

УДК 621.382.049.77.002

Оптимизация температуры сварки индиевых столбов в методе групповой сборки многоэлементных ФП

А. Р. Новоселов, А. В. Предеин, И. Г. Косулина, В. В. Васильев

*Результаты исследований по оптимизация температуры сварки индиевых столбов в методе групповой сборки многоэлементных фотоприемных модулей ИК ФПУ позволили разработать технологию сборки при температуре 120 °С и давлении менее $1,56 \cdot 10^7$ Н/м² методом перевернутого кристалла фоточувствительных матриц *n-p*-переходов в гетероэпитаксиальном слое HgCdTe *p*-типа без ухудшения электрофизических характеристик *n-p*-переходов и усилием на разрыв фотоприемных модулей размерностью 128×128 элементов 2675 г при диаметре столба 20 мкм.*

PACS: 85.60.Bt

Ключевые слова: фотоприемник, фотоприемный модуль, столб, индий, температура.

Введение

Принцип построения современных систем видеонаблюдения в инфракрасном (ИК) спектральном диапазоне длин волн основан на создании гибридного фотоприемного модуля (ФПМ), состоящего из мультиплексора и фотоприемной матрицы. Преобразование изображения в электрические сигналы выполняет фотоприемная матрица, содержащая, например, *n-p*-переходы на основе узкозонных полупроводниковых материалов, чувствительных в требуемом диапазоне длин волн. Обработку сигналов с фотоприемной матрицы и коммутацию их на выход ФПМ осуществляет кремниевая микросхема — мультиплексор.

Сборку осуществляют методом перевернутого кристалла (технология *flip-chip*), когда каждый *n-p*-переход фотоприемной матрицы (ФМ) соединяется со своей входной ячейкой кремниевой микросхемы (КМ) через индиевые столбы связи. Индиевые столбы формируются на ФМ и КМ. Для получения надежного механического и электрического соединений индиевых столбов связи в ФПМ в процессе сборки происходит воздействие давления и температуры. Влияние температуры (максимальная температура воздействия — температура плавления индия 157 °С) не вызывает изменений электрофизических свойств КМ. Узкозонные полупроводниковые материалы более чувствительны

как к температурному, так и механическому воздействию.

В данной статье представлен материал по тепловому воздействию на *n-p*-переходы в ГЭС МЛЭ КРТ пленках (гетероэпитаксиальные слои Cd_xHg_{1-x}Te *p*-типа, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии при $x = 0,22$) и влиянию нагрева на *n-p*-переходы после механического воздействия в процессе сборки гибридного ФПМ.

Влияние давления и отжига при температурах 70—90 °С на электрофизические характеристики *n-p*-переходов в КРТ

Работ по термической стабильности материала КРТ недостаточно для определения допустимой температуры во время сборки. Так, в работе [1] описаны эксперименты по температурному отжигу объемного КРТ при температуре 70 °С, показавшие, что длительное воздействие температуры не влияет на вольт-амперные характеристики (ВАХ) *n-p*-переходов, сформированных имплантацией бора. Исследования, описанные в работе [2], показали, что отжиг фотодиодов при температуре 80 °С в течение 40 ч, созданных реактивным ионным травлением жидкофазного КРТ, также не влияет на ВАХ фотодиодов. В работе [3] описаны исследования, позволившие авторам утверждать, что стабильность электрофизических параметров диодов, изготовленных ионной имплантацией бора в гетероэпитаксиальные слои МЛЭ КРТ, не ухудшается при отжигах (90 °С) в вакууме в течение 54 ч. Было отмечено, что дифференциальное сопротивление диодов увеличилось почти на порядок, фототок — в 2,5 раза. Контрольный образец, хранившийся в течение 4 лет без температурной обработки, не показал существенного изменения темновых фототоков.

Новоселов Андрей Рудольфович, научный сотрудник.
Предеин Александр Владиленович, ведущий инженер.
Косулина Ирина Григорьевна, ведущий инженер.
Васильев Владимир Васильевич, старший научный сотрудник.
Институт физики полупроводников СО РАН.
Россия, 630090, г. Новосибирск, просп. Ак. Лаврентьева, 13.
Тел. (783) 333-10-79. Факс (783) 330-90-29.
E-mail: novoselov@thermo.isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 11 декабря 2008 г.

Существенное увеличение динамического сопротивления и снижение темновых токов при кратковременных отжигах (1,5 ч) и температурах 120 и 150 °С отражены и в работе [4], однако дальнейший отжиг приводит к ухудшению характеристик диодов.

Авторы объясняют такое поведение характеристик диодов постепенным перемещением *n-p*-переходов вглубь образца с последовательным переходом из области, которая содержит большое число рекомбинационных ловушек, вызванных ионной имплантацией в область с меньшим числом ловушек и далее в область, имеющую большое число дислокаций.

Авторы работы [3] определили, что при отжиге в вакууме происходит увеличение дифференциального сопротивления и фототока, а также уменьшение темнового тока диодов, сформированных имплантацией бора в МЛЭ КРТ. Эти процессы они связывают с частичным отжигом радиационных дефектов, генерированных ионной бомбардировкой.

Входящая в состав КРТ подвижная ртуть при температурном воздействии также влияет на параметры *n-p*-переходов [5]. При отжиге после нанесения диэлектриков (SiO_2 и Si_3N_4) при температурах более 110 °С ртуть диффундирует в полупроводник с границы полупроводник — диэлектрик, заполняя вакансии и при дальнейшем отжиге — заполняет междуузлия, что приводит к ухудшению параметров приповерхностных слоев КРТ.

Влияние механического воздействия на изменение параметров *n-p*-переходов в МЛЭ КРТ, описанных в работе [6], показывает, что пленки КРТ выходят из области упругих деформаций при комнатной температуре и давлениях более $4 \cdot 10^7$ Н/м², вызывая резкое нарастание концентрации дислокаций. Изменение ВАХ фотодиодов начинает заметно сказываться при давлениях более $4 \cdot 10^7$ Н/м².

Определение оптимальной температуры сборки ФПМ

Известно, что увеличение температуры в процессе сборки гибридного ФПМ позволяет получать более качественную сварку между индиевыми столбами связи КМ и ФМ. Проведенные авторами исследования зависимости усилия на разрыв ФПМ от температуры во время сборки показали, что усилие на разрыв ФПМ размерностью 128×128 элементов повышается с 1609 гс при сборке без нагрева до 2675 гс при температуре сборки 120 °С.

Таким образом, область температур 100—156 °С, которая наиболее благоприятна для сборок ФПМ методом переворнутого кристалла при примене-

нии индиевых столбов связи, совершенно не исследована при использовании ФМ на основе МЛЭ КРТ. Не исследовано воздействие одновременно тепловых и деформационных нагрузок на ФМ в процессе сборки ФПМ.

Для проведения экспериментов по температурному воздействию на электрофизические параметры *n-p*-переходов, сформированных в МЛЭ КРТ, были использованы ФМ размерностью 4×288 элементов. Исследовались ВАХ диодов ФМ до и после отжига. Отжиг проводили при разных температурах: при 90 °С в вакууме 2 ч, при 100 и 120 °С — на воздухе в течение 4 ч. Было также исследовано долговременное влияние температуры 120 °С в течение 15 и 48 ч. Исследовалось влияние процесса сборки ФПМ на изменение электрофизических характеристик *n-p*-переходов в МЛЭ КРТ, когда через индиевые столбы связи прикладывалось рабочее давление, необходимое для сборки при температурах 90 и 135 °С, и через 10 мин линейки фотодиодов нагревались до требуемой температуры.

Отжиг при температурах 90 °С (2 ч), 100 °С (4 ч) и 120 °С (4 ч) показал, что темновой ток *n-p*-переходов при рабочем напряжении смещении –200 мВ существенно не изменялся, однако наблюдалось сужение плотности распределения по темновому току *n-p*-переходов. На рис. 1 показана типичная гистограмма распределения темновых токов *n-p*-переходов при рабочем смещении –200 мВ до и после отжига. Видно, что распределение плотности распределения по темновому току *n-p*-переходов сужается после отжигов как со стороны больших, так и со стороны меньших токов, т. е. повышается однородность распределения по току. Аналогичная зависимость наблюдалась, когда авторы имитировали сборки при температурах 90 °С (прикладываемая сила 1950 гс, выдержка 24 мин при заданной температуре) и 135 °С (прикладываемая сила 975 гс, выдержка 12 мин при заданной температуре). На рис. 2, а, б представлены темновые вольт-амперные зависимости *n-p*-переходов до и после имитации сборки ФПМ при температурах 90 и 135 °С. Диапазон изменения темновых ВАХ *n-p*-переходов также сужался, как видно из графиков.

Таким образом, в отношении основной массы *n-p*-переходов МЛЭ КРТ можно утверждать, что отжиг способствует улучшению темновых вольт-амперных зависимостей *n-p*-переходов. Вместе с тем часть *n-p*-переходов деградирует после отжига в диапазоне температур 90—135 °С. На рис. 2, в, г показано такое изменение ВАХ *n-p*-переходов после температурного воздействия 90 и 135 °С.

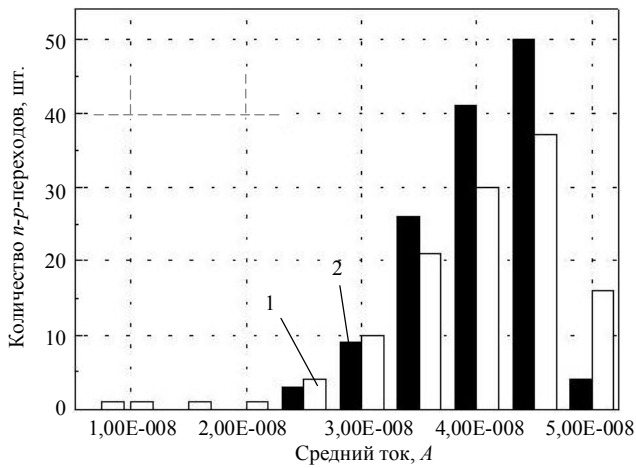


Рис. 1. Гистограмма темновых токов *p-n*-переходов ФМ размерностью 4×288 при рабочем смещении -200 мВ до и после отжига 4 ч на воздухе при температуре 120 °С. До отжига измерялся 91 *p-n*-переход на ФМ, после отжига — 132:
1 — исходные токи; 2 — токи после отжига

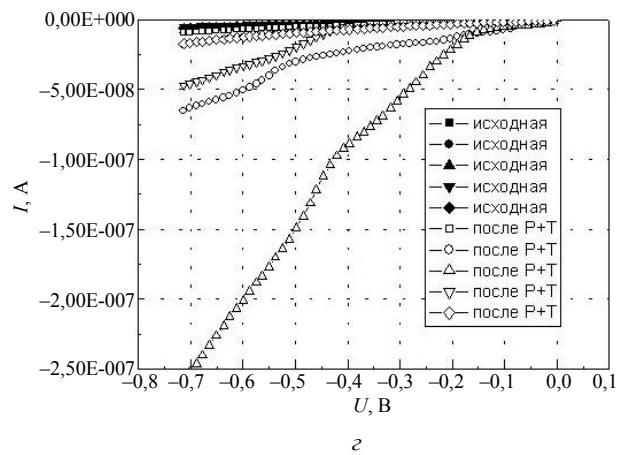
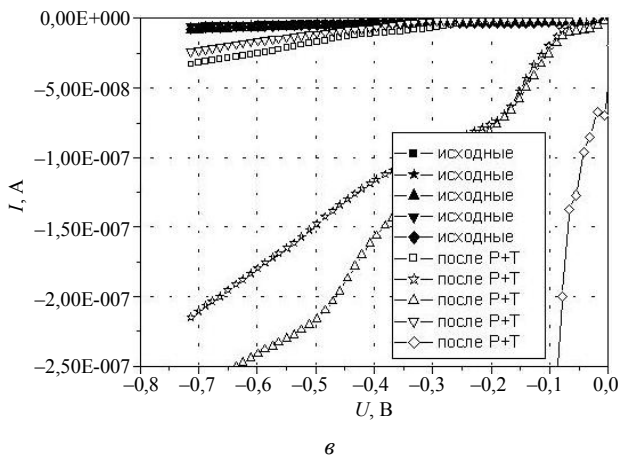
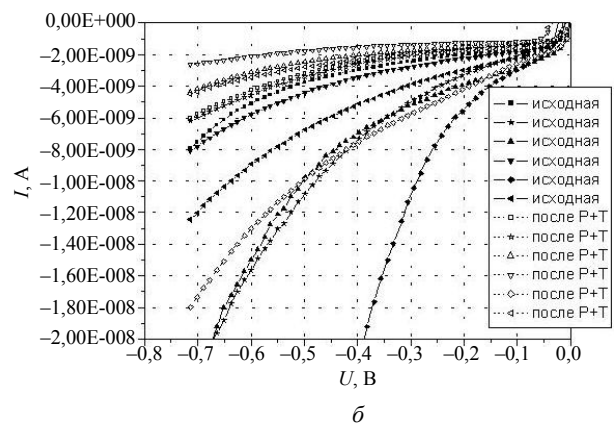
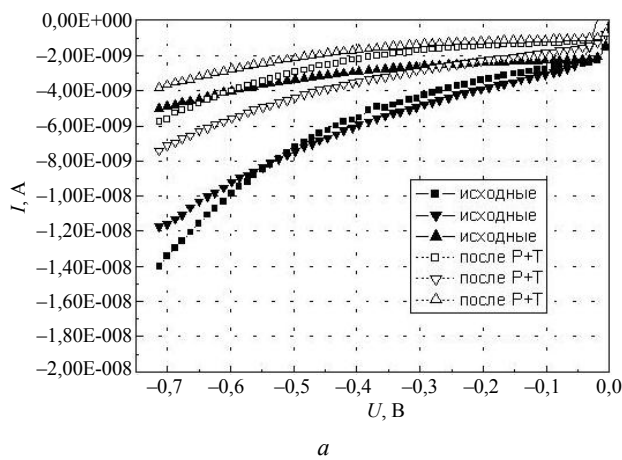


Рис.2. ВAX *p-n*-переходов при температурах 90 и 135 °С:

P+T — после воздействия давления и температуры при имитации процесса сборки ФПМ. Для температуры 90 °С (а, в), прикладываемая сила — 1950 гс; для температуры сборки 135 °С (б, з) — 975 гс; а, б — до и после имитации режимов сборки ФПМ; в, з — отрицательные изменения ВAX после имитации процесса сборки ФПМ

Исследование долговременного воздействия температуры на изменения ВAX *p-n*-переходов показало, что для тех из них, для которых воздействие температуры не приводит к их деградации, наблюдается положительная тенденция уменьшения темнового тока и увеличения фототока (фонового тока). На рис. 3 представлены изменения

темнового тока и фонового тока *p-n*-переходов в зависимости от длительности отжига для одной из трех ФМ, на которых исследовалось влияние долговременного отжига. Для данного эксперимента были взяты ФМ размерностью 288×4 сразу после изготовления и с выдержкой один год. Отжиг производился при температуре 120 °С на воздухе, ФМ

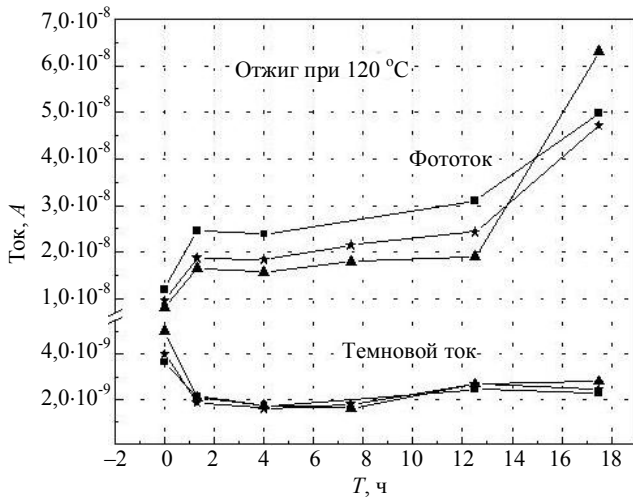


Рис. 3. Изменения темнового и фототока для трех диодов при напряжении смещения -150 мВ от времени отжига при 120 °С

ставили в печь при комнатной температуре, и в течение 30 мин нагревали до 120 °С. После отжига в течение заданного времени и выдержки при

комнатной температуре в течение 1—48 ч измеряли ВАХ n - p -переходов (по шесть штук из каждой ФМ) при температуре жидкого азота. Следующий отжиг производился не ранее чем через сутки после измерений. Изменение темновой и фоновой засветок ВАХ n - p -переходов после отжига при 120 °С через 1 ч 20 мин; 4 ч; 7 ч 30 мин; 12 ч 30 мин; 17 ч 30 мин представлен на рис. 4. Цифрой 25 обозначен один из диодов, который имел изначально не характерную для фотодиодов ВАХ, но через 17 ч 30 мин отжига при температуре 120 °С она восстановилась.

Таким образом, продолжительный отжиг для основной массы n - p -переходов ФМ приводит к тому, что разброс ВАХ n - p -переходов ФМ уменьшается, область начала мягкого пробоя сдвигается в сторону больших напряжений и наблюдается увеличение тока при фоновой засветке фотодиода. Отжиг n - p -переходов ФМ при 120 °С в течение 48 ч не привел к деградации их вольт-амперных зависимостей.

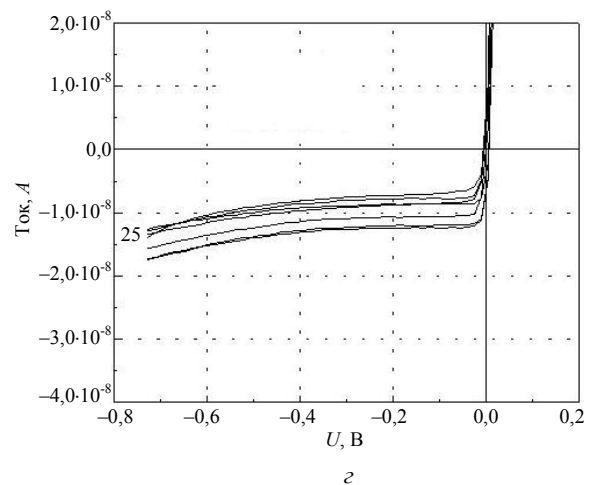
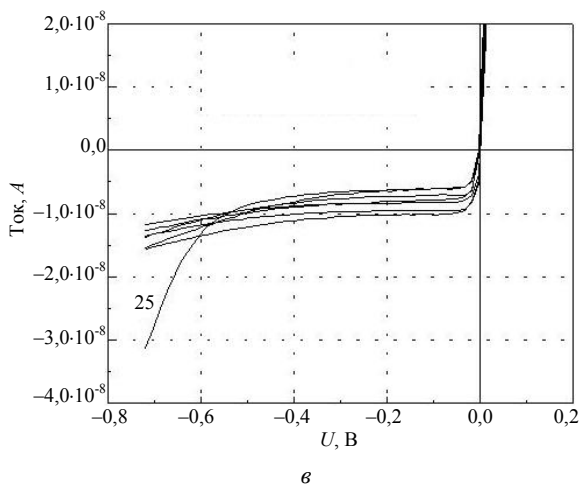
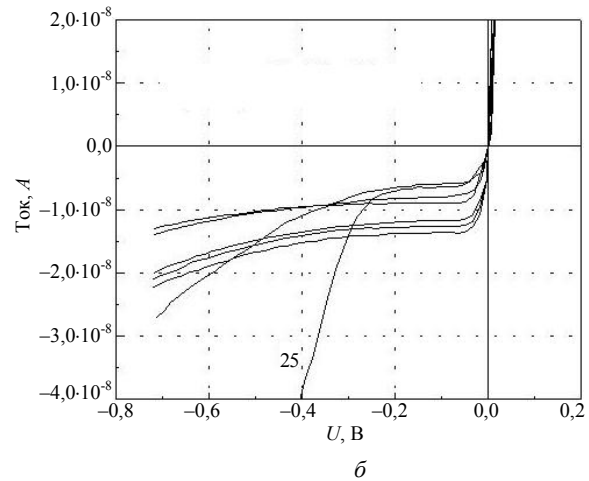
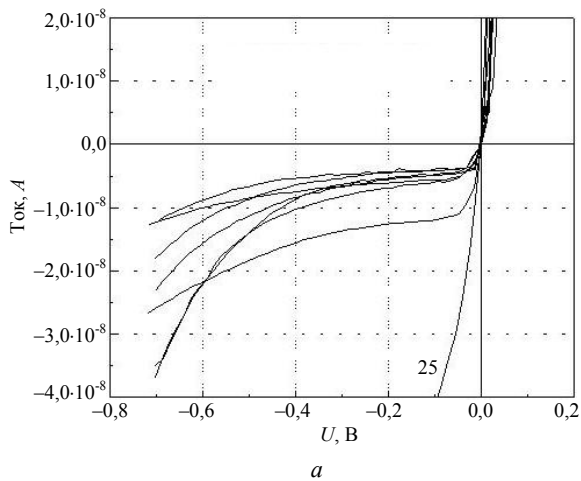


Рис. 4. Изменения темнового и фототока через n - p переходы в зависимости от длительности отжига; образец № 1: а — исходные ВАХ диодов; б — отжиг при 120 °С в течение 1 ч 20 мин; в — при 120 °С в течение 7 ч 30 мин; г — при 120 °С в течение 17 ч 30 мин

Выводы

- Применение длительного отжига при температуре 120 °С на воздухе приводит к уменьшению темновых токов и увеличению фототоков через *n-p*-переход.
- Полученные экспериментальные результаты по воздействию температуры на вольт-амперные зависимости *n-p*-переходов ФМ позволяют применять температуру 120 °С в процессе сборки ФПМ.
- Усилие на разрыв ФПМ размерностью 128×128 элементов изменяется с 1609 гс без нагрева до 2675 гс для сборки ФПМ при температуре 120 °С, что должно повысить надежность работы ФПМ.

Литература

1. Бовина Л. А., Стафеев В. И., Болтарь К. О., Лакеенков В. М., Лощина М. А. // Прикладная физика. 1999. № 3. С. 41.
2. White J. K., Antoszewski J., Pal R., Musca C. A., Dell J. M., Faraone L., Piotrowski J. // J. Of Electronic Materials. 2002. V. 31. No. 7. P. 743.
3. Васильев В. В., Овсяк В. Н., Протасов Д. Ю., Талинов Н. Х. // Прикладная физика. 2005. № 2. С. 37.
4. Akira Ajisawa, Naoki Oda // J. Of Electronic Materials. 1995. V. 24. No. 9. P. 1105.
5. Romashko L. N., Ovsyuk V. N., Vasilev V. V., Nestorov A. A. // Phys. Stat. Sol. (a). 1998. V. 168. P. 433.
6. Romashko L. N., Klimenko A. G., Ovsyuk V. N., Vasilyev V. V., Voinov V. V., Plotnicov A. E. // Ibid. 2001. No. 3. P. 445.

Optimization of indium bumps welding temperature for assembly of FPA photodetectors

A. R. Novoselov, A. V. Predein, I. G. Kosulina, V. V. Vasilyev

Institute of Semiconductor Physics, 13 Lavrentyeva av., 630090, Novosibirsk, Russia
E-mail: novoselov@thermo.isp.nsc.ru

During assembly of photodetector module by flip-chip method a silicon multiplexer and a photodetector circuit (photodiodes array manufactured on heteroepitaxial p-type HgCdTe) are subjected to high thermal and deformation strain. In this paper experimental data are presented showing a method of photodetector array and silicon multiplexer assembly at temperature of 120 °C and pressure less than $1,56 \cdot 10^7$ N/m² without deterioration of n-p junction parameters.

PACS: 85.60.Bt

Keywords: photodetector, photoreception module, column, indium, temperature.

Bibliography — 6 references.

Received 11 December 2008