

**Отзыв**  
**научного руководителя на диссертанта**  
**Павлова Ивана Сергеевича**

Иван Сергеевич Павлов, 1997 года рождения, в 2018 г. с отличием окончил кафедру «Общей физики и молекулярной электроники» физического факультета «Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова». В 2019 г в лаборатории электронной микроскопии Института кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника РАН» начал выполнять работу в рамках магистерской диссертации, которую блестяще защитил в МГУ 2020 году. После защиты магистерской диссертации в 2020 году Иван Сергеевич поступил в очную аспирантуру ИК РАН. Уже на этом этапе проявились положительные качества молодого ученого – целеустремленность, быстрая обучаемость новым методам, потрясающая работоспособность.

Научная работа И.С. Павлова была посвящена исследованию кристаллов карбидов бора. Это направление затрагивает целый ряд актуальных проблем. Формирование частиц карбидов бора с необычной морфологией, проявляющей пятерную симметрию наблюдалось и ранее, однако, механизм их образование ранее понятен не был. Такая морфология частиц встречается в квазикристаллах, поэтому первой задачей, которая стояла перед И.С. Павловым было определение кристаллической структуры наблюдаемых частиц. Для решения этой задачи И.С. Павловым были освоены на высоком уровне множество современных методов анализа: методы растровой электронной микроскопии (РЭМ), подготовки образцов для исследования в просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) с помощью фокусированных ионных пучков (ФИП), а также методы ПЭМ, растровой ПЭМ (ПРЭМ), ПЭМ/ПРЭМ высокого разрешения, электронной дифракции, энергидисперсионного рентгеновского микроанализа (ЭРМ) и рентгенофазового анализа (РФА). Особо необходимо отметить отработку методов обнаружения и описания квазикристаллов и, собственно, сплава Al-Cu-Fe с квазикристаллическими частицами, полученного методом высокоскоростной кристаллизации.

Работа Ивана Сергеевича никогда не ограничивалась исключительно структурными исследованиями, в частности, им были проведены оценочные расчеты свободной энергии Гиббса в кристаллитах карбида бора. Так, И.С. Павловым было показано, что кристаллическая решетка таких частицы описывается ромбоэдрической сингонией, а псевдо-пятерная симметрия проявляется из-за множественного циклического двойникования, стимулирующими факторами которого являются высокая температура и давление.

Ещё одной задачей, которая стояла перед И.С. Павловым в диссертационной работе являлось поиск метода для определения позиций атомов бора и углерода в ромбоэдрической элементарной ячейке карбида бора. Бор и углерод являются соседними атомами расположенными в начале периодической системы элементов и достоверно отличить их между собой методами рентгеновской и нейтронной

дифракции, а также классическим методами ПЭМ/ПРЭМ практически невозможно. Для решения этой задачи И.С. Павловым были освоены методы компьютерного моделирования изображений ПЭМ/ПРЭМ высокого разрешения, а также предложен метод интегрированного дифференциального фазового контраста (идФК). Он принимал активное участие в разработке программного обеспечения, позволяющего моделировать идФК ПРЭМ изображения и с помощью этого ПО показал, что метод позволяет различать атомные колонки, состоящие из бора и углерода, что также было подтверждено экспериментальным изображением.

Одной из сфер практического применения карбида бора является медицина, где их используют для изготовления препаратов для бор-нейтронозахватной терапии. Лазерная абляция частиц бора растворных в этилацетате является одним из методов получения частиц для этой цели. И.С. Павловым был исследован материал, формируемый при лазерной абляции объемной мишени  $BC_3$  в воде и было показано, что в такой реакции также формируются частицы карбида бора, которые могут быть использованы в бор-нейтронозахватной терапии. При этом, из реакции впервые удалось исключить этилацетат, что снижает токсичность производства.

Результаты научной работы по теме диссертации опубликованы в 8 печатных работах: из них 4 статьи в рецензируемых научных журналах, индексируемых международными базами (РИНЦ, Scopus, Web of Science) и включенных в перечень ведущих периодических изданий ВАК РФ, и 4 тезиса докладов на российских и международных научных конференциях. Доклад по результатам работы был удостоен именной премии на молодежном конкурсе научных работ Института кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН в 2021 г. Параллельно Иван Сергеевич участвовал в нескольких сравнительно небольших исследовательских работах с интересными результатами и с его участием было опубликовано еще 8 работ в высокорейтинговых журналах.

И.С. Павлов проявил себя целеустремленным, инициативным и грамотным исследователем, способным самостоятельно решать задачи в области структурного анализа материалов методами электронной микроскопии. Он, безусловно, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.20. (01.04.18) – «Кристаллография, физика кристаллов».

Отзыв дан для представления в Диссертационный совет 24.1.245.01 (Д 002.114.01) в связи с защитой И.С. Павловым диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему «Особенности морфологии, структуры и дефектов кристаллов карбидов бора» по специальности 1.3.20. (01.04.18) – «Кристаллография, физика кристаллов».

Научный руководитель,  
к.ф.-м.н.

18.09.2023

А.Л. Васильев

2

