

ОБРАТИМЫЕ ОТКАЗЫ МАЛОШУМЯЩИХ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ГЕТЕРОПЕРЕХОДОМ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ*

А. М. Бобрешов, И. С. Коровченко, В. А. Степкин,
Г. К. Усков, Лэ Куанг Тук

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 01.06.2016 г.

Аннотация. Проведено экспериментальное исследование обратимых эффектов воздействия сверхкоротких видеоимпульсов на однокаскадный малошумящий усилитель на основе кремний-германиевого биполярного транзистора с гетеропереходом. В работе рассмотрены причины возникновения физических процессов в полупроводниковой структуре транзистора, лежащих в основе исследуемых эффектов. Установлено, что при воздействии видеоимпульсов как положительной, так и отрицательной полярности происходит уменьшение выходного тока и снижение коэффициента усиления. В статье приведены экспериментальные зависимости статических характеристик транзистора при воздействии последовательности видеоимпульсов: измерены зависимости тока коллектора от времени, напряжений питания и смещения.

Ключевые слова: обратимые эффекты, сверхкороткий видеоимпульс, биполярный транзистор с гетеропереходом, малошумящий усилитель.

RECOVERABLE FAILS OF LOW-NOISE HETEROJUNCTION BIPOLEAR TRANSISTORS UNDER ULTRA-SHORT PULSE OVERLOADS EXPOSURE

A. M. Bobreshov, I. S. Korovchenko, V. A. Stepkin,
G. K. Uskov, Le Quang Tuc

Abstract. Experimental investigation of low-noise amplifier, which based on SiGe heterojunction bipolar transistor, under ultra-short pulses exposure was carried out. A complex dependence of the effects physics mechanisms which based described effects and the characteristics of semiconductor transistor structure was revealed. Collector current and gain decreasing under both positive and negative pulses was found. Time measurements of dependences of static characteristics in different modes under exposure of a video pulse series are listed in paper.

Keywords: recovery effects, ultra-short pulses, low noise silicon germanium bipolar RF transistor, low-noise amplifier, temperature dependences.

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-01238а).

© Бобрешов А. М., Коровченко И. С., Степкин В. А., Усков Г. К., Лэ Куанг Тук, 2016

1. ВВЕДЕНИЕ

В составе малошумящих усилителей (МШУ) полупроводниковых радиоприемников сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона все чаще используются биполярные транзисторы с гетеропереходом (БТГП). Выбор обусловлен рядом преимуществ: сравнительно высокий коэффициент усиления при невысокой стоимости, низкий уровень шумов, высокий КПД, почти полное отсутствие токов утечки. Вместе с тем, такие транзисторы являются маломощными и рассчитаны на сравнительно небольшие уровни входного сигнала, а, следовательно, подвержены воздействию помех.

Классическими видами помех, традиционно рассматриваемыми при анализе электромагнитной совместимости МШУ, являются гармонические, модулированные и импульсные помехи. В связи с большой перспективой использования и интенсивным развитием сверхширокополосных технологий, задачи исследования влияния сверхкоротких импульсных помех и разработки методов защиты от них выходят на первый план.

В работах [1–5] рассматривается воздействие преднамеренных и непреднамеренных помех, представляющих собой серии сверхкоротких видеоимпульсов (СКВИ), на характеристики МШУ СВЧ диапазона. Отмечается, что такое импульсное воздействие приводит к временному уменьшению (деградации) функциональных характеристик активного элемента, а, следовательно, и к уменьшению коэффициента усиления МШУ в целом. При этом эффект обладает последствием, а время деградации не ограничивается временем воздействия. В случае устройств СВЧ диапазона, наиболее вероятный путь воздействия – это радиоприемный тракт. Вследствие большой ширины спектра импульсов даже при наличии защитных устройств, часть энергии импульса может воздействовать на полупроводниковые элементы устройства. Параметры полупроводниковой структуры активных элементов МШУ полностью определяют работу всего приемника.

Целью данной работы было исследование обратимых отказов малошумящих усилителей на основе биполярных транзисторов с гетеропереходом под воздействием импульсных помех субнаносекундной длительности. Актуальность этого исследования обусловлена необходимостью разработки современных полупроводниковых радиоэлектронных устройств, способных работать в условиях импульсных помех.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОБРАТИМЫХ ОТКАЗОВ

Основными эффектами, которые могут приводить к обратимым (временным) и необратимым (катастрофическим) отказам, являются наведение мощности на конструктивных элементах радиоустройства и непосредственное взаимодействие электромагнитного поля импульса с полупроводниковой структурой активного элемента [1].

Наиболее уязвимыми для действия первого эффекта являются узлы приемного тракта. Наведенные токи могут приводить к проявлению эффекта электрического защелкивания, электроперегрузкам по входным цепям и изменять режимы работы активных элементов, что будет приводить к отказу устройства в целом.

Помимо электрических перегрузок необходимо учитывать эффекты, связанные с действием поля импульсов на полупроводниковую структуру рассматриваемого элемента. К таким эффектам можно отнести: непосредственный разогрев носителей заряда, уже имеющихся в зоне полем импульса, разогрев носителей в полупроводниковой структуре за счет передачи к ней тепла от разогретых полем металлических контактов, изменение параметров глубоких уровней, изменение процессов генерации-рекомбинации, перераспределение и накопление объемного заряда в полупроводниковой структуре элемента и другое [1].

В случае импульсного воздействия на полупроводниковую структуру БТПП обратимые отказы могут быть вызваны несколькими факторами. В статьях [1], [6] описано воздействие СВЧ радиоимпульсов на биполярные транзисторы. Отмечается, что обратимые отказы связаны с отклонением от линейного закона зависимости изменения тока базы при увеличении мощности импульсной последовательности, а также с уменьшением коэффициента передачи по току β при росте мощности радиоимпульсов. Данные эффекты связываются с изменением режима работы транзистора при действии отрицательной части периода гармонического заполнения радиоимпульсов, наведенные токи которых становятся сравнимыми с режимными токами.

Анализ эффектов воздействия СКВИ будем проводить для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером. Такое включение БТПП часто применяется в МШУ, поскольку обеспечивает максимальный коэффициент усиления по току и напряжению. За основной путь воздействия СКВИ примем входную цепь, то есть цепь база-эмиттер.

В случае воздействия СКВИ на БТПП могут наблюдаться схожие эффекты. В общем случае можно исследовать эффекты, возникающие при воздействии положительных и отрицательных СКВИ в отдельности. При таком подходе влияние двухполярных видеоимпульсов можно рассматривать как совокупность откликов на последовательно идущие однополярные импульсы. Появление двухполярных СКВИ на входе устройства может быть обусловлено как его непосредственным наведением на узлы приемного тракта, в том числе антенну, так и влиянием реактивных сопротивлений различных конструктивных элементов прибора и электрической схемы, а также емкости р-п переходов полупроводниковой структуры БТПП.

Действие импульсов отрицательной полярности можно объяснить также как и в случае действия радиоимпульсов, смещением режима в сторону малых токов при обратном смещении перехода. При этом становится малой или даже нулевой (когда суммарное напряжение импульса и питания на базе становится отрицательным) эффективность эмиттера, которая в основном и определяет коэффициент передачи по току β [7]. Кроме того, очевидно имеет место инжекция неосновных носителей в базу транзистора.

Рассмотрение действия импульсов положительной полярности необходимо проводить для двух случаев. Первым является случай, когда амплитуда импульсов не превышает напряжение коллектор-эмиттер. При этом воздействие СКВИ не приводит к нарушению нормальной работы транзистора. Среднее значение низкочастотной составляющей тока коллектора остается неизменным. Во втором случае, когда амплитуда импульсов становится значительно больше напряжения коллектор-эмиттер, сильно проявляются эффекты деградации транзистора, выраженные в падении тока коллектора и коэффициента усиления. Это может быть связано с процессами избыточной инжекции неосновных носителей в базу транзистора из коллектора. Инжектированные носители вызывают увеличение плотности основных носителей в базе, что приводит к снижению эффективности в эмиттере. С ростом тока коллектора количество инжектированных носителей возрастает.

Необходимо также отметить тот факт, что зависимость снижения эффективности эмиттера от протекающего тока в обоих случаях имеет степенной характер. Но в случае увеличения коллекторного тока, т.е. в случае действия импульсов положительной полярности, показатель степени имеет более высокий порядок [7]. С этим может быть связано то, что воздействие импульсов положительной полярности будет выражено сильнее.

Исходя из выше описанных предположений можно заключить, что кумулятивный эффект при воздействии серии видеоимпульсов, как это было в униполярных приборах, возможен только в том случае, если избыточные инжектированные носители не успевают уйти из базы в межимпульсные промежутки. Порядок времени рассасывания инжектированных носителей определяется коэффициентом диффузии и током базы.

Важным является и наличие гетероперехода на границе эмиттера и базы, который умень-

шает практически до нуля ток основных носителей из базы в эмиттер. Это приводит к увеличению периода рассасывания избыточных основных носителей в базе, а, следовательно, и к увеличению периода, в течение которого эффективность эмиттера снижена по отношению к равновесному значению до воздействия СКВИ.

3. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальная установка, предназначенная для исследования воздействия последовательности видеоимпульсов на малошумящий усилитель на базе биполярного транзистора с гетеропереходом, представляет собой модификацию измерительного комплекса, описанного в [8]. Она включает в себя: аналоговый модуль, генератор сверхкоротких видеоимпульсов, генератор испытательных импульсов, источники питания, персональный компьютер, программно-аппаратный комплекс на РХИ-платформе компании National Instruments с разработанным на базе языка программирования LabVIEW программным обеспечением, теплоизолирующий модуль на основе сосуда Дьюара.

Электрическая схема аналогового модуля, представляющего собой малошумящий усилитель на основе БТГП. Усилитель выполнен на печатной плате, на которой исследуемый транзистор включен по схеме с общим эмиттером, и содержит входы для подключения напряжений питания, испытательных сигналов и выход для снятия сигнала с испытуемого транзистора. Рабочий режим транзистора задается внешними источниками напряжения. Вход аналогового модуля предназначен для подачи на базу транзистора последовательности сверхкоротких импульсов.

Блок-схема алгоритма экспериментального исследования представлена на рисунке 1. Экспериментальное исследование начинается с измерения статических параметров транзистора в отсутствие импульсов. В работе в качестве контролируемого функционального параметра был выбран ток коллектора. Далее в ходе эксперимента устанавливается амплитуда и частота следования, которые в совокупности определяют среднюю мощность последовательности СКВИ. Сформированная последовательность видеоимпульсов с выхода генератора поступает на вход испытательного модуля. С помощью АЦП в составе РХИ-платформы с интервалом в 1 мс измеряются мгновенные значения напряжения на резисторе, включенном в цепь коллектора. Длительность импульсной последовательности задается таким образом, чтобы за время ее действия успевал завершаться переходный процесс, наблюдаемый по изменению низкочастотной составляющей измеряемого тока коллектора (рисунок 2 б). По окончании воздействия наблюдается восстановление тока до исходного значения, после чего цикл измерений повторяется для всех необходимых значений мощностей импульсной последовательности и режимов работы МШУ. Все результаты измерений сохраняются в цифровом виде.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рисунке 2 а представлена временная диаграмма тока коллектора транзистора ВФР 640 при действии последовательности СКВИ с частотой 100 кГц. Если рассматривать процесс падения тока коллектора в меньшем масштабе (рисунок 2 б), видно, что минимальное значение тока коллектора достигается только после действия определенного количества СКВИ, то есть имеет место кумулятивный эффект. Точное количество поданных импульсов в последовательности не имеет существенного значения, поскольку все измерения проводятся по достижению низкочастотной составляющей тока коллектора своего минимального значения. Это значение фиксируется и нормируется на значение тока коллектора до воздействия последовательности СКВИ. Все измерения проводятся для диапазона амплитуд импульсов в серии от 25В до 75В (с шагом в 3 дБ).

Результаты экспериментальных исследований обрабатываются программным обеспечением

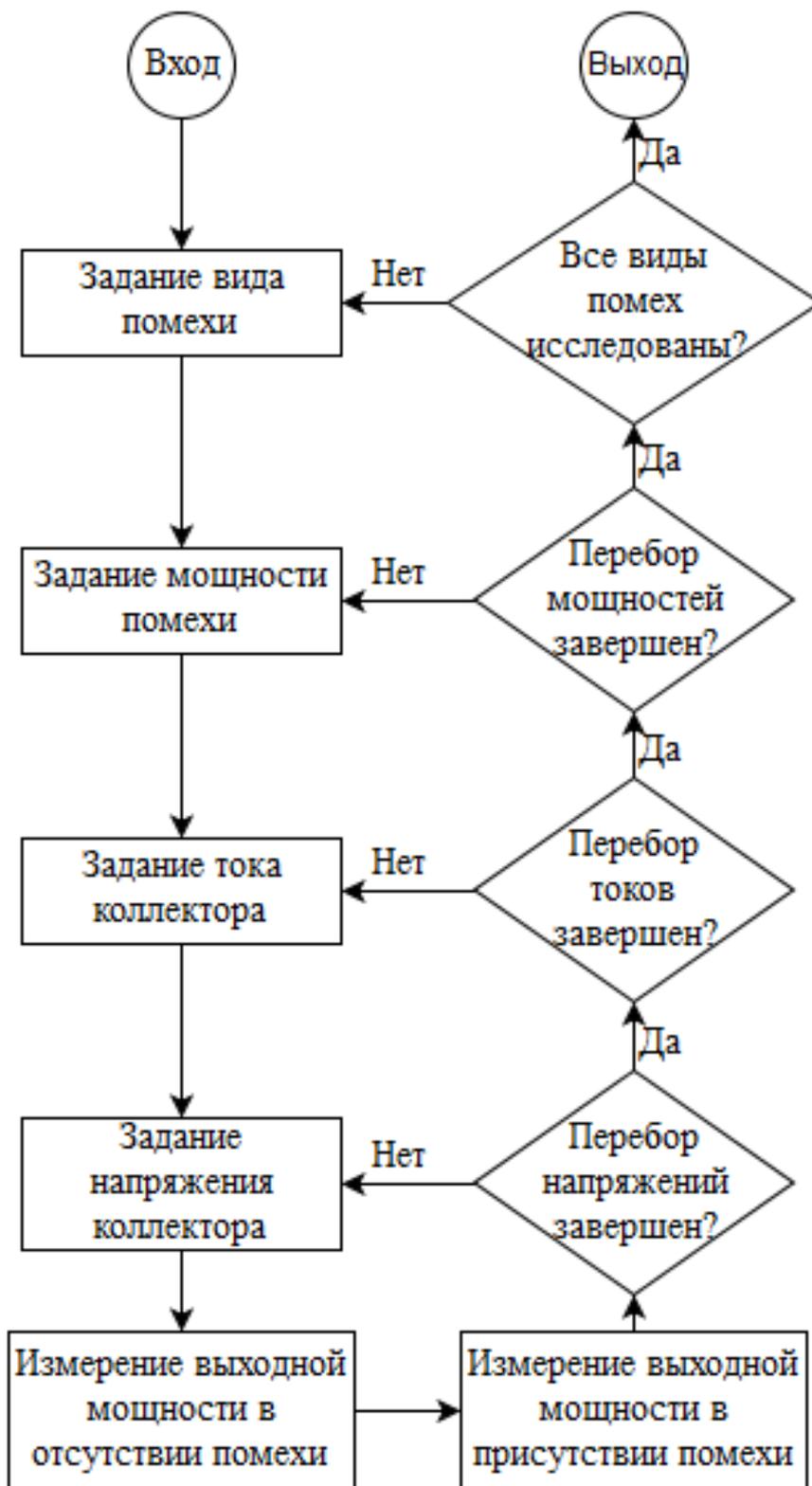
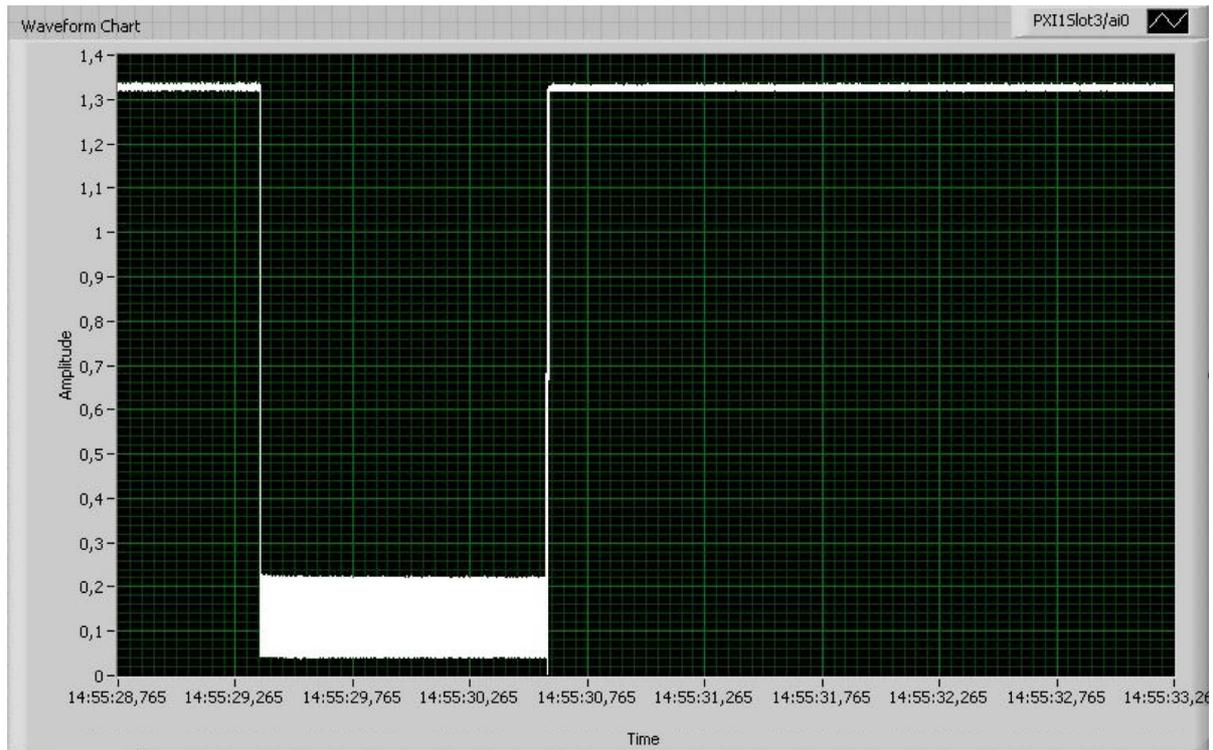
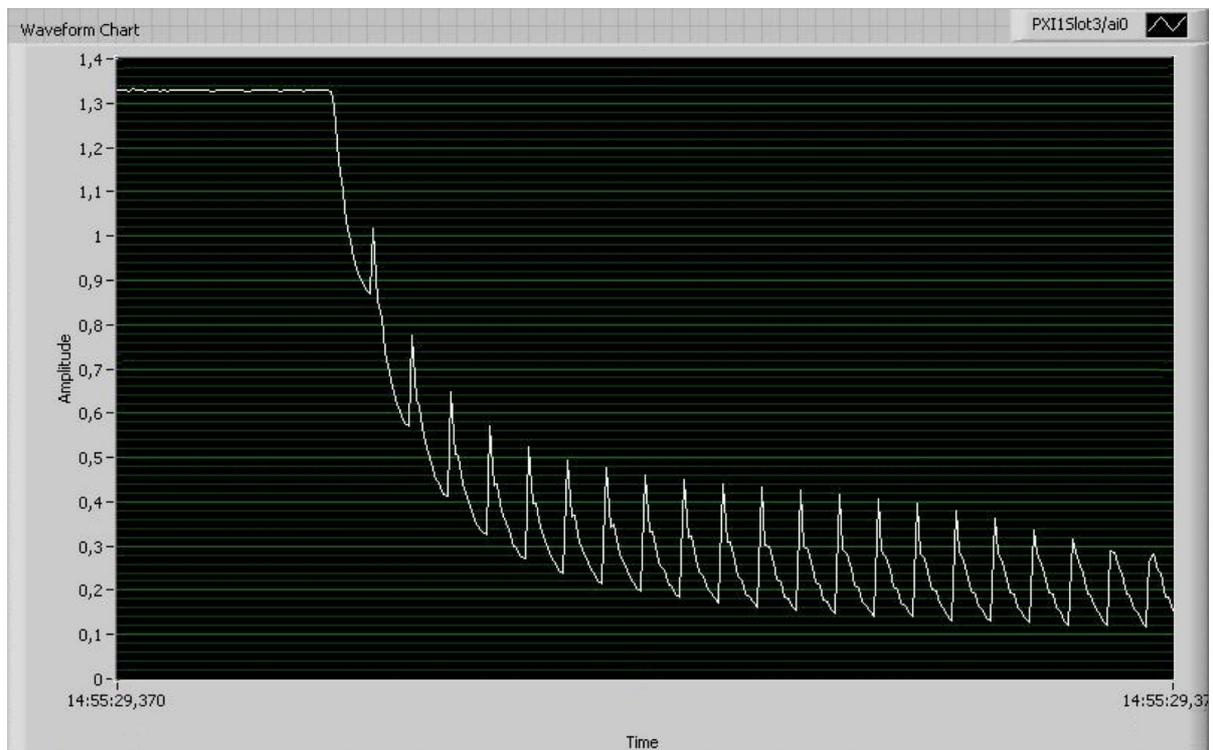


Рис. 1. Алгоритм экспериментального исследования эффектов импульсного воздействия по-следовательности СКВИ, подаваемой на вход МШУ.



а)



б)

Рис. 2. Зависимость выходного тока БТГП под воздействием серии СКВИ (а – в большом, б – в малом масштабе по времени).

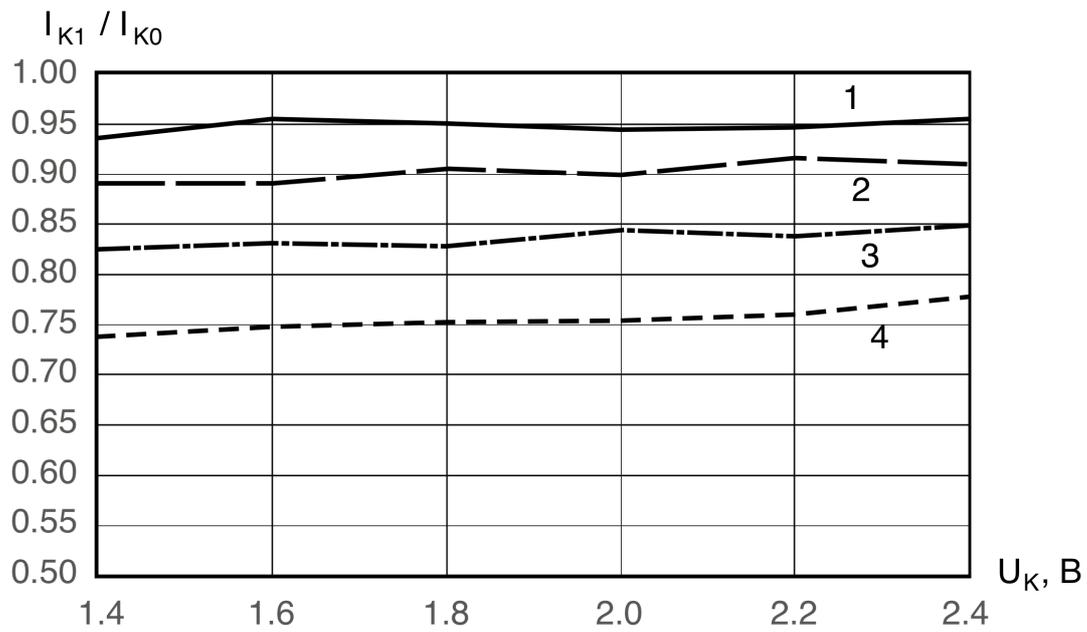


Рис. 3. Зависимости относительных минимальных значений тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер при подаче последовательности сверхкоротких импульсов амплитудами 25 В (кривая 1), 36 В (кривая 2), 51 В (кривая 3), 73 В (кривая 4) и частотой следования 100 кГц.

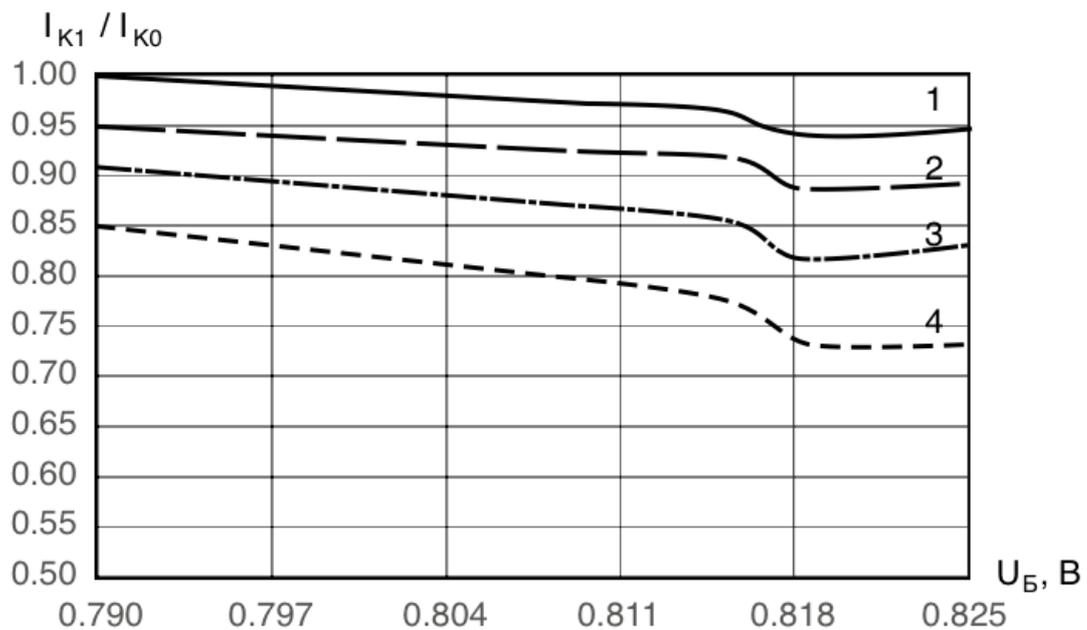


Рис. 4. Зависимости относительных минимальных значений тока коллектора от напряжения база-эмиттер при подаче последовательности сверхкоротких импульсов амплитудами 25 В (кривая 1), 36 В (кривая 2), 51 В (кривая 3), 73 В (кривая 4) и частотой следования 100 кГц.

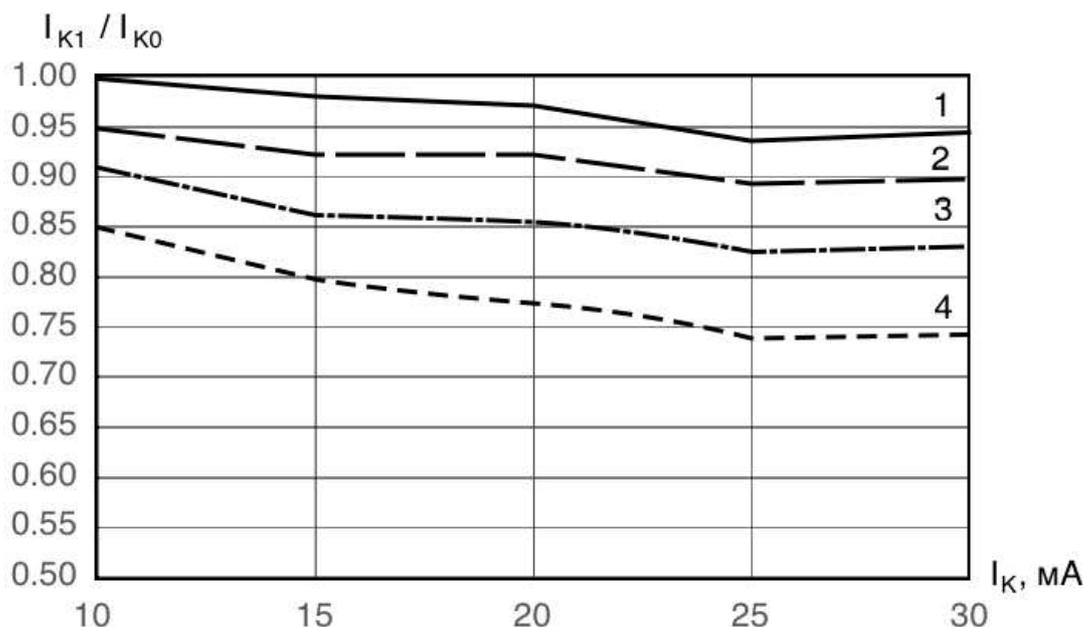


Рис. 5. Зависимости относительных минимальных значений тока коллектора от тока коллектора при подаче последовательности сверхкоротких импульсов амплитудами 25 В (кривая 1), 36 В (кривая 2), 51 В (кривая 3), 73 В (кривая 4) и частотой следования 100 кГц.

ем измерительного комплекса и представляются в виде графических зависимостей. На рисунке 3 представлены зависимости относительных минимальных значений тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер при подаче последовательности сверхкоротких импульсов амплитудами 25, 36, 51, 73 В и частотой следования 100 кГц. Напряжение база-эмиттер при этом поддерживалось на постоянном уровне и было равно 0,825 В. Видно, что степень воздействия практически полностью определяется амплитудой импульсов и не зависит от напряжения на коллекторе. На рисунке 4 представлены аналогичные зависимости, но от напряжения база-эмиттер. Напряжение на коллекторе не менялось и было равно 1,4 В. Видно, что с увеличением значения напряжения воздействие усиливается. Это может быть связано с увеличением коллекторного тока, что подтверждается зависимостями относительных минимальных значений тока коллектора от тока коллектора для разных амплитуд воздействий, представленными на рисунке 5.

С увеличением тока коллектора уменьшается пороговое значение напряжение СКВИ, при котором начинает падать эффективность эмиттера, что в свою очередь приводит к уменьшению тока коллектора и ухудшению статических характеристик транзистора.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование статических характеристик БТПГ при воздействии СКВИ. Показано, что причиной, вызывающей временное нарушение работы (деградацию) транзистора, может являться эффект снижения эффективности эмиттера, как при малых токах, так и при больших.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы / В. В. Антипин, В. А. Годовицын, Д. В. Громов и др. // Зарубежная радиоэлектроника. — 1995. — № 1. — С. 37–53.
2. Баранов, И. А. Стойкость твердотельных модулей СВЧ к кратковременным электроперегрузкам / И. А. Баранов, О. И. Обрезан, А. И. Ропий. — Обзоры по электронной технике. Сер. 1, СВЧ-техника. М. : ЦНИИ “Электроника”, 1997. — 111 с.
3. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием / Под ред. Ю. М. Перунова. — М. : Радиотехника, 2003. — 416 с.
4. Современное состояние и перспективы развития авиационных средств радиоэлектронной борьбы / О. В. Викулов, В. Д. Добыкин, В. В. Дрогалин и др. // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. — 1998. — № 12. — С. 3–16.
5. Полевые транзисторы с затвором Шоттки при воздействии сверхкоротких импульсных перегрузок в широком температурном диапазоне / А. М. Бобрешов, И. С. Коровченко, В. А. Степкин, Г. К. Усков // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика, математика. — 2013. — № 2. — С. 7–14.
6. Amdory, R. A. Microwave interference effect in bipolar transistors / R. A. Amdory, V. G. Puglielly, R. E. Richardson // IEEE Trans. — 1975. — V. 7 EMC-17, № 4. — P. 216–225.
7. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн. 1 / С. Зи. — М. : Мир, 1984. — 456 с.
8. Автоматизированный измерительный стенд для оценки стойкости радиоэлектронной аппаратуры к воздействию сверхкоротких импульсных помех / А. М. Бобрешов [и др.] // Радиотехника. — 2011. — № 8. — С. 54–57.

REFERENCES

1. Antipin V.V., Godovicyn V.A., Gromov D.V, Kazhevnikov A.S., Ravaev A.A. The influence of powerful pulse microwave interferences on semiconductor devices and integrated circuits. [Antipin V.V., Godovicyn V.A., Gromov D.V, Kazhevnikov A.S., Ravaev A.A. Vliyanie moshhnykh impul'snykh mikrovolnovykh pomex na poluprovodnikovye pribory i integral'nye mikroskemy]. *Zarubezhnaya radioelektronika — Foreign electronics*, 1995, no. 1, pp. 37–53.
2. Baranov I.A., Obrezan O.I., Ropij A.I. Resistance of solid-state microwave modules to short electrical overloads. [Baranov I.A., Obrezan O.I., Ropij A.I. Stojkost' tverdotel'nykh modulej SVCh k kratkovremennym e'lektroperegruzkam]. Reviews on electronic engineering. Ser.1, The microwave equipment, Moscow: CNII «Elektronika», 1997, 111 p.
3. Electronic suppression of information channels of weapon control systems. Pod red. Yu.M. Perunova. [Radioelektronnoe podavlenie informacionnykh kanalov sistem upravleniya oruzhiem. Pod red. Yu.M. Perunova]. Moscow: Radiotekhnika, 2003, 416 p.
4. Vikulov O.V., Dobykin V.D., Drogalin V.V. i dr. Current state and prospects of development of aviation electronic warfare. [Vikulov O.V., Dobykin V.D., Drogalin V.V. i dr. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya aviacionnykh sredstv radioelektronnoj bor'by]. *Zarubezhnaya radioelektronika. Uspexi sovremennoj radioelektroniki — Foreign Radioelectronics. Successes of modern radio electronics*, 1998, no. 12, pp. 3–16.
5. Bobreshov A.M., Korovchenko I.S., Stepkin V.A., Uskov G.K. Low-noise MESFETS under ultra-short pulse overloads exposure in spread temperature band. [Bobreshov A.M., Korovchenko I.S., Stepkin V.A., Uskov G.K. Polevye tranzistory s zatvorom Shottki pri vozdejstvii sverxkorotkix impul'snykh peregruzok v shirokom temperaturnom diapazone]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika — Proceedings of*

Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics, 2013, no. 2, pp. 7–14.

6. Amdory R.A., Puglielly V.G., Richardson R.E. Microwave interference effect in bipolar transistors. IEEE Trans., 1975, v. 7 EMC-17, no. 4, pp. 216–225.

7. Zi S. Physics of semiconductor devices: 2 vols. V. 1. [Zi S. Fizika poluprovodnikovyx priborov: V 2-x knigax. Kn. 1]. Moscow: Mir, 1984, 456 p.

8. Bobreshov A.M. et. al. Automated measuring stand for estimating the durability of electronic equipment to the effects of ultrashort pulse interference. [Bobreshov A.M. i dr. Avtomatizirovannyj izmeritel'nyj stend dlya ocenki stojkosti radioelektronnoj apparatury k vozdeystviyu sverxkorotkix impul'snyx pomex]. Radiotekhnika – Radio, 2011, no. 8, pp. 54–57.

Бобрешов Анатолий Михайлович, декан физического факультета, заведующий кафедрой электроники физического факультета ФГБОУ ВО “Воронежский государственный университет”, доктор физико-математических наук, профессор, Воронеж, Российская Федерация
E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru
Тел.: +7(910)479-79-45

Bobreshov Anatoly Mikhailovich, Dean of the Physics faculty, Head of the Department of Electronics, Voronezh State University, doctor of physical and mathematical science, professor, Voronezh, Russian Federation
E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru
Tel.: +7(910)479-79-45

Коровченко Игорь Сергеевич, доцент кафедры электроники физического факультета ФГБОУ ВО “Воронежский государственный университет”, кандидат физико-математических наук, Воронеж, Российская Федерация
E-mail: korovchenko@phys.vsu.ru
Тел.: +7(904)212-13-07

Korovchenko Igor Sergeevich, associate professor of the Department of Electronics, Physics faculty, Voronezh State University, candidate of physical and mathematical sciences, Voronezh, Russian Federation
E-mail: korovchenko@phys.vsu.ru
Tel.: +7(904)212-13-07

Степкин Владислав Андреевич, доцент кафедры электроники физического факультета ФГБОУ ВО “Воронежский государственный университет”, кандидат физико-математических наук, Воронеж, Российская Федерация
E-mail: stepkin@phys.vsu.ru
Тел.: +7(920)469-45-30

Stepkin Vladislav Andreevich, associate professor of the Department of Electronics, Physics faculty, Voronezh State University, candidate of physical and mathematical sciences, Voronezh, Russian Federation
E-mail: stepkin@phys.vsu.ru
Tel.: +7(920)469-45-30

Усков Григорий Константинович, доцент кафедры электроники физического факультета ФГБОУ ВО “Воронежский государственный университет”, доктор физико-математических наук, доцент, Воронеж, Российская Федерация
E-mail: uskov@phys.vsu.ru
Тел.: +7(952)953-82-94

Uskov Gregory Konstantinovich, associate professor of the Department of Electronics, Physics faculty, Voronezh State University, doctor of physical and mathematical sciences, associate professor, Voronezh, Russian Federation
E-mail: uskov@phys.vsu.ru
Tel.: +7(952)953-82-94

*Лэ Куанг Тук, аспирант кафедры электроники физического факультета ФГБОУ ВО “Воронежский государственный университет”, Воронеж, Российская Федерация
E-mail: lequangtuc@gmail.com
Тел.: +7(909)214-09-85*

*Le Quang Tuc, postgraduate student at the Faculty of Physics, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation
E-mail: lequangtuc@gmail.com
Tel.: +7(909)214-09-85*