уменьшить вклад в фазовый набег перемещений, нормальных к поверхности объекта, и увеличить чувствительность интерферометра к внутриплоскостным перемещениям объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борыняк Л. А., Герасимов С. И., Жилкин В. А. Практические способы записи и расшифровки голографических интерферограмм, обеспечивающие необходимую точность определения компонент тензора деформаций // Автометрия. 1982. № 1. С. 17–24.

2. **Пат. 2406070 РФ.** Голографический интерферометр для измерения деформаций плоской поверхности элементов твердотельной электроники /Л. А. Боряняк, Ю. К. Непочатов. Опубл. 10.12.2010, Бюл. № 34.
3. **Островский Ю. И., Бутусов М. М., Островская Г. В.** Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1977. 336 с.
4. **Кибиткин В. В., Солодушкин А. И., Плешанов В. С., Лычагин Д. В.** Формирование единого изображения поверхности материала для измерения поля смещений и деформации // Автометрия. 2011. 47, № 4. С. 83–90.
5. **Най Дж.** Физические свойства кристаллов. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. 385 с.
6. **Физические** величины. Справочник /Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
7. **Мезенов А. В., Сомс Л. Н., Степанов А. И.** Термооптика твердотельных лазеров. Л.: Машиностроение, 1986. 198 с.
8. **Боряняк Л. А.** Оценка величины систематической погрешности измерения перемещений в накладных интерферометрах. г. Новосибирск, 1986. 9 с. Деп. в ВИНТИ 05.02.86, № 838-1386.
9. **Боряняк Л. А., Краснопевцев Е. А., Логинов А. В., Штыгашев А. А.** Точность определения перемещений в голографических интерферометрах // Автометрия. 1992. № 6. С. 62–74.
10. **Боряняк Л. А.** Точность измерения перемещений в накладных интерферометрах. г. Новосибирск, 1986. 6 с. Деп. в ВИНТИ 05.02.86, № 838-1386.
11. **Боряняк Л. А., Величко А. А., Непочатов Ю. К.** Применение метода голографической интерференции для оценки остаточных деформаций в подложках гибридных интегральных модулей СВЧ // Матер. Рос. науч.-техн. конф. «Информатика и проблемы коммуникаций». Новосибирск, 2000.

Поступила в редакцию 20 мая 2011 г.
