

## ОТЗЫВ

**на автореферат 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.**

В диссертационной работе Ю.А. Манкелевича полноразмерное моделирование с детальным учетом плазмохимической кинетики (для десятков компонент в различных газовых смесях) опирается и тесно связано с обширными и разнообразными экспериментальными данными сразу для нескольких, наиболее распространенных типов реакторов для газофазного химического осаждения (ГХО) алмазных пленок и монокристаллов. Химические реакторы рассмотренных типов, например, с горячей нитью и СВЧ разрядом находят широкое применение в технологии и научных исследованиях. Несмотря на огромный объем эмпирических знаний режимов работы таких реакторов, корректное описание (моделирование) достаточно полной картины процессов в плазме и на поверхности растущего алмаза является очень непростым ввиду комплексности задачи и необходимости учета множества факторов. Имеется лишь небольшое количество работ в мире по серьезному моделированию отдельных реакторов. Поэтому проведение детальных численных расчетов функционирования реакторов ГХО очень важны для более глубокого механизмов синтеза алмаза, для осмысленного управления условиями синтеза с целью достижения необходимого качества алмазного материала и высоких скоростей роста, а также для конструирования оптимальных реакторов. Таким образом, работа Ю.А. Манкелевича крайне актуальна.

Важными результатами в диссертационной работе являются рассчитанные пространственные профили важнейших радикалов в газе, температуры, степени ионизации в условиях, близких к используемым в реальных системах осаждения алмаза, также их эволюция при вариации основных параметров - состава смеси, давления, плотности СВЧ мощности. Эти результаты позволили, в частности, дать полезные для практики численные оценки скорости роста и концентрации метильного радикала в зависимости от содержания метана в газе и давления. Как положительный факт следует отметить сопоставление расчетов с экспериментальными данными, известными для ряда рассмотренных способов осаждения. Также важными являются результаты моделирования СВЧ плазмы в смесях  $Ar/CH_4/H_2$  с высоким обогащением по

аргону, которые используют для осаждения ультрананокристаллических алмазных (UNCD) пленок. Оказалось, что широко ранее принятое положение о том, что основным строительным кирпичиком при строительстве алмазной решетки, является радикал  $C_2$ , теперь можно поставить под сомнение, т.к. расчетные концентрации  $C_2$  у подложки намного ниже, чем  $CH_3$ .

К работе, тем не менее, есть замечание. В части моделирования СВЧ реактора в автореферате ничего не сказано о сопоставлении результатов автора с работами других исследователей на эту тему. Так, группа из Парижского Университета 13 (Hassouni K, Gicquel A. Silva, F. ...) опубликовала с конца 90-х годов значительное количество работ по детальному обсчету СВЧ плазмы (в рамках двумерной модели для водорода и одномерных моделей для C/H смесей) с параметрами, типичными для роста как поликристаллических, так и монокристаллических алмазных пленок. Было бы полезно хотя бы коротко прокомментировать в тексте, в чем отличие и новизна полученных в диссертации данных с выводами коллег.

В целом диссертационная работа выполнена на очень высоком научном уровне, написано ясно, подробно. Новизна и значимость результатов для научного сообщества несомненна.

По представленным в результатах диссертационная работа Ю.А. Манкелевича полностью соответствует требованиям к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а соискатель достоин присвоения ему искомой ученой степени по специальности 01.04.08 – "Физика плазмы".

3 февраля 2014

зав. Лабораторией алмазных материалов,  
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН  
канд. физ-мат. наук



Ральченко В.Г.

Подпись руки В.Г. Ральченко удостоверяю,

Ученый секретарь ИОФ РАН  
канд. физ-мат. наук



С.Н. Андреев