

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Пудикова Дмитрия Александровича «Особенности синтеза и электронной структуры графена на подложках на основе d- и f- металлов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Диссертация Пудикова Д.А. представляет собой обширное экспериментальное исследование электронной энергетической и кристаллической структуры графен-содержащих систем, полученных рядом методик. Исследование деталей процесса синтеза и особенностей электронной и спиновой структуры графена, полученного методом крекинга пропилена, а также методами сегрегации атомов углерода сквозь пленки переходных и карбидизацией слоев редкоземельных металлов, расширяет возможности для производства данного материала и конструирования наноэлектронных устройств на его основе. Именно возможностью применения полученных результатов в производстве графена определяется высокая **актуальность** работы.

Диссертант поставил ряд важных целей, достижение которых определило высокую фундаментальную и практическую значимость работы. **Научная новизна** работы заключается в том, что большинство представленных в диссертационном исследовании результатов получена впервые:

- Впервые исследована электронная структура графена, сформированного методом CVD на монокристаллической поверхности Ni(100), имеющей несоразмерную ему кристаллическую структуру. Показано, что энергетическое положение, а также искажение линейного характера дисперсии π состояния в окрестности точки K свидетельствуют о сильном взаимодействии между сформированным графеном и никелевой подложкой. Также показано, что в случае с несоразмерной подложкой, формирующийся графен имеет несколько доменов, повернутых друг относительно друга на 30° .
- Выявлено, что процесс интеркаляции Au под графен на Ni(100) проходит при больших температурах и временах экспозиции, чем под графен на Ni(111). Впервые показано, что электронная структура графена на Ni(100) с интеркалированным слоем золота подобна квазисвободному графену, т.е. π состояние локализовано около 8 эВ в точке Г и имеет линейную дисперсию вблизи уровня Ферми в точке K зоны Бриллюэна.
- Проведено систематическое исследование синтеза графена методом сегрегации атомов углерода сквозь пленки переходных металлов, при этом варьировались виды углеродных подложек (ВОПГ, монокристаллический графит) и металлы (Ni, Co). Представлен анализ процесса синтеза, показано, что формирование графена во

всех случаях проходит через одни и те же этапы. Приводится характеристика как промежуточных этапов, так и конечной стадии синтеза.

- Показано, что синтез графена методом сегрегации углерода сквозь пленки переходных (Ni, Co) металлов проходит при температурах порядка 250 – 400°C, что существенно меньше, чем при методе CVD на тех же металлах.
- Показано, что графен, выращенный методом сегрегации сквозь пленку кобальта на подложке монокристаллического графита, имеет высокоупорядоченную кристаллическую структуру, а электронная структура схожа с графеном, выращенным методом CVD на подложке Co(0001). Также показано, что сильная связь графена с нижележащим слоем Co может быть ослаблена при помощи интеркаляции атомов Au, при этом вершина конуса π состояний в окрестности точки K сдвигается к уровню Ферми.
- Исследован процесс синтеза графена через карбидизацию слоев редкоземельных металлов, нанесенных на графит. Показано, что вне зависимости от металла и типа графитовой подложки формирование графена проходит через одни и те же этапы. Продемонстрировано фундаментальное отличие данного метода от метода формирования графена посредством сегрегации углерода через слои переходных металлов.
- Продемонстрировано, что на пленке Dy, нанесенной на монокристаллический графит, формирование графена происходит при температуре около 1000°C, после полной карбидизации слоя металла. Изучена электронная структура графена, характеризующаяся линейностью π состояний около точки K зоны Бриллюэна и сдвигом точки Дирака до энергий связи 1,8 эВ. Получена информация о расщеплении π состояний графена по спине.

Успеху работы способствовало использование целого комплекса взаимодополняющих методов исследования поверхности для получения исчерпывающей информации об объектах. Следует отметить высокую эффективность экспериментального исследования, достигнутого посредством комбинации структурного метода дифракции медленных электронов с методом фотоэлектронной спектроскопии остовных уровней и валентной зоны, дающими полное представление о кристаллической структуре изучаемых систем, их кристаллического совершенства и об электронной энергетической структуре заполненных электронных состояний. Использование этих методов позволило сформировать целостное представление об исследуемых системах и протекающих в них физических процессах. Это определяет высокую степень достоверности полученных результатов и обоснованность сделанных на их основе выводов и научных положений.

Работа хорошо оформлена, четко изложена и иллюстрирована. Все её части логически обоснованы.

По диссертационной работе Пудикова Д.А. можно сделать несколько замечаний:

1. Из текста диссертации не ясно, из каких соображений выбирались редкоземельные металлы, использованные для синтеза графена методом карбидизации.

2. Недостаточно детально проанализирована спиновая структура исследуемых систем. Хотелось бы узнать, проводились ли измерения со спиновым разрешением графена, сформированного методом сегрегации на Со/графит?

3. В работе не уделено должного внимания более детальному анализу механизма образования графена на поверхности пленок переходных металлов, в частности, роли дефектов и дислокаций в процессе кристаллизации графена при понижении температуры и соответствующем понижении растворимости атомов углерода в Со и Ni пленках.

Возникшие замечания не умаляют ценности представленного исследования. Диссертация Пудикова Д.А. представляет собой законченное научное исследование, в котором содержится решение ряда проблем, имеющих существенное значение для развития современной физики конденсированного состояния.

Автореферат диссертации достаточно полно освещает суть работы. Результаты работы опубликованы в 6 статьях в ведущих отечественных и зарубежных журналах. Диссертация соответствует специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

В целом, диссертационная работа Пудикова Д.А. «Особенности синтеза и электронной структуры графена на подложках на основе d- и f- металлов» **отвечает всем требованиям** «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Министерства образования и науки РФ (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 №842), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, профессор,

профессор кафедры экспериментальной физики

Санкт-Петербургского политехнического

университета им. Петра Великого

адрес: 195251, г. Санкт-Петербург,

ул. Политехническая, 29

тел. (812) 552-77-90

e-mail: petrov@physics.spbstu.ru



В.Н. Петров

