

ОТЗЫВ НАУЧНОГО КОНСУЛЬТАНТА

профессора д.ф.-м.н. Григорьева Юрия Николаевича на диссертацию Горобчука Алексея Геннадьевича «Математическое моделирование плазмохимических технологий микроэлектроники», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Плазмохимическое травление (ПХТ) является одним из базовых технологических процессов производства современной кремниевой микро- и субмикроэлектроники. Но несмотря на его широкое использование на практике, теоретические исследования ПХТ, в первую очередь, основанные на математическом моделировании, до конца 90-х годов прошлого столетия не получили соответствующего развития. Одной из возможных причин такого положения было отсутствие в ПХТ интенсивных факторов, в частности, очень медленное течение рабочего газа, близкие к комнатным температуры, низкие уровни ионизации плазмы, слабые токи. Все это способствовало распространению простых моделей, пригодных разве что для грубой оценки производительности реакторов ПХТ различных конструкций, безотносительно к качеству получаемых изделий.

Можно предположить, что в недрах крупных электронных фирм уже тогда существовали численные модели для достаточно адекватного моделирования этого сложного процесса, которые являются не предназначенным для научной публикации «know how».

В любом случае исследования А.Г. Горобчука, начиная с первых работ, посвященных моделированию отдельных факторов, оказывающих существенное влияние на качество изделия, до создания комплексной продвинутой численной модели ПХТ со сложной кинетикой были и остаются актуальными как с точки зрения развития теории, так и в свете их приложения в приоритетном направлении развития науки, технологий и техники в Российской Федерации "Индустрия наносистем".

Вошедшие в диссертацию результаты можно условно разделить на две части. К первой относятся исследования автора, способствовавшие развитию физической модели ПХТ. В частности, им была показана важность учета теплообмена излучением, переноса активной компоненты не только концентрационной, но и термодиффузией, вклада граничных условий скольжения и температурного скачка на нижней границе диапазона рабочих давлений промышленных реакторов травления. Для этого диссертантом были созданы физически обоснованные модели соответствующих процессов. Здесь же надо упомянуть обоснованный диссертантом способ оптимизации равномерности травления образцов с помощью кольцевых протекторов, а также выполненное им сравнение простых кинетик, выявившее существенную зависимость производительности реактора от сделанного выбора. Последнее показало необходимость развития моделей ПХТ с адекватной плазмохимической кинетикой, как газофазной, так и поверхностной.

Математическое моделирование процессов ПХТ на основе достаточно полных моделей многокомпонентной кинетики смесей тетрафторметана с ки-

слородом и водородом составляет вторую часть результатов диссертации. В ней надо выделить оптимизационные расчеты реактора промышленной схемы по составу рабочей смеси, оценку влияния абсорбции отдельных радикалов, возникающих в процессе ПХТ, на скорость травления. В этих расчетах впервые в численном эксперименте был воспроизведен ряд наблюдавшихся на практике эффектов, таких как явление гистерезиса скорости травления в зависимости от концентрации кислорода или замедление процесса травления вплоть до полной остановки путем присадки водорода, что подтвердило адекватность и большие прогностические возможности развиваемых моделей.

Отдельно следует отметить созданную диссертантом численную модель ВЧ-разряда в гидродинамическом приближении, потребовавшую значительных усилий автора при ее разработке и программной реализации. В итоге проведенных исследований была выдана обоснованная рекомендация описания распределения первичных электронов формулой для диффузионно-дрейфового приближения, вполне удовлетворительной для проведения параметрических оптимизационных расчетов. В то же время при радикальном изменении конфигурации реактора разработанная модель позволит заново рассчитать конфигурацию разряда.

В процессе создания численной модели ПХТ диссертант предложил ряд новых численных алгоритмов для расчета переноса и реакций диссоциации-рекомбинации в многокомпонентных газах, а также ВЧ-разряда, которые с необходимостью позволяют выполнить физические требования неотрицательности рассчитываемых концентраций и температур электронов и многочисленных газовых компонент. Созданные алгоритмы и программы объединены в единый комплекс, который может быть использован для математического моделирования как при дальнейших исследованиях процесса ПХТ в плазме других исходных газовых смесей, так и новых задач физико-химической гидродинамики.

Сделанный краткий обзор результатов позволяет сделать вывод, что диссертация А.Г. Горобчука полностью отвечает требованиям паспорта специальности 05.13.18, так как включает в себя создание оригинальной математической модели, адекватно описывающей многофакторный физический процесс, разработку новых численных методов и создание на этой основе комплекса программ, который позволил автору получить ряд новых результатов в области математического моделирования процесса ПХТ, являющегося одним из основных в производстве изделий микроэлектроники.

Основные результаты диссертации полностью опубликованы в авторитетных международных и российских периодических изданиях, в том числе входящих в рекомендательный список ВАК, докладывались на многочисленных всероссийских и международных конференциях, что свидетельствует о достаточной апробации результатов, вошедших в диссертационную работу.

Дополнительным аргументом в пользу положительной оценки диссертации может служить поддержка исследований диссертанта грантами РФФИ на всем протяжении работы, а также его постоянное участие в программах поддержки ведущей научной школы академика Ю.И. Шокина и интеграционных проектах СО РАН.

Оценивая результаты диссертации в совокупности, можно констатировать, что работами А.Г. Горобчука открывается перспективное направление в

математическом моделировании актуальных технологий плазмохимического травления. Созданная и развиваемая диссертантом оригинальная численная модель ПХТ, включающая в себя достаточно полную кинетику в газовой фазе и на обрабатываемой поверхности, ряд не рассматривавшихся ранее физических эффектов, моделирование ВЧ-разряда в гидродинамическом приближении, которая реализуется на базе созданного автором комплекса программ, является основополагающим вкладом в новое направление и апробированным инструментом для продолжения исследований.

Считаю, что диссертационная работа Алексея Геннадьевича Горобчука удовлетворяет требованиям ВАК России, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 05.13.18, и соискатель несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по избранной специальности.

Главный научный сотрудник
лаборатории анализа и оптимизации
нелинейных систем ИВТ СО РАН
д.ф.-м.н., профессор

Григорьев Юрий Николаевич

6 сентября 2016 г.

630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт вычислительных технологий
Сибирского отделения Российской академии наук.
Тел. 89139525142
e-mail: grigor@ict.nsc.ru

Подпись д.ф.-м.н., проф. Ю.Н. Григорьева удостоверяю.
Ученый секретарь ИВТ СО РАН
к.ф.-м.н.



/Д.В.Есипов/