

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.382.049.77.002:776

**КОРОБКО
ЮЛИЯ ОЛЕГОВНА**

**ФОРМИРОВАНИЕ СУБМИКРОННЫХ КМОП СТРУКТУР С
ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТЬЮ КРИТИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ
МЕТОДОМ ПРОЕКЦИОННОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ**

Специальность **05.27.01**

«Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и
наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск 2005

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский
государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: академик НАН Беларуси, доктор технических наук профессор Достанко Анатолий Павлович (Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», кафедра электронной техники и технологии)

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Лыньков Леонид Михайлович (Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», кафедра защиты информации)

кандидат технических наук
Аваков Сергей Мирзоевич (Государственный научно-производственный концерн точного машиностроения «Планар»)

Оппонирующая организация: Унитарное предприятие «БЕЛМИКРОСИСТЕМЫ»

Защита состоится «17» марта 2005 г. в 14.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013 г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп.1, ауд.232, тел. 239-89-89.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Одной из основных задач микроэлектронного производства является создание рисунка топологии ИМС. Применение методов оптической фотолитографии - наиболее экономически выгодного способа переноса рисунка с фотошаблона на кремниевую пластину - в сочетании с всё возрастающими требованиями миниатюризации и повышения плотности размещения активных и пассивных элементов на кристалле ИМС, приводит к необходимости использования дополнительных методов повышения разрешающей способности оптического оборудования (RET – методов), позволяющих осуществить технологический процесс с минимальными допусками отклонений от технологических нормативов.

Характерной особенностью современного процесса фотолитографии является нелинейный перенос изображения с фотошаблона на кристалл, что приводит к усилению роли дефектов, возникающих при создании топологии шаблона в процессе формирования изображения и производства субмикронных структур ИМС. Поэтому анализ степени влияния ошибок переноса топологической информации на электрические параметры ИМС и разработка технологических методов, позволяющих уменьшить коэффициент переноса ошибок топологии MEEF весьма актуальны. Решение данных задач будет способствовать более успешному созданию качественной элементной базы и дальнейшему прогрессу в области разработки совершенных устройств твердотельной микроэлектроники и, в частности, при их производстве на предприятиях Республики Беларусь (НПО «Интеграл»).

Связь работы с крупными научными программами, темами. Диссертационная работа выполнена в рамках: задания 01.32. ГНТП «Белэлектроника» «Разработать конструкцию, процесс и освоить серийное производство мощного высоковольтного быстродействующего транзистора в корпусе КТ-28 для энергосберегающих технологий», инновационного проекта №P182-2003 «Модернизация конструкции и технологического процесса изготовления стабилизаторов напряжения положительной полярности серии 78XX с улучшенными технико-экономическими показателями», а также проекта компании Intel Co. по разработке субмикронной технологии 0,18 мкм.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является исследование влияния ошибок топологии на выходные характеристики ИМС и разработка с помощью фазосмещающих фотошаблонов методов минимизации их влияния на формируемые КМОП структуры с топологическими нормами проектирования 0,25 мкм и менее при использовании фотолитографического оборудования предшествующего поколения. Для достижения указанной цели предполагается решить следующие задачи:

- Исследовать на основе разработанного метода численного моделирования особенности влияния дефектов топологии на электрические характеристики типовых ИМС для технологий формирования КМОП структур с минимальной длиной канала 0,25 мкм и ниже.
- Провести сравнительный анализ показателей технических методов и средств, улучшающих точность фотолитографического переноса топологии на кристалл.
- Разработать тестовые структуры, позволяющие формировать контактные окна 0,18-0,22 мкм с шагом 0,42-0,48 мкм методами фотолитографии (длина волны $\lambda = 248$ нм).
- Разработать методику получения фазосмещающих фотошаблонов.
- Исследовать особенности применения фазосмещающих фотошаблонов для получения субмикронных элементов в производственном процессе.

Объект и предмет исследования.

Объектом исследования являются искажения топологического слоя, возникающие при переносе с фотошаблона на кристалл с помощью метода фотолитографии топологической информации о полупроводниковых приборах, имеющих размеры 0,25 мкм и меньше.

Предметом исследования являются:

- выходные характеристики полупроводниковых приборов и степень их изменения при различных ошибках процесса переноса топологической информации, определяемая с помощью методов численного моделирования;
- структура и особенности применения фазосмещающих фотошаблонов для повышения разрешающей способности экспонирующего оборудования при фотолитографическом формировании топологии субмикронных элементов.

Гипотеза. При субмикронных технологиях влияние топологических ошибок на электрические характеристики ИМС нелинейно, что требует разработки специальных научно-технических решений, позволяющих получать элементы с заданными нормативными показателями.

Методология и методы проведенного исследования. В качестве экспериментальных методов исследования нами использованы проекционная оптическая, электронно-лучевая и лазерная фотолитография, методы повышения разрешающей способности (RET-методы) оптических систем с помощью фазосмещающих фотошаблонов (PSM) для получения тестовых образцов; а также различные метрологические методики: сканирующая электронная микроскопия для анализа критических размеров поверхности и разреза топологического слоя; оптическая микроскопия для измерения точности позиционирования и критических размеров топологических структур фотошаблона; атомный силовой микроскоп для изучения дефектности структур фотошаблона, установка AIMS для изучения распределения фронта световой волны при прохождении через дефектные участки фотошаблона.

Для моделирования технологических особенностей процесса переноса топологической информации на кристалл, а также моделирования электронных схем на уровне транзисторов и их соединений нами были использованы методы численного моделирования, опирающиеся на применение программных пакетов PISCES2B и SPICE. Использован также метод Монте-Карло для статистического анализа результатов моделирования. Численная оценка распределения интенсивности излучения на поверхности фоторезиста при прохождении через тестовые структуры фотошаблона осуществлялась с помощью пакета программного моделирования PHOTO.

Научная новизна и значимость полученных результатов:

1. Предложен ускоренный (2-5 часов вместо нескольких суток машинного времени) метод численного моделирования влияния погрешностей длины и ширины канала КМОП транзистора на быстродействие логических и запоминающих подсистем ИМС. Метод основан на использовании физического моделирования одного транзистора с последующим расчётом аналитической модели для схемного моделирования при помощи пакета SPICE и статистического метода Монте-Карло.
2. На основе анализа результатов численного моделирования установлено нелинейное влияние дефектов топологии на быстродействие логических и запоминающих подсистем ИМС при миниатюризации их номинальных размеров, что определяет необходимость введения топологических норм на основе вероятностных оценок характеристик топологии микросхем вместо традиционного приема масштабирования.
3. Предложена и разработана топология субмикронных фазосмещающих тестовых структур и исследованы особенности ее применения при формировании контактных элементов размером 0,18-0,22 мкм с шагом 0,44-0,48 мкм при использовании фотолитографии ($\lambda = 248$ нм, $NA = 0,42$, $\sigma = 0,3$) на оборудовании предшествующего поколения.
4. Показано, что разрешающая способность фотолитографического процесса при использовании фазовых фотошаблонов увеличивается в 1,5~2 раза по сравнению с применением традиционных (COG) фотошаблонов, что позволяет уменьшить размер формируемых контактных окон при сохранении широкого диапазона рабочих доз облучения и фокусных расстояний.
5. Предложен метод повышения точности совмещения слоев фотошаблона на основе разработанной методики калибровки координатных столов.
6. Предложен способ получения фазосмещающих фотошаблонов в производственном процессе, включающий двухэтапное осуществление процесса фотолитографии, при котором второй (фазовый) топологический слой формируется с помощью лазерных установок поверх полностью созданного основного рисунка топологии шаблона, полученного с помощью электронно-лучевых установок, а также осуществляется дополнительное к

процессу травления хрома травление кварца на глубину, соответствующую изменению фазы световой волны на 180° .

Практическая (экономическая, социальная) значимость полученных результатов.

1. Разработанная технология использования трёхуровневых (фазосмещающих) фотошаблонов для увеличения разрешающей способности оптических систем и уменьшения топологических ошибок при передаче изображения является экономически выгодной, поскольку позволяет применить фотолитографическое оборудование предыдущего поколения для производства ИМС наиболее современных субмикронных технологий.
2. Разработанная технология получения фазосмещающих фотошаблонов в производственном процессе при двухэтапном осуществлении процесса фотолитографии, а также осуществлении дополнительного травления кварца на глубину, соответствующую изменению фазы в 180° , обеспечивает требуемую точность воспроизведения критических размеров и отображения краев трафарета при формировании субмикронных структур.
3. Предложенная расчетная методика оценки влияния дефектности топологии слоя на выходные характеристики элементов ИМС позволяет оценить качество проектирования до вложения средств в тестовые партии, имеющие высокую стоимость, за счет задания более точных допустимых норм разброса геометрических параметров, определяющих отклонение выходных показателей ИМС в заданном диапазоне по сравнению с существующей практикой прямого масштабирования.
4. Разработанная методика численного моделирования при расчёте влияния разброса геометрических параметров топологического слоя на выходные характеристики ИМС позволяет избежать перебора всех возможных комбинаций топологических ошибок и неточностей процесса и сократить время численного анализа с нескольких дней до 2~5 часов для 10000 выборок при использовании персонального компьютера с микропроцессором Pentium 4 и, при этом, основывается на применении доступных программных пакетов.

Результаты, полученные в ходе исследования и разработки метода применения фазосмещающих фотошаблонов, были использованы в технологических процессах в Intel Co., крупнейшей компании – производителе микропроцессоров, начиная с технологии 860, а также в НИО «Интеграл» для оценки перспектив и преимуществ перехода производства на субмикронные технологии высшего порядка при создании микроэлектронной продукции.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту :

1. нелинейное влияние дефектов топологии на временные параметры КМОП элементов при миниатюризации их номинальных размеров;

2. ускоренный (на порядок и более) метод численного моделирования для оценки влияния дефектов топологии на выходные характеристики ИМС;
3. топология тестовых фазосмещающих структур и результаты ее применения для формирования контактных элементов размером 0,18-0,22 мкм с шагом 0,44-0,48 мкм на оборудовании предшествующего поколения, доказавшие возможность увеличения \sim в 2 раза разрешающей способности фотолитографического процесса и понижения до 3 раз коэффициента переноса дефектов топологии с фотошаблона на подложку;
4. способ получения фазосмещающих фотошаблонов при двухэтапном осуществлении процесса фотолитографии и дополнительном к процессу травления хрома осуществлении травления кварца на глубину, позволяющую создать изменение фазы в 180° .

Личный вклад соискателя Автор принимал участие в постановке задач исследований, планировании и проведении экспериментов, анализе полученных результатов, подготовке публикаций, участвовал в апробации предложенных методов в промышленном производстве ИМС. Личный вклад автора также заключается в разработке метода численного моделирования для оценки влияния ошибок топологии на электрические характеристики ИМС.

Апробация результатов диссертации. Материалы, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на международных конференциях: BACUS, SPIE (Redwood city, California, USA 1998 г.), BACUS, SPIE (Monterey, California, USA 2001 г., 2004 г.), III Международной научно-технической конференции «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств», (г.Новополоцк, 2004 г.), 9-ой Международной научно-технической конференции «Современные средства связи» (г.п. Нарочь, 2004 г.).

Апробация результатов работы проводилась на семинарах БГУИР, Component research Lab., Intel Co. (Santa Clara, California, USA), а так же D1 Lab., Intel Co. (Oregon, USA).

Опубликованность результатов По материалам диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ, в том числе 3 статьи в научных журналах, 6 статей в научно-технических сборниках и сборниках материалов конференций, 3 тезиса доклада. Общее количество опубликованных страниц - 68 страниц.

Структура и объем диссертации Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, 5 глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Полный объем диссертации составляет 134 страниц текста, в том числе 82 рисунка на 26 страницах, 11 таблиц на 5 страницах и приложений на 9 страницах. Библиографический список содержит 117 наименований литературных источников на 8 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении и общей характеристике работы обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи работы, изложены положения, выносимые на защиту, охарактеризована научная новизна и практическая значимость полученных в работе результатов.

В первой главе проанализированы основные направления развития производства интегральных микросхем и известные технологические решения в современной фотолитографии.

Показано, что перспективное развитие микроэлектроники связано с уменьшением критических параметров элементов ИМС и повышением их плотности на кристалле, что обеспечивается требуемым уровнем технологического процесса, в котором фотолитография является ключевым этапом производства.

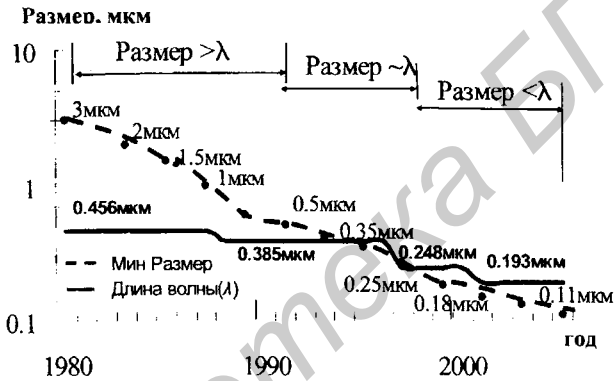


Рис. 1 Соответствие длины волны используемого фотолитографического излучения нормам проектирования

Начиная с технологии создания субмикронных структур с нормативными размерами 0,25 мкм (рис.1), требуемые минимальные размеры элементов оказываются меньше длины волны используемого для экспозиции излучения. В этом режиме дифракционные эффекты играют значительную роль при формировании изображения. Наблюдается закругление углов, укорачивание структур, появление вуали, потеря глубины фокуса и нелинейность при передаче изображения структур различных размеров, т.е. коэффициент переноса дефектов топологии $MEF = \Delta CD_{wafer} / \Delta CD_{mask} \gg 1$, где ΔCD_{wafer} , ΔCD_{mask} – размерные ошибки рисунка на подложке и фотошаблоне соответственно.

Согласно формуле Рэля теоретическая разрешающая способность оптической системы R определяется как

$$R = k_1 (\lambda / NA) \quad (1)$$

где λ – длина волны излучения, а NA – числовая апертура линз, k_1 – константа Рэлея.

Для традиционных методов фотолитографии $k_1 \sim 0,5$, что соответствует ситуации, когда только дифрагированные волны первого порядка (т.е. 0, +1 и -1) участвуют в формировании изображения.

Использование технологического процесса при $k_1 < 0,5$ в условиях, когда длина световой волны равна или больше размеров субмикронных элементов приводит к существенным проблемам в обеспечении качества изображения вследствие потери более высоких дифракционных порядков. Наиболее надежным способом повышения качества фотолитографического процесса в этих случаях является переход на новые производственные технологии, например, с экспозиционной длины волны $\lambda = 365$ нм на $\lambda = 248$ нм и т.п., а также повышение числовой апертуры линз, использование более чувствительного фоторезиста и более совершенного контрольного оборудования. Однако такой переход требует значительных материальных затрат как на стадии научно-исследовательских разработок, так и при реализации их результатов в производственном процессе. Так, например, стоимость переоснащения технологической линии для технологии 0,1 мкм составляет $\sim 0,3$ миллиарда долларов.

Анализ научно-технической информации показывает, что особенностью современного производства ИМС, определяемой потребительскими ориентирами, является опережающий темп перехода на новые поколения ИМС по сравнению с темпами создания нового, более совершенного проекционного оборудования. Это приводит к необходимости использования существующих производственных линий для ИМС следующего поколения. Инженерные методы, позволяющие не только поддерживать достаточный процент выхода годных изделий в условиях фотолитографии с низким k_1 (FLEX-улучшает глубину фокуса за счёт смещения фокальной плоскости при последовательной двойной экспозиции, OPC и SRAF – усиление контраста края основных структур топологии за счет добавления ассистирующих неразрешаемых структур, EPSM- плёночные фазосмещающие фотошаблоны), но и перешагнуть предел теоретической разрешающей способности «по Рэлею» (OAI-метод наклонного излучения, APSM – «сильные» фазосмещающие фотошаблоны) являются необходимой частью технологического процесса в субмикронной области. Это накладывает определённые ограничения на проектирование топологии и технологический процесс. Исследование различных RET-методов позволяет оценить возможности их применения к конкретным приложениям и качественно улучшить существующий производственный процесс.

Выходные параметры ИМС напрямую зависят как от качества индивидуального транзистора, так и от однородности и качества характеристик транзисторов, составляющих микросхему. В связи с вышеуказанными особенностями субмикронной технологии возникает необходимость определения влияния возможных топологических отклонений в элементах от номинальных значений на выходные характеристики ИМС и

их подсистем, а также необходимость детальной разработки технологического процесса, позволяющего получать ИМС с заданными параметрами при ограниченных возможностях фотолитографической базы. Это и явилось целью выполнения настоящей работы.

Во второй главе даётся описание методики численного моделирования, а также экспериментальных образцов и оборудования, используемого для проведения работы.

Численное моделирование. а) Для моделирования технологических особенностей процесса переноса топологической информации на кристалл, а также моделирования электронных схем на уровне транзисторов и их соединений с целью проведения оценки изменения их выходных параметров при различных топологических ошибках нами применены методы численного моделирования, использующие программные пакеты PISCES2B и SPICE. С помощью пакета PISCES2B строится структура транзистора по заданным технологическим нормам и рассчитывается его ВАХ. Параметры аналитической модели, заложенной в программном пакете SPICE (подпрограмма BSIM3), оптимизируются согласно результатам ВАХ, полученным при расчете транзистора на физическом уровне при помощи PISCES2B. Относительная точность совпадения значений ВАХ, рассчитанных с помощью пакетов PISCES2b и BSIM3 составила $\epsilon = 0,012$. Оптимизированная модель далее используется для последующего расчета временных характеристик изучаемых подсистем ИМС. Применение статистического метода Монте-Карло позволяет провести анализ влияния разброса ошибок топологии на временные характеристики подсистем ИМС за приемлемое время.

б) Распределение волнового фронта на поверхности фоторезиста после прохождения структур фотошаблона определялось нами с помощью программного пакета IPHOTO (коммерческий эквивалент - PROLITH).

Математическое моделирование процесса оптической литографии проведено для оценки распределения интенсивности светового излучения на поверхности фоторезиста при использовании фотошаблонов с различной топологией структур.

Эксперимент. Для исследования особенностей формирования тестовых контактных структур требовалось: а) создание тестового фотошаблона; б) выбор и подготовка экспериментальных материалов: подложки, фоторезиста, закрепителя, проявителя; в) проведение опытов на установке оптической фотолитографии ($\lambda = 248$ нм, $NA = 0,42$, $\sigma = 0,3$); г) измерительной аппаратуры. Метрологические результаты получены с помощью сканирующего электронного микроскопа. Для изготовления фотошаблонов и анализа результатов, приведенных в диссертационной работе, использовались: а) установки электронно-лучевой и лазерной литографии; б) метрологическое оборудование: сканирующий электронный микроскоп, оптический микроскоп и установка, предназначенная для проведения высокоточных измерений координат положения элементов топологии шаблонов с оценкой совмещаемости слоёв шаблона; в) контрольное оборудование:

атомный силовой микроскоп и установка, позволяющая анализировать распределение интенсивности в фронте световой волны при прохождении через окна фотошаблона (AIMS).

Третья глава работы посвящена анализу влияния топологических ошибок на выходные характеристики транзисторов с помощью методов математического моделирования. Схема реализации предложенной методики представлена на рис. 2.

Главной особенностью предложенного метода является использование моделирования полупроводниковых структур на физическом уровне (пакет PISCES2B) для получения коэффициентов аналитической модели транзистора (пакет BSIM3), соответствующей конкретному технологическому процессу. Последующее использование аналитической модели в программном пакете (SPICE) для расчета электрических характеристик ИМС позволяет в десятки раз сократить время вычислений по сравнению с прямым моделированием. Использование метода Монте-Карло при статистическом анализе влияния отклонений параметров топологии на скорость переключения логических электрических схем и схем запоминающих устройств позволяет получить результаты за приемлемое время при сравнительно небольших вычислительных ресурсах (выборка в 10000 за ~ 5 часов на РС типа Pentium 4).

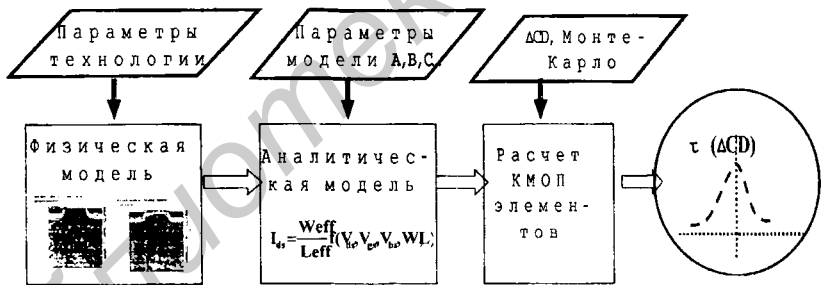


Рис.2 Схема расчета влияния погрешностей топологии на выходные характеристики ИМС

Необходимо отметить, что, несмотря на наличие на рынке САПР ИМС пакетов программ, осуществляющих различные этапы рассмотренного выше анализа (моделирование полупроводниковых структур на физическом уровне, схемное моделирование ИС, статистическое моделирование), не существует программ, связывающих все этапы воедино, что реализовано нами в предложенном методе расчета.

В работе проанализировано влияние нестабильности критических параметров топологии, таких как длина и ширина канала КМОП транзистора, на быстродействие логических и запоминающих подсистем ИМС (на примере цепочки инверторов и схемы триггера) для технологий 0,5 мкм, 0,35 мкм, 0,25 мкм, 0,18 мкм и 0,13 мкм. Моделирование проводилось для

топологических погрешностей критических размеров длины и ширины затвора при варьировании величины в пределах 5 - 25% от нормативных значений.

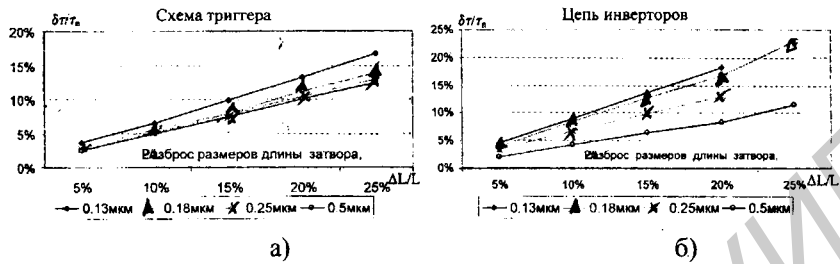


Рис. 3 Влияние изменения длины затвора на время записи сигнала триггера (а) и на время задержки сигнала в цепи инверторов (б) при различных технологических нормах

Приведенные на рис.3 результаты свидетельствуют о том, что одно и то же относительное изменение длины затвора приводит к существенным (более, чем в 2 раза) отличиям во временной задержке сигнала для разных технологий. Это свидетельствует о необходимости особого контроля за данным критическим параметром в ходе фотолитографического процесса при формировании субмикронных структур. Кроме того, появляется возможность определить нормативные значения, базируясь на выходных характеристиках микросхемы, вместо традиционного масштабирования, применяемого при переходе к технологии нового поколения.

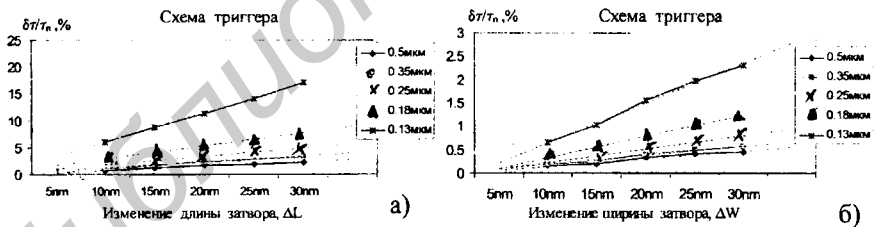


Рис.4 Влияние изменения времени записи в схеме триггера от: а) изменения длины канала; б) изменения ширины канала

Как видно из результатов, представленных на рис. 4, изменение длины канала оказывает значительно большее влияние на изменение времени задержки (времени записи), чем соответствующее изменение ширины канала.

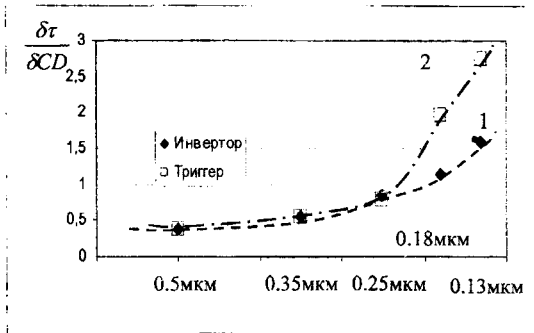


Рис.5 Отношение флуктуации временных характеристик ИМС к флуктуациям длины затвора при различных технологиях для: 1-цепочки инверторов; 2-схемы триггера

Видно, что погрешности топологических параметров влияют на чувствительность разброса временных характеристик ИМС, особенно для технологии в 0,13 мкм (рис.5).

В результате проведенного исследования было показано, что современные методы САПР при проектировании субмикронных процессов (0,25 мкм и ниже) должны учитывать вероятностный характер входных данных топологии.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния топологии различных типов фотошаблонов (размеры окон и шаговых расстояний), а также технологических параметров (доз экспозиции и глубины расфокусировки) на возможность формирования контактных окон размерами 0,18-0,22 мкм при использовании фотолитографического оборудования ($\lambda = 0,248$ мкм, $NA = 0,42$, $\sigma=0,3$). На основе численного анализа и анализа результатов сравнительного эксперимента проведена оптимизация топологии фазосмещающих фотошаблонов, применение которых позволило повысить разрешающую способность оптического оборудования и улучшить качество формируемых субмикронных структур за счет явления деструктивной интерференции световых потоков, проходящих через соседние апертуры фотошаблона. Схематично принцип работы фазовых фотошаблонов представлен на рис.6.

Одно из окон фотошаблона протравливается на глубину длины волны используемого излучения (тип фотошаблона - APSM), или покрывается специальной пленкой (тип фотошаблона - EPSM), что позволяет осуществить сдвиг фазы света, проходящего через это окно, на 180° по сравнению с фазой света, проходящего через соседнее окно. Суммарная интенсивность светового потока в зонах фоторезиста, соответствующих темным областям фотошаблона, стремится к нулю, что способствует усилению контраста, увеличению модуляционной передаточной функции и, как следствие, повышению разрешающей способности оптической системы.

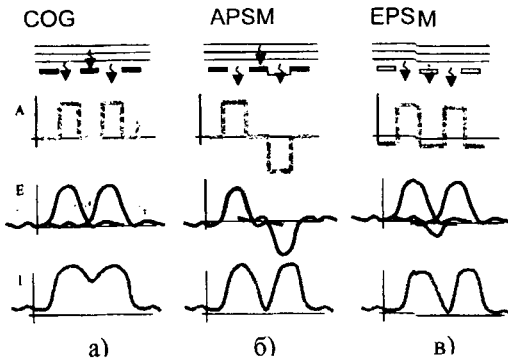


Рис. 6 Схематичное изображение работы стандартных COG (а), фазосмещающих фотошаблонов типа APSM (б) и типа EPSM (в). А – амплитуда световой волны на выходе фотошаблона, Е – амплитуда световой волны на поверхности фоторезиста, I – суммарная интенсивность светового потока на поверхности фоторезиста.

Однако, все RET-методы (как и любые методы сверхразрешения) очень чувствительны к любым погрешностям, и поэтому применять их в производстве сложно. В работе предложена и детально разработана методика использования фазосмещающих фотошаблонов в производственном процессе на примере получения матрицы контактных окон размером 0,18-0,22 мкм с шагом меньше 0,48 мкм (технология 0,18 мкм). Для этих целей использовалось литографическое оборудование предыдущего поколения технологий 0,35-0,25 мкм ($\lambda = 0,248$ мкм, $NA = 0,42$, $\sigma = 0,3$). Были исследованы различные типы фазосмещающих фотошаблонов: APSM (типы L1, L2, и бесхромовые) и EPSM. Полученные при этом результаты сравнивались с результатами, которые получали с помощью стандартных (COG) фотошаблонов.

Эксперименты показали, что при использовании традиционных фотошаблонов и заданных условий экспонирования можно было получить контактные окна размером до 300 нм при минимальном расстоянии между ними в 0,72 мкм.

Для оценки возможностей фазосмещающих фотошаблонов, прежде всего методами математического моделирования, были определены конфигурации тестовых структур, позволяющие получать контактные окна требуемых размеров. Производился расчет распределения интенсивности световой волны на поверхности фоторезиста при прохождении через тестовые структуры. Рассматривались положения пиков интенсивности световой волны и функция передачи для фотошаблонов MTF:

$$MTF = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) \quad (2)$$

Оценочным критерием качества формирования контактных окон являлось одновременное выполнение двух условий: 1) относительная

интенсивность «засветки» фоторезиста должна быть больше 30%; 2) функция передачи (MTF) должна быть больше 0,6.

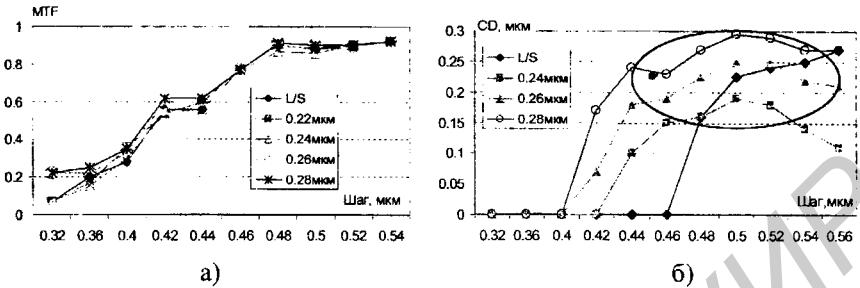


Рис. 7 Зависимости значений функции MTF (а) и значений размеров контактных окон (б) от размера тестовых структур.

Для всех типов тестовых структур были построены зависимости значений функции MTF и зависимости распределения пиков интенсивности света от шагового расстояния между окнами фотошаблона различных размеров, как показано на рис. 7 (а, б) на примере структур APSM фотошаблона типа L1.

Из представленных на рис.7 результатов моделирования следует, что при выполнении условий ($MTF > 0,6$, $I = 30\%$) для получения контактов размерами 0,18-0,20 мкм наиболее оптимальным представляется использование окон размерами 0,26 - 0,28 мкм, находящихся на расстоянии 0,44-0,46 мкм. Для структур с размерами окон большими, чем ширина линии хрома, например 0,26x0,42 и 0,28x0,42, интенсивность излучения в теневой области увеличивается, что приводит к потере контраста. По этой причине и формирование контактных структур становится невозможным.

Чтобы оценить необходимость перехода на новое оборудование было проведено численное моделирование для условий экспонирования, соответствующих применению более современной модели степперов ($\lambda = 0,248$ мкм, $NA = 0,6$, $\sigma = 0,3$). Как и предполагалось, увеличение числовой апертуры линз усиливает разрешение оптической системы (см. таблицу).

Результаты численного анализа далее были сопоставлены с данными экспериментов для всех типов тестовых структур APSM. Они показали, что фотошаблоны типа EPSM при заданных литографических условиях не дают такого преимущества в повышении разрешения, как использование фотошаблонов типа APSM. Некоторые результаты измерений для APSM шаблонов бесхромового типа приведены на рис.8, а сравнительные результаты численных и экспериментальных исследований различных типов APSM шаблонов собраны в таблице.

Их анализ показывает, что размер проявленных контактов при сохранении достаточно широкого диапазона рабочих доз и фокусных расстояний уменьшается почти в 2 раза.

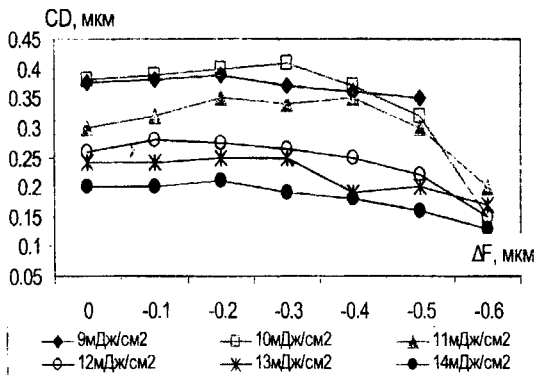


Рис.8 Изменение размеров контактных окон в зависимости от расфокусировки при различных дозах экспонирования

Таблица

Сравнительные результаты формирования контактных структур при использовании разработанных тестовых фотошаблонов по сравнению со стандартным фотошаблоном

Тип фотошаблонов	Моделирование @NA=0.42		Эксперимент @NA=0.42			Моделирование @NA=0.6	
	Мин. шаг, нм	Мин. CD, нм	Мин. шаг, нм	Мин. CD, нм	F, мкм	Мин. шаг, нм	Мин. CD, нм
Стандартный	750	300	750	300	1	520	210
L - 1	460	230	460	220	>0.6	322	140
L - 2	380	150	380	180	>0.6	270	120
Бесхромовый	360	-	480	220	>0.6	260	-

Результаты исследования доказали преимущество фазосмещающих фотошаблонов, что позволило реализовать их применение в производственном процессе для получения микропроцессоров поколения 860 (INTEL).

Пятая глава диссертации содержит описание способа получения фазосмещающих фотошаблонов в производственном процессе и методы решения возникающих при этом технологических проблем.

В отличие от производства стандартных COG фотошаблонов, для получения фазовых фотошаблонов типа APSM было предложено проведение двухступенчатого процесса фотолитографии, а также осуществление операции травления кварца на определенную глубину. Эти два этапа являются определяющими в процессе создания качественных фотошаблонов.

Анализ экспериментальных результатов показывает, что ошибка в совмещении слоёв (основного и фазового) приводит к травлению участков кварца в местах, не соответствующих заданному рисунку топологии и, как следствие, возникновению паразитных структур при переносе изображения на подложку. Согласно нормативным требованиям производства фотошаблонов, принятым международной ассоциацией производителей полупроводниковой продукции (SIA), точность совмещения фазового слоя с основным не должна превышать 100 нм для технологии 0,18 мкм, 60 нм для технологии 0,09 мкм и 35 нм для технологии 0,065 мкм. Расположение и читаемость меток совмещения, а так же степень искривления координатных систем столов литографических установок влияют на точность совмещения. Калибрование координатных столов литографических установок непосредственно связано с точностью калибровки координатного стола измерительной системы. Отсутствие двухмерных эталонов вызывает большие сложности в проведении и точности калибровки. Нами было предложено использовать методологию самокалибровки, основанную на принципах конгруэнтности при переносе и повороте в Декартовой системе координат, и впервые осуществлено ее применение в измерительной системе для технологии 0,18 мкм и ниже. Достигнутая точность калибровки координатного стола составила 2,9 нм (3σ), что сопоставимо с воспроизводимостью результатов измерений самой установки (2 нм, 3σ). Используя откалиброванную систему координат метрологической установки, мы достигли совмещения координатных систем столов литографических установок в пределах 10-20 нм (величины, ограниченные точностью позиционирования самих литографических систем).

Было показано, что реализация преимуществ фазосмещающих фотошаблонов типа APSM связана с возможностью осуществить точный сдвиг фазы света на 180° и обеспечить одинаковые значения интенсивности света, проходящего через апертуры 0° и 180° . Этого можно достичь при оптимизации параметров процесса травления (как хрома, так и кварца), исключая появление фазовых дефектов, отрыв пленки хрома или снижение качества формирования края структуры.

Создание систем последующего контроля и исправления фотошаблонов, а также применение необходимого программного обеспечения для корректировки рисунка топологического слоя позволило реализовать разработанные фазосмещающие методы в серийном производстве для формирования контактных элементов размером 0,18-0,2 мкм с шагом 0,44-0,48 мкм при использовании фотолитографии ($\lambda = 248$ нм, $NA = 0,42$, $\sigma = 0,3$) на оборудовании предшествующего поколения.

Заключение

1. Предложен ускоренный метод численного моделирования влияния топологических погрешностей слоя (в частности, длины и ширины канала КМОП транзистора) на быстродействие логических и запоминающих подсистем ИМС. Метод основан на использовании физического моделирования одного транзистора для расчёта коэффициентов аналитической модели транзистора, применяемой в программном пакете для схемного моделирования SPICE. Применение уточненной аналитической модели транзистора повысило точность расчёта выходных характеристик подсистем ИС, так как были учтены особенности конкретного технологического процесса. Использование метода Монте-Карло при статистическом анализе полученных результатов позволило оценить вероятностные характеристики отклонений электрических параметров подсистем ИМС от номинальных величин за приемлемое время (около 5 часов для 10000 выборки), что на порядок быстрее, чем при использовании традиционных схем моделирования /3,8/.

2. Установлено нелинейное влияние дефектов топологии на быстродействие логических и запоминающих подсистем ИМС при миниатюризации их номинальных размеров. Это приводит к необходимости определения топологических норм на основе вероятностных характеристик топологии микросхем вместо традиционного приема масштабирования /1,9/.

3. Разработана топология фазосмещающих тестовых структур и на основе численного анализа и сравнительного эксперимента проведена ее оптимизация для формирования контактных элементов размером 0,18-0,22 мкм с шагом 0,44-0,48 мкм при использовании фотолитографии ($\lambda=248$ нм, $NA=0,42$, $\sigma=0,3$) на оборудовании предшествующего поколения. /2,3,4,6,10,12/.

4. Получены зависимости размеров формируемых контактных окон от характеристик топологии фазосмещающих фотошаблонов (размеры окон и шаговых расстояний), а также доз экспозиции и глубины расфокусировки. Показано, что использование фазовых фотошаблонов позволяет увеличить в 1,5-2 раза разрешающую способность фотолитографического процесса по сравнению с применением традиционных (COG) фотошаблонов и уменьшить размер проявленных контактов при сохранении широкого диапазона рабочих доз облучения и фокусных расстояний /2,5/.

5. Предложен способ получения фазосмещающих фотошаблонов в производственном процессе, заключающийся в двухэтапном осуществлении процесса фотолитографии, при котором второй (фазовый) слой формируется с помощью лазерных установок поверх полностью созданного основного рисунка топологии шаблона, полученного с помощью электронно-лучевых установок, а также с дополнительным к процессу травления хрома травлением кварца на глубину, позволяющую осуществить изменение фазы световой волны на 180° /5,7,11/.

6. Предложен на основе метода самокалибровки (принцип конгруэнтности при переносе и повороте в Декартовой системе координат) и применен в технологическом процессе метод калибровки координатных столов измерительных и литографических систем, что позволило повысить точность позиционирования и совмещения слоев фотошаблона благодаря минимизации систематических искривлений координатных систем установок. Достигнута точность калибровки координатного стола измерительной системы в $2,9 \text{ нм}$ (3σ) /7/.

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ИМС - интегральная микросхема; AIMS - установка для проверки наличия дефектов на фотошаблонах; CD - критический размер структуры топологии слоя; COG - стандартный тип фотошаблонов (хром на стекле/кварце); DUV - глубокое ультрафиолетовое излучение (193-248 нм); NA - числовая апертура линз; MEF - коэффициент переноса ошибок топологии с фотошаблона на подложку; MEEF - уточненный коэффициент переноса ошибок топологии с фотошаблона на подложку; MTF - модуляционная передаточная функция; OPC - методика корректировки качества изображения, переносимого с фотошаблона на подложку; PSM - фазосмещающие фотошаблоны; APSM - тип PSM ($A_{180^\circ} = A_0^\circ$); EPSM - тип PSM ($A_{180^\circ} \ll A_0^\circ$); RET - методы повышения разрешающей способности оптической системы; σ - фактор когерентности света; wafer - подложка; mask - фотошаблон; F - глубина фокуса; I_{ds} - ток сток-исток; W - ширина канала; L - длина канала; τ - время записи (время задержки).

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Статьи в научных журналах:

1. Коробко Ю.О. Влияние разброса топологических размеров на отдельные параметры элементной базы ИМС // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. - № 2 (18). – С. 82-84.
2. Достанко А.П., Турцевич А.С., Коробко Ю.О. Особенности применения проекционной фотолитографии // Доклады БГУИР – 2004. - № 4(8).- С.79-83.
3. Достанко А.П., Коробко Ю.О., Особенности и перспективы развития современной микроэлектроники //Труды ПГУ, Сер. Естественные науки. – 2004. - № 11. - С. 1-8.

Статьи в научно-технических сборниках:

4. Korobko Yu.O., Lu M-C., Telans J., Powers J. E. Resolution limits with 248-nm strong phase-shifting techniques for contact patterning applications // SPIE Proc. – 1998. –Vol. 3546. – P. 594-605
5. Tsai W., Kamna M., Korobko Yu.O., Qian Q.-D., Buckmann K. M. Technological Challenges in Implementation of Alternating Phase-Shift Mask // SPIE Proc. – 2001. – Vol. 4562. – P. 433-443.
6. Cotte E., Engelstad R., Lovell E., Tansil D., Eschback F., Korobko Yu.O., Fujita M., Nakagawa H. Effects of Soft Pellicle Frame Curvature and Mounting Process on Pellicle-Induced Distortions in Advanced Photomasks // SPIE Proc. - 2003. - Vol. 5040. - P.1044-1054.
7. Chandramouli M., Korobko Yu. O. Calibration of the registration Metrology System // SPIE Proc. – 2004. – Vol. 5567 - P. 1056 -1066.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

8. Коробко Ю.О., Ануфриев Л.П., Турцевич А.С. Исследование влияния дефектов топологии на девиацию электрических характеристик элементов интегральных микросхем // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: Материалы III Международной научно-технической конференции, Новополоцк, 26-28 мая 2004 г. / ПГУ. – Новополоцк, 2004. - - Т.1. - С. 234-237.
9. Коробко Ю.О., Достанко А.П. Компьютерное моделирование влияния погрешности топологических размеров элементов на выходные характеристики интегральных микросхем // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: Материалы III Международной научно-технической конференции, Новополоцк, 26-28 мая 2004 г. / ПГУ. - Новополоцк, 2004. - Т.2. - С. 195-197.

Тезисы докладов:

10. Korobko Yu.O., Lu M-C., Telans J., Powers J. E. Resolution limits with 248-nm strong phase-shifting techniques for contact patterning applications // Book of Abstract of 18 Annual Symposium on Photomask Technology and

Management: Ed. B. J. Grenon, F. E. Abboud, Redwood City, CA, USA, 16 - 18 Sept. 1998/ SPIE. – Monterey, CA., 1988. - P. 59.

11. Tsai W., Kamna M., Korobko Yu.O., Qian Q.-D., Buckmann K. M. Technological Challenges in Implementation of Alternating Phase-Shift Mask // Book of Abstracts of 21 Annual BACUS Symposium on Photomask Technology: Ed. B. J. Grenon, G. T. Dao, Monterey, USA, 3-5 Oct. 2001 / SPIE. – San-Diego, CA., 2001. - P. 43.
12. Cotte E., Engelstad R., Lovell E., Tansil D., Eschback F., Korobko Yu.O., Fujita M., Nakagawa H. Effects of Soft Pellicle Frame Curvature and Mounting Process on Pellicle-Induced Distortions in Advanced Photomasks // Book of Abstracts of XVI Optical Microlithography Conference: Ed. A.Yen, Santa Clara, California, USA, 25-28 Feb. 2003 / SPIE. – San-Diego, CA., 2003. - P. 104.



Карабко Юлія Алегаўна

ФАРМАВАННЕ СУБМІКРОННЫХ КМВП СТРУКТУР З ПАВЫШАНАЙ ДАКЛАДНАСЦЮ КРЫТЫЧНЫХ ПАМЕРАЎ МЕТАДАМІ ПРАЕКЦЫЙНАЙ ФОТАЛІТАГРАФІІ

Ключавыя словы: мікраэлектроніка, субмікронная фоталітаграфія, фоташаблон, лікавае мадэліраванне, элементы інтэгральных мікрасхемаў, кантроль крытычных памераў, тапалогія.

Мэтай дысертацыйнай працы з'яўляецца даследаванне ўплыва памылак тапалогіі на выхадныя характарыстыкі ІМС і распрацоўка з дапамогай фазазмешчальных фоташаблонаў метадаў мінімізацыі іх уплыва на фарміруемыя КМВП структуры з тапалагічнымі нормамаі праектавання 0,25 мкм і менш пры выкарастанні фоталітаграфічнага абсталявання папярэдняга пакалення.

Аб'ектам даследавання з'яўляюцца скажэнні тапалагічнага слоя, узнікаючыя пры пераносе з фоташаблона на крышталі з дапамогай метада фоталітаграфіі тапалагічнай інфармацыі аб паўправадніковых элементах, маючых памер 0,25 мкм і менш.

У дысертацыйнай працы разгледзены канструктыўна-тапалагічныя асаблівасці дызайна мікрасхемаў, звязаныя з складанасцю і абмежаванасцямі фоталітаграфічнага працэсу пры субмікронных тэхналогіях.

Прапанаваны арыгінальны метады ацэнкі ўплыва пагрэшнасці тапалогіі на выхадныя характарыстыкі элементаў ІМС з выкарастаннем фізічнага і аналітычнага мадэлявання. На прыкладзе інвертарнага ланцуга і трыгера, пры вар'іраванні памераў даўжыні і шырыні канала ад 5 да 20% ад іх імянальнага значэння было паказана, што часавыя характарыстыкі (час пераключэння і час запісу) ўзрастаюць нелінейна пры павялічэнні разбросу крытычных памераў. Як следства, рэкамендуецца ўлічваць імаверсныя паводзіны тапалагічных памераў на этапе дызайна схемы.

Для мінімізацыі памылак тапалогіі прапанавана выкарастоўваць фазазмешчальныя фоташаблоны, якія дазваляюць не толькі палепшыць разрашэнне аптычнай сістэмы, але таксама значна паменшыць паказчык пераноса памылак тапалогіі МЕЕФ. Гэтая рэкамендацыя пацверджана вопытным шляхам пры палучэнні кантактных структураў 0,18-0,22 мкм пры выкарастанні фоталітаграфіі ($\lambda = 248$ нм, $NA = 0,42$, $\sigma = 0,3$)

Распрацавана і ўжыта на практыцы тэхналогія палучэння фазазмешчальных фоташаблонаў. Разгледжаны складанасці вытворчага працэса выпрацоўкі фоташаблонаў і спосабы іх рашэння.

РЕЗЮМЕ

Коробко Юлия Олеговна

ФОРМИРОВАНИЕ СУБМИКРОННЫХ КМОП СТРУКТУР С ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТЬЮ КРИТИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ МЕТОДАМИ ПРОЕКЦИОННОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ

Ключевые слова: микроэлектроника, субмикронная фотолитография, фотошаблоны, численное моделирование, элементы интегральных микросхем, контроль критических размеров, топология.

Целью диссертационной работы является исследование влияния ошибок топологии на выходные характеристики ИМС и разработка с помощью фазосмещающих фотошаблонов методов минимизации их влияния на формируемые КМОП структуры с топологическими нормами проектирования 0,25 мкм и менее при использовании фотолитографического оборудования предшествующего поколения.

Объектом исследования являются искажения топологического слоя, возникающие при переносе с фотошаблона на кристалл с помощью метода фотолитографии топологической информации о полупроводниковых элементах, имеющих размеры 0,25 мкм и меньше.

В диссертационной работе рассмотрены конструктивно-топологические особенности дизайна микросхем, связанные со сложностями и ограничениями фотолитографического процесса при субмикронных технологиях.

Предложен оригинальный метод оценки влияния погрешностей топологии на выходные характеристики элементов ИМС с использованием физического и аналитического моделирования. На примере инверторной цепи и схемы триггера, при варьировании размеров длины и ширины канала от 5 до 20% от их номинального значения, было показано, что временные характеристики (время переключения и время записи) возрастают нелинейно при увеличении разброса критических размеров. Как следствие, рекомендуется учитывать вероятностное поведение схемы на этапе дизайна.

Для минимизации ошибок топологии предложено использовать фазосмещающие фотошаблоны, которые позволяют не только улучшить разрешение оптической системы, но также значительно уменьшить показатель переноса ошибок топологии МЕЕФ. Данная рекомендация подтверждена опытным путем при получении контактных структур 0,18-0,22 мкм при использовании фотолитографии ($\lambda = 248$ нм, $NA = 0,42$, $\sigma = 0,3$). Разработана и применена на практике технология получения фазосмещающих фотошаблонов. Рассмотрены сложности производственного процесса изготовления фотошаблонов и способы их решения.

SUMMARY

Korobko Yulia Olegovna

Patterning of the submicron CMOS structures with tight CD control specifications using optical microlithography

Keywords: microelectronics, submicron photolithography, reticle, numerical modeling, IC elements, CD control, layout.

The aim of the thesis is to investigate the impact of the defects of the layout on the characteristics of IC and to develop with the help of phase shift masks methods to minimize their influence forming CMOS structures with layout standards of design 250 nm and below using facilities of the previous generation.

The subject of the research is the defects of the layout layer, which are caused by image transfer of layout information about semiconductor elements of 250 nm and below from the reticle to the wafer, using photolithographic methods.

In the thesis the limitations for the IC layout design, caused by submicron lithography process were discussed and key issues to be addressed during the manufacturing were identified.

Suggested a unique methodology to assess of the influence of the layout defects on the electrical characteristics of IC subsystems. This methodology utilizes numerical modeling on the physical and electrical levels of IC description. By optimizing the analytical model through physical level transistor simulation, the accuracy of the subsequent circuit level simulation improves. It was shown, by using an example of inverter chain and latch, through the variation of the critical layout dimensions such as channel width and length from 5 to 20 %, that the instability of the circuits timing characteristics (such as delay for inverter chain and write time for latch) are exhibiting a non-linear response to the layout dimensions variations.

Through the computer modeling and experimental data on the manufacturing of 0.18-0.22 μm contact windows, using photolithography process ($\lambda = 248 \text{ nm}$, $\text{NA} = 0,42$, $\sigma=0,3$), the phase shifting masks were suggested for resolution improvements and patterning defects reduction.

The technology achieving PSM was developed and applied in practice. Issues in PSM manufacturing and application, as well as techniques to mitigate the problems were discussed.

Коробко Юлия Олеговна

**ФОРМИРОВАНИЕ СУБМИКРОННЫХ КМОП СТРУКТУР
С ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТЬЮ КРИТИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ
МЕТОДОМ ПРОЕКЦИОННОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ**

**05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах**

Автореферат

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Подписано в печать	10.02.2005.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.		Усл. печ. л. 1, 63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 90 экз.		Заказ 112.

Полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Лицензия на осуществление издательской деятельности №02330/0056964 от 01.04.2004.
Лицензия на осуществление полиграфической деятельности №02330/0133108 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6.