

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Богданова Сергея Александровича «Исследование плазмохимического синтеза алмазных плёнок в газах с контролируемой добавкой примесей», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Диссертация С.А. Богданова посвящена исследованию плазмохимического синтеза (или CVD синтеза – Chemical Vapor Deposition) алмаза в газовых смесях с добавками различных примесей (азот, бор, кислород). Введение примесей в состав газовой среды позволяет получать алмаз с контролируемыми свойствами, которые не встречаются у природного алмаза. Работа содержит большое количество экспериментальных результатов, часть из которых посвящена исследованию синтеза полупроводникового алмаза р-типа (легированного бором) в кислородсодержащих газовых смесях, другая часть содержит результаты исследования влияния малых добавок азота на скорость роста и качество алмаза, а также на образование центров окраски азот-вакансия (NV центров – Nitrogen Vacancy) в процессе роста. Также в работе уделено существенное внимание исследованию плазмы СВЧ разряда в присутствии примесей и связи характеристик плазмы и свойств получаемого алмаза. В настоящее время полупроводниковый алмаз рассматривается как один из наиболее перспективных широкозонных материалов для электроники, а многие уникальные свойства центров окраски в алмазе (таких как NV центры) находят применения в квантовых технологиях. Таким образом, актуальность работы для современных исследований в области CVD синтеза алмаза не вызывает сомнений.

Среди основных результатов, полученных в работе, хочется отметить результаты исследования процессов легирования алмаза бором и азотом. В частности, получены сильнолегированные бором монокристаллические алмазные слои с гладкой поверхностью роста и высоким кристаллическим совершенством. Благодаря использованию кислородсодержащих газовых смесей решена одна из важных практических задач - продемонстрировано долговременное осаждение сильнолегированных бором слоёв без образования сажи в реакторе, что позволило получить сильнолегированные слои с концентрацией бора $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ толщиной более 100 мкм в течение одного процесса роста. Продемонстрирован рост дельта-слоёв (толщиной 3 нм) легированных азотом, а также изучены методы повышения концентрации NV центров с помощью облучения электронным пучком. При этом достигнута рекордная концентрация NV центров в дельта-слоях.

Изложенные в автореферате результаты имеют непосредственную практическую значимость. Проведенные исследования плазмы СВЧ разряда в присутствии примесей имеют значение для совершенствования технологии CVD синтеза монокристаллических алмазных слоёв. Результаты, относящиеся к исследованию синтеза алмаза, легированного бором, важны для разработки электронных приборов на основе алмаза.

Следует отметить также ряд замечаний к автореферату: а) в описании главы 3 не объясняется целесообразность исследования плазм с Ag, и влияет ли его добавка на распределение радикалов в плазме; б) в главе 4 не приводятся значения электрических характеристик объемных сильно легированных бором алмазных слоев, которые представляют большой практический интерес и определяют применимость такого материала для создания электронных устройств – силовых диодов и транзисторов; в) в

тексте автореферата нет прямого упоминания кристаллической ориентации алмазных монокристаллических подложек, на которых проводились все описанные процессы синтеза. Однако данные замечания не являются критичными и не снижают общей высокой оценки работы и ее значимости для развития научной области синтеза алмаза.

Судя по автореферату, диссертация С.А. Богданова удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физ.-мат. наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

К.ф.-м.н., старший научный сотрудник, руководитель лаборатории алмазной электроники ФГБНУ ТИСНУМ

Тарелкин Сергей Александрович

21.09.2021 г.

ФГБНУ Технологический институт сверхтвёрдых и новых углеродных материалов

г. Москва, г. Троицк, ул. Центральная 7а

E-mail: sergey.tarelkin@gmail.com

тел. +7 916 886 78 89

Подпись Тарелкина С.А. заверяю



Начальник отдела кадров ФГБНУ ТИСНУМ

Кропивьянская Т.В.