

19. *Rebeiz G.M., Muldavin J.B.* RF MEMS Switches and Switch Circuits, *IEEE Microwave Magazine*, 2001, Vol. 2, No. 4, pp. 59-71.
20. *Randy J. Richards, Héctor J. De Los Santos* MEMS-for RF/microwave wireless applications: the next wave – Part 2. *Microwave journal*, March 2001, Horizon House Publications, Inc.
21. *Goldsmith C., Lin T-H., Powers B., Wu W-R. and Norvell B.* Micromechanical membrane switches for microwave applications, *Tech. Digest, IEEE Microwave Theory and Techniques Symp.*, 1995. pp. 91-95.
22. *Goldsmith C., Ehmke J., Malczewski A., Pillans B., Eshelman S., Yao Z., Brank J., and Eberly M.* "Lifetime Characterization Of Capacitive RF MEMS Switches, 2001 *IEEE International Microwave Symposium*, May 2001, Vol. 1, pp. 227-230,

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Е.А. Рындин.

Лысенко Игорь Евгеньевич – Южный федеральный университет; e-mail: ielysenko@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371603, кафедра конструирования электронных средств; зав. кафедрой; д.т.н.; доцент.

Ткаченко Алексей Вячеславович – e-mail: msqk@mail.ru; тел.: +79286059722; кафедра конструирования электронных средств; аспирант.

Lysenko Igor Evgenievich – Southern Federal University; e-mail: ielysenko@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371603; the department of electronic apparatuses design; head of department; dr. of eng. sc.; associate professor.

Tkachenko Alexey Vyacheslavovich – e-mail: msqk@mail.ru; phone: +79286059722; the department of electronic apparatuses design; graduate student.

УДК 539.23

DOI 10.23683/2311-3103-2018-2-16-25

Ю.В. Клунникова, Е.Ю. Гусев

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛЕНКАХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ НА ПОДЛОЖКЕ САПФИРА, ПОЛУЧЕННЫХ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМ ОСАЖДЕНИЕМ

Представлены результаты экспериментальных исследований применения метода плазмохимического осаждения из газовой фазы для получения пленок поликристаллического кремния на сапфировой подложке, которая является основой для производства радиационно-стойких интегральных схем. Полученные образцы исследовались методами стилусной профилометрии и атомно-силовой микроскопии. Выявлен ряд параметров, влияющих на фазу, значения размеров кристаллов и среднеквадратическое значение шероховатости полученных пленок. Установлены режимы плазмохимического осаждения, обеспечивающие получение однородных пленок поликристаллического кремния с размером кристаллитов до 250 нм. Средняя шероховатость поверхности составляет $16,2 \pm 2,1$ нм. При температурах осаждения порядка 700 °С сводится к минимуму влияние различий в коэффициентах теплового расширения кремния и сапфира и сокращается плотность дефектов в полученных пленках. Плазмохимическое осаждение пленки поликристаллического кремния на подложку сапфира сопровождается появлением термоупругих напряжений, которые могут вызвать разрушение пленочного покрытия и поверхностного слоя подложки. Проведена оценка уровня термоупругих напряжений в поликристаллических пленках кремния на сапфировой подложке от параметров плазмохимического осаждения, толщины пленки, свойств пленки и подложки в программе ANSYS, использующей метод контрольных элементов. Определено, что величина термоупругих напряжений в структуре пленки поликристаллического кремния–сапфировая подложка пропорциональна температуре осаждения. Увеличение термоупругих напряжений при увеличении температуры осаждения связано с возрастанием влияния различия температурных коэффициентов линейного расширения

пленки и подложки. Результаты исследований могут быть использованы при создании устройств микро- и нанoeлектроники, в частности, в специализированных интегральных схемах, солнечной энергетике.

Сапфировая подложка; поликристаллический кремний; плазмохимическое осаждение; термоупругие напряжения.

Yu.V. Klunnikova, E.Yu. Gusev

**INVESTIGATION OF THERMOELASTIC STRESSES
IN POLYCRYSTALLINE SILICON FILMS ON SAPPHIRE SUBSTRATE
OBTAINED BY PLASMOCHEMICAL DEPOSITION**

We present the results of experimental studies of the plasma-chemical deposition method from the gas phase application to produce polycrystalline silicon films on sapphire substrate, which are the basis for the production of radiation-resistant integrated circuits. The obtained samples were examined by stylus profilometry and atomic force microscopy. We have found the set of parameters that influence the phase, crystal size values and root-mean-square roughness of the obtained films. We define the plasma-chemical deposition modes that ensure the homogeneous polycrystalline silicon films production with crystallite sizes up to 250 nm. The average surface roughness is 16.2 ± 2.1 nm. The effect of differences in the coefficients of silicon and sapphire thermal expansion is minimized at deposition temperatures of about 700 °C, and the density of defects in the resulting films is reduced. Plasma-chemical deposition of polycrystalline silicon film on sapphire substrate is accompanied by the emergence of thermoelastic stresses, which can cause destruction of the film coating and the substrate surface layer. The level of thermoelastic stresses in polycrystalline silicon films on sapphire substrate is estimated from the parameters of plasma-chemical deposition, film thickness, film and substrate properties in the ANSYS program using the control element method. We have found out that the value of thermoelastic stresses in the polycrystalline silicon film – sapphire structure is proportional to the deposition temperature. The thermoelastic stresses growth with deposition temperature increment is associated with an increase in the influence of the difference in the temperature coefficients of the film and substrate linear expansion. The results of the research can be used to develop devices for micro- and nanoelectronics, in particular, specialized integrated circuits and solar energy.

Sapphire substrate; polycrystalline silicon films; plasmochemical deposition; thermoelastic stresses.

Введение. В последнее время широкое развитие находит нано- и поликристаллический кремний при создании специализированных интегральных схем, различных устройств солнечной энергетике, микро- и наносистемной техники [1–3]. Большая область применения определяет важность контроля физических и электрических свойств пленок кремния, которые во многом зависят от структуры, типа и размера зерен, формируемых при их получении [1, 4]. В настоящее время востребованными являются подложки на основе оксида алюминия (Al_2O_3), что связано с их радиационной стойкостью, возможностью работы при высоких температурах и механических нагрузках, возможностью получения подложек больших размеров [5–9]. Для эпитаксии полупроводниковых материалов (Si, GaN, AlGaN и многих других) сапфировые подложки можно применять, когда параметры решетки не совсем совпадают с параметрами гетероэпитаксиальных структур, что обусловило выбор подложки для проведения дальнейших исследований. Физические свойства подложек сапфира, используемых для гетероэпитаксиальных пленок [10, 11], представлены в табл. 1 [10].

Таблица 1

Физические свойства сапфира, полученного методом горизонтальной направленной кристаллизации и используемого для гетероэпитаксиальных пленок

Параметр	Значение
Плотность, г/см ³	3,98
Твердость по Моссу	9
Модуль упругости, ГПа	350
Температура плавления, °С	2050
Растворимость	Устойчив в кислых и щелочных средах
Обрабатываемость	Хорошо шлифуется, полируется, образуя зеркальную поверхность
Токсичность	Не токсичен
Пожароопасность	Не пожароопасен
Взрывоопасность	Не взрывоопасен

Постановка задачи. Для получения пленок поликристаллического кремния использовался метод плазмохимического осаждения из газовой фазы (ПХО) [1, 4, 12]. Применение газоразрядной плазмы для разложения реакционного газа на активные радикалы позволяет управлять процессами разложения в разряде и дает возможность получать пленки методом ПХО при температурах менее 700 °С и больших скоростях осаждения порядка 2 нм/с, чем в аналогичных процессах химического осаждения из газовой фазы с термическим разложением реакционного газа (0,8 нм/с) [12–14]. При таких температурах осаждения сводится к минимуму влияние различий в коэффициентах теплового расширения кремния и сапфира и сокращается плотность дефектов в полученных пленках. Малая термическая чувствительность скорости ПХО позволяет получить однородность свойств получаемых пленок. Для получения пленок кремния с требуемыми свойствами методом ПХО необходимо определить значимые технологические параметры и управлять ими в процессе осаждения.

Целью данной работы является исследование термоупругих напряжений в пленках поликристаллического кремния, полученных методом плазмохимического осаждения, на сапфировой подложке, которая является основой для производства радиационно-стойких интегральных схем, что в первую очередь важно для космической промышленности и атомной энергетики. Диэлектрическая подложка (сапфир) позволяет практически исключить токи утечки приборов и уменьшить энергопотребление.

Проведенные исследования. В качестве подложки использовали сапфировую пластину площадью 1×1 см², толщиной 3–5 мм. После очистки пластин проводили плазмохимическое осаждение пленки оксида кремния (SiO_x) толщиной 100–200 нм (PlasmaLab 100, Oxford Instruments) при температуре 350 °С, мощности разряда 10 Вт, в потоке смеси газов (Ar:SiH₄:NO₂) при давлении в камере 1 мм рт. ст. [3, 15]. Затем, этим же методом получали слои поликристаллического кремния (Si*) толщиной 500–600 нм [4, 16]. Осаждение проводили при

температуре 650–700 °С, мощности 10 Вт, давления в камере 1 мм рт. ст., поток смеси газов при этом поддерживали постоянным на уровне 500 см³/мин (Ar:SiH₄ 9:1).

Полученные образцы исследовались методами стилусной профилометрии (AlphaStep D-100, KLA Tencor, США) и атомно-силовой микроскопии (зондовая нанолaborатория Ntegra, НТ–МДТ, Россия) [17, 18]. Статистическую обработку данных атомно-силовой микроскопии (АСМ) производили с применением программного пакета Image Analysis 3.5. Результаты исследований (рис. 1–3) показали, что полученные пленки кремния однородны, при этом значения диаметра кристаллов находятся в диапазоне до 200 – 250 нм. Среднеквадратичная шероховатость поверхности пленки по данным профилометрии составила $13,16 \pm 0,88$ на длине 2 мм (рис. 1). Размах высот и среднеквадратичная шероховатость на поле 5×5 мкм² (рис. 2) составили $16,2 \pm 2,1$ нм и $1,8 \pm 0,2$ нм, соответственно. Отмечается, что с ростом температуры процесса осаждения от 650 до 700°С увеличивается диаметр кристаллитов. Объемные дефекты исходной подложки типа «пустот», вскрытые шлифовкой и полировкой, декорировались пленкой кремния в виде полусферы диаметром единицы микрометров (5,4 мкм на рис. 3) и высотой до 500–700 нм.

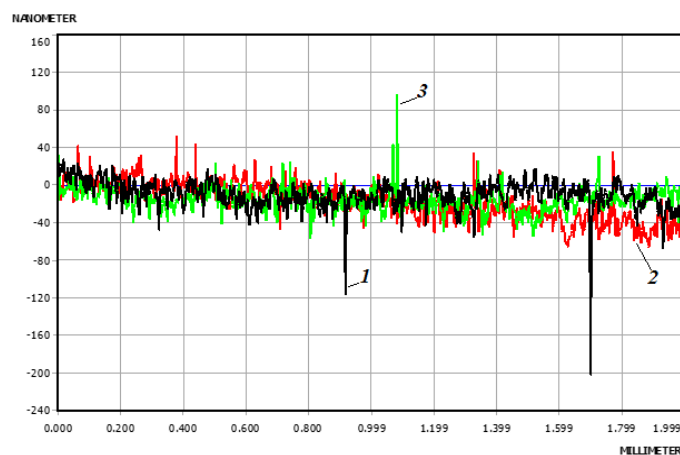


Рис. 1. Профили поверхности образцов: 1 – исходной подложки, 2 – пленки SiO_x на подложке, 3 – пленки Si* на структуре SiO_x/подложка

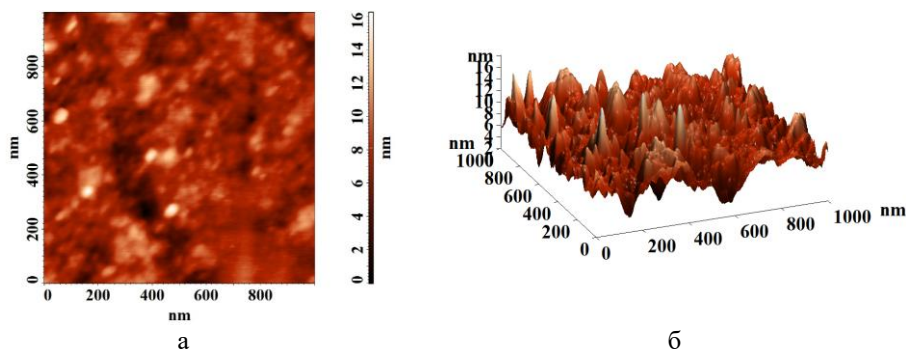


Рис. 2. АСМ-изображения поликристаллической пленки кремния на подложке сапфира

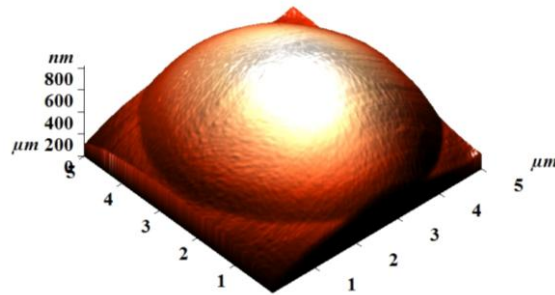


Рис. 3. Морфология пленки Si* на дефекте подложки

В работе рассчитываются термоупругие напряжения в структуре пленка-сапфир, позволяющие оценить зависимость термоупругих напряжений в пленках от температуры осаждения и толщины пленки на сапфировой подложке в программе ANSYS, использующей метод контрольных элементов [19].

Для оценки термоупругих напряжений в пленках поликристаллического кремния на подложках сапфира использовались следующие выражения [20–24]:

$$\sigma_f = \frac{E_{ef} \int_{T_r}^{T_d} (\alpha_s - \alpha_f) dT}{1 + 4(E_{ef} / E_{es})(h / H)}, \quad (1)$$

где $E_{ef} = E_f / (1 - \nu_f)$, $E_{es} = E_s / (1 - \nu_s)$, E_f , E_s – модуль Юнга пленки и подложки; ν_f , ν_s – коэффициент Пуассона пленки и подложки; h, H – толщина пленки и подложки; α_f , α_s – коэффициент линейного расширения пленки и подложки; T_r – комнатная температура; T_d – температура осаждения.

Анализ выражения (1) показывает, что термоупругие напряжения, возникающие в пленке при плазмохимическом осаждении, определяются в основном свойствами материала пленки и подложки, дефектами структуры, параметрами плазмохимического осаждения.

На рис. 4 приведена зависимость термоупругих напряжений пленки от температуры осаждения.

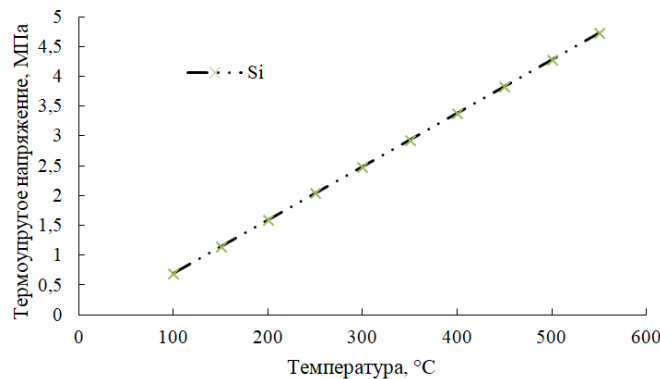


Рис. 4. Зависимость термоупругих напряжений пленки кремния от температуры осаждения

Из рис. 4 видно, что величина термоупругих напряжений в структуре пленка-сапфир пропорциональна температуре осаждения. Увеличение термоупругих напряжений при увеличении температуры осаждения связано с возрастанием влияния различия температурных коэффициентов линейного расширения пленки и подложки. Исследования термоупругих напряжений в пленках толщиной до 8–10 мкм показали, что термоупругие напряжения остаются на одном уровне.

Термоупругие напряжения в пленке поликристаллического кремния на подложке сапфира, полученной методом ПХО, носят сжимающий характер, причем радиальные напряжения спадают значительно быстрее, чем тангенциальные. Для получения низконапряженных пленок рекомендуется получать пленки при более низких температурах, и тем самым уменьшать термическую составляющую механических напряжений.

Результаты. В работе получены однородные пленки поликристаллического кремния методом плазмохимического осаждения из газовой фазы. Морфология, структура и оптические свойства полученной пленки определялись режимами получения. Установлены режимы, обеспечивающие получение пленок поликристаллического кремния с размерами кристаллитов до 250 нм.

Проведен анализ возникновения термоупругих напряжений в структуре пленка-подложка, полученной методом ПХО, так как термоупругие напряжения в пленке поликристаллического кремния на подложке сапфира могут вызвать разрушение пленки и поверхностного слоя подложки.

Результаты исследований могут быть использованы при создании устройств микро- и наноэлектроники, в частности, в специализированных интегральных схемах, солнечной энергетике [25, 26].

Исследования проводились с использованием оборудования научно-образовательного центра «Нанотехнологии» и центра коллективного пользования «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 14.587.21.0025, уникальный идентификатор проекта RFMEF158716X0025, в части исследования термоупругих напряжений в пленках поликристаллического кремния на подложке сапфира) и Южного федерального университета (грант ВнГр-07/2017-02, в части получения и исследования пленок оксида кремния и поликристаллического кремния).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *El-Kareh B.* Fundamentals of semiconductor processing technology. – Boston, Springer, 1995. – 599 p.
2. *Агеев О.А., Беляев А.Е., Болтовец Н.С., Конакова Р.В., Миленко В.В., Пулипенко В.А.* Фазы внедрения в технологии полупроводниковых приборов и СБИС. – Харьков: НТК “Институт монокристаллов”, 2008. – 392 с.
3. *Ageev O.A., Balakirev S.V., Bykov A.V., Gusev E.Y., Fedotov A.A., Jityaeva J.Y., Il'in O.I., Il'ina M.V., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G., Krasnoborodko S.U., Polyakov V.V., Smirnov V.A., Solodovnik M.S., Zamburg E.G.* Development of new metamaterials for advanced element base of micro- and nanoelectronics, and microsystem devices. In: Advanced Materials – Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications. – Springer International Publishing Switzerland, 2016. – P. 563-580.
4. *Ageev O.A., Gusev E.Yu., Jityaeva J.Y., Ilina M.V., Bykov A.V.* Grain size and doping effect on structure and electromechanical properties of polycrystalline silicon for MEMS applications // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 741 (1). – P. 012001.
5. *Клуникова Ю.В.* Оптимизация технологического процесса получения высококачественных подложек из сапфира для интегральных схем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 4 (177). – С. 23-31.

6. *Malyukov S.P., Klunnikova Yu.V., Parinov I.A.* Investigations of Defects Formation During Sapphire Growth. In: *Advanced Nano- and Piezoelectric Materials and Their Applications*. – USA: Nova Science, 2014. – P. 89-108.
7. *Malyukov S.P., Klunnikova Yu.V.* Physical and Technological Fundamentals of Sapphire Production for Electronics. In: *Nano- and Piezoelectric Technologies, Materials and Devices*. – USA: Nova Science, 2013. – P. 133-150.
8. *Malyukov S.P., Klunnikova Yu.V.* Complex Investigations of Sapphire Crystals Production. In: *Advanced Materials // Springer Proceedings in Physics*. – Switzerland, 2014. – Vol. 152. – P. 55-69.
9. *Малюков С.П., Клунникова Ю.В., Ковалев А.В., Лашков А.В.* Разработка и исследование математических моделей и алгоритмов оптимизации технологии изготовления подложек для мемристоров // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – № 11. – С. 435-439.
10. *Dobrovinskaya E.R., Lytvynov L.A., Pishchik V.V.* Sapphire. Material, Manufacturing, Applications. – New York: Springer, 2009. – 481 p.
11. *Malyukov S.P., Cherednichenko D.I., Klunnikova Y.V.* Heat-physical processes at the sapphire crystals growth by horizontal directed crystallization // In: *Sapphire: structure, technology and applications*. – USA: Nova Science Publishers, 2013. – P. 101-118.
12. *Величко Р.В., Гусев Е.Ю., Гамалеев В.А., Михно А.С., Бычкова А.С.* Исследование режимов плазмохимического осаждения пленок нано- и поликристаллического кремния // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – № 11. – С. 1176-1179.
13. *Гусев Е.Ю., Житяева Ю.Ю., Быков А.В., Бесполодин В.В.* Исследование электрофизических свойств пленок поликристаллического кремния для создания микроэлектромеханических систем // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2015. – № 9 (170). – С. 126-134.
14. *Алексеев А., Агеев О., Гусев Е., Коноплев Б., Лысенко И., Петров С.* Тандем ЗАО "НТО" и НОЦ "Нанотехнологии" ЮФУ – пример успешного взаимодействия производства и науки // *Электроника: Наука, технология, бизнес*. – 2016. – № 7 (157). – С. 78-83.
15. *Гусев Е.Ю., Житяева Ю.Ю.* Влияние параметров плазмохимического осаждения на свойства оксида кремния для создания солнечных элементов // *Физика. СПб 2017: тезисы докл. Междунар. молодежной конф. (Санкт-Петербург, 24-26 окт. 2017 г.)*. – URL: <http://physica.spb.ru/data/uploads/physica2017theses.html> (дата обращения 20.02.2018).
16. *Gusev E.Yu., Jityaeva J.Y., Geldash A.A., Ageev O.A.* Effects of PECVD temperature and RF power on surface structure and refractive index of amorphous and polycrystalline silicon films // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 917. – P. 032029.
17. *Агеев О.А., Коломийцев А.С., Михайличенко А.В., Смирнов В.А., Пташник В.В., Солодовник М.С., Федотов А.А., Замбург Е.Г., Климин В.С., Ильин О.И., Громов А.Л., Рукмоийкин А.В.* Получение наноразмерных структур на основе нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2011. – № 1 (114). – С. 109-116.
18. *Коноплев Б.Г., Агеев О.А.* Элионные и зондовые нанотехнологии для микро- и наносистемной техники // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2008. – № 12 (89). – С. 165-175.
19. *Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А.* ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М.: Едиториал УрСс, 2003. – 272 с.
20. *Буй Т.Х.* Разработка и исследование чувствительных элементов датчиков давления на основе структур «кремний на сапфире» с использованием лазерных технологий: дис. ... канд. техн. наук. – Таганрог, 2017. – 123 с.
21. *Haider J. et al.* Simulation of thermal stress in magnetron sputtered thin coating by finite element analysis // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – Vol. 168, № 1. – P. 36-41.
22. *Астащенко О.Н., Корляков А.В.* Механизмы формирования механических напряжений в пленках карбида кремния и нитрида алюминия, полученных магнетронным методом // *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. – 2014. – № 2 (15). – С. 57-61.
23. *Астащенко О.Н., Корляков А.В.* Контроль физико-механических параметров тонких пленок // *Нано- и микросистемная техника*. – 2013. – № 2. – С. 24-29.
24. *Малюков С.П., Клунникова Ю.В., Саенко А.В., Буй Т.Х.* Моделирование температурных полей и внутренних напряжений в пластине сапфира при лазерной обработке // *Физика и химия обработки материалов*. – 2016. – № 5. – С. 11-16.

25. Алексеев А.Н., Соколов И.А., Агеев О.А., Коноплев Б.Г. Комплексный подход к технологическому оснащению центра прикладных разработок. Опыт реализации в НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 4 (117). – С. 207-210.
26. Достанко А.П., Аваков С.М., Агеев О.А. Технологические комплексы интегрированных процессов производства изделий электроники. – Минск: Белорусская наука, 2016. – 251 с.

REFERENCES

1. *El-Kareh B.* Fundamentals of semiconductor processing technology. Boston, Springer, 1995, 599 p.
2. Ageev O.A., Belyaev A.E., Boltovec N.S., Konakova R.V., Milenin V.V., Pilipenko V.A. Fazy vnedreniya v tekhnologii poluprovodnikovyyh priborov i SBIS [Implementation phases in semiconductor devices and VLSI technology], Har'kov: NTK "Institut monokristallov", 2008, 392 p.
3. Ageev O.A., Balakirev S.V., Bykov A.V., Gusev E.Y., Fedotov A.A., Jityaeva J.Y., Il'in O.I., Il'ina M.V., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G., Krasnoborodko S.U., Polyakov V.V., Smirnov V.A., Solodovnik M.S., Zamburg E.G. Development of new metamaterials for advanced element base of micro- and nanoelectronics, and microsystem devices. In: Advanced Materials – Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications. Springer International Publishing Switzerland, 2016, pp. 563-580.
4. Ageev O.A., Gusev E.Yu., Jityaeva J.Y., Ilina M.V., Bykov A.V. Grain size and doping effect on structure and electromechanical properties of polycrystalline silicon for MEMS applications, *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, Vol. 741 (1), pp. 012001.
5. Klunnikova Yu.V. Optimizatsiya tekhnologicheskogo processa polucheniya vysokokachestvennykh podlozhek iz salfira dlya integral'nykh skhem [Optimization of the technological process for obtaining high-quality sapphire substrates for integrated circuits], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 4 (177), pp. 23-31.
6. Malyukov S.P., Klunnikova Yu.V., Parinov I.A. Investigations of Defects Formation During Sapphire Growth. In: Advanced Nano- and Piezoelectric Materials and Their Applications. USA: Nova Science, 2014, pp. 89-108.
7. Malyukov S.P., Klunnikova Yu.V. Physical and Technological Fundamentals of Sapphire Production for Electronics. In: Nano- and Piezoelectric Technologies, Materials and Devices. USA: Nova Science, 2013, pp. 133-150.
8. Malyukov S.P., Klunnikova Yu.V. Complex Investigations of Sapphire Crystals Production. In: Advanced Materials, *Springer Proceedings in Physics*. Switzerland, 2014, Vol. 152, pp. 55-69.
9. Malyukov S.P., Klunnikova Yu.V., Kovalev A.V., Lashkov A.V. Razrabotka i issledovanie matematicheskikh modeley i algoritmov optimizatsii tekhnologii izgotovleniya podlozhek dlya memristorov [Development and research of mathematical models and optimization algorithms for memristors substrates manufacturing technology], *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2012, No. 11, pp. 435-439.
10. Dobrovinskaya E.R., Lytvynov L.A., Pishchik V.V. Sapphire. Material, Manufacturing, Applications. New York: Springer, 2009, 481 p.
11. Malyukov S.P., Cherednichenko D.I., Klunnikova Y.V. Heat-physical processes at the sapphire crystals growth by horizontal directed crystallization, In: *Sapphire: structure, technology and applications*. USA: Nova Science Publishers, 2013, pp. 101-118.
12. Velichko R.V., Gusev E.Yu., Gamaleev V.A., Mihno A.S., Bychkova A.S. Issledovanie rezhimov plazmohimicheskogo osazhdeniya plenok nano- i polikristallicheskogo kremniya [Investigation of plasmachemical deposition modes of nano- and polycrystalline silicon films], *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2012, No. 11, pp. 1176-1179.
13. Gusev E.Yu., Zhityaeva Yu.Yu., Bykov A.V., Bespoludin V.V. Issledovanie elektrofizicheskikh svoystv plenok polikristallicheskogo kremniya dlya sozdaniya mikroelektromekhanicheskikh sistem [Investigation of the electrophysical properties of polycrystalline silicon films for the microelectromechanical systems development], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 9, pp. 126-134.
14. Alekseev A., Ageev O., Gusev E., Konoplev B., Lysenko I., Petrov S. Tandem ZAO "NTO" i NOC "Nanotekhnologii" YuFU – primer uspehnogo vzaimodeystviya proizvodstva i nauki [Tandem JSC "NTO" and SEC "Nanotechnology" SFedU – an example of successful interaction of production and science], *Ehlektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: science, technology, business], 2016, No. 7 (157), pp. 78-83.

15. Gusev E.Yu., Zhityaeva Yu.Yu. Vliyaniye parametrov plazmokhimicheskogo osazhdeniya na svoystva oksida kremniya dlya sozdaniya solnechnykh ehlementov [Influence of plasma-chemical deposition parameters on the properties of silicon oxide for the creation of solar cells], *Fizika.SPb 2017: tezisy dokl. Mezhdunar. molodezhnoy konf.* (Sankt-Peterburg, 24-26 okt. 2017). Available at: <http://physica.spb.ru/data/uploads/physica2017theses.html>.
16. Gusev E.Yu., Jityaeva J.Y., Geldash A.A., Ageev O.A. Effects of PECVD temperature and RF power on surface structure and refractive index of amorphous and polycrystalline silicon films, *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, Vol. 917, pp. 032029.
17. Ageev O.A., Kolomiycsev A.S., Mihaylichenko A.V., Smirnov V.A., Ptashnik V.V., Solodovnik M.S., Fedotov A.A., Zamburg E.G., Klimin V.S., Il'in O.I., Gromov A.L., Rukomoykin A.V. Poluchenie nanorazmernykh struktur na osnove nanotekhnologicheskogo kompleksa NANOFAB NTK-9 [Obtaining of nanoscale structures based on nanotechnology complex NANOFAB NTK-9], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 1 (114), pp. 109-116.
18. Konoplev B.G., Ageev O.A. Eliionnye i zondovye nanotekhnologii dlya mikro- i nanosistemnoy tekhniki [Elyon and probe nanotechnologies for micro- and nanosystem systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 12 (89), pp. 165-175.
19. Kaplun A.B., Morozov E.M., Olfer'eva M.A. ANSYS v rukah inzhenera: Prakticheskoe rukovodstvo [ANSYS in the hands of an engineer: practical guide]. Moscow: Editorial UrSs, 2003, 272 p.
20. Buy T.H. Razrabotka i issledovanie chuvstvitel'nykh elementov datchikov davleniya na osnove struktur «kremniy na sapfire» s ispol'zovaniem lazernykh tekhnologiy: dis. kand. tekhn. nauk [Development and investigation of pressure sensing elements on the basis of "silicon on sapphire" structures using laser technologies: cand. of eng. sc. diss.], Taganrog, 2017, 123 p.
21. Haider J. et al. Simulation of thermal stress in magnetron sputtered thin coating by finite element analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, Vol. 168, № 1, pp. 36-41.
22. Astashenkova O.N., Korlyakov A.V. Mekhanizmy formirovaniya mekhanicheskikh napryazheniy v plenkach karbida kremniya i nitrida alyuminiya, poluchennykh magnetronnym metodom [Mechanisms for the formation of mechanical stresses in silicon carbide and aluminum nitride films obtained by the magnetron method], *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii* [Modern science: research, ideas, results, technology], 2014, No. 2 (15), pp. 57-61.
23. Astashenkova O.N., Korlyakov A.V. Kontrol' fiziko-mekhanicheskikh parametrov tonkikh plenok [Control of physicomechanical parameters of thin films], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and microsystem technology], 2013, № 2, pp. 24-29.
24. Mal'yukov S.P., Klunnikova Yu.V., Saenko A.V., Buj T.H. Modelirovanie temperaturnykh poley i vnutrennikh napryazheniy v plastine sapfira pri lazernoy obrabotke [Simulation of temperature fields and internal stresses in sapphire substrate during laser treatment], *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and chemistry of material processing], 2016, No. 5, pp. 11-16.
25. Alekseev A.N., Sokolov I.A., Ageev O.A., Konoplev B.G. Kompleksnyy podkhod k tekhnologicheskomu osnashcheniyu centra prikladnykh razrabotok. Opyt realizacii v NOC «Nanotekhnologii» YuFU [Complex approach to the technological equipment of the center of applied developments. Experience of implementation in REC "Nanotechnology" SFedU], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 207-210.
26. Dostanko A.P., Avakov S.M., Ageev O.A. Tekhnologicheskie komplekсы integrirovannykh processov proizvodstva izdeliy ehlektroniki [Technological complexes of integrated processes for the production of electronics products], Minsk: Belorusskaya nauka, 2016, 251 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Клунникова Юлия Владимировна – Южный федеральный университет; e-mail: uyklunnikova@sfnu.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корпус «Е»; тел.: 88634371603; кафедра конструирования электронных средств; доцент.

Гусев Евгений Юрьевич – e-mail: eyugusev@sfnu.ru; тел.: 88634371-940; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; доцент.

Klunnikova Yulia Vladimirovna – Southern Federal University; e-mail: yvklunnikova@sfedu.ru; 2, Shevchenko str. building “E”, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634371603; the department of electronic apparatuses design; associate professor.

Gusev Evgeny Yurievich – e-mail: eyugusev@sfedu.ru; phone: +78634371940; the department of nanotechnology and microsystem technics; associate professor.

УДК 621.3.049.77

DOI 10.23683/2311-3103-2018-2-25-33

М.А. Денисенко, А.С. Исаева

**ИНТЕГРАЛЬНЫЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ТУННЕЛЬНЫЙ
АКСЕЛЕРОМЕТР НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ
МЕХАНИЧЕСКИ НАПРЯЖЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЛОЕВ***

В настоящее время на рынке инерциальных систем навигации и ориентации большое внимание уделяется реализации простых, компактных и недорогих решений. Это объясняется возникновением новых сфер применения: носимая электроника, игрушки, игровые консоли, фото- и видеотехника, дроны и роботизированные системы и др. Адаптация дорогостоящих прецизионных приборов (на лазерных, волоконно-оптических, поплавковых гироскопах) для малогабаритных объектов трудновыполнимая, а часто и невозможная задача. Наиболее перспективны для разнообразного широкого применения датчики на основе МЭМС-технологии. Массовое использование микромеханических датчиков (гироскопов и акселерометров) и систем на их основе за рубежом началось со сложных аэрокосмических и оборонных систем. Дальнейшее внедрение микромеханики в автомобильные системы безопасности, медицинские системы, мобильную связь и производство смартфонов, индустрию детских товаров и т.д. стало возможным в результате повышения технологичности производства МЭМС. Рассмотрена конструкция нового интегрального микромеханического сенсора линейных ускорений на основе туннельного эффекта для перспективных инерциальных систем навигации и ориентации малоразмерных подвижных объектов, а также для промышленных нужд; кратко описан метод построения с использованием операции самосборки на основе управляемой самоорганизации механически напряженных полупроводниковых слоев GaAs/InAs, который позволяет прецизионно контролировать формирование туннельного контакта с зазором порядка единиц нанометров. При этом обеспечивается высокая технологичность конструкции в том числе за счет возможности ее интегрального изготовления групповыми методами обработки с использованием стандартных технологических операций. Конструкция туннельного акселерометра была промоделирована в САПР ANSYS. Результаты математического моделирования удовлетворяют требованиям, предъявляемым к современным микромеханическим акселерометрам, и позволяют использовать их для дальнейшего развития структур такого типа. Полученные данные могут быть использованы в частности для расчета рекомендуемых параметров при разработке методик проектирования туннельных сенсоров угловых скоростей и линейных ускорений и для разработки более точных моделей МЭМС-структур.

МЭМС; микромеханический акселерометр; дизайн; датчик; математическая модель.

* Работа выполнена при финансовой поддержке из средств "Программы развития Южного федерального университета до 2021 года" (проект ВнГр-07/2017-10).