

МИКРО- И НАНОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNOLOGY

УДК 681.586

Анализ изготовления чувствительного элемента микроакселерометра

*И.В. Уваров¹, О.В. Морозов¹, М.К. Аминов¹, М.О. Изюмов¹,
С.С. Лемехов¹, А.Н. Куприянов¹, А.Н. Козлов², И.И. Амиров¹*

¹*Ярославский Филиал Физико-технологического института
Российской академии наук*

²*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
им. Н.Л. Духова (г. Москва)*

Analysis of Process for Manufacturing Microaccelerometer Sensitive Element

*I.V. Uvarov¹, O.V. Morozov¹, M.K. Aminov¹, M.O. Izyumov¹,
S.S. Lemechov¹, A.N. Kupriyanov¹, A.N. Kozlov², I.I. Amirov¹*

¹*Yaroslavl Branch of the Institute of Physics and Technology,
Russian Academy of Sciences*

²*All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow*

Приведены результаты анализа изготовления чувствительного элемента микроакселерометра емкостного типа на основе высокоаспектных встречно-штыревых гребенчатых структур, созданного по объемной технологии с использованием процессов глубокого анизотропного травления кремния (Bosch-процесса) и анодного срачивания со стеклом. Анализ изготовления элемента после вывешивания его чувствительной массы в процессе высокоаспектного травления кремния осуществлялся с использованием методики измерения напряжения, подаваемого на гребенки встречно-штыревых структур, при котором происходило резкое изменение емкости конденсаторов (напряжение схлопывания). Приведены результаты расчета и экспериментальные данные изменения напряжения схлопывания в зависимости от бокового ухода размеров гребенчатых структур и пружинных подвесов в результате перетрава на стадии вывешивания чувствительной массы. Показано, что по значению этого напряжения можно проводить экспресс-диагностику изготовления чувствительных элементов.

Ключевые слова: микроакселерометр; чувствительный элемент; технология изготовления; анализ; травление высокоаспектных структур; встречно-штыревые структуры.

© И.В. Уваров, О.В. Морозов, М.К. Аминов, М.О. Изюмов, С.С. Лемехов, А.Н. Куприянов, А.Н. Козлов, И.И. Амиров, 2016

The results of the analysis of manufacturing the microaccelerometer capacitive sensor based on the high aspect inter-digital comb structures, fabricated on the bulk process technology using the deep silicon anisotropic etching (Bosch-process) and glass anodic bonding, have been presented. The analysis of manufacturing the sensor element after weighing its sensitive high aspect mass during the silicon etching process has been performed using the method of measuring the voltage applied to the inter-digital comb structures, in which a sharp change of the capacitors (voltage pull-in) had taken place. The calculation and experimental results of voltage pull-in changes depending on the lateral dimensions of spring beam and comb structures as a result of over etching at the stage of weighing the sensitive mass have been presented. It has been shown that by the value of this voltage the express diagnostics of the sensitive element can be carried out.

Keywords: microaccelerometer; sensing element; fabrication technology; analysis; high aspect ratio etching; interdigitated structures.

Введение. Емкостные микроакселерометры (МА) на основе высокоаспектных встречно-штыревых структур (ВШС), изготовленные по объемной технологии с использованием процесса глубокого анизотропного травления кремния (Bosch-процесса), характеризуются наибольшей чувствительностью [1, 2]. Такие МА изготавливаются с использованием КНИ-пластин (кремний на изоляторе) или утоненных кремниевых пластин, соединенных со стеклом методом анодного сращивания (кремний на стекле (КНС)) [1–3]. Технология их изготовления включает несколько этапов, на каждом из которых возможно отклонение от номинальных режимов. Для отработки технологии изготовления МА необходимо иметь методику контроля параметров чувствительных элементов (ЧЭ) на разных стадиях изготовления [4, 5]. Такой контроль особенно важен после выполнения заключительной стадии изготовления ЧЭ – вывешивания чувствительной массы. Эта стадия осуществляется в процессе проведения глубокого анизотропного травления канавочных структур разной ширины. В результате неизбежного перетрава, возникающего вследствие эффекта аспектно-зависимого травления и зарядового эффекта (notching effect), происходит растрав элементов ВШС в вертикальном и боковом направлениях. Перетрав ведет к уменьшению их ширины, а также ширины пружинных подвесов ЧЭ МА, в результате чего изменяются его характеристики.

Для контроля ухода емкостных характеристик МА от номинальных на стадии вывешивания можно применять методику измерения напряжения резкого смыкания, или схлопывания V_{pi} (напряжение pull-in) емкостных ВШС [4, 6]. Такие измерения можно использовать как экспресс-диагностику изготовления ЧЭ. В настоящей работе применимость такой методики показана на примере изготовления ЧЭ емкостного гребенчатого типа на КНС-пластине.

Конструкция и основные этапы изготовления чувствительного элемента микроакселерометра. ЧЭ (рис.1) состоит из освобожденной чувствительной массы, вывешенной на пружинном подвесе длиной 490 мкм и шириной 5,5 мкм, и двух наборов гребенчатых встречно-штыревых структур с длиной зубцов $l_c = 175$ мкм, длиной перекрытия зубцов l_{ce} , шириной $w_c = 10$ мкм, зазорами между зубцами $s_1 = 3$ и $s_2 = 11$ мкм, образующих два конденсатора емкостью C_1 и C_2 (рис.2). При возникновении ускорения одна из емкостей увеличивалась, а другая уменьшалась, так что их разность возрастала.

ЧЭ изготавливались с использованием окисленных кремниевых пластин (100) КДБ 1 диаметром 100 мм. Технология изготовления ЧЭ состоит из нескольких этапов и включает три литографические операции:

- глубокое травление кремния на обратной стороне пластины для формирования приборного слоя толщиной 50–60 мкм (Bosch-процесс);
- формирование алюминиевых контактных площадок;
- анодное сращивание кремния со стеклом в вакууме.

На заключительной стадии процесса проводилось сквозное плазменное травление ВШС в приборном слое (Bosch-процесс) для вывешивания чувствительной массы. Контроль травления осуществлялся по времени анизотропного травления канавок минимальной ширины. Аспектное отношение канавок достигало 20. Ширина ВШС и другие размеры структур ЧЭ измерялись с помощью РЭМ Zeiss SUPRA 40.

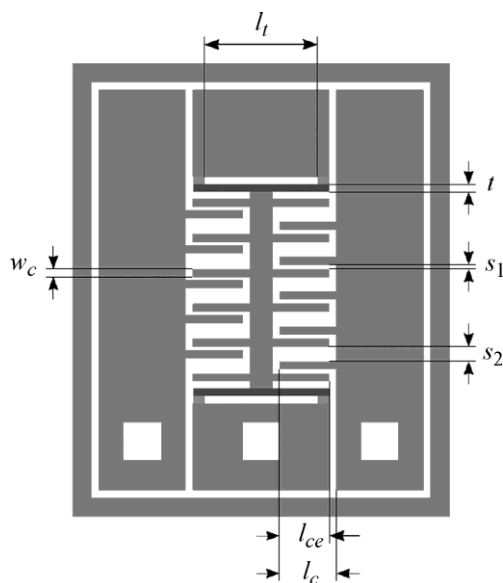


Рис.1. Схема чувствительного элемента микроакселерометра

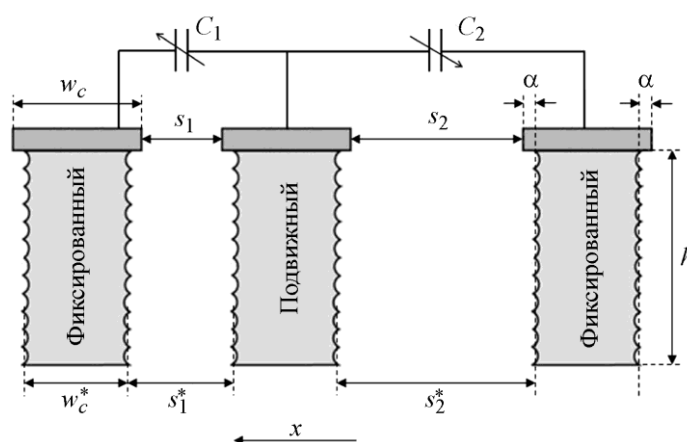


Рис.2. Схема фрагмента встречно-штыревой структуры

Методика определения величины уменьшения ширины встречно-штыревых гребенчатых и пружинных структур ЧЭ МА по напряжению схлопывания. Данная методика расчета предложена в [4, 6]. Сечение фрагмента ВШС схематично показано на рис.2. Подвижные зубцы чувствительной массы расположены несимметрично между неподвижными зубцами гребенки. Зубцы гребенок имеют рифленные стенки, что является результатом глубокого плазменного травления кремния. С каждой стороны зубца имеется подтрав под маску величиной α (технологический подтрав). Емкость гребенок ВШС определяется выражением

$$C(x) = C_1(x) + C_2(x) = \frac{n_c}{2} \varepsilon_0 l_{ce} h \left(\frac{1}{s_1^* - x} + \frac{1}{s_2^* + x} \right),$$

где x – перемещение подвижного зубца относительно исходного положения под действием внешней силы; n_c – количество пар зубцов ВШС; ε_0 – электрическая постоянная; h – толщина приборного слоя; s_1^* и s_2^* – зазоры 1 и 2 с учетом бокового подтрав.

Боковой подтрав приводит также к уменьшению длины перекрытия зубцов l_{ce} , но так как он намного меньше, то его влияние можно не учитывать. Подтрав ведет к расширению зазоров между зубцами:

$$s_1^* = s_1 + 2\alpha, \quad s_2^* = s_2 + 2\alpha,$$

где s_1 и s_2 – зазоры без учета подтравы (номинальный размер); α – боковой подтрав.

Если между подвижной и неподвижной гребенками прикладывается электрическое напряжение V , то между зубцами возникает электростатическая сила, под действием которой подвижная масса вместе с гребенками переместится на некоторую величину x в направлении, обозначенном стрелкой на рис.2. Электростатическая сила задается выражением

$$F_{es} = \frac{1}{2} \frac{\partial C(x)}{\partial x} V^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial C_1(x)}{\partial x} + \frac{\partial C_2(x)}{\partial x} \right) V^2.$$

Перемещение подвижной массы вызывает деформацию подвесов, в них возникает сила упругости:

$$F_{sp} = kx.$$

Если прикладываемое напряжение постепенно увеличивать, то при некотором его значении V_{pi} электростатическая сила станет больше силы упругости и произойдет резкое перемещение чувствительной массы – электростатическое схлопывание.

Константа упругости подвесов, на которых крепится подвижная масса МА, равна

$$k = n_t E h \left(\frac{w_t^*}{l_t^*} \right)^3, \quad (1)$$

где n_t – количество пружинных подвесов; E – модуль Юнга кремния (169 ГПа); h , l_t^* и w_t^* – соответственно толщина, длина и ширина подвесов с учетом бокового подтравы.

Подтрав увеличивает длину подвеса и сужает его. Так как длина подвеса (490 мкм) намного больше подтравы, его можно не учитывать. Тогда

$$w_t^* = w_t - 2\alpha,$$

где w_t – ширина подвеса без учета подтравы (номинальный размер).

Потенциальная энергия рассматриваемой системы складывается из энергии упругой деформации подвесов и энергии, запасенной в ВШС как в конденсаторе:

$$U(x, V) = U_{elastic}(x) + U_{electric}(x, V) = \frac{kx^2}{2} - \frac{C(x)V^2}{2}. \quad (2)$$

Смещение подвижной массы и напряжение, при котором происходит схлопывание (x_{pi} , V_{pi} соответственно), определяются из решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dU(x, V)}{dx} = 0; \\ \frac{d^2U(x, V)}{dx^2} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Первое уравнение системы (3) является условием равенства электростатической и упругой сил, второе – условием потери стабильности положения равновесия.

Емкость C_2 в рассматриваемой конструкции ЧЭ существенно меньше, чем C_1 , и при расчетах напряжения схлопывания ею можно пренебречь ($C_2 = 0$). В этом случае емкость ВШС задается выражением

$$C(x) = C_1(x) = \frac{n_c}{2} \varepsilon_0 l_{ce} h \frac{1}{s_1^* - x}. \quad (4)$$

Подставив (4) в выражение для потенциальной энергии (2), получим из (3)

$$\begin{cases} kx - \frac{n_c \varepsilon_0 l_{ce} h V^2}{4} (s_1^* - x)^{-2} = 0; \\ k - \frac{n_c \varepsilon_0 l_{ce} h V^2}{2} (s_1^* - x)^{-3} = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где константа упругости k задается выражением (1). Решая систему (5), можно получить выражения для перемещения подвижной массы, когда происходит схлопывание, и напряжения схлопывания:

$$x_{pi} = \frac{1}{3} s_1^*, \quad (6)$$

$$V_{pi} = \sqrt{\frac{16}{27} \frac{n_t E}{n_c \varepsilon l_{ce}} \left(\frac{w_t^* s_1^*}{l_t} \right)^3}. \quad (7)$$

Согласно (6) схлопывание происходит при перемещении подвижной массы на одну треть зазора s_1^* между зубцами гребенки. Выражение (7) представляет собой зависимость V_{pi} от номинальных значений параметров конструкции ЧЭ, а также от глубины подтравы под маску, поскольку величины w_t^* , s_1^* являются функциями α . Зависимость напряжения V_{pi} от величины подтравы определяется следующим выражением:

$$V_{pi} = \sqrt{\frac{16}{27} \frac{n_t E}{n_c \varepsilon (l_{ce})} \frac{(w_t - 2\alpha)^3 (s_1 + 2\alpha)^3}{(l_t)^3}}.$$

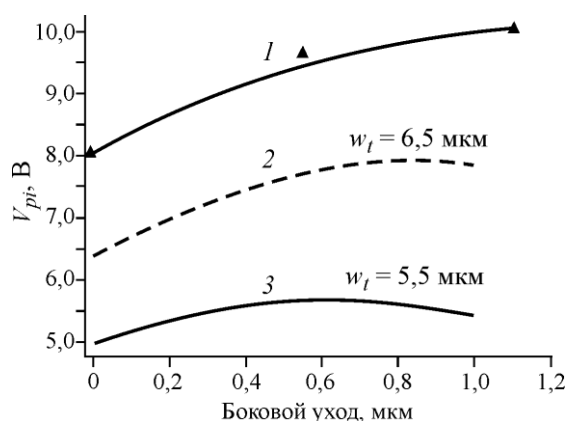


Рис.3. Экспериментальная (1) и расчетные (2, 3) зависимости напряжения V_{pi} от величины бокового ухода (подтравы) гребенчатых элементов ВШС

Такие зависимости для ЧЭ с номинальной шириной подвесов 5,5 и 6,5 мкм в диапазоне подтравы 0–1 мкм представлены на рис.3. Технологический уход у изготовленных образцов ЧЭ, боковой уход ширины гребенок и пружинных подвесов задавали равным 0,25 мкм.

Зависимость напряжения схлопывания от глубины подтравы имеет форму колокола, т.е. при увеличении подтравы наблюдается сначала рост напряжения схлопывания, а затем некоторый спад. Такая форма зависимости обусловлена влиянием подтравы на два фактора, определяющих напряжение схлопывания:

электростатическую силу, которую развивает ВШС, и силу реакции подвесов. С одной стороны, с увеличением подтрава зазоры между зубцами увеличиваются, емкость ВШС падает и уменьшается электростатическая сила. Следовательно, напряжение схлопывания должно увеличиваться. С другой стороны, с увеличением подтрава уменьшается константа упругости подвесов и снижается сила упругости, что должно приводить к уменьшению напряжения схлопывания. Таким образом, влияние подтрава на электростатическую и влияние на упругую силы конкурируют между собой, что и объясняет характер зависимости напряжения схлопывания от величины подтрава.

Экспериментальное определение напряжения схлопывания и его зависимости от величины перетрава. Напряжение V_{pi} измерялось с помощью специальной электронной схемы, преобразующей переменную емкость ВШС в выходной сигнал. К одной контактной площадке подключался вход измерительной схемы, на другую подавалось управляющее напряжение (рис.4,а). Одна гребенка ЧЭ служила для перемещения чувствительной массы относительно исходного положения, другая – для отслеживания этого перемещения по изменению емкости гребенки. Напряжение на ЧЭ подавалось от источника питания постоянного тока Agilent Technologies E3647A. Управление источником питания осуществлялось по интерфейсу GPIB с помощью программного обеспечения LabView. Сигнал с измерителя разности емкостей поступал на АЦП платы National Instruments 6221 и считывался программно. В автоматическом режиме строилась зависимость разности емкостей в плечах измерителя от приложенного к ЧЭ напряжения. При этом задавался исследуемый диапазон напряжения и шаг по напряжению.

Типичный вид зависимости изменения емкости от напряжения представлен на рис.4,б. При уменьшении напряжения после достижения V_{pi} характер зависимости изменился. Резкое изменение сигнала происходило при более низком напряжении V_{po}

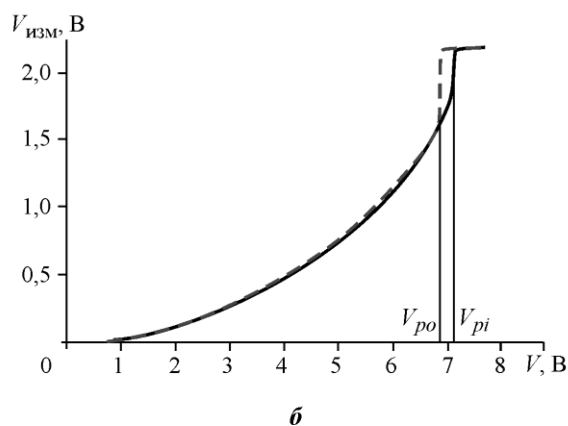
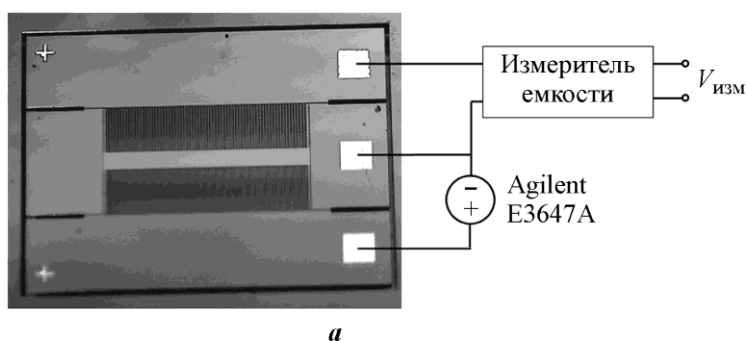


Рис.4. Схема измерения (а) и зависимость выходного сигнала $V_{изм}$ от напряжения V на обкладках одной из емкостей ВШС ($V_{po} = 6,85$ В; $V_{pi} = 7,10$ В) (б)

(напряжение pull-out). Возникновение гистерезиса объясняется эффектом залипания пружинных подвесов, а также зубцов ВШС. Залипание гребенок подтверждается наблюдением в оптический микроскоп. В зависимости от силы залипания разность $V_{pi} - V_{po}$ может достигать нескольких вольт. Хотя в конструкции ЧЭ предусмотрены упоры, они не предотвратили залипание. Отметим, что наличие гистерезиса не должно влиять на характеристики ЧЭ. Многократные измерения гистерезисной кривой подтвердили, что величина напряжения V_{pi} не изменялась. Измерения V_{pi} разных ЧЭ, изготовленных на одной пластине, ширина пружинных подвесов которых равнялась 5,0 мкм, показали, что V_{pi} изменялось в диапазоне 8,05–8,80 В. Такой широкий разброс V_{pi} может быть обусловлен влиянием как технологических факторов (неравномерность травления по пластине, литографический уход и др.), так и загрязнениями. Экспериментально полученные величины V_{pi} были выше их расчетных значений. Это может объясняться тем, что при расчете не учитывалось влияние емкости C_2 .

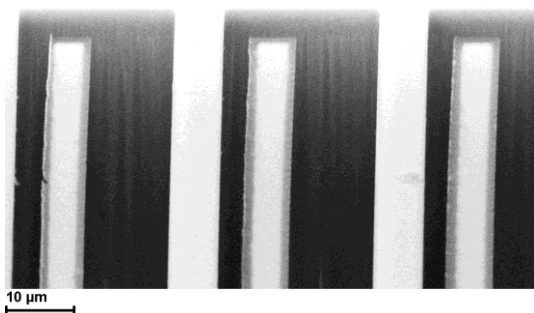


Рис.5. РЭМ-изображение части ВШС после проведения дополнительных 100 циклов травления (перетравка)

плазменном травлении вследствие плохого теплоотвода значительно выше температуры приборного слоя. Влияние теплоотвода вывешенной чувствительной массы на уход размеров элементов отмечено в работе [7]. При таком значительном перетраве высота гребенок уменьшалась, как это было в случае изготовления ЧЭ на КНИ-пластинах [8]. Полученные данные показали, что зависимость V_{pi} от перетравки находилась в качественном согласии с расчетными данными. Значительное отклонение V_{pi} от номинальных значений может свидетельствовать о технологическом уходе режимов изготовления ЧЭ микроакселерометров. Отметим, что вид зависимости выходного сигнала от подаваемого напряжения может измениться (см.рис.4,б), если поменять измерительные и управляющие ВШС. Это свидетельствует о том, что две емкости ВШС различны. Данный факт также может служить параметром контроля изготовления ЧЭ МА.

Заключение. Результаты исследования показали, что экспресс-контроль изготовления ЧЭ можно осуществлять по виду зависимости емкости его конденсаторов от приложенного напряжения и по величине напряжения схлопывания.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Диагностика микро- и наноструктур» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Литература

1. *Amini B.V., Ayazi F.* Micro-gravity capacitive silicon-on-insulator accelerometers // J. Micromech. Microeng. – 2005. – Vol. 15. – P. 2113–2120.
2. *Chae J., Kulah H., Najafi K.* A CMOS-compatible high aspect ratio silicon-on-glass in-plane micro-accelerometer // J. Micromech. Microeng. – 2005. – Vol. 15. – P. 15336–45.

3. Compact electrode design for an in-plane accelerometer on SOI with refilled isolation trench / **J. Xie, R. Agarwal, Y. Liu et al.** // J. Micromech. Microeng. – 2011. – Vol. 21. – P. 095005.
4. **Mol L., Rocha L.A., Cretu E., Wolffenbuttel R.F.** Read-out calibration of a SOI capacitive transducer using the pull-in voltage // J. Micromech. Microeng. – 2008. – Vol. 18. – P. 064009.
5. Балансировка кремниевых датчиков угловой скорости в процессе изготовления / **С.П. Тимошенко, Б.М. Симонов, О.М. Бритков и др.** // Изв. вузов. Электроника. – 2015. – Т. 20. – № 1. – С. 58–67.
6. **Rocha L.A., Cretu E., Wolffenbuttel R.F.** Analysis and analytical modeling of static pull-in with application to MEMS-based voltage reference and process monitoring. // J. of Microelectromechanical Systems. – 2004. – Vol. 13. – P. 342–354.
7. **Lee Y.-S., Jang Y.H., Kim Y.-K., Kim J.-M.** Thermal de-isolation of silicon microstructures in a plasma etching environment // J. Micromech. Microeng. – 2013. – Vol. 23. – P. 025026.
8. **Docker P.T., Kinnell P., Ward M.C.** A dry single-step process for the manufacture of released MEMS structures // J. Micromech. Microeng. – 2003. – Vol. 13. – P. 790–794.

Статья поступила 16 мая 2016 г.

Уваров Илья Владимирович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории технологии микро- и наносистемной техники Ярославского Филиала Физико-технологического института РАН (ЯФ ФТИАН РАН). *Область научных интересов:* проектирование, разработка технологии изготовления устройств МЭМС и НЭМС. **E-mail: i.v.uvarov@bk.ru**

Морозов Олег Валентинович – старший научный сотрудник лаборатории технологии микро- и наносистемной техники ЯФ ФТИАН РАН. *Область научных интересов:* плазменные процессы травления технологии микроэлектроники, микро- и наносистемной техники, разработка технологии изготовления устройств МЭМС.

Аминов Марат Куручович – электроник лаборатории технологии микро- и наносистемной техники ЯФ ФТИАН РАН. *Область научных интересов:* электронно-лучевая литография, электроника, проектирование и разработка электронных схем.

Изюмов Михаил Олегович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории технологии микро- и наносистемной техники ЯФ ФТИАН РАН. *Область научных интересов:* плазменные процессы травления технологии микроэлектроники, микро- и наносистемной техники.

Лемехов Сергей Станиславович – ведущий технолог лаборатории технологии микро- и наносистемной техники ЯФ ФТИАН РАН. *Область научных интересов:* технологические процессы изготовления и анализа работы устройств МЭМС.

Куприянов Александр Николаевич – научный сотрудник лаборатории технологии микро- и наносистемной техники ЯФ ФТИАН РАН. *Область научных интересов:* моделирование, разработка алгоритмов и программ управления средствами измерений и процессами.

Козлов Алексей Николаевич – заместитель начальника отделения производственного отдела Научно-производственного комплекса микроэлектроники ВНИИА им. Н.Л. Духова (г. Москва). *Область научных интересов:* исследования и разработка технологии создания устройств микро- и наносистемной техники.

Амиров Ильдар Искандерович – доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией технологии микро- и наносистемной техники ЯФ ФТИАН РАН. *Область научных интересов:* плазменные процессы технологии микро- и наноэлектроники, исследование и разработка технологии изготовления устройств МЭМС и НЭМС.