

ПЛИС как начало

А. ГОЛЫШКО, канд. техн. наук, г. Москва

"Секрет того, чтобы добиться чего-то, — начать."

Марк Твен

FPGA или Field-Programmable Gate Array — программируемые пользователем вентильные матрицы или ППВМ. В более общем случае у нас их называют ПЛИС или программируемые логические интегральные схемы, которые состоят из большого числа простых логических элементов. Между этими элементами, как следует из названия, программным путём устанавливаются связи, то есть архитектура возникает не при изготовлении микросхемы на заводе, а позже, когда её создаёт программист с помощью специального ПО и оборудования. Пожалуй, слово программист логично заменить на термин конструктор. Здесь под программируемостью понимается возможность изменения внутренней структуры ИС таким образом, чтобы она обеспечивала реализацию заданных функций алгебры логики (ФАЛ) на аппаратном уровне.

ПЛИС широко применяются в различных устройствах: потребительской электронике, оборудовании телекома, платах-ускорителях для применения в дата-центрах, различной робототехнике, а также при прототипировании микросхем ASIC (Application Specific Integrated Circuit или простыми словами — это просто микросхема, которая выполняет определённый вид работы).

Разумеется, ПЛИС — это не контроллер и не специализированная логическая микросхема, хотя может превратиться в них при правильном программировании. Вообще, использовать термин программирование при проектировании устройства на базе ПЛИС не совсем корректно, и потому официально используется более подходящий термин синтез. И если в память известного нам традиционного контроллера загружается программа, то есть набор последовательно выполняющихся команд, и нужные для работы данные, то у ПЛИС нет ни того, ни другого. Однако при должном умении и прочих сопутствующих факторах микросхема приобретает любую конфигурацию и назначение в рамках своих аппаратных возможностей. Подобная универсальность

позволяет ПЛИС быть вне конкуренции по сравнению с какими-либо специализированными интегральными схемами.

ПЛИС часто используются в качестве частного заменителя интегральной схемы, если таковой не существует в природе или если она обойдётся гораздо дороже, если заняться её проектированием и изготовлением. Микросхемы ПЛИС — это не микропроцессоры, в которых пользовательская программа выполняется последовательно, команда за командой. В ПЛИС реализуется именно электронная схема, состоящая из логики и триггеров, которая может реализовать произвольную логику чего угодно, от микропроцессора до генератора видеосигнала или майнера криптовалюты.

ПЛИС состоит из множества логических блоков CLB (Configurable Logic Block), каждый из которых обычно состоит из триггера и логической функции, а также из сети проводников, соединяющей логические блоки. Собственно, CLB — важнейший аппаратный ресурс ПЛИС. Число CLB в современных кристаллах ПЛИС может быть разным и зависит от типа и его ёмкости. К примеру, сегодня существуют чипы с числом CLB в пределах примерно от четырёх тысяч до трёх миллионов.

Что делает ПЛИС особенной, так это то, что она является программируемым аппаратным обеспечением, в котором можно сконфигурировать каждый логический блок и соединения между ними. В результате можно построить сложное цифровое устройство без физического соединения каждого логического элемента и триггера, что обошлось бы в стоимость разработки заказной интегральной схемы. Проект синтеза в ПЛИС может быть представлен, например, в виде принципиальной схемы. Ещё существуют специальные языки описания аппаратуры на базе ПЛИС, например Verilog или VHDL. В любом случае и графическое и текстовое описание проекта реализуют цифровую электронную схему, которая в конечном счёте будет "рождена" в ПЛИС.

Итак, ПЛИС аппаратно конфигурируются под конкретную задачу, а их производительность не определяется тактированием и ограничивается лишь скоростью движения электронов по проводникам и логическим элементам. При этом в одной микросхеме, то есть в одном физическом корпусе, можно даже создать несколько независимых логических схем. Ряд структурных элементов ПЛИС могут использовать тактирование от внешнего источника или внутреннего генератора для привязки к фактору времени или циклическому внешнему воздействию. Это могут быть счётчики, часы, мультиплексоры и так далее. Но и в этом случае скорость работы будет гораздо выше, чем в любой другой программируемой логике. Скорость, близкая к максимально возможной при сохранении некоторой гибкости конструкции, — вот что является основным преимуществом ПЛИС перед контроллерами.

В целом ПЛИС состоит из:

- конфигурируемых CLB, реализующих требуемую логическую функцию;
- программируемых электронных связей между конфигурируемыми CLB;
- программируемых блоков ввода/вывода, обеспечивающих связь внешнего вывода микросхемы с внутренней логикой.

В современных ПЛИС часто также бывают встроены дополнительно блоки памяти, блоки DSP (Digital Signal Processor — цифровые сигнальные процессоры), умножители, элементы ФАПЧ и другие компоненты. Ключевая особенность ПЛИС — возможность реконфигурации. Скажем, сегодня вам нужен контроллер 100G Ethernet, а завтра эта же плата может быть использована для реализации четырёх независимых интерфейсов 25G Ethernet.

ПЛИС состоит из таких же транзисторов, из которых собираются триггеры, регистры, мультиплексоры и другие логические элементы для обычных схем. Изменить порядок соединения этих транзисторов, конечно, нельзя. Однако архитектурно микросхема построена таким образом, что можно изменять коммутацию сигналов между CLB. Также можно изменять логическую функцию, которую выполняет CLB. Достигается это за счёт того, что вся микросхема пронизана ячейками конфигурационной памяти Static RAM. Каждый бит этой памяти либо управляет каким-то ключом коммутации сигналов, либо является частью таблицы истинности логической функции, которую реализует CLB.

Поскольку конфигурационная память построена по технологии Static RAM, то, во-первых, при включении питания микросхему ПЛИС обязательно надо сконфигурировать, а во-вторых, её можно реконфигурировать практически бесконечное число раз.

Структура ПЛИС основана на ФАЛ (булевой алгебры) и содержит следующие логические элементы: логическое И (конъюнкторы); логическое ИЛИ (дизъюнкторы); логическое НЕ (инверторы); — буферные элементы с прямыми, инверсными и тристабильными выходами; исключающее ИЛИ; — триг-



геры D- и T-типа; мультиплексоры конфигурации. Поскольку любая логическая функция может быть представлена в виде суммы произведений дизъюнктивной нормальной формы (ДНФ), базовыми структурными компонентами ПЛИС являются матрицы элементов И и ИЛИ.

Блоки CLB находятся в коммутационной матрице, которая задаёт соединения входов и выходов блоков CLB. На каждом пересечении проводников находятся шесть переключающих ключей, управляемых своими ячейками конфигурационной памяти. Открывая одни и закрывая другие, можно обеспечить разную коммутацию сигналов между CLB.

CLB очень упрощённо состоит из блока, задающего булеву функцию от нескольких аргументов (она называется таблицей соответствия — Look Up Table, LUT), и триггера (flip-flop, FF). В современных ПЛИС LUT имеет шесть входов. Выход LUT подаётся на выход CLB либо асинхронно (напряжения), либо синхронно (через триггер FF, работающий на системной тактовой частоте).

Помимо CLB, внутри ПЛИС есть ещё ряд важных аппаратных ресурсов. Например, аппаратные блоки умножения с накоплением или блоки DSP. Каждый из них может делать операции умножения и сложения 18-битных чисел каждый такт. В топовых кристаллах число блоков DSP может превышать 6000.

Другой ресурс — это блоки внутренней памяти (Block RAM, BRAM). Каждый блок может хранить 2 Кб. Полная ёмкость такой памяти, в зависимости от кристалла, может достигать от 20 Кб до 20 Мб. Как и CLB, BRAM и DSP-блоки связаны коммутационной матрицей и пронизывают весь кристалл. Связывая блоки CLB, DSP и BRAM, можно получить весьма эффективные устройства обработки данных.

Вспомним, что первые интегральные схемы были созданы в 1950-х годах, и в течение следующих двух десятилетий они постоянно увеличивались в сложности и снижались в стоимости. В середине 1970-х годов были разработаны первые программируемые логические устройства (ПЛУ), предшественники современных ПЛИС. ПЛУ предлагали пользователю гибкость в настройке логической схемы после изготовления кристалла, что было ценным свойством для многих разработчиков. В это время появились первые интегральные схемы, такие как микросхемы RTL (Resistor-Transistor Logic) и DTL (Diode-Transistor Logic). Эти микросхемы имели ограниченные возможности и были дорогими. Однако с появлением технологии TTL (Transistor-Transistor Logic) стали возможны более сложные и дешёвые интегральные схемы. Первыми разработанными ПЛУ стали такие микросхемы, как PAL (Programmable Array Logic), GAL (Generic Array Logic) и PLA (Programmable Logic Array).

Технология ПЛИС была изобретена Россом Фрименом, сооснователем компании Xilinx, в 1983 г., а первой микросхемой ПЛИС была XC2064. Она была гораздо проще современных ПЛИС,

содержала всего лишь 64 логических блока, и её создание привело к появлению отрасли стоимостью в миллиарды долларов. Этот чип использовал маскируемую программную матрицу для определения связей между блоками. Устройство предлагало гибкость программирования, а также возможность повторного использования, поскольку его можно было перепрограммировать.

Во время интеграции транзисторов на микросхемах была намного ниже, чем сейчас, и в цифровых устройствах часто использовались микросхемы "рассыпной логики". Отдельно существовали микросхемы регистров, счётчиков, мультиплексоров, умножителей и др. Под конкретное устройство создавалась своя печатная плата, на которой устанавливались эти микросхемы низкой интеграции. Использование ПЛИС позволило отказаться от такого подхода. Даже ПЛИС на 64 CLB значительно экономит место на печатной плате, а доступность реконфигурации добавила возможность обновлять функциональность устройств уже после изготовления во время эксплуатации, как говорят, in the field (отсюда и название — field-programmable gate array).

XC2064 оказалась настолько важна для мировой индустрии микроэлектроники, что вошла в Chip Hall of Fame (Зал славы чипов/микросхем), образованный IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers — Институт инженеров электротехники и электроники) в 2017 г. В Chip Hall of Fame помещаются интегральные схемы, без которых мы всё ещё были бы в эпоху пара или, возможно, вакуумных ламп.

В это же время стали разрабатываться другие архитектуры ПЛИС, такие как Actel с их антифюзными ПЛИС и Altera с ПЛИС архитектуры CPLD (Complex Programmable Logic Device).

Сегодня существуют два крупных производителя FPGA-чипов: Xilinx и Intel, которые контролируют 58 % и 42 % рынка соответственно. Intel пришла на этот рынок в 2015 г., поглотив компанию Altera, которая была основана когда-то практически одновременно с Xilinx. Технологии ПЛИС Xilinx и Altera во многом схожи, как и среды разработки.

С появлением первых ПЛИС стали разрабатываться различные архитектура и технология. Одной из ключевых разработок было появление SRAM-базированных ПЛИС, которые использовали статические запоминающие устройства (SRAM — Static Random Access Memory) для хранения настроек логической схемы. SRAM-базированные ПЛИС имели ряд преимуществ, таких как возможность перепрограммирования без удаления из системы и быстрое время настройки. Примером таких ПЛИС является Xilinx Virtex с встроенным ядром PowerPC.

Технические характеристики ПЛИС продолжали расти по мере развития технологий. В 1990-е годы появились первые ПЛИС со встроенными процессорами, что позволило создавать более интегрированные системы на кристалле (SoC — System on a Chip). Кроме того,

разработчики стали внедрять такие функции, как блоки памяти, цифровые сигнальные процессоры (DSP) и трансиверы для передачи данных на высоких скоростях. Это позволило использовать ПЛИС для решения более сложных задач, таких как обработка видео, цифровой обработки сигналов и высокоскоростной передачи данных. Примером таких продуктов являются Xilinx Virtex-II и Altera Stratix.

С развитием технологий и потребности в более высокой производительности ПЛИС стали использоваться для решения задач высокопроизводительных вычислений и искусственного интеллекта. Современные ПЛИС, такие как Xilinx Virtex UltraScale+ и Intel Stratix 10, содержат миллионы логических элементов, сотни блоков памяти и трансиверов, а также встроенные процессоры и интерфейсы для подключения к внешним устройствам. Эти мощные чипы используются для решения сложных задач, таких как обработка больших объёмов данных, машинное обучение и ускорение работы серверов.

Помимо увеличения производительности, современные ПЛИС также предлагают улучшенные возможности для разработки и отладки. Производители ПЛИС предоставляют разработчикам мощные инструменты, такие как интегрированные среды разработки (IDE — Integrated Development Environment), симуляторы и анализаторы для проектирования и тестирования своих схем. Это позволяет разработчикам быстро создавать и оптимизировать свои проекты, а также упрощает процесс отладки и повышает надёжность решений на базе ПЛИС.

С развитием технологий и появлением новых областей применения ПЛИС, таких как Интернет Вещей (IoT — Internet of Things) или автомобильной промышленности, производители интегральных схем продолжают совершенствовать свои продукты. В последние годы наблюдается рост интереса к низкочастотным ПЛИС, таким как Xilinx Artix и Intel Cyclone, которые предлагают оптимальное сочетание производительности и энергоэффективности для малопотребляющих приложений.

Продолжаются исследования и разработка новых материалов и технологий для улучшения характеристик ПЛИС. Например, исследуются возможности использования новых материалов, таких как графен и углеродные нанотрубки, для создания более быстрых и энергоэффективных ПЛИС. Также разрабатываются новые архитектуры и методы программирования, такие как оптическое программирование и квантовые ПЛИС, которые могут открыть новые горизонты для применения программируемых логических устройств.

На сегодня существуют всего два основных вида ПЛИС: CPLD и FPGA.

CPLD (Complex Programmable Logic Device) — классическая ПЛИС, структура которой строится на однородной матрице, состоящей из одинаковых логических блоков числом сотни и тысячи штук. CPLD обычно комплектуется небольшой встроенной энергонезависимой памятью для хранения

прошивки, данных и используется в устройствах, когда нужны высокая скорость и большое число входов-выходов для выполнения относительно простых задач. К плюсам можно добавить сравнительно невысокую цену.

FPGA (Field-Programmable Gate Array) — более развитая и сложная ПЛИС. Содержит большее число элементов, может включать в себя готовые блоки для выполнения стандартных операций, например мультиплексоров, обработки протоколов коммутации, аудио, видео и так далее. Прошивка, как правило, хранится во внешней энерго-независимой памяти. Дороже предыдущего варианта, но предоставляет широкие возможности и позволяет создавать более сложные устройства.

Наиболее распространёнными являются ПЛИС двух производителей: Altera (теперь являющаяся частью Intel) и Xilinx (теперь принадлежащей AMD). У каждого производителя выпускаются несколько серий микросхем, отличающихся размером, числом выводов, дополнительным оснащением и прочими параметрами. Каждая серия содержит в себе несколько конкретных моделей.

У Altera и Xilinx имеются похожие, но собственные среды разработки. Сказать, какая из них лучше, очевидно, может лишь тот, кто в них работал. Говорят, они обе достаточно сложные и непривычные для рядовых программистов контроллеров. К тому же по обеим очень мало информации на русском языке. Более того, на сегодняшний день, в связи с известными событиями, скачивание того и другого для россиян временно закрыто.

За счёт того что внутри FPGA можно реализовать любую аппаратную цифровую схему (главное, чтобы хватило ресурсов), одно из важных применений ПЛИС — это прототипирование микросхем ASIC. Ведь разработка ASIC очень сложна и затратна, цена ошибки очень высока, и вопрос тестирования логики критичен. Поэтому одним из этапов разработки ещё до начала работы над физической топологией схемы стало её прототипирование на одном или нескольких кристаллах ПЛИС. Для разработки ASIC выпускают специальные платы, содержащие много ПЛИС, соединённых между собой. Прототип микросхемы работает на значительно меньших частотах (может быть, десятки мегагерц), но позволяет сэкономить на выявлении проблем и багов.

Гибкая структура ПЛИС позволяет реализовывать аппаратные схемы для высокоскоростной и параллельной обработки данных с возможностью изменить алгоритм. Эта платформа сочетает эффективность ASIC с возможностью менять программу. Конечно, ПЛИС не универсальны, но существует класс алгоритмов и задач, которые на них будут показывать лучшую производительность, чем на CPU и даже на GPU (Graphics Processing Unit — графический процессор). Сложность разработки для FPGA выше, однако новые средства разработки делают этот разрыв меньше.

Решающее преимущество ПЛИС — это способность обрабатывать данные в темпе их поступления с минимальной задержкой реакции. В качестве примера можно представить умный сетевой маршрутизатор с большим числом портов, причём при поступлении пакета Ethernet на один из его портов необходимо проверить множество правил, прежде чем выбрать выходной порт. Возможно, даже потребуется изменение некоторых полей пакета или добавление новых. Использование ПЛИС позволяет решать эту задачу мгновенно. Байты пакета ещё только начали поступать в микросхему из сетевого интерфейса, а его заголовок уже анализируется. Использование процессоров тут может существенно замедлить скорость обработки сетевого трафика, поскольку процессор будет последовательно выполнять все предписанные программой процедуры, находить соответствующие правила и т. п. Поэтому достичь требуемой гибкости в сочетании с высокой производительностью поможет только ПЛИС. Таким образом, ПЛИС используются там, где нужна высокая производительность обработки данных, наименьшее время реакции, а также низкое энергопотребление.

В облачных вычислениях ПЛИС применяются для быстрого счёта, ускорения передачи сетевого трафика и осуществления оперативного доступа к массивам данных. Сюда же можно отнести использование ПЛИС для высокочастотной торговли на биржах. В серверы вставляют платы FPGA с PCI Express и оптическим сетевым интерфейсом производства Intel (Altera) или Xilinx.

На ПЛИС отлично ложатся криптографические алгоритмы, сравнение последовательностей ДНК и научные задачи, вроде молекулярной динамики. В компании Microsoft, например, давно используют ПЛИС для ускорения поискового сервиса Bing, а также для организации программно-определяемых сетей (SDN — Software Defined Networking) внутри облака Azure.

Бум машинного обучения тоже не обошёл стороной ПЛИС. Компании Xilinx и Intel предлагают средства на основе FPGA для работы с глубокими нейросетями. Они позволяют получить прошивки FPGA, которые реализуют ту или иную сеть напрямую из фреймворков, вроде Caffe и TensorFlow.

Причём это всё можно попробовать, буквально не выходя из дома и используя облачные сервисы. Например, в Amazon можно арендовать виртуальную машину с доступом к плате FPGA и любым средствам разработки, в том числе и Machine Learning (машинное обучение).

Традиционно ПЛИС применялись для цифровой обработки одномерных сигналов (и конкурировали с процессорами DSP) в устройствах радиолокации, приёмопередатчиках радиосигналов. С ростом интеграции микросхем и увеличением производительности платформы ПЛИС стали всё чаще применяться для высокопроизводительных вычислений, например для обработки двумерных сигналов "на краю облака"

(Edge Computing).

Это так называемые граничные вычисления, позволяющие экономить облачные ресурсы. Если, к примеру, для анализа автомобильного трафика с функцией распознавания номеров машин использовать камеру с возможностью передачи видео через Интернет и обрабатывать поток на удалённом сервере, то с ростом числа камер будет серьёзно расти и нагрузка на сеть. Вместо этого лучше реализовать распознавание номеров на вычислителе, установленном непосредственно в корпусе видеокamеры, и передавать в облако номера машин просто в формате текста. Для этого даже можно взять сравнительно недорогие ПЛИС с низким энергопотреблением, чтобы хватало питания аккумулятора. При этом остаётся возможность изменять логику работы ПЛИС, например при изменении стандарта автомобильных номеров.

А если взять робототехнику или различные дроны, то в этой сфере также необходимо выполнять два ключевых условия — высокую производительность и низкое энергопотребление. Платформа ПЛИС подходит тут как нельзя лучше и может использоваться, в частности, для создания бортовых контроллеров для БПЛА, которые смогут принимать оперативные решения на лету непосредственно в процессе выполнения различных задач.

С началом технологического прогресса, который связан с появлением первых интегральных схем и развития полупроводниковой промышленности, производители интегральных схем постоянно совершенствовали ПЛИС, предлагая новые архитектуры, технологии и функциональные возможности. В результате ПЛИС стали ключевым компонентом в современных высокотехнологичных системах и продолжают эволюционировать, открывая новые возможности для разработчиков и инженеров по всему миру.

Во многом сегодня ПЛИС — это начало практически любых схемотехнических решений самого широкого применения, начало творчества, начало инноваций в микроэлектронике. Или начало новых мыслей о том, как создать нечто подобное в нашей импортозамещаемой индустрии.

По материалам

<http://we.easyelectronics.ru/plis/plis-zametki-nachinayusche-go.html> 5,

<https://marsohod.org/11-blog/265-fpga-6>,

<https://habrahbr.ru/post/274829>,
<https://habr.com/ru/articles/520420/>,

<https://www.i-programmer.info/news/82-heritage/10905-chip-hall-of-fame.html>,

<https://www.ieee.org/>,
<https://xakep.ru/2018/11/15/fpga/#toc01>,

<https://tellur-el.ru/blog/tehnologii/istoriya-sozdaniya-plis/?ysclid=m15363r13343210750>