



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

H01L 29/772 (2017.08)

(21)(22) Заявка: 2016150471, 21.12.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
21.12.2016

Дата регистрации:  
05.03.2018

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 21.12.2016

(45) Опубликовано: 05.03.2018 Бюл. № 7

Адрес для переписки:

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

(72) Автор(ы):

Тихомиров Владимир Геннадьевич (RU),  
Вьюгинов Владимир Николаевич (RU),  
Гудков Александр Григорьевич (RU),  
Городничев Артем Аркадьевич (RU),  
Зыбин Андрей Артурович (RU),  
Видякин Святослав Игоревич (RU),  
Парнес Яков Михайлович (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)

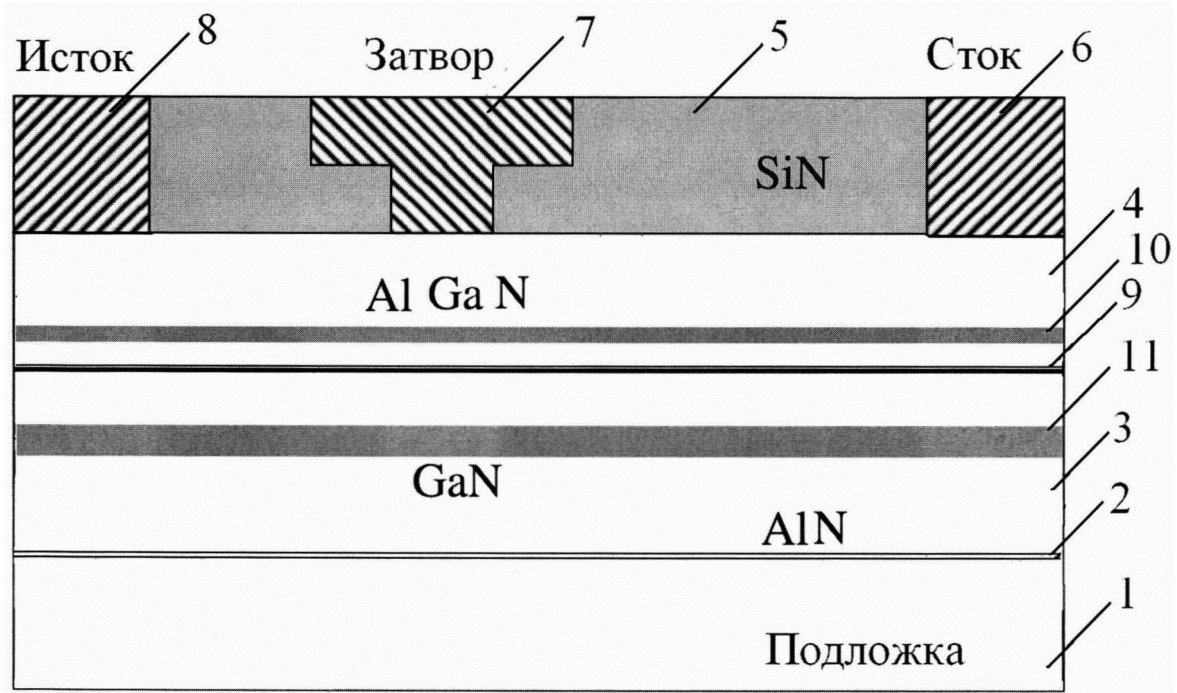
(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 154437 U1, 27.08.2015. RU  
2534002 C1, 27.11.2014. US 5192987 A,  
09.03.1993. US 2004/0155260 A1, 12.08.2004. US  
2001/0020700 A1, 13.09.2001. WO 03/049193  
A1, 12.06.2003. JP 2008118044 A, 22.05.2008.

(54) Гетероструктурный полевой транзистор на основе нитрида галлия с улучшенной стабильностью вольт-амперной характеристики к ионизирующим излучениям

(57) Реферат:

Изобретение относится к области радиотехники и электроники. В гетероструктурном полевом транзисторе на основе нитрида галлия с улучшенной стабильностью вольт-амперной характеристики, включающем подложку из карбида кремния, зародышевый слой, буферный слой, барьерный слой на основе AlGaIn, слой пассивации на основе нитрида кремния, электроды стока, затвора, истока, зародышевый слой выполнен на основе AlN, буферный слой выполнен на основе нитрида галлия, в барьерный слой на расстоянии 5-10 нм от канала транзистора вводится дополнительный

слой AlGaIn с дельта-легированием, толщиной 5 нм, со стороны буферного слоя, на расстоянии 10-15 нм от канала транзистора, вводится дополнительный слой GaN с легированием по всей глубине слоя. Изобретение позволяет упростить конструкцию транзистора, получить дополнительный источник электронов для двумерного газа в канале полевого транзистора на основе гетероструктур типа AlGaIn/GaN и расширить канал со стороны буферного слоя, что приводит к улучшению стабильности вольт-амперной характеристики транзистора в условиях воздействия ионизирующих излучений. 3 ил.



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC  
*H01L 29/772 (2017.08)*

(21)(22) Application: **2016150471, 21.12.2016**

(24) Effective date for property rights:  
**21.12.2016**

Registration date:  
**05.03.2018**

Priority:

(22) Date of filing: **21.12.2016**

(45) Date of publication: **05.03.2018** Bull. № 7

Mail address:

105005, Moskva, ul. 2-ya Baumanskaya, 5, str. 1,  
MGТУ im. N.E. Bauman, TSZIS, dlya Gudkova  
A.G. (kaf. RL-6)

(72) Inventor(s):

**Tikhomirov Vladimir Gennadevich (RU),  
Vyuginov Vladimir Nikolaevich (RU),  
Gudkov Aleksandr Grigorevich (RU),  
Gorodnichev Artem Arkadevich (RU),  
Zybin Andrej Arturovich (RU),  
Vidyakin Svyatoslav Igorevich (RU),  
Parnes Yakov Mikhajlovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

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

(54) **HETEROSTRUCTURAL FIELD-EFFECT TRANSISTOR BASED ON GALLIUM NITRIDE WITH IMPROVED STABILITY OF THE CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTIC TO IONIZING RADIATION**

(57) Abstract:

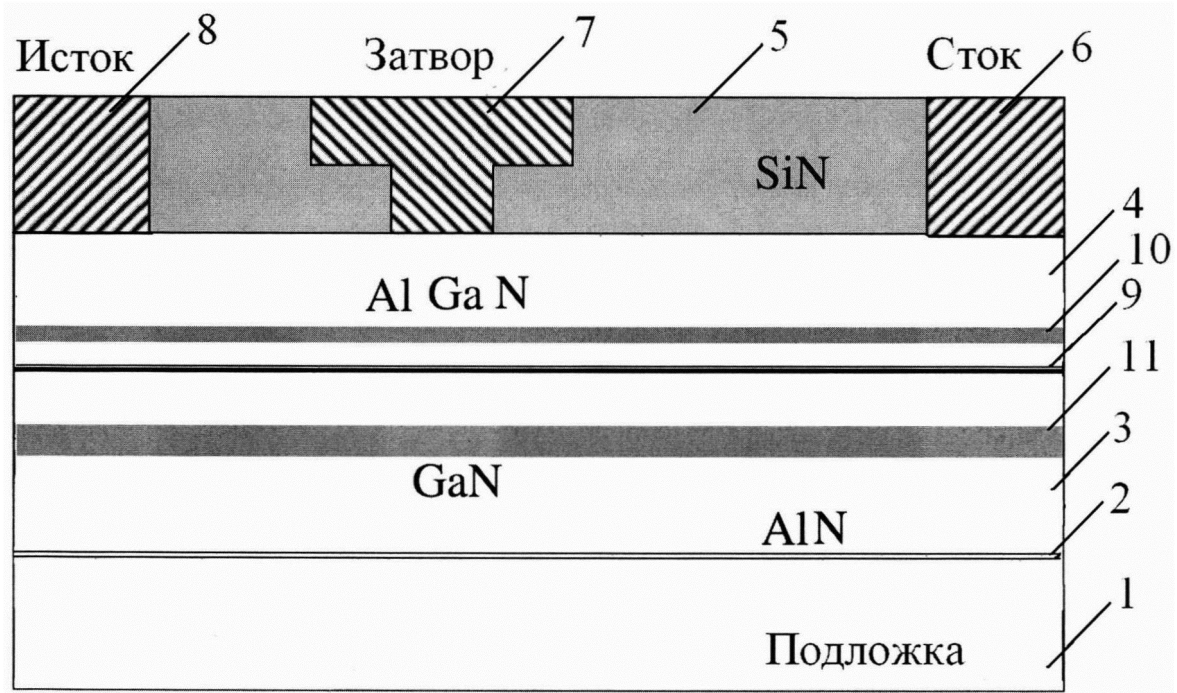
FIELD: radio engineering; electronics.

SUBSTANCE: invention relates to radio engineering and electronics. In a heterointerface gallium nitride-based FET with improved stability of the current-voltage characteristic, including a silicon carbide substrate, a nucleating layer, a buffer layer, an AlGaN-based barrier layer, a silicon-nitride-based passivation layer, drain electrodes, gate electrodes, source electrodes, the nucleating layer is made on the basis of AlN, the buffer layer is made on the basis of gallium nitride, an additional layer of AlGaN with delta-doping is added into the barrier layer at a distance of 5–10 nm from the channel of the transistor, 5 nm thick, from the

side of the buffer layer, at a distance of 10–15 nm from the transistor channel, an additional GaN layer is added with doping over the entire depth of the layer.

EFFECT: invention makes it possible to simplify the design of the transistor, to obtain an additional source of electrons for a two-dimensional gas in the channel of a field-effect transistor based on AlGaN/GaN heterostructures and to expand the channel from the buffer layer, which leads to an improvement in the stability of the current-voltage characteristics of the transistor under the conditions of effects of ionizing radiation.

1 cl, 3 dwg



Фиг. 1

RU 2646529 C1

RU 2646529 C1

Изобретение относится к области радиотехники и электроники, в частности к высокочастотным полевым транзисторам на основе широкозонных полупроводников группы  $A_3B_5$ . Изобретение может быть использовано в СВЧ-транзисторах для усилителей мощности в устройствах различного функционального назначения.

Известен транзистор с высокой подвижностью электронов на  $GaN/Al_xGa_{1-x}N$  гетеропереходах (см. US №5192987, кл. H01L 29/80, 09.03.1993). Указанный транзистор с высокой подвижностью электронов имеет преимущество возросшей мобильности за счет двумерных электронного газа, имеющих место в  $GaN/Al_xGa_{1-x}N$  гетеропереходах. Эти структуры осаждаются на базальной плоскости сапфира с использованием низкого давления металлоорганических химических осадений из паровой фазы. Транзистор включает подложку, буферный слой, осаждаемый на подложку, первый активный слой, состоящий по существу из  $GaN$ , нанесенный на буферный слой, второй активный слой, состоящий в основном из  $Al_xGa_{1-x}N$ , где  $x$  больше 0 и меньше 1 и множество электрических соединений, находящихся на втором активном слое, причем множество электрических соединений включает соединение истока, соединение затвора и соединение стока, позволяя тем самым разности электрических потенциалов быть примененной ко второй активной области с тем, чтобы обеспечить работу транзистора. Транзистор, сконструированный в соответствии с изобретением, имеет более низкий шумовой ток, температура эксплуатации увеличивается по сравнению с арсенид - галлиевым транзистором до  $800^\circ C$ .

Недостатком транзистора является недостаточная стабильность вольт-амперной характеристики.

Наиболее близким аналогом-прототипом является гетероструктурный полевой транзистор на основе нитрида галлия с улучшенной стабильностью вольт-амперной характеристики (см. RU 154437 U1, кл. H01L 29/772, 27.08.2015). Гетероструктурный полевой транзистор на основе нитрида галлия с улучшенной стабильностью вольт-амперной характеристики включает подложку из карбида кремния, зародышевый слой, буферный слой, барьерный слой на основе  $AlGaIn$ , слой пассивации на основе нитрида кремния, электроды стока, затвора, истока. Гетероструктурный полевой транзистор имеет уменьшенный гистерезис тока стока полевого транзистора на основе гетероструктур типа  $AlGaIn/GaN/AlGaIn$  с каналом в слое  $GaN$  и может быть использован в СВЧ-транзисторах для усилителей мощности в устройствах различного функционального назначения.

Недостатками прототипа являются сложность и недостаточная стабильность его вольт-амперной характеристики в условиях воздействия ионизирующих излучений.

Технический результат, на достижение которого направлено изобретение, заключается в устранении вышеуказанных недостатков (упрощение конструкции транзистора), в получении дополнительного источника электронов для двумерного газа в канале полевого транзистора на основе гетероструктур типа  $AlGaIn/GaN$  и расширении канала со стороны буферного слоя, что приводит к улучшению стабильности вольт-амперной характеристики транзистора в условиях воздействия ионизирующих излучений.

Технический результат достигается тем, что в гетероструктурном полевом транзисторе на основе нитрида галлия с улучшенной стабильностью вольт-амперной характеристики, включающем подложку из карбида кремния, зародышевый слой, буферный слой, барьерный слой на основе  $AlGaIn$ , слой пассивации на основе нитрида кремния, электроды стока, затвора, истока, зародышевый слой выполнен на основе  $AlN$ , буферный слой выполнен на основе нитрида галлия, в барьерный слой на

расстоянии 5-10 нм от канала транзистора вводится дополнительный слой AlGaIn с дельта-легированием, толщиной 5 нм, со стороны буферного слоя, на расстоянии 10-15 нм от канала транзистора, вводится дополнительный слой GaN с легированием по всей глубине слоя.

На фиг. 1 показана принципиальная схема гетероструктурного полевого транзистора на основе нитрида галлия с улучшенной стабильностью вольт-амперной характеристики к ионизирующим излучениям.

На фиг. 2 показаны результаты расчета зонной диаграммы гетероструктуры предложенного полевого транзистора.

На фиг. 3 показаны результаты моделирования воздействия заданного внешнего фактора на вольт-амперные характеристики транзистора.

Гетероструктурный полевой транзистор на основе нитрида галлия с улучшенной стабильностью вольт-амперной характеристики (см. фиг. 1) включает подложку из карбида кремния 1, зародышевый слой 2, буферный слой 3, барьерный слой на основе AlGaIn 4, слой пассивации на основе нитрида кремния 5, электроды стока 6, затвора 7, истока 8. Зародышевый слой выполнен на основе AlN, буферный слой выполнен на основе нитрида галлия, в барьерный слой на расстоянии 5-10 нм от канала транзистора 9 вводится дополнительный слой AlGaIn 10 с дельта-легированием кремнием

(концентрацией  $1 \cdot 10^{18} \text{ [см}^{-3}\text{)]}$ , толщиной 5 нм, со стороны буферного слоя, на расстоянии 10-15 нм от канала транзистора 9, вводится дополнительный слой GaN 11 с легированием кремнием (концентрацией  $5 \cdot 10^{18} \text{ [см}^{-3}\text{)]}$  по всей глубине слоя.

Предложенная конструкция была просчитана в программном пакете системы автоматизированного технологического проектирования полупроводниковых приборов (см. TCAD "Synopsys" Synopsys Inc., Sentaurus Device User Guide, Version E-2010.12, Fremont, California, 2010). В этом же пакете рассчитывалось воздействие заданного внешнего фактора (интенсивности облучения электронами) на проводимость двумерного газа и вольт-амперные характеристики предложенного полевого транзистора по сравнению с аналогом-прототипом - полевым транзистором на основе нитрида галлия с улучшенной стабильностью вольт-амперной характеристики (см. Тихомиров В.Г. и др. Оценка влияния режимов эксплуатации на BAX GaN HEMT, используемых в аппаратуре космического назначения с помощью численного моделирования. 25th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology. Sevastopol, 2015, pp. 113-115).

В работе (см. Polyakov A.Ya. and other. 6th All-Russian Conf. "Nitrides of gallium, indium and aluminum - structures and devices", Saint-Petersburg, 2008, pp. 146) показано, что заметное уменьшение проводимости канала происходит после воздействия заданного внешнего фактора (в данном случае облучения потоком электронов) и является следствием возрастания рассеяния электронов в буфере GaN. В результате воздействия наблюдается сдвиг вольт-фарадной характеристики в сторону отрицательных напряжений, что можно объяснить возрастанием плотности объемного заряда, связанного с локальными центрами в слое AlGaIn. Детальные исследования спектров глубоких центров для одной из транзисторных структур показывают, что в буферном слое происходит постепенное заглубление уровня Ферми. В результате анализа результатов расчетов для снижения влияния указанных негативных факторов и получения дополнительного источника электронов для двумерного газа в канале полевого транзистора на основе гетероструктур типа AlGaIn/GaN, а также расширения канала со стороны буферного слоя предложено ввести в конструкцию два дополнительных слоя с легированием, что приводит к улучшению стабильности вольт-амперной характеристики транзистора в

условиях воздействия ионизирующих излучений.

Результаты расчета зонной диаграммы гетероструктуры полевого транзистора показаны на фиг. 2. На фигуре показаны диаграммы без введения дополнительных слоев (а), с введением дополнительного слоя в барьерном слое (б), с введением дополнительного слоя в буферном слое (в) и с введением дополнительных слоев в барьерном и буферном слоях (г).

Из расчетов видно, что введение предложенных изменений в конструкцию транзистора действительно изгибает зону проводимости в барьерном слое, что служит дополнительным источником электронов для двумерного газа в канале полевого транзистора на основе гетероструктур типа AlGaIn/GaN и расширения канала со стороны буферного слоя. Совокупность этих изменений приводит к улучшению стабильности вольт-амперной характеристики транзистора в условиях воздействия ионизирующих излучений. Численные расчеты показывают, что влияние заданного внешнего фактора на вольт-амперной характеристики исследуемого прибора весьма значительно. С целью минимизации влияния внешних воздействий на работоспособность прибора необходимы изменения гетероструктуры и конструкции самого транзистора, а также проведение комплексной технологической оптимизации (см. Vyuginov V.N. et al. Account of inheritable characteristics in terms of complex technological optimization of MMIC. 2011 21th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Yechnology" (CriMiCo'2011). Sevastopol, 2011, pp. 709, а также Gudkov A.G. et al. Account Application of complex technological optimization for monolithic circuits designing. 2008 18th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Yechnology" (CriMiCo'2008). Sevastopol, 2008, pp. 535-536).

Результаты моделирования воздействия заданного внешнего фактора (облучение потоком электронов с энергией 10 МэВ) на вольт-амперные характеристики предлагаемого транзистора и его аналога-прототипа при нулевом потенциале на затворе приведены на фиг. 3. На фигуре показаны фрагменты экрана программы с результатами моделирования воздействия заданного внешнего фактора на вольт-амперные характеристики предлагаемого транзистора и его аналога-прототипа при нулевом потенциале на затворе.

Кривая 12 показывает вольт-амперную характеристику после воздействия заданного внешнего фактора предлагаемого гетероструктурного полевого транзистора на основе нитрида галлия с улучшенной стабильностью вольт-амперной характеристики. Кривая 13 показывает вольт-амперную характеристику после воздействия заданного внешнего фактора аналога-прототипа.

В результате анализа результатов расчетов видно, что предложенные изменения в конструкции гетероструктурного полевого транзистора на основе нитрида галлия действительно привели к улучшению стабильности вольт-амперной характеристики этого транзистора в условиях воздействия ионизирующих излучений и технический результат, на достижение которого направлено изобретение, достигнут.

Предлагаемый гетероструктурный полевой транзистор на основе нитрида галлия с улучшенной стабильностью вольт-амперной характеристики к ионизирующим излучениям позволяет упростить конструкцию транзистора по сравнению с прототипом, получить дополнительный источник электронов для двумерного газа в канале полевого транзистора на основе гетероструктур типа AlGaIn/GaN и расширить канал со стороны буферного слоя, что приводит к улучшению стабильности вольт-амперной характеристики транзистора в условиях воздействия ионизирующих излучений.

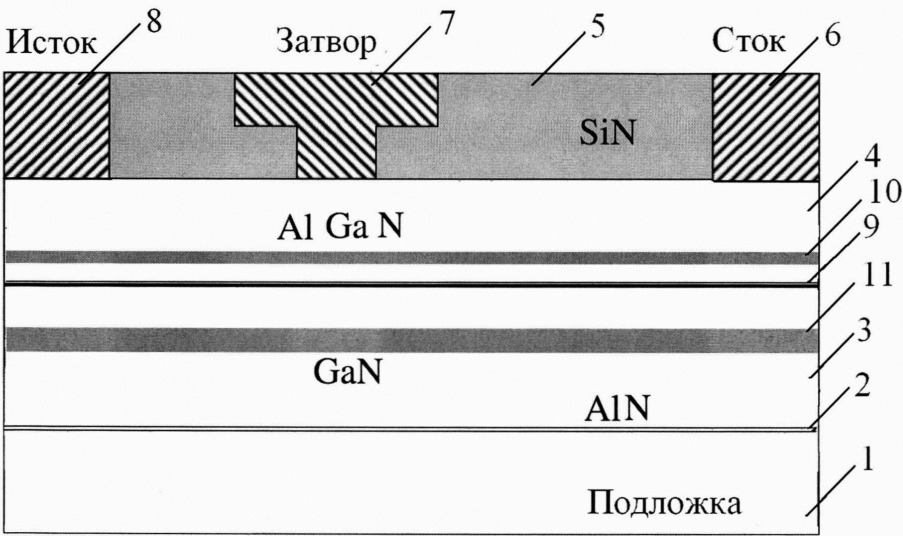
(57) Формула изобретения

Гетероструктурный полевой транзистор на основе нитрида галлия с улучшенной стабильностью вольт-амперной характеристики, включающий подложку из карбида кремния 1, зародышевый слой 2, буферный слой 3, барьерный слой на основе AlGa<sub>N</sub> 4, слой пассивации на основе нитрида кремния 5, электроды стока 6, затвора 7, истока 8, отличающийся тем, что зародышевый слой выполнен на основе AlN, буферный слой выполнен на основе нитрида галлия, в барьерный слой на расстоянии 5-10 нм от канала транзистора 9 вводится дополнительный слой AlGa<sub>N</sub> 10 с дельта-легированием, толщиной 5 нм, со стороны буферного слоя, на расстоянии 10-15 нм от канала транзистора 9, вводится дополнительный слой GaN 11 с легированием по всей глубине слоя.



1

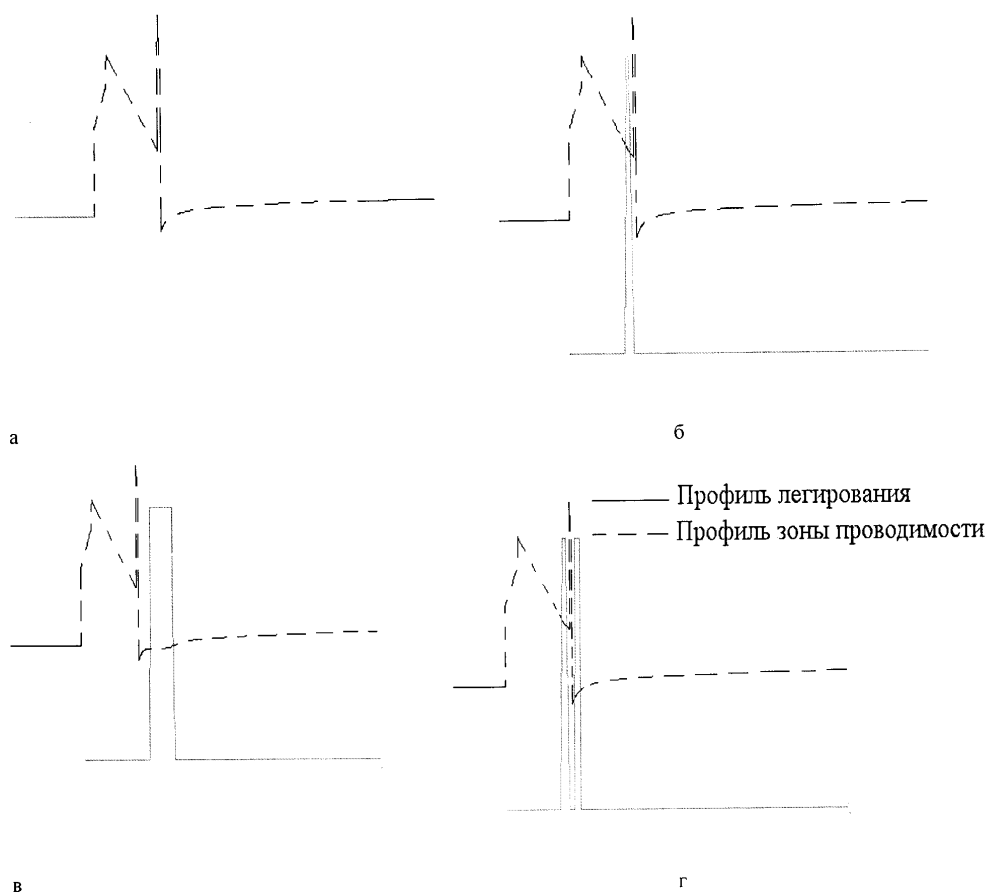
Гетероструктурный полевой транзистор на основе нитрида галлия с  
улучшенной стабильностью вольт-амперной характеристики к  
ионизирующим излучениям



Фиг. 1

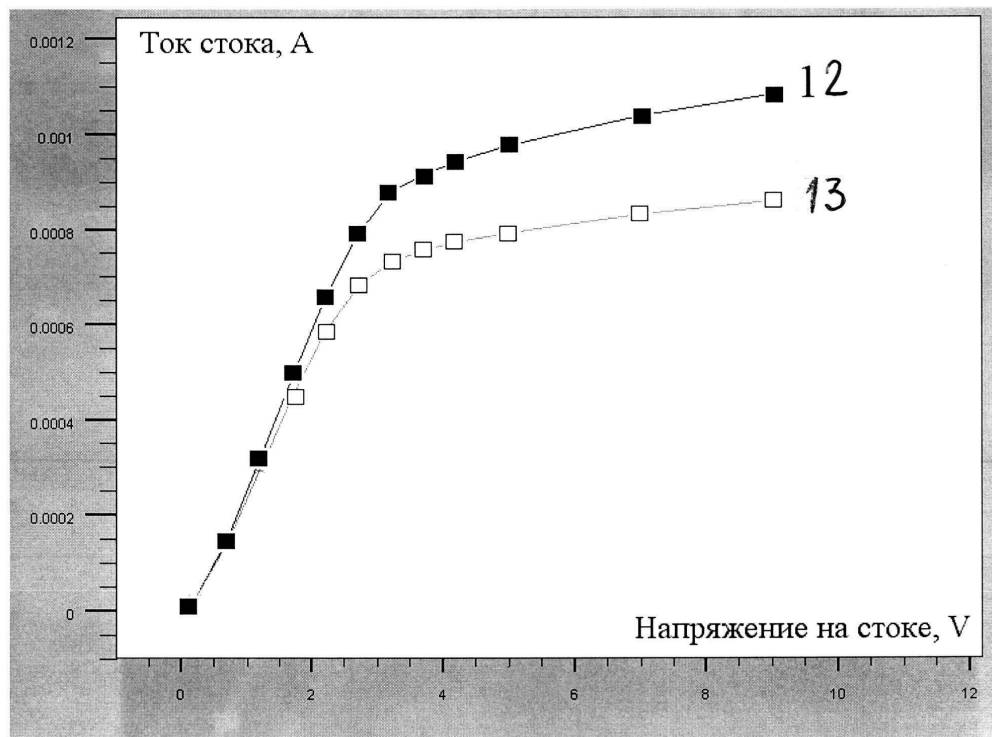
2

Гетероструктурный полевой транзистор на основе нитрида галлия с  
улучшенной стабильностью вольт-амперной характеристики к  
ионизирующим излучениям



Фиг. 2

Гетероструктурный полевой транзистор на основе нитрида галлия с  
улучшенной стабильностью вольт-амперной характеристики к  
ионизирующим излучениям



Фиг. 3