

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ БИС СИНТЕЗАТОРОВ ЧАСТОТ СВЧ-ДИАПАЗОНА

DESIGN ISSUES OF RADIATION TOLERANT RF FREQUENCY SYNTHESIZER ICS

УДК 621.382

СОТСКОВ ДЕНИС ИВАНОВИЧ^{1,2}

disot@spels.ru

ЕЛЕСИН ВАДИМ ВЛАДИМИРОВИЧ^{1,2}

vveles@spels.ru

КУЗНЕЦОВ АЛЕКСАНДР ГЕННАДИЕВИЧ^{1,2}

НАЗАРОВА ГАЛИНА НИКОЛАЕВНА^{1,2}

ЧУКОВ ГЕОРГИЙ ВИКТОРОВИЧ^{1,2}

УСАЧЁВ НИКОЛАЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ^{1,2}

ТЕЛЕЦ ВИТАЛИЙ АРСЕНЬЕВИЧ¹

SOTSKOV DENIS I.^{1,2}

disot@spels.ru

ELESIN VADIM V.^{1,2}

vveles@spels.ru

KUZNETSOV ALEXANDER G.^{1,2}

NAZAROVA GALINA N.^{1,2}

CHUKOV GEORGY V.^{1,2}

USACHEV NIKOLAY A.^{1,2}

TELETS VITALY A.¹

¹ Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31

² АО «ЭНПО СПЭЛС»

г. Москва, 115409, Российская Федерация

¹ National Research Nuclear University MEPhI
(Moscow Engineering Physics Institute)

31 Kashirskoe Highway, Moscow, Russian Federation, 115409

² “Specialized Electronic Systems” JSC
Moscow, 115409, Russian Federation

Представлены показатели радиационной стойкости базовых функциональных блоков синтезаторов частот СВЧ-диапазона, изготовленных по различным технологиям. Показаны особенности разработки радиационно-стойких синтезаторов частот с максимальной рабочей частотой 4,0 ГГц по технологии КМОП КНИ 180 нм.

Ключевые слова: СВЧ; синтезатор частот; ФАПЧ; радиационная стойкость.

The paper presents an overview of radiation effects in RF frequency synthesizers (FS) IP-blocks. Design issues of radiation tolerant FSs operating up to 4GHz for 180nm SOI CMOS process have been presented.

Keywords: radio frequency; frequency synthesizer; phase-locked loop; radiation hardness.

Синтезаторы частот (СЧ) являются ядром тракта гетеродина современных приемопередатчиков систем связи, навигации, радиолокации, радиочастотной идентификации промышленного, научного, аэрокосмического, специального назначения и представляют собой радиоэлектронные устройства, предназначенные для формирования СВЧ гармонических колебаний с заданными частотами из колебаний одного или нескольких высокостабильных опорных генераторов (ОГ). В СВЧ-диапазоне наибольшее распространение получили СЧ на основе схемы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ-СЧ), что обусловлено высокой спектральной чистотой и стабильностью синтезируемых сигналов при малой потребляемой мощности и относительно простой реализации [1]. Упрощенная структурная схема ФАПЧ-СЧ показана на рис. 1.

ФАПЧ-СЧ СВЧ-диапазона имеет в своем составе радиочастотный (РЧ) тракт, который содержит генератор, управляемый напряжением (ГУН), предварительный делитель частоты (ПДЧ) и низкочастотный (НЧ) тракт, содержащий низкочастотные делители частоты (ДЧ), частотно-фазовый детектор (ЧФД), зарядно-разрядный блок (ЗРБ), фильтр нижних частот (ФНЧ) и интерфейсную схему управления (ИСУ).

Радиационные воздействия естественного и искусственного происхождения могут оказывать существенное влияние на электрические параметры и функциональную работоспособность ФАПЧ-СЧ [2, 3]. Согласно [4, 5] разработку радиационно-стойких БИС в целях обеспечения требуемых значений параметров и характеристик, сокращения стоимости и сроков проведения цикла испытаний необходимо проводить по маршруту радиационно-ориентированного проектирования (РОП), включающего операции прогнозирования и обеспечения радиационной стойкости (РС).

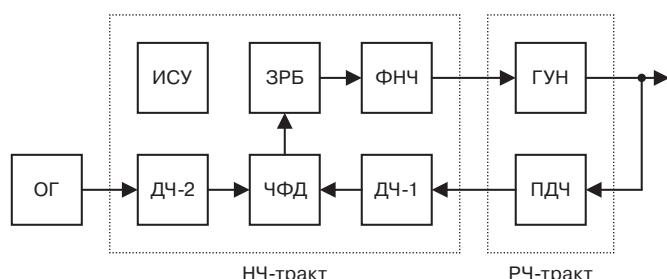


Рис. 1. Упрощенная структурная схема ФАПЧ-СЧ

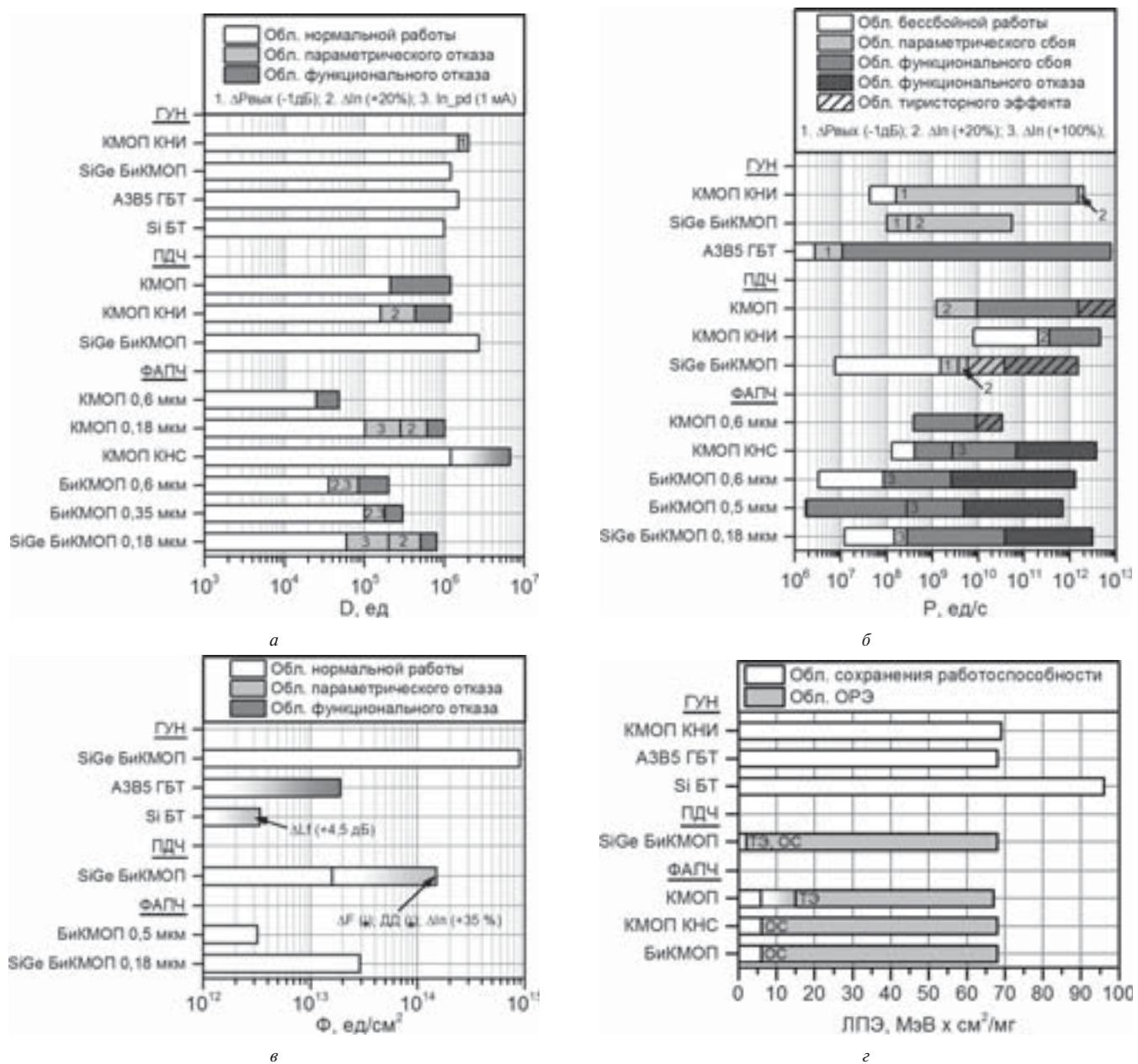


Рис. 2. Показатели стойкости типовых представителей ИС ФАПЧ, ГУН и ПДЧ: к дозовому воздействию ИИ (а), к импульльному воздействию ИИ (б), к воздействию быстрых нейтронов (в) и отдельных ядерных частиц (г)

В настоящей работе приведены показатели РС интегральных схем (ИС) ФАПЧ, а также функциональных блоков (ФБ), входящих в состав ФАПЧ-СЧ, выполненных по различным технологиям: КМОП, КМОП КНИ/КНС, кремниевым (Si) биполярным и БиКМОП, кремний-германиевым (SiGe) БиКМОП, а также на ГБТ на основе соединений АЗВ5. Подход РОП проиллюстрирован на примере разработки по технологии КМОП КНИ 180 нм ФБ ГУН и ПДЧ для радиационно-стойких ФАПЧ-СЧ с максимальной рабочей частотой 4,0 ГГц.

Показатели радиационной стойкости (РС) типовых представителей ИС ФАПЧ, ГУН и ПДЧ, полученные на основе результатов экспериментальных исследований, проведенных в АО «ЭНПО СПЭЛС» и НИЯУ МИФИ, приведены на рис. 2 [2, 3, 6–8].

Согласно результатам анализа экспериментальных данных (см. рис. 2) можно выделить следующие доминирующие

радиационные эффекты в ИС ФАПЧ, ГУН и ПДЧ, которые нужно учитывать при выборе технологического процесса (обеспечение РС), а также при создании радиационно-ориентированных моделей базовых элементов (БЭ) и ФБ (обеспечение и прогнозирование РС):

а) при дозовом воздействии ионизирующего излучения (ИИ) характерно снижение мощности выходного сигнала (Рвых) в ИС ГУН, увеличение тока потребления (I_p) рассмотренных ИС, в том числе в режиме пониженного энергопотребления (I_{p_pd}), функциональные отказы в ИС ФАПЧ и ДЧ при уровнях воздействия 10⁴–10⁶ ед.;

б) при импульсном воздействии ИИ происходит уменьшение Рвых и изменение частоты (Fвых) ГУН, уменьшение Рвых ПДЧ, увеличение I_p и сбои функционирования (ФС). При уровнях воздействия более 10⁸ ед/с в ИС ФАПЧ наблюдаются функциональные отказы (ФО), функционирование ИС восстанавливается

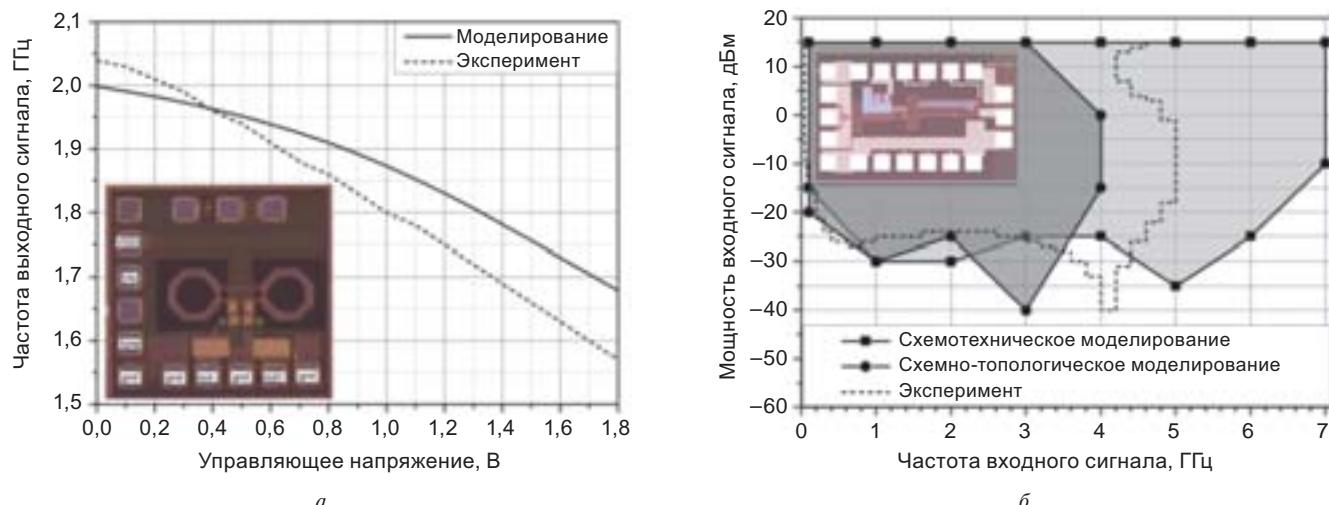


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные зависимости частоты выходного сигнала ГУН от управляющего напряжения (а); динамического диапазона ПДЧ от частоты входного сигнала (б)

Таблица 1. Экспериментальные значения параметров, разработанных СВЧ ФБ ФАПЧ-СЧ

ГУН		ПДЧ	
Наименование параметра, единица измерения	Значение	Наименование параметра, единица измерения	Значение
Диапазон частот выходного сигнала, ГГц	1,58–2,04	Коэффициент деления частоты, ед.	16/18
Диапазон управляющих напряжений, В	0–1,8	Диапазон частот входного сигнала, ГГц	0,1–4,0
Мощность выходного сигнала, дБм	0	Диапазон мощности входного сигнала, дБм	-15–15
Уровень фазового шума (100 кГц), дБн/Гц	-90	Мощность выходного сигнала, дБм	-5
Потребляемая мощность, мВт	45	Потребляемая мощность, мВт	65
Размеры кристалла, мм ²	1,1×1,3	Размеры кристалла, мм ²	1,35×0,85

после перепрограммирования. Для ИС, изготовленных по объемной КМОП- и SiGe БиКМОП-технологиям, характерным является наличие тиристорного эффекта (ТЭ) при уровнях воздействия $5 \cdot 10^9$ ед/с и более;

в) при воздействии быстрых нейтронов (структурные повреждения) в ИС, выполненных на основе БТ/ГБТ, характерно увеличение уровня фазового шума (L_f) и снижение Рвых ГУН, в ряде случаев наблюдаются ФО со срывом генерации вследствие изменения параметров транзистора, уменьшение динамического диапазона (ДД) и диапазона рабочих частот (Δf) ДЧ;

г) одиночные сбои (ОС) и ТЭ наблюдаются в ИС ФАПЧ и ДЧ, изготовленных по объемной КМОП- и SiGe БиКМОП-технологиям, при воздействии отдельных ядерных частиц (ОЯЧ) с линейными потерями энергии (ЛПЭ) 3 МэВ·см²/мг и более.

Разработка ФБ ГУН с диапазоном частот 1,58–2,04 ГГц и L_f не более -90 дБн/Гц (100 кГц) и ФБ ПДЧ с переменным коэффициентом деления 16/18 и диапазоном частот 0,1–4,0 ГГц для радиационно-стойких ФАПЧ-СЧ проводилась по маршруту РОП [5]. На основании проведенного анализа СВЧ-характеристик БЭ и показателей стойкости была выбрана технология КМОП КНИ 180 нм с шестью слоями металлизации и напряжением питания ядра 1,8 В [9].

Экспериментальные исследования проводились на пластине зондовыми методами с использованием автоматизированного аппаратно-программного комплекса на базе зондовой станции

Cascade Summit 12000 [10]. Расчетные и экспериментальные зависимости частоты выходного сигнала ГУН от управляющего напряжения и динамического диапазона ПДЧ от частоты входного сигнала показаны на рис. 3. Экспериментальные значения основных параметров, разработанных СВЧ ФБ ФАПЧ-СЧ, приведены в табл. 1.

В результате экспериментальной оценки показателей РС, разработанных ФБ ФАПЧ-СЧ, установлено, что ТЭ и катастрофические отказы отсутствуют при воздействии ОЯЧ с линейными потерями энергии до 80 МэВ·см²/мг, уровень стойкости ФБ ГУН к дозовому воздействию составляет не менее 10^6 ед. Таким образом, продемонстрирована эффективность маршрута РОП радиационно-стойкой СВЧ ЭКБ, включающего операции прогнозирования и обеспечения РС на этапах выбора технологии, верификации и создания библиотеки элементов, системного и схемотехнического проектирования, проектирования и верификации топологии, учета влияния корпуса и измерительной оснастки, экспериментальных исследований и испытаний [4, 5].

ЛИТЕРАТУРА

- Chenakin A. *Frequency Synthesizers: Concept to Product*. Norwood, Artech House, 2010. 254 p.
- Elesin V.V., Kuznetsov A.G., Sotskov D.I. / *Radiation Effects in Phase-locked Loop* // CriMiCo 2014, Conf. Proc., 2014, pp. 858–859.



3. 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, pp. 233–235.
4. Elesin V. V., Nazarova G. N., Nikiforov A. Y., Sotskov D. I., Telets V. A., Usachev N. A., Chukov G. V. / *Radiation Hardness Assurance and Evaluation for RF SoC and SoP* // CriMiCo 2016, Conf. Proc., 2016, pp. 1730–1736.
5. Елесин В. В., Назарова Г. Н., Никифоров А. Ю., Сотков Д. И., Телец В. А., Усачёв Н. А., Чуков Г. В. / Маршрут радиационно-ориентированного проектирования высокointегрированной электронной компонентной базы твердотельной СВЧ-электроники // Международная конференция «Микроэлектроника-2016», 2016. — С. 46–50.
6. Sotskov D. I., Elesin V. V., Kuznetsov A. G., Nazarova G. N., Chukov G. V. et al. / *Total Ionizing Dose Effects in Phase-Locked Loop ICs and Frequency Synthesizers* // 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), 2015, pp. 367–369.
7. Elesin V. V., Sotskov D. I., Chukov G. V., Amburkin K. M., Usachev N. A. / *Radiation Effects in RF Frequency Divider IC* // CriMiCo 2015, Conf. Proc., 2015, pp. 808–809.
8. Sotskov D. I., Amburkin D. M., Kuznetsov A. G., Chukov G. V. et al. / *Radiation Resistance Indexes for SHF Range Voltage-controlled Oscillators* // CriMiCo 2015, Conf. Proc., 2015, pp. 810–811.
9. Усачёв Н. А., Елесин В. В., Сотков Д. И., Назарова Г. Н., Никифоров А. Ю., Чуков Г. В., Метелкин И. О., Жидков Н. М., Дмитриев В. А., Шелепин Н. А., Селецкий А. В. / Библиотека элементов и функциональные блоки для создания приемопередающих БИС космического назначения по отечественной КМОП КНИ-технологии 180 нм // Международный форум «Микроэлектроника-2016», 2016. — С. 387–390.
10. Амбуркин К. М., Елесин В. В., Чуков Г. В. / Аппаратно-программный зондовый комплекс для исследовательских испытаний некорпусированных изделий ТСВЧЭ на дозовое воздействие // Радиационная стойкость электронных систем. Научн.-техн. сборник, 2016. — Вып. 19. — С. 140–141.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



КОНСТРУКТИВНО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СУБМИКРОННЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

Красников Г.Я.

М: ТЕХНОСФЕРА, 2011. – 800 с.
ISBN 978-5-94836-289-2

Цена 1188 руб.

В книге рассмотрены особенности работы субмикронных МОП-транзисторов, описаны направления развития и ограничения применения методов масштабирования транзисторов, представлены требования к подзатворным диэлектрикам технологии их формирования, различные конструкции сток-истоковых областей МОПТ и технологические процессы создания мелкозалегающих легированных слоев. Рассмотрены проблемы влияния масштабирования размеров элементов в субмикронную область и особенностей технологических процессов на надежность и долговечность субмикронных МОП-транзисторов.

Книга предназначена для специалистов в области проектирования и разработки технологий изготовления КМОП СБИС, а также для студентов старших курсов, аспирантов и преподавателей технических вузов.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

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