

## ОТЗЫВ

на автореферат 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.

Диссертация Горобчука А.Г. посвящена разработке адекватных эксперименту математических моделей плазмохимических технологий травления кремния, созданию эффективных методов численного моделирования, проведению численных исследований протекающих в плазмохимических реакторах физических и химических процессов и поиску новых способов оптимизации и управления технологическими процессами плазмохимического травления. В настоящее время плазмохимические технологии травления широко используются при изготовлении сверхбольших и ультрабольших интегральных схем. Однако в последние годы в связи с развитием нанотехнологий, переходом на новые топологические размеры и масштабы пластин требования к показателям плазмохимических технологий, таким как однородность и скорость травления, допустимые дефекты и т.д., становятся все более жесткими. В этой ситуации создание новых высокоэффективных плазменных технологий микроэлектроники, выбор оптимальных режимов их функционирования невозможны без глубокого понимания физико – химических процессов, протекающих в плазме, а также при взаимодействии плазмы с обрабатываемой поверхностью. Математические модели позволяют изучать указанные процессы и подбирать оптимальные параметры в численных экспериментах, которые намного дешевле в сравнении с реальными физическими экспериментами. С учетом вышесказанного выбранная тема диссертации несомненно является актуальной и практически важной.

Одним из наиболее значимых достижений диссертанта следует считать разработку обобщенной физико – математической модели для описания технологических процессов плазмохимического травления в двумерной постановке, которая включает в себя многокомпонентную кинетику газофазных и расширенную кинетику гетерогенных реакций, учитывает сложный теплообмен с учетом ИК-излучения многоатомных молекул, термодиффузию и ряд других процессов, которые ранее не принимались во внимание при моделировании



плазменного травления. Включение в модель новых процессов позволило существенно улучшить совпадение результатов расчета с известными экспериментальными данными и повысить ее прогностические возможности.

Созданная модель была успешно апробирована автором при численном исследовании базовых физико-химических процессов, определяющих механизмы плазмохимического травления кремния в различных экспериментальных условиях. Ее использование позволило адекватно воспроизвести в численных расчетах экспериментально наблюдаемые кинетические эффекты и количественные соотношения, в частности, получить значительное увеличение скорости травления кремния в смеси  $CF_4/O_2$  по сравнению с чистым тетрафторметаном, объяснить наличие эффекта гистерезиса и максимума в зависимости скорости травления от концентрации  $O_2$ , процесс полимеризации и снижение скорости травления в смеси  $CF_4/H_2$  и т.д.

В целом, полученные автором результаты обладают несомненной новизной, обладают большой научной и практической значимостью. Научные положения, вынесенные им на защиту, аргументированы и достоверны. Основные результаты работы опубликованы в открытой печати, обсуждались на российских и международных конференциях и симпозиумах.

Считаю, что представленная работа соответствует требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ и требованиям п.п. 9-11 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном постановлением № 842 Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, а ее автор заслуживает присуждения ему искомой степени.

Доктор физико-математических наук  
ведущий научный сотрудник

Трушкин Николай Иванович

АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 108840, г. Москва, г.Троицк, ул. Пушкиновых,  
владение 12, [trushkin@triniti.ru](mailto:trushkin@triniti.ru), 8-495-841-52-36. 26 декабря 2016 г.

Подпись Н.И. Трушкина заверяю:

Ученый секретарь АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ  
кандидат физико-математических наук

А.А. Ежов