

## Отзыв

### официального оппонента на диссертационную работу

#### Смольниковой Елены Александровны

«Исследование структурных и автоэмиссионных характеристик нанографитных холодных катодов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Диссертация Елены Александровны Смольниковой посвящена исследованию автоэлектронной эмиссии из наноструктурированных углеродных материалов. Целью работы было определение взаимосвязи структурных характеристик материалов с их автоэмиссионными свойствами, а также изменение этих характеристик и свойств в результате воздействия различных факторов в процессе эксплуатации наноуглеродных автокатодов или в процессе изготовления электровакуумных приборов и устройств на их основе. Такая формулировка цели работы продиктована наличием ряда важных нерешенных фундаментальных и прикладных научных проблем, связанных с физикой конденсированного состояния вещества (например выяснение структурных особенностей углеродных материалов и их модификацию при различных воздействиях), а также с другими областями науки и техники (вакуумная электроника, наноматериалы и нанотехнологии и др.). Сочетание междисциплинарного характера исследований с наиболее современной проблематикой в каждой из рассматриваемых областей свидетельствует о несомненной высокой **актуальности** данной работы. Автором проводится сравнительное исследование структурных характеристик различных наноуглеродных материалов с преимущественно графитоподобным типом межатомных связей, включая графен, углеродные нанотрубки и пленки, состоящие из кристаллитов графита нанометровой толщины. Различное происхождение исследованных материалов позволило наглядно продемонстрировать адекватность использованных в работе методов анализа и подходов. Несмотря на единство исследованных материалов с точки зрения их химического состава и графитоподобных межатомных связей, они демонстрируют существенные вариации в структурных характеристиках на нанометровом масштабе, что было вполне наглядно продемонстрировано в работе на примере автоэлектронной эмиссии. Проведенное исследование позволило выявить ряд **новых** эффектов, а также предложить объяснение ранее наблюдавшимся явлениям, включая взаимосвязь упругих свойств наноразмерных углеродных образований (нанотрубок, слоев графена) с их морфологическими характеристиками в макроскопически больших масштабах, а также влияние этих параметров на автоэмиссионные свойства. Другим важным результатом,



полученным в работе, является выявление процесса частичной аморфизации материала наноуглеродных эмиттеров в процессе их эксплуатации в качестве автокатодов. При этом было показано, что структурное разупорядочение наблюдается в первую очередь в тех областях наноуглеродных эмиттеров, которые обладают наивысшей способностью к эмиссии. Наглядная демонстрация этого эффекта является позволяет **впервые** сделать доказательные заключения о механизмах деградации эмиссионных свойств наноуглеродных автокатодов.

Важной особенностью диссертационной работы Смольниковой Е.А. является проведение значительного объема исследований на прототипах устройств и приборов, а также изучение воздействия факторов, имеющих место в ходе практической эксплуатации или создания таких приборов и устройств. Данное обстоятельство свидетельствует о несомненной **практической ценности** данной работы. В ходе проведенных исследований были впервые продемонстрированы такие важные с практической точки зрения характеристики нанографитных автокатодов, как их способность к долговременной работе в условиях высокого технического вакуума, стойкость к воздействию нагрева в кислород-содержащей атмосфере, возможности создания пассивирующих покрытий и др. Данные результаты позволяют выработать конкретные рекомендации по использованию наноуглеродных автокатодов в приборах вакуумной электроники. В диссертации **впервые** продемонстрирован пример такого применения наноуглеродных автокатодов в электронных пушках, предназначенных для систем перемещения космических аппаратов.

Содержание диссертационной работы изложено во введении, четырех главах и заключении. Введение посвящено обоснованию актуальности выбранной темы диссертации, формулированию основных целей работы, указаны ее научная новизна и практическая ценность, перечислены основные положения, выносимые на защиту. Первая глава, традиционно, содержит анализ имеющихся литературных данных по тематике исследования. В этой главе представлен достаточно полный анализ имеющейся литературы (всего в диссертации имеется 144 ссылки на оригинальные работы, обзоры, книги и т.п.). На основе проведенного анализа формулируются цели и задачи работы. В последующих главах излагаются оригинальные **результаты, полученные** автором. Во второй главе автор приводит сведения о методах исследований, использовавшихся в работе, включая описание процедуры долговременных измерений автоэмиссии и конструктивных особенностей исследовавшихся прототипов вакуумных электронных устройств. Третья глава диссертации посвящена описанию результатов сравнительных исследований автоэмиссии из различных типов наноструктурированных углеродных материалов. Одним из основных результатов этих исследований стало выявление



механизма возникновения гистерезиса в вольт-амперных характеристиках некоторых разновидностей наноуглеродных автокатодов, который, по мнению автора, обусловлен обратимыми морфологическими изменениями под действием пондеромоторных сил. Четвертая глава диссертационной работы содержит описание результатов исследований зависимости свойств нанографитных автокатодов от параметров внешней среды и некоторых других видов воздействия на материал, реализуемых в процессе их эксплуатации. К наиболее важным выводам данных исследований следует отнести, видимо, обнаружение обратимых и необратимых изменений автоэмиссионных свойств наноуглеродных автокатодов и определение конкретных условий, соответствующих этим изменениям. Важными результатами являются также демонстрация высокой стабильности наноуглеродного материала при воздействии высоких температур, а также возможности пассивации его поверхности путем нанесения тонких диэлектрических покрытий. В заключении формулируются основные выводы работы.

В целом диссертация изложена ясным научным языком, сделанные заключения, предложенные модели и механизмы достаточно аргументированы и логичны. Представленные в диссертации результаты имеют несомненную **практическую ценность**, как для фундаментальных научных исследований, так и для разработки конкретных применений в различных технических областях. Полученные результаты могут найти применение в научных исследованиях и технологических разработках осуществляемых в академических и ведомственных институтах, промышленных компаниях, таких как МГУ им. М.В. Ломоносова, ИОФ РАН, ФИ РАН, ФТИ РАН, ИНЭОС РАН, МФТИ, МВТУ, НПО «Исток», НПО «Платан» и др.

При всех неоспоримых достоинствах данной диссертации, следует сделать ряд **замечаний**:

- 1) При обсуждении изменения морфологических характеристик упругих наноуглеродных образований в процессе автоэмиссии полностью игнорируется возможность участия магнитных полей и вызванных ими сил. В тоже время, учитывая, относительно высокие плотности токов это воздействие может оказаться сопоставимым с пондромоторными силами электростатического происхождения.
- 2) Отсутствует достаточное обоснование для выбора диэлектрических покрытий, которые наносились на нанографитные пленки с целью стабилизации их эмиссионных характеристик. Представляется, что нанесение тонких пленок,