

Устройства функциональной электроники

Функциональная диэлектрическая электроника

1. Динамические неоднородности

Функциональная диэлектрическая электроника представляет собой направление в функциональной электронике, в котором изучаются явления и эффекты в **активных диэлектриках**, а также возможность создания приборов и устройств обработки и хранения информации на основе динамических неоднородностей электрической, магнитной или электромагнитной природы.

В активных диэлектриках в основном используются динамические неоднородности различной физической природы: **домены**, **квазичастицы**, **неоднородности фоторефрактивной** и **электрооптической** природы.

1. Сегнетоэлектрические домены

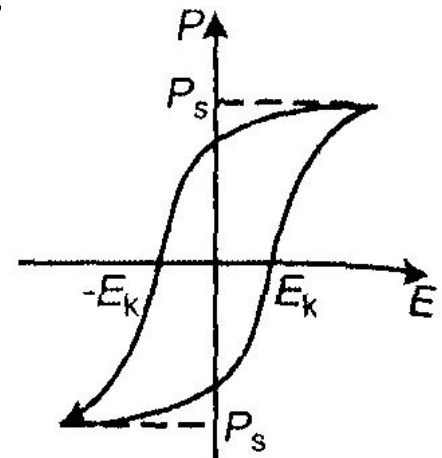
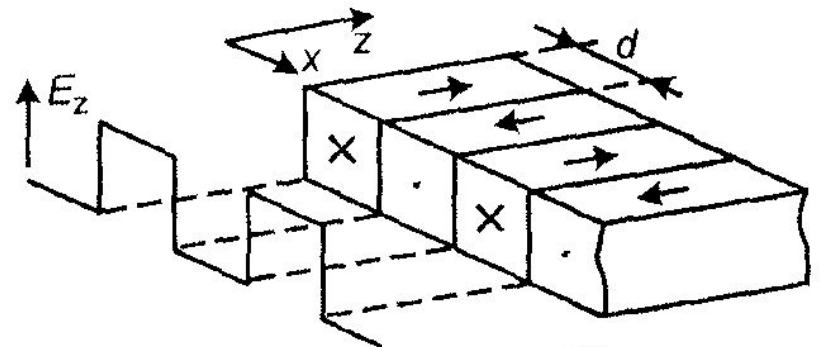
Представляют собой области однородной спонтанной поляризации P_S – аналогично магнитным доменам.

Размеры доменов составляют несколько микрон и разделены переходной областью или доменной границей толщиной в несколько ангстрем.

Поляризация P зависит от напряженности электрического поля E нелинейным образом.

При циклическом изменении E от $+E_K$ до $-E_K$ вектор поляризации меняется от $+P_S$ до $-P_S$, где E_K – коэрцитивная сила. Время электронной переполяризации составляет $\sim 10^{-15}$ с.

Локальные домены возникают в **сегнетоэлектриках** (обладают спонтанной поляризацией).



Функциональная диэлектрическая электроника

1. Динамические неоднородности

2. Сегнетоэластические домены

Локальные домены могут возникать в **сегнетоэластиках**, в которых может наблюдаться спонтанная деформация в результате изменения внешних условий – различающиеся ориентацией кристаллической решетки. Спонтанная деформация меняет знак при воздействии электрического поля.

3. В сегнетоэлектриках могут возникать **квазичастицы**:

- В сегнетоэлектриках наблюдаются фотостимулированные фазовые переходы 1-го и 2-го рода, при которых генерируются **фазоны** – макроскопические квазичастицы. **Фазоны** представляют собой возбуждение в гетерофазной системе из смеси фазовых состояний одного и того же вещества, связанной с образованием вокруг заряженной частицы флуктуации концентрации одной из компонент системы, создающей для частицы потенциальную яму.

Самосогласованный радиус фазона R_0 при данной температуре и заданной плотности поверхностной энергии пропорционален числу локализованных электронов n : $R_0 \sim n^{\frac{2}{3}}$ ($R_0 \sim 10 \text{ \AA}$). Фазоны можно рассматривать как подвижные пакеты квазичастиц с эффективной массой M . Модель фазона предполагает существенное влияние фазового перехода 1-го рода на электропроводность.

Функциональная диэлектрическая электроника

1. Динамические неоднородности

4. В **сегнетомагнитных кристаллах** одновременно существуют магнитная и электрическая дипольные структуры и соответственно векторы спонтанной поляризации P_S и спонтанной намагниченности M_S .

В элементарных ячейках кристаллографических структур **сегнетомагнетиков** должны находиться частицы, обладающие как электрическим дипольным моментом, так и магнитным дипольным моментом. Такие материалы обладают **магнитоэлектрическим эффектом**. Он состоит в том, что при наложении электрического поля появляется пропорциональная полю намагниченность, а при наложении магнитного поля появляется электрическая поляризация, пропорциональная этому полю.

В качестве континуальных сред в функциональной диэлектрической электронике используются, как правило, **активные диэлектрики**. Под активными диэлектриками понимают диэлектрические материалы, в которых могут быть возбуждены динамические неоднородности и которые предназначены для процессов генерации, усиления, преобразования и хранения информационных сигналов.

Активные диэлектрики существенно отличаются от **пассивных диэлектриков**, которые применяются в основном в качестве электроизоляционных материалов.

Функциональная диэлектрическая электроника

2. Континуальная среда

Свойства активных диэлектриков зависят от воздействия на них определенных физических полей: механических, тепловых, электрических, магнитных.

Результатом взаимодействия структуры диэлектрика и полей является генерация динамических неоднородностей определенной физической природы.

Активные диэлектрики, используемые в качестве континуальных сред в приборах и устройствах функциональной диэлектрической электроники, обладают широким набором свойств, определяемых типом воздействующих физических полей: механических, тепловых, электрических, магнитных, оптических.

Набольший интерес для функциональной электроники представляют собой **сегнетоэлектрические континуальные среды**, имеющие доменную структуру. Каждый домен обладает спонтанной поляризацией, уровень и направление которых могут быть изменены внешними полями, например электрическим. У сегнетоэлектриков суммарная поляризация зависит от поляризации отдельных доменов.

В зависимости от вида поляризации различают

- **ионные,**
- **дипольные,**
- **несобственные сегнетоэлектрики.**

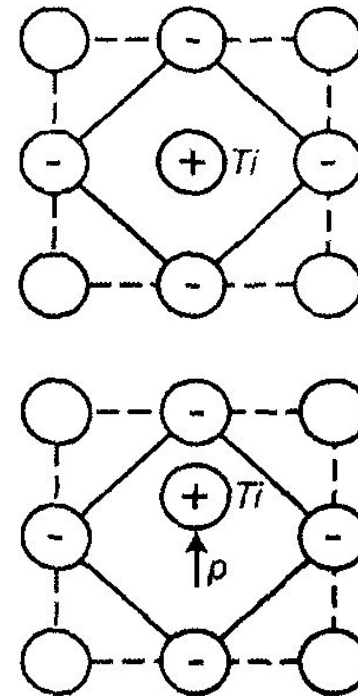
Функциональная диэлектрическая электроника

2. Континуальная среда

В **ионных сегнетоэлектриках** ячейка имеет вид куба типа ABO_3 , по вершинам которого расположены ионы типа A (Ba^{2+} , Pb^{2+} , K^{2+} ...), в центре ионы типа B (Ti^{4+} , Nb^{4+}), а в центрах граней ионы кислорода O^{2-} .

Если ионы типа B находятся в центре элементарной ячейки, то центры тяжести положительных и отрицательных ионов совпадают и общий дипольный момент равен нулю.

Смещение иона B (Ti^{4+} , например) из центра кислородного октаэдра приводит к разбалансировке и возникновению дипольного момента P , направленного в сторону смещения.



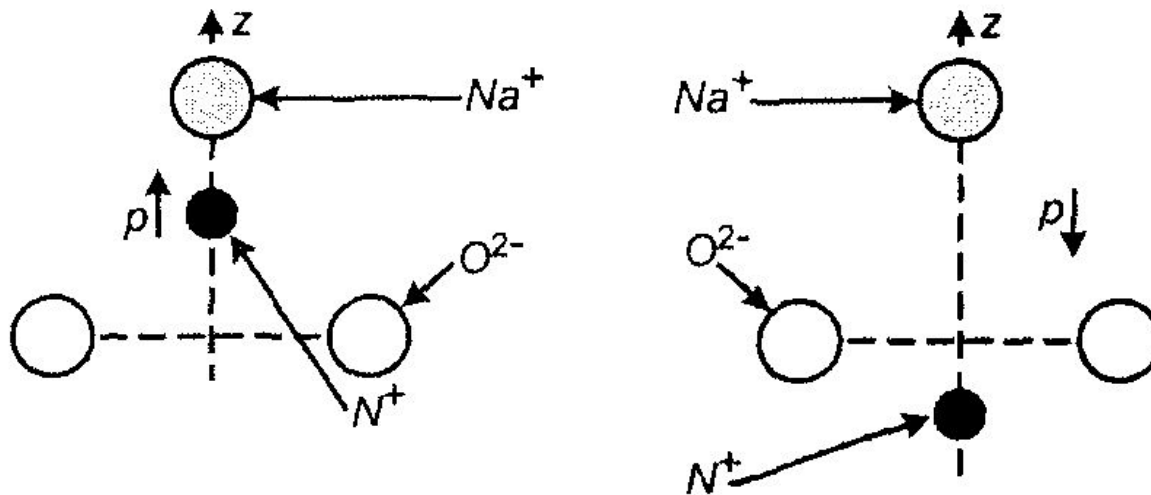
К ионным сегнетоэлектрикам относятся структуры типа перовскита ($CaTiO_3$), титанат бария ($BaTiO_3$), титанат свинца ($PbTiO_3$), ниобат калия ($KNbO_3$) и т. п.

Функциональная диэлектрическая электроника

2. Континуальная среда

В элементарной ячейке **дипольных сегнетоэлектриков** содержатся атомы с двумя положениями равновесия, электрическая поляризация которой и определяется взаимным положением атомов.

К дипольным сегнетоэлектрикам относятся сегнетова соль ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), триглицинсульфат ТГС ($(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$), нитрид натрия (NaNNO_2) и т. п.



Функциональная диэлектрическая электроника

2. Континуальная среда

В *несобственных сегнетоэлектриках* спонтанная поляризация обусловлена, например, деформацией кристаллической решетки при фазовом переходе.

К этому типу относятся молибдат гадолия $Cd_2(MoO_4)_3$, лангбейниты, $[Tl_2Cd_2(SO_4)]_3$, фторбериллат аммония $(NH_4)_2BeF$ и т. п.

Кристаллы, в соседних ячейках которых одноименные ионы смещены в противоположных направлениях, называются **антисегнетоэлектриками**.

Спонтанная поляризованность антисегнетоэлектриков равна нулю. При наложении сильного электрического поля антисегнетоэлектрик может переходить в сегнетоэлектрик с параллельной ориентацией диполей.

Отличительной особенностью антисегнетоэлектриков является наличие двойных петель диэлектрического гистерезиса.

К антисегнетоэлектрикам относятся кристаллы цирконата свинца ($PbZnO_3$), ниобата натрия ($NaNbO_3$), гафната свинца ($PbHfO_3$), дигидрофосфата аммония ADP ($NH_4H_2PO_4$) и т. п. Сегнетоэлектрики обладают довольно большим удельным сопротивлением

($\rho > 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Однако существуют такие сегнетоэлектрики, у которых значение ρ соответствует полупроводникам.

Можно искусственно снизить значение ρ , например, ионным легированием и получить новый тип сегнетоэлектрика – **сегнетополупроводник**. К ним относятся вещества – феррит висмута $BiFeO_3$, титанат свинца $PbTiO_3$ и др.

Функциональная диэлектрическая электроника

2. Континуальная среда

Весьма перспективными являются полимерные **сегнетоэлектрические пленки**, нанесенные на поверхность кремния. Пленки наносятся методом литья из раствора винилиденфторида $CH_2 = CF_2$ и трифторэтилена $CH_2 = F_2 - CHF - CF_2$ в ацетоне с последующим осаждением при температуре + 20 ... 22 °С. Толщина пленок лежит в пределах от 6 до 20 мкм.

Электрическими и магнитными свойствами обладают **сегнетомагнитные кристаллы**. Отличительной особенностью структуры сегнетоэлектриков является сосуществующие магнитная и электрическая взаимопроникающие решетки. Они образованы частицами, несущими электрические и магнитные дипольные моменты.

В диэлектриках этого класса обнаружен магнитоэлектрический эффект. Его сущность состоит в том, что в веществах определенной симметрии при наложении электрического поля появляется намагниченность, пропорциональная полю, и при приложении магнитного поля появляется электрическая составляющая, пропорциональная полю.

Сегнетомагнетики перспективны для устройств **функциональной электроники второго поколения**, где возможна интеграция эффектов и явлений за счет присутствия в среде спонтанной поляризации P_S и спонтанной намагниченности M_S .

К сегнетомагнетикам прежде всего относятся перовскитные соединения типа ферровольфрамат свинца $Pb(Fe_{2/3}W_{1/3})O_3$ и феррониобат свинца $Pb(Fe_{2/3}Ni_{1/3})O_3$, а также феррит висмута $BiFeO_3$, ренийсодержащие перовскиты Sr_2CoReO_6 , $SrNiReO_6$, сегнетомагнитные боракиды $Mg_3B_7O_{13}Cl$ и т. п.

Функциональная диэлектрическая электроника

3., 4., 5 Генерация, управление и детектирование ДН

Генерирование динамических неоднородностей в диэлектрических континуальных средах осуществляется физическими полями.

Динамические неоднородности в устройств диэлектрической электроники, как правило, не перемещаются в континуальной среде.

Информационный сигнал передается за счет изменения локальных физических свойств среды, прежде всего за счет локальных полей.

При приложении электрического поля с помощью статических неоднородностей соответствующей конфигурации к сегнетоэлектрику в нем генерируется неоднородность в виде домена определенной поляризации.

При приложении электромагнитного поля к сегнетоэлектрикам (например, KDP, ADP и др.) можно получить динамические неоднородности, изменяющие оптическую плотность среды и способствующие линейному преобразованию падающего излучения. При этом реализуется элемент конструкции – генератор динамических неоднородностей.

В приборах и устройствах диэлектрической электроники **управление динамическими неоднородностями**, как правило, носит статический характер и осуществляется с помощью меняющихся физических полей, в зависимости от типа выбранной динамической неоднородности.

Детектором динамических неоднородностей является, как правило, локальная область, изменяющая свои свойства под действием физических полей. Считывание информации можно осуществлять и сканирующим детектором. В этом случае имеет смысл говорить о распределенном детекторе.

Функциональная диэлектрическая электроника

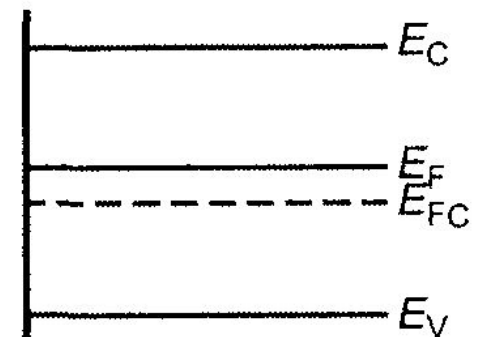
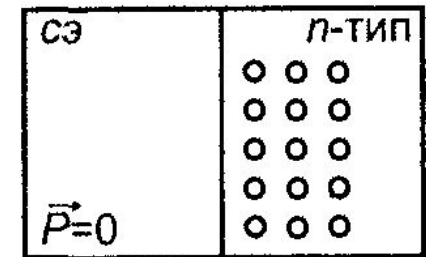
Устройства ФДЭ

Диэлектрики, как правило, используются в приборах диэлектрической функциональной электроники в виде **слоистых структур**.

Слой активного диэлектрика применяется для хранения или обработки информации, а ввод и детектирование информации осуществляется в других слоях с соответствующими статическими неоднородностями.

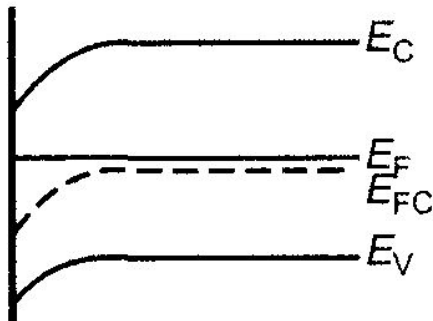
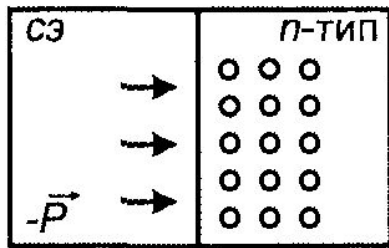
1. Например, в **структурах «сегнетоэлектрик-полупроводник»** используется эффект поля. В этом случае свойства полупроводника определяются состоянием поляризации сегнетоэлектрика

Если **сегнетоэлектрик деполяризован ($P = 0$)**, то на границе раздела «сегнетоэлектрик-полупроводник» n -типа нет изгиба зон. Собственный уровень Ферми E_{FC} представляет собой прямую линию, а основные носители смешаны в полупроводнике с неосновными.

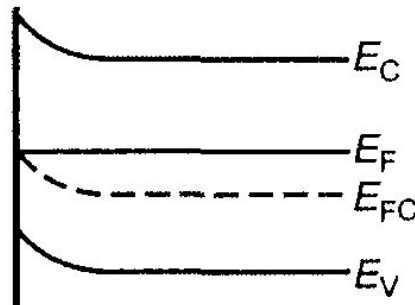
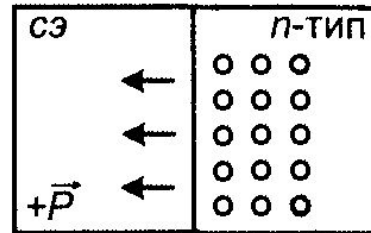


Функциональная диэлектрическая электроника Устройства ФДЭ

При поляризации сегнетоэлектрика ($-P$) у границы раздела в полупроводниковом слое образуется слой накопления основных носителей. Происходит изгиб зон, включая уровень Ферми, и при этом поверхностная плотность больше объемной плотности.



Если **переполяризовать сегнетоэлектрик ($+P$)**, то у границы раздела в полупроводнике образуется слой обеднения основными носителями. Зоны изогнутся в противоположную сторону и поверхностная плотность будет меньше объемной плотности зарядов.



В таких структурах информация, соответствующая одному из направлений вектора спонтанной поляризации, может быть считана по изменению поверхностного потенциала полупроводника.

Время перезаписи информации определяется временем переполяризации.

Таким образом можно управлять поперечной проводимостью полупроводника, управляя поляризацией сегнетоэлектрика.

Функциональная диэлектрическая электроника

Устройства ФДЭ

2. Весьма перспективной является структура **«сегнетоэлектрик-фотополупроводник»**.

Такая структура помещается между оптически прозрачными проводящими электродами. При локальном освещении полупроводника его сопротивление уменьшается, и все напряжение между проводящими электродами падает на слой сегнетоэлектрика. В освещенных областях сегнетоэлектрик переполяризуется. Возникающее пространственное распределение поляризации сегнетоэлектрика соответствует распределению освещенности и позволяет осуществить оптическое считывание.

Использование диэлектрических материалов при создании **запоминающих устройств** весьма перспективно для создания новых приборов, характеризующихся

- энергонезависимостью,
- высоким выходным сигналом,
- устойчивостью к воздействию перегрузок и радиации.

По функциональному назначению эти устройства близки к репрограммируемым полупроводниковым ЗУ (РПЗУ).

Одними из первых устройств этого типа были сегнетоэлектрические ЗУ, изготовленные на поликристаллической сегнетокерамике типа цирконата-титаната свинца (PZT-керамика).

Функциональная диэлектрическая электроника

Устройства ФДЭ

Запоминающее устройство изготовлялось на основе керамической пластины 2 в форме диска или прямоуголы

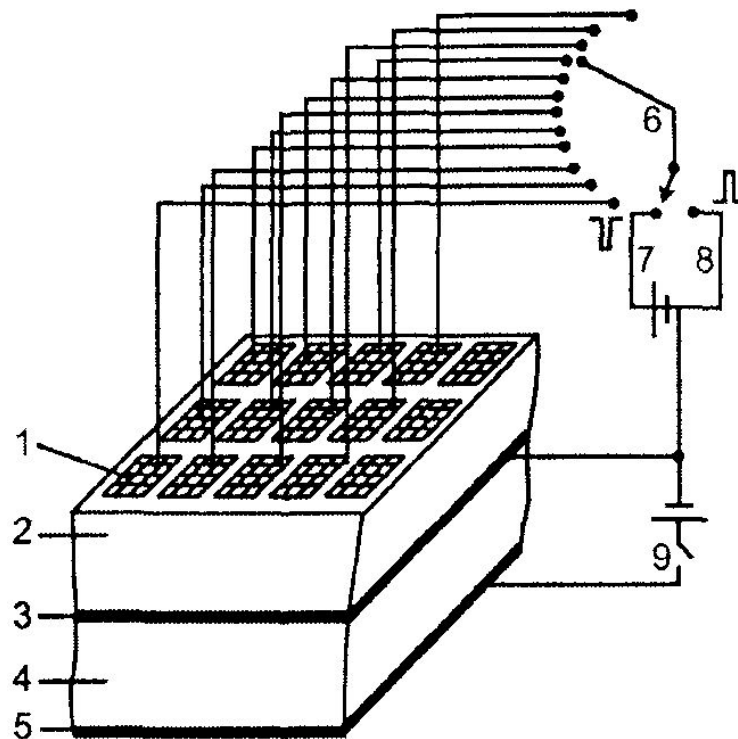
Термическим напылением в вакууме на внешнюю поверхность наносились металлические электроды форме секторов или прямоугольников 1.

С другой стороны наклеивался сплошной электрод из латуни или инвара 3, который служил общим электродом и для еще одной пластины PZT-керамики 4 со сплошным электродом 5, присоединенной снизу.

Такая слоистая структура из двух типов сегнетоэлектриков с электродами между ними представляет собой **твердотельную память на диэлектрике**.

Первоначально сегнетоэлектрик имеет остаточную поляризацию, например, отрицательную, при которой вектор остаточной поляризации $-P$ направлен вниз. Этому состоянию памяти можно приписать хранение во всех разрядах информационных нулей.

Это же состояние можно сформировать путем переполяризации секторов (разрядов) памяти, подавая отрицательный импульс напряжения с помощью коммутаторов 6 и 7.



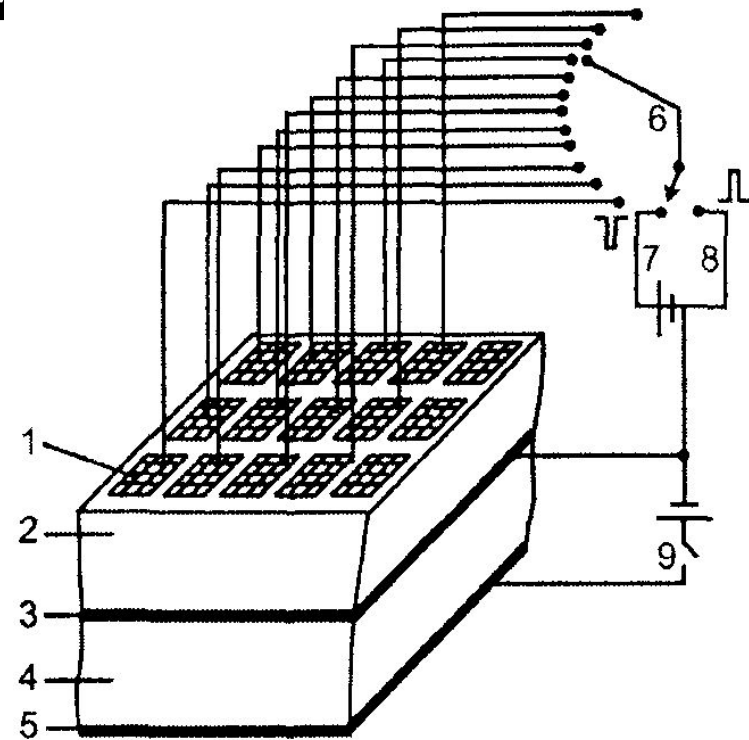
Функциональная диэлектрическая электроника

Устройства ФДЭ

Программирование запоминающего устройства происходит путем записи двоичной единицы информации в соответствующий разряд памяти (+P). С этой целью туда необходимо подать положительный импульс напряжения соответствующей комбинацией коммутаторов 6 и 8. После снятия напряжения записи заданное направление поляризации сохраняется в силу гистерезисных свойств сегнетокерамики.

Процесс считывания двоичной информации основывается на пьезоэлектрических свойствах сегнетокерамики. Так, если к электродам 3 и 5 сегнетокерамики 4 приложить напряжение с помощью коммутатора 9, то возникнет механическая деформация. Импульс деформации от изгибающего элемента 4 пройдет через сегнетокерамику 2 и индуцирует на секторных электродах заряд, соответствующий ранее записанной двоичной информации. Этот заряд может быть считан как соответствующий ему потенциал с помощью коммутатора 6 и, таким образом, считана ранее записанная информация.

Такая память на изгибающем элементе требует довольно больших входных сигналов (~ 15 В), способных вызвать значительные механические деформации и, соответственно, большие значения выходных сигналов (~ 2 В).



Функциональная диэлектрическая электроника

Устройства ФДЭ

Разработанные пьезокерамические матрицы (ПКМ) работают на принципе импульсного или резонансного считывания информации.

Считывание информации происходит без ее разрушения с тактовой частотой до 1 МГц, определяемой временем переполяризации (~ 50 мкс). Допускается $10^6 - 10^8$ циклов перезаписи информации. Разработаны интегральные ПКМ емкостью более 512 бит с напряжением перезаписи ~ 4 В, работающие в интервале температур $80 - 200$ °С, выдерживающие ударные нагрузки до $3 \cdot 10^4 g$ и отличающиеся высокой радиационной стойкостью.

В рассматриваемых устройствах возможно увеличение на порядок плотности записи информации без увеличения числа ячеек памяти. В основе лежит физический принцип переключения поляризации из состояния $-P$ в состояние $+P$. Из-за отсутствия абсолютного порога переключения можно один бит информации, например «1», разложить на амплитудный многоуровневый аналоговый сигнал и воспользоваться законами многозначной логики.

Так, в ПКМ достаточно легко обеспечить 20 уровней $\pm \Delta P$ во всем диапазоне $\pm P$ с разрешением цифроаналогового преобразования 0,1 В. Одним из основных требований к сегнетоэлектрическим материалам таких ПКМ является обеспечение коэффициента прямоугольности петли диэлектрического гистерезиса

$$0,85 < K_{\text{ПР}} = P/P_S < 1.$$

Функциональная диэлектрическая электроника

Устройства ФДЭ

Весьма перспективным материалом для ЗУ являются **сегнетоэлектрические пленки** на основе нитрата калия (KNO_3). Они отличаются малым временем переключения $\sim 10^{-9}$ с, высокой тактовой частотой $\sim 10^8$ Гц, малыми геометрическими размерами доменов, позволяющими получить размер ячейки ~ 20 мкм² и, соответственно, достичь степени интеграции $10^8 - 10^{10}$ бит/см².

Устройства памяти на сегнетоэлектриках обладают энергонезависимостью.

Лучший результат дает технология осаждения на поверхность тонкой пленки цирконата-титаната свинца (ЦТС или PZT), с помощью которой формируются сегнетоэлектрические конденсаторы. Такие конденсаторы соответствующим образом поляризуются и, имея высокое значение диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 1200$), обеспечивают определенное состояние ЗУ при частом отключении питания.

Используемая керамика цирконат-титанат свинца (PZT) обладает высоким удельным сопротивлением (изолятор), термической и химической стойкостью, высокой механической прочностью. Температура фазового перехода PZT-керамики составляет 330 °С, и поэтому такие схемы могут работать в температурном диапазоне $-180 \dots +320$ °С. Пробивное напряжение таких схем составляет ~ 40 В, диэлектрическая проницаемость выше $1,2 \cdot 10^3$, что позволяет резко повысить плотность интеграции по сравнению с известными схемами ОЗУ.

Динамические неоднородности в виде сегнетоэлектрических доменов, встроенных в устройства схемотехнической электроники, позволяют получить их новое качество, существенно улучшить выходные характеристики.

Функциональная диэлектрическая электроника

Устройства ФДЭ

Процессоры для обработки больших информационных массивов, реализованные на принципах функциональной электроники, позволяют обрабатывать информацию в аналоговом виде, одномоментно либо весь массив, либо его часть.

Результирующая информация может быть преобразована в цифровую форму. Возможна операция выделения разностной информации между двумя и более временными состояниями информационного массива.

Процессоры можно реализовать на **слоистых структурах типа «сегнетоэлектрик—фотополупроводник».**

С обеих сторон такой структуры напыляются проводящие пленки, причем со стороны фотополупроводника пленка должна быть оптически прозрачной. При формировании на слое фотополупроводника оптического информационного массива на слоистую структуру одновременно подается «записывающий» импульс напряжения.

В освещенных участках сопротивление фотополупроводника резко уменьшается, и все приложенное напряжение падает на слое сегнетоэлектрика. Под засвеченными местами сегнетоэлектрик переполяризуется.

В темных местах сопротивление фотополупроводника велико и все напряжение падает на нем. Сегнетоэлектрик под темными местами не переполяризуется.

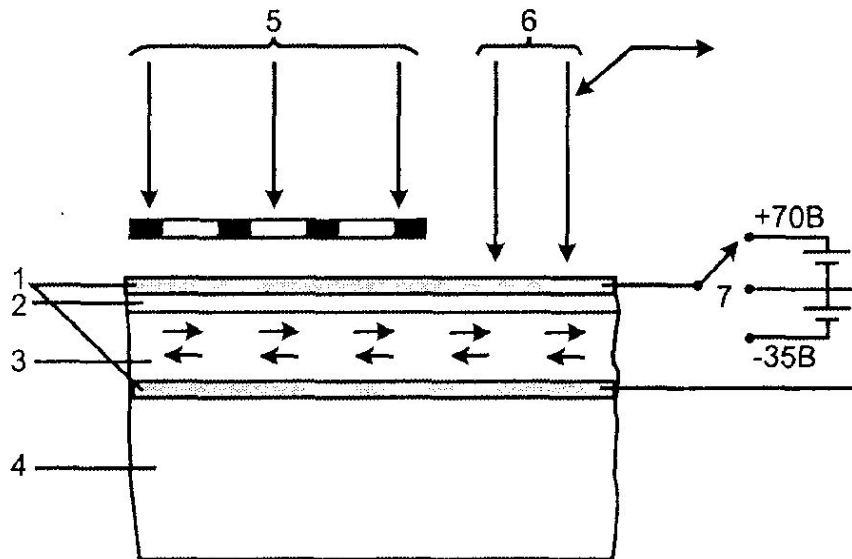
Возникает пространственное распределение поляризации сегнетоэлектрика, соответствующее распределению освещенности, и оптический информационный массив преобразован в электрически заряженный информационный массив, который может быть считан.

Стирание записанной информации происходит путем засветки всей поверхности фотополупроводника с одновременной подачей импульса напряжения, 18

Функциональная диэлектрическая электроника

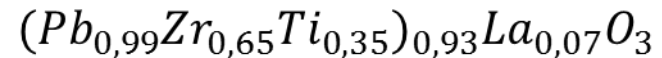
Устройства ФДЭ

Устройство на основе метода преимущественной ориентации доменов с помощью механического напряжения, создаваемого деформацией пластины, получило название **ФЕРПИК (FERPIC, FERroelectric Picture)**.



- 1 – прозрачные проводящие электроды;
- 2 – фотопроводник;
- 3 – сегнетокерамика;
- 4 – прозрачная подложка;
- 5 – облучение через маску;
- 6 – облучение сканированием;
- 7 – переключатель режимов работы;
- 8 – источники напряжения.

В качестве основной непрерывной среды используется сегнетоэлектрик 3 в виде цирконата-титаната свинца с лантаном (ЦТСЛ-керамики)



со средним размером зерна 1,0 – 1,5 мкм.

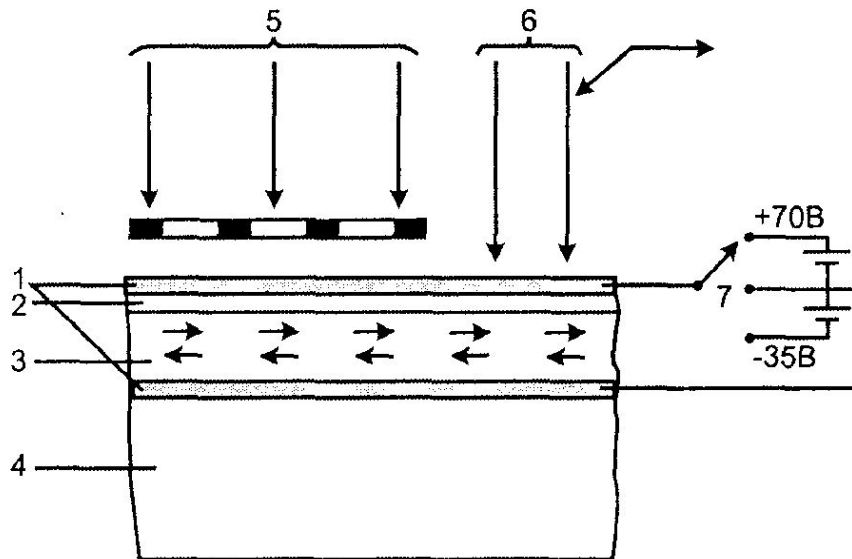
В такой среде динамические неоднородности представляют собой субмикронные сегнетоэлектрические домены.

Непрерывная среда подвергается смещению деформацией, что позволяет сориентировать домены вдоль оси напряжения.

Функциональная диэлектрическая электроника

Устройства ФДЭ

Устройство на основе метода преимущественной ориентации доменов с помощью механического напряжения, создаваемого деформацией пластины, получило название **ФЕРПИК (FERPIC, FERroelectric Picture)**.



- 1 – прозрачные проводящие электроды;
- 2 – фотопроводник;
- 3 – сегнетокерамика;
- 4 – прозрачная подложка;
- 5 – облучение через маску;
- 6 – облучение сканированием;
- 7 – переключатель режимов работы;
- 8 – источники напряжения.

Считывание записанной информации производится при соединении электродов (поставив переключатель в среднее положение и осветив устройство пучком монохроматического света).

При этом достигается разрешение ~ 40 лин/мм и контраст 10:1.

Стирание информационного массива можно осуществить путем освещения всей поверхности и одновременной подачи на слоистую структуру отрицательного напряжения (-35 В).

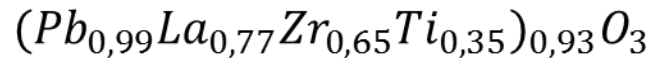
При этом динамические неоднородности в виде сегнетоэлектрических доменов возвращаются в исходное состояние. Это устройство обработки информации в русской терминологии называют еще «сегнот» – сегнетоэлектрическое отображение.

Функциональная диэлектрическая электроника

Устройства ФДЭ

В дальнейшем эта конструкция процессора стимулировала появление аналогичных устройств на основе слоистых структур «сегнетокерамика – фотопроводник».

К ним относятся, например, **КЕРАМПИК (CERAMPIC, CERAMic Picture)**, континуальной средой в котором служит крупнозернистая керамика



с размером зерен $\sim 3,0$ мкм.

В процессоре такого типа в качестве континуальной среды используется сегнетокерамика толщиной 250 мкм, обладающая свойством локально деформироваться и, таким образом, **распределение поверхностной деформации соответствует распределению переполаризовавшихся участков.**

Амплитуда деформации составляет 0,5 мкм и можно получить увеличенное изображение в отраженном свете с разрешением до 100 лин/мм.

Слоистая структура может применяться в качестве **оптических процессоров**, в частности для преобразования входного некогерентного изображения в выходной когерентный сигнал, что используется в голографических ЗУ.

Весьма перспективно применение таких структур в процессорах сложения и вычитания информационных массивов. В этих устройствах используется способность сегнетоэлектрика к устойчивому частичному переключению в пределах от $-P_S$ до $+P_S$ под действием электрического поля.