

## РЕПРОГРАММИРУЕМАЯ ОДНОРОДНАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СТРУКТУРА НА ОСНОВЕ ПЭМП

Б. А. Панфилов, Ю. Б. Панфилов

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Статья получена 12 января 2014 г.

**Аннотация.** Металлоподобная перемычка (МП) возникает в результате полярнозависимого электромассопереноса в кремнии (ПЭМП). Воздействием специально сформированных импульсов возможно изменять толщину МП. На основе МП могут быть изготовлены резистивная матрица памяти (РМП) и коммутационная матрица (КМ). В свою очередь на основе РМП и КМ может быть создано новое устройство программируемой логики - репрограммируемая однородная вычислительная структура на основе ПЭМП.

**Ключевые слова:** металлоподобная перемычка, полярнозависимый электромассоперенос в кремнии, резистивная матрица, коммутационная матрица, программируемая логика.

**Abstract.** Metal-jumper (MP) is the result of polar dependent electro migration in silicon (PDEM. It is possible to change the thickness of the MP by the the influence of specially shaped pulses. The resistive memory matrix (RMM) and the switching matrix (SM) can be made on the basis of the MP. In turn the new device: programmable logic - reprogrammable homogeneous computing structure based on PDEM can be created on the basis of RMM and SM.

**Key words:** metal-jumper, polar dependent electro migration in silicon, resistive matrix, switching matrix, programmable logic.

### 1. Технология полярнозависимого электромассопереноса в кремнии (ПЭМП)

Технология ПЭМП позволяет создавать электронные устройства с неизвестными ранее свойствами, открывающие новые возможности для обработки информации.

ПЭМП заключается в протекании электронных процессов и полярнозависимого электромассопереноса вещества электродов в межэлектродном пространстве под действием соответствующих электрических сигналов и наблюдается как на планарных кремниевых структурах (электроды нанесены на одной поверхности кремниевой пластины), так и на объёмных кремниевых структурах (электроды нанесены на противоположных поверхностях кремниевой пластины).

В процессе первого включения (формовки) под действием нарастающего импульса тока в объёме кремния формируется капилляр, заполненный жидким металлоподобным сплавом (ЖМС) металл электрода - кремний. После прекращения действия импульса формовки сплав остывает и превращается в твердую металлоподобную перемычку (МП). Поперечное сечение капилляра, (а, следовательно, и сопротивление МП) регулируется в сторону уменьшения сопротивления токовым режимом процесса формовки.

В процессе выключения под действием электрического импульса противоположной полярности МП нагревается, превращается в ЖМС и частично или полностью выводится из капилляра. После прекращения действия импульса ЖМС превращается в МП с разрывом. Максимальная величина сопротивления, которую можно реализовать в процессе выключения, соответствует полному выведению ЖМС из капилляра, соединяющего электроды структуры.

В процессе включения, в результате приложения к электродам структуры импульса той же полярности, что и при формовке, МП расплавляется, переходит в ЖМС и начинает заполнять область разрыва по стенкам «пустого капилляра» за счет механизма электрогидродинамического растекания в виде трубчатого потока, при этом толщина стенок трубчатого потока регулируется прикладываемым импульсом в сторону увеличения площади поперечного сечения, т.е. с уменьшением сопротивления. Минимальное сопротивление реализуется в случае, когда ЖМС заполнит область разрыва полностью.

Подстройка сопротивления электрическим сигналом. Было обнаружено,

что пропускание нарастающего импульса тока по сформированной МП в том же направлении, что и при формовке, приводит, после достижения током некоторого порогового значения, к скачкообразным осцилляциям сопротивления, при которых после каждого «скачка» сопротивление МП уменьшается.

Экспериментально показано, что после формовки процессы включения, выключения и подстройки сопротивления электрическим сигналом можно производить порядка  $10^4$  раз с энергонезависимым хранением любого выставленного состояния.

Оценки показывают, что можно сформировать порядка 500 ( $K \sim 500$ ) различных равновероятных состояний по сопротивлению. Необходимо подчеркнуть, что носителем информации является величина поперечного сечения МП (а, следовательно, и величина её сопротивления). Это означает, что информация хранится энергонезависимо и обладает высокой стойкостью к внешним воздействиям (электрические и магнитные поля, радиационное воздействие и др.) Очевидно, что для разрушения или искажения записанной информации необходимо механически разрушить или сильно деформировать перемычку. Этого можно достигнуть либо при дозах внешних воздействий, в десятки, сотни и даже тысячи раз превышающих предельно допустимые дозы для традиционных носителей информации, либо за счёт нагревания до температуры, превышающей температуру образования жидкой эвтектической фазы в системе металл электрода - кремний. Например, для сплава алюминий - кремний такая температура составляет 577 С. Тот факт, что перемычка находится в объёме кремния, даёт основание утверждать, что записанная информация защищена от разрушительного воздействия внешней химически активной агрессивной среды. Для регулирования сопротивления МП используют «Способ регулирования сопротивления твердотельных приборов на основе поляризационно-зависимого электромассопереноса в кремнии» [1].

На базе заводской кремниевой планарно-интегральной технологии разработана и изготовлена резистивная матрица памяти (РМП) в каждой ячейке которой находится элемент памяти с вышеизложенными основными свойст-

вами. Из этого следует, что в каждой ячейке матрицы можно многократно формировать любое из  $K$  легко различимых состояний по сопротивлению и электрическим сигналом многократно записывать, считывать, стирать и энергонезависимо хранить такую информацию.

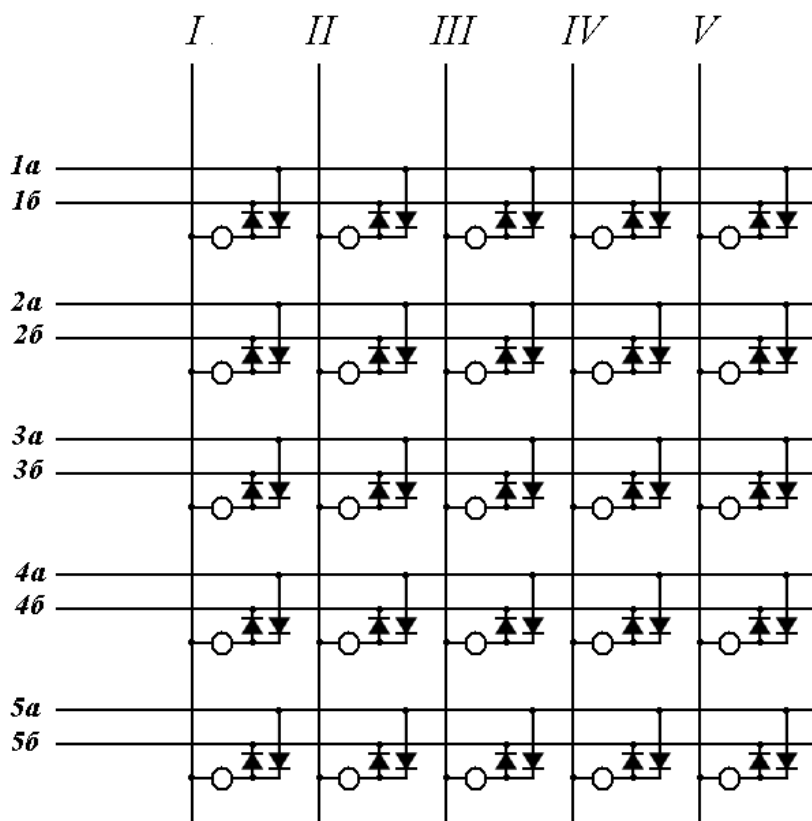


Рис.1. Резистивная матрица памяти (РМП).

Наличие электронной подстройки сопротивления в каждой ячейке матрицы позволяет реализовать любое из  $K$  различных дискретных состояний по величине сопротивления и таким образом записывать в каждой ячейке не 1 или 0 - числа двоичного исчисления, а число в троичном, четверичном и т.п. исчислении в зависимости от числа различных дискретных состояний  $K$ . При  $K=500$  емкость одной такой ячейки, очевидно, будет близка к 9 битам, поскольку  $2^9 = 512$ .

На базе заводской кремниевой планарно-интегральной технологии также разработана и изготовлена коммутационная матрица (КМ) на основе ПЭМП, которая предназначена для коммутации потоков информации, поступающих на

$n$  независимых входных металлических шин и выходящих через соответствующий каждому  $n$  коммутационный элемент (КЭ) с  $m$  выходных металлических шин по схеме: любой из  $n - n_1$  с любым из  $m - m_1$ , любой из  $(n - n_1) - n_2$  с любым из  $(m - m_1) - m_2$  и так далее, пока последний  $n_i$  с последним  $m_i$ , где  $i$  – количество входных или выходных шин, при условии, что количество  $n=m$ .

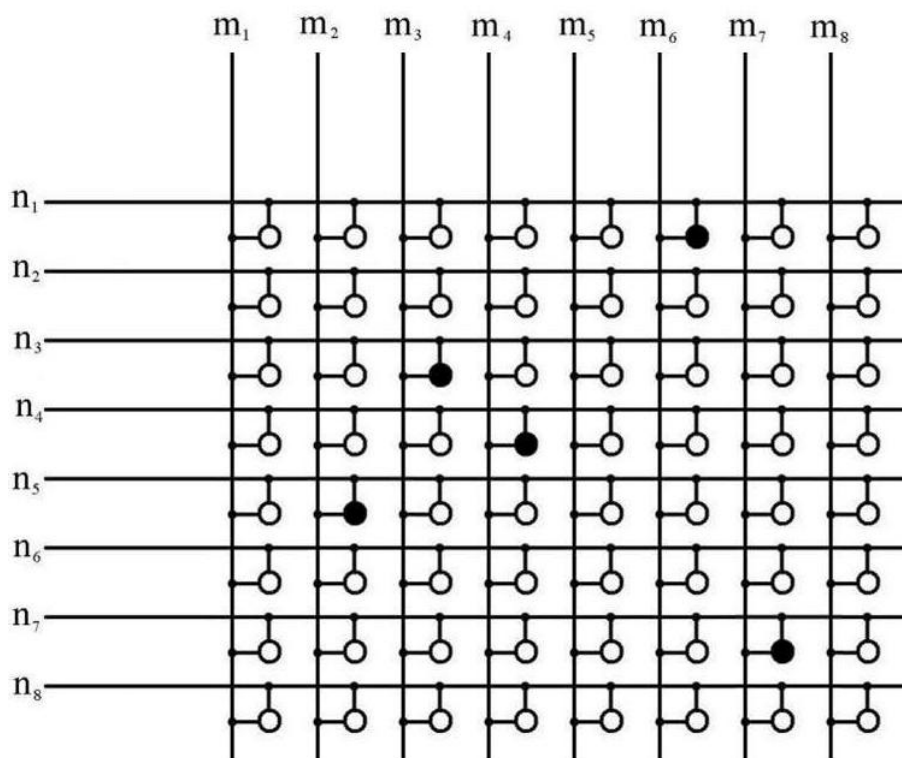


Рис.2. Коммутационная матрица (КМ).

В качестве КЭ используют МП с вышеизложенными свойствами. Во всех местах пересечения металлических шин один электрод КЭ соединен с горизонтальной шиной, другой с вертикальной шиной. Соединения с шинами КМ изготавливают один раз и в процессе эксплуатации они остаются неизменными. Коммутацию осуществляют за счет управляемого включения и выключения МП.

При этом необходимо отметить следующее.

Как уже было указано, состояние КЭ сохраняется энергонезависимо с высокой стойкостью к внешним воздействиям.

Конструкция КМ позволяет реализовать любой из  $i!$  вариантов комму-

тации.

Использование коммутационных элементов позволяет поменять местами входные и выходные шины.

Схематично КМ показана на Рис.2. «Включенные» шины показаны черными точками, «Выключенные» располагаются во всех остальных узлах и никак не обозначены.

## 2. Возможности для реализации вычислений

С помощью КМ возможна реализация вычислений различного характера, т.е. может быть получено устройство, реализующее практически любое преобразование над входной  $n$ -битной последовательностью, поскольку для любого входа в КМ можно установить в соответствие любой из имеющихся свободных выходов. Такое устройство на основе КМ может быть названо "универсальный логический элемент" - УЛЭ. Данное устройство будет относиться к классу комбинационных устройств и принципиально близко к устройствам, конфигурируемым методом масочного программирования, т.е. однократным пережиганием перемычек. Отличительной чертой УЛЭ будет возможность многократного конфигурирования и простота исполнения. Устройство состоит из входного модуля на основе дешифратора, КМ и выходного модуля на основе шифратора. Основная функция шифратора, как известно, - преобразование двоичного кода в код по основанию  $n$ , дешифратор выполняет обратное действие.

Битовая последовательность (нулей и единиц) длиной  $n$  подаётся на  $n$  входов  $D$ , после чего на одном из  $2^n$  выходов, порядковый номер которого соответствует интерпретации битовой последовательности как числа, не превышающего  $2^n$ , формируется сигнал "логическая единица". Все выходы  $D$  являются входами для КМ, поэтому "логическая единица" появляется на одном из выходов КМ согласно заданным правилам коммутации. Выходы КМ в свою очередь соответствуют входам  $Ш$ , с выходов которого снимается результирующая  $n$ -битная последовательность.

В качестве примера можно рассмотреть УЛЭ, таблично реализующее

функцию  $y = x_1 + x_2$  сложения двух двоичных регистров длиной  $n$  бит каждый. Количество входных и выходных разрядов одинаково и равно 4,  $n=2$  (Таблица 1). На Рис.3 схематично показан УЛЭ, реализующий Таблицу 1.

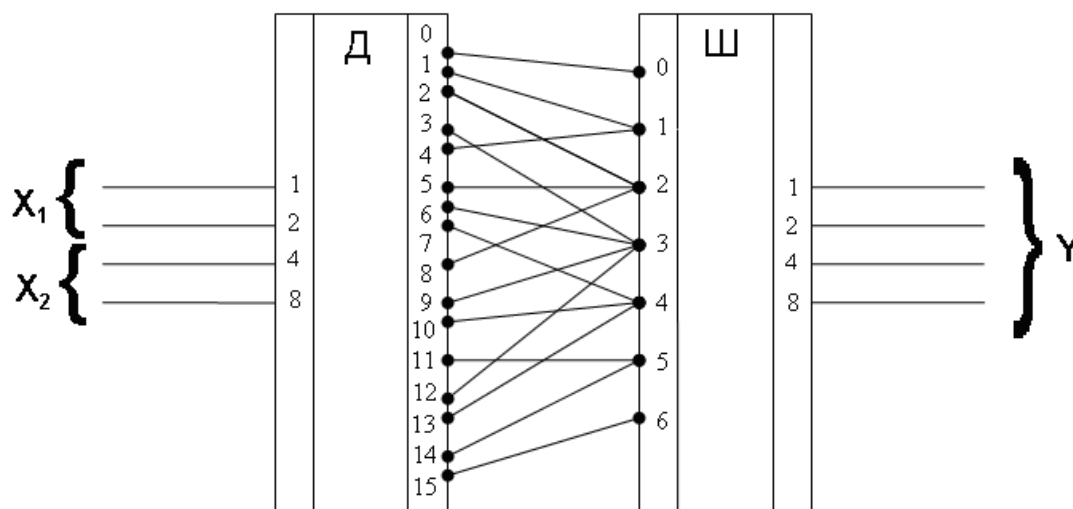


Рис.3. Универсальный логический элемент (УЛЭ).

Таблица 1.

N п/п	Десятичное представление			Двоичное представление		
	$x_1$	$x_2$	$y$	$x_1$	$x_2$	$y$
0	0	0	0	00	00	0000
1	1	0	1	01	00	0001
2	2	0	2	10	00	0010
3	3	0	3	11	00	0011
4	0	1	1	00	01	0001
5	1	1	2	01	01	0010
6	2	1	3	10	01	0011
7	3	1	4	11	01	0100
8	0	2	2	00	10	0010
9	1	2	3	01	10	0011
10	2	2	4	10	10	0100
11	3	2	5	11	10	0101
12	0	3	3	00	11	0011
13	1	3	4	01	11	0100
14	2	3	5	10	11	0101
15	3	3	6	11	11	0110

Все вычисления удобно разделить в зависимости от интерпретации

входных и выходных данных на логические и числовые. К логическим можно отнести битовые и символьные преобразования над битовой или байтовой строкой, к числовым - те преобразования, где входные данные интерпретируются как числа и над ними выполняются математические действия.

Для реализации числовых операций на УЛЭ можно предложить понятие набора элементарных операций. Например, для вычисления выражения вида  $ax^m + by^n$  вполне можно обойтись одной операцией сложения, хотя можно также ввести умножение и возведение в степень, после чего умножение будет выполняться не как набор последовательных сложений, а "сразу", то есть как самостоятельная операция, причем время выполнения всех трех операций будет в таком случае одинаковым. Под каждую конкретную вычислительную задачу может формироваться свой набор таблично заданных элементарных операций, например, сложение, вычитание, умножение, деление. Даже перечисленных операций вполне достаточно для выполнения значительной части известных алгоритмов.

Основными логическими операциями, использование которых характерно для современных алгоритмов, можно назвать битовую перестановку, битовую подстановку, логический (битовый) сдвиг и сложение по модулю 2. Очевидно, что КМ в силу своей структуры представляет собой готовое устройство, способное выполнять перестановку поданных на  $n$  входов бит в  $n$ -битном слове, традиционно называемое "блок перестановок". УЛЭ, в свою очередь, представляет собой готовое устройство для изменения входной битовой строки в зависимости от значения каждого бита по заранее заданному правилу и полностью соответствует описанию "блока замен" в [2]. Также очевидно, что операция битового сдвига реализуется блоком перестановки, а сложение по модулю 2 - табличным заданием данной функции.

### **3. Однородная вычислительная структура на основе ПЭМП**

Не вызывает сомнений то, что с увеличением количества узлов, способных одновременно выполнять обработку данных, общая вычислительная мощность системы будет увеличиваться. Объединив несколько узлов, можно



получить значительный прирост скорости вычислений, точное значение которого будет напрямую зависеть от взаимодействия между узлами.

Для достижения максимально возможной эффективности такие связи должны быть реконфигурируемыми, обеспечивая возможность разработчику подобрать наилучшую конфигурацию под решение прикладной задачи. Если рассматривать УЛЭ в качестве такого вычислительного узла, то КМ наилучшим образом подходит для создания множества реконфигурируемых межсоединений.

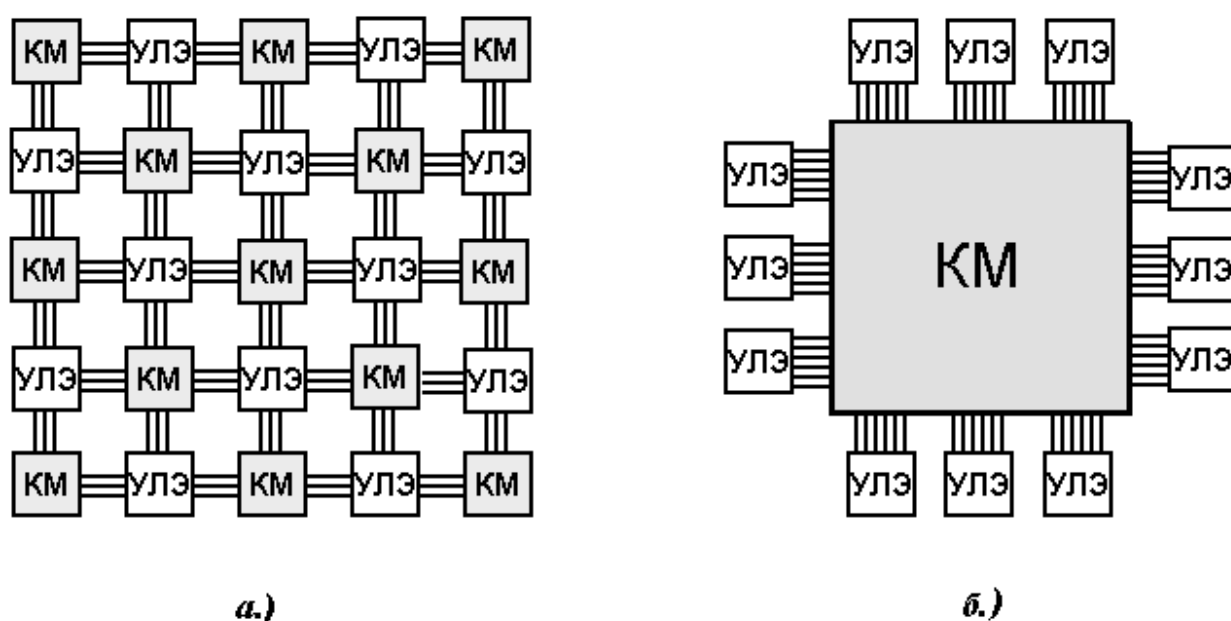


Рис.4. Однородная вычислительная структура

а) с частичной коммутацией, б) с полной коммутацией.

Возможно практически неограниченное число вариантов реализации такой структуры, от варианта с частичной настраиваемой коммутацией связей между соседними УЛЭ (Рис.4.а) до структуры с возможностью коммутации любого выхода любого УЛЭ с любым входом другого УЛЭ и наоборот, т.е. полной коммутации всех межсоединений. (Рис.4.б).

Для оценки быстродействия интегральной схемы необходимо иметь представление о том, сколько требуется времени электрическому сигналу для прохождения её элементов. Поскольку для КМ время прохождения сигнала

(время задержки) следует рассчитывать, исходя из минимального значения сопротивления, к примеру 1 Ом, то для МП можно рассчитать, что это время составит  $5 \cdot 10^{-12}$  сек. или 5 пикосекунд, при паразитной ёмкости порядка 5 пикофарад. Отсюда же получается, что теоретически один коммутационный элемент КМ может функционировать на частоте до  $5 \cdot 10^3$  гигагерц. Разумеется, в реальных условиях это значение должно быть ниже из-за различных паразитных эффектов, тем не менее не вызывает сомнения, что КМ обладает значительным потенциалом по быстродействию.

Несложно заметить сходство между подобной однородной вычислительной структурой и компоновкой некоторых современных ПЛИС - программируемых логических интегральных схем, здесь УЛЭ выступает функциональным аналогом логического блока, а КМ - маршрутизатора межсоединений [3]. При этом в качестве постоянной энергонезависимой памяти вполне может быть использована и рассматриваемая выше РМП, причем реализация АЦП для преобразования значения сопротивления в битовую строку также может быть выполнена с использованием МП в качестве резисторов. Отсюда следует, что интегральная схема с достаточно развитым функционалом вполне реализуема почти исключительно на основе технологии ПЭМП. Технология изготовления интегральных схем на основе ПЭМП достаточно дешева, не требует предельных техпроцессов и пригодна для массового производства. Полная энергонезависимость МП, возможность многократной перезаписи и стойкость к мощным электромагнитным воздействиям предоставляет дополнительную свободу действий для потенциального разработчика.

### Литература

1. Панфилов Б.А. Патент на изобретение №2471264 «Способ регулирования сопротивления твердотельных приборов и резистивная матрица памяти на основе поляризационнозависимого электромассопереноса в кремнии», опубликован в бюллетене «Изобретения. Товарные знаки» 27.12.2012 г., вып.36.

2. Хорст Фейстель. Криптография и компьютерная безопасность. Пер. А. Винокурова по изданию: Horst Feistel . Cryptography and Computer Privacy, Scientific American, May 1973, Vol. 228, No. 5, pp. 15-23 [Электронный ресурс]

Андрей Винокуров 23.12.00 URL:

[http://www.enlight.ru/crypto/articles/feistel/feist\\_i.htm](http://www.enlight.ru/crypto/articles/feistel/feist_i.htm) (дата обращения: 5.06. 2015)

3. Андрей Строганов, Валерий Небольсин, Алексей Быстрицкий, Максим Мотылев. ПЛИС типа ППВМ: от 2D к 3D [Электронный ресурс] КОМПОНЕНТЫ И ТЕХНОЛОГИИ № 3 '2012 URL: [http://kit-e.ru/articles/plis/2012\\_3\\_95.php](http://kit-e.ru/articles/plis/2012_3_95.php)

(дата обращения: 5.06. 20015)