

# Монолитные микросхемы коммутаторов СВЧ-сигналов компании Hittite Microwave

Владимир ДЬЯКОНОВ,  
д. т. н., профессор  
vpdyak@yandex.ru

Американская компания Hittite Microwave выпускает обширную номенклатуру монолитных интегральных микросхем СВЧ-диапазона [1–3]. По ряду показателей они не уступают обычным коаксиальным СВЧ-устройствам [4] и даже превосходят их. В данной статье описаны монолитные микросхемы коммутаторов СВЧ-сигналов этой компании, которые широко применяются в современных системах связи гражданского и военного назначения.

## Монолитные микросхемы СВЧ-коммутаторов общего назначения

Монолитные и гибридно-пленочные интегральные микросхемы компании построены на основе самых современных интегральных транзисторов типа MESFET, PHEMT, MHEMT и HBT, изготавливаемых на GaAs, InGaP/GaAs, InP, SiGe. Сегодня это наиболее высокочастотные из известных транзисторов. По этому параметру они намного превосходят обычные германиевые и кремниевые и позволяют расширить диапазон частот до 100 ГГц.

На рис. 1а показан внешний вид корпуса типа SMT микросхемы H427. Он имеет миниатюрные размеры 2×3 мм и предназначен для поверхностного монтажа на печатную плату. Очень малая паразитная индуктивность выводов такого корпуса обеспечивает высокие частоты переключаемых сигналов — от постоянного тока DC до 8 ГГц. Микросхема выполнена по технологии GaAs MMIC.

Функциональная диаграмма микросхемы H427 приведена на рис. 1б. Видно, что микросхема содержит четыре переключателя.

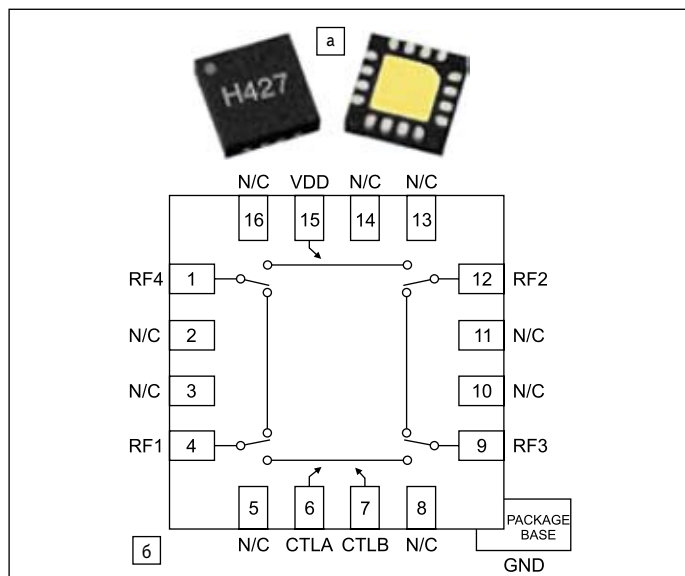


Рис. 1. Микросхема H427: а) внешний вид; б) функциональная диаграмма

Таблица 1. Диаграмма состояния микросхемы H427

Сигналы управления		Соединения			
A	B	RF4–RF2	RF1–RF3	RF4–RF1	RF2–RF3
низкий	высокий	Вкл.	Вкл.	Выкл.	Выкл.
высокий	низкий	Выкл.	Выкл.	Вкл.	Вкл.

Напряжение смещения  $V_{dd} = 5$  В при токе 10 мкА. Управляющее напряжение низкое (0–0,2 В) при токе 6 мкА и высокое  $\pm V_{dc}$  при токе 10 мкА. Описание состояний коммутатора указано в таблице 1.

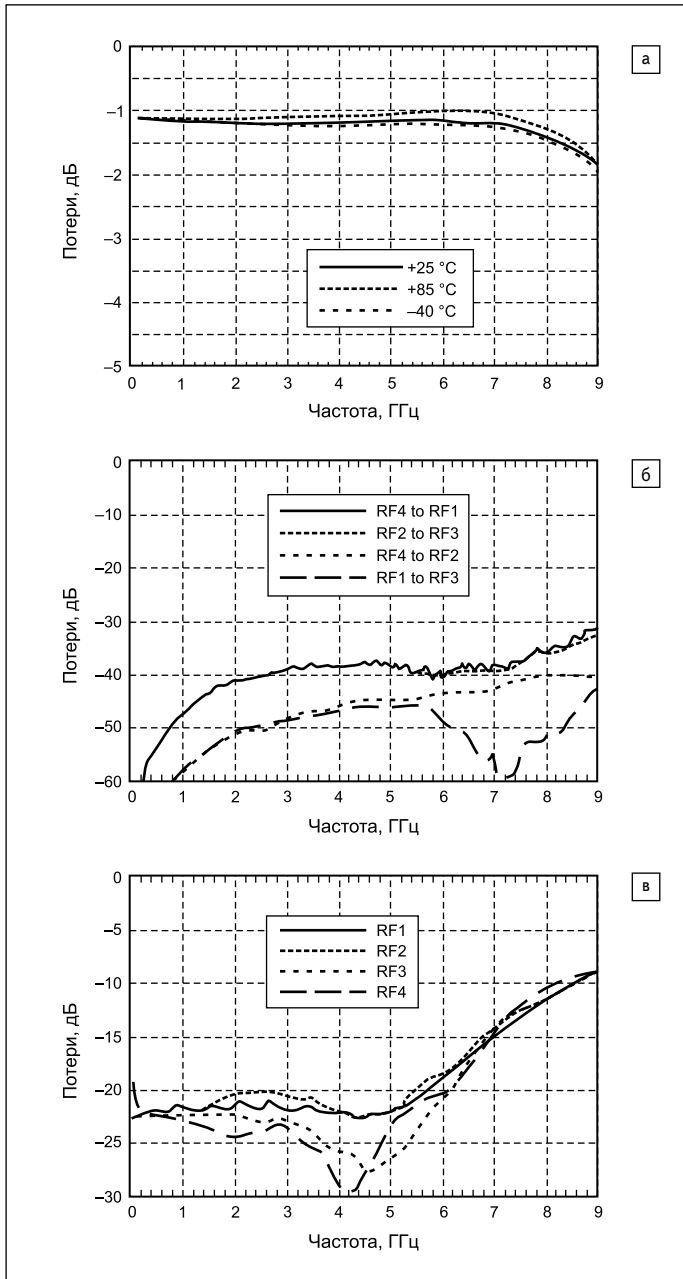
Основными параметрами коммутаторов СВЧ-сигналов являются потери (ослабление) сигнала во включенном состоянии и потери в режиме выключения. Они измеряются в отрицательных децибелах (дБ) и характеризуют коэффициент передачи микросхемы или ее отдельного участка. Для микросхем коммутаторов желательно иметь малые потери во включенном состоянии (близкие к 0 дБ) и как можно большие в выключенном состоянии (например, –40 дБ соответствует ослаблению сигнала в 100 раз).

У микросхемы H427 потери в режиме включения составляют от –1,2 до –1,6 дБ в диапазоне частот 0–6 ГГц. Частотная зависимость этого параметра во включенном состоянии коммутатора H427 приведена на рис. 2а. Она отличается высокой равномерностью и небольшим спадом после частоты 7 ГГц.

В режиме выключения потери достигают 48 дБ, но сильно зависят от частоты (рис. 2б). Они, естественно, заметно возрастают на сравнительно низких частотах (менее 2 ГГц), но падают на частотах выше 6–7 ГГц. Последнее можно объяснить просачиванием сигнала с выхода на вход через малые проходные емкости структуры микросхемы.

Более полно микросхемы характеризуются S-параметрами. Из них наиболее часто указывают обратные потери. Зависимость обратных потерь от частоты в выключенном состоянии коммутатора H427 представлена на рис. 2в. За пределами рабочего диапазона частот наблюдается рост сигнала отражения, характеризующего обратные потери.

Печатная плата модуля коммутатора с микросхемой H427 показана на рис. 3. Подключение входов и выход осуществляется с помощью согласованных линий передачи. Отрезок такой линии, предназначенный для ее отдельного тестирования, создан в верхней части платы. Входы и выходы имеют бескорпусные разделительные конденсаторы C2–C5 с емкостью по 100 пФ каждый. Емкость конденсатора C1 — 1000 пФ. Номинал бескорпусных резисторов R1 и R2 — 100 Ом. Все компоненты имеют очень малую паразитную индуктивность.

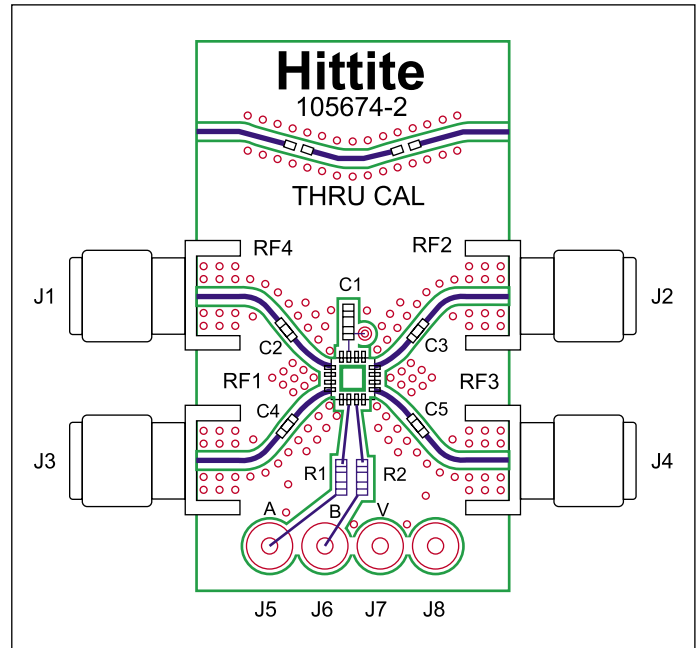


**Рис. 2.** Зависимости для коммутатора H427:  
 а) зависимость коэффициента передачи от частоты во включенном состоянии;  
 б) зависимость коэффициента передачи от частоты в выключенном состоянии;  
 в) зависимость обратных потерь от частоты в выключенном состоянии

**Микросхемы многоканальных СВЧ-коммутаторов**

Микросхема HP321 — это GaAs MMIC SP8T (рис. 4а) неотражающий (точнее, мало отражающий) переключатель сигналов с полосой частот от постоянного тока DC (0 Гц) до 8 ГГц. Технические характеристики изделия:

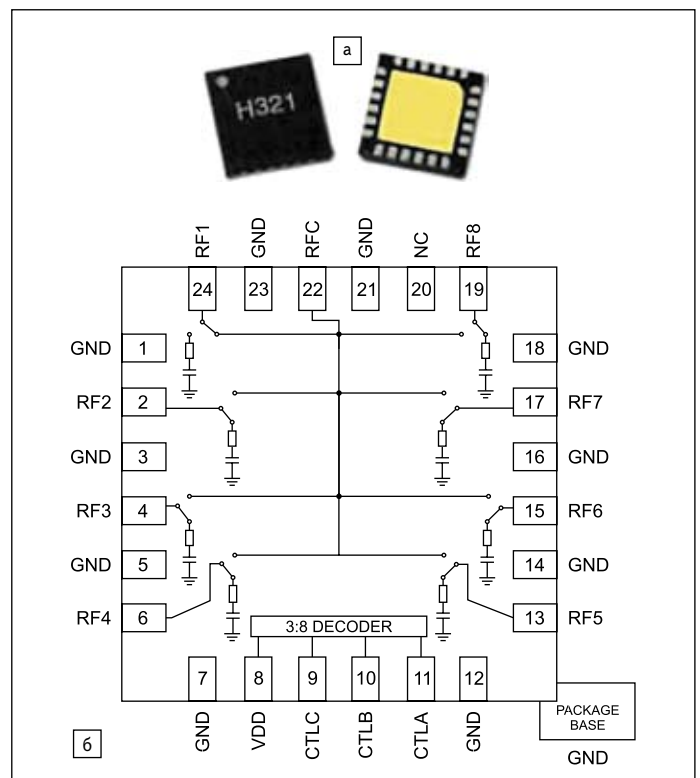
- SMT-корпус типа LP4 (LP4E) размером 4×4 мм.
- Управление логическими сигналами с уровнями:
  - низкий (0–0,8 В при типовом токе 5 мкА);
  - высокий (2 и 5 В при типовом токе 25 мкА).
- Температурный диапазон:
  - хранения –85...+150 °С;
  - рабочий –40...+85 °С.
- Максимальная мощность сигнала для каждого «горячего» вывода +26 дБм.



**Рис. 3.** Монтаж микросхемы коммутатора H427 на печатную плату

Функциональная диаграмма микросхемы показана на рис. 4б. Коммутатор обеспечивает подключение общего радиочастотного вывода RFC на любой из выводов RF1–RF8 в соответствии с расшифровкой диаграммы состояния, представленной в таблице 2. Для уменьшения отражений каждый вывод, отключенный от общего вывода, подключается к конденсатору небольшой емкости, входящему в состав микросхемы (рис. 4б).

Зависимость коэффициента передачи (потерь в дБ) от частоты во включенном состоянии коммутатора HP321 при разных значе-



**Рис. 4.** Микросхема коммутатора HP321LP4:  
 а) внешний вид; б) функциональная диаграмма

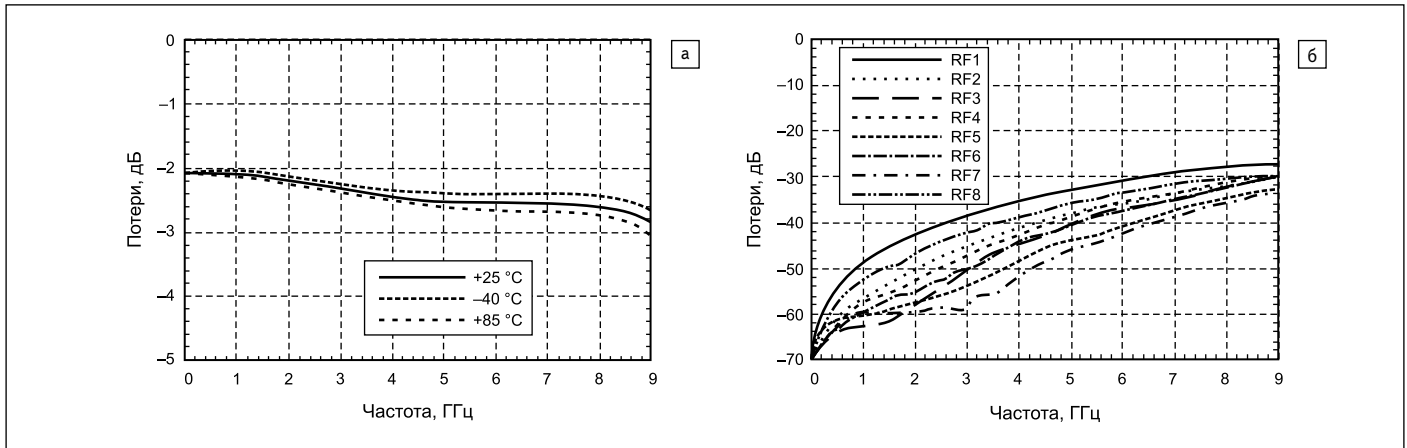


Рис. 5. Зависимость коэффициента передачи от частоты: а) во включенном состоянии; б) в выключенном состоянии

Таблица 2. Диаграмма состояния соединений коммутатора HP321

Сигналы управления			Соединения RFC на
A	B	C	
низкий	низкий	низкий	RF1
высокий	низкий	низкий	RF2
низкий	высокий	низкий	RF3
высокий	высокий	низкий	RF4
низкий	низкий	высокий	RF5
высокий	низкий	высокий	RF6
низкий	высокий	высокий	RF7
высокий	высокий	высокий	RF8

ниях температуры окружающей среды показана на рис. 5а. Потери составляют около -2 дБ на низких частотах и доходят до -2,6 дБ на высоких (до 8 ГГц).

Зависимость коэффициента передачи от частоты для каждого радиочастотного входа (от RF1 до RF8) в выключенном состоянии для коммутатора HP321 приведена на рис. 5б. Очень высокие потери характерны

для низких частот, где влияние паразитных емкостей минимально.

Монтаж коммутатора HP321 на печатную микросхему с радиочастотными разъемами показан на рис. 6. Все проводники выполнены в виде микрополосковых линий передачи со стандартным волновым сопротивлением 50 Ом. Конденсаторы C1–C9 бескорпусные с емкостью 100 пФ, ВЧ-разъемы типа SMA RF.

### Сверхширокополосные микросхемы коммутаторов

Более широкополосная микросхема HMC641LP4E (рис. 7) — GaAs MMIC SP4T неотражающий переключатель сигналов с полосой частот 0–20 ГГц. Микросхема также выполнена в SMT-корпусе типа LP4E. Выводы, не подключаемые к общему выводу, подключаются к согласующим резисторам с сопротивлением 50 Ом, что существенно уменьшает отражения по сравнению с ранее описанной микросхемой.

Частотная зависимость коэффициента передачи во включенном состоянии коммутатора HMC641 показана на рис. 8а. Ввиду широкой полосы частот коммутируемого сигнала эта зависимость имеет заметную неравномерность и немонотонный характер, а на частотах выше 20 ГГц демонстрирует довольно резкий спад. В режиме выключения коэффициент передачи во всей полосе частот составляет не более -40 дБ и также сильно зависит от частоты (рис. 8б).

Печатная плата модуля коммутатора с микросхемой HMC641 показана на рис. 9. Подключение входов и выходов осуществляется с помощью согласованных линий передачи. Отрезок такой линии, предназначенный для ее отдельного тестирования, создан в правой части платы. Плата упрощена и имеет единственный блокирующий конденсатор C1 с емкостью 1000 пФ.

Многие микросхемы коммутаторов выполняются в бескорпусном исполнении (в виде чипов). Сверхминиатюрные размеры таких микросхем и очень малые паразитные реак-

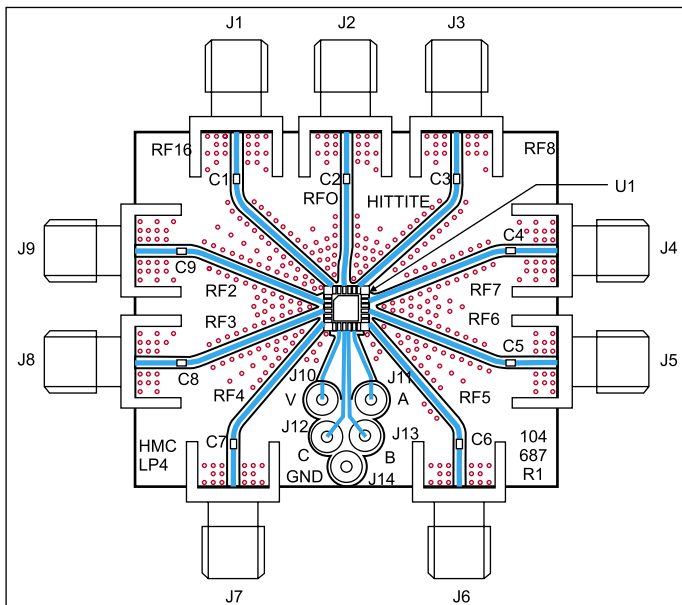


Рис. 6. Печатная микросхема с коммутатором HP321

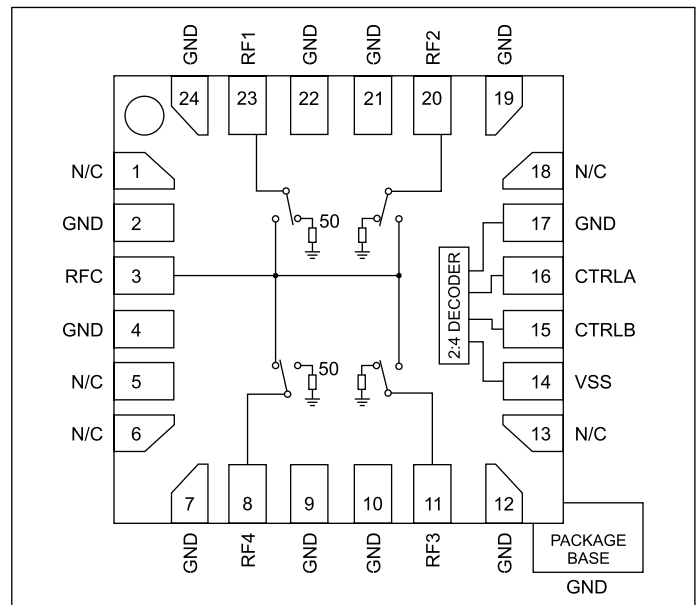


Рис. 7. Функциональная диаграмма широкополосного коммутатора HMC641LP4E

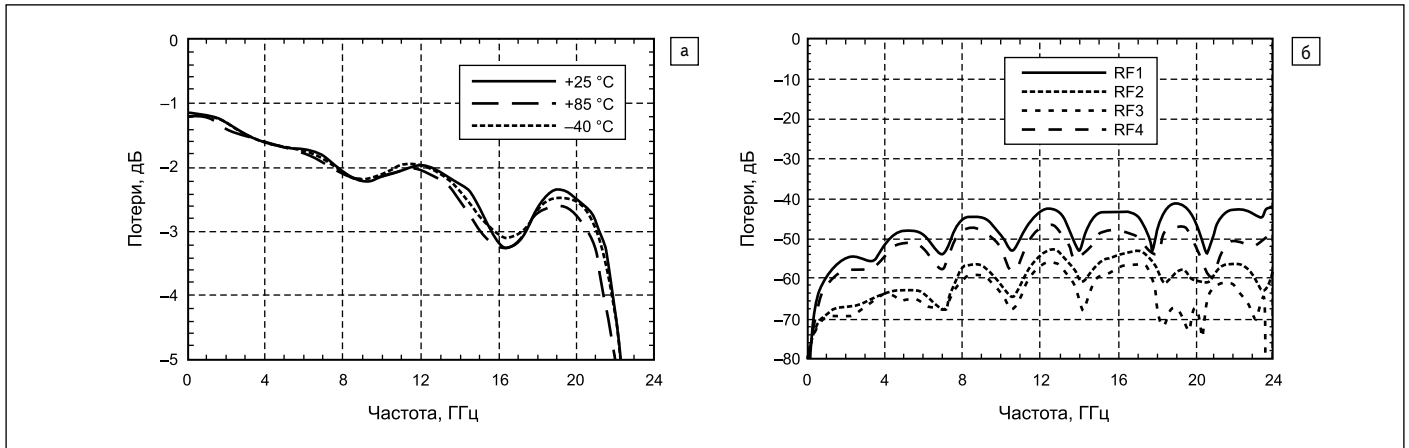


Рис. 8. Зависимость коэффициента передачи коммутатора HMC641: а) во включенном состоянии; б) от частоты в выключенном состоянии

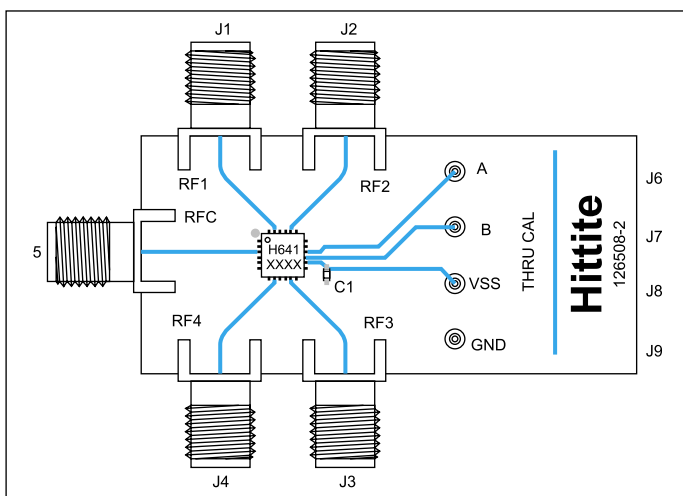


Рис. 9. Монтаж микросхемы коммутатора HMC641 на печатной плате

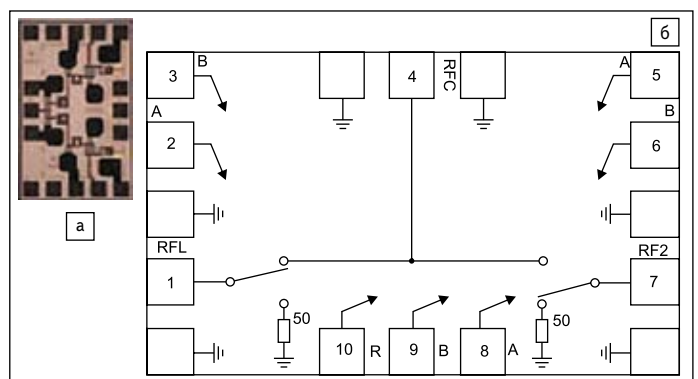


Рис. 10. Широкополосный коммутатор HMC347: а) бескорпусная микросхема; б) функциональная диаграмма

тивности позволяют расширить диапазон частот коммутируемых сигналов. Микросхема HMC347 (рис. 10а) — это мало отражающий коммутатор класса SPDT Non-Reflective Switch Chip с полосой частот коммутируемых сигналов 0–20 ГГц. Микросхема предназначена для поверхностного монтажа на печатную плату.

Функциональная диаграмма широкополосного коммутатора HMC347 показана на рис. 10б. Из этой диаграммы назначение микросхемы вполне очевидно и в дополнительном описании не нуждается.

Зависимость потерь во включенном состоянии коммутатора HMC641, показанная на рис. 8, свидетельствует о существенно улучшенной равномерности коэффициента передачи этой микросхемы по сравнению с той же зависимостью для микросхемы HMC347, выполненной в миниатюрном корпусе (рис. 11а). В частности, волнистость характеристики полностью отсутствует: виден лишь едва заметный провал в области частот около 12 ГГц.

То же можно сказать в отношении зависимости коэффициента передачи от частоты в выключенном состоянии (рис. 11б). Характерный резкий минимум этой зависимости виден лишь за пределами рабочего диапазона частот — на частоте около 22 ГГц.

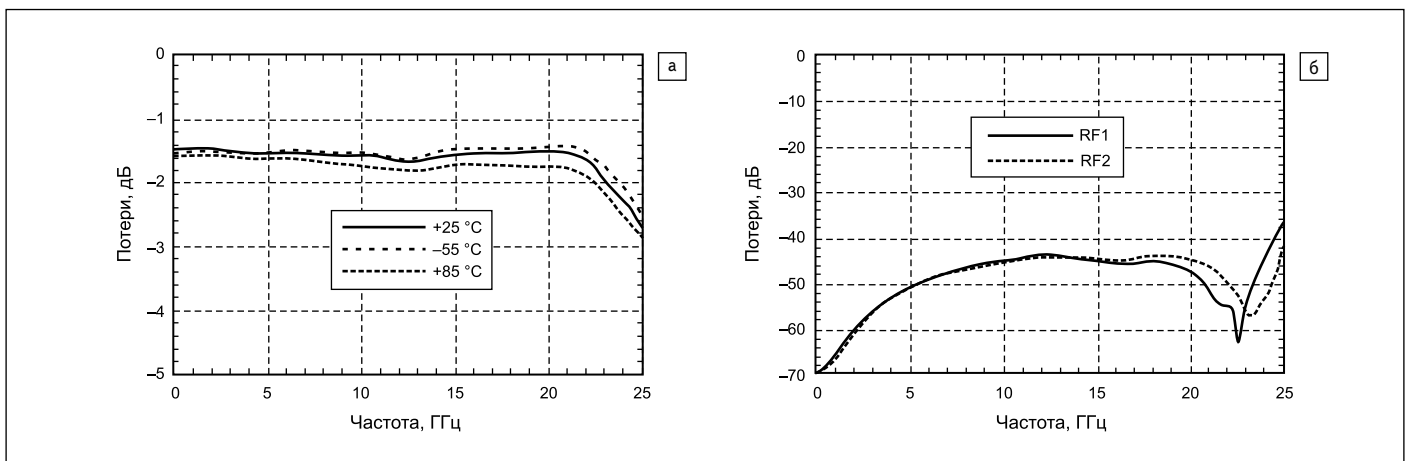


Рис. 11. Зависимость коэффициента передачи коммутатора HMC641: а) во включенном состоянии; б) в выключенном состоянии от частоты

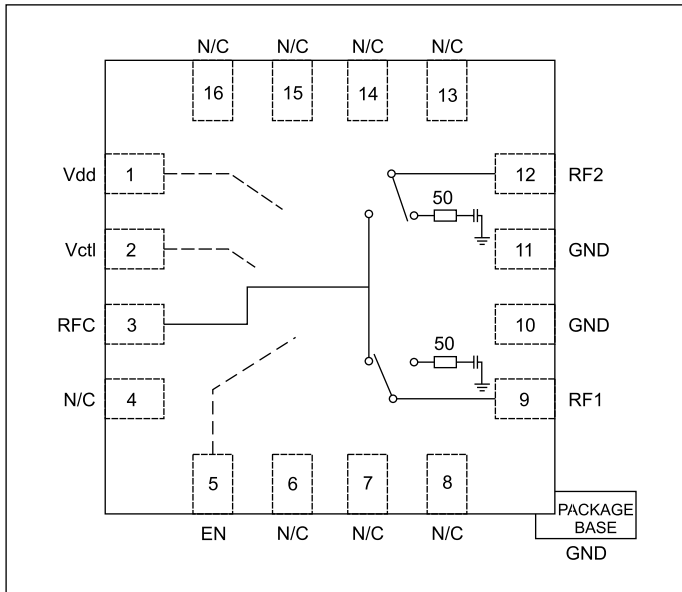


Рис. 12. Функциональная диаграмма широкополосного коммутатора HMC349

Как видно из приведенных примеров, микросхемы коммутаторов на GaAs-транзисторах имеют заметное ослабление при включенном состоянии цепей коммутации. Это связано с работой на низкоомную (обычно 50 или 75 Ом) нагрузку и с конечным сопротивлением включенного транзистора. С другой стороны, ослабление в выключенном состоянии недостаточно велико из-за наличия паразитных емкостей в структуре микросхем. Это говорит о необходимости тщательной оптимизации схем. Она удорожает микросхемы и сужает их диапазон частот.

### Микросхемы коммутаторов с улучшенными показателями

Среди микросхем коммутаторов есть ряд образцов с рекордными показателями во включенном и выключенном состоянии. Например, микросхема HMC349 (рис. 12) имеет коэффициент передачи всего в  $-0,9$  дБ на частоте 1 ГГц при частотном диапазоне 0–4 ГГц.

Зависимость коэффициента передачи во включенном состоянии коммутатора HMC349 показана на рис. 13а. Она монотонная и не имеет признаков колебаний. Частотные зависимости коэффициента передачи в выключенном состоянии для коммутатора HMC349 показаны на рис. 13б. Потери в этом случае велики и свидетельствуют о высокой степени изоляции отключаемых выводов.

В более узком диапазоне частот 0–2,5 ГГц еще лучшие показатели имеет микросхема коммутатора HMC348LP3/HMC348LP3E. Она дает ослабление сигнала во включенном состоянии  $-0,6$  дБ и в выключенном состоянии  $-55$  дБ на частоте 1 ГГц и даже  $-80$  дБ в выключенном состоянии на частоте 2,5 ГГц. Столь высокое ослабление сигнала достигается в достаточно широкой (хотя и не рекордной для микросхем компании Hittite Microwave) полосе частот.

### Микросхемы коммутаторов с повышенной мощностью коммутируемых сигналов

В ряде применений коммутаторов необходимо коммутировать сигналы достаточно высоких уровней — с мощностью, не выходящей приборы из строя, до десятков ватт. Hittite Microwave выпускает ряд микросхем коммутаторов такого рода, именуемых Filesafe Switch.

Функциональная диаграмма одной из таких микросхем GaAs MMIC 40W Filesafe Switch HMC646LP2/646LP2E представлена на рис. 14. Рабочие состояния микросхемы представлены в таблице 3. Напряжение питания микросхем Vdd —  $+3...+8$  В. Управляющее на-

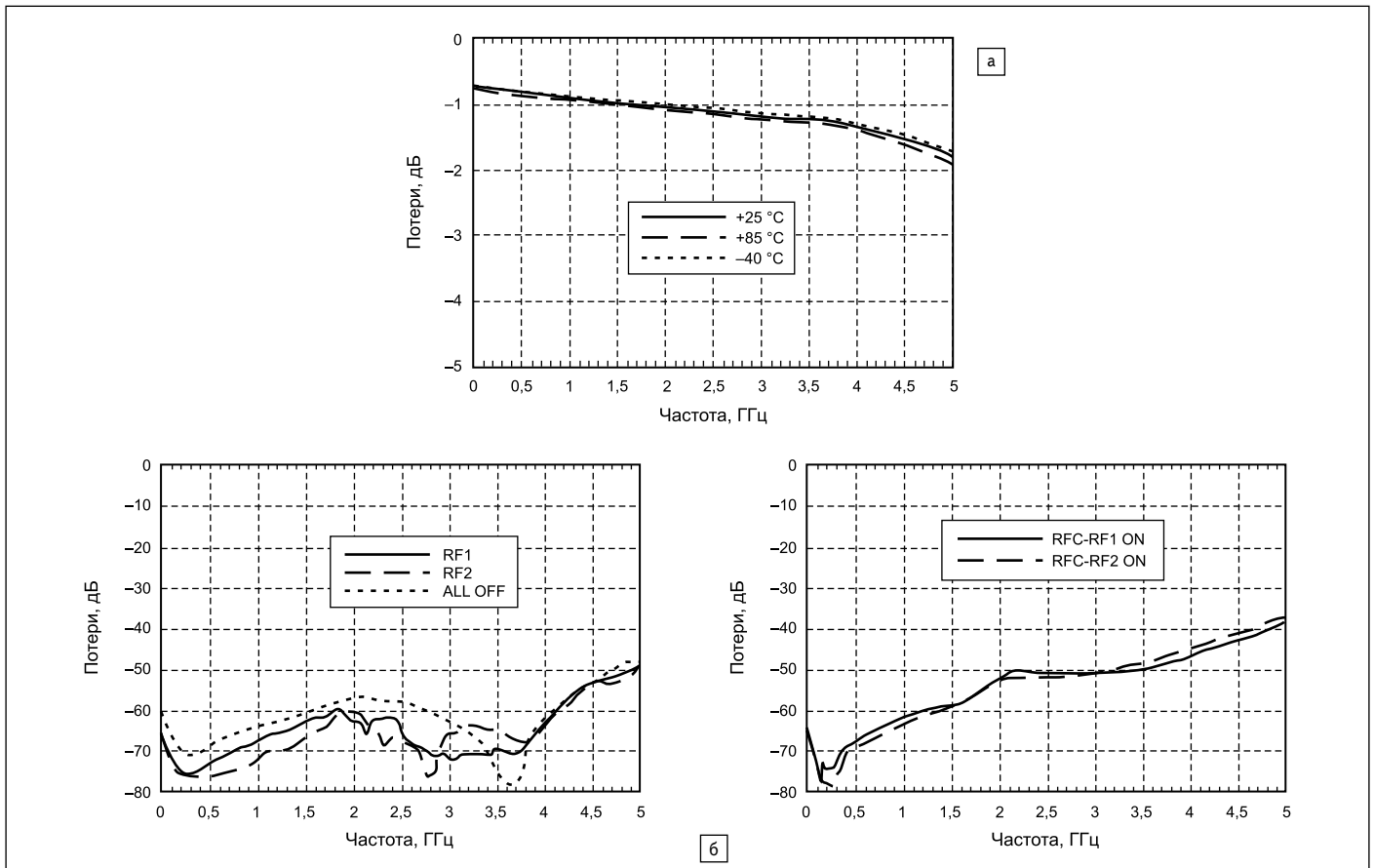


Рис. 13. Зависимость коэффициента передачи коммутатора HMC349: а) во включенном состоянии; б) в выключенном состоянии

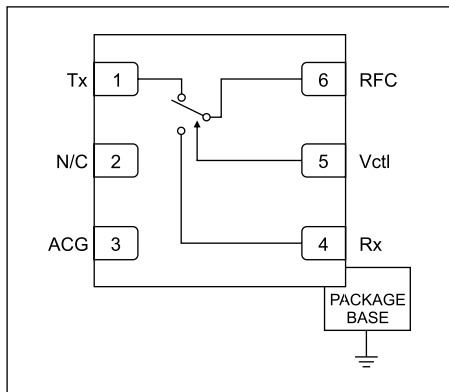


Рис. 14. Функциональная диаграмма микросхемы HMC646LP2/646LP2E

Таблица 3. Рабочие состояния микросхемы HMC646LP2/646LP2E

Управляющее напряжение		Состояние	
Vctl	Vdd	RFC – Tx	RFC – Rx
0	0	Вкл.	Выкл.
0	Vdd	Выкл.	Вкл.
Vdd	Vdd	Вкл.	Выкл.

пряжение  $V_{ctl} = \pm 0,2V_{dc}$ . Микросхема имеет сигнальные порты RFC, Tx и Rx.

В отличие от описанных выше аperiodических микросхем такие микросхемы имеют LC-резонансные цепи, хорошо согласующие импеданс, но в узком частотном диапазоне частот. Типичная схема включения микросхем HMC646LP2/646LP2E показана на рис. 15. В таблице 4 представлены номиналы ее компонентов на трех частотах при общем диапазоне 0,1–2,2 ГГц. Монтаж микросхемы HMC646LP2/646LP2E на печатную плату представлен на рис. 16.

Таблица 4. Номиналы компонентов схемы, приведенной на рис. 15

Частота	0,915 ГГц	1,6 ГГц	2,015 ГГц
C1, C3, C5, пФ	1000	330	330
C2, пФ	2,7	1,5	1,1
C4, пФ	1000	100	100
C6, пФ	1,8	0,5	0,5
C7, пФ	15	4,7	2,7
L1, нГ	15	3,9	1,8
L2, нГ	9	4,3	3,3
R1, кОм	10	10	10

Зависимости коэффициента передачи (потерь) для микросхем HMC646LP2/646LP2E во включенном и выключенном состоянии показаны на рис. 17.

У этой микросхемы не повреждающая ее мощность сигнала достигает 40 Вт. Мощность до 20 Вт обеспечивает микросхема HMC546MS8G/HMC546MS8GE. Диапазон частот коммутируемых сигналов у этой микросхемы 0,2–2,2 ГГц.

Микросхема HMC784MS8GE SPDT, 10W, T/R (рис. 18a) выполнена в миниатюрном корпусе с малоиндуктивными балочными

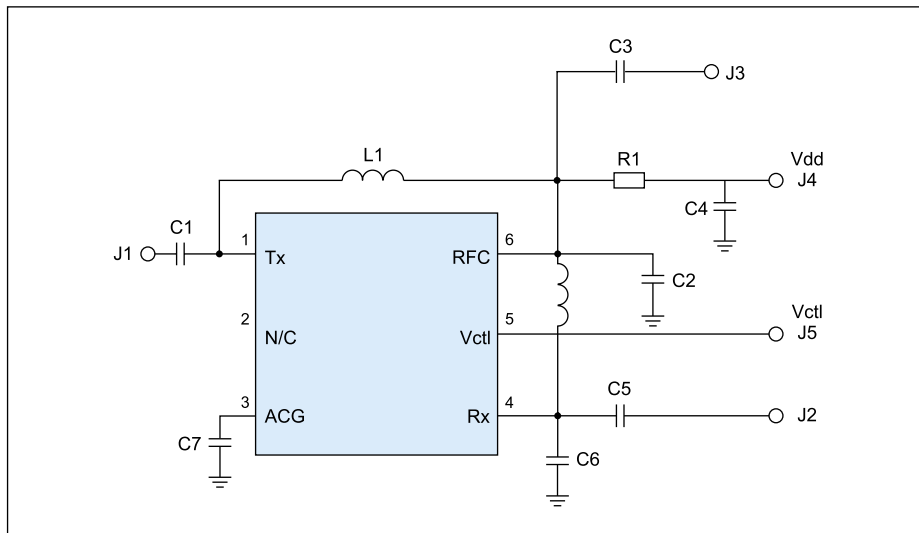


Рис. 15. Принципиальная схема включения микросхем HMC646LP2/646LP2E

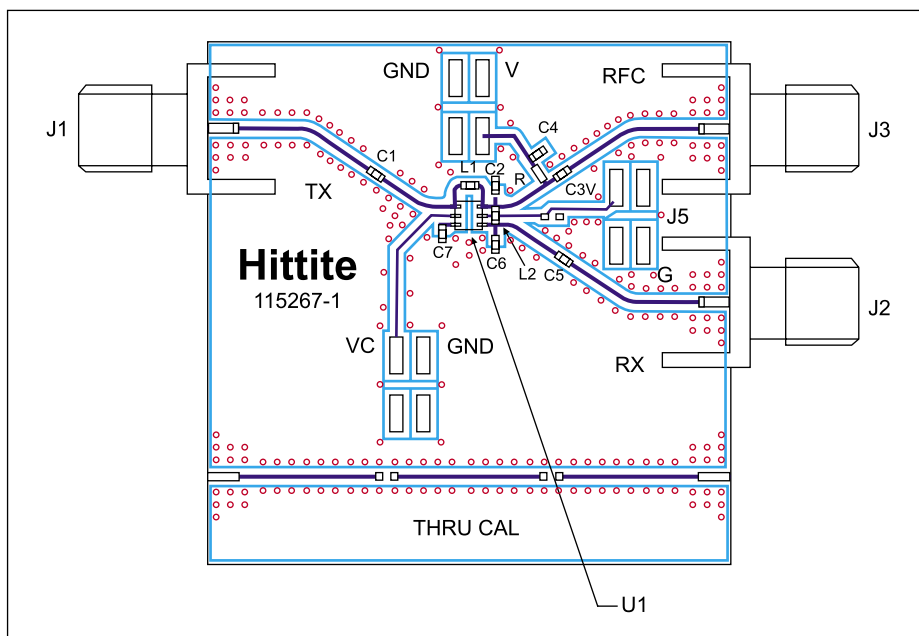


Рис. 16. Монтаж микросхемы HMC646LP2/646LP2E на печатную плату

выводами. В полосе частот 0–4 ГГц она обеспечивает коммутацию СВЧ-сигналов с неповреждающей мощностью до 10 Вт.

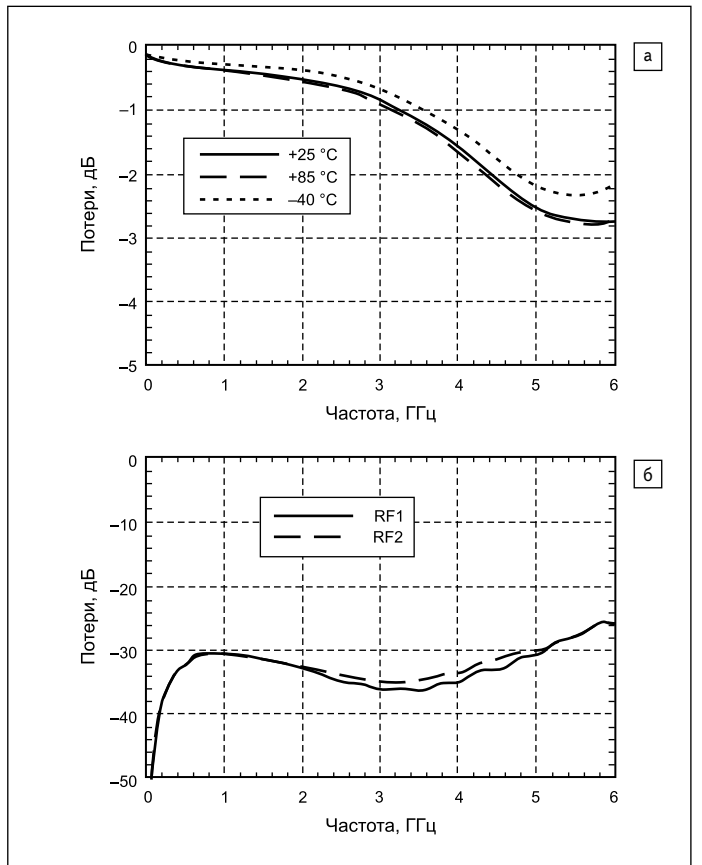
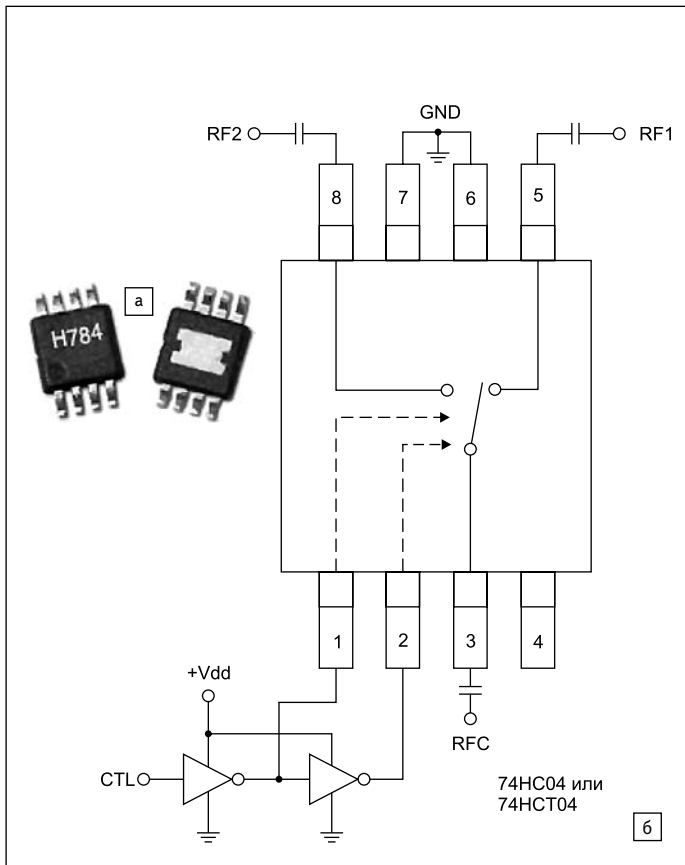
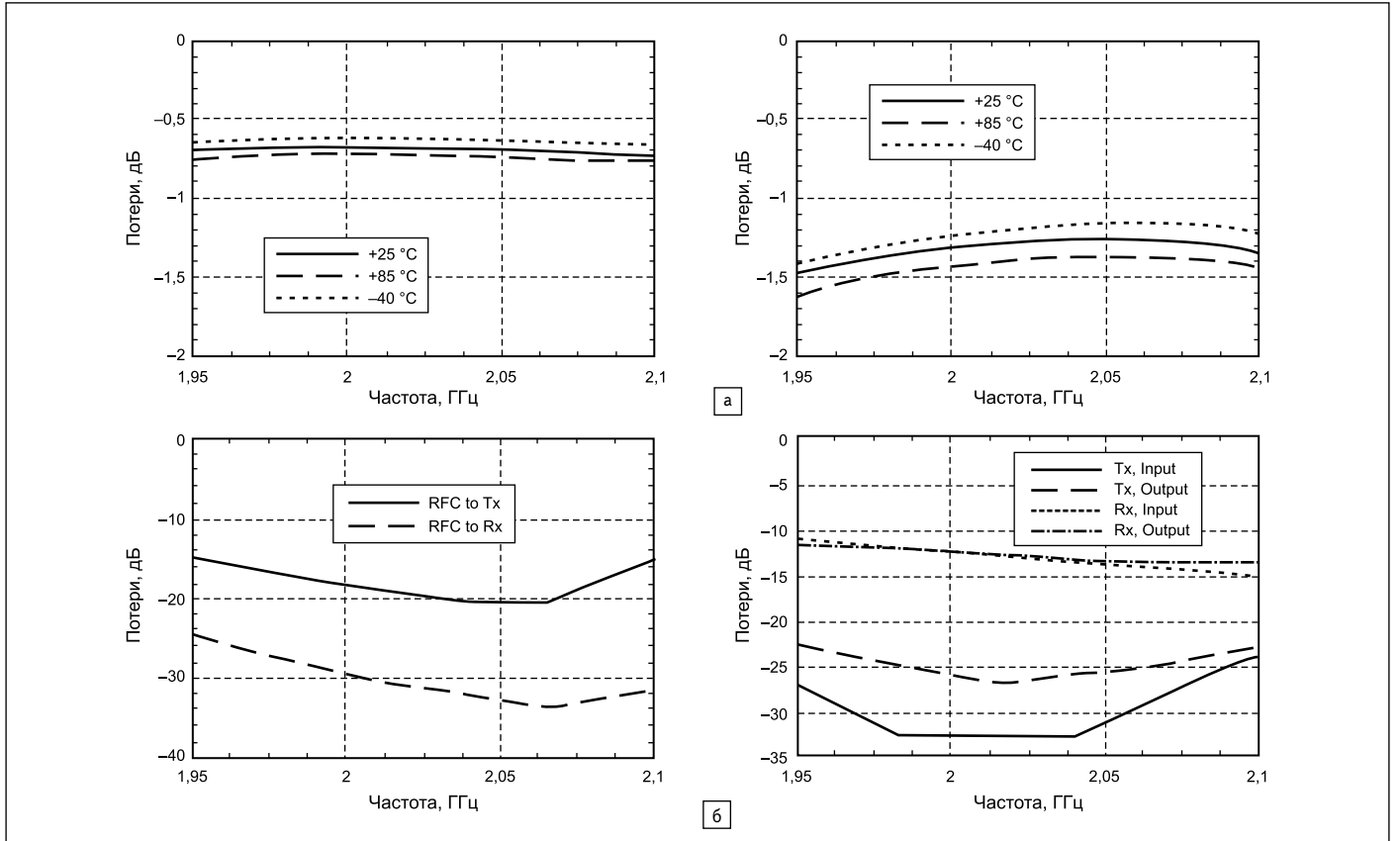
Типовая схема включения микросхемы представлена на рис. 18б. Она не содержит резонансных цепей с индуктивными элементами, что является ее несомненным достоинством.

На рис. 19 представлены типовые зависимости потерь микросхемы HMC784MS8GE во включенном и выключенном состояниях. Во включенном состоянии потери малы до частоты примерно 3 ГГц. Зависимость потерь от частоты гладкая и резонансных явлений не выявляет. В спецификации микросхемы есть обширные данные по параметрам, характеризующим ее нелинейные свойства при большой мощности коммутируемых СВЧ-сигналов.

Монтаж микросхемы на печатную плату представлен на рис. 20. Бескорпусные разделительные конденсаторы C1–C3 имеют номинал емкости в 100 пФ, блокирующий конденсатор C4 — 10 нФ. Применены бескорпусные резисторы с номиналом в 100 Ом.

### Микросхемы СВЧ-коммутаторов на p-i-n-диодах

Микросхемы коммутаторов на полевых GaAs-транзисторах имеют важное достоинство: по цепям управления они потребляют очень малый ток. Однако максимальные частоты коммутируемых сигналов у них ограничены примерно 20 ГГц. Существенно более высокие частоты имеют микросхемы коммутаторов на p-i-n-диодах. Такие GaAs-диоды имеют очень малые разме-



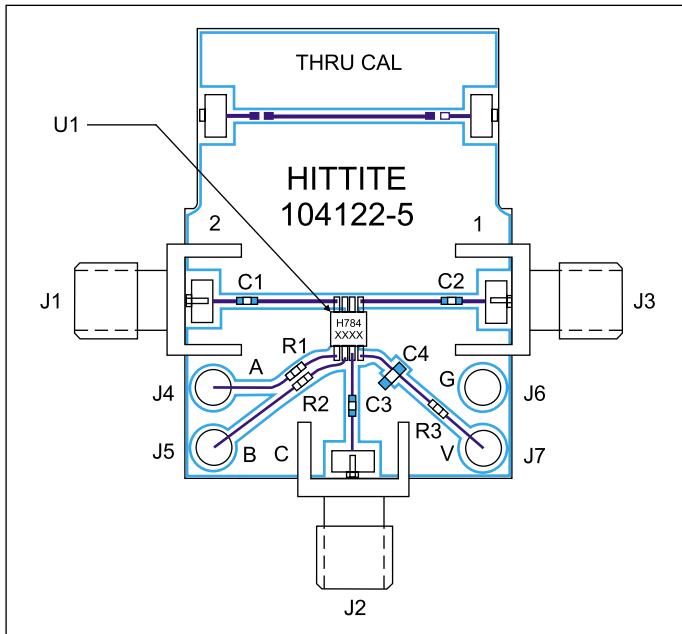


Рис. 20. Монтаж микросхемы HMC784MS8GE на печатную плату

ры  $i$ -области и малые собственные емкости. При пропускании через них прямого тока дифференциальное сопротивление диодов падает до единиц Ом и менее, что и положено в основу коммутации сигналов.

На рис. 21 показана функциональная диаграмма микросхемы HMC975, которая является коммутатором сверхширокополосных сигналов с полосой частот 2–50 ГГц. Микросхема имеет бескорпусное оформление и очень малые размеры: 1,75×1,1×0,1 мм.

Функциональная схема этой микросхемы представлена на рис. 22. Здесь стоит обратить внимание на организацию радиочастотных выводов. Даже внутри микросхемы она реализована в виде микрополосковых линий передачи, обеспечивающих максимально возможное согласование с расчетными сопротивлениями в 50 Ом.

Микросхема коммутатора подключается к внешним цепям с помощью микрополосковых широкополосных линий передачи. Схема подключения показана на рис. 23. Для уменьшения паразитной индуктивности золотых проводников они выполнены на основе параллельного включения двух проводников.

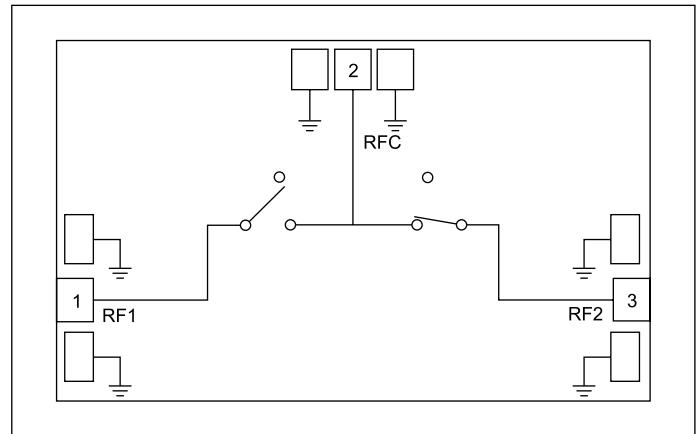


Рис. 21. Функциональная диаграмма микросхемы HMC975

На рис. 24а приведены зависимости коэффициентов передачи при включенном состоянии. На низкочастотной границе рабочего диапазона коммутируемых сигналов коэффициент передачи составляет менее –0,5 дБ и почти монотонно растет с повышением частоты до 50 ГГц.

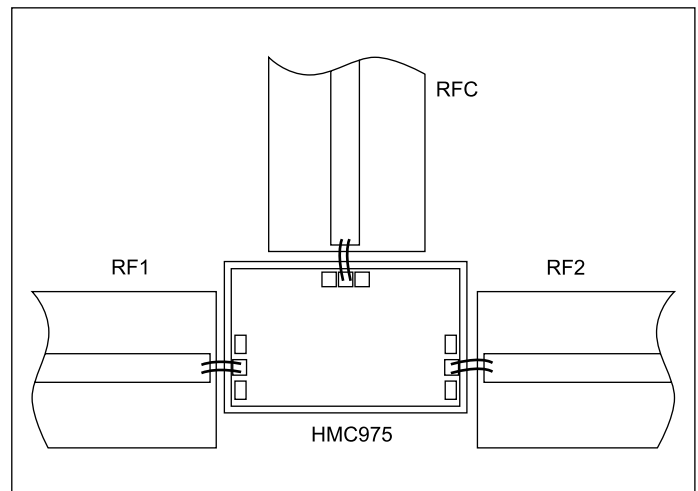


Рис. 23. Подключение микросхемы HMC975 к микрополосковым линиям передачи

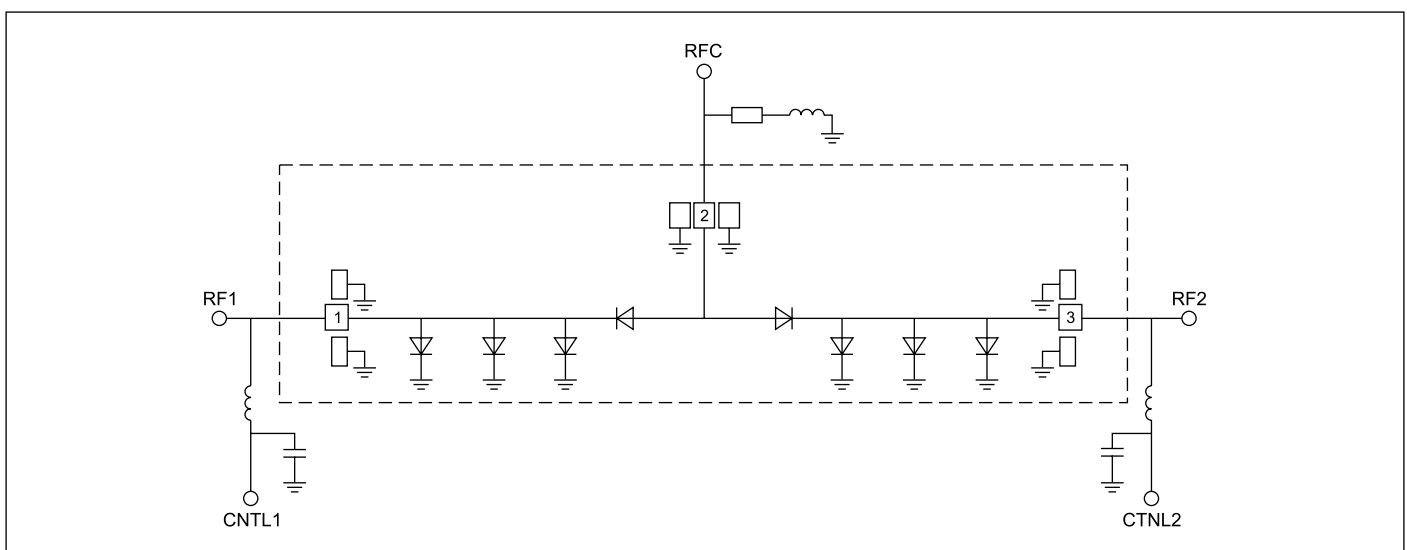


Рис. 22. Функциональная схема микросхемы HMC975



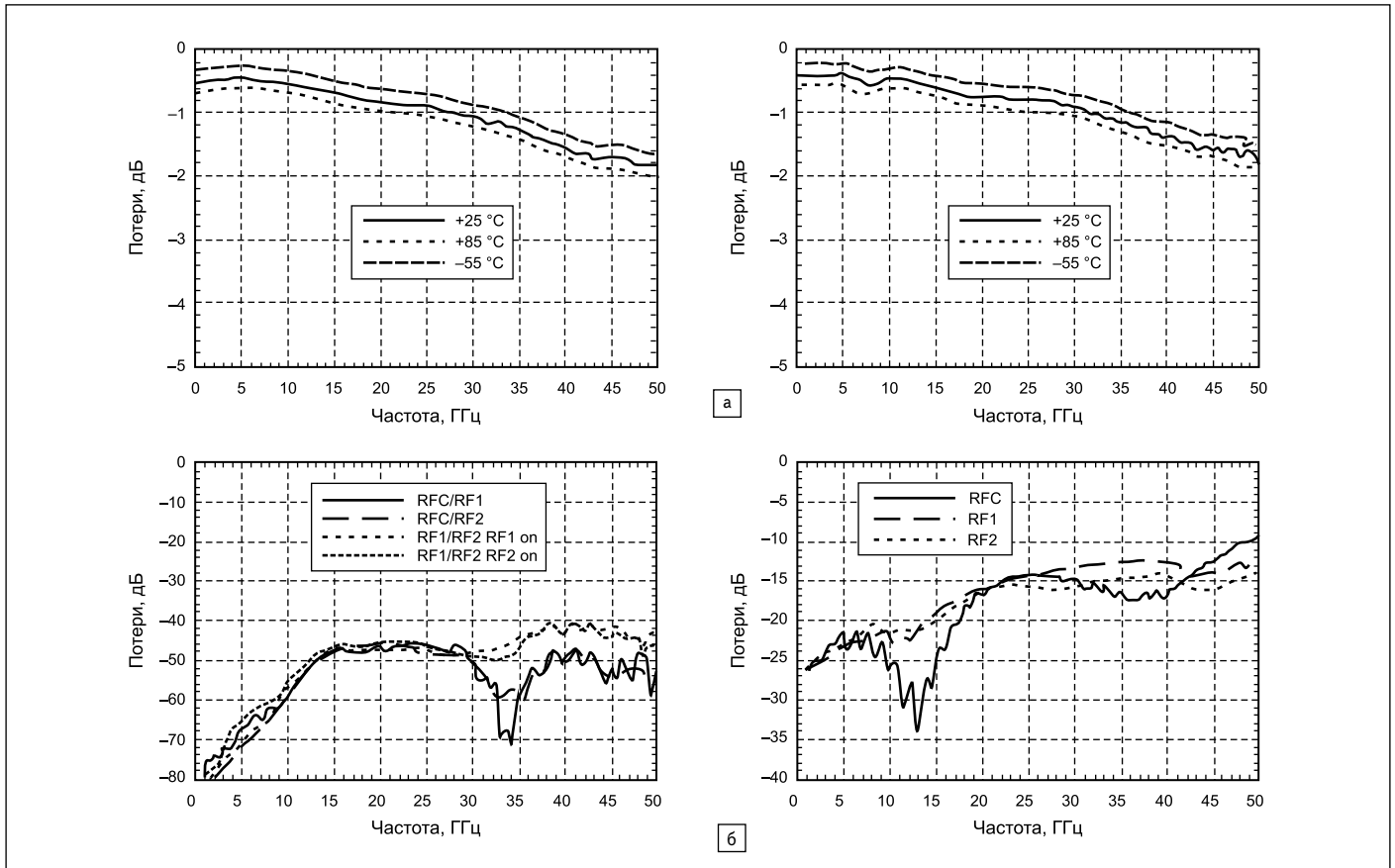


Рис. 24. Зависимости коэффициентов передачи HMC975: а) при включенном состоянии; б) при выключенном состоянии

Зависимости коэффициентов передачи при выключенном состоянии показаны на рис. 24б. Они различны для левой и правой части функциональной схемы коммутатора.

На рис. 25 показан вид микросхемы HMC971, выполненной в бескорпусном оформлении. Ее размеры  $2,21 \times 1,26 \times 0,1$  мм (меньше спичечной головки).

Функциональная схема микросхемы HMC971 приведена на рис. 26. Здесь ра-

диочастотные выводы также реализованы в виде микрополосковых линий передачи. Подключение микросхемы HMC971 к внешним цепям представлено на рис. 27.

Зависимость коэффициента передачи при включенном состоянии микросхемы HMC971 от частоты показана на рис. 28а при различных значениях температуры окружающей среды, а частотная зависимость в выключенном состоянии — на рис. 28б.

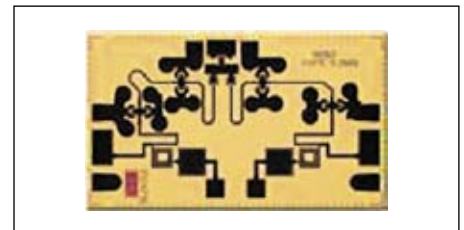


Рис. 25. Вид бескорпусной микросхемы HMC971

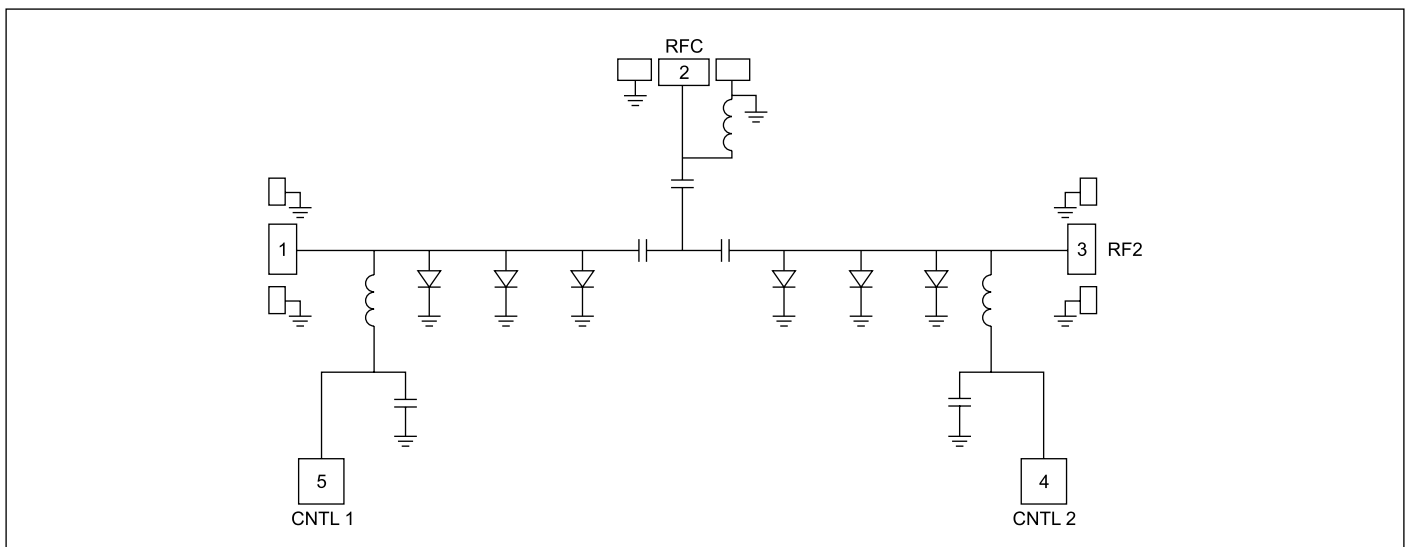


Рис. 26. Функциональная схема микросхемы HMC971

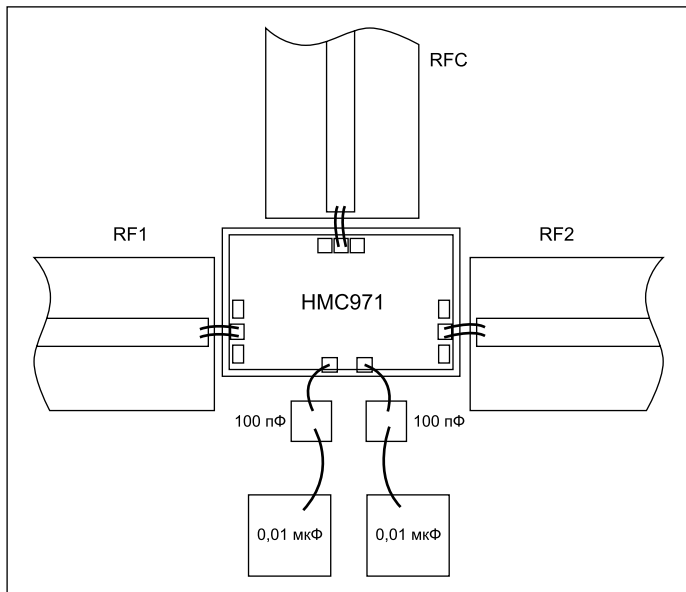


Рис. 27. Подключение микросхемы HMC971

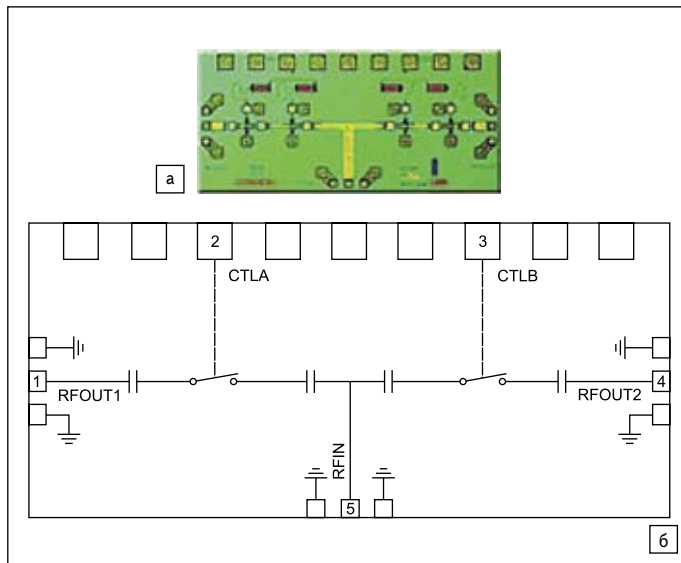


Рис. 29. СВЧ-коммутатор HMC SDD112: а) бескорпусная микросхема; б) функциональная диаграмма

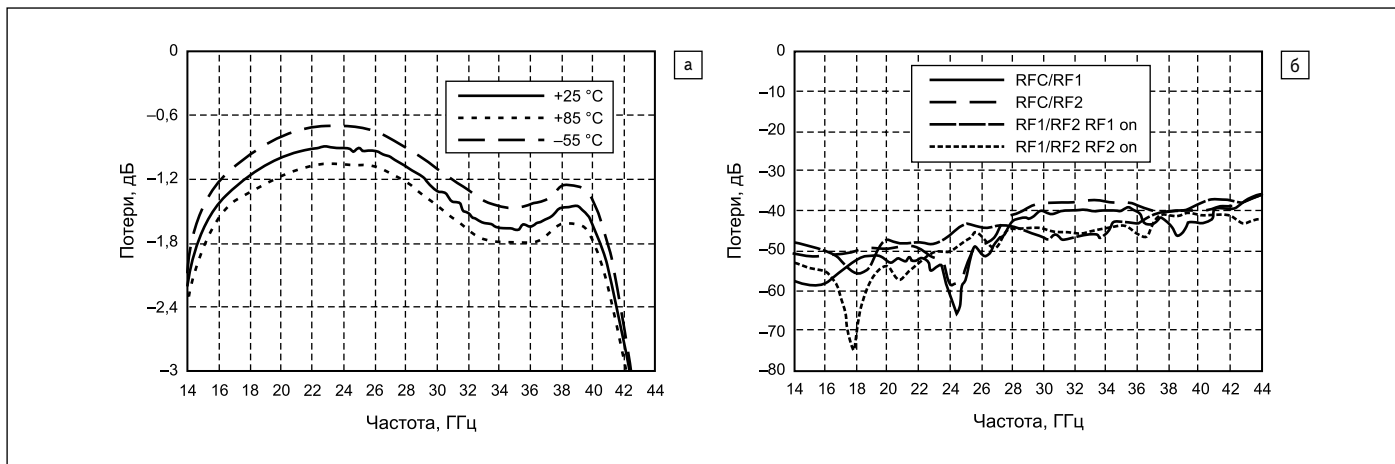


Рис. 28. Зависимость коэффициента передачи микросхемы HMC971: а) при включенном состоянии; б) при выключенном состоянии

Наиболее высокочастотной микросхемой коммутатора SPDT SWITCH является HMC SDD112 (полоса частот 55–86 ГГц). Она выпускается в бескорпусном исполнении (рис. 29а) и имеет размеры 2,01×0,975×0,1 мм.

Функциональная диаграмма СВЧ-коммутатора HMC SDD112 приведена на рис. 29б. Управляющее напряжение этой микросхемы –5/+5 В, коэффициент передачи во включенном состоянии –2 дБ, в выключенном — –30 дБ.

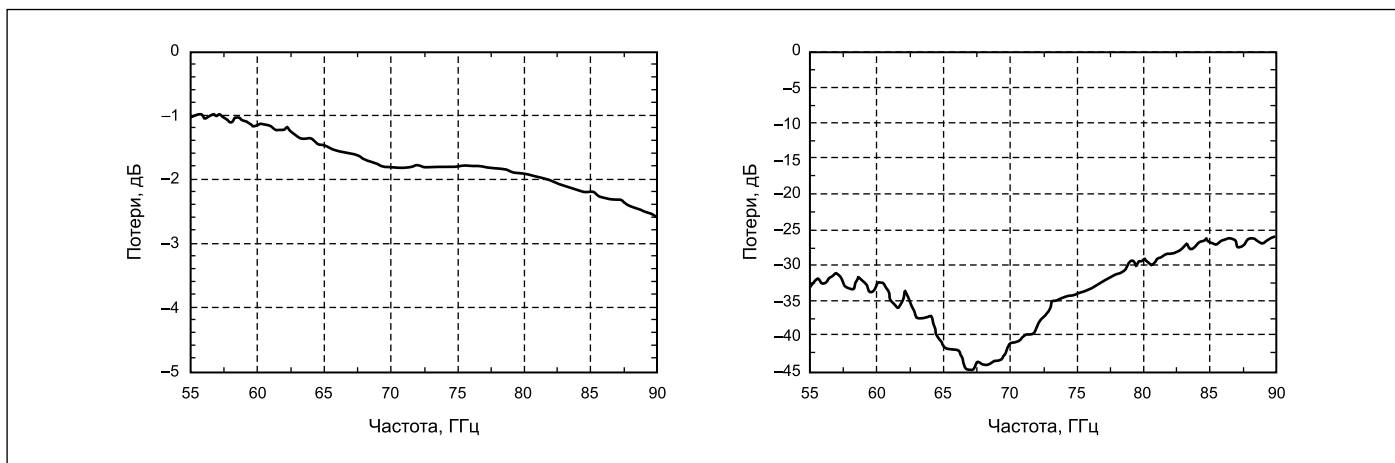


Рис. 30. Типовые частотные зависимости потерь при включенном и выключенном состоянии микросхемы HMC971

Типовые зависимости от частоты потерь при включенном и выключенном состоянии микросхемы НМС971 показаны на рис. 30. Типичное подключение микросхемы к отрезкам линий передачи и к источникам управляющих сигналов приведено на рис. 31.

### Заключение

Монолитные микросхемы коммутаторов корпорации Hittite Microwave многократно превосходят коммутаторы на основе обычных коаксиальных конструкций [4] по массо-габаритным показателям и частотному диапазону коммутируемых СВЧ-сигналов. Они не уступают им по коэффициенту передачи во включенном состоянии. В то же время ослабление в выключенном состоянии у них все же меньше, чем у обычных коммутаторов на полевых транзисторах и *p-i-n*-диодах. Это обусловлено ограниченными возможностями качественного экранирования цепей и отдельных их компонентов в монолитных микросхемах и влиянием паразитных емкостей их структур, расположенных очень близко друг от друга. Тем не менее перспективность монолитных микросхем коммутаторов СВЧ-сигналов очевидна, и продукция корпорации Hittite Microwave является этому наглядным подтверждением. ■

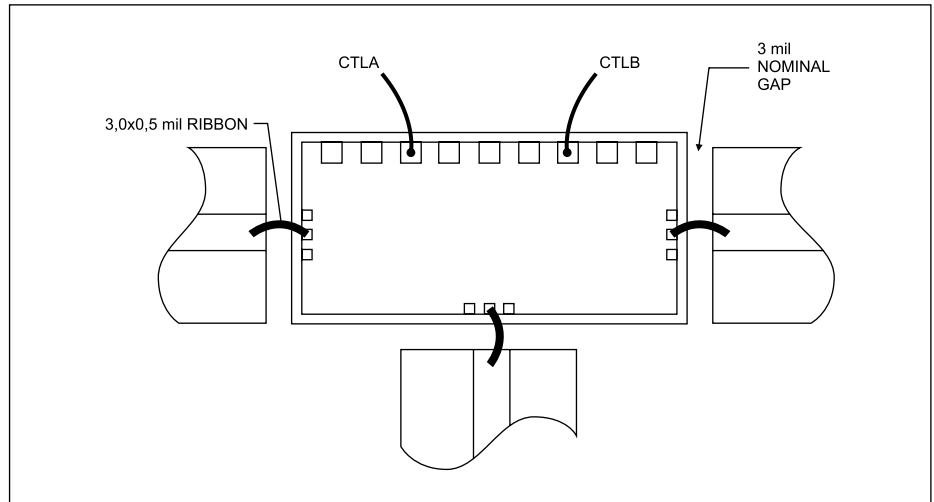


Рис. 31. Подключение микросхемы к отрезкам линий передачи и источникам управляющих сигналов

### Литература

1. [www.hittite.com](http://www.hittite.com)
2. Дьяконов В. П. Пикосекундные цифровые монолитные микросхемы корпорации Hittite Microwave // Компоненты и технологии. № 9. 2011.
3. Дьяконов В. П. Монолитные СВЧ-микросхемы аттенуаторов и усилителей компании Hittite Microwave // Компоненты и технологии. 2011. № 10.
4. Дьяконов В. П. СВЧ-аксессуары фирмы Agilent Technologies // Компоненты и технологии. 2011. № 9.
5. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике. М.: ДМК-Пресс. 2011.