

Плазмохимическое травление двухслойной маски молибден-фоторезист

Н. С. Трухачева, М. В. Седнев, А. В. Трухачев, А. В. Ляликов

Проведены исследования плазмохимического травления отверстий в двухслойной маске молибден-фоторезист, предназначенной для формирования Lift-of-технологией контактов к фоточувствительным элементам матриц 640×512 на основе nВр гетероэпитаксиальных структур с активным слоем InGaAs. Установлено, что после плазмохимического травления окон в жертвенном слое поверхность основы, предназначенной для напыления металла, имеет шероховатость с характерными значениями $R_a = 0,007$ и $R_z = 0,058$ мкм соответственно, которые превышают более чем на порядок неровности исходной поверхности основы. Показано, что после плазмохимического травления окон в жертвенном слое на поверхности основы остается перфорированный слой толщиной в несколько десятков нанометров, не поддающийся дальнейшему травлению. Предложен способ обработки пластин с двухслойной маской молибден-фоторезист раствором КОН определенной концентрации, что позволило удалять перфорированный слой, образовавшийся при плазмохимическом травлении отверстий в маске. Полученные результаты позволили уменьшить дефектность и увеличить процент выхода годных матриц.

Ключевые слова: InGaAs, матрица фоточувствительных элементов, МФЧЭ, гетероэпитаксиальные структуры, ГЭС, Lift-of-технология, плазмохимическое травление.

Ссылка: Трухачева Н. С., Седнев М. В., Трухачев А. В., Ляликов А. В. // Прикладная физика. 2019. № 4. С. 54.

Reference: N. S. Trukhacheva, M. V. Sednev, A. V. Trukhachev, and A. V. Lyalikov, Prikl. Fiz., No. 4, 54 (2019).

Введение

Lift-of-технология является важным инструментом при разработке и производстве твердотельных микроэлектронных устройств и используется для формирования элементов топологии с различным функциональным назначением с высокой точностью [1–5]. Возможности этого метода могут обеспечивать

копирование рисунка фотошаблона с точностью нанометрового диапазона. Часто Lift-of-технология применяется при изготовлении микроконтактов, в том числе высоких, используемых при гибридизации фоточувствительных матриц и БИС считывания [5–10].

Альтернативный метод копирования рисунка фотошаблона прямым травлением напыленного слоя через маску фоторезиста не может обеспечить достаточной точности из-за изотропии процесса растворения металла [3]. Поэтому минимальное расстояние между микроконтактами не может быть меньше толщины слоя металла. Кроме этого, из-за неоднородного травления по площади трудно изготовить микроконтакты с одинаковыми размерами вершины на пластинах с площадью более $4 \div 5$ см².

Важной отличительной особенностью Lift-of-технологии является возможность

Трухачева Наталия Сергеевна, инженер-технолог 2 кат.
Седнев Михаил Васильевич, нач. участка, к.т.н.
Трухачев Антон Владимирович, инженер-технолог 2 кат.
Ляликов Алексей Владимирович, вед. инженер.
АО «НПО «Орион».
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 12 июля 2019 г.

© Трухачева Н. С., Седнев М. В., Трухачев А. В.,
Ляликов А. В., 2019

формирования элементов топологии из химически инертных материалов, а также исключить воздействие на поверхность основы жидкостных реагентов, применяемых при формировании элементов топологии прямым травлением [1–3].

Однако при практической реализации достоинств Lift-of-технологии возникают определенные трудности. Так, физико-химические основы процесса изготовления однослойной маски на позитивных фоторезистах не позволяют формировать вертикальную стенку окна с отрицательным наклоном, обеспечивающим область полутени на основе по отношению к потоку напыляемого материала. Как видно из рис. 1, неизбежное напыление металла на вертикальную стенку окна в однослойной маске препятствует проникновению растворителя к жертвенному слою фоторезиста, что ограничивает толщину топологического элемента до 0,05–0,1 мкм.

Наиболее полно возможности Lift-of-метода раскрываются при использовании двухслойной маски (см. рис. 1). Область тени, образуемая верхней частью маски, обеспечивает доступ растворителя к жертвенному слою даже после напыления материала пленочного покрытия методом магнетронного распыления, если его толщина меньше слоя фоторезиста.

В представленной работе обсуждаются результаты исследования состояния поверхности после вскрытия окон в двухслойной маске молибден-фоторезист в результате плазмохимического травления молибдена по маске фоторезиста и фоторезиста по маске из молибдена и обработки пластин с двухслойной маской молибден-фоторезист раствором КОН.

Подготовка образцов и техника эксперимента

Исследования проводили на пластинах кремния диаметром 60 мм с эпитаксиальным слоем кремния, легированного фосфором, и на *nVp* гетероэпитаксиальных структурах (ГЭС) с фото-активным слоем InGaAs диаметром 51,8 мм. Измерения шероховатости чистой кремниевой пластины показали $R_a = 0,002$ мкм; $R_z = 0,01$ мкм, что соответствует погрешности используемого в работе контактного профилометра. После отмытки в органических растворителях на пластинах изготавливали двухслойную маску для формирования Lift-of-методом контактов к элементам матриц ФЧЭ (никель 300 Å + золото 1000 Å) и БИС считывания (In 5–6 мкм). Для этого на пластины наносили центрифугированием слой фоторезиста ФП-0,5 или ФП-27 толщиной 0,5 и 5–6 мкм соответственно. На поверхность фоторезиста магнетронным распылением напыляли молибден, толщина слоя 70 нм, на который наносили другой слой фоторезиста (ФП-0,5), а затем фотолитографией формировали окна для травления Mo. Отверстия в маске получали последовательным плазмохимическим травлением молибдена в газовой среде (CF₄-O₂) и фоторезиста в кислороде.

Операции нанесения, сушки, экспонирования, проявления фоторезиста выполняли на

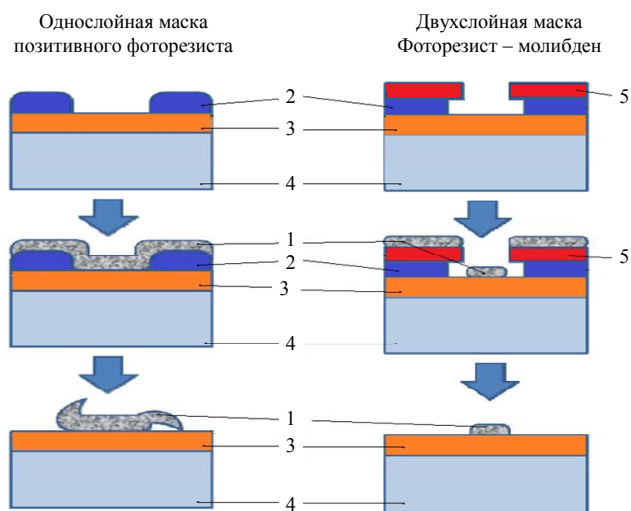


Рис. 1. Схематическое изображение Lift-of-технологии с использованием однослойной либо двухслойной маски для формирования контактов резистивным или электронно-лучевым напылением: 1 – никель/золото; 2 – фоторезист; 3 – эпитаксиальный кремний; 4 – кремниевая подложка; 5 – молибден.

Использование негативных фоторезистов решает задачу получения профиля окна с отрицательным наклоном в ряде технологических применений. Однако разрешающая способность этой группы фоторезистов хуже, что ограничивает точность копирования с фотошаблона.

стандартном фотолитографическом оборудовании с точностью совмещения до 1 мкм.

Плазмохимическое травление молибдена выполняли в объемной плазме при давлении смеси фреона с кислородом 40 Па, травление фоторезиста производили на установке реактивного травления при давлении кислорода в камере 44 Па.

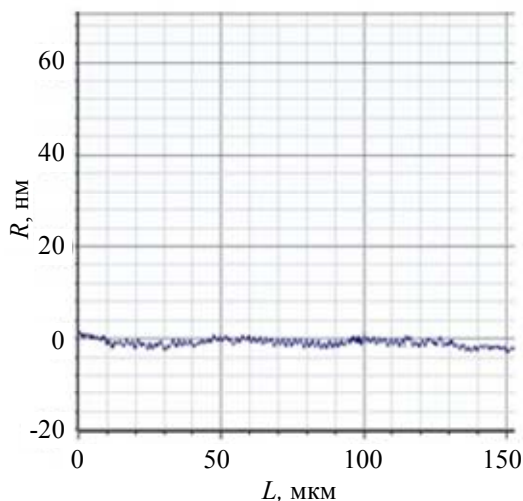
Шероховатость поверхности определяли с помощью контактного профилометра, обеспечивающего погрешность не более 20 Å.

Поверхность исследовали с помощью растрового электронного микроскопа с функцией рентгеновского анализатора элементного состава, а также с применением лабораторного микроскопа с увеличением 500 крат, оснащенного цифровой 8-мегапиксельной фотокамерой.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Сравнение исходной поверхности кремния с поверхностью в окнах после травления двухслойной маски в темном поле лабораторного микроскопа позволило установить существенные различия: темное изображение полированной исходной поверхности кремния и

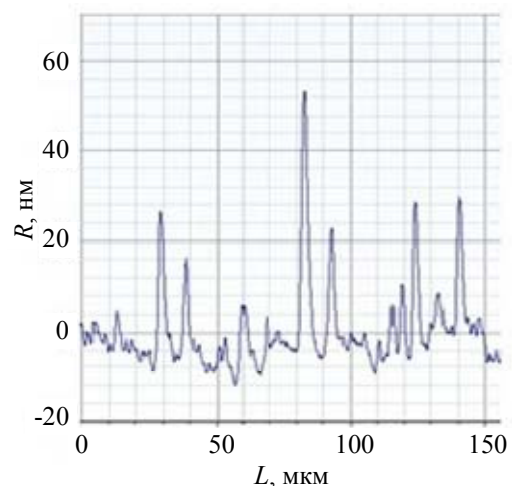
светящейся поверхности, рассеивающей отраженный свет под разными углами, после травления маски. На рис. 2 представлены результаты измерения шероховатости контактным профилометром. Среднеквадратичное отклонение R_a исходной поверхности кремния не превышает 2 нм, а в окнах после плазмохимического травления молибдена и фоторезиста возрастает на порядок. Рентгеноспектральный анализ обнаруживает как на поверхности маски, так и в окнах наличие молибдена. Изображение фрагмента поверхности образца с двухслойной маской после плазмохимического травления окон на поверхности кремниевой эпитаксиальной структуры, полученное с помощью растрового электронного микроскопа, представлено на рис. 3, а и свидетельствует о наличии на поверхности основы нитевидных образований произвольной формы, причем с характерными размерами по длине 1–1,5 мкм и ширине 0,3 мкм. Рентгеноспектральный анализ на поверхности основы в окнах обнаруживает наличие молибдена в количественном отношении на два порядка меньше, чем на поверхности маски. К сожалению, легкие элементы, такие как углерод, кислород, водород, не распознаются используемым в работе методом.



$$R_a = 1 \text{ нм} = 0,001 \text{ мкм}$$

$$R_z = 8 \text{ нм} = 0,008 \text{ мкм}$$

а



$$R_a = 6 \text{ нм} = 0,006 \text{ мкм}$$

$$R_z = 70 \text{ нм} = 0,07 \text{ мкм}$$

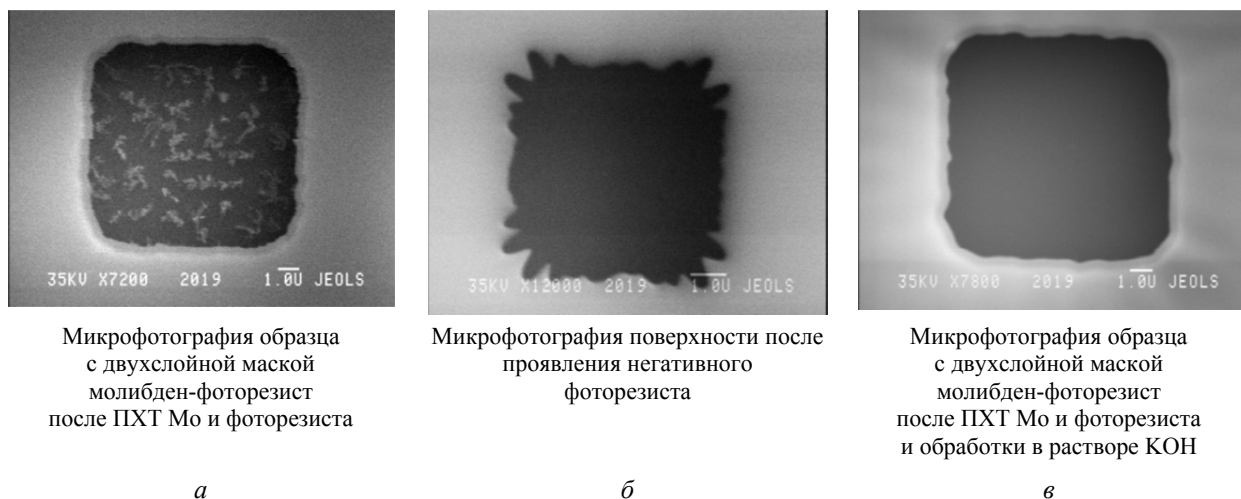
б

Рис. 2. Шероховатость R поверхности кремния, измеренная контактным профилометром, длина сканирования $L = 150$ мкм: а – исходная поверхность, б – в окнах после плазмохимического травления молибдена и фоторезиста.

Для сравнения на рис. 3, б показана микрофотография поверхности после жидкостного проявления маски негативного фоторезиста. Шероховатость поверхности в окне соответствует значению на чистой основе. В отсутствие металлического слоя на поверхности фоторезиста не обеспечивается сток заряда с фоторезиста при сканировании луча электронного микроскопа, что может приводить к искажению изображения края маски. В то же время наблюдаемое искривление линии края маски в пределах 1 мкм можно объяснить меньшей разрешающей способностью негативного фоторезиста по сравнению с позитивным, что подтвердилось сравнением

изображений края окна до и после напыления тонкого слоя металла, обеспечивающего сток заряда.

Удалить остатки продуктов плазмохимического травления (ПХТ) и улучшить состояние поверхности основы при использовании двухслойной маски удается жидкостной обработкой пластины с маской в растворе щелочи КОН. Микрофотография образца с двухслойной маской молибден-фоторезист после ПХТ Мо и фоторезиста и обработки в растворе КОН представлена на рис. 3, в. Среднеквадратичное отклонение R_a не превышает 2 нм и идентично измеренной на исходной поверхности кремния.



Микрофотография образца с двухслойной маской молибден-фоторезист после ПХТ Мо и фоторезиста

а

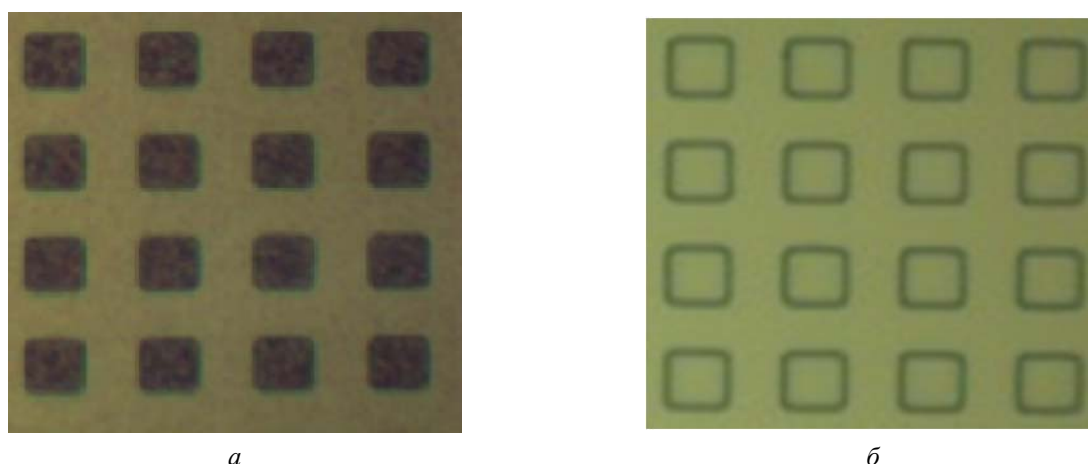
Микрофотография поверхности после проявления негативного фоторезиста

б

Микрофотография образца с двухслойной маской молибден-фоторезист после ПХТ Мо и фоторезиста и обработки в растворе КОН

в

Рис. 3. Изображения фрагментов образцов с маской на поверхности кремниевой эпитаксиальной структуры, полученное с помощью растрового электронного микроскопа: а – двухслойной маской после плазмохимического травления, б – однослойного негативного фоторезиста, в – двухслойной маски молибден-фоторезист после ПХТ Мо и фоторезиста и обработки в растворе КОН.



а

б

Рис. 4. Фотоизображения фрагментов матриц ФЧЭ 640×512 с шагом 15 мкм после напыления слоев металлов никель-золото на двухслойную маску: а – непосредственно после плазмохимического травления, б – после дополнительной жидкостной обработки в растворе КОН.

После напыления металлического покрытия «никель-золото» фотоизображения существенно отличаются для поверхностей с двухслойной маской молибден-фоторезист и отверстий в ней, полученных плазмохимическим травлением и открывающих поверхность основы. На рис. 4, а представлена поверхность маски зеркальная и отражает свет с характерным для золота оттенком, тогда как на поверхности основы, в отверстиях, наблюдается мелкозернистая структура напыленного слоя, которая видна при 500-кратном увеличении микроскопа. Измеренная высота профиля контакта, сформированного Lift-of-процессом, составила 0,18 мкм и значительно

превысила толщину 0,12 мкм, заданную процессом напыления.

Финишная обработка маски в растворе КОН удаляет в окнах с поверхности основы остатки продуктов плазмохимического травления, как было показано выше, что обеспечивает идентичную исходной шероховатость поверхности. Это продемонстрировано данными представленной таблицы. Высота профиля Ni-Au после Lift-of-процесса составляет 0,12 мкм. При этом при наблюдении в микроскоп не обнаруживается отличий в изображениях поверхности основы и маски, что видно на рис. 4, б.

Таблица

Результаты завершенного плазмохимического процесса

№ образца	Подготовка поверхности основы в окнах маски для Lift-of-процесса		Шероховатость поверхности в окнах после обработки перед напылением, мкм	Высота профиля Ni-Au после Lift-of-процесса, мкм
	Плазмохимическое травление маски	Обработка в растворе КОН		
СМ-1	+	-	$R_a = 0,006$ $R_z = 0,07$	0,18
СМ-3	+	+	$R_a = 0,001$ $R_z = 0,008$	0,12

Заключение

Анализ полученных результатов свидетельствует, что после плазмохимического травления двухслойной маски молибден-фоторезист в жертвенном слое на поверхности основы остается перфорированный слой толщиной в несколько десятков нанометров, не поддающийся дальнейшему травлению в кислородной плазме.

Обработка пластин с двухслойной маской молибден-фоторезист раствором КОН определенной концентрации позволяет удалять перфорированный слой, образовавшийся при плазмохимическом травлении отверстий в маске.

Использование маски негативного фоторезиста ограничивает возможности копирования элементов топологии Lift-of-технологией из-за меньшей разрешающей способности негативного фоторезиста по сравнению с позитивным.

Полученные результаты использованы в технологическом маршруте изготовления матриц ФЧЭ на основе InGaAs для *nVp* ГЭС формата 640×512 с шагом 15 мкм. Обработка

пластин с двухслойной маской молибден-фоторезист раствором КОН перед напылением металла повышает процент выхода годных матриц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Adam Lyonsa, Ranganath Tekib, John Hartleya, // URL: proceedings.spiedigitallibrary.org/ (on 06/15/20162)
2. Thomas E. Wilson Konstantin A. Korolev Nathaniel A. Crow, // J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS. 2015. Vol. 14. No. 1. P. 014501
3. Седнев М. В., Бурлаков И. Д., Болтарь К. О. // Прикладная физика. 2007. № 5. С. 58.
4. Speshilova A. B., Solov'ev Yu. V., Alexandrov S. E. // Russian Journal of Applied Chemistry. 2016. Vol. 89. No. 8. P. 1317.
5. Седнев М. В. Болтарь К. О., Мезин Ю. С., Климанов Е. А., Шаронов Ю. П. // Прикладная физика. 2012. № 1. С. 90.
6. Батырев Н. И., Климанов Е. А., Лисейкин В. П., Надров Д. Р., Седнев М. В. // Прикладная физика. 2012. № 6. С. 142.
7. Седнев М. В., Зубкова Е. Н., Шаронов Ю. П. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 350.
8. Болтарь К.О., Смирнов Д. В., Седнев М. В. Способ изготовления индиевых микроконтактов. Заявка № 2014141993 от 20.10.14. Патент 2571436, зарегистр. 24.11.2015.

9. Седнев М. В., Болтарь К. О., Климанов Е. А., Шаронов Ю. П., Коротин С. Д., Широков С. А. Способ изготовления микроконтактов матричных фотоприемников. Патент 2522802 от 27.03.2013.

10. Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Седнев М. В., Патрашин А. И., Иродов Н. А. // Прикладная физика. 2014. № 6. С. 45.

11. Седнев М. В., Болтарь К. О., Климанов Е. А., Микертумянц А. Р. Способ изготовления индиевых кон-

тактов с помощью позитивного обрабатываемого фоторезиста. Патент 2522769 от 09.01.2013.

12. Седнев М. В., Атрашков А. С. // Прикладная физика. 2017. № 4. С. 78.

13. Седнев М. В., Лопухин А. А., Атрашков А. А. Способ изготовления многоэлементного ИК фотоприемника. Патент 2628449 от 16.08.2017.

14. Ranganathan Nagarajan and Rakesh Kumar // Proceedings of SPIE. 2002. Vol. 4936. <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/> (on 07/07/2016)

PACS: 85.60.-q

Investigation of the plasma chemical etching process of the bi-layered molybdenum-photoresist mask

N. S. Trukhacheva, M. V. Sednev, A. V. Trukhachev, and A. V. Lyalikov

Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

Received July 12, 2019

The paper studies the plasma chemical etching process of the bi-layered molybdenum-photoresist mask for IR focal plane arrays (FPA) based on InGaAs 640×512. The investigation shows that after the plasma chemical etching process the layer density about dozens nanometers on the surface of the wafer remains which doesn't yield further etching. In this paper presented the method of processing wafers with certain concentration solution of KOH after the plasma chemical etching that permit to remove this layer from the surface of the wafer and to proceed the further process.

Keywords: InGaAs, Focal Plane Array, heteroepitaxial structures, «Lift-of», plasma chemical etching.

REFERENCES

1. Adam Lyonsa, Ranganath Tekib, John Hartleya, URL: proceedings.spiedigitallibrary.org/ (on 06/15/20162)
2. Thomas E. Wilson Konstantin A. Korolev Nathaniel A. Crow, J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS **14** (1), 014501 (2015).
3. I. D. Burlakov, K. O. Boltar, and M. V. Sednev, Prikl. Fiz., No. 5, 58 (2007).
4. A. B. Speshilova, Yu. V. Solov'ev, and S. E. Alexandrov, Russian Journal of Applied Chemistry **89** (8), 1317 (2016).
5. M. V. Sednev, K. O. Boltar, Y. S. Mezin, E. A. Klimanov, and Y. P. Sharonov, Prikl. Fiz., No. 1, 90 (2012).
6. N. I. Batyrev, E. A. Klimanov, V. P. Liseykin, D. R. Nadrov, and M. V. Sednev, Prikl. Fiz. No. 6, 142 (2012).
7. M. V. Sednev, E. N. Zubkova, and Y. P. Sharonov, Prikl. Fiz. No. 1, 3, 350 (2013).
8. K. O. Boltar, D. V. Smirnov, and M. V. Sednev, *Method of production indium microcontacts*. (Patent 2571436, 24.11.2015).
9. M. V. Sednev, K. O. Boltar, E. A. Klimanov, and Y. P. Sharonov, Method of production FPA microcontacts. (Patent 2522802, 27.03.2013)
10. N. I. Yakovleva, K. O. Boltar, M. V. Sednev, I. A. Patrashin, and N. A. Irodov, Prikl. Fiz., No. 2, 45 (2014).
11. M. V. Sednev, K. O. Boltar, and E. A. Klimanov, and A. R. Mikertumyants, *Method of production indium contacts*. (Patent 2522769, 09.01.2013).
12. M. V. Sednev and A. A. Atrashkov, Prikl. Fiz., No. 4, 78 (2017).
13. M. V. Sednev, A. A. Lopuhin, and A. A. Atrashkov, *Method of production IR detector*. (Patent №2628449, 16.08.2017).
14. Modification of photoresist profile in lift-off process for MEMS application Ranganathan Nagarajan and Rakesh Kumar, Nano- and Microtechnology: Materials, Processes, Packaging, and Systems, Dinesh K. Sood, Ajay P. Malshe, Ryutaro Maeda, Editors, Proceedings of SPIE Vol. 4936 (2002) © 2002 SPIE · 0277-786X/02/\$15.00, Downloaded From: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/> on 07/07/2016.