

Твердотельные СВЧ-переключатели с высокой скоростью коммутации

Часть 4

В. Кочемасов, к. т. н.¹, А. Сафин, к. т. н.², С. Дингес, к. т. н.³

УДК 621.389 | ВАК 05.27.01

В первых трех частях статьи, опубликованных в десятом за 2020 год, первом и третьем за 2021 год номерах журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес», было рассказано о рpн-диодных переключателях в различных исполнениях и нескольких типах переключателей на полевых транзисторах. В данном номере рассматриваются интегральные переключатели на основе кремниевых технологий КНИ и КНС, а также переключатели, управляемые по USB- и SPI-интерфейсам.

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ КНИ И КНС

В предыдущих разделах были рассмотрены твердотельные переключатели, реализованные на рpн-диодах, арсенид-галлиевых и нитрид-галлиевых полевых транзисторах. Каждая из этих технологий имеет свои достоинства и недостатки. К сожалению, ни одна из них не удовлетворяет полностью требованиям, предъявляемым со стороны нового поколения систем мобильной связи и радиолокации.

Так, в системах мобильной связи появление все новых и новых стандартов (от 1G до 6G) постоянно усложняет структуру антенных переключателей за счет увеличения числа используемых портов (уже в стандарте 4G число портов достигает 30), введения в их состав нескольких многопозиционных переключателей, низкочастотных и полосовых фильтров, а также диплексоров.

В радиолокации постоянно растет спрос на приемопередающие модули, являющиеся составной частью АФАР. Каждый из таких приемопередающих модулей, помимо нескольких переключателей, включает в себя управляемые цифровыми кодами аттенуатор и фазовращатель, а также малошумящий и среднemosный усилители.

Эти обстоятельства, а также то, что потенциальная потребность в антенных переключателях для мобильной связи и приемопередающих модулей для РЛС исчисляется миллионами и миллиардами штук привело к тому, что около 20 лет тому назад разработчики вновь обратили внимание на старую технологию КМОП, которая

после ее усовершенствования стала на рынке беспроводной связи и радиолокации доминирующей.

КМОП-изделия, появившиеся в середине прошлого столетия, имеют исключительно низкую стоимость, просты в разработке и отличаются чрезвычайно низкими токами потребления по цепям управления. Важно также и то, что для управления ими требуется лишь одно напряжение положительной полярности. Главным недостатком изделий, выполненных по стандартной КМОП-технологии, является высокая проводимость кремниевых подложек, затрудняющая реализацию на них переключателей в широкой полосе частот с высокой входной мощностью, низкими вносимыми ослаблениями, высокими развязками и малыми временами коммутации.

Справедливости ради следует отметить, что, несмотря на высокую проводимость подложек, стандартная КМОП-технология, получившая название bulk CMOS, до сих пор используется для создания переключателей с вполне приемлемыми характеристиками. Об этом свидетельствуют как многочисленные научные публикации, например [29], так и созданные некоторыми компаниями в эти годы отдельные модели переключателей. Однако наиболее перспективными стали переключатели на основе КМОП-технологий, в которых используются подложки с низкой проводимостью.

Первый шаг по устранению присущих стандартной КМОП-технологии недостатков был сделан в 1961 году компанией Rockwell, предложившей использовать обладающие низкой проводимостью сапфировые подложки. Эта технология получила название «кремний на сапфире» (КНС). Дальнейшее ее развитие было связано с компанией Peregrine Semiconductors (pSemi) (ныне – Murata), которая приложила значительные усилия по ее совершенствованию, в том числе и применительно к разработке переключателей (табл. 17).

¹ ООО «Радиокомп», генеральный директор.

² НИУ «МЭИ», заведующий кафедрой формирования и обработки радиосигналов.

³ МТУСИ, доцент кафедры радиооборудования и схемотехники.

Интерес к этой технологии был связан еще и с тем, что она обеспечивает высокую радиационную стойкость, необходимую при использовании переключателей в космической и ракетной технике. К настоящему времени эта технология стала вполне конкурентной с арсенид-галлиевой технологией в космических применениях.

Впоследствии компания CEL предложила использовать технологию «кремний-на-изоляторе» (КНИ), в которой вместо дорогих сапфировых подложек стали использовать дешевые кремниевые материалы с нанесенным на них изолирующим слоем, позволяющим избежать недостатков, присущих технологии bulk CMOS, и увеличить добротность размещаемых на подложке пассивных компонентов. Первым коммерческим изделием, выполненным по этой технологии, стал SPDT-переключатель UPD5710TK компании CEL. В дальнейшем совершенствованием этой технологии занимались компании Analog Devices, Qorvo, IDT, Mini-Circuits, Skyworks Solutions (табл. 18).

Использование этих двух технологий позволило существенным образом расширить диапазон рабочих частот, получить при необходимости высокие скорости коммутации, уменьшить вносимое ослабление, увеличить развязку. В качестве дополнительных преимуществ удалось обеспечить исключительно низкую стоимость изделий, особенно выполненных по технологии КНИ КМОП, и чрезвычайно низкую чувствительность (1–10 кВ) обеих технологий к электростатическим воздействиям.

Все эти улучшения характеристик переключателей стали следствием снижения сопротивления замкнутых контактов переключателя $R_{он}$ и емкости разомкнутых контактов C_{off} , а значит, и их произведения $R_{он} \cdot C_{off}$, характеризующего предельные возможности переключателей, выполненных по различным технологиям (табл. 19) [22, 30–36]. Разработанная в 2008 году компанией IBM технология производства микроконтроллеров

CSO17RF [36] была доработана под задачи изготовления переключателей и обеспечила $R_{он} \cdot C_{off} = 210$ фс, а напряжение пробоя $V_{br} = 3,7$ В. В 2013 году удалось уже получить $R_{он} \cdot C_{off} = 140$ фс и $V_{br} = 4,7$ В. Новая технология IBM CSO17SW позволила снизить $R_{он} \cdot C_{off}$ до 115 фс и поднять V_{br} до 5,5 В. К настоящему времени эти показатели существенно улучшены (см. табл. 19).

Отметим также, что наряду с рассмотренными в статье технологиями создания СВЧ-переключателей появились и другие технологии: SiGe HBT, InGaAs mHEMT, SiGe BiCMOS (см. табл. 19), которые со временем, возможно, будут использоваться для создания промышленных изделий.

Высокие коммутируемые мощности в КНС- и КНИ-переключателях достигаются двумя способами. Первый из них – это совершенствование технологического процесса (см. табл. 19). Второй – групповое включение полевых транзисторов (см. рис. 25), при котором пробивное напряжение увеличивается пропорционально числу используемых активных элементов.

Применение группового включения транзисторов заметно усложняет структуру антенных переключателей, используемых в мобильных телефонах, базирующихся на стандартах 4G, 5G, 6G. Реально выпускаемые антенные переключатели для этих стандартов реализуются на многопозиционных структурах SPMT, где $M = 8, 10, 12, 14, 16$ (см. табл. 17 и 18). В data sheets структура таких антенных переключателей не раскрывается. Однако сведения об их устройстве можно найти в научных публикациях. Так, в [37] приведены результаты разработки и экспериментального исследования антенного SPIOT-переключателя, рассчитанного на работу в GSM (0,85/0,90 ГГц) и WCDMA (1,8/1,9 ГГц) диапазонах. Это изделие реализуется по 0,18 мкм КНИ КМОП технологии и обеспечивает в режиме GSM компрессионную

Таблица 17. Интегральные переключатели на основе КМОП-технологии «кремний на сапфире» (КНС), выпускаемые компанией pSemi (Murata)

Модель	Тип	Диапазон частот, ГГц	$P_{вх.},$ Вт	IL, дБ	Iso, дБ	$T_r,$ нс	$T_f,$ нс	$T_{он},$ нс	$T_{off},$ нс	$T_{set},$ нс	$V_T,$ мВ
PE42424	SPDT	0,1–6,0	12,5 ($P_{1дБ}$)	0,80–0,95	47–30	–	–	145	145	–	–
PE95420	SPDT	0,001–8,5	0,5 ($P_{1дБ}$)	0,77–1,38	86–28	–	–	700	300	–	–
PE42524	SPDT	0,01–40,0	<1,8 ($P_{1дБ}$)	0,6–5,5	84–33	55	55	–	–	840*	3,5
PE42525	SPDT	9 кГц–60,0	<3,2 ($P_{1дБ}$)	0,9–2,7	80–36	3,0	3,0	8	8	48*	–
PE426462	SP6T	0,01–8,0	<10,0 ($P_{1дБ}$)	0,7–1,6	68–30	100	100	210	210	560*	–
PE42482	SP8T	0,01–8,0	<10,0 ($P_{1дБ}$)	0,7–1,6	85–30	100	100	227	227	870*	–
PE426412	SP12T	0,01–8,0	<10,0 ($P_{1дБ}$)	0,7–2,4	69–22	100	100	232	232	870*	–

* 0,05 дБ от установившегося значения.

Таблица 18. Интегральные переключатели, выполненные по КМОП-технологии «кремний на изоляторе» (КНИ)

Фирма	Модель	Тип	Диапазон частот, ГГц	$P_{вх.}$, Вт	IL, дБ	Iso, дБ	T_r , нс	T_f , нс	T_{on} , нс	T_{off} , нс	T_{set} , нс	V_T , МВ
Analog Devices	ADC901	SPST	0-4,5	0,05 ($P_{1дБ}$)	0,4-0,8	61-37	3,1	6,0	3,6	5,8	-	2,5
Qorvo	QPC6014	SPST	0,005-6,0	5,0	0,63-1,05	70-43	-	-	165	165	1000	-
IDT	F2910	SPST	0,03-8,0	<2,5 ($P_{0,1дБ}$)	0,38-1,55	85-26	-	-	265	225	280*	<45,0
Mini-Circuits	CSWA2-63DR+	SPDT	0,5-6,0	<1,0 ($P_{1дБ}$)	1,0-1,5	76-44	23	35	35	-	-	25,0
Analog Devices	HMC8038	SPDT	0,1-6,0	<4,0 ($P_{1дБ}$)	0,7-0,9	70-51	60	60	150	150	170*	-
Mini-Circuits	HSWA2-63DR+	SPDT	0,1-6,0	1,0	0,95-1,60	71-48	67	67	300	300	-	27,0
Qorvo	RFSW6224	SPDT	0,005-6,0	4,0 ($P_{1дБ}$)	0,55-1,10	80-48	-	-	250	250	1500	-
IDT	F2933	SPDT	0,05-8,0	<2,0	0,68-1,6	86-37	-	-	210	115	225**	-
Analog Devices	ADRF5020	SPDT	0,1-30,0	0,4 ($P_{0,1дБ}$)	1,2-2,0	65-70	2	2	10	10	20*, 15**	-
Analog Devices	ADRF5024	SPDT	0,1-44,0	0,6 (ГП***)	1,0-1,7	44-35	2	2	10	10	22*, 17**	-
Mini-Circuits	JSW3-272DR+	SP3T	0,005-2,7	3,2 ($P_{0,1дБ}$)	0,6	37-27	420	840	1900	1400	-	3,0
Skyworks Solutions	SKY13588-460LF	SP3T	0,1-6,0	8,0 ($P_{0,1дБ}$)	0,35-0,80	40-22	250	250	1500	1500	-	-
Analog Devices	HMC7992	SP4T	0,1-6,0	3,2 ($P_{1дБ}$)	0,6-1,0	45-30	30	30	150	150	320*	-
Mini-Circuits	HSWA4-63DR+	SP4T	0,03-6,0	3,2 ($P_{0,1дБ}$)	0,9-1,9	61-32	100	100	255	255	-	14,0
Qorvo	QPC6044	SP4T	0,005-6,0	5,0 ($P_{1дБ}$)	0,87-1,20	66-42	-	-	150	150	1000	-
IDT	F2914	SP4T	0,05-8,0	3,2 ($P_{0,1дБ}$)	0,9-1,8	62-36	-	-	256	256	285**	-
Mini-Circuits	JSW5-272DR+	SP5T	0,005-2,7	3,2 ($P_{0,1дБ}$)	0,6	37-27	420	840	1900	1400	-	3,0
Analog Devices	ADRF5250	SP5T	0,1-6,0	2,5 ($P_{0,1дБ}$)	1,3-1,8	55-46	40	80	150	150	400*, 500**	-
Qorvo	QPC6054	SP5T	0,005-6,0	>4,0 ($P_{1дБ}$)	0,95-1,90	70-44	-	-	150	150	1000	-
IDT	F2915	SP5T	0,05-8,0	5,0	0,93-2,30	62-36	-	-	256	256	285*	-
Mini-Circuits	JSW6-33DR+	SP6T	0,005-2,7	3,2 ($P_{0,1дБ}$)	0,6	37-27	420	840	1900	1400	-	3,0
Qorvo	QPC6064	SP6T	0,005-6,0	4,0 ($P_{1дБ}$)	1,02-2,02	72-40	-	-	150	150	1000	-
Qorvo	QPC6222	DPDT	0-6,0	<6,2	0,34-0,53	32-23	<5000	-	-	-	<20000	-
Qorvo	QPC6222	DPDT	0-6,0	<6,2	0,34-0,53	32-23	<5000	-	-	-	<20000	-
Skyworks Solutions	SKY13491-21	SP14T	0,7-2,7	<4,0-1,2	0,70-1,25	28-20	2000	-	-	-	-	-
Skyworks Solutions	SKY13492-21	SP16T	0,7-2,7	<4,0-1,2	0,70-1,25	28-20	2000	-	-	-	-	-
Skyworks Solutions	SKY13417-485LF	SP7T	0,1-2,0	5,0 ($P_{0,1дБ}$)	0,45-0,80	37-21	-	-	1500	-	-	-

* 0,05 дБ от установившегося значения.

** 0,1 дБ от установившегося значения.

*** ГП – горячее переключение.

Таблица 19. Показатели качества твердотельных переключателей, выполненных по различным технологиям

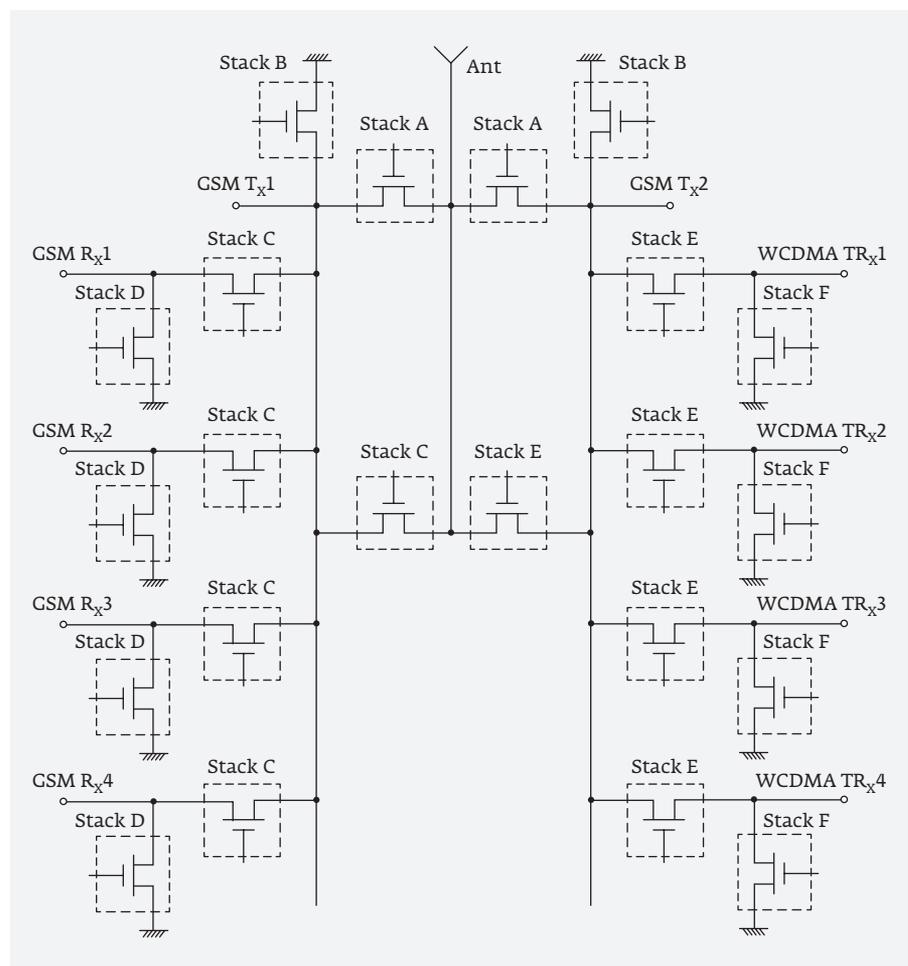
Технология	Диапазон частот, ГГц	$R_{on} \cdot C_{off}$, фс	V_{br} , В
Si pin-диод	-	70 [30]	50 [30]
GaAs pin-диод	90-98 [31]	44 [31]	30 [30]
GaAs PHEMT	30-85 [31]	42 [31]	8 [30]
GaN HEMT	-	300 [22]	70 [30]
Bulk CMOS	54-84 [32]	162 [31]	7 [30]
КНС КМОП	-	264 [33, 34]	-
КНИ КМОП	140-220 [31, 35]	75,6 [31, 35]	5,5 [36]
SiGe HBT	80-170 [31]	83,7 [31]	-
SiGe BiCMOS	96-163 [35]	83,7 [35]	-
InGaAs mHEMT	122-283 [31]	110,3 [31]	-

мощность $P_{1дБ} = 35$ дБм в диапазоне 0,8–0,9 ГГц и 33 дБм в диапазоне 1,8–1,9 ГГц. Передатчики в WCDMA-каналах имеют компрессионную мощность $P_{1дБ} = 26$ дБм.

Упрощенная схема такого SP10T приемопередающего переключателя включает в себя 22 группы полевых транзисторов (рис. 33) [37]: stack A, stack B, stack C, stack D, stack E и stack F. Число полевых транзисторов в группах разное – от 6 до 12 (рис. 34). Общее количество полевых транзисторов в этом антенном переключателе равно 164. Разработанный переключатель обладает высокой линейностью и обеспечивает защиту от статического электричества 8,5 кВ (HBM).

Отметим, что в промышленно выпускаемых переключателях применяются как КНС КМОП (см. табл. 17), так и КНИ КМОП (см. табл. 18) технологии. Наибольшее число каналов на сегодняшний день удалось реализовать компании Skyworks Solutions в изделии SKY13442-21, предназначенном для подключения 16 передатчиков к антенне для обеспечения работы в стандартах LTE, UMTS, CDMA2000, EDGE, GSM, TDD-LTE, TD-SCDMA.

Анализ табл. 17 и 18 показывает, что малое время переключения обеспечивают изделия, выполненные как по КНС, так и по КНИ КМОП технологиям. Некоторые кремниевые SPST- и SPDT-переключатели отличаются чрезвычайно малыми (единицы наносекунд) значениями длительностей фронта и спада (см. табл. 17 и 18). Такие переключатели могут использоваться в качестве модуляторов. Например, в изделии ADG901-EP компании Analog Devices времена нарастания T_r и спада T_f равны 2,8 и 5,1 нс соответственно. Существенно меньшие времена $T_r = 300$ пс и $T_f = 360$ пс были достигнуты при разработке SP4T-переключателя, рассчитанного на диапазон частот 0–70 ГГц, выполненного

**Рис. 33.** Упрощенная схема антенного SP10T-переключателя, выполненного по КНИ КМОП технологии

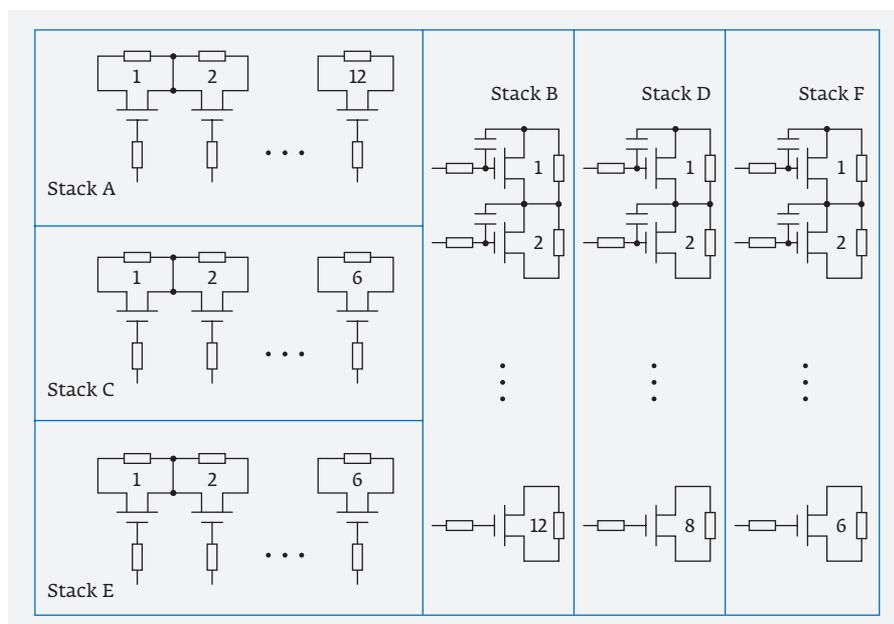


Рис. 34. Группы полевых транзисторов (stack), используемые в схеме переключателя, показанного на рис. 33

по 0,13 мкм bulk CMOS IBM8HP технологии [38]. Моделирование формы радиоимпульса (рис. 35) в этом переключателе было выполнено на частотах 20, 40 и 60 ГГц [38].

Характер переходных процессов при смене одного состояния на другое в различных моделях может существенно различаться. В изделиях компании IDT эти отличия могут быть значительными (рис. 36).

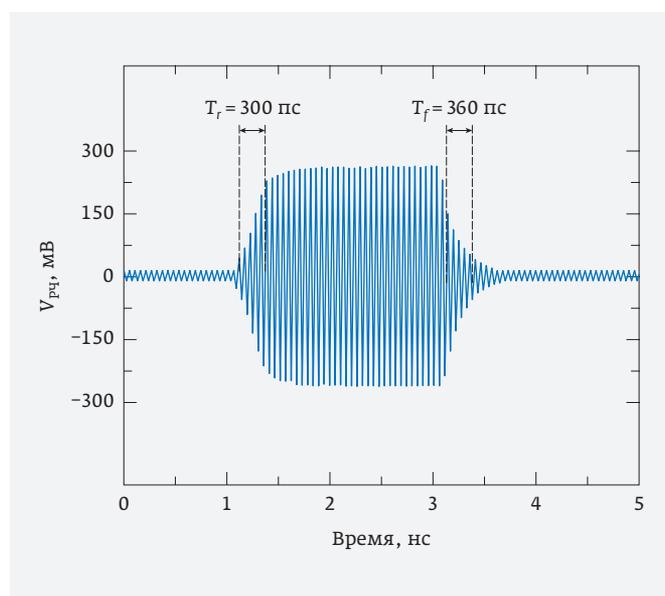


Рис. 35. Моделирование процесса формирования радиоимпульса на частоте 20 ГГц в SP4T-переключателе, выполненном по стандартной (IBM8HP) КМОП-технологии

Представляют также интерес наложенные друг на друга осциллограммы напряжений на первом и третьем выходах многопозиционного SP4T-переключателя ADG904 компании Analog Devices при коммутации входного сигнала с первого выхода на третий (рис. 37).

Времена переключения в конкретных изделиях зависят как от требований, заданных при их разработке, так и от факторов, влияющих на них в процессе эксплуатации, к которым прежде всего относятся напряжение питания и температура (рис. 38), влияние которых весьма заметно.

Важным преимуществом кремниевых технологий перед арсенид-галлиевыми является существенно меньшее время установления T_{set} . Так, в изделиях HMC540 и HMC540S, изготовленных компа-

нией Analog Devices по этим технологиям [39], при одинаковых требованиях ко всем остальным характеристикам, времена установления оказались равными 8 и 1 мкс соответственно (рис. 39). Сравнимые характеристики $T_r = T_f = 100$ нс, $T_{on} = T_{off} = 232$ нс, $T_{set} = 870$ нс обеспечивают и в SPI2T-переключателе PE426412 компании pSemi, работающем в диапазоне частот 0,01–8,0 ГГц.

Надо также отметить исключительно низкие значения времени установления T_{set} в изделиях PE42525 ($T_{set} = 48$ нс), ADRF5020 ($T_{set} = 15$ –20 нс) и ADRF5024 ($T_{set} = 17$ –22 нс), выполненных по КНС КМОП (см. табл. 17) или КНИ КМОП (см. табл. 18) технологиям.

В ряде описаний переключателей, производимых компанией IDT, приводятся зависимости обратных потерь $RL(t)$ и КСВН(t) на трех портах (RF_c , RF_1 , RF_2) этого изделия во время их коммутации. Значения этих величин во время переходных процессов на 500-нс временном интервале на этих портах существенно отличаются от своих стационарных значений (рис. 40), что необходимо учитывать разработчикам при проектировании изделий, включающих твердотельные переключатели.

Анализируя табл. 17 и 18, можно отметить, что как в КМОП КНС переключателях, так и в КМОП КНИ переключателях достигнут чрезвычайно высокий уровень характеристик. Так в SPDT-переключателе ADRF5020 (компания Analog Devices) в рабочем диапазоне частот 0,1–30 ГГц компрессионная мощность по уровню 0,1 дБ составила 0,4 Вт при развязке 65–70 дБ и временах нарастания и спада 2 нс, а в SPDT-переключателе PE42525



а)



б)



в)



г)

Рис. 36. Осциллограммы напряжений на выходе SPDT-переключателей компании IDT при переходе из закрытого состояния в открытое (а, в) и из открытого состояния в закрытое (б, г): а, б – модель F2970; в, г – модель F2977

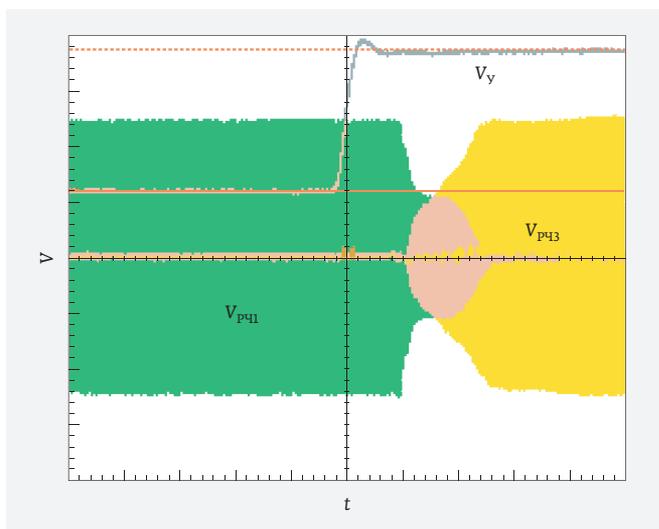


Рис. 37. Управляющий V_y и радиочастотные $V_{PЧ1}$, $V_{PЧ3}$ на 1-м и 3-м выходах сигнала SP4T-переключателя ADG904 компании Analog Devices при коммутации с 1-го на 3-й канал

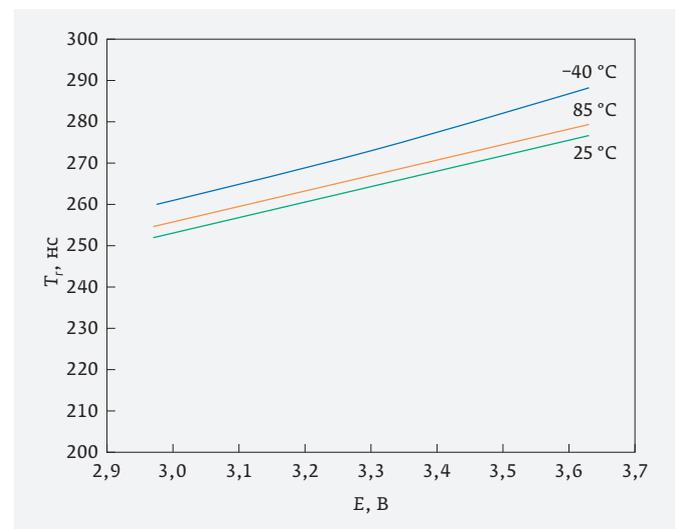


Рис. 38. Изменение времени нарастания T_r в зависимости от напряжения питания E при различных температурах окружающей среды

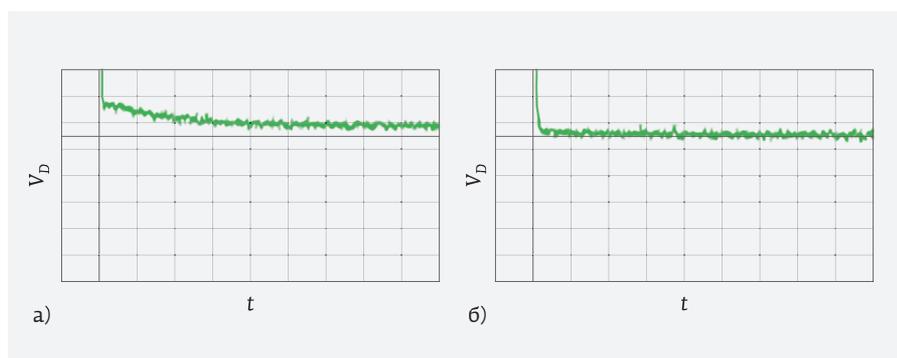


Рис. 39. Процессы установления стационарного режима в двух переключателях компании Analog Devices: а – модель HMC540, GaAs PHEMT технология; б – модель HMC540S, кремниевая КМОП-технология

в диапазоне частот 9 кГц – 60 ГГц компрессионная мощность достигает 3,2 Вт при развязке 80–36 дБ и временах нарастания и спада 3 нс. Проводя сравнение с переключателями, выполненными по другим технологиям, отметим, что эти результаты на сегодняшний день являются наивысшим достижением.

ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ, УПРАВЛЯЕМЫЕ ПО USB- И SPI-ИНТЕРФЕЙСАМ

Любое производство, а в особенности массовое, предполагает проведение различного рода измерений. Одними из наиболее часто применяемых при измерении и тестировании различных компонентов являются переключатели,

Таблица 20. Переключатели, управляемые по интерфейсам USB и SPI

Фирма	Модель	Тип	Диапазон частот, ГГц	$P_{вх.}$, Вт	IL, дБ	Iso, дБ	T_p , нс
Vaunix	LSW-102PDT-75F	SPDT	0,01–1,0	<10,0	3,5	65	<300
Telemakus	TES3000-60	SPDT	0,05–3,0	100,0	<1,0	60	2000
Vaunix	LSW-502PDT	SPDT	0,1–5,0	15,8 ($P_{1дБ}$)	1,5	70	90
Telemakus	TES6000-30	SPDT	0,1–6,0	2,0 ($P_{0,1дБ}$)	<2,0	30	33
Vaunix	LSW-602PDT	SPDT	0,01–6,0	<10,0	3,5	65	<300
Telemakus	TES7000-50	SPDT	0,1–7,0	2,0 ($P_{0,1дБ}$)	<3,0	50	33
Pasternack	PE71S3900	SPDT	0,5–18,0	<0,1	<6,0	>60	6000
Qotana Technologies	DBSA0200802000C	SPDT	0,8–20,0	1,0 ($P_{0,1дБ}$)	1,6–2,7	70–65	500
PMI	P2T-500M40G-USB	SPDT	0,5–40,0	<0,1	<6,0	>60	<6000
Qotana Technologies	DBSA0200504350C	SPDT	0,5–43,5	0,2 ($P_{1дБ}$)	2,0–4,5	85–55	500
Vaunix	LSW-102P4T-75F	SP4T	0,01–1,0	<10,0	3,5	60	<300
Vaunix	LSW-502P4T	SP4T	0,1–5,0	15,8 ($P_{1дБ}$)	1,5	60	<90
Vaunix	LSW-602P4T	SP4T	0,01–6,0	<10,0	3,5	60	<300
Mini-Circuits	USB-SP4T-63	SP4T	0,001–6,0	<0,5	1,25	50	3000
Qotana Technologies	DBSA0402001800U	SP4T	2,0–18,0	1,0 ($P_{0,1дБ}$)	1,6–2,7	70–60	100
Qotana Technologies	DBSA0802005000B	SP8T	2,0–50,0	0,2 ($P_{0,1дБ}$)	5,5–10,5	70–50	500
Mini-Circuits	SPI-SP10T-63	SP10T	0,001–6,0	0,5	-	80	6000

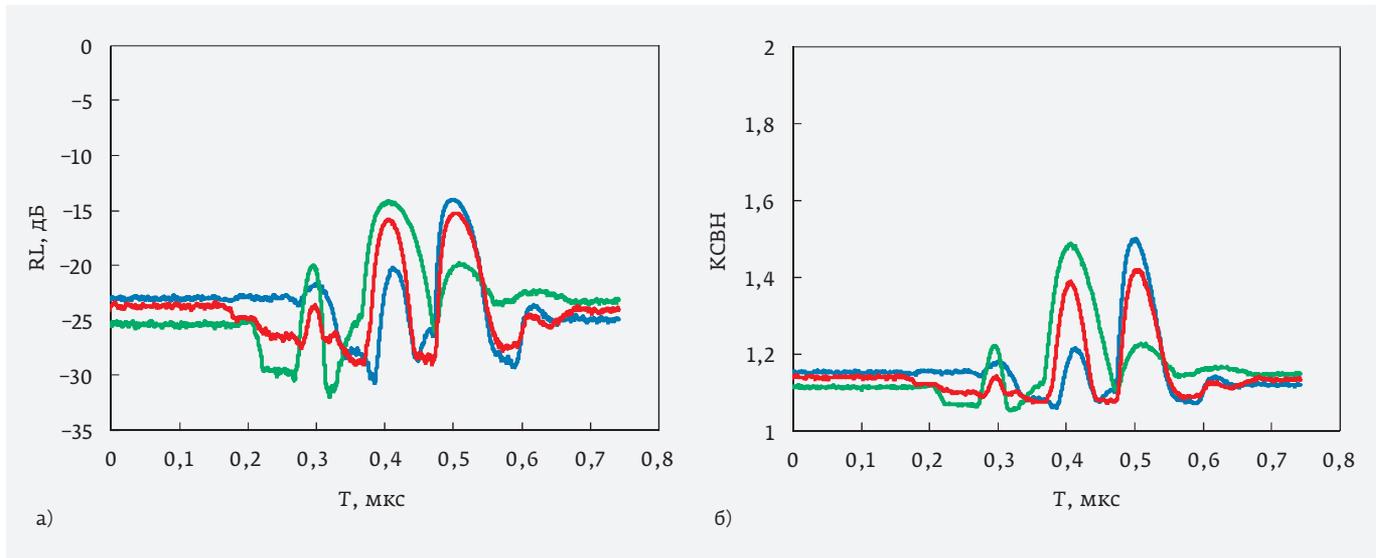


Рис. 40. Переходные процессы RL (а) и КСВН (б), возникающие на RF_1 , RF_2 и RF_c портах SPDT-переключателя F2923 во время его коммутации: синий цвет – порт RF_1 (переключение с RF_1 на RF_c) или порт RF_2 (переключение с RF_2 на RF_c); зеленый цвет – порт RF_1 (переключение с RF_c на RF_1) или порт RF_2 (переключение с RF_c на RF_2); красный цвет – порт RF_c (переключение с RF_1 на RF_2 или с RF_2 на RF_1)

управляемые по USB- и SPI-интерфейсам (табл. 20). Рынок этих изделий постоянно расширяется. Основными производителями таких переключателей являются компании Vaunix, Telemakus и Mini-Circuits, а в последнее время и Qotana Technologies, вышедшая на рынок с линейкой USB-переключателей SPST...SP8T конфигураций. Большая часть этих изделий обеспечивает малое (<500 нс) время коммутации, значительную (60–80 дБ) развязку, а в отдельных случаях и достаточно высокий (до 100 Вт) уровень коммутируемой мощности. Некоторые из этих моделей работают в диапазонах частот до 20 ГГц и даже до 50 ГГц. Процесс включения / выключения в SPDT-переключателе P2T-500M40G-USB компании PMI иллюстрируется осциллограммами (рис. 41). Внешний вид этих переключателей отличается значительным разнообразием (рис. 42). Так, некоторые модели (см. рис. 42) поставляются с USB-кабелем. Компания Mini-Circuits выпускает переключатели с управлением как по USB-, так и по SPI-интерфейсам.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАССМОТРЕННЫХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ

СВЧ-переключатели являются на рынке компонентов одним из наиболее востребованных видов изделий. Это касается не только номенклатуры, но и количества производимых переключателей, которые поставляются для средств мобильной связи и радиолокации миллионными партиями.

В промышленном исполнении эти изделия выпускаются на Si и GaAs pin-диодах и на полевых транзисторах по технологиям GaAs, GaN и КМОП.

Переключатели на pin-диодах производятся уже в течение 5–6 десятилетий в основном в модульном исполнении и будут востребованы и в дальнейшем, прежде всего в тех задачах, где требуются высокие мощности, частоты и скорости коммутации. Стоимость этих изделий весьма высока, что прежде всего связано с высокой трудоемкостью и технологическими особенностями их изготовления.

Арсенид-галлиевые переключатели на полевых транзисторах, отличающиеся относительно невысокой стоимостью в интегральном исполнении, будут прежде всего использоваться для космических применений, благодаря их высокой стойкости к радиации.

Переключатели на нитрид-галлиевых полевых транзисторах будут востребованы в тех задачах, где требуется высокая мощность, малые габариты, высокая надежность и радиационная стойкость. Роль этих изделий может существенно возрасти с появлением на рынке нитрид-галлиевых полевых транзисторов с пробивным напряжением более 200 В. Цена этих изделий может быть весьма высокой.

Интегральные КМОП-изделия уверенно заняли рынок переключателей, используемых в средствах мобильной связи и радиолокации, причем изделия по технологии КНС КМОП, отличающиеся высокой радиационной стойкостью, оптимально подходят для космического применения, а дешевые КНИ КМОП изделия – для систем связи и радиолокации, где требуемые количества оцениваются миллионами и миллиардами штук. Важной для многих применений является высокая стойкость КМОП-изделий

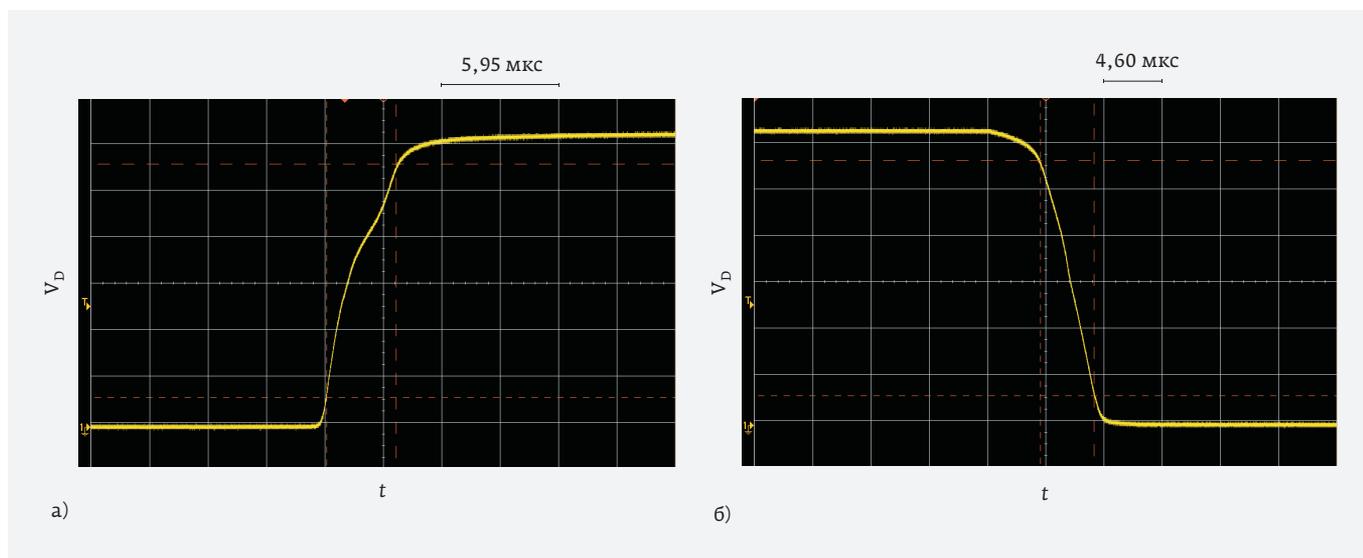


Рис. 41. Осциллограммы напряжений на выходе pin-диодного SPDT-переключателя P2T-500M40G-USB (компания PMI), управляемого по USB-интерфейсу, при включении (а) и выключении (б) одного из каналов

Таблица 21. Предельные характеристики твердотельных переключателей, выполненных по различным технологиям

Характеристика	На pin-диодах				На полевых транзисторах					
	Монолитные		Si, GaAs		GaAs pHEMT		GaN PHEMT		Монолитные КМОП	
	Si	GaAs	модульные	волноводные	монолитные	модульные	монолитные	модульные	КНС	КНИ
$f_{вх., макс.}$, ГГц	20	90	67	150	50	40	18	18	60	44
$P_{н. макс.}$ ($P_{и. макс.}$), Вт	100	50	800 (3500)	12,5	2	0,5	100	200 (1000)	12,5	8
$IL_{мин.}$, дБ	0,2	0,8	0,25	1,0	0,25	1,6	0,3	0,8	0,6	0,34
$ISO_{макс.}$, дБ	63	47	85	70	65	100	57	90	86	86
$T_{п мин.}$, нс	20	2	2	2	4	-	10	18	-	-
$T_{г мин.}$, нс	32	10	0,9	3	1,8	1	50	-	3	2
$T_{f мин.}$, нс	-	8	0,9	3	1,8	1	50	-	3	2
$T_{оп мин.}$, нс	85	20	4	-	4	5	20	-	8	3,6
$T_{оф мин.}$, нс	-	20	3	-	4	4	20	-	8	5,8
Защита от статического электричества (ESD)	Средняя				Низкая		Высокая		Высокая	Высокая
Стоимость	Высокая				Низкая		Высокая		Низкая	Очень низкая



Рис. 42. Конструкции модульных переключателей управляемых по USB- и SPI-интерфейсам: а - LSW602PDT, SPDT, компания Vaunix; б - DBSA0200504350C, SPDT, компания Qotana Technologies, в - P2T-500M40G-USB, SPDT, компания PMI; г - DBSA0202001800U, SPDT, компания Qotana Technologies; д - LSW-602P4T, SP4T, компания Vaunix; е - USB-SP4T-63, SP4T, компания Mini-Circuits; ж - DBSA0802005000B, SP8T, компания Qotana Technologies; з - SPI-SP10T-63, SP10T, компания Mini-Circuits

Фильтры ФИЛИН

www.filin-rf.ru
 ФИЛИН
 Filter Innovations
 www.radiocomp.ru
 filin-rf@radiocomp.ru

Фильтры ВЧ/СВЧ, в том числе переключаемые и перестраиваемые, и устройства на их основе для частот до 26,5 ГГц и выше

- Диплексеры
- Мультиплексеры
- Генераторы
- Фазовращатели
- Делители/сумматоры мощности
- Направленные ответвители

Любые виды заказов:

- крупносерийные заказы
- единичные заказы
- срочные заказы
- НИР, ОКР



Разработка, производство, испытания устройств с учетом требований заказчика

- Устройства на сосредоточенных элементах
- Устройства на керамических резонаторах
- Гребенчатые и встречно-стержневые фильтры
- Моноблочные керамические фильтры
- Устройства на микрополосковых линиях
- Волноводные устройства
- Устройства по технологии LTCC

109316, Москва, Волгоградский проспект, 42 Отдел продаж: +7 495 95 777 45 Техподдержка: +7 495 361 09 04

к статическому электричеству, достигающая 10 и более киловольт.

Помимо упомянутых технологий, используемых в промышленно выпускаемых моделях, в научных публикациях представлены и другие, которые в будущем, возможно, будут использованы и в коммерческих изделиях. Здесь прежде всего надо упомянуть изделия на SiGe биполярных [40] и особенно на HBT [41, 42] транзисторах. Последние из них имеют произведение $R_{on} \cdot C_{off} = 83,7$ фс, работают в широкой (80–170 ГГц) полосе частот, отличаются исключительно малой площадью кристаллов ($0,213 \text{ мм}^2$) и малыми временами нарастания $T_r = 25$ пс и спада $T_f = 50$ пс [43].

Результаты исследований нескольких вариантов исполнения SPDT-переключателей, выполненных по 50-нм технологии InGaAs mHEMT (metamorphic high electronic-mobility transistor) показывают возможность создания изделий с частотами до 330 ГГц, в которых произведение $R_{on} \cdot C_{off} = 110,3$ фс [31].

С целью объективной оценки достижимых значений характеристик высокоскоростных переключателей, выполненных по различным технологиям, в табл. 21 были собраны предельные (максимальные и минимальные) значения показателей промышленно выпускаемых изделий из табл. 1–12, 14–18. Из табл. 21 следует, что наибольшие входные частоты достигаются в GaAs pin-диодных переключателях (включая волноводные изделия), арсенид-галлиевых изделиях на полевых транзисторах и в КМОП-переключателях. Кремниевые pin-диодные и GaN-переключатели обладают по этому показателю не столь высокими характеристиками. Однако по уровню допустимой входной мощности эти два вида изделий являются безусловными лидерами.

Вносимые потери и развязка в значительной степени зависят от диапазона рабочих частот, уровня входной мощности и схемотехнических решений. Отличие этих показателей в переключателях, выполненных по различным технологиям, невелико.

Наибольшие скорости переключения достигаются в pin-диодных модульных изделиях, интегральных переключателях на GaAs pin-диолах, волноводных переключателях, интегральных и модульных переключателях, выполненных по GaAs PHEMT технологии, а также в КМОП-изделиях. Несколько худшими характеристиками по этому показателю обладают интегральные изделия на кремниевых pin-диолах и нитрид-галлиевые переключатели в интегральном и модульном исполнении.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Геворкян В., Кочемасов В.** Ферритовые переключатели // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 6. С. 90–94; № 9. С. 122–131.
2. **Кочемасов В.** Электромеханические переключатели ВЧ/СВЧ-сигналов – основные типы и производители // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2016. № 7. С. 114–121; № 8. С. 96–106; № 9. С. 128–134.
3. **Кочемасов В., Майстренко А.** СВЧ-переключатели на основе МЭМС // СВЧ-электроника. 2016. № 1. С. 36–42.
4. **Кочемасов В., Кирпиченков А.** Твердотельные СВЧ-переключатели // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2017. № 10. С. 92–97; 2018. № 1. С. 116–124; 2018. № 2. С. 150–163.
5. **Кочемасов В., Рауткин Ю.** Интегральные СВЧ-переключатели // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2018. № 4. С. 122–127; № 5. С. 152–163; № 6. С. 80–93.
6. **Кочемасов В., Дингес С., Шадский В.** Твердотельные СВЧ-переключатели средней и большой мощности // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2019. № 8. С. 108–112; № 9. С. 116–130; № 10. С. 82–94; 2020. № 1. С. 142–151.
7. **Freeston A., Boles T., Varmazis C.** Speedy Switches Minimize Gate Lags // Microwave & RF. March 2010. PP. 98–102.
8. Understanding RF/Microwaves Solid State Switches and their Applications. Application Note. – Agilent Technologies.
9. Agilent U9397A/C FET Solid State Switches (SPDT) Technical overview. Agilent Technologies.
10. U9400A/C Solid State FET Transfer Switches. Technical overview. – Keysight Technologies.
11. Switches. – Каталог компании General Microwave.
12. **Blair E., Farrington K., Tubbs K.** Selecting the Right RF Switch. – Каталог компании Daico Industries. PP. 253–262.
13. Microwave Switches. – Каталог компании Elisra.
14. **Chinoy P., Jain N., Li P., et al.** Manufacture of Low-Loss Microwave Circuits using HMIC Technology // IEEE MTT-S Digest. 1994. PP. 1137–1140.
15. **Heston D. D., Seymour D. J., Zych D.** 100 MHz to 20 GHz Monolithic Single-Pole, Two-, Three-, and Four-Throw GaAs PIN Diode Switches. – 1991 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. PP. 429–432.
16. **Баров А., Гущин С.** GaAs МИС PIN диодного двухпозиционного коммутатора // Chip News. 2008. № 1. С. 50–51.
17. **Alekseev E., Pavlidis D., Ziegler V.** 77 GHz High-Isolation Coplanar Transmit-Receive Switch Using InGaAs/InP PIN Diodes. – 1998 IEEE GaAs IC Symposium.
18. **Lam K., Ding H., Liu X. et al.** Wideband Millimeter Wave PIN Diode SPDT Switch using IBM 0.13 μm SiGe Technology. – Proceeding of the European Microwave Integrated Circuit Conference. 2007. PP. 108–111.
19. **Song P., Schmid R. L., Ulusoy A. C., Cressler J. D.** A High-Power, Low Loss W-band SPDT Switch Using SiGe PIN Diodes. – IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. 2014. PP. 195–198.

20. **Yang J. G., Yang K.** High-Linearity K-band Absorptive-Type MMIC Switch Using GaN PIN-Diodes // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2013. V. 23, No. 1, PP. 37–39.
21. **Boles T., Freeston A.** New NanoSecond Switch Technology // Microwave Journal. June 2010. PP. 56–60.
22. **Campbell C. F., Dumka D. C.** Wideband High Power GaN on SiC SPDT Switch MMICs. 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. PP. 145–148.
23. **Ma B. Y., Boutros K. S., Hacker J. B. et al.** High Power AlGaIn/GaN Ku-band MMIC SPDT Switch and Design Consideration. – 2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. PP. 1473–1476.
24. **Gotch D.** A Review of Technological Advances in Solid-State Switches // Microwave Journal. November 2007. PP. 24–34.
25. **Vye D., Pelletier L., Theeuwens S. et al.** The New Power Brokers: High Voltage RF Device // Microwave Journal. June 2009. PP. 22–40.
26. GaN Switches Enable Hot Switching at Higher Power // Microwave Journal. January 2012. PP. 134–136.
27. GaN MMIC Switch Handles 40 W from DC to 6 GHz // Microwave Journal. November 2011. PP. 132–134.
28. **Vye D.** Divine Innovation: 10 Technologies Changing the Future of Passive and Control Components // Microwave Journal. November 2011. PP. 22–42.
29. **Chang H.-Y., Chan C.-Y.** A Low Loss High Isolation DC–60 GHz SPDT Travelling-Wave Switch with a Body Bias Technique in 90 nm CMOS Process // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2010. V. 20. No. 2. PP. 82–84.
30. **Bahl I. G.** Control Components Using Si, GaAs, and GaN Technologies. 2014.
31. **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. 2018. V. 66. No. 4. PP. 1998–2009.
32. **Shu R., Tang A., Drouin B. et al.** A 54–84 GHz CMOS SPDT Switch with 35 dB Isolation. 2015 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. PP. 15–18.
33. **Hindle P.** The State of RF/Microwave Switches // Microwave Journal. Nov. 2010. PP. 20–36.
34. **Tombak A., Carroll M. S., Kerr D. C. et al.** Design of High-Order Switches for Multimode Applications on a Silicon-on-Insulator Technology // Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2013. V. 61. No. 10. PP. 3639–3649.
35. **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 Letters. 2014. V. 24. No. 6. PP. 400–402.
36. **Jaffe M., Abou-Khalil M., Botula A. et al.** Improvements in SOI Technology for RF Switches. – 2015 IEEE 15th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems. PP. 30–32.
37. **Wang X. S., Wang X., Lu F. et al.** Concurrent Design Analysis of High-Linearity SP10T Switch With 8.5 kV ESD Protection // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2014. V. 49. No. 9. PP. 1927–1941.
38. **Centinoneri B., Atesal Y. A., Rebeiz G. M.** A Miniature DC–70 GHz SP4T Switch in 0.13 μ m CMOS. – 2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. PP. 1093–1096.
39. **Bayrakci B.** RF and MW Control Products in Silicon. – Analog Devices.
40. **Hancock T. M., Rebeiz G. M.** Design and Analysis of a 70-ps SiGe Differential RF Switch // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2005. V. 53. No. 7. PP. 2403–2410.
41. **Schmid R. L., Song P., Coen C. T. et al.** On the Analysis and Design of Low-Loss Single-Pole Double-Throw W-Band Switches Utilizing Saturated SiGe HBTs // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2014. V. 62. No. 11. PP. 2755–2767.
42. **Ulusoy A. C., Schmid R. L., Kaynak M. et al.** High-Performance W-band LNA and SPDT Switch in 0.13 μ m SiGe HBT Technology. – IEEE, RWS 2015. PP. 162–164.
43. **Thian M., Fusco V. F.** Ultrafast Low-Loss 42–70 GHz Differential SPDT Switch in 0.35 μ m SiGe Technology // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2012. V. 60. No. 3. PP. 655–659.

ООО “Руднев-Шиляев”

- разработка измерительных систем по техническому заданию Заказчика.
- помощь в составлении технического задания Заказчика.
- производство измерительных систем.
- разработка и производство приборов.
- разработка программно-аппаратного обеспечения по ТЗ Заказчика.
- сертификация измерительных систем и приборов.

Инструментальные решения задач заказчика!

125130, г. Москва, ул. Клары Цеткин, д. 33 корп. 35
 www.rudshel.ru, e-mail: adc@rudshel.ru
 тел./факс: (495) 787-6367, 787-6368