

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 621.3.049.779

DOI: 10.17587/nmst.23.63-67

**С. П. Тимошенко**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., директор ин-та НМСТ, **С. А. Анчутин**<sup>2</sup>, вед. инж., **Н. М. Зарянкин**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, вед. инж., **В. В. Калугин**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., e-mail: viktor118@mail.ru, **Е. С. Кочурина**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, гл. метролог, e-mail: kochurinaes@gmail.com, **А. С. Тимошенко**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, ген. дир., **Л. Р. Боев**<sup>1</sup>, аспирант, e-mail: leo.boev@mail.ru.

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", г. Зеленоград

<sup>2</sup> Общество с ограниченной ответственностью "Лаборатория микроприборов", г. Зеленоград

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА

Поступила в редакцию 12.02.2021

*Приведено краткое описание МЭМС-акселерометра. Проведены расчеты, подтверждающие работоспособность конструкции и расчеты номинальных значений емкостей чувствительного элемента. Дано описание технологии изготовления МЭМС-акселерометра и определены оптимальные режимы плазмохимического травления.*

**Ключевые слова:** преобразователь линейного ускорения, инерциальный датчик, чувствительный элемент, МЭМС-акселерометр, моделирование МЭМС, метод конечных элементов, Bosch-процесс, плазмохимическое травление

### Введение

В настоящее время МЭМС-акселерометры являются одной из наиболее перспективных областей в отрасли инерциальных датчиков. Проектирование и исследование конструкций МЭМС-акселерометров связано с решением задач математической физики. Также немаловажной задачей является соблюдение технологического маршрута, в том числе проведение таких операций, как глубокое травление кремния.

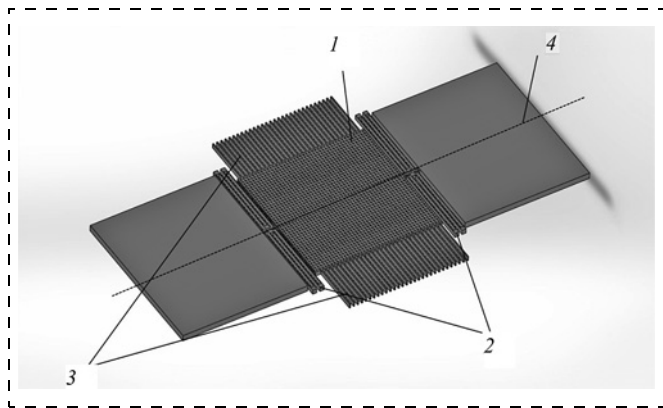
### Моделирование чувствительного элемента МЭМС-акселерометра

Программная система конечно-элементного анализа, используемая при проектировании кремниевого чувствительного элемента, представляет собой набор программных пакетов, предназначенных для решения обширного класса задач методом конечно-элементного моделирования. Механическая и математическая основа указанного программного комплекса представляет собой метод конечных элементов (МКЭ) — наиболее распространенный и достаточно универсальный метод анализа напряженно-деформированного состояния. Основная идея МКЭ состоит в том, что любую непре-

рывную величину (перемещение, температура, давление и т. п.) можно аппроксимировать моделью, состоящей из отдельных элементов (участков). На каждом из этих элементов исследуемая непрерывная величина аппроксимируется кусочно-непрерывной функцией, которая строится на значениях исследуемой непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемого элемента. В общем случае непрерывная величина заранее неизвестна, и нужно определить значения этой величины в некоторых внутренних точках области. После этого можно перейти к общему случаю [1, 2].

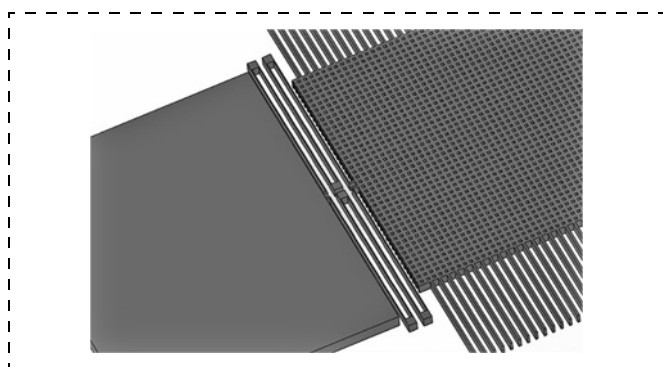
Разработанный чувствительный элемент (ЧЭ) МЭМС-акселерометра представляет собой массу (1), подвешенную на торсионах (2) (рис. 1). В конструкции предусмотрена емкостная система съема сигнала, представляющая собой 30 дифференциальных пар электродов (3). При появлении воздействующего ускорения вдоль оси чувствительности (4) масса 1 перемещается, что приводит к изменению значений емкостей 3.

Чувствительный элемент был изготовлен из монокристаллического кремния <100>. При моделировании учитывалась анизотропия свойств монокристаллического кремния. Анизотропные свойства кремния были промоделированы как свойства



**Рис. 1. Геометрическая модель чувствительного элемента МЭМС-акселерометра:**

1 — инерционная масса; 2 — торсионы; 3 — емкостная система съема сигнала; 4 — ось чувствительности



**Рис. 2. Фрагмент геометрической модели ЧЭ МЭМС-акселерометра**

ортоотропного материала с параметрами, приведенными ниже:

Модуль Юнга .....	169 ГПа
Коэффициент Пуассона .....	0,28
Плотность материала .....	2328 кг/м <sup>3</sup>

На рис. 2 приведен фрагмент разработанной геометрической модели ЧЭ МЭМС-акселерометра.

### Расчеты, подтверждающие работоспособность конструкции

Для подтверждения работоспособности конструкции были проведены модальный анализ и статический расчет, результаты приведены на рис. 3 (см. третью сторону обложки).

Модальный анализ позволил определить собственную частоту ЧЭ (452,83 Гц) и форму колебаний: собственная частота значительно (в 4,5 раза) меньше ближайшей "паразитной" частоты (1825,9 Гц). Проведенный расчет показал, что выбранная форма и размеры торсионов и инерционной массы позволяют изготовить ЧЭ, у которого влияние паразитных частот будет минимальным.

Также был проведен статический расчет, который показал, что максимальное смещение ЧЭ

при воздействии ускорения 1 g составляет 1,25 мкм (рис. 4, см. третью сторону обложки).

Напряженно-деформируемое состояние торсионов и суммарное значение напряжения материала составляет для данной конструкции  $2,5 \cdot 10^7$  Па.

Полученный результат показал, что значение напряжения материала меньше предела прочности для кремния ( $10^9$  Па). При расчете ускорение было задано в 10 раз больше (10 g).

### Расчет номинальных значений емкостей чувствительного элемента

Эквивалентная схема ЧЭ показана на рис. 5.

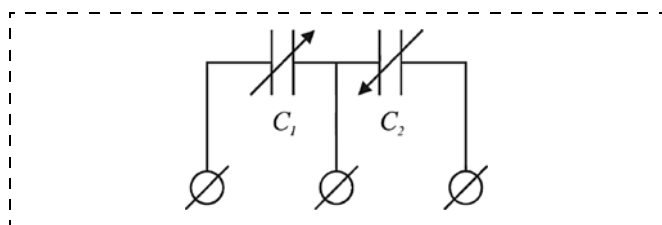
Емкости  $C_1$  и  $C_2$  образуются как сумма индивидуальных емкостей соответствующей гребенчатой структуры. Каждая структура содержит 30 отдельных емкостей. Фрагмент емкостных элементов гребенки ЧЭ показан на рис. 6.

Для каждой гребенки ЧЭ можно записать:

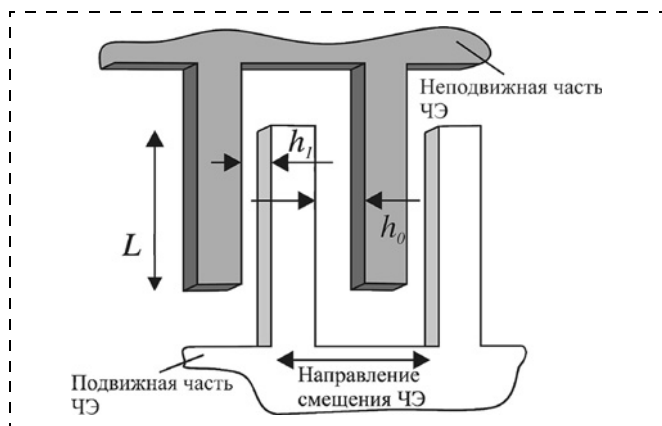
$$C_1 = \epsilon_0 \frac{bL}{h_0 + dx} + \epsilon_0 \frac{bL}{h_1 - dx};$$

$$C_2 = \epsilon_0 \frac{bL}{h_0 - dx} + \epsilon_0 \frac{bL}{h_1 + dx},$$

где  $\epsilon_0 = 8,85$  пФ/м,  $b = 30$  мкм — высота профиля ЧЭ;  $L = 252$  мкм — длина рабочей части электродов (зона перекрытия электродов подвижной и неподвижной частей ЧЭ);  $h_0 = 3$  мкм — номинальный зазор (при отсутствии ускорения, в положении покоя);  $dx = K_M g_Y$  — смещение ЧЭ под дейст-



**Рис. 5. Эквивалентная схема ЧЭ**



**Рис. 6. Схематичное изображение емкостных электродов гребенки ЧЭ**

вием ускорения силы тяжести;  $K_M = 0,08$  мкм/г — крутизна статической характеристики ЧЭ;  $g_Y = g \sin(\alpha) \approx g\alpha$  — проекция ускорения силы тяжести  $g$  на ось чувствительности ЧЭ;  $\alpha$  — малый угол отклонения оси чувствительности ЧЭ от горизонтальной плоскости.

Тогда можно записать для измерителя дифференциальной емкости:

$$C_1 = \varepsilon_0 b L \left( \frac{1}{h_0 + K_M 1 g \alpha} - \frac{1}{h_1 - K_M 1 g \alpha} \right);$$

$$C_2 = \varepsilon_0 b L \left( \frac{1}{h_0 - K_M 1 g \alpha} + \frac{1}{h_1 + K_M 1 g \alpha} \right);$$

$$dC = C_1 - C_2 =$$

$$= \frac{2 b \varepsilon_0 1 g K_M L (h_0^2 - h_1^2)}{(h_0^2 - \alpha^2 (1 g K_M)^2) (h_1^2 - \alpha^2 (1 g K_M)^2)} \alpha.$$

Рассчитанные значения емкостей  $C_1$  и  $C_2$  равняются 29,22 и 30,28 пФ соответственно. Дифференциальная емкость равна 1,058 пФ.

Обозначим масштабный коэффициент ЧЭ (для 30 гребенок):

$$K_\alpha = \frac{2 \cdot 30 b \varepsilon_0 1 g K_M L (h_0^2 - h_1^2)}{h_0^2 h_1^2}.$$

Тогда нелинейность преобразования примет вид:

$$N_3 = \frac{K_\alpha (1 g K_M)^2 (h_0^2 + h_1^2)}{h_0^2 h_1^2};$$

$$\delta N \% = \frac{N_3 \alpha_{\max}^2}{K_\alpha} \cdot 100 \%.$$

Расчетные значения основных параметров ЧЭ (30 гребенок), с диапазоном измерения 1 г будут следующие: масштабный коэффициент ЧЭ акселерометра  $K_M$  равен 0,0035 мкм/г; коэффициент нелинейности преобразования  $\delta N = 0,079$  %.

### Особенности технологии изготовления чувствительного элемента МЭМС-акселерометра

При травлении неглубоких отверстий в кремнии в технологии формирования объемных микроструктур для уменьшения числа операций технологического маршрута и при условии стойкости фоторезиста к условиям процесса травления целесообразно использовать фоторезистивную маску (ФРМ). При травлении глубоких (более 75 мкм) или сквозных отверстий в кремнии, либо при жестких условиях процесса травления кремния целесообразно использовать твердую маску. Кроме того, выбор маски должен быть обусловлен процессами как формирования кремниевого профиля, так и эффективного удаления маски с поверхности

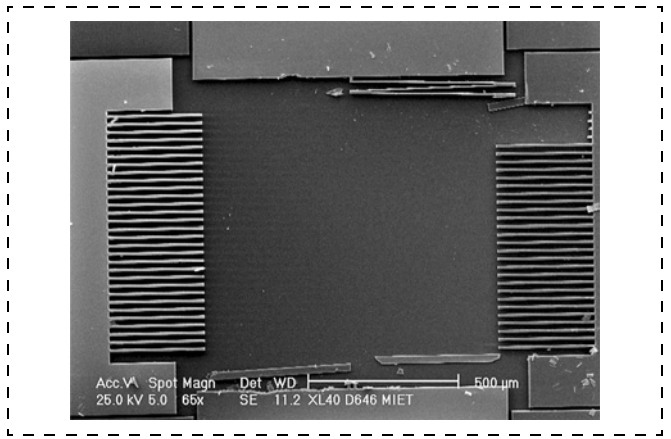


Рис. 7. Брак сложно-профильной структуры — разрушение электромеханических элементов конструкции

кремния. Травление на большую глубину (больше 75 мкм) с использованием ФРМ может приводить к неравномерности бокового подтрав, искажению геометрической формы элементов травления различной прочности конструкции и разрушению структуры (рис. 7).

В настоящее время множество методов для глубокого травления кремния с использованием плазмы. Проведенные исследования показали, что наиболее оптимальным для кремниевых МЭМС является применение ИСР плазмы и Bosch-процесса. Одним из ключевых параметров является давление, от которого зависят физические свойства плазмы, химические процессы, происходящие в объеме рабочей камеры. Существует тенденция к понижению давления при сохранении качества травления кремния. Особенно это актуально для профилей с высоким аспектным отношением. Уменьшение давления приводит к уменьшению числа столкновений ионов с нейтральными частицами в камере, что увеличивает число частиц в зоне реакции. Дополнительным преимуществом является уменьшение вероятности осаждения на поверхности продуктов реакции [3, 4].

Варьируемыми параметрами глубокого травления кремния являются:

Мощность ИСР-разряда	1...3 кВт
Давление в реакторе	1...7 Па
Температура электрода	от 0 до +30 °С
Мощность генератора смещения (400 кГц)	0...500 Вт
Расходы рабочих газов	0...400 см <sup>3</sup> /мин

Достижимое значение селективности довольно высокое и составляет около 75 для фоторезистивной маски. Несмотря на это, на практике возникает необходимость его увеличения. В частности, для травления кремния на глубину более 100 мкм приведенного выше значения селективности к фоторезистивной маске недостаточно. В этом случае целесообразно наносить металлическую маску или

маску из двуокиси кремния. Это усложняет технологический процесс, значительно увеличивая число операций.

При уменьшении температуры электрода с 20 до  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  наблюдалось уменьшение подтравы. Это вызвано ослаблением химической реакции между радикалами плазмы и стенками кремниевого профиля. С ростом температуры электрода и температуры в камере наблюдается рост скорости травления. Однако при большой скорости начинают проявляться различные дефекты процесса травления, к которым относятся повышенная шероховатость (рис. 8), искажения формы конструктивных элементов в объеме (рис. 9), нарушение вертикальности стенок профиля (рис. 10).

Путем движения по градиенту был определен режим глубокого травления кремния с повышенной селективностью более 100 для фоторезистивной маски и более 1000 для маски  $\text{SiO}_2$ . Подтверждено, что неоднородность глубины травления кремния в канавках различной ширины (апертурный эффект) уменьшается при увеличении соотношения длительностей стадий пассивации и травления. Путем движения по градиенту найдены условия, при которых неоднородность травления существенно снижена [5].

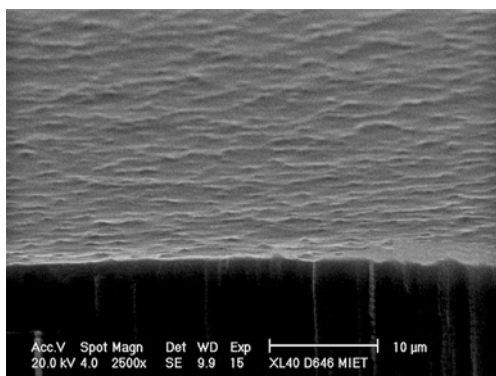


Рис. 8. Повышенная шероховатость поверхности травления полированного кремния на глубину 100 мкм

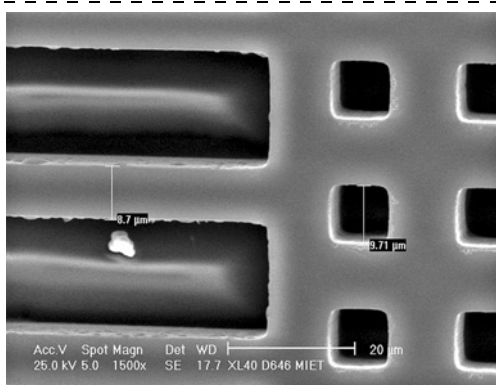


Рис. 9. Искращения формы конструктивных элементов в объеме

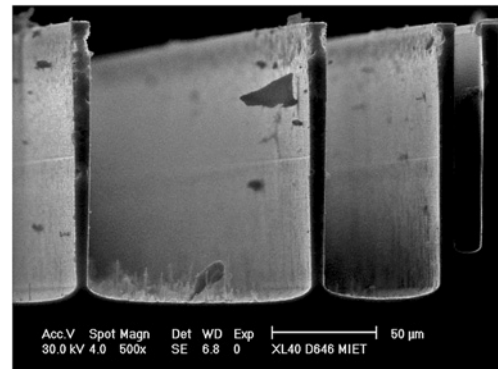


Рис. 10. Нарушение вертикальности стенок профиля

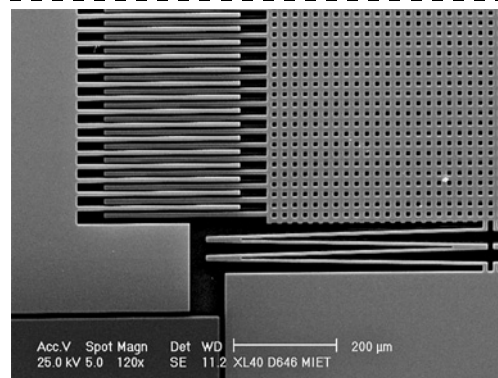


Рис. 11. Фрагмент сложно-профильной конструкции чувствительного элемента МЭМС-акселерометра

Одним из предложенных режимов травления глубоких канавок кремния в Bosch-процессе для разработанной конструкции МЭМС-акселерометра является:

- расход газа  $\text{SF}_6$  —  $300\text{ см}^3/\text{мин}$ ;
- расход газа  $\text{C}_4\text{F}_8$  —  $150\text{ см}^3/\text{мин}$ ;
- скважность подачи газов —  $7/2,5\text{ с}$ ;
- давление газа —  $3\text{ Па}$ ;
- мощность ИСР-разряда —  $2000\text{ Вт}$ ;
- мощность смещения —  $100\text{ Вт}$ ;
- температура подложкодержателя  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Оптимальные режимы травления и правильно подобранные маски в процессе травления позволили получить работоспособный кремниевый элемент.

На рис. 11 приведена фотография изготовленного фрагмента чувствительного элемента МЭМС-акселерометра.

### Заключение

Было проведено моделирование ЧЭ МЭМС-акселерометра с использованием МКЭ. Определена собственная частота конструкции, равная  $452,83\text{ Гц}$ . Проведен расчет напряженно-деформируемого состояния при воздействии вдоль оси чувствительности ускорения значениями  $1\text{ г}$  и  $10\text{ г}$ . Результат статического расчета при воздействии вдоль оси

чувствительности ускорения значением 1 g составляет  $1,25 \cdot 10^6$  м. Для 10 g значение напряжения материала составляет  $2,5 \cdot 10^{-7}$  Па. Это говорит о том, что значение напряжения материала меньше предела прочности для кремния. Проведенный расчет показал, что выбранная форма и размеры торсионов и инерционной массы позволяют изготовить ЧЭ, у которого влияние паразитных частот будет минимальным.

Дифференциальная емкость конденсаторной структуры равна 1,058 пФ. Расчетные значения основных параметров ЧЭ (30 гребенок), диапазоном измерения 1 g: масштабный коэффициент ЧЭ акселерометра  $K_M = 0,0035$  мкм/г; коэффициент нелинейности преобразования  $\delta N = 0,079$  %.

В результате проведенного исследования Bosch-процесса с использованием методов планирования многофакторных экспериментов определены режимы процесса глубокого травления кремния.

Произведены работоспособные кремниевые ЧЭ МЭМС-акселерометров.

#### Список литературы

1. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. Изд. 3-е. М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2009. 272 с.
2. Семичев Ю. С., Сурков И. А. Влияние плотности разбиения на элементы конструктивного концентратора напряжений на точность расчета методом конечных элементов // Вестник машиностроения. 2012. № 11. С. 39—41.
3. Ефремов А. М., Светцов В. И., Рыбкин В. В. Вакуумно-плазменные процессы и технологии: учеб. Иваново: Изд. ГОУВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т., 2006. 260 с.
4. Айнспрук Н., Браун Д. Плазменная технология в производстве СБИС / пер. с англ. с сокращ. М.: Мир, 1987. 471 с.
5. Виноградов А. И., Зарянкин Н. М., Прокопьев Е. П., Тимошенко С. П. Оптимизация параметров процесса глубокого плазмохимического травления кремния для элементов МЭМС // Известия вузов. Электроника. 2010. № 2 (82). С. 3—9.

S. P. Timoshenkov<sup>1</sup>, D. Sc., Professor, S. A. Anchutin<sup>2</sup>, Lead Engineer, N. M. Zarjankin<sup>2</sup>, Ph. D., Lead Engineer, V. V. Kalugin<sup>1</sup>, D. Sc., Professor, e-mail: viktor118@mail.ru, E. S. Kochurina<sup>2</sup>, Ph. D., Chief metrologist., e-mail: kochurinaes@gmail.com, A. S. Timoshenkov<sup>2</sup>, D. Sc., CEO, L. R. Boev<sup>1</sup>, Postgraduate Student, e-mail: leo.boev@mail.ru

<sup>1</sup> National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow

<sup>2</sup> Limited Liability Corporation "LMD", Moscow

Corresponding author:

Boev Leonid R., Postgraduate Student, National Research University of Electronic Technology (MIET), Zelenograd, Moscow, 124498, Russian Federation, e-mail: leo.boev@mail.ru

## Research and Development of MEMS Accelerometer's Sensor

Received on February 12, 2021

Accepted on February 18, 2021

Currently, MEMS accelerometers are one of the most promising areas in the inertial sensor industry. The design and study of MEMS accelerometers structures is associated with solving problems of mathematical physics. Also, a very important task is to comply with the technological route, including carrying out such operations as deep etching of silicon.

This article describes the modeling of the developed geometric model of the sensitive element MEMS accelerometer. The calculations were carried out, which showed that the developed structure is efficient.

As a result of the study of the Bosch process using methods for planning multifactor experiments, the modes of deep etching of silicon were optimized. Prototypes of sensitive element MEMS accelerometers have been produced.

**Keywords:** linear acceleration transducer, inertial sensor, capacitive accelerometer, sensing element, MEMS accelerometer, MEMS simulation, finite element method, Bosch process, plasma-chemical etching

For citation:

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- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 63—67.

DOI: 10.17587/nmst.23.63-67

#### References

1. Kaplun A. B., Morozov E. M., Olf'er'eva M. A. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. Изд. 3-е. Moscow, Knizhnyy dom "LIBROKOM", 2009, 272 p. (in Russian).
2. Semichev Ju. S., Surkov I. A. Vlijanie plotnosti razbi-enija na jelementy konstruktivnogo koncentratora naprjazhenij na tochnost' rascheta metodom konechnyh jelementov, *Vestnik mashinostroenija*, 2012, no. 11, pp. 39—41 (in Russian).

3. Efremov A. M., Svetcov V. I., Rybkin V. V. Vakuumno-plazmennye processy i tehnologii: ucheb. posobie; GOUVPO, Ivanovo, Ivan. gos. him.-tehnol. un-t, 2006, 260 p. (in Russian).
4. Ajnspruk N., Braun D. Plazmennaja tehnologija v proiz-vodstve SBIS: perevod s angl. s sokrashh. Moscow, Mir, 1987, 471 p. (in Russian).
5. Vinogradov A. I., Zarjankin N. M., Prokop'ev E. P., Timoshenkov S. P. Optimizacija parametrov processa glubokogo plazmohimicheskogo travlenija kremnija dlja jelementov MJeMS, *Izvestija vuzov. Elektronika*, 2010, no. 2 (82), pp. 3—9 (in Russian).