

На правах рукописи

КОРПАЧЕВ МАКСИМ ЮРЬЕВИЧ

**ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ
РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОЦЕССА
УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ЛИТОГРАФИИ**

Специальность: 05.13.12 – Системы автоматизации
проектирования (приборостроение)

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

МОСКВА – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технологический университет» (МИРЭА).

Научный руководитель: **Ивашов Евгений Николаевич,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Антамошкин Александр Николаевич,**
доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа и исследования операций ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева»

Павлов Александр Юрьевич,
кандидат технических наук, заведующий лабораторией № 106 ФГБУН «Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Защита состоится «22» декабря 2016 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 217.047.01 во ФГУП «Научно-исследовательский и экспериментальный Институт автомобильной электроники и электрооборудования» по адресу: 105187, Москва, ул. Кирпичная д. 39.

Автореферат разослан «__» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 217.047.01
доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Варламов О.О.

Актуальность работы

Начиная со второй половины XX века микроэлектронная промышленность имеет беспрецедентно высокие темпы развития. При этом рост основных качественных показателей микроэлектронных изделий за счет использования литографических технологий имеет экспоненциальный характер, что обеспечило в последнее десятилетие переход данной отрасли промышленности из индустрии микрообъектов в индустрию нанообъектов и нанотехнологий. Совершенствование технологических процессов ультрафиолетовой литографии как одной из основных движущих сил развития микроэлектронного производства требует дальнейшего решения задач по сокращению сроков проектирования и созданию методологий повышения качества ее основных параметров. Решение этих задач не может быть достигнуто за счет простого увеличения численности и квалификации проектировщиков и связано с анализом круга проблем по комплексной автоматизации проектирования процессов ультрафиолетовой литографии.

В настоящее время создано либо находится на стадии разработки большое количество литографических САПР, ориентированных на проектирование отдельных стадий технологического процесса, что, однако, не решает в целом комплексную задачу обеспечения высоких темпов роста микроэлектронного производства. Сложившаяся ситуация требует разработки интегрированных САПР (ИН САПР), объединяющих этапы проектирования с элементами технологической подготовки производства. Такой перспективной САПР должна служить информационная система поддержки принятия решений при проектировании процессов ультрафиолетовой литографии применительно к производству современных поколений микро- и наноэлектронных изделий с повышенными потребительскими свойствами за счет разработки методов снижения характеристических размеров объектов ультрафиолетовой литографии, синтеза методологии многокритериального выбора установок ультрафиолетовой литографии из множества альтернатив, совершенствования параметров оптических систем, источников освещения, устройств совмещения и фотошаблонов, создания новых видов литографического оборудования.

Таким образом, разработка сквозной комплексной информационной системы поддержки принятия решений при проектировании процесса ультрафиолетовой литографии, совокупно охватывающей этапы проектирования с элементами технологической подготовки производства, является современной актуальной научно-технической задачей.

Цель работы

Целью диссертации является разработка элементов информационной системы поддержки принятия решений при проектировании устройств и технологических процессов ультрафиолетовой литографии, позволяющей существенно снизить временные затраты на проектирование, повысить качество проектных решений за счет сквозной автоматизации литографического производства с синтезом комплексно-интегрированных систем и проблемно-ориентированных модулей и обеспечить достижение оптимизированных характеристик по показателям экспонирования активного слоя, снижения характеристического размера создаваемых объектов, совершенствования технических решений в области формирования изображений на фотошаблоне, эффективности многокритериального альтернативного выбора и оценки качества и надежности функционирования ультрафиолетовых литографических установок из многофункциональных модулей, определения параметров оптических систем, источников освещения, устройств совмещения и фотошаблонов.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели необходимо осуществить следующие исследования:

1. Выполнить комплекс обзорно-аналитических исследований в области разработки систем поддержки принятия решений при проектировании процессов ультрафиолетовой литографии.

2. Произвести разработку теоретического подхода к решению задачи создания элементов автоматизированной системы поддержки принятия решений при проектировании процессов ультрафиолетовой литографии.

3. Выполнить математическое моделирование процессов формирования изображения в ультрафиолетовой литографии.

4. Разработать концептуальную модель ультрафиолетовой литографической системы и выполнить ее формализацию.

5. Произвести морфологический анализ-синтез при поиске литографических технологических решений с последующим созданием технических устройств формирования изображений на фотошаблоне.

6. Выполнить разработку имитационных моделей, проблемно-ориентированных алгоритмов и комплексно-интегрированных программных модулей, подлежащих включению в автоматизированную систему поддержки принятия решений при проектировании процессов ультрафиолетовой литографии.

7. Произвести оценку достоверности и адекватности математических моделей оптимального управления процессами ультрафиолетовой литографии и эффективности использования разработанной системы поддержки принятия решений посредством верификации изложенных в работе теоретических положений и алгоритмов.

Объектом исследования являются процессы синтеза проектно-технологических решений в области использования ультрафиолетовой литографии при разработке и изготовлении устройств микро- и нанoeлектроники.

Предметом исследования является комплексная автоматизация процессов проектирования литографического технологического оборудования и синтеза моделей применения ультрафиолетовой литографической технологии на основе разработки специализированной системы поддержки принятия решений.

Методы исследований

Методологической основой диссертационного исследования является концептуальное применение системного подхода. Методами исследования, используемыми в работе при решении поставленных задач, являются прикладные положения теории систем, методы теории автоматизированного управления, теории множеств, теории вероятности и математической статистики, теории принятия решений, теории нечетких множеств, теории дифференциальных уравнений. В работе проводится обобщающий последовательный анализ существующих решений в области проектирования и реализации технологических процессов ультрафиолетовой литографии. В диссертационном исследовании также используются современные методики компьютерного моделирования и программирования.

Научная новизна

Новизна результатов диссертационной работы определяется следующими научными положениями:

1. Математической моделью формирования фотолитографического изображения, позволяющей в отличие от существующих моделей вычислять распределение интенсивности изображения произвольного фазосдвигающего шаблона при заданных условиях освещения с заданными характеристиками системы формирования изображения.

2. Разработкой модифицированного дискриминационного метода решения задачи выбора материалов для ультрафиолетовой литографической технологии, основанного на применении непараметрических методов обработки информации и алгоритмической восходящей классификации информации при проектировании процесса ультрафиолетовой литографии.

3. Разработкой метода исследования характеристик качества функционирования ультрафиолетовых литографических установок, позволяющего определить коэффициент готовности при заданной вероятности выполнения поставленной задачи в процессе

формирования объектов ультрафиолетовой литографической технологии с необходимыми свойствами.

4. Разработкой алгоритма выбора вариантов технологических решений в области процессов формирования удовлетворяющих техническим заданиям объектов с применением ультрафиолетовой литографии на основе рационального и причинно-обусловленного выбора из множества Парето.

5. Разработкой комплекса элементов автоматизированной и структурированной системы поддержки принятия решений при проектировании процессов ультрафиолетовой литографии, основанной на предложенных имитационных моделях, проблемно-ориентированных алгоритмах и комплексно-интегрированных программных модулях.

Практическая значимость

1. Разработана информационная система поддержки принятия решений в области проектирования процессов ультрафиолетовой литографии, обеспечивающая эффективный синтез усовершенствованных устройств микро и нанoeлектроники в современных вычислительных комплексах.

2. Предложен адаптированный для технологической реализации метод скалярного и векторного моделирования распределения интенсивности монохроматического поля излучения на плоскости изображения фотошаблона.

3. Разработаны методы снижения минимального характеристического размера при автоматизированном проектировании объектов ультрафиолетовой литографии, базирующиеся на предложенной в диссертации формализованной концептуальной модели ультрафиолетовой литографической системы.

4. Предложены патентоспособные и адаптированные для промышленного применения технические решения по созданию устройств формирования изображения на подложке и устройств формирования нанообъектов, отвечающие требованиям, предъявляемым к прецизионному оборудованию и оборудованию точного приборостроения.

5. Разработано специализированное программное приложение для расчета основных характеристик ультрафиолетовой литографической системы, позволяющее определять минимальный разрешаемый размер элемента формируемой топологии, глубину сфокусированного изображения фотошаблона, а также время экспонирования заданного количества пластин и производительность литографической системы.

Достоверность результатов

Достоверность результатов диссертационного исследования обеспечивается строгой математической обоснованностью и корректностью применяемых подходов и методов, использованием признанных апробированных платформ для разработки специализированных программных приложений, а также непосредственной согласованностью полученных в работе выводов и заключений в ряде частных случаев с опубликованными результатами исследований других авторов.

Реализация и внедрение результатов работы

Теоретические и прикладные результаты диссертационного исследования получили практическое применение при автоматизации проектирования электронно-вычислительных систем и комплексов управления в Научно-исследовательском институте предельных технологий, а также в учебном процессе при обучении студентов в МИЭМ НИУ ВШЭ, департамента электронной инженерии в процессе преподавания лекционного материала по курсам «Технология производства электронных средств» и «Системы автоматизированного управления оборудованием», а также в дипломном проектировании студентов департамента.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель формирования фотолитографического изображения, позволяющая вычислять распределение интенсивности монохроматического поля излучения произвольного фазосдвигающего шаблона при заданных условиях освещения с заданными характеристиками системы формирования изображения.

2. Модифицированный дискриминационный метод подбора материалов для ультрафиолетовых литографических технологий, а также методика его практической реализации в качестве элемента информационной системы поддержки принятия решений при проектировании процессов ультрафиолетовой литографии.

3. Алгоритм поиска эффективных литографических технологических решений и предложенные на его основе технические решения по синтезу устройств формирования изображения на подложке и устройств формирования нанообъектов для ультрафиолетовой литографической технологии.

4. Обобщенный критерий качества в автоматизированном проектировании технологического оборудования ультрафиолетовой литографии.

Апробация работы

Основные научные результаты диссертационной работы были представлены в 32 докладах на Международных, Всероссийских и ведомственных научно-технических и научно-практических конференциях, в том числе на:

– Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения – «INTERMATIC» (г. Москва, МИРЭА, 2009, 2010, 2012 гг.);

– XV Международной научно-технической конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы» (г. Ульяновск, УлГУ, 2012 г.);

– IX, X Международной научно-практической конференции «Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий» (г. Сочи, МИЭМ НИУ ВШЭ, 2012-2013 гг.);

– Научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов (г. Москва, МИЭМ НИУ ВШЭ, 2012-2013 гг.);

– II Международной научно-практической конференции «Инновационные информационные технологии» (Прага, Чехия, 2013 г.);

– Научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов (г. Москва, НИУ ВШЭ, 2014 г.);

– Научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов (г. Москва, НИУ ВШЭ им. Е.В. Арменского, 2015 г.).

Публикации

По теме диссертации автором опубликованы 53 научные работы, из них 5 публикаций в изданиях, входящих в перечень ВАК, в том числе 1 работа, входящая в международный перечень Scopus, 12 патентов РФ на полезные модели, 2 свидетельства РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 205 страницах общего текста и состоит из введения, пяти глав, заключения с основными выводами и результатами, списка использованных источников и приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено обоснование актуальности проблемы создания информационной системы поддержки принятия решений при проектировании процесса ультрафиолетовой литографии и охарактеризована степень разработанности темы диссертации, определены цели и задачи работы, описаны методы исследования, дана характеристика научной новизны, достоверности, практической значимости, общего вклада автора в решение поставленных задач, апробации результатов исследований, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Дана характеристика публикаций по теме диссертации и структурных особенностей работы.

В первой главе работы представлено обзорно-аналитическое исследование по проблеме разработки систем автоматизированного проектирования технологических процессов ультрафиолетовой литографии. Рассмотрена сопоставительная характеристика

основных видов литографических технологий – контактной ультрафиолетовой литографии, проекционной литографии и литографии в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне с использованием отражательной оптики. Приводятся физические основы процесса экспонирования фоторезиста, дается обоснование целесообразности применения основных методов повышения разрешающей способности, таких, как коррекция эффекта оптической близости, методика внеосевого освещения, использование фазосдвигающих масок, двойное формирование рисунка.

Рассмотрены подходы к созданию универсальной литографической СППР на основе автоматизации основных стадий анализа-синтеза технических решений при проектировании процессов изготовления микросистемных изделий литографическим способом.

Показана целесообразность применения методик функционального моделирования литографических процессов в автоматизированных средах, применения процедурной модели проектирования и IDEF методологии.

Выполнен анализ основных статических, динамических и графоаналитических методов моделирования процессов создания изделий литографическим методом, что создает основу для теоретических и экспериментальных исследований в области создания комплексной литографической СППР.

Вторая глава посвящена синтезу теоретического подхода к решению задачи поддержки принятия решений при проектировании процессов ультрафиолетовой литографии, включая разработку специализированных программно-технических средств, объединенных в технологическую цепочку с отраженной на рис. 1. структурой.

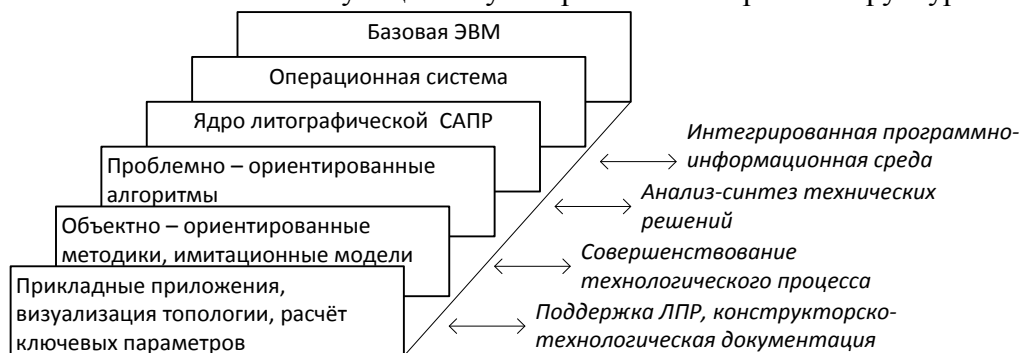


Рис. 1 Структура САПР для поддержки принятия решений в области технологических процессов ультрафиолетовой литографии

В контексте рассматриваемой проблемы предложена описываемая на рис. 2. функциональная схема СППР для технологических процессов ультрафиолетовой литографии (ТП УФЛ), включающая подсистемы управления процессами проектирования; оперативного взаимодействия проектировщика с СППР, информационно-поисковой системы (ИПС) и системы обработки проектной информации и документирования.

Реализуемая разработка основана на предлагаемой концептуальной модели литографической технологической системы с набором компонентов и правил, включающим A – целевую характеристику литографического процесса; $E\{e_i\}$ – множество элементов, составляющих систему технологического процесса ультрафиолетовой литографии; $T\{t_\tau\}$ – множество элементов времени, характеризующих литографический процесс; $P_i\{p_i^j\}$ – множество признаков, характеризующих литографическую систему, как целое на всех этапах технологического процесса ультрафиолетовой литографии; $S^\tau\{s_i^\tau\}$ – множество состояний элементов литографической системы в некоторый промежуток времени;

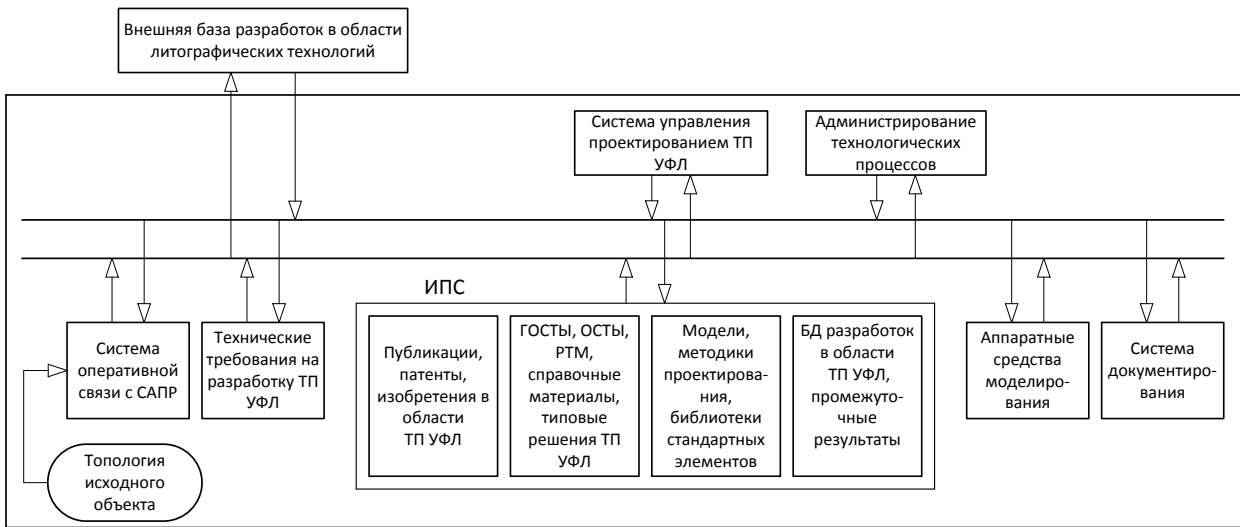


Рис. 2 Функциональная схема СППР для технологических процессов ультрафиолетовой литографии

$H = S^{\tau} \times T$ – упорядочивающее правило смены состояний; $Q\{e_i, e_k\}$ – множество связей между элементами литографической системы; $F : \{p_{\zeta}^j = f_m(p_i^j)\}$ – математические модели, описывающие связи между признаками для элементов и признаками для систем; $P_c\{p_c\}$ – множество признаков, определяющих взаимодействие литографической системы с условной внешней средой. Для описания элементарной операции технологического процесса предложено использовать соотношение вида

$$Q_m = s_i^{\tau} \succ s_i^{\tau+1},$$

в котором s_i^{τ} – состояние элемента литографической системы e_i ; Q_m – элементарная операция. Синтез математических моделей технологического процесса ультрафиолетовой литографии, строящихся на базе структурного описания проектируемой системы, предложено осуществлять на множестве элементов E , характеризуемых множеством признаков P_{ζ} и связей Q , на всех этапах технологического процесса $\tilde{L}P_s = \{E, P_{\zeta}, Q\}$. Соответственно для динамических моделей литографических процессов, включающих множество признаков взаимодействия проектируемой системы со средой P_c , множество элементов времени T и правил взаимодействия между признаками элементов и признаками системы введено описание $\tilde{L}P_D = \{P_c, T, F : (p_{\zeta}^j = f_m(p_i^j))\}$,

В качестве инструмента анализа моделей литографических процессов при значительном объеме статистических данных и ограничений, вызванных параметрами технологического процесса, предложено использование методики дискретного математического программирования

$$\begin{cases} \text{extr}_{X \in XD} A(x), \\ XD = \{X \in D; \varphi(X) \geq 0, \Psi(X) = 0\}, \end{cases}$$

где $A(x)$ – целевая функция, X – вектор управляемых параметров на множестве D , $\varphi(X)$ и $\Psi(X)$ – вектор-функции ограничений. Предложенная методика рекомендована, в частности, для поиска эффективной процедуры выбора состава литографического технологического оборудования при задании в качестве X количества треков с экспонируемыми подложками, функции $A(x)$ как минимального характеристического размера элемента, функции $\varphi(X)$ как показателя производительность системы, ее надежности, занимаемой площади, энергопотребления и т.д. Для автоматизированного проектирования технологических процессов ультрафиолетовой литографии в данном разделе диссертационной работы предложен алгоритм, представленный на рис. 3.

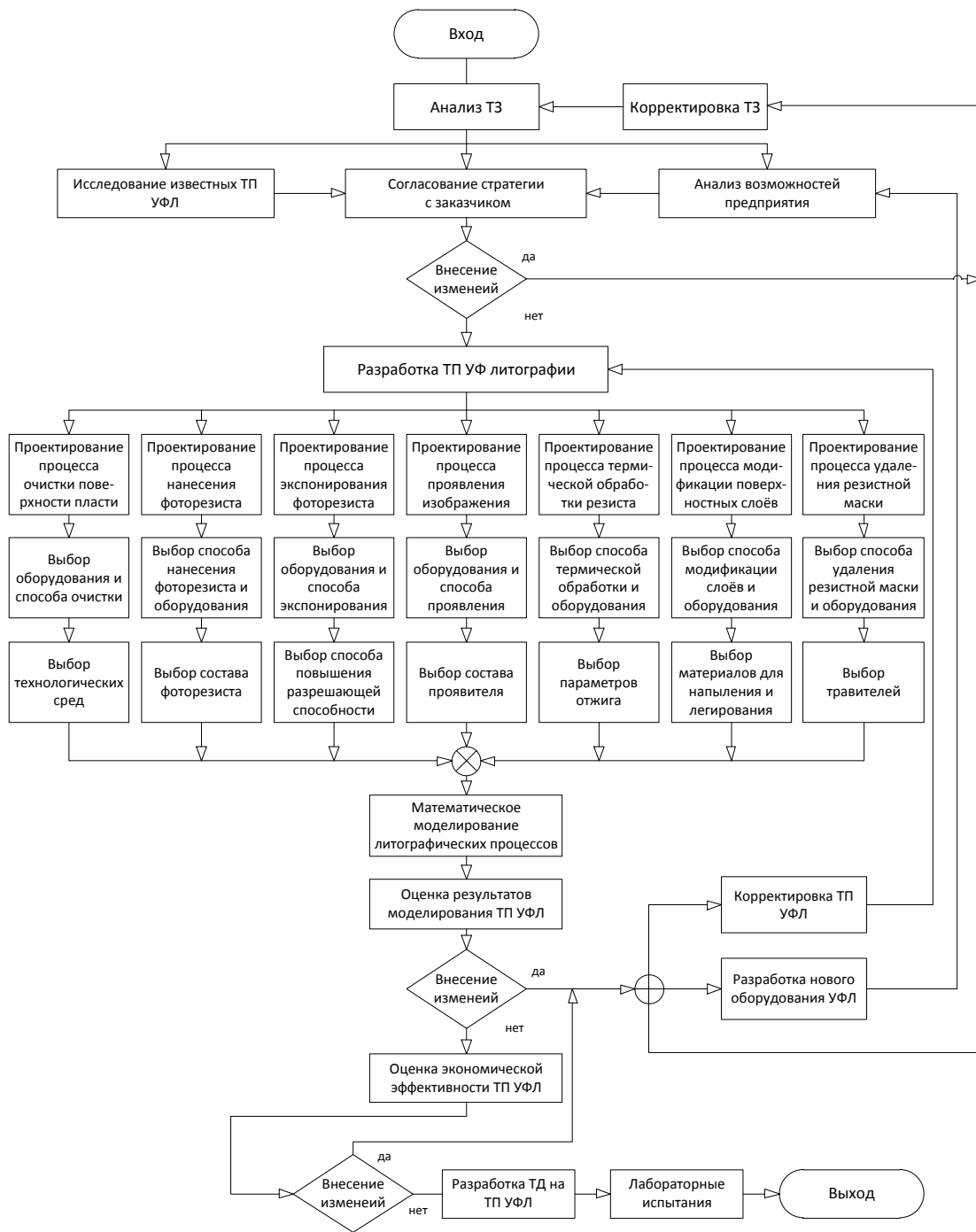


Рис. 3 Алгоритм проектирования процесса УФЛ

Третья глава диссертационной работы посвящена построению физико-математических моделей процессов формирования объектов с применением ультрафиолетовой литографической технологии.

Для моделирования процесса формирования изображения в ультрафиолетовой литографии предложена адаптированная методика вычисления интенсивностей освещения произвольного фотшаблона при определенных условиях в литографической установке с заданными характеристиками. В представленной на рис. 4. схеме моделирования процесса формирования изображения используются канонические координаты плоскости источника освещения ψ_x, ψ_y ; канонические координаты плоскости предмета γ_x, γ_y ; канонические координаты плоскости зрачка ω_x, ω_y ; канонические координаты плоскости изображения ϕ_x, ϕ_y , а непосредственно синтезируемая математическая модель процесса формирования

изображения в канонических координатах обладает свойствами описания дифракции в оптической системе и осуществляется преобразованием Фурье без масштабных множителей; представления плоскости изображения и плоскости зрачка выполнены в одинаковом масштабе $\omega_x = \varphi_x$, $\omega_y = \varphi_y$; применимы соотношения:

$$\alpha_x = \gamma_x / \varphi_x, \alpha_y = \gamma_y / \varphi_y$$

для описания коэффициента увеличения α в оптической системе; описания области зрачка кругом; представления всех влияющих факторов в виде зависимостей и ограничений. Функция распределения яркости $S(\psi_x, \psi_y)$ в модели характеризует так называемый эффективный источник произвольной формы с некоторыми произвольными размерами, а воздействие бесконечно тонкого фотошаблона в рамках скалярной теории дифракции описывается функцией $T(\gamma_x, \gamma_y) = t(\gamma_x, \gamma_y) \cdot e^{[i\alpha(\gamma_x, \gamma_y)]}$ комплексного пропускания излучения, проходящего через предмет, в которой $t(\gamma_x, \gamma_y) = [T(\gamma_x, \gamma_y)]$ – функция пропускания по амплитуде, $\alpha(\gamma_x, \gamma_y) = \text{arg}[T(\gamma_x, \gamma_y)]$ – функция пропускания по фазовому сдвигу на предмете.

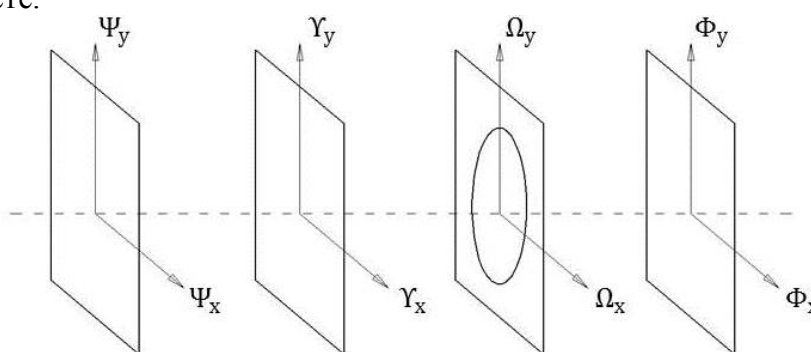


Рис. 4 Схема моделирования процесса формирования изображения в ультрафиолетовой литографии

Таким образом, оптическая система литографического оборудования воздействует на проходящее излучение, согласно следующим правилам:

- 1) Конечные размеры оптической системы и ее апертурной диафрагмы, является фактором ограничивающим размеры проходящего поля.
- 2) Потеря энергии на преломление, отражение и рассеивание в оптической системе, существенно ослабляет амплитуду проходящего поля.
- 3) Наличие aberrаций в оптической системе существенно влияет на фазу проходящего поля.

Суммарное воздействие на проходящее излучение всех описанных выше факторов представлено в виде зрачковой функции, в канонических координатах:

$$f(\omega_x, \omega_y) = \begin{cases} \sqrt{\sigma(\omega_x, \omega_y)} e^{[-2\pi i W(\omega_x, \omega_y)]} & , \omega_x^2 + \omega_y^2 \leq 1; \\ 0, & \omega_x^2 + \omega_y^2 > 1; \end{cases}$$

где $\sigma(\omega_x, \omega_y)$ – функция амплитудного пропускания, отражающая энергетические потери при прохождении излучения, $W(\omega_x, \omega_y)$ – функция волновой aberrации, отражающая фазовые изменения проходящего через объектив излучения. Условия в зрачковой функции описывают ограничение размеров проходящего через объектив литографической системы волнового поля излучения.

Исходными данными для разработки оптических систем литографического оборудования, являются результаты моделирования качественных характеристик процесса формирования изображения, для чего применимо разложение функции волновой aberrации $W(\omega_x, \omega_y)$ по ортогональному базису полиномов Цернике в зрачковых канонических

координатах. Если ограничиться полиномами степени не выше p , в полярных координатах, такое разложение примет вид:

$$W(\omega, \alpha) = \sum_{n=0}^p \sum_{m=0}^n c_{nm} R_n^m(\omega) \cos(m\alpha) + \sum_{n=1}^p \sum_{m=1}^n s_{nm} R_n^m(\omega) \sin(m\alpha),$$

где $m+n$ – четные числа, $\omega = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}$, $\alpha = \arcsin\left(\frac{\omega_x}{\omega}\right) = \arccos\left(\frac{\omega_y}{\omega}\right)$,

c_{nm} и s_{nm} – коэффициенты разложения, служащие моделями aberrаций оптической системы, $R_n^m(\omega)$ – радиальные полиномы Цернике.

Одной из основных характеристик оптической системы литографического оборудования, является способность снижения размерности элемента в топологии исходного изображения фотошаблона. Для решения данной задачи применяется способ коррекции оптического эффекта близости в процессе проектирования промежуточных фотошаблонов (рис. 5).

При экспонировании элементов топологии на изображении фотошаблона с размерами, равными и меньшими критического размера по Аббе – Рэлею, изображение фотошаблона претерпевает дифракционные искажения, имеющие вид, сужений или недоэкспонирования длинных узких линий, укорачивание и округление концов, затемнение узких зазоров и смазывание острых углов.

Искажения такого рода целесообразно корректировать, создавая упреждающие и компенсирующие элементы на фотошаблоне в виде вырезов и наплывов.

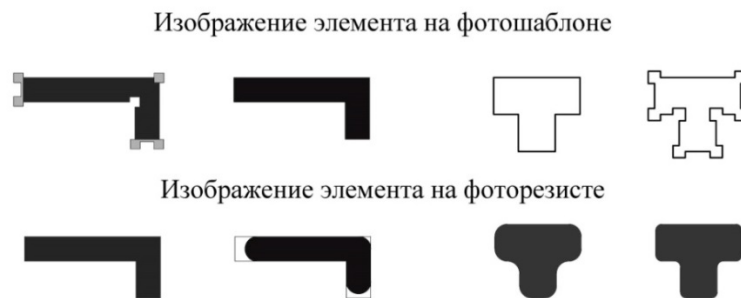


Рис. 5 Коррекция оптического эффекта близости на примере «Г» и «Т» образных элементов топологии.

При интерпретации данных элементов для автоматизации построения топологии фотошаблона применимы методы и двумерного отображения Сэммона, выполняющие отображение множества направляющих векторов многомерной структуры элементов в пространство на плоскости, с сохранением расстояний между ними. Производится минимизация функции потерь, характеризующая изменение дистанций между первоначальными и полученными векторами в пространстве малой размерности.

$$\varepsilon = \frac{1}{\sum_{i<j} d_{ij}} \cdot \sum_{i<j}^X \frac{(d_{ij} - d_{ij}^*)^2}{d_{ij}}$$

где d_{ij} и d_{ij}^* – дистанции между элементами i и j , соответственно, в многомерном и двумерном пространстве, N – количество элементов.

Использование триангуляции, позволяет снизить вычислительную сложность данного метода для отображения произвольного количества элементов $M < N$. Осуществляется последовательное добавление $(M - N)$ элементов, при этом для каждого элемента o_i , $i = (M+1) \dots N$ выбирается два элемента o_j , o_k , $j, k = 1 \dots M$ из числа уже спроецированных, а положение $(y_{i1}; y_{i2})$ элемента o_i на плоскости определяется, исходными соотношениями, обеспечивая точное сохранение расстояний между рассматриваемыми элементами, $d_{ij} = d_{ij}^*$, $d_{ik} = d_{ik}^*$. Когда расстояния не сохраняются, за искомое положение элемента o_i берется точка $(y_{i1}; y_{i2})$ на отрезке $(y_{j1}; y_{j2})$ $(y_{k1}; y_{k2})$, для которой выполняется соотношение: $d_{ij}/d_{ik} = d_{ij}^*/d_{ik}^*$. Когда возможно выполнение приведенных соотношений и существует две

точки $(y_{i1}^1; y_{i2}^1)$ и $(y_{i1}^2; y_{i2}^2)$, то из набора уже спроецированных элементов берется еще один элемент o_s , $s = 1 \dots M$ и искомое положение, для минимального расстояния, определяется системой:

$$(y_{i1}; y_{i2}) = \begin{cases} (y_{i1}^1; y_{i2}^1), & \text{если } |d_{i1}^{1*} - d_{i1}| \leq |d_{is}^{2*} - d_{i1}|, \\ (y_{i2}^2; y_{i2}^2), & \text{если } |d_{i1}^{1*} - d_{i1}| > |d_{is}^{2*} - d_{i1}|, \end{cases}$$

здесь d_{i1}^{1*} и d_{is}^{2*} - дистанции от точек $(y_{i1}^1; y_{i2}^1)$ и $(y_{i1}^2; y_{i2}^2)$ до точки $(y_{s1}; y_{s2})$. Иначе, наилучшее положение элемента $(y_{i1}; y_{i2})$ считается единственным.

В ряде установок ультрафиолетовой литографии с целью повышения качественных характеристик системы формирования изображения и улучшения разрешающей способности всего технологического процесса применяется метод внеосевого освещения (рис. 6). Данный метод позволяет воспроизводить структуру фотошаблона, состоящую из светлых и темных полос, имеющих период превышающий разрешение объектива. Для этого фотошаблон освещается наклонными пучками излучения, для образования которых в оптический тракт осветителя помещается диафрагма с двумя отверстиями.

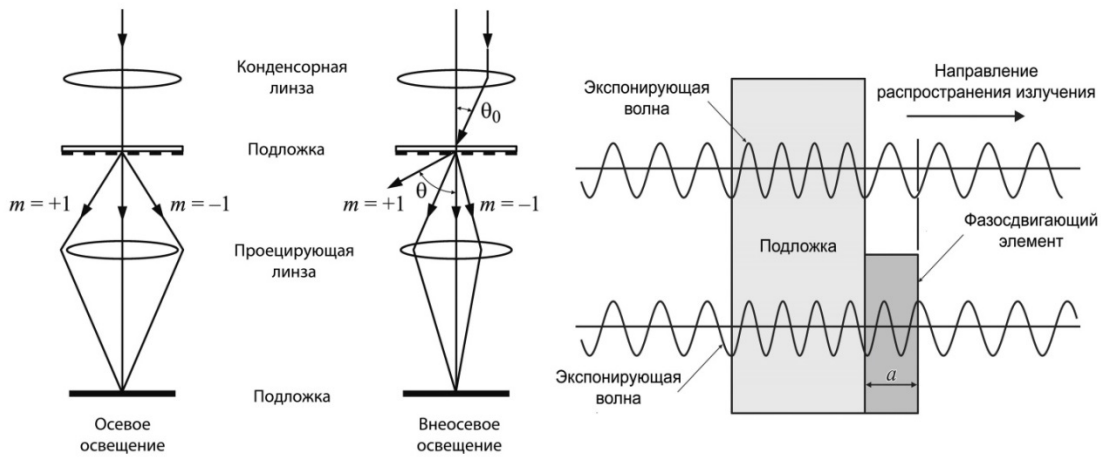


Рис. 6 Схематическое изображение установок ультрафиолетовой литографии с осевым и внеосевым методом освещения

В случае внеосевого освещения, процесс формирования изображения можно дополнительно представить в виде двух потоков электромагнитного излучения. При этом уравнение для двух связанных степеней свободы имеет вид:

$$\begin{cases} L_1 = f_1(s_1, s_2), \\ L_2 = f_2(s_1, s_2); \end{cases}$$

Дифференцируя полученное уравнение имеем:

$$\begin{aligned} \frac{dL_1}{dx} &= \frac{dL_1}{ds_1} \cdot \frac{ds_1}{dx} + \frac{dL_1}{ds_2} \cdot \frac{ds_2}{dx}; \\ \frac{dL_2}{dx} &= \frac{dL_2}{ds_1} \cdot \frac{ds_1}{dx} + \frac{dL_2}{ds_2} \cdot \frac{ds_2}{dx}. \end{aligned}$$

Помножим уравнения на коэффициенты C_{11} и C_{22} , тогда:

$$\begin{aligned} C_{11} \frac{dL_1}{dx} &= C_{11} \frac{dL_1}{ds_1} \cdot \frac{ds_1}{dx} + C_{11} \frac{dL_1}{ds_2} \cdot \frac{ds_2}{dx}; \\ C_{22} \frac{dL_2}{dx} &= C_{22} \frac{dL_2}{ds_1} \cdot \frac{ds_1}{dx} + C_{22} \frac{dL_2}{ds_2} \cdot \frac{ds_2}{dx}. \end{aligned}$$

Левая часть полученных уравнений выражает полные потоки s_1, s_2 :

$$j_1 = -C_{11} \frac{dL_1}{dx}; \quad j_2 = -C_{22} \frac{dL_2}{dx}.$$

Положим градиент второго потенциала равным нулю $\left(\frac{dL_2}{dx} = 0\right)$, в этом случае второй поток отсутствует, тогда слагаемое $\left(\frac{dL_1}{ds_1} \cdot \frac{ds_1}{dx}\right)$, в первой формуле, представляет собой общую

силу $X_1 = -\frac{\partial L_1}{\partial s_1} \cdot \frac{ds_1}{dx}$, первого потока. Аналогично при отсутствии первого потока для второй формулы получим: $X_2 = -\frac{\partial L_2}{\partial s_2} \cdot \frac{ds_2}{dx}$. Из выражений X_1 и X_2 находим производные:

$$\frac{ds_1}{dx} = -\frac{X_1}{\frac{\partial L_1}{\partial s_1}}, \quad \frac{ds_2}{dx} = -\frac{X_2}{\frac{\partial L_2}{\partial s_2}}.$$

Выполняя подстановку, получаем:

$$\begin{cases} j_1 = C_{11}X_1 + C_{12}X_2, \\ j_2 = C_{21}X_1 + C_{22}X_2; \end{cases}$$

где приняты обозначения:

$$C_{12} = C_{11} \frac{\partial s_2}{\partial L_2}, \quad C_{21} = C_{22} \frac{\partial s_1}{\partial L_1}.$$

Эти уравнения определяют процессы в литографической установке использующей схему внеосевого освещения с количественной точки зрения.

Таким образом, наряду с функцией распределения яркости на источнике, функцией комплексного пропускания излучения и зрачковой функцией, мы получаем полную математическую модель формирования изображения в ультрафиолетовой литографической системе.

Четвертая глава посвящена созданию методов выбора оптимальных технологических решений для ультрафиолетовой литографии.

Процесс создания наиболее оптимального технологического решения начинается с оценки возможных технических и технологических вариантов решения поставленной задачи, затем происходит ранжирование вариантов по оценкам, в процессе которого выделяется вариант с наивысшей оценкой.

Представим отображение множества вариантов технических и технологических решений для ультрафиолетовой литографии на множество оценок, тогда выбор оптимального варианта имеет вид:

$$(F: X \rightarrow V) \rightarrow opt$$

Для принятия оптимального решения в ультрафиолетовой литографической технологии приходится сравнивать варианты по множеству признаков, причем по одним критериям лучшими оказываются одни варианты, а по другим другие. Важность используемых критериев также различна. Тогда вариант технического и технологического решения можно представить как: $\rho_j; j = \overline{1, n}$. Совокупность критериев для оценки вариантов, имеет вид: $V = \{v_i; i = \overline{1, m}$.

Для создания набора критериев, наиболее адекватных задачам оптимизации, выбираются признаки, оказывающие максимальное влияние на цели проектирования.

В технических задачах для ультрафиолетовой литографической технологии генерация решения, оптимального по всем параметрам, практически невозможна – приходится находить компромисс. Причем компромиссом, в одном случае является уравнивание важности различных критериев, в другом – выделение главного критерия.

Поиск компромиссного решения позволяет свести многокритериальную задачу к однокритериальной, используя принципы выделения главного критерия, справедливой уступки, равномерности и последовательной уступки.

Для реализации принципа равномерности необходимо:

1. Уравнивание значимости используемых критериев

$$opt_{V \in \Omega_i} = opt_{V \in \Omega_v^k} V = \{\bar{v}_1 = \bar{v}_2 = \dots = \bar{v}_k\} \in \Omega_v^k,$$

где Ω_i – отображение области возможных технических и технологических решений для ультрафиолетовой литографии в пространстве V ; Ω_v^k – подмножество компромиссных критериев; \bar{v}_k – оптимальное значение элемента на множестве критериев.

2. Оптимизация наихудших критериев

$$opt_{V \in \Omega^k} = \max \min v_i$$

3. Квазиравенство критериев, то есть принятие набора неравных критериев, равными с некоторой, заранее заданной погрешностью.

Выполнение принципа справедливой уступки возможно, если сумма абсолютного уровня снижения одного или нескольких критериев не становится больше суммы абсолютного уровня повышения других критериев. По данному условию максимальная сумма критериев выполняется, когда:

$$opt_{V \in \Omega^k} = \max \sum_{i=1}^k v_i,$$

где Ω_V – множество компромиссных критериев, v_i – значение i -ого критерия.

В ходе разработки технических и технологических решений в ультрафиолетовой литографии необходимо анализировать не только экономическую целесообразность производства и эксплуатации изделий микро- и нанoeлектроники, но также подвергать анализу затраты на саму разработку и проектную деятельность. Интегральная величина таких затрат имеет вид: $\Phi(\tau) = \int_0^{\tau_n} P(\tau) d\tau$, где $P(\tau)$ – зависимость затрат от времени, τ_n – время затраченное на разработку проекта. Суммарный доход за период эксплуатации: $\Psi(\tau) = \int_0^{\tau_Y} I(\tau) d\tau$, где $I(\tau)$ – функция прибыли от времени, τ_Y – время полезной эксплуатации микроэлектронного изделия. Текущая прибыль предприятия изготовителя: $f(\tau) = I(\tau) - P(\tau)$. Полная прибыль $F(\tau) = \int [I(\tau) - P(\tau)] d\tau$.

При выборе наиболее оптимальных технических и технологических решений в ультрафиолетовой литографии приходится учитывать многокритериальность большинства задач оптимизации, так как реализация литографического технологического процесса должна одновременно удовлетворять большому числу критериев эффективности: (f_1, f_2, \dots, f_n) .

Различают функциональные, технологические, структурные, экономические и экологические локальные критерии.

I. Функциональные:

- 1) разрешающая способность,
- 2) числовая апертура,
- 3) глубина фокуса,
- 4) точность совмещения;

II. Технологические:

- 1) диаметр пластины,
- 2) размер кадра,
- 3) время экспонирования,
- 4) давление разряда в рабочей камере,
- 5) время выхода на рабочий режим,
- 6) выход годных;

III. Структурные:

- 1) оптимальное количество литографических установок,
- 2) класс чистоты производственного помещения;

IV. Экономические:

- 1) стоимость нормо-часа,
- 2) производительность,
- 3) окупаемость;

V. Экологические:

- 1) выброс загрязняющих веществ,
- 2) уровень электромагнитного излучения.

В качестве основной концепции многокритериальной оптимизации выступает концепция недоминируемых точек в критериальном пространстве (множество Парето). Исходя из паретовской концепции реализация литографического процесса $F(x)$ может быть оценена по p критериям качества f_1, f_2, \dots, f_p .

Тогда оптимизация процесса принимает вид:

$$F(X) = \{f_1(X), f_2(X), \dots, f_p(X)\} \rightarrow \min_{X \in D \subset R^n},$$

здесь D – конечное и счетное множество допустимых вариантов технологических решений для ультрафиолетовой литографии.

$$X^0 \in D_p \stackrel{def}{\iff} (\exists X \in D); \\ ((f_i(X) \leq f_i(X^0), i = \overline{1, p}) \wedge \exists i_0 (f_{i_0}(X) < f_{i_0}(X^0))).$$

Принятое технологическое решение $X^0 \in D$ считается недоминируемым (паретовским, неуплощаемым), если на конечном и счетном множестве допустимых вариантов технологических решений для ультрафиолетовой литографии D не существует такого решения, которое по основным значимым функциям считалось бы не хуже, чем X^0 и являлось бы строго лучшим X^0 по хотя бы одной значимой функции.

Множеством Парето, в пространстве альтернативных вариантов решений в ультрафиолетовой литографической технологии (пространство переменных), является множество D_i всех оптимальных точек.

Множеством Парето в пространстве критериев (на множестве критериальных точек) – является множество:

$$M = f(D_M) = \{(f_1(X), f_2(X), \dots, f_p(X)) \in R^0, X \in D_M\}.$$

Для любого варианта технического и технологического решения в ультрафиолетовой литографии, не являющегося элементом паретовского множества D_M , найдется вариант на множестве D_M , имеющий по всем значимым функциям значения, не хуже чем у этого технического и технологического решения, а хотя бы по одной значимой функции – лучше.

Таким образом, решая многокритериальную задачу оптимизации, мы выбираем вариант технического и технологического решения для ультрафиолетовой литографии из множества Парето, так как любое другое решение можно улучшить паретовским, как минимум по одному значимому параметру без ухудшения других.

Пятая глава посвящена генерации алгоритмов поиска проектных решений из ряда недоминируемых альтернатив при проектировании процесса ультрафиолетовой литографии.

Каждое принимаемое решение в ультрафиолетовой литографической технологии должно привести к ряду позитивных изменений в производственном процессе. В работе анализируется степень соответствия возможных изменений желаемому результату, при определении целесообразности того или иного технического проекта в литографической технологии. Пусть нечёткой цели поиска наилучшего проектного решения в пространстве возможных решений будет поставлено в соответствие нечёткое подмножество C исходного универсального множества вариантов X . Достижение поставленной цели, возможно, осуществить с некоторой степенью принадлежности к наилучшим решениям $\mu_C(x)$, при некоторой степени выполнения заданного ограничения $\mu_G(x)$.

Тогда степень отождествления альтернативных решений x с наилучшими, определяется принципом наилучшего гарантированного результата:

$$\mu_O(x) = \min\{\mu_G(x), \mu_C(x)\} = \mu_G(x) \wedge \mu_C(x),$$

где $\mu_G(x)$, $\mu_C(x)$ – функции принадлежности, $O = G \cap C$. Проектным решениям, наилучшим в рассматриваемых условиях, соответствует подмножество $O \subseteq C$. с функцией принадлежности $\mu_O(x)$. Данное подмножество определяется пересечением нечеткого множества цели и нечетко ограниченного множества альтернативных проектных решений на множестве вариантов X .

Пусть принимаемому проектному решению соответствует m атрибутов выбора (состав оборудования, длина волны излучения, доза экспонирования, глубина фокуса, материал фоторезиста и т.д.), причём каждому выбору соответствует n значений атрибутов. Для k -ого проектного решения существует набор атрибутов $(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$, где $x_i^{(k)}$ –

значение i -ого атрибута. Обозначим как $A^{(k)}$ k -ую альтернативу, определяемую $(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$ и соответствующую некоторому варианту проектного решения в литографической технологии.

Воспользовавшись концепцией «идеальной точки» примем обозначение $A^*(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$, в качестве «идеальной» альтернативы, для которой x_i^* предпочтительней $x_n^{(k)} \forall k, i$.

$$x^* \in Arg \max_{\substack{\lambda \leq \mu_C(x), \\ \lambda \leq \mu_G(x)}} \lambda, \quad x \in X$$

Причем некоторым значениям x_i^* , может не иметься соответствующего атрибута, среди значений альтернатив $A^{(k)}$.

Если дать субъективную оценку i -го атрибута с помощью нечеткого множества H_i , то функция $f_{H_i}(x_i^{(k)})$ выразит предпочтительность варианта $A^{(k)}$ по i -му атрибуту.

$f_{H_i}(x_i^{(k)}) = 1$, т.к. x_i^* – наилучшее значение для i -го атрибута.

Выражая нечёткое множество H_i распределением вероятностей, получим:

$$p_i^{(k)} = \frac{f_{H_i}(x_i^{(k)})}{\sum_{l=1}^m f_{H_i}(x_i^{(l)})}$$

где $p_i^{(k)}$ – степень принадлежности $x_i^{(k)}$ нечеткому множеству H_i . Определяя неопределённость по i -му атрибуту через функцию энтропии, получим соотношение: $e_i = -M \sum_{k=1}^m p_i^{(k)} \ln p_i^{(k)}$. Здесь M – нормирующая константа, приводящее максимальное значение $e_i = 1$. Тогда, e_i , максимально, если $p_i^{(k)} = \frac{1}{m}$, отсюда, $M = \frac{1}{\ln m}$ и $0 \leq e_i \leq 1$. Итоговая неопределенность получается суммированием неопределенностей по каждому атрибуту

$$E = \sum_{i=1}^n e_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m p_i^{(k)} \ln p_i^{(k)}$$

Введём коэффициент сатисфакции, как

$$\bar{S}_i = \frac{1 - e_i}{\sum_{i=1}^n (1 - e_i)} = \frac{1 - e_i}{n - E},$$

где $0 < n \leq 1$. При значительной неопределённости по i -му атрибуту, величина e_i близка к единице и коэффициент сатисфакции мал. Высокая неопределённость относительного i -го, атрибута, варианта проектного решения, показывает что значительное количество проектных вариантов имеют схожие коэффициенты сатисфакции по отношению к i -му атрибуту и большого влияния на выбор альтернативы данный атрибут не оказывает.

Обозначим w_i – как относительные веса важности, заданные проектировщиком по i -му атрибуту априори. Определим дополненный весовой коэффициент, как

$$S_i = \frac{S_i w_i}{\sum_{i=1}^n \bar{S}_i w_i},$$

где $0 < i \leq 1$. Удалённость альтернативы $A^{(k)}$ от идеальной A^* , соответствует тому насколько значения атрибутов $A^{(k)}$ удовлетворяют представлениям проектировщика об идеальном проектном решении. Обозначим дополнение нечеткого множества H_i , через U_i и для которого выполняется $f_{U_i}(x_i^{(k)}) = 1 - f_{H_i}(x_i^{(k)})$.

Удаленность альтернатив проектных решений $A^{(k)}$ и A^* по i -му атрибуту, выражается как степень неудовлетворённости проектировщика значением i -го атрибута для $A^{(k)}$:

$$Dis^{(i)}[A^*, A^{(k)}] = Sif_{U_i}(x_i^{(k)}) = \left[\sum_{i=1}^n (Dis^{(i)}[A^*, A^{(k)}])^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Функция различимости по каждому i -му атрибуту, характеризуется значением $Dis^{(i)}$, значение $Dis^{(i)}[A^*, A^{(k)}]$ выражает среднеквадратичное отклонение $Dis^{(i)}$. Решение задачи поиска проектных решений из ряда недоминируемых альтернатив при проектировании процесса ультрафиолетовой литографии, является выбор альтернативы $A^{(k_0)}$, максимально приближенной к A^* .

$$Dis[A^*, A^{(k_0)}] = \min_k Dis[A^*, A^{(k)}]$$

Покажем также дополнительные условия выбора, полезные проектировщику:

$$Dis_{(1)}[A^*, A^{(k)}] = \sum_{i=1}^n Sif_{U_i}(x_i^{(k)}), Dis_{(2)}[A^*, A^{(k)}] = \max_i \{Sif_{U_i}(x_i^{(k)})\}$$

Решающий алгоритм выбора проектных решений из ряда недоминируемых альтернатив при проектировании процесса ультрафиолетовой литографии имеет вид блок-схемы (рис. 7).

На первой стадии алгоритма проектировщику предоставляется полный набор недоминируемых альтернатив, исходя из которых, проектировщик задаёт идеальную альтернативу.

Затем проектировщик задаёт правило предпочтительности $f_{H_i}(x_i^{(k)})$, выражающее степень предпочтительности k -ой альтернативы по i -му атрибуту $\forall k, i$, H_i – нечёткое множество выражающее субъективную оценку для i -го атрибута. Далее вводятся весовые коэффициенты относительной важности i -го атрибута.

На конечной стадии, после выполнения расчётов $Dis[A^*, A^{(k)}]$ и экспертной оценки получаем решение $A^{(k_0)}$.

Если полученное проектное решение не удовлетворяет проектировщика литографических процессов, то необходимо назначить заново правило предпочтительности $f_{H_i}(x_i^{(k)})$.

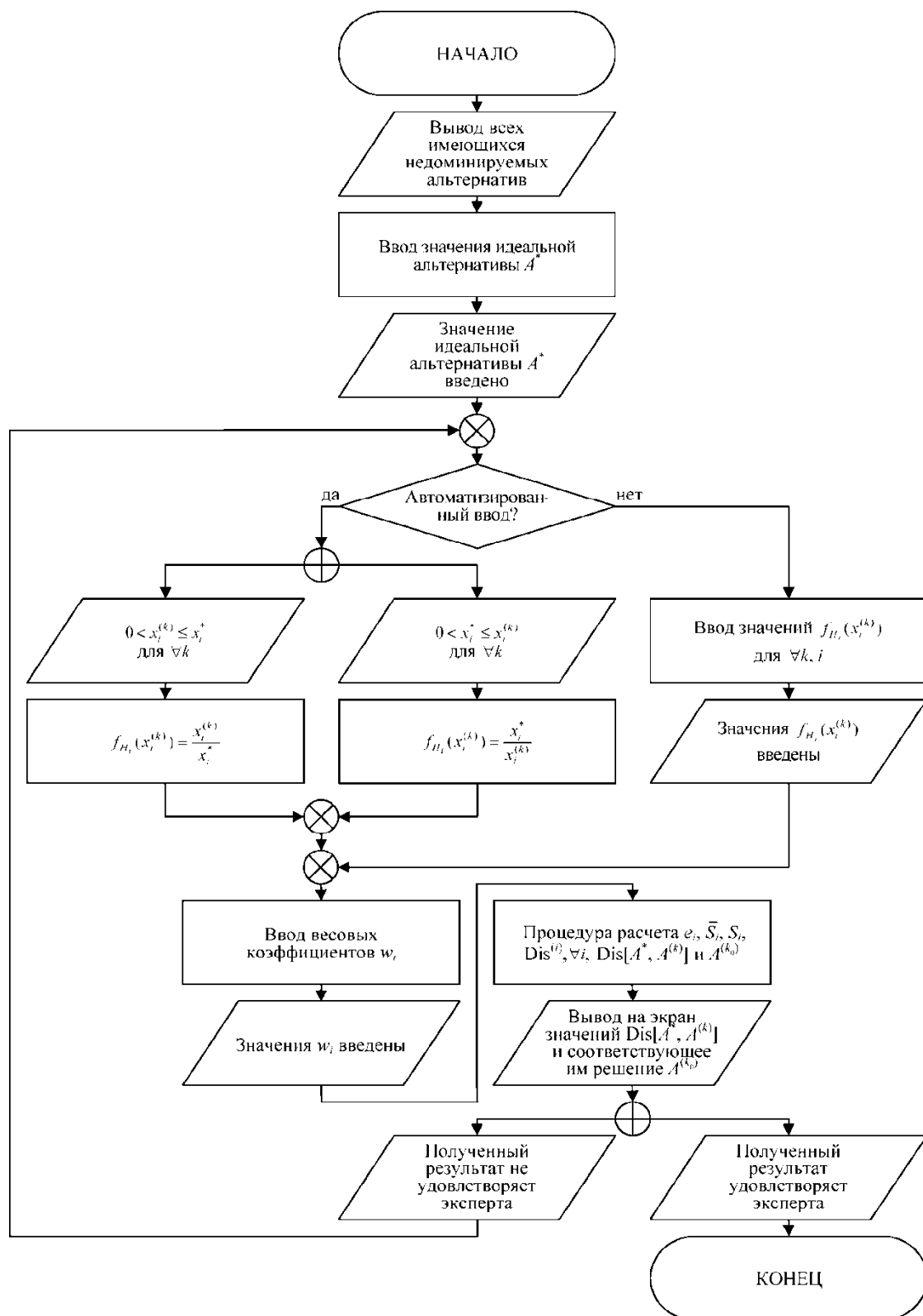


Рис. 7 Алгоритм выбора проектных решений из ряда недоминируемых альтернатив при проектировании процесса ультрафиолетовой литографии

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Диссертационная работа содержит решение актуальной научной задачи, заключающейся в разработке элементов информационной системы поддержки принятия решений при проектировании устройств и технологических процессов ультрафиолетовой литографии, позволяющей существенно снизить временные затраты на проектирование, повысить качество проектных решений за счет сквозной автоматизации литографического производства с синтезом комплексно-интегрированных систем и проблемно-ориентированных модулей и обеспечить достижение оптимизированных характеристик по показателям экспонирования активного слоя, снижения характеристического размера создаваемых объектов, совершенствования технических решений в области формирования изображений на фотошаблоне, эффективности многокритериального альтернативного выбора и оценки качества и надежности функционирования ультрафиолетовых литографических установок из многофункциональных модулей, определения параметров оптических систем, источников освещения, устройств совмещения и фотошаблонов.

В процессе осуществленных в работе исследований получены следующие основные результаты и выводы:

1. Разработаны элементы автоматизированной и структурированной системы поддержки принятия решений при проектировании технологических процессов ультрафиолетовой литографии, которая базируется на предложенных имитационных моделях, проблемно-ориентированных алгоритмах и комплексно-интегрированных программных модулях и позволяет существенно повысить потребительские свойства производимых микро- и наноэлектронных изделий, а также снизить трудозатраты на их производство.

2. Разработана математическая модель формирования фотолитографического изображения, которая в отличие от существующих моделей позволяет вычислять распределение интенсивности изображения произвольного фазосдвигающего шаблона при заданных условиях освещения с заданными характеристиками системы формирования изображения.

3. Предложен метод исследования характеристик качества функционирования ультрафиолетовых литографических установок, позволяющий определить коэффициент готовности при заданной вероятности выполнения поставленной задачи в процессе формирования объектов ультрафиолетовой литографической технологии с заданными свойствами.

4. Синтезированы патентоспособные и адаптированные для промышленного применения технические решения по созданию устройств формирования изображения на подложке и устройств формирования нанообъектов, отвечающие требованиям, предъявляемым к прецизионному оборудованию и оборудованию точного приборостроения.

5. Разработано специализированное программное приложение для расчета основных характеристик ультрафиолетовой литографической системы, позволяющее определять минимальный разрешаемый размер элемента формируемой топологии, глубину сфокусированного изображения фотошаблона, а также время экспонирования заданного количества пластин и производительность литографической системы.

6. Осуществлено построение и последующая формализация концептуальной модели ультрафиолетовой литографической системы, положенной в основу предложенных методов снижения минимального характеристического размера при автоматизированном проектировании объектов ультрафиолетовой литографии.

7. Осуществлена верификация полученных в работе теоретических положений и созданных алгоритмов, свидетельствующая о высокой степени достоверности и адекватности синтезированных математических моделей оптимального управления процессами ультрафиолетовой литографии и обоснованности рекомендаций по эффективному практическому использованию разработанной системы поддержки принятия решений.

8. Получены практические данные относительно показателей эффективности использования синтезированных элементов сквозной информационной системы поддержки принятия решений при проектировании процессов ультрафиолетовой литографии и проблемно-ориентированных модулей, свидетельствующие о существенном снижении временных затрат на проектирование, а также повышении качества проектных работ для устройств микро и наноэлектроники в современных вычислительных комплексах

9. Выполнена детализированная оценка экономического и технологического эффекта от применения разработанной системы поддержки принятия решений при проектировании процессов ультрафиолетовой литографии на этапе аванпроектирования по совокупности функциональных, структурных, технологических, экологических и экономических критериев качества.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях из перечня ВАК РФ:

1. **Корпачев М.Ю.** Алгоритм оценки дискретных параметров технических систем [Текст] / Болнокин В.Е., Ивашов Е.Н., Корпачев М.Ю., Федотов К.Д. // Вестник машиностроения (перевод). 2016. № 2. С. 42-47.

2. **Корпачев М.Ю.** Многокритериальная задача принятия решения при проектировании УФ-литографического модульного оборудования [Текст] / Васин В.А., Ивашов Е.Н., Корпачев М.Ю., Костомаров П.С., Степанчиков С.В. // Автоматизация и современные технологии. 2013. № 4. С. 19-24.

3. **Корпачев М.Ю.** Критерий качества в автоматизированном проектировании элементов формирования топологии в ультрафиолетовой литографии [Текст] / Балан Н.Н., Васин В.А., Ивашов Е.Н., Корпачев М.Ю., Степанчиков С.В. // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2012. № 3. С. 46-51.

4. **Корпачев М.Ю.** Обработка информации о предпочтениях при поиске решений отражательных фотошаблонов для ультрафиолетовой литографии [Текст] / Балан Н.Н., Васин В.А., Ивашов Е.Н., Корпачев М.Ю., Степанчиков С.В. // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. 2012. № 3. С. 77-85.

5. **Корпачев М.Ю.** Характеристики качества функционирования нанолитографических систем в автоматизированном проектировании [Текст] / Балан Н.Н., Васин В.А., Ивашов Е.Н., Корпачев М.Ю., Степанчиков С.В. // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2012. № 12. С. 8-15.

В других изданиях:

6. **Корпачев М.Ю.** Коррекция эффектов оптической близости в литографии [Текст] / Ивашов Е.Н., Корпачев М.Ю., Костомаров П.С. // В кн.: Инновационные информационные технологии: Материалы международной научно-практической конференции / Отв. ред.: И.А. Иванов; под общ. ред.: С.У. Увайсов. Т. 3. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. С. 436-440.

7. **Корпачев М.Ю.** Построение управляющей системы для современного литографического оборудования [Текст] / Ивашов Е.Н., Корпачев М.Ю., Костомаров П.С. // В кн.: Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий: Материалы международной научно-практической конференции (2013) / Отв. ред.: И.А. Иванов; под общ. ред.: С.У. Увайсов; науч. ред.: А.Н. Тихонов. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. С. 447-448.

8. **Корпачев М.Ю.** Техническое обслуживание автоматизированных систем управления [Текст] / Ивашов Е.Н., Корпачев М.Ю., Костомаров П.С. // В кн.: Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий: Материалы международной научно-практической конференции (2013) / Отв. ред.: И.А. Иванов; под общ. ред.: С.У. Увайсов; науч. ред.: А.Н. Тихонов. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. С. 439-441.

9. **Корпачев М.Ю.** Алгоритм выбора технологического решения в ультрафиолетовой литографии [Текст] / Ивашов Е.Н., Корпачев М.Ю., Костомаров П.С. // В кн.:

Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2012», 3–7 декабря 2012 г., Москва / Отв. ред.: А.С. Сигов. Ч. 7: Проблемы надежности и качества. М.: МГТУ МИРЭА – ИРЭ РАН, 2012. С. 82-87.

10. **Корпачев М.Ю.** Задача морфологической коррекции в литографической технологии для опто- и наноэлектроники [Текст] / Ивашов Е.Н., Корпачев М.Ю., Костомаров П.С. // В кн.: Опто-, наноэлектроника, наноматериалы и микросистемы: Труды XV международной конференции. Ульяновск: УлГУ, 2012. С. 54-55.

11. **Корпачев М.Ю.** Задача снижения размерности для опто- и наноэлектроники в литографической технологии [Текст] / Ивашов Е.Н., Корпачев М.Ю., Костомаров П.С. // В кн.: Опто-, наноэлектроника, наноматериалы и микросистемы: Труды XV международной конференции. Ульяновск: УлГУ, 2012. С. 52-53.

12. **Корпачев М.Ю.** Критерий качества в УФ – литографии [Текст] / Балан Н.Н., Васин В.А., Ивашов Е.Н., Корпачев М.Ю., Лучников П.А., Степанчиков С.В. // В кн.: Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2012», 3–7 декабря 2012 г., Москва / Отв. ред.: А.С. Сигов. Ч. 7: Проблемы надежности и качества. М.: МГТУ МИРЭА – ИРЭ РАН, 2012. С. 75-78.

13. **Корпачев М.Ю.** Литографическая нанотехнология для создания устройств снабжения организма лекарственными препаратами [Текст] / Ивашов Е.Н., Корпачев М.Ю., Костомаров П.С. // В кн.: Опто-, наноэлектроника, наноматериалы и микросистемы: Труды XV международной конференции. Ульяновск: УлГУ, 2012. С. 51-51.

14. **Корпачев М.Ю.** Методы снижения характеристического размера при автоматизированном проектировании элементов СБИС [Текст] / Ивашов Е.Н., Корпачев М.Ю. // В кн.: Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий: материалы международной научно-технической конференции (2012) / Отв. ред.: И.А. Иванов; под общ. ред.: С.У. Увайсов. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2012. С. 284-287.

15. **Корпачев М.Ю.** Надежность функционирования технологического оборудования нанолитографии [Текст] / Балан Н.Н., Васин В.А., Ивашов Е.Н., Корпачев М.Ю., Ланцев А.Н., Степанчиков С.В. // В кн.: Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2012», 3–7 декабря 2012 г., Москва / Отв. ред.: А.С. Сигов. Ч. 3: Материалы и технологии. М.: МГТУ МИРЭА-ИРЭ РАН, 2012. С. 83-87.

16. **Корпачев М.Ю.** Стратегия развития ультрафиолетовой литографической технологии [Текст] / Корпачев М. Ю. // В кн.: Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ им. Е.В. Арменского. Материалы конференции / Под общ. ред.: А. Н. Тихонов, В. Н. Азаров, У. В. Аристова, М. В. Карасев, В. П. Кулагин, Ю. Л. Леохин, Б. Г. Львов, Н. С. Титкова, С. У. Увайсов. М. : МИЭМ НИУ ВШЭ, 2015. С. 259-260.

17. **Корпачев М.Ю.** Методика разработки комплексных производственных модулей в современном микроэлектронном производстве [Текст] / Болнокин В. Е., Ивашов Е. Н., Корпачев М. Ю., Костомаров П. С. // Успехи современного естествознания. 2014. № 5. С. 137-145.

18. **Корпачев М.Ю.** Методика улучшения качества изображения в различных литографических системах [Текст] / Корпачев М. Ю. // В кн.: Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ. Материалы конференции / Под общ. ред.: А. Н. Тихонов, В. Н. Азаров, У. В. Аристова, М. В. Карасев, В. П. Кулагин, Ю. Л. Леохин, Б. Г. Львов, Н. С. Титкова. М. : МИЭМ НИУ ВШЭ, 2014. С. 244-245.

19. **Корпачев М.Ю.** Моделирование процесса формирования изображения в ультрафиолетовой литографии [Текст] / Корпачев М. Ю. // В кн.: Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ. Материалы

конференции / Под общ. ред.: А. Н. Тихонов, В. Н. Азаров, У. В. Аристова, М. В. Карасев, В. П. Кулагин, Ю. Л. Леохин, Б. Г. Львов, Н. С. Титкова. М. : МИЭМ НИУ ВШЭ, 2014. С. 243-243.

20. **Корпачев М.Ю.** Проектирование технологического оборудования в случае малых выборок на основе опорных точек [Текст] / Болнокин В. Е., Ивашов Е. Н., Костомаров П. С., Корпачев М. Ю. // Успехи современного естествознания. 2014. № 5. С. 132-136.

21. **Корпачев М.Ю.** Анализ вариантов литографических систем при выборе проектных решений для микроэлектронного производства [Текст] / Ивашов Е. Н., Корпачев М. Ю. // В кн.: Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий: Материалы международной научно-практической конференции (2013) / Отв. ред.: И. А. Иванов; под общ. ред.: С. У. Увайсов; науч. ред.: А. Н. Тихонов. М. : МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. С. 442-444.

22. **Корпачев М.Ю.** Построение литографических отображений в двумерном пространстве / [Текст] / Корпачев М. Ю. / В кн.: Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ НИУ ВШЭ. Тезисы докладов / Под общ. ред.: А. Н. Тихонов, В. Н. Азаров, М. В. Карасев, В. П. Кулагин, Ю. Л. Леохин, Б. Г. Львов, У. В. Аристова, Н. С. Титкова. М. : МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. С. 263-264.

23. **Корпачев М.Ю.** Принятие технического решения из ряда недоминируемых альтернатив при разработке литографических процессов [Текст] / Корпачев М. Ю. // В кн.: Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ НИУ ВШЭ. Тезисы докладов / Под общ. ред.: А. Н. Тихонов, В. Н. Азаров, М. В. Карасев, В. П. Кулагин, Ю. Л. Леохин, Б. Г. Львов, У. В. Аристова, Н. С. Титкова. М. : МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. С. 265-265.

24. **Корпачев М.Ю.** Обобщённый критерий качества технологического оборудования ультрафиолетовой литографии [Текст] / Корпачев М. Ю. // В кн.: Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ, посвященная 50-летию МИЭМ / Под общ. ред.: В. Н. Азаров, Л. Н. Кечиев, Ю. Л. Леохин, С. Н. Никольский, И. Смирнов, Н. С. Титкова, В. М. Четвериков. М. : Московский государственный институт электроники и математики, 2012. С. 293-294.

25. **Корпачев М.Ю.** Применение литографических технологий для обработки генетической информации в молекулах ДНК и РНК [Текст] / Ивашов Е. Н., Корпачев М. Ю., Костомаров П. С. // В кн.: Опто-, наноэлектроника, наноматериалы и микросистемы: Труды XV международной конференции. Ульяновск : УлГУ, 2012. С. 50-50.

26. **Корпачев М.Ю.** Проектирование и экспертиза технически целесообразных решений отражательных фотомасок для УФ - литографии [Текст] / Балан Н. Н., Васин В. А., Корпачев М. Ю., Лучников П. А., Степанчиков С. В. // В кн.: Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2012», 3–7 декабря 2012 г., Москва / Отв. ред.: А. С. Сигов. Ч. 3: Материалы и технологии. М. : МГТУ МИРЭА – ИРЭ РАН, 2012. С. 126-131.

27. **Корпачев М.Ю.** Пути снижения размерности изображения топологии в УФ – литографическом процессе производства СБИС [Текст] / Ивашов Е. Н., Корпачев М. Ю., Костомаров П. С., Ланцев А. Н., Лучников П. А. // В кн.: Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2012», 3–7 декабря 2012 г., Москва / Отв. ред.: А. С. Сигов. Ч. 3: Материалы и технологии. М. : МГТУ МИРЭА – ИРЭ РАН, 2012. С. 66-73.

28. **Корпачев М.Ю.** Устройство формирования топологической структуры микрочипа для снабжения организма лекарственными препаратами [Текст] / Ивашов Е. Н., Корпачев М. Ю., Костомаров П. С., Лучников П. А. // В кн.: Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2012», 3–7 декабря 2012 г., Москва / Отв. ред.: А. С. Сигов. Ч. 4. [б.и.], 2012. С. 164-165.

29. **Корпачев М.Ю.** Формирование топологии в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне [Текст] / Корпачев М. Ю. // В кн.: Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ, посвященная 50-летию МИЭМ / Под общ. ред.: В. Н. Азаров, Л. Н. Кечиев, Ю. Л. Леохин, С. Н. Никольский, И. Смирнов, Н. С. Титкова, В. М. Четвериков. М. : Московский государственный институт электроники и математики, 2012. С. 295-296.
30. **Корпачев М.Ю.** Фотомозаика чипа для фракционирования ДНК на основе литографических технологий [Текст] / Ивашов Е. Н., Корпачев М. Ю., Костомаров П. С. // В кн.: Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2012», 3–7 декабря 2012 г., Москва / Отв. ред.: А. С. Сигов. Ч. 2. М. : МГТУ МИРЭА, 2012. С. 112-113.
31. **Корпачев М.Ю.** Формирование изображения в вакуумном ультрафиолете [Текст] / Ивашов Е. Н., Корпачев М. Ю., Костомаров П. С., Лучников П. А. // В кн.: INTERMATIC - 2010. Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения», 23-27 ноября 2010 г., Москва / Под общ. ред.: А. С. Сигов; науч. ред.: А. С. Сигов. Ч. 1. М. : Энергоатомиздат, 2010. С. 303-305.
32. **Корпачев М.Ю.** Формирование изображения на подложке в иммерсионной литографии [Текст] / Ивашов Е. Н., Корпачев М. Ю., Костомаров П. С., Лучников П. А. // В кн.: INTERMATIC - 2010. Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения», 23-27 ноября 2010 г., Москва / Под общ. ред.: А. С. Сигов; науч. ред.: А. С. Сигов. Ч. 1. М. : Энергоатомиздат, 2010. С. 306-307.
33. **Корпачев М.Ю.** Формирование нанобъектов литографическим методом [Текст] / Ивашов Е. Н., Корпачев М. Ю., Костомаров П. С. // В кн.: INTERMATIC - 2010. Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения», 23-27 ноября 2010 г., Москва / Отв. ред.: А. С. Сигов. Ч. 2. М. : Энергоатомиздат, 2010. С. 302-303.
34. **Корпачев М.Ю.** Применение лазерного излучения в технологии формирования наноструктур [Текст] / Ефимов И. А., Ивашов Е. Н., Корпачев М. Ю., Костомаров П. С., Лучников П. А. // В кн.: INTERMATIC - 2009. Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения», 7 - 11 декабря 2009 г., Москва / Отв. ред.: А. С. Сигов. Ч. 2. М. : Энергоатомиздат, 2009. С. 227-230.
35. **Корпачев М.Ю.** Патент РФ на полезную модель №104508. Устройство для формирования нанодорожек на подложке / Ивашов Е.Н., Корпачев М.Ю., Костомаров П.С., Степанчиков С.В., Якункин М.М. – № 2010146414/07. Заявл. 15.11.2010; опубл. 20.05.2011, Бюл. № 14.
36. **Корпачев М.Ю.** Патент РФ на полезную модель №104772. Устройство для формирования изображения / Ивашов Е.Н., Корпачев М.Ю., Костомаров П.С., Степанчиков С. В., Якункин М.М. -№ 2010146416/07. Заявл. 15.11.2010; опубл. 20.05.2011, Бюл. № 14.
37. **Корпачев М.Ю.** Патент РФ на полезную модель №104771. Устройство для формирования квантовых ям на подложке / Ивашов Е.Н.; Корпачев М.Ю.; Костомаров П.С. - № 2010149690/07. Заявл. 07.12.2010; опубл. 20.05.2011, Бюл. № 14.
38. **Корпачев М.Ю.** Патент РФ на полезную модель №102430. Нанотехнологическое устройство для выполнения операций / Ивашов Е.Н., Корпачев М.Ю., Костомаров П.С., Якункин М.М. - № 2010119552/07; заявл. 17.05.2010; опубл. 27.02.2011, Бюл. № 6.
39. **Корпачев М.Ю.** Свидетельство РФ 2014611501 об официальной регистрации программы для ЭВМ. Расчет основных характеристик ультрафиолетовой литографической системы / Ивашов Е.Н., Корпачев М.Ю.; Костомаров П.С. - № 2013661642. Заявл. 13.12.2013; зарег. 04.02.2014.