

**FERROELECTRIC
THIN FILMS
IN MICROELECTRONICS**

A. S. SIGOV

Ferroelectric thin films are taken as an example of the surprising properties of the so-called “smart dielectrics”. It is shown that such films can be integrated into modern technologies of semiconductor electronics and are promising for creating new data-storage and processing devices.

На примере сегнетоэлектрических пленок рассмотрены удивительные свойства так называемых умных диэлектриков. Показана возможность включения таких пленок в современные технологии полупроводниковой микроэлектроники, что открывает широкие возможности создания новых видов устройств хранения и обработки информации.

**СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
ТОНКИЕ ПЛЕНКИ
В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ**

А. С. СИГОВ

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)

В последние годы довольно часто стало встречаться утверждение о свершившемся переходе человечества в новую эпоху — эпоху всеобщей информатизации. Эта истина столь же справедлива, сколь и банальна. Действительно, информационный обмен резко возрастает, а современные технические возможности позволяют записывать, хранить, быстро передавать, обрабатывать и воспроизводить огромные массивы информации, причем объем памяти и быстродействие средств вычислительной техники растут необычайно. Это связано с бурным развитием цифровой микроэлектроники, которое происходит в направлении повышения степени интеграции на базе традиционных схемотехнических решений, когда носителем информации является электрическое состояние ячеек схемы, построенных на активных и пассивных элементах, а также в направлении повышения быстродействия интегральных схем. Степень интеграции до недавнего времени повышалась за счет уменьшения минимального топологического размера элементов и ячеек, а также за счет увеличения размеров кристаллов. Достигнутые в настоящее время результаты — десятки мегабит в кристалле и единицы наносекунд по времени выборки бита — выглядят достаточно впечатляюще. Однако именно сейчас в развитии цифровой микроэлектроники наметились серьезные проблемы, которые связаны с принципиальными ограничениями конструктивно-технологических приемов, лежащих в основе планарной технологии, и касаются прежде всего ограничений по степени интеграции. Анализ перспектив развития этого направления показывает, что как по технологическим, так и по принципиальным физическим причинам минимальный топологический размер не может быть существенно ниже практически достигнутой сегодня величины порядка 1 мкм: возникают неразрешимые в данном подходе проблемы взаимовлияния ячеек и соединений между ними — так называемых токоведущих дорожек.

Необходимость освобождения от “тирании межсоединений” диктует потребность поиска новых видов носителей информации и принципов ее обработки и соответственно новых материалов. В качестве подобных носителей уже сравнительно долгое время используются разнообразные динамические неоднородности — изменяющиеся во времени

локальные области неравновесных состояний в континуальных средах. Примерами динамических неоднородностей, широко используемых в настоящее время для решения отдельных частных задач радиоэлектроники и вычислительной техники, являются поверхностные акустические волны, цилиндрические магнитные домены, модуляции электростатического потенциала в линейках и матрицах приборов с зарядовой связью, квантовых ямах и т.д.

Необходимость обработки больших массивов информации в реальном масштабе времени ставит задачу создания устройств функциональной электроники, объединяющих функции ввода, преобразования и вывода информации для последующей ее обработки в цифровом коде с помощью традиционных принципов. Создание таких устройств функциональной электроники опирается на интеграцию различных физических эффектов и разных видов динамических неоднородностей (несущих информацию) в одном устройстве. Использование же новых видов носителей информации неизбежно должно привести к появлению новых принципов обработки информации, позволяющих, в частности, параллельно переносить большие информационные пакеты из одной континуальной среды в другую.

Таким образом, развитие функциональной электроники как альтернативы схемотехническому пути развития микроэлектроники тесно связано с решением ряда задач в области физики материаловедения, технологии и принципов обработки информации.

Вспомним, что подавляющее большинство высокоэффективных устройств микроэлектроники создано благодаря применению коммутационных матриц на основе структур типа металл–оксид–полупроводник (МОП) и приборов с зарядовой связью (ПЗС), полностью интегрированных с элементами приема, хранения и обработки информации. Так, практически все разнообразие микросхем памяти основано на использовании МОП-коммутаторов, а большая часть твердотельных приемников изображения – на ПЗС. К сожалению, в такой интеграции не всегда удается остаться в рамках стандартных технологий многослойных интегральных схем, хорошо отработанных в современной полупроводниковой микроэлектронике, приходится переходить к гибридным конструкциям. Одна из причин этого состоит в необходимости использовать новые нетрадиционные материалы, которые по тем или иным причинам в стандартную технологию не вписываются. В качестве примера можно привести активные жидкокристаллические экраны или телевизионные приемные матрицы для дальней инфракрасной области спектра.

Однако наибольшее многообразие возможностей открывает использование сегнетоэлектриков, то есть веществ, кристаллическая структура которых допускает существование в некотором диапазоне температур и давлений спонтанной электрической

поляризации (отличного от нуля результирующего дипольного момента единицы объема образца), модуль и пространственная ориентация которой могут быть изменены под действием внешнего электрического поля. Сказанное поясняет рис. 1, где изображена характерная петля сегнетоэлектрического гистерезиса для значений температуры и давления из области существования сегнетоэлектрической фазы. В подписи к рис. 1 приведены некоторые необходимые далее определения. Помимо электрически переключаемой спонтанной поляризации сегнетоэлектрики обладают целым спектром полезных для приложений физических свойств, среди которых особенно выделяются высокая, резко анизотропная и зависящая от внешнего электрического поля диэлектрическая проницаемость, прямой и обратный пьезоэлектрический, а также пироэлектрический эффекты.

Уместно задать вопрос: но почему же при таком многообразии уникальных свойств сегнетоэлектрики до сих пор получили столь узкое применение в микроэлектронике? Ответ очень прост: сразу после их открытия инженеры проявляли интерес к этому классу веществ, но практическое использование в микроэлектронике оказалось невозможным из-за отсутствия технологии получения тонкопленочных сегнетоэлектрических материалов высокого качества с воспроизводимыми свойствами. И лишь в последнее десятилетие удалось добиться контролируемой совместимости тонких слоев сегнетоэлектриков с полупроводниковыми коммутационными

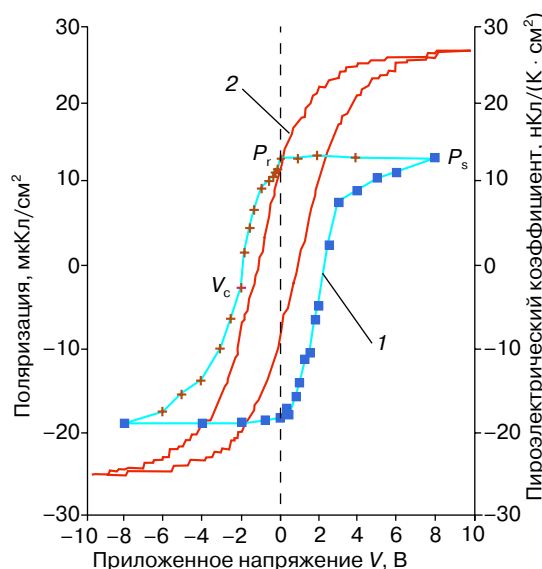


Рис. 1. Петли сегнетоэлектрического (1) и пироэлектрического (2) гистерезиса сегнетоэлектрической пленки цирконата–титаната свинца ЦТС (0,53/0,47): P_s – спонтанная поляризация (насыщение), P_r – остаточная поляризация ($V=0$), V_c – коэрцитивное напряжение ($P=0$).

матрицами в рамках планарной технологии полупроводниковых приборов. Такая интеграция, с одной стороны, открывает возможность создания целого ряда новых устройств, а с другой – позволяет избежать дорогих и ненадежных гибридных конструкций.

Чудесные свойства тонких сегнетоэлектрических пленок находят применение при создании устройств энергонезависимой памяти, динамической памяти с произвольной выборкой, конденсаторов, микроактюаторов, приемников инфракрасного излучения, оптических процессоров, волноводов и линий задержки, приборов на поверхностных акустических волнах, разнообразных акустооптических устройств, изменяющих заданным образом спектральный состав, амплитуду и направление распространения светового сигнала. В приводимой таблице отражены некоторые возможные применения сегнетоэлектрических пленок, свойства, материалы и толщины пленок, необходимые для реализации указанных применений.

Очевидно, что физические свойства пленки существенно зависят от состояния ее поверхности, стехиометрии, кристалличности, плотности, микроструктуры и кристаллографической ориентации, то есть, в свою очередь, от методов получения пленки. Проблема усложняется также необходимостью высокотемпературного нагрева ($-600 - 800^{\circ}\text{C}$) для кристаллизации пленок, при наличии в их составе химически активных и летучих компонентов (например, свинца).

Методы получения сегнетоэлектрических пленок непрерывно развиваются и совершенствуются буквально в каждой лаборатории, но по основным чертам можно выделить четыре наиболее перспективных направления: магнетронное напыление, лазерную абляцию, химическое осаждение из газовой фазы металлоорганических соединений и золь-гель процесс.

При магнетронном напылении атомы мишени выбиваются высокоэнергетичными ионами и осаждаются на поверхности подложки. Пленка растет довольно медленно и для больших площадей

Таблица 1. Применения сегнетоэлектрических пленок

Вид использования	Необходимые свойства	Химический состав	Толщина, мкм
Энергонезависимая память	Высокая остаточная поляризация, низкое коэрцитивное поле, большое число циклов переключения	$\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ $(\text{PbLa})\text{TiO}_3$ $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ BaMgF_4 $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$	0,1 – 0,3
Динамическая память с произвольной выборкой	Высокая диэлектрическая проницаемость, высокое пробивное напряжение	$(\text{BaSr})\text{TiO}_3$ $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ $(\text{PbLa})\text{TiO}_3$ $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$	0,2 – 0,5
Конденсаторы	Высокая диэлектрическая проницаемость, низкие диэлектрические потери, термостабильность, высокое пробивное напряжение	$(\text{BaSr})\text{TiO}_3$ $(\text{PbLa})(\text{ZrTi})\text{O}_3$ $\text{Pb}(\text{MgNb})\text{O}_3$ $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$	0,1 – 0,5
Поверхностные акустические волны	Пьезоэлектричество	$(\text{PbLa})(\text{ZrTi})\text{O}_3$ LiNbO_3	2 – 10
Микроактюаторы	То же	$(\text{PbLa})(\text{ZrTi})\text{O}_3$ $\text{Pb}(\text{MgNb})\text{O}_3$	1 – 10
Приемники ИК-излучений	Пироэлектричество, низкая диэлектрическая проницаемость	$(\text{PbLa})(\text{ZrTi})\text{O}_3$ $\text{K}(\text{TaNb})\text{O}_3$	1 – 5
Оптический процессор	Пироэлектричество, высокая диэлектрическая проницаемость	$(\text{PbLa})(\text{ZrTi})\text{O}_3$ $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$	
Световоды, линии задержки	Электрооптические явления	$(\text{LiK})\text{NbO}_3$ $(\text{PbLa})(\text{ZrTi})\text{O}_3$ $(\text{SrBa})\text{Nb}_2\text{O}_6$	0,2 – 5,0
Дефлекторы	Фоторефракция	То же	0,2 – 5,0
Умножение частоты	Высокая эффективность генерации гармоник высших порядков	То же	0,2 – 5,0

подложки может иметь значительные вариации микроструктуры и состава. К настоящему времени разработаны многочисленные способы частичного преодоления этих трудностей, в результате чего качество пленок постоянно улучшается.

Группа методов, объединенных названием “лазерная абляция”, то есть инициированный лазером массоперенос вещества мишени на подложку, получила развитие около десяти лет назад, при поиске путей нанесения пленок многокомпонентных металлооксидных соединений – высокотемпературных сверхпроводников. Лазерный луч (обычно используют мощные лазеры с частотой следования импульсов от 10 до 100 Гц, работающие на переходах между электронными уровнями эксимерных молекул, существующих только в электронно-возбужденных состояниях) фокусируется на мишени, испаряющиеся атомы которой переносятся на подложку, где растёт пленка. В сравнении с методами магнетронного распыления эти методы открывают возможность понизить температуру подложки (что бывает критичным при интегрировании сегнетоэлектрических пленок с полупроводниками) и обеспечить удовлетворительное выполнение условий стехиометрии на всей поверхности осаждения. Основные трудности связаны с напылением однородных пленок на подложки большой площади и с защитой поверхности растущей пленки от поврежденных осколками распадающейся мишени.

При химическом осаждении из газовой фазы металлоорганических соединений потоки газов, содержащих все необходимые компоненты сегнетоэлектрического соединения, фокусируются на поверхности нагретой подложки и вступают в химическую реакцию, в результате которой образуется твердая пленка сегнетоэлектрика.

Несмотря на трудности подбора необходимых исходных металлоорганических соединений (алкилов, алкоксидов и арилов) и сложность протекающих химических реакций, это направление обладает многими преимуществами, позволяя, в частности, снизить температуру подложки ($< 600^{\circ}\text{C}$), обеспечить высокое качество покрытия на значительной площади, большие скорости роста и т.д.

В последние годы активно развивается золь-гель метод получения пленок сегнетоэлектриков, который дает наибольшие преимущества. В основе метода лежат реакции гидролиза и поликонденсации металлоорганических соединений, главным образом алколюлятов металлов, ведущие к образованию металл-кислородного каркаса, постепенное разветвление которого вызывает последовательные структурные изменения по схеме раствор–золь–гель–оксид. Такой метод обеспечивает возможность очень точного управления структурой получаемого вещества на молекулярном уровне, получение многокомпонентных оксидных соединений с точным соблюдением стехиометрического соотно-

шения элементов, высокой гомогенностью и низкой температурой образования оксидов. Конечным продуктом данной технологии могут быть материалы различного вида и внутренней структуры: гели, стекла, порошки, керамика, волокна, пленки. Оптимизация условий приготовления исходных коллоидных растворов и формирования пленок обеспечивается путем статистического контроля свойств исходных растворов и образующихся при их испарении порошков, а также свойств пленок, формируемых из данных растворов. Контроль растворов и порошков осуществляется методами аналитического и физико-химического тестирования, а свойства пленок исследуются методами рентгеноструктурного анализа, электронной микроскопии, микроскопии атомных сил, эллипсометрии, широким спектром электрофизических методов.

Исключительно важным является этап кристаллизации пленок. Для этого используют изотермический или быстрый термический отжиг. Большое влияние на свойства формируемых интегрированных структур оказывают электроды, в качестве которых, как правило, применяются химически инертная платина или близкий по свойствам иридий, а также оксиды иридия, рутения. Механические напряжения, кристаллическая структура электродов, особенно нижнего электрода, могут существенно изменять свойства пленок. Одна из трудностей, например, связана с рекристаллизацией платинового электрода, что часто приводит к резким локальным ухудшениям электрофизических свойств пленок.

Вообще при создании интегральных схем с участием сегнетоэлектриков на первый план выходит проблема физико-химического и механического взаимодействия сегнетоэлектрической пленки с окружающими материалами, поскольку это может приводить, с одной стороны, к ухудшению характеристик сегнетоэлектрического элемента, а с другой – к утечкам и деградации транзисторных структур. Поэтому технологический маршрут изготовления интегральной схемы должен исключать процессы высокотемпературного отжига при наличии контакта сегнетоэлектрика с оксидами или другими активно взаимодействующими материалами.

Платина как материал электродов в кремниевых интегральных схемах порождает дополнительные трудности, обусловленные сложностью процесса травления и плохой адгезией. Для улучшения адгезии нижнего электрода к диоксиду кремния обычно вводят адгезионный подслои титана, однако и он не устраняет данной трудности в полной мере. К тому же в процессе высокотемпературной кристаллизации сегнетоэлектрического слоя взаимодействие титана с диоксидом кремния приводит к образованию оксидов и силицидов титана, сильно затрудняющих процесс формирования заданной конфигурации нижнего электрода.

Процесс высокочастотного ионно-плазменного травления электродов осложнен сильным разогревом фоторезистивной маски. Поэтому для формирования платиновых электродов используется процесс ионно-лучевого травления, причем в обработке структуры Ti–Pt наибольшую сложность представляет травление слоя титана. Это связано с тем, что оксиды титана имеют значительно более низкие скорости распыления, чем сам металл, скорость распыления которого тоже сравнительно невелика. Поэтому травление осуществляется в одну стадию без промежуточной разгерметизации камеры, а скорости составляют: платина 23 – 25 нм/мин, титан 12 – 14 нм/мин, диоксид кремния – 25 нм/мин, цирконат–титанат свинца (ЦТС) 15 нм/мин.

Ранее предпринимались попытки подвергать пленки ЦТС жидкостному и ионно-лучевому травлению. Однако при жидкостном травлении наблюдалось значительное (до 1 мкм) отклонение от заданных размеров, вызванное двухстадийным характером процесса. А сложности ионно-лучевого травления связаны с неконформностью сегнето-

электрической пленки из-за планаризирующего эффекта, характерного для слоев, создаваемых методом центрифугирования.

Твердые растворы цирконата–титаната свинца–лантана находят абсолютно универсальное применение при создании интегральных схем любого назначения (см. табл. 1), поэтому ниже мы рассмотрим несколько возможных вариантов формирования элементов интегрированных структур на основе сегнетоэлектриков, используя в качестве примера простейшую пленочную структуру типа Si–SiO₂–Ti–Pt–ЦТС–Pt.

В первом случае (рис. 2а) последовательность процедур аналогична применяемой при производстве пленочных конденсаторов. Но нанесение сегнетоэлектрической пленки после селективного травления нижнего электрода приводит к сильному химическому взаимодействию ЦТС с SiO₂ при термической обработке, что вызывает серьезные повреждения как в слое ЦТС, так и в элементах схемы. Во втором случае (рис. 2б) сначала наносятся пленки нижнего электрода и сегнетоэлектрика, затем

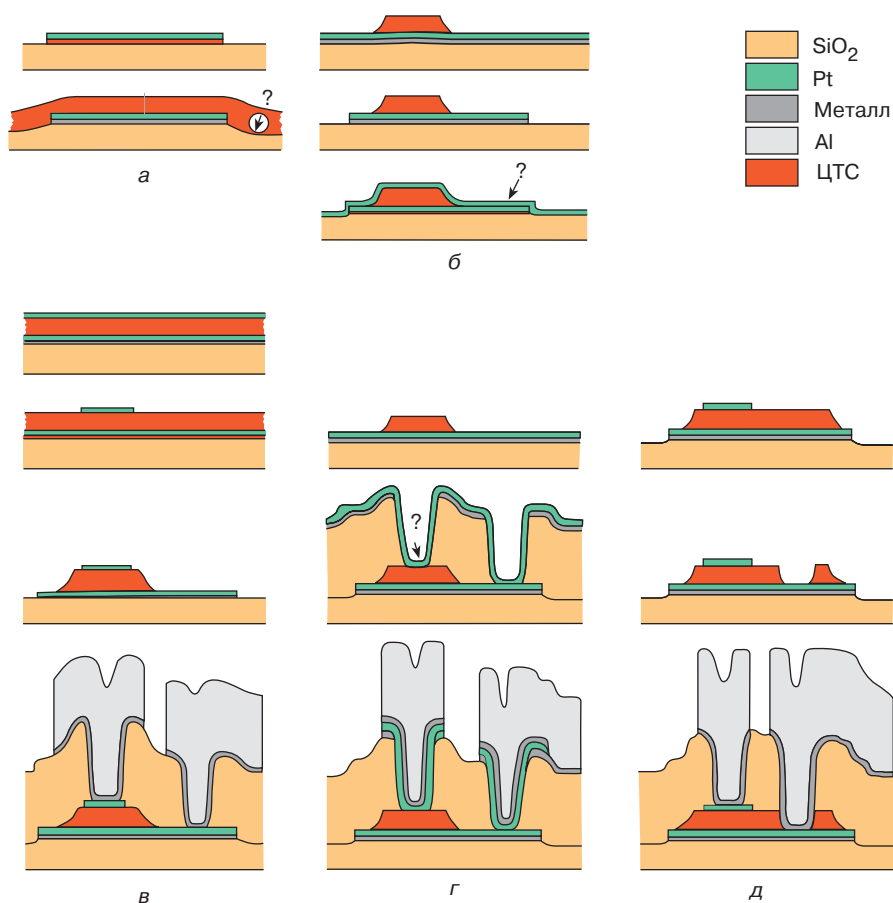


Рис. 2. Примеры различных последовательностей технологических шагов при изготовлении пленочной структуры на основе сегнетоэлектрической керамики ЦТС.

формируется конфигурация сегнетоэлектрического элемента, а после этого — верхнего электрода. Однако здесь необходимо обеспечить целостность нижнего электрода при ионно-лучевом травлении верхнего электродного слоя. Третий вариант технологической цепочки (рис. 2в) связан с последовательным нанесением на подложку нижнего электрода, сегнетоэлектрического слоя и верхнего электрода. Затем производится селективное травление от верхнего электрода до нижнего для формирования структуры. При этом удается избежать взаимодействия ЦТС с окружающими слоями при высокотемпературном отжиге, однако сильные механические напряжения в структуре вызывают многочисленные рождение точечных дефектов и дислокаций. Эта проблема снимается, если в отличие от второго случая слой диоксида кремния наносится методом плазмохимического осаждения после формирования конфигурации нижнего электрода и сегнетоэлектрического элемента, с последующим селективным по отношению к ЦТС и Pt открытием в SiO₂ контактных окон (рис. 2з). В этом случае взаимодействие ЦТС и SiO₂ может привести к невоспроизводимости создаваемых структур и снижению выхода годных элементов. Поэтому был предложен еще один подход (рис. 2д), когда верхний электрод формируется перед нанесением слоя диоксида кремния, после травления сегнетоэлектрического слоя и нижнего электрода. Однако и этот подход не лишен недостатков, поскольку оксидная пленка, предохраняющая транзисторные структуры, дважды подвергается ионно-лучевому травлению.

Видно, что ни одна из приведенных технологических процедур не позволяет успешно преодолеть все возникающие трудности. Тем не менее даже достигнутые результаты выглядят достаточно впечатляюще: указанная структура на базе состава Pb_{1,1}Zr_{0,52}Ti_{0,48}O₃ при толщине пленки 0,18 — 0,25 мкм имела остаточную поляризацию 10 — 20 мкКл/см², коэрцитивное напряжение 0,5 — 1,5 В, рабочее напряжение 5 В, пробивное напряжение не более 20 В, время переключения заряда поляризации не менее 10 нс; параметры не изменялись по крайней мере при миллиарде циклов переключения.

Рассмотрим теперь вкратце основные принципы и элементы конструкции некоторых существующих и проектируемых устройств на основе интегрированных сегнетоэлектриков. Начнем с динамической памяти с произвольной выборкой (DRAM), принцип действия которой основан на хранении электрического заряда в конденсаторных элементах ячеек МОП-матрицы. В традиционных устройствах такого рода используют в качестве диэлектрика диоксид или нитрид кремния, диэлектрическая проницаемость которых довольно низка (4 — 6). Сложная конструкция и увеличивая размеры подложки, удалось довести объем памяти таких микросхем до 16 Мбит, однако дальнейшее повышение объема па-

мяти в рамках современной технологии не представляется возможным.

Именно характеристики ячейки хранения накладывают принципиальные ограничения на степень интеграции несегнетоэлектрических микросхем памяти. Причина состоит в малости диэлектрической проницаемости диоксида или нитрида кремния и соответственно малой удельной емкости хранения. По мере роста степени интеграции соотношение между емкостями хранения и шин считывания становится все более неблагоприятным, и в конце концов прямое считывание информации оказывается невозможным. Тогда на каждую запоминающую ячейку приходится ставить усилительный элемент, что увеличивает топологические размеры ячейки и ограничивает степень интеграции.

Отсюда очевидна перспективность интеграции МОП коммутационной матрицы с пленочными сегнетоэлектрическими элементами хранения, так как сегнетоэлектрики отличаются предельно высокой удельной емкостью (за счет высокой диэлектрической проницаемости). При конструировании DRAM речь идет о сегнетоэлектриках с высокой диэлектрической проницаемостью в параэлектрической фазе. Примером такого материала служит титанат бария—стронция, недавно полученный в виде слоев толщиной 0,18 — 0,30 мкм, с диэлектрической проницаемостью 600 — 1000. Применение этих пленок в ячейках хранения позволяет увеличить удельную емкость примерно в 20 раз. Необходимость усиления сигнала в такой ячейке отпадает, и соответствующие ограничения по степени интеграции снимаются. Ряд фирм (“Matsushita”, “Olympus”, NEC, “Samsung”) планируют коммерческий выпуск таких DRAM емкостью в 64 Мбит в 1996 году.

Последнее время предпринимаются большие усилия по повышению рабочих частот микросхем DRAM путем замены кремниевой коммутационной матрицы на арсенид-галлиевую. В этом случае возникают еще большие трудности с конструкцией ячейки хранения и использование сегнетоэлектрических пленок с высокой диэлектрической проницаемостью в параэлектрической фазе приобретает особое значение.

Другое активно развивающееся направление использования сегнетоэлектрических пленок в низкосимметричной фазе — микросхемы энергозависимой памяти. Запись информации осуществляется путем локального переключения внешним электрическим полем поляризации микроскопических доменов — ячеек памяти; в двоичном коде два противоположных направления вектора поляризации соответствуют значениям 0 или 1. Достоинствами подобных устройств являются низкие управляющие напряжения, совместимые со схемами обрания (3 — 5 В); длительные времена энергонезависимого хранения информации (не менее 5 лет); неизменность параметров при очень большом числе циклов

запись – считывание ($> 10^{10} - 10^{12}$); высокая радиационная стойкость; высокая степень интеграции (минимальный размер домена значительно ниже предела разрешения процессов литографии). Конструкция простейшей ячейки запоминающего устройства конденсаторного типа показана на рис. 2д.

В настоящее время определились наиболее вероятные сегнетоэлектрические материалы для таких микросхем – это ЦТС и $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$, предложенный фирмой “Symetrix” три года назад. На базе этих материалов несколько фирм (“Matsushita”, “Micron”, “Symetrix”, “Ramtron”, “Seiko”) начинают в ближайшее время выпуск микросхем небольшой степени интеграции (64 – 256 кбит).

Во всех этих разработках для считывания информации используется переключение поляризации электрическим полем, поэтому после считывания информации требуется ее регенерация. Для этого в запоминающую ячейку необходимо вводить дополнительные элементы, что усложняет конструкцию и увеличивает топологические размеры. Кроме того, на сегнетоэлектрическую пленку накладываются весьма жесткие требования по числу циклов переключения поляризации ($> 10^{12}$), что потребовало достаточного серьезных материаловедческих исследований.

Имеется, однако, альтернативная возможность неразрушающего считывания, заключающаяся в использовании пирозлектрического эффекта. Если на сегнетоэлектрическую пленку нанести резистивный элемент, то при пропускании через него электрического тока в ячейке хранения за счет джоулева нагрева возникнет пирозлектрический сигнал, а состояние поляризованности не изменится, то есть считывание будет неразрушающим. Оценки показывают, что энергия считывания информации в такой микросхеме будет не слишком большой ($\sim 10^{-10}$ Дж/бит), а характерное время считывания ~ 1 мкс. Такие параметры далеки от рекордных, но конструкция ячейки считывания существенно упрощается, и по степени интеграции такая микросхема может приблизиться к DRAM.

Не потребовалось долго искать сегнетоэлектрический материал для практической реализации такой микросхемы. Им оказался все тот же ЦТС! Исследования показали, что для пленок ЦТС петля пирозлектрического гистерезиса имеет вполне подходящий (“квадратный”) вид (кривая 2 на рис. 1), а величина пирозлектрического коэффициента после некоторого спада сохраняется во времени (рис. 3б). Таким образом, основные требования, предъявляемые к материалу для подобных запоминающих устройств, можно считать выполненными.

Следует отметить, что существует и другая схемотехническая возможность исключения регенерации информации после считывания. Она состоит в использовании в качестве запоминающей ячейки МОП-транзистора с сегнетоэлектрической плен-

кой как подзатворным диэлектриком. Можно отметить здесь же, что использование сегнетоэлектрических пленок в качестве подзатворного диэлектрика в ПЗС позволяет создать аналоговые процессоры нового типа. Меняя за счет изменений локальной поляризации потенциальный рельеф, в котором перемещаются заряды в ПЗС, можно программно управлять потоками информации. Оба типа микросхем имеют высокую степень интеграции, но для их серийной реализации необходимо обеспечить необычайно высокое и контролируемое качество границы раздела сегнетоэлектрик – полупроводник. Эта задача до сих пор не получила ни теоретического, ни практического решения.

Все рассмотренные выше варианты использования сегнетоэлектрических пленок в микросхемах памяти не требуют выхода за пределы стандартной планарной технологии, поэтому, естественно, на них распространяются все ограничения, присущие этой технологии. К их числу в первую очередь относятся ограничения по минимальным технологическим размерам и вероятностям отказа элемента, обуславливающие ограничения по степени интеграции. Минимальный размер, определяемый разрешением фотолитографии, составляет в лучшем случае 0,25 мкм. Поэтому даже на очень большом кристалле не может быть размещено намного более 1 Гбита элементов. По мере роста степени интеграции растет вероятность появления дефектных

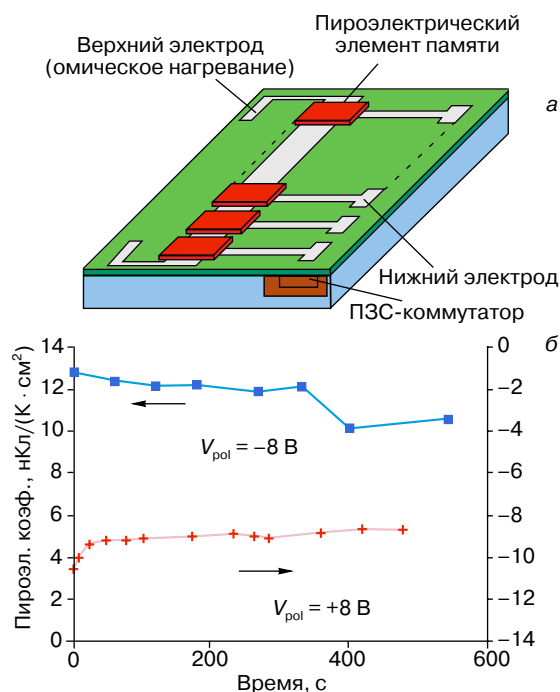


Рис. 3. а – Матрица пирозлектрических элементов памяти; б – зависимость пирозлектрического коэффициента пленки ЦТС от времени.

элементов. При современном уровне технологии это практически означает, что микросхемы с числом элементов более 100 Мбит будут иметь очень малый процент выхода годных. Во всяком случае можно уверенно утверждать, что в рамках планарной технологии гигабитный предел степени интеграции для устройств памяти едва ли будет преодолен даже с использованием гигабитных тонких пленок.

Обойти это ограничение можно только переходом к трехмерной интеграции. В принципе сегнетоэлектрические тонкие пленки могут позволить и такое. Речь пойдет об акустических линиях задержки. Рассмотрим акустический волновод (например, волокно из кварца или ниобата лития), на торцы которого нанесены сегнетоэлектрические слои. Если один из этих слоев использовать в качестве генератора ультразвуковых колебаний, а другой — в качестве приемника, получим ультразвуковую линию задержки (рис. 4а). Теоретические оценки скорости, дисперсии и затухания ультразвука, а также экспериментальные исследования показывают, что в такой линии может быть динамически записан доста-

точно большой объем информации. Например, при длине тракта 1 м и частоте звука 10^9 Гц объем записанной информации составляет ~ 100 кбит, а время передачи данных $< 10^{-3}$ с. Следовательно, одна или несколько таких линий, соединенные в кольцо, образуют элемент долговременной динамической памяти соответствующей емкости (рис. 4б).

Объединение таких элементов позволяет в принципе создать трехмерные структуры памяти очень большой емкости. Действительно, если возбудители и приемники ультразвука интегрировать в микросхему и использовать пучок волокон, то реализуется микросхема динамической памяти (рис. 4в). Степень интеграции торцевых микросхем может быть обеспечена на уровне 10^6 , тогда общий объем памяти устройства составит 100 Гбит. Ясно, что это далеко не предел! Увеличивая степень интеграции приемопередающих микросхем и плотность записи информации в линии, можно увеличить объем памяти до 10^{14} бит и более. Естественно, на практике придется искать способы устранения взаимовлияния каналов, но даже такая проблема может оказаться далеко не самой сложной! По нашему мнению, данное направление работ будет весьма перспективным уже в ближайшем будущем.

Интегральная акустоэлектроника предоставляет еще и возможность создания параллельных процессорных систем гигантской мощности. Поскольку в линии задержки реализуется динамический принцип хранения информации, проходящий через приемопередатчики информационный поток оказывается постоянно доступным для модификации или переадресации. Таким образом, усложнив конструкцию торцевых приемопередающих кристаллов, мы можем создать параллельный процессор, обрабатывающий поток 10^{15} бит/с при тактовой частоте 10^9 Гц, что в миллион раз превосходит производительность обычных процессорных микросхем!

Бесспорно, создание таких устройств — дело будущего. Еще предстоит решить множество технологических, схемотехнических и других задач. Однако в той или иной степени все эти проблемы ясны, и их преодоление кажется вполне реалистичным. Трехмерные акустоэлектронные устройства открывают путь к созданию мощных систем типа нейрокомпьютерных, по объему памяти и производительности приближающихся к возможностям человеческого мозга. Альтернативной элементной базы для создания устройств такого класса в настоящее время не видно.

Благодаря тонким пленкам активных диэлектриков приобрело новый импульс еще одно важное направление — микроэлектромеханические системы (MEMS), — объединяющее системы, получаемые в результате полной интеграции разного рода сенсоров, актюаторов, специальных управляющих электронных схем и т.п. с традиционными интегральными полупроводниковыми схемами.

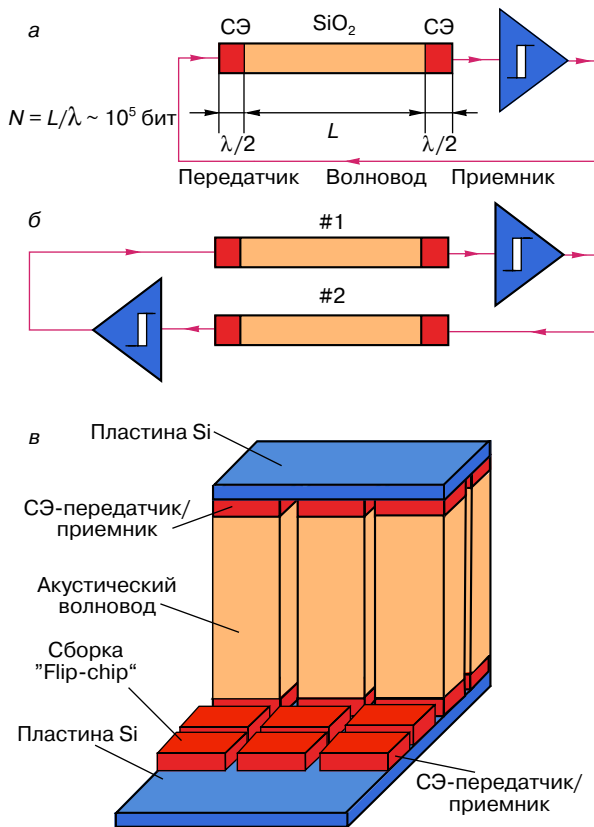


Рис. 4. Схематические примеры использования акустической волноводной линии задержки для создания долговременной динамической памяти. Замыкание одной (а) и двух (б) линий для создания элемента памяти, в — условное представление интегральной схемы трехмерной памяти.

Успехи в области MEMS помогли решить проблему создания полностью интегрированных неохлаждаемых приемников ИК-излучения (тепловизоров) на основе пьезоэлектрического эффекта в тонких пленках. Для улучшения характеристик пьезоэлектрических детекторов с целью их выигрыша в соревновании с охлаждаемыми квантовыми приемниками на узкозонных полупроводниках требуется максимально снизить теплоемкость и тепловые потери в приемной части детектора. Для этого создают так называемые подвешенные мембранные конструкции, когда площадь опор всей приемной матрицы не превышает тысячной доли основной ее площади.

Выше уже упоминалась возможность создания аналоговых процессоров путем объединения ПЗС и сегнетоэлектрических пленок. Матрица ПЗС при очень высокой степени интеграции (10^7 элементов и более) обеспечивает широкий динамический диапазон обрабатываемого сигнала (10^4). В такой матрице естественно и с высокой точностью реализуются операции параллельного сдвига больших массивов информации и их суммирование, но намного сложнее обстоит дело с функциями хранения и перемножения аналоговой информации. Способность сегнетоэлектриков длительное время сохранять локально поляризованное состояние, а также отмеченная ранее пропорциональность сигнала пьезоэлектрического отклика величине поляризации обеспечивают необходимое дополнение ПЗС в части хранения и перемножения информации (рис. 5). Анализ показывает, что такие микросхемы могут успешно решать большинство задач управления и обработки аналоговой информации в радио- и акустолокационных системах с синтезированной апертурой, а также могут оказаться полезными для предвари-

тельной обработки изображений в системах оптического и ИК-диапазонов.

Конечно, все сказанное далеко не исчерпывает многообразия физических свойств и возможных применений пленок активных диэлектриков и структур на их основе. В научной литературе появился даже новый термин – “умные диэлектрики”, что прекрасно передает смысл проблемы. Свойства тонких пленок во многом отличны от свойств массивных образцов того же состава, поэтому эффективное применение пленок связано с дополнительным изучением их электрофизических и механических характеристик. Разработка технологии интегральных схем, реализующих функции электронной, оптической, акустической и механической обработки и преобразования информации, предполагает прежде всего изучение таких свойств пленок, как остаточные напряжения, адгезия, структура, взаимодействия на поверхностях раздела, реакция на травление, роль и поведение примесей и дефектов, термические напряжения, влияние радиоактивного излучения и многих других факторов. За каждым понятием скрывается отдельная увлекательная тема.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рез И.С., Поплавко Ю.М. Диэлектрики. М.: Радио и связь, 1989.
2. Барфут Дж., Тэйлор Дж. Полярные диэлектрики. М.: Мир, 1981.
3. Лайнс М., Гласс А. Сегнетоэлектрики и родственные материалы. М.: Мир, 1981.
4. Струков Б.А. Сегнетоэлектричество. М.: Наука, 1979.
5. Scott J.F., Paz De Araujo, McMillan L.D. Integrated Ferroelectrics // Condensed Matter News. 1992. V. 1. № 3. P. 16 – 20.
6. Swartz S.L., Wood V.E. Ferroelectric Thin Films // Ibid. № 5. P. 4 – 13.
7. Microelectronic Engineering / P.K. Larsen, G.J.M. Dormans. Eds. 1995. V. 29.
8. Ferroelectric Thin Films. NATO ASI Series (E), 1995. V. 284.

* * *

Александр Сергеевич Сигов, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой “Электроника конденсированных сред”, декан факультета электроники Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики (технического университета). Область научных интересов: физические свойства кристаллов с дефектами и многослойных структур, активные диэлектрики. Автор двух монографий, ряда обзоров и более 170 научных статей.

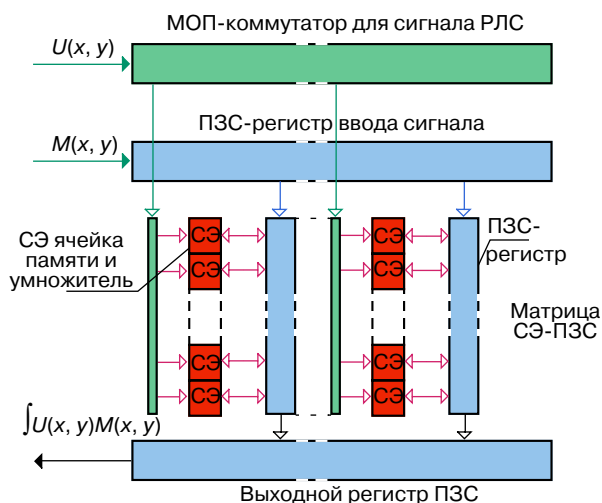


Рис. 5. Схема параллельного аналогового процессора, основанного на интеграции ПЗС-линейек с сегнетоэлектрическими тонкими пленками.