

ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ КРУПНОФОРМАТНЫХ ИНФРАКРАСНЫХ ФОТОПРИЕМНЫХ МОДУЛЕЙ НА ИНДИЕВЫХ МИКРОСТОЛБАХ

© 2009 г. А. Г. Клименко, канд. физ.-мат. наук; Т. Н. Недосекина; Н. В. Карнаева;
И. В. Марчишин; А. Р. Новоселов; В. Н. Овсяк, доктор физ.-мат. наук;
Д. Г. Есаев*, канд. физ.-мат. наук

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск

E-mail: esaev@thermo.isp.nsc.ru

Исходное плоскопараллельное положение фотоприемной матрицы (ФПМ) и кремниевого мультиплексора (МП) возникает при соприкосновении верхушек индиевых микростолбов под действием лишь силы тяжести ФПМ. Ориентацию кристаллов (по xy) проводим в видимом свете, используем выносные реперные знаки на ФПМ. Цепочки лазерных микропробоин в полиимиде выносных реперных знаков совмещаем с реперными знаками на МП. Учитываем исходные погрешности всех осевых линий; погрешность совмещения достигает $\pm 0,4$ мкм (по xy). На всех стадиях сборки МП включен, наблюдаем прикасание и сварку микростолбов. Во избежание перекосов планаров (по z) применяем стоп-ограничители подходящей высоты, расположенные по периметру ФПМ.

Ключевые слова: фотоприемная матрица, инфракрасный приемный модуль, индиевые микростолбы.

Коды OCIS: 160.1890,040.3060,230.5160,230.4170,310.6860.

Поступила в редакцию 30.03.2009.

Метод сборки многоэлементных фотоприемных матриц (ФПМ) с кремниевыми мультиплексорами (МП) на индиевых микростолбах широко используется при создании гибридных инфракрасных (ИК) фотоприемных модулей. В продаже имеются установки для такой сборки и описания их работы. Все известные установки обладают рядом недостатков, которые особенно проявляются на стадии исследовательских разработок, когда базовые технологические процессы еще не отработаны, а количество годных фотоприемных матриц и годных мультиплексоров крайне ограничено. В настоящей работе мы предлагаем метод сборки на индиевых микростолбах, в котором устранены недостатки известных методов и установок.

С самого начала процесса сварки кристаллов необходимо обеспечить плоскопараллельное соприкосновение свариваемых кристаллов без каких-либо перекосов. Это достигается путем самоориентации соединяемых плоскостей (планаров) при их соприкосновении вершинами индиевых микростолбов под действием лишь силы тяжести фотоприемной матрицы. Процесс сварки, начиная от стадии легкого соприкосновения индиевых микростолбов вплоть до окончания,

наблюдается на экране персонального компьютера. На территории матрицы видны ячейки, в которых индиевые столбы соприкасаются между собой, и ячейки, в которых контакт еще не возник. Рисунок соприкасающихся ячеек при минимальных давлениях отображает исходные изгибы планаров соединяемых кристаллов. По мере усиления вертикальной нагрузки видно, как территория матрицы заполняется включенными ячейками, что свидетельствует о том, что все больше индиевых микростолбов касаются друг друга.

На предварительной стадии, в условиях слабых вертикальных усилий, когда соприкосновение произошло, а сварка практически еще не происходит, можно наблюдать некоторые "врожденные" дефекты ФПМ и МП и осознанно принять решение либо о прекращении, либо о продолжении процесса. Например, видна группа неконтактов в виде пятна с резкими границами. Поскольку качество поверхностей индиевых микростолбов отслеживается предварительно и загрязнения в виде "шапочек" диэлектрика заранее отсутствуют, можно предположить, что это пятно связано с проблемой контактов в окнах под индием, – либо в окнах ФПМ, либо в окнах

МП. Тогда определяются координаты, процесс прекращается и кристаллы отправляются на исследование. При этом один из кристаллов сохраняется для дальнейшего использования. На этой ранней стадии есть возможность провести повторную ориентацию кристаллов в плоскости xy , если наблюдаются рассеянные неконтакты в углах матричного поля, что говорит о развороте кристалла вокруг вертикальной оси.

Поскольку механическая система сжатия позволяет верхнему кристаллу наклоняться по отношению к нижнему (см. рис. 1), в случае, когда исходные кристаллы изогнуты, по мере сжатия наблюдается сложная картина меняющихся со-прикосновений. При малых нагрузках, по мере их увеличения, наблюдается переход к все более симметричной картине включенных ячеек и далее – к равномерному подключению ячеек матрицы. Если на кристаллах с самого начала есть дефекты, например, в виде отсутствующих микростолбов либо в виде микростолбов, соединенных между собой, они проявляются в наблюдаемой на экране картине.

Как правило, все особенности реальной картины межсоединений в ячейках видны при нагрузках, не превышающих 10% от необходимой для качественной сварки. Попытки исправить “неконтакты” путем увеличения давления существенно выше необходимого для сварки в большинстве случаев не улучшают результат. В самом деле, “закрытые” окна под индиевыми микростолбами так и останутся непроводящими, поскольку причиной их “закрытости” являются ошибки в базовых процессах изготовления мультиплексоров или (намного реже) – фотоприемных матриц.

На рис. 1 показана схема сварки индиевых микростолбов ФПМ с ответными индиевыми микростолбами входных ячеек кремниевого МП вертикальным давлением.

Кремниевый МП 5 очищается от остаточных загрязнений и микропылинок с тыльной стороны и устанавливается на плоскопараллельный оптически отполированный сапфировый диск (сапфировое окно) 7, который встроен в днище исследовательского корпуса. Мультиплексор разваривается и еще до сборки подвергается исследованию на “безукоризненность” электронных свойств. Перед сборкой планар МП продувается струей обеспыленного сжатого воздуха и обрабатывается виброзондом из вольфрамовой микропроволоки диаметром 8 мкм, чтобы убрать прилипшие микропылинки. Таким же образом очищаются лицевая поверхность ФПМ 3 и ее индиевые микростолбы.

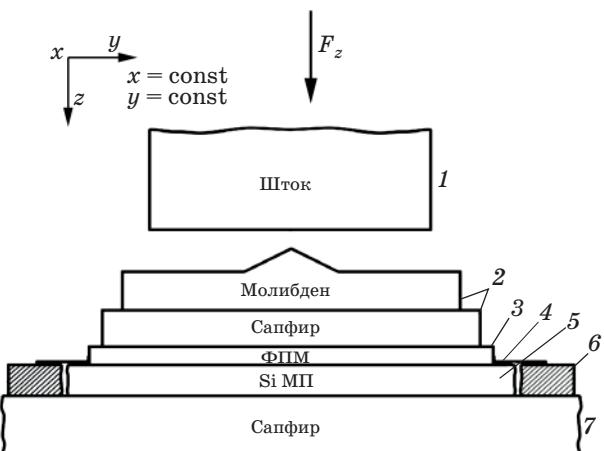


Рис. 1. Схема сварки индиевых микростолбов модуля вертикальным давлением (вид сбоку). 1 – шток устрйства сжатия, 2 – разравниватель (распределитель давления), 3 – ФПМ, 4 – фиксатор по xy , 5 – мультиплексор, 6 – опора фиксатора, 7 – сапфировый диск.

После ориентации ФПМ в плоскости xy ее фиксируют с помощью плоских фиксаторов 4, подклеивая фиксаторы к опорам 6. Сами фиксаторы имеют в сечении Г-образную форму, изготовлены из листового Та (Mo, Ni) толщиной 8 мкм и заранее подклеены к граням ФПМ. Фиксаторы 4 имеют размеры около 1,5×1,5 мм и обеспечивают закрепление ФПМ над МП в сориентированном положении в плоскости xy , сохраняя возможность вертикального перемещения (по z) на расстояние, необходимое для сварки микростолбов.

Шток 1 устройства сжатия устроен так, что обеспечивает передачу внешней нагрузки по вертикали в отсутствие боковых дрейфов.

Цифрой 2 обозначен так называемый “разравниватель”. Он состоит из двух деталей - нижнего плоскопараллельного оптически отполированного сапфира (вырезанного из оптического окна) и верхней металлической детали с конусным возвышением в центре. Обе эти детали склеены между собой. После ориентации и фиксации ФПМ (3) по xy ее тыльная сторона очищается от микропылинок и сверху на нее накладывается “разравниватель” 2, при этом в качестве связки используется небольшое количество дистиллированной воды. “Разравниватель” 2 передает вертикальную нагрузку на ФПМ так, что есть возможность небольших наклонов плоскости ФПМ относительно МП, но нет прогиба ФПМ в ее центральной части. Исходя из этого подбираются толщины сапфира и металла для (2). Мас-

штаб рисунка не позволяет увидеть сбоку совмещенные вершинами индивидуальные микростолбы, тогда как в микроскоп это хорошо видно.

На рис. 2 показан вид сверху на фотоприемную матрицу и мультиплексор, совмещенные перед сборкой. Здесь ФПМ 1 наложена на МП 2, ориентирована по xy и закреплена фиксаторами 3 перемещений по xy , которые своими Г-образными отворотами заранее приклеены к ФПМ, а своими плоскостями подклеены (после ориентации) к опорам фиксаторов 4. Плоскости фиксаторов 3 и выносных реперных знаков 5 параллельны планару ФПМ. Высота опор фиксаторов 4 равна толщине кристалла МП.

Реперные знаки 5, подобно фиксаторам 3, имеют в сечении Г-образную форму, изготовлены из Та (Mo, Ni) толщиной 8 мкм, заранее подклеены к боковым граням ФПМ, а их "большие" плоскости параллельны планару ФПМ (см. рис. 3). Сквозные окна в реперных знаках закрыты тонким прозрачным слоем полииамида, в центральной части окна в полииамиде сделано сквозное отверстие, по габаритам несколько превосходящее соответствующий реперный знак на МП. На лазерной установке, пробивающей в полииамиде сквозные отверстия микронных диаметров, заранее (до сборки) делаются цепочки отверстий вдоль осевой линии и поперечные цепочки отверстий на заданном расстоянии от крайних в ФПМ индивидуальных микростолбов.

Расстояние поперечной цепочки лазерных микроотверстий в полииамиде реперного знака на ФПМ задается по результатам измерений на измерительном цифровом микроскопе типа ИМЦЛ

100×50 "Б" (с дискретностью отсчетов 0,2 мкм) расстояния от крайних индивидуальных микростолбов МП до соответствующей поперечной линии реперного знака МП.

Получившиеся реальные расстояния и отклонения от идеала измеряются на том же микроскопе и учитываются при совмещении, чтобы добиться как можно более точного совпадения.

Следует отметить, что во время изготовления цепочек лазерных микропробоин в полииамиде выносных реперных знаков на ФПМ настройка осевых и поперечных реперных линий ведется по реальным индивидуальным микростолбам (по центрам вершин микростолбов). Это необходимо делать потому, что реальные индивидуальные микростолбы всегда находятся не в идеальных позициях, так как различные предшествующие технологические операции приводят к их уходу от идеального положения. Аналогично и измерения расстояния от краевых индивидуальных микростолбов МП до соответствующего реперного знака на кремниевом проводятся по реальным индивидуальным микростолбам. Кроме того, на измерительном микроскопе проводится измерение (вдоль осевой линии) расстояний между краевыми столбцами и на ФПМ, и на МП. Эти расстояния (из-за набегов в фотошаблонах) могут различаться на несколько микрометров. Далее, во время совмещения, это различие учитывается, т. е. кристаллы устанавливаются так, чтобы идеальное совмещение произошло в центральной области (при этом на краях разбег уменьшается вдвое).

На рис. 3 показан фрагмент совмещаемых кристаллов вблизи выносного реперного знака. В сквозном окне в полииамиде 4 в измерительный микроскоп хорошо виден реперный знак на планаре кремниевого МП. Полииамид расположен выше планара приблизительно на 8 мкм, что соответствует глубине резкости (не требуется перестраивать микроскоп).

Заранее определяется реальное положение осевого реперного знака на МП относительно центров вершин индивидуальных микростолбов близлежащих строк, так как реальное положение индивидуальных микростолбов отклоняется от идеала и смещение реперных знаков может быть разным с каждой стороны кристалла. Все отклонения учитываются при совмещении.

Из рис. 3 видно, что отогнутый под прямым углом край носителя реперного знака приклейен к краю ФПМ, а горизонтальный плоский участок, несущий на себе окно, закрытое полииамидом, плоскоПараллелен планару ФПМ. Лазерные

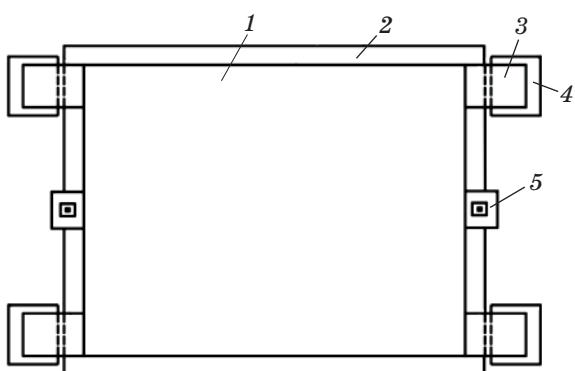


Рис. 2. Фотоприемная матрица и мультиплексор, совмещенные перед сборкой (вид сверху). Обозначения: 1 – ФПМ, 2 – мультиплексор, 3 – фиксаторы перемещений по xy , 4 – опоры фиксаторов, 5 – реперные знаки на фотоприемной матрице.

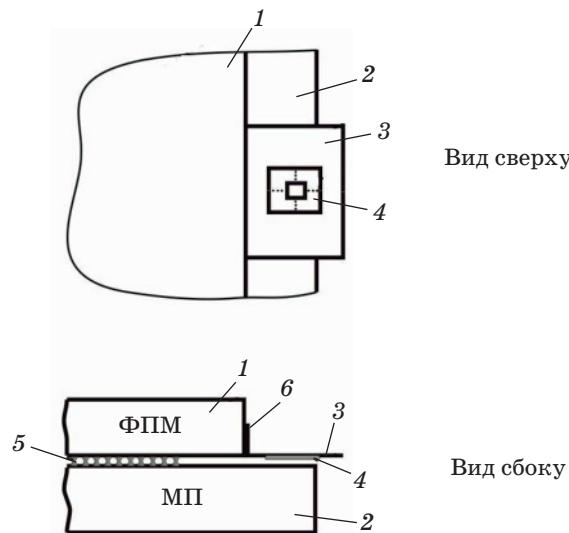


Рис. 3. Фрагмент совмещаемых кристаллов вблизи выносного реперного знака ФПМ. 1 – ФПМ, 2 – мультиплексор, 3 – носитель реперного знака (металл толщиной 8 мкм), 4 – прозрачный полиимид (толщина 9 мкм), 5 – индиевые микростолбы, 6 – клей.

микропробоины в полиииде имеют диаметр 1–3 мкм. Видно, что сориентированные индиевые микростолбы 5 касаются друг друга под действием тяжести ФПМ.

Ориентация верхнего кристалла относительно нижнего осуществляется с помощью микроманипулятора путем легкого приподнимания верхнего кристалла. Ориентацию проводят вплоть до полного совпадения соответствующих лазерных микропробоин с осевыми и поперечными линиями реперных знаков на МП. При этом учитываются все ранее измеренные отклонения от идеала. Во время этой процедуры эпоксидный клей в небольших количествах уже введен между фиксаторами 4 по *xy* и опорами фиксаторов 6 (см. рис. 1). Наличие эпоксидного клея необходимо для того, чтобы процедура ориентации проходила плавно и вся система была устойчивой к малым вибрациям и толчкам (верхние индиевые микростолбы не должны соскальзывать с нижних при вибрациях и толчках). По окончании “тонкого” совмещения на измерительном микроскопе типа ИМЦЛ 150×50 “Б”, снабженном системой визуализации на основе высокоразрешающей ТВ-камеры, проводятся финишные измерения взаимного расположения реперных знаков и проверяется, учтены ли все ранее обнаруженные отклонения от идеала. Затем прогревом полимеризуется эпоксидный клей.

После затвердевания эпоксидного клея еще раз проверяется, не произошло ли сдвигов реперных знаков. Очищаем от микропыли нок тыльную поверхность ФПМ, накладываем разравниватель (поз. 2 на рис. 1) и устанавливаем подготовленные к сварке кристаллы МП и ФПМ в устройство для сжатия (рис. 1). Мультиплексор заранее установлен и разварен в плоской исследовательской коробке, днищем коробки является сапфировый диск (поз. 7 на рис. 1).

Шток 1 опускаем на вершину конуса разравнивателя 2 (рис. 1). Благодаря большой жесткости разравнивателя вертикальное усилие передается на тыльную сторону ФПМ равномерно по всей площади. Разравниватель, слегка наклоняясь в ту или иную сторону, при малых вертикальных нагрузках приводит свариваемые кристаллы в плоскопараллельное положение, и на экране включенного дисплея наблюдается все более симметричная картина подключений ячеек ФПМ к МП.

Дальнейшее увеличение вертикальной нагрузки в широком диапазоне не меняет картину. Чтобы воспрепятствовать чрезмерному сближению планаров и избежать возникновения коротких замыканий между ячейками из-за слишком большого увеличения диаметров микростолбов, используются ограничители сближения 4, расположенные равномерно по периметру ФПМ (рис. 4). Зная исходные диаметры свариваемых микростолбов, их высоту и шаг ячейки, легко рассчитать максимально допустимое расстояние между планарами и, исходя из этого, подобрать высоту ограничителей сближения.

Поведение индиевых микростолбов в процессе сварки кристаллов играет ключевую роль. Нами был разработан метод измерения кривых пластичного течения индивидуальных инди-

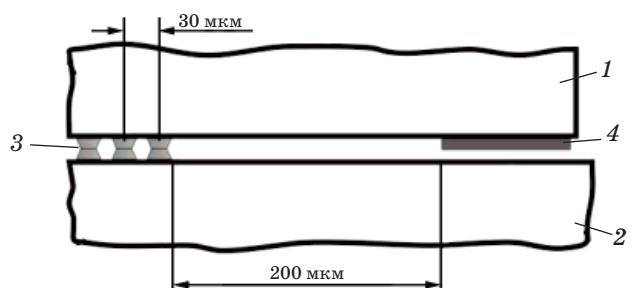


Рис. 4. Ограничители сближения планаров. Фрагмент (после ориентации перед сваркой). 1 – ФПМ, 2 – мультиплексор, 3 – индиевые микростолбы (касаются вершинами); 4 – ограничители сближения (полиимид 80×80×6 мкм).

вых микростолов [1, 2] и проведены исследования пластических свойств микростолов в зависимости от температуры, геометрической формы, технологии изготовления, очистки и предподготовки [1–5]. Показано, что “двуэтажные” индиевые микростолбы, в которых нижний “этаж” изготовлен методом фотолитографии, а верхний прямым высоковакуумным напылением индия сквозь матрицу микроответстий, обладают высокой пластичностью и обеспечивают пластическое течение и сварку при давлениях, которые в разы меньше самого “строгого” известного из научной литературы предела начала образования дополнительных дефектов в КРТ ($1,7 \text{ кг}/\text{мм}^2$ для однородного монокристаллического CdHgTe).

Исследование реальных однослойных индиевых микростолов, изготовленных методом высоковакуумного напыления и фотолитографии, показало, что в подавляющем большинстве они имеют кривые пластического течения, у которых “полочка” пластического течения начинается при меньших давлениях, чем предел $1,7 \text{ кг}/\text{мм}^2$, а вероятность встречи двух “аномально прочных” индиевых микростолов составляет лишь около 0,01% и, таким образом, представляет незначительную опасность.

Разработанная технология является основой мелкосерийной сборки ИК фотоприемных модулей формата 320×256 с шагом 30 мкм для диапазона 8–14 мкм с ФПМ на выращенных на GaAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии варизонных слоях КРТ и на структурах с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs [6–14]. Погрешность при совмещении составляет $\pm 0,4 \text{ мкм}$, реальный результат определяется “разбегом” набегающей ошибки фотошаблонов.

Количество несоединенных ячеек в модуле достигало 28, что составляет менее 0,04% и отражает весьма высокий технологический уровень как всех предшествующих операций, так и непосредственно микросборки.

Предварительные оценки возможных отклонений от идеала на разных стадиях микросборки с учетом понятных уже теперь возможностей улучшения процессов показывают, что изложенные в настоящей работе принципы перспективны для сборки модулей формата 640×512 при шаге ячейки 20–25 мкм. Изложенные принципы сборки можно использовать и для модулей большего формата, например 768×768 .

Необходимо отметить, что все стенды, приборы, микроскопы, лазерные установки, компоненты, использованные в настоящей работе,

отечественные, некоторые разработаны и изготовлены в ИФП СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Войнов В.Г., Клименко А.Г., Недосекина Т.Н., Новоселов А.Р. Пластические свойства индиевых микростолов. Проблема контактирования на КРТ // Автометрия. 1996. № 4. С. 126–129.
2. Воинов В.Г., Клименко А.Г., Новоселов А.Р. Устройство и метод измерения пластической деформации образцов микронных размеров // ПТЭ. 1996. № 6. С. 119–121.
3. Клименко А.Г., Недосекина Т.Н., Воинов В.Г., Овсян В.Н., Захарьин Т.И., Васильев В.В., Новоселов А.Р. Особо пластичные индиевые микростоловы для матричных ФПУ на CdHgTe // Автометрия. 1998. № 4. С. 105–112.
4. Клименко А.Г., Недосекина Т.Н., Карнаева Н.В., Овсян В.Н., Захарьин Т.И., Васильев В.В., Новоселов А.Р. Индиевые микростоловы для холодной сварки инфракрасных фотоприемных устройств при минимальных давлениях // Наука производству. 2001. № 12. С. 50–53.
5. Новоселов А.Р., Косулина И.Г., Клименко А.Г., Паулиш А.Г., Васильев В.В. Индиевые столбы для Flip-chip технологии матричных фотоприемных устройств на основе пленок Cd–Hg–Te, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2008. № 3. С. 60–63.
6. Васильев В.В., Овсян В.Н., Шашкин В.В., Асеев А.Л. Инфракрасные фотоприемные модули на варизонных слоях КРТ и на структурах с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 6. С. 63–69.
7. Vasilyev V.V., Klimenko A.G., Marchishin I.V., Ovsyuk V.N., Talipov N.Ch., Zahar'yash T.I., Golenkov A.G., Derkach Yu.P., Reva V.P., Sizov F.F., Zabudsky V.V. MCT heteroepitaxial 4×288 FPA // Infrared Phys. and Technology. 2004. V. 44. P. 13–23.
8. Журавлев П.В., Добровольский П.П., Шатунов К.П., Васильев В.В., Овсян В.Н., Захарьин Т.И., Сусляков А.О. Полноформатный тепловизионный модуль на основе охлаждаемого фотоприемника 288×4 элементов отечественного производства // Тез. докл. Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, М., 2006. С. 135.
9. Васильев В.В., Дворецкий С.А., Варавин В.С., Михайлов Н.Н., Ремесник В.Г., Сидоров Ю.Г., Сусляков А.О., Асеев А.Л. Матричный фотоприемник на основе варизонного изотропного $n-p$ -перехода в слоях КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Автометрия. 2007. Т. 43. № 4. С. 17–24.
10. Васильев В.В., Предеин А.В., Варавин В.С., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Рева В.П., Сидоров Ю.Г.,

- Сизов Ф.Ф., Суслаков А.О., Асеев А.Л.* Линейчатый фотоприемник формата 288×4 с двунаправленным режимом ВЗН // Тез. докл. Российское совещание по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники. “Фотоника-2008”, Новосибирск, 2008. С. 82.
11. Долганин Ю.Н., Карпов В.В., Васильев В.В., Захарьяш Т.И., Клименко А.Г., Суслаков А.О. Многоспектральный МФПУ с топологией 3×4×288 на $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ для спектрального диапазона 8–12 мкм // Тез. докл. XX Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М., 2008. С. 160.
12. Брунев Д.В., Варавин В.С., Васильев В.В., Дегтярев Е.В., Дворецкий С.А., Добровольский П.П., Захарьяш Т.И., Клименко А.Г., Крайлюк А.Д., Марчишин И.В., Михайлов Н.Н., Предеин А.В., Сабинина И.В., Сидоров Ю.Г., Суслаков А.О., Якушев М.В., Асеев А.Л. Инфракрасные фотоприемные устройства второго поколения на основе оптимизированных ГЭС КРТ МЛЭ // Тез. докл. Российского совещания по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники “Фотоника-2008”. Новосибирск, 2008. С. 4.
13. Васильев В.В., Дворецкий С.А., Марчишин И.В., Михайлов Н.Н., Предеин А.В., Ремесник В.Г., Суслаков А.О. Матричный фотоприемник 320×256 со встроенным отрезающим фильтром // Тез. докл. Российское совещание по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники “Фотоника-2008”. Новосибирск, 2008. С. 81.
14. Варавин В.С., Васильев В.В., Дворецкий С.А., Захарьяш Т.И., Клименко А.Г., Козлов А.И., Марчишин И.В., Михайлов Н.Н., Овсяк В.Н., Суслаков А.О., Сидоров Ю.Г., Асеев А.Л. Инфракрасные фотоприемники на основе гетероструктур $\text{HgCdTe}/\text{CdZnTe}/\text{GaAs}$ с варизонными слоями // Тез. докл. XIX Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М., 2006. С. 106–107.