

ХЕРСОНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

МЕЛЕНТЬЕВ НИКОЛАЙ ГЕННАДИЕВИЧ

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ЛИНИЙ ЗАДЕРЖКИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯВЛЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ
ПОЛИКРЕМНИЕВЫХ РЕЗИСТОРОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТОКА

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников и
диэлектриков

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Запорожье - 1994



ДВ 30.006

Диссертацией является рукопись.

Работа выполнена в Особом конструкторском бюро "Элмис"
г. Запорожье) и Запорожском индустриальном институте

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент Ткаченко Н.Н.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Гусев В.А.
кандидат физико-математических наук,
доцент Головка А.Г.

Ведущая организация: Институт физики полупроводников
АН Украины

Защита состоится "___" _____ 1994г. на заседании
специализированного совета Д 19.01.02 при Херсонском индустриальном институте по адресу: 325008, г. Херсон, Бериславское шоссе, 24

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ХИИ

Автореферат разослан "___" _____ 1994г.

Ученый секретарь специализированного совета
доктор химических наук, профессор

Новиков А.А.

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

Актуальность темы. Схемы временной задержки в настоящее время становятся все более распространенными в цифровых устройствах и системах. Распределение синхросигналов, построение высокоскоростных шин, контрольно-измерительного оборудования и интерфейсов для работы со средствами передачи данных или носителями памяти – вот далеко не полный перечень применения схем временной задержки. При выборе конкретного подхода к реализации цифровых систем и, учитывая соотношение "цена-характеристики", во многих случаях специальные требования удастся удовлетворить путем использования стандартных ИС линий задержки (ЛЗ).

Следует отметить, что до недавнего времени данный класс изделий электронной техники был представлен только гибридными ИС, что определялось в первую очередь высокими требованиями к точности динамических параметров ЛЗ, а также использованием традиционных конструкций для данных ИС на основе LC-фильтров, что невозможно обеспечить технологией твердотельных ИС, по крайней мере без значительных материальных затрат. Развитие технологии лазерной функциональной подгонки элементов и узлов изделий электронной техники позволило создать новый класс прецизионных цифровых ИС – твердотельные ЛЗ, однако существенно не снизило материальных затрат на их изготовление. Следовательно, задача создания твердотельных ИС линий задержки на базе стандартных технологий ИС продолжает оставаться актуальной. Это нашло отражение в формировании государственных программ создания элементной базы для перспективных изделий вычислительной техники, согласно приказа МЭП N 409 от 10.07.90г.

К технологическим аспектам, связанным с реализацией вышеупомянутой программы и, в частности, разработкой твердотельных ИС линий задержки, относится формирование поликремниевых элементов ИС. Использование при этом явления изменения сопротивления поликремниевых резисторов (ПР) под действием тока позволяет решить задачу создания твердотельных ИС линий задержки с параметрами мирового уровня и выше без значительных материальных затрат на изготовление.

В то же время явление прецизионного изменения сопротивления ПР под действием тока в широком диапазоне концентраций легирующей примеси практически не исследовано, а токовые флуктуации в таких регулируемых током резисторах, отражающие и особенности физических процессов, приводящих к изменению сопротивления и являющиеся важным эксплуатационным параметром, до сих пор не изучались. Поэтому исследование явления изменения сопротивления ПР под действием тока также является актуальным и с научной и с практической точек зрения.

Целью работы является улучшение основных параметров и характеристик твердотельных ИС линий задержки, повышение степени интеграции, расширение функциональных возможностей ИС, снижение материальных затрат на их изготовление путем использования при разработке и изготовлении твердотельных ИС линий задержки и их элементов явления изменения сопротивления ПР под действием тока и новых схемотехнических подходов.

Для достижения указанной цели в свою очередь необходимо было решить следующие задачи :

1. Разработать концепцию схемотехнического подхода к проектированию ЛЗ и на ее базе детализировать варианты их конструкций.

2. Исследовать явление изменения сопротивления и ТКС пленок поликристаллического кремния под действием тока и установить особенности его протекания в резисторах на основе таких пленок в широком диапазоне концентраций легирующей примеси.

3. Исследовать токовые флуктуации в резисторах на основе пленок поликристаллического кремния, изучить особенности их проявления в широком диапазоне концентраций легирующей примеси.

4. Разработать и исследовать базовый элемент твердотельной ЛЗ на основе явления изменения сопротивления ПР под действием тока.

5. Осуществить метрологическое обеспечение твердотельных ИС линий задержки и разработать метод измерения временных задержек наносекундного диапазона.

Научная новизна работы.

1. Предложены новые схемотехнические подходы при проектировании ЛЗ, в основе которых лежит использование заряда двух

раздельных времязадающих цепей, что позволяет повысить точность ЛЗ, уменьшить минимальную длительность входного импульса, увеличить рабочую частоту, а также повысить степень интеграции ИС и расширить их функциональные возможности.

2. Экспериментально обнаружено явление прецизионного уменьшения сопротивления ПР под действием тока для концентраций легирующей примеси порядка $10^{17} \text{ см}^{-3} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Предложена модель изменения сопротивления, состоящая в том, что для низких концентраций легирующей примеси (меньше 10^{19} см^{-3}) происходит изменение заселенности ловушек на границах зерен (ГЗ) носителями заряда, изменение их электрического состояния и электростимулированная диффузия ловушек из области ГЗ, что приводит к снижению потенциального барьера на ГЗ и к уменьшению сопротивления. Для высоких концентраций легирующей примеси (больше 10^{19} см^{-3}) электростимулированная диффузия примеси на ГЗ приводит к уменьшению рассеяния на дефектах ГЗ и к уменьшению сопротивления. Установлено, что при уменьшении сопротивления ТКС резисторов увеличивается и переходит из области отрицательных значений через ноль в область положительных значений.

3. Впервые обнаружено увеличение сопротивления ПР под действием тока для концентраций легирующей примеси порядка 10^{19} см^{-3} , установлено, что с ростом сопротивления происходит уменьшение отрицательного ТКС поликремниевых резисторов.

4. Впервые исследованы низкочастотные токовые флуктуации в ПР в широком диапазоне концентраций легирующей примеси ($10^{17} \text{ см}^{-3} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$), установлена природа возникновения шума и доказано, что для низких концентраций легирующей примеси шум связан с термоэмиссионными и туннельными процессами переноса через ГЗ, а для высоких концентраций - шум связан с рассеянием на дефектах ГЗ. Установлено, что с ростом концентрации легирующей примеси до 10^{19} см^{-3} уменьшение шума ПР происходит резче, чем по модели термоэмиссии.

Практическая ценность работы.

1. На основе предложенных схемотехнических подходов при проектировании ЛЗ разработана и освоена серия бескорпусных ИС КБ1563 для гибридных активных ЛЗ, обеспечивающая времена задержки от 5нс до 1000нс с точностью $\pm 0,3\text{нс}$ или $\pm 0,5\%$.

2. Разработаны и освоены гибридные активные ЛЗ У2БР1971, У2БР2081, У2БР2083 (в настоящее время ряд расширяется).

3. Предложены конструкции ИС линий задержки с n-выходами и одним (двумя) времязадающими элементами, что позволяет повысить точность ЛЗ, надежность, увеличить степень интеграции.

4. Разработана структурная схема и схемотехническая реализация генератора временных диаграмм на основе использования двух отдельных времязадающих цепей, что позволяет расширить диапазон задержки.

5. Экспериментально исследовано изменение ТКС поликремниевых резисторов под действием тока, позволяющее регулировать его величину при изготовлении дискретных резисторов и пассивных элементов ИС.

6. Разработана и освоена серия твердотельных ИС линий задержки КР1563 на основе явления изменения сопротивления ПР под действием тока, обеспечивающая реализацию твердотельных ЛЗ по стандартной технологии ИС с минимальными затратами на изготовление.

7. Разработана методика и программное обеспечение регулировки и измерения динамических параметров ИС, что позволяет регулировать параметры ИС после их изготовления.

8. Предложен прецизионный метод измерения временных задержек наносекундного диапазона, обеспечивающий точность измерений $\pm 0,2$ нс при контроле динамических параметров ИС на пластине.

Разработки защищены 11 авторскими свидетельствами на изобретение.

Достоверность полученных результатов физических экспериментов и основных выводов подтверждается соблюдением необходимых требований к метрологическому обеспечению опытов и обработке их результатов, согласованностью между развитыми модельными представлениями и полученными экспериментальными результатами.

Реализация результатов работы. Основные результаты работы внедрены на трех предприятиях промышленных министерств. Серия бескорпусных ИС КБ1563 для гибридных активных ЛЗ освоена Производственным объединением "Гамма" г.Запорожье. Серия твердотельных ИС линий задержки КР1563 освоена Особым конструктор-

ским бюро "Элмис" г.Запорожье. Гибридные активные ЛЗ У2БР2081, У2БР2083, У2БР1971 (в настоящее время ряд расширяется) серийно изготавливаются НПО "Электронприбор" г.Дроздякль.

На защиту выносятся :

1. Предложенная концепция схемотехнического проектирования ЛЗ на основе заряда двух отдельных времязадающих цепей и разработанные на ее базе конструкции ИС линий задержки.

2. Разработанная конструкция и принцип действия базового элемента твердотельной ЛЗ на основе явления изменения сопротивления ПР под действием тока.

3. Результаты исследования явления уменьшения сопротивления и ТКС поликремниевых резисторов под действием тока в диапазоне концентраций легирующей примеси 10^{17} см^{-3} - 10^{20} см^{-3} и физические модели уменьшения сопротивления.

4. Результаты впервые обнаруженного явления увеличения сопротивления ПР под действием тока для концентрации легирующей примеси порядка 10^{19} см^{-3} и его взаимосвязь с изменением ТКС.

5. Результаты исследования шума ПР в диапазоне концентраций легирующей примеси 10^{17} см^{-3} - 10^{20} см^{-3} и природы его возникновения.

6. Методика и программное обеспечение регулировки и измерения динамических параметров ИС после их изготовления и прецизионный способ измерения временных задержек наносекундного диапазона при контроле динамических параметров ИС на пластине.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на XIV Всесоюзной научной сессии, посвященной Дню радио (г.Москва, 1990г.); на Всесоюзном научно-техническом семинаре "Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах" (г.Черноголовка, 1990г.); на Международной конференции "Микроэлектроника 92" (г.Варшава, 1992г.); на научно-техническом семинаре "Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах" (г.Москва, 1993г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликована 21 печатная работа, из которых 11 авторских свидетельств на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложений и содержит 137 страниц основного текста, 50 рисунков, 8 таблиц,

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель работы, научная новизна, практическая ценность и основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор работ, характеризующих достигнутый уровень в области разработки и исследований ИС линий задержки, рассмотрены их основные схемотехнические и технологические особенности, а также приведены данные об известных сериях этого класса изделий электронной техники. Показано, что традиционные конструкции стандартных ЛЗ представляют собой гибридные ИС, содержащие LC- или RC-фильтры нижних частот и входные и выходные буферы определенного типа логики. Отмечено, что недостатком известных конструкций является использование одной времязадающей (LC- или RC-) цепи для задержки фронта и среза сигнала. Это приводит к тому, что минимальная длительность входного импульса должна быть, как минимум, вдвое больше величины задержки, т.к. в противном случае форма задержанного импульса будет искажаться за счет неодинаковой задержки фронта и среза. Использование одной времязадающей цепи также затрудняет получение одинаковой задержки фронта и среза, т.к. в этом случае необходимо добиться одинакового времени заряда и разряда времязадающей цепи, что усложняет конструирование ЛЗ, снижает ее точность и увеличивает материальные затраты на изготовление.

Новым шагом в развитии данного класса изделий электронной техники стало создание фирмой Dallas Semiconductor Corp. (США) серий твердотельных ИС линий задержки на основе метода дискретной лазерной подгонки, при котором коммутация необходимых времязадающих цепей для получения требуемой задержки осуществляется путем перерезания лазером поликремниевых перемычек. Таким образом, для серий твердотельных ИС линий задержки DS1000, DS1010, DS1013 достигнуто повышение надежности и снижение материальных затрат на изготовление по сравнению с гибридными аналогами при сохранении основных электрических пара-

метров. Однако относительно твердотельных ИС вообще цена изделий фирмы Dallas Semiconductor Corp. остается достаточно высокой, что связано с дорогостоящей лазерной технологией. Не устранены также и параметрические недостатки, связанные с ограничением минимальной длительности входного импульса, рабочей частоты и сложности регулировки из-за использования заряда-разряда одной времязадающей цепи. Кроме того, в известной технологии отсутствует возможность изготовления переменных ЛЗ, в которых предусматривается элемент регулировки задержки потребителем.

Анализ имеющихся данных позволяет заключить, что к настоящему времени накоплен значительный теоретический и практический опыт в области проектирования и изготовления ИС линий задержки и их элементов и, в частности, твердотельных ЛЗ. Однако известные конструкции имеют параметрические недостатки и ограниченные функциональные возможности. Что касается известных технологий, то, хотя они и обеспечивают высокую точность параметров ИС линий задержки, но достигается это ценой значительных материальных затрат.

Отмеченные обстоятельства определили цель диссертационной работы и направленность проводимых исследований и разработок.

Во второй главе представлена концепция схмотехнического проектирования ЛЗ и конструкции ИС линий задержки на ее базе, рассмотрены конструкция и принцип действия элемента задержки твердотельной ИС линии задержки на основе явления изменения сопротивления ПР под действием тока, описан технологический процесс изготовления ИС.

В основе предлагаемого в настоящей работе схмотехнического подхода, используемого при проектировании ИС линий задержки, лежит применение двух отдельных времязадающих цепей для задержки фронта и среза, которые представляют собой одинаковые цепи заряда. Базовая структурная схема звена ЛЗ содержит логический элемент двойного инвертирования, два одинаковых регулируемых элемента задержки фронта и логические элементы функционального назначения. Входной сигнал с выходов элемента двойного инвертирования поступает на элементы задержки, один из которых осуществляет задержку фронта входного сигнала, а другой - задержку среза, после чего сигналы складываются, и

на выходе ЛЗ появляется задержанный сигнал, в точности сохраняющий форму входного. Регулируя время задержки элементов осуществляют регулировку ЛЗ на требуемую величину задержки с требуемой точностью. Установлено, что в интегральном исполнении две одинаковые цепи заряда (дна элемента задержки), осуществляющие задержку фронта и среза, легче выполнить с меньшим технологическим разбросом, чем одну цепь заряда-разряда, как в известных схемах. Кроме того, в модифицированном варианте базовой схемы предусматривается раздельная регулировка фронта и среза. Поэтому базовая структурная схема ЛЗ обеспечивает более высокую точность в получении одинаковой задержки фронта и среза (минимального отклонения длительности выходного импульса). Поскольку разряд времязадающих цепей не формирует задержку сигнала, то осуществляя его за минимальное время, можно уменьшить длительность входного импульса, и в предлагаемой схеме она равна величине задержки, что в два раза лучше аналогичного параметра известных схем.

На основе базовой структурной схемы ЛЗ и ее варианта для n -выходов задержки разработаны и серийно выпускаются бескорпусные ИС КБ1563 для гибридных активных ЛЗ. В общем случае при изготовлении гибридной ЛЗ к бескорпусной ИС на отвод (выход) задержки необходимо подключить два внешних времязадающих конденсатора, один из которых определяет задержку фронта, а другой - задержку среза, и внешний резистор, подгонкой сопротивления которого обеспечивают точность задержки при регулировке гибридной ИС. Точность задержки гибридной ЛЗ на основе бескорпусной ИС КБ1563БР2-4 составляет $\pm 0,3\%$ или $\pm 0,5\%$ (для известных зарубежных серий ЛЗ DL14 ф.Карра Networks, Inc. (США), 0447: ф. Bel Fuse, Inc. (США) и др. точность равна $\pm 2\%$ или $\pm 5\%$), а минимальная длительность входного импульса - 20% от общей задержки (для известных зарубежных серий - 40%). На основе бескорпусных ИС серии КБ1563 серийно выпускаются гибридные ЛЗ У2БР2081, У2БР2083, У2БР1971 (в настоящее время ряд расширяется).

Дальнейшее развитие базовая структурная схема ЛЗ находит в конструкции ЛЗ, где реализован принцип использования двух раздельных цепей заряда одного времязадающего элемента для задержки фронта и среза, что обеспечивает повышение точности за-

держки ЛЗ. Кроме того, для случая гибридной ИС линии задержки в результате уменьшения количества навесных времязадающих элементов обеспечивается повышение надежности, а для случая твердотельной ИС — повышение степени интеграции (т.к. времязадающие элементы занимают основную площадь на кристалле). В свою очередь эта конструкция ЛЗ становится базовой при разработке ИС линий задержки с п-выходами, содержащей два или один времязадающих элемента вместо п-времязадающих элементов, как в известных схемах. В разработанных ЛЗ времязадающий элемент (два элемента) в соответствующие моменты времени коммутируются с нужным звеном задержки, формируя задержку фронта или среза на данном выходе.

С целью расширения диапазона задержки на основе схемотехнического подхода с применением двух отдельных времязадающих цепей для задержки фронта и среза предложена реализация генератора временных диаграмм, у которого задержка больше длительности входного сигнала, а выходной импульс повторяет входной.

Разработанные и исследованные в работе твердотельные ИС линий задержки проектировались на основе представленной схемотехнической концепции, а изготавливались по стандартной технологии твердотельных ИС с поликремниевыми элементами и, таким образом, не требуют значительных материальных затрат при изготовлении, как в случае лазерной технологии для изделий фирмы Dallas Semiconductor, Corp. С целью обеспечения точности задержки использовано явление изменения сопротивления ПР под действием тока.

Базовый элемент задержки разработанных твердотельных ИС линий задержки содержит компаратор, RC-цепь, подключенную к его инвертирующему входу, а напряжение на неинвертирующем входе компаратора определяется перестраиваемым ПР, подключенным между общей шиной и специальной клеммой, предназначенной для регулировки ЛЗ. Время задержки базового элемента твердотельной ИС определяется временем заряда конденсатора RC-цепи до уровня напряжения на неинвертирующем входе компаратора. В режиме регулировки задержки к клемме регулировки подключается импульсный источник тока, с помощью которого через перестраиваемый ПР, легированный с концентрацией примеси порядка 10^{17} см^{-3} — 10^{20} см^{-3} ,

пропускают ток плотностью $10^5 - 10^6 \text{ А/см}^2$. Установлено, что при этом происходит плавное уменьшение сопротивления ПР вплоть до 50% от первоначальной величины (для концентраций примеси порядка $10^{17} \text{ см}^{-3} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и 10^{20} см^{-3}) с точностью $\pm 0,01\%$, что приводит к уменьшению в рабочем режиме ЛЗ напряжения на неинвертирующем входе компаратора и, соответственно, времени задержки с требуемой высокой точностью. Для концентрации примеси порядка 10^{19} см^{-3} обнаружено увеличение сопротивления ПР до 50% и более. Ток, протекающий через ПР в рабочем режиме ЛЗ, на порядок меньше тока регулировки и не влияет на сопротивление и задержку.

Установлено, что изменение сопротивления ПР с концентрацией легирующей примеси порядка $10^{17} \text{ см}^{-3} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$ под действием тока носит обратимый характер, поэтому при выполнении очередной регулировки ЛЗ возможно как уменьшение, так и увеличение времени задержки. Следовательно, в отличие от твердотельных ИС известных серий фирмы Dallas Semiconductor, Corp. становится возможной реализация твердотельной переменной ЛЗ, которая характеризуется повышенной надежностью и меньшими габаритами, т.к. известные переменные ЛЗ изготавливаются с использованием подвижного механического контакта.

С целью расширения диапазона задержки ЛЗ кроме тонкой регулировки на основе прецизионного изменения сопротивления ПР, компенсирующей отклонения технологического процесса, применена грубая регулировка. Для этого через часть ПР определенной топологии пропускают ток с плотностью, приводящей к закорачиванию этой части ПР мигрирующими из контакта атомами металла, в результате чего ее сопротивление резко уменьшается до единиц ом. В элементе задержки твердотельных ИС линии задержки серии КР1563 перестраиваемый ПР изготовлен состоящим из двух секций, что обеспечивает выполнение тонкой и грубой регулировки ЛЗ.

Твердотельная ИС линии задержки изготовлена по технологии боковой разделительной изоляции оксидом кремния и с применением двух слоев поликремния (для формирования ПР и самосовмещенных поликремниевых контактов). Стандартный технологический процесс серии логических ТТЛШ ИС КР1563 дополнен, таким образом, этапом формирования ПР, включающим в себя нанесение поликремния толщиной $0,27 - 0,3 \text{ мкм}$ методом газифазного химичес-

кого осаждения при пониженном давлении, ионно легирование бором с энергией 60 кэВ дозой 450 мкКл/см^2 , разгонку примеси для получения поверхностного сопротивления $150 \pm 30 \text{ ом/кв.см}$ и фотолитографию. Временязадерживающий МДП-конденсатор RC-цепи выполнен на основе полупроводниковой базовой области p-типа и алюминиевой металлизации с межслойным диэлектриком, состоящим из слоя оксида кремния толщиной $0,05 \pm 0,01 \text{ мкм}$ и слоя нитрида кремния толщиной $0,16 \pm 0,02 \text{ мкм}$ с удельной емкостью $200 \pm 25 \text{ пФ/мм}^2$.

Базовый элемент задержки твердотельной ИС имеет дополнительную клемму регулировки для настройки ЛЗ, которая представляет собой дополнительную контактную площадку, и регулировка ИС линии задержки осуществляется на пластине после изготовления кристаллов непосредственно перед сборкой в корпуса. С целью обеспечения регулировки ИС линии задержки потребителем предложена схема элемента задержки, содержащая цепь регулировки, подключенную к выходу ИС и управляемую стабилизатором, что позволяет регулировать задержку через выход устройства.

В третьей главе приведены результаты исследования явления изменения сопротивления и температурного коэффициента сопротивления ПР под действием тока в диапазоне концентраций легирующей примеси от 10^{17} см^{-3} до 10^{20} см^{-3} , результаты исследования низкочастотного шума ПР, описано впервые обнаруженное явление увеличения сопротивления для концентраций порядка 10^{19} см^{-3} и качественно разработаны физические модели и механизмы изменения сопротивления ПР.

В качестве образцов для экспериментальных исследований использованы ПР, изготовленные на основе пленок поликристаллического кремния толщиной $0,3 \text{ мкм}$ и шириной от 3 мкм до 8 мкм , осажденных в реакторе пониженного давления при температуре 670 С и ионнолегированных бором с концентрацией от $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ до $2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Установлено, что для концентраций порядка 10^{20} см^{-3} при воздействии на ПР током плотностью порядка 10^6 А/см^2 происходит уменьшение сопротивления до 50% и более, а при изменении наклона ВАХ - выход на участок с обС и переход в состояние с низким сопротивлением ("закорочено") или высоким сопротивлением ("оборвано") в зависимости от топологии резистора. Для концентраций порядка 10^{19} см^{-3} при применении тока плотностью

порядка 10^{15} A/cm^2 вначале наблюдается уменьшение сопротивления на 10% - 20%, а затем с увеличением тока имеет место возрастание сопротивления ПР до 20% - 50% от первоначальной величины. ВАХ в этом случае до области с ОДС имеет два характерных участка с изменением наклона, соответствующие уменьшению и увеличению сопротивления. Для концентраций порядка 10^{17} см^{-3} - 10^{18} см^{-3} наблюдается уменьшение сопротивления ПР до 40%, а при изменении наклона ВАХ - переход на участок с ОДС и далее в состояние "закорочено" или "оборвано".

Установлено, что уменьшение сопротивления ПР с точностью изменения $\pm 0,01\%$ происходит при воздействии постоянным и импульсным током с длительностью импульсов вплоть до микросекунд. Выбор легирующей примеси из бора, мышьяка, фосфора и способа легирования из ионной имплантации и термической диффузии практически не влияет на протекание явления. Измерение эффекта Холла демонстрирует, что изменение сопротивления ПР не связано с изменением концентрации свободных носителей. Обнаружено, что уменьшение сопротивления ПР сопровождается увеличением ТКС резисторов, причем исходный отрицательный ТКС может переходить через ноль в область положительных значений. При изменении сопротивления ПР для концентрации легирующей примеси порядка 10^{19} см^{-3} ТКС резисторов увеличивается с уменьшением сопротивления и уменьшается с его увеличением. Таким образом, экспериментальными исследованиями изменения ТКС поликремниевых резисторов показана возможность выбора области температурной стабильности при проектировании ИС и регулировки величины ТКС при изготовлении дискретных резисторов и пассивных элементов микросхем. В работе обнаружено, что первоначально уменьшенное сопротивление может быть восстановлено, в частности, в результате изменения полярности источника тока, т.е. установлен обратимый характер уменьшения сопротивления.

Следовательно, на основании полученных в работе экспериментальных результатов доказано, что явление уменьшения сопротивления ПР под действием тока имеет значительно более широкий диапазон проявления по концентрации, чем это считалось ранее. Впервые обнаружено явление увеличения сопротивления ПР для концентрации порядка 10^{19} см^{-3} и установлена его связь с изменением ТКС. Показана возможность использования явления изме-

нения сопротивления ПР под действием тока для корректировки параметров уже изготовленных ИС, а также для конструирования выгодных в стоимостном отношении регулировочных элементов для таких прецизионных твердотельных ИС, как появившиеся в последнее время ЛЗ.

На основании температурной зависимости сопротивления ПР для концентрации легирующей примеси порядка 10^{18} см^{-3} от обратной температуры показано, что энергия активации уменьшается при уменьшении сопротивления под действием тока и увеличивается при восстановлении сопротивления. Известны теоретические работы по электропроводности ГЗ, учитывающие изменение заполнения ловушек на ГЗ носителями заряда и, соответственно, изменение потенциального барьера на ГЗ от внешнего напряжения. В полученных экспериментальных результатах по изменению сопротивления ПР подтверждена идея изменения потенциального барьера на ГЗ вследствие изменения заполнения ловушек при приложении внешнего напряжения. Предложена модель изменения сопротивления ПР для низких концентраций легирующей примеси под действием тока, учитывающая изменение заселенности ловушек на ГЗ носителями заряда, изменение их электрического состояния и электростимулированную диффузию ловушек из области ГЗ, приводящую к изменению потенциального барьера на ГЗ.

Отмечено, что уменьшение величины шума ПР после токового воздействия подтверждает модель уменьшения сопротивления ПР для этого случая концентраций вследствие уменьшения потенциального барьера на ГЗ, что отслеживается изменением шума.

Для разработки модели изменения сопротивления ПР под действием тока для высоких концентраций легирующей примеси, где потенциальный барьер на ГЗ составляет величину порядка 0,01 эВ и не влияет на сопротивление, исследованы температурные зависимости шумовых характеристик и сопротивления ПР до и после воздействия током на ПР. Показано, что для концентрации легирующей примеси порядка 10^{20} см^{-3} существует принципиально другой характер изменения шума и его температурной зависимости по сравнению со случаем низких концентраций: с уменьшением сопротивления после воздействия током шум растет, а его температурная зависимость с ростом температуры уменьшается. На основании сопоставления теоретической температурной зависимости под-

вижности, представляющей собой суперпозицию различных процессов рассеяния, и экспериментальной температурной зависимости сопротивления ПР показано, что температурная зависимость подвижности до воздействия током на ПР определяется рассеянием носителей в поле упругих напряжений дислокаций. После воздействия током на ПР и изменения характера температурной зависимости сопротивления ПР (увеличение сопротивления с ростом температуры) в температурной зависимости подвижности определяющим становится рассеяние на тепловых колебаниях решетки. Предложена модель уменьшения сопротивления ПР под действием тока для случая высоких концентраций легирующей примеси, учитывающая уменьшение рассеяния носителей на дефектах ГЗ после воздействия током на ПР. Согласно этой модели электростимулированная диффузия ионизированной примеси и (или) оборванных связей дислокаций на ГЗ ослабляет поле упругих напряжений дислокаций после электрического воздействия на ПР, что приводит к росту подвижности и уменьшению сопротивления.

На основании экспериментально полученных концентрационных и температурных зависимостей низкочастотного шума ПР установлено, что уменьшение шума с ростом концентрации вплоть до 10^{19} см^{-3} происходит резче, чем по известной модели термоэмиссии, для низких концентраций шум связан с термоэмиссионными и туннельными процессами переноса через ГЗ, для высоких концентраций — с рассеянием носителей на дефектах ГЗ.

В четвертой главе изложены результаты реализации твердотельных ИС линий задержки серии КР1563 на основе явления изменения сопротивления ПР под действием тока, рассмотрены программные средства измерения и регулировки динамических параметров ИС линий задержки и метод измерения временных задержек наносекундного диапазона, проведено сравнение параметров ИС серии КР1563 с аналогами мирового уровня.

На основе представленных в настоящей работе схематехнических, технологических и физических принципов в особом конструкторском бюро "Элмис" разработаны и серийно освоены твердотельные ИС линий задержки КР1563, главным конструктором которых был автор настоящей диссертации. ИС серии КР1563 представляют собой микросхемы усовершенствованной ТТЛШ-логики, по входным и выходным сигналам соответствуют серии логических ИС КР1531

(аналог зарубежной серии "FAST") и обеспечивающей задержку на 100–150 нс с отводами задержки через 20–30 нс.

Измерение динамических параметров ИС серии КР1563 и их регулировка для компенсации наклонов параметров технологического процесса и обеспечения точности задержки осуществляется на пластине непосредственно перед сборкой кристаллов в корпуса. Программа реализована на контрольно-измерительном комплексе "ИЗМИР", написана на языке "СОФТЭМ" и рассчитана на ручной режим измерений и регулировки (работа оператора) и автоматический режим. Для ИС КР1563БРЗБ точность задержки при регулировке в ручном режиме не хуже $+2\%$. При автоматической регулировке точность задержки не хуже $+5\%$ или $+2$ нс, что соответствует точности задержки для серии DS1000 и большинства выпускаемых зарубежных серий гибридных ИС линий задержки. Для повышения точности измерений в программе реализован специальный программно-аппаратный метод измерений задержек, позволяющий обеспечить точность $\pm 0,2$ нс.

В сравнении с серией DS1000 разработанные твердотельные ИС линий задержки серии КР1563 имеют более высокую нагрузочную способность в статическом режиме, а по динамическим параметрам имеют в 2 раза меньшую минимальную длительность входного импульса, в 4 раза большую рабочую частоту и меньшую зависимость задержки от температуры для плюсового диапазона.

Таким образом, твердотельные ИС линий задержки серии КР1563 по своим параметрам находятся на уровне лучших мировых изделий микровлектроники данного класса, а их изготовление требует меньших материальных затрат.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Предложена концепция схемотехнического проектирования ЛЗ на основе заряда двух раздельных времязадающих цепей, позволяющая повысить точность задержки ЛЗ, уменьшить минимальную длительность входного импульса и увеличить рабочую частоту. Разработанные и серийно изготавливаемые в соответствии с предложенной концепцией конструкции ИС линий задержки имеют расширенные функциональные возможности, обеспечивающие высокую степень интеграции, улучшенные параметры и характеризуются минимальными затратами на изготовление.

2. Предложено использование явления изменения сопротивления ПР под действием тока для конструирования регулируемого элемента задержки твердотельной ИС линии задержки и проектирования переменной твердотельной ЛЗ. Промышленно освоена серия твердотельных ИС линий задержки КР1563.
3. Установлено, что явление прецизионного изменения сопротивления ПР под действием тока имеет более широкий диапазон проявления, чем это считалось ранее, и обнаруживается в диапазоне концентраций легирующей примеси порядка 10^{17} см^{-3} - 10^{20} см^{-3} . При уменьшении сопротивления ТКС резисторов увеличивается и переходит из области отрицательных значений через ноль в область положительных значений.
4. Предложена физическая модель изменения сопротивления ПР под действием тока, учитывающая для низких концентраций легирующей примеси изменение заселенности ловушек в области потенциального барьера на ГЗ носителями заряда, изменение их электрического состояния и электростимулированную диффузию заряженных ловушек из области ГЗ, что приводит к уменьшению потенциального барьера на ГЗ и уменьшению сопротивления ПР. Для высоких концентраций легирующей примеси электростимулированная диффузия примеси в области механического разупорядочения на ГЗ приводит к уменьшению рассеяния на дефектах в области ГЗ и уменьшению сопротивления ПР.
5. Установлено, что для концентрации легирующей примеси порядка 10^{19} см^{-3} происходит увеличение сопротивления ПР под действием тока, сопровождающееся уменьшением ТКС резисторов.
6. Установлено, что низкочастотный шум ПР уменьшается с ростом концентрации легирующей примеси. Для низких концентраций шум ПР связан с термоэмиссионными и туннельными процессами переноса через ГЗ, для высоких концентраций - с рассеянием на дефектах ГЗ.

Основные результаты диссертации изложены в двух научно-технических отчетах и следующих публикациях:

1. Мелентьев Н.Г. Новые подходы в конструировании и технологии изготовления интегральных схем линий задержки // Электронная техника. Сер.3. Микроволновая электроника. - Вып.4(143). - 1991. - С.47-50.

2. Мелентьев Н.Г., Остренко Д.В. Способ регулирования температурного коэффициента сопротивления поликремниевых резисторов// Электронная техника. Сер. Радиодетали и радиокомпоненты.-1990.-Вып.4(81).-С.39-40.
3. А.с. СССР кл. НОЗК 5/13 N 1707746. Перестраиваемая линия задержки/ Гаращенко Н.П., Мелентьев Н.Г., Муры́й Ю.Ф. - 23.01.1992.
4. Положительное решение по заявке N 5033518/21 от 23.03.92. Перестраиваемая линия задержки/Мелентьев Н.Г.
5. Мелентьев Н.Г. Бескорпусная интегральная схема для гибридной линии задержки//Электронная промышленность.-1989.-N8.-С.68.
6. Мелентьев Н.Г.Бескорпусные интегральные схемы КБ1563БР1А-4 и КБ1563БР1Б-4 для гибридных активных линий задержки//Электронная промышленность.-1991.-N4.-С.89-90.
7. А.с. СССР кл. НОЗК 5/13 N 1793535. Устройство задержки/Мелентьев Н.Г.-07.02.1993.
8. А.с. СССР кл. НОЗК 5/13 N 1757091. Линия задержки/Мелентьев Н.Г., Казаринов О.Г.-23.08.1992.
9. А.с. СССР кл. НОЗК 5/13 N 1750039. Линия задержки/Мелентьев Н.Г., Казаринов О.Г.-23.07.1992.
10. А.с. СССР кл. НОЗК 5/13 N 1750038. Генератор задержанных импульсов/Мелентьев Н.Г.-23.07.1992.
11. А.с. СССР кл. НОЗК 5/13 N 1750037. Генератор задержанных импульсов/Мелентьев Н.Г.-23.07.1992.
12. А.с. СССР кл. НОЗК 5/13 N 1751839. Линия задержки/ Мелентьев Н.Г., Гаращенко Н.П.-30.07.1992.
13. Положительное решение по заявке N 4858563/22 от 8.08.90. Линия задержки с регулируемыми параметрами/Мелентьев Н.Г., Остренко Д.В., Ткаченко Н.Н., Снапиро И.Б., Коломоец Г.П.
14. Мелентьев Н.Г. Монолитная линия задержки//Электронная промышленность.-1991.-N1.-С.100.
15. Мелентьев Н.Г., Порада С.А., Ткаченко Н.Н. Эффект памяти в поликристаллическом кремнии//Тез. докл. XLV Всесоюзная научная сессия, посвященная Дню радио.-М.: Радио и связь, 1990.-С.71.
16. Коломоец Г.П., Мелентьев Н.Г., Ткаченко Н.Н. Токовый шум поликремниевых резисторов//Тез. докл. н.-т. семинара "Шу-

- мовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах". - Черноголовка. - 1990. - С.21-22.
17. Положительное решение по заявке N 4845656 от 2.07.90. Способ подгонки величины сопротивления поликристаллического резистора/ Мелентьев Н.Г., Остренко Д.В., Ткаченко Н.Н., Снапиро И.Б., Коломоец Г.П.
 18. Ткаченко Н.Н., Коломоец Г.П., Мелентьев Н.Г. Токовые флуктуации в поликристаллических пленках кремния// Тез. докл. н.-т. семинара "Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах". - Москва, МЭИ, 1993.
 19. Tkachenko N.N., Kolomoets G.P., Melentjev N.G. Polycrystalline resistors with current-induced tuning of electrical parameters//Proc. of Int. Conf. "Microelectronics'92", 21-23 September, 1992, Warsaw, Poland. Published by SPIE, USA. - 1992. - V.1783. - P.223-243.
 20. Мелентьев Н.Г., Пономарев А.А. Монолитные интегральные схемы линий задержки// Электронная промышленность. - 1992. - N3. - С.56-58.
 21. Положительное решение по заявке N 5017615 от 18.12.91. Линия задержки/Мелентьев Н.Г.

APR 30 1932

457201

AB 30.056

AB 30.056