

Отзыв официального оппонента

о диссертационной работе **Чернова Валерия Валерьевича «Исследование плазмохимического синтеза тонких алмазных пленок в плазме, поддерживаемой пересекающимися пучками непрерывного СВЧ излучения миллиметрового диапазона длин волн»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы

Работа В.В. Чернова посвящена исследованию источника неравновесной плазмы на основе СВЧ разряда, поддерживаемого двумя пересекающимися пучками непрерывного излучения миллиметрового диапазона длин волн, используемого для реализации плазмохимического осаждения тонких алмазных пленок. Важной задачей, решаемой в диссертации, является оптимизация работы плазмохимического СВЧ реактора для достижения максимальной скорости контролируемого роста тонких алмазных пленок большой площади с наперед заданными свойствами.

Актуальность работы обусловлена тем, что в последнее время различные типы сверхвысокочастотных разрядов широко применяются в качестве источников неравновесной плазмы в различных технологиях. Одной из таких успешно развивающихся технологий является получение тонких ультранано- и нанокристаллических алмазных пленок методом осаждения из газовой фазы (CVD технология). Метод искусственного выращивания алмаза заключается в осаждении атомов углерода из газовой фазы с образованием ими кристаллической решетки алмазного типа. Как правило, при этом процессе для осаждения алмаза применяется водород с небольшой добавкой углеродсодержащего газа. Активация газовой смеси может осуществляться как термическими методами, так и с помощью газового разряда. Поэтому разработка новых видов СВЧ-реакторов, а также оптимизация их работы с целью повышения скорости роста тонкой поликристаллической алмазной пленки без ухудшения ее качества на основе изучения происходящих в плазме СВЧ разряда процессов, является актуальной задачей.

Научная и практическая значимость работы заключается в том, что исследования, выполненные В.В. Черновым, направлены на разработку новых плазмохимических реакторов для CVD-технологии на основе мощных гиротронов миллиметрового диапазона длин волн. В диссертации выявлен оптимальный режим создания низкотемпературной плазмы, обеспечивающий повышение скорости роста поликристаллических тонких алмазных пленок большой площади без ухудшения их качества. Разработанный им метод создания и поддержания над подложкой плазменного

слоя может быть использован не только для осаждения тонких нанокристаллических алмазных пленок, но и для обработки подложек и создания новых материалов, используемых в различных практических приложениях.

Диссертация состоит из введения, четырех основных глав, заключения, трех приложений и списка цитируемых работ.

Во введении сформулирована постановка проблемы, обоснована ее актуальность, определены основные задачи и цели диссертации, представлены положения, выносимые на защиту, приведено краткое описание работы.

В первой главе дан обзор современного состояния технологии плазмохимического осаждения тонких поликристаллических алмазных пленок в многокомпонентной газовой среде. Кратко описаны различные типы CVD-реакторов. Особое внимание акцентируется на предварительной подготовке подложек для плазмохимического осаждения, обсуждаются механизмы и скорость роста алмазных пленок в неравновесной плазме. Рассмотрены основные свойства и различные применения ультранано- и нанокристаллических алмазных пленок.

Во второй главе диссертации представлено описание экспериментальной установки, созданной на базе гиротрона с частотой 30 ГГц. На этой установке проводились исследования формирования и поддержания однородных плазменных слоев большой апертуры. Низкотемпературная плазма создавалась над подложкой в области двух пересекающихся волновых пучков непрерывного СВЧ излучения миллиметрового диапазона длин волн. Достигнутые в работе параметры плазмы позволили получить высокие концентрации радикалов и обеспечить их однородный поток на поверхность подложки большой площади. Для измерения характеристик СВЧ разряда в CVD-реакторе использовалась бесконтактная оптическая спектроскопия, позволяющая получить данные о температуре газа, концентрации электронов. К сожалению, в тексте диссертации не представлены данные о характеристиках используемого спектрометра и световода, что не позволяет оценить возможность применения данной аппаратуры для измерения параметров плазмы. Температура газа определялась по вращательной структуре полосы с длиной волны канта 516 нм системы Свана молекулярного углерода. Концентрация электронов измерялась по штарковскому уширению спектральной линии H_{β} бальмеровской серии атомарного водорода. Определены зависимости концентрации электронов и температуры газа от состава и давления многокомпонентной газовой смеси и мощности гиротрона. Методом травления графита были получены данные о величине и зависимости потока атомов водорода от расстояния до центра подложки..

В третьей главе дано описание численной модели СВЧ разряда, поддерживаемого в двух пересекающихся над подложкой волновых пучках в многокомпонентной газовой смеси. Представлены результаты численного моделирования СВЧ разряда в широком диапазоне условий. Методом численного моделирования и теоретического анализа были выявлены оптимальные условия поддержания однородного СВЧ разряда, используемого для технологии осаждения поликристаллических алмазных пленок.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию плазмохимического осаждения нанокристаллических алмазных пленок на подложки из различных материалов. Дано описание разработанного автором способа подготовки подложки и нанесения на ее поверхность центров нуклеации алмаза, основанного на методе центрифугирования. Приведены результаты осаждения тонких нанокристаллических алмазных пленок на кремниевые и кварцевые подложки. Исследованы свойства полученных пленок и их связь с параметрами СВЧ разряда. Особого внимания заслуживают результаты, полученные при осаждении тонких нанокристаллических покрытий на объемные молибденовые катоды. Экспериментально показано увеличение плотности эмиссионного тока из молибденового катода при нанесении на его поверхность однослойных и двухслойных алмазных пленок.

В **Заключении** приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

Полученные в работе В.В. Чернова результаты являются актуальными, новыми, вносят определенный вклад в понимание физики создания низкотемпературной плазмы в пересекающихся волновых пучках миллиметрового диапазона длин волн, полезны для разработки оптимальных режимов создания газоразрядной плазмы большого объема, имеют практическую значимость для решения стоящих перед научным сообществом проблем, связанных с получением тонких ультранано- и нанокристаллических алмазных пленок методом осаждения из газовой фазы.

Автором получен ряд важных результатов, среди которых, прежде всего, хотелось бы отметить разработанный им метод осаждения тонких поликристаллических алмазных пленок, реализуемый в условиях плазмохимического ректора на основе СВЧ разряда в широком диапазоне изменения внешних параметров. Разработанный автором метод является новым важным шагом в развитии CVD-технологии.

Работа В.В. Чернова является законченным научным исследованием, выполнена на достаточно высоком уровне, полученные им основные результаты являются надежными, достоверность их подтверждается многочисленными экспериментальными результатами.

Тем не менее, считаю необходимым указать на определенные недостатки работы.

1. В диссертации не представлены экспериментально полученные спектры излучения плазмы СВЧ разряда. Их отсутствие не позволяет сделать вывод о степени неравновесности плазмы и провести оценки возможности применения выбранных автором спектральных методов для измерения параметров исследуемой плазмы.
2. Концентрация электронов в работе определялась по уширению спектральной линии $H\beta$ серии Бальмера водорода. На стр. 52 текста диссертации приведены данные о том, что типичная полуширина спектральной линии $H\beta$, зарегистрированная в экспериментах, составляет 35-40 пм, тогда как штарковское уширение оценивается на уровне 10 пм, доплеровское уширение имеет величину порядка 20 пм, полуширина аппаратной функции составляет 23 пм, а совокупность столкновительного и собственного уширения линии не превышает 1 пм. В этих условиях практически невозможно с достаточной степенью точности измерить концентрацию электронов ниже, чем 10^{13} см^{-3} , тогда в работе приведены данные о концентрации электронов в диапазоне от $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ до $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.
3. Температура газа в диссертации определялась по распределению интенсивностей вращательных линий полосы Свана с длиной волны канта 516.5 нм радикала C_2 . Однако в условиях протекания в неравновесной молекулярной плазме химических превращений применимость данного метода требует проведения дополнительных подробных обоснований. Кроме того, ссылка на приведенный на рис. 2.4,б спектр излучения данной полосы, взятый из другой работы [117], некорректна, так как используемый в диссертации В.В. Чернова спектральный прибор не позволяет получить спектр с полностью разрешенной вращательной структурой.
4. При поиске оптимального режима работы плазмохимического реактора в третьей главе диссертации представлена полученная автором аналитическая формула (3.60), позволяющая легко оценить зависимость энергоцены получения одного атома водорода у подложки от частоты СВЧ излучения. Однако для применения другими исследователями приведенной аналитической формулы желательно было бы сравнить полученные данные с результатами полного численного 2D-моделирования для других частот, например, 10 и 60 ГГц.

Приведенные замечания не снижают в целом хорошего впечатления от рассматриваемой работы и ее научной ценности.

Основные положения, выносимые на защиту, соответствуют выбранной теме и подробно обоснованы в диссертации. Достоверность результатов подтверждается

публикациями в российских и зарубежных научных изданиях и докладами на конференциях. Квалификационная ценность результатов исследований признана российским и международным научными сообществами. Полученные в диссертации результаты являются новыми, а выводы – обоснованными.

Основные результаты диссертации в полной мере опубликованы в научных журналах и трудах российских и международных конференций.

Автореферат правильно и полно отражает основное содержание диссертации.

Представленные в диссертации результаты могут быть использованы в ИНХС РАН (г. Москва), ФТИ РАН (г. Москва), ИОФ РАН (г. Москва), МГУ имени М.В. Ломоносова, ОИВТ РАН (г. Москва), МФТИ (г. Москва) и др.

Считаю, что рецензируемая диссертационная работа «Исследование плазмохимического синтеза тонких алмазных пленок в плазме, поддерживаемой пересекающимися пучками непрерывного СВЧ излучения миллиметрового диапазона длин волн» отвечает всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а Чернов Валерий Валерьевич, несомненно, заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Профессор физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук



08.02.2016г.

В.М.Шибков

Подпись В.М.Шибкова удостоверяю.

Декан
физического факультета МГУ
профессор



Н.Н.Сысоев

Шибков Валерий Михайлович - профессор, д.ф.-м.н., физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, профессор, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, (495)939-13-37 или (495)939-25-47, shibkov@phys.msu.ru

