

DOI: 10.18721/JCSTCS.12407
УДК 621.316.543.1

СИНТЕЗ И РЕАЛИЗАЦИЯ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ СВЧ-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ GaAs pHEMT-ТЕХНОЛОГИИ

А.Ф. Березняк¹, А.С. Коротков²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры,
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Предложен новый метод синтеза проектирования твердотельных СВЧ-переключателей. Метод базируется на процедуре синтеза по ФНЧ-прототипу. Синтез СВЧ-переключателя осуществляется по величине требуемой развязки. Минимальные вносимые потери достигаются с помощью последовательной согласующей индуктивности, создаваемой на поверхности кристалла интегральной схемы. Путем последовательных частотных и схемных преобразований формируется топология СВЧ-переключателя. Эффективность предлагаемого метода подтверждается изготовлением GaAs pHEMT SPDT СВЧ-монолитной интегральной схемы переключателя С-диапазона.

Ключевые слова: синтез, реализация, СВЧ-переключатель, AlN, GaAs pHEMT, SPDT.

Ссылка при цитировании: Березняк А.Ф., Коротков А.С. Синтез и реализация монолитных интегральных схем СВЧ-переключателей на основе GaAs pHEMT-технологии // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2019. Т. 12. № 4. С. 84–96. DOI: 10.18721/JCSTCS.12407

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

DESIGN METHOD AND MANUFACTURING MONOLITHIC MICROWAVE INTEGRATED CIRCUIT SWITCHES ON GaAs pHEMT

A.F. Berezniak¹, A.S. Korotkov²

¹ All-Russian Scientific Research Institute of Radio Equipment,
St. Petersburg, Russian Federation;

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

This paper proposes a new synthesis method for design of solid-state microwave switches. The synthesis method based on the design of a prototype low-pass filter. By implementing successive frequency transformations and circuit conversions, a switch topology obtained. The effectiveness of the method is demonstrated by manufacturing a monolithic GaAs pHEMT SPDT switch of C-band.

Keywords: design method, microwave switch, A3B5, GaAs pHEMT, SPDT.

Citation: Berezniak A.F., Korotkov A.S. Design method and manufacturing monolithic microwave integrated circuit switches on GaAs pHEMT. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2019, Vol. 12, No. 4, Pp. 84–96. DOI: 10.18721/JCSTCS.12407

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

СВЧ-переключатели используются для коммутации СВЧ-трактов (например, антенных, приёмных, передающих, контрольно-измерительных трактов). СВЧ-переключатели входят в состав аппаратуры систем связи, радиолокации, навигации, управления [1–4]. В настоящее время развитие СВЧ-переключателей происходит по трём направлениям: рабочие частоты достигают десятков гигагерц [5–9], осваиваются новые технологии [10–12], СВЧ-переключатели входят в состав более сложных СВЧ-монолитных интегральных схем (СВЧ МИС) [13–15].

Основы общей теории СВЧ-переключателей изложены в монографиях [16, с. 2; 17, с. 19]. Существующие методы синтеза (проектирования) СВЧ-переключателей основываются на представлении переключающих элементов в виде дискретных компонентов с различными паразитными (индуктивными/ёмкостными) связями. Методы синтеза монолитных интегральных схем (МИС) переключателей, основывающиеся на представлении переключающих элементов в виде интегральных компонентов с задаваемыми после решения задачи параметрического синтеза размерами, не развиты или отсутствуют, в том числе, для МИС СВЧ-переключателей на основе полупроводников группы АЗВ5.

В данной статье развивается методика синтеза твердотельных СВЧ-переключателей на базе представления СВЧ-переключателя как параметрического частотного фильтра [18]. Приводятся результаты синтеза и реализации монолитной интегральной схемы СВЧ-переключателя С-диапазона типа SPDT – «один вход – два выхода» на основе отечественной GaAs pHEMT-техно-

логии. Полученные результаты подтверждают справедливость предлагаемого подхода к синтезу твердотельных СВЧ-переключателей на полевых транзисторах.

Выбор аппроксимации Баттерворта для синтеза СВЧ-переключателей

Основу предлагаемой методики синтеза СВЧ-переключателей составляет компактная модель полевого транзистора (ПТ) в режиме ключа, представляющая транзистор пассивными RLC элементами [18]. На базе данной модели транзистора создадим модель (схему) Г-образного СВЧ-переключателя. Назовем такой переключатель элементарным (рис. 1 а), поскольку данная схема состоит из двух ПТ в комплементарных состояниях.

Для элементарного СВЧ-переключателя введём два состояния: ВКЛ – транзистор Т1 находится в замкнутом состоянии, транзистор Т2 находится в разомкнутом состоянии; ВЫКЛ – транзистор Т1 находится в разомкнутом состоянии, а транзистор Т2 находится в замкнутом состоянии (см. рис. 1 а).

При синтезе СВЧ-переключателей поведение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в переходной области (от полосы пропускания к полосе задержания) имеет второстепенное значение, первостепенное значение имеет монотонность АЧХ и линейность фазовой характеристики. Максимально гладкую АЧХ обеспечивает фильтр Баттерворта, наиболее линейную ФЧХ обеспечивает фильтр Бесселя. Сравнение передаточных функций второго порядка Баттерворта:

$$H(p) = \frac{1}{p^2 + \sqrt{2}p + 1}, \quad (1)$$

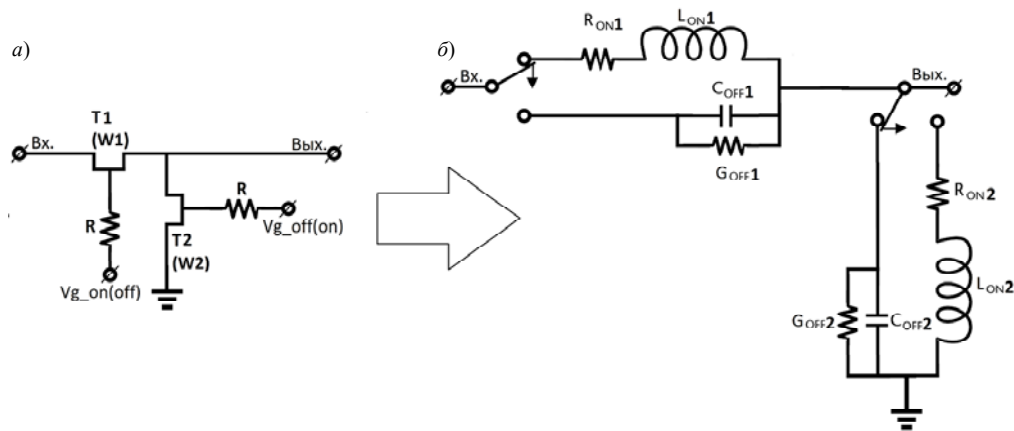


Рис. 1. Принципиальная схема Г-образного СВЧ-переключателя на ПТ – а; представление Г-образного СВЧ-переключателя через основные параметры элементов компактной модели ПТ (без учета элементов управления R) – б

Fig. 1. Schematic diagram of the Γ-shaped microwave switch on the PT – a; the representation of the Γ-shaped microwave switch through the main parameters of the elements of the compact model of the PT (excluding controls R) – б

и Бесселя

$$H(p) = \frac{1}{0,618p^2 + 1,362p + 1}, \quad (2)$$

где p – нормированная по частоте среза комплексная частота, показывает, что различия для второго порядка незначительны; коэффициенты (1 и 0,618) при p^2 ($\sqrt{2}$ и 1,362) при p близки. Поэтому в качестве аппроксимирующей функции выбираем передаточную функцию Баттерворта.

Синтез СВЧ-переключателя проведем по величине требуемой развязки, т. к. требуемые вносимые потери можно обеспечить за счет малого сопротивления «сток-исток» открытого транзистора, т. е. выбрав достаточно «широким» последовательный транзистор T1 (рис. 1 а), тогда как обеспечение требуемой развязки нуждается в нетривиальном решении.

Если в режиме ВЫКЛ амплитудно-частотную характеристику СВЧ-переключателя, представляющего в этом режиме фильтр верхних частот (ФВЧ), аппроксимировать модулем передаточной функции Баттерворта с частотой среза, равной максимальной рабочей частоте f_{p_max} , на которой модуль АЧХ равен требуемой развязке между входом и выходом СВЧ-переключателя

A_{off_min} [дБ], то получим искомое решение. Монотонность функции Баттерворта гарантирует, что в диапазоне рабочих частот ниже f_{p_max} СВЧ-переключатель обеспечит развязку выше требуемого значения, т. е. точка на АЧХ с координатами f_{p_max} , A_{off_min} [дБ] будет соответствовать минимальной развязке СВЧ-переключателя.

Подготовительный этап процедуры синтеза твердотельных СВЧ-переключателей

Для синтеза искомого ФВЧ необходимо синтезировать его ФНЧ-прототип. Воспользоваться справочными таблицами значений элементов для ФНЧ-прототипов нельзя, т. к. они нормированы по частоте среза по уровню АЧХ равному -3 дБ, тогда как требуются нестандартные уровни АЧХ (например, $A_{off_min} = -20$ дБ, -30 дБ и т. д.). Нагрузки на входе и выходе СВЧ-переключателя нормируем на $Z_0 = 50$ Ом. После расчета нормированного ФНЧ-прототипа Баттерворта, описанного в [18], найдем нормированную индуктивность g_1 и нормированную емкость g_2 ФНЧ-прототипа:

$$g_1 = \sqrt{2\varepsilon_p}; \quad g_2 = \sqrt{2\varepsilon_p}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_p = \sqrt{10^{|A_{off_min}|/10}} - 1$ – коэффициент неравномерности.

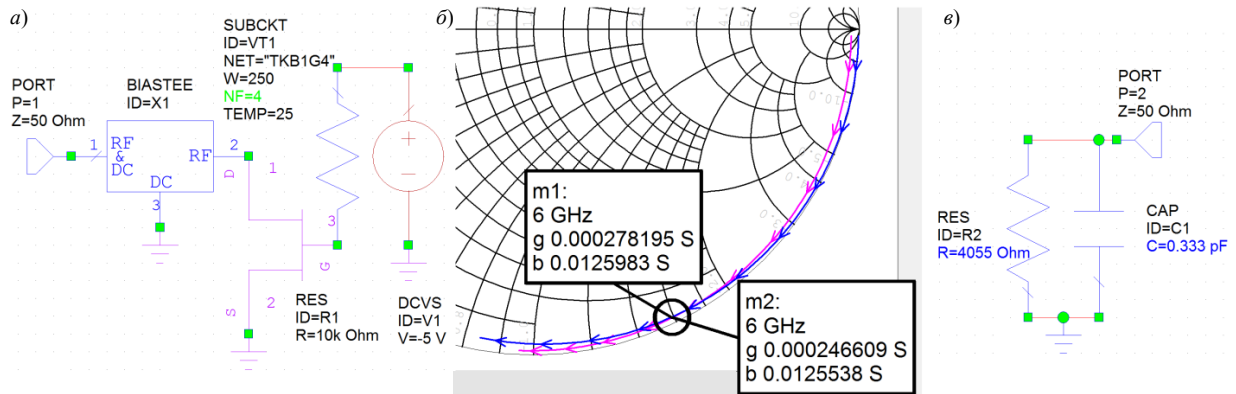


Рис. 2. Иллюстрация методики идентификации основных параметров компактной модели полевого транзистора в режиме ключа

Fig. 2. Illustration of a method for identifying the main parameters of a compact field-effect transistor model in key mode

Нормированный ФНЧ-прототип преобразуем в искомый ФВЧ с помощью преобразований вида:

$$L_{\text{ФВЧ}} = \frac{Z_0}{2\pi f_{p_max} g_1},$$

$$C_{\text{ФВЧ}} = \frac{1}{2\pi f_{p_max} g_2 Z_0},$$

$$L_{\text{ФВЧ}} = L_{ON2} = L_{on_ud} / W_2,$$

$$C_{\text{ФВЧ}} = C_{OFF1} = C_{off_ud} W_1,$$

где $L_{\text{ФВЧ}} = L_{ON2}$ – индуктивность параллельного открытого транзистора; $C_{\text{ФВЧ}} = C_{OFF1}$ – ёмкость последовательного закрытого транзистора; W_1, W_2 – ширина затвора, последовательного и параллельного ПТ, соответственно (см. рис. 1); $L_{on_ud}[\text{нГн*мм}]$ – удельная (погонная) индуктивность «сток-исток» открытого транзистора, численно равная величине индуктивности транзистора с шириной затвора 1 мм, измеренной на рабочей частоте при последовательной схеме замещения; $C_{off_ud}[\text{пФ/мм}]$ – удельная (погонная) ёмкость «сток-исток» закрытого транзистора, численно равная величине ёмкости транзистора с шириной затвора 1 мм, измеренной на рабочей частоте при параллельной схеме замещения.

Таким образом, параметрический синтез переключателя сводится к определению значений W_1, W_2 , для чего необходимо

идентифицировать (определить) удельные величины $L_{on_ud}[\text{нГн*мм}]$ и $C_{off_ud}[\text{пФ/мм}]$.

Идентификацию проводим по S-параметрам двухполюсника (область транзистора «сток-исток» закрытого/открытого транзистора с шириной затвора равной 1 мм, рис. 2 а). S-параметры могут быть как измеренными, так и рассчитанными. В данном примере использовалась компактная модель транзистора из технологического набора конструктора (PDK) АО «Светлана-Рост» для технологии рНЕМТ05. Полученные S-параметры отображены на диаграмме Смита (рис. 2 б). Идентифицируемая модель транзистора представляет параллельное соединение RC элементов для закрытого состояния транзистора (рис. 2 в):

$$G_{off_ud} [1/(\text{Ом*мм})] \parallel C_{off_ud} [\text{пФ/мм}],$$

где $G_{off_ud}[1/\text{Ом*мм}]$ назовем удельной (погонной) проводимостью «сток-исток» закрытого транзистора, численно равной проводимости транзистора с шириной затвора 1 мм, измеренной на рабочей частоте при параллельной схеме замещения. Для открытого состояния транзистора модель представляет последовательное соединение RL элементов:

$$R_{on_ud} [\text{Ом*мм}] \text{ ser } L_{on_ud} [\text{нГн*мм}],$$

где $R_{on_ud}[\text{Ом*мм}]$ назовем удельным (погонным) сопротивлением «сток-исток» открытого транзистора, численно равным

сопротивлению транзистора с шириной затвора 1 мм, измеренному на рабочей частоте при последовательной схеме замещения.

Идентификация проводилась путем итерационного изменения величин $C1$ и $R2$ (рис. 2 в). На рис. 2 б приведен фрагмент диаграммы Смита с результатами оценки (расчета) параметра S_{11} , из которого видно, что погрешность идентификации параметров $C_{off-ud} = C1$ и $G_{off-ud} = 1/R2$ не превышает несколько процентов. Параметры L_{on-ud} и R_{on-ud} идентифицируются аналогично для транзистора в открытом состоянии.

Таким образом, в результате решения задачи идентификации параметров компактной модели полевого транзистора в режиме ключа были определены четыре параметра, которые назовем основными (табл. 1).

Для упрощения расчетов и сопоставления различных технологий с целью выбора оптимальной технологии для решения требуемой задачи синтеза введем четыре дополнительных параметра, которые назовем производными параметрами (табл. 2), поскольку они формируются из основных параметров.

Этап параметрического синтеза твердотельных СВЧ-переключателей

В режиме ВЫКЛ потерями в последовательном запертом транзисторе можно пренебречь (реактивная проводимость намного выше активной, рис. 2 б) и синтезировать последовательный транзистор (рассчитать его ширину W_1), рис. 1:

$$W_1[\text{мм}] = \frac{C_{\text{ФВЧ}}}{C_{\text{off-ud}}} = \frac{1}{2\pi f_{p_max} C_{\text{off-ud}} g_1 Z_0} = \frac{f_r}{f_r 2\pi f_{p_max} C_{\text{off-ud}} g_1 Z_0} = \frac{2\pi f_r}{\sqrt{L_{\text{on-ud}} C_{\text{off-ud}}}} = \frac{1}{K \frac{Z_0}{\rho_X} g_1} \quad (5)$$

В режиме ВЫКЛ потерями в параллельном открытом транзисторе пренебречь нельзя. Реактивное сопротивление индуктивности

$$|X_L| = 2\pi f_{p_max} L_{\text{on-ud}} = 2\pi \times 6 \times 10^9 \times 0,046 \times 10^{-9} = 1,734 \text{ Ом*мм}$$

сравнимо с активным сопротивлением открытого транзистора $R_{on-ud} = 1,575 \text{ Ом*мм}$.

Таблица 1

Основные параметры компактной модели ПТ в режиме ключа для технологии рНЕМТ05

Table 1

The main parameters of the compact model PT in key mode for рНЕМТ05 technology

Основные параметры			
R_{on-ud}	L_{on-ud}	G_{off-ud}	C_{off-ud}
1,575 Ом*мм	0,0512 нГн*мм	$2,466 \times 10^{-4} \text{ 1/Ом*мм}$	0,333 пФ/мм

Таблица 2

Производные параметры компактной модели ПТ в режиме ключа для технологии рНЕМТ05

Table 2

Derived parameters of the compact PT model in key mode for рНЕМТ05 technology

Производные параметры			
Резонансная частота	Характеристическое сопротивление	Добротность	Нормированная частота
$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{\text{on-ud}} C_{\text{off-ud}}}}$	$\rho_X = \sqrt{\frac{L_{\text{on-ud}}}{C_{\text{off-ud}}}}$	$Q = \frac{1}{R_{\text{on-ud}}} \sqrt{\frac{L_{\text{on-ud}}}{C_{\text{off-ud}}}}$	$K = \frac{2\pi f_{p_max}}{2\pi f_r}$
$f_r = 40,726 \text{ ГГц}$	$\rho_X = 11,771 \text{ Ом}$	$Q = 7,47$	$K = 0,1473, f_{p_max} = 6 \text{ ГГц}$

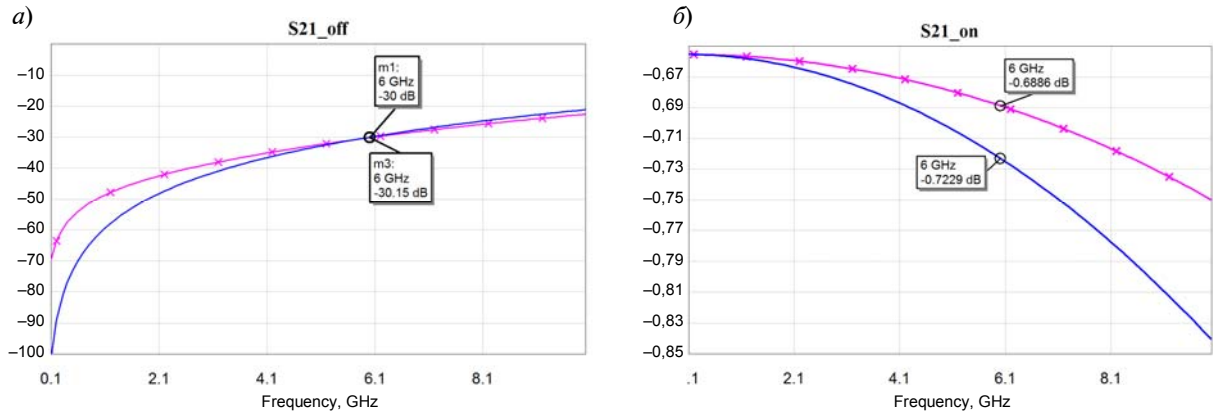


Рис. 3. АЧХ SPST СВЧ-переключателя в режиме ВЫКЛ/ВКЛ – кривые с крестиками: а – АЧХ ФВЧ – гладкая кривая; б – АЧХ RC фильтра – гладкая кривая

Fig. 3. Frequency response of the SPST microwave switch in the OFF/ON mode – curves with crosses: а – the frequency response of the high-pass filter is a smooth curve; б – Frequency response of the RC filter – smooth curve

Ширину параллельного транзистора находим, считая модуль реактивного сопротивления

$$|X_L| = 2\pi f_{p_max} L_{ФВЧ} \quad (6)$$

на максимальной рабочей частоте f_{p_max} равным модулю комплексного сопротивления

$$|Z_{LR}| = \frac{\sqrt{(R_{on_ud})^2 + (K\rho_x)^2}}{W_2} = \frac{R_{on_ud}\sqrt{1+K^2Q^2}}{W_2}, \quad (7)$$

$$2\pi f_{p_max} L_{ФВЧ} = \frac{R_{on_ud}\sqrt{1+K^2Q^2}}{W_2}, \quad (8)$$

$$\frac{Z_0}{g_2} = \frac{R_{on_ud}\sqrt{1+K^2Q^2}}{W_2}, \quad (9)$$

$$W_2 = \frac{g_2 R_{on_ud} \sqrt{1+K^2Q^2}}{Z_0}. \quad (10)$$

Проиллюстрируем приведенный алгоритм синтеза SPST СВЧ-переключателя численным примером. Пусть требуется синтезировать SPST СВЧ-переключатель, обеспечивающий на частоте $f_{p_max} = 6$ ГГц развязку равную или больше $A_{off_min} = -30$ дБ.

1. Найдем ФНЧ-прототип фильтра Баттерворта, т. е. для требуемой развязки

$A_{off_min} = -30$ дБ найдем нормированную индуктивность и ёмкость согласно (3):

$$g_1 = g_2 = \sqrt{2\epsilon_p} = \sqrt{2\sqrt{10^{|A_{off_min}|/10} - 1}} = \sqrt{2\sqrt{999}} = 7,95.$$

2. Найдем геометрические размеры последовательного ПТ (ширину затвора рНЕМТ транзистора) согласно (5) (см. табл. 2):

$$W_1 = \frac{C_{ФВЧ}}{C_{off_ud}} = \frac{1}{K \frac{Z_0}{\rho_x} g_1} = \frac{1}{0,1473 \frac{50}{11,771} 7,95} = 0,201 \text{ мм}$$

3. Найдем геометрические размеры параллельного ПТ (ширину затвора рНЕМТ транзистора) согласно (10):

$$W_2 = \frac{g_2 R_{on_ud} \sqrt{1+K^2Q^2}}{Z_0} = \frac{7,95 * 1,575 * 1,487}{50} = 0,372 \text{ мм}.$$

Верифицируем полученный результат с помощью САПР AWR MWO, т. е. построим зависимости АЧХ ФВЧ и АЧХ SPST СВЧ-переключателя в режиме ВЫКЛ при расчитанных значениях элементов (рис. 3 а).

На рис. 3 гладкая кривая соответствует АЧХ ФВЧ, элементы которого рассчитаны согласно (4):

$$L_{ФВЧ} = \frac{Z_0}{2\pi f_{p_max} g_1} = \frac{50}{2\pi * 6 * 10^9 * 7,95} = 0,16683 \text{ нГн},$$

$$C_{ФВЧ} = \frac{1}{2\pi f_{p_max} g_2 Z_0} = \frac{1}{2\pi * 6 * 10^9 * 7,95 * 50} = 0,06673 \text{ пФ}.$$

Кривая с крестиками соответствует АЧХ СВЧ-переключателя в режиме ВЫКЛ, рассчитанной с помощью компактной модели (см. рис. 1), элементы которой определены как

$$C_{OFF1} = C_{off_ud} W_1 = 0,333 * 0,201 = 0,066933 \text{ пФ},$$

$$G_{OFF1} = G_{off_ud} W_1 = 2,466 * 10^{-4} * 0,201 = 4,9567 * 10^{-5} \text{ Ом}^{-1} = 1 / 20,175 \text{ кОм},$$

$$R_{ON2} = R_{on_ud} / W_2 = \frac{1,575}{0,372} = 4,234 \text{ Ом},$$

$$L_{ON2} = L_{on_ud} / W_2 = \frac{0,0512}{0,372} = 0,1376 \text{ нГн}.$$

На этом этап параметрического синтеза СВЧ-переключателя в режиме ВЫКЛ для элементарного СВЧ-переключателя, обеспечивающего развязку, равную 30 дБ на частоте 6 ГГц, завершен. Найдены размеры транзисторов T1 и T2 ($W_1 = 0,201$ мм, $W_2 = 0,372$ мм), которые при изготовлении по технологии рНЕМТ05 (табл. 1) обеспечат требуемую развязку.

Этап структурного синтеза твердотельных СВЧ-переключателей

Рассмотрим этап структурного синтеза СВЧ-переключателя в режиме ВКЛ. Необходимо оценить максимальные потери, вносимые синтезированным переключателем в режиме ВКЛ A_{on_max} [дБ] на частотах до $f_{p_max} = 6$ ГГц, для чего воспользуемся известным выражением [19, 20], в котором не учитывается влияние индуктивности

L_{ON1} транзистора в открытом состоянии (см. рис. 1):

$$A_{on_max} [\text{дБ}] = 10 \lg \left[\left(1 + \frac{R_s}{2Z_0} \right)^2 + \left(\frac{Z_0 + R_s}{2X_c} \right)^2 \right], \quad (11)$$

где $R_s = \frac{R_{on_ud}}{W_1}$ — сопротивление последовательного переключающего элемента, $X_c = \frac{1}{2\pi f_{p_max} C_{off_ud} W_2}$ — реактивное сопротивление параллельного переключающего элемента.

В рассмотренном примере переключатель, обеспечивающий развязку 30 дБ, будет вносить потери

$$R_s = \frac{R_{on_ud}}{W_1} = \frac{1,575}{0,201} = 7,836 \text{ Ом};$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi f_{p_max} C_{off_ud} W_2} = \frac{1}{2\pi * 6,0e9 * 0,333e-12 * 0,372} = 214,09 \text{ Ом};$$

$$A_{on_max} [\text{дБ}] = 10 \lg \left[\left(1 + \frac{R_s}{2Z_0} \right)^2 + \left(\frac{Z_0 + R_s}{2X_c} \right)^2 \right] = 10 \lg [1,163 + 0,0182] = 0,723 \text{ дБ}.$$

Если учесть индуктивность открытого транзистора

$$L_{ON} = \frac{R_{on_ud}}{W_1} = \frac{0,0512}{0,372} = 0,1376 \text{ нГн},$$

получим меньшие вносимые потери, рис. 3 б), (АЧХ SPST СВЧ-переключателя в режиме ВКЛ, рассчитанная по компактной модели — кривая с крестиками; эта же АЧХ, рассчитанная по выражению (11) [19, 20], — гладкая кривая). Полученное «уменьшение» вносимых потерь указывает на возможность компенсации потерь, обусловленных отражением, путем согласования синтезированного элементарного СВЧ-переключателя по входу и выходу. К этому

же выводу придет, если исследовать зависимость вносимых потерь и развязки элементарного СВЧ-переключателя от размеров последовательного W_1 и параллельного W_2 транзисторов (табл. 3).

Таблица 3

Топологические и электрофизические параметры синтезированных СВЧ-переключателей

Table 3

Topological and electrophysical parameters of the synthesized microwave switches

$A_{off\ min}$, дБ	W_1 , мм	W_2 , мм	$A_{on\ max}$, дБ
20	0,716	0,160	0,196
30	0,402	0,286	0,343
40	0,226	0,508	0,616
50	0,127	0,904	1,121
60	0,071	1,607	2,108

Из таблицы видно, что чем больше требуется развязка, тем «уже» будет последовательный транзистор. «Узкий» последовательный транзистор приводит к большим вносимым потерям (большое R_{on}) и к увеличению коэффициента стоячей волны напряжения КСВН как на входе, так и на выходе СВЧ-переключателя. Следовательно, необходимо внести коррекцию на эта-

пе структурного синтеза, поскольку предложенная процедура синтеза Γ -образного SPST СВЧ-переключателя позволяет синтезировать переключатель с заданной величиной развязки, но не с минимальными вносимыми потерями и КСВН. Для завершения процедуры синтеза необходим этап согласования [21, с. 285], на котором полученные вносимые потери можно уменьшить за счет уменьшения потерь на отражение, добавив новый структурный элемент: индуктивность L_{AD} .

Рассмотрим два варианта структурного синтеза: вариант с Т-образной $L-C-L$ схемой согласования на выходе СВЧ-переключателя (рис. 4 а) и вариант с Γ -образной (на входе и выходе) $L-C-L$ схемой согласования в комбинации с внутренними реактивностями транзисторов (рис. 4 б). Если ёмкость C_{AD} в схеме согласования заменить закрытым транзистором, то в режиме ВЫКЛ СВЧ-переключателя получим дополнительное увеличение развязки.

Дополнительное увеличение развязки позволяет уменьшить исходное требование к величине развязки $A_{off\ min}$ [дБ] на полученную избыточную величину и повторить процедуру синтеза для скорректированной величины $A_{off\ min}$ [дБ]. На этом синтез МИС SPST-переключателя завершён.

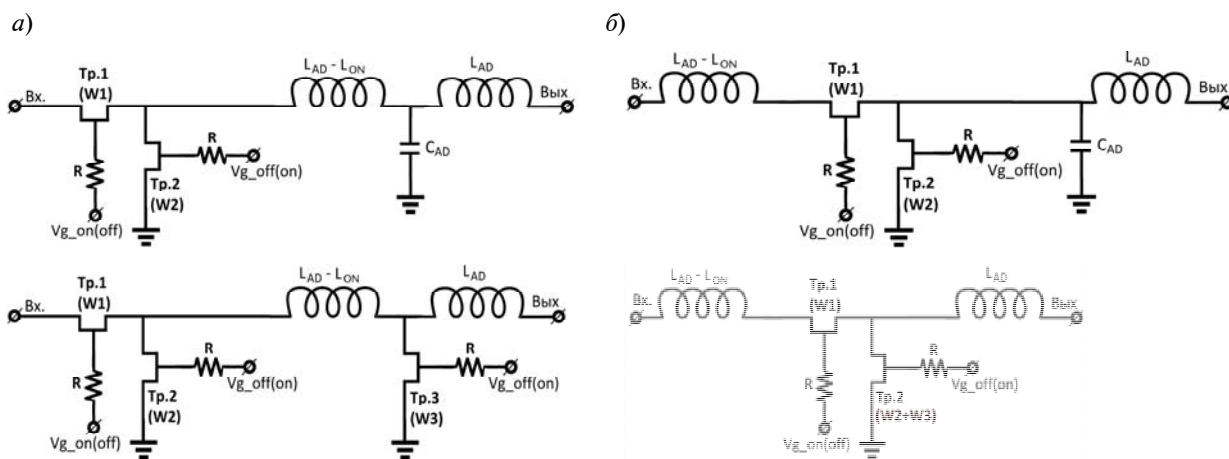


Рис. 4. Схемы согласования СВЧ-переключателя: а – Т-образное согласование; б – Γ -образное согласование

Fig. 4. Microwave switch matching circuitry

Синтез SPnT СВЧ-переключателя, где n – число выходов переключателя, проводится параллельным подключением ко входу SPST-переключателя в состоянии ВКЛ ($n - 1$) штук SPST-переключателей в состоянии ВЫКЛ. Входной импеданс SPST-переключателя в состоянии ВЫКЛ представляет ёмкость с потерями (основная часть ёмкости обеспечивается последовательным закрытым транзистором, основная часть потерь обеспечивается параллельным открытым транзистором). Реактивные потери ($n - 1$) SPST-переключателей компенсируются добавлением ко входу СВЧ-переключателя последовательной катушки индуктивности. Активные потери ($n - 1$) SPST-переключателей в состоянии ВЫКЛ приводят к увеличению вносимых потерь в n -м SPST-переключателе в состоянии ВКЛ.

По изложенному алгоритму синтеза SPnT СВЧ-переключателя была синтезиро-

вана МИС SPDT СВЧ-переключателя для С-диапазона частот. Согласование на выходе переключателя (SPST-переключателя в состоянии ВКЛ) осуществлялось с помощью Т-образной схемы согласования с транзистором 3 (рис. 4 а). Согласование на входе переключателя осуществлялось с помощью последовательной катушки индуктивности. На рис. 5 приведены параметры разработанной схемы.

МИС СВЧ-переключателя С-диапазона частот

Для экспериментального подтверждения предложенной процедуры синтеза спроектирована и изготовлена по технологии DpHEMT05 АО «Светлана-Рост» МИС SPDT СВЧ-переключателя. Данный переключатель спроектирован так, чтобы вносимые потери составляли не более 0,8 дБ, а КСВН < 1,5, тогда как развязка достигала максимума, определяемого технологией DpHEMT05.

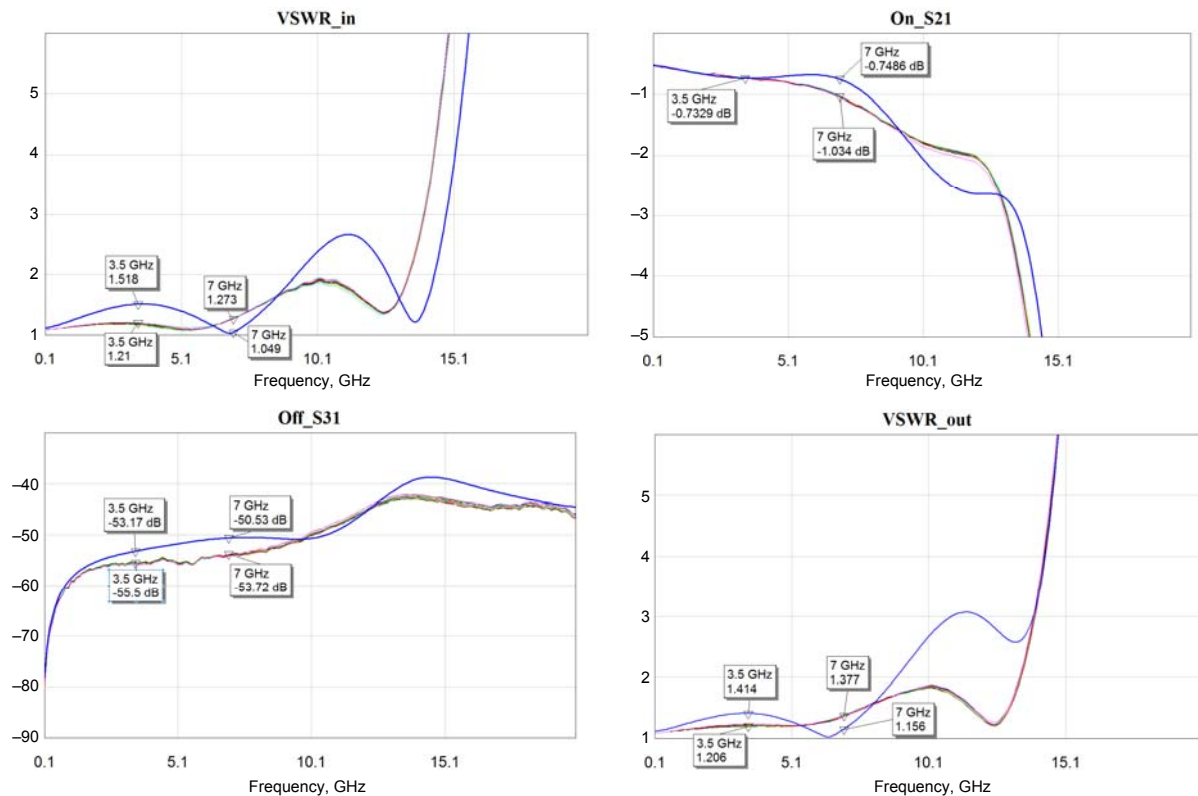


Рис. 5. Параметры МИС СВЧ SPDT-переключателя: рассчитанные – гладкая кривая; измеренные – набор совпадающих кривых

Fig. 5. Parameters of the MIS microwave SPDT switch: calculated – smooth curve; measured – a set of matching curves

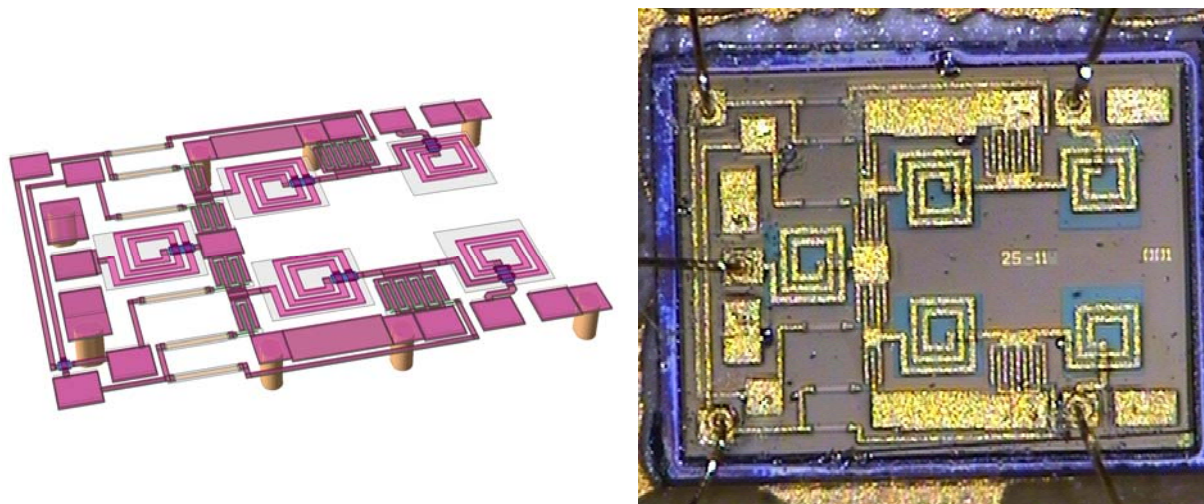


Рис. 6. Топология и фотография кристалла СВЧ МИС SPDT-переключателя С-диапазона
 Fig. 6. Topology and crystal photograph of a microwave MIS SPDT C-band switch

На рис. 5 приведены параметры СВЧ-переключателя, рассчитанные (гладкая кривая) и измеренные (набор совпадающих кривых). Вносимые потери (расчетные и измеренные на графике Op_S21) в открытом плече СВЧ-переключателя SPDT на частотах до 3,5 ГГц сравнимы с потерями в зарубежных аналогах (табл. 4). На более высоких частотах имеется расхождение с расчетом $> 30\%$, что связано с низкой добротностью реализованных катушек индуктивности по сравнению с добротностью, заявленной в PDK. Измеренный

КСВН на входе и выходе открытого плеча СВЧ-переключателя SPDT лучше рассчитанного КСВН благодаря низкой добротности реализованных катушек индуктивности и сравним с КСВН в зарубежных аналогах. Развязка между входом и выходом Off_S31 закрытого плеча СВЧ-переключателя SPDT (расхождение с расчетом менее 6%) превосходит развязки, приведенные для зарубежных аналогов.

На рис. 6 представлена топология кристалла и фотография МИС SPDT СВЧ-переключателя.

Характеристики зарубежных аналогов изготовленного SPDT

Таблица 4

Characteristics of foreign analogues manufactured by SPDT

Table 4

Наименование	Вносимые потери, дБ	Развязка, дБ	КСВН	Входная P_{1dB} , дБм
SKY13276-334 ¹	0,70	21	$\leq 1,2$	30 ($V_{ynp} = 3$ В) 34 ($V_{ynp} = 5$ В)
MASW6010G ²	0,8	22	$\leq 1,9$	27 ($V_{ynp} = -5$ В) 33 ($V_{ynp} = -8$ В)
RFSW8009 ³	0,65	28	$\leq 1,4$	34 ($V_{ynp} = 3$ В)
Данная статья	0,8	53	$\leq 1,2$	27 ($V_{ynp} = -5$ В) 30 ($V_{ynp} = -7$ В)

¹ Product Data Sheet SKY13276-334. Available: <https://www.rfmw.com/products/detail/sky13276334-skyworks-solutions-inc/313020/> (Accessed: 30.10.2019).

² Product Data Sheet MASW6010G. Available: <https://www.qorvo.com/products/p/RFSW8009> (Accessed: 30.10.2019).

³ Product Data Sheet RFSW8009. Available: <https://www.qorvo.com/products/p/RFSW8009> (Accessed: 30.10.2019).

Имеются сообщения о СВЧ-переключателях SPDT с развязкой, равной развязке данного изготовленного переключателя, например [22, 23], но рабочая полоса частот при этом меньше (до 4 ГГц) [22], либо вносимые потери значительно больше (1,7 дБ) [23]. Таким образом, предлагаемая методика синтеза позволяет не только формализовать процедуру расчета МИС СВЧ-переключателя, но и получить наилучшие параметры переключателя, достижимые при данной технологии.

Выводы

Предложена методика синтеза МИС СВЧ-переключателей на основе теории структурного и параметрического синтеза частотно-избирательных цепей – фильтров. При решении задачи структурного синтеза предложено расширить элементный базис схем переключателей введением дополнительного элемента – индуктивности. Это позволило свести задачу к параметрическому синтезу схемы переключателя при известном решении задачи структурного синтеза.

Разработана линейная компактная модель полевого транзистора в режиме ключа, предназначенная для синтеза СВЧ-переключателей. Параметры модели позволяют провести оценку параметров технологии изготовления, достаточных для решения задачи реализации СВЧ-переключателей с заданными линейными параметрами. Особенностью предложенной модели является возможность идентификации по S-параметрам. S-параметры могут быть получены

либо в результате измерений, либо в результате расчета по компактной модели транзистора, имеющейся в PDK фирмы-изготовителя СВЧ МИС.

Разработана методика синтеза МИС СВЧ-переключателей на полевых транзисторах, обеспечивающая заданную развязку при минимальных вносимых потерях и минимальном КСВН. Данная методика основывается на классической методике синтеза фильтра верхних частот со следующими существенными отличиями: выбор частоты среза АЧХ ФНЧ-прототипа осуществляется по максимальной рабочей частоте СВЧ-переключателя, на которой уровень затухания соответствует требуемой развязке СВЧ-переключателя; угловая частота ФНЧ-прототипа нормируется по выбранной частоте среза. Минимальные вносимые потери и минимальный КСВН обеспечиваются с помощью Г-образной или Т-образной схемы согласования на выходе МИС СВЧ-переключателя, интегрированной на кристалле с переключающими элементами.

Синтезирован и реализован СВЧ-переключатель SPDT С-диапазона по технологии GaAs pHEMT. Измеренные характеристики (вносимые потери, КСВН, развязка) близки к расчетным (расхождение с расчетом менее 6 % для развязки между входом и выходом) и сравнимы или превосходят характеристики зарубежных аналогов. При управляющем напряжении –5 В мощность точки компрессии на входе IP1dB = 27 дБм, при управляющем напряжении –7 В – IP1dB = 30 дБм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березняк А.Ф., Коротков А.С. Твердотельные СВЧ-переключатели: схемотехника, технологии изготовления, тенденции развития. Обзор. Часть 1 // Радиоэлектроника. Известия вузов. 2013. Т. 56. № 4. С. 3–28.
2. Березняк А.Ф., Коротков А.С. Твердотельные СВЧ-переключатели: схемотехника, технологии изготовления, тенденции развития. Обзор. Часть 2 // Радиоэлектроника. Известия вузов. 2013. Т. 56. № 5. С.3–20.
3. Кочемасов В., Рауткин Ю. Интегральные СВЧ-переключатели. Часть 2 // Электроника: НТБ. 2018. № 5 (00176). С. 152–163. DOI: 10.22184/1992-4178.2018.176.5.152.163
4. Кочемасов В., Рауткин Ю. Интегральные СВЧ-переключатели. Часть 3 // Электроника: НТБ. 2018. № 6 (00177). С. 80–93. DOI: 10.22184/1992-4178.2018.177.6.80.93
5. Guo D., Qiao T., Luo X., Li M. Design of a Ka-band broadband SPDT switch MMIC based on GaN HEMTs // 2015 IEEE 16th Internat. Conf. on Communication Technology. Hangzhou, Oct. 2015. DOI: 10.1109/ICCT.2015.7399832
6. Zhao L., Liang W.F., Zhou J.Y., Jiang X. Compact 35–70 GHz SPDT switch with high isolation for high power application // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2017. Vol. 27. Iss. 5. Pp. 485–487. DOI: 10.1109/LMWC.2017.2690834

7. **Trinh K.T., Kao H.L., Chiu H.C., Karmakar N.C.** A Ka-band GaAs MMIC traveling-wave switch with absorptive characteristic // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2019. Vol. 29(6). Pp. 394–396. DOI: 10.1109/LMWC.2019.2913507
8. **Cetindogan B., Ustundag B., Turkmen E., Wietstruck M., Kaynak M., Gurbuz Y.** A D-Band SPDT switch utilizing reverse-saturated SiGe HBTs for dicke-radiometers // 11th German Microwave Conf. Freiburg, Germany, 2018. Pp. 47–50. DOI: 10.23919/GEMIC.2018.8335025
9. **Li L., Qian R., Sun X.-W.** W-band single-pole four-throw switch for multichannel high power transceiver chipset design // *Progress in Electromagnetics Research M*. 2019. Vol. 81. Pp. 107–116.
10. **Chen C., Xu X., Yoshimasu T.** A DC-50 GHz, low insertion loss and high P1 dB SPDT switch IC in 40-nm SOI CMOS // 2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conf. Kuala Lumpur, Malaysia, Nov. 2017. DOI: 10.1109/APMC.2017.8251363
11. **Bhandarkar S., Nakhate S.** Asymmetric inductive substrate bias RF SPDT switch // *Materials Today Proc*. 2017. Vol. 4. Iss. 9. Pp. 10351–10355 // URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.379>
12. **Ha B.W., Seo C.W., Cho C.S., Kim Y.J.** Wideband high-isolation SPDT RF switch in 0.18 μm SiGe BiCMOS technology // *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*. 2016. Vol. 87. Iss. 1. Pp 11–19.
13. **Hühn F., Wentzel A., Heinrich W.** Highly compact GaN-based all-digital transmitter chain including SPDT T/Rx switch for massive MIMO applications // *Internat. J. of Microwave and Wireless Technologies*. 2019. Vol. 11. Special Issue 7. Pp. 609–617 // URL: <https://doi.org/10.1017/S175907871900045X>
14. **Truong N.K., Lee D.-S., Kim S.-J., Lee M.** 40 dB-isolation, 1.85 dB-insertion loss full CMOS SPDT switch with body-floating technique and ultra-small active matching network using on-chip solenoid inductor for BLE applications // *Electronics*. 2018. Vol. 7. P. 297. DOI: 10.3390/electronics7110297
15. **Memioğlu O., Kazan O., Turan I., Karakuzulu A., Gundel A., Kocer F., Civi O.A.** Development of X-band transceiver MMIC's using GaN technology // *Advanced Electromagnetics*. 2019. Vol. 8. No. 2. Pp. 1–9 // URL: <https://doi.org/10.7716/aem.v8i2.1012>
16. **Caverly R.H.** Microwave and RF semiconductor control device modeling. Boston and London: Artech House, 2016.
17. **Bahl I.J.** Control components using Si, GaAs, and GaN technologies. Boston and London: Artech House, 2014.
18. **Березняк А.Ф., Коротков А.С., Балашов Е.В.** Трансформация синтеза фильтров частот в синтез твердотельных СВЧ-переключателей // *Наноиндустрия*. 2017. Т. 74 (Спецвыпуск). С. 427–432.
19. **Cory R., Fryklund D.** Solid state RF/Microwave switch technology: Part 2 // *MPD/Microwave Product Digest*, June 2009 // URL: https://www.rfmw.com/datasheets/skyworks/4b_solid_state_rfmicrowave_switchtechnology_part2.pdf (Дата обращения: 21.11.2019).
20. **Microsemi-Watertown.** The pin diode circuit designers handbook. Watertown: Microsemi Corp.-Watertown, 1998 // URL: https://www.ieee.li/pdf/essay/pin_diode_handbook.pdf (Дата обращения: 21.11.2019).
21. **Poole C., Darwazeh I.** Microwave active circuit analysis and design. London: Academic Press, 2016.
22. **Wang G.Q., Liu C.P.** Wideband SPDT switch with TTL control // *Applied Mechanics and Materials online since*: Aug. 2014. Vol. 599–601. Pp. 1820–1823. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.599-601.1820>
23. **Deng J., Gan X.** A X-band SPDT switch // 3rd Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications. *Advances in Engineering Research*. 2017. Vol. 148. Pp. 453–456.

Статья поступила в редакцию 25.10.2019.

REFERENCES

1. **Berezniak A.F., Korotkov A.S.** Solid-state microwave switches: circuitry, manufacturing technologies and development trends. Review (Part 1). *Radioelektronika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii*, 2013, Vol. 56, No. 4, Pp. 3–28. (rus)
2. **Berezniak A.F., Korotkov A.S.** Solid-state microwave switches: circuitry, manufacturing technologies and development trends. Review (Part 2). *Radioelektronika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii*, 2013, Vol. 56, No. 5, Pp. 3–20. (rus)
3. **Kotchemasov V., Rautkin Y.** Integrated microwave switches. Part 2. *Electronica: NTB*, 2018, No. 5 (00176), Pp. 152–163. DOI: 10.22184/1992-4178.2018.176.5.152.163 (rus)
4. **Kotchemasov V., Rautkin Y.** Integrated microwave switches. Part 3. *Electronica: NTB*, 2018, No. 6 (00177), Pp. 80–93. DOI: 10.22184/1992-4178.2018.177.6.80.93 (rus)
5. **Guo D., Qiao T., Luo X., Li M.** Design of a Ka-band broadband SPDT switch MMIC based on

- GaN HEMTs. *2015 IEEE 16th International Conference on Communication Technology*, Hangzhou, 18–20 Oct. 2015, DOI: 10.1109/ICCT.2015.7399832
6. **Zhao L., Liang W.F., Zhou J.Y., Jiang X.** Compact 35–70 GHz SPDT switch with high isolation for high power application. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2017, Vol. 27, Issue 5, Pp. 485–487. DOI: 10.1109/LMWC.2017.2690834
7. **Trinh K.T., Kao H.L., Chiu H.C., Karmakar N.C.** A Ka-band GaAs MMIC traveling-wave switch with absorptive characteristic. *IEEE Microwave and Wireless Components Letter*, 2019, Vol. 29(6), Pp. 394–396. DOI: 10.1109/LMWC.2019.2913507
8. **Cetindogan B., Ustundag B., Turkmen E., Wietstruck M., Kaynak M., Gurbuz Y.** A D-band SPDT switch utilizing reverse-saturated SiGe HBTs for dicke-radiometers. *2018 11th German Microwave Conference*, Freiburg, Germany, March 12–14, 2018, Pp. 47–50. DOI: 10.23919/GEMIC.2018.8335025
9. **Li L., Qian R., Sun X.-W.** W-band single-pole four-throw switch for multichannel high power transceiver chipset design. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2019, Vol. 81, Pp. 107–116.
10. **Chen C., Xu X., Yoshimasu T.** A DC–50 GHz, low insertion loss and high P1dB SPDT switch IC in 40-nm SOI CMOS. *2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference*, Kuala Lumpur, Malaysia, 13–16 Nov. 2017. DOI: 10.1109/APMC.2017.8251363
11. **Bhandarkar S., Nakhate S.** Asymmetric inductive substrate bias RF SPDT switch. *Materials Today Proceedings*, 2017, Vol. 4, Issue 9, Pp. 10351–10355. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.379>
12. **Ha B.W., Seo C.W., Cho C.S., Kim Y.J.** Wideband high-isolation SPDT RF switch in 0.18 μm SiGe BiCMOS technology. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2016, Vol. 87, Issue 1, Pp 11–19.
13. **Hühn F., Wentzel A., Heinrich W.** Highly compact GaN-based all-digital transmitter chain including SPDT T/Rx switch for massive MIMO applications. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2019, Vol. 11, Special Issue 7, Pp. 609–617. Available: <https://doi.org/10.1017/S175907871900045X>
14. **Truong N.K., Lee D-S., Kim S-J., Lee M.** 40 dB-isolation, 1.85 dB-insertion loss full CMOS SPDT switch with body-floating technique and ultra-small active matching network using on-chip solenoid inductor for BLE applications. *Electronics*, 2018, Vol. 7, P. 297. DOI: 10.3390/electronics7110297
15. **Memioğlu O., Kazan O., Turan I., Karakuzulu A., Gundel A., Kocer F., Civi O.A.** Development of X-band transceiver MMIC's using GaN technology. *Advanced Electromagnetics*, 2019. Vol. 8, No. 2, Pp. 1–9. Available: <https://doi.org/10.7716/aem.v8i2.1012>
16. **Caverly R.H.** *Microwave and RF semiconductor control device modeling*. Boston and London: Artech House, 2016.
17. **Bahl I.J.** *Control components using Si, GaAs, and GaN technologies*. Boston and London: Artech House, 2014.
18. **Berezniak A.F., Korotkov A.S., Balashov E.V.** Transformation of synthesis of frequency filters for synthesis of solid-state microwave switches. *Nanoindustry*, 2017, Vol. 74 (Special Issue), Pp. 427–432. (rus)
19. **Cory R., Fryklund D.** Solid state RF/Microwave switch technology: Part 2. MPD/Microwave Product Digest, June 2009. Available: https://www.rfmw.com/datasheets/skyworks/4b_solid_state_rfmicrowave_switchtechnology_part2.pdf (Accessed: 21.11.2019).
20. Microsemi-Watertown. The pin diode circuit designers handbook. Watertown: Microsemi Corp.-Watertown, 1998. Available: https://www.ieee.li/pdf/esay/pin_diode_handbook.pdf (Accessed: 21.11.2019).
21. **Poole C., Darwazeh I.** *Microwave active circuit analysis and design*. London: Academic Press, 2016.
22. **Wang G.Q., Liu C.P.** Wideband SPDT switch with TTL control. *Applied Mechanics and Materials online since: August 2014*, Vol. 599–601, Pp. 1820–1823. Available: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.599-601.1820>
23. **Deng J., Gan X.** A X-band SPDT switch. 3rd Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications, *Advances in Engineering Research*, 2017, Vol.148, Pp. 453–456.

Received 25.10.2019.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

БЕРЕЗНЯК Анатолий Федорович
BEREZNIAK Anatoliy F.
 E-mail: baf1954@mail.ru

КОРОТКОВ Александр Станиславович
KOROTKOV Alexander S.
 E-mail: korotkov@rphf.spbstu.ru