

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Иониха Юрия Зиновьевича на диссертацию Сысоева Сергея Сергеевича на тему: «Исследование нелокальной плазмы тлеющих разрядов и ее применение для анализа состава газовых смесей методом плазменной электронной спектроскопии (ПЛЭС)», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Диссертация С.С.Сысоева посвящена экспериментальному исследованию неравновесной газоразрядной плазмы. В большей части работы (в двух главах из трёх, не считая обзора) описываются методы и результаты зондовой диагностики плазмы. Хотя зонд Ленгмюра используются для диагностики плазмы уже много десятилетий, в подавляющем большинстве речь идет об условиях, близких к классическим тлеющим разрядам в установках с характерным размером порядка сантиметра и при давлении, не превышающим единиц Торр. В представленной диссертации диапазоны этих величин существенно расширены: рассматривается интервал давлений от  $\sim 0.1$  Торр до атмосферного в разрядных системах с характерным размером от  $\sim 0.1$  до 400 мм. Получение такой информации дает возможность решать важные проблемы физики плазмы в ее современных приложениях. Этим обусловлена актуальность диссертации С.Сысоева.

Структура диссертации традиционная: Введение, четыре главы, Заключение и список литературы. **Введение** детально обосновывает актуальность работы, ее научную новизну и практическую значимость, формулирует основные положения, выносимые на защиту, и приводит список российских и международных конференций, на которых апробировались результаты работы, и список публикаций по теме диссертации, содержащий 9 наименований.

**Глава 1 (Обзор литературы)** дает краткое, но информативное описание тлеющего разряда; зондового метода диагностики плазмы, его истории, сущности, возможностей и ограничений; изложение метода плазменной электронной спектроскопии, разработанного на кафедре оптики СПбГУ в группе Н.Б.Колоколова, и его модификаций для анализа примесей в газе (А.А.Кудрявцев); описание конкретных разрядов, диагностика которых проводится в работе (микроразряд атмосферного давления, разряд в камерах большого объема с коаксиальным сетчатым электродом); и, наконец, изложение методов создания устойчивого облака пылевых частиц в газоразрядной плазме – информация, нужная для понимания результатов четвертой главы диссертации.

*Замечания.* 1) Опечатка в заголовке рис.1.2 (с.16).

2) Утверждение *"В положительном столбе, который существует независимо от приэлектродных областей разряда, возбуждение и ионизация осуществляются локальным электрическим полем"* (с.16) не точно. При низком давлении в положительном столбе возможен нелокальный режим.

**В главе 2** описываются установки, методика и результаты зондовой диагностики плазмы разряда пониженного давления. Исследовались два вида плазменных источников: прикатодная область короткого разряда в гелии и в смеси гелий–азот при давлении 5 – 10 Торр; и разряд в большой (диаметром 40 см) камере с коаксиальными сетчатыми электродами в воздухе и в аргоне при давлении 15 – 50 Па. Сняты вольтамперные характеристики зонда и найдены (путем расчета или аппаратно) их вторые производные.

Из обработки зондовых характеристик получены параметры плазмы: электронная концентрация и ее радиальная зависимость, электронная температура. Следует отметить оригинальный метод, использованный при изучении коротких промежутков: разрядная трубка помещается внутрь вакуумной камеры, которая, в свою очередь, наполняется исследуемым газом (или через которую прокачивается газ). Такая схема позволяет легко заменять разрядные трубки.

В результате проведенных исследований подтверждено, что область отрицательного свечения тлеющего разряда имеет низкую электронную температуру (порядка нескольких десятых электронвольта). Показано также, что плазма во внутренней области разряда большого объема с коаксиальными сетчатыми электродами представляет собой плазму отрицательного свечения, аналогичную прикатодной области тлеющего разряда. Обработанные зондовые характеристики оказываются пригодными для использования их в методе ПЛЭС, с помощью которого можно оценить концентрацию примесей (азота и кислорода) и метастабильных атомов гелия.

*Замечание.* Для регистрации зондовых характеристик использовались три различных устройства (с.42–43). При этом не указано, были ли выяснены преимущества у каких-то из них и которые из них применялись для получения результатов, приведенных на рис.2.8 – 2.13 и 2.19– 2.27.

**Глава 3** посвящена зондовой диагностике плазмы микроразряда при средних (40–150 Торр) и атмосферном давлении. В первом случае характерные размеры разрядного промежутка были ~1 мм, во втором – порядка 0.1 мм. Разряд зажигался в потоке гелия, присутствовали также примеси азота и кислорода. В качестве зонда использовался дополнительный кольцевой электрод, помещенный между катодом и анодом. Такая конструкция позволила снять вольтамперные характеристики зонда и получить оценки электронной концентрации и температуры. Кроме того, вторая производная ВАХ, снятой при давлениях 40 и 150 Торр, содержала максимумы, характерные для электронных спектров, получаемых при низких давлениях в гелии с примесями атмосферных газов. Это говорит о возможности применения метода ПЛЭС в таких устройствах.

*Замечания.* 1) При таких малых расстояниях между катодом и кольцевым зондом, можно ли исключить наличие дрейфового тока на зонд?

2) Что означает термин *нелокальная эквипотенциальная плазма* (с.80)?

**Глава 4** стоит особняком по отношению к основной части диссертации тем, что в ней не нет зондовой диагностики плазмы. Тем не менее, она представляется весьма актуальной и интересной. В ней предлагается и реализуется новый простой способ локализации пылевого облака в тлеющем разряде низкого давления, содержащем дисперсную (пылевую) компоненту. Идея, на которой основан этот метод, не очевидна; она основана на знаниях свойств и характеристик разряда в условиях нелокального режима. Как следует из теории, в таком режиме амбиполярное поле при приближении к стенке трубки резко возрастает и может существенно превысить продольное поле, поддерживающее разряд. Сила, действующая в таком поле на заряженную пылевую частицу, может удерживать ее в равновесии. Действие на нее продольного поля устраняется в области вертикального колена трубки. Такой способ удержания пылевого облака не требует наличия неподвижных в разряде страт – условие, необходимое для применения традиционного метода при вертикальном расположении трубки.

Замечание. Автор называет трубку, используемая в работе, U-образной. Скорее она все же П-образная. По-настоящему U-образная, то есть с дуговой перемычкой, трубка тоже работала бы, но, вероятно, несколько по-другому: она селектировала бы частицы по массе и/или заряду.

Оценивая работу в целом, можно отметить, что, несмотря на то, что её результаты носят преимущественно качественный характер, а численные результаты там, где они есть, являются оценочными, она оставляет чрезвычайно благоприятное впечатление. О ее актуальности уже говорилось выше. Еще раз отметим огромный диапазон условий, в которых автор смог успешно применить зондовую диагностику плазмы: четыре порядка по давлению газа и почти столько же по характерным размерам разрядного промежутка. Для этого ему пришлось в ряде случаев находить непростые технические решения. Но в результате диапазон условий, в которых возможно применение зондовой диагностики в целом, и метода плазменной электронной спектроскопии в частности, существенно расширился. Очевидно, что на основе этих исследований можно в дальнейшем ожидать появление новых разработок и конкретных диагностических устройств. Следует отметить хороший литературно-научный стиль написания работы, благодаря которому она очень легко читается. Сравнительно правильно расставлены и знаки пунктуации (что является большой редкостью в наше время). Опубликованные статьи достаточно полно отражают содержание работы.

Диссертация Сысоева Сергея Сергеевича на тему: «Исследование нелокальной плазмы тлеющих разрядов и ее применение для анализа состава газовых смесей методом плазменной электронной спектроскопии (ПЛЭС)» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», а соискатель Сысоев Сергей Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы. Пункты 9 и 11 указанного Порядка диссертантом не нарушены.

Член диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук, профессор,  
профессор кафедры оптики СПбГУ



Ионих Ю.З.

09.02.2022