

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Беликова Евгения Александровича «Атомное и электронное строение биогибридных материалов на основе бактериоферритина Dps», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Исследование биогибридных наноматериалов, сочетающих природные белковые молекулярные контейнеры с неорганическими наночастицами железа, относится к числу наиболее перспективных междисциплинарных направлений современной физики конденсированного состояния, материаловедения и бионанотехнологий. Бактериоферритин Dps представляет собой уникальную биологическую систему, способную формировать сверхмалые (менее 12 нм) железосодержащие ядра с высокой воспроизводимостью и биосовместимостью. Актуальность работы обусловлена отсутствием в литературе систематических данных о фазовом составе, валентных состояниях железа и локальном атомном окружении в таких ядрах, а также возможностью их контролируемой интеграции с полупроводниковыми наноструктурами (в частности, с нитевидным кремнием).

В диссертации решён комплекс задач, включающий разработку оригинальных методик пробоподготовки биологических образцов для сверхвысоковакуумных синхротронных исследований, установление морфологии и размеров белковых молекул и их ядер методами просвечивающей (в том числе крио-) и сканирующей электронной микроскопии, детальное исследование атомного и электронного строения с использованием синхротронных методов XANES и PEEM, а также XPS. Впервые показана возможность получения устойчивых биогибридных наноструктур Dps на поверхности нитевидного кремния, что открывает путь к созданию новых сенсорных и спинтронных устройств.

Научная новизна работы подтверждается следующими ключевыми результатами:

- Разработаны и апробированы универсальные подходы к осаждению массива молекул Dps на подложки различной природы, совместимые с условиями сверхвысокого вакуума.
- Установлены размеры и фазовый состав железосодержащих ядер (преимущественно Fe^{3+} в оксидной форме с примесью металлического железа в некоторых образцах).
- Получены и интерпретированы синхротронные XANES-спектры на K-крае железа, демонстрирующие наличие нескольких валентных и координационных состояний.
- Продемонстрирована успешная интеграция биогибридных частиц Dps с нитевидным кремнием без разрушения белковой оболочки.

Достоверность результатов обеспечивается использованием современного комплекса методов (ТЕМ, cryo-ТЕМ, SEM, XPS, синхротронные

XANES и РЕЕМ), проведением измерений на ведущих российских и зарубежных установках, а также большим объемом опубликованных материалов (по данным автореферата – 45 публикаций, из них 7 статей в журналах Q1–Q3).

Вместе с тем при изучении автореферата возник ряд вопросов, которые хотелось бы уточнить:

1. На странице 4 автореферата указано, что размеры неорганических ядер составляют «до ~12 нм в зависимости от типа ферритина». В то же время для Dps в литературе обычно указывается внутренний диаметр полости около 4,5–5 нм. Как соотносятся полученные размеры ядер с геометрическими ограничениями белковой оболочки Dps? Были ли зафиксированы случаи переполнения полости или образования внешних кластеров?
2. В работе применялось ионное травление для удаления поверхностных загрязнений. Как контролировалось возможное восстановление оксидов железа под действием Ag-ионов и как это могло повлиять на наблюдаемое соотношение $Fe^{3+}/Fe^{2+}/Fe^0$ в XPS-спектрах?
3. Насколько стабильно сохраняется нативная структура белковой оболочки Dps после осаждения на нитевидный кремний и последующего отжига/обработки? Есть ли данные спектроскопии (например, по C 1s или N 1s) о денатурации белка?

Замечания носят уточняющий характер и не снижают ценности выполненного исследования.

Работа выполнена на высоком научном уровне, содержит элементы существенной научной новизны, имеет четко сформулированные цели и задачи, полностью решенные автором.

Диссертация Беликова Евгения Александровича полностью соответствует критериям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Жидков Иван Сергеевич,
кандидат физико-математических наук, доцент,
заведующий кафедрой электрофизики ФГАОУ ВО УрФУ
«10» декабря 2025 г.

Подпись Жидкова И.С. заверяю,
Ученый секретарь Ученого Совета УрФУ

В.А. Морозова

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
620062, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

