

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертации Ю.А. Манкелевича «Плазменно и термически стимулированное осаждение алмазных пленок: многомерные модели химических реакторов», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Диссертация Ю.А. Манкелевича посвящена расчетно - теоретическому исследованию физических и плазмохимических процессов газофазного химического осаждения тонких углеродных пленок в реакторах различного типа и выполнена в тесном контакте с экспериментальными исследованиями. Углеродные пленки обладают рядом уникальных свойств, такие как аномально высокие эмиссионные характеристики, большая электрохимическая емкость и др., которые делают их весьма перспективным материалом с точки зрения приложений в информационных технологиях, электронике, энергетике и т. д. Следует, однако, отметить, что перспективы практических применений углеродных пленок напрямую связаны с созданием эффективных технологий их получения, которые бы, с одной стороны, позволяли вести массовое производство пленок при их высоком качестве, с другой - обеспечивали достаточно низкую себестоимость конечного продукта. Очевидно, что создание подобных технологий невозможно без глубокого понимания всей совокупности физических и плазмохимических процессов, лежащих в основе получения углеродных пленок. Эффективность технологий будет напрямую определяться выбором оптимальных условий реализации указанных процессов в реакторах различного типа. Поэтому выбранная тема диссертации несомненно является актуальной, поскольку исследуемые реагирующие газы и способы их активации горячей нитью, дуговым плазмотроном, разрядами постоянного тока и СВЧ разрядами широко используются на практике в различных химических реакторах. Знания, полученные в диссертационной работе, будут полезны и для более широкого круга проблем активации газовых смесей и осаждения различных тонких пленок.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Во введении автор обосновывает актуальность выбранной темы исследований, формулирует цели и задачи работы, а также приводит основные положения, выносимые на защиту. Здесь же представлено краткое описание содержания диссертации и обсуждение практической ценности полученных результатов.

**Первая глава** диссертации носит вводный характер. Она содержит обзор литературы по изучаемой проблеме, краткое описание основных типов химических реакторов, которые используются для получения углеродных пленок и представляет современное положение дел в рассматриваемой области.

**Вторая глава** посвящена изучению самого простого по технической реализации типа реактора – реактора с горячей нитью. Здесь подробно описаны разработанные автором пространственно двумерные и трехмерные модели реакторов, а также механизмы роста алмазных пленок, результаты моделирования реакторов в различных газовых смесях: метан - водородных, метан - водородных с добавками  $\text{NH}_3$  и  $\text{B}_2\text{H}_6$ . Основным достижением автора в этой части следует считать получение пространственных распределений концентраций различных газовых компонент и температуры газа, установление важности учета трехмерных (3-D) эффектов в этих распределениях, анализ конверсии газовых компонент в Н/С смесях, расчет потоков радикалов на подложку в реакторах с одной горячей нитью и системой параллельных нитей. Следует также отметить во многом пионерское исследование превращений компонент в газовых смесях Н/С/Н и Н/С/В в реакторах с горячей нитью, стимулированное проблемами легирования алмазных пленок.

**В третьей главе** исследуется каталитическая диссоциация молекул водорода и азота на поверхности горячей нити и поведение концентраций атомов Н и N как функций давления газа и температуры нити. Примененный автором двухступенчатый механизм диссоциации с одновременным согласованным учетом высокоградиентных распределений температуры газа и концентраций атомов в окрестности горячей нити позволил объяснить давнюю проблему экспериментально наблюдаемого поведения атомов от температуры нити и давления (насыщения их концентраций при повышенных давлениях газа). Здесь же получены интересные результаты по пространственному распределению колебательной неравновесности молекул азота.

**В четвертой главе** построена двумерная (2-D) модель распада высокоскоростной горячей плазменной струи дугового плазмотрона и ее смешения с окружающей, более холодной С/Н/Аг смесью, предложена методика определения параметров струи плазмотрона на входе в реакционную камеру. Автору удалось в рамках развитой двумерной модели и известных ион-молекулярных и электрон - ионных реакций описать наблюдаемое в эксперименте весьма неожиданное уменьшение (примерно в 100 раз) линейной плотности возбужденного атома водорода  $\text{H}(n=2)$  при увеличении в несколько раз доли молекулярного водорода в исходной  $\text{H}_2/\text{Ar}$

смеси. Достаточно интересным физическим результатом, полученным в этой главе, является установление автором важности процесса бародиффузии, который обычно не учитывался в известных плазмохимических моделях. Диссертант показал, что при расширении высокоскоростной струи процесс бародиффузии приводит к существенному разделению атомов Н и Аг в зоне ударной волны. Проведенное моделирование показало, что получаемые в расчетах потоки атомов углерода и молекул СН на подложку вполне обеспечивают наблюдаемые в эксперименте высокие скорости роста алмазных пленок порядка 100 мкм/ч.

**В пятой главе** с помощью разработанной двумерной численной модели изучены процессы активации Н/С и Н/С/О смесей высокого давления (100-200 Тор) разрядом постоянного тока. Численным моделированием автором были получены характерные параметры плазмы, их пространственные распределения и изменения в экспериментальных режимах с различными межэлектродными зазорами, выявлены основные процессы активации смесей и плазмохимической конверсии компонент. Одним из наиболее значимых результатов, полученных в этой главе, является установленное соотношение между термически равновесными и неравновесными электронными механизмами рождения наиболее важных химически активных радикалов.

**В шестой главе** представлены разработанная двумерная (в цилиндрической геометрии) модель реактора с активацией газовой смеси СВЧ разрядом, результаты систематических численных расчетов для варьируемых параметров реактора и различных Н/С/Аг, Н/Аг/О, Н/В/Аг/О и Н/В/С/Аг/О газовых смесей и сравнения расчетных и многочисленных разнообразных экспериментальных данных. В этой главе получен целый ряд новых интересных результатов, среди которых следует особо отметить обнаружение трех характерных областей пространственно-разделенного механизма конверсий углеводородных компонент, установление основных каналов трансформации поглощенной электрической мощности и детального энергетического баланса плазмы с расчетом потоков тепла на все стенки реактора, подложку и подложкодержатель, оценку предельной мощности для реактора заданного объема в Н/С/Аг смесях и последовательного изменения параметров плазмы при варьировании доли аргона в смеси от 0 до 98.5%. Также несомненный интерес представляют результаты по слабоизученной Н/В/С/Аг/О плазмохимии, эффектам борных компонент, в частности, взрывному росту атомов В и молекул ВН при добавлении ~1%

метана В/Н/Аг плазму реактора с СВЧ разрядом, вкладу хемилемюнесценции ВН\* в свечение плазмы.

**В заключении (выводах)** автор кратко формулирует наиболее существенные результаты проведенных исследований.

**По диссертации можно сделать следующие замечания.**

1. Вопрос о роли ион – молекулярных реакций в механизме плазмохимических превращений различных газовых смесей является важным ввиду больших констант скоростей элементарных процессов с участием ионов. При описании плазмохимического реактора с дуговым разрядом (гл. 4), в котором концентрации ионов достаточно высоки, автор указывает на важность ион – молекулярных реакций, однако какие – либо количественные данные о вкладе этих реакций в механизм конверсии С/Н/Аг смесей в диссертации не приведены.
2. Известно, что цепные реакции, инициированные плазмой, могут значительно уменьшить энергетическую цену получения химически активных частиц, в частности, радикала  $\text{CH}_3$ , который является ключевым в механизме роста алмазных пленок. В этой связи поиск и предсказание экспериментальных условий, в которых могут эффективно протекать цепные реакции, весьма актуальны с точки зрения практического применения плазменных методов получения углеродных пленок. В диссертации не уделено должного внимания этому вопросу.
3. В реакторе с СВЧ разрядом (гл.6) автор не учитывал возможный нагрев СВЧ излучением входного кварцевого окна реакторной камеры. Было бы весьма интересно и полезно с точки зрения практических приложений обсудить эффекты нагрева этого окна, особенно в аргон - доминирующих смесях. Каков масштаб этих эффектов и как они могут повлиять на расчетные результаты?

Указанные замечания не затрагивают основных выводов и существа диссертационной работы, которая выполнена на высоком научном уровне и представляет собой существенное развитие физики плазмохимических процессов в газоразрядной плазме. Надежность и обоснованность расчетных результатов и выводов подтверждена сравнением полученных результатов с аналитическими решениями и многочисленными экспериментальными данными.

Основные результаты диссертации были опубликованы в ведущих научных журналах и получили апробацию на российских и международных научных конференциях. Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание.

Результаты работы представляют значительный интерес для широкого круга специалистов в области физики и химии плазмы и могут быть рекомендованы для использования в национальном исследовательском центре «Курчатовский институт», ОИВТ РАН, институте общей физики РАН, физико –технологическом институте РАН, всероссийском электротехническом институте, Троицком институте инновационных и термоядерных исследований.

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 01.04.08 - физика плазмы, а ее автор заслуживает присуждения ему искомой степени.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук  
ведущий научный сотрудник



Н.И.Трушкин

Подпись Н.И.Трушкина заверяю

Ученый секретарь ГНЦ РФ ТРИНИТИ  
кандидат физико-математических наук



А.А.Ежов