

# Пикосекундные цифровые монолитные микросхемы корпорации Hittite Microwave

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

Цифровые и логические микросхемы — основа множества современных вычислительных устройств, средств связи и приборов научного приборостроения.

Американская компания Hittite Microwave [1] выпускает обширную номенклатуру сверхскоростных цифровых и логических (High Speed Digital Logic) монолитных микросхем пикосекундного диапазона. К ним фирма относит следующие устройства:

- Clock Dividers — делители частоты тактовых импульсов;
- Fanout Buffers — быстродействующие буферы;
- Flip-Flops — высокоскоростные триггеры;
- Logic Gates — высокоскоростные логические устройства;
- NRZ-to-RZ Converters — конверторы NRZ в RZ;
- Selectors — селекторные устройства.

Микросхемы Clock Dividers — это делители частоты тактовых импульсов, задающих временную последовательность логических и цифровых устройств. Основные характеристики делителей частоты для логических устройств приведены в таблице 1. Микросхемы выпускаются с коэффициентом деления 2, 4 и 8 и способны работать с очень высокими частотами в 26 и 28 ГГц.

Микросхемы выполнены в сверхминиатюрных керамических корпусах (рис. 1), рассчитанных на поверхностный монтаж, дающий минимальную паразитную индуктивность выводов. Тип корпуса указан в конце наименования микросхемы. Подробные данные о его размерах и конструкции приведены в фирменном описании (datasheet) микросхемы (это относится и к другим, описанным далее микросхемам).



Рис. 1. Корпус LC4B микросхемы HMC791LC4B

Типовая схема включения HMC791LC4B — делителя частоты в 4 раза — изображена на рис. 2. Внутри корпуса показана функциональная диаграмма этой микросхемы.

На схеме видно, что наряду с делителями (на основе триггера со счетным запуском) в состав микросхемы входят входной и выходной сверхширокополосные усилители

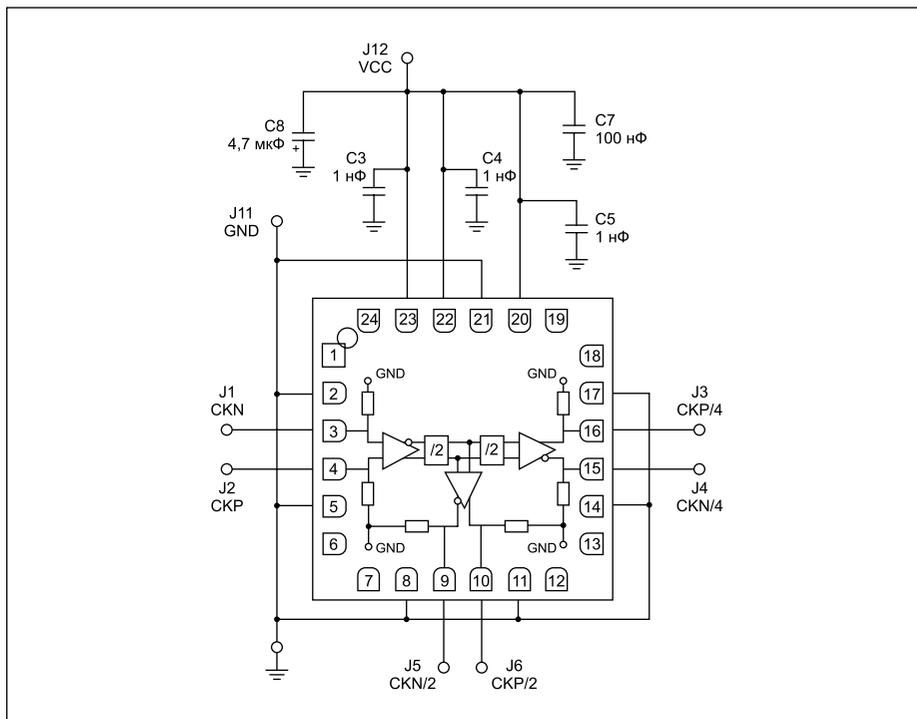


Рис. 2. Типовая схема включения микросхемы HMC791LC4B

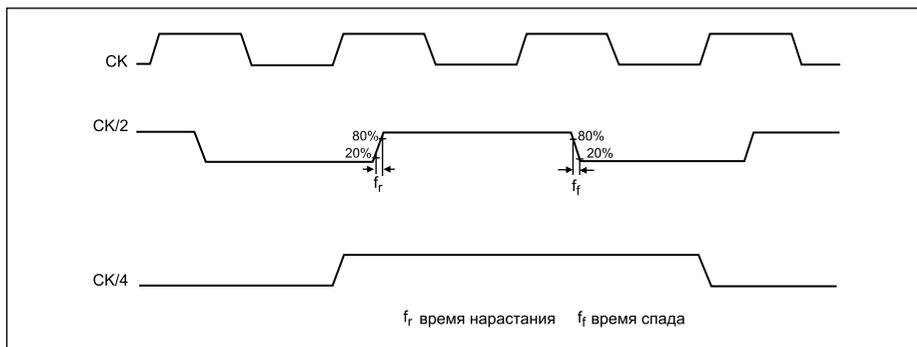


Рис. 3. Временные диаграммы работы микросхемы HMC791LC4B

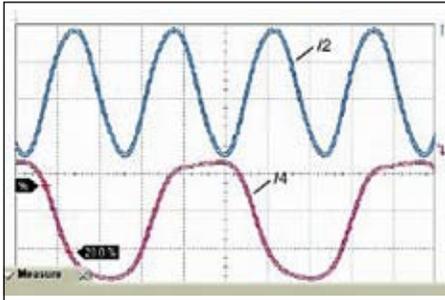


Рис. 4. Осциллограммы выходных сигналов HMC791LC4B

с дифференциальными входом и выходом. Именно они обеспечивают очень малое время нарастания и спада выходных импульсов. Дифференциальный вход и выход обеспечивают возможность работы как с однопроводными линиями передачи, так и с 2-проводными линиями — типа «витая пара». Волновое сопротивление таких трактов 50 Ом.

Временные диаграммы работы микросхем представлены на рис. 3. Они характерны для делителей частоты.

Реальные осциллограммы импульсов при работе микросхем на близкой к предельной частоте входных импульсов показаны на рис. 4. Судя по данным (табл. 1), микросхема обеспечивает на стандартной нагрузке 50 Ом очень малое время нарастания (12 пс) и спада (14 пс) выходных импульсов. Форма выходных импульсов близка к технически прямоугольной.

Монтаж микросхемы HMC791LC4B на печатной плате (рис. 5) — вполне обычный для скоростных микросхем: дифференциальные входы и выходы подключаются через 50-омные линии, работающие в режиме со-

Таблица 1. Делители частот тактовых импульсов

Тип микросхемы	Скорость, Гбит / частота, ГГц	Делитель	Время роста/спада, пс	$V_{OUT}$ , Вп-п	$P_{потр}$ , мВт	$V_{дп}$ , В
HMC791LC4B	28/28	2/4	12/14	0,6	660	-3,3
HMC859LC3	-/26	8	9/17	0,8-1,8	320	
HMC959LC3		4	19/19		281	

Таблица 2. Высокоскоростные буферные каскады

Тип микросхемы	Скорость, Гбит / частота, ГГц	Вход/выход	Время роста/спада, пс	$V_{OUT}$ , Вп-п	$P_{потр}$ , мВт	$V_{дп}$ , В
HMC670LC3C	13/13	1:2	24/22	1,1	250	-3,3
HMC720LC3C		1:2 FR	19/18	0,6-1,1	300	
HMC720LP3E		1:2 FE		1,1		
HMC724LC3C		1:2 FR	22/20	0,6-1,2	290	+3,3
HMC842LC4B		45/28	1:2	11/11	0,4-1,2	465
HMC850LC3C	28/20	16/15		0,6-1,1	315	
HMC940LC4B	13/13	1:4		26/25	0,6-1,4	440

гласования. Образцовый отрезок такой полосковой линии создан в верхней части платы. Его можно использовать для тестирования полосковых линий платы.

В сложных логических и цифровых устройствах наряду с логическими микросхемами широко применяются буферные каскады. Корпорация Hittite Microwave выпускает ряд таких высокоскоростных микросхем (табл. 2). Те из них, что дают быстрое время нарастания (Fast Rise), отмечены сокращением FR.

Типичная схема включения буферной микросхемы HMC842LC4B приведена на рис. 6. Там же (в корпусе) показана функциональная диаграмма микросхемы. Она состоит из ряда сверхширокополосных усилителей с дифференциальными входами и выходами, согласованными с 50-омными резисторами.

Временные диаграммы работы микросхемы представлены на рис. 7, а на рис. 8 показан чертеж печатной платы с микросхе-

мой HMC842LC4B. Микросхема способна работать с частотой до 28 ГГц и передавать данные, следующие с рекордной скоростью передачи — до 45 Гбит/с.

Hittite Microwave выпускает ряд триггерных микросхем сверхвысокого быстродействия — с рабочей частотой от 13 до 46 ГГц. Реализованы различные типы триггеров: типа D и T, с цепью сброса на ноль Reset и др. Основные характеристики триггерных микросхем представлены в таблице 3. Часть микросхем имеет программируемое выходное напряжение: у них указывается интервал значений  $V_{OUT}$  (от пика до пика).

На рис. 9 показано подключение к источникам питания микросхемы D-триггера HMC673LC3C. В корпусе микросхемы приведена ее функциональная диаграмма. Помимо триггера, микросхема содержит выходной усилитель с дифференциальным выходом.

Временные диаграммы работы микросхемы HMC673LC3C представлены на рис. 10.

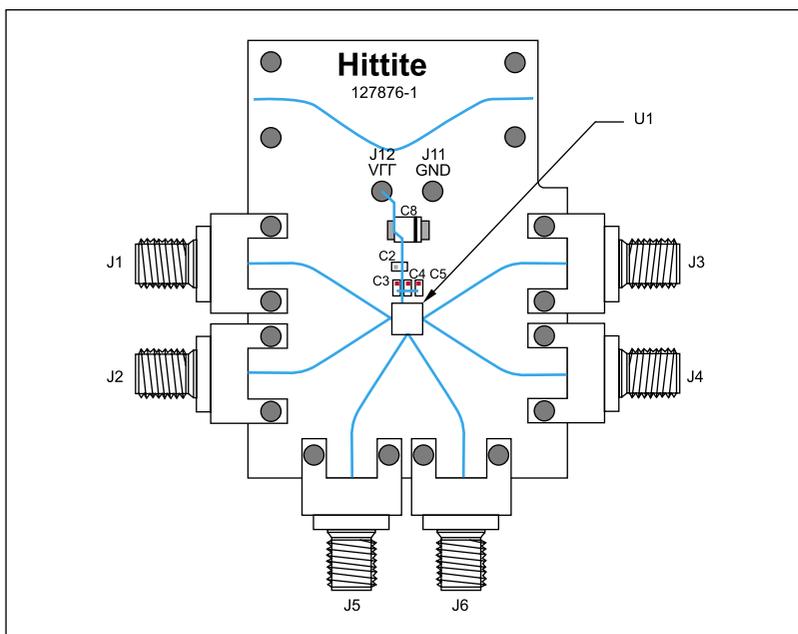


Рис. 5. Монтаж микросхемы HMC791LC4B на печатной плате

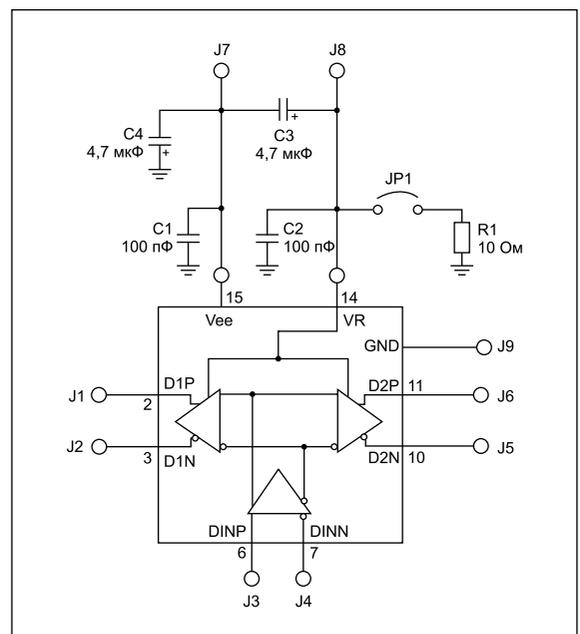


Рис. 6. Схема включения буферной микросхемы HMC842LC4B

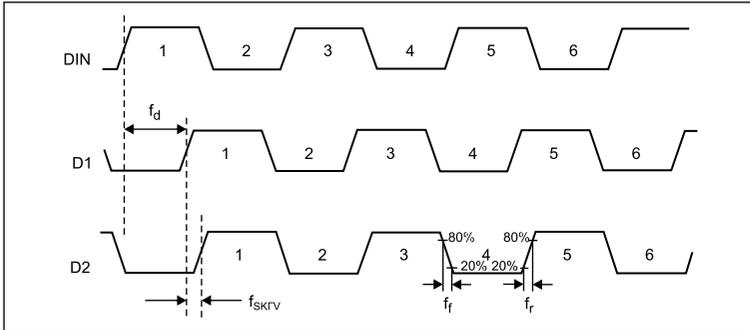


Рис. 7. Временные диаграммы работы микросхемы HMC842LC4B

Таблица 3. Микросхемы сверхскоростных триггерных устройств

Тип микросхемы	Скорость, Гбит/частота, ГГц	Тип триггера	Время роста/спада, пс	V <sub>OUT</sub> Вп-п	P <sub>потр</sub> мВт	V <sub>п</sub> В
HMC673LC3C	13/13	D	24/22	1,1	210	-3,3
HMC679LC3C	26/26	T Reset	18/17	0,4	270	
HMC723LC3C	13/13	D Adj. Vout	19/17	0,7	264	
HMC723LP3E		DRF Adj. Vout	19/17	0,7	260	
HMC727LC3C		FR D	19/17	1,1	270	+3,3
HMC729LC3C	26/26	T Reset	18/17		260	
HMC747LC3C	13/13	FR D	22/20	0,7–1,3	264	+3,3
HMC749LC3C	26/26	T Reset	18/17	0,6–1,2	270	
HMC841LC4B	43/43	D Adj. Vout	12/12	0,2–0,85	630	-3,3
HMC853LC3C	28/28	D	15/14	0,7–1,3	260	
HMC953LC4B	14/14	2xD Com. Clock	22/20	0,6–1,3	442	

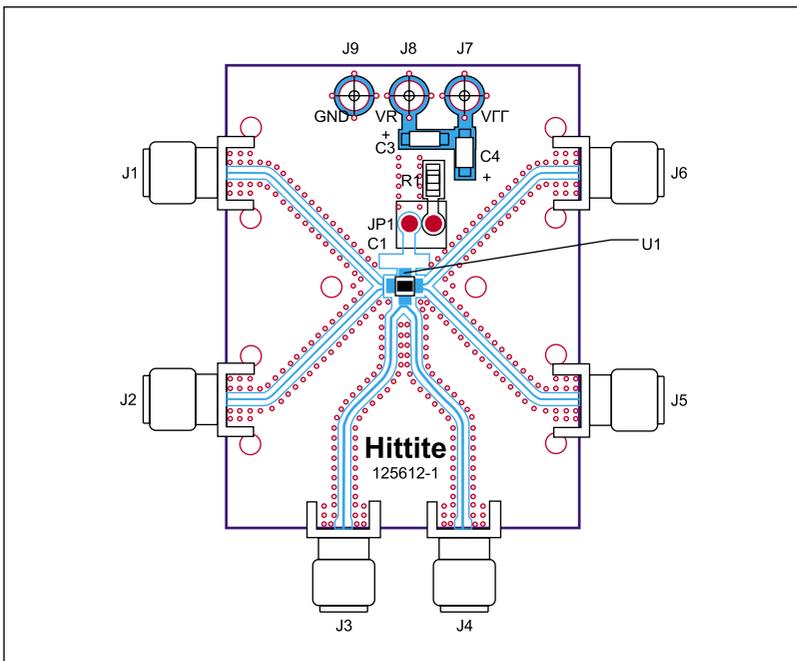


Рис. 8. Печатная плата с микросхемой HMC842LC4B

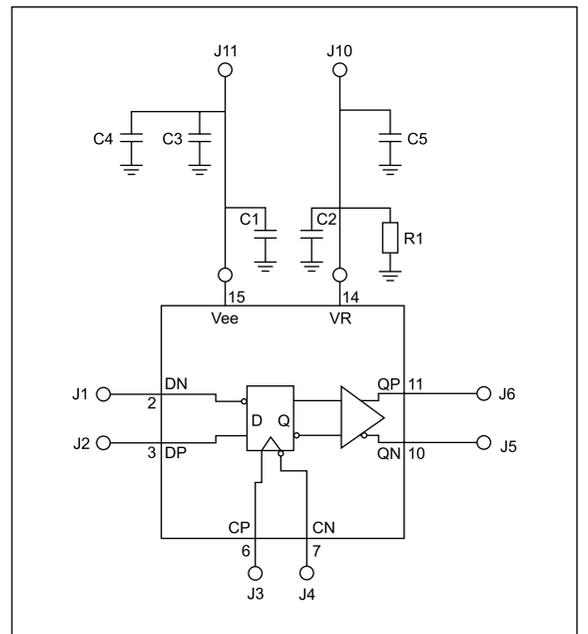


Рис. 9. Подключение D-триггера (микросхема HMC673LC3C) к источникам питания

Для оценки скорости работы быстродействующих интегральных схем с учетом шума и дрожания фронтов импульсов (джиттера) применяются глазковые диаграммы [2]. На рис. 11 показана такая диаграмма для микросхемы D-триггера HMC673LC3C. При скорости работы 10 Гбит/с «глаза» открыты, что указывает на четкую работу микросхемы.

Самой скоростной микросхемой D-триггера является HMC841LC4B. Ее подключение к источникам питания и функциональная диаграмма показаны на рис. 12.

Эта микросхема имеет уникально малое время нарастания и спада выходных импульсов — около 10 пс (рис. 13). Это обеспечивает работу микросхемы с самой высокой

скоростью передачи данных — до 43 Гбайт/с. Глазковая диаграмма, подтверждающая возможность работы со столь высокой скоростью передачи данных, представлена на рис. 14.

Схема подключения T-триггера HMC679LC3C к источникам питания и его функциональная диаграмма показаны на рис. 15. На рис. 16 приведены идеализированные диаграммы работы этой микросхемы.

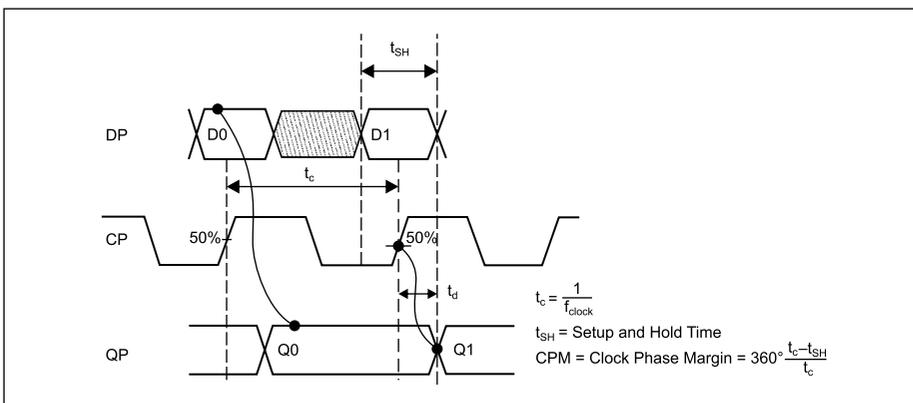


Рис. 10. Временные диаграммы работы микросхемы HMC673LC3C

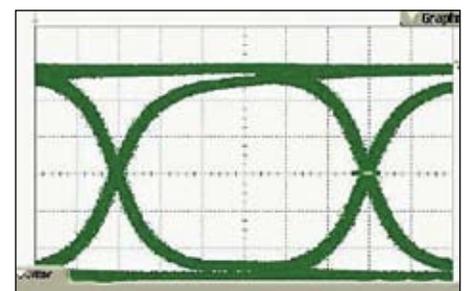


Рис. 11. Глазковая диаграмма работы микросхемы HMC673LC3C при скорости работы 10 Гбит/с (масштаб по вертикали 100 мВ/дел., по горизонтали — 16,7 пс/дел.)

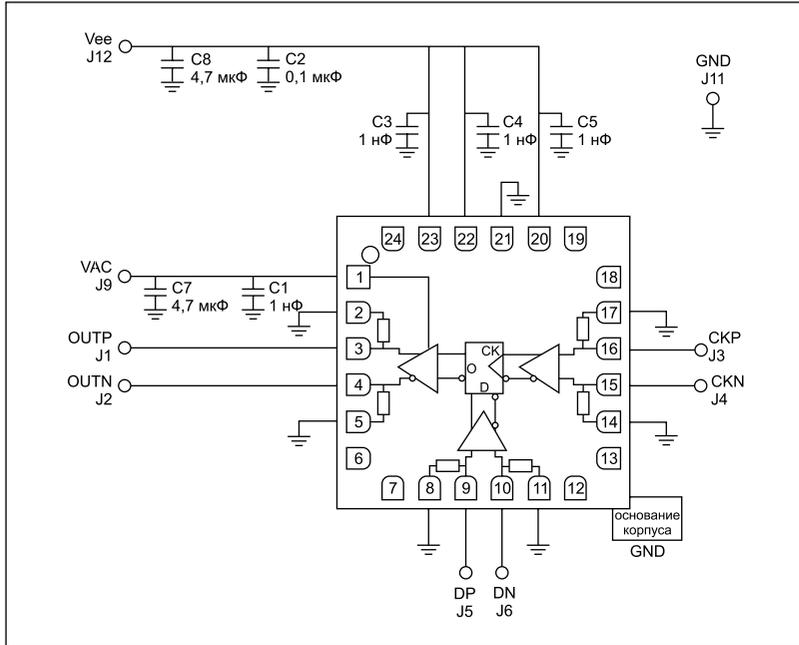


Рис. 12. Подключение микросхемы HMC841LC4B к источникам питания

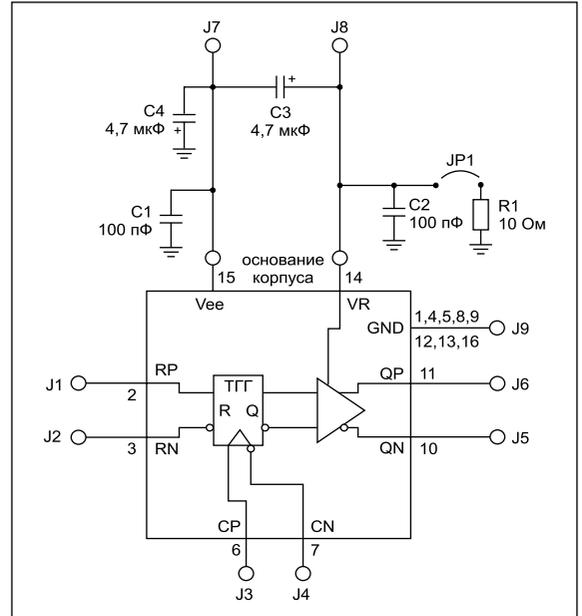


Рис. 15. Схема подключения микросхемы Т-триггера HMC679LC3C к источникам питания

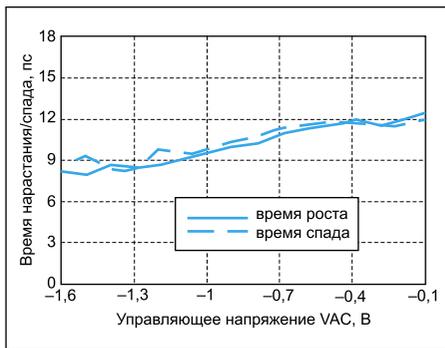


Рис. 13. Зависимость времени нарастания и спада выходных импульсов микросхемы HMC841LC4B от напряжения VAC

Таблица 4. Сверхскоростные логические микросхемы

Тип микросхемы	Скорость, Гбит / частота, ГГц	Тип логики	Время роста/спада, пс	V <sub>OUT</sub> Вп-п	P <sub>потр</sub> мВт			
HMC671LC3C	13/13	XOR/XNOR	24/22	1,1	180			
HMC672LC3C		AND/NAND/OR/NOR						
HMC721LC3C		FR XOR/XNOR						
HMC721LP3E						FR AND/NAND/OR/NOR		
HMC722LC3C		FR AND/NAND/OR/NOR				19/18	0,6-1,1	230
HMC722LP3E		FR AND/NAND/OR/NOR						
HMC725LC3C		FR XOR/XNOR				1,1	240	
HMC726LC3C		FR AND/NAND/OR/NOR						
HMC745LC3C		FR XOR/XNOR				21/19	0,6-1,2	240
HMC746LC3C		FR AND/NAND/OR/NOR				22/21	230	
HMC843LC4B	45/25	AND/NAND/OR/NOR	10/10	0,2-0,9	530			
HMC844LC4B		AND/NAND/OR/NOR	11/10	0,2-0,85				
HMC851LC3C	28/28	XOR/XNOR	15/14	0,5-1,3	241			
HMC852LC3C		AND/NAND/OR/NOR						
HMC706LC3C	13/13	NRZ-to-RZ Converter	15/13	0,3-1,2	594			

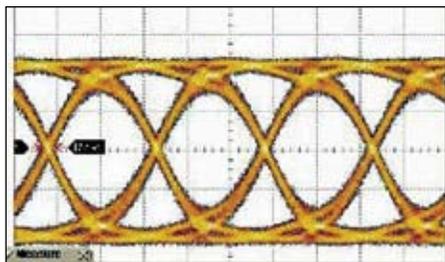


Рис. 14. Глазковая диаграмма микросхемы HMC841LC4B при скорости передачи входных импульсов 40 Гбайт/с

Осциллограммы выходного сигнала HMC679LC3C (рис. 17) дают представление о скорости работы микросхемы при частоте входных импульсов, близкой к предельной. Выходной сигнал при этом приобретает почти треугольную форму.

Hittite Microwave выпускает также ряд стандартных по назначению, но уникальных по скорости работы логических микросхем. Их данные приведены в таблице 4. На их основе возможно построение сверхскоростных арифметико-логических устройств (АЛУ).

Следует отметить, что микросхема HMC672LC3C может выполнять логические функции AND, NAND, OR и NOR.

Схема подключения микросхемы HMC843LC4B к источникам питания и ее функциональная диаграмма показаны на рис. 18. А на рис. 19 даны временные диаграммы работы этой микросхемы.

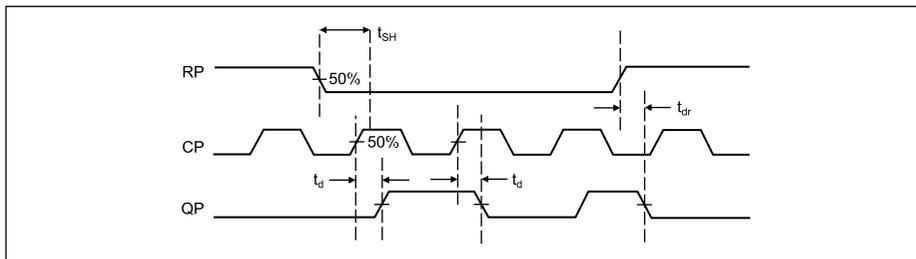


Рис. 16. Диаграмма работы микросхемы Т-триггера

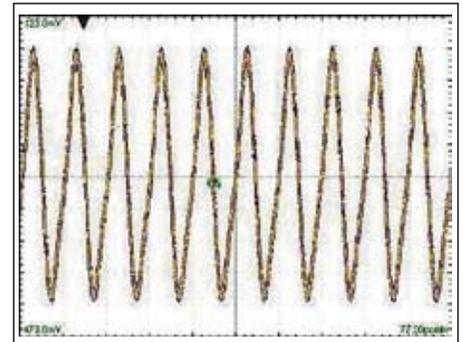


Рис. 17. Осциллограмма выходного сигнала микросхемы HMC679LC3C

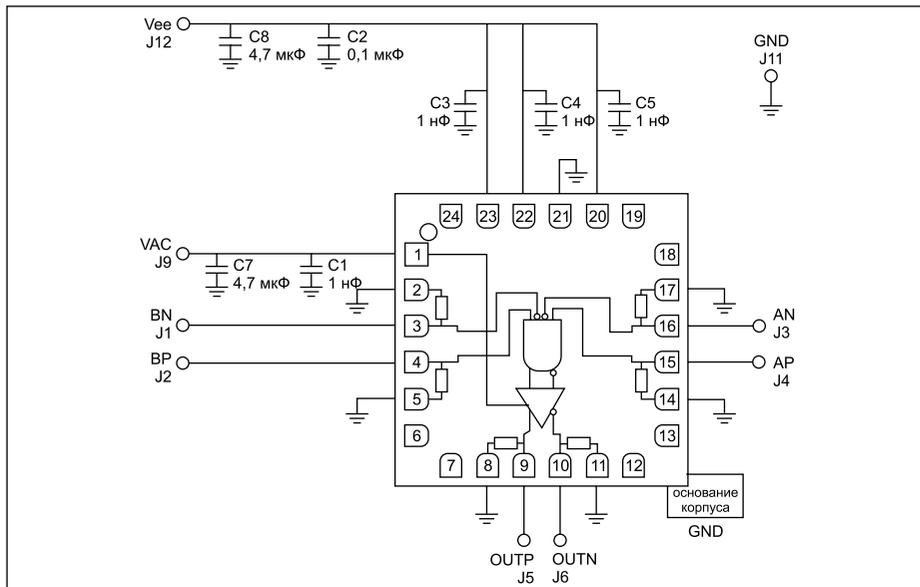


Рис. 18. Схема подключения микросхемы HMC843LC4B к источникам питания

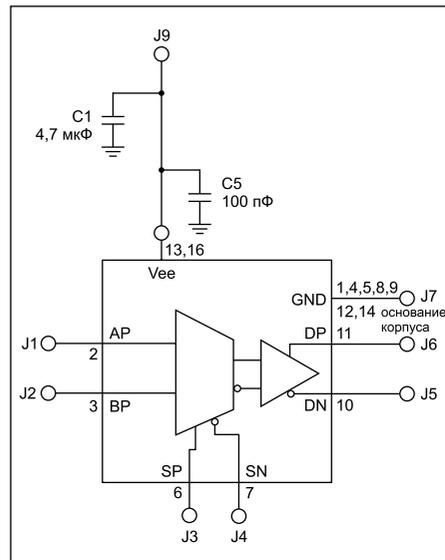


Рис. 22. Схема подключения микросхемы HMC678LC3C к источникам питания

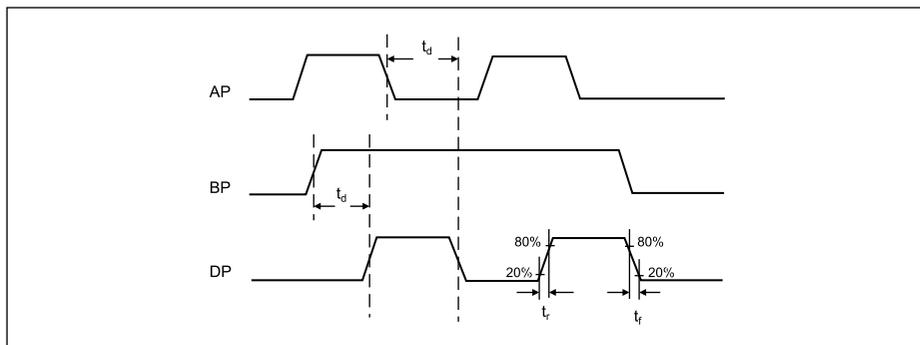


Рис. 19. Временные диаграммы работы микросхемы HMC843LC4B

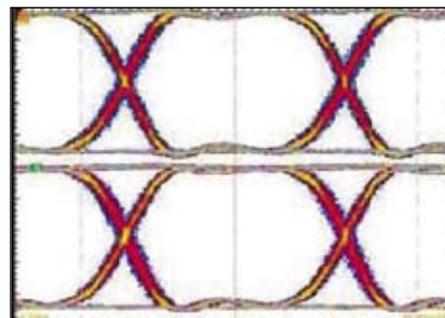


Рис. 23. Глазковые диаграммы работы микросхемы HMC678LC3C по обоим направлениям

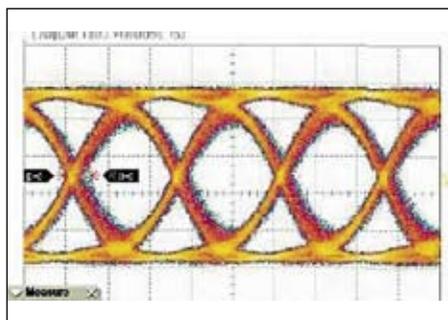


Рис. 20. Глазковая диаграмма работы микросхемы HMC843LC4B при скорости передачи входных данных 40 Гбайт/с

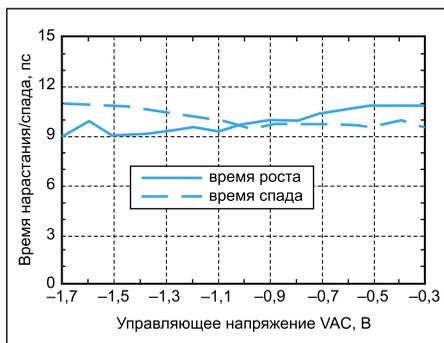


Рис. 21. Зависимость времени нарастания и спада выходных импульсов от напряжения VAC

Используется дифференциальный выход, обеспечивающий наибольшую скорость передачи данных. Зависимость времени нарастания и спада выходных импульсов от напряжения VAC, показанная на рис. 21, демонстрирует рекордно малое время нарастания (Rise) и спада (Fall) выходных импульсов — порядка 10 пс.

Выпускается также несколько микросхем-селекторов, предназначенных для коммутации логических сигналов. Данные этих микросхем сведены в таблицу 5.

Схема подключения HMC678LC3C, микросхемы-селектора на два направления, к источникам питания и ее функциональная диаграмма представлены на рис. 22.

Глазковые диаграммы для обоих направлений микросхемы HMC678LC3C показаны на рис. 23. Каждому направлению соответствует своя диаграмма. Обе диаграммы практически равноценны.

Выпускаются и микросхемы HMC705LP4/HMC705LP4E с программируемым от 1 до 17 коэффициентом деления частоты (рис. 24 и 25).

Для получения полного ряда коэффициентов деления (от 1 до 17) используются специ-

Глазковая диаграмма работы микросхемы HMC843LC4B, снятая при скорости передачи входных данных 40 Гбайт/с (рис. 20), характеризует ее высокое быстродействие.

Таблица 5. Параметры микросхем-селекторов

Тип микросхемы	Скорость, Гбит / частота, ГГц	Тип устройства	Время роста/спада, пс	V <sub>OUT</sub> , Вл-п	P <sub>потр</sub> , мВт
HMC678LC3C	13/13	2:1 Selector	17/15	0,6–1,2	250
HMC728LC3C				1,1	
HMC748LC3C				0,6–1,2	
HMC858LC4B	14/14	2:1 Dif. Selector	19/20	0,5–1,3	221
HMC958LC5		4:1 Selector	17/17		294



Рис. 24. Корпус микросхемы HMC705LP4/HMC705LP4E с программируемым от 1 до 17 коэффициентом деления частоты

альные схемные решения, например импульсные обратные связи в цепочке триггеров, комбинации умножителей и делителей частоты. Признаком применения импульсных обратных связей является отличие скважности выходных импульсов от 2 (рис. 26).

Микросхемы умножителей частоты служат для преобразования входного сигнала в определенном диапазоне частот в выходной сигнал с кратной частотой. Простейшими умножителями частоты являются пассивные умножители. Фирма выпускает 14 типов микросхем пассивных умножителей частоты. Для получения СВЧ выходных сигналов в умножителях применяются, например, сверхскоростные GaAs-диоды с барьером Шоттки. Коэффициент умножения обычно равен 2. Лишь одна микросхема из этого класса — HMC-XTB110 — имеет коэффициент умножения, равный 3.

Значительно больше номенклатура выпускаемых Hittite Microwave активных умножителей частоты. Они имеют входной и выходной усилители, что позволяет скомпенсировать потери преобразования и в ряде случаев повысить коэффициент умножения. Параметры ряда активных умножителей частоты приведены в таблице 6. Название типа корпуса указано в конце наименования микросхемы. Если его нет, значит, использован бескорпусный вариант оформления микросхемы (Chip).

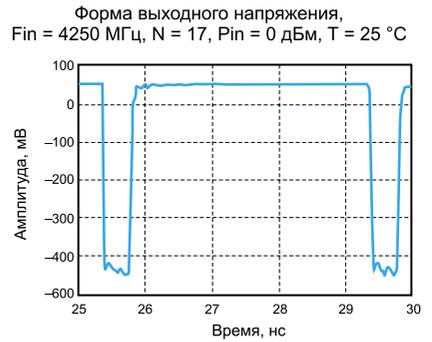
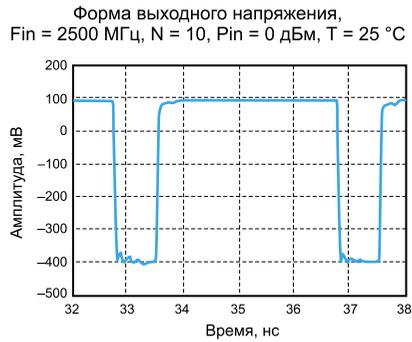
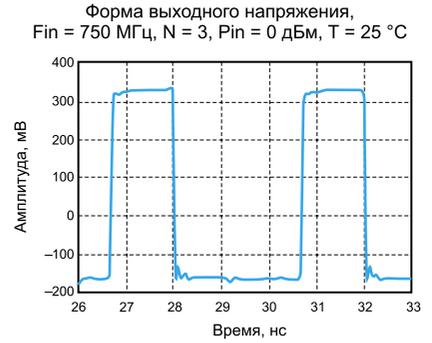
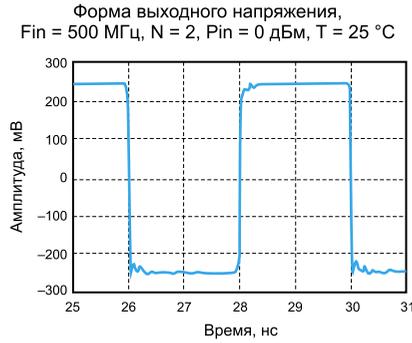


Рис. 26. Осциллограммы выходных импульсов микросхемы HMC705LP4/HMC705LP4E при различных коэффициентах деления

Таблица 6. Типовые параметры ряда активных умножителей частоты корпорации Hittite Microwave

Тип микросхемы	F <sub>IN</sub> , ГГц	Коэффициент умножения	F <sub>OUT</sub> , ГГц	P <sub>IN</sub> , дБм	P <sub>OUT</sub> , дБм	Фазовый шум, дБс/Гц	
HMC368LP	4,5–8	×2	9–16	2	15	-140	
HMC369LP3	4,95–6,35		9,9–12,7	0	4	-142	
HMC370LP4	3,6–4,1	×4	14,4–16,4	-15	0	-140	
HMC443LP4	2,45–2,8		9,8–11,2		3	-142	
HMC444LP4	1,2375–1,4	×8	9,9–11,2	-15	6	-136	
HMC445LP4	0,62–0,69		9,9–11		7	-130	
HMC449	13,5–16,5	×2	27–33	0	10	-132	
HMC573LC3B	4–11		8–22	5	12	-134	
HMC576	9–14,5		18–29	3	17	-132	
HMC578	12–16,5		24–33				
HMC579	16–23		32–46	13	-127		
HMC598	11–23		22–46	5	15	-	
HMC814	6,5–12,3		13–24,6	4	17	-136	
HMC916LP3E	2,66–5,33		×3	8–16	5	2	-152
HMC917LP3E	1,5–2,5			8–10			-148

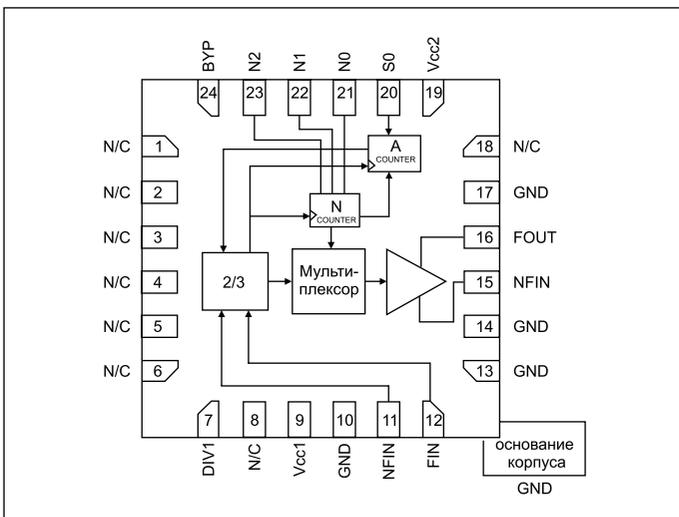


Рис. 25. Функциональная диаграмма микросхемы HMC705LP4/HMC705LP4E

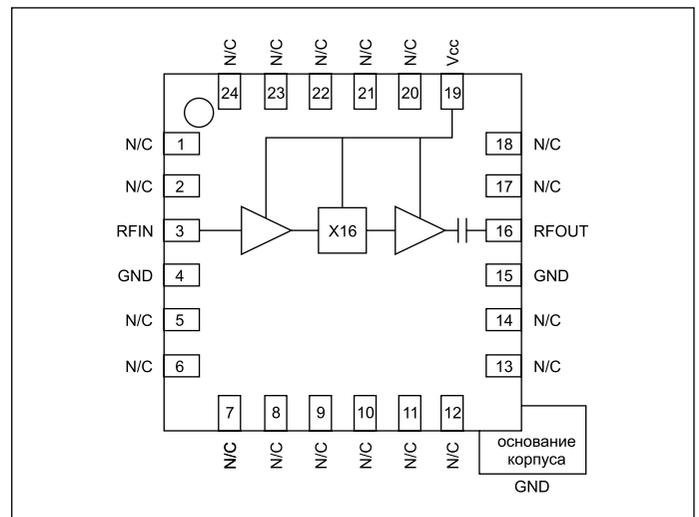


Рис. 27. Функциональная диаграмма микросхемы HMC445LP4

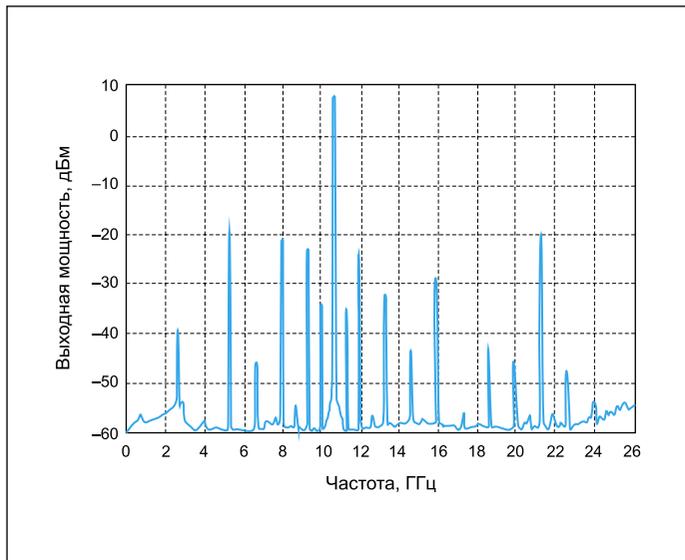


Рис. 28. Спектр выходного сигнала микросхемы HMC445LP4

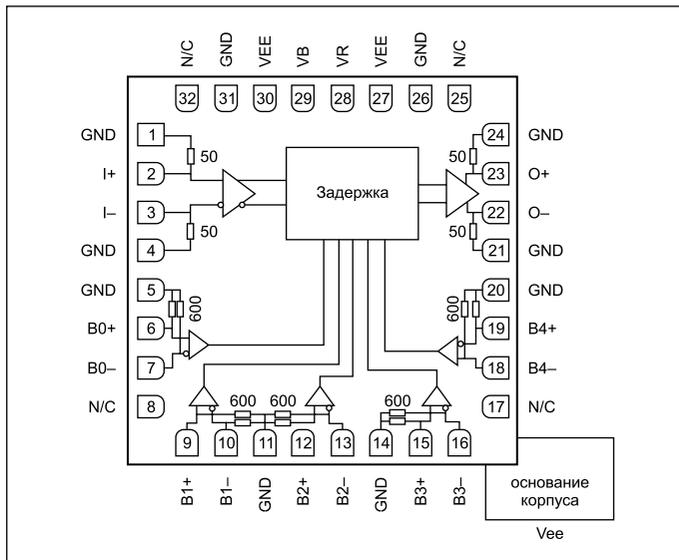


Рис. 29. Функциональная диаграмма микросхемы HMC856LC5

Микросхема HMC445LP4 (рис. 27) имеет самый большой коэффициент умножения, равный 16, и самую низкую частоту входного сигнала в узком диапазоне частот — от 0,62 до 0,69 ГГц. Это отражает общую закономерность построения умножителей частоты: диапазон частот умножителей получается тем шире, чем меньше коэффициент умножения. Это фундаментальное свойство спектров сигналов. Спектр выходного сигнала микросхемы HMC445LP4 показан на рис. 28.

В ряде современных устройств связи, радиолокации и измерительной техники применяются линии с регулируемой временной задержкой. Они есть в частотных синтезаторах, точных таймерах, современных высокоскоростных последовательных логических устройствах и др. Hittite Microwave — одна из немногих компаний в мире, выпускающих интегральные твердотельные микросхемы линий задержки (ICs — Broadband Time Delay) пикосекундного диапазона с цифровой и аналоговой регулировкой задержки.

Микросхема HMC856LC5 предназначена для создания устройств временной задержки с длительностью от 0 до 100 пс. Она выполнена в миниатюрном 32-выводном керамическом корпусе SMT с размером кристалла 5×5 мм. Корпус предназначен для поверхностного монтажа и обеспечивает предельно малую длину выводов.

Функциональная диаграмма микросхемы представлена на рис. 29. Помимо собственно линии задержки DELAY, микросхема содержит согласующие дифференциальные каскады с 50-омными резисторами на входе и выходе, а также усилители для 5 разрядов блока цифрового управления. Эти усилители также имеют дифференциальные входы и могут работать от дифференциальных линий передачи управляющих сигналов.

Типовая временная диаграмма работы микросхемы HMC856LC5 представлена

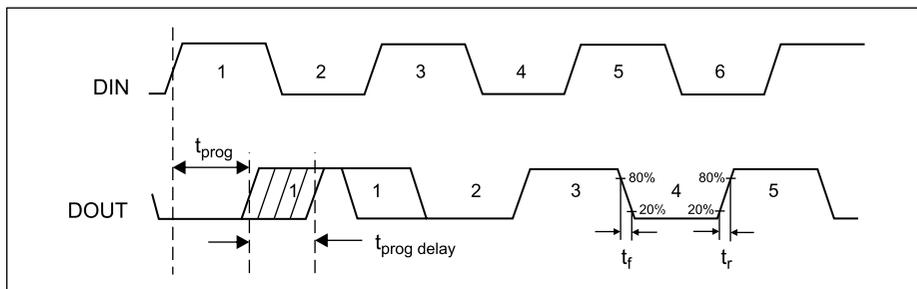


Рис. 30. Временная диаграмма работы микросхемы HMC856LC5

на рис. 30. Выходное напряжение микросхемы можно программировать и задавать в интервале от 500 до 1360 мВ с помощью управляющего напряжения VR. Типовое напряжение питания микросхемы — 3,3 В (диапазон значений от -3,7 до 2,9 В), потребляемый ток — 185 мА.

На рис. 31 показана зависимость задержки микросхемы от управляющего напряжения, представленного в десятичном коде. Она практически линейная и дана для трех значений температуры окружающей среды. Видно, что температурная нестабильность времени за-

держки достаточно мала. Разрешающая способность по времени задержки равна 3 пс.

Микросхема имеет довольно малое время нарастания и спада выходных импульсов. На рис. 32 приведена зависимость времени нарастания и спада от напряжения питания. Типичное время нарастания — 20 пс, спада — 18 пс (измеряется при уровнях отсчета 20% и 80% от перепада выходного напряжения).

Малое время нарастания и спада позволяет использовать микросхему задержки в линиях связи с высокой пропускной спо-

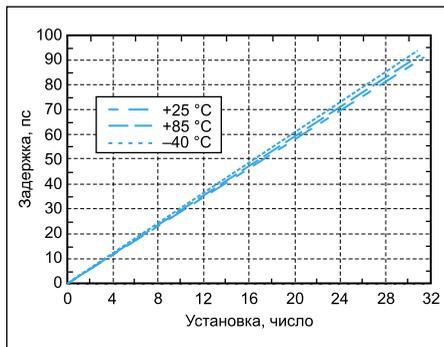


Рис. 31. Зависимость задержки от управляющего напряжения, представленного в десятичном коде для микросхемы HMC856LC5

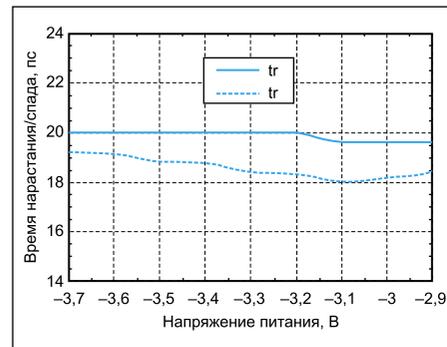


Рис. 32. Зависимость времени нарастания и спада выходных импульсов от напряжения питания микросхемы HMC856LC5

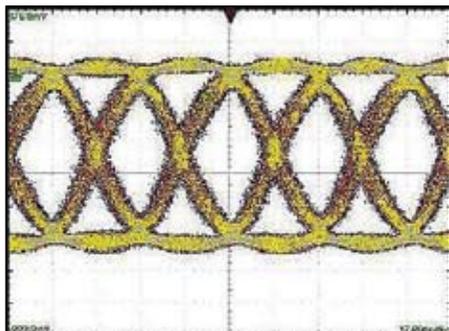


Рис. 33. Глазковая диаграмма работы микросхемы HMC856LC5

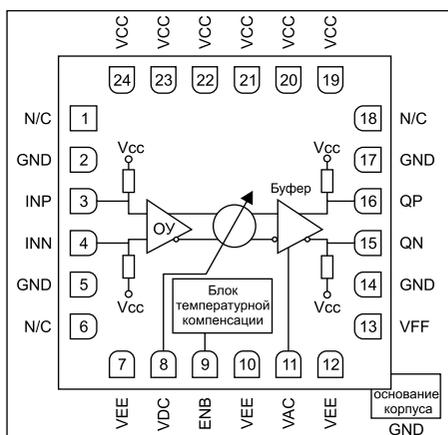


Рис. 34. Функциональная диаграмма микросхемы временной задержки с аналоговым управлением HMC910LC4B

способностью, а в перспективе — в генераторах импульсов с субнаносекундными фронтами. На рис. 33 показана глазковая диаграмма микросхемы при скорости передачи данных 28 Гбит/с. Даже при такой высокой скорости передачи «глаза» диаграммы остаются открытыми, что говорит о наличии достаточного запаса по динамическим параметрам микросхемы. Принципы построения глазковых диаграмм и осциллографы для их построения описаны в [2]. Для построения глазковой диаграммы на рис. 33 был использован осциллограф CSA8000 фирмы Tektronix.

Hittite Microwave выпускает также микросхему HMC910LC4B с временем задержки,

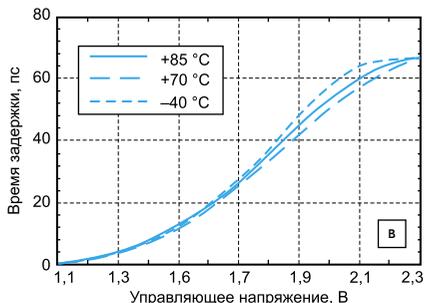
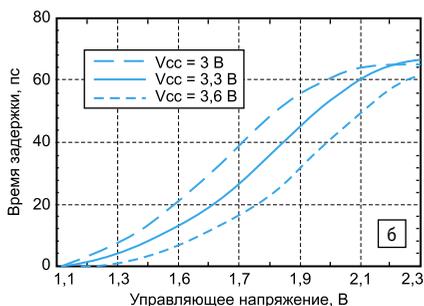
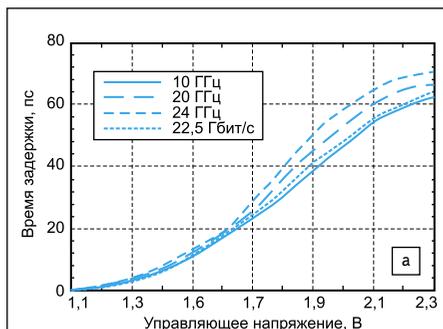


Рис. 35. Зависимость времени задержки микросхемы HMC910LC4B от управляющего напряжения  $V_{DC}$ :

- при разных значениях частоты;
- при разных значениях напряжения питания;
- при разных значениях температуры окружающей среды

управляемым аналоговым напряжением. Это упрощает микросхему и обеспечивает плавную регулировку времени задержки. Микросхема выполнена в сверхминиатюрном 24-выводном керамическом корпусе типа SMT с размерами 4×4 мм.

Функциональная диаграмма микросхемы временной задержки с аналоговым управле-

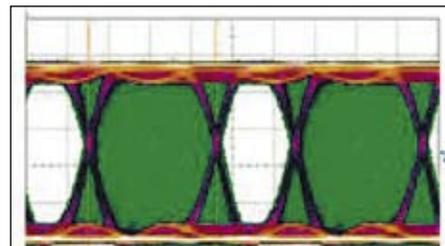


Рис. 36. Глазковая диаграмма работы микросхемы при скорости передачи данных 10 Гбит/с

нием HMC910LC4B представлена на рис. 34. В состав микросхемы входят собственно линии задержки и согласующие усилители с дифференциальными входами и выходами.

На рис. 35а показана зависимость времени задержки микросхемы HMC910LC4B от управляющего напряжения  $V_{DC}$  при разных значениях частоты. Аналогичные зависимости при разных значениях напряжения питания и температуры показаны на рис. 35б, в.

Глазковая диаграмма работы микросхемы HMC910LC4B дана на рис. 36. Она снята при скорости передачи данных 10 Гбит/с. При такой скорости «глаза» диаграммы открыты. Максимальная скорость передачи данных (при закрытии «глаза») может достигать 32 Гбит/с.

## Заключение

Набор сверхскоростных логических микросхем фирмы Hittite Microwave вполне соответствует потребностям современной высокоскоростной электроники сверхвысокого (пикосекундного) быстродействия. Микросхемы выполнены на основе GaAs биполярных транзисторов, имеют дифференциальные входы и выходы и нередко допускают программирование уровня выходных сигналов.

## Литература

- [www.hittite.com](http://www.hittite.com)
- Афонский В. П., Дьяконов В. П. Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике. М.: ДМК-Пресс, 2011.