

Фотозлектроника

УДК 535.231.6

Неохлаждаемое микроболометрическое фотоприемное устройство формата 320×240 на основе оксида ванадия, полученного методом реактивного ионно-лучевого распыления

В.Ш. Алиев, М.А. Демьяненко, Д.Г. Есаев, И.В. Марчишин, В.Н. Овсяк, Б.И. Фомин

Установлено, что метод реактивного ионно-лучевого распыления в сравнении с золь-гель методом позволяет получать слои оксида ванадия, обладающие более высоким температурным коэффициентом сопротивления, большей однородностью и меньшим 1/f шумом. Применение этого метода позволило, не изменяя конструкцию и остальные технологические операции изготовления микроболометрического фотоприемного устройства формата 320×240, понизить эквивалентную шуму разность температур такого приемника от значения 100 мК, достигнутого в рамках золь-гель метода, до 50 мК.

PACS: 07.57.Kp; 73.50.Lw; 73.50.Td; 81.15.Cd; 81.15.Jj; 81.20.Fw

Ключевые слова: микроболометр, оксид ванадия, ионно-лучевое распыление, золь-гель, неохлаждаемый, инфракрасный, приемник.

Введение

Неохлаждаемые матричные микроболометрические приемники (ММБП) инфракрасного (ИК) излучения благодаря постоянному улучшению технических и потребительских характеристик находят все более широкое применение в различных областях человеческой деятельности [1–3].

Разработанная нами ранее [4, 5] технология изготовления неохлаждаемых ММБП, основанная на золь-гель методе получения термочувствительных слоев оксидов ванадия (VO_x), позволила создать фотоприемные устройства (ФПУ) формата 160×120 и 320×240 с эквивалентной шуму разностью температур (NETD) менее чем 100 мК при угле зрения 60° и частоте кадров 50 Гц. Учитывая, что полученные нами значения NETD [4, 5] существенно уступали значениям, достигнутому в мире [1–3], мы провели модернизацию нашей технологии путем замены золь-гель метода получения термочувствительных слоев оксидов ванадия на метод реактивного ионно-лучевого распы-

ления-осаждения (Ion Beam Sputtering Deposition) [6], который преимущественно применяется в зарубежных фирмах при производстве матричных микроболометрических приемников [7–10].

Целью данной работы являлось сравнение основных параметров термочувствительных слоев, изготовленных двумя указанными выше методами, и представление параметров ФПУ, достигнутых в результате такой модернизации технологии.

Конструкция и технология изготовления матричного микроболометрического фотоприемного устройства формата 320×240

Матричное микроболометрическое ФПУ (ММБ ФПУ) формата 320×240 с шагом 51 мкм, на улучшение технических характеристик которого направлена рассматриваемая в данной работе модернизация технологии, состоит из матричного микроболометрического приемника, малогабаритного вакуумного корпуса с просветленным германиевым окном, газопоглотителя (геттера), термоэлектрического охладителя и транзисторного датчика температуры, необходимых для стабилизации температуры ММБП. Матричный микроболометрический приемник представляет собой массив фоточувствительных микроболометров мостикового типа, изготовленных интегральным способом на кремниевом кристалле, в котором уже выполнена схема считывания сигналов (мультиплексор). Мультиплексор формата 320×240, использующий мостовую схему включения микроболометров и ориентированный на базовую

Алиев Владимир Шакирович, ст. научн. сотрудник.
Демьяненко Михаил Алексеевич, ст. научн. сотрудник.
Есаев Дмитрий Георгиевич, зав. лабораторией.
Марчишин Игорь Владимирович, ст. научн. сотрудник.
Овсяк Виктор Николаевич, гл. научн. сотрудник.
Фомин Борис Иванович, вед. научн. сотрудник.
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова
Сибирского отделения РАН.
Россия, 630090, Новосибирск, пр-т. Ак. Лаврентьева, 13.
Тел.: (383) 333–10–81. E-mail: demyankenko@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 20 января 2013 г.

© Алиев В.Ш., Демьяненко М.А., Есаев Д.Г., Марчишин И.Н., Овсяк В.Н., Фомин Б.И., 2013

КМОП-технологии с топологической нормой 1,2 мкм, разработан ОАО «Ангстрем» совместно с ОАО «ЦНИИ «Циклон». Конструкция и технология изготовления всех элементов ММБ ФПУ, включая мультиплексор, вакуумный корпус и несущие микроболометрические мостики, остались неизменными и представлены ранее в работе [5]. Изменения коснулись только термочувствительного элемента, а именно, технологии нанесения слоя оксида ванадия. Отдельно отметим, что топология микроболометров не изменялась, т.е. использовались те же фотошаблоны, что и в работе [5].

Термочувствительные слои оксида ванадия, использованные в работе [5], были получены золь-гель методом, кратко описанным в работе [4]. Слои обладали аморфной структурой и имели слоевое сопротивление 90–130 кОм/квadrat при толщине ≈ 70 нм. В настоящей работе слои оксидов ванадия были выращены методом реактивного ионно-лучевого распыления-осаждения. Мишень из металлического ванадия ($V > 99,5\%$) распылялась в вакуумной камере в присутствии кислорода высокой чистоты ($O > 99,999\%$), который подавался в вакуумную камеру, откачиваемую криогенным насосом. Слои VO_x наносились при комнатной температуре и обладали аморфной структурой. С целью повышения качества наносимых слоев было использовано ассистирование процесса роста пучком ионов аргона с энергией 40 эВ и плотностью ионного тока на поверхности образца около $0,1$ мА/см². Слоевое сопротивление задавалось парциальным давлением кислорода в вакуумной камере и скоростью распыления ванадиевой мишени. Типичные толщины слоев около 120 нм выращивались за 40–50 минут. Также как и в работе [5], с целью минимизации влияния последующих технологических операций на свойства слоя VO_x его поверхность защищалась плазмохимическим нитридом кремния толщиной 30–35 нм, после чего проводилось формирование топологии термочувствительного элемента, а затем выполнялись остальные операции технологического маршрута.

Сравнительный анализ слоев оксидов ванадия, полученных золь-гель и ионно-лучевым методами

Одним из важнейших параметров, определяющих качество слоев оксидов ванадия, используемых в качестве термочувствительных элементов микроболометрических приемников, является температурный коэффициент сопротивления (ТКС), т.к. чувствительность микроболометра пропорциональна его величине.

На рис. 1 приведены зависимости ТКС α от удельного сопротивления ρ слоев оксидов ванадия, полученных нами с помощью золь-гель и ионно-лучевого методов. В обоих материалах ТКС возрастает с ростом удельного сопротивления и, следовательно, предпочтительными являются большие удельные сопротивления. Однако следует учитывать, что при использовании слоев VO_x с толщиной $\approx 0,1$ мкм и удельным сопротивлением $\rho \approx 3$ Ом·см сопротивление микроболометра с топологией термочувствительного элемента, близкой к квадрату, составит ≈ 300 кОм. Шум Джонсона такого микроболометра равен 70 нВ/Гц^{1/2}, что при времени интегрирования, равном 50 мкс, даст интегральный шум $V_n \approx 7$ мкВ, совпадающий с шумом использованного нами мультиплексора [5]. Следовательно, рабочие слои VO_x должны иметь удельное сопротивление менее 3 Ом·см. В этой области слои VO_x , полученные ионно-лучевым методом, характеризуются более высокими значениями ТКС по сравнению со слоями, полученными золь-гель методом. Кроме того, особенности процесса восстановления золь-гель слоев от предельного оксида V_2O_5 до оксидов с составом близким к VO_2 [4] приводят к тому, что наиболее воспроизводимыми и однородными являются слои с удельным сопротивлением $\rho \approx 1$ Ом·см. Это, в свою очередь, еще больше понижает величину ТКС рабочих золь-гель слоев VO_x .

Сравнивая приведенные на рис. 1 зависимости с данными работ [7, 8], отметим, что использованные нами золь-гель слои оксидов ванадия по характеристике удельное сопротивление—ТКС близки к слоям, получаемым методом импульсного магнетронного распыления без высокочастотного смещения. В то время как слои VO_x , полученные нами с помощью ионно-лучевого метода,

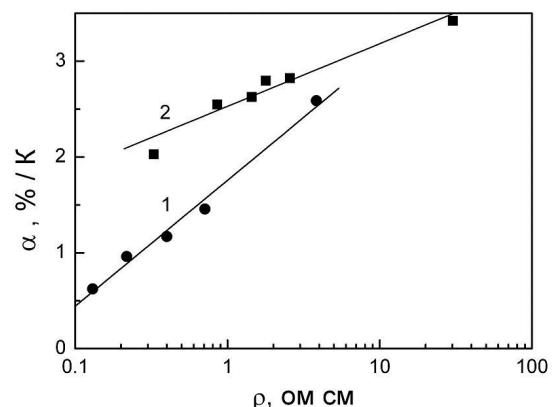


Рис. 1. Зависимости температурного коэффициента сопротивления слоев оксидов ванадия, полученных золь-гель (1) и ионно-лучевым (2) методами, от их удельного сопротивления при комнатной температуре.

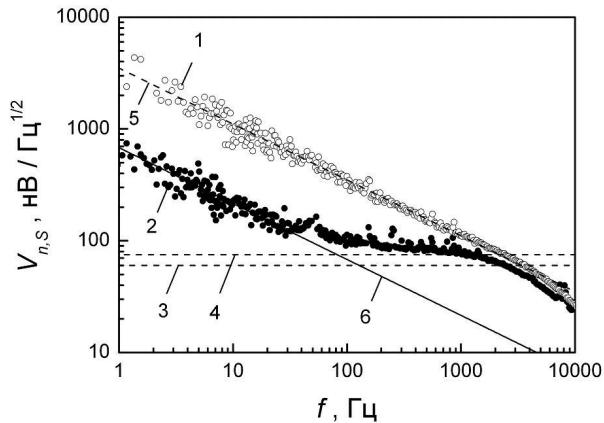


Рис. 2. Спектральные зависимости шума микроболометров, изготовленных по золь-гель (1, 3, 5) и ионно-лучевой технологиям (2, 4, 6). 1, 2 — измерения при смещении болометров равном 2 В; 3, 4 и 5, 6 — аппроксимации шума Джонсона и $1/f$ шума.

соответствуют слоям, полученным аналогичным методом, а также методом импульсного магнетронного распыления с высокочастотным смещением.

Другим важнейшим параметром, определяющим качество слоев оксидов ванадия, используемых в качестве термочувствительных элементов микроболометрических приемников, является $1/f$ шум. Его интегральная по рабочей полосе частот величина должна быть мала по сравнению с интегральными значениями шума Джонсона и шума мультиплексора. На рис. 2 приведены частотные зависимости спектральной плотности шума V_{nS} двух микроболометров, изготовленных по золь-гель и ионно-лучевой технологиям, с сопротивлениями, соответственно, равными 220 и 350 кОм. Для измерения шума использовались одиночные тестовые микроболометры, идентичные микроболометрам чувствительной матрицы и расположенные по краю кристалла ММБП. При смещении, равном нулю, регистрируется только независимый от частоты шум Джонсона. Наблюдаемое уменьшение шума при частотах более 1000 Гц обусловлено шунтированием микроболометра электрической емкостью кабеля, соединяющего его с анализатором шума. Видно, что $1/f$ шум микроболометра, изготовленного по ионно-лучевой технологии, значительно меньше аналогичного шума микроболометра, изготовленного по золь-гель технологии, однако все еще остается больше величины $1/f$ шума, достигнутой в работе [11]. Проинтегрированный по рабочей полосе частот $1-10^4$ Гц $1/f$ шум микроболометров, приведенных на рис. 2, равен 2 и 11 мкВ, соответственно.

Однородность сопротивлений микроболометров по массиву чувствительных элементов ММБП также является важным параметром. Вы-

сокая неоднородность сопротивлений микроболометров не позволяет установить достаточно большое время интегрирования сигнала, что позволило бы понизить рабочую полосу частот и получить низкий интегральный шум, приведенный к болометру. Это обусловлено тем, что в используемом нами мультиплексоре с ростом времени интегрирования пропорционально возрастает и коэффициент усиления A_V интегрирующих усилителей, вследствие чего разброс входных напряжений указанных усилителей, в свою очередь, обусловленных высоким разбросом сопротивлений микроболометров, после усиления может превысить диапазон выходных напряжений мультиплексора, что приведет к потере чувствительности большого количества микроболометров. Рис. 3 показывает, что ионно-лучевой метод нанесения слоев оксидов ванадия позволяет получать ММБП с более высокой однородностью сопротивлений микроболометров, чем в случае применения золь-гель метода. Относительный разброс сопротивлений микроболометров $\Delta R/R$ по массиву чувствительных элементов ММБП измерялся с помощью методики, изложенной в работе [12].

В таблице приведены параметры ФПУ, изготовленных по золь-гель и ионно-лучевой технологиям. Здесь $V_n(4)$ и $V_n(0)$ — шумы выходного напряжения ФПУ при рабочем смещении мостовой схемы, равном 4 В, и при отсутствии такого смещения; S_T и S_T/A_V — абсолютная и приведенная ко входу усилителя температурные чувствительности ФПУ при угле зрения на протяженное абсолютно черное тело (АЧТ), равном 60° ; $V_{1/f}$ и $V_{1/f}/A_V$ — интегральный $1/f$ шум микроболометров на выходе ФПУ, определенный соотношением $V_{1/f} = (V_n(4)^2 - V_n(0)^2)^{1/2}$, и приведенный ко входу усилителя, соответственно. Все приведенные в таблице величины ($V_n(4)$, $V_n(0)$, S_T , A_V ,

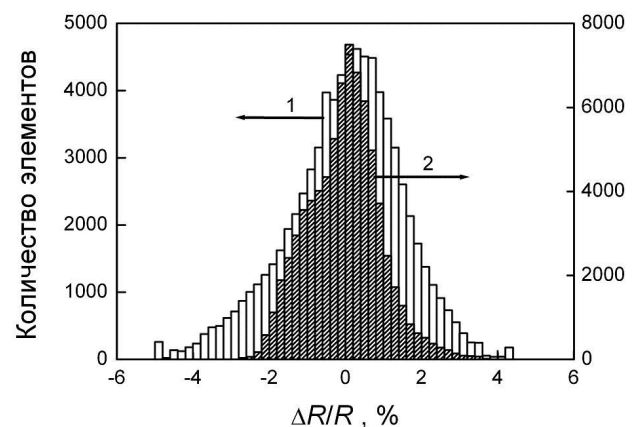


Рис. 3. Гистограммы распределения относительного разброса сопротивлений микроболометров по элементам ФПУ формата 320×240 , изготовленных по золь-гель (1) и ионно-лучевой (2) технологиям.

$V_{1/f}$ и NETD) являются усредненными по массиву чувствительных элементов ММБП. Видно, что, в целом, при больших значениях коэффициента усиления A_V и, следовательно, больших временах интегрирования выходной шум находящихся в рабочем режиме ФПУ, изготовленных по ионно-лучевой технологии, оказывается меньше или не превышает значений для ФПУ, изготовленных по золь-гель технологии. Кроме того, выходной шум ФПУ, изготовленных по ионно-лучевой технологии, слабо или практически незаметно изменяется при включении $V_n(4)$ или отключении $V_n(0)$ смещения микроболометров. Это указывает на малость $1/f$ шума в таких термочувствительных слоях. Действительно, интегральный $1/f$ шум, приведенный ко входу усилителя, $V_{1/f}/A_V$ оказывается меньше шума мультиплексора, равного ≈ 7 мВ, в то время как в ФПУ, изготовленных по золь-гель технологии, он превышает шум мультиплексора (см. таблицу). Отметим, что указанные в таблице значения интегрального $1/f$ шума, приведенного ко входу усилителя, близки к значениям найденным выше путем интегрирования спектральных зависимостей шума, показанных на рис. 2. Повышенный ТКС слоев оксидов ванадия, полученных ионно-лучевым методом, обеспечивает повышенную приведенную ко входу усилителя величину температурной чувствительности S_T/A_V , а повышенный коэффициент усиления еще больше увеличивает ее абсолютное значение S_T по сравнению с ФПУ, изготовленными по золь-гель технологии.

В результате указанных преимуществ слоев оксидов ванадия, полученных ионно-лучевым методом, величина NETD для ФПУ формата 320×240 была понижена вдвое по сравнению с такими же ФПУ, изготовленными по золь-гель технологии, т.е. до величин 50 мК и менее при угле зрения 60° и частоте кадров 50 Гц (см. таблицу).

Пример теплового изображения, полученного с помощью изготовленного по ионно-лучевой технологии ММБ ФПУ и германиевого объектива с относительным отверстием 1/1, приведен на рис. 4. Видно, что качество изображения, полученного без усреднения по кадрам, позволяет уверенно различать температуру кожи вблизи кровеносных сосудов на руке и вдали от них. Однако

следует заметить, что величина указанного перепада температур может значительно меняться в зависимости от состояния организма в данный момент. Более объективная и информативная иллюстрация чувствительности ММБ ФПУ основана на регистрации малого изменения температуры протяженного АЧТ. На вставке рис. 4 приведено тепловое изображение протяженного АЧТ с температурой 25,05 °С, полученное после вычитания из него «темнового кадра», снятого при температуре АЧТ, равной 25,00 °С. Хорошо виден излучатель АЧТ, имеющий форму диска диаметром 75 мм, температуру которого повысили на 0,05 °С. Отметим, что «темновой кадр» получали путем усреднения по 36 кадрам, а остальные кадры — без использования усреднения. В данном случае применялся германиевый объектив с относительным отверстием 1/0,8.

Распределения сигналов по строке и столбцу, пересекающих изображения АЧТ, аналогичные показанному на вставке рис. 4, приведены на рис. 5. Температура АЧТ изменялась от 25,00 °С до 25,05 и 25,10 °С, соответственно. Использовался режим измерителя температуры, в котором изменение напряжения выходного сигнала каждого j -го пикселя ФПУ ΔV_j , вызванное изменением температуры АЧТ, нормируется на измеренную в процессе калибровки ФПУ температурную чувствительность данного пикселя $S_{T,j}$, так, что нормированный сигнал $\Delta T_{S,j} = \Delta V_j / S_{T,j}$ в линейном приближении соответствует изменению температуры ΔT наблюдаемого объекта (в данном случае АЧТ). Для каждого уровня сигнала измерения проводились как без усреднения по кадрам, так и при усреднении по шести кадрам. Видно, что изменение температуры АЧТ на 0,05 °С приводят к различимому сигналу даже по данным одного столбца или строки и без усреднения по кадрам. Температурная чувствительность S_T данного ФПУ при использовании объектива с относительным отверстием 1/0,8 составляла 6,3 мВ/К, что совместно с измеренным без усреднения по кадрам временным шумом, равным 0,38 мВ, соответствует величине NETD, равной 60 мК. Усреднение по шести кадрам оказывается эффективным вследствие малости $1/f$ шума ФПУ и понижает NETD до 30

Таблица.

Сравнение параметров ФПУ, изготовленных двумя разными технологиями.

Номер ФПУ	$V_n(4)$, мВ	$V_n(0)$, мВ	A_V	S_T , мВ/К	S_T/A_V , мкВ/К	$V_{1/f}/A_V$, мкВ	NETD, мК
Технология реактивного ионно-лучевого распыления-осаждения							
0_2А	0,51	0,45	41,4	9,67	234	5,8	54
0_7	0,31	0,29	27,6	6,59	239	4,0	49
0_9	0,38	0,37	40,3	9,92	246	2,1	38
Золь-гель технология							
8_1	0,51	0,37	35,5	6,84	193	9,9	75
8_2	0,50	0,35	33	4,92	149	10,8	102
8_3	0,40	0,30	22	3,35	152	12,0	121

мК. Усреднение по большему количеству кадров не приводило к дальнейшему понижению NETD. Средний по кадру геометрический шум, измеренный через 1–2 с после вычитания сигналов «темнового кадра», также составлял 0,38 мВ (или 60 мК) и затем медленно повышался до 0,42 мВ (67 мК) в течение 500 с, что задает характерное время активации калибровочной шторки.

Ранее нами отмечалось [13], что ММБ ФПУ обладают чувствительностью и в терагерцовом диапазоне, демонстрируя при этом пороговую мощность $P_{th, THz}$, равную ≈ 30 нВт/пиксель на длине волны 130 мкм. Учитывая, что усовершенствование технологии касалось только слоев VO_x , которые сами не производят значительного поглощения инфракрасного и терагерцового излучения [14], можно полагать, что достигнутое в инфракрасном диапазоне двукратное уменьшение NETD и, следовательно, пороговой мощности $P_{th, IR}$ распространяется также и на терагерцовый диапазон, в котором пороговая мощность $P_{th, THz}$ из-

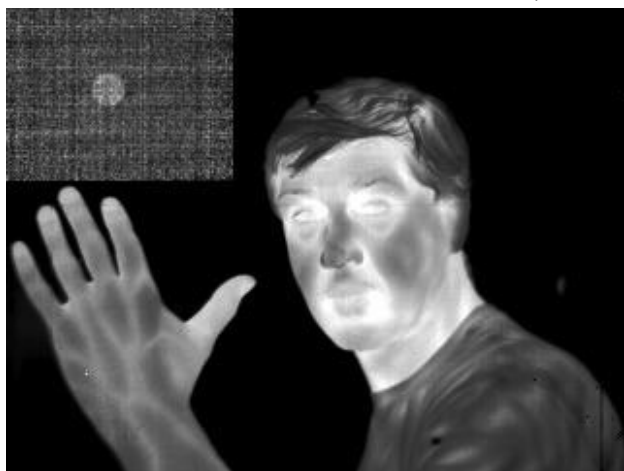


Рис. 4. Тепловое изображение, полученное с использованием неохлаждаемого микроболлометрического ФПУ формата 320×240, изготовленного по ионно-лучевой технологии. На вставке показано тепловое изображение АЧТ, полученное при изменении температуры его излучателя на 0,05 °С.

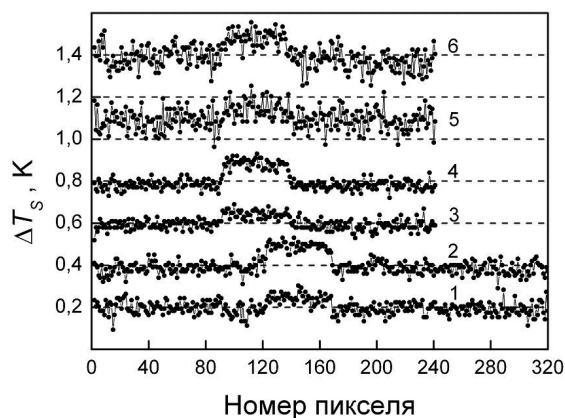


Рис. 5. Распределение сигналов ММБ ФПУ формата 320×240 по строке (1, 2) и столбцу (3–6), вызванных изменением температуры АЧТ на 0,05 °С (1, 3, 5) и 0,1 °С (2, 4, 6), при использовании усреднения по шести кадрам (1–4) и без усреднения (5, 6).

меренная на длине волны 130 мкм, теперь должна ожидаться равной 15 нВт/пиксель.

Заключение

Применение метода реактивного ионно-лучевого распыления-осаждения для нанесения слоев оксидов ванадия позволило:

- 1) повысить температурный коэффициент сопротивления термочувствительных слоев;
- 2) повысить их однородность по сопротивлению, что позволило, используя более высокие коэффициенты усиления сигнала и большее время его интегрирования, увеличить чувствительность и уменьшить интегральный шум Джонсона;
- 3) существенно понизить величину $1/f$ шума микроболлометров.

В результате эквивалентная шуму разность температур для ММБ ФПУ формата 320×240 с шагом 51 мкм была понижена до величин 50 мК и менее при угле зрения 60° и частоте кадров 50 Гц. Достигнутое качество термочувствительных слоев позволяет ставить в качестве ближайших задач разработку ММБП с размером пикселей 25 мкм при сохранении эквивалентной шуму разности температур не хуже 50 мК, а также разработку ФПУ, не требующих стабилизации температуры ММБП.

Литература

1. Li C., Han C.J., Skidmore G. D., Hess C. DRS // Proc. SPIE. 2010. V. 7660. P.76600V.
2. Mizrahi U., Schapiro F., Bykov L., Giladi A., et al. // Proc. SPIE. 2012. V. 8353. P. 83531H.
3. Robert P., Tissot J.L., Pochic D., et al. // Proc. SPIE. 2012. V. 8353. P. 83531F.
4. Овсяк В.Н., Шашкин В.В., Демьяненко М.А. и др. // Прикладная физика. 2005. № 6. С. 114.
5. Демьяненко М.А., Фомин Б.И., Васильева Л.Л., и др. // Прикладная физика. 2010. № 4. С.124.
6. Lee C.C., Hsu J.C., Wei D.T., Shen C. H. // Thin Solid Films. 1996. V.290–291. P. 88.
7. Cabarcos O.M., Basantani H.A., Bharadwaja S. S. N., et al. // Proc. SPIE. 2011 V. 8012, P. 80121K.
8. Gauntt B.D., Li J., Cabarcos O. M., Basantani H. A., et al. // Proc. SPIE. 2011. V. 8012. P. 80123T.
9. Han C.J., Howard C.G., Howard P.E., et al. // Proc. SPIE. 2004. V. 5406. P. 483.
10. Cole B.E., Higashi R.E., Ridley J.A., Wood R.A. // Proc. SPIE. 2001. V. 4369. P. 235.
11. Marshall C., Butler N., Blackwell R., et al. // Proc. SPIE. 1996. V. 2746. P. 23.
12. Ovsyuk V.N., Shashkin V.V., Fomin B.I., et al. // Proc. SPIE. 2005. V. 5957, P. 59571R.
13. Демьяненко М.А., Есаев Д.Г., Овсяк В.Н., и др. // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 12. С. 5.
14. Демьяненко М.А., Есаев Д.Г., Овсяк В.Н., и др. // «Вестник НГУ», серия «Физика». 2010. Т. 5. № 4. С. 73.

320×240 microbolometer uncooled IR FPA and sensor on basis reactive ion beam sputtered vanadium oxides

V.Sh. Aliev, M.A. Dem'yanenko, D.G. Esaev, I.V. Marchishin, V.N. Ovsyuk, and B.I. Fomin

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Russian Academy of Sciences,
13 Lavrentieva av., Novosibirsk, 630090, Russia
E-mail: demyanenko@isp.nsc.ru

It is found that the method of reactive ion beam sputtering in comparison with the sol-gel method allows to get vanadium oxide layers having a more high temperature coefficient of resistance, a better uniformity of resistance and a lower 1/f noise. Application of this method made it possible to reduce noise equivalent temperature difference of 320×240 microbolometer uncooled focal plane array from the value of 100 mK, achieved in framework of the sol-gel method, to 50 mK without changing design and other technological operations of the detector fabrication.

PACS: 07.57.Kp; 73.50.Lw; 73.50.Td; 81.15.Cd; 81.15.Jj; 81.20.Fw

Keywords: microbolometer, vanadium oxide, ion beam sputtering, sol-gel, uncooled, infrared, detector.

Bibliography — 14 references

Received January 200, 2013