

# Разработка микроэлектронной компонентной базы приборных структур GaAs *pin*-диодов

П.С. Кратович, И.И. Шрамов, А.А. Павлючик

ОАО «Минский НИИ радиоматериалов»

**Аннотация:** в данной работе представлена разработка технологии изготовления *pin*-диодов на основе GaAs. Были изготовлены тестовые структуры активных элементов и измерены их электрические параметры. Для проверки работы *pin*-диодов в СВЧ диапазоне была разработана схема защитного устройства с полосой пропускания от 0,5 до 12 ГГц.

**Ключевые слова:** *pin*-диод, технология изготовления, арсенид галлия.

## 1. Введение

Предприятие ОАО «МИНСКИЙ НИИ РАДИОМАТЕРИАЛОВ» (ОАО «МНИИРМ») специализируется на разработке и мелкосерийном производстве СВЧ электронной компонентной базы на основе материалов  $A_3B_5$  в части твердотельных СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) – маломощных усилителей и усилителей мощности, защитных устройств, переключателей, аттенуаторов, преобразователей частоты и СВЧ-модулей.

В мире существует широкий набор различных решений СВЧ МИС для работы в разных полосах пропускания. [1, 2] В последнее время, в целях импортозамещения, возникает острая необходимость в расширении номенклатуры отечественных СВЧ устройств.

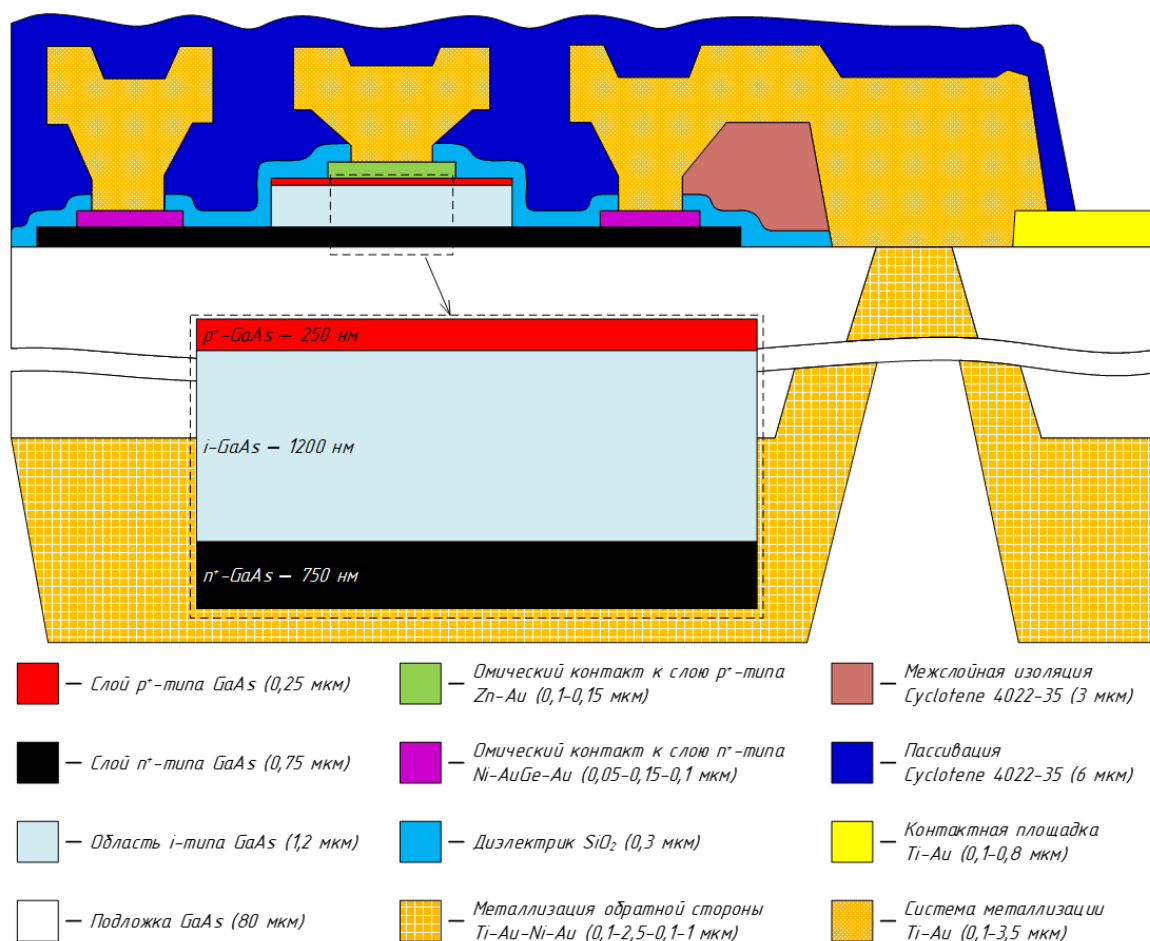
Освоение технологии изготовления GaAs *pin*-диодов позволит наладить производство критической импортозамещающей продукции: переключателей различного СВЧ-диапазона и защитных устройств (ЗУ). Данное решение обеспечит повышение технологического суверенитета в области микроэлектроники и машиностроения и независимое развитие гражданского и оборонного сектора экономики.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка технологии изготовления интегрального *pin*-диода на основе GaAs. С целью подтверждения работоспособности разработанной технологии проведена разработка и изготовление опытных образцов МИС ЗУ на базе ОАО «МНИИРМ».

## 2. Разработка технологии изготовления интегрального GaAs *pin*-диода

Конфигурация эпитаксиальных слоев GaAs *pin*-диода была выбрана на основе структуры разработанной *TriQuint Semiconductor* [3].

Изготовление интегрального GaAs *pin*-диода требует проведения 12 фотолитографий для формирования: меток совмещения, меза-структуры области анода, омического контакта к области катода, омического контакта к области анода, меза-структуры диода, окон в диэлектрике, областей контактных площадок, металлизации первого уровня, воздушных мостов, металлизации второго уровня, пассивирующего слоя, и, сквозных отверстий. Поперечное сечение структуры диода представлено на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Поперечное сечение структуры интегрального GaAs pin-диода.

При формировании меза-структуры применялось химическое травление с использованием перекисно-фосфорного раствора  $\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}$ , скорость травления GaAs в таком растворе составляет 330 нм/мин.

Напыление омического контакта к областям n- и p-типа проводилось на установке термовакуумного напыления УВН-71П-3, путем формирования систем Ni/AuGe/Au и Zn/Au соответственно. Вжигание омических контактов проводилось на установке STE RTA 100 SemiTEq.

Формирование диэлектрика проводилось с помощью плазмохимического осаждения  $\text{SiO}_2$  толщиной 250 нм на установке STE ICPd81L SemiTEq. Травление окон в диэлектрике выполнялось с применением плазмохимического травления на установке 08ПХО-100Т-001.

Для обеспечения лучшей адгезии металла контактных площадок к подложке — было проведено химическое травление соответствующих областей с использованием перекисно-фосфорного раствора.

Первый уровень металлизации включает в себя формирование областей контактных площадок и возможных соединений между элементами лежащих в одной плоскости. Воздушные мосты формировались с применением Cyclotene 4022-35 толщиной 3 мкм. Второй уровень металлизации изготавливался с применением электрохимического осаждения Au толщиной 3,5 мкм, через маску, сформированную с применением фоторезиста Az15nxT. В качестве пассивирующего материала использовался Cyclotene 4022-35 толщиной 7 мкм.

Сквозные отверстия Ø 60 мкм размещены в специально отведенных областях, где проводилось электрохимическое осаждение Au, а процесс формирования выполнялся

с применением плазмохимического травления на установке *STE ICPe68L SemiTEq*, в качестве газов использовались  $\text{BCl}_3$  и  $\text{Cl}_2$ . Металлизация обратной стороны выполнялась в два этапа: вакуумное напыление системы Ti/Au на установке *STE EB SemiTEq*, и, электрохимического осаждения системы Au/Ni/Au.

Площадь анода диода составила  $600 \text{ мкм}^2$ , а катода –  $636 \text{ мкм}^2$ . Выходная ВАХ прямого включения интегрального GaAs *pin*-диода приведена на рисунке 2. По результатам измерений пороговое напряжение диода составляет  $0,81 \text{ В}$ , дифференциальное сопротивление –  $138 \text{ Ом}$ , емкость перехода –  $0,05 \text{ пФ}$ .

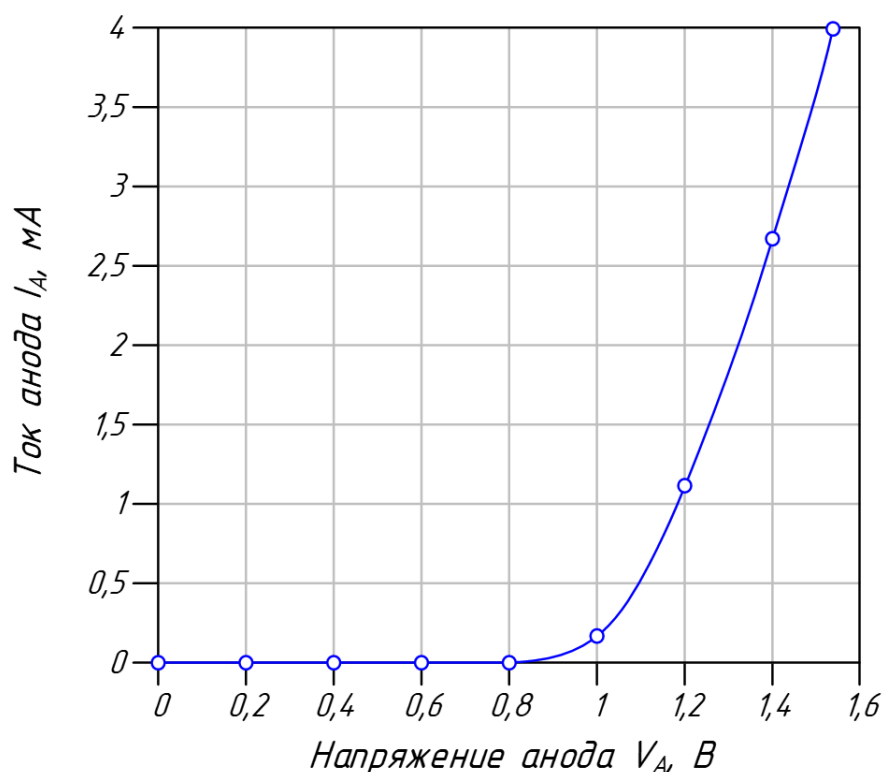


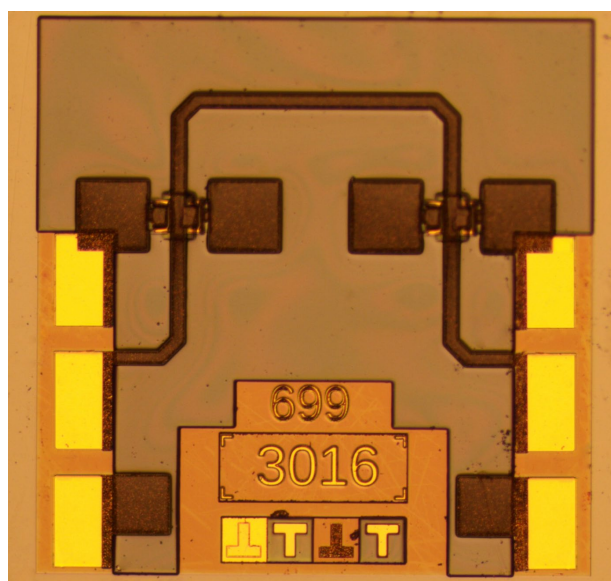
Рисунок 2. Выходные параметры интегрального GaAs *pin*-диода.

### 3. Результаты изготовления МИС защитного устройства

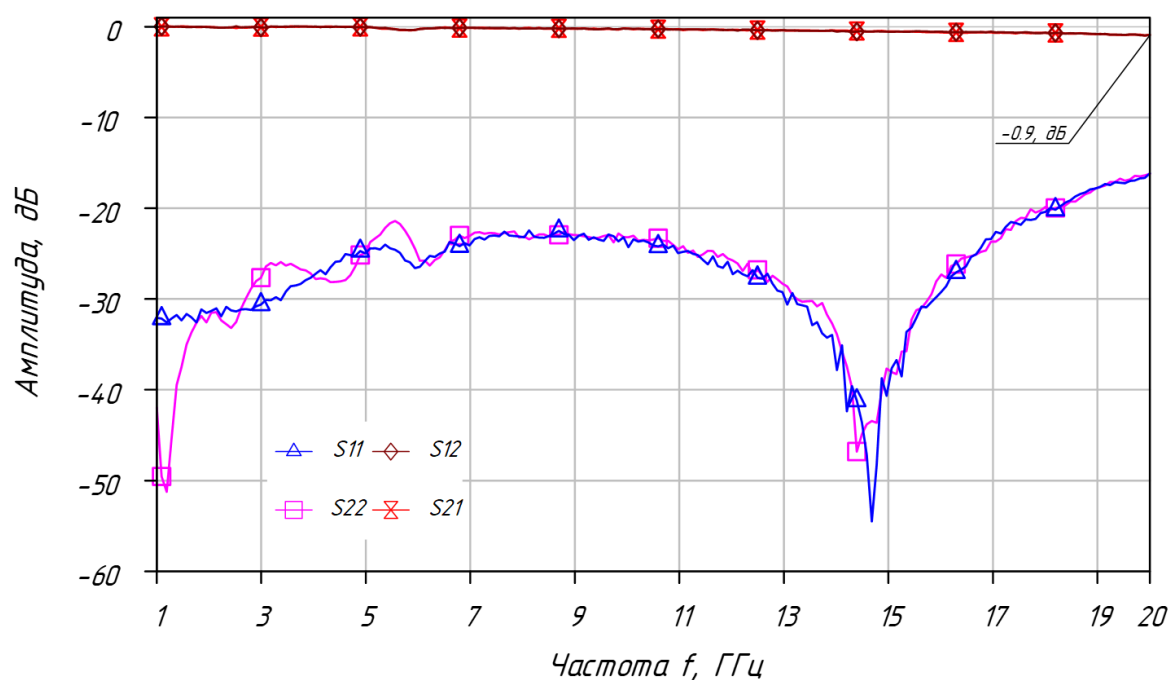
Разработка МИС ЗУ выполнялась в программном комплексе *Cadence AWR Design Environment* [4]. Схема представляет собой две пары встречноключенных *pin*-диодов, связанных между собой через общую точку в виде металлизированных сквозных отверстий. На рисунке 4 приведен микрофотоснимок изготовленного кристалла ЗУ.

Были проведены измерения СВЧ-характеристик с использованием векторного анализатора *Rohde & Schwarz ZVA 40*, результаты измерений *S*-параметров приведены на рисунке 5. Также была построена зависимость выходной мощности от входной (рисунок 6).

Ближайшим аналогом по параметрам разработанного устройства является ЗУ *TGL2201* фирмы *Qorvo Inc* [5]. Электрическая схема *TGL2201* включает в себя две пары встречноключенных *pin*-диодов, а также два конденсатора на входе и выходе соответственно. Следует отметить, что на основании паспортных данных *TGL2201* в диапазоне частот от 2 до 12 ГГц вносимые потери составляют  $0,3 \text{ дБ}$ , а в диапазоне от 12 до 25 ГГц увеличиваются до значения  $1 \text{ дБ}$ . Было проведено сравнение ключевых параметров разработанного ЗУ на базе ОАО «МНИИРМ» с аналогом (таблица 1).



**Рисунок 4.** Микрофотоснимок изготовленного кристалла МИС защитного устройства (увеличение  $\times 20$ ).



**Рисунок 5.** Результаты измерений  $S$ -параметров.

#### 4. Заключение

Выполнена разработка технологии изготовления интегрального GaAs *pin*-диода и определены его электрические параметры. На основе полученных результатов была проведена разработка и изготовление МИС защитного устройства с площадью контакта анода и катода  $600 \text{ мкм}^2$  и  $636 \text{ мкм}^2$  соответственно. Проведенные измерения СВЧ-параметров показывают, что диапазон рабочих частот, изготовленных опытных образцов составляет от 0,5 до 12 ГГц. Потери пропускания в данном диапазоне минимальны и составляют 0,25 дБ. Однако максимальные потери на частоте 20 ГГц составили 0,9 дБ, что является допустимым уровнем и показывает стабильность устройства в более широкой полосе пропускания.

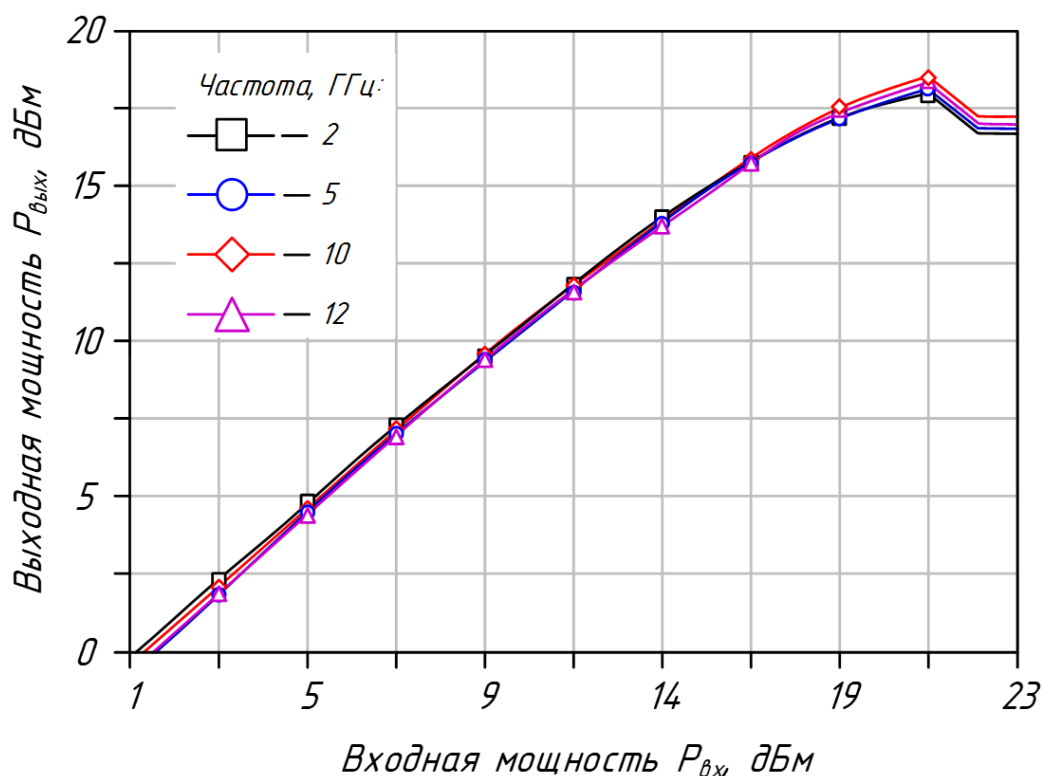


Рисунок 6. Зависимость выходной мощности от входной, при разной частоте.

Таблица 1. Результаты сравнения электрических параметров защитного устройства

| Параметр                                        | Значение     |            |
|-------------------------------------------------|--------------|------------|
|                                                 | ОАО «МНИИРМ» | Qorvo Inc. |
| Диапазон рабочих частот, ГГц                    | 0,5-12       | 2-25       |
| Потери пропускания, дБ                          | <0,25        | <1         |
| Макс. непрерывная входная мощность, дБм         | 37           | 37         |
| Макс. непрерывная просачивающаяся мощность, дБм | 18           | 18         |
| КСВН входа/выхода                               | <1,7         | <1,7       |

Исследование выполнено за счет гранта Белорусского Инновационной Фонда (договор № 1-КО от 25.02.2025).

#### Список литературы

1. Семенова, А. А. Защитное устройство на GaAs для работы в X-диапазоне частот / А. А. Семенова, М. Н. Петров // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. – 2019. – № 4. – С. 49-52.
2. Садеков Д. Обзор ВЧ/СВЧ-компонентов Analog Devices: основные категории устройств и области применения / Д. Садеков / Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2020. – №. 10. – С. 84-89.
3. TriQuint Semiconductor [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.digchip.com/datasheets/download\\_datasheet.php?id=1039812&part-number=vpin](https://www.digchip.com/datasheets/download_datasheet.php?id=1039812&part-number=vpin)
4. Cadence AWR Design Environment [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.cadence.com/en\\_US/home/tools/system-analysis/rf-microwave-design/awr-design-environment-platform.html](https://www.cadence.com/en_US/home/tools/system-analysis/rf-microwave-design/awr-design-environment-platform.html)
5. Qorvo Inc. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.qorvo.com/products/d/da004951>