



УДК 621.382

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.427.429

# РАДИАЦИОННО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЧ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИХ БИС НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

## RADIATION HARDENING TECHNIQUE FOR MITIGATING DISPLACEMENT DAMAGE EFFECTS IN A3B5 HBTs MICROWAVE FUNCTIONAL BLOCKS

УСАЧЕВ НИКОЛАЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ  
Nausach@spels.ru

USACHEV NIKOLAY A.  
Nausach@spels.ru

СОТСКОВ ДЕНИС ИВАНОВИЧ

SOTSKOV DENIS I.

ЕЛЕСИН ВАДИМ ВЛАДИМИРОВИЧ

ELESIN VADIM V.

НАЗАРОВА ГАЛИНА НИКОЛАЕВНА

NAZAROVA GALINA N.

МЕТЕЛКИН ИГОРЬ ОЛЕГОВИЧ

METELKIN IGOR O.

ЧУКОВ ГЕОРГИЙ ВИКТОРОВИЧ

CHUKOV GEORGE V.

КУЗНЕЦОВ АЛЕКСАНДР ГЕННАДЬЕВИЧ

KUZNETSOV ALEXANDER G.

Национальный исследовательский  
ядерный университет «МИФИ»  
115409, Россия, г. Москва, Каширское ш., 31  
АО «ЭНПО СПЭЛС»  
115409, Россия, г. Москва, Каширское ш., 31

National Research Nuclear University MPhI,  
31 Kashirskoe Highway, Moscow, 115409, Russia  
JSC "Specialized Electronic Systems"  
31 Kashirskoe Highway, Moscow, 115409, Russia

Представлены результаты радиационно-ориентированного проектирования СВЧ функциональных блоков статического делителя и буферного усилителя с рабочими частотами до 10 ГГц, предназначенных для изготовления по технологии на основе АЗВ5 гетероструктурных биполярных транзисторов.

*Ключевые слова:* СВЧ; функциональный блок; БИС; приемопередатчик; радиационная стойкость; проектирование.

The paper presents radiation hardening by design technique for mitigating displacement damage effects in A3B5 HBTs frequency divider and buffer amplifier with operating frequency up to 10 GHz.

*Keywords:* microwave; functional block; VLSI; transceiver; radiation hardening; design.

Базовые технологические процессы (БТП) на основе гетероструктурных биполярных транзисторов (ГБТ), выполненных на соединениях кремний-германия (SiGe) и АЗВ5 с граничными частотами усиления (Ft) 30–70 ГГц и более, являются предпочтительными для создания ряда СВЧ функциональных блоков (ФБ) приемопередающих БИС, таких как генераторы, управляемые напряжением (ГУН), делители частоты (ДЧ), буферные (БУ) и выходные усилители мощности (УМ). К преимуществам ГБТ перед полевыми транзисторами (МОП-транзисторы, гетероструктурные транзисторы с затвором Шоттки) следует отнести меньшее значение фликкер-шума и более высокие пробивные напряжения (до 5–10 В и более) при сравнимых, а в ряде случаев превосходящих значениях Ft [1–5].

Существенное влияние структурных повреждений при радиационном воздействии на характеристики СВЧ-изделий на основе SiGe и АЗВ5 ГБТ приводит к необходимости выполнения операций прогнозирования и обеспечения стойкости на этапах схемно-топологического проектирования. Следует отметить, что реализация подхода

радиационно-ориентированного проектирования (РОП) с использованием коммерческих САПР требует создания специализированных моделей базовых элементов, учитывающих доминирующие радиационные эффекты, которые, как правило, отсутствуют в составе комплекта средств проектирования, предоставляемого фабрикой [1, 4, 7].

В настоящей работе представлены результаты радиационно-ориентированного проектирования СВЧ ФБ на примере ДЧ с фиксированным коэффициентом деления, равным 2, предназначенного для применения в составе гетеродинного тракта БИС приемопередатчика, и БУ. Рассматриваемые СВЧ ФБ предназначены для изготовления в рамках АЗВ5 ГБТ БТП с проектной нормой 2 мкм и Ft транзисторов, равной 35 ГГц. Значения основных параметров ДЧ и БУ, полученные в результате моделирования, приведены в табл. 1. Упрощенные электрические схемы СВЧ ФБ ДЧ и БУ показаны на рис. 1.

Моделирование эффектов структурных повреждений проводилось с использованием макромодели транзистора, показанной на рис. 1а и выполненной на основе ядра VBIC и дополнительных



Таблица 1. Результаты моделирования СВЧ ФБ делителя частоты и буферного усилителя

ФБ делителя частоты с Кд = 2		ФБ буферного усилителя	
Наименование параметра, единица измерения	Значение	Наименование параметра, единица измерения	Значение
Диапазон частот входного сигнала, ГГц	0,5–10,0	Диапазон рабочих частот, ГГц	0,1–10,0
Диапазон мощности входного сигнала, дБм	–10...10	Коэффициент усиления, дБ	10
Мощность выходного сигнала, дБм	–5	Верхняя граница линейности по выходу, дБм	0,5
Потребляемая мощность, мВт	235	Потребляемая мощность, мВт	223

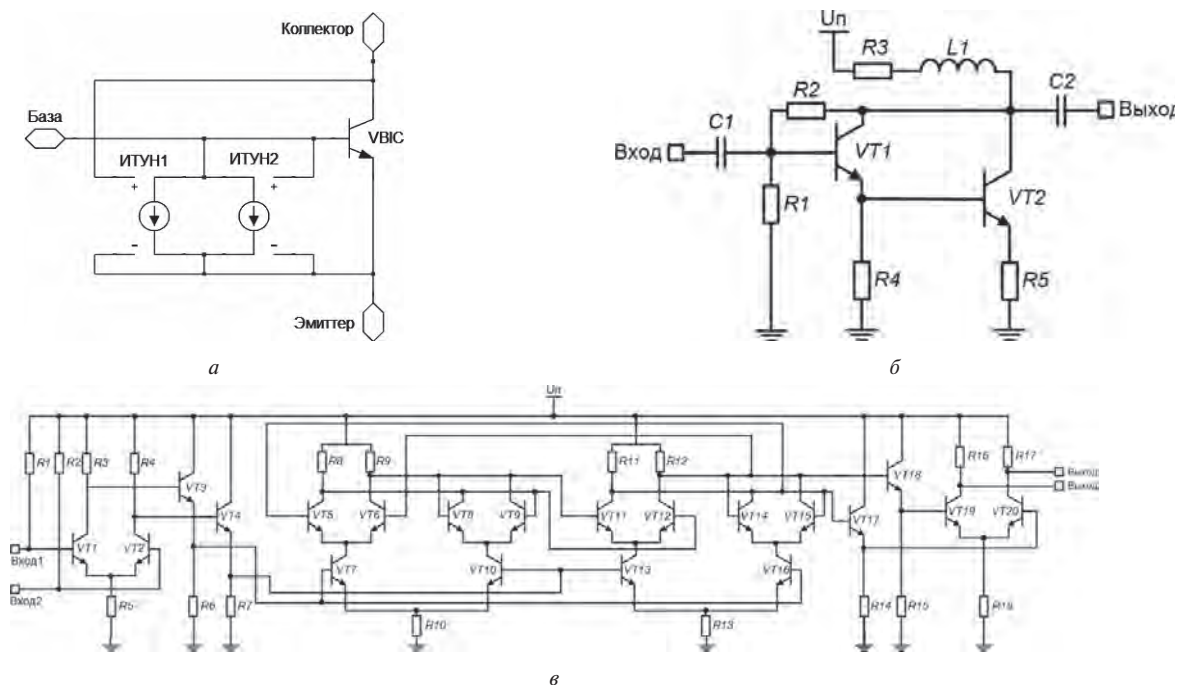


Рис. 1. Макромодель АЗВ5 ГБТ, учитывающая структурные повреждения (а), упрощенные электрические схемы СВЧ ФБ БУ (б) и ДЧ (в)

источников тока, управляемых током (ИТУН1 и ИТУН2), необходимых для учета увеличения тока базы (снижения  $\beta$ ) [7].

ФБ ДЧ с коэффициентом деления (Кд) 2 выполнен по статической схеме построения на основе эмиттерно-связанной логики и включает входной БУ (VT1–VT4), триггерное ядро (VT5–VT16) и выходной БУ (VT17–VT20). В результате радиационно-ориентированного моделирования было установлено, что ФБ ДЧ является слабочувствительным к структурным повреждениям: изменение мощности выходного ( $\Delta P_{\text{вых}}$ ) сигнала при предельном уровне воздействия составляет не более 0,7 дБ (при значении типовой нормы на отклонение не более 1 дБ), что исключает необходимость выполнения дополнительной коррекции схемы и топологии. Результаты моделирования показаны на рис. 2а.

ФБ БУ выполнен по схеме на основе составного транзистора Дарлингтона, охваченного петлей обратной связи (ОС). В ходе проведения радиационно-ориентированного моделирования было установлено существенное снижение выходной мощности  $P_{\text{вых}}$  с ростом уровня воздействия ( $\Delta P_{\text{вых}}$  не менее 5 дБ при  $\Phi = 8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ), коэффициента усиления  $K_u$  ( $\Delta K_u$  не менее 8 дБ) и тока потребления  $I_p$  ( $\Delta I_p$  не менее 40%). Дegradaция параметров ФБ БУ определяется высокой чувствительностью рабочей точки АЗВ5 ГБТ к увеличению тока базы (снижение  $\beta$ ). В целях минимизации влияния данного эффекта определение

параметров элементов цепей задания режима и ОС (см. рис. 1б) осуществлялось с использованием следующих выражений:

$$(1 + \beta_{VT1}) \cdot R4 \gg R1 \cdot R2 / (R1 + R2); \quad (1)$$

$$(1 + \beta_{VT2}) \cdot R5 \gg R4,$$

где  $\beta_{VT1}$ ,  $\beta_{VT2}$  — коэффициенты передачи тока базы ГБТ из состава ФБ БУ.

Результаты моделирования показали, что коррекция параметров элементов цепей задания режима и ОС позволяет достигнуть следующих показателей стойкости: снижение  $K_u$  и  $P_{\text{вых}}$  — не более 1 дБ, относительное изменение  $I_p$  — не более 20% (см. рис. 2б) при предельном уровне воздействия ( $\Phi = 8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ).

В результате моделирования эффектов структурных повреждений установлено, что при предельном уровне воздействия деградация мощности выходного сигнала  $P_{\text{вых}}$  ДЧ и коэффициента усиления  $K_u$  БУ не превышает 0,8 дБ (норма на отклонение — 1 дБ), а относительное изменение (уменьшение) тока потребления  $I_p$  составляет не более 20%, что подтверждает целесообразность использования предложенных схемотехнических решений при проектировании СВЧ ФБ, выполненных на основе АЗВ5 и SiGe гетероструктурных биполярных транзисторов.

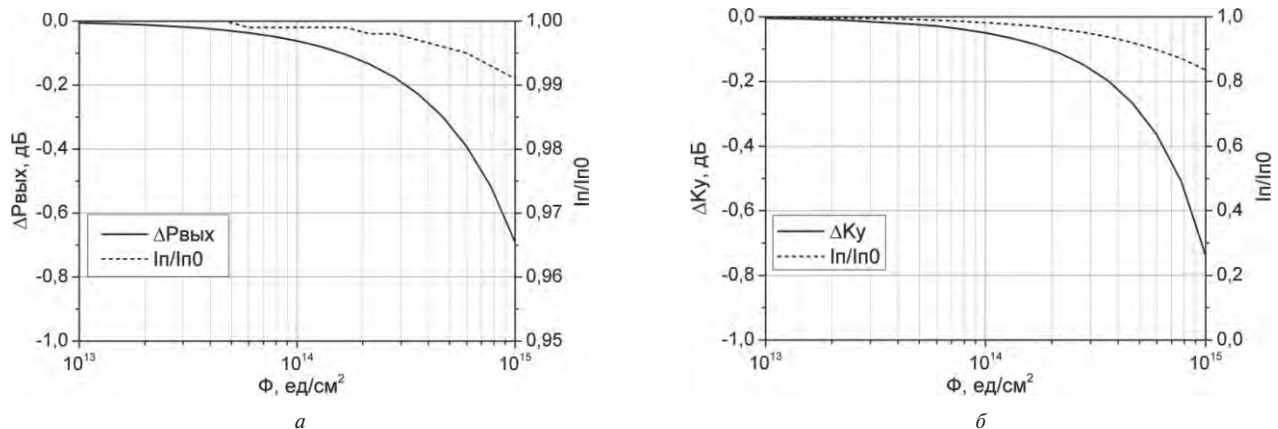


Рис. 2. Расчетные зависимости относительного изменения параметров ФБ ДЧ (а) и ФБ БУ (б) от уровня воздействия ( $\Phi$ )

### ЛИТЕРАТУРА

1. Cressler J. D., Mantooth A. / Extreme Environment Electronics // CRC Press. 2012. 1041 p.
2. Chukov G. V., Elesin V. V., Nazarova G. N., Nikiforov A. Y. *et al.* / SEE Testing Results for RF and Microwave ICs // IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW). 2014. P. 233–235.
3. Elesin V. V., Nazarova G. N., Nikiforov A. Y. *et al.* / Radiation hardness assurance and evaluation for RF SoC and SoP // CriMiCo 2016. Conf. Proc. 2016. P. 1730–1736.
4. Елесин В. В., Назарова Г. Н., Никифоров А. Ю. и др. / Маршрут радиационно-ориентированного проектирования высокоинтегрированной электронной компонентной базы твердотельной СВЧ электроники // Международная конференция «Микроэлектроника-2016», 2016. — С. 46–50.
5. Елесин В. В., Чуков Г. В., Громов Д. В. и др. Исследование влияния ионизирующих излучений на характеристики кремний-германиевых интегральных схем СВЧ-диапазона // Микроэлектроника, 2010. — № 2(39). — С. 136–148.
6. Elesin V. V., Sotskov D. I., Chukov G. V. *et al.* / Radiation effects in RF frequency divider IC // CriMiCo 2015. Conf. Proc. 2015. P. 808–809.
7. Метелкин И. О., Усачев Н. А., Елесин В. В. / Моделирование эффектов смещения в СВЧ гетероструктурных биполярных транзисторах на основе соединений кремний-германия и АЗВ5 // Радиационная стойкость электронных систем. Научн.-техн. сборник. — Вып. 20. 2017. — С. 146–147.

### КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена 1090 руб.

## СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ СО ВСТРОЕННЫМИ АНТЕННАМИ НА НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРАХ А<sup>3</sup>В<sup>5</sup>

под редакцией д. т. н., профессора П. П. Мальцева

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. — 528 с.  
ISBN 978-5-94836-526-8

В сборник вошли статьи сотрудников Федерального государственного автономного научного учреждения «Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В. Г. Мокерова» Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), опубликованные в период 2010–2017 гг. по новым направлениям исследований наногетероструктур А<sup>3</sup>В<sup>5</sup> (арсенид галлия и нитрид галлия): расчет и моделирование систем на кристалле с интегрированными антеннами и усилителями для крайне высоких частот, создание фотопроводящих антенн для терагерцевых устройств.

Статьи использованы при выполнении работ по заказу Минобрнауки России в рамках: ФЦП «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008–2015 годы, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России» на 2007–2013 годы и на 2014–2020 годы.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 (495) 234-0110; 📠 +7 (495) 956-3346; ✉ knigi@technosfera.ru, sales@technosfera.ru