

УДК 621.315.5

Методы повышения надежности гибридации кристаллов

В. М. Акимов, К. О. Болтарь, Л. А. Васильева, Н. А. Иродов, Е. А. Климанов

При создании фотоприемных устройств УФ- и ИК-диапазонов используются кристаллы, изготовленные из разных материалов. Гибридация разнородных подложек осуществляется методом перевернутого кристалла с помощью сформированных на каждом кристалле индиевых микроконтактов. Рассмотрены методы гибридации кристаллов с разной формой индиевых микроконтактов. Исследовано влияние формы микроконтактов на надежность гибридации кристаллов.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz

Ключевые слова: индиевые микроконтакты, гибридация, стыковка, метод перевернутого монтажа.

Введение

В настоящее время для гибридации кристаллов БИС считывания и матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) используется метод перевернутого монтажа с использованием индиевых микроконтактов, сформированных на обоих кристаллах. Для получения надежной стыковки двух кристаллов необходимо получение прочного механического соединения с малым электрическим и тепловым сопротивлением. При этом определяющими операциями являются:

- формирование массива индиевых микроконтактов, включая создание индиевых микроконтактов на кристаллах требуемой формы и жесткости с хорошей адгезией индия к нижележащему слою металлизации;
- подготовка кристаллов к стыковке;
- очистка поверхности микроконтактов от оксида индия;
- выравнивание плоскостности поверхности кристаллов;

- точное совмещение микроконтактов и дозированное сжатие кристаллов;
- отжиг сборки для устранения механических напряжений, появившихся во время стыковки;
- заполнение межкристалльного пространства наполнителем и т. д.

Наличие нескольких вариантов исполнения вышеперечисленных операций у различных изготовителей свидетельствует о сложности и недостаточной отработке процесса получения качественных гибридных сборок. Ситуация усугубляется постоянным увеличением формата кристаллов с соответствующим снижением шага элементов на кристаллах, что требует применения новых конструкторско-технологических решений.

В предлагаемой статье рассмотрена одна из проблем, возникающих при гибридации кристаллов, а именно, очистка зоны соединения двух стыкуемых индиевых микроконтактов от оксида индия.

Постановка задачи

Для гибридации кристаллов БИС считывания и МФЧЭ широкое распространение получили индиевые микроконтакты квадратной или круглой формы с плоскими вершинами и одинаковыми размерами для обоих кристаллов [1, 2]. Такие микроконтакты просты в изготовлении и после зачистки поверхности от оксида индия кристаллы готовы к гибридации. Индиевые микроконтакты прямоугольной формы могут быть изготовлены на поверхности обоих кристаллов любым из известных способов [3—6].

Один из недостатков использования для стыковки микроконтактов с плоскими вершинами состоит в низкой прочности соединения кристаллов из-за наличия на поверхности индиевых микро-

Акимов Владимир Михайлович, главный специалист¹.

Болтарь Константин Олегович, начальник НТК¹, профессор².

Васильева Лариса Александровна, вед. инженер-конструктор¹.

Иродов Никита Александрович, инженер 2 категории¹.

Климанов Евгений Алексеевич, главный научный сотрудник¹, доцент².

¹АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Тел. 8 (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

²Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 18 мая 2015 г.

© Акимов В. М., Болтарь К. О., Васильева Л. А., Иродов Н. А., Климанов Е. А., 2015

контактов жесткой оксидной пленки, обладающей низкими адгезионными и пластическими свойствами. Окисление индия на воздухе происходит очень быстро — за десятки секунд, и в дальнейшем от окисной пленки очень трудно избавиться [7].

При стыковке формируется индиевое соединение, состоящее из двух слоев индия, между которыми остаются частицы индиевой оксидной пленки, значительно ухудшающей липкость микроконтактов. В процессе эксплуатации гибридных микросхем в них возникают циклические термомеханические напряжения. При этом индиевые соединения микроконтактов постепенно разрушаются по границе соединения индий—индий, поскольку между двумя слоями индия присутствует индиевая оксидная пленка, которая значительно ослабляет прочность соединения. По этой границе происходит постепенное разрушение соединения микроконтактов [8]. Кроме того, по данным работы [9], сварка микроконтактов с плоскими поверхностями осуществляется только в узкой краевой области (по их периметру), то есть там, где возникает нарушение плоскостности поверхности микроконтакта.

Второй недостаток микроконтактов с плоскими вершинами состоит в большой площади касания микроконтактов. Для получения прочного соединения требуется, как правило, применение значительного сдавливающего усилия при стыковке, что может привести к деградации электрических свойств МФЧЭ из-за возникновения дополнительных электрически активных дислокаций. Чем толще слой естественного оксида, тем большее давление требуется для его разрушения, и, кроме того, пластичность индиевых микроконтактов ухудшается с течением времени — через десятки часов после нанесения слоя — примерно в 1,5 раза [10]. В связи с этим качественная стыковка микроконтактов может быть проведена с микроконтактами примерно одного и, желательнее, «юного возраста».

При стыковке микроконтактов с разным временем хранения возможен вариант соединения, когда при сдавливании на свежем микроконтакте происходит разрыв оксидной пленки с обнажением чистого индия в трещинах оксида, а на микроконтакте с длительным хранением происходит только деформация пленки оксида без ее разрыва. В таком случае сварка микроконтактов не происходит, а получается прижимной контакт малой механической прочности с высоким и нестабильным во времени электрическим сопротивлением. Для разрыва «старой» оксидной пленки необходимо повысить прижимное усилие, что может привести к раздавливанию ответного микрокон-

такта с возможностью закорачивания соседних микроконтактов.

Методы очистки индиевых микроконтактов

Надежная холодная сварка индиевых микроконтактов происходит только в тех местах, где при сдавливании нарушается целостность оксидного слоя и чистый индий выдавливается из объема микроконтакта навстречу чистому индию ответного микроконтакта [11].

Таким образом, для повышения прочности стыковки необходимо очистить место соединения индиевых микроконтактов от оксидной пленки.

Существует несколько способов очистки поверхности индиевых микроконтактов от оксидной пленки:

- химическое травление в 1%-соляной кислоте;
- ионное травление;
- механическая очистка при помощи колеблющейся в потоке воздуха вольфрамовой проволоки диаметром 8—10 мкм;
- оплавление индиевого микроконтакта в защитной или восстанавливающей атмосфере и др.

Перечисленные способы очистки имеют существенный недостаток, связанный с применением дополнительных операций по очистке поверхности индиевых микроконтактов от оксидной пленки.

Следует отметить, что полной очистки от оксида в перечисленных способах не происходит и, кроме того, после очистки поверхности микроконтактов от оксидной пленки до их стыковки проходит определенное время, в течение которого наблюдается рост новой пленки оксида индия.

В данном перечне наиболее эффективным является метод очистки от оксида индия во время стыковки оплавленных в защитной атмосфере водорода или парах органических кислот индиевых микроконтактов [12]. Если в остальных методах стыковка кристаллов происходит через некоторый интервал времени после очистки индиевого микроконтакта от оксида (в течение которого может произойти повторное тонкое окисление поверхности индия), то в этом методе очистка поверхности индия происходит во время стыковки.

Оплавленные индиевые микроконтакты в форме полусферы, расположенные на мультиплексоре, из-за незначительной площади первичного контакта вдавливаются в плоскую поверхность ответных индиевых микроконтактов МФЧЭ, деформируют их поверхность, эффективно разрушая целостность оксидной пленки. По мере дальнейшего сдавливания область растрескивания оксидных пленок расширяется и охватывает всю поверхность индиевого микроконтакта на мультиплексоре и МФЧЭ. Оплавленные микро-

контакты можно формировать только на мультиплексоре, так как нагрев матрицы фоточувствительных элементов на узкозонных полупроводниковых материалах до температуры плавления индия (157 °С) приводит к значительному ухудшению её фотоэлектрических характеристик или вообще к выходу из строя.

Однако растрескивание оксидной пленки на поверхности индиевого микроконтакта не означает ее удаления из зоны контакта. Чистый индий, выступивший из образовавшихся трещин одного микроконтакта, соединяется с выдавленным индием из трещин другого стыкуемого микроконтакта. Вследствие этого в зоне стыковки остаются фрагменты пленки оксида с вершин обоих микроконтактов, и, следовательно, полной очистки от оксида индия в зоне стыковки не происходит, что в конечном итоге снижает прочность стыковки.

Задачей работы является повышение прочности стыковки индиевых микроконтактов за счет более полного удаления индиевой окисной пленки из места соединения микроконтактов, а также упрощение и удешевление технологии изготовления индиевых микроконтактов за счет исключения дополнительных операций по удалению окисной пленки с поверхности индиевых микроконтактов.

Повышение прочности стыковки кристаллов

Для решения поставленной задачи необходимо минимизировать площади касания микроконтактов, по крайней мере, на одном кристалле. Это приведет к сильной деформации микроконтактов в зоне касания и, вследствие этого, к улучшению растрескивания оксидной пленки при приемлемом давлении во время сдавливания микроконтактов. Это можно сделать несколькими способами:

- уменьшение размеров микроконтактов на одном кристалле;
- применение микроконтактов полусферической формы;
- использование микроконтактов прямоугольной формы.

Наиболее перспективным, по нашему мнению, является метод повышения прочности стыковки использованием микроконтактов на кристаллах БИС и МФЧЭ в виде вытянутых прямоугольников, расположенных под углом, например 90°, по отношению друг к другу [13] (см. рис. 1). Очистка микроконтактов от оксида индия в этом случае происходит в зоне стыковки, во время сильной деформации микроконтактов при их сдавливании, без доступа кислорода, с вытеснением оксида на периферию зоны стыковки. Индий при этом не успевает окислиться, и поэтому образуется единое прочное индиевое соединение.

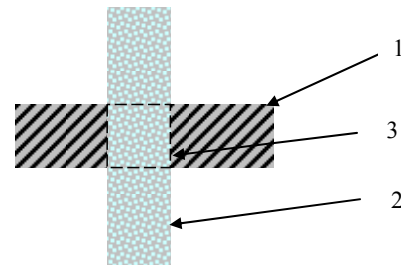


Рис. 1. Индиевые микроконтакты до стыковки. Здесь и далее: поз. 1 — микроконтакт БИС считывания, поз. 2 — микроконтакт МФЧЭ, поз. 3 — зона касания микроконтактов

При сдавливании стыкуемые микроконтакты, сильно деформируются, как бы разрезают друг друга, с последующим слипанием чистым индием не только горизонтальными плоскостями, но и боковыми сторонами. Стыковка кристаллов проходит при меньшем давлении, чем в случае микроконтактов квадратной или круглой формы, а также оплавленных микроконтактов. В зоне стыковки остается лишь небольшая часть разорванной оксидной пленки, занимающая площадь, равную площади первичного касания прямоугольных микроконтактов и части оксида с боковых стенок.

Во время сжатия микроконтактов выдавливаемый из зоны стыковки индий, двигаясь вдоль поверхности, увеличивает площадь соприкосновения микроконтактов (рис. 2), что повышает прочность их соединения.

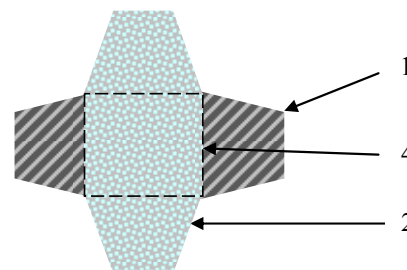


Рис. 2. Индиевые микроконтакты после стыковки, где поз. 4 — зона стыковки микроконтактов

Для увеличения прочности соединения кристаллов, в том числе при малом шаге элементов, индиевые микроконтакты могут быть ориентированы по диагоналям ячеек стыкуемых кристаллов (рис. 3). В этом случае длина и ширина индиевых микроконтактов могут быть увеличены в $\sqrt{2} = 1,41$ раз. Так, например, при шаге ячеек в 15 мкм в матрице длина и ширина прямоугольных микроконтактов при их ориентации параллельно сторонам ячеек может составлять соответственно 10 и 5 мкм, а при ориентации по диагоналям — 14 и 7 мкм. В первом случае площадь первичного касания микроконтактов при стыковке составляет $5 \times 5 = 25 \text{ мкм}^2$, а во втором — $7 \times 7 = 49 \text{ мкм}^2$, что в

два раза выше, а, следовательно, выше и прочность соединения микроконтактов.

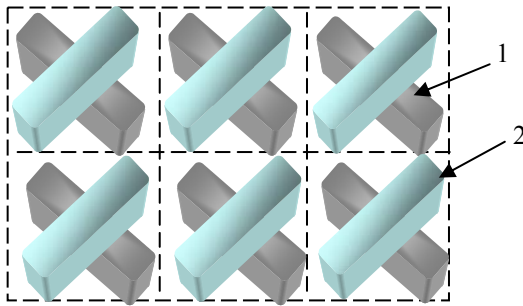


Рис. 3. Микроконтакты, ориентированные вдоль диагоналей ячеек

Прямоугольные микроконтакты могут быть использованы для создания опорных индиевых микроконтактов большой площади, например, контактов к подложке, расположенных на периферии кристалла. С этой целью формируются множества прямоугольных микроконтактов, которые могут быть объединены в решетки (рис. 4). Причем решетки индиевых микроконтактов на каждом кристалле сдвинуты друг относительно друга на половину шага по двум координатам. Комбинируя ширину и шаг индиевых полос, составляющих решетку, можно формировать регулируемый ограничитель стыковки кристаллов.

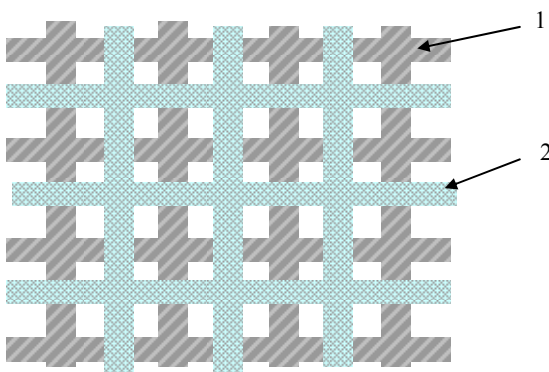


Рис. 4. Решетки опорных контактов

На рис. 5 и 6 представлены фотографии фрагментов кристалла БИС считывания с шагом 28 мкм с прямоугольными индиевыми микроконтактами размером 18×7 мкм до и после стыковки. После расстыковки кристаллов с прямоугольными микроконтактами заметна деформация боковых стенок индиевых микроконтактов, связанная с разрывом связи между микроконтактами при расстыковке кристаллов, что свидетельствует о хорошей адгезии состыкованных микроконтактов двух кристаллов. Считается [11], что для качественной сварки индиевых микроконтактов необходимо прикладывать усилие, при котором измене-

ние диаметра микроконтактов (деформация) составляет не менее 30 %. Сравнение размеров индиевых микроконтактов на фотографиях показывает, что при стыковке прямоугольных микроконтактов увеличение размеров микроконтактов составляет не менее 100 %. Это позволяет получить высокую прочность соединения микроконтактов в широком диапазоне температур без использования дополнительных приемов улучшения качества холодной сварки.

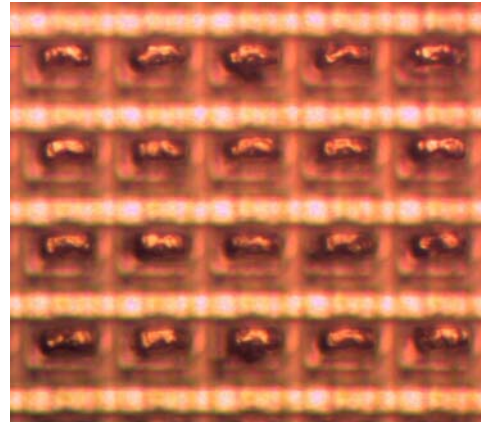


Рис. 5. Фрагмент кристалла до стыковки (оптический микроскоп)

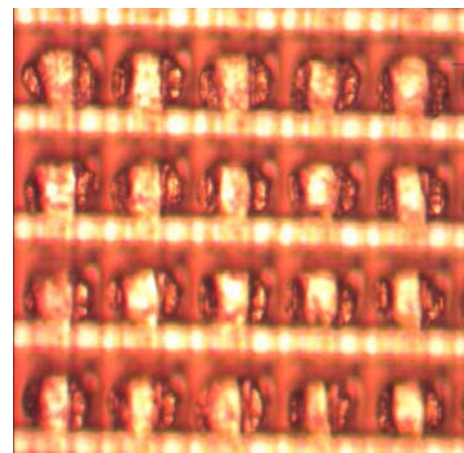


Рис. 6. Фрагмент кристалла после расстыковки (оптический микроскоп)

Оптимальное соотношение длины и ширины микроконтакта прямоугольной формы зависит от толщины индия, его структуры, адгезии к нижележащему слою металлизации, толщины пленки оксида индия и шага элементов на кристалле. Следует отметить, что при стыковке микроконтакт лишь немного удлиняется, а ширина основания микроконтакта может увеличиться более чем в два раза. Внешний вид микроконтакта после расстыковки приобретает форму, близкую к квадратной (рис. 6), несмотря на исходную прямоугольную форму с соотношением сторон 2,5:1.

Устранение закороток микроконтактов

При гибридизации микроконтактов квадратной или круглой формы возможно закорачивание микроконтактов одного кристалла микроконтактами другого кристалла даже при небольшой погрешности их совмещения [14]. Закорачивание индиевых микроконтактов происходит уже при погрешности совмещения более величины зазора между микроконтактами на кристалле, что обычно составляет 3—10 мкм при шаге микроконтактов 10—35 мкм. В этом случае либо все ФЧЭ матрицы оказываются соединенными между собой, либо вдоль строк или столбцов матрицы.

Использование прямоугольных микроконтактов для гибридизации кристаллов позволяет не только повысить прочность стыковки и снизить необходимое для гибридизации давление, но и исключить возможность закороток соседних микроконтактов. Технический результат достигается тем, что индиевые микроконтакты на обоих кристаллах имеют конфигурацию вытянутых прямоугольников, причём размер каждого микроконтакта одного кристалла меньше зазора между микроконтактами другого кристалла, как по вертикали, так и по горизонтали. Условие отсутствия закороток микроконтактов двух кристаллов выглядит следующим образом [15]:

$$T > W + L, \quad (1)$$

где T — шаг индиевых микроконтактов на кристаллах, W — ширина, L — длина микроконтактов.

При допустимом минимальном расстоянии между индиевыми микроконтактами двух кристаллов после стыковки, равном 1 мкм, получим

$$T - 2 \text{ мкм} = W + L. \quad (2)$$

На рис. 5 представлена фотография исходных индиевых микроконтактов до стыковки кристаллов. Видно, что размеры индиевых микроконтактов удовлетворяют соотношению (2). В этом случае исключается возможность закорачивания соседних микроконтактов при совмещении, т. к. размеры и конфигурация микроконтактов подобраны так, что даже в самом худшем случае совмещения микроконтакты не смогут закоротиться. Кроме того, исключается неконтролируемый сдвиг микроконтактов во время стыковки за счёт отсутствия широких плоских или наклонных поверхностей в месте касания микроконтактов и, тем самым, предоставляется возможность проведения повторной стыковки при неудачном попадании микроконтактов одного кристалла в зазоры между микроконтактами другого кристалла, поскольку микроконтакты при этом, практически, не деформированы.

Заключение

Для гибридизации кристаллов БИС считывания и МФЧЭ методом перевернутого монтажа обычно используются микроконтакты квадратной или круглой формы с плоскими вершинами. Однако из-за наличия на поверхности микроконтактов жесткой пленки оксида индия, препятствующей качественной сварке микроконтактов, прочность соединения кристаллов оказывается низкой. В работе рассмотрены некоторые методы улучшения качества сварки микроконтактов.

При сдавливании прямоугольные микроконтакты, сильно деформируясь, как бы разрезают друг друга, с последующим слипанием чистым индием не только горизонтальными плоскостями, но и боковыми сторонами. В этом случае давление, необходимое для разрушения оксидной пленки ниже, чем при использовании квадратных или круглых микроконтактов с плоскими вершинами. Показано, что при ориентации прямоугольных микроконтактов вдоль диагоналей ячеек увеличивается площадь стыковки, а, следовательно, и прочность соединения микроконтактов. Прямоугольные микроконтакты, объединенные в решетки, могут быть использованы для формирования опорных элементов на периферии кристаллов для устранения передавливания матричных микроконтактов.

Проведен ряд стыковок кристаллов БИС и МФЧЭ формата 384×288 с шагом 28 мкм с микроконтактами прямоугольной формы. Представлены фотографии исходных индиевых микроконтактов до стыковки и после расстыковки, которые свидетельствуют о хорошей адгезии индия состыкованных микроконтактов двух кристаллов. Это позволяет получить высокую прочность соединения микроконтактов в широком диапазоне температур без использования дополнительных приемов улучшения качества холодной сварки.

При небольшой погрешности совмещения кристаллов с микроконтактами квадратной или круглой формы с плоскими вершинами возможно закорачивание микроконтактов одного кристалла микроконтактами другого кристалла. Использование для гибридизации микроконтактов прямоугольной формы позволяет исключить возможность появления подобных закороток при сохранении механической прочности соединения.

Рассмотрены геометрические соотношения между размерами микроконтактов, при которых выполняется условие отсутствия закороток микроконтактов двух кристаллов.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации НШ-2787.2014.9.

ЛИТЕРАТУРА

1. John M. Тгасу. Патент US № 4067104А.
2. Акимов В. М., Климанов Е. А., Лисейкин В. П. и др. // Прикладная физика. 2003. № 2. С. 80.
3. Акимов В.М., Болтарь К.О., Васильева Л.А. и др. Способ изготовления индиевых столбиков Патент на изобретение № 2371808, 27.10.09.
4. Акимов В. М., Климанов Е. А., Лисейкин В. П. и др. // Прикладная физика. 2010. № 4. С. 99.
5. Болтарь К. О., Корнеева М. Д., Мезин Ю. С. и др. // Прикладная физика. 2011. № 1. С. 96.
6. Дирочка А. И., Климанов Е. А., Мезин Ю. С. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 1. С. 65.
7. Ефимов В. М., Валишева Н. А. / XXII международная науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, 22—25 мая 2012 г). Тезисы докладов. С. 308.
8. Ефимов В. М. Патент РФ № 2411610.
9. Курьшев Г. Л., Ковчавцев А. П., Вайнер Б. Г. и др. // Автометрия. 1998. № 4. С. 5.
10. Клименко А. Г., Войнов В. Г., Новоселов А. Р. и др. // Автометрия. 1998. № 4. С. 105.
11. Новоселов А. Р., Косулина И. Г., Клименко А. Г. и др. // Автометрия. 2013. Т. 49. № 1. С. 111.
12. Новоселов А. Р., Кузьмин и др. Способ формирования контактного столба многоконтактного гибридного соединения. Патент РФ № 2392690.
13. Акимов В.М., Болтарь К.О., Васильева Л.А. и др. Способ гибридизации кристаллов БИС считывания и матрицы фоточувствительных элементов фотоприемных устройств. Патент на изобретение № 2537089, 30.10.14.
14. Акимов В. М., Болтарь К. О., Васильева Л. А. и др. / XXIII Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения. (Москва, 28—30 мая 2012). Тезисы докладов. С. 518.
15. Акимов В. М., Болтарь К. О., Васильева Л. А., Демидов С. С. и др. // Прикладная физика. 2015. № 1. С. 51.

Constructive methods of improving the reliability of hybridization the crystals

V. M. Akimov¹, K. O. Boltar^{1,2}, L. A. Vasilyeva¹, N. A. Irodov¹, and E. A. Klimanov^{1,2}

¹Orion R&P Association, Inc.
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

²Moscow Institute of Physics and Technology (State University)
9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

Received May 18, 2015

Crystals made of different materials are used in creation of the UV and IR photodetectors. Hybridization of heterogeneous substrates is carried out by using a flip-chip method by means of indium microcontacts to be formed on each crystal. Consideration is given to the methods of hybridization of crystals with different forms of indium microcontacts. Influence of a form of microcontacts on the reliability of crystal hybridization has been investigated.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz

Keywords: indium microcontacts, hybridization, docking, “flip flop” method.

REFERENCES

1. M. John, US Patent No. 4067104A.
2. V. M. Akimov, E. A. Klimanov, V. P. Liseikin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 80 (2003).
3. V. M. Akimov, K. O. Boltar, L. A. Vasilyeva, et al., RF Patent No. 371808, October 10, 2009.
4. V. M. Akimov, E. A. Klimanov, V. P. Liseikin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 99 (2010).
5. K. O. Boltar, M. D. Korneeva, Yu. S. Mezin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 96 (2011).
6. A. I. Dirochka, E. A. Klimanov, Yu. S. Mezin, et al., *Uspekhi Prikladnou Fiziki* **1**, 65 (2013).
7. V. M. Efimov and N. A. Valisheva, in *Proc. XXII Intern. Conf. Photoelectronics* (Moscow, May 22—25, 2012). P. 308.
8. V. M. Efimov, RF Patent No. 2411610.
9. G. L. Kuryshv, A. P. Kovchavtsev, B. G. Vainer, et al., *Optoelectron., Instrum. Data Process.*, No. 4, 5 (1998).
10. A. G. Klimenko, V. G. Voinov, A. R. Novoselov, et al., *Optoelectron., Instrum. Data Process.*, No. 4, 105 (1998).
11. A. R. Novoselov, I. G. Kosulina, A. G. Klimenko, et al., *Optoelectron., Instrum. Data Process.*, No. 1, 111 (2013).
12. A. R. Novoselov et al., RF Patent No. 2392690.
13. V. M. Akimov, K. O. Boltar, L. A. Vasilyeva, et al., RF Patent No. 2537089, October 10, 2014.
14. V. M. Akimov, K. O. Boltar, L. A. Vasilyeva, et al., in *Proc. XXIII Intern. Conf. Photoelectron.* (Moscow, May 28—30, 2012). P. 518.
15. V. M. Akimov, K. O. Boltar, L. A. Vasilyeva, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 51 (2015).