

О Т З Ы В

официального оппонента о диссертации А.Г. Горобчука
«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»

Актуальность темы исследований. В настоящее время при изготовлении сверхбольших интегральных схем (ИС) широко используется перспективные плазмохимические технологии (ПХТ) травления. В связи быстрым уменьшением топологических норм производства элементов ИС и значительным увеличением диаметра обрабатываемых пластин требования к ПХТ существенно возрастают. Общемировой тенденцией в области исследований современной микроэлектроники стала разработка технологических процессов с одновременным их изучением на основе адекватных физико-математических моделей, что позволяет направлять отдельные технологические эксперименты кратчайшим путем к внедрению в производство. Без всестороннего изучения и понимания физико-химических процессов в низкотемпературной плазме и на поверхности обрабатываемого изделия создание новых высокоэффективных плазменных технологий микроэлектроники весьма затруднительно. Учитывая сложность и многофакторность процесса травления, математическое моделирование позволяет достаточно эффективно изучать указанные процессы в численных экспериментах, предоставляя широкие возможности для оптимизации ПХТ. Диссертация А.Г. Горобчука посвящена разработке теоретических основ моделирования технологических процессов плазмохимического травления с использованием адекватных физико-математических моделей, отражающих наиболее существенные стороны процесса травления. В этой связи выполненные исследования безусловно актуальны и практически значимы, поскольку направлены на создание и разработку новых технологий в микроэлектронике.

Содержание диссертации, основные результаты и их научная новизна. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы.

Во введении дан обзор литературы по моделированию плазмохимических технологий травления. Подробно рассмотрены модели многокомпонентной гидродинамики и ВЧ-разряда, позволяющие описать гидродинамику, тепломассообмен, физико-химическую кинетику и низкотемпературную плазму ВЧ-разряда. Обсуждаются численные методы решения уравнений данных моделей. Сформулированы требования к разрабатываемой модели технологических процессов, на основе которых выделены основные элементы математического описания всех составляющих плазмохимического процесса.

В первой главе диссертации автором впервые сформулирована обобщенная физико-математическая модель ПХТ, учитывающая достаточно полно комплекс взаимосвязанных физико-химических процессов в низкотемпературной плазме. Модель описывает конвективно-диффузионный тепломассоперенос в химически реагирующей газовой смеси и дает возможность исследовать новые эффекты, такие как, слабая разреженность среды, термодиффузия, излучение многоатомных молекул газовой смеси, многокомпонентная кинетика химических реакций. Впервые электронная и ионная компоненты плазмы определялись в численных расчетах для аксиально-симметричного ВЧ-разряда с использованием достаточно полного гидродинамического приближения, характеризующегося высокой трудоемкостью.

Во второй главе диссертации представленная модель реализована с помощью оригинальных численных алгоритмов, включающих параллельные алгоритмы для моделирования многокомпонентной химической кинетики и аксиально-симметричного разряда на многопроцессорной системе. Разработанные алгоритмы подтвердили свою высокую эффективность в многочисленных расчетах, рассмотренных в последующих главах диссертации. Для проведения исследований в режимах пониженного давления автором были получены новые дискретные краевые условия для

завихренности, учитывающие эффекты развитого скольжения на твердой стенке. Реализующий алгоритмы пакет программ тщательно тестировался на задачах, имеющих аналитические решения, а также результаты сравнивались с результатами расчетов других авторов. Практическая сходимость определялась из серии численных решений на последовательности сеток. При расчете заряженных компонент плазмы автор впервые применил метод экспоненциальной подгонки для построения безусловно монотонной разностной схемы для интегрирования уравнений ВЧ-разряда в двумерной постановке.

В третьей главе диссертации на основе бинарной модели кинетики травления кремния в низкотемпературной плазме CF_4 рассматриваются различные физические эффекты, определяющие процесс плазмохимического травления, и обсуждается их влияние на ПХТ. Одним из наиболее значимых результатов этой главы является определение механизмов травления в распространенных схемах реакторов (*pedestal* и *stadium*) в изотермическом приближении. В расчетах показано, что процесс травления образцов и его однородность определяются диффузией химически активных частиц к образцу и стенкам реакционной камеры, что позволило предложить новый способ минимизации неоднородности травления кольцевыми протекторами и дать рекомендации относительно выбора конструкционных материалов для элементов реактора. Впервые влияние температурного фактора рассматривалось с учетом теплового излучения многоатомных рабочих газов и термодиффузии. Несмотря на относительно небольшие градиенты температуры, термодиффузия химически активных частиц обеспечивает до 20% полного потока на подложку. Для расчета поглощательной способности смеси газов разработана оригинальная методика на основе экспоненциальной модели полосы, дающая хорошее совпадение с экспериментальными данными. С понижением давления до режимов скольжения влияние процесса термодиффузии химически активных частиц в ПХТ усиливается.

В четвертой главе диссертации представлены результаты моделирования ПХТ с использованием многокомпонентных моделей химической кинетики травления кремния в CF_4 и его смесях с O_2 и H_2 . На

основе расчетов реактора радиальной схемы впервые исследуется влияние детализации многоканальной кинетики реакций диссоциации, рекомбинации и травления в CF_4 , показавшее необходимость использования даже в однородных, но высокомолекулярных газах более сложных моделей химической кинетики для адекватного описания химии плазмы. Наиболее значимыми результатами диссертации являются расчеты ПХТ травления кремния в смесях CF_4 с O_2 и H_2 . Использование многокомпонентных моделей соответствующих химических кинетик, отобранных на основе экспериментальных данных, совместно с детальным описанием процессов тепломассопереноса позволило воспроизвести в численных расчетах экспериментально наблюдаемые эффекты, в частности, увеличение скорости травления кремния с ростом содержания кислорода в смеси CF_4/O_2 , эффект гистерезиса для зависимости скорости травления от концентрации O_2 , снижение скорости травления и возникновение процесса полимеризации поверхности кремния ненасыщенными радикалами CF_2 , CF_3 в CF_4/H_2 , а также выполнить численную оптимизацию скорости травления кремния по составу бинарной смеси CF_4/O_2 .

В пятой главе диссертации впервые исследовано влияние выбора модели ВЧ-разряда на физические механизмы ПХТ, а также производство химически активных частиц и качество травления образцов. Показано, что с точки зрения эффективности моделирования ПХТ целесообразно использование аналитических моделей ВЧ-разряда, основывающихся на результатах численных экспериментов или данных натуральных измерений.

В заключении сформулированы результаты диссертационной работы.

Обоснованность и достоверность полученных результатов.

Основные результаты диссертации являются новыми. Их обоснованность и достоверность основывается на использовании наиболее полных физико-математических моделей для плазмохимического травления с учетом всех факторов, сопровождающих технологический процесс; проведением многочисленных тестовых расчетов с применением мер контроля точности получаемых решений; сопоставлением полученных численных результатов с известными аналитическими, численными и экспериментальными данными.

Практическая значимость работы. Полученные автором результаты обладают научной и практической значимостью. Выполненные исследования технологических процессов плазмохимического травления несомненно имеют мировой уровень и относятся к приоритетным направлениям развития микроэлектроники, в частности, к перспективным направлениям развития науки, технологий и техники в РФ «Индустрия наносистем». Полученные результаты могут быть использованы для развития численных моделей плазмохимических технологий, усовершенствования технологии производства микросхем, а также моделирования аналогичных течений многокомпонентных смесей молекулярных газов с физико-химическими превращениями. Обобщенная физико-математическая модель плазмохимических технологий позволяет проводить исследования в области разработки оборудования, включая субмикронные технологии микроэлектроники, а также выполнять комплексную оптимизацию существующего технологического оборудования с одновременным поиском новых способов управления плазменными процессами. Представленные результаты анализа по влиянию на реакторные процессы различных факторов и конструктивных решений имеют практический интерес для организаций и специалистов, занимающихся проектированием технологического оборудования для производства ИС с применением подложек большого диаметра.

Автором выполнены исследования технологических процессов с учетом важных физических эффектов, ранее находившихся вне поля зрения исследователей, и рассмотрены возможности оптимизации и совершенствования технологий в многокомпонентных химически реагирующих газовых системах. Основные результаты диссертации достаточно полно опубликованы в известных периодических научных изданиях, а также трудах отечественных и международных конференций. Автореферат достаточно полно отражает основные результаты диссертации.

Заключение. В целом диссертацию А.Г. Горобчука «Математическое моделирование плазмохимических технологий микроэлектроники» можно квалифицировать как законченную научно-исследовательскую работу,

которая вносит основополагающий вклад в новое перспективное направление математического моделирования технологических процессов травления в микроэлектронике. Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а сам автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Главный научный сотрудник
лаборатории прикладной
и вычислительной гидродинамики
отдела прикладной гидродинамики ИГиЛ СО РАН,

д.ф.-м.н., профессор

Воеводин Анатолий Федорович

16 января 2017г.

630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

тел. 8(383) 333-17-82

e-mail: Voevodin@hydro.nsc.ru

Подпись А.Ф. Воеводина заверяю

Ученый секретарь ИГиЛ СО РАН

к.ф.-м.н.

Любашевская Ирина Васильевна