

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 621.382.32

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАБОТУ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С УПРАВЛЯЮЩИМ p - n -ПЕРЕХОДОМ

© 2025 г. С. Ш. Рехвиашвили^{а, *}, Д. С. Гаев^б, А. Б. Литвинов^а

^аИнститут прикладной математики и автоматизации КБНЦ РАН,
ул. Шортанова, 89 А, Нальчик, 360000 Российская Федерация

^бКабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,
ул. Чернышевского, 173, Нальчик, 360004 Российская Федерация

*E-mail: rsergo@mail.ru

Поступила в редакцию 12.01.2024 г.

После доработки 02.04.2024 г.

Принята к публикации 09.04.2024 г.

Проведены экспериментальные и теоретические исследования влияния немодулированного лазерного излучения на функционирование полевого транзистора с управляющим p - n -переходом в составе усилительного каскада с общим истоком. Определены закономерности в изменениях параметров транзистора в зависимости от внешнего излучения. Установлено, что при лазерном облучении наибольшие изменения претерпевают напряжение отсечки и удельная крутизна затвора. Обнаружено, что при облучении транзисторной структуры возникает фотовольтаический эффект на p - n -переходе затвора, изменяется концентрация свободных носителей заряда в полупроводниковых областях и сопротивление канала. Показано, что прибор достаточно устойчив к воздействию лазерного излучения, что принципиально важно для создания радиационно-стойких интегральных схем.

Ключевые слова: полевой транзистор с управляющим p - n -переходом, статические и динамические характеристики, лазерное излучение, радиационная стойкость

DOI: 10.31857/S0033849425010092, **EDN:** HIWTEB

ВВЕДЕНИЕ

В полевом транзисторе с управляющим p - n -переходом (ПТУП, англ. Junction Field-Effect Transistor – JFET) регулировка протекающего через него тока осуществляется с помощью обратно смещенного p - n -перехода [1]. В отличие от пространственных полевых транзисторов со структурой «металл-оксид-полупроводник» ПТУП менее восприимчив к перегрузкам по току и напряжению. Основным достоинством ПТУП по сравнению с биполярным транзистором (БТ) является то, что прибор, как правило, применяется в закрытом состоянии, что обеспечивает высокое входное сопротивление. Поскольку ток обратно смещенного p - n -перехода затвора всегда мал, коэффициент передачи по току у ПТУП всегда больше единицы.

ПТУП находит применение в аналоговых и цифровых переключателях, а также в различных усилителях, активных фильтрах, генераторах, модуляторах, ограничителях и источниках тока. Важным направлением в современной микроэлектронике является разработка и изготовление интегральных микросхем на ПТУП. К таким

микросхемам, прежде всего, относятся операционные усилители с входными полевыми транзисторами, которые обладают большим входным сопротивлением и низким уровнем шумов. Можно также считать перспективным применение транзисторов данного типа в качестве базовых элементов для радиационно-стойких интегральных схем [2–7]. В структурах типа «металл-оксид-полупроводник» при воздействии ионизирующего излучения быстро накапливается заряд в диэлектрике и увеличивается скорость поверхностной рекомбинации на границе раздела «кремний-оксид кремния». Радиационное нарушение работы биполярных структур обусловлено уменьшением времени жизни основных носителей заряда и изменением их концентрации и подвижности. Указанные недостатки у ПТУП отсутствуют по двум основным причинам: а) канал транзистора находится в объеме полупроводника; б) ток в канале транзистора образуется за счет основных носителей заряда.

Настоящая работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию влияния немодулированного лазерного излучения видимого диапазона (*оптической накачки*) на работу ПТУП.

Отметим, что аналогичные исследования для БТ с целью направленного улучшения его характеристик проводились ранее в [8, 9].

1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Была исследована микросхема КР504НТЗВ, которая содержит два согласованных сильноточных ПТУП с каналом p -типа. Корпус микросхемы механически сошлифовывали так, чтобы оставался тонкий защитный слой, не препятствующий проникновению лазерного излучения в кристалл. Источником внешнего излучения служил красный маломощный полупроводниковый лазер с длиной волны 650 нм, визуализируемый диаметр пятна 3 мм. Во всех экспериментах интенсивность фоновой лазерной засветки была одинаковой. Мощность излучения контролировали прибором S142С и составляла ~ 130 мВт. Такая мощность излучения позволила надежно регистрировать изменения всех электрических характеристик и параметров. Измерения с излучением и без излучения проводили после надлежащей выдержки, а именно после стабилизации измеряемых токов и напряжений микросхемы. Тем самым были обеспечены стационарные условия эксперимента.

Напряжение отсечки, при котором ток через транзистор в пределах точности измерений равен нулю, с лазерным воздействием и без него составило -4.1 В и -3.9 В. Значения напряжений холостого хода вследствие вентильного фотоэффекта при заданном уровне засветки на переходах «затвор–сток» и «затвор–исток» равны 65 мВ и 55 мВ (± 5 мВ) соответственно.

Были проведены измерения статических характеристик и осциллограмм сигналов усилительного каскада с общим истоком, схема которого показана на рис. 1а.

При измерениях с нулевым входным напряжением входная цепь оставалась замкнутой на источник. Результаты измерений приведены на рис. 2–4.

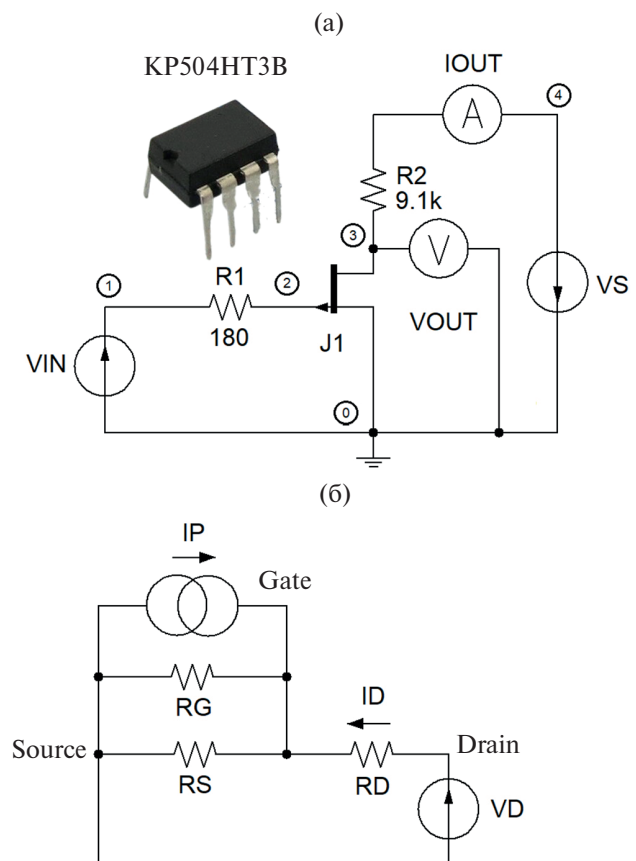


Рис. 1. Схема усилительного каскада с общим истоком (а) и эквивалентная электрическая схема облучаемого p -канального ПТУП с соединенными затвором и истоком (б).

Обозначения токов и напряжений на данных рисунках соответствуют рис. 1а.

Кроме красного лазера тестировались зеленый (длина волны 532 нм) и синий (длина волны 450 нм) маломощные полупроводниковые лазеры. Было обнаружено, что с уменьшением длины волны излучения

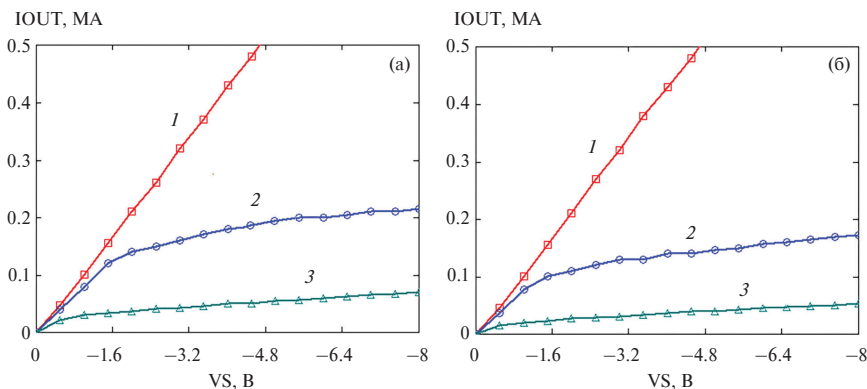


Рис. 2. Выходные вольт-амперные характеристики усилительного каскада: (а) — без лазерного воздействия; (б) — с лазерным воздействием. Кривые 1–3 соответствуют входному напряжению VIN: 0 (1), 3.6 (2) и 3.8 (3) В.

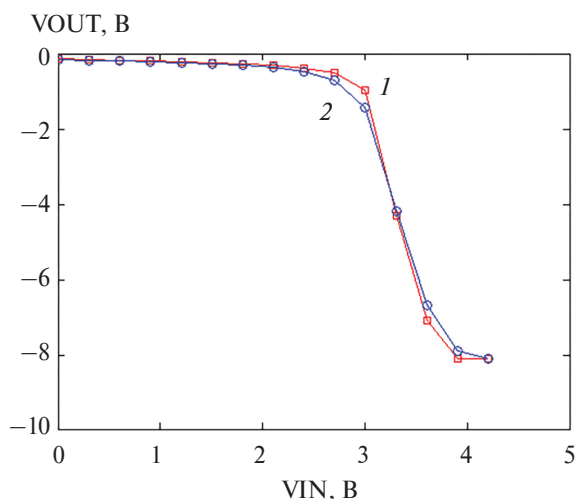


Рис. 3. Экспериментальные передаточные характеристики усилительного каскада по напряжению: кривая 1 – без лазерного воздействия; кривая 2 – с лазерным воздействием.

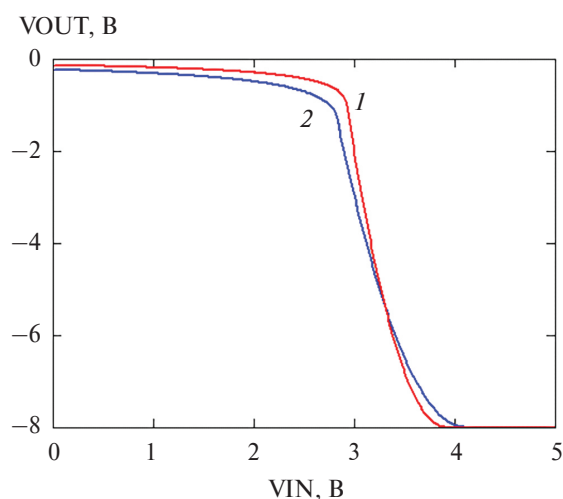


Рис. 5. Теоретические передаточные характеристики усилительного каскада по напряжению: кривая 1 – без лазерного воздействия; кривая 2 – с лазерным воздействием.

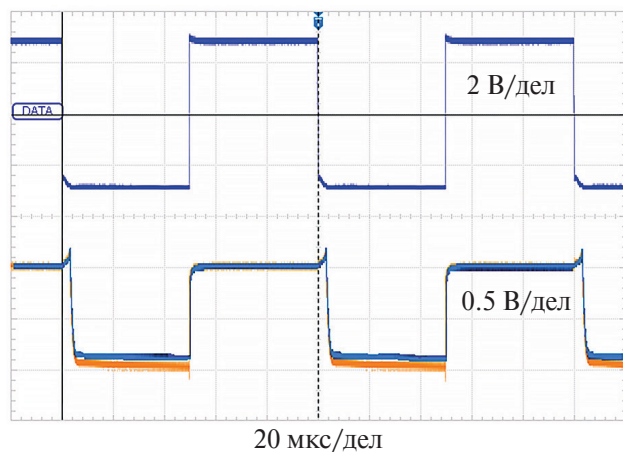


Рис. 4. Осциллограммы сигналов в усилительном каскаде: вверху – входной сигнал; внизу – выходные сигналы с облучением (с меньшей амплитудой) и без облучения (с большей амплитудой).

наблюдаемые в микросхеме эффекты уменьшаются. Таким образом, наиболее предпочтительным для экспериментов оказался красный лазер.

Теоретическое исследование проводилось с использованием схемотехнического моделирования и стандартной компактной SPICE-модели ПТУП. Применялась программа LTspice, которая обладает всеми необходимыми вычислительными возможностями [10] и находится в свободном доступе. Результаты моделирования показаны на рис. 5. Характерные обозначения величин в приведенных ниже формулах и на всех графиках соответствуют [1] и синтаксису интерпретатора SPICE [11].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно проведенным экспериментам, напряжение отсечки ПТУП возрастает по модулю по мере увеличения интенсивности лазерного облучения. Применительно к нашему случаю напряжение отсечки можно оценить на основе известных формул для резкого p - n -перехода

$$\frac{d}{2} = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{q} \left(\frac{n+p}{np} \right) (PB - VTO)}, \quad (1)$$

$$PB = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{np}{n_i^2} \right), \quad (2)$$

где $VTO < 0$ – напряжение отсечки, PB – контактная разность потенциалов (составляет ~ 1 В), d – толщина канала, ϵ_0 – электрическая постоянная, q – заряд электрона, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, $n_i = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ – концентрация собственных носителей заряда в кремнии, $\epsilon = 12$ – относительная диэлектрическая проницаемость кремния, n и p – концентрации электронов и дырок в затворе и канале транзистора. При записи (2) предполагалось, что в транзисторе канал располагается между двумя идентичными p - n -переходами. Из (1), (2) находим

$$VTO = -\frac{qd^2}{8\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{np}{n+p} \right) + \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{np}{n_i^2} \right). \quad (3)$$

На основании (3) можно заключить, что напряжение отсечки по абсолютному значению должно быть преимущественно возрастающей функцией концентраций генерируемых лазерным излучением электронов и дырок. При облучении транзистора в n -затворе и p -канале концентрации свободных носителей заряда возрастают, поэтому

область пространственного заряда (ОПЗ) на границе p - n -перехода сужается. Для резкого и асимметричного перехода n^+ - p -типа напряжение отсечки будет зависеть в основном от концентрации дырок в канале, поэтому формула (3) упрощается

$$V_{TO} = -\frac{qpd^2}{8\epsilon\epsilon_0} + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{p}{n_i}\right). \quad (4)$$

Формулу для удельной крутизны затвора можно написать в виде [1, 12–14]:

$$\text{БЕТА} = \frac{G}{4(PB - V_{TO})} \sim \frac{1}{R} \frac{1}{V_{TO}}, \quad (5)$$

где G и R — электропроводность в отсутствие ОПЗ и сопротивление канала. Из (5) следует, что статические характеристики ПТУП должны определяться концентрацией свободных носителей заряда в канале и, стало быть, интенсивностью внешнего оптического воздействия.

Одновременное действие напряжений на затворе и стоке приводит к изменению геометрии активной области канала ПТУП — в окрестности стока канал сужается сильнее, чем вблизи истока. Как следствие, с увеличением напряжения на стоке ток через канал сначала возрастает, а затем почти стабилизируется, достигая насыщения. Если входная цепь каскада на рис. 1а разомкнута, то лазерное облучение ожидаемо приводит к уменьшению сопротивления канала ПТУП в основном из-за фоторезистивного эффекта. Объединение затвора и истока в общий входной контур видоизменяет наблюдаемую картину физических процессов. В этом случае лазерное облучение транзисторной структуры при напряжениях на затворе, меньших напряжения отсечки, приводит к уменьшению тока стока и увеличению выходного напряжения, что продемонстрировано на рис. 2, 3. Это необычное на первый взгляд поведение объясняется фотовольтаическим эффектом на p - n -переходе затвора, уменьшением удельной крутизны БЕТА и увеличением напряжения отсечки V_{TO} . Влияние фотовольтаического эффекта наглядно отражает линейная (малосигнальная) эквивалентная схема на рис. 1б. С ее помощью несложно убедиться, что ток через освещаемый транзистор с короткозамкнутыми электродами истока и затвора может уменьшаться:

$$I_D = \frac{V_D - I_P R_S \parallel R_G}{R_D + R_S \parallel R_G} \approx I_D^{(0)} - I_P \frac{R_G}{R_D},$$

где $I_D^{(0)}$ — темновой ток, I_P — фототок, V_D — напряжение на стоке, R_G , R_S и R_D — встроенные сопротивления затвора, истока и стока.

По мере приближения к напряжению отсечки ситуация меняется на противоположную. При

напряжениях на затворе, близких к напряжению отсечки, облучение уже влечет за собой увеличение тока стока и уменьшение выходного напряжения. Это, вероятнее всего, вызывается уменьшением ширины ОПЗ и открыванием транзистора. В пользу этого объяснения косвенно свидетельствует увеличение электрической емкости фотодиодов при оптическом воздействии [15]. В нашем случае генерация неравновесных носителей заряда также уменьшает ширину ОПЗ и увеличивает электрическую емкость p - n -перехода. Отметим, кроме того, что существует небезосновательное мнение [16] о влиянии разогрева газа свободных носителей заряда на барьерную емкость под действием внешнего лазерного излучения.

Для схемотехнического моделирования применяется модель ПТУП Шихмана-Ходжеса [10–14]. Чтобы в этой модели учесть основные эффекты, возникающие в транзисторной структуре при постоянной фоновой засветке, помимо включения в схему каскада на рис. 1а дополнительных источников тока, требуется варьировать параметры БЕТА и V_{TO} . Это диктуется следующими физическими соображениями. При оптическом воздействии на ПТУП его затвор становится эквивалентным фотодиоду. Если входной контур каскада на рис. 1а разомкнут, то фотогенерация электронно-дырочных пар приводит к уменьшению сопротивления канала транзистора. Если же входной контур замкнут, как это изображено на рис. 1а, то через p - n -переход транзистора будет протекать фототок: сгенерированные электроны и дырки перебрасываются соответственно в области затвора и канала, увеличивая или уменьшая протекающий через транзистор результирующий ток в зависимости от величины входного напряжения. При этом величина фототока прямо пропорциональна количеству поглощенных фотонов. Иными словами, в условиях внешнего облучения и при замкнутом входном контуре затвор функционирует в фотодиодном режиме; большая часть электрического тока формируется носителями заряда, генерируемыми в ОПЗ, поскольку носители заряда имеют там высокую скорость дрейфа и низкий темп рекомбинации, тогда как носители заряда в объемах p - и n -областей имеют низкую скорость дрейфа и высокий темп рекомбинации. В связи со сказанным и на основании [1, с. 380], для тока стока в линейной области можно написать

$$I_D \approx 2\text{БЕТА}(V_G - V_{TO})V_D, \quad (6)$$

где V_G — напряжение на затворе транзистора. Из (6) следует, что изменения тока стока при облучении взаимосвязаны с изменениями удельной крутизны затвора и напряжения отсечки, которые в свою очередь зависят от концентрации подвижных носителей заряда. С учетом описанных особенностей была составлена программа моделирования усилительного каскада, которая представлена ниже.

* JFET Amplifier

VIN 1 0 2

VS 4 0 –8

R1 1 2180

R2 3 4 9.1k

IPS 2 0 10u

IPD 2 3 12u

J1 3 2 0 KP504HT3B

.MODEL KP504HT3B PJF(VTO = –4.1 +

+ BETA = 4.5E–4 PB = 1)

.DC VIN 0 5 0.02

.PRINT DC V(3)

.END

На рис. 5 показаны результаты моделирования передаточной характеристики по напряжению усилительного каскада при различных значениях напряжения отсечки и удельной крутизны. Качественное сравнение результатов моделирования с экспериментальными результатами, приведенными на рис. 3, позволяет сделать однозначный вывод о том, что облучение транзисторной структуры приводит к повышению напряжения отсечки и снижению удельной крутизны затвора. Согласно (3)–(6), главная причина состоит в изменении концентраций генерируемых носителей заряда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучена работа полевого транзистора с управляющим p - n -переходом в условиях его непрерывной фоновой засветки лазерным излучением. Экспериментально и теоретически показано, что при лазерном облучении транзисторной структуры имеют место следующие физические явления: 1) фотовольтаический эффект в области p - n -перехода затвора; 2) сужение ОПЗ p - n -перехода затвора; 3) уменьшение тока, протекающего через транзистор, в результате действия внешнего излучения. Можно также утверждать, что оптическое воздействие на транзистор в определенной степени равносильно повышению температуры прибора, которое исследовалось в [17]. Чтобы воспроизвести поведение транзистора посредством SPICE-модели, оказалось достаточным учесть изменения всего двух параметров – напряжения отсечки (Threshold Voltage) и удельной крутизны затвора (Transconductance Parameter). При оптическом воздействии на транзистор, разумеется, могут изменяться и другие параметры модели, например встроенные сопротивления областей. При моделировании эти параметры, однако, можно не принимать во внимание. Исследования в целом показали, что ПТУП слабо восприимчив к достаточно

интенсивному лазерному излучению, что свидетельствует о перспективности его применения для создания радиационно-стойких интегральных схем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы статьи заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sze S.M., Ng Kwok K. Physics of Semiconductor Devices. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
2. Citterio M., Kierstead J., Rescia S., Radeka V. // IEEE Trans. 1996. V.NS-43. № 3. P. 1576.
3. Кильметов Р.С., Кухаренко А.П., Механцев Б.Е., Механцев Е.Б. // Известия ТРТУ. 2000. № 3(17). С. 167.
4. Дворников О.В., Дятлов В.Л., Прокопенко Н.Н., Чеховский В.А. // РЭ. 2017. Т. 62. № 10. С. 1031.
5. Prokopenko N.N., Pakhomov I.V., Zhuk A.A. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. V. 862. № 3. Article No. 032109.
6. Vikulin I.M., Vikulina L.F., Gorbachev V.E., Mikhailov N.S. // Radioelectronics and Commun. Systems. 2021. V. 64. № 6. P. 310.
7. Takeyama A., Makino T., Tanaka Y. et al. // Quantum Beam Sci. 2023. V. 7. № 4. P. 31.
8. Рехвиашвили С.Ш., Нарожнов В.В. Способ повышения быстродействия транзисторов и транзисторных интегральных схем. Патент РФ № 2799113. Оpubл. офиц. бюл. «Изобретения. Полезные модели» № 19 от 04.07.2023.
9. Альтудов Ю.К., Гаев Д.С., Псху А.В., Рехвиашвили С.Ш. // Микроэлектроника. 2023. Т. 52. № 6. С. 489.
10. Володин В.Я. LTspice: компьютерное моделирование электронных схем. СПб.: БХВ-Петербург, 2010.
11. Разевиг В.Д. Применение программ P-CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Выпуск 2. М.: Радио и связь, 1992.
12. Shichman H., Hodges D.A. // IEEE J. Solid-State Circuits. 1968. V. 3. № 3. P. 285.
13. Antognetti P., Massobrio G. Semiconductor Device Modeling with Spice. N. Y.: McGraw-Hill, Inc., 1993.
14. Дворников О., Шульгевич Ю. // Современная электроника. 2009. № 8. С. 50.
15. Goncalves D., Fernandes L.M., Louro P. et al. // Proc. 4th Doctoral Conf. on Computing, Electrical and Industrial Systems (DoCEIS), 15–17 Apr. 2013. Costa de Caparica. Heidelberg: Springer, 2013. P. 547.
16. Мармур И.Я., Новиков Ю.Б., Оксман Я.А. // ФТП. 1988. Т. 22. № 1. С. 87.
17. Kavangary A., Graf P., Azazoglu H. et al. // AIP Advances. 2019. V. 9. № 2. Article No. 025104.

THE EFFECT OF LASER RADIATION ON A JUNCTION FIELD-EFFECT TRANSISTOR

© 2025 S. Sh. Rekhviashvili^{a, *}, D. S. Gaev^b, A. B. Litvinov^a

^a*Institute of Applied Mathematics and Automation, KBSC RAS,
89A Shortanova St., Nalchik, 360000 Russian Federation*

^b*Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov,
173 Chernyshevsky St., Nalchik, 360004 Russian Federation*

**E-mail: rsergo@mail.ru*

Received January 12, 2024; revised April 2, 2024; accepted April 9, 2024

Experimental and theoretical studies of the effect of modulated laser radiation on the functioning of a junction field-effect transistor (JFET) as part of an amplifier stage with a common source have been carried out. Patterns in changes in transistor parameters depending on external radiation are determined. It has been established that the cut-off voltage and the specific steepness of the shutter undergo the greatest changes during laser irradiation. It was found that when the transistor structure is irradiated, a photovoltaic effect occurs at the p - n junction of the gate, the concentration of free charge carriers in the semiconductor regions and the channel resistance change. It is shown that the device is sufficiently resistant to laser radiation, which is crucial for creating radiation-resistant integrated circuits.

Keywords: junction field-effect transistor (JFET), static and dynamic characteristics, laser radiation, radiation resistance