

ОТЗЫВ

официального оппонента Квашнина Александра Геннадьевича на диссертационную работу Леги Петра Викторовича «Термоупругий мартенситный переход и эффект памяти формы в сплаве Ti_2NiCu на микро- и наномасштабе», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. (01.04.07) – физика конденсированного состояния

Диссертационная работа Леги Петра Викторовича посвящена исследованию проявления фазовых переходов и сопутствующим им эффектов на микро- и наноуровне размеров. В настоящее время большое внимание уделяется разработке и исследованию новых функциональных материалов (“умных” материалов), то есть таких материалов, которые изменяют свою форму или размеры в ответ на внешнее воздействие - нагрев, магнитное или электрическое поле. Такие материалы очень важны, особенно для конструирования микро- и нано-электромеханических систем (МЭМС и НЭМС), так как в области микро- и нано- размеров не применимы обычные законы классической физики и химии и стандартные приемы конструирования механизмов. Очень востребованы устройства для трехмерного манипулирования реальными нано-объектами в вакуумной камере сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Однако, до сих пор в мире не создан универсальный инструмент для механического захвата и манипулирования нано-объектами, который по размерам был бы сопоставим с самими же нанообъектами. Микромеханическое устройство для манипулирования нано-бъектами на основе сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ) принципиально отличается от уже существующих микро-пинцетов, работающих на других физических принципах - пьезоэффект, терморасширение, электростатика. Все выше указанные устройства имеют бóльшие линейные размеры, чем устройство с ЭПФ, как минимум на один порядок. Кроме того устройства с ЭПФ обладают значительным потенциалом их дальнейшей миниатюризации. Все это приводит к тому, что для разработки нано-устройств с ЭПФ, необходимо изучить и понять, применимость классических законов физики и установить пределы миниатюризации в данных устройствах. А именно, требуется изучить термоупругое мартенситное превращение, которое

лежит в основе ЭПФ. То есть, по сути, оказалась, что в основе прикладной задачи создания наноинструмента, лежит фундаментальная проблема фазовых превращений на нано-масштабе, где физика фазовых переходов, качественно отличается от описания процессов, происходящих в объемных материалах. Таким образом, можно говорить о “новой низко размерной физике” и ее нанотехнологическом применении. Поскольку диссертация Леги П.В. посвящена таким исследованиям, то она является достаточно актуальной.

Диссертационная работа изложена на 127 страницах, включая 48 формул и 95 рисунков. Используемые в тексте диссертации источники перечислены в библиографическом списке, который включает 143 наименования на 8 страницах. В тексте диссертации последовательно приведены введение, в котором кратко обозначена актуальность темы исследования, цели и задачи, научная новизна работы и её практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, достоверность и апробация работы, и четыре главы, первая из которых содержит обзор литературы по теме диссертации, а последующие три главы содержат оригинальные результаты исследований автора, заключение и список литературы.

Первая глава содержит обстоятельный обзор литературы по истории исследования фазовых (мартенситных) переходов и эффекта памяти формы на микро- и наноуровне, а также моделированию фазовых переходов. Дается обзор известных методов теоретического и экспериментального исследования фазовых переходов и эффекта памяти формы на наномасштабе.

Во второй главе представлены результаты создания методики исследования термоупругого мартенситного фазового перехода и эффекта памяти формы в сплаве Ti_2NiCu на микромасштабе. Продемонстрирована новая схема изучения ЭПФ на микро- и наномасштабе размеров. Показан принцип работы композитных микроактюаторов. Экспериментально и теоретически изучены обратимые деформации в композитах сплава Ti_2NiCu с ЭПФ. Продемонстрировано создание микро-актюатора с ЭПФ и изучение деформаций микро-актюатора, а также показано удовлетворительное совпадение эксперимента и расчета прогиба актюатора по математической модели. Также, в качестве примера, продемонстрирован оригинальный метод применения наноактюатора для создания устройств с волной зарядовой плотности.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования и компьютерного моделирования термоупругого мартенситного перехода и ЭПФ в сплаве Ti_2NiCu на наномасштабе. Изучены обратимые термоуправляемые деформации композитов с субмикронной и нанометровой толщиной активного слоя. Экспериментально исследованы мартенситные превращения в клиновидных пластинах сплава Ti_2NiCu и $NiTi$ в зависимости от температуры и толщины пластинки. Представлены результаты теоретического описания полученных экспериментальных результатов, а именно, попытка объяснить результаты феноменологической дислокационно-кинетической теорией, теорией функционала плотности совместно с термодинамическим подходом и методом молекулярной динамики. Также впервые в нано-пластине Ti_2NiCu продемонстрирован ЭПФ в просвечивающем электронном микроскопе с приставкой для изменения температуры образца и одновременно показано перестроение мартенситных доменов при термоциклировании.

В четвертой главе представлены эксперименты по изучению кинетики проявления термоупругого мартенситного перехода и ЭПФ в сплаве Ti_2NiCu . Сделана оценка скорости движения границы фазового мартенситного перехода.

В заключении диссертации автор формулирует основные результаты, полученные в диссертационной работе. Далее следует список публикаций автора по теме диссертации и список использованных литературных источников.

Научная новизна представленных в диссертационной работе результатов заключается в том, что экспериментально определены зависимости положения границы аустенит-мартенсит от толщины пластины Ti_2NiCu и температуры клиновидной пластины в области 20 – 100 нм при изменении температуры от 400 до 100 К. Экспериментальные результаты согласуются с численным расчетом на основе феноменологической дислокационно-кинетической теории, а также с результатами компьютерного моделирования первопринципными методами и методом молекулярной динамики. Также впервые получены экспериментальные результаты по быстрдействию композитного микроактюатора с ЭПФ при активации импульсами электрического тока, пропускаемого непосредственно через актюатор и продемонстрировано быстрдействие до 8 кГц.

Практическая значимость полученных в диссертации результатов состоит в том, что в результаты данной работы могут быть найдены применение для производства миниатюрных механических устройств с ЭПФ, позволяющих манипулировать индивидуальными нанообъектами. Подобные устройства могут найти применение для производства различных изделий нанoeлектроники, например, биомедицинских датчиков для диагностики инфекционных заболеваний, в технологии МЭМС и НЭМС для создания исполнительных элементов и роботизированных устройств, в lab-on-chip технологии, микробиологии, для исследования биологических (ДНК, сенсилы насекомых и др.) и небологических (углеродные нанотрубки, графеновые слои, вискеры) микро- и нанообъектов.

Достоверность полученных результатов и обоснованность сделанных выводов и научных положений обеспечивается применением известных и апробированных методов исследования и обработки данных, их хорошей воспроизводимостью, сопоставлением и хорошим согласием полученных в работе результатов с имеющимися литературными данными.

Личный вклад автора диссертации заключается в участии в постановке цели и задач, в выборе методов исследований, создании новых экспериментальных установок, проведении экспериментов и обработке полученных данных, выполнении ряда теоретических выкладок и расчетов, участии в написании статей и тезисов докладов с последующим их представлением на различных конференциях. Вместе с тем по диссертации имеется ряд вопросов и замечаний:

1. В главе I диссертации, посвященной обзору литературы, большой упор делается на экспериментальную часть исследования, в частности, сделан хороший обзор по микро- и нанопинцетам. Однако, можно было бы подробнее описать мировой уровень работ по теоретическому изучению мартенситных фазовых превращений и ЭПФ на микро- и наномасштабе, в частности, методами компьютерного моделирования.
2. На рис. 46 приводится ВАХ полупроводникового диода. Однако, очевидно, что это стандартная ВАХ диода. Непонятно, зачем она приводится в диссертационной работе.

3. В разделе 3.4 теоретическое рассмотрение зависимости температуры мартенситного перехода от размера от толщины пластины проводится методами дислокационно-кинетической теории. Возникают вопросы: почему зависимость температуры перехода от размера образца не может быть рассчитана на основе традиционного термодинамического подхода, и почему результаты полученные при помощи дислокационно-кинетического подхода все же не достаточны и их необходимо дополнить численными расчетами на основе методов МД и DFT и др ?
4. На стр. 53 указано: «Для простоты принято, что модули Юнга для материала с ЭПФ в аустенитном состоянии и упругого слоя равны...». Насколько обосновано это предположение?
5. В диссертационной работе имеются опечатки, неточности, грамматические ошибки. Например, в разделе 3.4 сказано: «Расчет полной энергии электронных свойств...» следовало написать, видимо, «Расчет полной энергии структуры с учетом электронной и структурной подсистемы...». Непонятно, почему рисунки и обозначения приводятся то на русском, то на английском языке. Есть и другие замечания по тексту работы.

Указанные замечания не снижают общего хорошего впечатления от диссертационной работы и ценности полученных результатов, т.е. не влияют на общую оценку диссертации как законченной и актуальной работы.

Автореферат диссертации полностью соответствует содержанию диссертации. Соответствие содержания диссертации паспорту специальности 1.3.8. (01.04.07) – «физика конденсированного состояния» также не вызывает сомнений, поскольку в ней представлены результаты изучения физических свойств конденсированных сред, фазовых переходов, описаны разработанные экспериментальные методы измерения физических свойств (п. 3 и п. 6 паспорта специальности).

Таким образом, представленная диссертационная работа «Термоупругий мартенситный переход и эффект памяти формы в сплаве Ti_2NiCu на микро- и наномасштабе» является законченной научно-квалификационной работой, которая полностью соответствует требованиям ВАК, в том числе Положению о

присуждении учёных степеней, утвержденному Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г. «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор – Лега Петр Викторович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. (01.04.07) – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

«5» сентября 2022 г.

Квашнин Александр Геннадьевич,

доктор физико-математических наук

(01.04.07. – физика конденсированного состояния)

старший преподаватель,

Проектный центр по энергетическому переходу

Автономная некоммерческая образовательная

организация высшего образования

«Сколковского института науки и технологий» Квашнин Квашнин А.Г.

Территория Инновационного центра «Сколково»

Большой бульвар д.30, стр.1, Москва 121205, Россия

Подпись А.Г. Квашнина удостоверяю

РУКОВОДИТЕЛЬ ОТДЕЛА
КАДРОВОГО АДМИНИСТРИРОВАНИЯ



Гуляев С