

УДК 621.383.4/5.029.71./73

ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ГИБРИДНЫХ ФОТОПРИЁМНИКОВ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЁВ КАДМИЙ—РТУТЬ—ТЕЛЛУР

А. Р. Новоселов, И. Г. Косулина, А. Г. Клименко,
Н. А. Валишева, В. В. Васильев, С. А. Дворецкий

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
E-mail: novoselov@isp.nsc.ru*

Представлены результаты исследований, направленных на повышение прочности гибридных фотоприёмных устройств (ФПУ) на основе гетероэпитаксиальных слоёв кадмий—ртуть—теллур. Показано, что отжиг кремниевых мультиплексов при температуре 157 °С в потоке водорода в вакууме изменяет форму индиевых столбов на полусферическую, выравнивает их механические свойства по пластине. Контролируемое восстановление естественной кривизны пластин кремниевых мультиплексов и массивов фоточувствительных элементов в гибридных фотоприёмных устройствах при температуре 120 °С увеличивает срок их эксплуатации. Предложена последовательность технологических операций по гибридизации ФПУ, обеспечивающих повышение величины усилия на отрыв фоточувствительных элементов от кремниевых мультиплексов не менее 75 % в сравнении с ФПУ со сплавленными индиевыми столбами.

Ключевые слова: фотоприёмное устройство, гетероэпитаксиальные слои кадмий—ртуть—теллур, индиевые столбы.

Введение. Основой приборов контроля тепловых полей в инфракрасном спектральном диапазоне является фотоприёмное устройство (ФПУ). Оно может состоять из одного чипа с фоточувствительными элементами (ФЧЭ) и электронной схемой обработки фотосигналов или из двух чипов (особенно для многоэлементных ФПУ): первый содержит массив ФЧЭ (МФЧЭ), а второй — электронную схему обработки фотосигналов, например кремниевый мультиплексор (КМ), электрически связанный со всеми ФЧЭ. При этом гибридизация ФПУ осуществляется разными способами. Так, если КМ и МФЧЭ расположены рядом в одной плоскости, то связь между ними реализуется через сапфировую пластину, на которой нанесены металлические шины межсоединений, или поэлементно через индиевые столбы [1] методом перевёрнутого кристалла (технология flip-chip), так называемым методом групповой «холодной» сварки, который является базовым для многоэлементных ФПУ. Во время гибридизации КМ с МФЧЭ индиевые столбы совместно сдавливаются, деформируются и свариваются между собой, обеспечивая механическую прочность ФПУ в процессе эксплуатации. Одна из основных причин нарушения прочности ФПУ — наличие на поверхности индиевых столбов оксидной плёнки, обладающей низкими адгезионными и пластическими свойствами. Сварка индиевых столбов происходит только в тех местах, где при сдавливании нарушается целостность оксидного слоя и чистый индий выдавливается из объёма столба навстречу ответному. По данным работы [2] сварка столбов с плоскими поверхностями осуществляется только в узкой краевой области. Улучшение механической прочности ФПУ достигается термическим отжигом обычно при температуре около 200 °С [3], при котором происходит взаимодиффузия индия в месте сварки столбов и повышается качество сварки.

Термический отжиг при температуре плавления индия $156,7^\circ\text{C}$ и выше не применяют для ФПУ на основе плёнок кадмий—ртуть—теллур (КРТ) из-за увеличения подвижности ртути и изменения её концентрации в области ФЧЭ. Результаты предлагаемой работы показывают, что ухудшения вольт-амперных характеристик (ВАХ) МФЧЭ на основе плёнок гетероэпитаксиальных слоёв p -типа $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (ГЭС КРТ) на GaAs-подложках при температурах отжига 90°C в течение 24 мин и 135°C в течение 12 мин не наблюдается [4]. Отметим, что с уменьшением температуры отжига ФПУ снижается его механическая прочность.

Целью данной работы является поиск способа повышения качества сварки индиевых столбов в ФПУ на основе ГЭС КРТ при температурах ниже 135°C .

Методика проведения экспериментов. Гибридизация КМ и МФЧЭ осуществлялась на безлюфтовом прессе со столиком, подогреваемым до температур 150°C [5]. Подробное описание технологии гибридизации крупноформатных ФПУ дано в [6]. Все ФПУ после гибридизации подвергались термическому отжигу при температуре 120°C в течение 12 мин. На основе прессы также было реализовано устройство разрушающего контроля качества сварки индиевых столбов в ФПУ отрывом МФЧЭ от КМ при температуре 110°C [7]. Размеры индиевых столбов оценивались с применением растрового электронного микроскопа (РЭМ). Исследование пластических свойств индиевых столбов проводилось с помощью устройства, конструкция которого описана в [8]. Индиевые столбы изготавливались методом обратной литографии. Циклическое охлаждение ФПУ осуществлялось на лабораторной установке в диапазоне температур от 300 до 77 К. Время охлаждения составляло 11 мин, время нагрева — 4 мин. Для экспериментов использовались массивы индиевых столбов на сапфирах форматом 128×128 и 320×256 с шагом 30 мкм, диаметром столбов около 14 мкм и высотой 7 мкм, а также КМ и МФЧЭ форматом 4×288 и 128×128 .

Экспериментальные результаты. *Исследование качества сварки индиевых столбов.* Экспериментально установлено, что для качественной сварки индиевых столбов между собой необходимо прикладывать усилие, при котором изменение диаметра столбов (деформация) составляет не менее 30 %. Исследования деформационных (пластических) свойств разных индиевых столбов показали, что при прочих равных условиях пластическое течение начинается при меньших давлениях на столбы, у которых отношение высоты к диаметру больше и которые являются более крупнозернистыми [9–11]. Наилучшие результаты по пластичности получены нами для пирамидоподобных столбов. Однако наблюдаются различия деформационных свойств даже на одном МФЧЭ. На рис. 1 представлены кривые давления (механического напряжения) в зависимости от деформации индиевых столбов [12] (r — радиус индиевого столба, находящегося под воздействием давления).

Для демонстрации разброса деформационных свойств индиевых столбов даны только самые крайние кривые, измеренные на одном МФЧЭ форматом 128×128 . Исходная высота столбов около 6 мкм и радиус 10 мкм (r_0). Индиевый столб является наиболее пластичным, когда индий начинает деформироваться необратимо (пластически течь) при приложении к нему давления около $1,36 \text{ кг/мм}^2$ (тёмные треугольники), и наиболее «жёстким», когда пластическое течение индия начинается при давлении выше $2,9 \text{ кг/мм}^2$ (светлые треугольники). Давление около 3 кг/мм^2 будет критическим для ГЭС КРТ, так как при более высоких давлениях наблюдается деградация материала подложки [13].

Разброс деформационных свойств индиевых столбов по площади МФЧЭ затрудняет выбор оптимального давления для гибридизации, поскольку существуют ограничения как по допустимому давлению на ГЭС КРТ, так и увеличению радиуса индиевого столба при гибридизации (вероятности касания соседних индиевых столбов). В результате при гибридизации большеформатных ФПУ, когда все столбы сдавливаются одновременно, наиболее жёсткие столбы не обеспечивают качественную сварку.

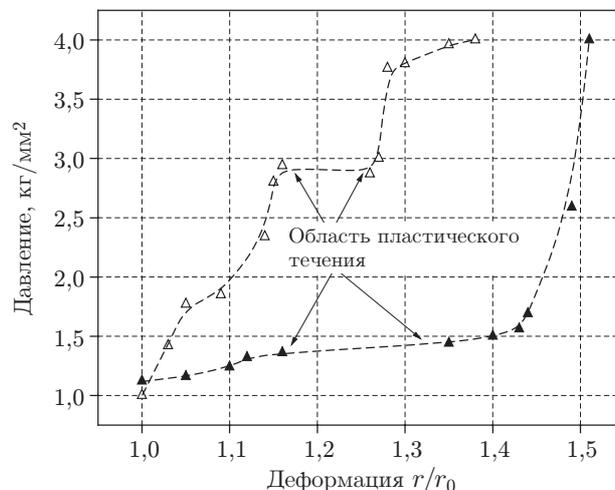


Рис. 1

Рис. 2 демонстрирует влияние поверхностной плёнки на качество сварки индиевых столбов. На рис. 2, *a* показан столб, у которого сварка с ответным столбом произошла по всей площади поверхности, а на рис. 2, *b* — отсутствие сварки между столбами. Выдавленный из единственной трещины индий не встретился с индием из ответного столба. На рис. 2, *c* приведён случай, когда сварка между столбами произошла только на части поверхности.

Разброс деформационных свойств столбов, покрытых оксидной плёнкой, по пластине в значительной степени зависит от условия их формирования, в частности от состава остаточных газов в вакууме во время напыления плёнок индия.

Сравнение между собой твёрдости столбов, сформированных из слоёв индия, нанесённых в вакууме с применением масляных (две установки) или безмасляных (одна установка) насосов, показало, что использование первых ведёт к формированию более жёстких индиевых столбов [14]. Степень их деформации при сдавливании меньше. Диаметры таких столбов при этом увеличиваются на 19 и 28 %, тогда как для столбов из индия, «напылённого» на установке с безмасляным насосом, — на 34 % (при исходном диаметре 30 мкм и высоте 7 мкм). Сдавливание осуществлялось воздействием груза, вес которого при пересчёте на один столб составлял около 323 мг и время воздействия 10 мин.

Качество групповой сварки в ФПУ повышается, если нарушить целостность оксидной плёнки на индиевых столбах перед гибридизацией КМ и МФЧЭ. При применении механического способа нарушения целостности с помощью колеблющейся в потоке воздуха вольфрамовой проволоки диаметром 8–10 мкм [15] усилие на отрыв МФЧЭ от КМ формата 128 × 128 составляет около 27 ± 1 Н [5], а максимальное усилие на отрыв после отжига ФПУ при температуре плавления индия 157 °С — около 36 Н [5]. Таким образом, механическое нарушение целостности оксидной плёнки на индиевых столбах обеспечивает сварку с силой на отрыв, незначительно меньшей (на 25 %) в сравнении со сплавлением столбов. Внешний вид области разрыва индиевых столбов аналогичен рис. 2, *a*.

Механическое нарушение целостности оксидной плёнки в МФЧЭ и КМ перед гибридизацией является достаточно трудоёмким процессом особенно при увеличении формата ФПУ. Качественная сварка для большеформатных ФПУ достигается удалением оксидов с поверхности индиевых столбов на КМ путём обработки столбов отжигом при температуре около 157 °С в потоке водорода в вакууме [16]. Столбы при этом оплавляются до полусферы (рис. 3).

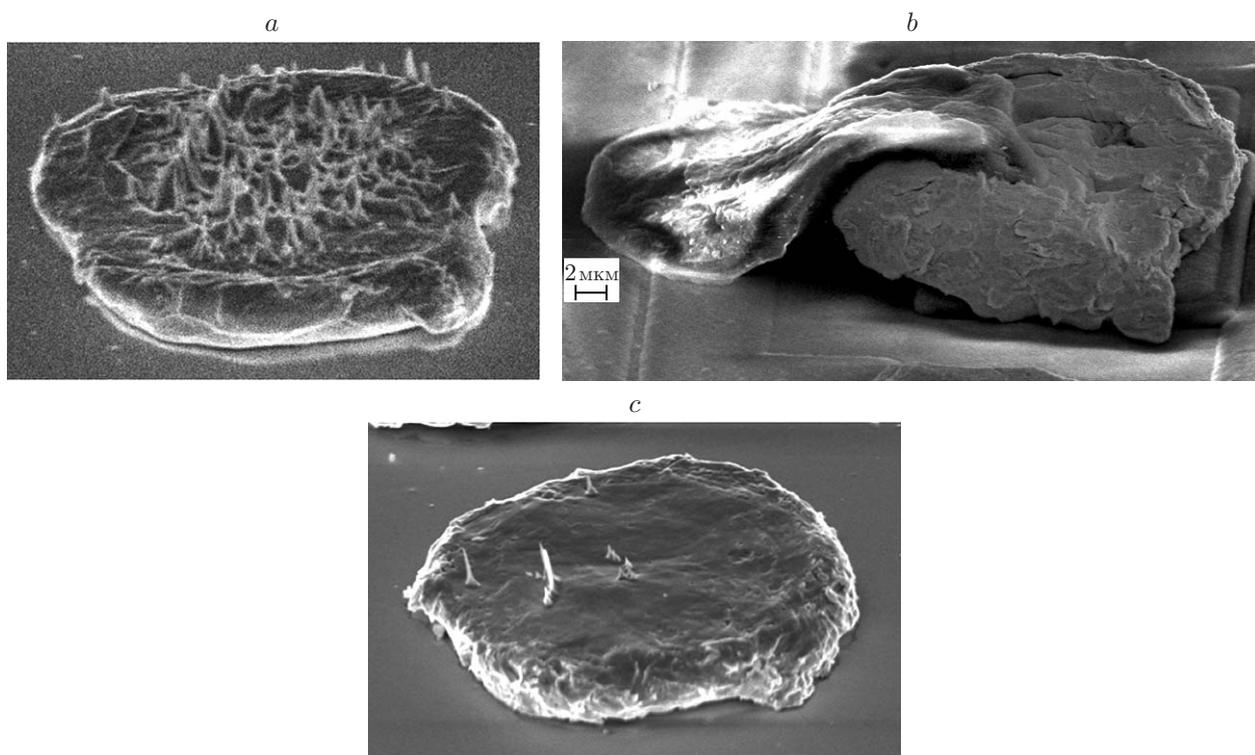


Рис. 2

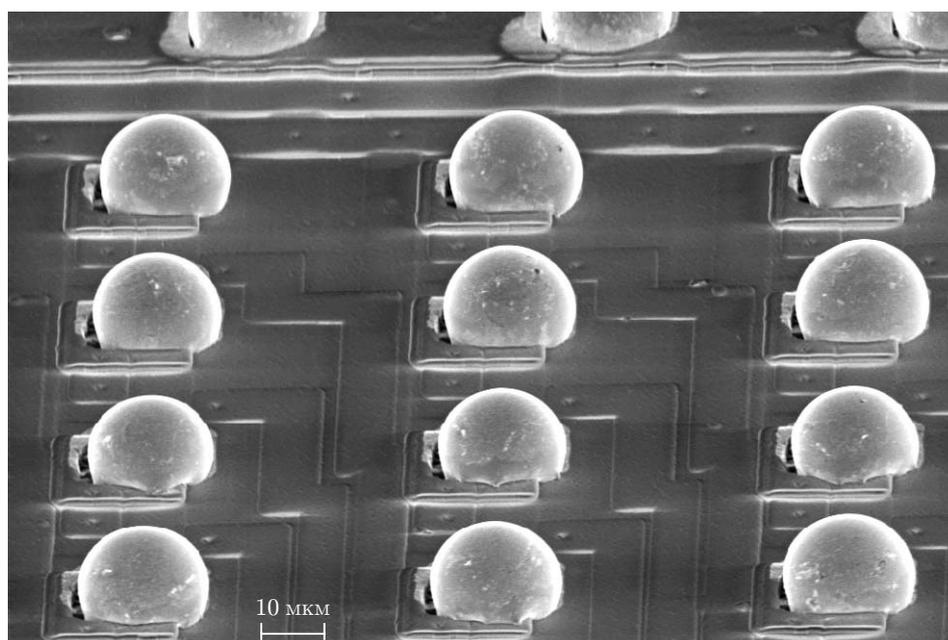


Рис. 3

Водород при данной температуре не проникает в объём столба (что наблюдается при 350 °С и выше) и не приводит к формированию полостей в объёме столба за счёт образования нестабильных соединений InH_3 , делающих столб «рыхлым» и не обеспечивающим механическую прочность ФПУ [17].

Обработка столбов на КМ отжигом при температуре около 157 °С в вакууме в потоке водорода выравнивает механические свойства индиевых столбов, сформированных из плёнок индия, напылённых на разных вакуумных установках. При воздействии груза около 323 мГ при пересчёте на один столб и выдержке в течение 10 мин все индиевые столбы деформировались одинаково. Диаметр образовавшейся при сдавливании плоской поверхности столбов составил примерно 17 мкм независимо от условий напыления слоя индия.

Сравнение прочности сварки ФПУ с плоскими и оплавленными столбами показало, что индиевые столбы на МФЧЭ должны иметь плоские вершины, а на КМ — оплавленные. Качество сварки при этом не хуже, чем при механическом способе нарушения целостности поверхностных плёнок на индиевых столбах (около 27 ± 1 Н для ФПУ форматом 128×128 после отжига при температурах 120 °С). Растровая электронная микроскопия показала, что оплавленные индиевые столбы на КМ из-за незначительной площади первичного контакта вдавливаются в плоскую поверхность ответных индиевых столбов МФЧЭ, деформируя их поверхность и эффективно разрушая целостность оксидной плёнки. По мере дальнейшего сдавливания область растрескивания оксидных плёнок расширяется и охватывает всю поверхность индиевого столба на КМ и МФЧЭ.

Отжиг гибридных ФПУ на основе ГЭС КРТ. Качественная сварка индиевых столбов в ФПУ является необходимым, но недостаточным условием для сохранения их работоспособности при многократных охлаждениях во время эксплуатации вследствие искривления чипов после операции разделения КМ и МФЧЭ. В процессе гибридизации ФПУ происходит принудительное распрямление КМ и МФЧЭ и, следовательно, в зависимости от исходной кривизны внесение в них упругих напряжений. Экспериментально определено, что для матричных ФПУ форматом 128×128 с размерами столбов 20×20 мкм усилие для распрямления чипов и сварки столбов КМ с МФЧЭ может превышать 56 Н. Если после гибридизации ФПУ суммарное искривление поверхностей КМ и МФЧЭ превышает 8 мкм, наблюдается (при хранении) постепенный разрыв части соединений из-за восстановления естественной кривизны КМ и МФЧЭ. Для таких КМ и МФЧЭ необходимо контролируемо вернуть естественную кривизну в ФПУ без нарушения электрической связи между ними. Кривизна чипов восстанавливается отжигом при температуре не ниже 120 °С. При этом индий становится достаточно пластичным и разрыва соединения между КМ и МФЧЭ не происходит.

На рис. 4 представлены экспериментальные данные зависимости давления, соответствующего началу деформации (пределу текучести) чистого массивного индия (99,99 %), от температуры, измеренные по методу Бринеля (тёмные квадраты). Светлыми квадратами показано давление, при котором начинается деформация наиболее пластичных пирамидоподобных индиевых столбов [9–11]. Время выдержки под нагрузкой составляло около 5 мин. На рисунке видно соответствие давлений начала деформации наиболее пластичных индиевых столбов и массивных образцов чистого индия, пределы текучести которых практически совпадают. При увеличении температуры с 20 до 120 °С предел текучести индия уменьшается в 2,7 раза, что является, как показали наши исследования, достаточным для снятия упругих напряжений в ФПУ без разрушения связи между ФЧЭ и КМ.

Контролируемое восстановление естественной кривизны КМ и МФЧЭ без разрыва связи между индиевыми столбами зависит от метода гибридизации ФПУ.

1. Разработанным в Институте физики полупроводников СО РАН лабораторным методом [6] непосредственно после сборки ФПУ осуществляется его нагрев. При достижении

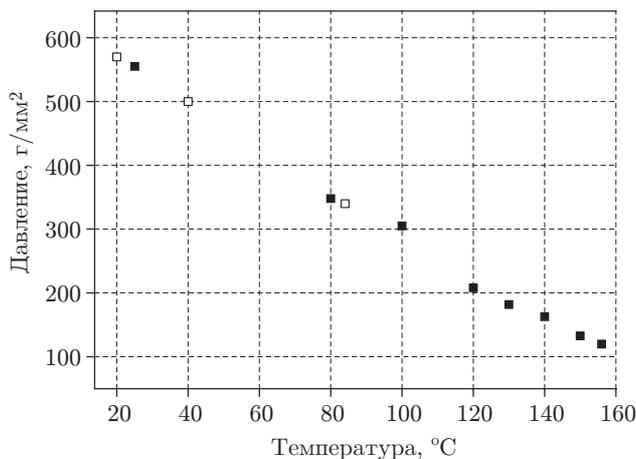


Рис. 4

температуры 80 °С снимается половина нагрузки, при 120 °С нагрузка снимается полностью, и через 10–15 мин нагрев прекращается. Экспериментально определено, что этого времени достаточно для восстановления естественной кривизны МФЧЭ и КМ. (ФПУ снимается со столика при температуре менее 50 °С.)

2. Для промышленных установок сборки методом flip-chip по окончании гибридации отключается вакуумное удержание КМ и МФЧЭ. Выбирается режим работы установки, когда положение нижнего столика фиксируется по координате Z (режим удержания расстояния между нижним и верхним столиками). Оба столика нагреваются до температуры 120 °С, и нижний столик с ФПУ медленно опускается на 5–10 мкм. Через 10–15 мин нагрев столиков отключается. Фотоприёмное устройство удаляется из установки после остывания нижнего столика до температуры 50 °С.

Экспериментально показано, что применение способа контролируемого восстановления естественной кривизны КМ и МФЧЭ увеличивает количество циклов охлаждения ФПУ без разрыва связей в нём. Для сравнения прочности использовались ФПУ форматом 4×288 , собранные на промышленной установке типа М9 в следующих условиях:

- 1) без отжига,
- 2) с последующим отжигом при температуре 90 °С в течение 10 мин в фиксированном положении ФПУ,
- 3) после гибридации ФПУ способом контролируемого восстановления естественной кривизны КМ и МФЧЭ.

Для всех ФПУ целостность оксидных плёнок на индиевых столбах перед гибридацией механически нарушалась. Перед испытанием на циклические охлаждения было проверено, что все МФЧЭ электрически связаны с КМ. После 150 циклов охлаждения в ФПУ, собранном в условиях 1, полностью нарушилась связь между КМ и МФЧЭ в 36 % каналов, в 27 % каналов частично. В ФПУ, собранном в условиях 2, полное разрушение связи между КМ и МФЧЭ наблюдалось в 25 % каналов и частичное в 35 % каналов. В ФПУ с восстановленной кривизной КМ и МФЧЭ разрыва связи зарегистрировано не было. На рис. 5 представлены топограммы связи МФЧЭ с КМ для этого образца ФПУ до (а) и после (б) 150 циклов охлаждения. Фоточувствительные элементы форматом 4×288 сформированы в p -типе ГЭС КРТ ($x = 0,22$) на GaAs-подложках с ориентацией $\{310\}$ [18]. Массив ФЧЭ состоит из 288 каналов по четыре фотодиода в каждом. Рисунок наглядно демонстрирует, что применение способа контролируемого восстановления естественной кривизны КМ и МФЧЭ на основе ГЭС КРТ на кремниевых подложках обеспечивает долговременную

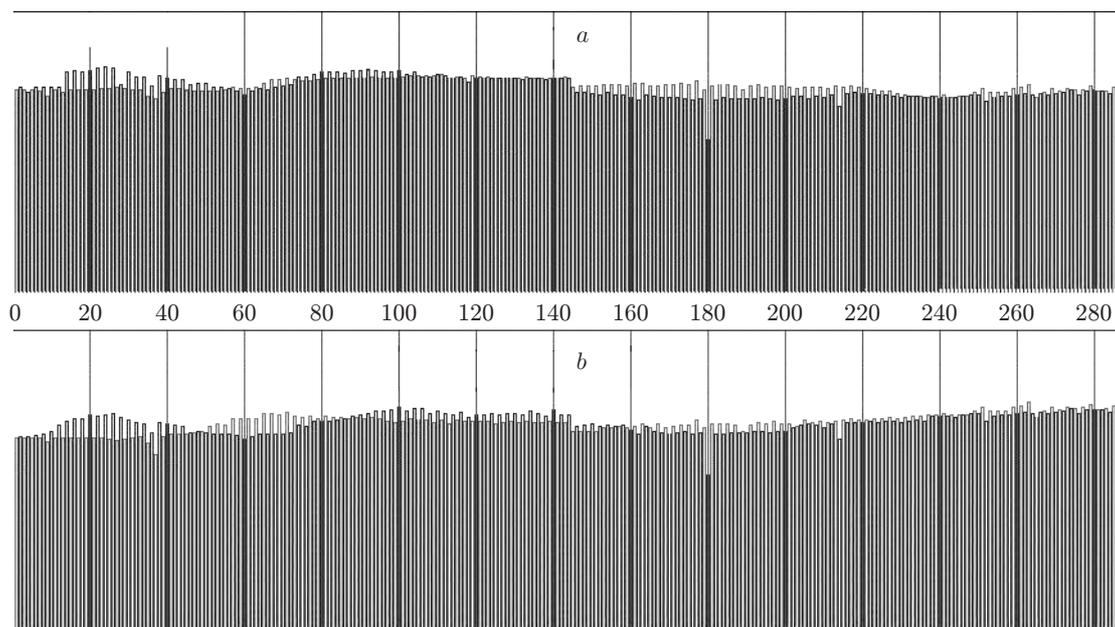


Рис. 5

работу ФПУ. Собранные в условиях 3 ФПУ выдерживают не менее 1250 циклов охлаждения от комнатной до температуры жидкого азота без разрыва связи между КМ и МФЧЭ на кремниевой подложке и без изменения вольт-ваттной чувствительности во всех 288 каналах ФПУ [19].

Заключение. В данной работе достигнуто повышение прочности большеформатных гибридных фотоприёмников на основе ГЭС КРТ последовательным выполнением следующих технологических операций.

1. Индиевые столбы на кремниевых мультиплексорах обрабатывались перед сборкой в потоке водорода в вакууме при $157\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом происходило выравнивание их механических свойств и изменение формы столбов на полусферическую. Разрушение целостности оксидных плёнок в процессе вдавливания полусферических столбов в столбы на массиве фоточувствительных элементов, имеющих плоскую поверхность, позволило добиться сварки по всей площади столба.

2. Стандартная процедура гибридизации ФПУ осуществлялась при комнатной температуре на промышленных установках или лабораторным способом.

3. Низкотемпературный отжиг ФПУ (при температуре $120\text{ }^{\circ}\text{C}$) проводился способом контролируемого восстановления естественной кривизны КМ и МФЧЭ без разрыва связи между индиевыми столбами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chamonal J. P., Mottin E., Audebert P. et al. Long linear MWIR and LWIR HgCdTe arrays for high resolution imaging // Proc. SPIE. 2000. **4130**. P. 452–462.
2. Курышев Г. Л., Ковчавцев А. П., Вайнер Б. Г. и др. Медицинский тепловизор на основе матричного ФПУ 128×128 , работающий в диапазоне спектра $2,8\text{--}3,05\text{ }\mu\text{m}$ // Автометрия. 1998. № 4. С. 5–12.
3. Merken P., Joohn J., Zimmermann L., van Hoof C. Technology for very dense hybrid detector arrays using electroplated indium solderbumps // IEEE Trans. Adv. Packaging. 2003. **26**, N 1. P. 60–64.

4. Новоселов А. Р., Предеин А. В., Косулина И. Г., Васильев В. В. Оптимизация температуры сварки индиевых столбов в методе групповой сборки многоэлементных ФП // Прикладная физика. 2010. № 1. С. 73–77.
5. Новоселов А. Р., Косулина И. Г., Клименко А. Г. и др. Индиевые столбы для flip-chip технологии матричных фотоприемных устройств на основе пленок CdHgTe, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Изв. вузов. Сер. Материалы электронной техники. 2008. № 3. С. 60–63.
6. Клименко А. Г., Недосекина Т. Н., Карнаева Н. В. и др. Технология сборки крупноформатных инфракрасных фотоприемных модулей на индиевых микростолбах // Оптический журнал. 2009. 76, № 12. С. 63–68.
7. Новоселов А. Р., Косулина И. Г. Оперативный метод контроля сборок flip-chip // Автометрия. 2009. 45, № 6. С. 119–122.
8. Клименко А. Г., Войнов В. Г., Новоселов А. Р. Устройство и метод измерения пластической деформации образцов микронных размеров // Приборы и техника эксперимента. 1996. № 6. С. 119–121.
9. Клименко А. Г., Войнов В. Г., Новоселов А. Р. и др. Особо пластичные индиевые микростолбы для матричных ФПУ на CdHgTe // Автометрия. 1998. № 4. С. 105–112.
10. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона /Под ред. С. П. Синецы. Новосибирск: Наука, 2001. 375 с.
11. Клименко А. Г., Недосекина Т. Н., Новоселов А. Р. и др. Индиевые микростолбы для холодной сварки инфракрасных фотоприемных устройств при минимальных давлениях // Наука производству. 2001. № 12. С. 50–53.
12. Войнов В. Г., Клименко А. Г., Недосекина Т. Н., Новоселов А. Р. Пластические свойства индиевых микростолбов. Проблема контактирования на КРТ // Автометрия. 1996. № 4. С. 126–129.
13. Romashko L. N., Klimenko A. G., Ovsyuk V. N. et al. Influence of dislocation on MBE Cd_{0.22}Hg_{0.78}Te/GaAs photodiodes // Phys. Stat. Sol. (a). 2001. 186, N 3. P. 445–452.
14. Новоселов А. Р., Косулина И. Г., Паулиш А. Г. и др. Оплавленные индиевые столбы в технологии сборки ИК ФПУ // Прикладная физика. 2010. № 5. С. 77–80.
15. Паулиш А. Г., Бикташов А. М., Кузьмин Н. Б. и др. Формирование и обработка индиевых столбов для сборки матричных фотоприемных устройств методом перевернутого кристалла // Sensor Electron. and Microsyst. Technol. 2007. № 3. С. 60–65.
16. Пат. 2392690. РФ. Способ формирования контактного столба многоконтактного гибридного соединения /А. Р. Новоселов, Н. Б. Кузьмин, Н. А. Валишева, И. Г. Косулина. Оpubл. 20.06.2010, БИ № 17. С. 892.
17. Реми Г. Курс неорганической химии. М.: ИЛ, 1963. Т. 1. 920 с.
18. Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Liberman V. I. et al. Molecular beam epitaxy of high quality Hg_{1-x}Cd_xTe films with control of the composition distribution // Journ. Cryst. Growth. 1996. 159, Is. 1–4. P. 1161–1166.
19. Якушев М. В., Брунев Д. В., Варавин В. С. и др. Гетероструктуры CdHgTe на подложках Si(310) для инфракрасных фотоприемников // Автометрия. 2009. 45, № 4. С. 23–31.

Поступила в редакцию 5 мая 2012 г.