

Киевский политехнический институт

на правах рукописи

Саджих Ахмад
(Сирия)

удк : 681.327.66

Средства исследования процессов в сегнетоэлектрических
запоминающих устройствах

Специальность 05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления

05.13.16 - Применение вычислительной техники,
математического моделирования и ма-
тематических методов в научных ис-
следованиях

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев-1993



робота виконана в Київському політехнічному інституті
в кафедрі вичислительної техніки

НАУЧНИЙ РУКОВОДИТЕЛЬ - кандидат технічних наук,
ведучий научний співробітник
Мартиник Я. В.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ - доктор технічних наук,
професор Синьков М. В.

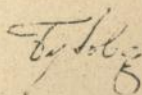
- кандидат технічних наук,
ведучий научний співробітник
Селигей А. М.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ - Київський науково-дослідницький інститут мікроприборів.

Захист проводиться " 15 " марта 1993 г. в 14³⁰ часов
на засіданні спеціалізованого комітету Д 068.14.09 в
Київському політехнічному інституті корпус 18, ауд. 306.
Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу : 252056, Киев-56, проспект Победы, 37, КПИ, ученому секретарю.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Киевского политехнического института.

Автореферат разослан " ____ " февраля ___ 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного комитета
д. т. н., профессор

 О. В. Бузовский

АВ-26.833

Аннотация

Целью диссертационной работы является: теоретическое и экспериментальное исследование кинетики поляризации тонкопленочных сегнетоэлектрических материалов в наносекундном диапазоне, разработка математических моделей статики и динамики процессов поляризации, методов и средств их машинного моделирования, электрических моделей и схем интегральных сегнетоэлектрических запоминающих элементов (СЗЭ), накопителей запоминающих устройств на их основе, методов и средств машинного моделирования и исследования процессов в накопителях сегнетоэлектрических запоминающих устройствах (СЗУ) в зависимости от структурных, технических и технологических параметров устройств для систем автоматизированного проектирования (САПР).

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе сформулированы и решены следующие задачи:

- установление зависимости остаточной поляризации сегнетоэлектрических материалов от времени воздействия и амплитуды импульсных электрических полей с учетом предместории состояния поляризации;
- разработка математической модели статики и динамики процесса поляризации сегнетоэлектрических материалов, а также алгоритмов и программ машинного расчета и моделирования кинетики переключения сегнетоэлектрических материалов и сегнетоконденсаторных запоминающих элементов на их основе;
- разработка эквивалентных электрических схем интегральных СЗЭ с учетом вида их конструкций и проектно-технологических норм на их изготовление;
- разработка эквивалентных электрических схем накопителей интегральных СЗУ с элементами и схемами управления, методов исследования процессов при функционировании СЗУ, программных средств машинного моделирования и расчета характеристик СЗУ;
- разработка алгоритмов, программных модулей и элементов оптимизации для САПР СЗУ.

Автор защищает следующие основные положения и результаты:

1. Аналитическое выражение значения остаточной поляризации сегнетоэлектрического материала в зависимости от времени и амплитуды воздействия электрического поля.
2. Метод и алгоритм машинного моделирования кинетики по-

ляризации СЗЭ с учетом значений параметров схем управления и конструктивно-технологических ограничений.

3. Электрические эквивалентные схемы интегральных СЗЭ и накопителей СЗУ внешней и оперативной памяти ЭВМ.

4. Методы и алгоритмы машинного моделирования процессов в накопителях СЗУ в зависимости от емкости памяти и проектно-технологических норм.

5. Алгоритмы, программные модули и элементы оптимизации СЗУ для САПР.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы .. В настоящее время в совершенствовании средств вычислительной техники одна из основных проблем заключена в необходимости создания единой энергонезависимой оперативной и внешней памяти ЭВМ, совместимых между собой и с процессорной частью машины по быстродействию и характеру обмена информацией. В этом направлении значительную перспективу представляет комплексное использование тонкопленочных сегнетозлектрических материалов с полупроводниковыми структурами и реализация на этой основе требуемой энергонезависимой электронной памяти ЭВМ сверхбольших объемов.

Несмотря на значительные технические и технологические результаты в разработке СЗУ (быстродействие в пределах единиц наносекунд, плотность компоновки СЗЭ $10^6 \dots 10^8$ бит/мм², одно +5В или +3В питающее напряжение), существующие проблемы моделирования процессов в СЗУ, их топологии и технологии изготовления, отсутствие машинных методов оптимального проектирования сдерживают разработку и применение сегнетозлектрических ЗУ.

В этой связи разработка средств исследования СЗУ и процессов в них с применением вычислительной техники, математического моделирования и математических методов анализа процессов в СЗУ, их оптимального проектирования с целью повышения быстродействия, информационной емкости и эксплуатационных возможностей является актуальной проблемной задачей.

Настоящая работа является частью комплексных исследований по проблеме создания принципиально новой диэлектрической элементной базы для электроники и средств вычислительной техники, проводимых в Киевском политехническом институте на кафедре вы-

числительной техники под общим руководством чл.-корр. АН Украины, д.т.н., профессора Самофалова К. Г.

Методы исследования. Разработка и исследование математических моделей характеристик переключения остаточной поляризации в толстых и тонких сегнетоэлектрических пленках базируются на теоретических и экспериментальных исследованиях с привлечением теории полярных диэлектриков, теории электрического поля, методов математической статистики, теории вероятностей.

Для разработки математических методов моделирования и исследования статистики и кинетики поляризации в сегнетоэлектрических материалах и запоминающих элементах, использован метод цифрового математического моделирования с привлечением теории нелинейных электрических цепей, численных методов решения нелинейных дифференциальных уравнений.

Разработка эквивалентных электрических схем интегральных сегнетоэлектрических запоминающих элементов и накопителей СВУ выполнена на основе теории электрического поля, теории полупроводников с использованием общей теории проектирования и технологии изготовления интегральных полупроводниковых структур и запоминающих устройств.

Математические методы исследования электрических процессов в накопителях СВУ, методы оптимального проектирования структур накопителя выполнены с привлечением общих положений теории электрических цепей, цифрового математического моделирования, теории линейного программирования.

Научная новизна. Математическое выражение характеристик переключения сегнетоэлектриков, дифференцируемое во всем интервале времен, в том числе в точке $t = 0$, обеспечивающее получение аналитических выражений эквивалентных нелинейных сопротивлений и емкостей сегнетоэлектрических запоминающих элементов необходимых и приемлимых для цифрового моделирования и исследования процессов в сегнетоэлектрических структурах определено и обосновано автором впервые.

При этом получены следующие новые результаты.

1. Предложен метод и проведено машинное моделирование и исследование кинетики поляризации СВУ в диапазоне малых и больших времен (от единиц нс до сотен секунд), с разработкой эквивалентной электрической схемы с эквивалентными нелинейными динамическими электрическими проводимостью и емкостью, отражающими изменение спонтанной поляризации. Метод и разра-

ботаное программное обеспечение позволяют определять зависимости характеристик СЗЭ от конструктивных и технологических ограничений при обеспечении максимального быстродействия и плотности компоновки.

2. Проведен анализ режимов функционирования базовых структур интегральных накопителей с поэлементной выборкой, определены требования к схемам управления. Разработаны электрические эквивалентные схемы запоминающих элементов и накопителей, математические выражения параметров элементов схем с учетом конструкции и топологии. Из эквивалентных схем накопителей (двухмерных электрических схем с распределенными параметрами) обоснованы и разработаны частные эквивалентные схемы, обеспечивающие сведение исследования электрических процессов в накопителях к одномерным схемам с распределенными параметрами.

3. Разработан комбинированный алгоритм явного метода интегрирования для исследования динамических процессов в активных схемах с распределенными RC-элементами, проведены численные расчеты и анализ характеристик накопителей по быстродействию при записи и считывании информации в зависимости от структуры накопителя, емкости памяти, значений проектно-технологических норм в диапазоне 1,5...3 мкм.

4. Разработан алгоритм по определению структуры накопителя (числа адресов и разрядов), обеспечивающий максимальное быстродействие при фиксированной емкости памяти.

Практическая ценность работы определяется: разработанной математической моделью (выражением) статических характеристик переключения поликристаллических сегнетоэлектрических материалов, приемлемой для описания кинетики поляризации СЗЭ в системах автоматизированного проектирования, алгоритмом и программой машинного расчета кинетики поляризации; эквивалентными электрическими схемами СЗЭ; эквивалентными электрическими схемами накопителей; аналитическими выражениями амплитуд информационных сигналов; проведенными машинными расчетами зависимостей величин задержек распространения управляющих и информационных сигналов в шинах накопителей. Результаты работы представляют необходимый комплекс данных для инженерного проектирования накопителей и СЗУ, обеспечивают возможность разработки системы автоматизированного проектирования СЗУ.

Реализация научных результатов работы. Результаты теоретических экспериментальных исследований, полученные в диссер-

тационной работе, использованы при выполнении научно-исследовательских работ, проводимых кафедрой вычислительной техники Киевского политехнического института в соответствии с программой Министерства образования Украины "Методы проектирования и создания интегрированных компьютеризованных систем и технологии" и программой Комитета по научно-техническому прогрессу при Кабинете Министров Украины "Перспективные информационные технологии". В НПО "Микропроцессор", г. Киев, использованы следующие результаты: рекомендации и требования к топологии узлов управления и фрагментов интегральных накопителей сегнетозлектрических ЗУ, аналитические выражения информационных сигналов и помех в СЗУ при проектировании и изготовлении тестовой структуры СТМ-46, предназначенной для определения конструктивных и технологических ограничений проектирования интегральных микросхем сегнетозлектрических ЗУ емкостью 64 Кбит.

Апробация работы. Основные научные результаты работы докладывались на III отраслевой научно-технической конференции Министерства Электронной Промышленности СССР "Опыт разработки, производства и применения БИС РГЗУ, ПЗУ и ПЛИС", г. Киев, 1990г., многократно докладывались и обсуждались на ряде научно-технических советов НПО "Микропроцессор" в процессе выполнения совместных работ.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 2 статьи.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 115 страницах машинописного текста, и содержит 30 страниц рисунков, 17 таблиц, список литературы (90 наименований) и приложение.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель диссертационной работы и задачи исследования.

В первой главе диссертации проанализированы свойства сегнетозлектрических материалов в слабых и сильных электрических полях, рассмотрены современные тенденции и направления в теории моделирования характеристик переключения спонтанной поляризации и кинетики поляризации сегнетозлектрических материалов. Доработана математическая модель поляризации тонко- и толсто пленочных сегнетозлектриков, учитывающая зависимость коэрцитивного напряжения от времени, с целью применения ее для анализа кинетики процессов при поляризации в материалах, СЗЗ и СЗУ в

наносекундном диапазоне времени.

Во второй главе описаны конструктивные, технологические и схемотехнические ограничения; электрические модели конденсаторных СЗЭ; проанализированы методы численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений для математического моделирования электронных цепей, обоснованно и предложено использование метода Гира-Брайтона (ФДП- формула дифференцирования назад); предложен программный модуль машинного анализа кинетики процесса переключения поляризации в конденсаторном СЗЭ с использованием динамической проводимости и емкости для моделирования нелинейных процессов [1]; выполнены машинные расчеты и их анализ [2].

В третьей главе разработаны эквивалентные электрические схемы конденсаторных СЗЭ, накопителей СЗУ и получены выражения для параметров элементов электрических схем, учитывающие особенности их конструкций и технологии изготовления, предложены частные эквивалентные схемы, которые обеспечивают возможность сведения исследования процессов в СЗУ к одномерным линиям с распределенными параметрами, разработан алгоритм и программный модуль анализа процессов в конденсаторных СЗУ при записи и считывании информации.

В четвертой главе проведены машинные расчеты процессов в цепях управления и записи информации накопителей СЗУ, приведены зависимости величин задержки сигналов от емкостей накопителей и параметров элементов при различных проектно-технологических нормах; разработан алгоритм проектирования оптимальной структуры накопителей, обеспечивающий максимальное быстродействие при считывании информации. В приложениях приведены программы моделирования и расчеты процессов в СЗЭ и накопителях.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Параметры и характеристики вновь разрабатываемых сегнетоэлектрических запоминающих устройств определяются в основном свойствами запоминающей среды - сегнетоэлектрической пленки, обладающей управляемой остаточной поляризацией. Поэтому для проектирования СЗУ требуется исследование статичности и динамики процессов в сегнетоэлектрических пленках и структурах на их основе.

В общем случае остаточная поляризация P_r сегнетоэлектрического материала является нелинейной, неоднозначной функцией

температуры T , электрического поля E , времени воздействия поля t , механического напряжения σ . Задача управления остаточной поляризации сегнетоэлектрического материала в виде общей функции $P_r(E, T, t, \sigma)$ является весьма сложной и к настоящему времени в полном объеме не решена.

В работе выполнена серия экспериментальных исследований тестовых элементов на основе объемных сегнетоэлектрических материалов системы цирконата-титаната свинца, в частности горячепрессованной пьезокерамики ЦТС-19, на экспериментальном стенде с параметрами: длительность t импульсов поляризующего поля $1 \text{ мкс} - 100 \text{ с}$, выходное сопротивление формирователей импульсов поляризующего поля 10 Ом , амплитуда импульсов поляризующего поля до $\pm 400 \text{ В}$. При этом получено качественно новое выражение, описывающее статические характеристики остаточной поляризации сегнетоэлектрического материала

$$P_r(E) = P_r \operatorname{th}[(E - E_c) / \gamma_c E_c], \quad (1)$$

где P_r - предельная остаточная поляризация; E - внешнее поле; E_c - коэрцитивное поле характеристик поляризации; E_0 - коэрцитивное поле предельной статической характеристики поляризации (характеристики соответствующей длительностям импульсов поляризующего поля t стремящимися к бесконечности); γ_c - коэффициент наклона характеристики поляризации.

В работе подтверждена ранее полученная зависимость E_c от температуры T :

$$E_c(T) = E_0 (T_n (2T_c - T) / (T(2T_c - T_n))), \quad (2)$$

где T_n - нормальная температура $293 \text{ }^\circ\text{К}$; T_c - температура Кюри.

Подтверждена зависимость E_c от длительности импульсов поляризующего поля t :

$$E_c(t) = E_0(T) [1 + (\tau/t)^{1/n}], \quad (3)$$

где $E_0(T)$ - коэрцитивное поле предельной характеристики при t стремящемся к бесконечности; n - число; τ - постоянная времени поляризации сегнетоматериала, определяемая как $\tau = t$ при $E_c(t) = 2E_0(T)$.

Установлено, что коэффициент γ_c практически не зависит от длительности поляризующего поля t , когда обеспечивается чистота эксперимента, а именно, когда падение напряжения на выходном сопротивлении формирователя от тока переключения незначительно. На значения γ_c влияет температура T . С увеличением T , γ_c также увеличивается.

Таким образом, общее выражение, описывающее статические характеристики переключения сегнетоматериала с учетом выражений (1), (2) и (3), получено в виде

$$P_r(E, t, T) = P_n \operatorname{th} \{ [E - E_0(T) (1 + (\tau/t)^{1/n})] / [\gamma_c E_0(T)] \}. \quad (4)$$

Выражение (4) с вероятностью 0,95 адекватно отражает экспериментальные статические характеристики переключения исследуемых образцов сегнетоэлектрической керамики ЦТС-19 при значениях $\gamma_c = 0,063$; $E_0 = 0,88$ В/мкм; $\tau = 10^{-3}$ с; $n = 8$. В работе показано, что выражение (4) распространяется и на статические характеристики переключения остаточной поляризации тонких сегнетоэлектрических пленок. Поляризация образцов сегнетоэлектрических пленок системы ЦТС толщиной 1 мкм с платиновыми электродами исследовались импульсным методом Фрицберга в диапазоне амплитуд импульсов напряжения поляризации от -20 В до $+20$ В, их длительностей от 10^{-7} с до 10^{-4} с. Установлено, что экспериментальные характеристики переключения остаточной поляризации тонкопленочных образцов адекватно с вероятностью 0,92 описываются выражением

$$q(u, t) = q_0 \operatorname{th} \{ \alpha [u/U_0 - (1 + \tau/t)^{1/\alpha}] \}, \quad (5)$$

при значении $\alpha = 3$; коэрцитивном напряжении $U_0 = 3,1$ В предельной статической характеристике переключения и $\tau = 10^{-3}$ с.

На характеристики переключения реального СЗЭ наряду со свойствами материала существенное влияние оказывает его конструкция.

Проанализирована зависимость характеристик переключения реальных СЗЭ от их конструктивных и технологических особенностей. При этом обосновано использование эквивалентных линейных элементов (сопротивления R_c и емкости C_c) для представления параметров переходных слоев на границах раздела сегнетоэ-

лектрик- контактный электрод. Влияние неоднородности электрического поля в сегнетозлектрике на границах электродов элемента учитывается значением коэффициента α . Предложены эквивалентные схемы СЗЭ (рис.1), где C_0 и R_0 - линейная емкость и сопротивление элемента, обусловленные диэлектрической проницаемостью и проводимостью сегнетозлектрика для случая "слабых" полей; Z - нелинейное сопротивление, позволяющее отразить процесс переключения спонтанной поляризации $q(u, t)$; C_1, R_1 - параметры переходного привлекторного слоя; U_2 - приложенное к СЗЭ напряжение; R_2 - сопротивление цепи подачи напряжения U_2 .

Зависимость $q(u, t)$ в соответствии с выражением (5) отражает изменение во времени остаточного заряда сегнетозлектрической пленки в диапазоне от $-q_0$ до $+q_0$ при постоянном значении поляризующего поля u , или квазистатическую петлю гистерезиса в изменяющемся поле u при постоянной длительности поляризующего поля t и представляет собой нелинейную неоднозначную функцию переменных u и t , то есть систему с гистерезисом. Для решения такой системы предложено применять специальный метод моделирования с учетом предыстории состояния.

При всем многообразии форм математических моделей электронных цепей во временной области их неотъемлемой частью являются обыкновенные дифференциальные уравнения (ОДУ). Проведен анализ устойчивости известных методов численного интегрирования ОДУ для моделирования процессов в СЗЭ. Приведены интервалы устойчивости методов. Поскольку разрабатываемые алгоритмы анализа электрических процессов в конденсаторных СЗЭ должны ориентироваться на широкий спектр собственных значений матрицы Якоби системы ОДУ, что характерно для систем с гистерезисом, за основу должны быть приняты методы интегрирования со свойствами жесткой устойчивости. Показано, что среди таких методов наиболее предпочтителен метод Гира-Брейтона, или ФДН (формула дифференцирования назад) с автоматическим выбором шага и порядка. Кроме хорошей устойчивости, он обладает еще одним преимуществом: не требует выражения исходного уравнения в явном виде относительно производных.

Предложена математическая модель и разработаны алгоритм и программный модуль анализа кинетики процессов в конденсаторных СЗЭ. Для представления уравнений объекта моделирования выбран расширенный однородный координатный базис (РОКБ), как наиболее предпочтительный для формирования дискретизованных урав-

нений электрических схем с точки зрения размерности, разрешенности и обусловленности результирующей системы уравнений. Основной отличительной чертой предложенного подхода является отказ от формирования уравнений непрерывной модели схемы и работа с последовательностью ее дискретных аналогов, соответствующих фиксированным моментам времени. Дискретизация модели схемы выполняется на уровне компонентных уравнений и включает в себя обработку дифференциальных и нелинейных зависимостей в уравнениях с целью приведения их к линейному виду. В общем случае система уравнений схемы может быть представлена в виде $F(x', x, t) = 0$, где X - вектор неизвестных. Матричное уравнение дискретного аналога схемы с учетом индексов временных шагов n и итераций Ньютона m можно представить в виде

$$A(X_{n+1}^{(m)}) * X_{n+1}^{(m+1)} = B(X_{n+1}^{(m)}),$$

где $A = \frac{\partial F}{\partial X} + \frac{\alpha_0}{h} \frac{\partial F}{\partial X'}$, - матрица дискретной модели схемы;

$$B = \left[\frac{\partial F}{\partial X} + \frac{\alpha_0}{h} \frac{\partial F}{\partial X'} \right] X_{n+1}^{(m)} - F(X_{n+1}^{(m)}, X_{n+1}^{(m)}, t_{n+1})$$

, вектор правой части; α_0, h - коэффициент дискретизации и шаг интегрирования.

Для моделирования сегнетовэлектрического элемента памяти, представленного эквивалентной схемой на (рис.1), найдем ток через элемент Z как

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\partial q}{\partial u} \Big|_{t=const} * \frac{du}{dt} + \frac{\partial q}{\partial t} \Big|_{u=const} \quad (6)$$

Из выражения (6) видно, что элемент Z можно представить двумя компонентами: нелинейной емкостью $c = \partial q / \partial u$ и нелинейной проводимостью $G = 1/u = (\partial q / \partial t) * (1/u)$. Обозначив $W = \alpha(u/U_0 - (1 + \tau/t))^{1/\alpha}$, найдем

$$c = \frac{\alpha q_0}{U_0 ch^2 W}; \quad v = \frac{\alpha q_0 (\tau/t)^{1/\theta}}{8 u t ch^2 W}. \quad (7)$$

Полученные компонентные зависимости преобразуются в общую систему уравнений исследуемой схемы вида $Ax = v$, где x - вектор аргументов, A - матрица схемы, v - вектор правой части. Решение находим с помощью формулы численного интегрирования ФДН. Компонентное уравнение емкости $i_c = C du/dt$ может быть представлено в виде

$$i_c = C (\alpha_0 u + S) = \alpha_0 C u + C S,$$

где величина S учитывает ранее вычисленные значения. Введя обозначения $q_c = \alpha_0 C$, $\mathfrak{Z}_c = C S$, получим:

$$i_c = q_c u + \mathfrak{Z}_c, \quad (8)$$

где q_c - вклад емкости в матрицу схемы A ; \mathfrak{Z}_c - вклад в вектор правой части v . Компонентное уравнение проводимости имеет вид:

$$i_g = G u, \quad (9)$$

где G - вклад в матрицу схемы A .

Уравнения (7) - (9) учитываются в общей системе уравнений исследуемой схемы с помощью специальной подпрограммы вычисления функций аналоговых компонентов.

Особенностями разработанного алгоритма анализа процессов в конденсаторных СЗЭ являются: а) использование модели влеме- нта с запаздывающим аргументом; б) учет функций задержки при заполнении матрицы схемы A и правой части v исходной системы уравнений.

В результате моделирования получены временные зависимости переключаемого заряда $q(t)$, тока через СЗЭ $i(t)$, напряжения на СЗЭ $u(t)$. Расчетные кривые адекватны экспериментальным. Проведен анализ результатов машинного моделирования процессов переключения СЗЭ с учетом конструктивных и схемотехнических ограничений. Целью анализа является оценка влияния параметров эквивалентной схемы СЗЭ (рис.1) на процессы переключения по

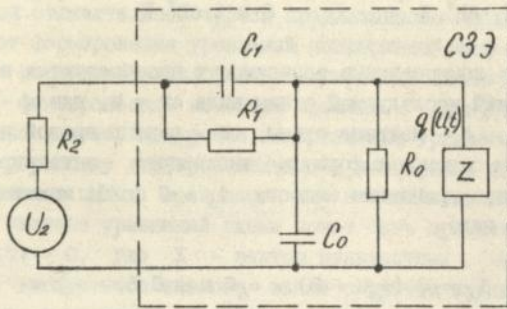


Рис. 1

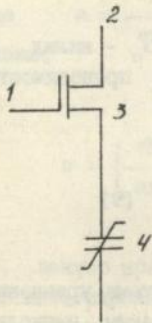


Рис. 2

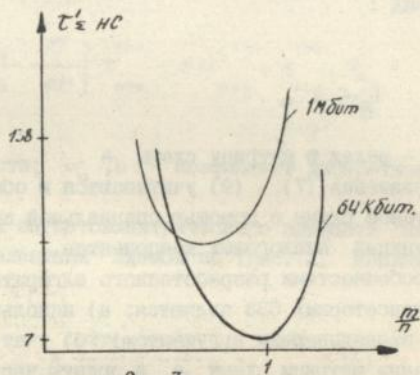


Рис. 3

критерия времени переключения t_{Π} при прочих известных внешних условиях, например, заданном значении переключающего поля U_2 и постоянной температуре. В диссертации приведены результаты расчетов параметров процесса переключения СЗЭ для различных значений параметров эквивалентной схемы, отражающих конструктивные, технологические и схемотехнические особенности реальных СЗЭ. По результатам расчетов можно сделать следующие выводы: 1) омическая проводимость сегнетоэлектрической пленки ухудшает быстродействие СЗЭ и для $t_{\Pi} < 0,1$ мкс необходимо $R_0 > 10^8$ Ом; 2) быстродействие резко ухудшается при увеличении внешнего напряжения U_2 до значений более $4U_0$; 3) увеличение емкости C_1 и сопротивления R_1 приэлектродного слоя снижает быстродействие СЗЭ; 4) требования к сопротивлению канала коммутации R_2 определяются при условии необходимого быстродействия из соотношения $R_0 C_0 \ll t_{\Pi}$. По полученным зависимостям параметров процесса переключения СЗЭ от напряжения записи, сопротивления коммутирующей цепи и конструктивных параметров запоминающей среды и приэлектродного слоя сформулированы требования к схемотехническим и конструктивным параметрам СЗУ.

Рассмотрены базовые структуры матричных накопителей конденсаторных сегнетоэлектрических ЗУ на основе СЗЭ, содержащего сегнетоэлектрический конденсатор и последовательно соединенный с ним МОП-транзистор (рис.2). Выделены две базовые структуры накопителей: структура, в которой истоки МОП-транзисторов СЗЭ соединены в шины перпендикулярные адресным шинам, объединяющим затворы МОП-транзисторов СЗЭ; структура, в которой истоки МОП-транзисторов соединены в шины параллельные адресным шинам.

На основе моделей СЗЭ разработаны эквивалентные электрические схемы накопителей СЗУ обеих базовых структур, содержащие также параметры статической модели МОП-транзисторов СЗЭ и параметры шин записи, считывания и адресных. В разработанных эквивалентных схемах не учтены распределенные и сосредоточенные индуктивности электродов и шин накопителя, распределенные проводимости слоев межэлектродной изоляции и некоторые другие несущественные элементы; используются упрощенные выражения для описания параметров элементов и конструкций через значение проектно-технологической нормы. Значения параметров эквивалентных схем ориентированы на максимальную плотность компоновки СЗЭ.

Проведен анализ эквивалентных схем базовых структур СЗУ

задающих источников, \mathbf{E}' - вектор производных напряжений задающих источников, $\mathbf{I}_p = \varphi(V)$ - обобщенно компонентное уравнение пассивных элементов.

Объединение в одну систему уравнений относительно векторов \mathbf{V} и \mathbf{I}_k является особенностью предлагаемого алгоритма моделирования, отличающей его от алгоритмов, известных ранее. Важным свойством предлагаемого способа построения математической модели для расчета явным методом является то, что матрица системы уравнений (10) структурно идентична матрице системы для неявного метода. Следовательно, для нахождения векторов \mathbf{V} и \mathbf{I}_k при решении можно использовать тот же набор кодирующих массивов и ту же беспойсковую процедуру решения, которые были сгенерированы на этапе формирования и упорядочения математической модели схемы для неявного метода. При этом может быть использована стратегия смены методов.

С помощью разработанных алгоритмов и программных моделей проведено исследование переходных процессов в адресных и разрядных цепях базовых структур накопителей СЗУ, емкостью 64 Кбит и 1 Мбит. Представляют интерес численные значения задержки распространения сигналов в шинах накопителей при достижении ими уровней 0,1; 0,5 и 0,9 от амплитудного значения. Значение задержек в адресных цепях находятся в диапазоне десятков наносекунд при числе ЗЭ до 10^3 на шину. Времена записи информации при числе ЗЭ в пределах $10^3 \dots 10^4$ на шину (то есть в накопителях емкостью 1...16 Мбит) находятся в пределах 0,1...1 мкс. Определяющее влияние на задержки оказывают значения сопротивлений шин накопителя и распределенных емкостей, так как собственные времена переключения СЗЭ составляют единицы-десятки наносекунд. Методом оптимизации Хука-Джилльда получены и приведены на (рис.3) номограммы значений задержек распространения сигналов в накопителях емкостью 64 Кбит и 1 Мбит в зависимости от организации накопителя (числа адресов m и числа разрядов n), которые позволяют принимать схемотехнические и технологические решения при проектировании СЗУ требуемого быстродействия и оптимальной организации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Исследованы статические характеристики поляризации полукристаллических толсто- и тонкопленочных сегнетоэлектрических

ких материалов системы цирконата титаната свинца. Получены систематические выражения, описывающие семейство статических характеристик поляризации сегнетоэлектрических пленок в зависимости от величины поляризующего поля, его длительности, температуры окружающей среды, приемлемые для исследования и анализа кинетики поляризации СЗЭ в наносекундном диапазоне времени.

2. Разработан метод, алгоритм и программа машинного моделирования и расчетов кинетики поляризации СЗЭ с учетом влияния его конструкции, параметров контактных электродов и электронных схем управления. Предложено в эквивалентной электрической схеме СЗЭ использовать динамическую емкость и динамическую проводимость для отражения нелинейного процесса изменения остаточной поляризации. Исследованы влияния параметров контактных электродов и схем управления на кинетику поляризации.

3. Проведен анализ структур накопителей СЗУ с разрушающим считыванием информации, определено два вида базовых структур с вертикальными и горизонтальными шинами записи.

4. Разработаны эквивалентные электрические схемы СЗЭ обеих структур, получены выражения параметров элементов этих схем, учитывающие топологию, конструкцию элементов и технологические ограничения через значения проектно-технологической нормы.

5. Разработаны эквивалентные схемы накопителей СЗУ, проведена их систематизация и построены частные эквивалентные схемы, позволившие свести исследования электрических процессов в двумерных накопителях к одномерным электрическим схемам с распределенными параметрами.

6. Разработан алгоритм явного метода интегрирования для исследования динамических процессов в активных схемах с распределенными RC-элементами, проведены численные расчеты и анализ накопителей обеих структур по быстродействию, в зависимости от емкости памяти и конструктивно-технологических ограничений.

7. Разработан алгоритм определения оптимальных структур накопителей (числа адресов и разрядов) с максимальным быстродействием при фиксированной емкости памяти. Проведены численные расчеты для накопителей емкостью 64Кбит и 1 Мбит.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах :

1. Ахмад Саджих, Мартынюк Я.В., Верба А.А., О модели про-

цесса реполяризации сегнетоэлектрических запоминающих элементов, - В кн.: Диэлектрики и полупроводники: сб. науч. тр., Киев, КГУ, 1993.

2. Ахмад Саджих, Верба А.А., Мартыник Я.В., Слюсар П.Б., Моделирование сегнетоэлектрических элементов памяти ALISA, - В кн.: Диэлектрики и полупроводники: сб. науч. тр., Киев, КГУ, 1993.

AB 26.833

AB 26.833