

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке и цифровому
развитию МГТУ им. Н. Э. Баумана,
д.э.н., профессор


П.А. Дрозов
2023 г.



О Т З Ы В

ведущей организации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)» на диссертацию Иванова Владимира Викторовича «Исследование эффектов оптической близости и разработка методов их коррекции для критических литографических слоев технологии производства СБИС проектных норм 65 нм», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 — Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств

Актуальность избранной темы

Освоение новых проектных норм микроэлектронного производства требует уменьшения размера полупериода структур, переносимых на полупроводниковую пластину в процессе проекционной фотолитографии. Это достигается применением излучателей с меньшей длиной волны, совершенствованием технических характеристик проекционных объективов, а также рядом технологических приемов, направленных на повышение разрешения существующих литографических установок. Первые два способа весьма затратны и представляют собой по сути создание нового поколения оборудования и материалов. Третий способ состоит в сочетании внеосевого освещения фотошаблона (в общем случае фазового) с дополнительной коррекцией его топологии (OPC – Optical Proximity Correction) для получения на пластине фоторезистивной маски (ФРМ) необходимой геометрии. Это позволяет минимизировать влияние паразитных дифракционных оптических эффектов или т.н. «эффектов оптической близости» и, таким образом, в

полной мере реализовать потенциал существующего оборудования, сделав возможной литографию структур с размерами полупериода элементов значительно менее длины волны рабочего излучения, хотя и с рядом ограничений на их конфигурацию.

Фотошаблоны (ФС), применяемые в современных установках проекционной фотолитографии, являются прецизионными оптическими элементами и, как правило, содержат крайне сложный рисунок, состоящий из десятков миллионов элементарных топологических структур, с весьма строгими требованиями к размеру и точности размещения элементов.

Переход на более продвинутые проектные нормы неизбежно сопровождается дальнейшим усложнением процесса проектирования фотошаблонов, как минимум, по причине применения новых поколений ОРС-решений, имеющих значительно более сложные входные и выходные данные и, соответственно, являющихся более требовательными к вычислительным ресурсам (Под ОРС-решением подразумевается совокупность моделей, алгоритмов и программных средств для их применения, позволяющих реализовывать коррекцию оптической близости). Это влечет за собой появление дополнительных процедур верификации топологии, новых операций выходного контроля управляющей информации (УИ) и, как результат, существенное удорожание процесса проектирования ФС. Особое влияние на эффективность выбранного ОРС-решения оказывают оптические модели, характеризующие особенности литографического оборудования, модели формирования фоторезистивной маски и ОРС-рецепт, определяющий фрагментацию топологии, алгоритм смещения фрагментов и порядок размещения контрольных точек для оценки эффективности топологической коррекции.

Ошибки, допущенные при проектировании ФС, негативно сказываются на работоспособности изготавливаемого изделия (вплоть до полной ее потери) и влекут за собой неблагоприятные экономические последствия по причине высокой стоимости производственного цикла в целом и этапа изготовления комплекта фотошаблонов в частности. Поэтому вопрос повышения эффективности процесса проектирования ФС в условиях перехода на новые уровни технологии имеет первоочередную важность. Его решение лежит в том числе в области оптимизации методов коррекции оптической близости.

Кроме того, по причине сильной коммерциализации этой сферы в мировом сообществе производителей специализированных САПР и поставщиков технологии, формируется зависимость отечественных предприятий не только от производителей материалов и оборудования, но и от поставщиков услуг в области разработки технологических решений. Из вышеизложенного следует, что задача исследования эффектов оптической близости, а также разработки и оптимизации методов их коррекции является в настоящее время актуальной и своевременной.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Для решения задач, поставленных в диссертационной работе, в качестве методов исследования, автором использовались основные положения фурье-оптики, прикладной статистики и оптимизации. Выполненные теоретико-экспериментальные исследования и практические расчеты базируются на использовании методов вычислительной математики, современных методов программирования и компьютерного моделирования. Результаты представленных в диссертации экспериментальных исследований получены с использованием проекционной фотолитографии и сканирующей электронной микроскопии. Общей методологической основой всех исследований является системный подход, что, в конечном итоге, подтверждает степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Достоверность и новизна

Достоверность проведенных теоретических исследований и представленных в работе экспериментальных результатов обеспечивается строгим математическим обоснованием предлагаемых подходов, результатами компьютерного моделирования, использованием современных экспериментальных методик, а также согласованностью полученных результатов с теоретическими и экспериментальными данными, имеющимися в отечественной и зарубежной литературе.

Научная новизна заключается в том, что:

1. Для усовершенствования процесса калибровки компактной модели контура ФРМ впервые применён кластерный анализ формирования

выборки калибровочных структур и исследована эффективность откалиброванной таким образом модели.

2. Впервые предложен эвристический алгоритм оптимизации параметров рецепта коррекции оптической близости на основе метода дифференциальной эволюции, обеспечивающий в сравнении с исходным рецептом уменьшение усредненного значения ошибки смещения положения края расчётной фоторезистивной маски относительно номинала и площади смещения моделируемого контура более, чем на 35% и 20% соответственно. В качестве исходного использовался типовой OPC-рецепт, применяемый в технологии уровня 90нм. Различия в целевых показателях, полученных с помощью универсального и специфичных для конкретных топологий рецептов, не превышают 2%, что подтверждает целесообразность применения полученного решения для коррекции топологий с произвольной конфигурацией.

3. На основе исследования вклада фотошаблонной составляющей в общую литографическую погрешность разработан универсальный метод составления спецификации на фотошаблон.

4. Впервые разработана и реализована методология создания OPC-решения, сохраняющая общую последовательность этапов разработки при переходе к следующим проектным нормам технологии производства СБИС.

5. С применением усовершенствованной методики калибровки компактных моделей проведена калибровка моделей контура ФРМ для затворного слоя на различных наборах калибровочных данных, что позволило определить оптимальный размер выборки (300-350 из 3300 калибровочных структур) при условии кластеризации калибровочных данных методом k-средних. При этом среднеквадратичная ошибка моделирования составила менее 1,4 нм, что составляет 2,3% от номинала критического линейного размера для технологии проектных норм 65 нм.

Практическая значимость диссертационной работы

В диссертационной работе на основе систематизации и обобщения полученных теоретико-экспериментальных результатов и литературных данных предложены принципы, позволяющие разработать OPC-решения для создания твердотельных электронных приборов проектных норм 65 нм,

реализовав в полной мере потенциал имеющегося литографического оборудования. В частности:

1. На основе разработанного метода с применением «полного» моделирования литографического процесса проведен анализ вклада допусков на параметры ФШ в литографическую погрешность, что позволило составить оценочную спецификацию на ФШ затворного слоя технологии проектных норм 65 нм.

2. Разработан и изготовлен универсальный калибровочный фотошаблон «LITHO90-65», включающий в свой состав ряд топологических модулей, предназначенных для калибровки оптической и компактной фоторезистивной модели VT5, а также для проверки правил расстановки непропечатываемых вспомогательных структур SRAF (Sub-Resolution Assist Feature) на одиночных и периодических элементах топологии. Указанный ФШ может быть использован при решении задач калибровки компактных моделей формирования контура ФРМ для технологических процессов проектных норм до 45 нм.

3. Предложена модель литографического процесса, основанная на пороговой обработке распределения интенсивности на пластине, получаемого методом Хопкинса. Модель калибруется на экспериментально установленный минимальный обрабатываемый полупериод рисунка в резисте.

На основе предложенной модели с учетом условий и особенностей процесса АО "Микрон" рассчитаны параметры оптической системы сканера ASML PAS 5500/1150C ($NA = 0,75$; $\sigma_{in} = 0,60$, $\sigma_{out} = 0,85$, $\alpha = 30^\circ$), оптимальные при литографии затворного слоя технологии проектных норм 65 нм, а также предварительно определены параметры непропечатываемых вспомогательных топологических структур SRAF (в масштабе пластины):

- $w = 28$ нм, расположение в центрах промежутков между основными линиями – для периодов линий от 340 нм до 560 нм;
- $w = 36$ нм, $s = 180$ нм – для периодов линий от 560 нм и более.

Применение указанных вспомогательных структур при оптимальных настройках оптической системы сканера позволяет (согласно используемой модели) достичь глубины фокуса проекционной фотолитографии более 260 нм для затворного слоя с исключением возможности пропечатки элементов

SRAF. Результаты моделирования согласуются с экспериментальными данными.

4. Разработано программное средство «OPC_Optimizer», позволяющее выполнять оптимальную настройку OPC-рецепта с помощью алгоритмов оптимизации, в том числе, эвристического алгоритма дифференциальной эволюции, а также решать другие оптимизационные задачи в рамках разработки OPC-решения. На программный продукт «OPC_Optimizer» получено Свидетельство РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Теоретические и практические результаты работы внедрены в производственный процесс АО «НИИМЭ» и АО «Микрон», были использованы при проведении ряда НИОКР, а также используются в учебном процессе НОУ ДПО «ЦОРК НИИМЭ».

Результаты работы могут быть полезны при разработке технологии проекционного переноса изображения на полупроводниковую пластину, в частности, методов коррекции оптической близости, в ряде отечественных организаций и предприятий электронной промышленности, таких как АО «НМ-Тех», ООО «Крокус Нанoeлектроника», НИИСИ РАН, АО «ЗИТЦ» и др.

Соответствие автореферата диссертации

Автореферат соответствует основным положениям диссертационной работы.

Полнота опубликованных работ

По теме диссертации опубликовано 28 научных работ, в том числе 14 работ – в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Замечания по диссертационной работе

1. В тексте диссертационной работы недостаточно отражены методы «полного» моделирования литографического процесса на основе физико-химических принципов.

2. В работе отмечается, что при определении параметров фотошаблонной спецификации использовалось «полное» моделирование, однако из остального текста работы следует, что для адекватной оценки этих параметров вполне достаточно более простых методов, использующих моделирование формирования контура ФРМ на основе воздушного изображения.

3. При подсчете значений среднеквадратичного отклонения значений CD или EPE на этапе калибровки и верификации оптической и фоторезистивной полуэмпирических моделей для определения весов используемых тестовых структур применялся лишь метод экспертных оценок в то время, как существует ряд более формальных способов их расчета, наверняка известных автору работы.

4. Следует признать слишком большим объем как самой диссертации (205 стр.), так и автореферата (35 стр.). Без ущерба для диссертации можно было бы сократить, например, втрое объем первой главы, исключив из нее материалы познавательного характера.

Заключение

В соответствии с п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013г. №842) кандидатская диссертация Иванова Владимира Викторовича является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи исследования эффектов оптической близости и разработки методов их коррекции для критических литографических слоев технологии производства СБИС проектных норм 65 нм, имеющей существенное значение для отечественного производства полупроводниковых приборов.

Диссертационная работа Иванова Владимира Викторовича соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а также паспорту специальности 2.2.2 — Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств, в частности, пунктам:

- п. 1 – Разработка и исследование физических основ создания новых и совершенствования существующих приборов, интегральных схем,

изделий микро- и наноэлектроники, твердотельной электроники, дискретных радиоэлектронных компонентов, микроэлектромеханических систем (МЭМС), наноэлектромеханических систем (НЭМС), квантовых устройств, включая оптоэлектронные приборы и преобразователи физических величин;

- п. 2 – Исследование и разработка физических и математических моделей изделий по п.1, в том числе для систем автоматизированного проектирования.

Автор диссертационной работы – Иванов Владимир Викторович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 — Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

Настоящий отзыв ведущей организации ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)» рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана от 10 мая 2023 года, Протокол № 5.

Заведующий кафедрой «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Заслуженный деятель науки РФ, д. т. н., профессор



В.А. Шахнов

10.05.2023