

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **041507**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2022.10.31**

(51) Int. Cl. **H01L 27/04** (2006.01)

(21) Номер заявки  
**202191775**

(22) Дата подачи заявки  
**2021.07.09**

---

(54) **ЭФФЕКТИВНАЯ НЕМТ-ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОНОЛИТНЫХ  
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ СВЧ НА  
ПОЛУИЗОЛИРУЮЩИХ ПЛАСТИНАХ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ**

---

(43) **2022.10.26**

(56) RU-C2-2523060

(96) **2021000075 (RU) 2021.07.09**

CN-A-107425063

US-A1-20200227547

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ,  
ОТ ИМЕНИ КОТОРОЙ  
ВЫСТУПАЕТ ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
КОРПОРАЦИЯ ПО  
КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ  
"РОСКОСМОС" (RU)**

SUBRAMANIAM ARULKUMARAN et al. Thermally Stable Device Isolation by Inert Gas Heavy Ion Implantation in AlGaIn/GaN HEMTs on Si, J. Vac. Sci. Technol., 2016, vol. 34, no. 4, Art. no. 042203.

(72) Изобретатель:  
**Титов Андрей Юрьевич, Бутенко  
Елена Васильевна (RU)**

(74) Представитель:  
**Горбановский Н.Г. (RU)**

---

(57) Изобретение относится к области создания твердотельной ЭКБ СВЧ мм-диапазона для ППМ бортовых АФАР с электронным управлением передачей сигналов. Сущность изобретения высокоэффективной НЕМТ - технологии изготовления ММИС на мм-диапазоне длин волн заключается в локальном ионном легировании используемых пластин арсенида галлия кремнием и аргоном для формирования электрофизической  $n^-n^+-n-i$ -структуры НЕМТ (базовых активных элементов функциональных узлов ММИС), что обеспечивает наряду с гибким управлением процессом формирования функциональных узлов ММИС высокое линейное разрешение и высокую однородность воспроизведения соразмерных параметров активного субмикронного (0,15 мкм)  $n$ -слоя и Т-затвора НЕМТ (формируемого на плоской поверхности пластины) как по площади одной пластины, так от пластины к пластине в партии пластин. Наряду с повышением надёжности ММИС на НЕМТ снижаются трудоёмкость производственного цикла и материальные затраты на изготовление ММИС.

---

**041507 B1**

**041507 B1**

Изобретение относится к области создания многофункциональных интегральных схем СВЧ на полупроводящих пластинах арсенида галлия.

Область применения: производство твердотельной ЭКБ СВЧ мм-диапазона для ППМ АФАР.

Повышение скорости и объёма обрабатываемой информации, повышение надёжности и снижение массы и размеров радиоэлектронной аппаратуры авиационного и космического базирования нового поколения стимулируют создание твердотельной малогабаритной ЭКБ СВЧ см- и мм-диапазона повышенного уровня интеграции, в частности монолитных многофункциональных интегральных схем (ММИС), составляющих конструктивное ядро (core-chip) твердотельных модулей СВЧ, управляющих амплитудой и направлением передачи СВЧ сигналов на АФАР. Функциональные узлы ММИС (переключатель, фазовращатель, усилитель мощности, аттенуатор др.) предпочтительно строятся на полевых транзисторах с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) с Т-образной конструкцией затвора, облегчающей получение его субмикронной длины, обеспечивающей нужное быстродействие.

К настоящему времени сложились два технологических направления изготовления ММИС на НЕМТ, отличающихся способом формирования электрофизической структуры активных областей:

1 - на сложных эпитаксиальных структурах арсенида галлия (с заданным концентрационным профилем распределения электронов) посредством прецизионного локального травления эпитаксиальных слоев;

2 - на пластинах монокристаллического нелегированного арсенида галлия, изначально обладающих высоким удельным сопротивлением (до  $10^8$  Ом·см), посредством их локального ионного легирования донорной примесью для формирования нужного концентрационного профиля электронов.

Технология изготовления ММИС на сложных псевдоморфных гетероструктурах (InGaAs/GaAs, AlGaAs/GaAs, InGaAs/AlGaAs/GaAs и др) - рНЕМТ-технология предназначена для изготовления сложнофункциональных (до 10 узлов и более) монолитных управляющих устройств см-диапазона (на рабочие частоты до 18 ГГц); по ней за рубежом серийно производятся кристаллы модели СНА3014 (выпускаются европейской фирмой United Monolithic Semiconductors), а в России - МР 001D (фирмы "Микран").

Недостатки, ограничивающие применение рНЕМТ-технологии для изготовления ММИС на мм-диапазон (помимо использования дорогостоящих материалов и электронно-лучевой литографии) таковы:

отсутствие гарантий по однородности состава и профилю легирования тонких эпитаксиальных слоев по площади пластины [патент РФ № 2390875 С1, опубликован 27.05.2010 по индексу МПК H01L 21/335];

использование плохо поддающегося контролю анизотропного химического травления, которое может приводить к размыванию боковых граней лунки, вытравливаемой в контактном слое эпитаксиальной структуры при формировании активных областей схемы и заглублённого Т-затвора транзистора, и как следствие к изменению заданных размеров канала и уходу от проектных норм расположения в нём затвора тем сильнее, чем толще контактный слой [патент РФ № 2421848 С1, опубликован 20.06.2011 по индексу МПК H01L 21/338, В82В 3/00].

Изготовление НЕМТ на мм-диапазон непосредственно на пластине полупроводящего арсенида галлия посредством легирования ионами донорной примеси снижает эти риски и обеспечивает более высокое линейное разрешение и воспроизведение Т-затвора с субмикронной длиной основания при снижении трудоёмкости и материальных затрат [патент РФ №2523060 С2, опубликован 20.07.2014 по индексу МПК H01L 29/00] - прототип.

На рабочей поверхности полупроводящей монокристаллической пластины арсенида галлия посредством низкодозового (до  $8,0 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>) и высокодозового (от  $5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> и выше) легирования ионами кремния формируется  $n^+$ - $n$ - $i$ -структура полевого транзистора с барьером Шоттки. Затем по тонкоплёночной технологии с применением фотолитографии изготавливаются исток и сток транзистора, а между ними - Т-затвор транзистора с субмикронной ( $\leq 0,3$  мкм) длиной основания. После этого посредством дополнительного высокодозового легирования кремнием расширяются контактные  $n^+$ -области истока и стока и сокращается рабочая длина канала. Для пассивации рабочей поверхности активной области используется имплантация ионов бора. В результате обеспечивается работоспособность транзистора в мм-диапазоне длин и увеличивается его выходная мощность.

Недостатки: высокие риски проявления эффектов "короткого канала", снижения пробивного напряжения, глубокого проникновения ионов бора в канал и др., что ухудшает надёжность транзисторов.

По разработанной НЕМТ-технологии ММИС на мм-диапазон изготавливаются на монокристаллической полупроводящей пластине арсенида галлия. Посредством прецизионной имплантации ионов кремния (донора) и ионов аргона формируются активные области функциональных узлов ММИС и  $n^-$ - $n^+$ - $n$ - $i$ -структура НЕМТ с толщиной  $n$ -канала не более 0,15 мкм.

По тонкоплёночной технологии формируются исток, сток и Т-затвор транзистора с субмикронной ( $\geq 0,15$  мкм) длиной основания; таким образом, обеспечивается фундаментальное требование по надёжности работы СВЧ транзисторов: отношение длины затвора к толщине канала должно превышать единицу. Для "всплавления" металлизации истока и стока применяется импульсно - лучевая термообработка пластины.

Технические результаты:

надёжная планарная изоляция секторов функциональных узлов ММИС и НЕМТ и за счёт высокого удельного сопротивления пластины арсенида галлия;

гибкое управление в едином технологическом цикле процессами формирования "пассивных" транзисторов для коммутационных узлов (переключателя и фазовращателя) и "активных" транзисторов (для аттенюатора, усилителя мощности):

высокое линейное разрешение (топологическая норма), обеспечивающая изготовление ММИС на мм-диапазон длин волн;

повышение процента выхода годных ММИС (с десятками и более НЕМТ) за счёт обеспечения высокой однородности субмикронного канала по толщине и уровню легирования и субмикронного затвора НЕМТ, формируемого на плоской поверхности пластины;

повышение надёжности НЕМТ за счёт соразмерности толщины канала и длины затвора, ограничения неконтролируемой диффузии и увеличения пробивного напряжения затвор-сток, исключения образования "высокоомных" торцевых контактов истока и стока к каналу транзистора;

снижение трудоёмкости производственного цикла и материальных затрат на изготовление ММИС.

Такая НЕМТ - технология применительно к изготовлению ММИС мм-диапазона на полупроводниковой пластине арсенида галлия, схема алгоритма реализации которой на начальном отличительном этапе формирования НЕМТ с Т-затвором, представленная на фиг. 1, не встречается в проанализированных патентных и научно-технических источниках.

На фиг. 1, 2, 3 показана схема формирования НЕМТ на полупроводниковой пластине арсенида галлия: фиг. 1 - внедрение  $^{28}\text{Si}^+$ ; фиг. 2 - внедрение  $^{40}\text{Ar}^+$ ; фиг. 3 - формирование электродов сток-исток-затвор.

Пример конкретного выполнения.

ММИС изготавливается на полупроводниковой пластине арсенида галлия марки АГЧП-9, и процесс её изготовления начинается с формирования "пассивных" и "активных" НЕМТ - базовых активных элементов функциональных узлов ММИС (переключателя, фазовращателя, усилителей мощности др.) в следующей последовательности.

1. В подготовленную (подвергнутую химико-динамической полировке) рабочую поверхность пластины (фиг. 1, 2, 3 - поз. 1) имплантируют ионы кремния ( $^{28}\text{Si}^+$ ) (фиг. 1 - поз. 2); вначале малой ( $7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ) дозой при энергии ускоряющего напряжения 110 кэВ, а затем большой дозой ( $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ) при энергии ускорения 50 кэВ - через окна маски, сформированной из плёнки нитрида кремния. Для активации внедрённых ионов кремния проводится кратковременная (длительностью 8,5 с) импульсно-лучевая термообработка пластины при температуре 980°C, вследствие чего в её рабочем слое формируются нижний слаболегированный ( $1 \dots 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) n-типа проводящий канал толщиной  $\sim 0,2$  мкм (фиг. 1, 2, 3 - поз. 3), а на нём - сильнолегированные (с концентрацией электронов  $\sim 8 \dots 9 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) толщиной  $\sim 0,12 \dots 0,15$  мкм контактные  $\text{n}^+$  - области истока и стока (фиг. 1 - поз. 4). После этого рабочая поверхность пластины облучается тяжёлыми ионами аргона ( $^{40}\text{Ar}^+$ ) (фиг. 2 - поз. 5) дозой  $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  при энергии ускорения 40 кэВ. В результате формируется  $\text{n}^- \text{-n}^+ \text{-n-i}$ -структура НЕМТ с поверхностным ( $\sim 0,05$  мкм) компенсирующим  $\text{n}^-$ -слоем (фиг. 2, 3 - поз. 6), ограничивающим токи утечки по затвору и обеспечивающим более надёжное управление проводимостью канала.

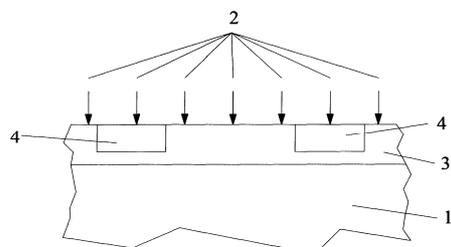
2. Изготовление электродов НЕМТ на сформированной  $\text{n}^- \text{-n}^+ \text{-n-i}$ -структуре осуществляется по тонкоплёночной технологии с применением усовершенствованной оптической литографии. Электроды истока (фиг. 3 - поз. 7) и стока (толщиной 0,2...0,25 мкм) (фиг. 3 - поз. 8) изготавливаются из двухслойной металлической плёнки  $\text{Ge}_{40}\text{Ni}_{60}\text{-Al}$ , а затвора (толщиной 0,3...0,4 мкм) (фиг. 3 - поз.9) - из плёнки  $\text{Ti - Al}$ . Низкоомные (с удельным сопротивлением 0,4...0,6 Ом-мм) контакты истока и стока формируются при импульсно-лучевой термообработке пластины длительностью 2,0...2,5 мин при температуре 450°C.

Затвор транзистора Т-образной формы с субмикронной длиной основания формируется методом обратной литографии. На пластину наносится слой диэлектрика  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной 0,2 мкм, на него наносится резистивная маска (ФП-051 Т) с размером окна  $\sim 0,5$  мкм. Затем через окно в маске проводится плазмохимическое травление слоя  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в атмосфере  $\text{SF}_6/\text{O}_2$  и импульсно - лучевая термообработка. В результате окно (щель) в этой двухслойной маске сокращается до 0,2 мкм. Размер полученной щели в диэлектрике определяет длину основания (ножки) Т-затвора. При формировании шляпки Т-затвора из металлизации  $\text{Ti-Al}$  используется двухслойная фоторезистивная маска (ФН-11С/ФН-051Т), определяющая размер и положение шляпки затвора.

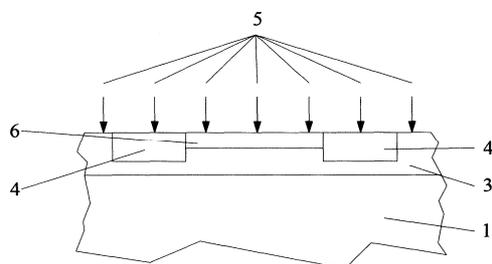
3. Пассивные топологические элементы функциональных узлов ММИС (обкладки конденсаторов, низкоомные резисторы, катушки индуктивности и т.д.) изготавливаются одновременно с истоком и стоком НЕМТ из металлизации того же состава, но на различных уровнях, разделённых изолирующим слоем из нитрида кремния; из двуокиси кремния изготавливается диэлектрик конденсаторов. Число уровней расположения пассивных элементов достигает девяти и на последнем девятом уровне располагаются плоские катушки индуктивности, что характерно для кристаллов ММИС СВЧ.

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

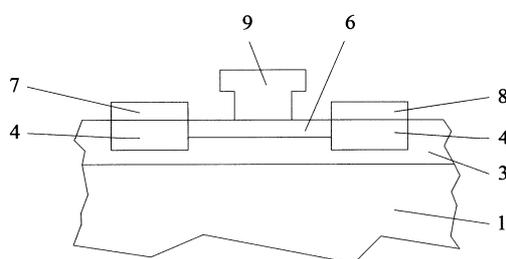
Способ изготовления сверхвысокочастотных монокристаллических многофункциональных интегральных схем (ММИС) на полупроводниковых пластинах арсенида галлия, заключающийся в ионном легировании и усовершенствованной оптической литографии, отличающийся тем, что на начальной стадии технологического процесса - изготовления электрофизической структуры базовых активных элементов функциональных узлов ММИС - транзисторов с высокой подвижностью электронов (НЕМТ), после имплантации ионов кремния в пластину дополнительно имплантируются ионы аргона и на полученной  $n^-n^+n^-i$ -структуре с субмикронной толщиной n-канала формируют T-затвор с длиной основания не более 0,15 мкм.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

