

О Т З Ы В

на автореферат диссертации Ляхова Анатолия Александровича «**Моделирование кинетических процессов в аргон-силановой высокочастотной плазме пониженного давления**», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

В конструкциях многих плазменных устройств находит широкое применение тлеющий разряд, неравновесность плазмы которого является ключевым свойством в технологических применениях. Отрыв температуры электронов от тепловой энергии и возникающая одновременно с этим неравновесность распределения частиц газа по энергетическим уровням обеспечивают необходимые условия для осуществления заданных процессов в рабочем объеме плазмы (создание инверсной заселенности, диссоциация молекул, радиационные переходы и др.). Теоретическое описание неравновесных плазменных процессов, требует обращения к специальным методам статистической физики, которые для практических задач очень редко допускают решения в аналитической форме. Полнота описания во многих случаях не может быть получена также и экспериментальными методами, поскольку они, как правило, дают информацию о параметрах только одной подсистемы плазмы. В связи с этим при исследовании газоразрядных плазменных систем большую роль приобретают численные методы. В частности, такие методы применяются для математического моделирования плазмохимических реакторов и применения их для синтеза пленок. Расчеты состава сред и моделирование процессов внутри реактора - необходимый этап при расчете и оптимизации конкретного плазмохимического процесса.

В диссертационной работе Ляхов А.А. численно исследовал плазму $\text{Ar}+\text{SiH}_4$, которая часто применяется в качестве исходной смеси для получения пленок аморфного кремния по методу плазмохимического осаждения из газовой фазы. В рамках поставленных задач автор рассмотрел две подсистемы аргон-силановой плазмы – электронную и подсистему нейтральных компонентов. Описание неравновесной кинетики электронов выполнено путем решения кинетического уравнения Больцмана в двучленном приближении. Новизной такого подхода является то, что энергетический спектр электронов определяется с учетом наличия пылевых частиц в объеме силановой плазмы. Кроме этого на основе результатов расчета достаточно подробно анализируется влияние частиц пыли на транспортные коэффициенты электронов. Установлено, что в силаносодержащей плазме влияние пылевых частиц наиболее сильно сказывается в области средних значений приведенного электрического поля, а для плазмы аргона коэффициенты переноса при добавлении пыли увеличиваются в малых полях. Автор объясняет этот эффект наличием минимума в транспортном сечении рассеяния электронов. Близкий по физическому смыслу эффект наблюдается в некоторых молекулярных газах, для которых на зависимости скорости дрейфа электронов от величины приведенного поля наблюдается участок отрицательной дифференциальной проводимости, что объясняется также присутствием глубокого минимума в сечении рассеяния электронов. В этой связи аргументацию автора по увеличению коэффициентов переноса для электронов в пылевой плазме можно считать вполне обоснованной. Вторая часть работы посвящена моделированию химической кинетики нейтральных компонентов аргон-силановой плазмы. Для описания процессов массопереноса

химически-реагирующего газа соискатель использовал диффузионное приближение, что вполне оправдано при низких давлениях рабочего газа. Судя по содержанию автореферата, значительное внимание в работе уделено исследованию кинетики реакций силановых радикалов. В результате расчетов выявлены основные каналы образования и стока основных продуктов плазмохимического процесса и проанализирована их временная динамика. В эксперименте такого рода информацию получить довольно сложно, в тоже время с практической точки зрения сведения о «маршрутах» реагентов плазмы очень полезны, т.к. позволяют конкретизировать основные закономерности плазмохимического процесса осаждения аморфного кремния.

По тексту автореферата имеются следующие замечания:

1. В изложении результатов исследования кинетики электронов в автореферате не указаны важные детали, касающиеся определяющих уравнений и используемых приближений. Каким образом вычислялся ионный ток на пылевую частицу? Как задавалась энергия плазменных ионов, если расчет выполнялся для приведенного поля, значения которого изменяются в пределах трех порядков?
2. В приведенной на стр. 4 формуле для параметра $\xi_d = an_d$ радиус частиц указан в первой степени.

Указанные замечания не изменяют общего впечатления от представленного в автореферате исследования, которое в целом заслуживает положительной оценки. Работа соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Считаю, что Ляхов Анатолий Александрович, достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Начальник управления – проректор по сетевой информационной деятельности, заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, (3822) 52-98-52, <http://www.tsu.ru>, rector@tsu.ru), доктор физико-математических наук (01.04.05 – Оптика), профессор



Демкин Владимир Петрович
тел. (3822)529-848
E-mail: demkin@ido.tsu.ru

20.12.2018

