

УДК 621.382.323

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

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 30.08.2013 г.

Аннотация: проведено экспериментальное исследование зависимости обратимых эффектов воздействия сверхкоротких видеоимпульсов на однокаскадный малошумящий усилитель на основе арсенид-галлиевого транзистора с затвором Шоттки в широком диапазоне температур. Выявлена сложная зависимость эффектов, обусловленная природой глубоких уровней полуизолирующей подложки и особенностями полупроводниковой структуры транзистора.

Ключевые слова: обратимые эффекты, сверхкороткий видеоимпульс, полуизолирующая подложка, глубокие уровни, полевой транзистор с затвором Шоттки, малошумящий усилитель, зависимость от температуры.

Abstract: experimental investigation of low-noise amplifier, which based GaAs MESFET, under ultra-short pulses exposure was carried out in spread temperature band. Revealed a complex dependence of the effects due to the nature of the deep levels of semi-insulating substrate and the characteristics of semiconductor transistor structure.

Keywords: recovery effects, ultra-short pulses, semi-insulated substrate, deep levels, GaAs MESFET, low-noise amplifier, temperature dependences.

1. ВВЕДЕНИЕ

Стойкость радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) к воздействию импульсных перегрузок различной природы является важным параметром современной радиоаппаратуры СВЧ диапазона [1, 2]. В связи со стремительным развитием широкополосных систем передачи информации по радиоканалам среди импульсных помех все чаще выделяют последовательности радио- и видеоимпульсов большой амплитуды. Последствием воздействия таких помех могут быть обратимые и необратимые отказы различных элементов радиоприемного тракта. Наиболее уязвимыми при этом являются входные транзисторные малошумящие усилители (МШУ).

Особый интерес среди импульсных помех представляют субнаносекундные сверхкороткие видеоимпульсы (СКВИ). Высокая амплитуда импульсов, воздействующих на входные цепи приемника, может приводить к нарушению работоспособности радиоприемной аппаратуры.

© Бобрешов А. М., Коровченко И. С., Степкин В. А., Усков Г. К., 2013

Как показывают современные исследования, при действии СКВИ наиболее вероятной является обратимая деградация параметров полупроводниковых структур транзисторов.

Эффекты воздействия СКВИ на различные полупроводниковые приборы подробно изучены в работах [1 – 8]. Однако определенный интерес представляют исследования таких эффектов при различных температурах окружающей среды, которым уделено недостаточно внимания. Актуальность подобных исследований определяется необходимостью обеспечения устойчивой работы современных РЭА при воздействии помех в экстремальных метеоусловиях, обусловленных различным временем года и их геопозицией.

При воздействии СКВИ на МШУ основным уязвимым элементом электронной схемы является активный полупроводниковый элемент [1 – 3]. В качестве активных элементов современных МШУ обычно используются полевые транзисторы с затвором Шоттки (ПТШ), транзисторы с высокой подвижностью электронов (high electron mobility transistor – НЕМТ).

Целью данной работы является исследование зависимости процессов обратимой деградации полевого транзистора с барьером Шоттки (ПТШ) при воздействии по входной цепи последовательности сверхкоротких видеоимпульсов от температуры окружающей среды.

2. ФИЗИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ОБРАТИМЫХ ОТКАЗОВ

Возникающие при воздействии СКВИ отрицательной полярности на затвор транзистора физические процессы определяются параметрами глубоких уровней в полуизолирующей подложке транзистора [9]. В случае, когда значение напряжения импульса во входной цепи затвор-исток превышает значение напряжения отсечки ПТШ [6 – 8, 10, 11], происходит образование избыточного объемного заряда в подложке транзистора. Данный процесс приводит к перераспределению объемного заряда в канале и уменьшению толщины активного слоя, который определяет значение тока стока ПТШ [11]. После действия импульса за счет тепловых процессов в подложке структура и значения объемного заряда стремятся к тому, что было до импульсного воздействия [1 – 4]. Если период следования СКВИ меньше, чем время релаксации глубоких уровней, происходит накопление последствий импульсного воздействия (кумулятивный эффект) [1, 2].

Время релаксации носителей, захваченных на глубокие уровни после электрического импульсного воздействия, определяется зависимостью скоростей эмиссии основных и неосновных носителей от температуры [9], имеющих следующий вид:

$$e_i = \frac{\sigma_i \langle v_i \rangle N_{Di}}{g_i} \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (1)$$

где индекс i , равный 1 определяет величины для неосновных носителей, а равный 2 – для основных, σ_i – сечение захвата основных или неосновных носителей, $\langle v_i \rangle$ – средняя тепловая скорость основных или неосновных носителей, N_{Di} – эффективная плотность состояний в зоне основных или неосновных носителей, g_i – вырождение глубокого уровня для основных или неосновных носителей, ΔE – величина разностей энергий глубокого уровня и зоной неосновных носителей. Скорости эмиссий носителей, захваченных разными глубокими уровнями, для каждой температуры существенно отличаются. При этом время релаксации определяется наиболее длительным процессом разрядки глубоких уровней.

Зависимость времени релаксации от температуры имеет локальные экстремумы. Значения максимумов и минимумов на температурных зависимостях времени релаксации могут зависеть от величины напряжения сверхкороткого импульса, как показано это для электрических микросекундных импульсов в [9].

Другим важным параметром является концентрация присутствующих в канале свободных носителей. Зависимость концентрации свободных носителей от температуры можно представить выражением [12]:

$$n(T) = VT^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right), \quad (2)$$

в котором V – параметр материала, а E_g – ширина запрещенной зоны, также зависящая от температуры:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{(T + \beta)}, \quad (3)$$

где α и β – постоянные, определяемые для каждого материала, $E_g(0)$ – ширина запрещенной зоны при температуре абсолютного нуля. Концентрация свободных носителей в канале и ширина активной области будут определять величину тока стока ПТШ.

Из выше сказанного следует, что время релаксации тока стока транзистора и его значения во время и после воздействия последовательности СКВИ зависят от температуры сложным образом и, в основном, определяется двумя процессами: генерацией свободных носителей в канале, которая представлена зависимостью (2), и релаксацией ширины потенциального барьера на границе раздела канал-подложка, которая определяется выражением для скорости эмиссии носителей, захваченных на глубокие уровни (1).

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Экспериментальная установка, описанная в [13] и предназначенная для изучения воздействия на ПТШ последовательности видеоимпульсов 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 установленным программным обеспечением LabVIEW, теплоизолирующий модуль на основе сосуда Дюара.

Аналоговый модуль, представляющий собой малощумящий усилитель на основе ПТШ, выполнен на печатной плате, на которой предусмотрено место для установки тестируемого транзистора, содержится разъемы для подключения напряжений питания, испытательных сигналов и выходных сигналов, снимаемых с испытуемого транзистора. Транзистор включен по схеме с общим истоком. Рабочий режим транзистора задается внешними источниками напряжения. Вход аналогового модуля предназначен для подачи на затвор транзистора сверхкоротких импульсов.

Аналоговый модуль помещен в сосуд Дюара, на дне которого находится жидкий азот. В области температур ниже комнатной температура аналогового модуля регулируется путем изменения его расположения относительно поверхности жидкого азота. При температурах выше комнатной нагревание аналогового модуля происходит с помощью потока горячего воздуха. Все значения температур контролируются с помощью термодатчика, который расположен в непосредственной близости с ПТШ.

На рисунке 1 представлена блок-схема алгоритма экспериментального исследования. В ходе эксперимента устанавливается амплитуда и частота следования СКВИ. Сформированная последовательность видеоимпульсов с выхода генератора поступает на вход испытательного модуля. С резистора в цепи стока с помощью АЦП в составе РХИ-платформы считывается мгновенные значения напряжения с периодом 1 мс.

На рисунке 2 представлены осциллограммы для тока стока транзистора 3П362А-9 при действии последовательности СКВИ с частотой 10 Гц при температуре $T \approx 20$ °С и при

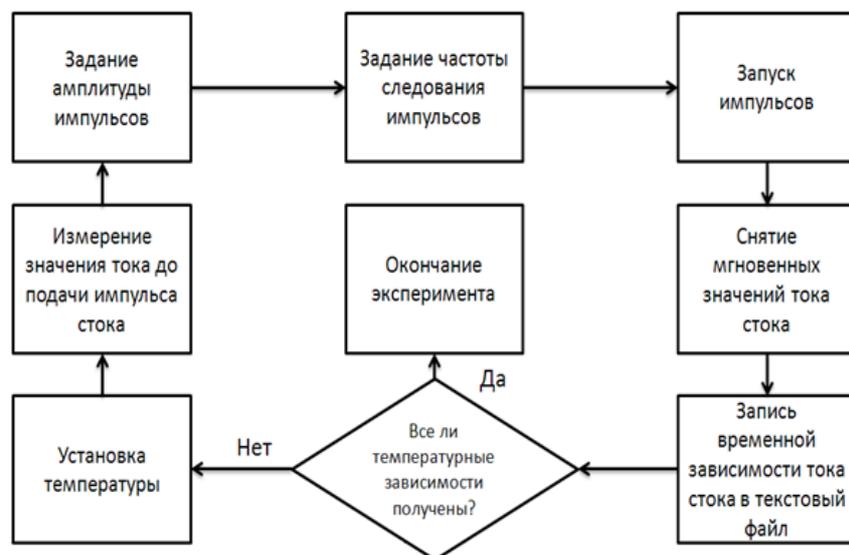


Рис. 1. Алгоритм экспериментального исследования эффектов импульсного воздействия по последовательности СКВИ, подаваемой на вход МШУ, при различной температуре окружающей среды.

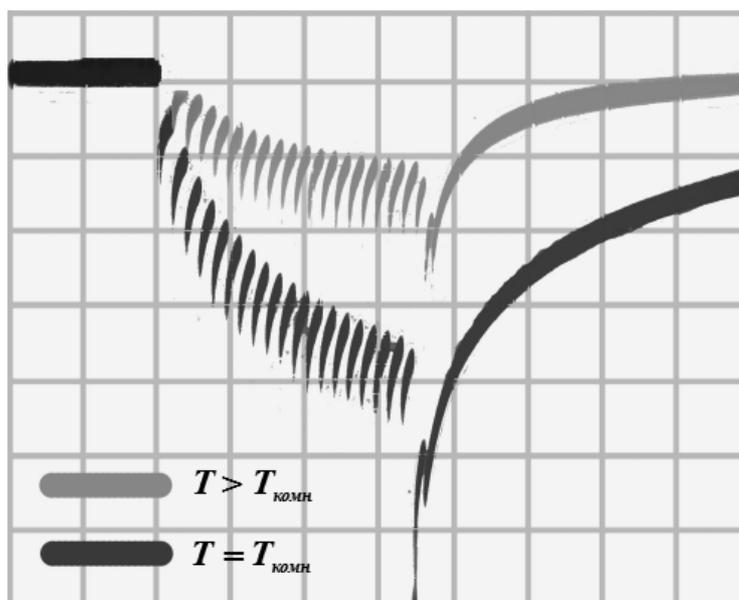


Рис. 2. Осциллограммы тока стока транзистора 3П362А-9 при различных температурах.

температуре $T \approx 45 \text{ }^\circ\text{C}$. На осциллограмме видно, что время релаксационных процессов, а именно время восстановления тока стока транзистора, уменьшается при увеличении температуры. На осциллограмме видно, что минимальное значение тока стока достигается не после первого импульса, а после действия нескольких СКВИ. Точное количество поданных СКВИ импульсов в последовательности не имеет существенного значения, поскольку начало изменений связано с полностью заряженными глубокими уровнями. В эксперименте измеряется величина минимального тока стока, нормированная на значение тока стока до воздействия

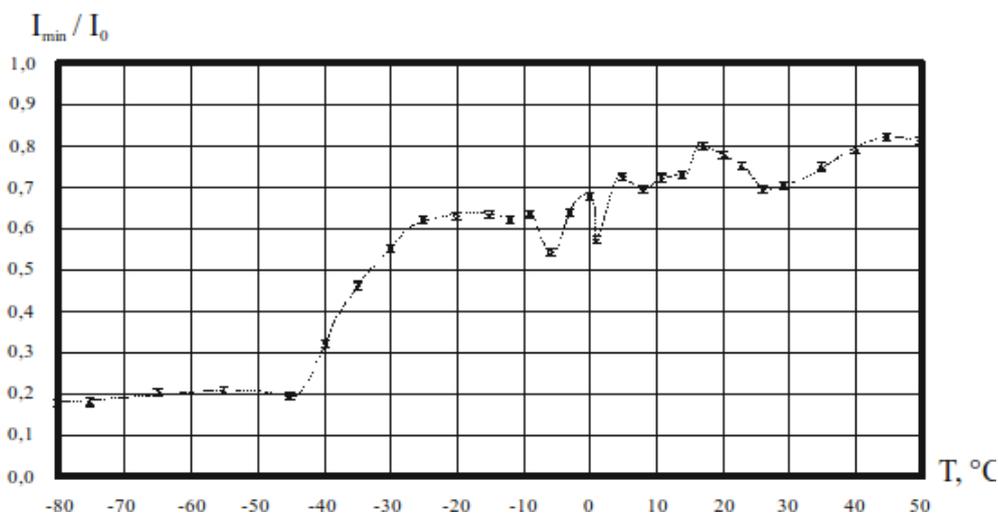


Рис. 3. Температурная зависимость относительных минимальных значений тока стока ПТШ 3П362А-9 во время действия последовательности СКВИ на вход.

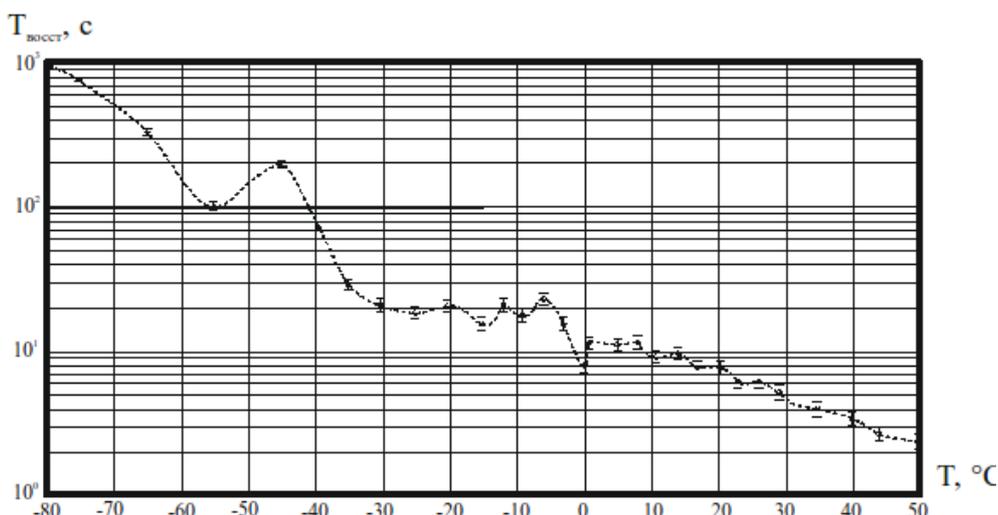


Рис. 4. Температурная зависимость времени восстановления тока стока ПТШ 3П362А-9 при подачи последовательности СКВИ на вход.

последовательности СКВИ. После прекращения воздействия СКВИ фиксируется время восстановления тока стока. Все измерения проводятся для широкого диапазона температур (от $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Результаты экспериментальных исследований представлены в виде графических зависимостей. На рисунке 3 представлена температурная зависимость относительных минимальных значений тока стока при подаче последовательности сверхкоротких импульсов амплитудой 22 В и частотой следования 10 кГц . При температурах ниже $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ относительные минимальные значения тока стока существенно меньше, чем при комнатной температуре и практически не изменяются. При температурах выше $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ относительное минимальное значение тока стока растет и меняется в диапазоне от $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ почти на порядок. При температурах выше $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ на относительное минимальное значение тока стока оказывают влияние

два конкурирующих процесса: с одной стороны это релаксация глубоких уровней в подложке ПТШ, время которой определяется скоростью эмиссии носителей (1), с другой — генерация свободных носителей в канале, определяемая процессами (2), (3). При этом зависимость относительных минимальных значений тока стока при подаче последовательности сверхкоротких импульсов имеет несколько локальных максимумов и минимумов.

На рисунке 4 представлена зависимость времени восстановления тока стока транзистора от температуры окружающей среды при подаче последовательности СКВИ. Наибольшее время восстановления составляет порядка 770 секунд при температуре $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. С ростом температуры время восстановления уменьшается. Однако при определенных температурах присутствуют локальные экстремумы, которые связаны с физической природой обратимых эффектов, возникающих при воздействии последовательности СКВИ. Конкурирующие физические процессы описаны выше. Однако влияние температуры на время релаксации тока стока после воздействия последовательности СКВИ оказывается более выраженным.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования позволяют говорить о сильной зависимости эффектов обратимой деградации арсенид-галлиевых ПТШ при воздействии последовательности сверхкоротких видеоимпульсов от температуры. При низких температурах степень воздействия существенно возрастает.

Полученные зависимости могут быть объяснены физическими процессами, происходящими в полупроводниковой структуре ПТШ. Полученные результаты согласуются с ранее проведенными исследованиями [9, 14 – 16], в которых сложная температурная зависимость процессов релаксации при импульсных воздействиях – эмиссией носителей заряда, захваченных на глубокие уровни – используется для измерения концентраций и значений уровней энергии в запрещенной зоне полупроводников.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы" (ГК № 14.514.11.4079).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Бобрешов А. М. Исследование обратимых отказов GaAs ПТШ при импульсных перегрузках электроперегрузок / А. М. Бобрешов [и др.] // Известия вузов. Электроника. — 2006. — № 5. — С. 69–77.
- [2] Бобрешов А. М. Экспериментальное определение стойкости полевых транзисторов к импульсным перегрузкам / А. М. Бобрешов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. — 2007. — № 5. — С. 108–113.
- [3] Экспериментальное исследование обратимой деградации GaAs ПТШ под действием сверхкоротких видеоимпульсов / А. М. Бобрешов [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2007. — Т. 10, № 1. — С. 104–111.
- [4] Обратимые отказы НЕМТ-транзисторов под действием сверхкоротких видеоимпульсов / А. М. Бобрешов, М. П. Ряполов, Г. К. Усков // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2009. — Т. 12, № 1. — С. 62–67.
- [5] Воздействие сверхкоротких импульсных перегрузок на ПТШ, изготовленные на полупроводниковых подложках из разных партий / А. М. Бобрешов, И. С. Коровченко, В. А. Степкин, Г. К. Усков // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Физика. Математика. — Воронеж, 2011.

- [6] Характеристики электромагнитной совместимости малошумящего усилителя на полевом транзисторе с затвором Шоттки при воздействии сверхкоротких импульсных помех / А.М. Бобрешов, И.С. Коровченко, В.А. Степкин, Г.К. Усков // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. — Киев, 2011. — С. 40–45.
- [7] Влияние концентрации глубоких уровней в полуизолирующих подложках на электроперегрузки GaAs ПТШ / А.М. Бобрешов, А.В. Иванцов, И.С. Коровченко, В.А. Степкин, Г.К. Усков // Радиотехника. — Москва, 2012. — № 5. — С. 99–101 .
- [8] Влияние сверхширокополосной помехи с высокой пиковой мощностью на функционирование малошумящих GaAs ПТШ / А.М. Бобрешов, И.С. Коровченко, Ю.Н. Нестеренко, В.А. Степкин, Г.К. Усков // Радиотехника. — Москва, 2013. — № 4. — С. 54–57.
- [9] Lang D. V. Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors / D. V. Lang // J. Appl. Phys. — 1974. — V. 45. — № 7. — P. 3023–3032.
- [10] Kocot C. Backgating in GaAs MESFET's / C. Kocot, C. A. Stolte // IEEE Trans. Electron Devices, 1982. — v. 29. — №7. — P. 1059–1064.
- [11] Itoh T. Stability of Performance and Interfacial Problems in GaAs MESFET's / T. Itoh, H. Yanai // IEEE Transactions on Electron Devices, 1980. — V. ED-27. — № 6. — P. 1037–1045.
- [12] Основы физики полупроводников [Текст] / Питер Ю. пер. с англ. И. И. Решениной; под ред. Б.П. Захарченко. — М.: Физматлит, 2002. — 560 с.
- [13] Бобрешов А. М. Автоматизированный измерительный стенд для оценки стойкости радиоэлектронной аппаратуры к воздействию сверхкоротких импульсных помех / А. М. Бобрешов, [и др.] // Радиотехника. — 2011. — № 8. — С. 54–57.
- [14] Martin G.M. Compensation mechanisms in GaAs[Text] / G.M.Martin [et al.]// J. Appl. Phys. — 1980. — V. 51, № 5. — P. 2840–2852.
- [15] Martin G. M. Electron traps in bulk and epitaxial GaAs crystals [Text] / G. M. Martin, A.Mitonneau, A. Mircea // Electron. Lett. — 1977. — V. 13. — P. 191–193.
- [16] Martin G. M. Hole traps in bulk and epitaxial GaAs crystals [Text] / G. M. Martin, A. Mitonneau, A. Mircea // Electron. Lett. — 1977. — V. 13. — P. 666–668.

Бобрешов Анатолий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры электроники ВГУ
E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru
Тел.: +7(473)220-82-84

Bobreshov Anatoly Mikhailovich, Ph.D. of radiophysics, full professor of Physical department of Voronezh state university
E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru
Tel.: +7(473)220-82-84

Коровченко Игорь Сергеевич, кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры электроники ВГУ
E-mail: korovchenko@phys.vsu.ru
Тел.: +7(473)220-82-84

Korovchenko Igor Sergeevich, Ph.D. of radiophysics, assistant of Physical department of Voronezh state university
E-mail: korovchenko@phys.vsu.ru
Tel.: +7(473)220-82-84

Степкин Владислав Андреевич, аспирант кафедры электроники ВГУ
E-mail: stepkin@phys.vsu.ru
Тел.: +7(473)220-82-84

Stepkin Vladislav Andreevich, aspirant of Physical department of Voronezh state university
E-mail: stepkin@phys.vsu.ru
Tel.: +7(473)220-82-84

Усков Григорий Константинович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники ВГУ
E-mail: uskov@phys.vsu.ru
Тел.: +7(473)220-82-84

Uskov Grigory Konstantinovich, Ph.D. of radiophysics, associate professor of Physical department of Voronezh state university
E-mail: uskov@phys.vsu.ru
Tel.: +7(473)220-82-84