

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ КЛЮЧИ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ НА ИЗОЛЯТОРЕ ОТ ANALOG DEVICES INC

Развитие многодиапазонных систем беспроводной связи, широкополосного доступа и передачи данных, а также спутниковых терминалов связи (VSAT) повлекло за собой потребность в более широкополосных компонентах СВЧ-тракта — усилителях (мощности и МШУ), детекторах, смесителях, ключах.

Не будет большим преувеличением утверждение, что высокочастотные переключатели являются одним из самых распространенных компонентов радиочастотной приемопередающей аппаратуры различного назначения.

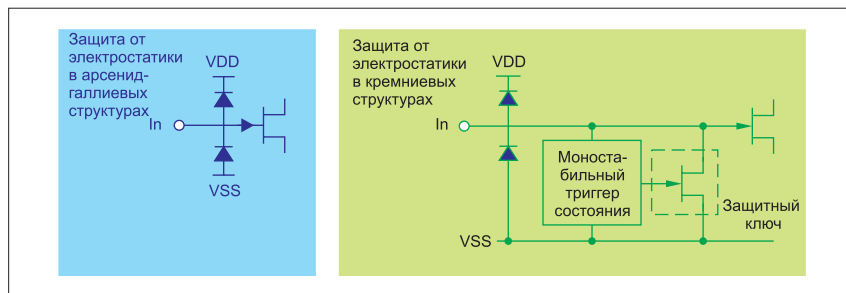
ВВЕДЕНИЕ

Высокочастотные переключатели принадлежат к числу самых распространенных компонентов радиочастотной приемопередающей аппаратуры различного назначения. Помимо широкополосных систем связи и передачи данных радиочастотные ключи широко применяются в контрольно-измерительных приборах, таких как векторные генераторы сложных сигналов, анализаторы спектра, векторные анализаторы цепей и измерительные приемники.

До настоящего времени наиболее популярной технологией производства интегральных высокочастотных переключателей с частотным диапазоном в несколько десятков гигагерц было изготовление кристаллов на основе арсенида галлия (GaAs). Как правило, данным компонентам присущи хорошая линейность, высокая верхняя частота рабочего диапазона, высокий уровень мощности коммутируемого сигнала.

Тем не менее сегодня производители СВЧ-компонентов выводят на рынок все больше интегральных высокочастотных компонентов, реализованных на основе иных технологий. Наиболее перспективными в плане динамических характеристик и эксплуатационных параметров, на мой взгляд, представляются технологии «кремний на изоляторе» (в отечественной технической литературе встречаются сокращения наименования технологии как на русском языке — КНИ, так и на английском — SOI, silicon on insulator) и, как частный случай, «кремний на сапфире».

Остановимся подробнее на особенностях и преимуществах кристаллов, выполненных на основе технологии крем-



▲ Рис. 1. Защитные схемы во входных цепях арсенид-галлиевых и кремниевых микросхем

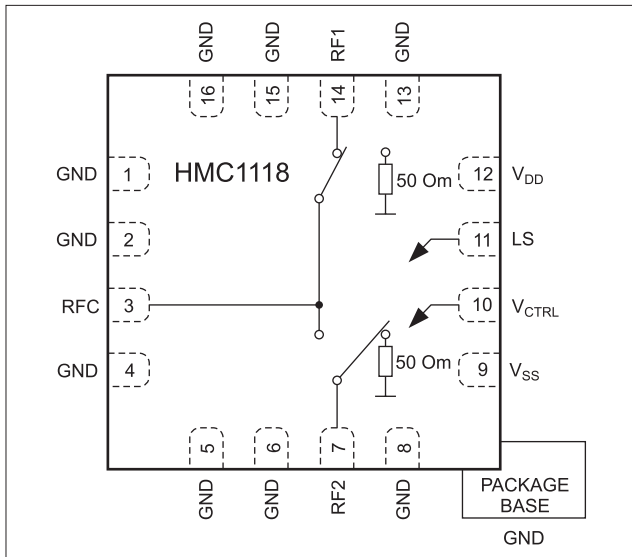
ний на изоляторе. В настоящее время структуры на основе кремния на изоляторе позволяют создавать высокочастотные переключатели с полосой рабочих частот более 40 ГГц, причем нижняя граница рабочих частот может достигать единиц килогерц. Это связано с тем, что в полевых транзисторах, на которых выполнен ключ, затвор полностью изолирован, и в данном техпроцессе возможна реализация высокоомных сопротивлений. В компонентах на основе арсенида галлия вследствие тока утечки затвора коммутация сигналов на низких частотах невозможна.

К безусловным достоинствам ключей на основе кремния на изоляторе относятся высокая устойчивость к воздействию электростатического разряда, в отличие от компонентов на основе арсенида галлия. В технологическом процессе на основе арсенида галлия для реализации схемы защиты от электростатики можно использовать небольшое число элементов (как правило, это схема на основе защитных диодов), в то время как в структурах кремния можно разработать гораздо более эффективную схему на основе триггера однократного срабатывания и защелки. На рис. 1 приведены

примеры схемы защиты от электростатики во входных цепях переключателей на основе арсенида галлия и кремния.

Характерное отличие КНИ высокочастотных переключателей — совместимость по физическим уровням рабочего напряжения с низковольтными КМОП/ТТЛ-структурами, что значительно упрощает построение схемы управления. Более того, наличие встроенного инвертирующего преобразователя напряжения в некоторых микросхемах позволяет обойтись питанием положительной полярности.

К преимуществу интегральных высокочастотных переключателей на основе кремния на изоляторе следует отнести сопоставимое с переключателями на основе арсенида галлия время установки выходного сигнала, что в совокупности с малым временем переключения управляющей схемы обеспечивает малое время коммутации. Особенно это важно в системах радиолокации и системах связи с временным разделением приема и передачи. В переключателях на основе арсенида галлия в транзисторах присутствует так называемый «эффект запаздывания затвора» (gate-lag effect), который проявляется в том, что при переключе-



▲ Рис. 2. Структурная схема SPDT-ключа HMC1118

нии затвора заряд в канале транзистора затухает значительно дольше, чем переключается затвор. Полное время переключения зависит от особенностей техпроцесса, напряжения смещения и уровней управляющего напряжения, и при разработке схемы приходится закладывать десятикратный запас времени для расчета периода коммутации ключа. В ключах на основе кремния время переключения детерминировано и зависимость от особенностей техпроцесса и напряжения смещения рассчитывается и моделируется с высокой точностью.

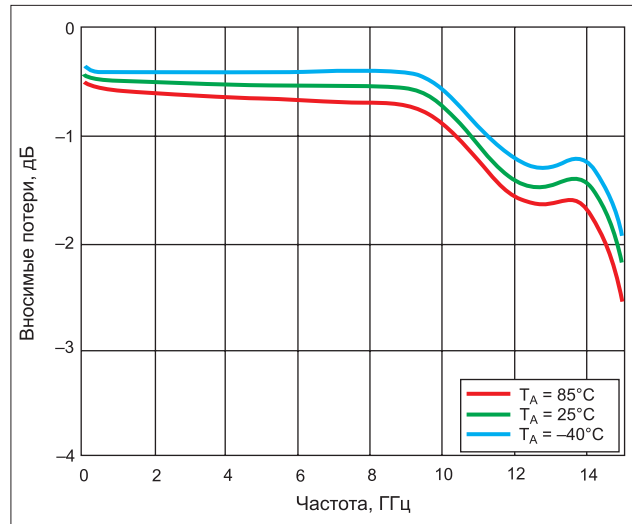
Продолжая сравнение ключей, выполненных на основе различных технологий, отметим возможность интеграции дополнительных функциональных блоков, сделанных на основе других технологий, например арсенида галлия, что дает возможность создавать специализированные интегрированные решения, сочетающие требования по структуре, линейности, пропускаемой мощности и быстродействию. Далее в статье мы рассмотрим подобные решения.

За последние годы компания Analog Devices Inc. выпустила довольно большое количество радиочастотных ключей в интегральном исполнении по технологии «кремний на изоляторе», дополнив линейку СВЧ-переключателей, изготовленных на основе арсенида галлия.

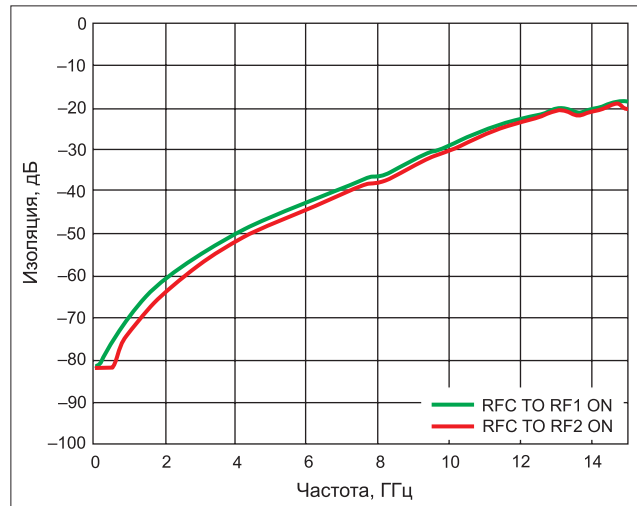
В настоящее время для работы в UHV-, L-, S-, C-, X-диапазонах серийно производятся переключатели HMC1118, HMC8038, ADRF5040, ADRF5250 и HMC7992. Опишем их подробнее.

Поглощающий (без отражения) переключатель HMC1118 имеет SPDT-структуру, предназначен для работы с сигналами на частотах 9 кГц ... 13 ГГц и отличается высоким коэффициентом изоляции 56 дБ (на частоте 8 ГГц). Малые вносимые потери (0,2 дБ в полосе до 9 ГГц) и хорошая линейность (62 дБм, 3 ГГц) делают HMC1118 оптимальным выбором для схемы коммутации сигнала с антенны на входе радиоприемного устройства (рис. 2–4). Особенностью данного ключа является возможность работы с однополярным напряжением питания (вывод питания отрицательной полярности подключается к GND), при этом режиме работы не изменяется частотный диапазон и незначительно ухудшаются значения коммутируемой мощности и линейности.

Аналогичный по структуре (один вход, выход на два направления) ключ HMC8038 имеет встроенные резисторы номиналом 50 Ом и предназначен для коммутации сигналов в полосе 0,1–6 ГГц. Данный ключ отличается совокупностью параметров — очень хорошим коэффициентом изоляции (62 дБ в полосе частот до 2 ГГц), низкими вносимыми по-

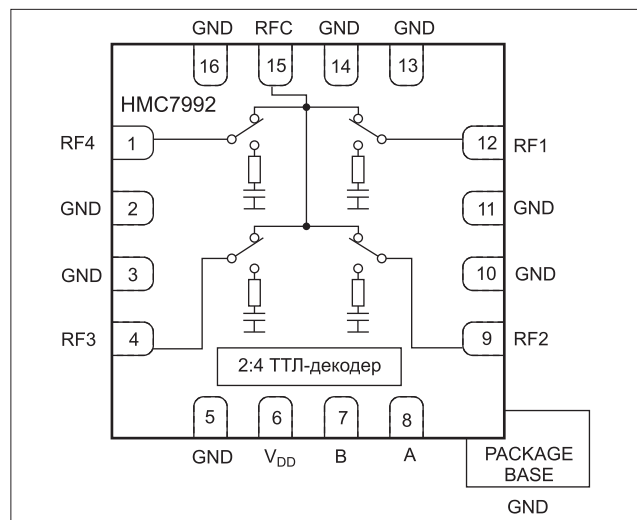


▲ Рис. 3. Зависимость вносимых потерь от частоты

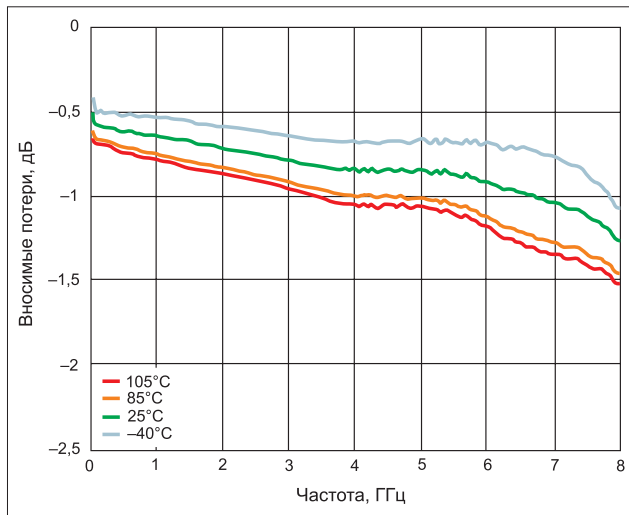


▲ Рис. 4. Зависимость изоляции между выходами RF1 и RF2 от частоты

терями (0,68 дБ на частотах до 2 ГГц) и весьма хорошей линейностью (IP3 по входу составляет 60 дБ в полосе частот до 2 ГГц). Однополярное питание радиочастотной части микросхемы и возможность управления сигналами уровнями 1,8 В/3,3 В/5 В упрощают схему подключения HMC8038. Время переключения составляет 60 нс, полное время включения и установки сигнала (по уровню 0,1 дБ) — 170 нс.



▲ Рис. 5. Структурная схема SP4T-ключа HMC7992



▲ Рис. 6. Зависимость вносимых потерь от частоты

Переключатели HMC7992 и ADRF5040 имеют структуру SP4T (single-pole, quad-throw) и предназначены для работы в полосе частот 100 МГц ... 6,0 ГГц (HMC7992) и 9 кГц ... 12 ГГц (ADRF5040). Поглощающий (неотражающий) ключ HMC7992 характеризуется очень малыми вносимыми потерями — всего 0,6 дБ на частотах до 2 ГГц, хорошей линейностью (58 дБм при питании +5 В) и неплохими значениями изоляции — 45 дБ на частотах до 2 ГГц и 38 дБ на частоте 4 ГГц. Схема управления ключа имеет декодер 2:4 (для выбора канала переключения), управление осуществляется сигналами с уровнями 1,8 В/3,3 В/5 В, как и у ключа HMC8038. Время переключения составляет 30 нс, полное время включения и установки сигнала (по уровню 0,1 дБ) — 150 нс (рис. 5–7).

Переключатель ADRF5040 тоже имеет встроенные согласованные 50-омные резисторы и так же, как и HMC7992, отличается очень малым уровнем вносимых потерь. Так, на частоте 4 ГГц коэффициент вносимых потерь составляет 0,7 дБ, на частоте 10 ГГц — 1,1 дБ. Микросхема обладает хорошими параметрами линейности во всем диапазоне рабочих частот (от 9 кГц) — точка компрессии по уровню 1 дБ равна 37 дБ, а точка пересечения с интермодуляционной характеристикой третьего порядка на частоте 8 ГГц равна 58 дБ.

Переключатель ADRF5250 осуществляет коммутацию сигнала в полосе частот 0,1–6 ГГц с одного входа на пять направлений и на данный момент остается единственным переключателем SP5T, производимым Analog Devices Inc. Структурная схема ключа приведена на рис. 8. Особенность ключа — встроенная отключаемая схема генерации отрицательного напряжения, что позволяет работать как с напряжением питания обеих полярностей, так

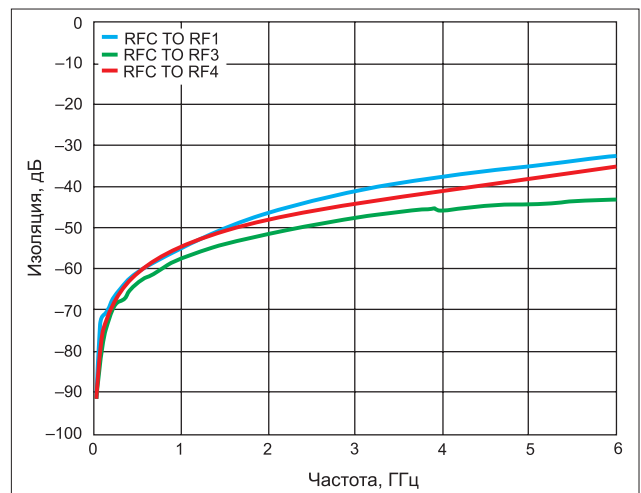
и с напряжением лишь положительной полярности номиналом +3,3 или +5 В. Как и описанные выше ключи HMC8038 и HMC7992, ADRF5250 обладает хорошими показателями линейности — точка компрессии мощности по уровню 0,1 дБ равна 35 дБмВт, а типовое значение ИРЗ составляет 57 дБмВт. Управление ключом реализуется с помощью трех логических выводов с уровнем напряжения в +1,8 В.

Характеристики ключей HMC1118, HMC8038, HMC7992, ADRF5040, ADRF5250 представлены в таблице 1.

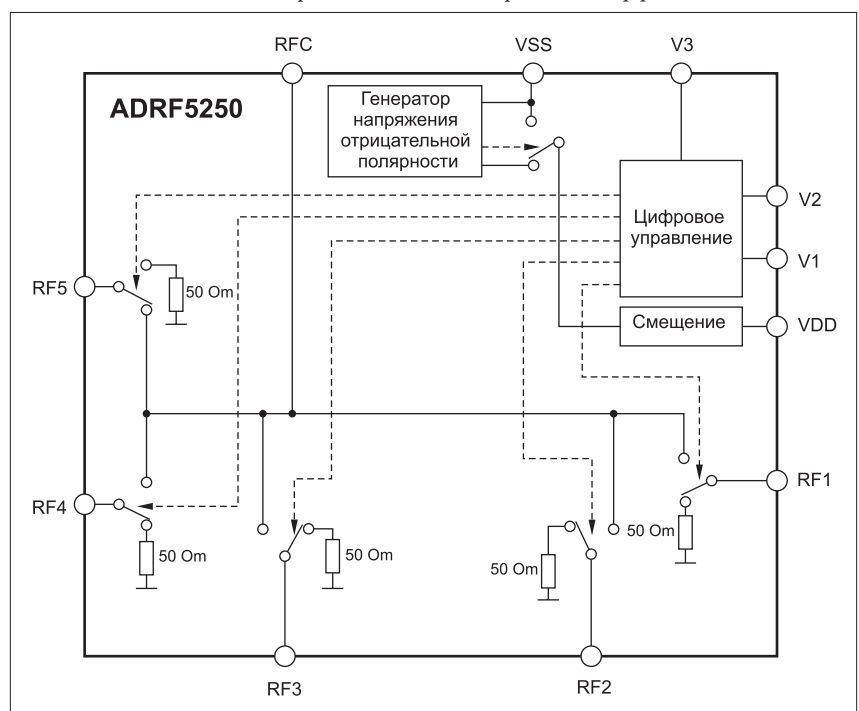
Как уже говорилось, высококачественные или широкополосные переключатели в интегральном исполнении до недавнего времени создавались на основе арсенид-галлиевой технологии, причем внутренние схемы реализовывались на основе рпн-диодов

(особого направления данная технология не получила), так и на полевых транзисторах (с барьером Шоттки или псевдоморфных транзисторах с высокой подвижностью электронов). Эта технология и сейчас достаточно широко применяется при создании новых приборов, однако преимущества, которые дает кремний на изоляторе, стали движущим фактором развития данной технологии и разработки компанией Analog Devices Inc. микросхем, действующих на частотах до 20 ГГц и выше.

Серия радиочастотных переключателей с верхней границей рабочей частоты 30 ГГц содержит два SPDT-ключа (ADRF5020, ADRF5021) и два SP4T-ключа (ARF5044, ADRF5045). ADRF5020 и ADRF5021 относятся к неотражающим ключам, обладают достаточно хорошим коэффициентом изоляции



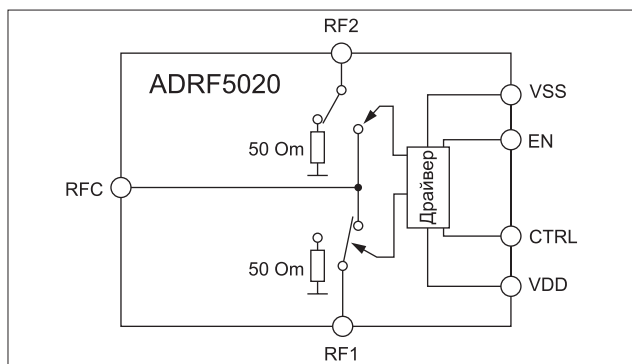
▲ Рис. 7. Зависимость изоляции между выходами RF1, RF3 и RF4 (при подключении RFC к выходу RF2) от частоты



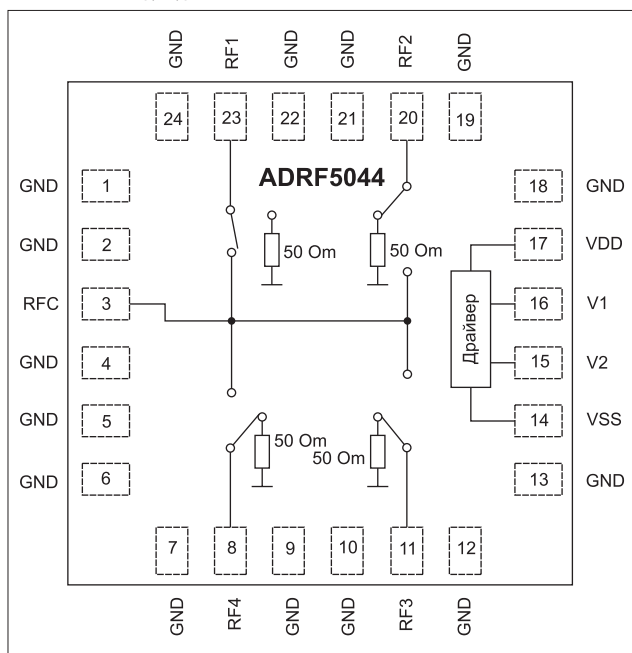
▲ Рис. 8. Структурная схема SP5T-ключа ADRF5250

Таблица 1. Характеристики ключей HMC1118, HMC8038, HMC7992, ADRF5040, ADRF5250

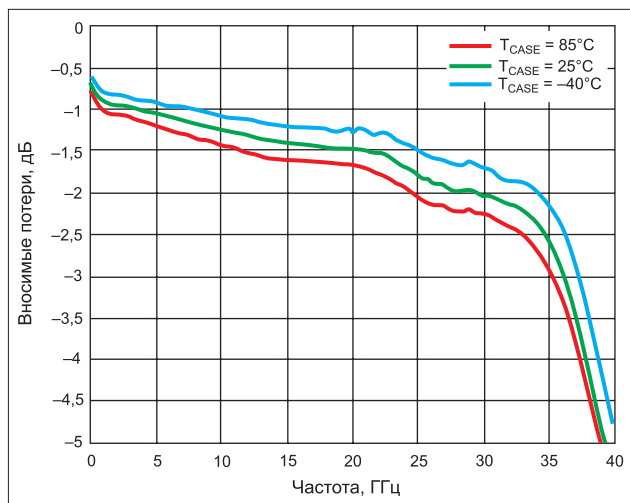
Параметры	HMC1118	HMC8038	HMC7992	ADRF5040	ADRF5250
Диапазон рабочих частот	9 кГц ... 13 ГГц	100 МГц ... 6 ГГц	100 МГц ... 6 ГГц	9 кГц ... 12 ГГц	100 МГц ... 6 ГГц
Топология	SPDT	SPDT	SP4T	SP4T	SP5T
Вносимые потери	0,6 дБ (8 ГГц)	0,9 дБ (6 ГГц)	0,6 дБ (2 ГГц)	0,8 дБ (8 ГГц)	1,5 дБ (4 ГГц)
Изоляция	56 дБ (2 ГГц)	60 дБ (2 ГГц)	45 дБ (2 ГГц)	34 дБ (10 ГГц)	50 дБ (4 ГГц)
Точка компрессии мощности (P1dB), дБмВт	37	36	35	37	34
Точка пересечения с интермодуляционной характеристикой третьего порядка (IP3), дБмВт	62	60	58	58	55
Пропускаемая мощность, дБмВт	36	34	33	33	34
Пропускаемая мощность при переключении, дБмВт	27	29	27	27	30
Устойчивость к электростатике (HBM), В	2000	4000	2000	4000	3500
Корпус	3×3 мм LFCSP	4×4 мм LFCSP	3×3 мм LFCSP	4×4 мм LFCSP	4×4 мм LFCSP



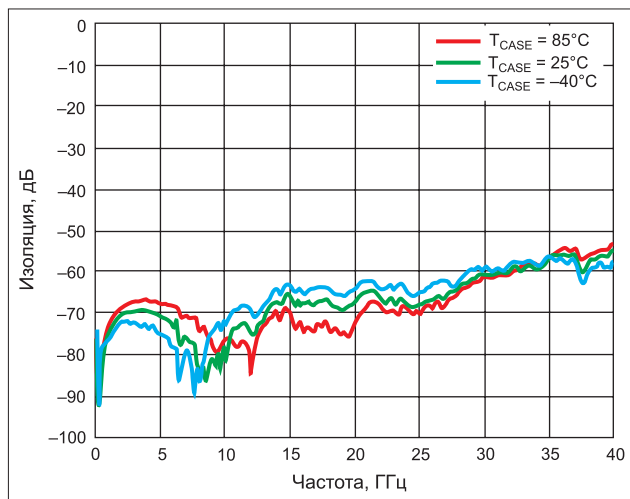
▲ Рис. 9. Структурная схема SPDT-ключа ADRF5020



▲ Рис. 10. Структурная схема SP4T-ключа ADRF5044



▲ Рис. 11. Зависимость вносимых потерь от частоты (ADRF5020)



▲ Рис. 12. Зависимость изоляции между выходами RF1 и RF2 от частоты

(около 65 дБ на частоте 20 ГГц) и малыми вносимыми потерями (порядка 1,4–1,5 дБ на частоте 20 ГГц). ADRF5020 имеет рабочий частотный диапазон 100 МГц ... 30 ГГц и производит коммутацию между каналами за 15 нс (время установки сигнала по уровню 0,1 дБ от установленного значения), ADRF5021 работает в диапазоне частот 9 кГц ... 30 ГГц и обладает временем переключения в 6,2 мкс.

Можно заметить, что микросхемы имеют одинаковую топологию и различаются временем переключения и нижней границей частотного диапазона. Данная взаимосвязь объясняется тем, что ядро переключателя содержит схему смещения, которая также переключается, когда происходит переключение с одного канала на другой. Более низкая рабочая частота ключа требует и более низкочастот-

ной схемы смещения, чьи особенности приводят к увеличению времени переключения.

Микросхемы ADRF5020 и ADRF5021 обладают хорошей линейностью (значение IP3 по входу составляет 52 дБмВт, точка компрессии P1dB — 26–27 дБмВт), требуют питания радиочастотной части +3,3 и –2,5 В, управляются сигналами ТТЛ/КМОП-уровней (рис. 9–12).

Таблица 2. Характеристики ключей ADRF5020, ADRF5021, ADRF5044, ADRF5045

Параметры	ADRF5020	ADRF5021	ADRF5044	ADRF5045
Диапазон рабочих частот	100 МГц ... 30 ГГц	9 кГц ... 30 ГГц	100 МГц ... 30 ГГц	9 кГц ... 30 ГГц
Топология	SPDT	SPDT	SP4T	SP4T
Вносимые потери	1,4 дБ (20 ГГц)	1,5 дБ (20 ГГц)	2,1 дБ (20 ГГц)	2,0 дБ (20 ГГц)
Изоляция	65 дБ (20 ГГц)	65 дБ (20 ГГц)	52 дБ (20 ГГц)	53 дБ (20 ГГц)
Точка компрессии мощности (P1dB), дБмВт	26	27	28	28
Точка пересечения с интермодуляционной характеристикой третьего порядка (IP3), дБмВт	52	52	50	50
Пропускаемая мощность, дБмВт	24	24	24	24
Мощность при подключении к внутреннему резистору, дБмВт	24	24	24	24
Устойчивость к электростатике (HBM), В	1000	1000	2000	4000
Корпус	3×3 мм LGA	3×3 мм LGA	4×4 мм LGA	4×4 мм LGA

Таблица 3. Высокочастотные SPDT-ключи ADRF5024, ADRF5025, ADRF5026, ADRF5027

Параметры	ADRF5024	ADRF5025	ADRF5026	ADRF5027
Диапазон рабочих частот	100 МГц ... 44 ГГц	9 кГц ... 44 ГГц	100 МГц ... 44 ГГц	9 кГц ... 44 ГГц
Топология	SPDT, отражающий	SPDT, отражающий	SPDT, поглощающий	SPDT, поглощающий
Вносимые потери	1,3 дБ (30 ГГц)	1,3 дБ (30 ГГц)	2,0 дБ (30 ГГц)	2,0 дБ (30 ГГц)
Изоляция	40 дБ (30 ГГц)	40 дБ (30 ГГц)	54 дБ (30 ГГц)	54 дБ (30 ГГц)
Точка компрессии мощности (P1dB), дБмВт	27	27	26	26
Точка пересечения с интермодуляционной характеристикой третьего порядка (IP3), дБмВт	50	50	53	53
Пропускаемая мощность, дБмВт	27	27	24	24
Пропускаемая мощность при переключении, дБмВт	27	27	24	24
Мощность при подключении к внутреннему резистору	ND	ND	24 дБмВт	24 дБмВт
Время переключения	10 нс	2 мкс	14 нс	1,1 мкс
Устойчивость к электростатике (HBM), В	1000	1000	2000	4000
Корпус	3×3 мм LGA	3×3 мм LGA	4×4 мм LGA	4×4 мм LGA

Анонсированные в конце 2017 года SP4T-ключи ADRF5044 и ADRF5045 также работают в полосах частот 100 МГц ... 30 ГГц и 9 кГц ... 30 ГГц,

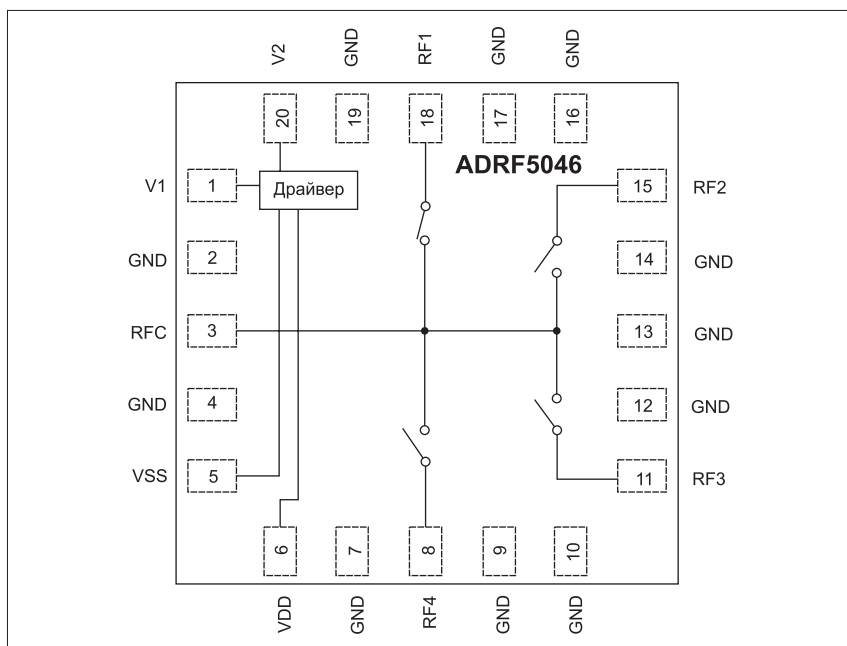
соответственно. Как и в ключах ADRF5020 и ADRF5021, у них разное время переключения: 19 нс у ADRF5044 и 2,1 мкс у ADRF5045.

Более полные данные по характеристикам этих микросхем приведены в таблице 2.

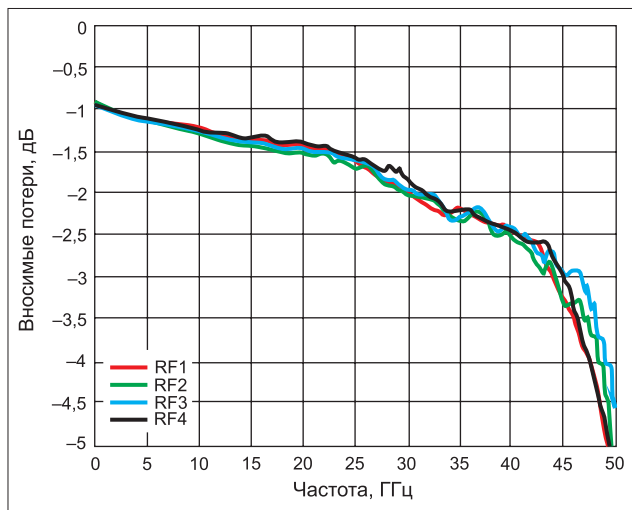
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ КЛЮЧИ

На данный момент Analog Devices Inc. серийно выпускает несколько сверхширокополосных ключей, работающих в частотном диапазоне до 44 ГГц. Это микросхемы ADRF5024, ADRF5025, ADRF5026, ADRF5027 с топологией single-pole, double-throw и ADRF5046, ADRF5047 с single-pole, quad-throw топологией. Диапазон рабочих частот этих ключей позволяет использовать их в широкополосных многодиапазонных приемопередающих устройствах и высокочастотной контрольно-измерительной аппаратуре.

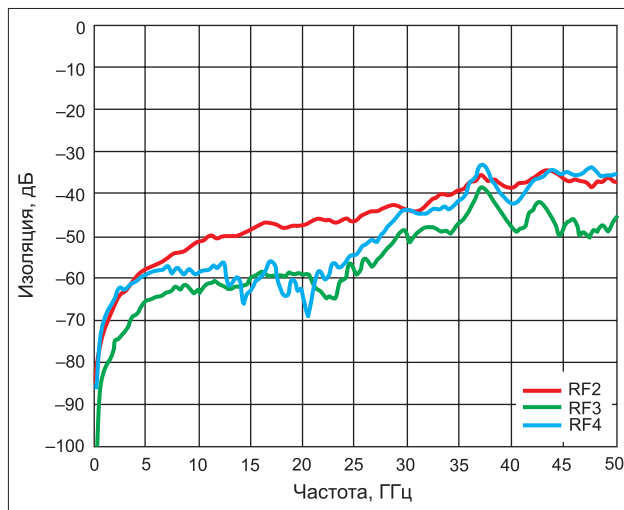
Переключатели ADRF5024 и ADRF5025 являются отражающими, и отсутствие встроенных сопротивлений приводит к тому, что значение вносимых потерь ниже, нежели в поглощающих ключах ADRF5026 и ADRF5027. Так, ADRF5024, ADRF5025 имеют вносимые потери 0,9 дБ на частотах до 20 ГГц, и 1,3 дБ



▲ Рис. 13. Структурная схема SP4T-ключа ADRF5046



▲ **Рис. 14.** Зависимость вносимых потерь при переключении на выходы RF1, RF2, RF3, RF4 от частоты (ADRF5046)



▲ **Рис. 15.** Зависимость изоляции (при подключении входа RFC к выводу RF1) от частоты

на частотах до 30 ГГц, в то время как переключатели ADRF5026, ADRF5027 обладают значениями вносимых потерь в 1,3 дБ и 2,0 дБ на частотах 20 и 30 ГГц соответственно.

Особенность ключей ADRF5026 и ADRF5027 я состоит в наличии встроенных 50-омных резисторов, что помимо хорошего согласования в выключенном состоянии (канала) увеличивает степень изоляции источника сигнала (вывод RFC) от коммутируемых выходов. Так, изоляция на частоте 10 ГГц у ADRF5026 и ADRF5027 достигает 60 дБ, на частотах до 30 ГГц значение коэффициента развязки падает до 54 дБ. У ключей ADRF5024 и ADRF5025 значения изоляции на частотах 10 и 30 ГГц будут равны 43 и 40 дБ.

Описанные выше 44-ГГц SPDT-ключи имеют неплохую линейность и выдерживают высокий уровень мощности коммутируемого сигнала. Технические характеристики микросхем приведены в таблице 3.

Микросхемы ADRF5046 и ADRF5047 относятся к отражающим ключам и работают в полосе 100 МГц ... 44 ГГц и 9 кГц ... 44 ГГц соответственно. Как было отмечено ранее, отражающие ключи обладают малым уровнем вносимых потерь, и ADRF5046 и ADRF5047 обладают коэффициентом вносимых потерь в 1,2 дБ на частотах до 10 ГГц, и 2,0 дБ на частотах до 30 ГГц (рис. 13–15). Так же, как и в описанных ранее ключах, в переключателе с более низкой границей частотного диапазона переключение происходит существенно медленнее, полный перечень параметров микросхем приведен в таблице 4.

В августе 2019 компанией Analog Devices Inc. были анонсированы два SPDT-ключа ADRF5300 и ADRF5301, оптимизированных для применения в беспроводной аппаратуре 5G различных

диапазонов (табл. 5). ADRF5300 имеет диапазон рабочих частот 24–32 ГГц, а ADRF5301 действует в полосе частот 35–44 ГГц. Данные ключи имеют одинаковую неотражающую структуру и отличаются малым уровнем вносимых потерь и достаточно высоким уровнем мощности коммутируемого входного сигнала. Время переключения ADRF5300 со-

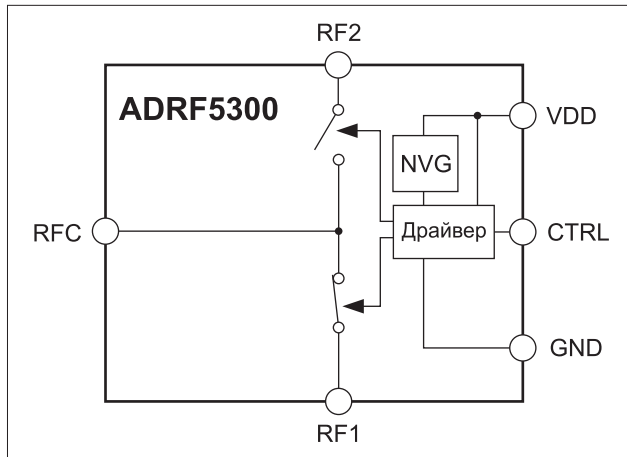
ставляет 65 нс (от превышения 50% логического уровня сигнала управления до уровня 0,1 дБ на радиочастотном выходе), у ADRF5301 время переключения 45 нс при тех же условиях. Обе микросхемы содержат схему формирования напряжения отрицательной полярности, то есть для питания необходимо лишь напряжение номиналом +3,3 В, управле-

Таблица 4. **Высокочастотные SP4T-ключи ADRF5046, ADRF5047**

Параметры	ADRF5046	ADRF5047
Диапазон рабочих частот	100 МГц ... 44 ГГц	9 кГц ... 44 ГГц
Топология	SP4T, отражающий	SP4T, отражающий
Вносимые потери	2,5 дБ (40 ГГц)	2,4 дБ (40 ГГц)
Изоляция	33 дБ (40 ГГц)	33 дБ (40 ГГц)
Точка компрессии мощности (P1dB), дБмВт	27	26,50
Точка пересечения с интермодуляционной характеристикой третьего порядка (IP3), дБмВт	50	50
Пропускаемая мощность, дБмВт	27	26
Пропускаемая мощность при переключении, дБмВт	27	26
Время переключения	50 нс	5 мкс
Устойчивость к электростатике (НВМ), СВЧ-выводы, В	500	500
Корпус	3×3 мм LGA	3×3 мм LGA

Таблица 5. **Высокочастотные SPDT-ключи ADRF5300, ADRF5301**

Параметры	ADRF5300	ADRF5301
Диапазон рабочих частот	24 ГГц ... 32 ГГц	35 ГГц ... 44 ГГц
Топология	SPDT, отражающий	SPDT, отражающий
Вносимые потери	1,1 дБ (30 ГГц)	1,8 дБ (44 ГГц)
Изоляция	38 дБ (30 ГГц)	28 дБ (44 ГГц)
Точка компрессии мощности (P1dB), дБмВт	37	37
Точка пересечения с интермодуляционной характеристикой третьего порядка (IP3), дБмВт	52	52
Пропускаемая мощность (среднее значение), дБмВт	28	28
Пропускаемая мощность (пиковое значение), дБмВт	36	36
Время переключения, нс	65	45
Корпус	3×3 мм LGA	3×3 мм LGA



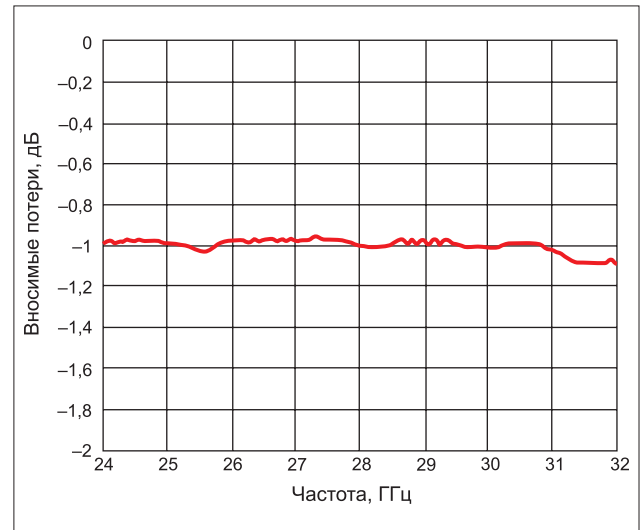
▲ Рис. 16. Структурная схема SPDT-ключа ADRF5300

ние производится логическими сигналами КМОП/низковольтного TTL-уровня (рис. 16–18).

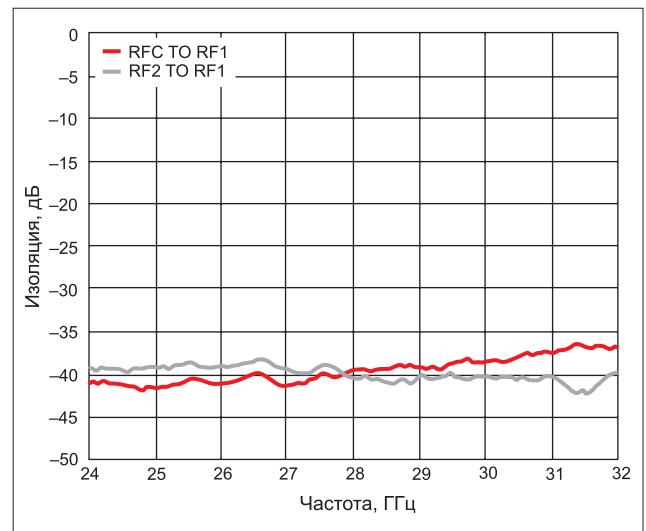
МОЩНЫЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ SPDT-КЛЮЧИ

К отдельной группе можно отнести мощные высокочастотные ключи — ADRF5130, ADRF5132, ADRF5160. Микросхема ADRF5130 является однополюсным ключом на два направления, с диапазоном рабочих частот 0,7–3,5 ГГц, отличительной способностью которого является возможность переключать сигналы с пиковой мощностью до 46,5 дБмВт (44 Вт) либо с постоянной мощностью до 43 дБмВт. Ключ ADRF5130 имеет отражающую структуру, согласован с 50-омными линиями, имеет малые вносимые потери — 0,6 дБ на частотах до 2 ГГц, и довольно высокий показатель изоляции — 50 дБ на этих же частотах. Данный ключ обладает прекрасной линейностью: значение параметра IP3 по входу составляет 68 дБмВт, точка компрессии по уровню 0,1 дБ равна 46 дБмВт. В части эксплуатационных параметров следует отметить, что ключ работает от напряжения питания номиналом +5 В, потребляя при этом не более 1,1 мА, управляется сигналами КМОП-уровня и выпускается в компактном корпусе размерами 4×4 мм. Как и другие кремниевые ключи, ADRF5130 обладает устойчивостью к электростатическому разряду: до 2 кВ по классу 2 НВМ.

ADRF5132 также представляет собой корпусированный SPDT-ключ, отличающийся высокой мощностью и предназначенный для работы в диапазоне частот 0,7–5 ГГц. ADRF5132 рекомендован для использования в аппаратуре базовых станций сотовой связи или беспроводных системах широкополосного доступа, особенностью данного ключа является возможность оперировать сигналами высокой мощности — до 35 дБмВт сигнала стандарта LTE (при значении пик-фактора (соотношение пиковой мощности к средней) в 8 дБ), 38 дБмВт для синусо-



▲ Рис. 17. Вносимые потери при подключении к выводу RF1 в диапазоне рабочих частот



▲ Рис. 18. Изоляция (при подключении входа RFC к выводу RF2) в диапазоне рабочих частот

идального сигнала, пиковое значение мощности коммутируемого сигнала достигает 43 дБмВт (20 Вт). Данный ключ обладает хорошими показателями линейности — типовое значение IP3 составляет 65 дБмВт, точка компрессии по уровню 0,1 дБ равна 42,5 дБмВт.

ADRF5160 является самым мощным из кремниевых ключей, выпускаемых Analog Devices Inc. в настоящее время, он спосо-

Таблица 6. Мощные высокочастотные SPDT-ключи ADRF5130, ADRF5132, ADRF5160

Параметры	ADRF5130	ADRF5132	ADRF5160
Диапазон рабочих частот, ГГц	0,7–3,5	0,7–5,0	0,7–4,0
Топология	SPDT, отражающий	SPDT, отражающий	SPDT, отражающий
Вносимые потери	0,6 дБ (2 ГГц)	0,6 дБ (2,7 ГГц)	0,7 дБ (2,0 ГГц)
Изоляция	50 дБ (2 ГГц)	40 дБ (30 ГГц)	54 дБ (30 ГГц)
Точка компрессии мощности (0.1P1dB), дБмВт	46	42,5	47
Точка пересечения с интермодуляционной характеристикой третьего порядка (IP3), дБмВт	68	65	70
Пропускаемая мощность (среднее значение), дБмВт	43	38	43
Пропускаемая мощность (пиковое значение), дБмВт	46	43	49
Устойчивость к электростатике (НВМ), В	2000	2000	4000
Корпус	4×4 мм LFCSP	3×3 мм LFCSP	5×5 мм LFCSP

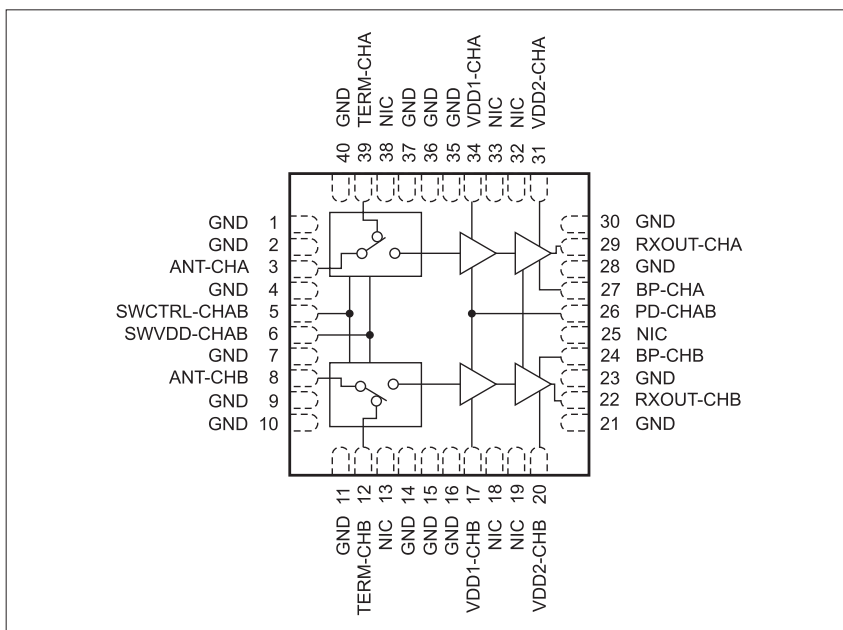
бен пропускать сигналы с пиковой мощностью 49 дБмВт (88 Вт). Ключ функционирует в полосе частот 0,7–4,0 ГГц, при этом способен работать с сигналами LTE с мощностью до 41 дБмВт (при значении пик-фактора в 8 дБ), или с сигналами с постоянным уровнем мощности на входе в 43 дБмВт. Как и в описанных выше мощных ключах, у ADRF5160 достаточно хорошие показатели линейности, и он имеет сходные особенности по питанию (напряжение питания +5 В) и управлению (совместимые с КМОП-логикой уровни напряжения) (табл. 6).

Мощные кремниевые ключи рекомендуются в качестве замены переключателей на pnp-диодах, при сопоставимых уровнях мощности пропускаемых сигналов, в качестве преимущества интегрированных кремниевых ключей можно отметить низкие значения напряжения питания, малые токи питания, простой интерфейс управления, устойчивость к электростатике и малые габаритные размеры.

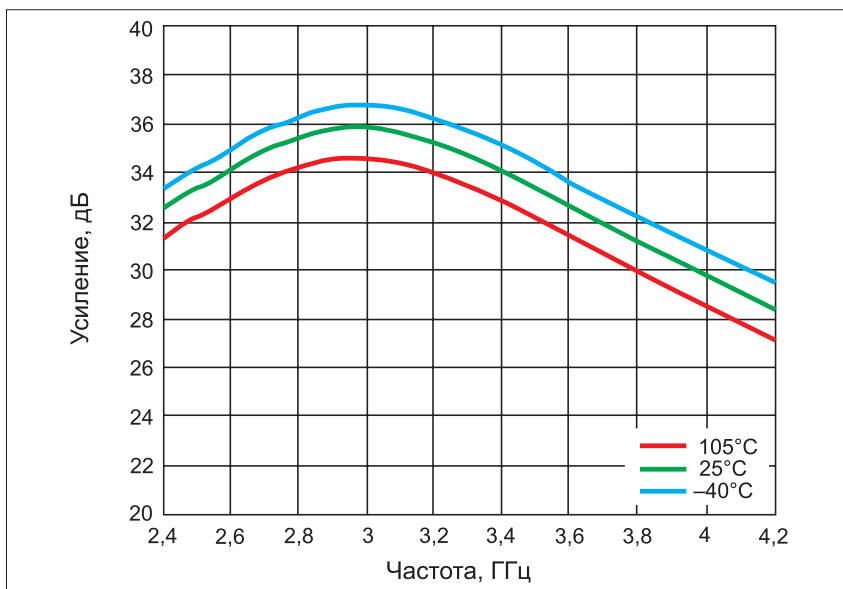
ИНТЕГРИРОВАННЫЕ РЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ КЛЮЧЕЙ

Некоторые преимущества кристаллов на основе кремния, такие как малое время переключения, низкое напряжение питания, малая потребляемая мощность и простота управления, оказались особенно востребованы при конструировании многоантенных приемопередающих устройствах связи нового поколения, где количество антенных модулей может достигать нескольких сотен. Интегрированные компоненты, содержащие высокочастотные ключи и малошумящие усилители, позволили реализовать компактное решение, оптимизированное для использования в Massive MIMO-аппаратуре связи сетей 5G. Летом 2019 года Analog Devices Inc. выпустила на рынок серию микросхем — ADRF5545A, ADRF5547, ADRF5549, имеющих два канала, каждый из которых содержит мощный SPDT-переключатель и два малошумящих усилителя. Внутренняя структура микросхем приведена на рис. 19.

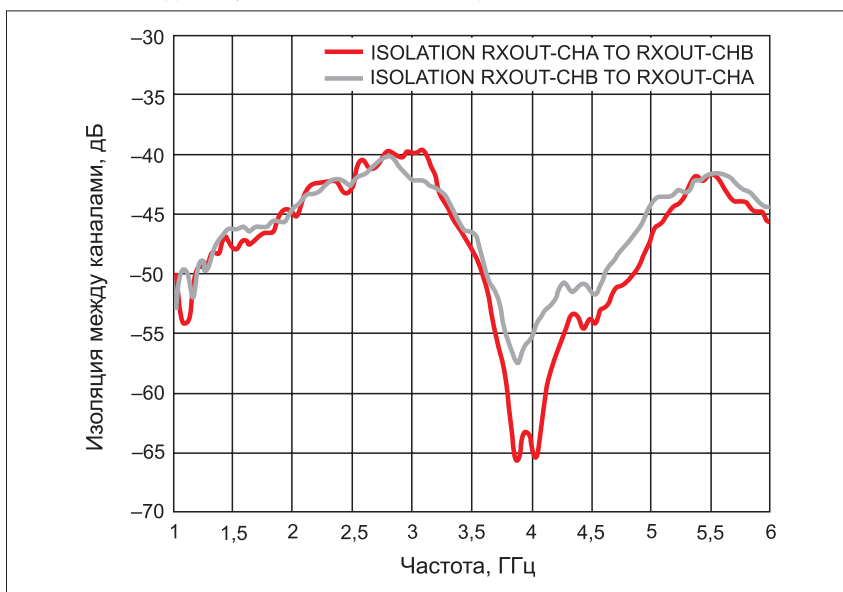
Микросхемы имеют схожие параметры, главное их отличие друг от друга заключается в диапазоне рабочих частот. Так, ADRF5545A действует в полосе частот 2,4–4,2 ГГц, ADRF5547 имеет диапазон рабочих частот 3,6–5,0 ГГц, а ADRF5549 предназначен для диапазона 1,8–2,8 ГГц. Рассмотрим в качестве примера ADRF5545A. Микросхема представляет собой двухканальное радиочастотное интегрированное решение предварительной обработки данных, предназначенное для построения входных каскадов приемных устройств беспроводной связи, работающих в ду-



▲ Рис. 19. Структурная схема ADRF5545A, ADRF5547, ADRF5549



▲ Рис. 20. Коэффициент усиления ADRF5545A в диапазоне рабочих частот



▲ Рис. 21. Изоляция между каналами ADRF5545A в диапазоне рабочих частот

Таблица 7. Интегрированные двухканальные радиочастотные решения предварительной обработки данных ADRF5545A, ADRF5547, ADRF5549

Параметры	ADRF5545A	ADRF5547	ADRF5549
Диапазон рабочих частот, ГГц	2,4–4,2	3,7–5,3	1,8–2,8
Топология	2-канальный (SPDT, 2 МШУ)	2-канальный (SPDT, 2 МШУ)	2-канальный (SPDT, 2 МШУ)
Вносимые потери	0,65 дБ (3,6 ГГц)	0,5 дБ (4,6 ГГц)	0,5 дБ (2,3 ГГц)
Изоляция ключа (каналы приема и передачи)	25 дБ (4 ГГц)	20 дБ (4 ГГц)	25 дБ (2 ГГц)
Точка компрессии мощности по выходу (0.1P1dB), большой коэфф. усил./малый коэфф. усил., дБмВт	19,дек	18,июн	19/13
Точка пересечения с интермодуляционной характеристикой третьего порядка (IP3) по выходу, большой коэфф. усил./малый коэфф.усил., дБмВт	32/29	31/22	32/25
Пропускаемая мощность (режим приема, LTE-сигнал, 9 дБ пик.), дБмВт	15	15	15
Точка компрессии мощности по входу (100 мкс импульс, 10% коэффициент заполнения)	50 дБмВт	ND	ND
Время переключения с передачи на приема (любой канал), нс	860	860	860
Время переключения с приема на передачу (любой канал), нс	800	800	800
Устойчивость к электростатике (HBM), В	500	500	500
Корпус	6×6 мм LFCSP	6×6 мм LFCSP	6×6 мм LFCSP

плексном режиме с временным разделением (TDD) в частотном диапазоне 2,4–4,2 ГГц. Каждый канал ADRF5545A содержит SPDT-переключатель высокой мощности, сделанный на основе кремния на изоляторе, и два малошумящих усилителя, выполненных по арсенид-галлиевой технологии (рис. 20–21).

Для достижения требуемой производительности возможно включение одного или двух усилителей: при включении обоих усилителей коэффициент усиления достигает 32 дБ, при включении одного усилителя — 16 дБ, при любом режиме уровень шума будет составлять 1,45 дБ. Значение изоляции ключа (между выводами приема и передачи) равняется 25 дБ.

В режиме передачи — при переключении радиочастотных выводов (ANT-

CHА и ANT-CHВ) к выводам радиопередающего тракта — вносимые потери встроенного ключа не превышают 0,65 дБ, при этом коммутируемая мощность сигнала может достигать 40 дБмВт (для LTE сигнала с пик-фактором 9 дБ) или 43 дБмВт (пиковая мощность сигнала при временном интервале не более 10 мкс.) Время переключения составляет 860 нс при переключении на прием и 800 нс при переключении на передачу. Технические параметры микросхем ADRF5545A, ADRF5547, ADRF5549 приведены в таблице 7.

Рассмотрев описанные выше компоненты и решения, можно сделать вывод, что в настоящее время Analog Devices Inc. выпускает значительное количество вполне современных высокочастотных переключателей на основе

технологии кремний на изоляторе, параметры которых позволяют использовать их в широком спектре радиочастотной аппаратуры различного назначения. —

ЛИТЕРАТУРА

1. Bayrakci B. RF and Microwave control products in silicon. www.analog.com/media/en/technical-documentation/white-papers/RF-and-Microwave-Control-Products-in-Silicon.pdf
2. Bayrakci B. ADI's High Power Silicon Switches Save Bias Power and External Components in Massive MIMO RF Front-End Design. www.analog.com/en/design-notes/adis-high-power-silicon-switches-save-bias-power-and-external-components-in-massive-mimo-rf-front-en.html
3. www.amalog.com <https://www.analog.com/en/products/rf-microwave/rf-switches/spst-spdt-sp3t-sp4t-sp6t-sp8t.html>