

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(21) **202191775** (13) **A1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ**

(43) Дата публикации заявки  
**2022.10.26**

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

(22) Дата подачи заявки  
**2021.07.09**

---

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

---

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

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

(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  $T$ -затвора НЕМТ (формируемого на плоской поверхности пластины) как по площади одной пластины, так и от пластины к пластине в партии пластин. Наряду с повышением надёжности ММИС на НЕМТ снижаются трудоёмкость производственного цикла и материальные затраты на изготовление ММИС.

---

**A1**

**202191775**

**202191775**

**A1**

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

Изобретение относится к области создания многофункциональных интегральных схем СВЧ на полуизолирующих 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 слоёв;

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 сложно-функциональных (до 10 узлов и более) монокристаллических 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:

- отсутствия гарантий по однородности состава и профилю легирования тонких эпитаксиальных слоёв по площади пластины [Патент РФ № 2390875 С1, опубликован 27.05.2010 по индексу МПК H01L21/335];

- использование плохо поддающегося контролю анизотропного химического травления, которое может приводить к размытию 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 H01L21/338, B82B3/00].

Изготовление НЕМТ на мм-диапазон непосредственно на пластине полуизолирующего 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 H01L29/00] - прототип.

На рабочей поверхности полуизолирующей 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 полуизолирующей 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 «вплавления» 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 полуизолирующей 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 полуизолирующей 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 полуизолирующей 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 ( $^{+}\text{Si}^{28}$ ) (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 °С, 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  $\text{n}^- - \text{n}^+ - \text{n} - \text{i}$  - структура НЕМТ с поверхностным ( $\sim 0,05$  мкм) компенсирующим 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  $\text{n}^- - \text{n}^+ - \text{n} - \text{i}$  - структуре осуществляется по тонкоплёночной технологии с применением усовершенствованной оптической литографии. Электроды истока (Фиг.3 - поз.7) и стока (толщиной  $0,2 \dots 0,25$  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 °С.

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 ~ 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.

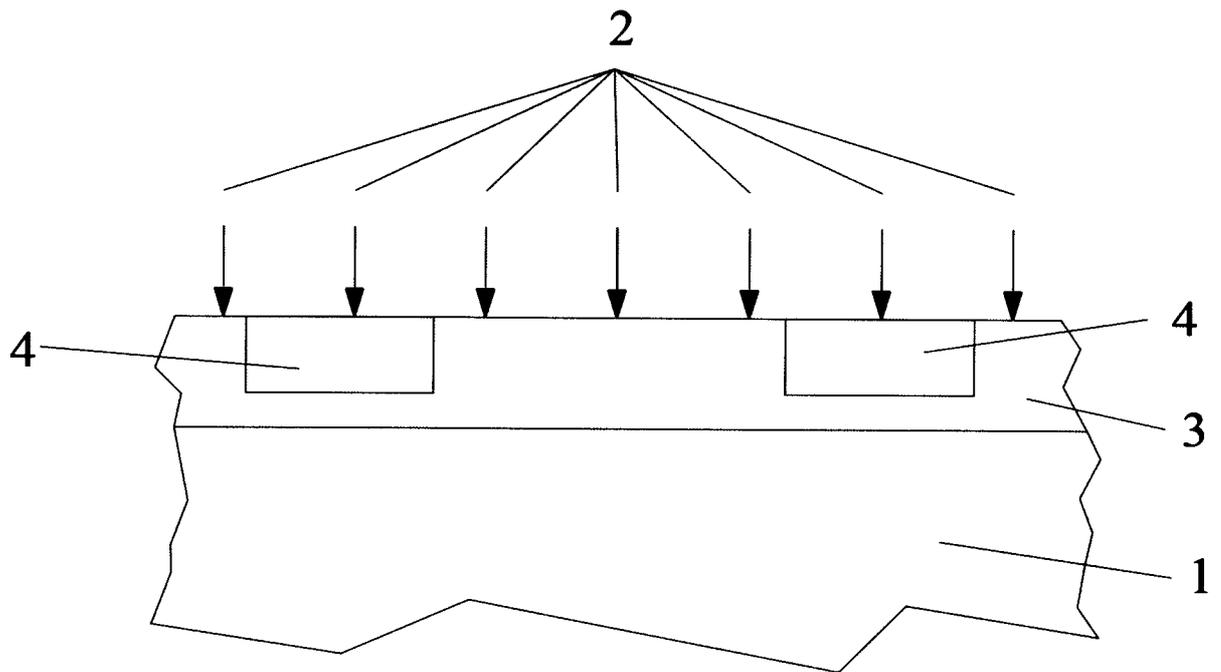
3. Пассивные топологические элементы функциональных узлов ММИС (обкладки конденсаторов, низкоомные резисторы, катушки индуктивности и т.д.) изготавливаются одновременно с истоком и стоком НЕМТ из металлизации того же состава, но на различных уровнях, разделённых изолирующим слоем из нитрида кремния; 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

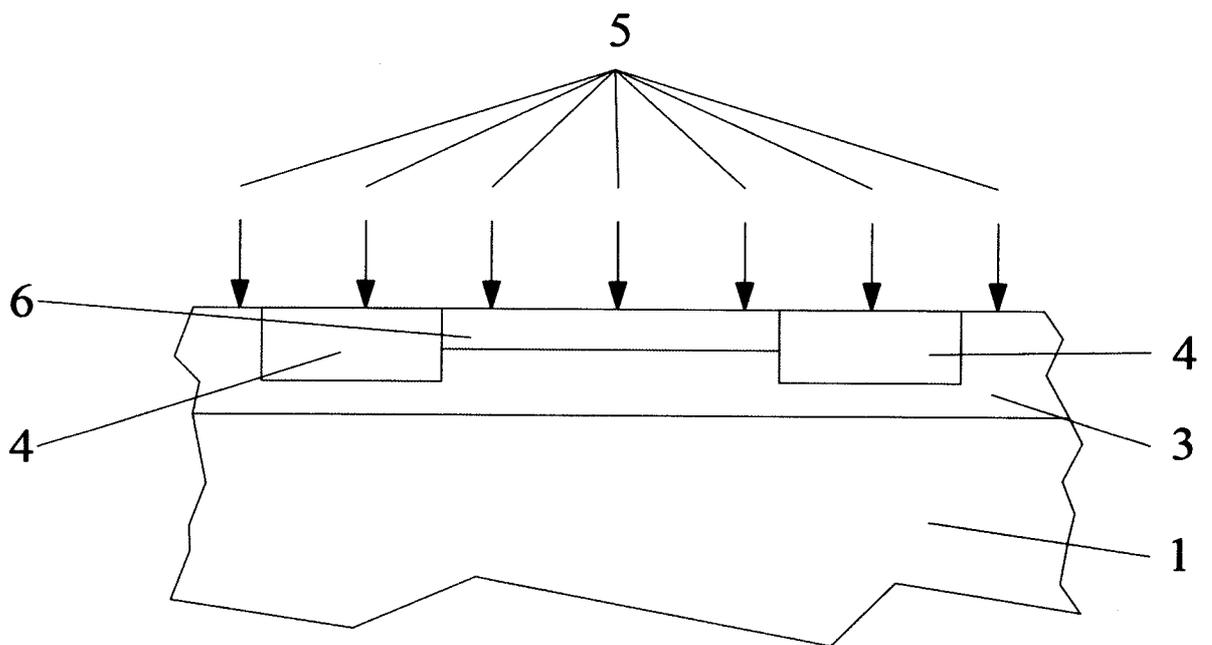
1. Способ изготовления сверхвысокочастотных монокристаллических многофункциональных интегральных схем (ММИС) на полуизолирующих пластинах арсенида, заключающийся в ионном легировании и усовершенствованной оптической литографии, отличающаяся тем, что на начальной стадии технологического процесса - изготовлении 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 формируется  $T$ -затвор с длиной основания не более 0,15 мкм

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

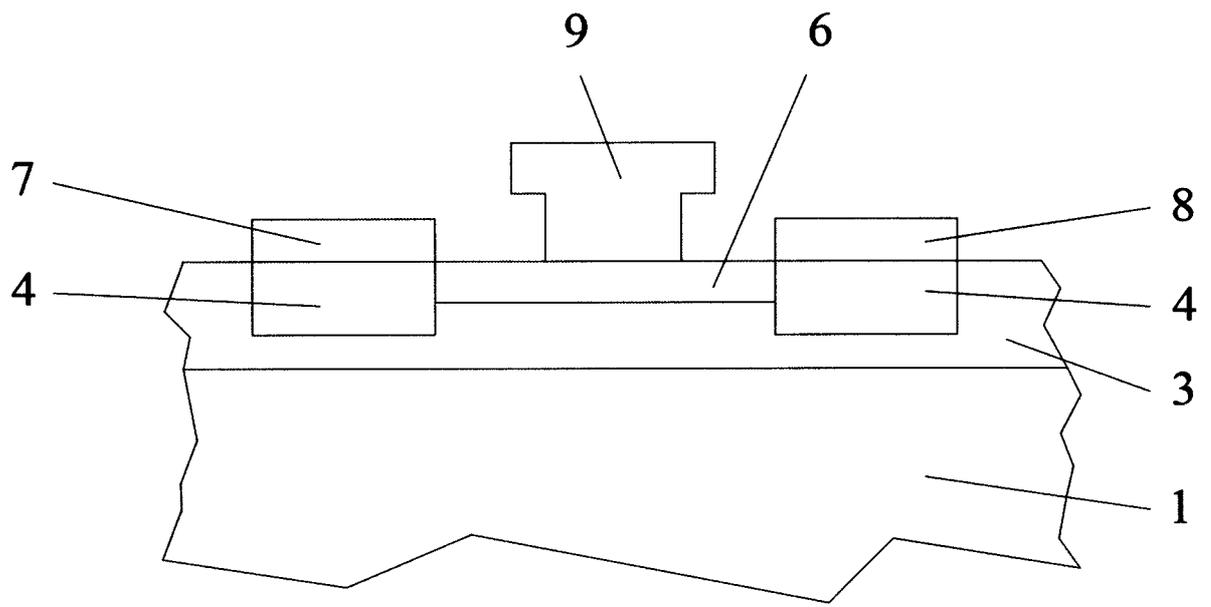
**Чертежи**



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

**ОТЧЕТ О ПАТЕНТНОМ ПОИСКЕ**  
(статья 15(3) ЕАПК и правило 42 Патентной инструкции к ЕАПК)

Номер евразийской заявки:

**202191775**

**А. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРЕДМЕТА ИЗОБРЕТЕНИЯ:**

**H01L 27/04** (2006.01)  
**H01L 29/778** (2006.01)

Согласно Международной патентной классификации (МПК)

**Б. ОБЛАСТЬ ПОИСКА:**

Просмотренная документация (система классификации и индексы МПК)  
H01L 21/223, 21/225, 23/38, 27/04, 29/00, 29/10, 29/20, 29/32, 29/36, 29/66, 29/778

Электронная база данных, использовавшаяся при поиске (название базы и, если, возможно, используемые поисковые термины)  
Espacenet, Google Patents

**В. ДОКУМЕНТЫ, СЧИТАЮЩИЕСЯ РЕЛЕВАНТНЫМИ**

Категория*	Ссылки на документы с указанием, где это возможно, релевантных частей	Относится к пункту №
A, D	RU 2523060 C2 (ЗАО «НИИМП-Т») 2014.07.20, весь документ	1
A	CN 107425063 A (UNIV SOUTHEAST) 2017.12.01, весь документ	1
A	US 2020/0227547 A1 (NXP USA INC) 2020.07.16, весь документ	1
A	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.	1

последующие документы указаны в продолжении

\* Особые категории ссылочных документов:  
«А» - документ, определяющий общий уровень техники  
«D» - документ, приведенный в евразийской заявке  
«E» - более ранний документ, но опубликованный на дату подачи евразийской заявки или после нее  
«O» - документ, относящийся к устному раскрытию, экспонированию и т.д.  
"P" - документ, опубликованный до даты подачи евразийской заявки, но после даты испрашиваемого приоритета"

«Т» - более поздний документ, опубликованный после даты приоритета и приведенный для понимания изобретения  
«Х» - документ, имеющий наиболее близкое отношение к предмету поиска, порочащий новизну или изобретательский уровень, взятый в отдельности  
«У» - документ, имеющий наиболее близкое отношение к предмету поиска, порочащий изобретательский уровень в сочетании с другими документами той же категории  
«&» - документ, являющийся патентом-аналогом  
«L» - документ, приведенный в других целях

Дата проведения патентного поиска: **03/02/2022**

Уполномоченное лицо:  
Заместитель начальника отдела механики,  
физики и электротехники

  
Д.Ф. Крылов