

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИВМ СО РАН
д.ф.-м.н., профессор В.М. Садовский



В.М. Садовский

2017 г.

О Т З Ы В

ведущей организации на диссертационную работу Горобчука Алексея Геннадьевича «Математическое моделирование плазмохимических технологий микроэлектроники», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Диссертация Горобчука А.Г. посвящена исследованию и оптимизации технологических процессов плазмохимического травления (ПХТ), широко применяемых в производстве изделий микроэлектроники. Данные технологические процессы являются наиболее перспективными при обработке различных материалов в вакууме и в настоящее время не имеют альтернатив. Задачи исследования и оптимизации таких процессов важны и актуальны для развития субмикронных технологий микроэлектроники. Для получения качественного изделия в многооперационном технологическом процессе, обеспечения высокого их выхода, снижения процента брака, повышения экологичности процесса необходима комплексная оптимизация параметров режима и конструкций плазмохимических реакторов (ПХР), в которых осуществляется обработка поверхностных слоев материалов. Большое число и сложная взаимосвязь факторов, определяющих их работу, выделить среди которых основные с помощью экспериментальных методов достаточно сложно, определяют практический интерес к математическому моделированию плазмохимических технологий микроэлектроники.

Для изучения сложного комплекса процессов ПХТ актуальны исследования, направленные на разработку адекватных физико-математических моделей, отражающих наиболее существенные стороны технологического процесса и позволяющих предложить новые способы управления им, в частности, путем применения различных добавок, усиливающих обменные процессы на поверхности соответствующего материала и др. Из-за сложности и многопараметричности процесса и вследствие применения многочисленных упрощений существующие модели ПХТ обладают невысокими прогностическими возможностями. Часто проведенные исследования на основе этих моделей отражают лишь отдельные аспекты сложного комплекса ПХТ. В этой связи проведенные в диссертации Горобчука А.Г. исследования несомненно актуальны.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

Во введении представлен обзор исследований по численному моделированию технологических процессов плазмохимического травления, в котором рассматриваются модели химической кинетики, гидродинамики, тепломассообмена и низкотемпературной плазмы ВЧ-разряда, обсуждаются численные методы для решения уравнений многокомпонентной гидродинамики и ВЧ-разряда в гидродинамическом приближении. На основании сделанного обзора сформулированы цели диссертационной работы, которые заключаются в разработке математических моделей плазмохимических технологий микроэлектроники, методов численного моделирования, реализующих данные модели и решения ряда задач по исследованию процессов ПХТ в различных газовых смесях и рассмотрение различных способов управления ими.

В первой главе представлена разработанная в диссертации обобщенная физико-математическая модель для описания технологических процессов плазмохимического травления в двумерной постановке, которая полностью соответствует современным требованиям к моделированию производства микроэлектронных схем и позволяет исследовать тонкие физические эффекты плазменного травления, включающие сложный теплообмен с учетом ИК-излучения многоатомных молекул, эффекты разреженности, термодиффузии, многокомпонентную кинетику газофазных реакций, расширенную кинетику гетерогенных реакций, что повышает прогностические возможности модели и раскрывает основные физические механизмы ПХТ. Особенности электрон-молекулярных взаимодействий в низкотемпературной плазме рассматривались на основе модели аксиально-симметричного ВЧ-разряда в гидродинамическом приближении.

Во второй главе представлены созданные диссертантом эффективные численные алгоритмы решения уравнений многокомпонентной гидродинамики реагирующей газовой смеси, моделирования ВЧ-разряда в гидродинамическом приближении, а также варианты их распараллеливания, позволяющие ускорить расчеты многокомпонентной химической кинетики и аксиально-симметричного разряда. Новые дискретные краевые условия для завихренности на непроницаемых поверхностях реакционной камеры позволили проводить исследования в режиме пониженного давления с учетом эффектов скольжения. На основе метода экспоненциальной подгонки впервые предложена безусловно монотонная разностная схема для интегрирования уравнений ВЧ-разряда в двумерной постановке.

В третьей главе исследуются механизмы травления кремниевых образцов в плазме SF_4 в распространенных схемах ПХР – *pedestal* и *stadium* в изотермическом приближении и выполнена оптимизация их технологических режимов работы. Впервые показана возможность оптимизации равномерности травления образцов с помощью кольцевых протекторов и представлены рекомендации относительно конструкционных материалов для элементов реактора. Проанализировано влияние неизотермичности и разреженности рабочей среды на скорость и качество травления образцов в

планарном ПХР *stadium*. Впервые исследованы особенности теплообмена с учетом ранее не рассматривавшихся эффектов разреженности, теплового излучения многоатомных рабочих газов и термодиффузии. Для расчета теплового излучения и поглощения в характерных для ПХТ газовых смесях предложена оригинальная методика на основе экспоненциальной модели полосы, дающая хорошее совпадение с экспериментальными данными.

В четвертой главе представлены результаты по численному моделированию технологии плазмохимического травления кремния в низкотемпературной плазме CF_4 и его смесях с O_2 и H_2 на основе многокомпонентных моделей кинетики. Впервые в рамках единой численной модели выполнено сравнение наиболее распространенных моделей химических кинетик травления кремния в тетрафторметане в ПХР радиальной схемы, показавшее необходимость их коррекции. Выполнена численная оптимизация скорости травления кремния по составу бинарной смеси CF_4/O_2 , впервые показавшая, что хемосорбция кислорода на кремнии приводит к гистерезису на графике зависимости скорости травления от концентрации фтора. Рассмотрен процесс пассивации кремния ненасыщенными радикалами типа CF_x при плазмохимическом травлении в CF_4/H_2 . Среди конкурирующих процессов на поверхности кремния в качестве преобладающего выделена адсорбция радикала CF_2 , слой которого при 40% добавке H_2 полностью покрывает поверхность образца, что прекращает процесс травления.

В пятой главе представлены результаты по влиянию характеристик ВЧ-разряда на процесс плазмохимического травления кремния в смеси CF_4/O_2 . Впервые рассматриваются эффективность диссоциации исходной газовой смеси CF_4/O_2 в условиях пониженной электронной плотности в ВЧ-разряде, а также влияние структуры ВЧ-разряда, рассчитанное с применением различных подходов, на качество травления кремниевых образцов.

В заключении представлены основные результаты и выводы диссертационной работы.

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием адекватных физико-математических моделей основных составляющих плазмохимической технологии травления; тщательным тестированием реализованных численных алгоритмов с контролем практической точности, в частности, с помощью исследований сходимости на последовательности вложенных сеток и устойчивости численных решений, практическим исследованием сходимости получаемых численных решений к точным решениям; удовлетворительным согласованием результатов с численными и экспериментальными данными других авторов.

Полученные впервые автором результаты исследований определяют научную новизну диссертационной работы и обладают большой научной и практической значимостью.

Исследования в области математического моделирования современных технологических процессов производства изделий с субмикронными

нормами относятся к разделу «Индустрия наносистем» перспективных направлений развития науки, технологий и техники в РФ.

Практическая значимость работы состоит в разработке и верификации обобщенной физико-математической модели для плазмохимических технологий микроэлектроники, позволяющей проводить комплексную многопараметрическую оптимизацию существующего технологического оборудования по заданным целевым параметрам, осуществлять поиск новых способов управления плазменными процессами в многокомпонентных газовых смесях, а также проводить исследования в области разработки нового оборудования для субмикронной технологии микроэлектроники.

Разработанный программный комплекс для численного моделирования технологических процессов плазмохимического травления на многопроцессорных вычислительных системах позволяет рассматривать самые детализированные многокомпонентные плазменные кинетики в двумерной постановке, что поднимает исследования на качественно новый уровень при оптимизации и совершенствовании данных технологий.

В качестве возможных областей применения результатов и выводов диссертации можно отметить следующие. Разработанная численная модель технологических процессов плазмохимического травления и реализующие ее пакеты программ дают разработчикам и конструкторам технологического оборудования для производства микроэлектроники эффективный инструмент, который позволяет принимать научно обоснованные решения в проектно-конструкторских разработках. Результаты анализа влияния на реакторные процессы различных факторов, эффективность отдельных конструктивных решений, данные по оптимизации существующих схем реакторов могут быть использованы при усовершенствовании технологии производства микросхем. Полученные результаты могут быть также использованы в качестве основы для аналогичных разработок в областях других технологий, использующих многокомпонентные смеси газов с физико-химическими превращениями. Возможные места использования результатов и выводов диссертации - ИТ СО РАН, ИТПМ СО РАН, ОАО «НИИМЭ и Микрон», ЯФ ФТИАН РАН, в ТПУ, НГУ, МИЭТ, ИГХТУ, в институтах и конструкторско-технологических бюро плазмохимического профиля.

Основные замечания по диссертации состоят в следующем.

1. Следует отметить, что результаты расчетов, полученные с применением иерархии математических моделей, практически не сравниваются с имеющимися в литературе экспериментальными данными.
2. В диссертации недостаточно полно представлены результаты тестирования разработанных численных алгоритмов.

Указанные недостатки не снижают высокой оценки работы. Полученные результаты являются новыми и достоверными, что позволяет их рассматривать как решение важной научной проблемы. Основные результаты опубликованы в ведущих научных журналах и трудах конференций, включая международные конференции высокого ранга. Автореферат полностью

отражает содержание диссертации. Из диссертационной работы, автореферата и опубликованных научных работ А.Г. Горобчука следует, что диссертация «Математическое моделирование плазмохимических технологий микроэлектроники» соответствует требованиям ВАК России, предъявляемым к докторским диссертациям.

Представленная диссертация является законченной научно-исследовательской работой, обобщающей многолетние исследования соискателя, которые вносят основополагающий вклад в новое перспективное направление математического моделирования плазмохимических технологий микроэлектроники. В связи с изложенным, автор диссертации Горобчук Алексей Геннадьевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Диссертационная работа была обсуждена и получила положительную оценку на заседании научного семинара ИВМ СО РАН «Проблемы математического и численного моделирования» 24 мая 2016 г., протокол № 5/2016.

Отзыв составил главный научный сотрудник отдела вычислительных моделей в гидрофизике Института вычислительного моделирования СО РАН — обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН, д.ф.-м.н., профессор В.М. Белолипецкий.

Федеральное государственное
бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр Сибирского
отделения Российской академии наук»
(ФИЦ КНЦ СО РАН)

Web-сайт организации: <http://icm.krasn.ru/>
660036, г. Красноярск, Академгородок, д.50. стр. 44

Телефон: +7 (391) 243 27 56

Адрес электронной почты: sek@icm.krasn.ru

Главный научный сотрудник
отдела вычислительных моделей
в гидрофизике ИВМ СО РАН,
д.ф.-м.н., профессор
16 января 2017г.

В.М. Белолипецкий

Подпись В.М. Белолипецкого заверяю
Ученый секретарь ИВМ СО РАН
к.ф.-м.н.



А.В. Вяткин