

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук Горобчука Алексея Вадимовича

«Математическое моделирование плазмохимических технологий микроэлектроники» по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Задачи исследования и оптимизации процессов в плазмохимических реакторах на основе ВЧ-разряда представляют интерес для развития технологий микроэлектроники. В то же время, теоретическое описание наблюдаемых в них явлений представляет собой чрезвычайно трудную задачу, т. к. включает взаимодействие большого многообразия плазмохимических, газодинамических, оптических, и других процессов. Обычно это связано с разработкой сложных программ с большим объемом вычислительных работ и нередко приводит к вынужденному упрощению подходов к решению задач. В данной работе предлагается решение этой задачи благодаря применению более эффективных алгоритмов с применением суперкомпьютерных технологий, не прибегая к упрощениям.

В прикладном смысле работа направлена на дальнейшее развитие алгоритмов и моделей низкотемпературной плазмы ВЧ-разряда применительно к исследованию кинетики в плазмохимических реакторах травления кремния, широко распространенного в производстве изделий микроэлектроники. При этом протекающие в них процессы учитываются в наиболее полном виде исходя из анализа известных литературных данных по имеющимся моделям.

На основе проведенного анализа моделей реакторов на основе ВЧ-разряда выявлен ряд недостатков, связанных с отсутствием алгоритмов по переносу инфракрасного излучения многоатомных молекул в плазме, эффектам разреженности среды, термодиффузии, что отрицательно сказывается на точности, достоверности результатов и возможности предсказания оптимальных режимов проведения процесса травления в широком диапазоне экспериментальных условий. Исходя из этого в модель были внесены соответствующие поправки, существенно расширяющие диапазон экспериментальных условий, в которых модель дает достоверные результаты.

В частности, предложены эффективные численные алгоритмы решения уравнений многокомпонентной гидродинамики реагирующей смеси газов, моделирования ВЧ-разряда в гидродинамическом приближении, а также параллельные алгоритмы ускорения расчетов многокомпонентной химической кинетики в аксиально-симметричном разряде. Проведены проверки алгоритмов с контролем практической точности, в частности, по последовательности вложенных сеток, и ряд других.

В окончательный вариант предложенной модели включены следующие виды расчетов: численное решение набора уравнений для аксиально-симметричного ВЧ-разряда в гидродинамическом приближении; расчет многокомпонентной химической кинетики плазмы; решение уравнений многокомпонентной гидродинамики реагирующей смеси; расчет переноса ИК-излучения в плазме. Таким образом, условия, необходимые для корректного описания газового разряда, кинетики, газовой динамики, переноса излучения, потоков заряженных и нейтральных частиц в диапазоне давлений газа от 0.01 до 1 Тор в модели выполнены.

С учетом тематики диссертационной работы, на основе предложенной модели проведены научные исследования. В частности, методом численного моделирования исследованы механизмы травления кремниевых образцов в плазме тетрафторметана в схемах реакторов *pedestal* и *stadium* в изотермическом приближении, проанализировано влияние неизотермичности и разреженности рабочей среды на скорость и качество травления образцов с учетом теплового излучения многоатомных молекул и

термодиффузии. Исследованы особенности тепломассообмена в широкоапертурном реакторе, влияние парциального состава смеси CF_4/O_2 , геометрии кольцевых протекторов, характеристик и структуры ВЧ-разряда на скорость и равномерность травления кремния. Отдельно рассмотрены процессы пассивации кремния в смесях CF_4/H_2 , влияние ее состава на формирование слоев CF_2 и CF_3 на поверхности образца.

В результате проведенных исследований впервые показана возможность коррекции распределения скорости травления по поверхности образца, с приближением его к равномерному и оптимизации этого процесса с помощью кольцевых протекторов. Также, даны рекомендации по конструкционным материалам реактора, проведена оптимизация скорости травления по составу смеси CF_4/O_2 и обнаружен эффект гистерезиса на графике зависимости скорости травления от концентрации фтора при хемосорбции кислорода на кремнии. Для бинарной смеси CF_4/H_2 установлен основной механизм пассивации поверхности образца, состоящий в адсорбции радикалов CF_2 и формировании адсорбционного слоя, что приводит к снижению скорости травления с ростом концентрации водорода. Показано, что при концентрации водорода больше 40% процесс травления полностью прекращается.

Достоверность полученных данных проверялась путем сопоставления результатов моделирования с экспериментом. Помимо этого, в диссертационной работе приведено сравнение данных моделирования с результатами, полученными в других работах на основе упрощенного подхода к моделированию процесса плазмохимического травления в ВЧ-разряде. В частности, показано влияние вкладов дополнительных видов частиц на скорость травления и концентрацию фтора в тетрафторметане.

Автореферат содержит новые научные результаты и положения, указанные в паспорте специальности и удовлетворяет требованиям ВАК по количеству публикаций и объему оригинального материала. Не останавливаясь на недочетах стилистического характера считаю, что соискатель заслуживает присуждения степени доктора физ.-мат. наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Доктор технических наук, профессор,
заведующий лабораторией плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН,

Коваль Николай Николаевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН).

634055, г. Томск, проспект Академический, 2/3

Тел. (3822) 491-544

Факс (3822) 492-410

E-mail: contact@hcei.tsc.ru

<http://www.hcei.tsc.ru/>

Подпись Ковалья Николая Николаевича удостоверяю.

Учёный секретарь ИСЭ СО РАН,

доктор физ. -мат. наук

Пегель И. В.

30 января 2017 г.