

SiGe-ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ОСЦИЛЛОГРАФОВ LeCroy

Сегодня кремний-германиевые (SiGe) компоненты широко применяются в микроэлектронике для изготовления аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и процессоров. Они имеют хорошие показатели надежности, энергопотребления, степени интеграции. В новейшей серии высокопроизводительных осциллографов **LabMaster 10 Zi** компании **LeCroy** (США) используется SiGe-технология «8HP» 4-го поколения от IBM (подразделение **IBM Semiconductor**). За лицевой панелью этих осциллографов находятся новейшие компоненты и апробированные промышленностью технологии. В области широкополосной осциллографии LeCroy предлагает инновационный продукт инженерам-разработчикам для ускорения процессов разработки высокоскоростных устройств и отладки встроенных систем на их базе (embedded systems), в очередной раз демонстрируя свое технологическое лидерство.

Для изготовления кремний-германиевых полупроводников в настоящее время используются хорошо отработанные на протяжении десятилетий технологические процессы. Параметры и характеристики SiGe-компонентов сравнимы с возможностями КМОП-структур, созданных на основе фосфида индия (InP) или арсенида галлия (GaAs). Анализируя потенциал этих трех основных направлений развития элементной базы с точки зрения создания цифровых запоминающих осциллографов (ЦЗО), следует отметить, что лишь SiGe и InP могут обеспечить более высокую полосу пропускания и быстродействие. Однако на сегодняшний день в сопоставимых устройствах технология InP уступает SiGe как в скорости, так и в достигнутом частотном диапазоне. Кроме того, следует учитывать, что кремниевые-германиевые микросхемы при работе выделяют значительно меньше тепла, чем их конкуренты на основе GaAs, поэтому SiGe-компоненты имеют существенно лучшую термостойкость.

Благодаря меньшей ширине запрещенной зоны (в сравнении с чистым кремнием) изготовление базы биполярного транзистора из SiGe повлияло на увеличение инжекции электронов в базу и, как результат, привело к повышению его коэффициента усиления. SiGe-технологии олицетворяют объединение при изготовлении твердотельных СВЧ-компонентов достоинств отработанной за полувековой срок кремниевой технологии и преимуществ биполярных транзисторов на гетеропереходах (HBT). Массовое применение BiCMOS¹ (на основе SiGe HBT) связано не только с высокими технико-экономическими показателями (быстродействие, теплопроводность, стоимость), но и такими преимуществами кремний-германиевых технологий, как наличие широкого перечня активных и пассивных компонентов, удобство монтажа и отладки готовых трактов. *Как следствие, компоненты на базе SiGe имеют большую совместимость и взаимозаменяемость в СВЧ-устройствах.*

Технология BiCMOS на кремний-германиевой основе позволяет реализовать множество операционно-вычислительных функций на одном чипе для получения сложнотехнологических устройств (СФУ). Использование новейших технологий делает доступным изготовление сверхминиатюрных усилителей и других элементов тракта, снизив занимаемый ими объем на материнской плате, а за счет этого добиться общей компактности устройства. Имея реальные перспективы применения в СВЧ-измерительных приложениях, технология SiGe сфокусирована именно на широком коммерческом применении в отличие от технологий InP / GaAs, востребованных в узкоспециализированных направлениях. Например, устройства на основе GaAs не имеют конкурентов при изготовлении высоковольтных передатчиков, где SiGe-приборы не выдерживают высоких рабочих напряжений, поскольку они являются малосигнальными изделиями с небольшим пробивным напряжением ($V_{ce} = 5,5 \text{ В}$).

¹ BiCMOS (bipolar complementary metal oxide semiconductor) биполярная комплементарная структура металл-оксид-полупроводник.

LeCroy имеет длительную историю сотрудничества в сфере разработки современной микроэлементной базы с лидером отрасли компанией IBM, которая в 1998 г. первой внедрила кремний-германиевую технологию в серийное производство. Одним из аргументов в пользу BiCMOS устройств на основе SiGe, является возможность их изготовления из дешевых кремниевых пластин-заготовок диаметром 200–450 мм, т. е. с использованием существующего оборудования, на котором выпускаются стандартные комплементарные металло-оксидные структуры (КМОП).

Производственные возможности IBM Semiconductor позволили создать новый класс специализированных СБИС, в которых сочетаются высокая степень интеграции и производительность в монокристалльном модуле. Базисом явились прорывные электронные технологии, физико-технологические и материаловедческие новации, и в первую очередь разработка высокосортных SiGe-элементов микроэлектроники с обеспечением их эффективности и надежности. Благодаря этому компания LeCroy на протяжении последних 10 лет успешно разрабатывает и выпускает высокоскоростные системы сбора данных ЦЗО. В основе успеха – постоянное развитие схмотехнических и конструктивных, а также инновационных метрологических решений при создании новых поколений осциллографов.

Краеугольный камень архитектуры новых продуктов LeCroy – использование SiGe-технологий в техническом моделировании, что позволило достичь в осциллографах рекордных скоростей аналогово-цифровых операций. Многолетнее и широкое использование SiGe-сборок, а также непрерывный процесс их развития и успешного применения доказали правильность выбранного направления. Серийно выпускаемые LeCroy осциллографы hi-end класса линеек WavePro, WaveMaster и LabMaster представляют собой унифицированные платформы для создания измерительных комплексов высокой производительности. Они отличаются от других, менее продвинутых и ранее выпускавшихся ЦЗО бóльшим количеством используемых функционально насыщенных SiGe-компонентов. При их выпуске применены:

- микро- и нанометрические технологии обработки материалов и компонентов;
- сложнофункциональные блоки (и на их основе СБИС – «система на кристалле»);
- микросхемные малощумящие операционные усилители;
- методы прецизионного контроля сборки готовых блоков.

Практика применения новейших поколений кремний-германиевых компонентов (с последовательным приростом скорости переключения транзисторов) давала ощутимый результат в виде увеличения полосы пропускания и скорости быстрого действия цифровых осциллографов.

За последние 5–7 лет эти микрокомпоненты прошли несколько стадий совершенствования, что позволило выпустить продукты мирового класса, которые востребованы в решении самых сложных прикладных задач. Так, если в 2002 г. компания LeCroy применила в серии WaveMaster 8000 микрочипы технологического исполнения «5HP SiGe», то в 2009 г. при изготовлении моделей осциллографов серий WaveMaster 8 Zi и LabMaster 9 Zi была использована улучшенная версия «7HP SiGe» 3 поколения (BiCMOS с нормой 0,18 мкм). С применением данного технологического процесса были изготовлены СВЧ-компоненты входного тракта, что является критически важным для достижения максимальной полосы пропускания реального времени. В компонентах «7HP SiGe» использовалась шестислойная металлическая соединительная структура, обеспечивающая максимальную гибкость в дизайне и компоновке электронных цепей, что чрезвычайно важно для обеспечения достоверности и целостности анализируемых сигналов.

АЦП, разработанный компанией LeCroy на базе «7HP SiGe», являлся одним из ключевых элементов в наборе аппаратных решений, определивших высокую производительность осциллографов в линейке WaveMaster 8 Zi. АЦП этой серии принадлежит к числу наиболее быстродействующих интегральных схем своего типа. В системе синхронизации и сбора данных осциллографов использовались новейшие на тот момент специализированные интегральные сборки (чипсет Apollo и др.).

Очередные запатентованные программно-аппаратные решения воплотилось в широкополосной осциллографической системе LabMaster 9 Zi-A (рис. 1), которая предназначена для многоканальных измерений в СВЧ диапазоне и обеспечивает от 5 аналоговых каналов с полосой пропускания 45 ГГц, до 10 каналов с полосой 30 ГГц и 20 каналов с полосой 20, 16, или 13 ГГц.

Мультиканальная система LabMaster 9 Zi-A имеет настраиваемую конфигурацию по схеме: один ведущий модуль и несколько управляемых модулей сбора данных.

Инновационная мультиканальная система синхронизации ChannelSync™ характеризуется значением межканального джиттера 350 фс с.к.з (тип.). Единая архитектура всего рабочего диапазона (13–45 ГГц) обеспечивает возможность модернизации полос пропускания с учетом потребностей пользователя.

Новый (SiGe) полупроводниковый процесс от IBM с использованием биполярных КМОП-транзисторов, внедренный LeCroy, имеет наименование «8HP SiGe» (0,13 мкм). Он характеризуется следующими техническими спецификациями:

- литографическая SiGe BiCMOS технология;
- высококачественные SiGe NPN-транзисторы (частота $F_t = 200$ ГГц);
- 130-нм КМОП полевые транзисторы 1,5 / 2,5 В;
- 5-слойная металлическая соединительная структура;
- общие медные уровни межсоединений, толстая алюминиевая металлизация сверху;
- полный набор пассивных компонентов

Биполярные кремний-германиевые КМОП-структуры, выполненные по более совершенной технологии с нормой 130 нм, обеспечили удвоение производительности по сравнению с устройствами предыдущего поколения. Это позволило создать в 2010 г. осциллограф с рекордно большой (на тот момент) полосой пропускания в реальном времени 45 ГГц и частотой дискретизации 120 ГГц. В обновленной серии WM 8Zi-A (с индексом «А») компания LeCroy применила высокоскоростной однокристалльный кремний-германиевый АЦП с частотой дискретизации 40 ГГц (Apollo Chipset 2-го поколения). Сочетание передовой элементной базы, технологии цифрового чередования полос пропускания (DBI) 5-го поколения и потоковой архитектуры обработки сигналов X-Stream II обеспечило прирост измерительных ресурсов и производительности, исключительную точность согласования и воспроизведения сигнала во всей полосе пропускания, значительное снижение уровня собственных шумов (~ 25 %). Осциллограф **WaveMaster 845Zi-A** (рис. 2) предоставил пользователю гибкую возможность работы на выбор: одновременно все 4 канала с полосой пропускания 20 ГГц или 2 канала с полосой пропускания 30 ГГц (при объединении двух каналов). При необходимости, объединив все каналы в единый тракт, можно для исследования высокоскоростных и широкополосных сигналов получить полосу пропускания до 45 ГГц (одноканальный режим).

За счет контроля профиля распределения германия в кристалле кремния разработчикам компонентов удалось значительно улучшить частотные характеристики SiGe-транзисторов вплоть до максимально доступной частоты. Эта технология позволила не только увеличить быстродействие

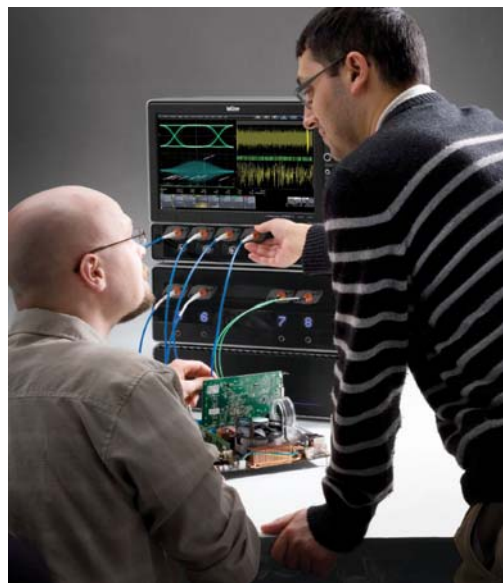


Рис. 1. Мультиканальная система LabMaster 9Zi-A



Рис. 2. Работа с осциллографом серии WaveMaster 8 Zi-A



Рис. 3. Осциллограф LabMaster 10-60Zi

новой серии **LabMaster 10 Zi**, в которой достигнута полоса пропускания 60 ГГц, максимальная дискретизация 160 Гвыб/с и память до 1 024 МБ/кан. Таким образом, впервые в отрасли цифровой осциллографии достигнута верхняя граница полосы пропускания реального времени 60 ГГц. Это значение превышает аналогичные показатели ближайших конкурентов.

Основной управляющий модуль, работающий совместно с одним модулем сбора данных, по сути, представляет собой широкополосный осциллограф (рис. 3), имеющий 4 канала с полосой пропускания 36 ГГц или 2 канала с полосой пропускания 60 ГГц (при объединении каналов). Более того, с помощью архитектуры ChannelSync™ могут быть идеально синхронизированы до 5 типовых модулей сбора данных.

За счет этого возможно расширение производительности LabMaster 10 Zi до уникальной осциллографической платформы: 20 каналов с полосой пропускания 36 ГГц или 10 каналов с полосой пропускания 60 ГГц (рис. 4).

Модульная архитектура LabMaster 10 Zi обеспечивает разделение процесса сбора данных и функций их постобработки, которые включают отображение входного сигнала и управление осциллографом. Основной управляющий модуль (блок MCM-Zi) имеет широкоформатный сенсорный дисплей, органы настройки, встроенную систему многоканальной синхронизации (ChannelSync™). Все эти элементы находятся под управлением высокопроизводительного многоядерного процессора серверного типа. Модули сбора данных на базе технологий 8HP SiGe и DBI обеспечивают оцифровку сигналов с частотой до 36 ГГц (непосредственная дискретизация на однокристалльном АЦП) и на их основе возможность анализа сигналов частотой до 60 ГГц при одновременной парной работе двух модулей (объединение двух каналов).

Благодаря использованию сегментированной внутренней памяти достигнута исключительная длина записи, максимально высокая скорость выборки, обеспечена поддержка интеллектуальных режимов TriggerScan и WaveScan, улучшены другие важные характеристики и параметры (см. таблицу). Ядром функционирования является передовая архитектура сбора данных (система «Front-End» – рис. 5) с высокоточным отслеживанием и усилением моментов пере-



Рис. 4. Модульная 20-канальная осциллографическая система

| Характеристика | WaveMaster 845Zi-A | LabMaster 9 Zi-A | LabMaster 10 Zi new | LabMaster 10 Zi new |
|--------------------------------------|-----------------------------------|---|--|--|
| Полоса пропускания, ГГц | 45 | 45 | 50 | 60 |
| Число каналов | 1 (4 × 20 ГГц, 2 × 30 ГГц) | 1 (с возможностью увеличения до 5) (4–20 × 20 ГГц, 2–10 × 30 ГГц) | 2 (с возможностью увеличения до 10) (4–20 × 36 ГГц) | 2 (с возможностью увеличения до 10) (4–20 × 36 ГГц) |
| Дискретизация (4 канала), Гвыб/с | 40 | 40 | 80 | 80 |
| Дискретизация (2 канала), Гвыб/с | 80 | 80 | 160 | 160 |
| Дискретизация (1 канал), Гвыб/с | 120 | 120 | 160 | 160 |
| Память (стандартная), МБ на канал | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Макс. память сбора данных, МБ | 768 | 768 | 1024 | 1024 |
| Сенсорный дисплей | 15.4" WXGA (1280 × 768) | 15.4" WXGA (1280 × 768) | 15.4" WXGA (1280 × 768) | 15.4" WXGA (1280 × 768) |
| Выпущен | октябрь 2010 | июль 2011 | январь 2012 | |

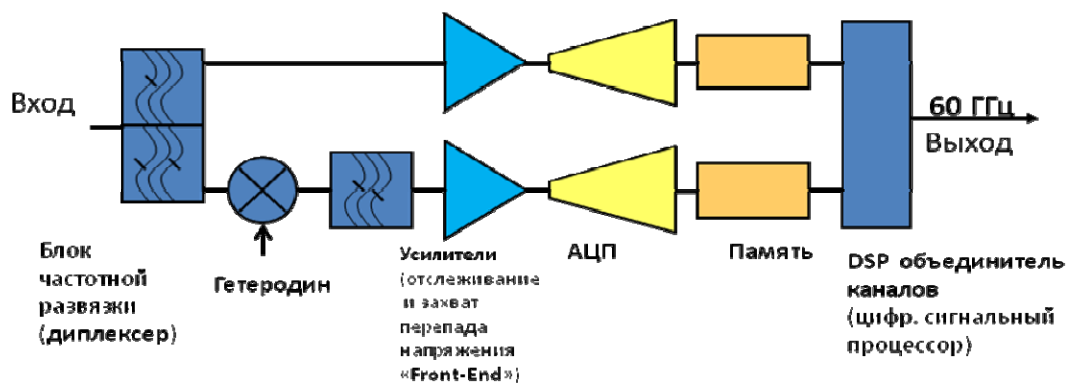


Рис. 5. Архитектура сбора данных осциллографов LabMaster 10 Zi

падов напряжения), которая сочетается с технологией цифрового чередования полос (DBI) 7-го поколения.

Передовые подходы и новации предоставили пользователю инструмент для выполнения сложных задач тестирования современных приложений, снижения времени на доводку и отладку РЭА и встроенных систем.

Система сбора данных в осциллографах LeCroy **LabMaster 10 Zi** имеет скорость выборки 80 Гвыб/с. Она выполнена на базе двух однокристалльных АЦП с дискретизацией 40 ГГц, работающих в паре и образующих таким образом единый канал аналого-цифрового преобразования. Такое решение является наиболее оптимальным для поддержания высоких амплитудно-частотных, фазовых характеристик и минимизации временных задержек по сравнению с другими решениями. Например, когда чипы АЦП объединяются «поканально» или когда в однокристалльном АЦП используются до 100 поочередных преобразователей.

Высокоскоростные модули памяти собственной разработки при их установке на материнской плате увеличивают длину памяти осциллографа до 512 Мб на канал (или до 1024 Мб при объединении двух каналов). Запатентованная технология потоковой обработки **X-Stream II** гарантирует быстрый и комплексный процесс обработки собранных данных на всей длине памяти, без ограничения возможностей в анализе, в отличие от конкурирующих осциллографов.

За счет использования в осциллографах LabMaster 10 Zi уникальной запатентованной архитектуры многоканальной прецизионной синхронизации LeCroy (ChannelSync™) и технологии DBI обеспечивается хронирование с предельно малым джиттером. Возможности конфигурации: одновременная работа 20 каналов (полоса 36 ГГц, дискретизация 80 ГГц) или 10 широкополосных каналов (полоса 60 ГГц, дискретизация 160 ГГц). Такая концентрация числа каналов в области СВЧ и гибкость адаптации полос пропускания под заказчика не предлагается в продуктах других производителей и является рекордной для отрасли.

В дополнение к лидерству по принципиальным параметрам (максимальность полосы пропускания и частоты дискретизации, длина памяти, степень концентрации числа каналов в области СВЧ) система LabMaster 10 Zi может похвастаться отраслевым первенством по другим важным характеристикам. Система синхронизации имеет рабочую полосу вплоть до 30 ГГц, что практически в два раза больше, чем в предыдущих линейках осциллографов LeCroy WaveMaster 8 Zi-A и LabMaster 9 Zi-A, и гораздо больше, чем в конкурентных моделях. Пороговое значение уровня фазового шума 100 фс с.к.з. является предельно малым для моделей с полосами 50 / 60 ГГц, обеспечивается высокая фазово-временная стабильность. Для LabMaster 10 Zi с полосой 60 ГГц время нарастания (20–80 %) не превышает 5,5 пс (для базовой полосы пропускания 36 ГГц ≤ 9,75 пс). Для обеспечения высокоточной временной синхронизации по всем каналам сбора данных архитектура LabMaster 10 Zi использует собственный общий источник опорной частоты 10 ГГц (в 1 000 раз выше, чем стандартный

ОГ $f = 10$ МГц для лабораторных приложений), межканальный джиттер не превышает 200 фс с.к.з.

Серия LabMaster 10 Zi поддерживает синхронизацию сигналов последовательной передачи со скоростями до 14,1 Гб/с и протоколов символьной последовательности 8b/10b и 64b/66b, а также синхронизацию для приложений PCI Express 3.0 (опционально). Такие параметры синхронизации существенно повышают значимость осциллографа LabMaster 10 Zi в качестве широкополосной мультисканальной системы для анализа высокоскоростных последовательных систем передачи данных, средств диагностики и отладки систем за счет возможности изоляции ошибок в заданных символах и шинах PCI Express на физическом уровне.

Анонсируя новую линейку **LabMaster 10 Zi**, компания LeCroy в очередной раз подняла на недостижимую пока для конкурентов высоту планку требований к осциллографам премиум-класса.

Алексей Шиганов

начальник информационно-технического отдела
info@prist.ru