



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015133039, 07.08.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
07.08.2015Дата регистрации:  
09.12.2016

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 07.08.2015

(45) Опубликовано: 10.01.2017 Бюл. № 1

Адрес для переписки:

105005, Москва, 2-я Бауманская, 5, стр. 1, МГТУ  
им. Н.Э. Баумана, ЦЗИС, (для Гудкова А.Г.,  
кафедра РЛ-6)

(72) Автор(ы):

Мешков Сергей Анатольевич (RU),  
Макеев Мстислав Олегович (RU),  
Гудков Александр Григорьевич (RU),  
Иванов Юрий Александрович (RU),  
Иванов Антон Иванович (RU),  
Шашурин Василий Дмитриевич (RU),  
Синякин Владимир Юрьевич (RU),  
Вьюгинов Владимир Николаевич (RU),  
Добров Владимир Анатольевич (RU),  
Усыченко Виктор Георгиевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
"Московский государственный технический  
университет имени Н.Э. Баумана" (МГТУ  
им. Н.Э. Баумана) (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: Макеев М.О., Иванов Ю.А.,  
Мешков С.А., Шашурин В.Д., К вопросу о  
повышении надежности смесительных AlAs/  
GaAs резонансно-туннельных диодов  
конструкторско-технологическими  
методами, Наука и Образование, Научное  
издание МГТУ ИМ. Н. Э. Баумана, ноябрь  
2013. BY 13130 C1, 30.04.2010. RU 2411527 C1,  
10.02.2011. US 4575676 A1, 11.03.1986. US  
4816753 A1, (см. прод.)

(54) Способ определения стойкости к радиационным и температурным воздействиям нанoeлектронного резонансно-туннельного диода (РТД) на основе многослойных AlGaAs (алюминий, галлий, арсеник) полупроводниковых гетероструктур

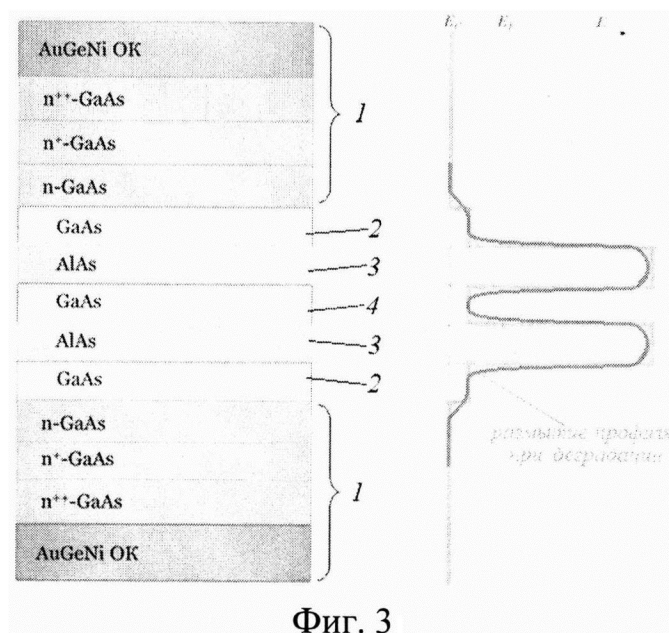
(57) Реферат:

Использование: для определения стойкости к радиационным и температурным воздействиям нанoeлектронного резонансно-туннельного диода. Сущность изобретения заключается в том, что способ определения стойкости к радиационным и температурным воздействиям нанoeлектронного резонансно-туннельного диода (РТД) на основе многослойных AlGaAs (алюминий, галлий, арсеник)

полупроводниковых гетероструктур заключается в последовательном приложении циклов радиационных воздействий на партию РТД, доза которых постепенно накапливается в каждом цикле, и температурных воздействий, время воздействия которых постепенно увеличивается, с тем, чтобы получить вызванное ими изменение вольт-амперной характеристики (ВАХ) в рабочей области не менее чем на порядок больше

погрешности измерения, в определении количества циклов радиационных и температурных воздействий путем установления ВАХ, соответствующей параметрическому отказу для конкретного применения РТД, в построении семейства ВАХ, в определении на основе анализа кинетики ВАХ скорости деградации РТД и в

определении стойкости к радиационным и температурным воздействиям РТД на основе полученной скорости деградации РТД. Технический результат: обеспечение возможности определения стойкости к радиационным и температурным воздействиям наноэлектронного резонансно-туннельного диода. 1 з.п. ф-лы, 3 ил.



Фиг. 3

(56) (продолжение):  
28.03.1989.

RU 2606174 C1

RU 2606174 C1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(21)(22) Application: **2015133039, 07.08.2015**(24) Effective date for property rights:  
**07.08.2015**Registration date:  
**09.12.2016**

Priority:

(22) Date of filing: **07.08.2015**(45) Date of publication: **10.01.2017** Bull. № 1

Mail address:

**105005, Moskva, 2-ya Baumanskaya, 5, str. 1, MGTU  
im. N.E. Baumana, TSZIS, (dlya Gudkova A.G.,  
kafedra RL-6)**

(72) Inventor(s):

**Meshkov Sergej Anatolevich (RU),  
Makeev Mstislav Olegovich (RU),  
Gudkov Aleksandr Grigorevich (RU),  
Ivanov Yuriy Aleksandrovich (RU),  
Ivanov Anton Ivanovich (RU),  
Shashurin Vasilij Dmitrievich (RU),  
Sinyakin Vladimir Yurevich (RU),  
Vyuginov Vladimir Nikolaevich (RU),  
Dobrov Vladimir Anatolevich (RU),  
Usychenko Viktor Georgievich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe byudzhethoe  
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego  
professionalnogo obrazovaniya "Moskovskij  
gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet imeni  
N.E. Baumana" (MGTU im. N.E. Baumana)  
(RU)**

(54) **METHOD OF DETERMINING RESISTANCE TO RADIATION AND TEMPERATURE EFFECTS OF  
NANOELECTRONIC RESONANT-TUNNELING DIODE (RTD) BASED ON MULTILAYER ALGAAS  
(ALUMINIUM, GALLIUM, ARSENICUM) SEMICONDUCTOR HETEROSTRUCTURES**

(57) Abstract:

FIELD: physics.

SUBSTANCE: invention can be used for determination of resistance to radiation and temperature effects of nanoelectronic resonant-tunneling diode. Summary of invention is, that method of determining resistance to radiation and temperature effects of nanoelectronic resonant-tunneling diode (RTD) based on multilayer AlGaAs (aluminium, gallium, arsenicum) semiconductor heterostructures consists in successive application of cycles of radiation effects to RTD batch, dose of which gradually is accumulated in each cycle, and thermal effects, exposure time of which gradually increases, in order to obtain caused by change of volt-

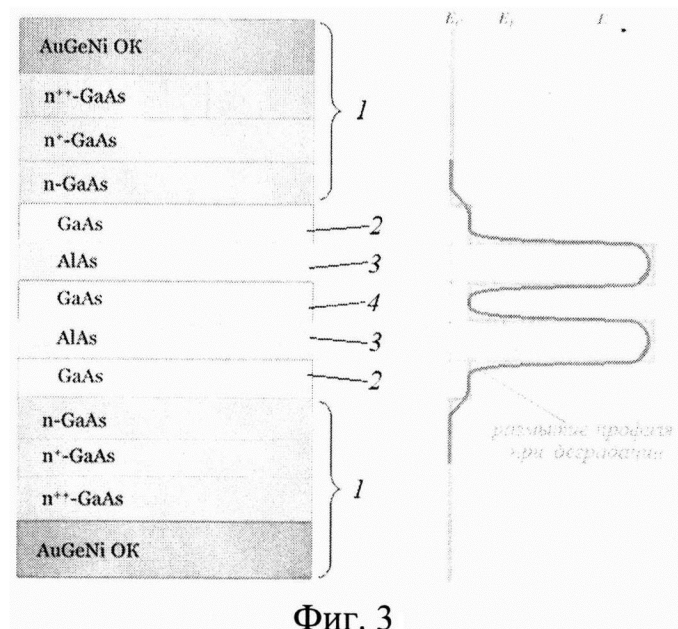
ampere characteristic (VAC) in working area of no less than by order greater than measurement error, in determining of number of cycles of radiation and temperature effects by setting curve of corresponding parameter fault for specific application of RTD, construction of VAC, in determining based on analysis of VAC of RTD degradation speed and in determination of RTD resistance to radiation and temperature effects based on obtained RTD degradation speed.

EFFECT: enabling determination of resistance to radiation and temperature effects of nanoelectronic resonant-tunneling diode.

1 cl, 3 dwg

**R U 2 6 0 6 1 7 4 C 1**

**1 C 1 7 4 2 6 0 6 1 7 4 R U**



Фиг. 3



Изобретение относится к электронным приборам, в частности к полупроводниковым приборам, и может быть использовано для определения стойкости к радиационным и температурным воздействиям наноэлектронного резонансно-туннельного диода (РТД) на основе многослойных AlGaAs (алюминий, галлий, арсеник) полупроводниковых гетероструктур.

К числу основных требований, предъявляемых к характеристикам бортовых систем космических аппаратов, относятся требования высокой надежности и стойкости к дестабилизирующим факторам космического пространства (КП).

Наибольшие трудности в обеспечении указанных требований практически на всех этапах развития космонавтики возникали при создании радиоэлектронных систем, так как именно для них характерны наиболее высокие темпы роста функциональной и аппаратной сложности, а темпы роста требований к их надежному функционированию существенно превышают темпы роста надежности элементной базы.

Ионизирующее излучение состоит из потока первичных заряженных ядерных частиц (электроны, протоны и тяжелые заряженные частицы), коротковолновое электромагнитное излучение (рентгеновское и гамма-излучение), а также вторичных ядерных частиц - продуктов ядерных превращений, связанных с первичным излучением. Основные эффекты воздействия ионизирующего излучения (ИИ) на радиоэлектронную аппаратуру (РЭА) связаны с ионизационными и ядерными потерями энергии первичных и вторичных частиц. Эти эффекты могут вызвать параметрический отказ полупроводниковых приборов и интегральных схем (ИС) вследствие накопления дозы ИИ, а также возникновение одиночных сбоев и отказов от воздействия отдельных высокоэнергетических ядерных частиц.

Влияние космической плазмы может проявляться на высоких орбитах полета космического аппарата (КА) через электризацию диэлектрических защитных и термоизолирующих покрытий. При достижении критического заряда происходит внутренний локальный электростатический пробой, который может привести к отказу или сбою в работе прибора.

При воздействии теплового излучения Солнца, а также при попадании в зону тени от других объектов происходит неравномерный разогрев конструкций КА, приводящий к значительным циклическим изменениям температуры поверхности КА. В результате возникают температурные градиенты, которые могут приводить к возникновению термоэлектродвижущей силы (термоЭДС). Кроме того, температурные эффекты приводят к изменению характеристик полупроводниковых приборов и ИС, входящих в состав РЭА КА. В условиях невесомости ухудшается тепловой режим работы РЭА, так как отсутствует конвекционный обмен теплом.

Результатом воздействия космического вакуума на элементы и узлы КА являются отсутствие конвективного теплообмена и теплопроводности и изменение электрических свойств материалов.

Из уровня техники известны ряд патентов, направленных на улучшение характеристик полупроводниковых приборов и интегральных схем (ИС), работающих в вышеуказанных условиях.

Известен способ отбраковки микросхем, изготовленных на КНД (кремний на диэлектрике) структурах, по стойкости к радиационному воздействию (см. RU №2411527 C1, кл. G01R 31/28, 10.02.2011).

Изобретение относится к области электронной техники, в частности предназначено для отбраковки микросхем, изготовленных на КНД (кремний на диэлектрике) структурах, по радиационной стойкости. Способ отбраковки микросхем, изготовленных

на КНД структурах, по стойкости к радиационному воздействию заключается в поэтапном облучении микросхем малой дозой, выборе статического тока потребления в качестве критериального параметра, определяющего радиационную стойкость микросхем, восстановлении исходных параметров микросхем путем их дополнительного облучения при заземленных выводах. Разбраковку осуществляют за один этап облучения при тестовой дозе, определяемой по результатам облучения определительной группы микросхем из производственной партии.

Недостатком известного способа является низкая надежность, связанная с уменьшенной разовой дозой облучения микросхем.

Известен способ разделения интегральных микросхем по радиационной стойкости и надежности (см. RU №2254587 C1, кл. G01R 31/26, 20.06.2005).

Изобретение относится к области электронной техники, в частности предназначено для разделения интегральных микросхем по уровням радиационной стойкости и надежности. Сущность: облучают поэтапно с количеством этапов не менее двух партии микросхем малой дозой ионизирующего излучения (от нескольких крад до нескольких десятков крад). Измеряют их стандартные электрические параметры и минимальное напряжение питания каждой микросхемы, при котором сохраняется ее функционирование. Строят дозовые зависимости, описывающие изменение стандартных параметров и минимального напряжения функционирования под действием облучения. С их помощью прогнозируют для каждой микросхемы дозу отказа, при которой хотя бы один стандартный параметр достигнет своего предельного значения или минимальное напряжение питания достигнет номинального значения напряжения питания микросхемы. Надежность микросхем определяют после отжига облученных микросхем по отклонению значения одного или нескольких стандартных параметров или минимального напряжения питания от их исходных значений до облучения.

Недостатком известного способа является сложность, связанная определением надежности микросхем после отжига.

В известных способах исследуются микросхемы и при этом определяются заранее заданные предельные параметры.

В последние годы в микроэлектронике СВЧ (сверхвысоких частот) все шире используются новые полупроводниковые материалы, такие как нитрид галлия GaN, карбид кремния SiC, кремний-германий SiGe. Не теряет своих позиций и арсенид галлия GaAs. На гетероструктурах AlGaIn/GaN создаются мощные полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов. На гетероструктурах SiGe разрабатываются биполярные транзисторы, способные работать на частотах в сотни гигагерц, Перечисленные материалы используются при создании современной в значительной степени новой элементной базы микроэлектроники, в частности наноэлектронного резонансно-туннельного диода (РТД) на основе многослойных AlGaAs (алюминий, галлий, арсенид) полупроводниковых гетероструктур.

Технический результат, на достижение которого направлено изобретение, заключается в определении стойкости к радиационным и температурным воздействиям наноэлектронного резонансно-туннельного диода (РТД) на основе многослойных AlGaAs полупроводниковых гетероструктур, определении необходимости доработок конструкторского и технологического характера, направленных на повышение стойкости РТД к действию указанных факторов и, соответственно, повышение надежности радиоэлектронной аппаратуры на основе РТД в условиях действия ионизирующих излучений и температурного фактора.

Указанный технический результат достигается тем, что способ определения стойкости

к радиационным и температурным воздействиям нанoeлектронного резонансно-туннельного диода (РТД) на основе многослойных AlGaAs полупроводниковых гетероструктур заключается в последовательном приложении циклов радиационных воздействий на партию РТД, доза которых постепенно накапливается в каждом цикле, и температурных воздействий, время воздействия которых постепенно увеличивается, с тем, чтобы получить вызванное ими изменение вольт-амперной характеристики (ВАХ) в рабочей области не менее чем на порядок больше погрешности измерения, в определении количества циклов путем установления ВАХ, соответствующей параметрическому отказу для конкретного применения РТД, в построении семейства ВАХ, в определении на основе анализа кинетики ВАХ скорости деградации РТД и в определении стойкости к радиационным и температурным воздействиям РТД на основе полученных данных по скорости деградации РТД.

Указанный технический результат достигается также тем, что температурные воздействия осуществляют в области 300°C.

Изобретение будет понятно из последующего описания и приложенных к нему чертежей.

На фиг. 1 показана типовая структура и энергетическая диаграмма РТД. По оси ординат диаграммы приведены:  $E$  - ось энергий,  $E_f$  - уровень Ферми,  $E_c$  - дно зоны проводимости.

На фиг. 2 показаны вольтамперные характеристики (ВАХ) РТД, полученные в результате действия циклов термических воздействий и циклов ионизирующих воздействий гамма-квантами. На оси абсцисс приведены значения напряжения -  $U$  на РТД в вольтах, на оси ординат приведены значения тока -  $I$  в амперах.

На фиг. 3 показаны искажения энергетической диаграммы в результате действия циклов термических и ионизирующих воздействий.

РТД состоит из двух контактных областей 1 (см. фиг. 1 и фиг. 3), выполненных из легированного GaAs и AuGeNi (золото, никель, германий), спейсеров 2, выполненных из GaAs, и резонансно-туннельной гетероструктуры в составе трех чередующихся областей: потенциальных барьеров 3, выполненных из  $Al_yGa_{1-y}As$ , где  $y$  - молярная доля Al (алюминия), и расположенной между ними потенциальной ямы 4, выполненной из GaAs, различающихся шириной запрещенной зоны и толщиной слоя. Потенциальная яма и потенциальные барьеры имеют толщину от нескольких единиц до нескольких десятков нм (см. Ivanov Yu.A., Meshkov S.A., Sinjakin V.Yu., Fedorenko I.A., Fedorkova N.V., Fedorov I.B., Shashurin V.D. Increase of quality of radio-electronic systems of new generation due to application of resonant tunneling nanodiodes. Nanoengineering. 2011. №1, pp. 34-43).

Способ определения стойкости к радиационным и температурным воздействиям нанoeлектронного резонансно-туннельного диода (РТД) на основе многослойных AlGaAs полупроводниковых гетероструктур осуществляется следующим образом.

Формируется партия РТД объемом  $N$  не менее 30 штук, которая подвергается воздействию циклов радиационных воздействий, чтобы получить вызванное ими изменение ВАХ в рабочей области не менее чем на порядок больше погрешности измерения. Доза радиационных воздействий постепенно накапливается в каждом цикле, а время температурных воздействий постепенно увеличивается. Температурные воздействия осуществляют преимущественно в области 300°C.

Радиационное облучение может производиться с помощью источника  $\gamma$ -квантов  $^{60}Co$ , например, ГИК-17М. Для температурного воздействия может использоваться

лабораторная электронагревательная печь, например СНОЛ 6/11.

Цикл радиационных и температурных воздействий состоит из следующих действий. Сначала партия РТД облучается дозой, при которой изменение ВАХ диодов не менее чем на порядок больше погрешности измерений. Изменение ВАХ регистрируется измерительным прибором (например, совместное использование микрозондового устройства (МЗУ) «ЛОМО 900072» и источника питания с цифровым управлением «Agilent 3640A DC Power Supply»). Затем партия РТД подвергается температурному воздействию, время и температура воздействия выбираются такими, при которых изменение ВАХ диодов не менее чем на порядок больше погрешности измерений. Изменение ВАХ регистрируется измерительным прибором. ВАХ партии РТД измеряются в каждом цикле радиационных и температурных воздействий.

После каждого цикла радиационных и температурных воздействий измеряются ВАХ партии РТД. На фиг. 2 приведена ВАХ 5, полученная до температурных и ионизирующих воздействий. После первого цикла радиационных и температурных воздействий получена ВАХ 6, соответственно после последующих циклов получены ВАХ 7 и ВАХ 8. Как видно из фиг. 2, вольтамперные характеристики 6-8 незначительно отличаются друг от друга. После дополнительных воздействий получены ВАХ 9 и ВАХ 10, вольтамперные характеристики которых резко отличаются от начальной.

Количество циклов определяется путем установления ВАХ, соответствующей параметрическому отказу для конкретного применения РТД. Критическая ВАХ соответствует такому состоянию РТД, в котором он не может выполнять функции нелинейного преобразования радиосигналов для обеспечения заданных показателей назначения преобразователя (функционального устройства) на его основе, т.е. наступает параметрический отказ. Критическая ВАХ РТД находится путем имитационного моделирования параметров нелинейного преобразователя с различными формами ВАХ, полученными в результате радиационных и температурных воздействий, и сравнения их с допустимыми значениями. За критическую принимается такая ВАХ, при которой хотя бы один функциональный параметр (показатель назначения) преобразователя выходит за допустимые пределы (см. Мешков С.А., и др. Перспективы разработки нелинейных преобразователей радиосигналов на базе резонансно-туннельных нанодиодов, Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение», 2012, №4 (89), с. 100-113).

Деградация резонансно-туннельной гетероструктуры РТД в виде искажения энергетической диаграммы в результате действия циклов термических и ионизирующих воздействий показана на фиг. 3. Повреждения вносятся не только в гетероструктуру, но и в контактные области РТД.

На основе построенного семейства ВАХ определяется смещение ВАХ, которое характеризует скорость деградации РТД. Использование полученной скорости деградации РТД производится по методикам, изложенным в книге Проников А.С. Параметрическая надежность машин. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, 560 с. и книге Чеканов А.Н. Расчеты и обеспечение надежности электронной аппаратуры: учебное пособие, М., КНОРУС, 2012, 440 с.

Изобретение позволяет определить стойкость к радиационным и температурным воздействиям нанoeлектронного резонансно-туннельного диода (РТД) на основе многослойных AlGaAs полупроводниковых гетероструктур, определить необходимость доработок конструкторского и технологического характера, направленных на повышение стойкости РТД к действию указанных факторов и, соответственно, повысить надежность радиоэлектронной аппаратуры на основе РТД в условиях действия

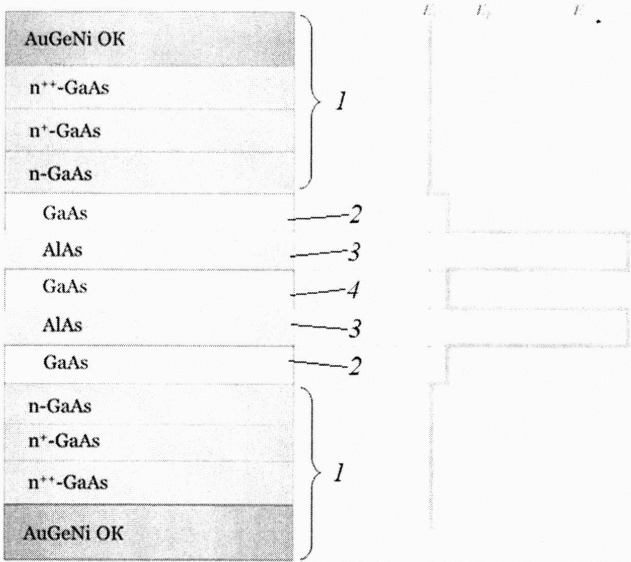
ионизирующих излучений и температурного фактора.

(57) Формула изобретения

1. Способ определения стойкости к радиационным и температурным воздействиям  
5 наноэлектронного резонансно-туннельного диода (РТД) на основе многослойных  
AlGaAs полупроводниковых гетероструктур, характеризующийся последовательным  
приложением циклов радиационных воздействий на партию РТД, доза которых  
постепенно накапливается в каждом цикле, и температурных воздействий, время  
10 воздействия которых постепенно увеличивается, с тем, чтобы получить вызванное ими  
изменение вольт-амперной характеристики (ВАХ) в рабочей области не менее чем на  
порядок больше погрешности измерения, определением количества циклов путем  
установления ВАХ, соответствующей параметрическому отказу для конкретного  
применения РТД, построением семейства ВАХ, определением на основе анализа  
кинетики ВАХ скорости деградации РТД и определением стойкости к радиационным  
15 и температурным воздействиям РТД на основе полученной скорости деградации РТД.  
2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что температурные воздействия осуществляют  
в области 300°C.

1

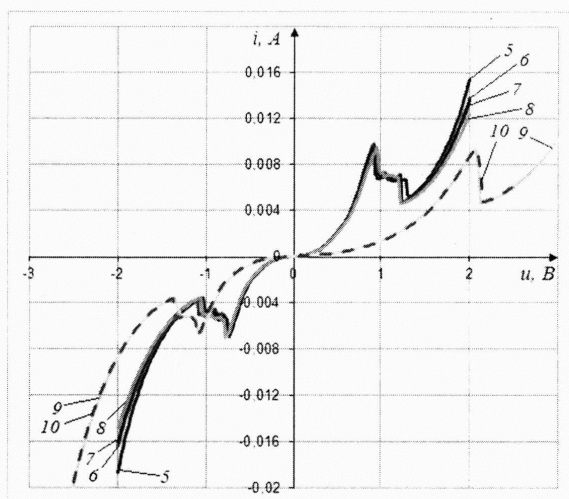
Способ определения стойкости к радиационным и температурным воздействиям нанoeлектронного резонансно-туннельного диода (РТД) на основе многослойных AlGaAs (алюминий, галлий, арсеник) полупроводниковых гетероструктур



Фиг. 1

2

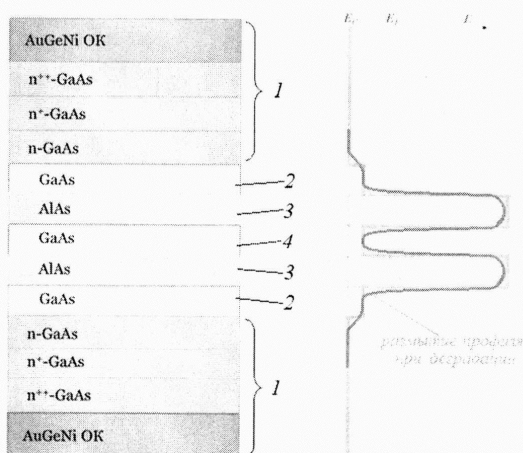
Способ определения стойкости к радиационным и температурным воздействиям наноэлектронного резонансно-туннельного диода (РТД) на основе многослойных AlGaAs (алюминий, галлий, арсеник) полупроводниковых гетероструктур



Фиг. 2



Способ определения стойкости к радиационным и температурным воздействиям нанoeлектронного резонансно-туннельного диода (РТД) на основе многослойных AlGaAs (алюминий, галлий, арсеник) полупроводниковых гетероструктур



Фиг. 3