

УДК 621.383.4, 681.786, 681.787

ОПЕРАТИВНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОМПОНЕНТ ФОТОПРИЁМНИКОВ FLIP-CHIP ИК-ДИАПАЗОНА

© А. Р. Новоселов¹, П. А. Алдохин¹, А. Е. Маточкин²,
П. П. Добровольский¹, К. П. Шатунов¹

¹Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
«Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 2/1

²Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

E-mail: novoselov@oesd.ru
matochkin@iae.nsk.su

Исследована возможность применения автоколлимационного и интерференционного методов для неразрушающего оперативного контроля формы поверхностей фотоприёмников, чувствительных в инфракрасном диапазоне спектра и изготовленных путём гибридизации компонент (технология flip-chip). Методы позволяют контролировать формы поверхностей и стрелки прогиба. Этими методами были исследованы: формы поверхностей фрагментов кремниевых приборных пластин и матриц фоточувствительных элементов на подложках GaAs, формы поверхностей фотоприёмников на разных стадиях разрушения и в процессе термоциклирования.

Ключевые слова: фотоприёмное устройство, автоколлимационный метод, интерференционный метод.

DOI: 10.15372/AUT20190208

Введение. Контроль тепловых полей в инфракрасном спектральном диапазоне разных объектов — важная задача для выявления скрытых объектов. Основой приборов контроля служит фотоприёмник (ФП) ИК-излучения. Широко используются ФП, состоящие из двух специализированных больших интегральных схем (чипов): первая содержит массив фоточувствительных элементов (ФЧЭ) на базе узкозонных полупроводниковых материалов, вторая является кремниевым мультиплексором (КМ), обрабатывающим информацию с ФЧЭ. Фотоприёмники изготавливаются путём гибридизации (технология flip-chip), когда индиевые столбы связи на КМ и ФЧЭ совместно сдавливаются, деформируются и свариваются между собой, обеспечивая электрический и механический контакты между компонентами. Для работы ФП на основе узкозонных полупроводниковых материалов необходимо охлаждать их до низких температур. Для ФЧЭ в спектральном диапазоне от 10 мкм и выше рабочей является температура, близкая к температуре жидкого азота. При периодических охлаждениях (термоциклировании) в ФП регистрируется потеря изображения отдельных фоточувствительных элементов или их групп. В [1] приведены примеры разрыва связи в линейчатых ФП после их термоциклирования. Выделим некоторые причины разрыва связи в ФП.

Механическая прочность. В процессе или после гибридизации ФП применяют термический отжиг для сплавления индиевых столбов. Оптимальной температурой отжига является температура плавления индия или чуть выше (около 200 °С) [2]. Для ФЧЭ на основе плёнок теллурида, кадмия и ртути (КРТ), предназначенных для работы в спектральном диапазоне от 10 мкм и более, термический отжиг не применяют из-за возможного

изменения концентрации ртути в области фоточувствительных элементов. Следовательно, ФП для данного спектрального диапазона имеют меньшую механическую прочность. В [3] представлены результаты исследования усилий на отрыв КМ от ФЧЭ и описан способ повышения качества сварки индиевых столбов при гибридизации ФП без сплавления.

Различие коэффициентов теплового расширения материалов. При применении для фоточувствительных плёнок КРТ в качестве подложки GaAs, имеющего коэффициент термического расширения, заметно отличающийся от кремния (основы КМ), во время охлаждения возникают напряжения в ФП и, как следствие, происходит разрыв связи между ФЧЭ и КМ [4]. Фоточувствительные элементы на кремниевых подложках улучшают условия работы ФП, но в соответствии с литературными данными не гарантируют отсутствия разрыва связей при термоциклировании [5].

Неплоские формы поверхностей компонент ФП. При использовании неплоские чипы принудительно выпрямляются в процессе гибридизации, и в них возникают упругие деформации, релаксация которых во времени приводит к постепенному разрыву связей в ФП. В [3] описано, что при суммарном (в 8 мкм и более) искривлении формы поверхностей сдавливаемых КМ и ФЧЭ даже во время хранения наблюдается разрыв части соединений. Отметим, что измерения искривлений формы поверхностей проводились с помощью оптического тракта установки сборки flip-chip перед процессом гибридизации. Точность измерения недостаточно высокая, но важен сам факт влияния формы поверхностей ФЧЭ и КМ на причины разрыва связей в ФП. Таким образом, актуальным является выяснение формы поверхностей КМ и ФЧЭ до гибридизации ФП. Для этого необходимо определить методы, позволяющие быстро провести анализ формы поверхностей КМ и ФЧЭ. Лазерные профилометры являются достаточно медленными устройствами, поэтому требуются другие бесконтактные способы, позволяющие быстро и качественно оценить форму поверхностей. После сравнительного анализа существующих методов были выбраны два, имеющие хорошие перспективы: автоколлимационный и интерференционный методы исследования формы поверхностей.

Цель данной работы — исследование возможностей автоколлимационного и интерференционного методов как инструмента для выяснения формы поверхностей и измерения стрелок прогиба ФЧЭ, КМ и ФП.

Исследования были проведены на фрагментах кремниевых приборных пластин и отдельных ФЧЭ на GaAs-подложках и на ФП.

Теория. Фоточувствительные элементы и кремниевые мультиплексоры являются многослойными плёночными структурами на толстых (300–500 мкм) полупроводниковых подложках, в которых возникают условия для внутренних напряжений, вычисляемых по формуле Стони [6]. Изгиб пластины с покрытием при этом зависит от толщин и модулей упругости слоёв и подложки [7]. Если покрытия нанесены тонкими слоями на подложку, то вероятность возникновения биметаллического эффекта стремится к нулю, поскольку сжатие/расширение будет в значительной степени определяться наиболее толстым и твёрдым слоем подложки. Следовательно, в КМ и ФЧЭ не должны возникать условия для изменения формы поверхностей.

Другой причиной искривления формы поверхностей чипов может стать разность обработок планарной и обратной сторон приборной пластины [8]. Неодинаковая и неравноценная обработка обеих сторон подложки приводит к разным остаточным механическим напряжениям на её поверхностях, а значит, к искривлению. Фотоприёмник из таких компонент также имеет изгиб, величина которого зависит от разницы прогиба КМ и ФЧЭ.

При охлаждении ФП до рабочих температур ФЧЭ и КМ сжимаются в соответствии со своими температурными коэффициентами линейного расширения, дополнительно стремятся изогнуть ФП, но этому препятствует жёсткая посадка КМ в криостате. При мно-

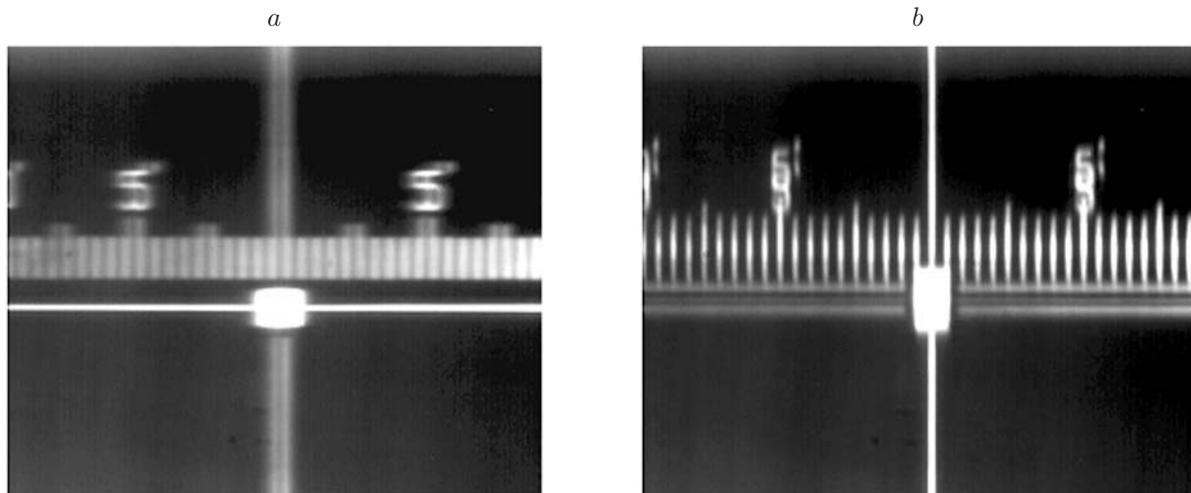


Рис. 1

гократных циклах охлаждения ФП может начаться его деформирование с постепенным разрывом индиевых контактов.

Методология проведения экспериментов. Исследуемые образцы закреплялись на держателях, позволяющих проводить исследования как автоколлимационным, так и интерференционным методом. Крепление осуществлялось индиевыми захватами с четырёх сторон без деформации кривизны поверхности образца. Образец ФП № 6 был закреплён на пьедестале в криостате с прозрачным окном для проведения исследования изменения формы поверхности при многократных охлаждениях до температур кипения жидкого азота.

Исследование автоколлимационным методом. Автоколлимационный метод измерения больших радиусов кривизны (R) хорошо известен и основан на зеркальном отражении лучей, идущих из центра кривизны полированной поверхности [9]. На поверхность исследуемого образца падает параллельный пучок лучей от автоколлимационной сетки, установленной в фокальной плоскости объектива автоколлимационной зрительной трубы (АЗТ), при этом перекрестие сетки подсвечивается источником света. Отражённые от поверхности исследуемого образца пучки лучей собираются в плоскости изображения объектива АЗТ. Измерения сводятся к определению разности отсчётов двух положений окуляра зрительной трубы, сфокусированной на бесконечно удалённый предмет и на автоколлимационное изображение перекрестия сетки, которое получают от поверхности исследуемого образца, помещённого перед объективом АЗТ. При этом фокусное расстояние объектива АЗТ должно быть известно [10]. Измерения радиуса кривизны формы поверхностей ФЧЭ, КМ и ФП проводились на экспериментальном измерительном стенде в нормальных климатических условиях, созданном на основе оптической скамьи типа ОСК-2 ЦЛ, на которую устанавливалась АЗТ. Для сохранения результатов измерения на персональном компьютере вместо окуляра АЗТ была установлена телевизионная камера.

Снимая значения отсчётов по шкале механизма фокусировки АЗТ, можно вычислить радиусы кривизны поверхностей исследуемых образцов в соответствии с формулами из [10].

Исходя из полученных значений радиусов кривизны R и размеров исследуемых образцов были определены стрелки прогиба в горизонтальном $H_{гор}$ и вертикальном $H_{верт}$ направлениях.

На рис. 1 даны автоколлимационные изображения перекрестия сетки, отражённые от поверхности одного из исследуемых образцов ФП (№ 6) при фокусировке в горизонтальном (а) и вертикальном (b) направлениях.

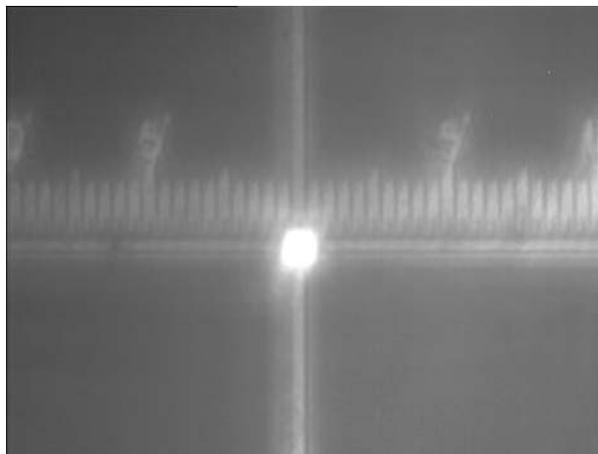


Рис. 2

Рис. 1 представлен для иллюстрации того, что невозможно добиться сфокусированного изображения перекрестия сетки в вертикальном и горизонтальном направлениях одновременно из-за различных радиусов искривления формы поверхностей.

Точность автоколлимационного метода при определении R зависит от погрешностей фокусировки трубы на автоколлимационное изображение, погрешностей отсчётов по шкале и нониусу механизма фокусировки АЗТ. Для плоской зеркальной поверхности относительная погрешность не превышает 1 % [9]. Для образца ФП № 6 была рассчитана относительная погрешность измерения R , которая составила 3,25 %.

Таким образом, результаты измерений для образца № 6 можно записать в следующем виде:

- для радиусов кривизны $R = R_{\text{ср}} \pm \sigma = 1,043 \times 10^4 \pm 340$ мм;
- для стрелок прогиба $h = h_{\text{ср}} \pm \sigma = 0,825 \pm 0,027$ мкм.

Различие значений погрешностей между плоским зеркалом и исследуемыми образцами объясняется тем, что на точность метода измерения влияет качество получаемого автоколлимационного изображения. Для примера на рис. 2 приведена фотография автоколлимационного изображения перекрестия сетки отражённого от поверхности исследуемого образца ФП № 7 при фокусировке в вертикальном направлении. Из-за сложного профиля исследуемой поверхности наблюдались несколько нефокусируемых линий и уширение основной, при фокусировке на которую проводились измерения.

Рис. 2 демонстрирует, что не на всех образцах можно получить резкое изображение перекрестия даже в одном направлении и это затрудняет возможность точного определения как радиуса кривизны, так и стрелки прогиба исследуемой поверхности.

Исследование интерференционным методом. Интерференционный метод контроля позволяет проводить прецизионные бесконтактные (неразрушающие) измерения формы поверхностей оптических изделий с нанометровой точностью. Точность и чувствительность интерференционного метода значительно повысились благодаря применению средств электронной регистрации интерференционной картины, автоматизации измерения координат интерференционных полос и последующей обработки данных. Метод основан на интерференции между опорной волной, отражающейся от эталонной поверхности, и объектной волной, отражающейся от поверхности контролируемой детали [11]. По возникающей интерференционной картине определяется карта ошибок волнового фронта. Ошибки волнового фронта линейно соотносятся с ошибками контролируемой поверхности. Сферические и плоские поверхности контролируются интерферометрами, построенными на основе схемы Физо [11].

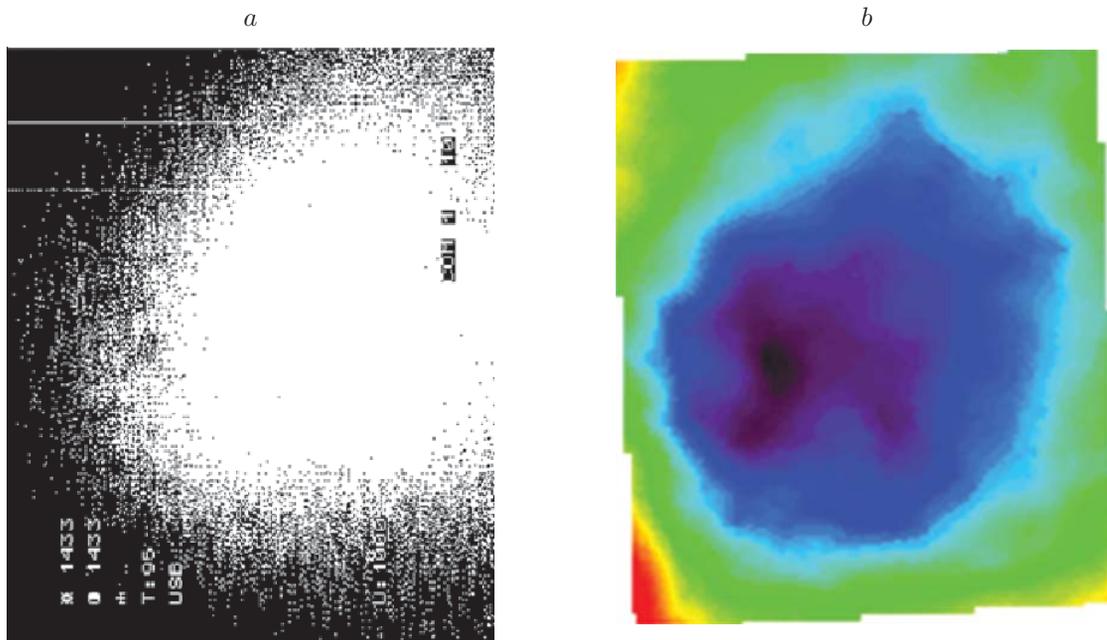


Рис. 3

Интерферометр Физо с фазовым сдвигом и программное обеспечение позволяют зарегистрировать пять независимых интерферограмм путём перемещения эталона пьезоэлектрическим приводом (время сканирования около 1 секунды). Восстановление формы волнового фронта (W) осуществляется по алгоритму

$$W_i = \tan^{-1} \left(\frac{2(I_2 - I_4)}{I_1 - 2I_3 - I_5} \right), \quad (1)$$

где I_n ($n = 1, \dots, 5$) — интенсивность светового потока в точке i интерферограммы n . Фазовый сдвиг между интерферограммами составляет $\pi/2$ [12].

После восстановления формы волнового фронта проводится сшивка фазовой функции, которая затем аппроксимируется с помощью полиномов Цернике. В итоге получается фазовая карта топологии поверхности контролируемого изделия, на которой отмечены рассчитанные величины: PV — максимальное отклонение (в нашем случае) от плоскости и RMS — среднеквадратическое отклонение. Данные величины измеряются в долях длины волны He—Ne-лазера (0,6328 мкм).

Экспериментальные результаты. Исследована форма поверхностей кремниевых пластин, ФЧЭ и ФП автоколлимационным и интерференционным методами измерения. Сначала рассмотрено искривление формы поверхностей пластин кремния (измерения проводились на планарной стороне) после разделения приборных пластин на фрагменты с разной степенью обработки обратной стороны и на чипах ФЧЭ (измерения проводились на тыльной поверхности GaAs-подложек). Результаты представлены в табл. 1. Во всех таблицах знак минус указывает, что поверхность выпуклая, отсутствие знака — поверхность вогнутая.

Вторая часть исследований посвящена вопросу выяснения форм поверхностей ФП со стороны GaAs-подложек ФЧЭ после неизвестного количества термоциклов. Результаты исследования приведены в табл. 2.

Для образца № 11 перед извлечением из криостата была зафиксирована карта электрических контактов между ФЧЭ и КМ. На рис. 3, *a* представлена карта электрических

Таблица 1

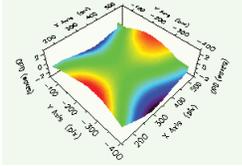
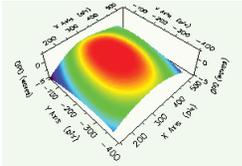
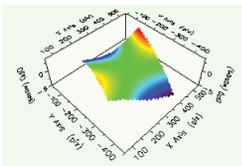
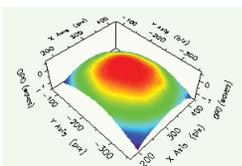
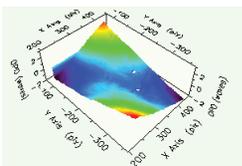
№ образца	Интерференционный метод			Автоколлимационный метод			
	Среднее значение стрелки прогиба, мкм		Примечание	Пиковое значение по образцу, мкм	Среднее значение стрелки прогиба, мкм		Примечание (форма поверхности)
	$H_{гор}$	$H_{верт}$			$H_{гор}$	$H_{верт}$	
0	—	—	Приборная пластина	—	-0,76	-0,62	Выпуклая приборная пластина кремния с планарной стороны, окно \varnothing 20 мм, тыльная сторона полирована, имеет сложную форму
1	2,14	-1,06	 Планарная сторона	3,41	3,10	-1,97	Вогнуто-выпуклая планарная сторона кремния, размер 20×20 мм, образец соответствует измеренной кривизне области на приборной пластине, имеет сложную форму
2	-3,18	-1,47	 Планарная сторона	4,81	-3,25	-0,5	Выпуклая, имеет сложную форму, размер 20×20 мм, тыльная сторона кремния шлифована
3	1,41	-2,43	 Планарная сторона	4,90	0,66	-1,96	Вогнуто-выпуклая, имеет сложную форму, размер 20×20 мм, тыльная сторона кремния шлифована
4	-0,70	-0,56	 Тыльная сторона GaAs	1,29	-1,09	-0,46	Чип ФЧЭ, выпуклая
5	0,41	0,52	 Тыльная сторона GaAs	3,16	—	—	Не удалось провести измерения, поверхность имеет сложную форму

Таблица 2

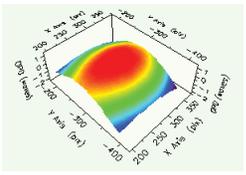
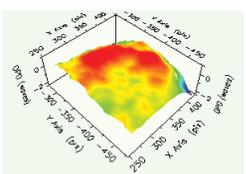
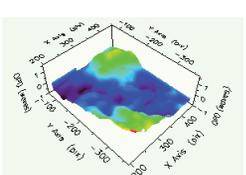
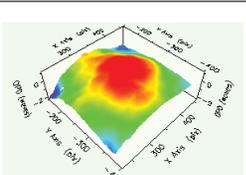
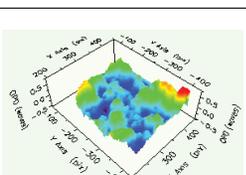
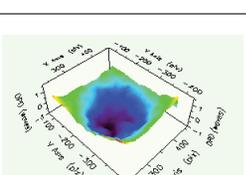
№ образца	Интерференционный метод			Автоколлимационный метод			Примечание (форма поверхности)
	Среднее значение стрелки прогиба, мкм		Примечание	Пиковое значение по образцу, мкм	Среднее значение стрелки прогиба, мкм		
	$H_{гор}$	$H_{верт}$			$H_{гор}$	$H_{верт}$	
6	-1,26	-0,44		1,82	-0,83	-0,76	Выпуклая
7	-0,55	-0,95		2,05	-0,15	0,44	Выпукло-вогнутая, имеет сложную форму
8	0,46	0,75		2,11	0,25	1,43	Вогнутая, имеет сложную форму
9	-1,09	-0,73		2,17	-1,28	-1,07	Выпуклая, имеет сложную форму
10	0,35	0,25		0,83	0,38	0,25	Вогнутая, имеет сложную форму
11	0,71	0,79		1,61	0,57	0,65	Вогнутая

Таблица 3

№ экспе- римен- та	Комнатная температура				Жидкий азот			
	Среднеарифметические значения				Среднеарифметические значения			
	$R_{гор} \times 10^4$, мм	$R_{верт} \times 10^4$, мм	$H_{гор}$, мкм	$H_{верт}$, мкм	$R_{гор} \times 10^4$, мм	$R_{верт} \times 10^4$, мм	$H_{гор}$, мкм	$H_{верт}$, мкм
1	-1,006	-2,097	0,8560	0,7081	-0,9583	-1,032	0,8986	1,439
2	-1,051	-2,086	0,8196	0,7119	-0,9538	-1,255	0,9028	1,183
3	-1,037	-1,787	0,8303	0,8309	-0,9961	-1,493	0,8645	0,995
4	-1,062	-1,779	0,8111	0,8347	-1,024	-1,499	0,8410	0,991
5	-1,076	-1,679	0,8003	0,8844	-1,027	-1,460	0,8389	1,017
ΔR и ΔH	0,07	-0,418	-0,0597	0,1763	0,0687	0,428	-0,0597	-0,422

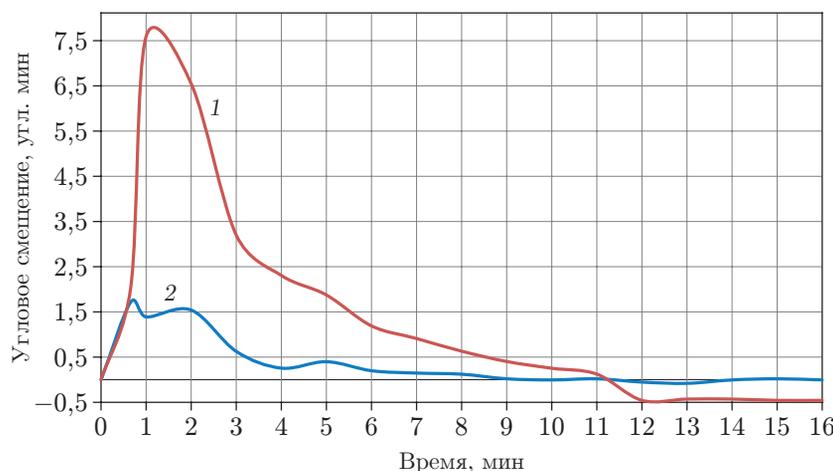


Рис. 4

контактов между ФЧЭ и КМ, на рис. 3, *b* — исследованная интерференционным методом форма поверхности ФЧЭ в ФП. Тёмные точки на рисунке 3, *a* — электрическая связь между отдельными фоточувствительными элементами и КМ отсутствует, светлые точки — связь существует. Рис. 3 иллюстрирует разрыв связи на левых краях ФЧЭ с КМ (согласно карте электрических соединений), и эти же края максимально загнуты вверх при исследовании формы поверхности ФП с тыльной стороны ФЧЭ интерференционным методом.

Были исследованы изменения формы поверхностей ФЧЭ в ФП № 6 в криостате при нескольких циклах охлаждения и изменение наклона поверхности ФП при охлаждении автоколлимационным методом, результаты представлены в табл. 3 и на рис. 4. В табл. 3 приведены результаты исследования изменения кривизны формы поверхностей ФП № 6 при пяти циклах охлаждения до рабочих температур (77 К) в криостате. На рис. 4 показаны графики изменения угла наклона поверхности ФП № 6 по координатам *Y* (кривая 1) и *X* (кривая 2) при начальной стадии охлаждения и до температуры 77 К.

Таким образом, максимальный угол отклонения пьедестала в криостате с ФП от исходного составил $X_{max} = 1,5'$ и $Y_{max} = 7,6'$.

Обсуждение методов измерения. Отличие измеренных значений стрелок прогиба при интерференционном и автоколлимационном методах в табл. 1 и 2 объясняется тем, что координаты центральной части участка исследуемой поверхности при измерении во вто-

ром случае близки, но не совпадают с координатами центральной части того же участка в первом случае.

Другой причиной различий в значениях стрелок прогиба является более высокая погрешность измерений радиусов кривизны автоколлимационным методом из-за размытости изображения сетки на некоторых исследуемых образцах, что снижает точность вычислений.

Интерференционный и автоколлимационный методы позволяют выяснить форму поверхностей КМ, ФЧЭ и ФП и оценить величину стрелки прогиба поверхности. Интерференционный метод даёт изображение формы поверхности с высокой точностью, однако автоколлимационный метод позволяет исследовать изменение радиусов кривизны ФП в процессе охлаждения.

Обсуждение результатов измерения. Формы поверхностей компонент и самих ФП исследованы автоколлимационным и интерференционным методами.

В процессе исследования фрагментов кремниевых приборных пластин, ФЧЭ и ФП выяснено, что их форма отличается от плоской.

1. Существуют два варианта искривления фрагментов пластин кремния и ФЧЭ: в форме седла (выпукло-вогнутые поверхности) и купола (выпуклые). Причём два образца, взятые из одной приборной пластины случайным образом (образцы № 2 и 3), имели разные варианты искривления поверхности.

2. Изгиб поверхности образца практически всегда имеет сложную форму. При применении автоколлимационного метода наличие таких изгибов фиксируется как присутствие дополнительных изображений перекрестия сетки, имеющих меньшую интенсивность.

3. Для случая выпукло-вогнутых поверхностей изгиб может не совпадать с углами фрагментов (образцы № 1, 3).

4. При разделении приборной пластины на фрагменты наблюдается дополнительное искривление поверхностей относительно исходного искривления пластины (образец № 1).

5. Не выявлено сильного влияния степени обработки тыльной (обратной) стороны приборной пластины на искривление фрагментов после вырезания, но полированная тыльная поверхность позволяет исследовать форму поверхности КМ после разделения приборной пластины на микросхемы.

6. Для ФП с вогнутой формой поверхности (образец № 11) наиболее вероятен отрыв индиевых столбов связи на углах.

7. Для образца ФП № 6, имеющего выпуклую форму поверхности ФЧЭ в ФП, при охлаждении наблюдается увеличение стрелки прогиба. Однако численные значения стрелки прогиба поверхности при каждом повторном охлаждении уменьшаются (после пяти циклов изменение составило $\Delta H_{\text{гор}} \approx -0,06$ мкм, $\Delta H_{\text{верт}} \approx -0,42$ мкм). Отметим, что после нагрева до комнатной температуры стрелки прогиба не восстанавливаются до исходных значений, т. е. происходит, возможно, постепенное выпрямление поверхности исследуемого образца при термоциклировании.

Причины такого поведения ФП при термоциклировании в рамках данной работы не выяснены, однако есть вероятность, что:

— из-за разности коэффициента расширения компонент ФП регистрируются увеличение стрелки прогиба и постепенная деформация индиевых столбов связи в ФП;

— из-за конструкции охлаждающего пьедестала криостата, где хладагент подходит к центральной его части, а края по длинной стороне зафиксированы на внутренней части корпуса, возникает градиент температуры.

Вопрос предельных значений стрелок прогиба формы поверхностей компонент ФП, пригодных для качественной сборки, в данной работе не рассматривается, так как требует дополнительных исследований.

В результате были выявлены только два варианта искривления формы поверхностей ФЧЭ и КМ: седловидная и куполообразная. Подбор комплектующих с учётом данного факта, вероятно, может улучшить качество ФП при гибридизации компонент одинаковой формы.

Необходимость закрепления образцов на держателях из-за горизонтального расположения экспериментальных установок затрудняет контроль их кривизны, но при создании вертикальных установок данная задача будет устранена.

Большой проблемой является измерение кривизны КМ с неполированной обратной стороной, а измерения на планарной стороне невозможны из-за существования рельефа из компонент микросхемы.

Заключение. В данной работе рассмотрены оперативные неразрушающие методы контроля формы поверхностей ФП, изготовленных путём гибридизации (технология flip-chip), и их компонент. Автоколлимационный и интерференционный методы позволяют контролировать формы поверхностей и стрелки прогиба ФП, ФЧЭ и КМ.

Этими методами были исследованы формы поверхностей: фрагментов приборных пластин (Si и ФЧЭ на подложке GaAs) и ФП после сборки, в процессе термоциклирования и на разных стадиях разрушения фрагментов кремниевых приборных пластин и ФЧЭ.

Проведённые исследования по применению известных методов измерения кривизны объектов показали их эффективность в технологии изготовления ФП. Неоспоримым лидером является интерференционный метод исследования. В то же время автоколлимационный метод позволяет оценивать как форму, так и величину прогиба исследуемых образцов с невысокой точностью.

Применение указанных методов исследования формы поверхностей компонент ФП улучшит качество их работы.

Благодарности. В исследованиях реализовано оборудование Центра коллективного пользования «Спектроскопия и оптика» в ИАиЭ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новоселов А. Р., Косулина И. Г. Оперативный метод контроля сборок flip-chip // Автометрия. 2009. 45, № 6. С. 119–122.
2. Merken P., Joohn J., Zimmermann L., van Hoof C. Technology for very dense hybrid detector arrays using electroplated indium solder bumps // IEEE Trans. Adv. Pack. 2003. 26, N 1. P. 60–64.
3. Новоселов А. Р., Косулина И. Г., Клименко А. Г. и др. Повышение механической прочности гибридных фотоприёмников на основе гетероэпитаксиальных слоёв кадмий—ртуть—теллур // Автометрия. 2013. 49, № 1. С. 111–118.
4. Новицкий Л. А., Кожевников И. Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. М.: Машиностроение, 1975. 216 с.
5. Greiner M., Davis M., Devitt J. et al. State of the art in large format IR FPA development at CMC Electronics Cincinnati // Proc. SPIE. 2003. 5074. P. 60–71.
6. Сироткина Н. М., Сироткина Н. С. Расчёт внутренних напряжений в покрытиях на основе теории изгиба двухслойной балки // Математика. Механика. 2002. № 4. С. 222–229.
7. Clyne T. Residual stresses in surface coatings and their effects on interfacial debonding // Key Eng. Mater. (Switzerland). 1996. 116–117. P. 307–330.
8. Готра З. Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник. М.: Радио и связь, 1991. 528 с.
9. Креопалова Г. В., Лазарева Н. Л., Пуряев Д. Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.

10. **Афанасьев В. А.** Оптические измерения. М.: Высш. шк., 1981. 229 с.
11. **Оптический** производственный контроль /Под ред. Д. Малакара. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
12. **Malacara D., Servin M., Malacara Z.** Interferogram Analysis for Optical Testing. Dekker, 1998. P. 169–245.

Поступила в редакцию 23.01.2019

После доработки 18.02.2019

Принята к публикации 21.02.2019
