

УДК 621.375.4

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВОГО СВЧ  
ТРАНЗИСТОРА ПРИ КРИОГЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ\*****Д.И. Вольхин, М.Д. Черницкая***Новосибирский государственный технический университет*

В статье представлены результаты экспериментального исследования характеристик полевого СВЧ транзистора 3П398А-5 при криогенной температуре 4 К для оптимизации его использования в криогенных малошумящих усилителях, применяемых в квантовых вычислениях и радиоастрономии. Проведены измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) и  $S$ -параметров транзистора с использованием специализированного измерительного стенда, включающего рефрижератор растворения Entropy He7, источник-измеритель Keithley 2636В и векторный анализатор цепей Rohde&Schwarz ZVL13. При температуре 4 К транзистор продемонстрировал значительное улучшение параметров по сравнению с комнатной температурой: напряжение отсечки снизилось с  $-2,5$  В до  $-0,9$  В, начальный ток стока увеличился с 36 до 55 мА, сопротивление канала уменьшилось с 83 до 20 Ом, а ток утечки сократился с 10 до 1 мкА. Анализ  $S$ -параметров выявил оптимальный режим работы ( $V_{gs} = -0,45$  В,  $V_{ds} = 0,5$  В,  $I_d = 9$  мА), обеспечивающий максимальный коэффициент усиления ( $S_{21}$ ) в диапазоне 1...12 ГГц при минимальной потребляемой мощности (около 4 мВт). Полученные данные позволяют уточнить модели транзисторов для проектирования высокочувствительных криогенных усилителей с низким уровнем шумов и высокой энергоэффективностью.

*Ключевые слова:* НЕМТ, GaAs транзистор, криогенная температура, вольт-амперные характеристики, малошумящий усилитель,  $S$ -параметры.

DOI: 10.17212/1727-2769-2025-3-5-17

**Введение**

Криогенные СВЧ усилители на основе транзисторов с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) являются ключевыми компонентами современных квантовых вычислительных систем [1, 2] и радиоастрономических приемников [3–5]. В квантовых вычислениях они используются для считывания состояний сверхпроводящих кубитов, где требуемая чувствительность достигает уровня отдельных фотонов. В радиоастрономии такие усилители применяются для детектирования слабых космических сигналов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, а также в качестве усилителей промежуточной частоты в дециметровом и сантиметровом диапазоне длин волн.

---

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № РНФ 24-79-00071.

© 2025 Д.И. Вольхин, М.Д. Черницкая

Работа таких усилителей при криогенных температурах позволяет существенно снизить тепловые шумы, что критически важно для повышения чувствительности. Однако поведение НЕМТ-транзисторов при сверхнизких температурах заметно отличается от характеристик при комнатных условиях. Эти отличия проявляются как в изменении вольт-амперных характеристик, так и в параметрах усиления, что требует специализированных исследований. Ранее проведенные исследования показали значительное снижение шумовой температуры НЕМТ-усилителей при переходе от комнатных температур к 4...20 К [6, 7].

Современные требования к криогенным усилителям предполагают сверхнизкий уровень шумов ( $T_n < 10$  К), высокий коэффициент усиления ( $>30$  дБ) и широкую полосу пропускания (не менее 50 % от рабочей частоты). Достижение таких параметров невозможно без глубокого понимания физики работы активных компонентов в условиях криогенного охлаждения и точного подбора режимов их эксплуатации.

Дополнительные сложности при проектировании широкополосных криогенных усилителей обусловлены паразитными элементами корпусных транзисторов. Использование бескорпусных решений и прямой монтаж кристаллов позволяют уменьшить паразитные емкости и индуктивности, улучшая согласование и теплоотвод – это особенно важно при температурах порядка 4 К.

В данной работе исследуется поведение бескорпусного рНЕМТ транзистора 3П398А-5 [8] при криогенной температуре. Целью исследования является изучение его работы при 4 К, экспериментальное определение вольт-амперных характеристик и S-параметров, а также выявление оптимальных режимов функционирования для применения в криогенных СВЧ-усилителях.

### 1. Схема измерительного стенда и конструкция держателя образца

Измерение вольт-амперных характеристик полевого транзистора при 4 К требует специального измерительного комплекса. Структурная схема экспериментального стенда для измерения вольт-амперных характеристик транзистора приведена на рис. 1. В основе стенда находится рефрижератор растворения Entropy He7, с установленным внутри держателем образца.

В качестве основного измерительного прибора в схеме используется двухканальный источник-измеритель Keithley 2636B. Канал «А» выполняет функцию источника напряжения смещения затвора, в то время как канал «В» обеспечивает подачу напряжения смещения на сток транзистора.

Подача напряжения смещения на транзистор осуществляется через инжекторы питания (Bias-tee) модели ZX85-12G-S+, подключенные выходом RF&DC к 300 К фланцу рефрижератора. На вход DC инжекторов подается напряжение от источника-измерителя Keithley 2636B. Выход RF инжекторов соединен с СВЧ аттенюаторами с затуханием 30 дБ. Установка аттенюаторов обеспечивает подавление возможных отраженных сигналов от открытого выхода инжектора питания, что повышает стабильность работы транзистора и точность измерений.

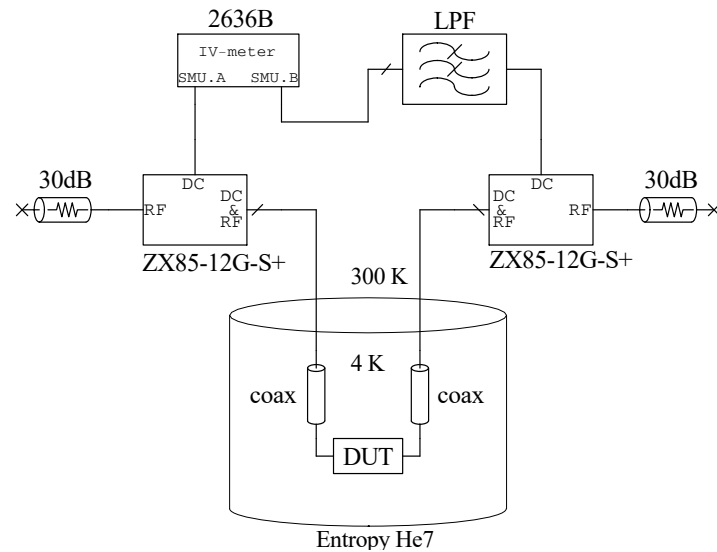


Рис. 1 – Структурная схема измерения вольт-амперных характеристик транзистора 3П398А-5

Fig. 1 – Block diagram of I -V measurements for the 3P398A-5 transistor

Подача напряжения смещения на сток транзистора осуществляется через  $LC$ -фильтр нижних частот с частотой среза 0,5 Гц. Такой фильтр обеспечивает эффективное подавление высокочастотных помех, что исключает возможность паразитного возбуждения транзистора и гарантирует высокую стабильность измерений вольт-амперных характеристик. Однако реализация столь низкой частоты среза требует использования катушки с существенной величиной индуктивности, что неизбежно приводит к появлению значительного омического сопротивления (61,1 Ом в данном случае). Наличие активного сопротивления в цепи стока вносит систематическую погрешность в измерения, которая должна быть учтена при обработке экспериментальных данных. Влияние данного сопротивления проявляется в виде дополнительного падения напряжения, пропорционального току стока, что приводит к несоответствию между измеряемым и фактическим напряжением на электродах транзистора. Для коррекции результатов измерений необходимо учесть величину омического сопротивления катушки индуктивности.

Структурная схема экспериментального стенда для измерения  $S$ -параметров транзистора показана на рис. 2. В качестве основного измерительного прибора в схеме используется векторный анализатор цепей Rohde&Schwarz ZVL13. Напряжения смещения на транзисторе задаются с помощью двухканального источника-измерителя Keithley 2636B. Канал «А» выполняет функцию источника напряжения смещения затвора, в то время как канал «В» обеспечивает подачу напряжения смещения на сток транзистора.

Для более точных измерений в данной схеме произведена калибровка векторного анализатора цепей на плоскость 300 К фланца рефрижератора

методом TOSM с помощью набора калибров ZV-Z270. Калибровка исключает влияние коаксиальных кабелей от векторного анализатора до инжекторов питания и самих инжекторов на результаты измерений. Однако в данной схеме СВЧ-тракт рефрижератора и держатель образца с подводными линиями будут влиять на результаты измерений из-за вносимых потерь и дополнительных отражений на разъёмных соединениях и неоднородностях СВЧ-тракта.

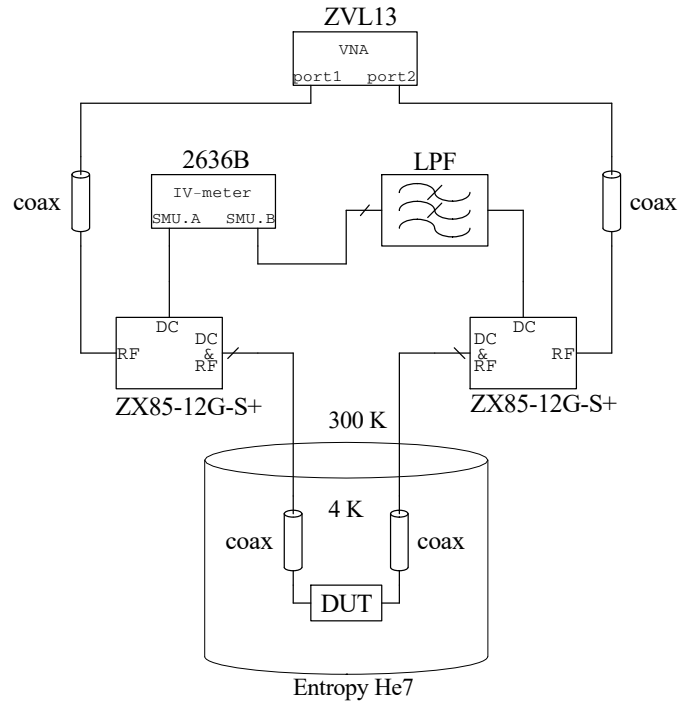


Рис. 2 – Структурная схема измерения S-параметров транзистора 3П398А-5

Fig. 2 – Block diagram of S-parameter measurements for the 3P398A-5 transistor

Измерения S-параметров транзистора выполнялись в частотном диапазоне 1...12 ГГц, что соответствует типичному рабочему диапазону криогенных СВЧ усилителей. Режим работы транзистора устанавливался вручную с учетом обеспечения стабильности потребляемого тока и коэффициента усиления в заданном частотном диапазоне.

Кристалл исследуемого транзистора размещен в латунном корпусе, оснащённом сверхвысокочастотными разъёмами типа SMA. Корпус обеспечивает экранировку от внешних электромагнитных помех и механическую стабильность образца в процессе измерений. В качестве диэлектрической подложки использован поликор ( $Al_2O_3$ ), на поверхности которого сформирована топология копланарной линии передачи, обеспечивающая согласование волнового сопротивления и минимизацию потерь на СВЧ-частотах.

Контактные площадки затвора и стока транзистора соединены с подводящими линиями методом термокомпрессионной разварки золотой проволокой диаметром 25 мкм, что гарантирует низкое переходное сопротивление и минимальное паразитное влияние на высокочастотные характеристики. Исток транзистора разварен с заземляющим полигоном, электрически соединенным с латунным корпусом, что обеспечивает эффективное заземление и снижение индуктивной составляющей цепи.

Подводящие линии передачи припаяны к центральным проводникам СВЧ-разъемов SMA с использованием низкотемпературного припоя на основе сплава Pb-Sn, что минимизирует тепловое воздействие на кристалл в процессе монтажа. Конструкция держателя обеспечивает надежный тепловой контакт с криостатом, необходимый для проведения измерений в условиях криогенных температур.

Изображение держателя образца с разваренным транзистором представлено на рис. 3.

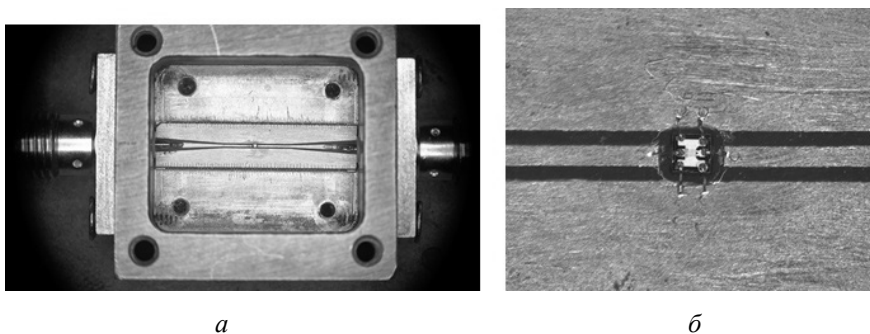


Рис. 3 – Держатель образца (а) с разваренным транзистором (б)

Fig. 3 – Sample holder (a) with a welded transistor (b)

## 2. Результаты измерений

Измерения вольт-амперных характеристик проводились в различных диапазонах напряжений с вариативным количеством измерительных точек внутри каждого диапазона, что обеспечивало необходимую детализацию. Обработка и визуализация вольт-амперных характеристик транзистора, полученных в ходе экспериментальных измерений, выполнена с коррекцией напряжения стока с учетом падения напряжения на активном сопротивлении фильтра:

$$V_{ds} = V_{ds_{meas}} - IdR_L,$$

где  $V_{ds}$  – скорректированное напряжение стока;  $V_{ds_{meas}}$  – измеренное напряжение стока;  $Id$  – ток стока;  $R_L$  – активное сопротивление фильтра (61,1 Ом).

На рис. 4 показаны результаты измерения выходных вольт-амперных характеристик транзистора с учетом коррекции напряжения. Также была измерена проходная ВАХ транзистора. Проходная вольт-амперная характеристика с учетом коррекции напряжения на стоке представлена на рис. 5.

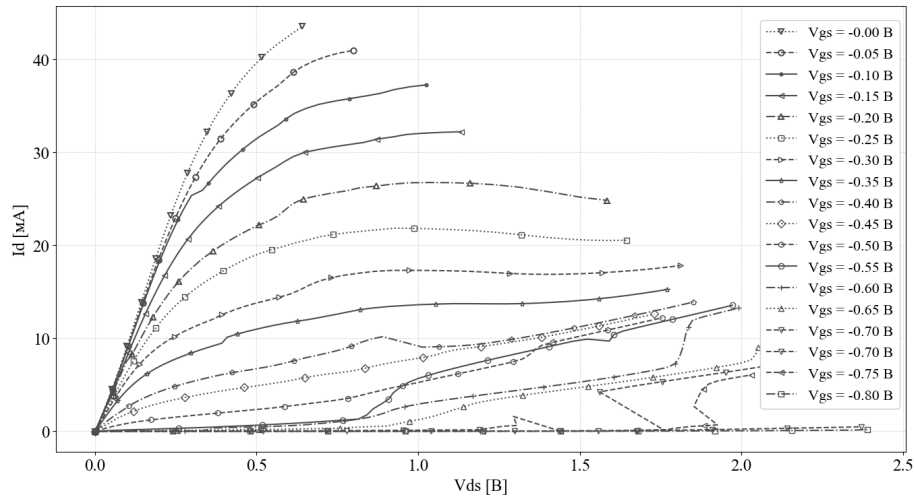


Рис. 4 – Выходные вольт-амперные характеристики транзистора 3П398А-5 при температуре окружающей среды 4 К

Fig. 4 – Output I-V characteristic of the 3P398A-5 transistor (4 K ambient temperature)

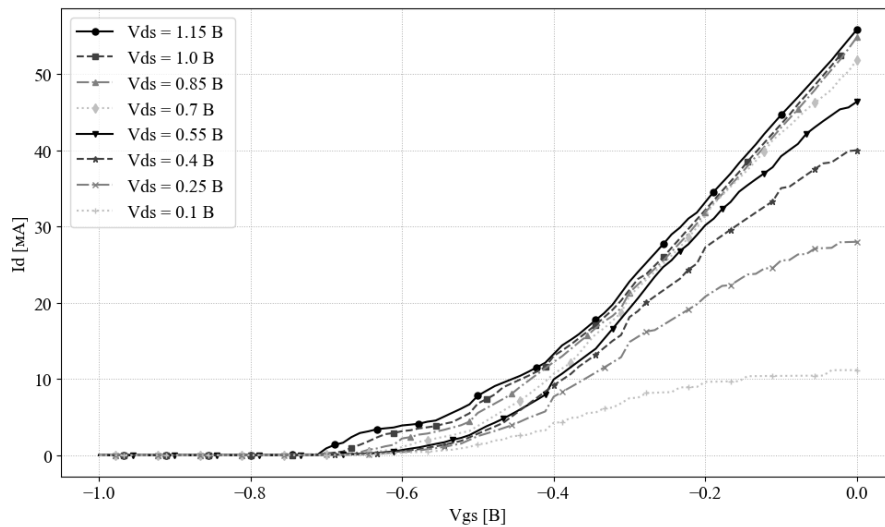


Рис. 5 – Проходная вольт-амперная характеристика транзистора 3П398А-5 при температуре окружающей среды 4 К

Fig. 5 – Transfer I-V characteristic of the 3P398A-5 transistor (4 K ambient temperature)

Измерения S-параметров транзистора проводились при различных напряжениях смещения на затворе и стоке, что позволило оценить его поведение в различных рабочих точках.

На рис. 6–8 показана зависимость параметра  $S_{21}$ , характеризующего коэффициент усиления транзистора, от частоты в диапазоне 1...12 ГГц.

Наблюдаемый наклон коэффициента усиления обусловлен двумя основными факторами: естественным уменьшением усиления транзистора с ростом частоты и затуханием в СВЧ-тракте, включая потери в коаксиальных линиях рефрижератора и подводящих проводниках держателя образца.

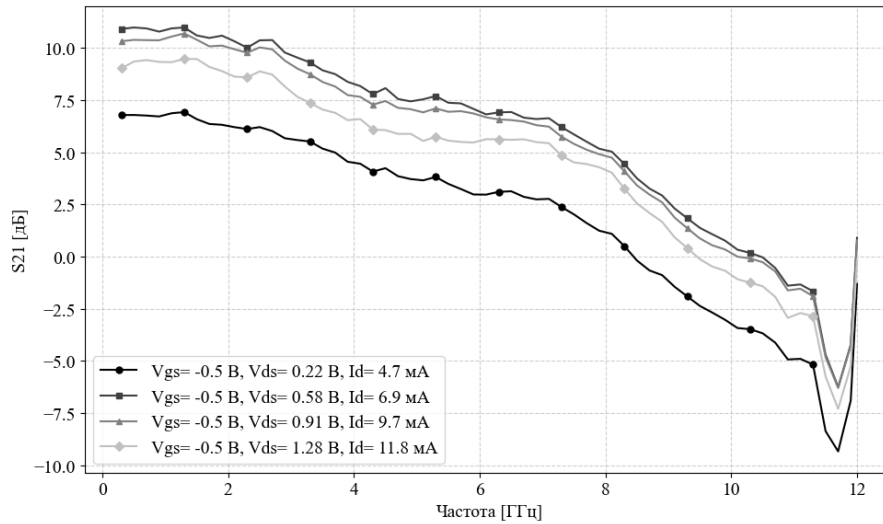


Рис. 6 – Частотная зависимость параметра  $S_{21}$  транзистора 3П398А-5 при напряжении на затворе  $-0,5$  В при температуре окружающей среды 4 К

Fig. 6 – Frequency response of the  $S_{21}$  parameter in the 3P398A-5 transistor at gate voltages of  $-0.5$  V (4 K ambient temperature)

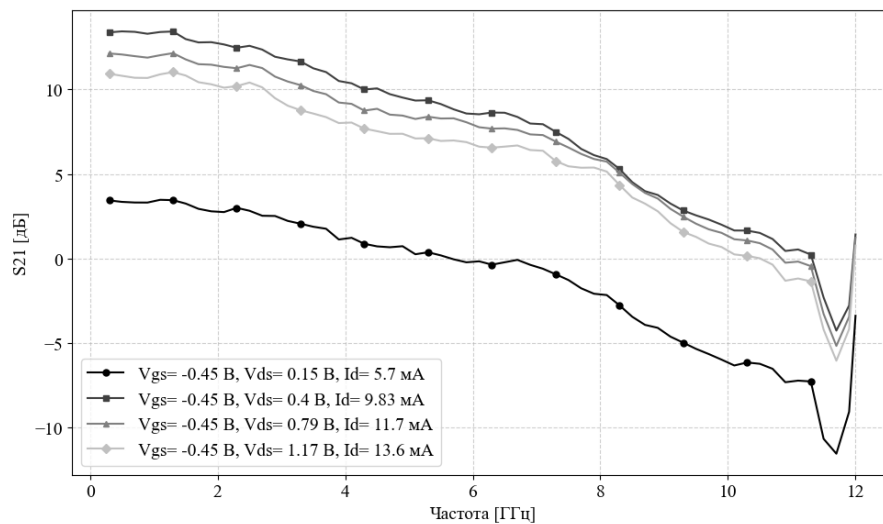


Рис. 7 – Частотная зависимость параметра  $S_{21}$  транзистора 3П398А-5 при напряжении на затворе  $-0,45$  В при температуре окружающей среды 4 К

Fig. 7 – Frequency response of the  $S_{21}$  parameter in the 3P398A-5 transistor at gate voltages of  $-0.45$  V (4 K ambient temperature)

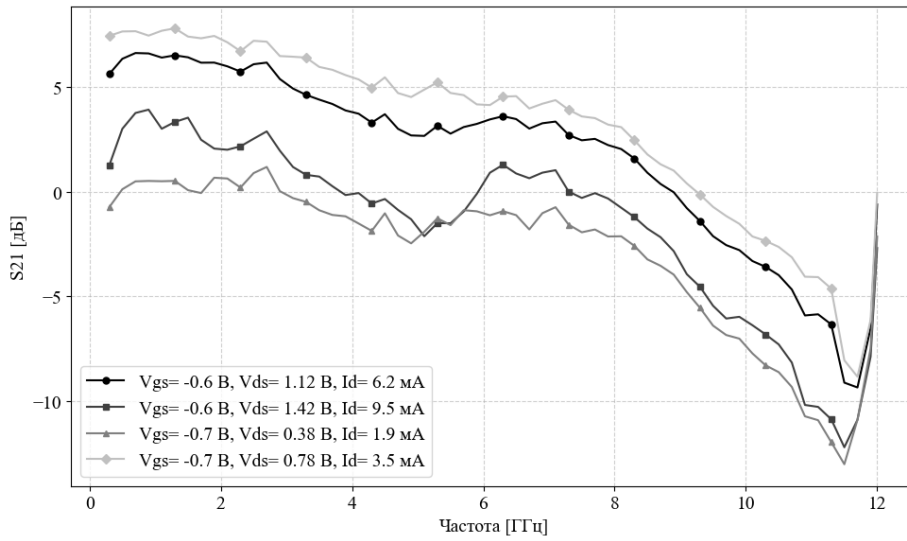


Рис. 8 – Частотная зависимость параметра  $S_{21}$  транзистора 3П398А-5 при напряжении на затворе  $-0,6$  В и  $-0,7$  В при температуре окружающей среды  $4$  К

Fig. 8 – Frequency response of the  $S_{21}$  parameter in the 3P398A-5 transistor at gate voltages of  $-0.6$  V and  $-0.7$  V ( $4$  K ambient temperature)

В качестве рабочих точек для измерения коэффициента усиления взяты значения, соответствующие различной потребляемой мощности. На рис. 6 и 7 транзистор находится близко к оптимальному режиму с точки зрения коэффициента усиления, потребляемой мощности (около  $4$  мВт) и стабильности работы ( $V_{gs} = -0,5$  В,  $V_{ds} = 0,58$  В,  $I_d = 6,9$  мА;  $V_{gs} = -0,45$  В,  $V_{ds} = 0,4$  В,  $I_d = 9,83$  мА). На рис. 8 показаны крайние значения при малом потреблении и при большом. Можно видеть, что транзистор показывает усиление при потребляемой мощности менее  $1$  мВт ( $V_{gs} = -0,7$  В,  $V_{ds} = 0,38$  В,  $I_d = 1,9$  мА).

### 3. Обсуждение результатов измерений

Из измеренных вольт-амперных характеристик (ВАХ) полевого транзистора можно определить несколько ключевых параметров, которые представлены в таблице. Сравнение параметров транзистора 3П398А-5 при температурах  $300$  К и  $4$  К показывает следующие особенности. Напряжение отсечки уменьшается с  $-2,5$  В при  $300$  К до  $-0,9$  В при  $4$  К, что свидетельствует об улучшении проводимости канала при криогенных температурах. Начальный ток стока увеличивается с  $36$  мА (при  $V_{ds} = 3$  В) до  $55$  мА (при  $V_{ds} = 1$  В), что указывает на повышение эффективности транзистора при низких температурах даже при меньшем напряжении сток-исток. Сопротивление канала в открытом состоянии значительно снижается с  $83$  Ом до  $20$  Ом, что подтверждает улучшение проводимости канала при  $4$  К. Ток утечки уменьшается с  $10$  мкА до  $1$  мкА, демонстрируя существенное снижение паразитных токов при криогенных температурах.

**Параметры СВЧ-транзистора 3П398А-5 при температуре 300 К и 4 К**  
**Performance of the 3P398A-5 microwave transistor at 300 K and 4 K**

| Параметр                                  | 300 К                                                                 | 4 К                                                                   |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Напряжение отсечки                        | –2,5 В                                                                | –0,9 В                                                                |
| Начальный ток стока                       | не менее 36 мА<br>( $V_{ds} = 3 \text{ В}$ , $V_{gs} = 0 \text{ В}$ ) | не менее 55 мА<br>( $V_{ds} = 1 \text{ В}$ , $V_{gs} = 0 \text{ В}$ ) |
| Сопротивление канала в открытом состоянии | не более 83 Ом                                                        | не более 20 Ом                                                        |
| Ток утечки                                | не более 10 мкА<br>( $V_{gs} = -2,5 \text{ В}$ )                      | не более 1 мкА<br>( $V_{gs} = -0,9 \text{ В}$ )                       |

В результате при температуре 4 К транзистор 3П398А-5 проявляет улучшенные характеристики по сравнению с работой при 300 К: выше проводимость канала, больше начальный ток стока, меньше напряжение отсечки и существенно снижен ток утечки. Наблюдалась повышенная чувствительность транзистора к внешним воздействиям, выраженная в скачках напряжения при измерении вольт-амперных характеристик при незначительном воздействии на систему измерений (касание измерительных линий).

На основании проведенных измерений определен диапазон рабочих напряжений на затворе и стоке, а также соответствующие значения тока стока, при которых транзистор демонстрирует стабильные характеристики при температуре 4 К. Стабильная рабочая область соответствует напряжению затвора: от  $V_{gs_{\min}} = -0,5 \text{ В}$  до  $V_{gs_{\max}} = -0,45 \text{ В}$  и напряжению стока от  $V_{ds_{\min}} = 0,35 \text{ В}$  до  $V_{ds_{\max}} = 1 \text{ В}$ .

При напряжении затвора выше или ниже указанного диапазона наблюдается снижение коэффициента усиления транзистора и появление «скачков» характеристики, что является признаком возбуждения транзистора. В области указанных затворных напряжений изменение напряжения стока позволяет плавно регулировать коэффициент усиления транзистора: происходит плавное включение и выключение активного элемента. Максимальный коэффициент усиления достигается при значении напряжения стока около 0,5 В. В этих пределах транзистор сохраняет линейность усиления, что критически важно для работы в криогенных СВЧ-усилителях.

Потребляемая транзистором мощность ( $P_{diss}$ ) рассчитывается как

$$P_{diss} = V_{ds} \cdot I_d.$$

Для указанных диапазонов напряжений потребляемая мощность варьируется от 3,8 до 11 мВт (значение зависит от режима).

На основании анализа S-параметров и ВАХ определена оптимальная рабочая точка:  $V_{gs} = -0,45 \text{ В}$ ,  $V_{ds} = 0,5 \text{ В}$ , обеспечивающая максимальный коэффициент усиления, минимальную потребляемую мощность, стабильность параметров во всем частотном диапазоне (1...12 ГГц).

Полученные данные позволяют не только определить устойчивые режимы работы транзистора, но и оптимизировать энергопотребление будущего

усилителя. Это особенно важно для криогенных применений, где тепловыделение должно быть минимизировано для сохранения низкотемпературных условий.

### Заключение

В работе исследованы ВАХ и S-параметры транзистора 3П398А-5 при 4 К. Полученные экспериментальные данные измерений вольт-амперных характеристик выявили значительное улучшение параметров транзистора при сверхнизких температурах: напряжение отсечки снизилось с  $-2,5$  до  $-0,9$  В, начальный ток стока увеличился с 36 мА до 55 мА, сопротивление канала уменьшилось с 83 до 20 Ом, а ток утечки сократился с 10 до 1 мкА. Эти изменения свидетельствуют о повышении эффективности транзистора в криогенных условиях, что позволяет использовать его в криогенных устройствах.

Анализ результатов измерений S-параметров показал, что транзистор демонстрирует стабильные характеристики при напряжении затвора от  $-0,5$  до  $-0,45$  В и напряжении стока от 0,35 до 1 В. Максимальный коэффициент усиления был достигнут при напряжении стока 0,5 В, что указывает на оптимальный режим работы устройства. Кроме того, было установлено, что транзистор сохраняет линейность усиления во всем исследуемом частотном диапазоне, что особенно важно для обеспечения высокой чувствительности усилителей.

Полученные данные позволяют уточнить параметры моделей транзистора [9], используемых при проектировании криогенных СВЧ-усилителей. Выявленные оптимальные режимы работы транзистора, такие как напряжение затвора  $-0,45$  В и напряжение стока 0,5 В, обеспечивают баланс между усилением, стабильностью и энергопотреблением. Это делает транзистор 3П398А-5 перспективным компонентом для создания устройств, работающих в условиях сверхнизких температур, где требования к энергоэффективности и тепловыделению особенно критичны.

Проведенная работа подтвердила возможность использования отечественного НЕМТ транзистора в криогенных усилителях. Полученные результаты создают основу для дальнейших исследований и разработки гибридных интегральных микросборок криогенных малошумящих СВЧ-усилителей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. A 300- $\mu$ W cryogenic HEMT LNA for quantum computing / E. Cha, N. Wadefalk, G. Moschetti, A. Pourkabirian, J. Stenarson, J. Grahm // 2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS). – IEEE, 2020. – P. 1299–1302. – DOI: 10.1109/IMS30576.2020.9223865.
2. A wideband cryogenic microwave low-noise amplifier / B.I. Ivanov, D.I. Volkhin, I.L. Novikov, D.K. Pitsun, D.O. Moskalev, I.A. Rodionov, E. Il'ichev, A.G. Vostretsov // Beilstein Journal of Nanotechnology. – 2020. – Vol. 11. – P. 1484–1491. – DOI: 10.3762/bjnano.11.131.

3. **Pospieszalski M.W.** Extremely low-noise cryogenic amplifiers for radio astronomy: past, present and future // 2018 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON). – Poznan, Poland, 2018. – P. 1–6. – DOI: 10.23919/MIKON.2018.8514558.
4. Matched wideband low-noise amplifiers for radio astronomy / S. Weinreb, J. Bardin, H. Mani, G. Jones // Review of Scientific Instruments. – 2009. – Vol. 80 (4). – P. 044702. – DOI: 10.1063/1.3103939.
5. **Risacher C., Belitsky V.** Low noise cryogenic IF amplifiers for super heterodyne radio astronomy receivers // Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Space Terahertz Technology. – Cambridge, MA, USA, 2002. – P. 391–400.
6. **Broise X., Bounab A.** Cryogenic ultra-low noise HEMT amplifiers board // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. – 2015. – Vol. 787. – P. 51–54. – DOI: 10.1016/j.nima.2014.11.016.
7. Self-heating of cryogenic high electron-mobility transistor amplifiers and the limits of microwave noise performance / A.J. Ardizzi, A.Y. Choi, B. Gabritchidze, J. Kooi, K.A. Cleary, A.C. Readhead, A.J. Minnich // Journal of Applied Physics. – 2022. – Vol. 132 (8). – P. 084501. – DOI: 10.1063/5.0103156.
8. Полевой транзистор 3П398А-5: Техническое описание / ЗАО НПП "Планета-Аргалл". – URL: <https://argall.nov.ru/wp-content/uploads/2021/10/398a.pdf> (дата обращения: 12.09.2025).
9. **Pospieszalski M.W.** Modeling of noise parameters of MESFETs and MODFETs and their frequency and temperature dependence // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1989. – Vol.37 (9). – P. 1340–1350. – DOI: 10.1109/22.32217.

## EXPERIMENTAL STUDY OF A MICROWAVE FIELD EFFECT TRANSISTOR AT CRYOGENIC TEMPERATURE

**Volkhin D.I., Chernitskaya M.D.**

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

This paper presents the results of an experimental study of the characteristics of the 3P398A-5 microwave field-effect transistor at a cryogenic temperature of 4 K, aimed at optimizing its use in cryogenic low-noise amplifiers for quantum computing and radio astronomy applications. Current-voltage (I-V) characteristics and S-parameters of the transistor were measured using a specialized measurement setup, which included an Entropy He7 dilution refrigerator, a Keithley 2636B source-measure unit, and a Rohde & Schwarz ZVL13 vector network analyzer. At 4 K, the transistor demonstrated significant performance improvements compared to room temperature: the pinch-off voltage decreased from –2,5 to –0,9 V, the drain current increased from 36 mA to 55 mA, the channel resistance decreased from 83 Ohm to 20 Ohm, and the leakage current was reduced from 10  $\mu$ A to 1  $\mu$ A. Analysis of the S-parameters revealed an optimal operating point ( $V_{gs} = -0.45$  V,  $V_{ds} = 0.5$  V), providing maximum gain (S21) in the 1–12 GHz range at minimal power consumption (approximately 4 mW). The obtained results allow for refinement of transistor models used in the design of high-sensitivity cryogenic amplifiers with low noise and high energy efficiency.

**Keywords:** HEMT, GaAs transistor, cryogenic temperature, I-V characteristics, low-noise amplifier, S-parameters.

DOI: 10.17212/1727-2769-2025-3-5-17

## REFERENCES

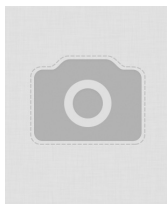
1. Cha E., Wadefalk N., Moschetti G., Pourkabirian A., Stenarson J., Grahn J. A 300- $\mu$ W cryogenic HEMT LNA for quantum computing. *2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2020, pp. 1299–1302. DOI: 10.1109/IMS30576.2020.9223865.
2. Ivanov B.I., Volkhin D.I., Novikov I.L., Pitsun D.K., Moskalev D.O., Rodionov I.A., Il'ichev E., Vostretsov A.G. A wideband cryogenic microwave low-noise amplifier. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2020, vol. 11, pp. 1484–1491. DOI: 10.3762/bjnano.11.131.
3. Pospieszalski M.W. Extremely low-noise cryogenic amplifiers for radio astronomy: past, present and future. *2018 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON)*, Poznan, Poland, 2018, pp. 1–6. DOI: 10.23919/MIKON.2018.8514558.
4. Weinreb S., Bardin J., Mani H., Jones G. Matched wideband low-noise amplifiers for radio astronomy. *Review of Scientific Instruments*, 2009, vol. 80 (4), p. 044702. DOI: 10.1063/1.3103939.
5. Risacher C., Belitsky V. Low noise cryogenic IF amplifiers for super heterodyne radio astronomy receivers. *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Space Terahertz Technology*, Cambridge, MA, USA, 2002, pp. 391–400.
6. Broise X., Bounab A. Cryogenic ultra-low noise HEMT amplifiers board. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2015, vol. 787, pp. 51–54. DOI: 10.1016/j.nima.2014.11.016.
7. Ardizzi A.J., Choi A.Y., Gabritchidze B., Kooi J., Cleary K.A., Readhead A.C., Minnich A.J. Self-heating of cryogenic high electron-mobility transistor amplifiers and the limits of microwave noise performance. *Journal of Applied Physics*, 2022, vol. 132 (8), p. 084501. DOI: 10.1063/5.0103156.
8. JSC NPP "Planeta-Argall". *3P398A-5 Field-Effect Transistor: Datasheet*. (In Russian). Available at: <https://argall.nov.ru/wp-content/uploads/2021/10/398a.pdf> (accessed 12.09.2025).
9. Pospieszalski M.W. Modeling of noise parameters of MESFETs and MODFETs and their frequency and temperature dependence. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1989, vol. 37 (9), pp. 1340–1350. DOI: 10.1109/22.32217.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Вольхин Дмитрий Игоревич** – родился в 1990 году, канд. техн. наук, старший науч. сотр. лаборатории квантовой криогенной электроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: разработка и исследование СВЧ устройств. Опубликовано 30 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: d.i.volkhin@mail.ru).

**Volkhin Dmitry Igorevich** (b. 1990) – Candidate of Sciences (Eng.), Senior Researcher at the Laboratory of Quantum Cryogenic Electronics, Novosibirsk State Technical University. His research interests include development and investigation of microwave devices. He has 30 scientific papers published. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: d.i.volkhin@mail.ru).



**Черницкая Мария Данииловна** – родилась в 2002 году, инженер-исследователь лаборатории квантовой криогенной электроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: разработка и исследование СВЧ устройств. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20).

**Chernitskaya Mariya Daniilovna** (b. 2002) – research engineer, laboratory of Quantum Cryogenic Electronics, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are design and investigation of microwave devices. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia).

*Статья поступила 20 июня 2025 г.  
Received June 20, 2025*

---

To Reference:

Volkhin D.I., Chernitskaya M.D. Eksperimental'noe issledovanie polevogo SVCH tranzistora pri kriogennoi temperature [Experimental study of a microwave field effect transistor at cryogenic temperature]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2025, no. 3 (68), pp. 5–17. DOI: 10.17212/1727-2769-2025-3-5-17.