



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
H01L 27/08 (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2017107257, 06.03.2017

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
06.03.2017

Дата регистрации:
03.07.2018

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 06.03.2017

(45) Опубликовано: 03.07.2018 Бюл. № 19

Адрес для переписки:
105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЦЗИС, для Резчиковой
Е.В. (НУК ИУ)

(72) Автор(ы):
Шахнов Вадим Анатольевич (RU),
Зинченко Людмила Анатольевна (RU),
Резчикова Елена Викентьевна (RU),
Макарчук Владимир Васильевич (RU),
Глушко Андрей Александрович (RU),
Терехов Владимир Владимирович (RU),
Михайличенко Сергей Сергеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Московский государственный
технический университет имени Н.Э.
Баумана" (национальный исследовательский
университет)" (МГТУ им. Н.Э. Баумана) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: WO 2013028696 A1, 28.02.2013. US
6084285 A1, 04.07.2000. US 20140239446 A1,
28.08.2014. US 7551094 B2, 23.06.2009.

(54) Конструкция микросистемы с повышенной радиационной стойкостью к воздействию одиночных заряженных частиц

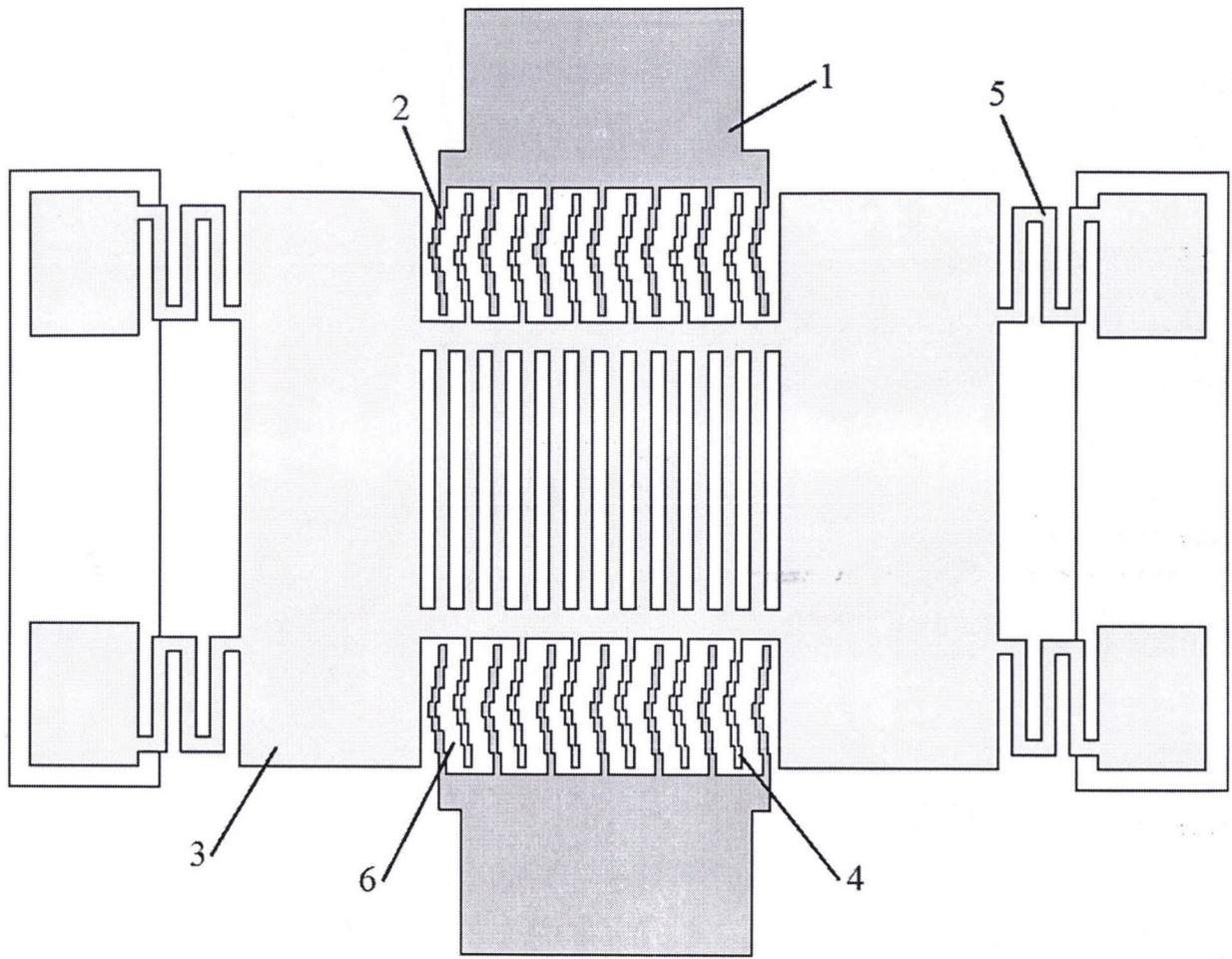
(57) Реферат:

Использование: для создания микроэлектромеханических устройств (МЭМС) с повышенной радиационной стойкостью. Сущность изобретения заключается в том, что в конструкции микросистемы с повышенной радиационной стойкостью к воздействию одиночных заряженных частиц, имеющей механическую часть и электрическую часть с фрактальной формой, обкладки

микроконденсаторов электрической части имеют трехмерную фрактальную форму Канторова множества. Технический результат: обеспечение возможности снижения вероятности радиационных повреждений МЭМС, исключения выхода микросистем из строя, а также считывания с них ложных данных при воздействии ионизирующего излучения тяжелых заряженных частиц. 4 ил.

RU 2 659 623 C1

RU 2 659 623 C1



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
H01L 27/08 (2006.01)

(21)(22) Application: **2017107257, 06.03.2017**

(24) Effective date for property rights:
06.03.2017

Registration date:
03.07.2018

Priority:

(22) Date of filing: **06.03.2017**

(45) Date of publication: **03.07.2018** Bull. № 19

Mail address:

105005, Moskva, ul. 2-ya Baumanskaya, 5, str. 1,
MGTU im. N.E. Baumana, TSZIS, dlya Rezhikovojoj
E.V. (NUK IU)

(72) Inventor(s):

**Shakhnov Vadim Anatolevich (RU),
Zinchenko Lyudmila Anatolevna (RU),
Rezhikova Elena Vikentevna (RU),
Makarchuk Vladimir Vasilevich (RU),
Glushko Andrej Aleksandrovich (RU),
Terekhov Vladimir Vladimirovich (RU),
Mikhajlichenko Sergej Sergeevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniya "Moskovskij gosudarstvennyj
tehnicheskij universitet imeni N.E. Baumana"
(natsionalnyj issledovatel'skij universitet)"
(MGTU im. N.E. Baumana) (RU)**

(54) **CONSTRUCTION OF MICROSYSTEM WITH HIGH RADIATION RESISTANCE TO THE SINGLE CHARGED PARTICLES IMPACT**

(57) Abstract:

FIELD: electrical equipment.

SUBSTANCE: use: to create the microelectromechanical devices (MEMD) with increased radiation resistance. Summary of invention is in the fact, that in the structure of the microsystem with increased radiation resistance to the single charged particles action having mechanical part and electrical part with the fractal shape, electrical part micro

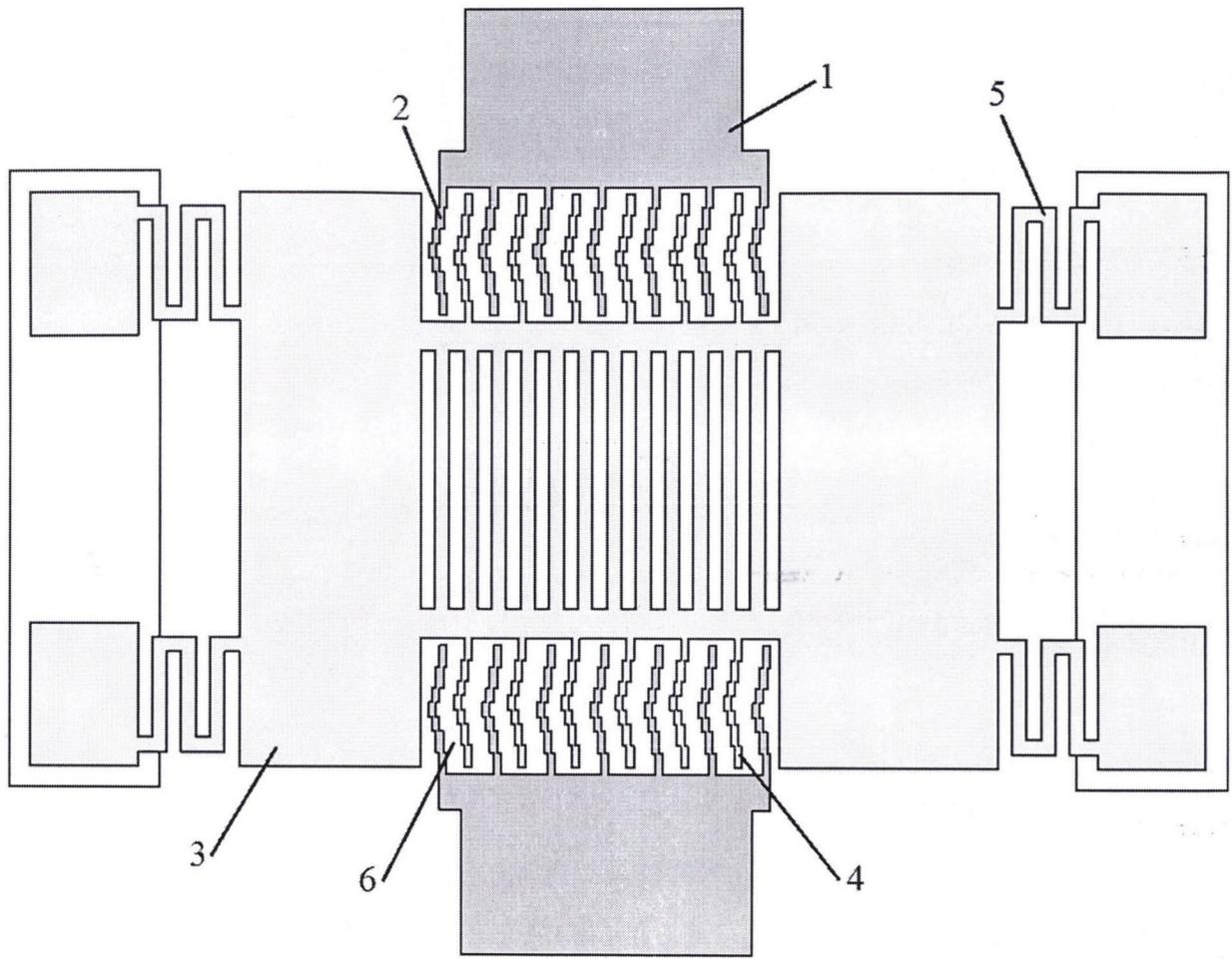
capacitors plates have the Cantor set three-dimensional fractal shape.

EFFECT: enabling the possibility of the MEMD radiation damage probability reducing, excluding the microsystems failure, as well as the false data reading from them during exposure to the heavy charged particles ionizing radiation.

1 cl, 4 dwg

RU 2 659 623 C1

RU 2 659 623 C1



Фиг. 1

Область техники

Область применения заявляемого технического решения - это приборы, состоящие из нескольких полупроводниковых или прочих компонентов на твердом теле, сформированных на одной общей подложке или внутри нее, в частности, содержащие только полупроводниковые компоненты одного вида. Заявляемое устройство относится к деталям и конструктивным элементам полупроводниковых приборов, интегральных схем с защитой от излучения, в частности от альфа-излучения. Предлагаемое решение может быть использовано в микросистемах для микроэлектромеханических устройств (МЭМС) с повышенной радиационной стойкостью, используемых, в частности, в космических кораблях и их оборудовании.

Уровень техники

Известна интегральная схема (ИС), содержащая потоковый конденсатор [1], имеющий фрактальную форму, включающий первую проводящую область в первом слое схемы, имеющую, по меньшей мере, одно ребро заданной конфигурации; вторую проводящую область в первом слое, имеющую, по меньшей мере, одно ребро с заданной комплементарной конфигурацией; по меньшей мере, одно ребро первой проводящей области и, по меньшей мере, одно ребро второй проводящей области отстоит на заданном расстоянии друг от друга с первой диэлектрической областью между первой проводящей областью ребра и второй проводящей областью ребра так, чтобы сформировать линейный конденсатор; третью проводящую область, во втором слое ИС, имеющей, по меньшей мере, одно ребро заданной конфигурации, третью проводящую область, соединенную с указанной первой проводящей областью; четвертую проводящую область в указанном втором слое ИС, имеющую, по меньшей мере, одно ребро заранее определенной комплементарной конфигурации, указанная четвертая проводящая область соединена с указанной второй проводящей областью; вторую диэлектрическую область между третьей проводящей областью и упомянутой четвертой проводящей областью; третью диэлектрическую область между указанными первым и вторым слоем схемы таким образом, что общая емкость для указанной интегральной с конденсатором содержит боковой поток между первой проводящей областью и указанной второй проводящей областью, боковой поток между третьей проводящей областью и четвертой проводящей областью, вертикальный поток между первой проводящей областью и указанной четвертой проводящей областью, и вертикальный поток между упомянутой второй проводящей областью и третьей проводящей областью.

Недостатком данного технического решения является то, что реализация описанных конденсаторов возможна только в интегральных схемах, поскольку создание описанных в патенте конденсаторов возможно только по технологическому процессу КМОП (CMOS). Производство микросистем по технологическим процессам для электростатических МЭМС, таких как PolyMUMPs или SOIMUMPs, не представляется возможным. Также, данное техническое решение предусматривает создание конденсаторов с переменной емкостью в очень узком диапазоне значений, что не отвечает требованиям динамичности микросистем. Анализ приведенных конденсаторов на радиационную стойкость, показал, что невозможно их применение в устройствах, функционирующих в среде с повышенным радиационным фоном. Например, в космических миссиях тяжелые заряженные частицы могут вызвать серьезные скачки тока и напряжения на обкладках конденсатора, что приведет к считыванию с сенсорной МЭМС неправильных значений измеряемой физической величины или выходу устройства из строя.

Также известно следующее изобретение [2]: Конденсатор с постоянной емкостью, имеющий корпус конденсатора в виде МЭМС-структуры, в которой корпус конденсатора имеет первую пластину с фрактальной формой в плоскости обкладки и горизонтально отделен от второй пластины с фрактальной формой, в которой первая 5 пластина и вторая пластина антисимметричны и находятся в одной плоскости; и подложку, над которой устанавливается корпус конденсатора. Фрактальная форма первой пластины и фрактальная форма второй пластины содержат фрактал Мура. Фрактальная форма первой пластины может являться геометрическим дополнением к фрактальной форме второй пластины в той же плоскости. Степень фрактала является 10 настраиваемой.

Приведенные конденсаторы за счет фрактальной формы позволяют добиться малых габаритов конденсатора, но они имеют постоянную емкость, что не позволяет использовать их в динамичных микросистемах, например, в тех, в основе которых 15 лежит принцип гибкого изменения емкости. Теоретический анализ приведенных конденсаторов на радиационную стойкость позволяет утверждать, что они откажут при работе в условиях повышенной радиации. Тяжелые заряженные частицы, которые в большом количестве пронизывают плоские конструкции, могут иметь энергию порядка нескольких гигаэлектронвольт [3], которые при попадании в сенсорные МЭМС могут вызвать интенсивную генерацию свободных носителей заряда в материалах 20 конденсаторов таких МЭМС. Это приведет к недопустимо большим скачкам тока и напряжения на обкладках конденсаторов, результатом чего станет считывание с сенсорной МЭМС неправильных значений измеряемой физической величины или выходу устройства из строя.

Наиболее близким техническим решением (прототипом) является [4]: Конденсатор 25 с переменной емкостью, являющийся частью МЭМС-структуры, имеющий верхнюю подвижную обкладку фрактальной формы, которая отделена от нижней неподвижной обкладки с комплементарной фрактальной формой вертикальным расстоянием, а также подложку, на которой находится конденсатор. Фрактальные формы верхней подвижной обкладки и нижней неподвижной обкладки комплементарны и имеют планарную 30 геометрию (форму) кривой Мура.

Хотя этот конденсатор позволяет варьировать величину емкости, использование его в специальных ответственных случаях, например, в МЭМС нецелесообразно по причине невозможности создать из описанных микроэлементов пространственную конфигурацию в разумном объеме. В приведенном техническом решении прототипа 35 фрактальная форма работает в плоскости для изменения емкости и основное предназначение технического решения - регулировка емкости конденсатора, что делает невозможным использование приведенных конденсаторов в сложных измерительных устройствах, например, трехосевых акселерометрах, поскольку антисимметричная фрактальная структура не позволяет создавать компактные сенсорные МЭМС для 40 измерений в нескольких геометрических осях. Также приведенное техническое решение невозможно применять в гироскопах с пространственной конфигурацией. Анализ данного технического решения показал, что подобные конденсаторы по причине плоской (планарной) формы компонентов непригодны для работы в условиях повышенного радиационного фона, что может быть критично при использовании 45 устройств, в которых используются данные конденсаторы, в космических миссиях, где все пространство пронизано космическими микрочастицами.

Раскрытие изобретения

Задачей заявляемого технического решения является снижение вероятности

радиационных повреждений МЭМС, исключения выхода микросистем из строя, а также считывания с них ложных данных при воздействии ионизирующего излучения тяжелых заряженных частиц.

Эффект достигается тем, что в конструкции микросистемы с повышенной радиационной стойкостью к воздействию одиночных заряженных частиц, имеющей механическую часть и электрическую часть с фрактальной формой, при этом фрактальная форма имеет трехмерную геометрию, в частности геометрию Канторова множества.

Трехмерная фрактальная форма электрической части микросистем уменьшает статистическую вероятность вывода устройства из строя или нарушения его функционирования благодаря уменьшению средней длины траектории движения тяжелой заряженной частицы в микросистеме. Также, трехмерная фрактальная форма электрической части микросистем уменьшает площадь контакта тяжелой заряженной частицы с поверхностями микросистем, результатом чего является снижение силы воздействия таких частиц на электрические свойства микросистем.

Краткое описание фигур

На фиг. 1 представлена модель МЭМС-акселерометра, обкладки микроконденсаторов которого имеют трехмерную фрактальную форму Канторова множества.

На фиг. 2 представлены модели микроконденсаторов с обкладками плоской формы (а) и фрактальной формы Канторова множества (б), смоделированные в программе Sentauros Process.

На фиг. 3 представлены графики распределения скоростей генерации свободных носителей заряда в конечный момент времени для угла $\phi=45^\circ$ для плоского микроконденсатора (а) и для конденсатора, имеющего трехмерную фрактальную форму Канторова множества (б).

На фиг. 4 представлена трехмерная модель одной из возможных форм обкладки микроконденсатора, основанная на фрактале Канторова множества.

Осуществление изобретения

Микросистема с фрактальной структурой содержит в себе механическую часть (грузики, подвесы, микрозеркала т.д.) и электрическую часть (проводники, обкладки конденсаторов, чувствительные элементы и т.д.), которая целиком или частично имеет фрактальную форму. Примером микросистемы с фрактальной структурой является акселерометр, который имеет неподвижный блок поз. 1 с несколькими обкладками микроконденсаторов поз. 2, имеющими фрактальную форму, подвижный грузик поз. 3 с несколькими обкладками микроконденсаторов фрактальной формы поз. 4, которые антисимметричны по отношению с обкладками неподвижного блока, упругие подвесы поз. 5, которые обеспечивают перемещение грузика, что приводит к изменению емкости микроконденсаторов, а также диэлектрик поз. 6, наполняющий пространство между обкладками микроконденсаторов (фиг. 1). Каждая из обкладок должна быть по своей форме антисимметрична другой, так чтобы обе обкладки могли соприкоснуться между собой при отсутствии диэлектрика с минимальным зазором. Каждая обкладка может иметь фрактальную форму на внутренней стороне, прилегающей к диэлектрику, и плоскую форму на внешней стороне, либо иметь фрактальную форму с обеих сторон. В микросистемах, требующих наличия конденсаторов с переменной емкостью, подвижными могут быть выполнены обе обкладки, либо только одна.

Электрические части микросистем могут быть выполнены из различных проводящих (например, из алюминия, золота) или полупроводниковых (например, кремния) материалов. Механические части микросистем могут быть выполнены как из

проводящих и полупроводниковых материалов (например, кремния, карбида кремния, алюминия, никеля), так и из диэлектриков (например, нитрида кремния). В случае наличия в микросистеме микроконденсаторов с переменной емкостью, в качестве диэлектрика, как правило, используется газовая среда, например, воздух.

5 Устройство работает следующим образом: в начальный момент времени к неподвижной (поз. 2) и подвижной (поз. 4) обкладкам микроконденсаторов приложено напряжение и микроконденсаторы полностью заряжены, следовательно, ток в цепи конденсатора не протекает. При наличии ускорения, действующего вдоль оси, перпендикулярной обкладкам микроконденсаторов, грузик (поз. 3) приходит в движение
10 благодаря упругим подвесам (поз. 5), что вызывает изменение расстояния между неподвижной (поз. 2) и подвижной (поз. 4) обкладками микроконденсаторов и, следовательно, изменение емкости каждого микроконденсатора. Это, в свою очередь, приводит к изменению разности потенциалов между обкладками микроконденсатора. Изменение разности потенциалов считывается и обрабатывается соответствующим
15 внешним устройством.

Было проведено исследование влияния фрактальной формы обкладок микроконденсаторов (использующихся в различных МЭМС сенсорах и актуаторах) на радиационную стойкость микросистем к воздействию одиночных заряженных частиц. В программе Sentaurus Process фирмы Synopsys были созданы компьютерные модели
20 плоского конденсатора (фиг. 2а) и конденсатора в виде ступенчатой усеченной пирамиды (фиг. 2б), основанного на трехмерном фрактале Канторова множество. Обкладки смоделированных микроконденсаторов выполнены из кремния и имеют одинаковую ширину области диэлектрика, но разную длину области диэлектрика в разрезе, зависящую от фрактальной формы обкладок. В качестве диэлектрика смоделированных
25 микроконденсаторов могут быть использованы различные материалы с достаточно высокой диэлектрической проницаемостью в любом фазовом состоянии.

При попадании тяжелой заряженной частицы под таким углом ϕ к вертикальной оси, при котором траектория частицы проходит сквозь обе обкладки конденсатора и диэлектрик между ними, на обкладках конденсатора в процессе симуляции фиксируется
30 скачок тока I_{\max} и соответствующий ему скачок напряжения V_{\max} . Скачки тока и напряжения возникают вследствие того, что тяжелая заряженная частица выбивает электроны из атомов кремния и бора (обкладки конденсатора выполнены из кремния, легированного бором), которые могут быть притянуты к другой обкладке вследствие приложенной к обкладкам разности потенциалов $V=1,5$ В.

35 Трехмерная фрактальная форма обкладок конденсатора обеспечивает два механизма защиты от тяжелых заряженных частиц. Первый - уменьшение вероятности прохождения частицы через весь конденсатор. Если предположить, что вероятность появления тяжелой заряженной части в фиксированной точке вблизи обкладки конденсатора, вектор скорости которой имеет угол ϕ в диапазоне от -90° до 90° одинакова, то для
40 плоского конденсатора вероятность прохождения частицы, которая вызовет появление значительного (более 2 мкА) скачка тока, составляет около 95%, в то время как для ступенчатого конденсатора, основанного на трехмерной фрактальной форме Канторова множества, эта вероятность составит около 67%. Второй механизм защиты - уменьшение площади контакта между тяжелой заряженной частицей и поверхностью
45 микроконденсатора, а также уменьшение длины траектории пролета частицы сквозь микросистему. Благодаря трехмерной фрактальной геометрии микроконденсатора даже в наихудшем случае (при малом угле ϕ) скачки тока на его обкладках будут не выше, чем для плоского конденсатора. С увеличением значения угла ϕ , площадь

контакта тяжелой заряженной частицы и конденсатора будет уменьшаться, что, в свою очередь, приведет к уменьшению скачков тока и напряжения. Этот эффект наглядно показан на фиг. 3 (а, б), где представлены графики скоростей генерации свободных носителей заряда в конечный момент времени моделирования для плоского микроконденсатора (а) и микроконденсатора с геометрией фрактала Канторова множество (б) при угле $\phi=45^\circ$. На фиг. 3 (а, б) поз. 7 показывает высокую скорость генерации зарядов, соответствующую траектории иона, поз. 8 - среднюю скорость генерации зарядов, а поз. 9 - отсутствие генерации зарядов.

Зная результаты воздействия одной тяжелой заряженной частицы на плоский конденсатор (скачки тока и напряжения, вызываемые ионом), ее параметры (тип и энергию), а также физические характеристики микроконденсатора (объем и плотность материала), возможно рассчитать поглощенную дозу. Благодаря свойствам трехмерной фрактальной формы обкладок микроконденсатора, для того же воздействия на микросистему (то есть, для получения скачков тока и напряжения такой же величины, как для плоского конденсатора), микроконденсатору в виде ступенчатой усеченной пирамиды требуется большая поглощенная доза. Результаты расчетов этой поглощенной дозы, а также ее процентное отношение к поглощенной дозе для плоского микроконденсаторов (расширение диапазона работы), сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

Угол ϕ	I_{\max} , мкА	V_{\max} , мВ	Поглощённая доза, мкГр	Поглощённая доза, требуемая для получения импульса тока I_{\max} , мкГр	Расширение диапазона работы
			Плоский конденсатор	Конденсатор с трехмерной фрактальной формой Канторова множества	
0°	9,2	9,2	39,5	101,7	157,5%
20°	8,4	8,5		39,5	-
45°	3,4	3,4		101,7	157,5%
70°	2,25	2,3		622	1474,7%
85°	2	1,9		553,6	1301,5%

Таким образом, предлагаемое техническое решение позволяет повысить надежность работы микросистем в условиях радиационных воздействий, что существенно расширяет диапазон применений МЭМС аппаратуры в различных условиях: космические исследования, предприятия, работающие с радиоактивными веществами, территории, загрязненные радиацией в аварийных ситуациях и т.п.

Дополнительным преимуществом предлагаемого технического решения является простота изготовления и технологичность. Для этого не требуется создавать новое уникальное оборудование, можно использовать существующие отработанные технологии.

Опубликованные источники информации

1. Патент США US 6084285 (МПК H01L 27/08; (IPC 1-7): H01L 29/41, опубли. 2000-07-04) LATERAL FLUX CAPACITOR HAVING FRACTAL-SHAPED PERIMETERS.

2. Патентная заявка США US 2014239446 (МПК H01L 49/02, опубли. 2014-08-28) FRACTAL STRUCTURES FOR FIXED MEMS CAPACITORS.

3. Shea H. Effects of Radiation on MEMS. // Proc. SPIE 7928. 2011.

4. Патентная заявка США 20140240894 (МПК H01G 13/00; H01G 5/16; H01G 7/00, опубл. 2014-08-28) FRACTAL STRUCTURES FOR MEMS VARIABLE CAPACITORS.

(57) Формула изобретения

5 Конструкция микросистемы с повышенной радиационной стойкостью к воздействию
одиночных заряженных частиц, имеющая механическую часть и электрическую часть
с фрактальной формой, отличающаяся тем, что обкладки микроконденсаторов
электрической части имеют трехмерную фрактальную форму Канторова множества.

10

15

20

25

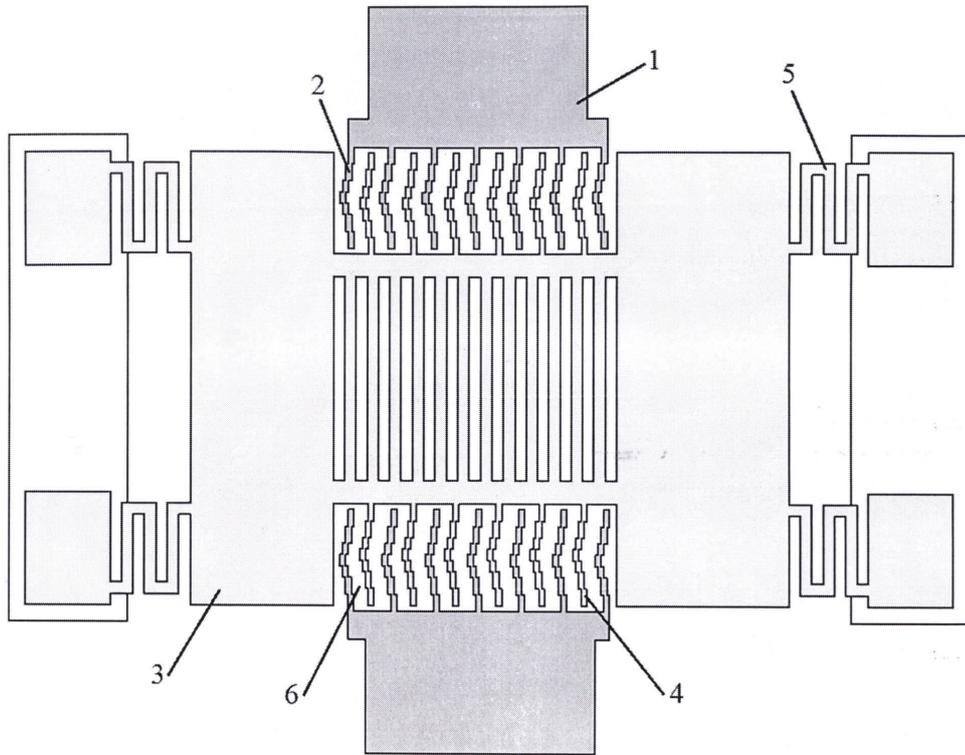
30

35

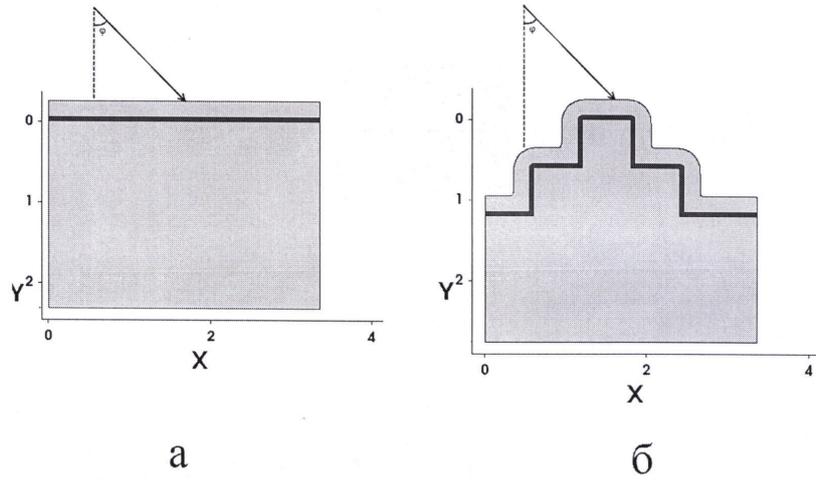
40

45

1

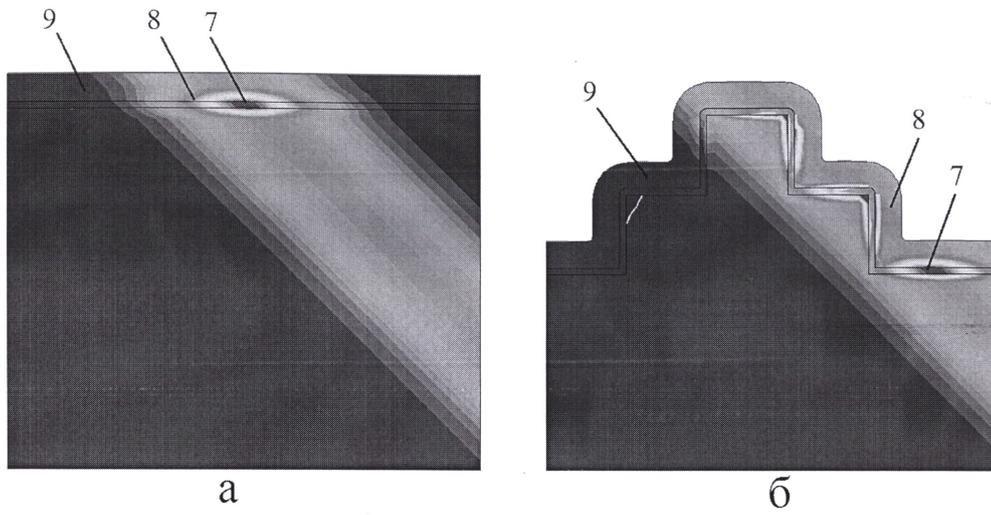


Фиг. 1



Фиг. 2

2



Фиг. 3



Фиг. 4