



№ \_\_\_\_\_  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИАП РАН

д. т. н. профессор В.Е. Курочкин



« \_\_\_\_\_ 2016 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Левченко Егора Александровича «Динамика молекул в тонкой плёнке  $C_{60}$  на поверхности полупроводников», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

## Актуальность работы

Создание электронных устройств на основе отдельных молекул – одно из основных направлений современной микро- и нанoeлектроники. Интерес к одномолекулярным приборам связан с общей тенденцией к минимизации размеров и возможностью управлять параметрами подобных устройств путем выбора базисных молекул, используя современные методы химического синтеза. Одной из основных проблем молекулярной электроники в настоящее время является повышение стабильности работы электронных элементов, основанных на одиночных молекулах. Поэтому исследование динамики

молекул  $C_{60}$  в ультратонких плёнках является актуальным. Выбор индивидуальных молекул фуллерена и ультратонких пленках  $C_{60}$  в качестве объекта исследования является обоснованным, и обусловлен тем, что к настоящему времени накоплена достаточно подробная информация о физико-химических свойствах  $C_{60}$ , что важно для адекватной интерпретации результатов исследований динамики данного нанообъекта.

### **Научная новизна работы**

Анализ диссертационной работы Е.А. Левченко показывает, что автором получен большой объем оригинальных результатов. Проведены систематические исследования динамика молекул в тонкой плёнке  $C_{60}$  методами сканирующей туннельной микроскопии/спектроскопии. Наиболее важными результатами работы являются следующие:

- впервые получены значения энергетических параметров переключения молекулы между двумя ориентациями в тонкой плёнке на поверхности оксида вольфрама;
- впервые обнаружены две приоритетные ориентации монослойной плёнки  $C_{60}$  на поверхности  $WO_2/W(110)$  относительно направления периодической структуры подложки;
- впервые определены причины остановки движения молекул  $C_{60}$ ;
- впервые показано, что изменение ориентации молекулы  $C_{60}$  относительно подложки связано с переносом заряда.

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов и списка литературы. Работа изложена на 89 страницах, содержит 42 рисунка. Список цитируемой литературы включает 91 источник.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации. Сформулированы цель работы и конкретные задачи исследования. Указано, в чём именно состоит научная новизна и практическая значимость



диссертационной работы.

**В первой главе** представлен обзор литературы, в котором рассматривается структура  $C_{60}$ , перспективы и препятствия к использованию молекул  $C_{60}$  в качестве основы для одномолекулярных полупроводниковых приборов. Приведены сведения о влиянии подложки на формирование плёнок  $C_{60}$ . Представлены сведения из ранних работ о фазовом переходе в тонкой плёнке  $C_{60}$ .

**Во второй главе** описана методика и аппаратура, примененные для исследования тонких плёнок  $C_{60}$ . Содержание этой главы, как и всё последующее изложение, свидетельствуют о хорошем владении диссертантом использованными технологиями и экспериментальными методами исследования.

**В третьей главе** диссертации изложены результаты исследования поверхности подложки  $WO_2/W(110)$  при помощи сканирующего туннельного микроскопа. Показано, что периодическая структура, наблюдаемая на СТМ-изображениях обусловлена электронными свойствами подложки.

**В четвёртой главе** диссертантом приведены результаты исследования ориентации доменов плёнки  $C_{60}$  относительно кристаллографических направлений подложки  $WO_2/W(110)$ . Экспериментально наблюдались две ориентации плёнки, которые также были подтверждены расчетами на основе предложенной автором модели, учитывающей адсорбцию молекул фуллерена на периодической поверхностной структуре подложки. Вдоль границы двух доменов наблюдались дефекты упаковки, вблизи которых располагались статичные молекулы фуллерена, в отличие от молекул, расположенных вдали от дефектов. «Замораживание» вращения молекул обусловлено локальным повышением температуры фазового вращательного перехода вблизи дефектов кристаллической решётки плёнки  $C_{60}$  в областях повышенного эффективного давления.

**В пятой главе** рассматриваются причины формирования размытых СТМ-изображений кластеров молекул  $C_{60}$  при температурах, близких к температуре

фазового вращательного перехода. При температурах близких к температуре фазового вращательного перехода обнаружено образование кластеров Линдемана, представляющих собой кластеры молекул с большой амплитудой либронных колебаний. Исследована динамика переключения молекул  $C_{60}$  между двумя ориентациями с минимальной энергией. Определены энергетические параметры переключения.

**В шестой главе** приведены результаты исследования причин различной яркости СТМ-изображений молекул  $C_{60}$ . Показано, что ярким молекулам соответствует отрицательно заряженное состояние молекулы, тёмным — нейтральное состояние. Обнаружена корреляция изменения ориентации молекулы относительно поверхности подложки с переносом заряда.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Полученные в работе результаты значительно расширили знания о свойствах тонких плёнок и отдельных молекул фуллерена  $C_{60}$  в их составе в различных условиях. Результаты проведенных исследований представляют практический интерес для разработки одномолекулярных полупроводниковых устройств на основе молекул фуллерена  $C_{60}$ .

### **Достоверность и обоснованность результатов**

Достоверность приведенных в диссертации Е.А. Левченко результатов обеспечивается корректной постановкой экспериментов, большим объемом данных, полученных на современном оборудовании, и их адекватной обработкой. Полученные результаты согласуются с литературными данными. Все научные положения, выводы и заключения, сформулированные в диссертационной работе, являются обоснованными и достоверными.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в журналах, входящих в список ВАК и индексируемых базами WoS и Scopus. Работа убедительно апробирована, результаты доложены на международных и российских конференциях. Автореферат и опубликованные работы отражают



все основные результаты исследований, вошедшие в представленную диссертацию.

### **Замечания по работе**

1. Указанная в заголовке тема диссертации не совсем точно отражает её содержание, поскольку в работе проведено исследование динамики молекул фуллерена  $C_{60}$  на поверхности  $WO_2/W(110)$ , а не на поверхности полупроводников, как это указано в заголовке.
2. Энергетическая диаграмма на рис.2.1 не адекватна исследуемой системе: W игла - вакуумный промежуток - тонкая пленка  $C_{60}$  - поверхность  $WO_2/W(110)$ .
3. На стр.30 допущена неточность в описании работы СТМ в режиме постоянной высоты.
4. В тексте диссертации указывается значение туннельного напряжения, однако не приводятся данные позволяющие определить направление туннелирования электронов (туннелирование из занятых состояний в образце или туннелирование на свободные состояния)
5. Текст диссертации не лишен стилистических и грамматических ошибок (смотри, например, стр. 4,5,8,12,50,61)

Однако высказанные замечания не снижают в целом хорошего впечатления от диссертационной работы Е.А. Левченко.

### **Общая характеристика диссертационной работы**

Рассмотрение работы показало, что, несмотря на указанные замечания, диссертация Е.А. Левченко выполнена на высоком профессиональном уровне и является законченным исследованием на актуальную тему. По своим целям, поставленным задачам, использованным методам и приемам при их решении, значимости результатов и уровню их обсуждения представленная диссертация заслуживает высокой оценки. Работа написана в хорошем стиле, снабжена

необходимым иллюстративным материалов и оформлена в соответствии с установленными требованиями. Результаты являются важными для отраслей знаний, связанных с созданием новых полупроводниковых приборов, опубликованы в российских и зарубежных научных журналах, в том числе рекомендованных ВАК РФ для защиты кандидатских диссертаций, а также были обсуждены на ряде международных конференций. Автореферат и публикации правильно и достаточно полно отражают содержание диссертационной работы.

При выступлении в нашей организации диссертант Левченко Е.А. успешно представил результаты и дал четкие и исчерпывающие ответы на заданные вопросы.

Диссертация соответствует специальности 01.04.07 - «Физика конденсированного состояния», а также критериям и требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» от 24.09.2013 №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а диссертант Е.А. Левченко заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - «Физика конденсированного состояния».

Доклад Е. А. Левченко по диссертационной работе заслушан на заседании научного семинара ИАП РАН 19 мая 2016 г, Протокол № 6

Зав. отделом

Приборов и методов нанотехнологий

д.ф-м.н.



А.О. Голубок.

Старший научный сотрудник

лаборатории сканирующей зондовой

микроскопии и спектроскопии

к.ф-м.н.



М.Л. Фельштын.