

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-2-236-242

УДК 621.382.2/3

Исследование геометрических параметров кремниевых структур в приборном слое при изготовлении чувствительных элементов микромеханических акселерометров

Никита Сергеевич Каранин✉

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

karanin.ns@gmail.com✉, <https://orcid.org/0009-0007-5086-0833>

Аннотация

Введение. Исследованы технологические процессы изготовления инерциальных чувствительных элементов изделий микроэлектромеханических систем. Изучено влияние площади травления на кинетические параметры процесса глубокого реактивно-ионного травления, позволяющего формировать кремниевые структуры с высоким аспектным соотношением для изготовления микромеханических акселерометров и гироскопов. **Метод.** Инерциальные чувствительные элементы микромеханических акселерометров были изготовлены на подложке диаметром 150 мм по усовершенствованному технологическому процессу, позволяющему минимизировать площадь травления на этапе формирования приборного слоя, который состоит из инерционной массы, упругого подвеса, управляющих и измерительных электродов, изоляционной рамки. Значения геометрических параметров кремниевых структур приборного слоя были получены путем анализа профилей инерциальных чувствительных элементов на сканирующем электронном микроскопе. Исследованы элементы приборного слоя по всему диаметру в радиальном и тангенциальном направлениях подложки для определения разброса геометрических параметров инерциальных чувствительных элементов. **Основные результаты.** Представлен технологический процесс изготовления инерциальных чувствительных элементов, позволяющий снизить площадь травления на этапе формирования приборного слоя, за счет альтернативного способа вскрытия области вывода контактов. Основываясь на измерениях геометрических параметров кремниевых структур приборного слоя, установлено, что размеры элементов и их отклонения изменяются в радиальном направлении от центра подложки к краю. Разброс значений геометрических параметров кремниевых структур инерциальных чувствительных элементов, изготовленных по усовершенствованному технологическому процессу на подложке диаметром 150 мм, был снижен до 0,4 мкм, а разброс их отклонений уменьшен до 0,2 мкм. **Обсуждение.** Предложенный технологический процесс может быть использован для повышения выхода годных при изготовлении инерциальных чувствительных элементов и однородности функциональных характеристик изделий микроэлектромеханических систем, таких как акселерометры и гироскопы. Результаты работы могут быть применены при проектировании технологических процессов изготовления новых инерциальных чувствительных элементов.

Ключевые слова

глубокое реактивно-ионное травление, Bosch-процесс, приборный слой, инерциальный чувствительный элемент, микромеханический акселерометр

Ссылка для цитирования: Каранин Н.С. Исследование геометрических параметров кремниевых структур в приборном слое при изготовлении чувствительных элементов микромеханических акселерометров // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 2. С. 236–242. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-2-236-242

Investigation of geometric parameters of silicon structures in device layer during manufacture of sensitive elements of micromechanical accelerometers

Nikita S. Karanin✉

Concern CSRI Electropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

karanin.ns@gmail.com✉, <https://orcid.org/0009-0007-5086-0833>

Abstract

The technological processes of fabrication inertial elements of devices of microelectromechanical systems are investigated. The influence of etch square on critical parameters of the process of deep reactive ion etching, allowing to etch silicon structures with high aspect ratios for fabrication micromechanical accelerometers and gyroscopes, is studied. Inertial sensitive elements of micromechanical accelerometers were manufactured on a 150 mm wafer diameter within the framework of an advanced technological process with minimized square etch area on stage of formation of the device layer consisting of an inertial mass, an elastic suspension, control and measuring electrodes, and insulating frame. Values of geometric parameters of silicon structural layers of the device were obtained by analyzing the profiles of inertial visible elements on a scanning electron microscope. Elements of device layer were studied both in the radial and tangential directions of a substrate with a diameter of 150 mm to determine the spread of geometric parameters of inertial sensitive elements. The technological process of fabrication inertial sensitive elements to reduce square of etch area at the stage of device layer formation using an alternative opening the area of the contacts is shown. Based on measurements of the geometric parameters of the silicon structures of the device layer, it was found that the dimensions of the elements and their deviations change in the radial direction from the center of the substrate to the edge. The spread of the geometric parameters of the silicon structures of inertial sensitive elements manufactured according to the advanced technological process on a 150 mm diameter substrate was reduced to 0.4 μm , and the spread of their deviations was reduced to 0.2 μm . The proposed technological process can be used to increase the yield of devices goods during manufacture of inertial sensitive elements and to obtain more uniform characteristics of microelectromechanical systems, such as accelerometers and gyroscopes. The work results can be used in the design of technological processes for the manufacture of new inertial sensitive elements.

Keywords

deep reactive ion etching, Bosch process, device layer, inertial sensitive elements, micromechanical accelerometer

For citation: Karanin N.S. Investigation of geometric parameters of silicon structures in device layer during manufacture of sensitive elements of micromechanical accelerometers. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 2, pp. 236–242 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-2-236-242

Введение

Инерциальные чувствительные элементы изделий микроэлектромеханических систем, такие как микро-механические акселерометры и гироскопы, активно используются в составе микромодулей в различных отраслях науки и техники [1], в том числе в навигационных целях [2]. Главными преимуществами инерциальных микромодулей являются низкая стоимость и компактность [1], что достигается за счет технологии изготовления чувствительных элементов [3].

На подложках из монокристаллического кремния или кварцевого стекла формируют поэтапно слои с определенной геометрией одновременно для множества будущих чувствительных элементов. Число элементов, размещаемых на одной подложке, варьируется от нескольких десятков до нескольких тысяч в зависимости от диаметра подложки. Конструктивно инерциальные чувствительные элементы состоят из пластины-основания, приборного слоя и пластины-крышки [4, 5], что позволяет обеспечить герметичность объема, внутри которого размещают подвижную структуру акселерометра или гироскопа [6]. На рис. 1 представлено изображение, полученное на растровом электронном микроскопе (РЭМ), инерциального чувствительного элемента микромеханического акселерометра.

Технологический процесс создания инерциальных чувствительных элементов характеризуется следующими этапами [7, 8].

Этап 1. Изготовление пластины-основания 1 с полостями под подвижную структуру.

Этап 2. Формирование приборного слоя 2 посредством сращивания через слой диэлектрика [9] или металла [10] с пластиной-основанием 1.

Этап 3. Глубокое реактивно-ионное травление приборного слоя 2 для формирования подвижной и неподвижных структур и области под контакты [11].

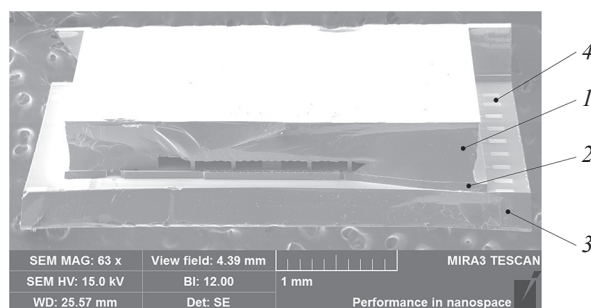


Рис. 1. РЭМ-изображение инерциального чувствительного элемента микромеханического акселерометра:

1 — кремниевая пластина-основание; 2 — кремниевый приборный слой; 3 — кремниевая пластина-крышка; 4 — внешняя контактная область

Fig. 1. SEM image of the inertial sensitive element of a micromechanical accelerometer, where 1 is the silicon wafer, 2 is the silicon device layer, 3 is the silicon cover wafer, 4 is the outer contact area

Этап 4. Сращивание с пластиной-крышкой 3 посредством эвтектической пайки [12], на которой предварительно выполняют металлические слои для контактных дорожек и зоны герметизации.

Этап 5. Травление контактной области для обеспечения доступа к контактам.

На характеристики инерциальных микромодулей наибольшее влияние оказывает процесс формирования структур в приборном слое, так как акселерометры и гироскопы чаще всего являются емкостными преобразователями, а жесткость конструкции определяется геометрическими параметрами упругого подвеса [7, 13]. В связи с этим размеры элементов в приборном слое являются критичными и на них устанавливают жесткие требования.

Элементы в приборном слое образуются за счет глубокого реактивно-ионного травления Bosch-процессом через защитную маску [11]. Процесс травления является прецизионным и позволяет формировать структуры в кремнии с высоким аспектным соотношением и вертикальными стенками [14]. Одним из ключевых параметров процесса является скорость травления и ее неравномерность по подложке, которая зависит в большей мере от соотношения площадей травления и подложки [15]. За счет необходимости травления одновременно и контактной области, и полостей вокруг подвижной структуры отношение площади травления областей незащищенной маской к площади подложки может составлять не менее 50 %. Оптимально для достижения минимальной неравномерности скорости травления отношение площади травления к площади подложки должно быть не более 20 %. Существует несколько способов снижения соотношения площади травления к площади подложки: увеличение габаритных размеров чувствительных элементов, что снижает общее число элементов на подложке; более сложные процессы изготовления за счет отсутствия необходимости травить область под контакты на этапе 2 формирования подвижной структуры, но большего числа слоев [4, 16, 17], изготовление открытых структур, которые являются менее надежными и негерметичными [8, 18].

Повышение надежности микромеханических акселерометров является актуальной задачей особенно в вопросах безопасности жизнедеятельности. Благодаря исследованиям надежности микромеханических акселерометров было выявлено множество механизмов отказа изделий [19, 20]. Такие механизмы, как слипание подвижной структуры с неподвижными элементами и механическое разрушение элементов упругого подвеса в результате ударных нагрузок, приводят к выходу изделия из строя за счет малого запаса прочности и жесткости элементов микромеханического акселерометра.

Целью настоящей работы является исследование снижения разброса геометрических параметров элементов приборного слоя микромеханических акселерометров путем уменьшения соотношения площади травления к площади подложки при сохранении общего числа изготавливаемых чувствительных элементов и их габаритных размеров.

Методы изготовления и исследования экспериментальных чувствительных элементов

Одним из наиболее технологичных процессов изготовления инерциальных чувствительных элементов является способ с обратным выводом контактов [21]. Этот способ позволяет достичь минимального количества слоев и операций для изготовления инерциального чувствительного элемента микромеханического акселерометра или гироскопа. Особенностью этого технологического процесса является прямой доступ к внешним контактам на пластине-крышке 3, что достигается за счет травления полостей в приборном слое 2 и пластине-основании 1 (рис. 1). Технологически это реализовано следующим образом [21]: изготавливается пластина-основание с полостями в кремнии и слое диоксида кремния (рис. 2, а), после чего пластина-основание сращивается с приборным слоем, на котором формируют глубоким реактивно-ионным травлением полости вокруг подвижной структуры и в области вывода контактов (рис. 2, б). Это необходимо для последующего удаления диоксида кремния и возможности вскрытия внешней контактной области со стороны пластины-основания. Для снижения площади травления на этапе 3 глубокого реактивно-ионного травления приборного слоя предлагается при изготовлении пластины-основания формировать полость в слое диоксида кремния в области вывода контактов (рис. 2, в), после чего в приборном слое необходимо вытравливать только полость вокруг подвижной структуры (рис. 2, д).

Реализовывалось изготовление пластины-основания по предлагаемому способу с помощью дополнительного этапа 6 фотолитографии и травления. После окисления кремниевой пластины на ее лицевой стороне выполнена фотолитография и протравка полости 4 до слоя кремния (рис. 2, в). Затем последовательно вытравливался диоксид кремния и кремний через фоторезистивную маску, закрывающую полость 4, для формирования полостей 3 (рис. 2, в).

Для исследования геометрических параметров элементов приборного слоя были изготовлены инерциальные чувствительные элементы микромеханических акселерометров по приведенным технологическим процессам на подложках диаметром 150 мм, значения отношений площадей травления к площади подложки на этапе 2 формирования приборного слоя составляли 36 % и 20 % для стандартного [21] и улучшенного технологических процессов соответственно. Формирование структур в приборном слое проводилось на установке глубокого реактивно-ионного травления Plasma Therm Versaline Bosch-процессом по двухстадийному циклическому режиму, параметры стадий пассивации и травления которого приведены в таблице.

Исследование геометрических параметров производилось путем определения размеров кремниевых структур на изображениях профилей, полученных на сканирующем электронном микроскопе Tescan Mira 3 (рис. 3). Наиболее существенными являются геометрические параметры элементов электродных структур, размеры которых были определены с помощью сканирующего электронного микроскопа

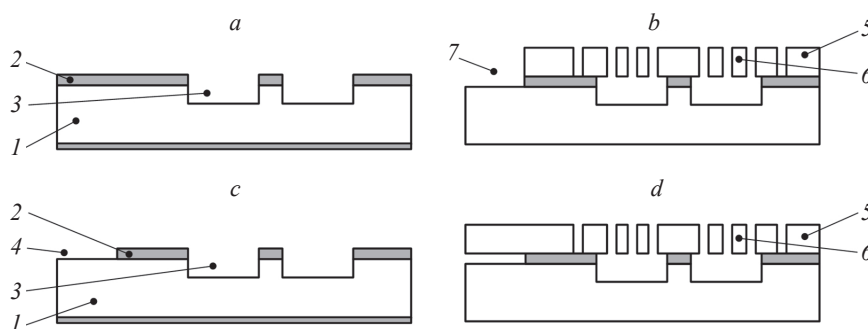


Рис. 2. Схематические изображения этапов технологического процесса изготовления инерциального чувствительного элемента: формирование пластины-основания (а) и структуры приборного слоя (b) стандартным технологическим процессом, формирование пластины-основания (с) и структуры приборного слоя (d) усовершенствованным технологическим процессом.

1 — кремниевая пластина-основание; 2 — слой диоксида кремния; 3 — полость в кремниевой пластине-основании; 4 — полость в области вывода контактов в слое диоксида кремния; 5 — кремниевый приборный слой; 6 — подвижная структура в приборном слое; 7 — полость в области вывода контактов

Fig. 2. Schematic images of the stages of the technological process for fabrication an inertial sensitive element: formation of the main wafer (a) and the structure of the device layer (b) by the standard technological process, formation of the main wafer (c) and the structure of the device layer (d) by the advanced technological process; where 1 is a silicon main wafer, 2 is a silicon dioxide layer, 3 is a cavity in the silicon main wafer, 4 is a cavity in the area of the contact output in the silicon dioxide layer, 5 is a silicon device layer, 6 is a movable structure in the device layer, 7 is a cavity in the area of the contact output

Таблица. Параметры глубокого реактивно-ионного травления приборного слоя микромеханического акселерометра

Table. Parameters of deep reactive ion etching of device layer of micromechanical accelerometer

Параметр	Значение	
	Пассивация	Травление
Рабочее давление, Па	3,3	4,0
Расход C_4F_8 , см ³ /мин	150	—
Расход SF_6 , см ³ /мин	—	150
Мощность разряда частотой 2 МГц, Вт	1500	
Напряжение смещения, В	10	400
Продолжительность стадии, с	2,5	5
Температура подложкодержателя, °C	-15	
Количество циклов	360	

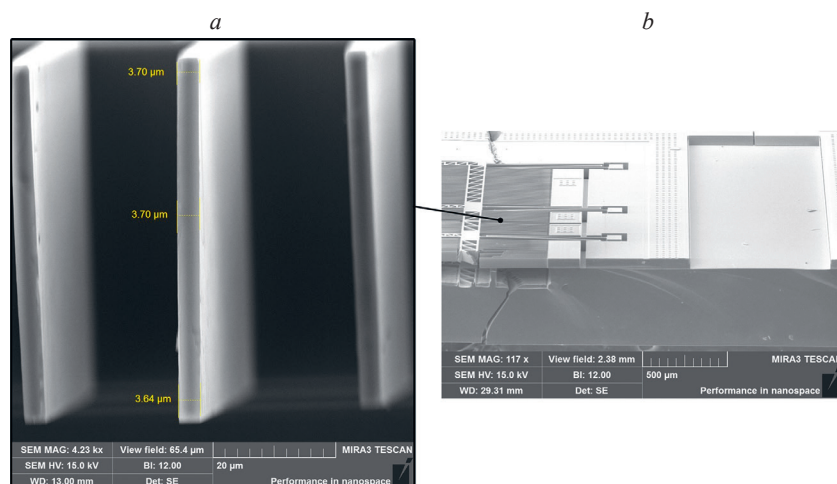


Рис. 3. РЭМ-изображения профиля элементов электродной структуры (а) и чувствительного элемента микромеханического акселерометра (b)

Fig. 3. SEM images of the profile of the electrode structure elements (a) and the sensitive element of the micromechanical accelerometer (b)

(рис. 3, *a*). Важными геометрическими параметрами являются среднее значение размера и разброс значений размеров элементов вдоль толщины приборного слоя. Были определены значения толщин элементов электродных структур в крайних положениях и в центре (рис. 3, *a*).

Для определения характера распределения геометрических параметров элементов приборного слоя были исследованы чувствительные элементы как в радиальном направлении подложки, так и в тангенциальном.

Результаты и обсуждение

На основе полученных данных значений толщин элементов электродных структур были определены их средние значения (рис. 4, *a*) и разброс значений (рис. 4, *b*) для чувствительных элементов микромеханических акселерометров, изготовленных по стандартному [21] и усовершенствованному процессу на подложках диаметром 150 мм. Усовершенствованный технологический процесс позволил снизить разброс средних значений толщин элементов в приборном слое на 33 % (рис. 4, *a*). Также значительно большее количество чувствительных элементов имеет минимальный разброс значений толщин кремниевых структур в приборном слое (рис. 4, *b*) за счет характера распределения травления чувствительных элементов по подложке.

На рис. 5 представлено распределение средних значений толщин элементов приборного слоя чувствительных элементов по подложке диаметром 150 мм. Из распределения были исключены технологические элементы (белые прямоугольники), которые необходимы исключительно для выполнения определенных операций при изготовлении акселерометров. Преимущественно геометрические параметры элементов изменяются от центра к краю подложки, что связано с диффузией реагентов и продуктов реакций в

процессе глубокого реактивно-ионного травления [15] и более высокой концентрацией радикалов и ионов в центре вакуумной камеры за счет расположения волновода источника высокочастотного газового разряда вокруг вакуумной камеры. Следует отметить, что распределение не является симметричным как относительно центрального чувствительного элемента, так и геометрического центра подложки. Такой характер распределения был выявлен на всех исследуемых подложках, что может быть связано в меньшей степени со смещением рисунка при выполнении фотолитографии из-за неидеально расположенных меток совмещения относительно центра подложки. А в большей степени с герметизацией подложки по краю на керамическом подложкодержателе, с образующейся внутренней полостью, в которую напускают и поддерживают гелий под давлением 500–2000 Па. Смещение центров подложки и подложкодержателя приводит к неравномерной утечке гелия из-под подложки и, как следствие, ее охлаждению, что и может оказывать влияние на характер распределения.

На основе анализа глубин травления зазора шириной 3 мкм было установлено, что увеличилось среднее значение скорости травления с 1,44 до 1,56 мкм/мин и снизилась ее неравномерность по подложке с 7,4 % до 5,9 % за счет уменьшения соотношения площади травления к площади подложки в 1,8 раз (с 36 % до 20 %), что согласуется с результатами в работе [15].

При травлении кремния вклад вносят две составляющие: ионная — за счет физического распыления материала и реакционная — за счет химического взаимодействия радикалов и ионов фтора с кремнием. Полимер, который осаждается на стадии пассивации и предотвращает травление боковых стенок, в первые секунды стадии травления удаляется ионной бомбардировкой со дна вытравливаемых полостей. Так как концентрация ионов больше в центре вакуумной камеры, полимер удаляется быстрее в центре подложки, за счет чего и продолжительность травления кремния

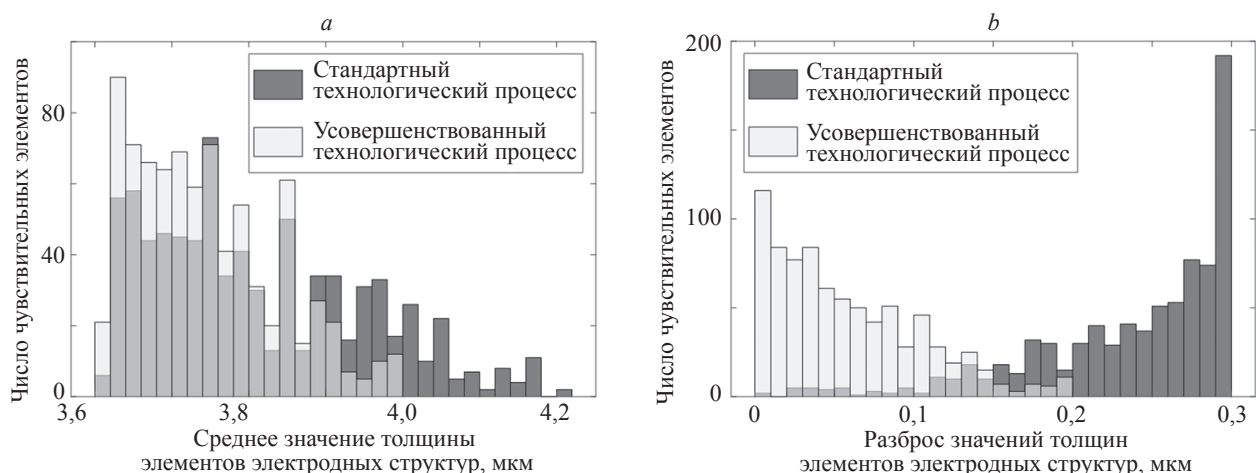


Рис. 4. Гистограммы распределения средних значений (*a*) и разброса значений (*b*) толщин элементов электродных структур с учетом пересечения значений (темно-серые столбцы)

Fig. 4. Histograms of the thicknesses average values distribution of the electrode structures elements (*a*) and the spread of the thicknesses values of the electrode structures elements (*b*) with accounting the intersection of values (dark gray columns)

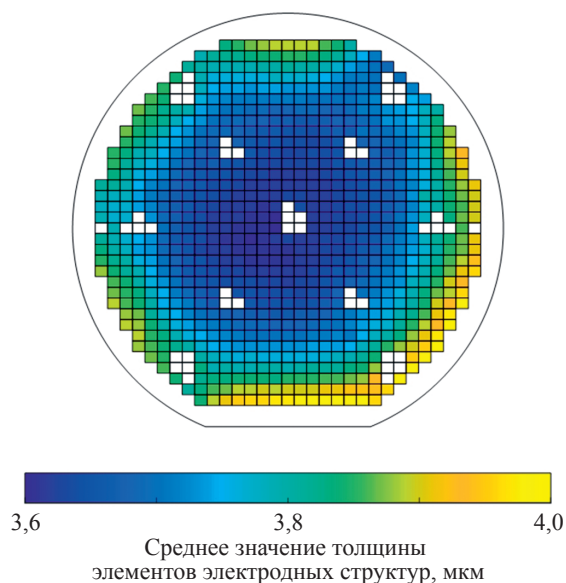


Рис. 5. Распределение средних значений толщин элементов электродных структур в чувствительных элементах микромеханических акселерометров по подложке диаметром 150 мм

Fig. 5. Distribution of the thicknesses average values of electrode structures elements in sensitive elements of micromechanical accelerometers on a 150 mm diameter substrate

Литература

1. Barzegar M., Blanks S., Sainsbury B.-A., Timms W. MEMS technology and applications in geotechnical monitoring: a review // *Measurement Science and Technology*. 2022. V. 33. N 5. P. 052001. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac4f00>
2. Fitzgerald A.M. MEMS Inertial Sensors // *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications*. Wiley, 2021. P. 1435–1446. <https://doi.org/10.1002/9781119458555.ch45>
3. Naumenko D., Tkachenko A., Lysenko I., Kovalev A. Development and research of the sensitive element of the MEMS gyroscope manufactured using SOI technology. *Micromachines*. 2023. V. 14. N 4. P. 895. <https://doi.org/10.3390/mi14040895>
4. Torunbalci M., Alper S., Akin T. Advanced MEMS process for wafer level hermetic encapsulation of MEMS devices using SOI cap wafers with vertical feedthroughs // *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2015. V. 24. N 3. P. 556–564. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2015.2406341>
5. Zoschke K., Mackowiak P., Kröhnert K., Oppermann H., Jürgensen N., Wietstruck M., Göritz A., Wipf ST., Kaynak M., Lang K.D. Cap fabrication and transfer bonding technology for hermetic and quasi hermetic wafer level MEMS packaging // *Proc. of the IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*. 2020. P. 432–438. <https://doi.org/10.1109/ECTC32862.2020.00076>
6. Torunbalci M., Gavcar H., Yesil F., Alper S., Akin T. An all-silicon process platform for wafer-level vacuum packaged MEMS devices // *IEEE Sensors Journal*. 2021. V. 21. N 13. P. 13958–13964. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3073928>
7. Евстифеев М.И. Методы проектирования конструкций микромеханических гироскопов. Учебное пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2018. 182 с.
8. Тимошенко С.П., Анчутин С.А., Зарянкин Н.М., Калугин В.В., Кочурина Е.С., Тимошенко А.С., Боев Л.Р. Проектирование и изготовление чувствительного элемента МЭМС-акселерометра // *Нано- и микросистемная техника*. 2021. Т. 23. № 2. С. 63–67. <https://doi.org/10.17587/nmst.23.63-67>

локально больше в пределах одного цикла, но скорость травления кремния начинает уменьшаться по мере удаления полимера в радиальном направлении подложки. Отметим, что при этом скорость травления принимает большие значения там, где продуктам проще покинуть зону реакций, т. е. ближе к краю подложки. За счет этого эффекта изменение соотношения площади травления к площади подложки влияет сильнее на размеры формируемых элементов, расположенных ближе к краю, чем к центру подложки.

Заключение

На основе полученных экспериментальных данных приведено распределение толщин элементов, характеризующееся изменением значений от центра к краю подложки. Показано, что снижение соотношения площади травления к площади подложки оказывает значительно большее влияние на среднюю толщину элементов и разброс их значений, чем на глубину формируемых полостей. Представленные результаты можно использовать для повышения выхода годных изделий и их надежности, а также при проектировании новых инерциальных чувствительных элементов микромеханических акселерометров и гироскопов.

References

1. Barzegar M., Blanks S., Sainsbury B.-A., Timms W. MEMS technology and applications in geotechnical monitoring: a review. *Measurement Science and Technology*, 2022, vol. 33, no. 5, pp. 052001. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac4f00>
2. Fitzgerald A.M. MEMS Inertial Sensors. *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications*. Wiley, 2021, pp. 1435–1446. <https://doi.org/10.1002/9781119458555.ch45>
3. Naumenko D., Tkachenko A., Lysenko I., Kovalev A. Development and research of the sensitive element of the MEMS gyroscope manufactured using SOI technology. *Micromachines*, 2023, vol. 14, no. 4, pp. 895. <https://doi.org/10.3390/mi14040895>
4. Torunbalci M., Alper S., Akin T. Advanced MEMS process for wafer level hermetic encapsulation of MEMS devices using SOI cap wafers with vertical feedthroughs. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2015, vol. 24, no. 3, pp. 556–564. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2015.2406341>
5. Zoschke K., Mackowiak P., Kröhnert K., Oppermann H., Jürgensen N., Wietstruck M., Göritz A., Wipf ST., Kaynak M., Lang K.D. Cap fabrication and transfer bonding technology for hermetic and quasi hermetic wafer level MEMS packaging. *Proc. of the IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2020, pp. 432–438. <https://doi.org/10.1109/ECTC32862.2020.00076>
6. Torunbalci M., Gavcar H., Yesil F., Alper S., Akin T. An all-silicon process platform for wafer-level vacuum packaged MEMS devices. *IEEE Sensors Journal*, 2021, vol. 21, no. 13, pp. 13958–13964. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3073928>
7. Evstifeev M.I. *Design Methods for Micromechanical Gyroscope Structures*. Study guide. St. Petersburg, ITMO, 2018. 182 p. (in Russian)
8. Timoshenkov S.P., Anchutin S.A., Zarjankin N.M., Kalugin V.V., Kochurina E.S., Timoshenkov A.S., Boev L.R. Research and Development of MEMS Accelerometer's Sensor. *Nano- and Microsystems Technology*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 63–67. (in Russian). <https://doi.org/10.17587/nmst.23.63-67>

9. Xu J., Ren Z., Dong B., Wang C., Tian Y., Lee C. Evolution of Wafer Bonding Technology and Applications from Wafer-Level Packaging to Micro/Nanofluidics-Enhanced Sensing // *Advanced MEMS/NEMS Fabrication and Sensors*. Springer, 2022. P. 187–215. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79749-2_7
10. Oggioni L., Garavaglia M., Seghizzi L. Wafer-to-Wafer Bonding // *Silicon Sensors and Actuators: The Feynman Roadmap*. Springer, 2022. P. 345–386. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80135-9_11
11. Karanin N.S. Deep reactive ion etching of device layer during manufacture micromechanical accelerometer // *Proc. of the Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*. 2022. P. 962–965. <https://doi.org/10.1109/ElConRus54750.2022.9755694>
12. Li D., Shang Z., She Y., Wen Z. Investigation of Au/Si eutectic wafer bonding for MEMS accelerometers // *Micromachines*. 2017. V. 8. N 5. P. 158. <https://doi.org/10.3390/mi8050158>
13. Kavitha S., Daniel R.J., Sumangala K. Design and analysis of MEMS comb drive capacitive accelerometer for SHM and seismic applications // *Measurement*. 2016. V. 93. P. 327–339. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.029>
14. Zhang Y., Wu Y., Sun Q., Shen L., Lan J., Guo L., Shen Z., Wang X., Xiao J., Xu J. Inductively coupled plasma dry etching of silicon deep trenches with extremely vertical smooth sidewalls used in micro-optical gyroscopes // *Micromachines*. 2023. V. 14. N 4. P. 846. <https://doi.org/10.3390/mi14040846>
15. Alnakhli Z., Liu Zh., AlQatari F., Cao H., Li X. UV-assisted nanoimprint lithography: the impact of the loading effect in silicon on nanoscale pattern of metalens // *Nanoscale Advances*. 2024. V. 6. N 11. P. 2954–2967. <https://doi.org/10.1039/D4NA00120F>
16. Wang X., Bleiker S.J., Edinger P., Errando-Herranz C., Roxhed N., Stemme G., Gylfason B., Niklaus F. Wafer-level vacuum sealing by transfer bonding of silicon caps for small footprint and ultra-thin MEMS packages // *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2019. V. 28. N 3. P. 460–471. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2019.2910985>
17. Liu J., Xia S., Peng C., Wu Z., Chu Z., Zhang Z., Lei H., Zheng F., Zhang W. Wafer-level vacuum-packaged electric field microsensor: structure design, theoretical model, microfabrication, and characterization // *Micromachines*. 2022. V. 13. N 6. P. 928. <https://doi.org/10.3390/mi13060928>
18. Belyaev Y.V., Belogurov A.A., Bocharov A.N., Kostygov D.V., Lemko I.V., Mihteeva A.A. Design of a micromechanical accelerometer // *Proc. of the 25th International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*. 2018. P. 1–7. <https://doi.org/10.23919/ICINS.2018.8405921>
19. Xu Y., Liu S., He C., Wu H., Cheng L., Yan G., Huang Q. Reliability of MEMS inertial devices in mechanical and thermal environments: a review // *Heliyon*. 2024. V. 10. N 5. P. e27481. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27481>
20. Peng T., You Z. Reliability of MEMS in shock environments: 2000–2020 // *Micromachines*. 2021. V. 12. N 11. P. 1275. <https://doi.org/10.3390/mi12111275>
21. Wenk B., Collet J., Gaff V. Technology platform for high performance Mems inertial & vibration sensors // *Proc. of the IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*. 2024. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/INERTIAL60399.2024.10502059>
9. Xu J., Ren Z., Dong B., Wang C., Tian Y., Lee C. Evolution of Wafer Bonding Technology and Applications from Wafer-Level Packaging to Micro/Nanofluidics-Enhanced Sensing. *Advanced MEMS/NEMS Fabrication and Sensors*. Springer, 2022, pp. 187–215. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79749-2_7
10. Oggioni L., Garavaglia M., Seghizzi L. Wafer-to-Wafer Bonding. *Silicon Sensors and Actuators: The Feynman Roadmap*. Springer, 2022, pp. 345–386. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80135-9_11
11. Karanin N.S. Deep reactive ion etching of device layer during manufacture micromechanical accelerometer. *Proc. of the Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, 2022, pp. 962–965. <https://doi.org/10.1109/ElConRus54750.2022.9755694>
12. Li D., Shang Z., She Y., Wen Z. Investigation of Au/Si eutectic wafer bonding for MEMS accelerometers. *Micromachines*, 2017, vol. 8, no. 5, pp. 158. <https://doi.org/10.3390/mi8050158>
13. Kavitha S., Daniel R.J., Sumangala K. Design and analysis of MEMS comb drive capacitive accelerometer for SHM and seismic applications. *Measurement*, 2016, vol. 93, pp. 327–339. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.029>
14. Zhang Y., Wu Y., Sun Q., Shen L., Lan J., Guo L., Shen Z., Wang X., Xiao J., Xu J. Inductively coupled plasma dry etching of silicon deep trenches with extremely vertical smooth sidewalls used in micro-optical gyroscopes. *Micromachines*, 2023, vol. 14, no. 4, pp. 846. <https://doi.org/10.3390/mi14040846>
15. Alnakhli Z., Liu Zh., AlQatari F., Cao H., Li X. UV-assisted nanoimprint lithography: the impact of the loading effect in silicon on nanoscale pattern of metalens. *Nanoscale Advances*, 2024, vol. 6, no. 11, pp. 2954–2967. <https://doi.org/10.1039/D4NA00120F>
16. Wang X., Bleiker S.J., Edinger P., Errando-Herranz C., Roxhed N., Stemme G., Gylfason B., Niklaus F. Wafer-level vacuum sealing by transfer bonding of silicon caps for small footprint and ultra-thin MEMS packages. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2019, vol. 28, no. 3, pp. 460–471. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2019.2910985>
17. Liu J., Xia S., Peng C., Wu Z., Chu Z., Zhang Z., Lei H., Zheng F., Zhang W. Wafer-level vacuum-packaged electric field microsensor: structure design, theoretical model, microfabrication, and characterization. *Micromachines*, 2022, vol. 13, no. 6, pp. 928. <https://doi.org/10.3390/mi13060928>
18. Belyaev Y.V., Belogurov A.A., Bocharov A.N., Kostygov D.V., Lemko I.V., Mihteeva A.A. Design of a micromechanical accelerometer. *Proc. of the 25th International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, 2018, pp. 1–7. <https://doi.org/10.23919/ICINS.2018.8405921>
19. Xu Y., Liu S., He C., Wu H., Cheng L., Yan G., Huang Q. Reliability of MEMS inertial devices in mechanical and thermal environments: a review. *Heliyon*, 2024, vol. 10, no. 5, pp. e27481. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27481>
20. Peng T., You Z. Reliability of MEMS in shock environments: 2000–2020. *Micromachines*, 2021, vol. 12, no. 11, pp. 1275. <https://doi.org/10.3390/mi12111275>
21. Wenk B., Collet J., Gaff V. Technology platform for high performance Mems inertial & vibration sensors. *Proc. of the IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, 2024, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/INERTIAL60399.2024.10502059>

Автор

Каранин Никита Сергеевич — инженер-технолог, АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация; аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0007-5086-0833>, karanin.ns@gmail.com

Author

Nikita S. Karanin — Process Engineer, Concern CSRI Electropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation; PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0007-5086-0833>, karanin.ns@gmail.com

Статья поступила в редакцию 07.12.2024
Одобрена после рецензирования 13.02.2025
Принята к печати 22.03.2025

Received 07.12.2024
Approved after reviewing 13.02.2025
Accepted 22.03.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»