

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА

ДМ003.046.01 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК.

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 17 февраля 2017 г. № 36

О присуждении Горобчуку Алексею Геннадьевичу **ученой степени** доктора физико-математических **наук**.

Диссертация «Математическое моделирование плазмохимических технологий микроэлектроники» **по специальности** 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» **принята к защите** 07 ноября 2016 г. протокол № 32 **диссертационным советом** ДМ003.046.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, ИВТ СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 6, Новосибирск, Россия, приказ Минобрнауки России от 09 ноября 2012 г. № 717/нк.

Соискатель Горобчук Алексей Геннадьевич 1969 года рождения, гражданин РФ, в 1992 году окончил Новосибирский государственный университет. Диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук «Численное моделирование плазмохимических реакторов травления» защитил в 2003 году в диссертационном совете, созданном на базе Объединенного института информатики Сибирского отделения Российской академии наук. Работает старшим научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук.

Диссертация «Математическое моделирование плазмохимических технологий микроэлектроники» выполнена в лаборатории анализа и оптимизации нелинейных систем отдела вычислительных технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный консультант — доктор физико-математических наук, профессор Григорьев Юрий Николаевич, Федеральное государственное бюджетное

учреждение науки Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, отдел вычислительных технологий, лаборатория анализа и оптимизации нелинейных систем, главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Воеводин Анатолий Федорович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория прикладной и вычислительной гидродинамики, отдел прикладной гидродинамики, главный научный сотрудник;

Князева Анна Георгиевна, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кафедра физики высоких технологий в машиностроении, профессор;

Чекмарев Сергей Федорович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория моделирования, главный научный сотрудник, дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН), г. Красноярск, **в своем положительном заключении**, подписанном Белолипецким Виктором Михайловичем, доктором физико-математических наук, профессором, главным научным сотрудником отдела вычислительных моделей в гидродинамике Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук — обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН указала: диссертация Горобчука А.Г. является законченной научно-исследовательской работой, обобщающей многолетние исследования соискателя, которые вносят основополагающий вклад в новое перспективное направление математического моделирования плазмохимических технологий микроэлектроники; исследования по тематике диссертации целесообразно использовать в институтах и конструкторско-технологических бюро плазмохимического профиля (ИТ СО РАН, ИТПМ СО РАН,

ОАО «НИИМЭ и Микрон», ЯФ ФТИАН РАН, в ТПУ, НГУ, МИЭТ, ИГХТУ и др.); полностью соответствует паспорту специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», удовлетворяет требованиям ВАК России, предъявляемым к докторским диссертациям, а сам соискатель заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук.

Соискатель имеет 80 опубликованных научных работ (24.8 п.л.) по теме диссертации, в том числе 14 статей (9.5 п.л./5.7 п.л.) в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ для представления основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора или кандидата наук; главу в коллективной монографии (1.8 п.л./1.1 п.л.); 27 работ в сборниках научных трудов и материалах всероссийских и международных конференций (10 п.л. / 0.6 п.л.). В совместных работах **вклад соискателя** состоял в том, что он участвовал в обсуждении постановок задач, занимался разработкой и реализацией численных алгоритмов, проведением расчетов, анализом результатов численного моделирования.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

Grigoryev, Yu.N. Numerical simulation of plasma-chemical processing semiconductors / Yu.N. Grigoryev, **A.G. Gorobchuk** // Micro electronic and mechanical systems. Ed. by Kenichi Takahata. 2009. InTech. ISBN 978-953-307-027-8. DOI:10.5772/7012. P.185-210;

Григорьев, Ю.Н. Численная оптимизация планарных реакторов индивидуального плазмохимического травления / Ю.Н. Григорьев, **А.Г. Горобчук** // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 1996. №2. С.47-63;

Григорьев, Ю.Н. Эффекты неизотермичности в плазмохимическом реакторе травления / Ю.Н. Григорьев, **А.Г. Горобчук** // Микроэлектроника. 1998. Т.27. №4. С.294-303;

Shokin, Yu.I. Advanced optimization of etching processes in radial flow plasma-chemical reactor / Yu.I. Shokin, Yu.N. Grigoryev, **A.G. Gorobchuk** // Proceedings of 8th International symposium on computational fluid dynamics (ISCFD-99). September 5th-10th, 1999, Bremen, Germany. 1999. University of Bremen.

Grigoryev, Yu.N. Numerical simulation of plasma-chemical reactors / Yu.N. Grigoryev, **A.G. Gorobchuk** // Notes on numerical fluid mechanics and multidisciplinary design. Computational science and high performance computing. Eds. Egon Krause, Yurii I. Shokin, Michael Resch, Nina Shokina. 2005. Springer. Germany. Vol.88 P.229-251;

Григорьев, Ю.Н. Особенности интенсификации травления кремния в CF_4/O_2 / Ю.Н. Григорьев, **А.Г. Горобчук** // Микроэлектроника. 2007. Т.36. №5. С.368-379;

Горобчук, А.Г. Влияние ВЧ-разряда на процесс плазмохимического травления кремния в CF_4/O_2 / А.Г. Горобчук, Ю.Н. Григорьев // Вычислительные технологии. 2007. Т.12. №5. С.51-66;

Григорьев, Ю.Н. Моделирование плазмохимической технологии травления в ВЧ разряде / Ю.Н. Григорьев, **А.Г. Горобчук** // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем-2012. Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.:ИППМ РАН, 2012. С.217-220;

Григорьев, Ю.Н. Влияние структуры ВЧ-разряда на неоднородность травления в плазмохимическом реакторе / Ю.Н. Григорьев, **А.Г. Горобчук** // Микроэлектроника. 2013. Т.42. №6. С.454-462;

Григорьев, Ю.Н. Численная модель ВЧ-разряда в плазмохимическом реакторе / Ю.Н. Григорьев, **А.Г. Горобчук** // Вычислительные технологии. 2013. Т.18. №5. С.58-73;

Григорьев, Ю.Н. Моделирование процесса полимеризации поверхности кремния при плазмохимическом травлении в CF_4/H_2 / Ю.Н. Григорьев, **А.Г. Горобчук** // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015. №2. С.81-86;

Gorobchuk, A.G. Numerical model of plasma-chemical etching of silicon in CF_4/H_2 plasma / A.G. Gorobchuk // Communication in computer and information science. 2015. Vol.549. P.44-52.

Помимо отзывов от оппонентов и ведущей организации на диссертацию и автореферат поступило 10 отзывов (все отзывы положительные, из них 5 без замечаний): от 1) д.ф.-м.н., заместителя директора Амирова И.И. (ЯФ ФТИАН РАН, г. Ярославль); 2) д.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника Трушкина Н.И. (АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, г. Троицк); 3) д.ф.-м.н., профессора Баутина С.П.

(УрГУПС, г. Екатеринбург); 4) д.ф.-м.н., профессора Исаева С.А. (С-ПбГУГА, г. Санкт-Петербург); 5) д.ф.-м.н., профессора Зинченко В.Г. и к.ф.-м.н., заведующего лабораторией Зверева В.Г. (НИИ ПММ ТГУ, г. Томск); 6) д.ф.-м.н., старшего научного сотрудника Жаровой И.К. (НИИ ПММ ТГУ, г. Томск); 7) д.ф.-м.н., профессора Кузнецова Г.В. (ТПУ, г. Томск); 8) д.ф.-м.н., профессора Коваля Н.Н. (ИСЭ СО РАН, г. Томск); 9) д.ф.-м.н., главного научного сотрудника Рябинина А.Н. (С-ПбГУ, г. Санкт-Петербург); 10) д.ф.-м.н., профессора, заместителя директора Боровина Г.К. (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва).

В отзывах высказаны следующие критические замечания (приведены наиболее существенные):

1) 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.

3) В автореферате не приводятся результаты моделирования характеристик плазмы ВЧ емкостного разряда (поток и энергия ионов), а приведены только зависимости от параметров проведения процесса. Это затрудняет проведение оценки разработанного метода.

4) В работе исследуется течение многокомпонентной газовой смеси с электрически заряженными компонентами. Диффузионный поток i -компоненты выражается через градиент концентрации этой же компоненты. Из общей теории многокомпонентной смеси следует, что данный поток должен зависеть также и от градиентов концентраций других компонентов. Поэтому используемая в работе модель диффузии требует дополнительного обоснования.

5) Отсутствуют данные об эффективности предложенных вычислительных технологий.

6) В уравнении теплопроводности (стр.75) отсутствуют источники (стоки) тепла, связанные с объемными реакциями и вязкой диссипацией. Во введении автор утверждал, что необходимо учитывать тепловые эффекты реакций. Почему нельзя учесть нагрев поверхности ионной бомбардировкой и тепловыделение вследствие

гетерогенных реакций явно (стр.150)? Как связаны температуры T_2 и T_{w2} с теплотами реакций?

7) Каким образом (из каких физических соображений) определяются коэффициент аккомодации (стр.168-169), коэффициенты прилипания (стр.181)?

8) Наряду с обзором достижений в рамках моделей сплошной среды, приведенном во Введении, был бы полезен краткий обзор результатов, получаемых на атомном уровне разрешения — с помощью методов Монте-Карло и молекулярной динамики.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается широкой известностью их исследований в области математического моделирования физико-химических процессов в гидродинамике, теплофизике, физике высоких технологий машиностроения, а также наличием большого числа публикаций в соответствующих сферах исследований, близких к теме диссертации Горобчука А.Г.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана обобщенная физико-математическая модель плазмохимических технологий микроэлектроники, позволяющая исследовать тонкие физические эффекты плазмохимического травления;

разработан конечно-разностный метод численного моделирования течений многокомпонентных газовых смесей с физико-химическими превращениями в технологических процессах плазмохимического травления в двумерной постановке, позволяющий проводить исследования, в том числе, в режиме пониженного давления с учетом эффектов развитого скольжения;

разработан конечно-разностный метод численного моделирования ВЧ-разряда в гидродинамическом приближении в двумерной постановке, обладающий свойством монотонности и сохраняющий положительные значения расчетных концентраций плазменных компонентов и электронной температуры;

разработаны оригинальные комплексы программ для численного моделирования плазмохимических технологий травлений и ВЧ-разряда с возможностью их применения в проектно-конструкторских разработках современного технологического оборудования производства микросхем;

показана важность учета эффектов разреженности среды, термодиффузии, излучения многоатомных молекул рабочих газов, структуры ВЧ-разряда, многокомпонентной кинетики химической реакций при моделировании технологических процессов плазмохимического травления;

получено решение ряда актуальных в научном плане задач исследования механизмов плазмохимического травления и способов их оптимизации.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

применительно к проблематике диссертации результативно (с получением обладающих новизной результатов) использованы разработанные программные комплексы для исследования и оптимизации плазмохимических технологий травления в микроэлектронике;

предложена обобщенная физико-математическая модель плазмохимических технологий микроэлектроники, содержащая оригинальные элементы, обуславливающие ее высокие прогностические возможности; в модели учитываются, в частности, сложный теплообмен с учетом ИК излучения многоатомных молекул, эффекты разреженности, термодиффузию химически активных частиц, многокомпонентную кинетику газофазных и гетерогенных реакций;

исследованы механизмы плазмохимического травления и рассмотрены способы оптимизации скорости и неоднородности травления, в частности, с помощью кольцевых протекторов, технологических параметров процесса, по составу газовой смеси с окисляющими или восстанавливающими добавками.

предложен численный алгоритм расчета течений многокомпонентных газовых смесей с физико-химическими превращениями в плазмохимических технологиях микроэлектроники в двумерной постановке, основанный на использовании новых дискретных краевых условий для завихренности в режиме пониженного давления;

предложен безусловно монотонный численный алгоритм расчета ВЧ-разряда в гидродинамическом приближении в двумерной постановке, основанный на использовании метода экспоненциальной подгонки;

изучены существующие модели и методы решения задач моделирования плазмохимических технологий и обоснована необходимость разработки новых моделей и численных методов решения таких задач.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны эффективные численные алгоритмы решения уравнений многокомпонентной гидродинамики и ВЧ-разряда в гидродинамическом приближении в двумерной постановке;

разработаны программные комплексы для исследования и оптимизации плазмохимических технологий микроэлектроники и ВЧ-разряда, которые использовались в исследованиях, проводимых в рамках проектов Российского фонда фундаментальных исследований №96-01-01642, №01-01-00827, №03-01-00160, №05-01-00359, №07-01-00315, №08-01-00116, №11-01-00064, №14-01-00274, междисциплинарных интеграционных программ фундаментальных исследований СО РАН №2000-43, №2003-2, №2009-26, №2012-47 и программ Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ №НШ-2314.2003.1, №НШ-9886.2006.9, №НШ-931.2008.9, №НШ-6068.2010.9, №НШ-6293.2012.9, №НШ-5006.2014.9, №НШ-7214.2016.9;

обоснована возможность применения разработанных программных комплексов для совершенствования технологии производства микросхем, развития моделей плазмохимического травления, а также для моделирования аналогичных процессов в многокомпонентных химически реагирующих газовых системах с физико-химическими превращениями.

Достоверность и обоснованность результатов исследования обеспечивается:

использованием адекватных физико-математических моделей основных составляющих технологии плазмохимического травления;

тщательным тестированием реализованных численных алгоритмов с контролем практической точности, в частности исследованием сходимости на последовательности вложенных сеток, устойчивости численных решений, и т. п.;

качественным и количественным совпадением полученных результатов с экспериментальными и численными данными аналогичных исследований других авторов.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в обсуждении постановок задач, разработке численных алгоритмов решения этих

задач, их программной реализации в виде комплексов программ, тестировании алгоритмов и программ, проведении многопараметрических расчетов с использованием многопроцессорных вычислительных комплексов, анализе и интерпретации результатов численного моделирования, подготовке печатных работ и докладов на конференциях.

На заседании 17 февраля 2017 г. диссертационный совет принял решение присудить Горобчуку А.Г. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 6 докторов наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (физико-математические науки), участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, проголосовали: "за" — 19, "против" — 0, недействительных бюллетеней — 0.

Председатель

диссертационного совета

академик



Шокин Юрий Иванович

Шокин Юрий Иванович

Ученый секретарь

диссертационного совета

к.ф.-м.н.

Лебедев Александр Степанович

Лебедев Александр Степанович

«20» февраля 2017 г.