

УДК 621.315.5

## Исследование индиевых столбчатых контактов при помощи электронной микроскопии

С. В. Головин, Ю. С. Мезин, М. В. Седнев, А. И. Еремчук, М. Д. Корнеева

*Исследованы индиевые столбчатые микроконтакты для гибридных матричных фотоприемных устройств (МФПУ) инфракрасного диапазона, состоящих из матрицы фоточувствительных элементов и кремниевого мультиплексора, состыкованных между собой. Показано, что индиевые столбики высотой 12 микрометров и более могут быть получены посредством последовательного проведения стандартных операций фотолитографии и химического травления, имеют шероховатость порядка 1 мкм и могут использоваться для операции стыковки в процессе изготовления МФПУ.*

PACS: 85.60.-q

*Ключевые слова:* фотолитография, матричный фотоприемник, индиевые столбики, КРТ.

### Введение

Матричные фотоприемные устройства (МФПУ) ИК-диапазона находят широкое применение в различной технике и оборудовании гражданского и военного назначения. В состав МФПУ, представляющего собой гибридную микросхему, входят матрица фоточувствительных элементов (МФЧЭ), в которой происходит поглощение ИК-излучения и формирование сигнальных фототоков для каждого чувствительного элемента матрицы, а также кремниевый мультиплексор, который осуществляет считывание и обработку сигнала. В настоящее время не существует иного способа гибридизации этих узлов кроме стыковки посредством столбиков, когда каждый пиксель соединяется с ячейкой мультиплексора через индиевый столбчатый микроконтакт (т. н. flip-chip) [1—5]. Выбор индия связан с тем, что этот металл технологичен, с ним легко работать, он сохраняет пластичность вплоть до гелиевых температур и хорошо соединяется холодной сваркой при комнатной температуре.

Для эффективной работы МФПУ ИК-диапазона требуется охлаждение до температуры жидкого азота  $T = 77$  К. Из-за разницы коэффициентов теплового расширения между МФЧЭ и мультиплексором, индиевые столбики испытывают значительное напряжение при термоциклировании между 300 и 77 К, неизбежном при работе МФПУ. Горизонтальное смещение столбиков, связанное с изменением температуры  $\Delta T$ , можно описать выражением  $\Delta L = L_0 \Delta T (\alpha_{\text{МФЧЭ}} - \alpha_{\text{Si}})$  [6], где  $L_0$  — расстояние от центра МФЧЭ,  $\alpha$  — коэффициенты теплового расширения МФЧЭ и мультиплексора. Среднее число циклов охлаждения, которое выдерживает индиевый контакт без расстыковки, выражается приближенной формулой  $N = 0,5(L\Delta T\alpha)^{-2}(0,65h)^2$ , где  $h$  — высота контакта. Иначе говоря, это число циклов обратно пропорционально квадратам размера МФЧЭ, разницы коэффициентов теплового расширения и разницы температур, но прямо пропорционально квадрату высоты индиевых контактов  $h$  [6].

Как следует из приведенной формулы, при заданном размере матрицы и рабочей температуре остаются только два способа повысить надежность соединения МФЧЭ и мультиплексора, а именно: уменьшить разницу коэффициентов расширения или увеличить высоту столбов. Первый способ связан с утоньшением МФЧЭ и не рассматривается в настоящей работе. Следует отметить, что при утоньшении матрицы и просто для придания прочности МФПУ пространство между МФЧЭ и мультиплексором может быть заполнено компаундом, которому для проникновения необходим зазор не менее 10 мкм и соответствующая высота индиевых межсоединений. Кроме того, высокие столбики облегчают процесс стыковки и повышают значения допуска на параллельность, разброс по высоте и другие требуемые параметры.

**Головин Сергей Вадимович**, старший научный сотрудник<sup>1</sup>.

**Мезин Юрий Сергеевич**, главный специалист<sup>1</sup>.

**Седнев Михаил Васильевич**, начальник участка<sup>1</sup>.

**Еремчук Анатолий Иванович**, главный технолог<sup>2</sup>.

**Корнеева Марина Дамировна**, зам. генерального директора, профессор<sup>1,3</sup>.

<sup>1</sup> АО «НПО «Орион».

Россия, 111395, Москва, ул. Косинская, 9.

Тел. 8 (499) 374-81-30.

E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup> АО «Швабе-Фотоприбор».

Россия, 111123, Москва, ул. Плеханова, 2/46, стр. 5.

<sup>3</sup> Московский институт радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА).

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2015 г.

© Головин С. В., Мезин Ю. С., Седнев М. В., Еремчук А. И., Корнеева М. Д., 2015

Целью данной работы является исследование индиевых столбиков в процессе изготовления с целью увеличения их высоты в интересах повышения надежности МФПУ ИК-диапазона.

### Описание процесса

Современные способы изготовления столбиков для стыковки можно разделить на две основные группы. Первая использует гальваническое нанесение индия, вторая — термическое напыление. Гальванические методы существенно уступают по однородности высоты столбиков из-за практически неизбежных различий плотности тока через матрицу во время осаждения индия, тогда как термическое напыление в вакууме обеспечивает почти нулевой разброс толщины слоя.

В настоящее время также разрабатываются различные процессы изготовления массива столбчатых контактов на посторонней подложке и последующего их переноса на МФЧЭ. Однако пока широкого распространения они не получили и остаются на стадии экспериментов, хотя и обладают рядом потенциальных преимуществ перед упомянутыми группами.

Способы, относящиеся ко второй группе, являются наиболее популярными и в стандартном варианте, как правило, используют взрывную фотолитографию и (или) переплавку столбиков. Тем не менее, реализация этих методов не проста и требует работы с толстыми (до 10 мкм и более) слоями фоторезиста, причем негативного. Возможно применение позитивного толстого резиста, но при этом количество операций еще более возрастает, а сам процесс превращается в многоэтапную сложную процедуру. Об этом можно судить по работе [6], где применялся резист AZ P4620, который давал пленку толщиной 10 мкм за одно нанесение при 2000 об/мин, поверх нее наносился еще резист AZ 4330, после чего все это замачивалось в хлорбензине для контролируемого изменения свойств резиста. Высота столбов, изготовленных в [6] взрывной фотолитографией с применением подобных нестандартных манипуляций, составила всего 10 мкм. Подобное усложнение обычно ведет к низкому проценту выхода годных приборных структур и поэтому нежелательно.

В настоящей работе проведено исследование разных стадий процесса изготовления высоких столбиков из напыленного индия с применением только стандартных операций прямой контактной фотолитографии и химического травления.

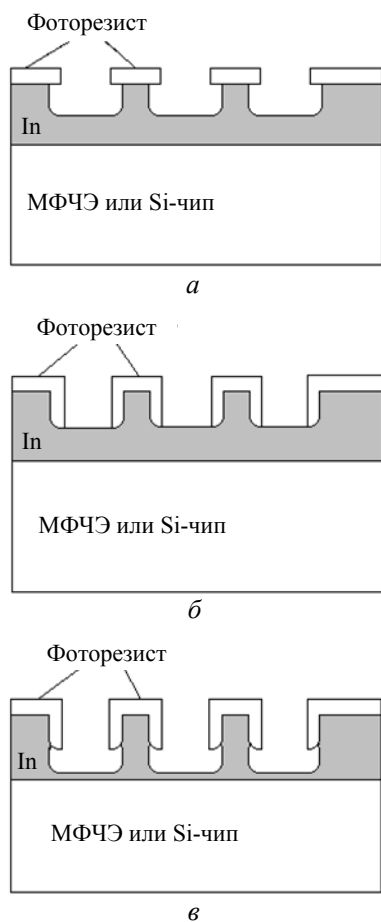
Напыление индия проводилось термически на установке ВУП. Во время процесса держатель подложки охлаждался водой. Слои имели толщину

10, 12 и иногда 14 мкм. Структура слоя обычно имела мелкозернистую природу, но при напылении на приборные структуры МФЧЭ на базе эпитаксиальных слоев CdHgTe/CdTe часто получались гладкие блестящие пленки. На сложность изготовления столбиков морфология пленки влияла слабо, хотя зернистые пленки травились более однородно, чем гладкие. Степень зернистости могла немного регулироваться изменением интенсивности охлаждения подложки.

В статье для наглядности представлен процесс изготовления столбов высотой 12 мкм на технологической подложке вместо приборной структуры. Подложка была проводящей, что облегчало исследование с помощью электронного микроскопа. Совмещение при последовательных фотолитографических процедурах проводилось по рисунку без использования знаков совмещения на установке Karl Suss MJB3. Использовался позитивный фоторезист ФП27-4Г отечественного производства, дающий толщину пленки 4 мкм при нормальных оборотах нанесения, и светлополюсный (площадка столба непрозрачна для ультрафиолета) шаблон для МФЧЭ с шагом 28 мкм. Величина площадки составляла 24×24 мкм, т. е. зазор составлял 4 мкм.

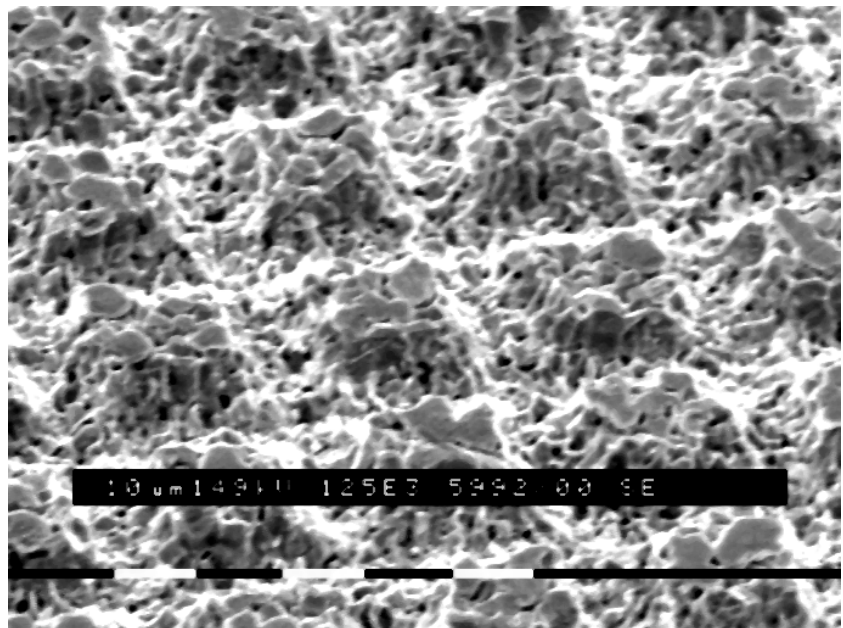
На рис. 1 схематически изображены отдельные стадии изготовления столбиков, дающие представление о процессе в целом. Вначале на поверхность индия на высоких оборотах наносился относительно тонкий (примерно 2 мкм) слой резиста ФП27-4Г и при помощи литографии закрывались площадки столбов. Затем, после задубливания, проводилось прецизионное химическое травление индия In (рис. 1, а), при этом при помощи микроскопа контролировались размеры площадок столбов, которые были видны через слой фоторезиста. По достижении требуемой для стыковки площади верхушки, составляющей примерно 14×14 мкм<sup>2</sup>, процесс прекращался, и резист снимался. В итоге получалась начальная мезаструктура In, показанная на рис. 2 (изображение получено на микроскопе Philips SEM). В ходе последующих операций она постепенно углублялась до самой подложки вплоть до устранения закороток между столбами, но размер верхушки оставался в дальнейшем неизменным и, таким образом, задавался на начальном этапе. Глубина мезаструктуры In после первого травления обычно равнялась 6—7 мкм, т. е. половине общей толщины индия.

Для травления In могут использоваться различные растворы, хотя, особенно на заключительных стадиях, следует использовать травители, не затрагивающие подложку. Например, для МФЧЭ на CdHgTe допускается применение HBr.



**Рис. 1.** Схематическое изображение основных стадий процесса изготовления индиевых столбиков для МФПУ ИК-диапазона. *а* — первое травление напыленного слоя In после первой фотолитографии и получение мезаструктуры, *б* — проведение фотолитографии на мезаструктуре, *в* — второе травление In и углубление мезаструктуры

После формирования мезаструктуры глубиной 6—7 мкм на ней последовательно проводились операции литографии и травления, в результате чего она углублялась и постепенно превращалась в массив индиевых столбиков. Однако в отличие от начального этапа, на пластине присутствовал рельеф, что вызывало необходимость работы с толстыми слоями резиста. Для этого фоторезист наносился в два слоя с промежуточной просушкой на скорости около 4000—5000 об/мин в зависимости от глубины рельефа. После нанесения второго слоя проводился обязательный контроль того, что верхушки изготавливаемых столбиков закрыты. Нанесение в два слоя позволяет не только получить надежное покрытие всей структуры при минимально возможной толщине резиста, но и уменьшает величину краевого валика, облегчая его удаление.

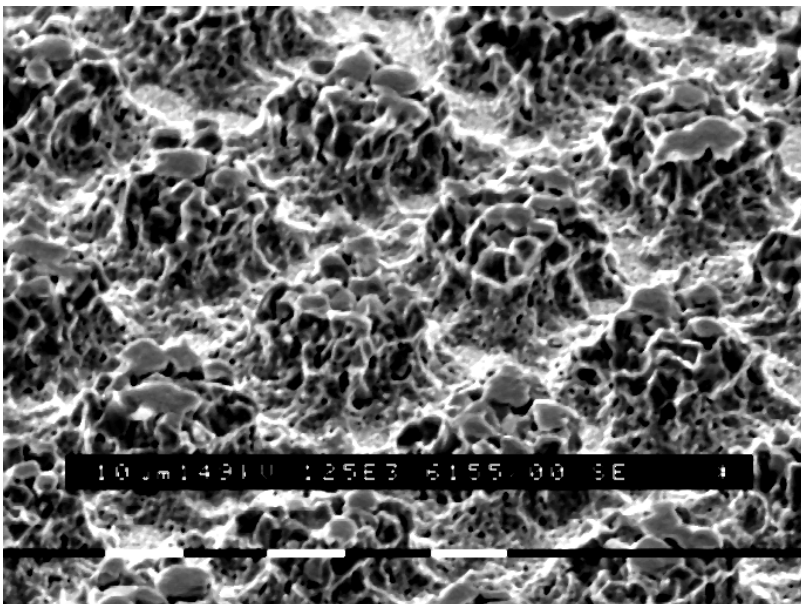
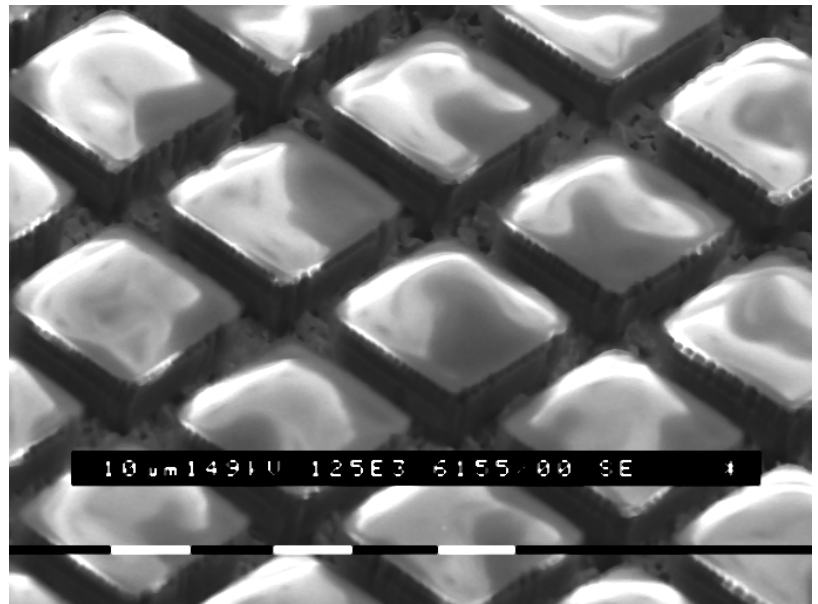


**Рис. 2.** Изображение мезаструктуры, полученной в результате первого химического травления In

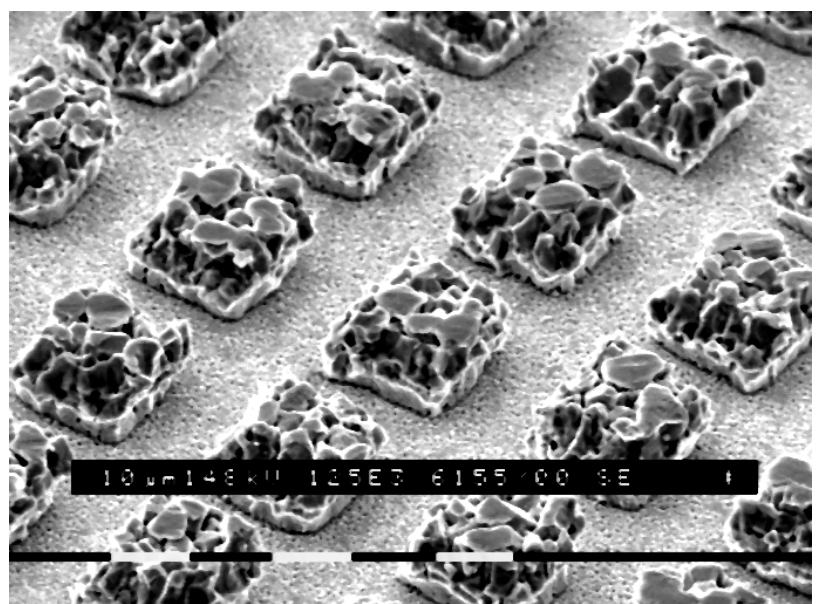
Совмещение и экспонирование также проводилось в два приема с промежуточным проявлением, поскольку это позволяет уменьшить суммарное требуемое время экспозиции толстого слоя между столбами и, следовательно, предотвратить повреждение резиста на верхушках и боковых поверхностях столбов из-за боковой засветки и недостаточно плотного контакта пластины и шаблона. В результате этой операции каждый будущий столбик оказывался заключенным в футляр из фоторезиста (рис. 1, *б*). На рис. 3 представлена фотография структуры на этой стадии. Как можно видеть, верхушки и боковые вертикальные поверхности столбов надежно защищены, так что после задубливания показанную структуру можно подвергать травлению (на фотографии рис. 3 резист еще не задублен).

Если при первом травлении In процесс останавливался после получения нужного размера площади верхушек столбиков, то при втором и последующих визуальный контроль был невозможен. Время процесса определялось экспериментально исходя из скорости травления слоя In в конкретном травителе. При травлении столбиков на МФЧЭ из CdHgTe в HBr допустимое время составляло не более полутора минут. После этого резист снимался (на рис. 4 показан вид структуры после второго травления), все операции по углублению мезаструктуры повторялись, слой индия между столбами утончался (рис. 1, *в*) и так вплоть до окончательного формирования столбиков (рис. 5).

*Рис. 3. Вид мезоструктуры In, изображенной на рис. 2, после проведения фотолитографии (резист не задублен)*



*Рис. 4. Мезоструктура после повторного травления In*



*Рис. 5. Окончательный вид изготовленных индиевых столбиков после третьего травления. Высота 12 мкм, шаг матрицы 28 мкм*

Следует отметить, что превышение допустимого времени травления вызывало искажение формы столбиков. При «перетравливании» площадь поперечного сечения уменьшалась, и могла появиться «грибообразность», когда столбик состоял из шляпки на тонкой ножке. Подобная форма не подходит для стыковки и поэтому не допускалась.

Для изготовления столбов высотой 12 мкм с шагом 28 мкм на подложке, показанных на рис. 5, потребовалось провести по 3 операции фотолитографии и химического травления. В целом общее количество процессов зависело от шага МФЧЭ, требуемой высоты столбов и структуры напыленного индия на конкретной пластине. Например, при шаге около 50 мкм и высоте 10 мкм обычно требуется провести по два процесса, и только при мелкозернистой структуре слоя In иногда можно сразу получить незакороченные столбы после первого травления. При шаге 28 мкм и высоте 12 или 14 мкм требуется провести как минимум по 3 фо-

толитографии и 3 травления, чаще всего по 4, а иногда и по 5. Несмотря на кажущееся большое число производственных операций, все они являются стандартными и при определенном навыке оператора особого труда не представляют.

На рис. 6 показаны столбики высотой 12 мкм, изготовленные на многорядной МФЧЭ на CdHgTe с шагом по осям 56 и 48 мкм. Изображение слегка размыто из-за наличия диэлектрического покрытия на матрице. Как и на рис. 5, верхушки имеют неровности из-за зернистости индия. На качестве стыковки это никак не сказывалось, поэтому переплавка столбиков не проводилась. В [6] также отмечалось, что операция переплавки столбов является необязательной при изготовлении МФЧЭ. Тем более эта процедура нежелательна для МФЧЭ на CdHgTe, поскольку в этом случае необходимый для переплавки нагрев до 200 °С, даже кратковременный, может привести к изменению свойств материала из-за испарения ртути.

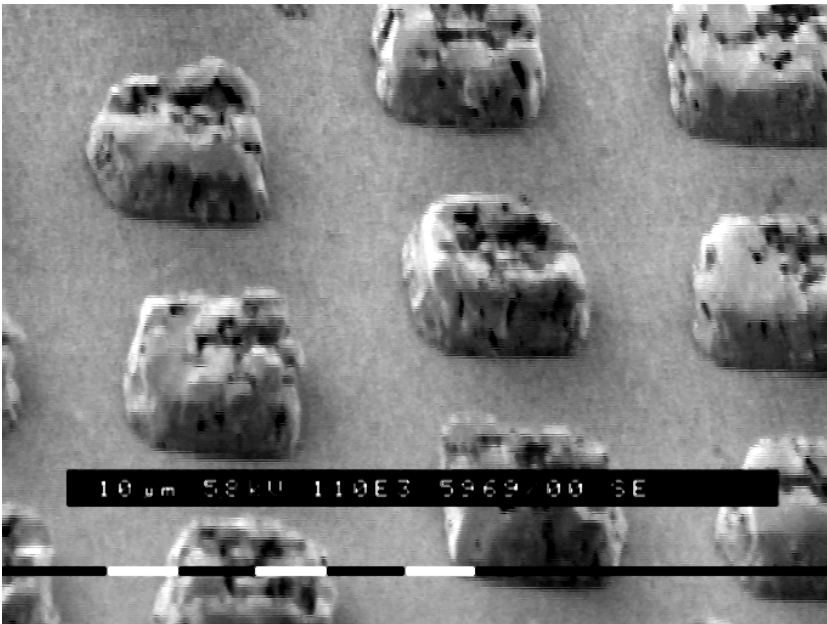


Рис. 6. Изображение столбиков на многорядной МФЧЭ из CdHgTe. Высота 12 мкм, шаг по осям 56 и 48 мкм

### Заключение

В статье проведено исследование индиевых столбиков, полученных при помощи прямой контактной фотолитографии и химического травления, на разных стадиях их изготовления. Разработан метод изготовления, пригодный для получения столбов высотой до 12 мкм и более на любых подложках, который подходит как для МФЧЭ, так и для кремниевых схем обработки сигнала. Процесс не включает в себя нестандартных операций и поэтому обладает высокой надежностью и воспроизводимостью. Изготовив предложенным методом 12-мкм столбики на МФЧЭ и мультиплексоре, после их гибридации можно получить зазор и высоту In контакта около 20 мкм (с учетом деформации In при стыковке). Это обеспечит высокую

надежность охлаждаемых до жидкого азота МФПУ ИК-диапазона и позволит без утоньшения применять МФЧЭ из CdHgTe размером до 1,5 см и более.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Клименко А. Г., Недосекина Т. Н., Карнаева Н. В. и др. // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 12. С. 63.
2. Новоселов А. Р., Косулина И. Г., Паулиш А. Г. и др. // Прикладная физика. 2010. № 5. С. 77.
3. Новоселов А. Р., Косулина И. Г. // Автотметрия. 2009. Т. 45. № 6. С. 119.
4. Новоселов А. Р., Косулина И. Г., Клименко А. Г. и др. // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2008. № 3. С. 60.
5. Болтарь К. О., Корнеева М. Д., Мезин Ю. С. и др. // Прикладная физика. 2011. № 1. С. 96.
6. Jutao Jiang, Stanley Tsao, Thomas O'Sullivan, et al. // Infrared Physics and Technology. 2004. V. 45. P. 143.

## Study of indium bumps for focal plane arrays

*S. V. Golovin<sup>1</sup>, Yu. S. Mezin<sup>1</sup>, M. V. Sednev<sup>1</sup>, A. I. Eremchuk<sup>2</sup>, and M. D. Korneeva<sup>1,3</sup>*

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

<sup>2</sup> Shvabe-Photopribor, Inc.  
Bld. 5, 2/46 Plekhanov str., Moscow, 111123, Russia

<sup>3</sup> Moscow Institute of Radio Electronics and Automatics (MERA)  
78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia

*Received November 27, 2015*

***Consideration is given to fabrication of the indium columnar microcontacts for hybrid FPAs of the IR range. It is shown that the 12- $\mu\text{m}$  columns can be made by means of photolithography and chemical etching. They have the 1- $\mu\text{m}$  roughness.***

PACS: 85.60.-q

*Keywords:* photolithography, matrix photodetector, indium columns, MCT.

### REFERENCES

1. A. G. Klimenko, T. N. Nasedkina, N. V. Karneeva, et al., *Opticheskii Zhurnal* **76** (12), 63 (2009).
2. A. R. Novoselov, I. G. Kosulina, A. G. Paulish, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 77 (2010).
3. A. R. Novoselov and I. G. Kosulina, *Optoelectron., Instrum. Data Process*, **45** (6), 119 (2009).
4. A. R. Novoselov, I. G. Kosulina, A. G. Klimenko, et al., *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Ser.: Material. Elektron. Tekhniki*, No. 3, 60 (2008).
5. K. O. Boltar, M. D. Korneeva, Yu. S. Mezin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 96 (2011).
6. Jutao Jiang, Stanley Tsao, Thomas O'Sullivan, et al., *Infrared Physics and Technology* **45**, 143 (2004).