DOI: 10.32603/1993-8985-2018-21-4-47-56

УДК 538.975

Г. А. Рудаков

НПК "Технологический центр"

Шокина пл., д. 1, Зеленоград, Москва, 124498, Россия

Р. З. Хафизов

ООО "ГрафИмпресс"

Стрелецкая ул., д. 6, Москва, 127018, Россия

Влияние теплового бюджета формирования кантилеверных консолей SiN_x/Al на начальные деформации тепловых сенсоров МЭМС

Аннотация. Механические свойства приборов и устройств микроэлектромеханических систем (МЭМС) во многом определяются их структурой и условиями изготовления: толщиной тонких пленок, температурой процессов их формирования, условиями осаждения и т. д. Эти условия, в частности температурные режимы осаждения и последующих термообработок, определяют остаточные напряжения в пленках и, как следствие, влияют на их начальные деформации, стабильность параметров, чувствительность и надежность. В связи с этим прогнозирование уровня остаточных напряжений и управление процессами формирования с целью их минимизации является важной частью конструктивно-технологического проектирования МЭМС.

В настоящей статье исследовано влияние термической обработки на остаточные механические напряжения пленок SiN_x , Al и структур SiN_x/Al . Показано, что растягивающие напряжения в пленках Al являются определяющими для остаточных напряжений структуры SiN_x/Al и возрастают при увеличении температуры и времени отжига. Это позволяет подобрать условия отжига и тепловой бюджет формирования структур таким образом, чтобы скомпенсировать сжимающие напряжения в слоях SiN_x и минимизировать суммарные остаточные напряжения и начальные деформации. Толщина слоев структуры SiN_x/Al слабо влияет на уровень остаточных механических напряжений, но соотношение толщин слоев SiN_x и Al является определяющим для термической деформации кантилеверной консоли.

Ключевые слова: биморфный кантилевер, структура SiN_x/Al , механические напряжения, деформации, тепловые сенсоры МЭМС

Для цитирования: Рудаков Г. А., Хафизов Р. З. Влияние теплового бюджета формирования кантилеверных консолей SiN_x/Al на начальные деформации тепловых сенсоров МЭМС // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 4. С. 47–56. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-4-47-56

Grigory A. Rudakov

SMC "Technological center"

1, Shokina Sq., Zelenograd, 124498, Moscow, Russia

Renat Z. Khafizov

GraphImpress Co Ltd

6, Streletskaia Str., 127018, Moscow, Russia

Initial Deformation of SiN_x/Al Cantilevers According to Thermal Budget for MEMS Sensors

Abstract. Mechanical properties of MEMS devices are specified by their structure and process parameters, such as temperature, films thickness, deposition conditions, etc. These features, in particular, the deposition temperature and post deposition treatments, determine the residual stress in the films, which affect the initial deformation, stability of parameters, sensitivity

ty and reliability. Prediction, control and minimization of residual stress are an important part of the structural and technological design of MEMS devices. The effect of post deposition thermal treatment on the residual mechanical stress of SiN_x/Al and SiN_x/Al films is studied. It is shown that the tensile stress in Al film is critical for residual mechanical stress of the SiN_x/Al structure and increases with the increase of temperature and time of post annealing. This allows to control the post annealing conditions and the process temperature budget to compensate the compressive stress in SiN_x films and to minimize the summary residual stresses and initial deformations of SiN_x/Al structure. The residual stress of the bilayer SiN_x/Al structure has little effect on the film thickness, but the ratio of SiN_x and Al thicknesses is significant for the thermal deformation of SiN_x/Al microcantilever.

Key words: bilayer cantilever, SiN_x/Al , residual stress, initial deformation, MEMS IR sensors

For citation: Rudakov G. A., Khafizov R. Z. Initial Deformation of SiN_x/Al Cantilevers According to Thermal Budget for MEMS Sensors. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2018, no. 4, pp. 47–56. doi:10.32603/1993-8985-2018-21-4-47-56 (In Russian)

Введение. Технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), активно развиваемые в последние годы ведущими электронными фирмами, стала основой революционного прорыва в реализации целого ряда принципиально новых изделий [1]–[3]. Широкое применение в качестве защитного и функционального материала в различных приборах МЭМС, таких, как акселерометры, резонаторы, электростатические переключатели, емкостные преобразователи и др., нашел нитрид кремния [4]–[6]. Среди структурных модификаций этого материала особое место занимает нестехиометрический нитрид кремния SiN_x , используемый в чувствительных к ИК-излучению элементах МЭМС в качестве поглощающего и функционального слоев. Выбор этого материала для создания тепловых сенсоров, изготовленных по технологии МЭМС, обусловлен возможностью эффективного использования энергии ИК-излучения за счет высокого коэффициента его поглощения SiN_x в диапазоне 8...14 мкм [7], [8] и низкой теплопроводностью, обеспечивающей минимальные тепловые потери. В сочетании с алюминием слои нестехиометрического нитрида кремния образуют биморфную структуру SiN_x/Al с высокой микромеханической чувствительностью вследствие значительного различия коэффициентов термического расширения SiN_x и Al [9].

Одно из необходимых требований к материалам, входящим в структуру элементов МЭМС, состоит в том, чтобы они не давали высоких остаточных механических напряжений после проведения всех технологических операций. В тепловых микромеханических сенсорах размеры мембран, формируемых из SiN_x , могут достигать 50...100 мкм по длине и ширине при толщине 0.5...1.0 мкм, а консоли, которые поддерживают мембраны в подвешенном состоянии относительно подложки, могут иметь длину до 50 мкм при ширине не более 5 мкм и толщине не более 0.3 мкм [9]. Очевидно, что при таких больших отношениях размеров даже небольшие начальные деформации

мембран или консолей могут приводить к прилипанию к нижележащей подложке или к избыточной деформации, делающей невозможной нормальную работу прибора.

Начальные деформации этих тонкопленочных элементов, возникающие после их вывешивания в свободное состояние, зависят от двух основных факторов: внутренних механических напряжений, связанных с процессом роста пленки, и термических напряжений, определяемых тепловым бюджетом¹ технологических операций. Источником термических напряжений являются деформации формируемых слоев и подложки, вызванные различием коэффициентов термического расширения материалов. Внутренние механические напряжения обусловлены рассогласованием кристаллических решеток, рекристаллизацией и другими фазовыми изменениями материала пленки в процессе формирования сплошного слоя.

Возможность прогнозирования уровня начальных деформаций и их вероятных отклонений, вызванных особенностями технологических процессов формирования тонких слоев SiN_x , Al и их сочетания, представляет существенный интерес при проектировании приборов МЭМС, в частности многоэлементных неохлаждаемых микромеханических приемников [10]–[15], в которых пленки SiN_x используются для формирования мембран, поглощающих ИК-излучение, а структуры SiN_x/Al – для создания консолей кантилеверов, поддерживающих теплочувствительную мембрану и обеспечивающих ее смещение в пространстве при воздействии ИК-излучения. Полученная на растровом электронном микроскопе (РЭМ) фотография матрицы описанных устройств приведена на рис. 1.

Одна из проблем при формировании тонких пленок, входящих в состав микромеханических сенсоров ИК-излучения, состоит в возможных проявлении

¹ Тепловой бюджет – совокупность температуры и времени операции формирования слоя и последующих термических процессов.

Рис. 1

ях, связанных с нестабильностью и релаксацией деформаций, которые могут возникать после изготовления мембранных структур и негативно влиять на функциональные характеристики ИК-сенсоров. Поэтому оптимизация конструкции и технологии с целью снижения отрицательных воздействий этих эффектов представляет актуальную задачу.

Настоящая статья посвящена исследованию остаточных механических напряжений пленок SiN_x , Al и структур SiN_x/Al в зависимости от условий последующей термической обработки и влияния конструктивных параметров на начальные деформации.

Подготовка структур и методы исследования.

В ходе экспериментальных исследований определялись зависимости остаточных механических напряжений в пленках SiN_x и Al от их толщины. Дополнительно исследовалось влияние теплового баланса термических обработок на значения остаточных механических напряжений в слоях нитрида кремния, алюминия и в биморфных структурах.

Эксперименты по оценке влияния толщины пленок SiN_x , Al на их остаточные механические напряжения проводились на образцах со слоями алюминия толщиной h_{Al} от 100 до 500 нм и нитрида кремния в диапазоне толщин $h_{\text{SiN}_x} = 300 \dots 1300$ нм, характерных для микромеханических приемников ИК-излучения.

Влияние термических обработок на значения остаточных механических напряжений исследовалось в температурном диапазоне $120 \dots 320$ °C на образцах с толщинами слоев нитрида кремния и алюминия 300 нм.

Слои SiN_x осаждались на чистые кремниевые пластины, а слои алюминия напылялись на пластины двух типов: с осажденным слоем SiN_x и с тонким термическим оксидом кремния, чтобы

исключить диффузию алюминия в кремний при последующей термической обработке.

В качестве исходных подложек использовались пластины монокристаллического кремния с ориентацией поверхности (100), легированного фосфором до удельного сопротивления 1.5 Ом/см, прошедшие предварительную химическую отмычку в перекисно-аммиачном растворе.

Одно из необходимых условий формирования слабонапряженных пленок SiN_x состоит в использовании низкотемпературных методов их осаждения, таких, как процессы плазмостимулированного химического осаждения из газовой фазы (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition – PECVD). Частным случаем такого процесса является ICPCVD (Inductive Coupling Plasma Chemical Vapor Deposition), представляющий собой PECVD-процесс, в котором в качестве источника плазмы высокой плотности используется индуктивно связанный разряд. Это позволяет проводить осаждение слоев при температурах ниже 350 °C с уникальными характеристиками и хорошим качеством [16], [17].

В описываемых экспериментах пленки SiN_x осаждались на установке плазмохимического осаждения PlasmaLab 133 ICPCVD компании Oxford Instruments. Осаждение проводилось при следующих технологических параметрах: температура электрода 250 °C, давление в рабочей камере 1.3 Па, мощность ICP-источника 1200 Вт, соотношение расходов газов моносилана и азота ($\text{SiH}_4 : \text{N}_2$) 1:3.

Слои алюминия напылялись на установке магнетронного напыления из мишени чистотой 99.99 % при мощности 1000 Вт и давлении 0.5 Па. Непосредственно перед напылением подложки нагревались до 180 °C для дегазации адсорбированной влаги с поверхности пластин и улучшения адгезионных свойств.

Механические напряжения слоев и структур вычислялись по методу Стони, основанному на изменении радиуса кривизны пластин под действием механических напряжений [18]. Радиус кривизны пластин определялся оптическим сканированием поверхности лазерным лучом с длиной волны 780 нм на измерительной системе FSM 500TC-R. Каждый цикл измерений включал в себя 7 последовательных сканирований в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Встроенная в FSM 500TC-R система нагрева позволяет измерять механические напряжения непосредственно в процессе циклического нагрева и охлаждения пластин со слоями и структурами в диапазоне температур 25...500 °C.

Экспериментальные результаты. На рис. 2 и 3 приведены зависимости значений остаточных механических напряжений σ от толщины слоев SiN_x (рис. 2) и Al (рис. 3). Полученные слои SiN_x обладают сжимающими напряжениями, что соответствует отрицательным значениям на рисунках, а слои Al – растягивающими напряжениями, представленными положительными значениями. Видно, что зависимости имеют слабо выраженный тренд на уменьшение абсолютных значений механических напряжений при увеличении толщины слоев. Обычно типовые отклонения толщин слоев от заданного номинала не превышают 10 %, поэтому при проектировании МЭМ-структур в первом приближении можно не принимать во внимание флуктуации механических напряжений, обусловленных толщинами слоев SiN_x и Al.

Как было показано в ряде работ [19]–[21], применение в качестве постобработки термического отжига позволяет изменять остаточные напряжения в сформированных тонких пленках. Для оценки влияния термообработки на остаточные механические напряжения в пленках SiN_x , Al и в структурах SiN_x/Al экспериментальные образцы подвергались термическому отжигу в среде азота при температурах в диапазоне от 120 до 320 °C. Отжиг представлял собой цикл, включающий нагрев от комнатной до заданной фиксированной температуры со скоростью 10 °C/мин, удержание

Рис. 2

Рис. 3

при заданной температуре в течение 30 мин и охлаждение естественным путем до исходной комнатной температуры. Для каждого типа образцов проводилось 3 цикла отжига со значениями температур тридцатиминутного удержания 120, 220 и 320 °C. На каждом из этапов цикла измерялась кривизна пластин для дальнейшего расчета механических напряжений. Измерения кривизны пластин осуществлялись без прерывания цикла, непосредственно в измерительной системе FSM 500TC-R в процессе их нагрева, удержания при заданной температуре и последующего остывания.

Изменения остаточных напряжений в процессе отжига представлены на рис. 4, где серые кривые 1 отражают процессы нагрева, кривые 2 – процессы охлаждения от температуры 120 °C, кривые 3 – охлаждение от температуры 220 °C, кривые 4 – от температуры 320 °C.

Переход от нагрева к охлаждению при указанных температурах предварялся тридцатиминутной выдержкой, во время которой механические напряжения немного уменьшались. Как видно из рис. 4, увеличение температуры отжига способствует снижению остаточных механических напряжений в слое SiN_x , но после охлаждения слоев до комнатной температуры механические напряжения возвращаются к значениям, близким к исходным. Незначительная разница между остаточными механическими напряжениями при температурах ниже и выше температуры формирования слоя может означать, что основной вклад в деформации вносят именно внутренние механические напряжения, зависящие от режимов формирования слоя.

Для пленок Al наблюдается увеличение остаточных напряжений после отжига при температурах выше температуры формирования слоя Al (180 °C). Такое поведение характерно для поликристаллических слоев и вызвано рекристаллизацией структуры слоя при превышении температуры его формирования [20]–[22]. Изменения значений и знака механических напряжений при нагревании свидетельствуют о существенном вкладе термической составляющей в остаточные механические напряжения в пленке Al. Характер изменений остаточных напряжений в структуре SiN_x/Al после отжига и в процессе нагрева схож с пленкой Al, с той лишь разницей, что не меняется знак напряжений.

На рис. 5 показано изменение механических напряжений во время отжига при постоянной температуре. Видно, что при температурах, превышающих температуру напыления слоя Al (180 °C),

Рис. 4

с увеличением времени отжига наблюдается тенденция к уменьшению значений механических напряжений. Для структуры SiN_x/Al эта тенденция менее выражена, чем для слоя Al.

На основании данных, представленных на рис. 4 и 5, можно предположить, что определяющий вклад в конечные значения механических напряжений в структуре SiN_x/Al с ростом температуры и времени отжига вносит пленка Al.

В процессе эксплуатации микромеханических приемников ИК-излучения биморфные структуры подвергаются многократным деформациям под воздействием изменения температур в небольшом диапазоне, что, вероятно, может приводить к дрейфу значения остаточных механических напряжений биморфной структуры. Указанный дрейф структуры SiN_x/Al оценивался по их изменению при многократном термоциклировании. Один термо-

цикл включал в себя нагрев образца до 50 °С со скоростью 10 °С/мин с последующим естественным остыванием до 30 °С. Перед каждым нагревом или остыванием образцы выдерживались при заданной температуре в течение 5 мин. Значения механических напряжений структуры SiN_x/Al в процессе термоциклирования, состоящего из 10 циклов, приведены на рис. 6. Заметных изменений средних значений механических напряжений, снятых при крайних значениях температуры в процессе термоциклирования, от цикла к циклу не наблюдается. Полученные значения лежат в пределах погрешности измерений.

С помощью процесса отжига, способствующего уменьшению остаточных механических напряжений в структуре SiN_x/Al , можно обеспечить выравнивание плоскости поглощающей тепло мембраны [23]. На рис. 7 представлены РЭМ-фотографии

Рис. 5

Рис. 6

Рис. 7

термомеханического транзистора с подвешенным на кантилеверных консолях SiN_x/Al теплочувствительным затвором [24] до отжига (рис. 7, а) и после отжига в атмосфере азота при температуре 320°C в течение 30 мин (рис. 7, б).

В отличие от внутренних напряжений, на которые влияет множество неопределенных факторов, остаточные деформации многослойных тонкопленочных структур, обусловленные тепловыми механическими напряжениями, можно прогнозировать методами численного моделирования. Результаты такого моделирования оказываются важными для выявления влияния конструктивных параметров полиморфных структур (геометрических размеров, толщины пленок, их соотношения и др.) на функциональные характеристики приборов на их основе.

Для экспериментального исследования начальных деформаций в биморфных кантилеверных структурах SiN_x/Al и численной оценки их температурной составляющей разработаны и изготовлены тестовые элементы (рис. 8). Элементы представляли собой кантилеверы со структурой SiN_x/Al шириной 4 мкм и длинами в диапазоне

Рис. 8

от 10 до 100 мкм с шагом 10 мкм. На рис. 9 представлены результаты численного моделирования температурных деформаций биморфных кантилеверов длиной 100 мкм для различных соотношений толщин слоев (см. таблицу) и температур формирования структуры. Для упрощения было принято, что все слои структуры формировались при одной температуре. Однако учитывая экспериментальные данные, описанные ранее, можно предположить,

Рис. 9

Элемент	h_{SiN_x} , нм	h_{Al} , нм
1	380	300
2	118	100
3	118	300
4	380	100

что в реальной ситуации температурой формирования структуры можно считать процесс осаждения слоя Al. Результаты моделирования демонстрируют зависимость деформаций структуры от температуры формирования и соотношения толщин слоев нитрида кремния и алюминия.

На рис. 10 приведена РЭМ-фотография тестовых элементов с биматериальными кантилеверными структурами SiN_x/Al , сформированных при температурах осаждения слоев SiN_x 250 °С, Al 180 °С (обозначения элементов соответствуют рис. 9). Видно, что при указанных условиях формирования деформации тестовых консолей хорошо согласуются с деформациями, полученными при моделировании структур с температурой формирования 200 °С.

Зависимость нормального сдвига конца консоли кантилевера Δz от соотношения толщин слоев и разницы температур описывается формулой [25]

Рис. 10

$$\Delta z = 3(\alpha_1 - \alpha_2)(l/h_2)^2 f(\chi, b) \Delta t,$$

где α_1 , α_2 – коэффициенты объемного расширения слоев SiN_x и Al соответственно; l – длина кантилевера; h_2 – толщина слоя SiN_x ; $f(\chi, b)$ – нормированная функция отклика; Δt – изменение температуры.

Функция $f(\chi, b)$ имеет вид

$$f(\chi, b) = \frac{\chi + 1}{b\chi^3 + 4\chi^2 + 6\chi + 4 + 1/(b\chi)},$$

где $\chi = h_1/h_2$ (h_1 – толщина слоя Al); $b = \bar{E}_1/\bar{E}_2$ – отношение модифицированных модулей упругости материалов слоев Al $\bar{E}_1$ и SiN_x $\bar{E}_2$.

Модифицированный модуль материала определяется как

$$\bar{E} = E/(1 - \nu),$$

где E , ν – модуль упругости материалов и его коэффициент Пуассона соответственно.

Зависимость функции $f(\chi, b)$ от χ для $b = 0.204$ структуры SiN_x/Al [25] представлена на рис. 11. На графике отмечены значения параметра χ , соответствующие изготовленным образцам, использованные при их моделировании. Из результатов моделирования и исследования экспериментальных образцов видно, что наибольшая термическая деформация соответствует кантилеверным консолям, обозначенным номером 2, для которых параметр χ равен ~0.85. График на рис. 11 показывает, что для этих образцов функция $f(\chi, b)$ имеет значение, близкое к максимуму, при $\chi = 1.05$.

Заключение. В настоящей статье представлены результаты исследования влияния температуры формирования и теплового бюджета последующих термических операций при изготовлении биморфных структур SiN_x/Al на остаточные механические напряжения и начальные деформации. Остаточные механические напряжения структуры являются суммой внутренних напряжений, зависящих от параметров процессов осаждения, и тепловых напряжений, вызванных различием коэффициентов термического расширения материалов. Показано, что в процессе термического отжига в слое SiN_x внутренние напряжения практически не меняются. Для слоя Al наблюдается возрастание растягивающих остаточных напряжений после термического отжига при температурах, превышающих температуру формирования слоя. Температура формирования слоя Al является критичной

для начальных деформаций биморфной структуры SiN_x/Al . Вариация температуры и времени отжига позволяет получать минимальные начальные деформации кантилеверных структур.

Толщины слоев SiN_x и Al в биморфных консолях слабо влияют на остаточные механические

напряжения, что позволяет ими пренебречь при оценке начальных деформаций. Однако для значений термической деформации соотношения толщин являются определяющими факторами. Наибольшая термическая деформация соответствует консолям кантилеверов с соотношениями толщин $\text{Al}/\text{SiN}_x = 0.85$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gaura E., Newman R. Smart MEMS and Sensor Systems. Imperial College Press, 2006. 552 p.
2. Enabling Technology for MEMS and Nanodevices / H. Baltes, O. Brand, G. K. Fedder, C. Hierold, J. G. Korvink, O. Tabata // Advanced Micro & Nanosystems. 2004. Vol. 1. Betreiber: Wiley-VCH, 2004. 430 p.
3. Hesketh P. J. BioNanoFluidic MEMS. Luxembourg: Springer, 2008. 292 p.
4. Ghodssi R., Lin P. MEMS Materials and Processes. Handbook. Luxembourg: Springer, 2008. 1188 p.
5. High sensitivity 25 μm and 50 μm pitch microcantilever IR imaging arrays / S. Hunter, G. Maurer, G. Simelgor, S. Radhakrishnan, J. Gray // Proc. of SPIE. 2007. Vol. 6542. P. 1–13.
6. Амеличев В. В., Ильков А. В. Конструктивно-технологический базис создания электроакустических преобразователей. Мир электроники. М.: Техносфера, 2012. 104 с.
7. Characterization of Nonstoichiometric Silicon Nitride PECVD/ALD Films for IR Micro-Detectors Arrays / G. A. Rudakov, A. A. Sigarev, V. A. Fedirko, E. A. Fetisov // 14th Int. Baltic Conference on Atomic Layer Deposition (BALD), Saint Petersburg, 2–4 Nov. 2016. Piscataway: IEEE, 2016. P. 2011–2013.
8. Thermopile IR Sensor Arrays / V. A. Fedirko, E. A. Fetisov, R. Z. Khafizov, G. A. Rudakov, A. A. Sigarev // Proc. of the Scientific-Practical Conf. "Research and Development – 2016", Moscow, Russia, 14–15 Dec. 2016. Luxembourg: Springer, 2016. P. 39–48.
9. Steffanson M., Rangelow I. W. Microthermomechanical Infrared Sensors // Opto-Electron. Rev. 2014. Vol. 22, № 1. P. 1–15.
10. Design, Fabrication, and Characterization of a 240 × 240 MEMS Uncooled Infrared Focal Plane Array With 42- μm Pitch Pixels / Ou Yi, Z. Li, F. Dong, D. Chen, Q. Zhang, C. Xie // J. of Microelectromechanical Systems. 2013. Vol. 22, № 2. P. 452–461.
11. Наноэлектромеханические термочувствительные элементы / Е. А. Фетисов, В. А. Федирко, Р. З. Хафизов, В. И. Золотарев, Д. А. Зенюк, Г. А. Рудаков // Сб. тр. IV Всерос. науч.-техн. конф. "Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем", Истра, 4–8 окт. 2010. М.: ИППМ РАН, 2010. С. 638–641.
12. Термомеханическая чувствительность неохлаждаемого биматериального приемника ИК-диапазона, построенного по технологии микрооптомеханических систем / Р. З. Хафизов, Е. А. Фетисов, Р. В. Лапшин, Е. П. Кириленко, В. Н. Анастасьевская, И. В. Колпаков // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1, № 4. С. 520–523.
13. Перспективные интегральные матричные приемники теплового излучения с оптическим считыванием / Д. Б. Рыгалин, Е. А. Фетисов, Р. З. Хафизов, В. И. Золотарев, И. А. Решетников, Г. А. Рудаков, Р. В. Лапшин, Е. П. Кириленко // Изв. вузов. Электроника. 2013. № 3(101). С. 60–63.
14. Инфракрасные фоточувствительные элементы на основе МЭМС / Е. А. Фетисов, Р. З. Хафизов, А. М. Белин, Г. А. Рудаков, В. И. Золотарев, В. А. Федирко, Д. Б. Рыгалин // Сб. тр. V Всерос. науч.-техн. конф. "Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем". М.: ИППМ РАН, 2012. С. 658–661.
15. Тепловые сенсоры на основе биморфных МЭМС для дистанционного контроля температурного распределения / И. А. Решетников, Д. Б. Рыгалин, Е. А. Фетисов, Р. З. Хафизов // Атомный проект. 2013. Вып. 16. С. 43–44.
16. Low Temperature Silicon Nitride and Silicon Dioxide Film Processing by Inductively Coupled Plasma Chemical Vapor Deposition / J. W. Lee, K. D. Mackenzie, D. Johnson, J. N. Sasserath, S. J. Pearton, F. Ren // J. Electrochem. Society. 2000. Vol. 147, № 4. P. 1481–1486.
17. Deposition of Dielectric Films with Inductively Coupled Plasma-CVD in Dependence on Pressure and Two RF-Power Sources / S. Jatta, K. Haberele, A. Klein, R. Shafranek, B. Koegel, P. Meissner // Plasma Process Polym. 2009. Vol. 6. P. 5582–5587.
18. Schwarzer N., Richter F. On the Determination of Film Stress from Substrate Bending: Stoney's Formula and Its Limits // Saxonian Institute of Surface Mechanics, TU Chemnitz, 2006. URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:swb:ch1-200600111> (дата обращения 09.08.2018).
19. Development of a Process Modeling for Residual Stress Assessment of Multilayer Thin Film Structure / H. J. Wang, H. A. Deng, S. Y. Chiang, Y. F. Su, K. N. Chiang // Thin Solid Films. 2015. Iss. 584. P. 146–153.
20. Rudakov G. A., Paramonov V. V., Eritsyan G. S. Role of Annealing Conditions of LPCVD Thin Silicon Films in the Changing of the Residue Stress for MEMS Application // IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), Moscow, Russia, 29 Jan.–1 Feb. 2018. Piscataway: IEEE, 2018. P. 2011–2013.
21. Local Stress Relaxation Phenomena in Thin Aluminum Films / U. Smith, N. Kristensen, F. Ericson, J. Schweitz // J. Vac. Sci. Technol. A. 1991. Vol. 9, № 4. P. 2527–2535.
22. Thermal Cycling Fatigue and Deformation Mechanism in Aluminum Alloy Thin Films on Silicon / J. Koike, S. Utsunomiya, Y. Shimoyama, K. Maruyama, H. Oikawa // J. Mater. Res. 1998. Vol. 13, № 11. P. 3256–3264.
23. I-Kuan Lin, Yanhang Zhang, Xin Zhang. The Deformation of Microcantilever-Based Infrared Detectors During Thermal Cycling // J. Micromech. Microeng. 2008. Vol. 18, № 7. P. 1–9.

24. Пат. RU 2399064 С1. МПК G01S 5/00 (2006.01). Термочувствительный полевой прибор / В. А. Беспалов, В. И. Золотарев, Г. А. Рудаков, Д. Б. Рыгалин, В. А. Федирко, Е. А. Фетисов, Р. З. Хафизов; опубл. 10.09.2010. Бюл. № 25.

25. Федирко В. А., Зенюк Д. А. Моделирование термоотклика мультиморфных микрокантилеверов // Вестн. МГТУ "Станкин". 2009. № 4(8). С. 75–81.

Статья поступила в редакцию 02 июля 2018 г.

Рудаков Григорий Александрович – магистр техники и технологии по направлению "Электроника и микροэлектроника" (2003), начальник участка НПК "Технологический центр". Автор более 20 научных работ. Область научных интересов – технология полупроводниковых приборов и МЭМ-преобразователей; тепловые приемники изображений.

E-mail: grigory.rudakov@gmail.com

Хафизов Ренат Закирович – кандидат физико-математических наук (1977), генеральный директор ООО "ГраФИМпресс". Автор более 100 научных работ. Область научных интересов: физика полупроводниковых приборов; многоэлементные фотоприемники видимого и ИК-диапазонов, в том числе на основе МЭМ-технологий; магниточувствительные сенсоры; фотоэлектрические преобразователи энергии.

E-mail: imagelab@mail.ru

REFERENCES

1. Gaura E., Newman R. Smart MEMS and Sensor Systems. Imperial College Press, 2006, 552 p.
2. Baltes H., Brand O., Fedder G. K., Hierold C., Korvink J. G., Tabata O. Enabling Technology for MEMS and Nanodevices. Advanced Micro & Nanosystems, vol. 1, Betreiber, Wiley-VCH, 2004, 430 p.
3. Hesketh P. J. BioNanoFluidic MEMS. Luxembourg, Springer, 2008, 292 p.
4. Ghodssi R., Lin P. MEMS Materials and Processes. Handbook. Luxembourg, Springer, 2008, 1188 p.
5. Hunter S., Maurer G., Simelgor G., Radhakrishnan S., Gray J. High Sensitivity 25µm and 50µm Pitch Microcantilever IR Imaging Arrays. Proc. of SPIE. 2007, vol. 6542, pp. 1–13.
6. Amelichev V. V., Il'kov A. V. *Konstruktivno-tekhnologicheskii bazis sozdaniya elektroakusticheskikh preobrazovatelei. Mir elektroniki* [Structural and Technological Basis for Creating Electro-Acoustic Transducers. The World of Electronics]. Moscow, Tekhnosfera, 2012, 104 p. (In Russian)
7. Rudakov G. A., Sigarev A. A., Fedirko V. A., Fetisov E. A. Characterization of Nonstoichiometric Silicon Nitride PECVD/ALD Films for IR Micro-Detectors Arrays. 14th Int. Baltic Conference on Atomic Layer Deposition (BALD). 2–4 November 2016. Saint Petersburg. Piscataway: IEEE, 2016, pp. 2011–2013.
8. Fedirko V. A., Fetisov E. A., Khafizov R. Z., Rudakov G. A., Sigarev A. A. Thermopile IR Sensor Arrays. Proc. of the Scientific-Practical Conf. "Research and Development – 2016". 14–15 December 2016. Moscow. Russia. Luxembourg, Springer, 2016, pp. 39–48.
9. Steffanson M., Rangelow I. W. Microthermomechanical Infrared Sensors. Opto-Electron. Rev. 2014, vol. 22, no. 1, pp. 1–15.
10. Yi Ou, Li Z., Dong F., Chen D., Zhang Q., Xie C. Design, Fabrication, and Characterization of a 240 × 240 MEMS Uncooled Infrared Focal Plane Array With 42-µm Pitch Pixels. J. of Microelectromechanical Systems. 2013, vol. 22, no 2, pp. 452–461.
11. Fetisov E. A., Fedirko V. A., Khafizov R. Z., Zolotarev V. I., Zenyuk D. A., Rudakov G. A. Nanoelectromechanical Thermosensitive Elements. *Sb. tr. IV vseross. nauch.-tekhnich. konf. "Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem"* [IV All-Russian Scientific and Technical Conference "Problems of Development of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems"]. Moscow, IPPM RAN, 2010, pp. 638–641. (In Russian)
12. Khafizov R. Z., Fetisov E. A., Lapshin R. V., Kirilenko E. P., Anastas'evskaya V. N., Kolpakov I. V. Thermomechanical Sensitivity of an Uncooled Bimaterial Receiver of the IR Range, Built Using the Technology of Micro-Optomechanical Systems. *Uspekhi prikladnoi fiziki* [Advances in Applied Physics]. 2013, vol. 1, no. 4, pp. 520–523. (In Russian)
13. Rygalin D. B., Fetisov E. A., Khafizov R. Z., Zolotarev V. I., Reshetnikov I. A., Rudakov G. A., Lapshin R. V., Kirilenko E. P. Perspective Integrated Matrix Heat Radiation Receivers with Optical Reading. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektronika* [Journal "Proceedings of Universities. Electronics"]. 2013, no. 3(101), pp. 60–63. (In Russian)
14. Fetisov E. A., Khafizov R. Z., Belin A. M., Rudakov G. A., Zolotarev V. I., Fedirko V. A., Rygalin D. B. *Infrakrasnye fotochuvstvitel'nye elementy na osnove MEMS. Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem* [Infrared Photosensitive Elements Based on MEMS. Problems of Development of Promising Micro- and Nanoelectronic Systems]. Moscow, IPPM RAN, 2012, pp. 658–661. (In Russian)
15. Reshetnikov I. A., Rygalin D. B., Fetisov E. A., Khafizov R. Z. Thermal Sensors Based on Bimorph MEMS for Remote Monitoring of Temperature Distribution. *Atomnyi projekt* [Atomic Project]. 2013, vol. 16, pp. 43–44. (In Russian)
16. Lee J. W., Mackenzie K. D., Johnson D., Sasserath J. N., Pearton S. J., Ren F. Low Temperature Silicon Nitride and Silicon Dioxide Film Processing by Inductively Coupled Plasma Chemical Vapor Deposition. J. Electrochem. Society. 2000, vol. 147, no. 4, pp. 1481–1486.
17. Jatta S., Haberele K., Klein A., Shafranek R., Koegel B., Meissner P. Deposition of Dielectric Films with Inductively Coupled Plasma-CVD in Dependence on Pressure and Two RF-Power Sources. Plasma Process Polym. 2009, vol. 6, pp. 5582–5587.
18. Schwarzer N., Richter F. On the Determination of Film Stress from Substrate Bending: Stoney's Formula and Its Limits. Saxonian Institute of Surface Mechanics,

TU Chemnitz, 2006. Available at: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:swb:ch1-200600111> (accessed: 09.08.2018)

19. Wang H. J., Deng H. A., Chiang S. Y., Su Y. F., Chiang K. N. Development of a Process Modeling for Residual Stress Assessment of Multilayer Thin Film Structure. *Thin Solid Films*. 2015, Iss. 584, pp. 146–153.

20. Rudakov G. A., Paramonov V. V., Eritsyun G. S. Role of Annealing Conditions of LPCVD Thin Silicon Films in the Changing of the Residue Stress for MEMS Application. 2018 IEEE Conf of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). Moscow, Russia, 29 Jan.–1 Feb. 2018, Piscataway: IEEE, 2018, pp. 2011–2013.

21. Smith U., Kristensen N., Ericson F., Schweitz J. Local Stress Relaxation Phenomena in Thin Aluminum Films. *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1991, vol. 9, no 4, pp. 2527–2535.

22. Koike J., Utsunomiya S., Shimoyama Y., Maruyama K., Oikawa H. Thermal Cycling Fatigue and Deformation Mechanism in Aluminum Alloy Thin Films on Silicon. *J. Mater. Res.* 1998, vol. 13, no. 11, pp. 3256–3264.

23. I-Kuan Lin, Yanhang Zhang, Xin Zhang The Deformation of Microcantilever-Based Infrared Detectors During Thermal Cycling. *J. Micromech. Microeng.* 2008, vol. 18, no. 7, pp. 1–9.

24. Bespalov V. A., Zolotarev V. I., Rudakov G. A., Rygalin D. B., Fedirko V. A., Fetisov E. A., Khafizov R. Z. *Termochuvstvitel'nyi polevoi pribor* [Thermosensitive Field Device]. Patent RF, no. 2399064 C1. 2010. (In Russian)

25. Fedirko V. A., Zenyuk D. A. Modeling the Thermo Response of Multimorph Microcantilevers. *Vestn. MGTU "Stankin"*. 2009, no. 4(8), pp. 75–81. (In Russian)

Received July, 02, 2018

Grigory A. Rudakov – Master's Degree in Electronics and Microelectronics (2003), head of sector of SMC "Technological center". The author of more than 20 scientific publications. Area of expertise: semiconductor and MEMS technologies, thermal image detectors.

E-mail: grigory.rudakov@gmail.com

Renat Z. Khafizov – Ph.D. in Physical and Mathematical sciences (1977), General Director of LLC "GrafImpress". The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: physics of semiconductor devices (focal planes arrays of visible and IR ranges, including those based on MEMS technologies, magnet-sensitive sensors, photoelectric energy converters).

E-mail: imabelab@mail.ru