

Транзисторы для твердотельных СВЧ-переключателей (обзор)

Е. М. Торина^{1,2}, В. Н. Кочемасов¹, А. Р. Сафин^{1,2,3✉}

¹ООО "Радиокомп", Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

³Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

✉arsafin@gmail.com

Аннотация

Введение. К характеристикам твердотельных СВЧ-переключателей предъявляются различные требования в зависимости от приложения и решаемых технических задач. Естественно, не существует универсального решения, удовлетворяющего сразу всем требованиям. Стремление к совершенствованию параметров переключателей привело к появлению устройств, изготовленных по различным технологиям. Для понимания тенденций развития техники переключателей важно рассмотреть технологии и возможности полупроводниковых приборов, являющихся основой схем переключателей.

Цель работы. Обзор типов транзисторов, используемых в твердотельных переключателях.

Материалы и методы. В основе поиска и подбора литературы для обзора лежит хронологический принцип. Глубина поиска для рассмотрения параметров конечных компонентов не более 10 лет, для рассмотрения технологий и структурных решений – более 10 лет, ввиду желания проследить историю развития и подходы к созданию полупроводниковых устройств, которые привели к возникновению современной компонентной базы. Конечный массив источников сформирован из научных публикаций, содержащих фактографическую информацию, представленную в обзоре, или дополняющих ее.

Результаты. Рассмотрены типы, структуры, материалы, характеристики и технологии изготовления транзисторов, используемых в переключателях. Представлены достижимые параметры переключателей, построенных на рассмотренных приборах.

Заключение. Выбор того или иного типа транзистора для переключателей зависит от требований, предъявляемых к параметрам и эксплуатационным характеристикам конечного устройства. На данный момент среди транзисторных решений для переключателей доминируют полевые транзисторы (ПТ) различных типов: GaAs- и GaN-транзисторы с повышенной подвижностью электронов (High Electron Mobility Transistor – НЕМТ), а также Si КМОП ПТ, реализованные как по стандартной, так и по технологиям "кремний на изоляторе" и "кремний на сапфире". Анализ литературы показал возможные перспективы развития технологии БиКМОП биполярных транзисторов с гетеропереходом.

Ключевые слова: твердотельные переключатели, ТВПЭ, КМОП, КНИ, КНС, БиКМОП, БГТ, FOM

Для цитирования: Торина Е. М., Кочемасов В. Н., Сафин А. Р. Транзисторы для твердотельных СВЧ-переключателей (обзор) // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 3. С. 6–31. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-6-31

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования: грант РНФ № 21-79-10396.

Статья поступила в редакцию 04.02.2023; принята к публикации после рецензирования 10.04.2023; опубликована онлайн 29.06.2023

Transistors for Solid-State Microwave Switches (A Review)

Elena M. Torina^{1,2}, Victor N. Kochemasov¹, Ansar R. Safin^{1,2,3✉}

¹"Radiocomp", Moscow, Russia

²National Research University "MPEI", Moscow, Russia

³Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Moscow, Russia

✉arsafin@gmail.com

Abstract

Introduction. The characteristics of solid-state microwave switches are subject to different requirements depending on the application area and technical problems to be solved. No versatile solution exists that could satisfy all requirements at once. The desire to improve the parameters of switches has led to the emergence of devices based on various technologies. In order to elucidate the current trends and future prospects in the field of switch technologies, semiconductor devices that form the basis of switch circuits should be considered.

Aim. To review transistor types used in solid-state switches.

Materials and methods. The search and selection of literature sources for review was based on the chronological principle. The search depth for considering the parameters of finished components was no more than 10 years, for considering technologies and structural solutions – more than 10 years. This choice was explained by our desire to trace the history of development and approaches to the creation of semiconductor devices that have led to the emergence of the modern component base. The final array of sources comprised scientific publications presenting factual information on the objects under consideration.

Results. The types, structures, materials, characteristics and manufacturing technologies of transistors used in switches are considered. The achievable parameters of the switches based on the considered devices are presented.

Conclusion. The choice of a particular transistor type for switches depends on the requirements for the parameters and performance characteristics of the final device. At present, transistor solutions for switches are dominated by field-effect transistors (FETs) of various types: GaAs and GaN transistors with a high electron mobility (HEMT) and Si CMOS FETs implemented by standard as well as silicon-on-insulator and silicon-on-sapphire technologies. The conducted literature review has revealed prospects for the development of technologies based on BiCMOS hetero-junction bipolar transistors.

Keywords: solid-state switches, HEMT, CMOS, SOI, SOS, BiCMOS, HBT, FOM

For citation: Torina E. M., Kochemasov V. N., Safin A. R. Transistors for Solid-State Microwave Switches (A Review). Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 3, pp. 6–31. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-6-31

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgment: RSF grant no. 21-79-10396.

Submitted 04.02.2023; accepted 10.04.2023; published online 29.06.2023

Введение. Твердотельные переключатели нашли широкое применение в ВЧ- и СВЧ-технике. В настоящее время они являются одними из самых распространенных радиотехнических устройств [1], к которым предъявляются разные требования. Так, радиолокационные приложения обычно требуют возможности коммутации сигналов довольно большой мощности. В современных системах беспроводной связи

более приоритетными являются требования к скорости переключения, миниатюризации конечного устройства и многоканальности [1–6].

В качестве активных элементов твердотельные СВЧ-переключатели используют в основном *pin*-диоды [6] и полевые транзисторы (ПТ) [1–5, 7–10]. В литературе можно найти результаты разработок переключателей и на других полупроводниковых активных элементах, показыва-

ющих неплохие характеристики, но пока что они не представлены в коммерческих устройствах.

Отдельно стоит отметить переключатели на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС), объединивших некоторые достоинства полупроводниковых и релейных устройств. Переключатели на МЭМС проигрывают транзисторным и диодным решениям по скорости переключения сигналов и мощности управления. Кроме того, у МЭМС-устройств есть ограничение на количество циклов переключения. Однако по уровню вносимых потерь, максимальной частоте коммутируемых сигналов и значению Figure of merit ($FOM = Ron \cdot Coff$) переключатели на МЭМС имеют существенные преимущества [11, 12].

Данная статья посвящена ПТ, используемым в переключателях. Цель работы – оценить место твердотельных переключателей на транзисторах среди твердотельных переключателей; оценить характеристики существующих на рынке приборов; рассмотреть технологии изготовления транзисторов и используемые полупроводниковые материалы. Для того чтобы понять, в каких случаях при выборе типа переключателя следует обращаться к решениям на транзисторах, кратко сравним их свойства с переключателями на *pin*-диодах [1–10, 13–17]:

- технологии ПТ проще и дешевле *pin*-диодных с точки зрения интегрируемости системы на кристалле;
- с точки зрения отвода тепла *pin*-диоды оказываются удобнее ввиду возможности отвода тепла от *i*-слоя вертикальной структуры;
- с точки зрения скорости переключения решения на ПТ выигрывают у *pin*-диодов за счет управления носителями только одного типа;
- значение тока управления ПТ на несколько порядков меньше, чем у *pin*-диодов, что позволяет упростить источники питания схемы;
- с точки зрения диапазона рабочих частот, с одной стороны, ПТ позволяют добиться более широкого диапазона рабочих частот и могут работать на постоянном токе, в то время как *pin*-диоды имеют ограничение по нижней частоте; с другой стороны, допустимые предельные частоты *pin*-диодов выше;
- с точки зрения вносимых потерь характеристики ПТ оказываются хуже *pin*-диодных, за

счет большего значения сопротивления во включенном состоянии;

- в момент коммутации может происходить искажение радиочастотного сигнала в виде паразитного видеоимпульса, наложенного на полезный сигнал. Величина этих искажений характеризуется высотой паразитного импульса (*video transients*). Существенным преимуществом ПТ, особенно GaAs-транзисторов с повышенной подвижностью электронов (*High Electron Mobility Transistor – HEMT*), является очень малое значение высоты паразитного видеоимпульса. Его амплитуда обычно составляет не более 150 мВ, в то время как устройства на *pin*-диодах имеют амплитуду видеоимпульсов порядка единиц вольт. Отметим, что переключатели на МЭМС имеют величину видеоимпульса еще на порядок меньше, чем переключатели на ПТ;

- *pin*-диоды обеспечивают более высокую по сравнению с ПТ допустимую мощность за счет большей толщины *i*-слоя по сравнению с длиной канала транзистора;

- среди твердотельных устройств наибольшие значения коэффициента интермодуляционных искажений третьего порядка характерны для переключателей на GaN HEMT-транзисторах и Si *pin*-диодах. В этих устройствах значение ПРЗ может превышать 70 дБм, что свидетельствует об их высокой линейности. Отметим также, что у переключателей на МЭМС достижимые значения ПРЗ могут быть более 95 дБм.

Таким образом, можно сказать, что для переключателей и *pin*-диодов, и транзисторы имеют свои преимущества. Далее рассматриваются только свойства переключателей на транзисторах. Основная часть статьи посвящена ПТ, так как именно они занимают большую часть рынка транзисторных переключателей. В первой части статьи приведены несколько примеров схем переключателей на ПТ, представленных на рынке радиотехнических приборов, и их основные характеристики. Подробный обзор этих переключателей представлен в [2–5, 7–10]. Числовые значения характеристик существующих на рынке устройств отражают состояние переключателей на транзисторах на данный момент. Следующие части статьи посвящены технологиям транзисторов и достижимым лабораторным значениям характери-

стик приборов. Как правило, научные разработки направлены на совершенствование конкретного параметра конечного прибора, который может быть и недостижим при серийном производстве. Однако рассмотрение научных результатов позволяет оценить тенденции развития рынка переключателей. В разделе "Общие сведения" обобщены основные особенности ПТ, позволяющие использовать их в переключательных устройствах. Далее рассмотрены два основных вида ПТ, используемых в переключателях: ПТ с управляющим переходом (ПТУП) и на основе структуры металл-оксид-полупроводник (МОП ПТ). Рассмотрены структуры, материалы, технологии изготовления и достижимые параметры переключателей на этих ПТ. Далее рассматриваются более редкие, но демонстрирующие неплохие характеристики SiGe биполярные транзисторы с гетеропереходом (БГТ).

Переключатели на основе ПТ. Как отмечалось ранее, переключателям на ПТ свойственны низкие токи управления. При этом они способны коммутировать довольно большие мощности, что делает их применение особенно привлекательным в мобильной телефонии, где постоянно растут требования к объему передаваемых данных [2–6]. Переключатели на ПТ

изготавливаются как в интегральном, так и в модульном исполнении. Заметим, что в отличие от *pin*-диодных устройств в случае ПТ сначала появились интегральные переключатели и лишь затем отдельные модульные изделия. При этом модульные устройства на МОП-структурах практически не выпускаются [7–10].

ПТ принято делить на два больших класса: с ПТУП и на основе МОП-структуры. Первый класс делится на транзисторы с управляющим *p-n*-переходом (Junction-gate Field-Effect Transistor – JFET), с переходом Шоттки (Metal-Semiconductor Field-Effect Transistor – MESFET) и наиболее распространенные в переключателях ПТ с повышенной подвижностью электронов (High Electron Mobility Transistor – HEMT). Сейчас наиболее часто изготавливаются переключатели на основе GaAs HEMT и GaN HEMT. Комплементарные МОП-транзисторы в переключателях используются на основе кремния и различаются технологией изготовления: стандартная (*bulk*) технология и усовершенствованные технологии "кремний на изоляторе" (КНИ) (Silicon-On-Insulator – SOI) и "кремний на сапфире" (КНС) (Silicon-On-Sapphire – SOS). У всех типов транзисторов есть свои преимущества для использования в переключателях (рис. 1).

Существует большое количество возможных вариантов построения схем переключателей

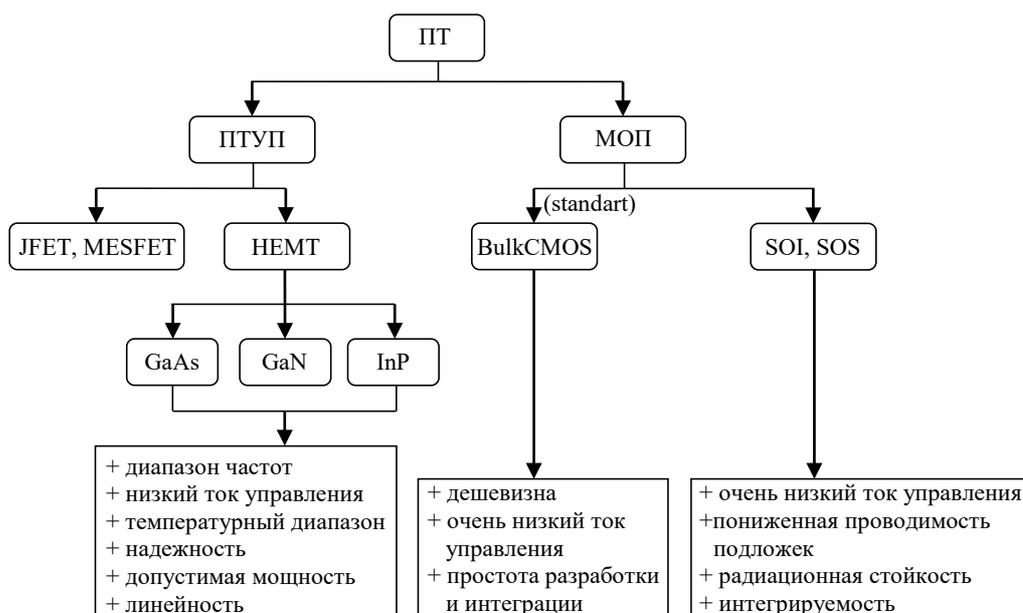


Рис. 1. Классификация переключательных ПТ, наиболее часто используемых в коммерческой реализации
 Fig. 1. Classification of switching field-effect transistors most commonly used in commercial implementation

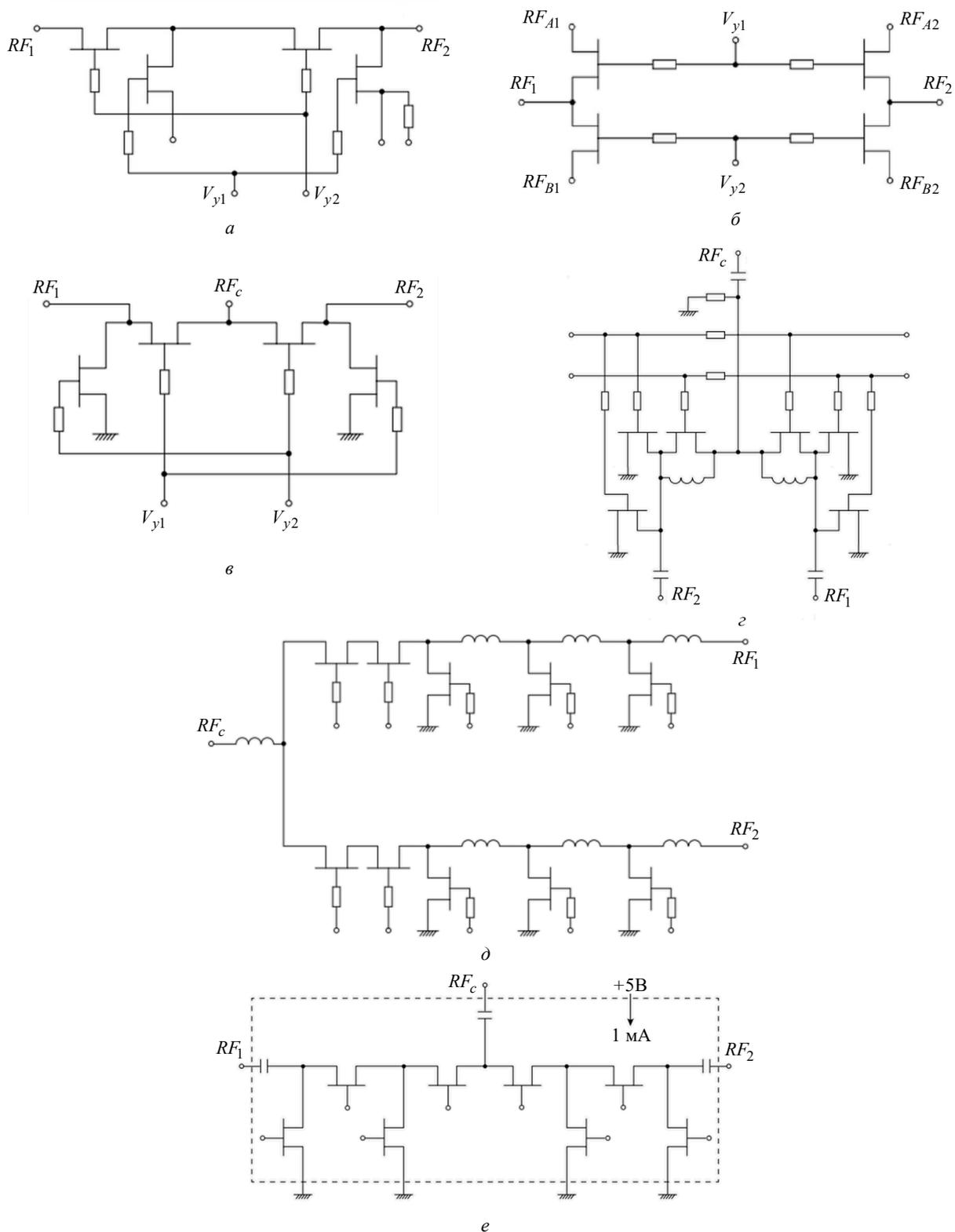


Рис. 2. Упрощенные принципиальные схемы переключателей на GaAs HEMT-транзисторах: а – модель MASW6020G (SPST), компания MACOM; б – модель CHS5104-99F (SPDT), компания UMS; в – модель MASW2040 (DPDT), компания MACOM; на GaN HEMT-транзисторах: г – CHS8618-99F (SPDT), компания UMS; д – компания Plextek RFI (SPDT); на основе кремниевых технологий КМОП: е – модель ADR5160 (SPDT), компания Analog devices

Fig. 2. Simplified circuits of switches based on GaAs HEMT transistors: а – model MASW6020G (SPST), MACOM; б – model CHS5104-99F (SPDT), UMS; в – model MASW2040 (DPDT), MACOM; based on GaN HEMT transistors: г – CHS8618-99F (SPDT), UMS; д – Plextek RFI (SPDT); based on silicon CMOS: е – model ADR5160 (SPDT), Analog devices

Табл. 1. Параметры переключателей на ПТ [2, 4]

Tab. 1. Parameters of FET switches [2, 4]

Компания	Модель	Структура ПТ	Тип	Диапазон частот, ГГц	Допустимая мощность ($P_{\text{доп}}$), Вт	Вносимые потери (IL), дБ	Развязка (Iso), дБ	Время переключения ($T_{\text{п}}$), нс
MACOM	MASW6020G [4]	GaAs HEMT	SPST	0...6.0	34	0.8...2.5	30...11	10
UMS	CHS5104-99F [2]	GaAs HEMT	SPDT	0...4.0	<2.0	0.25...0.5	38...20	–
MACOM	MASW2040 [2]	GaAs HEMT	DPDT	0...2.0	<2.5	<0.4...0.6	>25...15	–
UMS	CHS8618-99F [2]	GaN HEMT	SPDT	6.0...18.0	16	1.3	34	–
Plextek RFI	[2]	GaN HEMT	SPDT	0...20	–	0.75...1.3	45	–
Analog devices	ADR5160 [4]	КНИ	SPDT	0.7...4.0	49.7	0.7...0.9	53...35	1200
pSemi	PE42524 [4]	КНС	SPDT	0.01...40	<1.8	0.6...5.5	84...33	55

на ПТ, позволяющих оптимизировать их параметры, например: диапазон частот, время переключения, допустимый уровень коммутируемой мощности и пр. (табл. 1). Упрощенные схемы этих переключателей используют разные варианты включения транзисторов (рис. 2).

Общие сведения. Любой ПТ во включенном и выключенном состояниях можно представить [13] как сопротивление $R_{\text{он}}$ или емкость $C_{\text{офф}}$ между стоком и истоком транзистора соответственно (рис. 3, а, б). Ток стока (I_c) проходит по каналу, формируемому между областями стока и истока транзистора, а его значение и скорость изменения в зависимости от изменения напряжения сток–исток $U_{\text{с-и}}$ управляются напряжением на затворе $U_{\text{з-и}}$. Для переключателей важно, чтобы в открытом состоянии сигнал проходил с входа на выход без изменения гармонического состава, а в закрытом – прохождение сигнала должно быть полностью заблокировано, т. е. нужно, чтобы ПТ вел себя как управляемое сопротивление. Такая работа ПТ характерна для крутой области выходных вольт-амперных характеристик (ВАХ). Характер зависимости $I_c(U_{\text{с-и}})|_{U_{\text{з-и}}=\text{var}}$ для транзистора с каналом n -типа аналогичен для всех типов рассматриваемых ПТ (рис. 3, в).

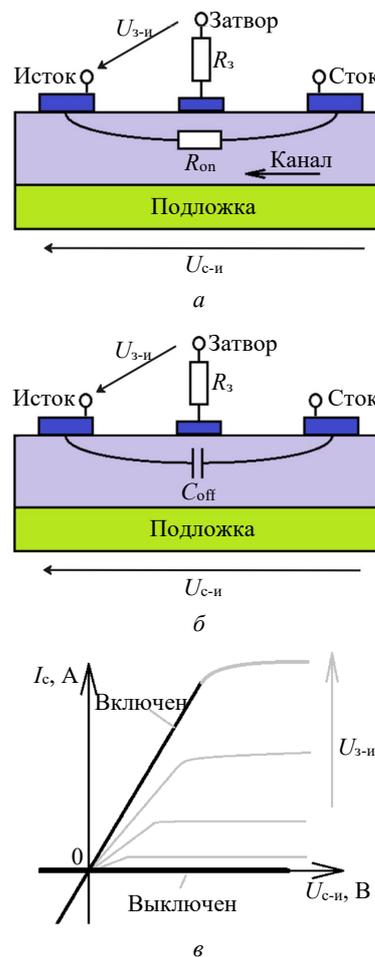


Рис. 3. Общий вид структуры планарного ПТ: а – во включенном состоянии; б – в выключенном состоянии; в – семейство выходных статических характеристик
 Fig. 3. General view of the planar FET structure in the on (a) and off (b) states; family of output static characteristics (v)

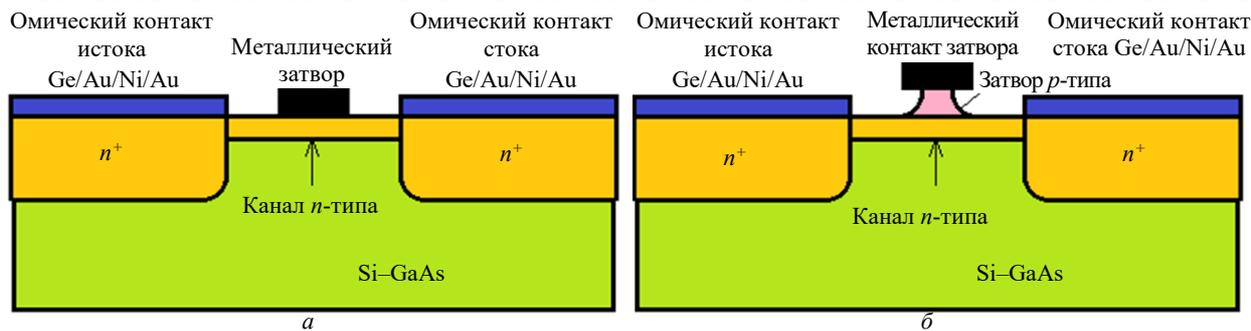


Рис. 4. Упрощенные структуры GaAs ПТ: а – MESFET; б – JFET

Fig. 4. Simplified structures of GaAs FETs: а – MESFET; б – JFET

ПТУП. Принцип работы, виды, структура. Арсенид-галлиевые интегральные схемы переключателей с ПТ с управляющим $p-n$ -переходом (JFET) успешно использовались в прошлом веке, пока в 1966 г. не был представлен ПТ с барьером Шоттки [18]. Упрощенные структуры, отражающие принцип работы этих транзисторов, схожи друг с другом (рис. 4). Транзисторы с барьером Шоттки (MESFET) обладали большими быстродействием и линейностью выходных характеристик, меньшим уровнем шумов и были более мощными. Сформированный между стоком и истоком канал из легированного полупроводника пропускает ток стока, зависящий от приложенного между электродами сток–исток поля и управляющего напряжения на затворе [19]. Напряжение на затворе меняет ширину обедненного слоя в легированном полупроводнике, что, в свою очередь, меняет сопротивление канала.

Для переключателей рабочей является линейная часть выходной характеристики. При этом транзистор работает при сравнительно малых значениях напряжения сток–исток, т. е. носители движутся по каналу в слабом поле. Важной характеристикой переключателей является быстродействие, которое напрямую зависит от подвижности носителей. Подвижность электронов в GaAs в слабом поле значительно выше, чем в Si, поэтому в качестве полупроводникового материала транзисторов для переключателей чаще использовался именно арсенид галлия.

Реальная структура MESFET-транзистора представлена на рис. 5. Базовым материалом является подложка из GaAs. Буферный слой, обычно тоже арсенид-галлиевый, эпитаксиально выращивается на полуизолирующей под-

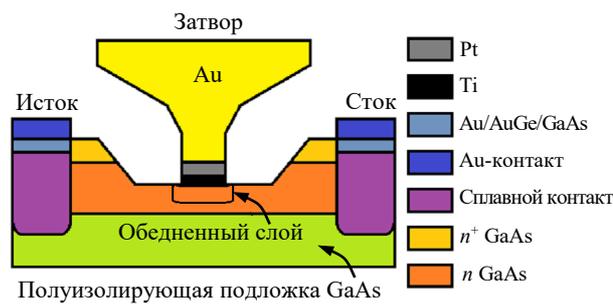


Рис. 5. Базовая структура GaAs ПТ с барьером Шоттки

ложке и служит для изоляции дефектов в подложке от рабочей части транзистора. Канал является тонким, слегка легированным проводящим слоем полупроводникового материала, эпитаксиально выращенным на буферном слое. Высоколегированные области, показанные на структуре, необходимы для обеспечения низкого омического сопротивления контактов транзистора [20].

Граничная и максимальная рабочие частоты определяются по формулам [19]

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{V_{\text{нас}}}{2\pi L}; f_{\text{max}} = \frac{f_T}{2} \sqrt{\frac{R_{\text{с-и}}}{R_3}}, \quad (1)$$

где τ – время пролета электронов через канал; $V_{\text{нас}}$ – напряжение насыщения; L – длина канала; $R_{\text{с-и}}$ – сопротивление между стоком и истоком; R_3 – сопротивление затвора.

На протяжении всей истории развития транзисторов требования к быстродействию и миниатюризации постоянно росли. Согласно (1) быстродействие ограничено временем пролета через канал и подвижностью носителей (скоростью насыщения), поэтому естественной мерой по совершенствованию приборов было

уменьшение длины затвора, что привело к существенным технологическим сложностям.

Улучшить переключательные свойства за счет уменьшения сопротивления во включенном состоянии R_{on} можно, уменьшая длину канала [19]. Однако такой подход оказался ограниченным: для эффективного управления током длина канала должна быть больше его глубины, что требует уменьшения физических габаритов кристалла, а малые размеры транзистора приводят к снижению их надежности [20]. Требовались новые структурные решения для транзисторов.

Дальнейшим развитием ПТУП стала разработка транзисторов на гетеропереходах, известных как транзисторы с повышенной подвижностью электронов или НЕМТ-транзисторы.

Создатель первого такого транзистора Такаши Мимура вспоминает [21], что принадлежал к группе разработки GaAs MESFET и работал над созданием арсенид-галлиевого МОП-транзистора, ожидая, что такой прибор окажется более быстродействующим по сравнению с кремниевыми структурами. Разработка такой структуры была осложнена тем, что в GaAs не происходило накопления и инверсии зарядов из-за высокой плотности поверхностных состояний.

В это время велись активные исследования в области совершенствования полупроводниковых структур, в частности гетеропереходов. За их ис-

следование и разработку наш соотечественник Ж. И. Алферов был удостоен Нобелевской премии. В 1979 г. была опубликована статья о разработанной в Bell Laboratories сверхрешетке на гетероструктурах. Именно она натолкнула Мимуру на идею использования эффекта поля для управления электронами на границе одиночного гетероперехода, состоящего из пары нелегированного GaAs и AlGaAs n -типа [21].

Впервые материал о НЕМТ-транзисторе был опубликован в 1980 г. [22], а первые устройства на GaAs НЕМТ были разработаны и представлены на международной конференции в 1983 г. Уже в 1987 г. коммерциализация НЕМТ значительно увеличилась, и НЕМТ начали заменять GaAs MESFET в спутниковых приемниках вещания. Так, например, транзисторы по технологии НЕМТ позволили уменьшить размер параболической антенны вдвое или более [21].

Гетероструктура первого НЕМТ-транзистора состояла из слоев нелегированного арсенида галлия и легированного кремнием $Al_xGa_{1-x}As$ ($x = 0.32$), где x – доля атомов галлия, замещенных атомами алюминия (рис. 6, *a*) [19]. Благодаря тому, что слои гетероперехода имеют разную ширину запрещенной зоны, на границе раздела структур электроны инжектируются из легированного электронами более широкозонного слоя в нелегированный узкозонный слой, образуя на

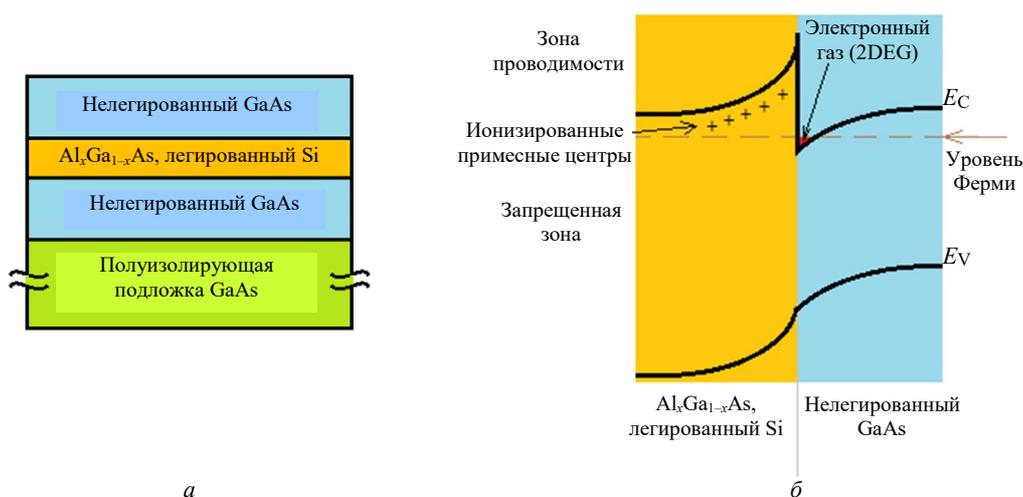


Рис. 6. Гетеропереход первого НЕМТ-транзистора: *a* – урощенная структура; *b* – энергетическая диаграмма (E_C – дно зоны проводимости, E_V – потолок валентной зоны)

Fig. 6. Heterojunction of the first HEMT transistor: *a* – truncated structure; *b* – energy diagram (E_C – bottom of the conduction band; E_V – top of the valence band)

границе область, где уровень Ферми находится непосредственно в зоне проводимости. Там образуется так называемый двумерный электронный газ (область 2DEG на рис. 6, б). Эта область обладает большей подвижностью электронов. Повышение подвижности связано с пространственным разделением между электронами и их исходными донорными примесями [22]. НЕМТ-транзисторы позволили повысить быстродействие, усиление и понизить коэффициент шума относительно своих предшественников MESFET-транзисторов.

Выращивание гетероструктур – технологически довольно сложный процесс из-за несоответствия постоянных решеток двух материалов, хотя визуально структуры кажутся аналогичными ПТУП с переходом Шоттки (рис. 5, 7). Существует 2 основных подхода к созданию НЕМТ-структур [20].

В первом случае слой одного из материалов делается настолько тонким, что его решетка буквально подстраивается (сжимается или растягивается), адаптируясь к постоянной решетке другого материала гетероперехода. В этом случае "адаптированный" материал будет находиться в напряжении, однако позволяет получить большую разницу запрещенных зон переходов. Транзисторы, выращенные таким образом, называются псевдоморфными или рНЕМТ (рис. 7, а). Именно они получили наиболее широкое применение в СВЧ-технике.

Другой способ – создание между слоями гетеропереходов буферного слоя, подобранного таким образом, что его решетка в достаточной степени согласуется с обоими слоями гетеропе-

рехода. Такая технология позволяет создавать метаморфные транзисторы или мНЕМТ (рис. 7, б). Метаморфные транзисторы хоть и реже используются в переключательных устройствах, особенно мощных, тем не менее имеют свои преимущества. В частности, с помощью них удается создавать более высокочастотные устройства [23].

Технологические процессы изготовления псевдо- и метаморфных транзисторов мало отличаются друг от друга. Структура выращивается на подложке с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии или металлоорганического испарения. Следующий выше (рис. 7) буферный слой эпитаксиально выращивается на подложке для изоляции дефектов и создает гладкую поверхность, на которой происходит выращивание активных слоев транзистора. Создается активный канал и имплантируется изолятор, далее формируются омические переходы, осуществляется формирование углублений затвора и области "затвор–металл". После этого осуществляют травление истока и контактов, формируют воздушные мостики, переходные отверстия и обрабатывают обратную сторону подложки [20].

По мере эксплуатации первых моделей арсенид-галлиевых переключателей на ПТ выявился весьма существенный недостаток – большое время установления (T_{set}), многократно превышающее значения времени нарастания (T_r), спада (T_f), включения (T_{on}) и выключения (T_{off}) из технических паспортов на эти изделия. Много усилий по преодолению

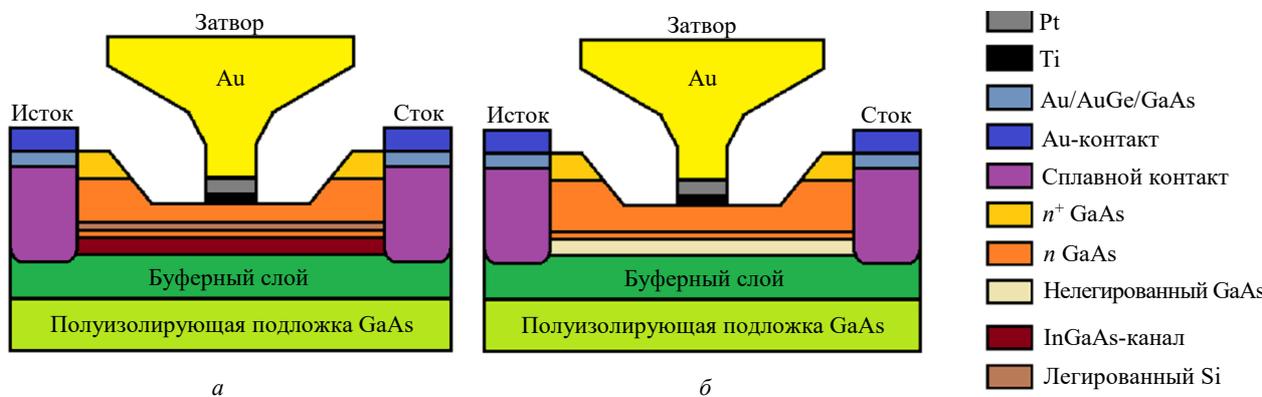


Рис. 7. Базовые структуры GaAs НЕМТ: а – псевдоморфного; б – метаморфного

Fig. 7. Basic structure of pseudomorphic (a) and metamorphic (b) GaAs HEMT

этого недостатка было приложено компанией MACOM, которой в конце концов удалось разработать модифицированный рНЕМТ-процесс, решивший проблему [2–5, 7–10]. Так, в переключателях, изготовленных с применением модифицированного рНЕМТ-процесса, время установления было улучшено с сотен наносекунд до десятков наносекунд [2–5].

Эквивалентные схемы. Построение эквивалентных схем ПТ – задача сложная. Часто она решается для каждого устройства индивидуально на основе измеренных экспериментально значений и параметров производителя: S -параметров; характеристик постоянного тока; предельных и эксплуатационных значений токов, напряжений, коэффициента усиления, частот и пр. Обычно эти данные можно найти в техническом паспорте конкретного прибора.

Несмотря на сложность, при проектировании нелинейных СВЧ-устройств, в том числе

переключателей, бывает необходимо пользоваться нелинейными моделями активных приборов (эквивалентными схемами). При переключении сигналов малой мощности достаточно воспользоваться малосигнальной эквивалентной схемой для расчета важнейших параметров, влияющих на показатели качества переключателей (в частности, рабочие частоты, R_{on} , C_{off}). При переключении сигналов большой мощности используют эквивалентные схемы в режиме большого сигнала.

Существует большое количество моделей транзисторов. В зависимости от пользователя требования к этим моделям могут быть разные, иногда противоречащие друг другу. Например, разработчикам компонентной базы важно точное соответствие модели физическим процессам в кристалле. Для разработчиков интегральных схем важна простота и эффективность. Для разработчиков систем автоматизированного

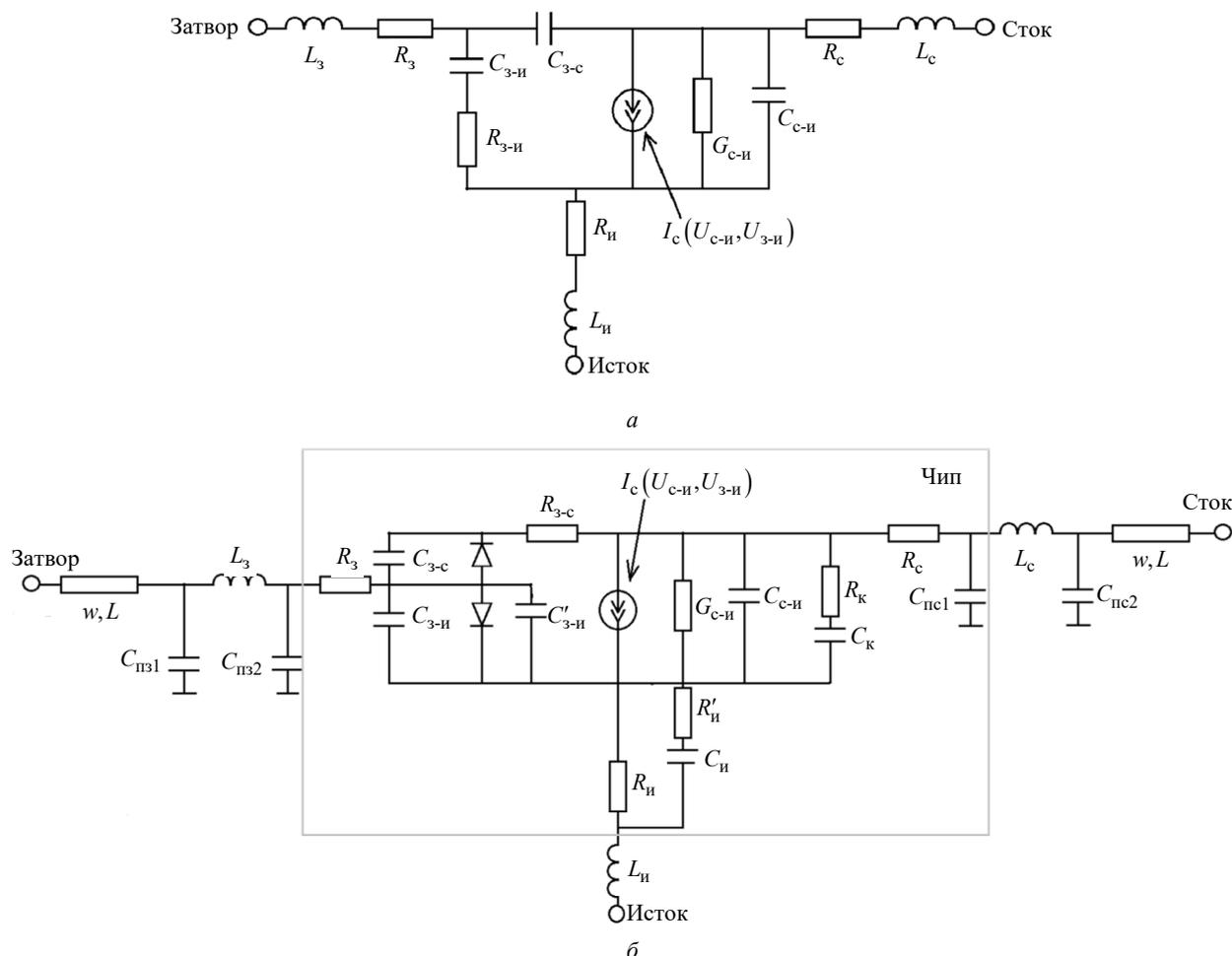


Рис. 8. Эквивалентные схемы НЕМТ-транзистора: а – малосигнальная; б – модель Чалмерса для большого сигнала

Fig. 8. Equivalent circuits of a HEMT transistor: а – low-signal; б – Chalmers model for a large signal

проектирования (САПР) важным параметром является совместимость новой модели с предыдущими версиями и т. д. [24]. При разработке переключателей важно, чтобы эквивалентные схемы были достаточно просты для анализа, но при этом хорошо согласовывались с работой прибора в двух состояниях: открытом и закрытом. Рассмотрим примеры моделей НЕМТ-транзисторов.

Малосигнальная схема, которая может быть использована в качестве модели НЕМТ-транзистора, имеет ряд упрощений (рис. 8, а) и применима только для рабочего режима транзистора при определенном управляющем сигнале [25]. Схема большого сигнала учитывает разные режимы транзистора и нелинейность его характеристик. В качестве примера взята модель Чалмерса (рис. 8, б). Данная схема учитывает пробойные явления, изменение режима и температуры прибора [26, 27].

В малосигнальной схеме $L_3, L_C, L_{и}, R_3, R_C, R_{и}$ – индуктивности выводов и сопротивления затвора стока и истока соответственно; $R_{3-и}, C_{3-и}$ – сопротивление и емкость между затвором и истоком; $G_{с-и}, C_{с-и}$ – проводимость и емкость между стоком и истоком; $I_c(U_{с-и}, U_{3-и})$ – зависящий от ширины канала ток стока. Схема большого сигнала дополнена паразитными ($C_{пз1,2}, C_{пс1,2}$), частотно-зависимыми элементами и $p-n$ -переходами между затвором, стоком и истоком, что позволяет учитывать пробойные явления.

Материалы НЕМТ-транзисторов и достижимые параметры переключателей на них. На данный момент на рынке можно встретить переключатели на НЕМТ-транзисторах из разных полупроводниковых материалов. Как было указано ранее, первые транзисторы с повышенной подвижностью электронов были выполнены из GaAs. Однако позже для изготовления приборов разработчики стали использовать и другие материалы. Для создания гетероструктур используются соединения $A^{II}B^{VI}$, $A^{III}B^V$ и их твердые растворы. Для переключателей преимущественно применяются соединения GaAs, GaN и InP [2–5, 7–10, 28].

GaAs и InP являются узкозонными материалами со сходными свойствами; GaN же является

существенно более широкозонным материалом [23], имеет существенно более высокое значение теплопроводности и критического поля.

Сравнивая используемые узкозонные материалы, можно сказать, что InP имеет преимущества перед GaAs по изоляционным свойствам, значению $FOM = R_{on} \cdot C_{off}$ и быстродействию. Этот материал более привлекателен при использовании для оптоэлектронного переключения, требующего совместимости с оптическими устройствами на основе InP. Однако у него есть и недостатки. Во-первых, GaAs выдерживает более высокую мощность, по сравнению с InP. Во-вторых, индий-фосфорные устройства более дорогие в изготовлении, имеют более хрупкие подложки. По этой причине GaAs является более привлекательным для использования в высокочастотных цифровых приложениях.

Для переключателей в качестве материала транзистора часто используется GaN. По сравнению с рассмотренными ранее узкозонными материалами GaN является широкозонным, ширина запрещенной зоны у него более чем в 2 раза шире. Следует выделить ряд ключевых факторов, делающих характеристики GaN НЕМТ специфическими [29]:

- рассеиваемая мощность больше в 10 раз, чем у GaAs;
- рабочая амплитуда напряжения выше в 5 раз, а тока в 2 раза, чем у GaAs;
- высокая теплопроводность;
- сильные пьезоэлектрические свойства;
- высокий ток затвора;
- высокая температура кристалла;
- высокая надежность.

GaN НЕМТ обычно выращивается либо на Si либо на SiC, реже на GaN и алмазе. В зависимости от подложки характеристики транзистора могут отличаться. Так, SiC обладает существенно большей теплопроводностью, чем чистый Si, поэтому транзисторы GaN-on-SiC обладают меньшими потерями, миниатюрны и предпочтительны для получения лучших характеристик переключателя. Однако кремниевые подложки дешевле, а сочетание высокого уровня плотности мощности и приемлемой изоляции позволяют GaN-on-Si также найти свое применение.

Табл. 2. Достижимые параметры переключаемых HEMT различных материалов

Tab. 2. Achievable parameters of switching HEMTs of various materials

Параметр	Материал			
	GaAs [2–5, 23, 28, 32]	GaN [2–5, 28, 30]	InP [2–5, 28]	InGaAs [31]
FOM (2005), фс	400	579	282	–
FOM (2018), фс	42	164	–	110.3
IL, дБ	0.3	<0.7	2.5	2.2
Iso, дБ	>29	>20	5	17.4
Freq _{max} , ГГц	85	150	170	<330

Возможная плотность мощности GaN на обоих типах подложек превышает возможность транзисторов на узкозонных материалах. Это происходит потому, что подвижность электронов, а значит, и их скорость насыщения у GaN выше. Соответственно, выше и возможное значение плотности тока. Кроме того, кристалл меньше греется при том же значении рассеиваемой мощности [29].

Однако сопротивление во включенном состоянии (R_{on}) у GaN-устройств выше, чем у InP и GaAs, что дает преимущества узкозонным материалам по показателю качества FOM. На малых мощностях изоляционные свойства переключателя на GaN HEMT хуже. Однако при повышении рабочей мощности и температуры изоляционные свойства устройств из InP и GaAs ухудшаются, в то время как свойства GaN остаются практически неизменными. На больших мощностях GaN HEMT проявляет уже лучшие по сравнению с узкозонными материалами свойства [28].

Следует также отметить встречающийся в литературе материал InGaAs. Это полупроводниковое соединение интересно тем, что изменяет свои физические и химические свойства, такие как ширину запрещенной зоны, постоянную решетки, максимальную температуру и пр., при разных соотношениях Ga и In друг к другу. В литературе есть примеры переключателей с неплохими достижимыми параметрами на основе InGaAs HEMT [30].

Достижимые характеристики переключателей на HEMT из GaAs в настоящее время позволяют добиться минимального значения FOM. Максимальная частота для коммерчески реализуемых изделий у переключателей на GaN HEMT, однако экспериментальные образцы соединений индия позволяют добиться более вы-

соких значений F_{max} . Переключатели на HEMT демонстрируют низкий уровень вносимых потерь и хорошую развязку. Следует отметить, что по мере развития технологий эти характеристики быстро улучшаются (табл. 2).

Кремниевые МОП-транзисторы. Комплиментарные МОП-технологии (КМОП) находят очень широкое применение в различных приложениях. В переключаемых устройствах они заняли свою нишу, благодаря постоянному развитию систем беспроводной связи. Например, мобильные телефоны GSM превратились из однодиапазонной системы TDMA, требующей только переключателя SPDT, в систему связи, объединяющую до четырех диапазонов GSM и WCDMA. Разработка новых стандартов связи постоянно усложняет структуру антенных переключателей, требуя все большее количество выходов. Так, в стандартах 4G число портов переключателей достигает 30. Учитывая огромный коммерческий спрос на устройства с поддержкой новых стандартов связи, можно ожидать, что потребность в антенных переключателях мобильной связи и приемо-передающих модулях РЛС будет исчисляться миллиардами штук в год. Для удовлетворения такого спроса нужна достаточно дешевая технология изготовления переключателей, которая к тому же будет легко интегрироваться с другими функциональными блоками конечного устройства. При этом переключатели должны быть многопозиционными и обладать приемлемыми характеристиками (линейностью, развязкой и пр.). В радиолокации приемо-передающие модули включают в себя не только переключатели, но и управляемые аттенюаторы, фазовращатели и усилители, что повышает значимость интегрируемости переключателей. Этим требованиям в полной мере отвечают КМОП-изделия [2–5, 7–10, 33, 34].

Появившиеся в конце середины прошлого века переключатели на КМОП ПТ имеют исключительно низкую стоимость, просты в разработке и отличаются чрезвычайно низкими токами потребления [7–10]. Рассмотрим подробнее принцип работы МОП-структуры и современные технологии КМОП, применяемые в переключателях.

Принцип работы и структуры МОП ПТ.

МОП-структура представляет собой соединение металла, диэлектрика (оксид) и легированного полупроводника (рис. 9, *a*). Функционирование приборов на ее основе связано с особенностями движения носителей при подаче на структуру напряжений различной полярности. Если подать напряжение таким образом, что электрическое поле будет направлено, например, от полупроводника *p*-типа к металлу, то в приконтактной области полупроводник–оксид начнут собираться основные для полупроводника носители – дырки, повышенная концентрация которых вызовет изменение объемного заряда в полупроводнике, который будет скомпенсирован зарядом противоположного знака в металле. Это режим обогащения. Если изменить полярность напряжения, то дырки начнут вытягиваться из приконтактной области, оставляя за собой отрицательно заряженные акцепторные центры в полупроводнике. Так как ионизированные центры примеси являются неподвижными, то и область, занимаемая объемным зарядом в полупроводнике, будет расширяться. Это режим обеднения. При дальнейшем увеличении электрического поля к приконтактной области начнут притягиваться неосновные для данного типа полупроводника подвижные носители – электроны, вызывая режим инверсии.

Работа различных полупроводниковых приборов основана на разных режимах МОП-

структур. Транзисторы на основе МОП-структур при открывании используют режим инверсии для формирования в подложке одного типа канала другого типа проводимости. Энергетическая диаграмма в этом режиме искажается таким образом, что уровень Ферми в приконтактной области оказывается ближе к дну зоны проводимости в полупроводнике *p*-типа (рис. 9, *б*) и потолку валентной зоны в полупроводнике *n*-типа. Рассмотрим подробнее особенности и основные характеристики используемых в переключателях МОП-транзисторов.

Для создания стандартного МОП-транзистора в МОП-структуру добавляются сильнолегированные другим типом примеси области, образующие сток и исток транзистора. Если используется подложка *p*-типа, то области стока и истока будут *n*⁺-типа (рис. 10, *a*). При подаче достаточного напряжения с затвора на исток в МОП-структуре обеспечивается режим инверсии. Повышенная концентрация неосновных для материала подложки подвижных носителей формирует тонкий канал между сильнолегированными стоком и истоком, выполненными из материала с другим, относительно подложки, типом проводимости. Это позволяет при подаче напряжения между стоком и истоком обеспечить протекание во внешней цепи тока. Сила тока будет регулироваться в зависимости от величины вертикального поля МОП-структуры, тем самым позволяя транзистору работать в качестве управляемого напряжением на затворе линейного сопротивления при относительно малых значениях напряжения на стоке.

Зависимость тока стока от напряжения между затвором и истоком в МОП ПТ с наведенным *n*-каналом находится в первом квадранте проходной вольт-амперной характери-

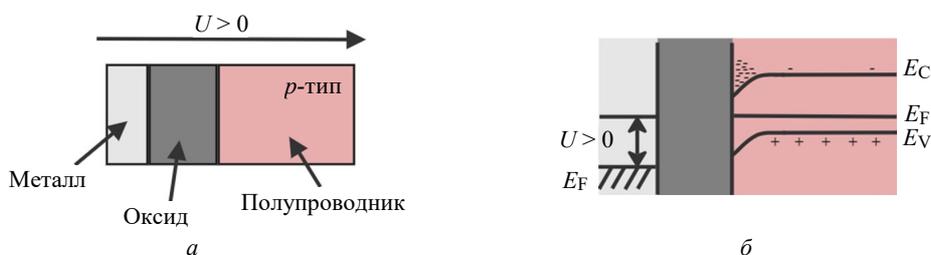


Рис. 9. Принцип работы МОП-структуры: *a* – структура металл–оксид–полупроводник; *б* – энергетическая диаграмма МОП-структуры в режиме инверсии

Fig. 9. Operation principle of the MOS structure: *a* – metal-oxide-semiconductor structure; *б* – energy diagram of the MOS structure in the inversion mode

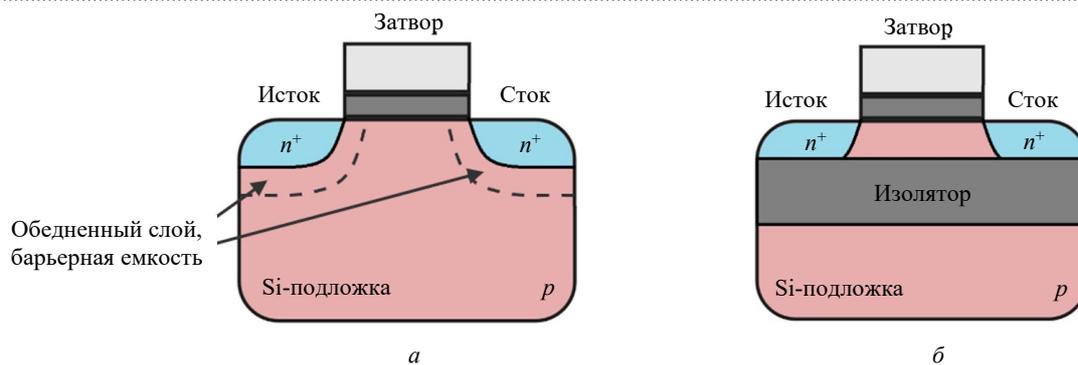


Рис. 10. Упрощенная структура МОП-транзистора: *a* – по стандартной технологии выращивания; *б* – по технологии "кремний на изоляторе"

Fig. 10. Simplified structure of the MOSFET: *a* – according to the standard growing technology; / *б* – according to the technology "silicon on the insulator"

стики $I_c(U_{з-и})$. При введении между стоком и истоком тонкого слоя легированного в соответствии с типом канала полупроводника формируется структура МОП ПТ со встроенным каналом. В таком транзисторе управляющее напряжение $U_{з-и}$ может быть разных полярностей. Отрицательное напряжение, т. е. приложенное от истока к затвору для n -канальных структур, может увеличиваться по модулю до некоторого значения $U_{отс}$. При достижении $U_{з-и} = U_{отс}$ к МОП-границе начнут притягиваться подвижные носители противоположного типа, переключая канал между стоком и истоком.

Технологии изготовления КМОП ПТ. Наиболее распространенной и дешевой является стандартная технология изготовления КМОП-структур, называемая в англоязычной литературе bulk CMOS. Большая часть электронных устройств сегодня создана по стандартной КМОП-технологии – хорошо отработанной, изученной, с низкими производственными затратами и высокой технологичностью [35]. Поэтому эта технология остается привлекательной и распространенной в технических приложениях, требующих массовости производства, даже если технические характеристики таких устройств будут проигрывать характеристикам устройств, построенных по другим технологиям.

Для создания интегральных схем часто используются комплементарные пары транзисторов на кремниевой подложке, построенные по стандартной технологии (рис. 11, *a*). Материалы областей стока и истока имеют повышенную концентрацию основных носителей, в

сравнении с материалом подложки, поэтому обедненный слой сосредоточен в основном в подложке (рис. 10, *a*), образуя барьерную емкость, т. е. каждый переход создает нежелательную паразитную емкость, причем при уменьшении линейных размеров устройства емкости будут возрастать. Это обстоятельство значительно ухудшает быстродействие устройств, построенных по стандартной КМОП-технологии, так как при переключении транзисторов много времени тратится на накопление или рассасывание заряда в обедненных областях, иными словами, на заряд паразитных емкостей. Другим недостатком стандартной КМОП-технологии является высокая проводимость кремниевых подложек, что ухудшает изоляционные свойства.

Для переключателей недостатки стандартной КМОП-технологии затрудняют создание устройств с широкой полосой частот, низкими вносимыми ослаблениями, высокими развязками и малым временем коммутации. Низкое значение напряжения пробоя не позволяет таким переключателям работать с высокой входной мощностью [7–10]. Для преодоления указанных недостатков применяются различные схемотехнические решения. Например, для повышения развязки в переключателях могут быть использованы эффекты компенсации сигнала при дифференциальном включении транзисторов [37]. Следует тем не менее отметить, что, несмотря на указанные недостатки, переключатели на стандартной КМОП-технологии все же выпускаются с достаточно приемлемыми характеристиками [7–10, 33].

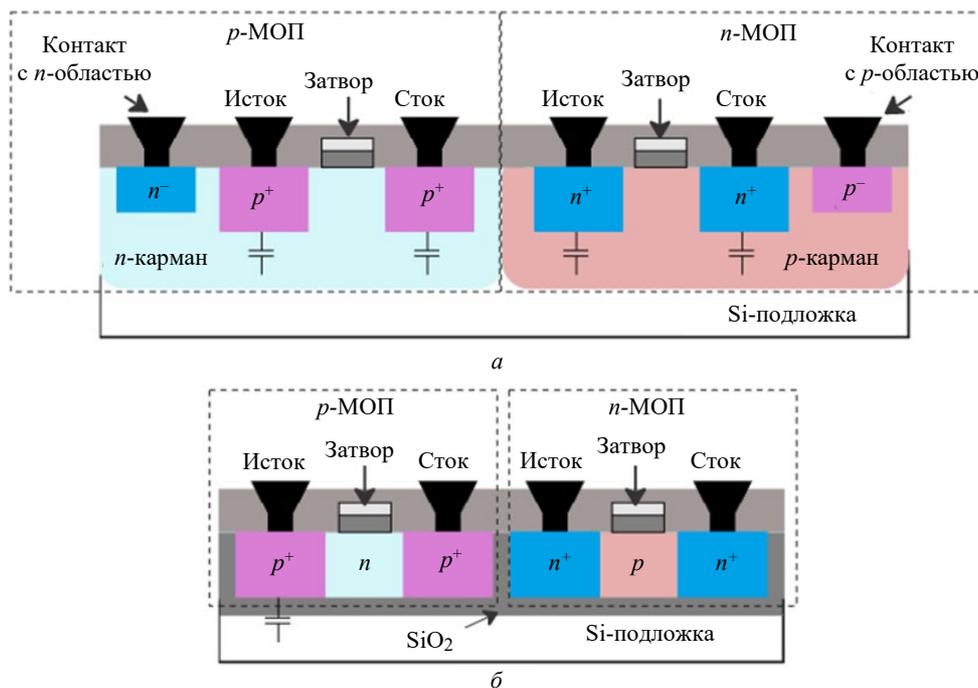


Рис. 11. Структуры комплементарных пар МОП-транзисторов: а – по стандартной технологии; б – по технологии КНИ [35, 36]
 Fig. 11. Structures of complementary pairs of MOS transistors according to: а – standard technology; б – SOI technology [35, 36]

Для устранения указанных недостатков стандартной КМОП-технологии в конце прошлого века было предложено поместить слой изолятора между поверхностным слоем, в котором формируются структуры транзисторов, и монокристаллической подложкой. Упрощенная структура такого решения, получившего название КНИ, отличается от стандартной только наличием в подложке изолирующего слоя (см. рис. 10, б). КМОП-транзисторы, созданные по технологии КНИ, в англоязычной литературе называемой SOI, состоят как бы из отдельных островков, изолированных друг от друга и от подложки. В качестве изолятора может быть использован, например, оксид кремния SiO₂ (рис. 11, б).

Благодаря изоляции отдельных транзисторов паразитные емкости переходов хоть и не исчезают полностью, но уменьшаются в несколько раз, что позволяет увеличить быстродействие. В стандартной КМОП-технологии для развязки устройств на одной подложке вводятся специальные канавки с пониженной концентрацией примеси (рис. 11, а), что накладывает ограничение на уплотнение компонентов. Введение изолятора позволяет значительно увеличить развязку и уменьшить вносимые потери. Поскольку ограничений по изоляции практически нет, в устрой-

ствах, построенных по технологии КНИ, не требуется введение дополнительных канавок и возможно повышение плотности транзисторов в несколько раз, что способствует миниатюризации устройств [7–10, 35, 36].

В КМОП-структурах важным параметром является также емкость затвора, характеризующая изоляцию затвора и, как следствие, исключительную малость токов управления. При сравнении стандартной и КНИ-технологии КМОП ПТ отмечается, что емкость затвора транзисторов остается приблизительно постоянной для этих решений [35].

Другим вариантом реализации технологии КНИ является использование в качестве изолирующей подложки сапфира. Такая технология получила отдельное название КНС (SOS). Следует отметить, что идея введения изолятора в подложку КМОП-структур была предложена именно для использования сапфира еще в 1961 г. [7–10, 35]. КНС обладает преимуществами как перед стандартной КМОП-технологией, так и перед КНИ. Сохраняя все указанные преимущества построения структур на изоляторе, использование сапфировых подложек показывает лучшие высокочастотные характеристики, имеет более высокую линейность, лучшую радиационную стойкость и бо-

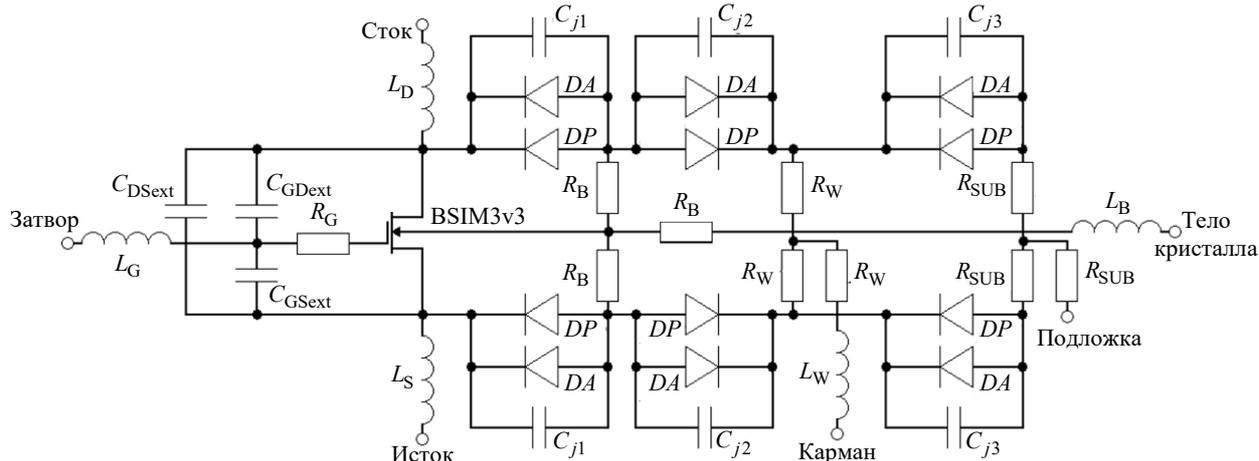


Рис. 13. Эквивалентная схема МОП-транзистора в режиме большого сигнала [40]

Fig. 13. Equivalent circuit of the MOS transistor in large signal mode [40]

набор параметров, который может быть получен экспериментально, аналитически или указан в техническом паспорте к устройству.

Как было отмечено, важной особенностью КНИ/КНС КМОП-структур является радиационная стойкость, однако обычно модели САПР не учитывают радиационных эффектов. Поэтому для проектирования устройств специального назначения разрабатываются дополнительные модели, учитывающие различные эффекты воздействия радиации: суммарной поглощённой дозы, импульсного облучения, одиночных ядерных частиц [37].

Современные СВЧ-модели МОП ПТ в большинстве своем предназначены для расчета характеристик транзистора в пологой области выходных характеристик. Такие модели обычно предполагают использование транзисторов для усиления, преобразования или детектирования сигналов. При проектировании переключателей основной интерес представляет крутая область работы транзисторов – область, в которой ток стока линейно зависит от напряжения между стоком и истоком при фиксированном управляющем напряжении. Поэтому при применении для разработки переключателей существующих стандартных моделей СВЧ МОП-транзисторов часто не удается обеспечить кор-

ректное моделирование параметров разрабатываемого переключателя. На основе стандартных моделей для проектирования переключателей специально разрабатываются модели МОП-транзисторов (рис. 13) [40].

Модель состоит из внутреннего ядра BSIM3v3 и "внешнего" транзистора. Здесь L_G , L_D , L_S , L_B , L_W – индуктивности металлизации затвора, стока, истока и подложки соответственно. Сопротивления затвора, карманов и подложки учитываются элементами R_G , R_B , R_W , R_{SUB} . Емкостные связи между металлизациями контактов затвора, стока и истока, соответственно, обозначены элементами C_{DSext} , C_{GSext} , C_{GDext} , $C_{j1,2,3}$ – емкости p - n -переходов между стоком, истоком и подложкой (карманом), DA и DP – плоскостные и краевые диоды между стоком, истоком и подложкой (карманом) соответственно. Данная схема позволяет получить корректный расчет параметров переключателей на частоте до 5 ГГц [40].

Достижимые параметры переключателей на основе КМОП ПТ. Переключатели на основе КМОП ПТ позволяют получить конкурентные значения достижимых параметров переключателей (табл. 3). На рынке представлены

Табл. 3. Достижимые параметры переключателей на КМОП ПТ [1, 7–10, 33, 40, 42–45]

Tab. 3. Achievable parameters of switches on CMOS FETs [1, 7–10, 33, 40, 42–45]

Параметр	Bulk [43]	Bulk [44]	Bulk [45]	SOI [40]	SOI [42]	SOS [34]	SOS [7–10]	SOS [1]
FOM, фс	147	–	134	64	75.6	448	–	264
IL, дБ	3.3...4	3.5	0.3...0.36	0.7...1.4	3...4.5	–	0.9...2.7	–
Iso, дБ	21.1...23.7	18	35...58	–	20...30	–	80...36	–
Диапазон частот, ГГц	130...180	70...100	0...10	0...60	140...220	0...25	$9 \cdot 10^{-6}$... 60	–

устройства как по стандартной КМОП-технологии, так и на основе КНИ и КНС-структур. Большая часть компаний, таких как Analog Devices, Qorvo, IDT, Mini-Circuits, Skyworks Solutions, работают над совершенствованием КНИ-технологий, но есть производители, работающие и с КНС-технологией. Особенно стоит отметить компанию Peregrine pSemi (ныне – Murata), приложившую большие усилия для совершенствования КНС-технологии и выпускающую переключатели КМОП только такого типа [2–5, 7–10].

КНС теоретически позволяет достичь наименьшего уровня интермодуляционных искажений, наиболее широкого диапазона рабочих частот и быстродействия. Тем не менее в современной литературе достижения КНС-технологий для переключательных устройств представлены довольно скупо. Ожидалось, что переключатели на основе КНС КМОП ПТ смогут достичь уровня FOM менее 200 фс в ближайшее время [1]. Однако, несмотря на то что КНС МОП ПТ имеют меньшие значения паразитных емкостей (C_{off}), чем ПТ, построенные по технологии КНИ, сопротивление во включенном состоянии у КНИ-транзисторов существенно ниже, что позволяет достичь уровня FOM, меньшего в несколько раз по сравнению с КНС-технологиями. Минимальное значение FOM для КНС-переключателей, которое удалось найти в литературе, составляет 264 фс [1], для КНИ-технологий – 64 фс [41].

Активное развитие технологий КМОП КНИ позволило построить устройства с очень широким диапазоном частот, конкурирующим с другими технологиями: 0...60 ГГц [41] и 140...220 ГГц [42]. Постоянно совершенствуются как схемотехнические, так и структурные решения, делая на настоящий момент переключатели на основе КНИ самыми оптимальными из КМОП-устройств по совокупности достижимых параметров, степени интегрируемости и стоимости изготовления.

Совершенствуется также и стандартная КМОП-технология. Дополнение различных вариантов внутреннего импеданса позволяет улучшить характеристики устройств [43, 44]. Подобные решения позволили улучшить FOM для переключателя по стандартной КМОП-

технологии до 147 фс при частоте от 110 до 180 ГГц [43]. Совершенствование структуры транзисторов также имеет потенциал. Теоретически полученные результаты позволили достичь FOM = 134 фс на частотах до 10 ГГц при очень низких потерях и довольно высокой развязке [45].

SiGe биполярные транзисторы с гетеропереходом. Рынок транзисторных переключателей базируется в основном на GaAs и GaN НЕМТ и Si КМОП ПТ [1–10, 13]. Однако в литературе встречаются и другие технологии, теоретически позволяющие достичь конкурентных параметров переключателей. Со временем они, возможно, будут использоваться для создания промышленных изделий. Наиболее хорошо представлены в литературе исследования на основе SiGe биполярных транзисторов с гетеропереходом (БГТ) или в англоязычной литературе heterojunction bipolar transistor (HBT) [46–51].

Идея повышения инжекции в эмиттере биполярного транзистора за счет изменения ширины запрещенной зоны материала была сформулирована еще в 1948 г. Однако на тот момент создание гетероструктур с малым количеством дефектов на границе раздела материалов было очень затруднено. Позднее развитие технологий гетеропереходов и постоянно ведущиеся разработки по улучшению параметров биполярных транзисторов, таких как коэффициент усиления по току и граничных частот, заставило разработчиков вновь обратить внимание на БГТ. Эмиттерный переход в БТ с гетеропереходом является гетеропереходом, состоящим из широкозонного эмиттера и узкозонной базы. Коллекторный переход также может быть гетеропереходом с широкозонным коллектором. В настоящее время БГТ изготавливаются на основе различных материалов широко известных гетеропереходных пар: SiGe, AlGaAs/GaAs, InGaP/GaAs. Также были попытки создать такие транзисторы на основе нитридов: GaN/SiC, AlGaN/GaN [47].

В переключателях обычно используются SiGe БГТ, позволяющие контролируемо менять ширину запрещенной зоны обычного Si, т. е. менять параметры материала в области базы биполярного транзистора, увеличивая граничные частоты его работы и степень инжекции носителей из эмиттера в базу при открывании

перехода. Надежность SiGe-приборов конкурентна с надежностью обычных кремниевых приборов, но при этом SiGe-технология позволяет обеспечить более высокие рабочие частоты. SiGe-приборы превосходят аналогичные GaAs-устройства по однородности характеристик на пластине, дешевизне изготовления и более высокому выходу годных, незначительно уступая при этом по быстродействию [48].

Создание переключателей на SiGe БГТ обычно осуществляется на основе переключателей на КМОП-транзисторах с помощью замены ПТ биполярными, например, как показано на рис. 14. Интерес к переходу от КМОП-переключателей к переключателям на БГТ особенно явно наблюдается в литературе, посвященной созданию переключательных устройств в миллиметровом диапазоне длин волн [46, 49]. Твердотельные ВЧ-переключатели с наиболее совершенными характеристиками реализуются на НЕМТ-транзисторах или *pin*-диодах, однако такие решения являются дорогостоящими. КМОП-решения дешевле, однако уступают по характеристикам более дорогим аналогам. В литературе показано, что теоретически использование SiGe БГТ, обладающего большим (до 500 ГГц) значением граничной частоты, позволит получить характеристики переключателей миллиметрового диапазона, близкие к НЕМТ-транзисторным и *pin*-диодным решениям, при этом их стоимость при серийном производстве будет существенно дешевле. Схема SPDT-переключателя, представленная на рис. 14, *а*, является довольно популярным решением для переключателей сигналов с частотой выше

60 ГГц [46, 49] (L_{stub} – шунтирующая линия передачи). Обратим внимание, что биполярные транзисторы можно подключить по-разному (рис. 14, *б*, *в*), но в обоих случаях работают в области насыщения. Конфигурации как прямого (рис. 14, *б*), так и обратного (рис. 14, *в*) насыщения позволяют добиться существенно меньшего значения сопротивления R_{on} , по сравнению с переключателем на КМОП. Конфигурация с обратным насыщением позволяет дополнительно улучшить характеристики переключателя. В режиме обратного насыщения транзистор перевернут, при этом эмиттер находится на выходе, а коллектор заземлен. Это улучшает характеристики коммутатора по двум причинам. Во-первых, эмиттер физически хорошо изолирован от проводящей кремниевой подложки, что приводит к уменьшению паразитных емкостей. Во-вторых, из-за более высокого уровня легирования в эмиттере и индивидуального уменьшения ширины запрещенной зоны, индуцированного Ge в базе, электроны для переноса из эмиттера в базу должны преодолеть больший потенциальный барьер (рис. 15). Поскольку потенциальный барьер ΔE_C в зоне проводимости больше у эмиттера, чем у коллектора ($\Delta E_{CE} > \Delta E_{CC}$), сопротивление закрытого эмиттерного перехода больше [46].

Перспективным для современных радиотехнических устройств является использование БиКМОП-технологии совместно с БГТ. Эта технология позволяет объединить преимущества БГТ и традиционного КМОП-процесса для проектирования интегральных схем на кри-

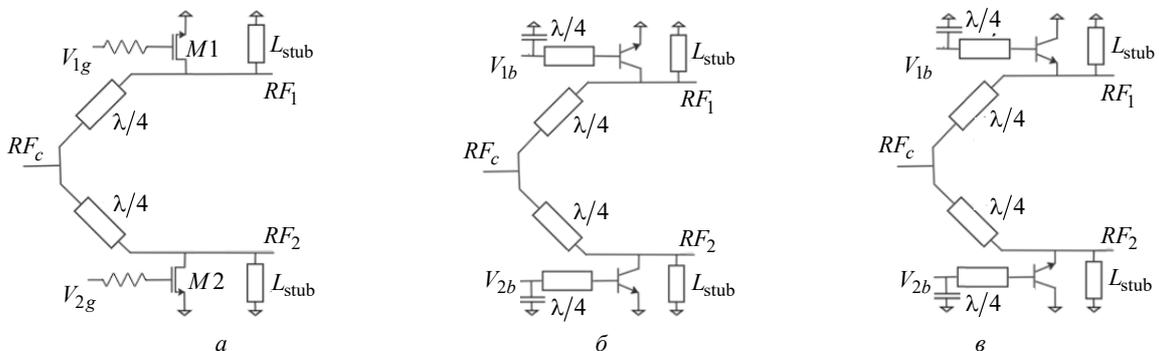


Рис. 14. SPDT-переключатель: *а* – на КМОП-транзисторах; *б* – на SiGe БГТ в конфигурации прямого насыщения; *в* – на SiGe БГТ в конфигурации обратного насыщения

Fig. 14. SPDT switch: on CMOS transistors (*a*); on SiGe HBT in the configuration of direct (*b*) and reverse (*v*) saturation

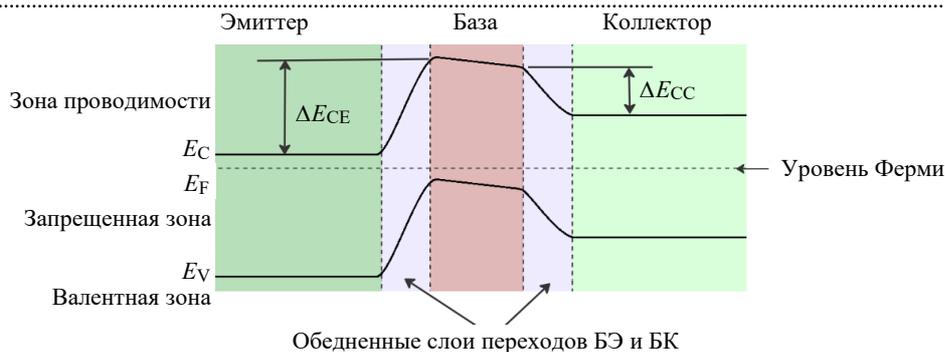


Рис. 15. Диаграмма энергетических зон SiGe БТ в термодинамическом равновесии

Fig. 15. Diagram of energy bands SiGe HBT in thermodynamic equilibrium



Рис. 16. 0.13-мкм технология интеграции биполярного транзистора в КМОП-процесс (БиКМОП) [50]

Fig. 16. 0.13 μm technology for integrating bipolar transistor into a CMOS process (BiCMOS) [50]

Табл. 4. Достижимые параметры переключателей на БТТ

Tab. 4. Achievable parameters of switches on HBT

Параметр	SiGe БТТ с прямым насыщением [46]	SiGe БТТ с обратным насыщением [46]	БиКМОП SiGe БТТ
FOM, фс	132	132	83.7
IL, дБ	1.8	1.4	2.6...3
Iso, дБ	19.3	19.3	23.5...29
Диапазон частот, ГГц	82...110	77...100	96...163

сталле, объединяя цифровые и аналоговые блоки с пассивными компонентами [48].

Пример реализации БиКМОП SiGe БТТ, т. е. создания биполярного транзистора в процессе изготовления кристалла по стандартной КМОП-технологии, предполагает проведение дополнительных мероприятий между стандартными этапами КМОП-технологии (рис. 16).

Построенные на БТТ по БиКМОП-технологии SPDT-переключатели продемонстрировали конкурентные с другими технологиями характеристики (табл. 4).

Заключение. В статье рассмотрены используемые в переключателях основные типы транзисторов, их материалы, технологии изготовления и достижимые параметры построен-

ных на них переключателей. Выбор того или иного типа прибора для построения переключателя зависит от ряда факторов. Среди транзисторных решений минимальное значение FOM демонстрируют GaAs НЕМТ. При переключении сигналов большой мощности наилучшими являются GaN НЕМТ-решения. Однако технологии КМОП более предпочтительны там, где требуются более дешевые и массово воспроизводимые устройства. КМОП КНИ-технологии демонстрируют хоть и немного худшие по сравнению с GaAs НЕМТ значе-

ния FOM, но вполне приемлемые для большинства приложений. Кроме того, КМОП КНИ и КНС обладают высокой радиационной стойкостью в сравнении со стандартной КМОП-технологией. На данный момент КМОП КНИ и КНС конкурируют с GaAs НЕМТ в космических и военных приложениях. Перспективным оказалось создание SiGe БГТ по БиКМОП-технологии. Развитие этой технологии в дальнейшем может сделать ее конкурентной с другими существующими решениями.

Авторский вклад

Торина Елена Михайловна – подготовка текста статьи и рисунков.

Кочемасов Виктор Неофидович – подготовка текста статьи.

Сафин Ансар Ризаевич – подготовка текста статьи.

Author's contribution

Elena M. Torina, preparation of the text and figures for the paper.

Victor N. Kochemasov, preparation of the text for the paper.

Ansar R. Safin, preparation of the text for the paper.

Список литературы

1. Hindle P. The state of RF and microwave switches // *Microwave J.* 2010. Vol. 53, № 11. P. 20–36.
2. Кочемасов В., Дингес С., Шадский В. Твердотельные СВЧ-переключатели средней и большой мощности. Ч. 1 // *Электроника: Наука, технология, бизнес.* 2019. № 8. С. 108–113. doi: 10.22184/1992-4178.2019.189.8.108.112
3. Кочемасов В., Дингес С., Шадский В. Твердотельные СВЧ-переключатели средней и большой мощности. Ч. 2 // *Электроника: Наука, технология, бизнес.* 2019. № 9. С. 116–131. doi: 10.22184/1992-4178.2019.190.9.116.130
4. Кочемасов В., Дингес С., Шадский В. Твердотельные СВЧ-переключатели средней и большой мощности. Ч. 3 // *Электроника: Наука, технология, бизнес.* 2019. № 10. С. 82–95. doi: 10.22184/1992-4178.2019.191.10.82.94
5. Кочемасов В., Дингес С., Шадский В. Твердотельные СВЧ-переключатели средней и большой мощности. Ч. 4 // *Электроника: Наука, технология, бизнес.* 2020. № 1. С. 142–151. doi: 10.22184/1992-4178.2020.192.1.142.151
6. Торина Е. М., Кочемасов В. Н., Сафин А. Р. Переключательные *pin*-диоды // *СВЧ-электроника.* 2021. № 4. С. 32–40.
7. Кочемасов В., Сафин А., Дингес С. Твердотельные СВЧ-переключатели с высокой скоростью коммутации. Ч. 1 // *Электроника: Наука, технология, бизнес.* 2020. № 10. С. 70–82. doi: 10.22184/1992-4178.2020.201.10.70.82
8. Кочемасов В., Сафин А., Дингес С. Твердотельные СВЧ-переключатели с высокой скоростью коммутации. Ч. 2 // *Электроника: Наука, технология, бизнес.* 2021. № 1. С. 98–109. doi: 10.22184/1992-4178.2021.202.1.98.108
9. Кочемасов В., Сафин А., Дингес С. Твердотельные СВЧ-переключатели с высокой скоростью коммутации. Ч. 3 // *Электроника: Наука, технология, бизнес.* 2021. № 3. С. 108–122. doi: 10.22184/1992-4178.2021.204.3.108.122
10. Кочемасов В., Сафин А., Дингес С. Твердотельные СВЧ-переключатели с высокой скоростью коммутации. Ч. 4 // *Электроника: Наука, технология, бизнес.* 2021. № 4. С. 104–115. doi: 10.22184/1992-4178.2021.205.4.104.115
11. Кочемасов В., Майстренко А. СВЧ-переключатели на основе МЭМС // *СВЧ-электроника.* 2016. № 1. С. 36–42.
12. A 25 THz FCO (6.3 fs RON* COFF) Phase-Change Material RF Switch Fabricated in a High Volume Manufacturing Environment with Demonstrated Cycling > 1 Billion Times / N. El-Hinnawy, G. Slovin, J. Rose, D. Howard // *IEEE/MTT-S Intern. Microwave Symp. (IMS).* Los Angeles, USA, 4–6 Aug. 2020. Piscataway: IEEE, 2020. P. 45–48. doi: 10.1109/IMS30576.2020.9223973
13. Berezniak A. F., Korotkov A. S. Solid-state microwave switches: Circuitry, manufacturing technologies and development trends. Review (pt. 1) // *Radioelectron-*

ics and Communications Systems. 2013. Vol. 56, № 4. P. 159–177. doi: 10.3103/S0735272713040018

14. Кочемасов В., Сафин А., Дингес С. Антенные переключатели. Ч. 1 // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2022. № 7. С. 102–115.

15. Кочемасов В., Сафин А., Дингес С. Антенные переключатели. Ч. 2 // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2022. № 8. С. 86–99. doi: 10.22184/1992-4178.2022.219.8.86.99

16. Кочемасов В., Сафин А., Дингес С. Антенные переключатели. Ч. 3 // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2022. № 9. С. 90–97. doi: 10.22184/1992-4178.2022.220.9.90.96

17. Кочемасов В., Сафин А., Дингес С. Антенные переключатели. Ч. 4 // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2022. № 10. С. 76–91. doi: 10.22184/1992-4178.2022.221.10.76.91

18. Zuleeg R., Notthoff J. K., Lehovc K. Femtojoule high speed planar GaAs E-JFET logic // IEEE Transactions on Electron Devices. 1978. Vol. 25, № 6. P. 628–639.

19. Zolper J. C., Hietala V. M., Housel M. S. Comparison of GaAs JFETs to MESFETs for high-temperature operation // Sandia National Lab. (SNL-NM). 1996. № SAND-96-1418C. P. CONF-9606159-6.

20. Александров Р. Монолитные интегральные схемы СВЧ: взгляд изнутри // Компоненты и технологии. 2005. № 53. С. 174–182.

21. Mimura T. The early history of the high electron mobility transistor (HEMT) // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002. № 50. P. 780–782.

22. A New Field-Effect Transistor with Selectively Doped GaAs/ n -Al_xGa_{1-x}As Heterojunctions / T. Mimura, S. Hiyamizu, T. Fujii, K. Nanbu // Japanese J. of Applied Physics. 1980. Vol. 19, № 5. P. 225–227. doi: 10.1143/JJAP.19.L225

23. High switching performance 0.1- μ m metamorphic HEMTs for low conversion loss 94-GHz resistive mixers / D. An, B. H. Lee, B. O. Lim, M. K. Lee // IEEE Electron Device Lett. 2005. Vol. 26, № 10. P. 707–709. doi: 10.1109/LED.2005.856013

24. Денисенко В. Моделирование МОП-транзисторов. Методологический аспект // Компоненты и технологии. 2004. № 43. С. 56–61.

25. Коколов А. А., Бабак Л. И. Методика построения малосигнальной модели СВЧ-транзистора с высокой подвижностью электронов // Докл. Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2010. Т. 22, № 2–1. С. 153–156.

26. Angelov I., Bengtsson L., Garcia M. Extensions of the Chalmers nonlinear HEMT and MESFET model // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1996. Vol. 44, № 10. P. 1664–1674.

27. Лазарев А. В., Рахимов С. К. Применение GaAs HEMT-технологии для разработки ММИС МШУ // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 33. С. 1376–1381.

28. Kameche M., Drozdovski N. V. GaAs-, InP- and GaN HEMT-based microwave control devices: what is best and why // Microwave J. 2005. Vol. 48, № 5. P. 164–173.

29. Moore A., Jimenez J. GaN RF Technology for dummies // TriQuint Special Edition. 2015. Vol. 111. P. 5774.

30. W-band SPDT switches in planar and tri-gate 100-nm gate-length GaN-HEMT technology / F. Thome, E. Ture, P. Brückner, Q. Rüdiger // 11th German Microwave Conf. Piscataway: IEEE, 2018. P. 331–334. doi: 10.23919/GEMIC.2018.8335097

31. Jie M., Fei Y., HuaiYu T. Millimeter-Wave SPDT Switch MMICs With Travelling Wave Concept // IEEE 5th Intern. Conf. on Integrated Circuits and Microsystems. Piscataway: IEEE, 2020. P. 263–266. doi: 10.1109/ICICM50929.2020.9292161

32. Thome F., Ambacher O. Highly isolating and broadband single-pole double-throw switches for millimeter-wave applications up to 330 GHz // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2017. Vol. 66, № 4. P. 1998–2009. doi: 10.1109/TMTT.2017.2777980

33. Meng F., Ma K., Yeo K. S. 2.3 A 130-to-180GHz 0.0035 mm² SPDT switch with 3.3 dB loss and 23.7 dB isolation in 65nm bulk CMOS // IEEE Intern. Solid-State Circuits Conf. Digest of Technical Papers. Piscataway: IEEE, 2015. P. 1–3. doi: 10.1109/isscc.2015.7062852

34. The state-of-the-art of silicon-on-sapphire CMOS RF switches / D. Kelly, C. Brindle, C. Kemerling, M. Stuber // IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symp. 2005. Piscataway: IEEE, 2005. P. 200–203. doi: 10.1109/CSICS.2005.1531812

35. Comparison of bulk and SOI CMOS Technologies in a DSP Processor Circuit Implementation / P. Simonen, A. Heinonen, M. Kuulusa, J. Nurmi // ICM 2001 Proc. The 13th Intern. Conf. on Microelectronics. Piscataway: IEEE, 2001. P. 107–110. doi: 10.1109/ICM.2001.997499

36. Nakamura T., Matsushashi H., Nagatomo Y. Silicon on sapphire (SOS) device technology // Oki technical review. 2004. Vol. 71, № 4. P. 66–69.

37. Проектирование МОП-переключателей СВЧ-диапазона с высоким уровнем развязки / В. В. Репин, И. И. Мухин, М. Г. Дроздецкий, А. С. Шнитников // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2015). 2015. С. 125–126.

38. Comparison of substrate effects in sapphire, trap-rich and high resistivity silicon substrates for RF-SOI applications / V. Sekar, C. C. Cheng, R. Whatley, Ch. Zeng, A. Zeng, A. Genc, T. Ranta, F. Rotella // IEEE 15th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems. Piscataway: IEEE, 2015. P. 37–39.

39. Компактная макромодель КНИ/КНС МОП-транзистора, учитывающая радиационные эффекты / К. О. Петросянц, Л. М. Самбурский, И. А. Харитонов, А. П. Ятманов // Изв. высших учебных заведений.

Электроника. 2011. № 1 (87). С. 20–28.

40. Метелкин И. О., Усачев Н. А., Елесин В. В. Модель изолированного МОП-транзистора для проектирования СВЧ-переключателей сигнала // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2015). 2015. С. 111–112.

41. 5G mm-Wave front-end-module design with advanced SOI process / C. Li, M. Wang, T. Chi, A. Kumar // IEEE 12th Intern. Conf. on ASIC. Piscataway: IEEE, 2017. P. 1017–1020. doi: 10.1109/ASICON.2017.8252651

42. Uzunkol M., Rebeiz G. M. 140–220 GHz SPST and SPDT switches in 45 nm CMOS SOI // IEEE Microwave and Wireless Components Let. 2012. Vol. 22, № 8. P. 412–414.

43. Meng F., Ma K., Yeo K. S. 2.3 A 130-to-180GHz 0.0035 mm² SPDT switch with 3.3 dB loss and 23.7 dB isolation in 65nm bulk CMOS // IEEE Intern. Solid-State Circuits Conf. Digest of Technical Papers. Piscataway: IEEE, 2015. P. 1–3. doi: 10.1109/isscc.2015.7062852

44. A W-Band SPDT Switch With 15-dBm P1dB in 55-nm Bulk CMOS / L. Chen, Z. G., Y. Sun, T. Hamilton, X. Zhu // IEEE Microwave and Wireless Components Let. 2022. Vol. 32, № 7. P. 879–882.

45. Ning R., Liu T., Shen J. Modeling and analysis of stacked depletion-mode NMOS transistors for RF switch applications // IEEE Intern. Conf. on Electro Information Technology. Piscataway: IEEE, 2017. P. 34–38. doi: 10.1109/EDTM.2017.8000254

46. A 94 GHz, 1.4 dB Insertion Loss Single-Pole Double-Throw Switch Using Reverse-Saturated SiGe HBTs / R. L. Schmid, A. C. Ulusoy, P. Song, J. D. Cressler // IEEE Microwave and Wireless Components Let. 2014. Vol. 24, № 1. P. 56–58. doi: 10.1109/LMWC.2013.2288276

47. Ковалев А. Н. Биполярные гетеротранзисторы на основе SiGe и aШbv // Изв. высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2008. № 2. С. 4–21.

48. Мухин И. И., Репин В. В. Применение SiGe БиКМОП-технологии для построения МИС дискретного фазовращателя, использующего принцип векторного сложения // Микроэлектроника СВЧ: сб. тр. Всерос. конф. Т. 2. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2012. С. 120–122.

49. Dong H., Chen J., Hou D. A Compact Bi-directional K and Ka Band SPDT in 0.13 μ m SiGe BiCMOS Process // IEEE Intern. Symp. on Radio-Frequency Integration Technology. Piscataway: IEEE, 2018. P. 1–3.

50. Avenier G., Chevalier P., Troillard G. et al. 0.13 μ m SiGe BiCMOS technology for mm-wave applications // IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. Piscataway: IEEE, 2008. P. 89–92. doi: 10.1109/BIPOL.2008.4662719

51. Ulusoy A. C., Song P., Schmid R. L. et al. A low-loss and high isolation D-band SPDT switch utilizing deep-saturated SiGe HBTs // IEEE Microwave and Wireless Components Let. 2014. Vol. 24, № 6. P. 400–402. doi: 10.1109/LMWC.2014.2313529

Информация об авторах

Торина Елена Михайловна – кандидат технических наук (2016), доцент кафедры формирования и обработки радиосигналов Национального исследовательского университета (НИУ) "МЭИ", старший научный сотрудник ООО "Радиокомп". Автор более 20 научных работ. Сфера научных интересов – радиофизика и электроника; устройства генерирования и формирования радиосигналов.

Адрес: НИУ "МЭИ", Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250, Россия

E-mail: dro.em@yandex.ru

Кочемасов Виктор Неофидович – кандидат технических наук (1976), генеральный директор ООО "Радиокомп". Автор более 150 научных работ, включая четыре монографии и более сорока авторских свидетельств на изобретения. Сфера научных интересов – радиотехника; устройства формирования и обработки радиосигналов, фильтры СВЧ; синтезаторы частот и сигналов.

Адрес: ООО "Радиокомп", пр. Волгоградский, д. 42, Москва, 109316, Россия

E-mail: kochemasovdv@gmail.com

Сафин Ансар Ризаевич – кандидат технических наук (2014), доцент, заведующий кафедрой формирования и обработки радиосигналов НИУ "МЭИ", старший научный сотрудник ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, начальник отдела в ООО "Радиокомп". Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – радиофизика и электроника; физика магнитных явлений; спинтроника.

Адрес: НИУ "МЭИ", Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250, Россия

E-mail: arsafin@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6507-6573>

References

1. Hindle P. The State of RF and Microwave Switches. Microwave J. 2010, vol. 53, no. 11, pp. 20–36.

2. Kochemasov V., Dinges S., Shadsky V. Solid-State Microwave Switches of Medium and High Power.

Pt. 1. Electronics: Science, Technology, Business. 2019, no. 8, pp. 108–113. doi: 10.22184/1992-4178.2019.189.8.108.112 (In Russ.)

3. Kochemasov V., Dinges S., Shadsky V. Solid-State Microwave Switches of Medium and High Power. Pt. 2. Electronics: Science, Technology, Business. 2019, no. 9, pp. 116–131. doi: 10.22184/1992-4178.2019.190.9.116.130 (In Russ.)
4. Kochemasov V., Dinges S., Shadsky V. Solid-State Microwave Switches of Medium and High Power. Pt. 3. Electronics: Science, Technology, Business. 2019, no. 10, pp. 82–95. doi: 10.22184/1992-4178.2019.191.10.82.94 (In Russ.)
5. Kochemasov V., Dinges S., Shadsky V. Solid-State Microwave Switches of Medium and High Power. Pt. 4. Electronics: Science, Technology, Business. 2020, no. 1, pp. 142–151. doi: 10.22184/1992-4178.2020.192.1.142.151 (In Russ.)
6. Torina E. M., Kochemasov V. N., Safin A. R. Switching *pin*-diodes. SHF Electronics. 2021, no. 4, pp. 32–40. (In Russ.)
7. Kochemasov V., Safin A., Dinges S. Solid State Microwave Switches with High Switching Speed. Pt. 1. Electronics: Science, Technology, Business. 2020, no. 10, pp. 70–82. doi: 10.22184/1992-4178.2020.201.10.70.82 (In Russ.)
8. Kochemasov V., Safin A., Dinges S. Solid State Microwave Switches with High Switching Speed. Pt. 2. Electronics: Science, Technology, Business. 2021, no. 1, pp. 98–109. doi: 10.22184/1992-4178.2021.202.1.98.108 (In Russ.)
9. Kochemasov V., Safin A., Dinges S. Solid State Microwave Switches with High Switching Speed. Pt. 3. Electronics: Science, Technology, Business. 2021, no. 3, pp. 108–122. doi: 10.22184/1992-4178.2021.204.3.108.122 (In Russ.)
10. Kochemasov V., Safin A., Dinges S. Solid State Microwave Switches with High Switching Speed. Pt. 4. Electronics: Science, Technology, Business. 2021, no. 4, pp. 104–115. doi: 10.22184/1992-4178.2021.205.4.104.115 (In Russ.)
11. Kochemasov V., Maystrenko A. Microwave Switches Based on MEMS. Microwave Electronics. 2016, no. 1, pp. 36–42. (In Russ.)
12. El-Hinnawy N., Slovin G., Rose J., Howard D. A 25 THz FCO (6.3 fs RON* COFF) Phase-Change Material RF Switch Fabricated in a High Volume Manufacturing Environment with Demonstrated Cycling > 1 Billion Times. IEEE/MTT-S Intern. Microwave Symp. (IMS). Los Angeles, USA, 4–6 Aug. 2020. Piscataway, IEEE, 2020, pp. 45–48. doi: 10.1109/IMS30576.2020.9223973
13. Berezniak A. F., Korotkov A. S. Solid-State Microwave Switches: Circuitry, Manufacturing Technologies and Development Trends. Review (part 1). Radioelectronics and Communications Systems. 2013, vol. 56, no. 4, pp. 159–177. doi: 10.3103/S0735272713040018
14. Kochemasov V., Safin A., Dinges S. Antenna Switches. Pt. 1. Electronics: Science, Technology, Business. 2022, no. 7, pp. 102–115. (In Russ.)
15. Kochemasov V., Safin A., Dinges S. Antenna Switches. Pt. 2. Electronics: Science, Technology, Business. 2022, no. 8, pp. 86–99. doi: 10.22184/1992-4178.2022.219.8.86.99 (In Russ.)
16. Kochemasov V., Safin A., Dinges S. Antenna Switches. Pt. 3. Electronics: Science, Technology, Business. 2022, no. 9, pp. 90–97. doi: 10.22184/1992-4178.2022.220.9.90.96 (In Russ.)
17. Kochemasov V., Safin A., Dinges S. Antenna Switches. Pt. 4. Electronics: Science, Technology, Business. 2022, no. 10, pp. 76–91. doi: 10.22184/1992-4178.2022.221.10.76.91 (In Russ.)
18. Zuleeg R., Notthoff J. K., Lehovc K. Femtojoule High Speed Planar GaAs E-JFET logic. IEEE Transactions on Electron Devices. 1978, vol. 25, no. 6, pp. 628–639.
19. Zolper J. C., Hietala V. M., Housel M. S. Comparison of GaAs JFETs to MESFETs for High-Temperature Operation. Sandia National Lab. (SNL-NM). 1996, no. SAND-96-1418C, p. CONF-9606159-6.
20. Alexandrov R. Microwave Monolithic Integrated Circuits: An Inside View. Components and Technologies. 2005, no. 53, pp. 174–182. (In Russ.)
21. Mimura T. The Early History of the High Electron Mobility Transistor (HEMT). IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002, no. 50, pp. 780–782.
22. Mimura T., Hiyamizu S., Fujii T., Nanbu K. A New Field-Effect Transistor with Selectively Doped GaAs/ n -Al_xGa_{1-x}As Heterojunctions. Japanese J. of Applied Physics. 1980, vol. 19, no. 5, pp. 225–227. doi: 10.1143/JJAP.19.L225
23. An D., Lee B. H., Lim B. O., Lee M. K. High Switching Performance 0.1- μ m Metamorphic HEMTs for low Conversion Loss 94-GHz Resistive Mixers. IEEE Electron Device Lett. 2005, vol. 26, no. 10, pp. 707–709. doi: 10.1109/LED.2005.856013
24. Denisenko V. Modeling MOS Transistors. Methodological Aspect. Components and Technologies. 2004, no. 43, pp. 56–61. (In Russ.)
25. Kokolov A. A., Babak L. I. A Technique for Constructing a Small-Signal Model of a Microwave Transistor with High Electron Mobility. Reports of the Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. 2010, vol. 22, no. 2–1, pp. 153–156. (In Russ.)
26. Angelov I., Bengtsson L., Garcia M. Extensions of the Chalmers Nonlinear HEMT and MESFET model. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1996, vol. 44, no. 10, pp. 1664–1674.
27. Lazarev A. V., Rakhimov S. K. Application of GaAs HEMT Technology for the Development of MMIS LNA. Innovations. The Science. Education. 2021, no. 33, pp. 1376–1381. (In Russ.)
28. Kameche M., Drozdovski N. V. GaAs-, InP- and GaN HEMT-Based Microwave Control Devices: What is Best and Why. Microwave J. 2005, vol. 48, no. 5, pp. 164–173.
29. Moore A., Jimenez J. GaN RF Technology for Dummies. TriQuint Special Edition. 2015, vol. 111, p. 5774.
30. Thome F., Ture E., Brückner P., Rüdiger Q. W-Band SPDT Switches in Planar and Tri-Gate 100-nm Gate-Length GaN-HEMT Technology. 11th German

Microwave Conf. Piscataway, IEEE, 2018, pp. 331–334. doi: 10.23919/GEMIC.2018.8335097

31. Jie M., Fei Y., HuaiYu T. Millimeter-Wave SPDT Switch MMICs With Travelling Wave Concept. IEEE 5th Intern. Conf. on Integrated Circuits and Microsystems. Piscataway, IEEE, 2020, pp. 263–266. doi: 10.1109/ICICM50929.2020.9292161

32. Thome F., Ambacher O. Highly Isolating and Broadband Single-Pole Double-Throw Switches for Millimeter-Wave Applications up to 330 GHz. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2017, vol. 66, no. 4, pp. 1998–2009. doi: 10.1109/TMTT.2017.2777980

33. Meng F., Ma K., Yeo K. S. 2.3 A 130-to-180GHz 0.0035 mm 2 SPDT Switch with 3.3 dB Loss and 23.7 dB Isolation in 65nm Bulk CMOS. IEEE Intern. Solid-State Circuits Conf. Digest of Technical Papers. Piscataway, IEEE, 2015, pp. 1–3. doi: 10.1109/isscc.2015.7062852

34. Kelly D., Brindle C., Kemerling C., Stuber M. The State-of-the-Art of Silicon-on-Sapphire CMOS RF switches. IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symp. 2005. Piscataway, IEEE, 2005, pp. 200–203. doi: 10.1109/CSICS.2005.1531812

35. Simonen P., Heinonen A., Kuulusa M., Nurmi J. Comparison of bulk and SOI CMOS Technologies in a DSP Processor Circuit Implementation. ICM 2001 Proc. The 13th Intern. Conf. on Microelectronics. Piscataway, IEEE, 2001, pp. 107–110. doi: 10.1109/ICM.2001.997499

36. Nakamura T., Matsushashi H., Nagatomo Y. Silicon on Sapphire (SOS) Device Technology. Oki Technical Review. 2004, vol. 71, no. 4, pp. 66–69.

37. Repin V. V., Mukhin I. I., Drozdetsky M. G., Shnitnikov A. S. Designing Microwave Range Mop Switches with a High Level of Decoupling // Microwave Engineering and Telecommunication Technologies (KryMiKo'2015). 2015, pp. 125–126. (In Russ.)

38. Sekar V., Cheng C.C., Whatley R., Zeng Ch., Zeng A., Genc A., Ranta T., Rotella F. Comparison of Substrate Effects in Sapphire, Trap-Rich and High Resistivity Silicon Substrates for RF-SOI Applications. IEEE 15th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems. Piscataway, IEEE, 2015, pp. 37–39.

39. Petrosyants K. O., Sambursky L. M., Khritonov I. A., Yatmanov A. P. A Compact Macromodel of SOI/SOS MOS Transistors That Takes into Account Radiation Effects. Electronics. 2011, no. 1 (87), pp. 20–28. (In Russ.)

40. Metelkin I. O., Usachev N. A., Yelesin V. V. Model of an Isolated MOS Transistor for Designing Microwave Signal Switches. SHF-technics and telecommunication technologies (KryMiKo'2015). 2015, pp. 111–112. (In Russ.)

41. Li C., Wang M., Chi T., Kumar A. 5G mm-Wave Front-End-Module Design with Advanced SOI Process. IEEE 12th Intern. Conf. on ASIC. Piscataway, IEEE, 2017, pp. 1017–1020. doi: 10.1109/ASICON.2017.8252651

42. Uzunkol M., Rebeiz G. M. 140–220 GHz SPST and SPDT Switches in 45 nm CMOS SOI. IEEE Microwave and Wireless Components Let. 2012, vol. 22, no. 8, pp. 412–414.

43. Meng F., Ma K., Yeo K. S. 2.3 A 130-to-180GHz 0.0035 mm 2 SPDT Switch with 3.3 dB loss and 23.7 dB Isolation in 65nm Bulk CMOS. IEEE Intern. Solid-State Circuits Conf. Digest of Technical Papers. Piscataway, IEEE, 2015, pp. 1–3. doi: 10.1109/isscc.2015.7062852

44. Chen L., Ge Z., Sun Y., Zhu X. A W-Band SPDT Switch with 15-dBm P1dB in 55-nm Bulk CMOS. IEEE Microwave and Wireless Components Let. 2022, vol. 32, no. 7, pp. 879–882.

45. Ning R., Liu T., Shen J. Modeling and Analysis of Stacked Depletion-Mode NMOS Transistors for RF Switch Applications. IEEE Intern. Conf. on Electro Information Technology. Piscataway, IEEE, 2017, pp. 34–38. doi: 10.1109/EDTM.2017.8000254

46. Schmid R. L., Ulusoy A. C., Song P., Cressler J. D. A 94 GHz, 1.4 dB Insertion Loss Single-Pole Double-Throw Switch Using Reverse-Saturated SiGe HBTs. IEEE Microwave and Wireless Components Let. 2014, vol. 24, no. 1, pp. 56–58. doi: 10.1109/LMWC.2013.2288276

47. Kovalev, A. N. Bipolar Heterotransistors Based on SiGe and a_{IIIbV} . News of Higher Educational Institutions. Materials of Electronic Engineering. 2008, no. 2, pp. 4–21. (In Russ.)

48. Mukhin I. I., Repin V. V. Application of SiGe BiCMOS Technology to Build a MIS Discrete Phase Shifter Using the Principle of Vector Addition. Microelectronics Microwave: Proc. of All-Russian Conf. Vol. 2. St Petersburg, Publishing House of SPbETU, 2012, pp. 120–122. (In Russ.)

49. Dong H., Chen J., Hou D. A Compact Bi-directional K and Ka Band SPDT in 0.13 μm SiGe BiCMOS Process. IEEE Intern. Symp. on Radio-Frequency Integration Technology. Piscataway, IEEE, 2018, pp. 1–3.

50. Avenier G., Chevalier P., Troillard G. et al. 0.13 μm SiGe BiCMOS Technology for mm-Wave Applications. IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. Piscataway, IEEE, 2008, pp. 89–92. doi: 10.1109/BIPOL.2008.4662719

51. Ulusoy A. C., Song P., Schmid R. L. et al. A low-loss and High Isolation D-band SPDT Switch Utilizing Deep-Saturated SiGe HBTs. IEEE Microwave and Wireless Components Let. 2014, vol. 24, no. 6, pp. 400–402. doi: 10.1109/LMWC.2014.2313529

Information about the authors

Elena M. Torina, Cand. Sci. (Eng.) (2016), Associate Professor of the Department of Radio Signal Generation and Processing of NRU "MPEI", Senior Researcher of Radiocomp LLC. The author of more than 20 scientific pa-

pers. Area of expertise: radiophysics and electronics; radio signals oscillators.
Address: NRU "MPEI", 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia
E-mail: dro.em@yandex.ru

Victor N. Kochemasov, Cand. Sci. (Eng.) (1976), General Director of Radiocomp LLC. Author of over 150 scientific papers, including four monographs and over forty copyright certificates for inventions. Area of expertise: radio engineering; devices for the generation and processing of radio signals; microwave filters; synthesizers of frequencies and signals.

Address: Radiocomp LLC, 42, Volgogradsky Ave., Moscow 109316, Russia
E-mail: kochemasovdv@gmail.com

Ansar R. Safin, Cand. Sci. (Eng.) (2014), Head of the Department of Radio Signal Generation and Processing, NRU "MPEI", Senior Researcher at the Institute of Radio Technologies and Electronics of the Russian Academy of Science n. a. V. A. Kotelnikov, Head of the Department of Radiocomp LLC. The author of more than 50 scientific papers. Area of expertise: radiophysics and electronics; physics of magnetic phenomena; spintronics.

Address: NRU "MPEI", 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia
E-mail: arsafin@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6507-6573>
