

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Йе Наинг Туна  
«Исследование взаимодействия низкотемпературной плазмы с  
неоднородной поверхностью электродов в газоразрядных приборах»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности  
01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Одним из важных направлений в рамках фундаментальной научной проблемы физики конденсированного состояния, связанной с исследованием механизмов взаимодействия двух состояний вещества – плазмы и твердого тела, является изучение взаимодействия низкотемпературной газоразрядной плазмы с поверхностью электродов. При этом в плазме, в отличие от ситуации, когда твердое тело бомбардируется пучком ионов в вакууме, энергии ионов являются функциями характеристик приэлектродного слоя разряда, на которые оказывают существенное влияние химический состав и структура приповерхностного слоя электрода. Поэтому для создания более долговечных электродов требуется знание физики процессов, протекающих при взаимодействии их эмиссионной поверхности с плазмой газового разряда. Изучению данного вопроса посвящено большое количество работ, однако в них недостаточно исследовано влияние рельефа поверхности и присутствия на ней диэлектрических включений на особенности взаимодействия твердое тело – плазма. Этим и определяется актуальность темы диссертационной работы Йе Наинг Туна

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые разработаны:

- модель катодного слоя тлеющего разряда при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки и исследовано влияние полевой электронной эмиссии из подложки катода в пленку на характеристики разряда;
- модель, описывающей разогрева катода, поверхность которого покрыта диэлектрической пленкой, и изучено влияние пленки на переход тлеющего разряда в дуговой

- найдены энергетические спектры бомбардирующих катод частиц при наличии на нем периодического рельефа малой амплитуды и диэлектрической пленки переменной толщины, а также оценено воздействие этих факторов на степень неоднородности его распыления в разряде.

Практическая значимость диссертации обусловлена тем, что ее результаты могут быть использованы для выбора оптимальной структуры эмиссионной поверхности, снижающей интенсивность ее распыления, при создании более долговечных электродов газоразрядных приборов.

В качестве основных можно отметить следующие результаты работы.

Показано, что наличие на поверхности катода тонкой диэлектрической пленки может приводить к заметному снижению катодного падения напряжения разряда и, соответственно, к уменьшению энергий бомбардирующих катод частиц, обусловленному полевой эмиссией электронов из металлической подложки катода под действием возникающего в пленке сильного электрического поля.

Рассчитано изменение характеристик катодного слоя разряда и температуры поверхности катода в течение времени горения тлеющего разряда до его перехода в дуговой. Установлено, что при наличии на катоде диэлектрической пленки, вследствие полевой электронной эмиссии из подложки в пленку и последующего выхода части электронов из нее, увеличивается разрядный ток и интенсивность нагрева катода, что обеспечивает более быстрое возникновение дугового разряда в приборе.

Найдены распределения плотностей потоков ионов и быстрых атомов, а также эффективного коэффициента распыления катода и плотности потока распыленных атомов вдоль искривленной поверхности поверхности металлического катода. Показано, что эффективный коэффициент распыления имеет минимальную величину на вершинах рельефа из-за преимущественной фокусировки на них низкоэнергетичных ионов. Плотность же потока атомов, распыленных с поверхности катода, достигает на вершинах рельефа максимального значения вследствие большей плотности потока бомбардирующих их частиц.

Изучены закономерности процесса распыления в тлеющем разряде катода с тонкой диэлектрической пленкой переменной толщины и установлено, что при достаточно малой неравномерности толщины пленки бомбардирующий ее ионный поток является существенно неоднородным и максимален на участках с наименьшей толщиной пленки. Поэтому поток распыленных атомов с них имеет наибольшую величину, что приводит к увеличению неравномерности толщины пленки и к образованию в ней пор.

Все положения и выводы диссертации достаточно обоснованы, а полученные в работе результаты находятся в соответствии с имеющимися в научной литературе данными экспериментальных и теоретических исследований, что дает основание сделать вывод об их достоверности.

По диссертации можно сделать следующие замечания:

1. В модель катодного слоя разряда учитывающую наличие диэлектрической пленки на поверхности катода, входит в качестве параметра величина  $\delta_f$ , равная доле эмитированных из металлической подложки в пленку электронов, которые достигают внешней границы пленки и, преодолевая потенциальный барьер, выходят в разряд, увеличивая эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода. В диссертации отмечается, что согласно литературным источникам при малой толщине пленки порядка 10 нанометров эта величина растет с увеличением толщины пленки. При этом в расчетах используется линейная зависимость ее величины от толщины, но не обоснован выбор именно такой зависимости.

2. В работе используется формула Фаулера-Нордгейма для плотности тока полевой эмиссии из подложки в пленку. Но первоначально эта формула была получена для случая полевой эмиссии из металла в вакуум. В работе не поясняется, остается ли она справедливой для описания полевой эмиссии электронов из металла в диэлектрик.

Однако эти замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Заявленная цель работы достигнута, поставленные задачи решены. Основные результаты опубликованы в авторитетных физических журналах и прошли апробацию на конференциях международного и всероссийского

