

Интегральные СВЧ-переключатели

Часть 3

В. Кочемасов, к. т. н.¹, Ю. Рауткин, к. т. н.

УДК 621.389 | ВАК 05.27.01

В первой и второй частях статьи, опубликованных в предыдущих номерах журнала, рассматривались интегральные СВЧ-переключатели на базе рin-диодов и арсенид-галлиевых полевых транзисторов. Теперь речь пойдет об устройствах на основе кремниевых полевых транзисторов.

ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

С появлением арсенид-галлиевых полевых транзисторов многие проблемы, связанные с использованием интегральных рin-диодов, ушли в прошлое. Однако и арсенид-галлиевым технологиям MOSFET, HEMT, pHEMT присущи некоторые недостатки, а именно: высокая чувствительность к статическому электричеству, необходимость в использовании внешних конденсаторов, обусловленная наличием двух управляющих напряжений, а также относительно невысокая линейность переключателей.

Существующая с 60-х годов прошлого столетия КМОП-технология не позволяла создавать работающие в широкой полосе частот полевые транзисторы, обладающие к тому же большим напряжением пробоя и высокой линейностью. По показателю качества $FOM = R_{on} \cdot C_{off}$ КМОП-переключатели значительно уступали арсенид-галлиевым аналогам. Вместе с тем потенциально КМОП-технология давала возможность интегрировать на одном кристалле как аналоговые, так и цифровые узлы, не требовала двух напряжений питания, а созданные с ее применением изделия были нечувствительны к статическому электричеству (>1 кВ при испытаниях на основе модели человеческого тела (Human

Body Model, HBM)). Кроме того, изготовленные по этой технологии на сапфировых подложках изделия были работоспособны в условиях повышенной радиации.

Желание развить достоинства, присущие КМОП-изделиям, и избавиться от негативных свойств арсенид-галлиевых переключателей привело к развитию технологий КНС (кремний на сапфире) и КНИ (кремний на изоляторе). Совершенствование этих улучшенных КМОП-технологий (КНС, КНИ, FDSOI, FinFET, tunnel FET, junctionless FET, nanowire FET, graphene FET и др. [10]) было предопределено лавинообразным ростом рынка кремниевых переключателей применительно к задачам мобильной телефонии.

Наибольших успехов при создании кремниевых переключателей добились компании Skyworks Solutions, CEL, Qorvo, Infineon, Mini-Circuits, Analog Devices, IDT и особенно IBM, e2v и Peregrine Semiconductor, объединившие в последние годы свои усилия по совершенствованию КМОП-технологий. По показателю качества $FOM = R_{on} \cdot C_{off}$ современные КМОП-переключатели обошли арсенид-галлиевые аналоги. Так, лучшие устройства на базе pHEMT-технологии имели $FOM = 198$ фс [11], а КМОП-переключатели, созданные IBM [12], – $FOM = 210$ фс в 2008 году, 140 фс в 2013 году и 115 фс в 2014 году.

Таблица 7. Характеристики SPST-переключателей на основе кремниевых полевых транзисторов

Фирма	Модель	Диапазон частот, ГГц	IL, дБ	Iso, дБ	T _п , нс	P _{доп.} , дБм
Peregrine Semiconductor	PE4270	0,001–3,0	0,50–0,75	90–63	2000	33
IDT	F2911	0,001–3,5	0,24–0,89	84–35	1100	31
Analog Devices	ADG901-EP	0–4,5	0,4–0,8	61–38	6,5	18
Peregrine Semiconductor	PE4246	0,001–5,0	0,8–1,3	55–44	2000	33
Qorvo	QPC6014	0,005–6,0	0,63–1,05	70–43	165	37
IDT	F2910	0,03–8,0	0,38–1,55	85–26	280	33

¹ ООО «Радиокомп», генеральный директор, vkochemasov@radiocomp.ru.

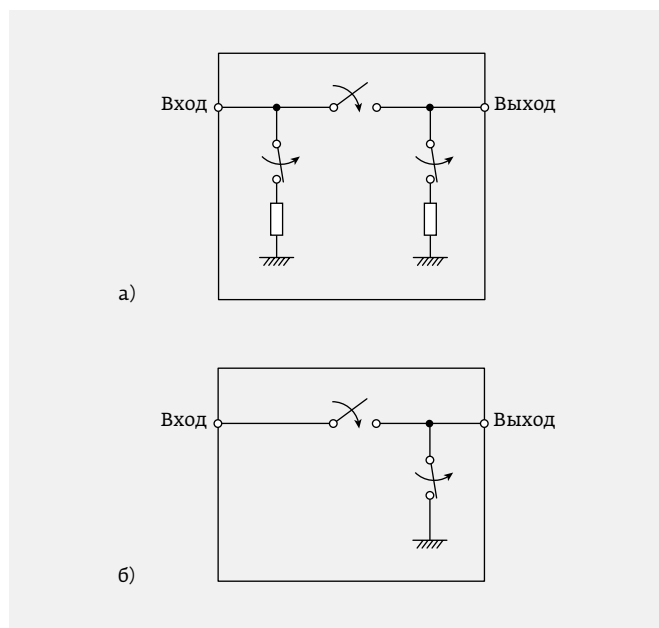


Рис. 32. Упрощенные схемы поглощающего ADG901 (а) и отражательного ADG902 (б) переключателей, производимых компаниями Analog Devices

В настоящее время на рынке представлены переключатели на основе кремниевых полевых транзисторов разных поколений и технологий. Условно можно разделить переключатели на три группы: с максимальными рабочими частотами до 3, 10 и более 10 ГГц. Последняя группа представлена относительно небольшим количеством моделей. Однако, судя по научным публикациям, количество моделей с диапазоном рабочих частот более 10 ГГц в ближайшее время существенно увеличится.

Количество моделей SPST-переключателей, созданных по КМОП-технологии, невелико (табл. 7). Их производство сосредоточено в компаниях Analog Devices, Qorvo, IDT и Peregrine Semiconductor.

Компания Analog Devices выпускает SPST-переключатели ADG901, ADG901-EP, ADG902 поглощающего (рис. 32а) и отражательного (рис. 32б) типов. Благодаря низкой мощности потребления ($E_{\text{пит.}} = 1,65\text{--}2,45\text{ В}$, $I_{\text{пит.}} < 2,5\text{ мкА}$) такие устройства потенциально привлекательны для использования в беспроводных системах связи, переключаемых фильтрах, во входных цепях трансиверов и других приложениях в диапазоне внешних температур от -55 до $125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поглощающие модели переключателей (ADG901, ADG901-EP), выпускаемые компанией Analog Devices, отличаются хорошим КСВН, обеспечивают минимальный уровень отражений от входного порта. Вместе с тем зависимость вносимых потерь и особенно развязки от температуры окружающей среды весьма значительная (рис. 33).

Поглощающий SPST-переключатель QPC6014 компании Qorvo, выполненный по КНИ-технологии,

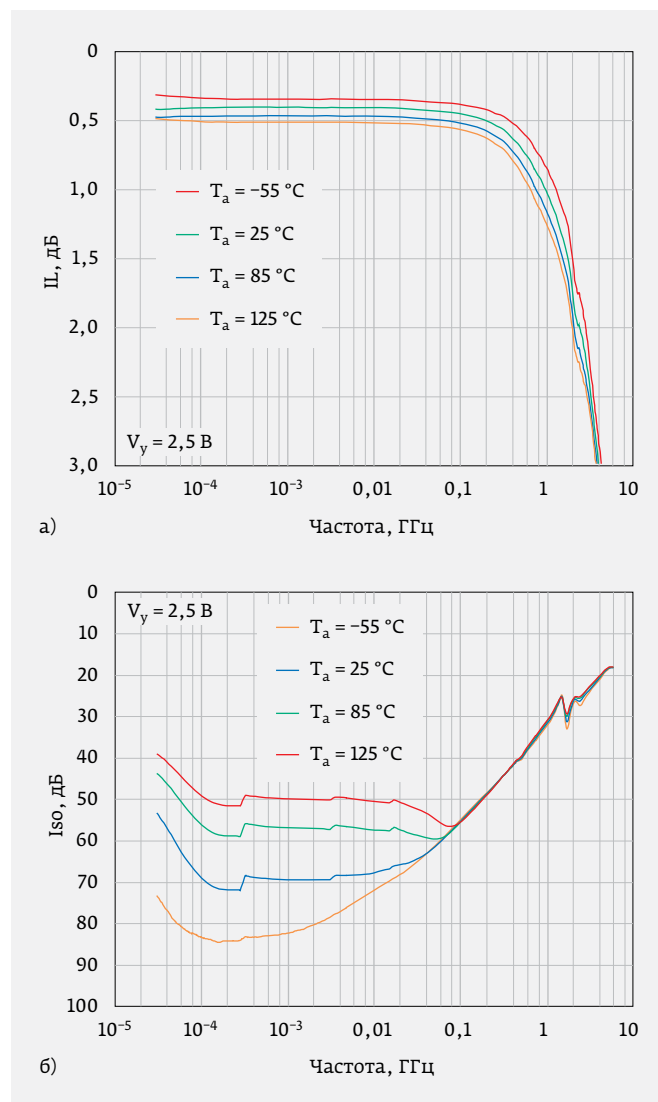


Рис. 33. Зависимости вносимых потерь IL и развязки Iso от частоты при различных значениях температуры окружающей среды T_a (микросхема ADG901-EP, компания Analog Devices). V_g – управляющее напряжение

предназначен для использования в мобильных устройствах (3G, LTE и др.), в высококачественных каналах связи и тестовом оборудовании. Переключатель отличается высокой линейностью ($IP2 = 110\text{ дБм}$, $IP3 = 58\text{ дБм}$) и большой входной мощностью ($P_{\text{идб}} = 33\text{--}36\text{ дБм}$). К достоинствам переключателя относятся также наличие в микросхеме блокировочных конденсаторов, малое потребление мощности в цепях питания ($E_{\text{пит.}} = 5\text{ В}$, $I_{\text{пит.}} = 75\text{ мкА}$) и особенно управления ($V_g = 5\text{ В}$, $I_g = 0,1\text{ мкА}$). При необходимости компания поставляет заказчикам отладочную плату (рис. 34). Как и другим КМОП-изделиям, переключателям QPC6014 свойственна низкая чувствительность к электростатическим воздействиям (2 кВ при испытаниях на основе модели НВМ).

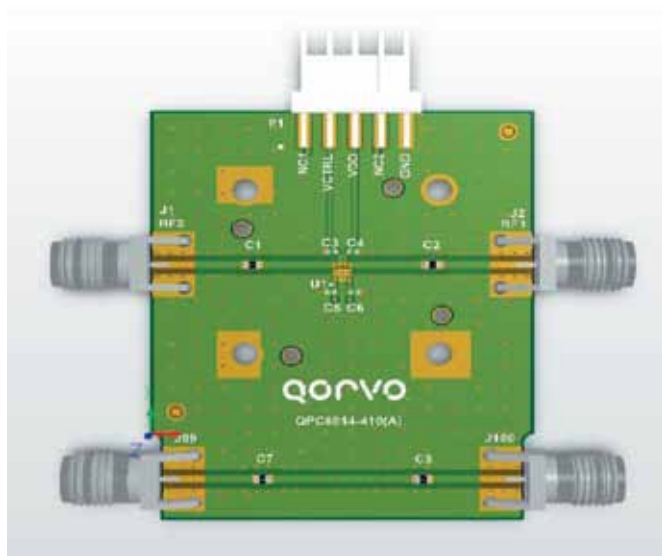


Рис. 34. Отладочная плата для SPST-переключателя QPC6014 (компания Qorvo)

SPST-переключатель на основе кремниевых полевых транзисторов (модель F2910, компания IDT), используемый в базовых станциях (2G, 3G, 4G), в военных связных системах, тестовом и измерительном оборудовании, отличается высокой развязкой (85–51 дБ), низкими вносимыми потерями (0,38–0,50 дБ) в диапазоне частот 0,03–2,00 ГГц. В этом же диапазоне частот переключателю свойственна высокая линейность ($IP2=124$ – 118 дБм, $IP3=65$ – 68 дБм). Отметим также, что максимально допустимая мощность в непрерывном режиме (continuous wave, CW) существенно (рис. 35) зависит от состояния переключателя («Включен», «Выключен») и режима переключения (холодный, горячий).

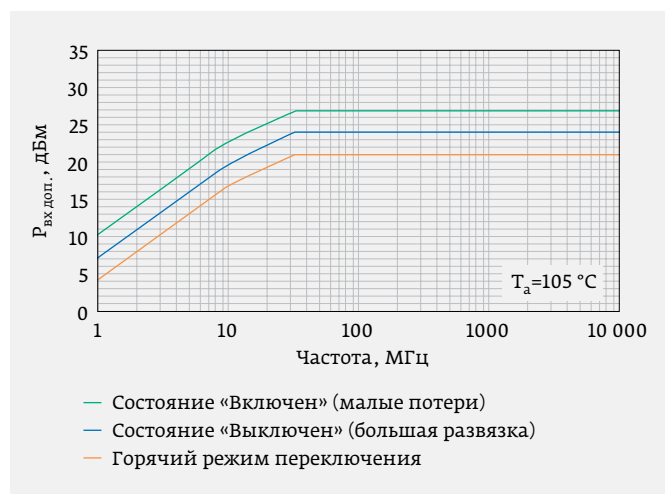


Рис. 35. Зависимость максимально допустимой входной мощности $P_{вх доп.}$ в непрерывном режиме от частоты для SPST-переключателя F2910 (компания IDT)

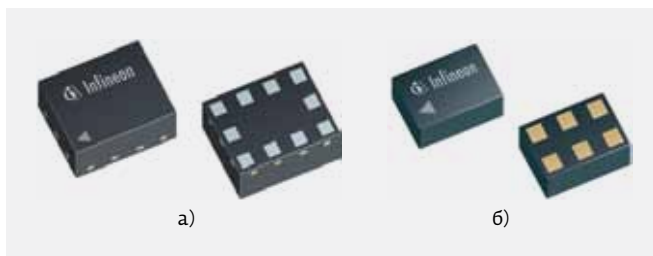


Рис. 36. SPDT-переключатели, производимые компанией Infineon: а – BGS12PN10; б – BGS12PL6

Одна из наиболее известных компаний, специализирующихся на выпуске КМОП-переключателей, – Peregrine Semiconductor. Обладая собственной патентованной технологией UltraCMOS, производитель выпускает две модели поглощающих SPST-переключателей по схеме, представленной на рис. 32а. Изделия рассчитаны на работу в диапазонах 1–3 000 МГц (PE4270) и 1–5 000 МГц (PE4246). Первая модель отличается чрезвычайно высоким уровнем развязки: 90 дБ на частоте 5 МГц и 63 дБ на частоте 1 ГГц.

SPDT-переключатели на основе кремниевых полевых транзисторов представлены на рынке компаниями Skyworks Solutions, Mini-Circuits, CEL, Infineon, Qorvo, IDT, Peregrine Semiconductor, Analog Devices (табл. 8). Области применения SPDT-переключателей включают в себя: мобильные телефоны, беспроводные системы связи (Bluetooth, WiBro, WiMax, LTE и др.), беспроводные системы контроля и управления, автоматические системы освещения, навигационные системы, системы кабельного телевидения, системы радиочастотной идентификации (RFID), различные системы доступа (жилые и офисные помещения, гаражи и др.), оборудование для бурения нефтяных и газовых скважин, тестовое и измерительное оборудование, автомобильный транспорт, медицинское оборудование, всевозможные системы коммерческого, промышленного, военного и космического назначения.

Большинство выпускаемых SPDT КМОП переключателей рассчитано на работу в частотном диапазоне 2–8 ГГц. Габариты и стоимость этих изделий, как правило, невелики. Например, переключатели BGS12PN10 и BGS12PL6 компании Infineon упакованы в корпуса (рис. 36) размером 1,1×1,5 мм и 0,7×1,1 мм соответственно.

В зависимости от требований, предъявляемых к устройствам, они могут быть реализованы различными способами (рис. 37). Наилучший результат обеспечивают поглощающие переключатели, выполненные по схемам, показанным рис. 37д, е. Для поглощающего переключателя RFSW6224 компании Qorvo, реализованного по схеме, представленной на рис. 37д, в техническом описании приводятся зависимости вносимых потерь IL от уровня входной мощности $P_{вх}$ при различных значениях частоты и температуры окружающей среды (рис. 38),

Таблица 8. Характеристики SPDT-переключателей на основе кремниевых полевых транзисторов

Фирма	Модель	Диапазон частот, ГГц	IL, дБ	Iso, дБ	T _п , нс	P _{доп} , дБм
Analog Devices	ADG918/ADG919	0–2,0	0,4–0,8	60–33	6,6	18
CEL	UPD5710TK	0–2,5	0,60–0,95	32,5–22,5	30	27
Skyworks Solutions	SKY13405-490LF	0,1–3,0	0,3–0,4	37–27	2 000	40
IDT	F2970	0,005–3,0	0,25–0,35	84–53	2 700	30
Mini-Circuits	JSW2-33DR-75+	0,005–3,0	0,38–0,53	45–31	1 900	37
Qorvo	RFSW6222	0,05–3,7	0,26–0,29	40–29	<5 000	38
Infineon	BGS12PL6	0,1–4,0	0,36–0,77	50–22	1 400	<36
Infineon	BGS12PN10	0,5–6,0	0,16–0,68	54–17	3 500	<40
IDT	F2977	0,03–6,0	0,33–0,45	48–26	1 500	34
Qorvo	RFSW6224	0,005–6,0	0,55–1,10	80–48	250	33
Qorvo	RFSW1012	0,005–6,0	0,25–0,75	45–21	5 000	37
Mini-Circuits	JSW2-63DR+	0,005–6,0	0,33–0,57	46–21	1 900	37
Peregrine Semiconductor	PE42551	0–6,0	0,65–0,90	29–21	7 000	34
IDT	F2932	0,05–8,0	0,68–1,60	86–37	210	36
IDT	F2923	300 кГц – 8,0 ГГц	0,43–1,12	77–29	600	33
e2v/Peregrine Semiconductor	PE95420	0,001–8,5	0,77–1,38	86,5–27,8	700	27
IDT	F2912	9 кГц – 9,0 ГГц	0,4–1,0	74–27	1 100	33
IDT	F2976	0,005–10,0	0,25–0,80	48–18	1 500	34
Peregrine Semiconductor	PE42521	9 кГц – 13,0 ГГц	0,60–1,85	90–17	500	36 (на частоте 0,6–4,0 ГГц)
Peregrine Semiconductor	PE42524	0,01–40,0	0,6–5,5	84–33	225	28,5–22,0
Peregrine Semiconductor	PE42525	9 кГц – 60,0 ГГц	0,9–2,7	80–36	8	10–29

а также осциллограммы, показывающие процесс выключения/включения переключателей при комнатной температуре (рис. 39). Время выключения при этом измеряется от момента перехода управляющего напряжения через 50% от своего амплитудного значения до снижения амплитуды высокочастотного сигнала к 10% ее максимального значения. Время включения регистрируется от момента достижения управляющим сигналом 50%-ного значения до достижения высокочастотным сигналом 90% уровня установившейся амплитуды. Времена выключения/включения для температур окружающей среды

–40, 25 и 85 °С составляют соответственно 212/280, 218/286 и 234/284 нс.

Повышенную надежность при эксплуатации и высокие электрические характеристики обеспечивают переключатели на основе кремниевых полевых транзисторов, выпускаемые компаниями IDT и Analog Devices. Так, переключатели F2932 и F2933, реализованные по схеме, показанной на рис. 37д, работают в диапазоне температур –40...105 °С, обеспечивают развязку 70–65 дБ в диапазоне частот от 1 до 4 ГГц и высокую линейность (IIP2=III дБм, IIP3=64 дБм) на частоте 2 ГГц. Зависимость входной точки однодецибельной

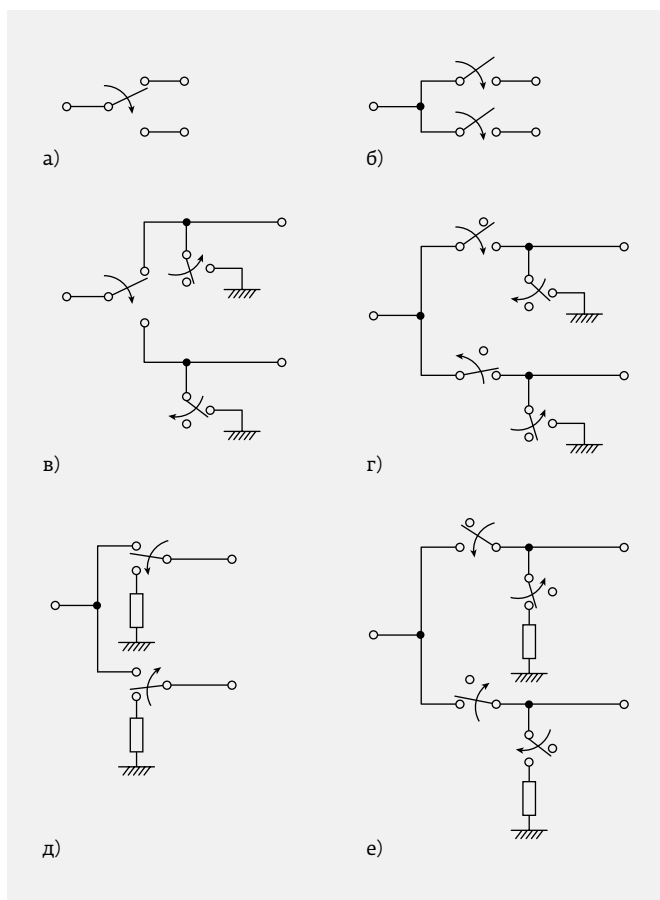


Рис. 37. Упрощенные схемы SPDT-переключателей: а – модели UPD5710TK (CEL), RFSW1012 (Qorvo); б – модели JSW2-33DR-75+ (Mini-Circuits), SKY13405-490LF (Skyworks Solutions); в – модели BGS12PN10 (Infineon), PE42510A (Peregrine Semiconductor); г – модели BGS12PL6 (Infineon), PE4272 (Peregrine Semiconductor), PE4273 (Peregrine Semiconductor), PE4283 (Peregrine Semiconductor), PE42551 (Peregrine Semiconductor), ADG919 (Analog Devices); д – модели RFSW6224 (Qorvo), F2932 (IDT), F2933 (IDT), HMC1118 (Analog Devices), ADRF5020 (Analog Devices), ADRF5021 (Analog Devices); е – модели PE42742 (Peregrine Semiconductor), PE95421 (e2v/Peregrine Semiconductor), PE95420 (e2v/Peregrine Semiconductor), ADG918 (Analog Devices)

Таблица 9. Характеристики SPDT-переключателей с расширенным частотным диапазоном, поставляемых компанией Analog Devices

Модель	Диапазон частот	IL, дБ	Iso, дБ	T _п , нс	P _{1дБ} /P _{0,1дБ} , дБм	P _{пр} , дБм	P _{нг} , дБм	P _{гп} , дБм
HMC1118	9 кГц – 13 ГГц	0,5–1,3	50–25	2 700	37 / 35	37	28	30
ADRF5020	0,1–30 ГГц	1,2–2,0	60–70	10	28 / 26	27	25	21
ADRF5021	9 кГц – 30 ГГц	1,1–2,0	60–70	1 100	28 / 27	27	25	21

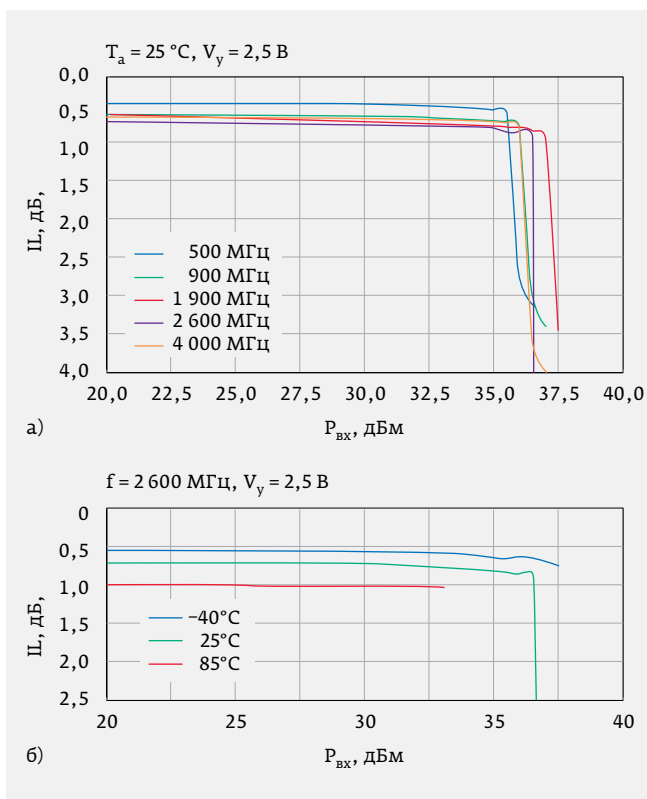


Рис. 38. Зависимости вносимых потерь IL от уровня входной мощности $P_{вх}$ для различных частот (а) и температур окружающей среды (б) в SPDT-переключателе RFSW6224 (компания Qorvo)

компрессии $P_{1дБ}$ от входного уровня мощности при нескольких значениях температуры окружающей среды для переключателя F2932 иллюстрирует рис. 40.

Столь же высокие характеристики реализованы и в других кремниевых SPDT-переключателях этих компаний, причем компания Analog Devices наряду с устройствами, выпускаемыми для беспроводной связи, производит ряд SPDT-изделий по схеме, представленной на рис. 37д, с расширенным частотным диапазоном (табл. 9). Особенность этих кремниевых SPDT-переключателей – снижение пропускаемой через них мощности $P_{пр}$ и мощности в режиме горячего переключения $P_{гп}$ относительно их номинальных

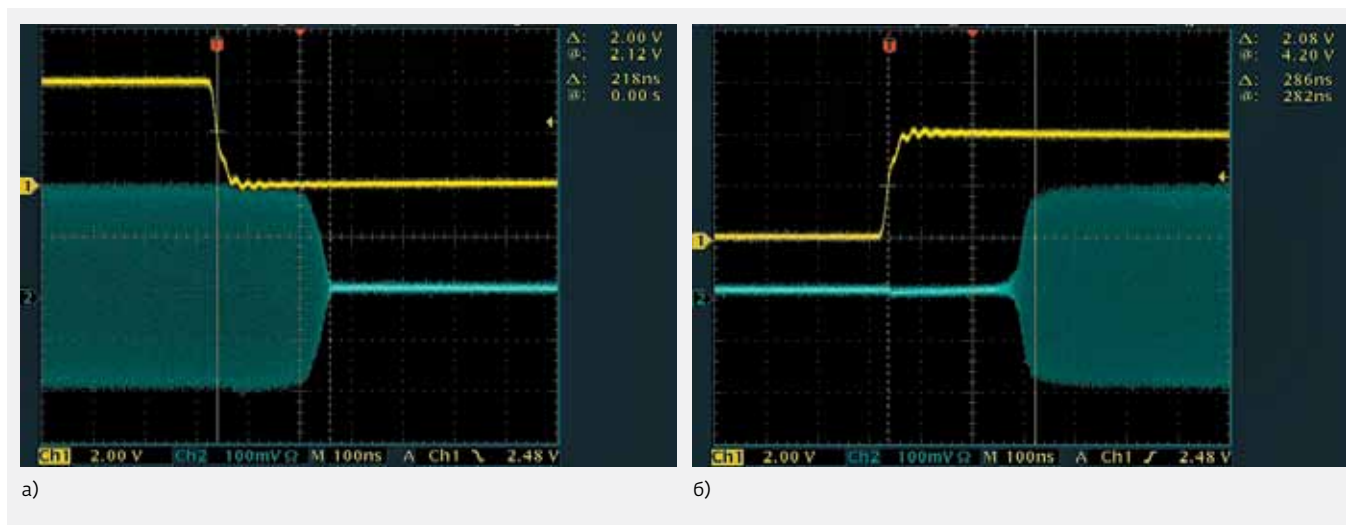


Рис. 39. Осциллограммы управляющего напряжения и радиочастотного сигнала при выключении (а) и включении (б) переключателя (микросхема RFSW6224, компания Qorvo)

значений в низкочастотной части рабочего диапазона (рис. 41). Сравнение приведенных зависимостей позволяет сделать вывод о существенном улучшении этих характеристик в последней из приведенных на рис. 41 трех моделей – ADRF5021. Наряду с мощностью $P_{1дБ}$ в этих переключателях нормируются мощность $P_{пр}$, проходящая со входа на выход, мощность $P_{нг}$, рассеиваемая на внутренней нагрузке в отключенном канале, и мощность горячего переключения $P_{гп}$. Для каждой из этих трех мощностей в технических описаниях приводятся сведения об их рабочих ($P_{1дБ}/P_{0,1дБ}$) и предельно допустимых ($P_{пр}$, $P_{нг}$, $P_{гп}$) значениях (см. табл. 9). Все три переключателя характеризуются низкими токами питания и управления. Время переключения этих изделий существенно различается.

Большинство SPDT-переключателей компании Peregrine Semiconductor реализуется по схемам, представленным на рис. 37д, е. Все они изготовлены в соответствии с процессом UltraCMOS по КНС-технологии на сапфировой подложке. Объединение усилий с компаниями IBM и e2v, использование их технологий в сочетании с UltraCMOS-процессом позволили реализовать ряд переключателей (PE9354, PE95420, PE95421), пригодных для использования в военных и космических приложениях. Одна из этих микросхем (PE9354) предназначена для работы при температурах окружающей среды $-55...125\text{ }^{\circ}\text{C}$ в условиях повышенной радиации и выдерживает дозу до 100 крад. Все изделия выполнены в керамических корпусах (рис. 42).

В 2015–2016 годах компания Peregrine Semiconductorполнила линейку своей продукции тремя SPDT-переключателями отражательного типа, изготовленными по КНС-технологии в соответствии с UltraCMOS-процессом. Первый из них (PE42524) работает в диапазоне

частот 10 МГц – 40 ГГц, обеспечивая переключение сигналов за 225 нс, а два других (PE42525 и PE426525) рассчитаны на диапазон частот 9 кГц – 60 ГГц. Оба устройства отличаются исключительно высокими характеристиками, включая время переключения 8 нс. При этом время нарастания и спада не превосходят 3 нс. На частоте 50 ГГц оба переключателя имеют развязку в 37 дБ и вносимые потери 1,9 дБ. Переключатели управляются током в 390 нА и характеризуются высокой линейностью, отличной защитой от статического электричества (1 кВ при испытаниях на основе модели НВМ). Первый (PE42525) идеален для тестовых измерений и систем 5G. Второй (PE426525) рассчитан на расширенный температурный диапазон $-55...125\text{ }^{\circ}\text{C}$, что позволяет использовать его

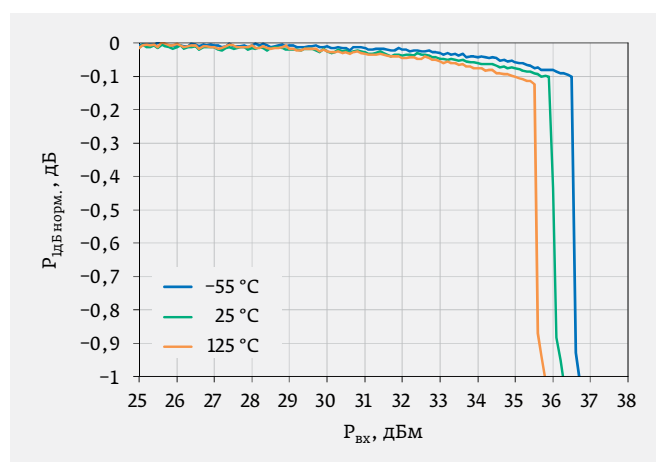


Рис. 40. Зависимость нормированной мощности $P_{1дБ}$ от входной мощности $P_{вх}$ для трех значений температуры окружающей среды (микросхема F2932 компании IDT)

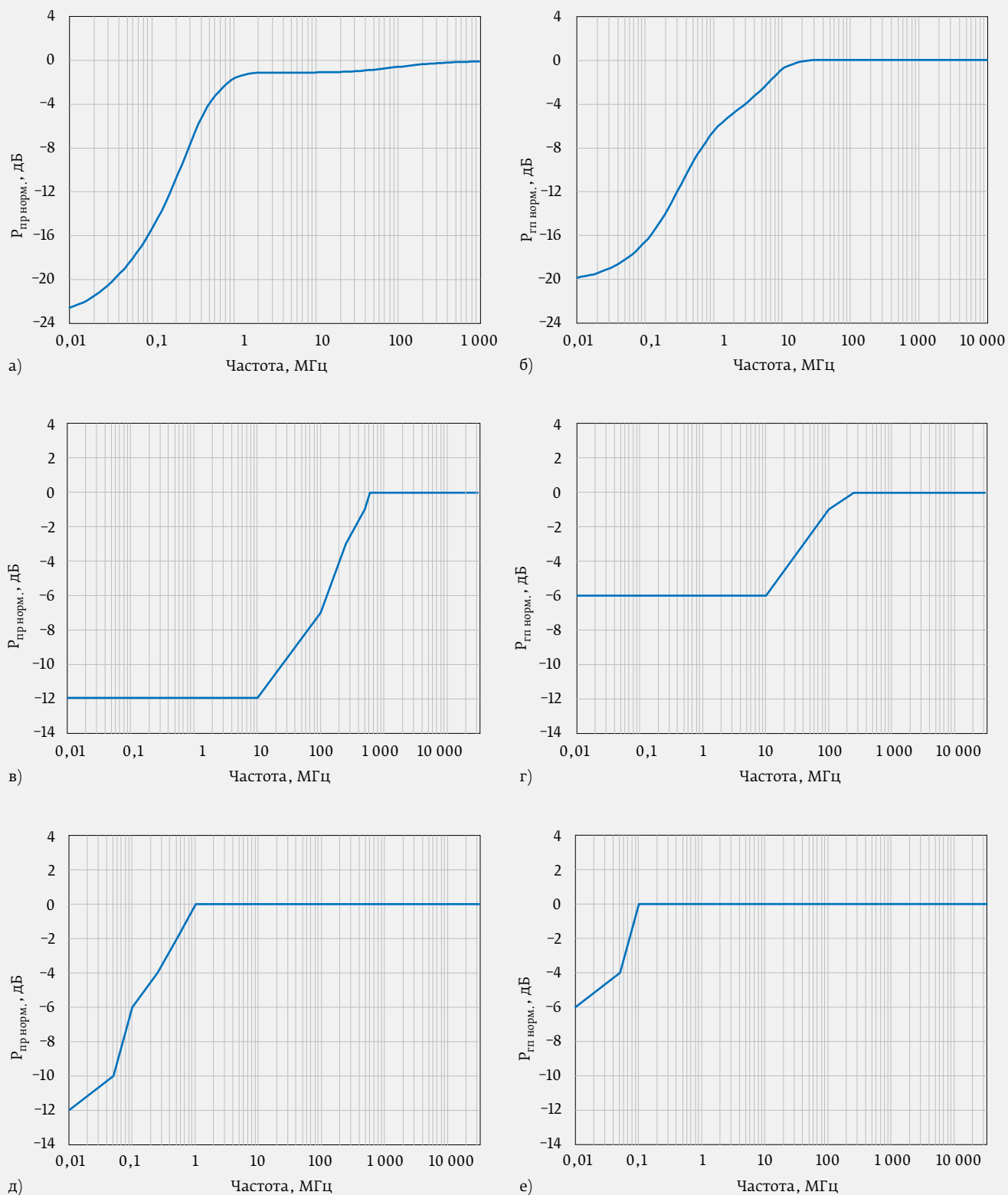


Рис. 41. Уменьшение мощностей $P_{пр}$ (а, в, д) и $P_{гп}$ (б, г, е) на низких частотах относительно их номинальных значений в переключателях НМС1118 (а, б), ADRF5020 (в, г), ADRF5021 (д, е)

Таблица 11. Интегральные DPDT-переключатели на основе кремниевых полевых транзисторов

Фирма	Модель	Диапазон частот, ГГц	IL, дБ	Iso, дБ	T _п , нс	P _{доп.} , дБм
Skyworks Solutions	SKY13396-397LF	0,7–3,0	0,4–0,6	25–17	3 000	39
Infineon	BGS22WL10	0,1–3,0	0,34–0,48	38–28	600	<32
Skyworks Solutions	SKYA21037	0,4–3,8	0,45–0,55	28,0–29,5	–	38,5
Skyworks Solutions	SKY13598-683LF	0,4–3,8	0,7	38	–	–

и измерительного оборудования, автомобильной промышленности и многих других вариантов применения.

Многопозиционные переключатели могут быть как отражательными (без нагрузочных резисторов), так и поглощающими (рис. 44). Сигнал может передаваться со входа RFC на порты RF1, RF2, RF3, RF4, а также с портов RF1, RF2, RF3, RF4 на порт RFC. В первом случае переключатель работает в режиме мультиплексора, во втором – демultipлексора.

По мере увеличения числа коммутируемых портов объем сопроводительной документации, как правило, существенно возрастает и наряду с традиционно приводимыми зависимостями в технических описаниях появляется много графиков, свойственных только многопозиционным переключателям. В качестве примера можно привести зависимости развязки между различными портами переключателя от частоты при условии, что сигнал проходит от порта RFC к порту RF1 (рис. 45).

При использовании многопозиционного переключателя в режиме демultipлексора максимальная непрерывная мощность, пропускаемая через него, снижается по мере уменьшения частоты (рис. 46). Особо следует отметить,

что максимально допустимая мощность, рассеиваемая на внутренних нагрузках отключенных каналов, меньше максимально допустимой мощности в рабочем канале.

Высоконадежный SP5T-переключатель (модель F2915 компании IDT) поглощающего типа разработан для мобильной связи, базовых станций, военных применений, для использования в тестовом измерительном оборудовании

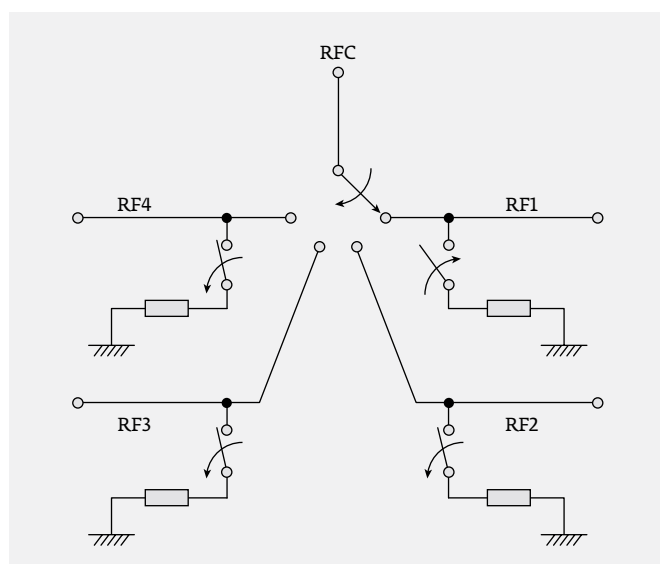


Рис. 44. Упрощенная схема 4-позиционного поглощающего переключателя

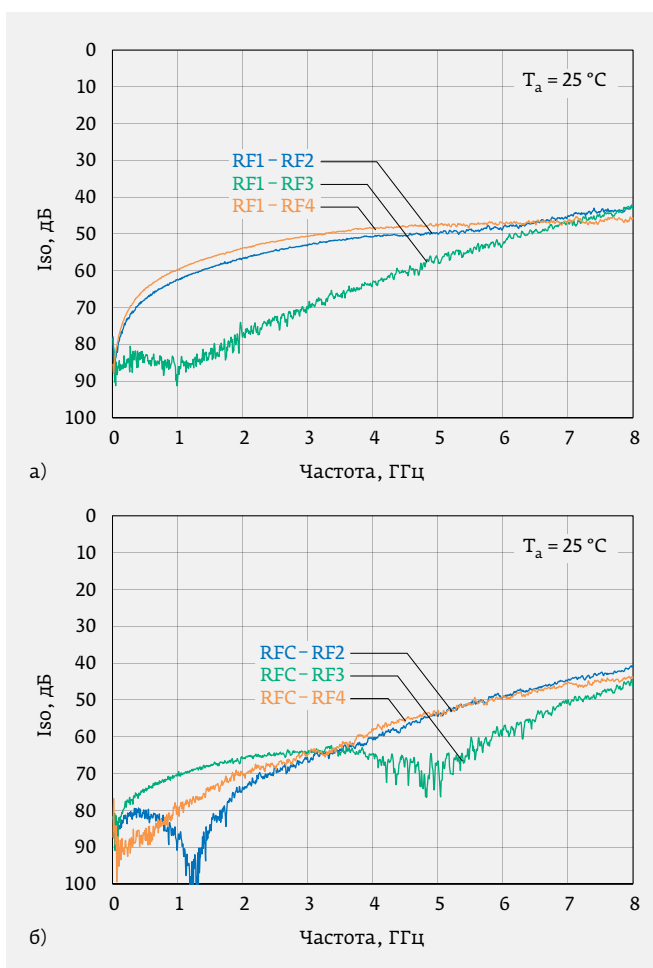
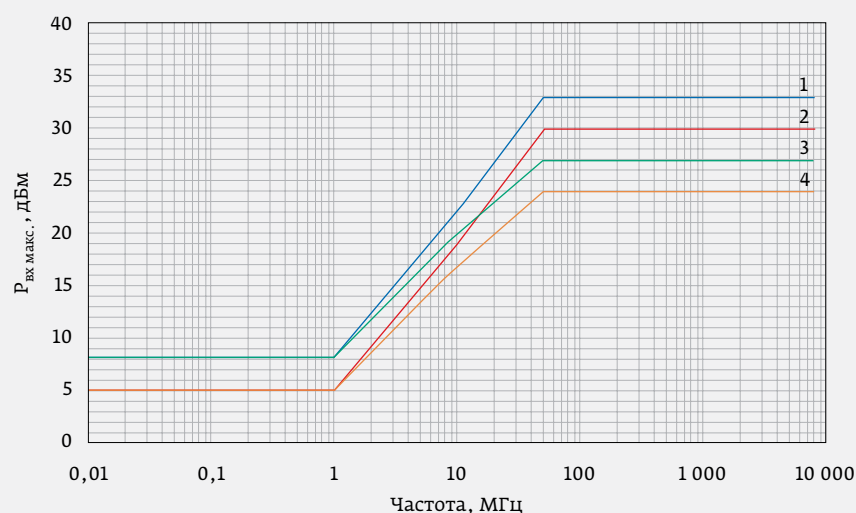


Рис. 45. Межпортовые развязки Iso в 4-позиционном переключателе QPC6044 при прохождении сигнала от RFC до RF1: а – развязка между RF1 и RF2, RF1 и RF3, RF1 и RF4; б – развязка между RFC и RF2, RF3, RF4

Таблица 12. Сведения о характеристиках КМОП-переключателей, опубликованные в научных журналах

Технология	Архитектура	Тип	Диапазон частот, ГГц	IL, дБ	Iso, дБ	P _{доп.} , дБм	Площадь чипа, мм ²	Источник
65 нм	Параллельная с индуктивными связями	SPST	54-84	1,7	>35	10,5 (P _{1дБ})	0,012	[13]
45 нм КНИ	Последовательно-параллельная	SPDT	45-60	1,7-2,5	>25,0	7,1	0,040	[14]
90 нм	«Бегущая волна»	SPDT	0-60	<3,0	>48,0	17 (на частоте 20 ГГц)	0,070	[15]
90 нм	Четверть-волновая линия передачи	SPDT	50-70	<2,0	>25,0	13,5	0,270	[16]
130 нм	Последовательно-параллельная	SPDT	50-70	2,0 (на частоте 60 ГГц)	>32,0	13	0,120	[17]
90 нм	«Бегущая волна»	SPDT	50-94	<3,3	>27,0	15,0	0,150	[18]
90 нм	Интегрированная линия передачи	SPDT	60-110	3,0-4,0	>25,0	10,5	0,300	[19]
130 нм	Параллельная	SP4T	50-70	2,3 (на частоте 60 ГГц)	>22,0	13	0,270	[17]
130 нм КНИ	Последовательно-параллельная с согласующими цепями	SP4T	0-70	<3,5	>25,0	>9,0	0,060	[20]



и для линеаризации мощных усилителей. Устройство покрывает диапазон частот от 50 до 8000 МГц, обеспечивает высокую линейность

Рис. 46. Зависимости максимально допустимой непрерывной мощности $P_{вх макс.}$, поступающей в режиме демультиплексирования на входы RF1, RF2, RF3, RF4 микросхемы F2914 (компания IDT), от частоты: 1, 2 – при прохождении сигнала от портов RF1, RF2, RF3, RF4 до RFC при температуре окружающей среды 85 °C (1), 105 °C (2) соответственно; 3, 4 – при подключении входного сигнала к внутренним нагрузкам при температуре 85 °C (3) и 105 °C (4) соответственно

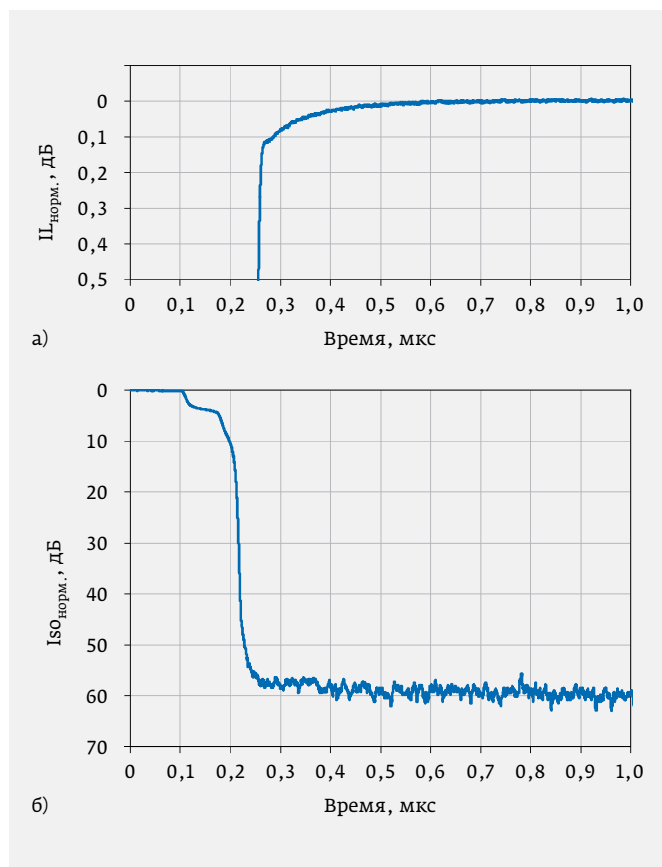


Рис. 47. Характер изменения во времени нормированных вносимых потерь $IL_{\text{норм.}}$ при переключении из положения «разомкнуто» в положение «замкнуто» (а) и нормированной развязки $Iso_{\text{норм.}}$ при переключении из положения «замкнуто» в положение «разомкнуто» (б) (микросхема F2915, компания IDT)

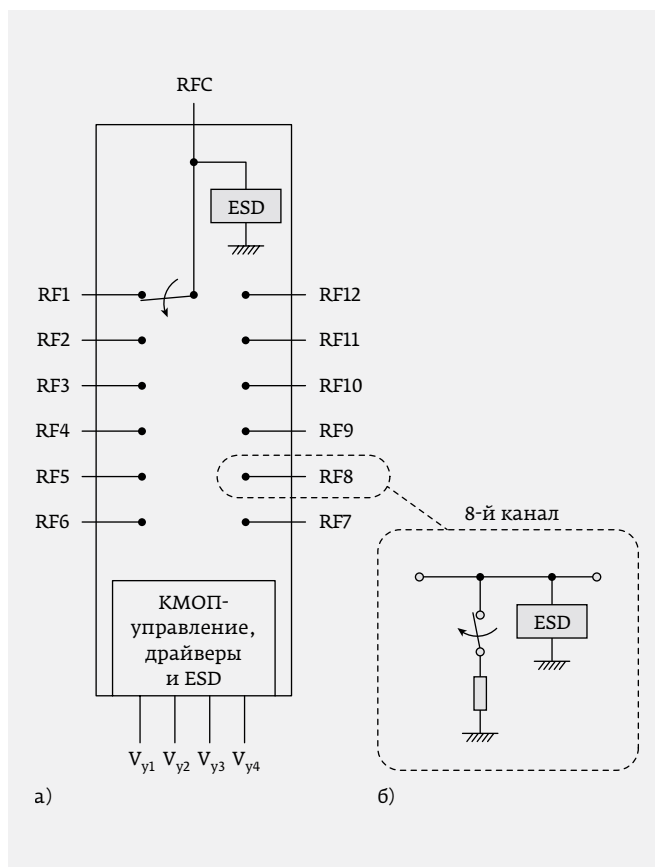


Рис. 48. Упрощенная функциональная схема 12-позиционного переключателя PE426412 (а) и упрощенная принципиальная схема одного из каналов (б) (компания Peregrine Semiconductor). ESD – блок защиты от статического электричества

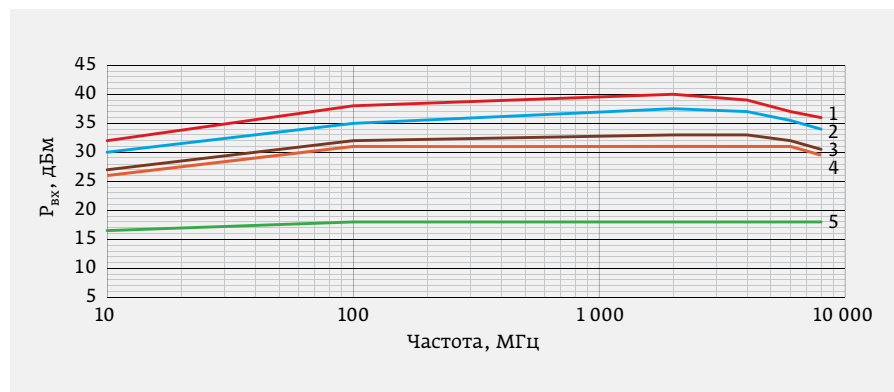


Рис. 49. Зависимость входных паспортных значений мощностей от частоты в 12-позиционном переключателе PE426412 (компания Peregrine Semiconductor): 1 – P_{ldb} ; 2 – $P_{0,\text{ldb}}$; 3 – максимально допустимая импульсная входная мощность; 4 – максимально допустимая непрерывная входная мощность; 5 – максимально допустимая мощность на внутренних нагрузках в отключенных каналах

($IP2=114$ дБм на частоте 2000 МГц и $IP3=60,5$ дБм на частоте 4000 МГц), малые вносимые потери и высокую развязку (см. табл. 10). Он идеально подходит для переключения двух и более усилителей. В техническом описании на эту микросхему приведены представляющие интерес зависимости от времени нормированных вносимых потерь при переключении из положения «разомкнуто» в положение «замкнуто» (рис. 47а) и нормированной развязки при переключении из положения «замкнуто» в положение «разомкнуто» (рис. 47б).

Все сказанное относительно SPDT-моделей с расширенным диапазоном частот характерно и для 4-позиционного кремниевого переключателя ADRF5040, рассчитанного на

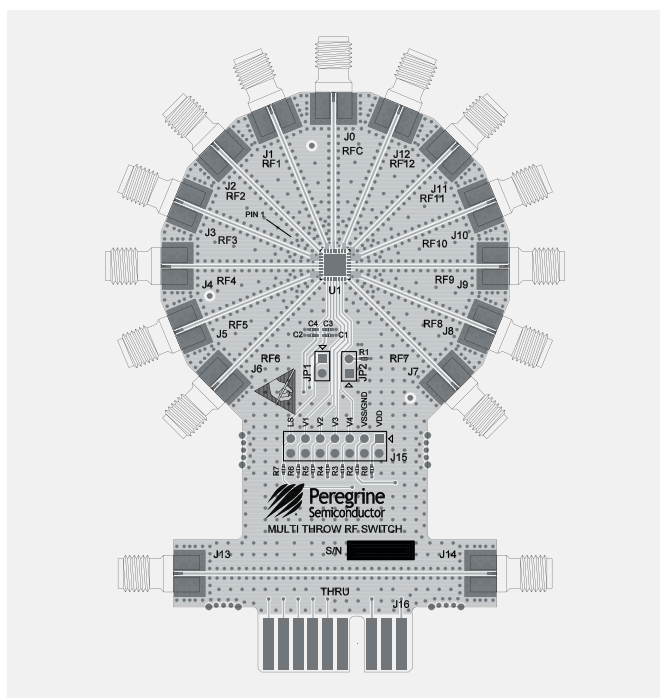


Рис. 50. Отладочная плата для 12-позиционного переключателя PE426412 (компания Peregrine Semiconductor)

диапазон частот 9 кГц – 12 ГГц. Все нормированные мощности $P_{пр}$ и $P_{гн}$ весьма значительно снижаются в низкочастотной области рабочего диапазона частот, что, безусловно, необходимо принимать во внимание при использовании подобных устройств.

Для жестких условий эксплуатации в диапазоне температур окружающей среды от -55 до 125 °C компания Peregrine Semiconductor предлагает 12-позиционный поглощающий переключатель (рис. 48). На всех входах переключателя предусмотрена ESD-защита от статических напряжений до 1 кВ. В технических условиях на этот переключатель приводятся сведения об изменении входных мощностных характеристик в зависимости от рабочей частоты (рис. 49). Режим горячего переключения в этом изделии возможен при

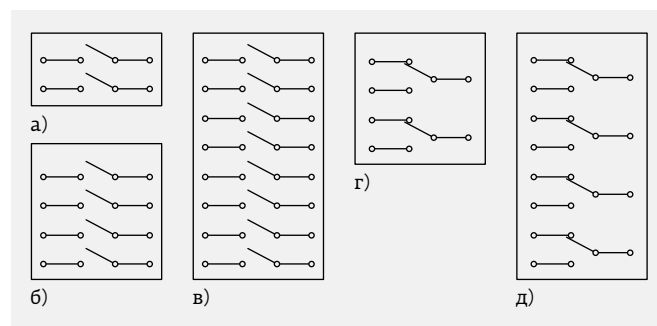


Рис. 51. Примеры размещения нескольких одностипных СВЧ-переключателей в одном корпусе микросхемы: а – SPST×2; б – SPST×4; в – SPST×8; г – SPDT×2; д – SPDT×4

входных мощностях менее 18 дБм на частотах, превышающих 100 МГц. В качестве технической поддержки, облегчающей освоение этого переключателя, компания Peregrine Semiconductor предлагает отладочную плату (рис. 50).

DPDT КМОП переключатели представлены компаниями Skyworks Solutions, Infineon, CEL, Filtronic и Qorvo (табл. 11). Диапазон рабочих частот этих устройств, предназначенных для мобильных приложений, не превышает 3–6 ГГц.

Ряд производителей (Analog Devices, Qorvo) выпускает в одном корпусе несколько SPST- и SPDT-переключателей (рис. 51). Особенно много подобных моделей представлено компанией Analog Devices (analog.com/switch-mux).

Подводя итоги, можно констатировать, что наибольших успехов в промышленном выпуске СВЧ КМОП переключателей достигла компания Peregrine Semiconductor, объединившая свои технологические возможности с наработками двух других компаний: IBM и e2v.

Вместе с тем из периодической печати известно также об успехах в части разработки переключателей с рабочими частотами в десятки гигагерц (табл. 12) [13–20]. При создании подобных устройств используются различные архитектуры [16]: последовательно-параллельная

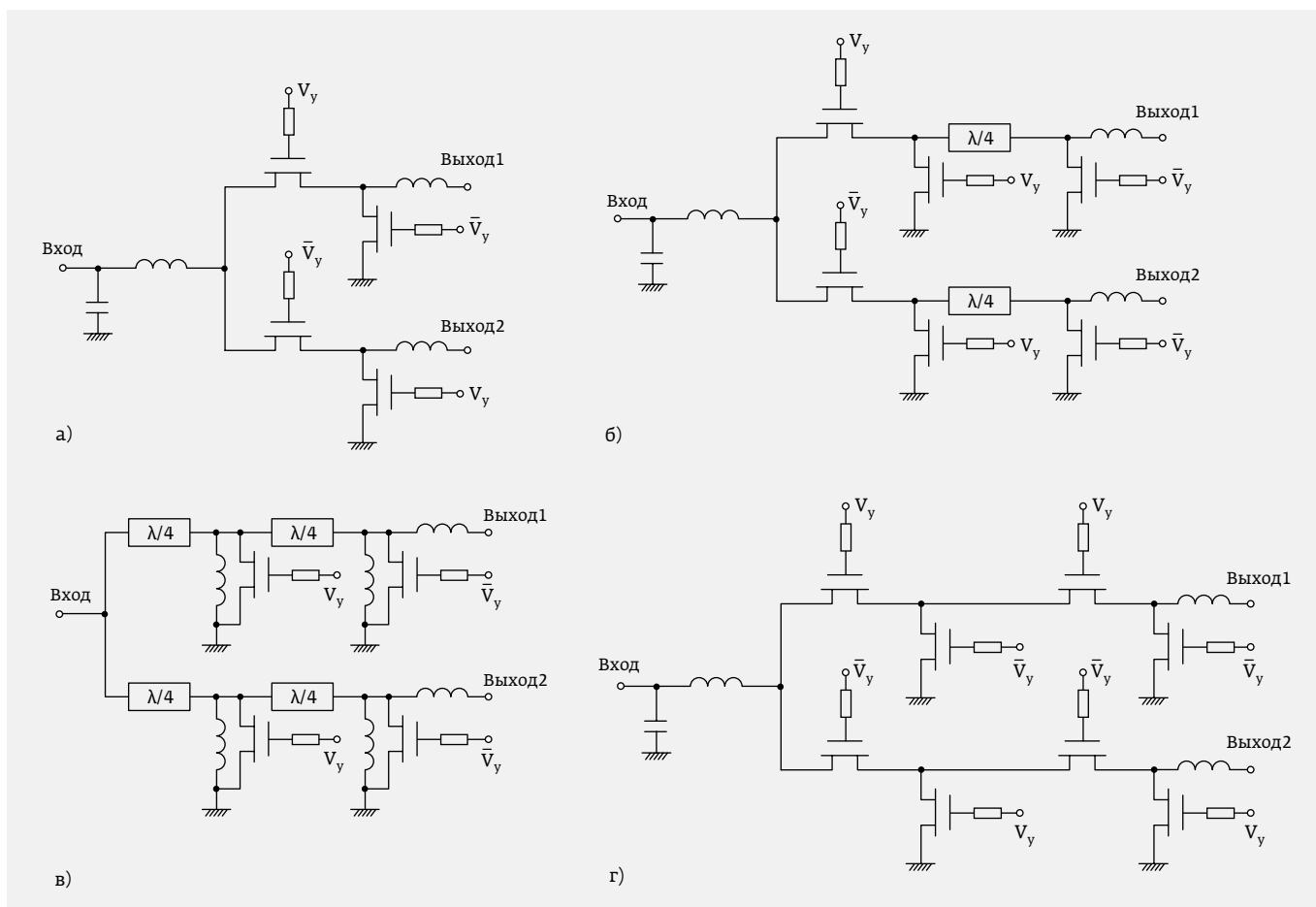


Рис. 52. Архитектуры SPDT КМОП переключателей: а – последовательно-параллельная; б – последовательно-параллельно-параллельная; в – параллельно-параллельная; г – каскадная последовательно-параллельная. $\lambda/4$ – четверть-волновые отрезки СВЧ линий передачи

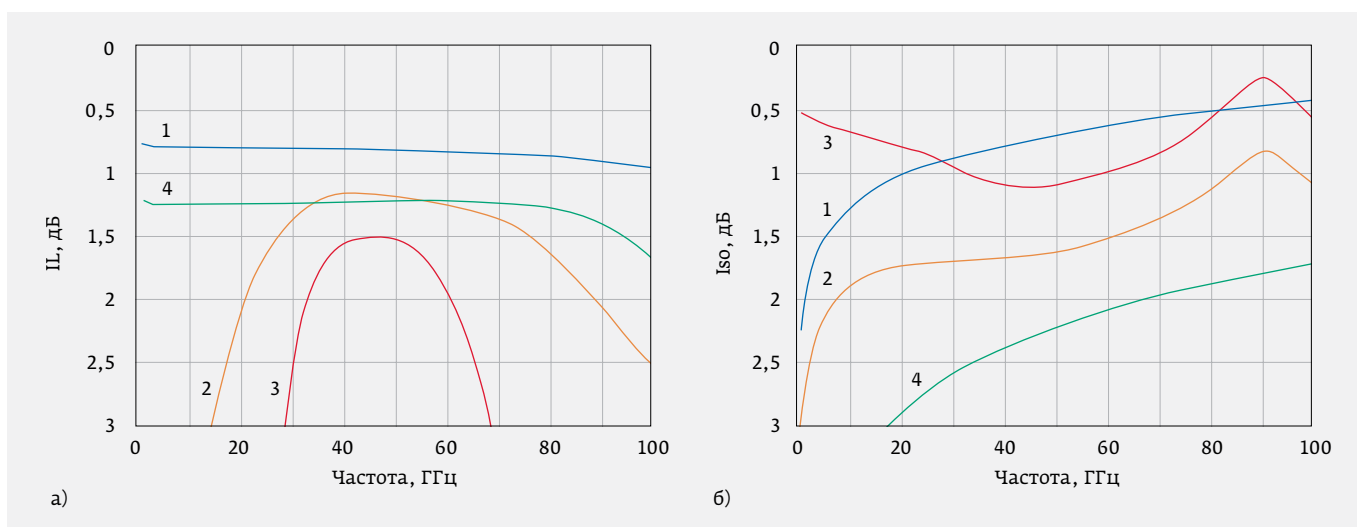


Рис. 53. Расчетные зависимости вносимых потерь IL и развязки Iso для различных архитектур: 1 – последовательно-параллельная (см. рис. 52 а); 2 – последовательно-параллельно-параллельная (см. рис. 52б); 3 – параллельно-параллельная (см. рис. 52в); 4 – каскадная последовательно-параллельная (см. рис. 52г)

(рис. 52а), последовательно-параллельно-параллельная (рис. 52б), параллельно-параллельная (рис. 52в), каскадная последовательно-параллельная (рис. 52г). Результаты моделирования этих структур (рис. 53) [16] позволяют определиться с выбором той или иной архитектуры в зависимости от предъявляемых к разработке требований. Наряду с этими техническими решениями разработчики применяют и другие подходы, обеспечивающие создание переключателей с уникальным набором характеристик.

Так, использование концепции «Бегущая волна» (рис. 54а) позволило реализовать устройства в диапазоне рабочих частот 0–60 ГГц [14], а включение в состав переключателя интегрированных линий передачи (рис. 54б) обеспечило возможность разработки изделий для диапазона частот 60–110 ГГц [19].

С учетом сказанного можно ожидать, что уже в ближайшей перспективе зарубежной промышленностью будут освоены дешевые, исключительно компактные СВЧ-переключатели, а на их основе фазовращатели, аттенюаторы, входные цепи приемников, приемо-передающие модули и трансиверы с рабочими частотами до 100 ГГц и более. Реализованные в интегральном исполнении, эти изделия в скором времени вытеснят с рынка многие модульные аналоги.

ЛИТЕРАТУРА

10. **Kuzmicz W.** The Future of CMOS: More Moore or the Next Big Thing? – Proc. 24th Intl Conf. «Mixed Design of Integrated Circuits and Systems». 2017. PP. 21–26.
11. **Tombak A., Carroll M.S., Kerr D.C., et al.** Design of High-Order Switches for Multimode Applications on a Silicon-on-Insulator Technology // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2013. V. 61. № 10. PP. 3639–3649.
12. **Jaffe M., Abon-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.
13. **Chao S.-F., Wang H., Su C.-Y., et al.** A 50 – to 94-GHz CMOS SPDT Switch Using Travelling-Wave Concept // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2007. V. 17. № 2. PP. 130–132.
14. **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. № 2. PP. 82–84.
15. **Uzunkol M., Rebeiz G.M.** A Low-Loss 50–70 GHz SPDT Switch in 90 nm CMOS // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2010. V. 45. № 10. PP. 2003–2007.
16. **Parlak M., Buckwalter J.F.** A Passive I/Q Millimeter-Wave Mixer and Switch in 45-nm CMOS SOI // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2013. V. 61. № 3. PP. 1131–1139.
17. **Cetinonery 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.
18. **Atesal Y.A., Cetinoneri B., Rebeiz G.M.** Low-Loss 0.13 μ m CMOS 50–70 GHz SPDT and SP4T Switches // IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. 2009. PP. 43–46.
19. **Lai R.-B., Kuo J.-J., Wang H.** A 60–110 GHz Transmission-Line Integrated SPDT Switch in 90 nm CMOS Technology // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2010. V. 20. № 2. PP. 85–87.
20. **Shu R., Li J., Tang A., et al.** Coupling-Inductor-Based Hybrid mm-Wave CMOS SPST Switch // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2017. V. 64. № 4. PP. 367–371.

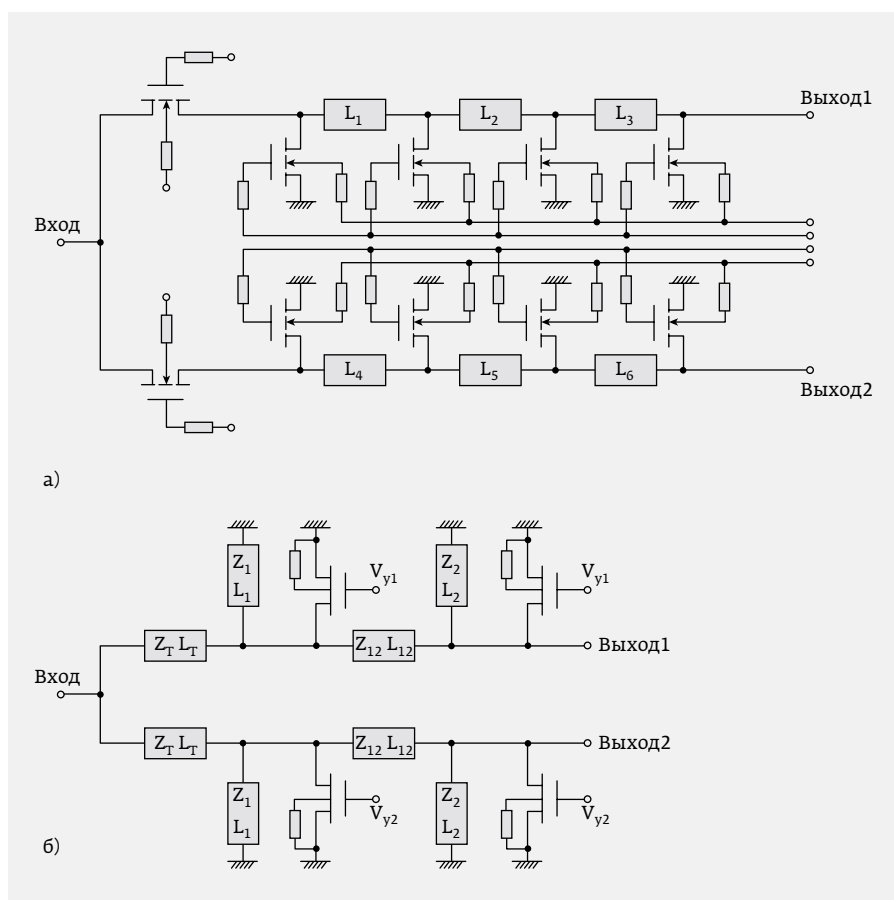


Рис. 54. Принципиальные схемы переключателей с различной архитектурой: а – «Бегущая волна», б – «Интегрированные линии передачи». L_x – линии передачи, Z_x – комплексные сопротивления