

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Особенность микросхем ПЛИС

Основное отличие ПЛИС (FPGA) от заказных микросхем (ASIC), которое, по сути, является причиной их существования, заключается в... их названии, т. е.

программируемая логическая интегральная схема
(*field programmable gate array*)

А теперь — шутки в сторону. Дело в том, что для программирования необходим механизм, который позволял бы конфигурировать (программировать) подготовленный кремниевый кристалл.

Простая программируемая функция

В качестве основы для дальнейших рассуждений давайте рассмотрим пример очень простой программируемой функции с двумя входами a и b и одним выходом y (Рис. 2.1).

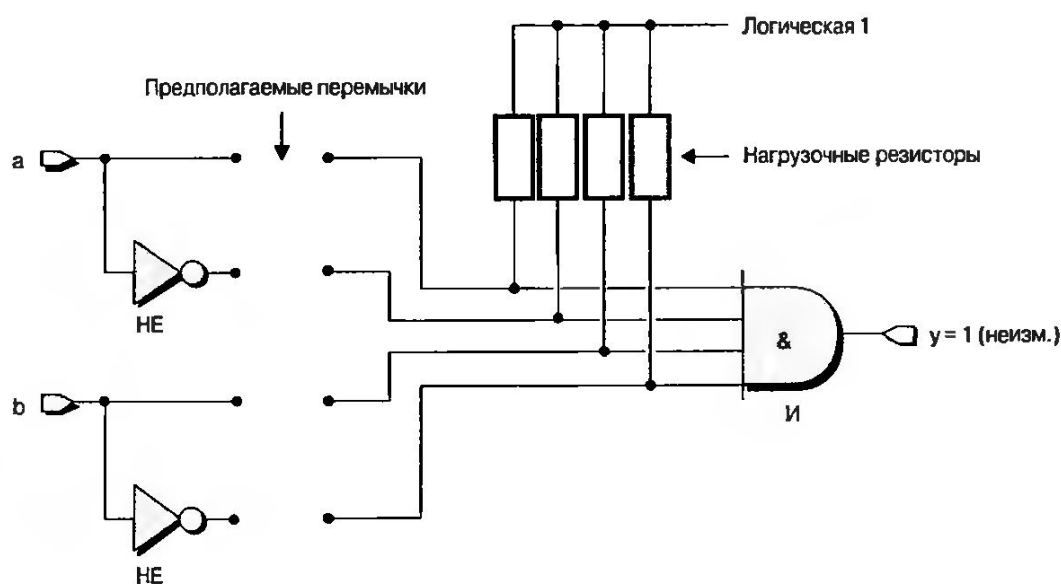


Рис. 2.1. Простая программируемая функция

На входах присутствуют инверторы (операция НЕ), следовательно, каждый вход может быть представлен либо в прямой, т. е. истинной, либо в измененной, т. е. инвертированной, форме.

Особого внимания заслуживает расположение предполагаемых перемычек. При отсутствии перемычек на все входы логического элемента И через нагрузочные резисторы будет подана логическая 1. Это значит, что выход y данного устройства всегда будет находиться в состоянии логической 1, что делает эту схему весьма неинтересной в её текущем состоянии. Чтобы сделать простую программируемую функцию более привлекательной, необходим некий механизм, который позволял бы устанавливать одну или несколько перемычек.

Метод плавких перемычек

Одним из первых методов, позволявший пользователям программировать собственные устройства, был и до сих пор существует так называемый *метод плавких перемычек*. При использовании этого метода устройство изготавливается со всеми возможными соединениями, каждое из которых представляет собой плавкую перемычку (Рис. 2.2).

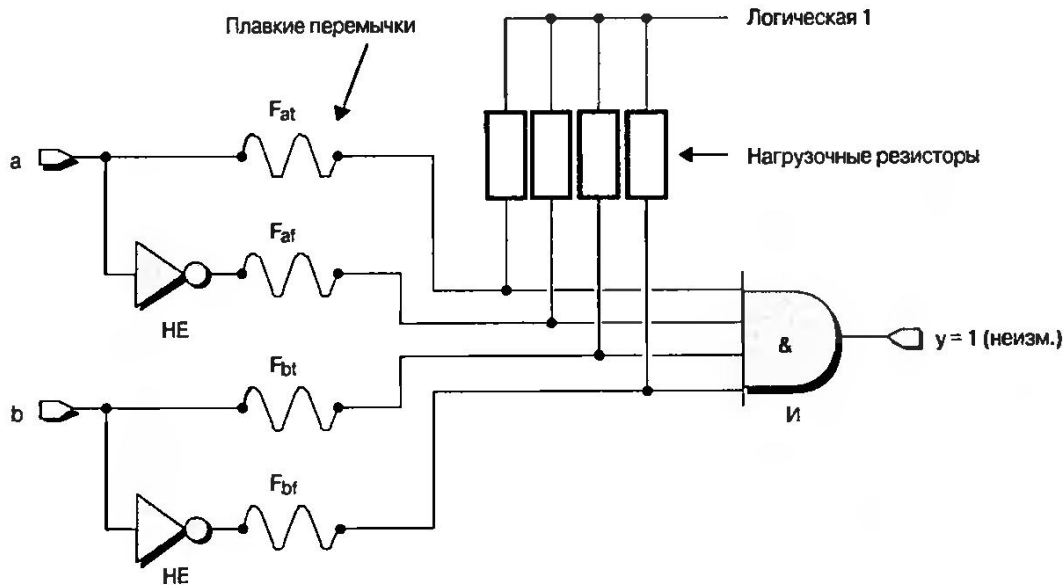


Рис. 2.2. Заполнение устройства незапрограммированными плавкими перемычками

Принцип действия этих перемычек аналогичен принципу действия предохранителей, которые используются в бытовой технике, например в телевизорах. Если в силу непредвиденных обстоятельств телевизор начинает потреблять слишком большую мощность, это приведет к перегоранию предохранителя. В результате произойдет разрыв цепи (разрыв проводника), который защитит устройство от повреждения.

Плавкие перемычки имеют микроскопические размеры, поскольку при их изготовлении на кремниевом кристалле используются те же технологии что при изготовлении транзисторов и проводников.

Когда инженер приобретает новое программируемое устройство на основе плавких перемычек все перемычки в устройстве изначально целые. Это означает, что в незапрограммированном состоянии на выходе функции, которая рассматривается здесь в качестве примера, всегда будет находиться уровень логического 0. Наличие уровня логического 0 хотя бы на одном из входов вентиля И приведет к установке 0 на выходе. Так, если на входе a установлен 0, на выходе вентиля И также будет 0. Аналогично, если на входе a установлена логическая 1, выход вентиля НЕ, который будем обозначать как $\bar{a}$, будет установлен в 0, и, следовательно, на выходе вентиля И будет 0. Такая же ситуация имеет место при использовании входа b .

Вся суть заключается в том, что разработчики могут выборочно удалять ненужные плавкие перемычки, подавая на входы устройства импульсы относительно высокого напряжения и большого тока. Рассмотрим, например, что произойдет, если удалить плавкие перемычки F_{af} и F_{bf} (Рис. 2.3).

Удаление этих перемычек приведет к отсоединению инвертированного входа a и прямого входа b от логического элемента И (через на-

25000 лет до н. э.
Первые бумеранги
использовались
людьми, прожива-
ющими на терри-
тории нынешней
Польши. Самому
старому австра-
лийскому бумеран-
гу «всего лишь»
13000 лет.

2500 лет до н. э.
В Месопотамии
изобретена пайка,
ее использовали для
соединения листов
золота.

Символ «&» используется для обозначения логической функции И, а символ « $\bar{}$ » для обозначения функции НЕ.

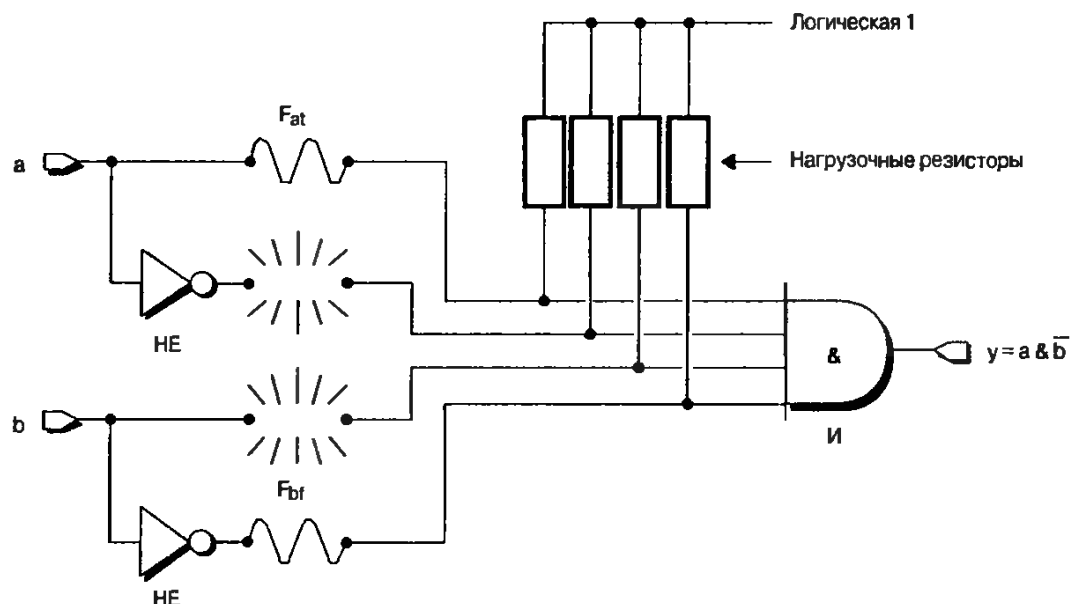


Рис. 2.3. Плавкие перемычки после программирования

грузочные резисторы на этих входах устанавливается значение логической 1). Это обстоятельство вынуждает устройство формировать новую функцию $y = a \& \bar{b}$ (см. главу 3).

Такой процесс удаления плавких перемычек обычно называется процессом *программирования* устройства, но может также называться *перезжиганием* перемычек или *прожиганием* устройства.

Устройства, конфигурирование которых основано на методе плавких перемычек, являются *однократно программируемыми* устройствами (OTP — *one-time programmable*), так как после пережигания плавкая перемычка не может быть заменена или возвращена в первоначальное состояние.

Для разных ПЛИС используются разные методы программирования, но метод плавких перемычек к современным ПЛИС не применяют. Поводом для его упоминания в данной книге явилось то, что он позволяет читателю понять материал, представленный в следующем разделе, и, кроме того, о нем достаточно подробно говорится в гл. 3, где рассматривается история развития технологии производства ПЛИС.

Метод наращиваемых перемычек

Данный метод прямо противоположен методу плавких перемычек. В этом случае каждое конфигурируемое соединение имеет линию связи, называемую *наращиваемой* перемычкой. В незапрограммированном состоянии наращиваемая перемычка имеет столь высокое сопротивление, что её можно рассматривать как разомкнутую цепь (разрыв проводника, Рис. 2.4, а).

В таком виде устройство находится в момент его приобретения. Однако перемычки могут выборочно «наращиваться» (программироваться) с помощью подаваемых на входы устройства импульсов относительно высокого напряжения и большого тока. Например, если добавить наращиваемые перемычки в цепь инвертированного входа a и прямого входа b , устройство реализует функцию $y = \bar{a} \& b$ (Рис. 2.5, а).

Наращиваемая перемычка начинает свою жизнь как микроскопический столбец аморфного (некристаллического) кремния, связывающего два металлических проводника. В таком «незапрограммирован-

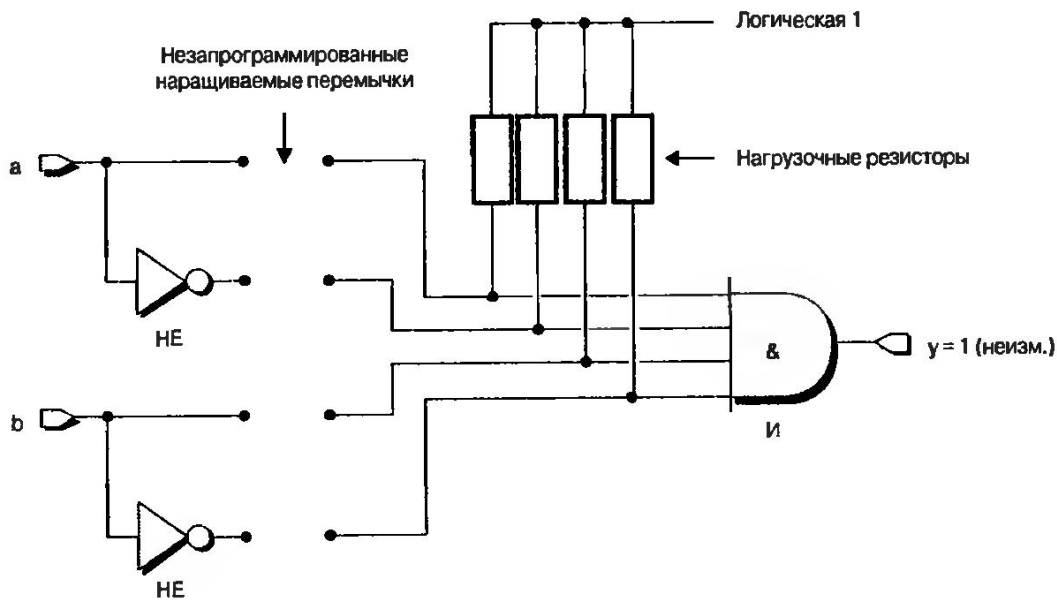


Рис. 2.4. Наращиваемые перемычки до программирования

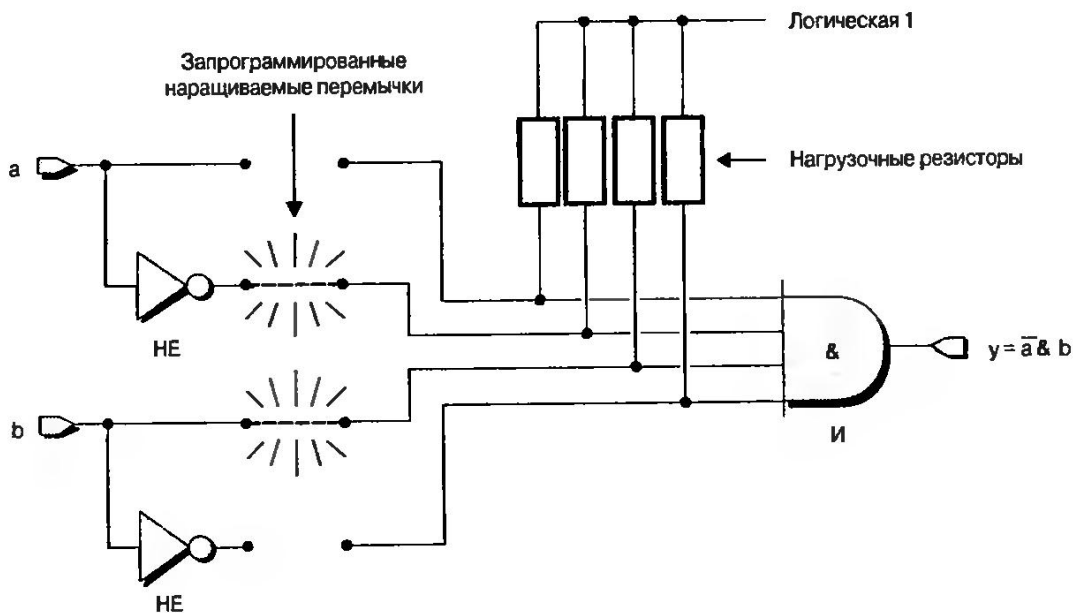


Рис. 2.5. Наращиваемые перемычки после программирования

ном» состоянии аморфный кремний ведет себя как диэлектрик с сопротивлением, достигающем миллиарда ом (Рис. 2.6, а).

Процесс программирования отдельного элемента заключается в выращивании связи, называемой соединением, и осуществляется путем преобразования аморфного кремния-изолятора в токопроводящий поликристаллический кремний (Рис. 2.6, б).



Рис. 2.6. Выращивание перемычки

260 лет до н. э. Архимед разработал принцип рычага.

К сожалению, устройства, конфигурирование которых основано на методе наращиваемых перемычек, являются *однократно программируемыми*, так как однажды выращенная перемычка не может быть разрушена или возвращена в исходное состояние.

Устройства, программируемые фотошаблоном

Прежде чем продолжить наши рассуждения, давайте совершим небольшой экскурс в область терминологии, которой будем придерживаться в дальнейшем. Электронные системы в общем и компьютеры в частности используют два типа запоминающих устройств: *постоянное запоминающее устройство* (ПЗУ) и *оперативное запоминающее устройство* (ОЗУ).

ПЗУ называют *энергонезависимыми* устройствами, так как хранящаяся в них информация не разрушается при отключении питания системы. Другие компоненты системы могут считывать информацию из устройств ПЗУ, но не могут записывать в них новые данные. В отличие от ПЗУ, в ОЗУ данные могут как записываться, так и считываться. Такие устройства являются *энергозависимыми*, так как при отключении питания вся информация, хранящаяся в ОЗУ, будет потеряна.

Типовые микросхемы ПЗУ также называются *программируемыми фотошаблоном*, или *масочно-программируемыми*, поскольку любые содержащиеся в них данные жестко прошиваются в процессе производства с помощью *фотошаблона*¹⁾. Фотошаблоны используются для создания транзисторов и соединяющих их на кремниевом кристалле металлических проводников, которые также называют *слоями металлизации*.

Рассмотрим, например, транзисторную ячейку ПЗУ, которая может хранить один *бит*²⁾ данных (Рис. 2.7). Стандартное устройство ПЗУ состоит из некоторого количества *строк* (адреса) и *столбцов* (данные), которые вместе образуют массив данных. К каждому столбцу подключен один нагрузочный резистор, который позволяет поддерживать на выходе столбца уровень логической 1, а в каждом пересечении строки и столбца присутствует транзистор и, при необходимости, перемычка. Наличие/отсутствие перемычки задается фотошаблоном.

Большинство микросхем ПЗУ изначально конфигурируют для массового пользователя. Когда необходимо сконфигурировать устройство в соответствии с особенными требованиями используется индивидуально изготовленный фотошаблон, с помощью которого определяются ячейки с перемычками и ячейки без перемычек.

Давайте проанализируем ситуацию, которая возникает при подаче активного сигнала на проводник строк, т. е. когда эта строка пытается перевести все подключенные к ней транзисторы в открытое состояние. В случае, когда ячейка содержит запрограммированное по фотошаблону соединение, активирующийся транзистор этой ячейки будет соединять проводник столбца с уровнем логического 0, устанавливая, таким образом, значение выхода в 0. И наоборот: если в ячейке нет запрограммированного соединения, транзистор не будет привносить какого-либо действия и через нагрузочный резистор, подсоединенный к столбцу, будет поддерживать на выходе микросхемы уровень логической 1.

¹⁾ Концепция фотошаблона и способы создания кремниевых кристаллов более детально описаны в книге «Bebop to the Boolean Boogie (An Unconventional Guide to Electronics)», ISBN 0-7506-7543-8.

²⁾ Термин «*бит*», что значит двоичная цифра, «изобрел» в 1940 году Джон Таки (John Wilder Tukey), американский химик и специалист в области топологии и статистики.

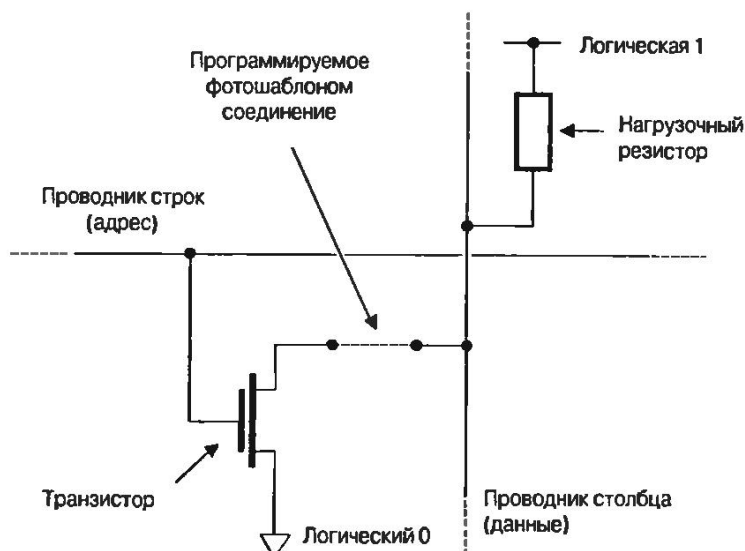


Рис. 2.7. Транзисторная ячейка ПЗУ, программируемая фотошаблоном

ППЗУ

Недостаток масочно-программируемых устройств состоит в том, что их производство является весьма дорогостоящим удовольствием, если только не предполагается их производство в очень больших количествах. Кроме того, они весьма редко используются при разработке аппаратуры, когда возникает необходимость часто менять состав компонентов.

Первые программируемые постоянные запоминающие устройства (ППЗУ) были разработаны в 1970 году фирмой Harris Semiconductor. Для создания этих устройств использовался метод плавких перемычек из нихрома.

В качестве примера рассмотрим упрощенную схему ячейки ППЗУ на основе транзистора с плавкой перемычкой (Рис. 2.8).

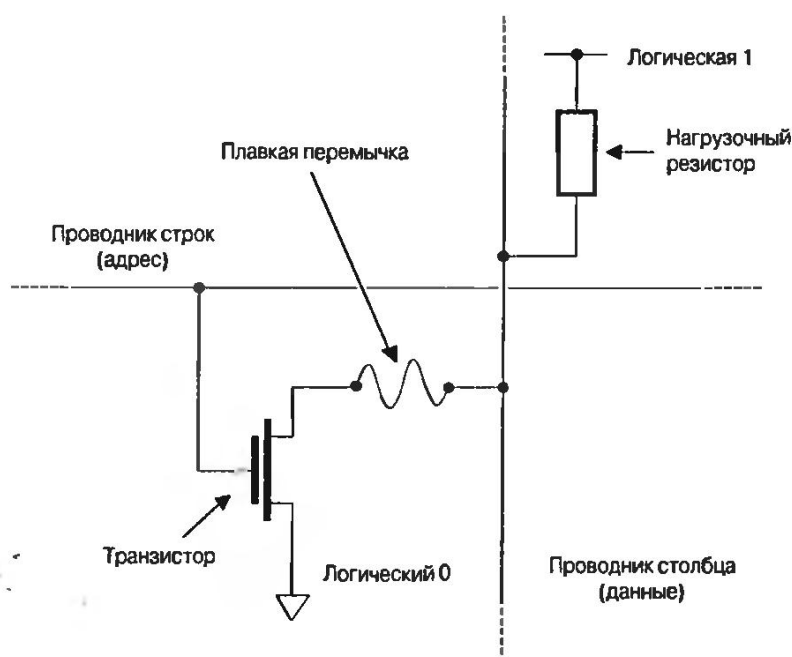


Рис. 2.8. Ячейка ППЗУ на основе транзистора с плавкой перемычкой

Микросхема, поступившая от изготовителя, находится в незапрограммированном состоянии, но при этом она содержит все предусмотренные конструкцией плавкие перемычки. В этом случае при переводе строки в активное состояние будут включаться все транзисторы, под-

15 год до н. э. В Китае изобрели радиотелеграфную передачу.

соединенные к этой строке, вынуждая, таким образом, все столбцы понижать уровень выходного напряжения до логического 0 через соответствующие им транзисторы. Инженер-разработчик может по своему усмотрению выборочно удалять ненужные плавкие перемычки, подавая на вход устройства импульсы относительно высокого напряжения и большого тока. При удалении плавкой перемычки на выходе ячейки будет формироваться уровень логической 1.

Эти микросхемы изначально предназначались для использования в качестве устройств памяти, т. е. для хранения компьютерных программ и значений постоянных величин (отсюда аббревиатура ПЗУ). Однако разработчики нашли им полезное применение при реализации простых логических функций, таких как таблицы соответствия и конечные автоматы. Тот факт, что микросхемы ППЗУ имели низкую стоимость, позволяет предположить, что эти устройства могли использоваться для устранения неисправностей или тестирования новых разработок посредством простого прожига новой микросхемы и помещения её в систему.

Со временем появились различные ПЛУ общего назначения, основанные на методах прожигаемых и наращиваемых перемычек (см. гл. 3).

СППЗУ

Как уже отмечалось, устройства на основе прожигаемых или наращиваемых перемычек могут быть запрограммированы только один раз, однократно. Поэтому внесение в систему каких-либо изменений после пережигания, или наращивания, перемычки требует больших затрат времени. В некоторых случаях можно увеличить модифицируемость устройства путем прожига или наращивания ещё не модифицированных исходных перемычек, но возможность воспользоваться этим свойством выпадает крайне редко. В связи с этим возникла идея создания таких устройств, которые можно было бы программировать, стирать и вновь программировать, т. е. перепрограммировать.

Одним из вариантов реализации этой идеи явилось *стираемое программируемое постоянное запоминающее устройство* (СППЗУ). Первое такое устройство было разработано в 1971 году компанией Intel, которая присвоила ему название 1702.

СППЗУ-транзистор имеет такую же структуру, как стандартный МОП-транзистор, но с дополнительным (вторым) *плавающим затвором* из поликристаллического кремния, изолированного слоями оксида кремния (Рис. 2.9).

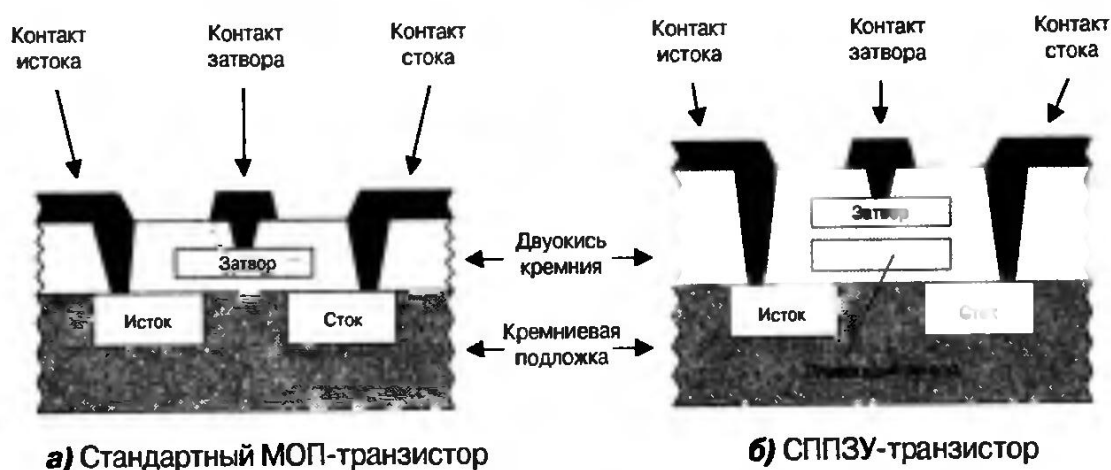


Рис. 2.9. Сравнение МОП- и СППЗУ-транзисторов

В незапрограммированном состоянии плавающий затвор не заряжен и не влияет на работу обычного затвора. Чтобы запрограммировать транзистор, необходимо приложить к контактам затвора и стока полевого транзистора относительно высокое напряжение, около 12 вольт. При этом транзистор резко включается, и быстрые электроны преодолевают слой оксида кремния, направляясь в плавающий затвор. Этот процесс известен как *инжекция горячих*, или *высокоэнергетических, электронов*. После снятия сигнала программирования, отрицательно заряженные частицы остаются в плавающем затворе. Их заряд стабилен и при соблюдении правил эксплуатации не рассеивается на протяжении более 10 лет. Накопленные на плавающем затворе заряды блокируют нормальную работу обычного затвора, и, таким образом, позволяют различать запрограммированные ячейки от незапрограммированных. Благодаря этому свойству такие транзисторы можно использовать для формирования ячеек памяти (Рис. 2.10).

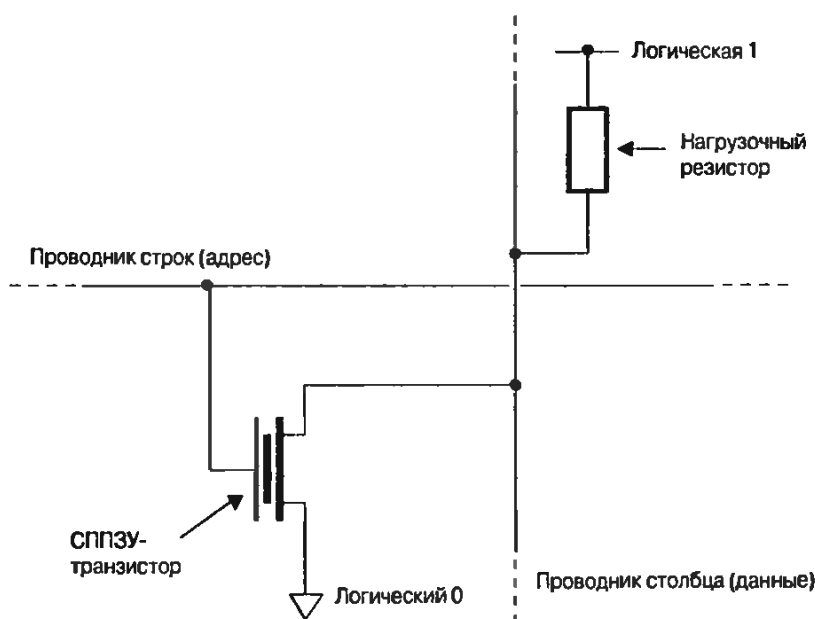


Рис. 2.10. Ячейка памяти на основе СППЗУ-транзистора

Такая ячейка памяти больше не нуждается в плавких перемычках, наращиваемых перемычках или программируемых фотошаблоном соединений. В незапрограммированном состоянии, которое обеспечивается производителем, все плавающие затворы в СППЗУ-транзисторах будут не заряжены. В этом случае при переводе проводника строк в активное состояние будут включаться все транзисторы, подсоединенные к этой строке, заставляя все проводники столбцов сбрасывать сигнал на выходе до уровня логического 0 через соответствующие транзисторы. Для программирования инженеры могут использовать входы устройства для заряда плавающих затворов выбранных транзисторов, тем самым, блокируя их работу. В этих случаях в ячейках памяти будут храниться логические 1.

С точки зрения расположения на кремниевом кристалле ячейки памяти СППЗУ более эффективны, так как их размеры существенно меньше, чем размеры их аналогов на плавких перемычках. Однако предметом их гордости является возможность быть стёртыми и перепрограммируемыми. Стирание ячеек памяти есть не что иное, как «вытекание» электронов из плавающего затвора. Энергия, необходимая для вытекания электронов, обеспечивается с помощью источника *ультрафиолетового (УФ)* излучения. Микросхемы СППЗУ поставляются в керамическом или пластиковом корпусе, наверху которого

имеется небольшое *кварцевое окно*. Это окно обычно закрыто кусочком непрозрачной клейкой ленты. Чтобы стереть микросхему, сначала надо извлечь её из монтажной платы, открыть кварцевое окно, и затем поместить в закрывающийся контейнер с мощным УФ-источником.

Главными недостатками СППЗУ является их дорогостоящий корпус с кварцевым окном и время, необходимое для их очистки, которое составляет примерно 20 минут. Проблема, которую придется решать в ближайшее время, как это не парадоксально, связана с усовершенствованием технологического процесса, который позволит выполнять транзисторы меньшего размера. Наряду с тем, что полупроводниковые структуры становятся меньше и их плотность, т. е. количество транзисторов и соединений, увеличивается, большой процент поверхности кристалла оказывается покрытым металлом. Это затрудняет поглощение УФ-излучения ячейками СППЗУ и увеличивает время экспозиции, требуемое для стирания.

Эти микросхемы изначально предназначались для использования в качестве программируемых постоянных запоминающих устройств, и это нашло отражение в их названии — ППЗУ. Позднее эта технология стала применяться в более универсальных ПЛУ, которые получили название *стираемые ПЛУ*.

ЭСППЗУ

Следующая ступенька технологической лестницы представляла собой *электрически стираемое программируемое постоянное запоминающее устройство* (ЭСППЗУ). Ячейка ЭСПЗУ приблизительно в 2.5 раза больше, чем эквивалентная ей ячейка СПЗУ, так как она состоит из двух отстоящих друг от друга транзисторов (Рис. 2.11).

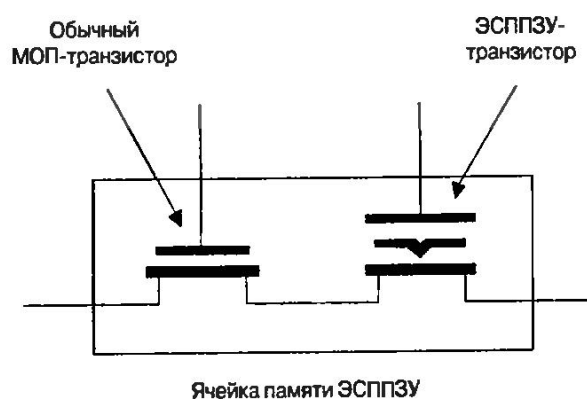


Рис. 2.11. Ячейка памяти ЭСПЗУ

Подобно ЭСПЗУ-транзистору, СПЗУ-транзистор имеет плавающий затвор, но этот затвор окружен очень тонким изолирующим слоем оксида кремния. Второй транзистор может использоваться для стирания ячейки памяти электрическим способом.

На заре своего существования ЭСПЗУ-микросхемы использовались в качестве компьютерной памяти. Эта же технология была впоследствии применена к устройствам ПЛУ, которые стали называться *электрически стираемыми ПЛУ* (ЭСПЛУ) или *программируемыми логическими интегральными схемами* (ПЛИС).

Flash-технология

Flash — вспышка, миг, мгновение.

Технология, известная как Flash, ведет свою родословную от технологии изготовления как СПЗУ, так и ЭСПЗУ. Первоначально название Flash было присвоено устройствам, выполненным по этой тех-

нологии, чтобы отразить характерное для них чрезвычайно малое время стирания по сравнению с устройствами СППЗУ. Компоненты, выполненные по Flash-технологии, могут быть реализованы во множестве архитектур. Одни устройства могут иметь ячейки памяти, выполненные на одном транзисторе с плавающим затвором такой же площади, как в ячейках СППЗУ, но с гораздо более тонкими изолирующими слоями оксида кремния. Такие устройства могут стираться электрическим способом, но при этом только путём очистки всего устройства или большей его части. Другие типы устройств построены на двухтранзисторных ячейках памяти подобно микросхемам ЭСППЗУ, что позволяет стирать или перепрограммировать информацию пословно.

Первые версии Flash-устройств могли хранить только один бит информации на ячейку. Но уже к началу 2002 года технологи выполнили ряд экспериментов по увеличению ёмкости ячеек. Оказалось, что согласно одному методу запоминание двух битов в одной ячейке возможно благодаря хранению различных уровней зарядов в плавающих затворах Flash-транзисторов, а согласно другому методу — благодаря созданию двух дискретных запоминающих узлов в слое под затвором.

Статическое ОЗУ

Существуют два основных типа полупроводниковых устройств оперативной памяти: *динамическое ОЗУ* и *статическое ОЗУ*. В случае динамического ОЗУ каждая ячейка памяти формируется с помощью пары транзистор-конденсатор, которая занимает мало места на поверхности кремниевого кристалла. Определение «динамическое» отражает тот факт, что с течением времени конденсатор теряет свой заряд, т. е. для сохранности данных каждая ячейка должна периодически перезаряжаться. Эта операция называется *регенерацией*. Она является относительно сложной и требует значительного количества дополнительных схемных решений. Применение этих микросхем оказывается оправданным, если «стоимость» цепей регенерации покрывается десятками миллионов бит в одной микросхеме динамического ОЗУ. Однако с точки зрения программируемой логики технология динамического ОЗУ не представляет большого интереса.

Определение «статическое» в названии статического ОЗУ отражает тот факт, что однажды записанное в ячейку памяти значение будет оставаться в ней неизменным до тех пор, пока не будет специально изменено или система не будет обесточена. Обозначение ячейки памяти на основе статического ОЗУ приведено на **Рис. 2.12**.

Ячейка памяти содержит мультитранзисторный элемент статического ОЗУ, выход которого подключен к дополнительному управляющему транзистору. В зависимости от содержимого (логический 0 или логическая 1) элемента памяти управляющий транзистор будет закрыт (т. е. отключен) или открыт (т. е. включен). Один из недостатков программируемых устройств на основе ячеек памяти статического ОЗУ состоит в том, что каждая ячейка занимает значительную площадь на поверхности кремниевого кристалла, так как состоит из четырех или шести транзисторов, сконфигурированных в виде регистра-защелки. Другим недостатком является то, что данные о конфигурации устройства будут потеряны при отклю-

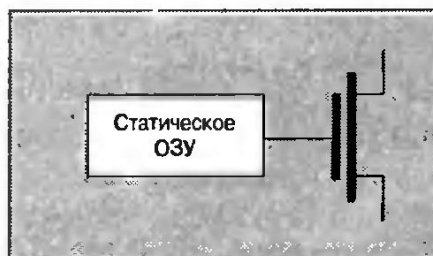


Рис. 2.12. Программируемая ячейка памяти на основе статического ОЗУ

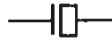
чении питания системы. Это означает, что при включении системы такие устройства приходится перепрограммировать. В то же время их можно перепрограммировать быстро и многократно.

Способы использования ячеек памяти в ПЛИС на основе статического ОЗУ более подробно будут рассмотрены в следующих главах. Здесь необходимо только заметить, что такие ячейки памяти могут быть использованы для замены плавких перемычек в примере, показанном на Рис. 2.2, наращиваемых перемычек (Рис. 2.4) или транзисторов (и масочно-программируемых соединений), относящихся к ячейкам памяти ПЗУ (Рис. 2.7). Естественно, что в последнем случае, было бы бессмысленно иметь ПЗУ на основе ячеек статического ОЗУ.

Заключение

Программируемые устройства и связанные с ними технологии программирования приведены в Табл. 2.1.

Таблица 2.1. Технологии программирования

Технология	Условное обозначение	Преимущественно применяется для
Плавкие перемычки		Простых ПЛУ
Наращиваемые перемычки		ПЛИС
СППЗУ		Простых и сложных ПЛУ
ЭСППЗУ и FLASH		Простых и сложных ПЛУ (некоторых ПЛИС)
Статическое ОЗУ		ПЛИС (некоторых сложных ПЛУ)

Кроме того, надо иметь в виду, что постоянно «всплывают» новые технологии. Некоторые из них немного «поплавав», бесследно исчезают в сточной трубе, другие так быстро пробиваются наверх, что иногда не понятно, откуда они появились.

Одна из таких технологий, несомненно, представляет интерес и называется *магнитным ОЗУ* (MRAM — *magnetic RAM*). Начало развитию этой технологии было положено в 1974 году, когда фирма IBM разработала так называемый *магнитный туннельный переход*. Речь шла о трехслойной структуре, состоящей из двух ферромагнитных слоев, разделенных тонким изолирующим слоем. Ячейки магнитного ОЗУ могли создаваться на пересечении двух проводников, проводника строк и проводника столбцов, с магнитным туннельным переходом между ними.

Ячейки магнитного ОЗУ — это высокая скорость работы статического ОЗУ, большой объем динамического ОЗУ, энергонезависимость Flash-технологии и минимальное количество потребляемой энергии. Согласно прогнозам, появление микросхем магнитного ОЗУ не заставит себя ждать. И как только они появится на рынке, станет возможной реализация таких устройств, как ПЛИС на ячейках магнитного ОЗУ.