

УДК 533.9.082.76

Влияние ионно-звуковой турбулентности на магнитную изоляцию плоского зонда в аномальном тлеющем разряде

Козырев Александр Валентинович

kozykryl@gmail.com

SPIN-код: 9512-5868

Айрапетянц Артём Владимирович

artem.airapetiants@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследования аномального тлеющего разряда на установке «Плазма-2», работающей на He-Ne смеси. В ходе проведения экспериментов с помощью двойных электрических Ленгмюровских зондов, находящихся у периферии и оси трубки, были определены локальные характеристики плазмы: электронная температура и концентрация, на основании которых был определен коэффициент отношения амбиполярного потока электронов к дрейфовому потоку электронов радиального поля, который характеризует потоки на зонды, находящиеся у стенки газоразрядной трубки. Проведено сравнение коэффициента гамма без магнитного поля и с наложенным продольным магнитным полем. Экспериментальные результаты показывают, что в области нахождения плоского зонда у поверхности газоразрядной трубки в зависимости от удельной мощности разряда, магнитная изоляция ухудшается, т. е. коэффициент гамма аномально возрастает. Это связано с тем, что разряд He-Ne плазмы стратифицирован и при изменении удельной мощности разряда турбулентная голова страты перемещается относительно плоской поверхности зонда с изменением характера амбиполярной диффузии. Проведенные ранее исследования показывают, что в голове страты возникают шумовые флуктуации тока насыщения на зонд в области сотен МГц, что соответствует ионно-звуковой турбулентности с ионно-звуковой плазменной частотой для данного разряда. Амбиполярная диффузия рассчитывается с учетом турбулентности плазмы.

Ключевые слова: аномальный тлеющий разряд, He-Ne плазма, коэффициент гамма, магнитная изоляция, зондовая диагностика плазмы, стратификация газового разряда, амбиполярная диффузия, ионно-звуковая турбулентность

The effect of ion-acoustic turbulence on the magnetic insulation of a flat probe in an anomalous glow discharge

Kozyrev Alexander Valentinovich

kozykryl@gmail.com

SPIN-code: 9512-5868

Airapetiants Artem Vladimirovich

artem.airapetiants@gmail.com

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. This paper presents the results of a study of an anomalous glow discharge at the Plasma-facility operating with a He-Ne mixture. Experiments using dual electric Langmuir probes located near the tube periphery and axis allowed us to determine local plasma charac-

teristics, including electron temperature and density. These were used to determine the ratio of the ambipolar electron flux to the radial drift electron flux, which characterizes the fluxes to the probes located near the gas-discharge tube wall. The gamma coefficient is compared without a magnetic field and with an imposed longitudinal magnetic field. The experimental results show that, in the region where the flat probe is located near the gas-discharge tube surface, magnetic insulation deteriorates, depending on the specific discharge power, meaning the gamma coefficient increases anomalously. This is due to the fact that the He-Ne plasma discharge is stratified, and as the specific discharge power changes, the turbulent head of the stratum moves relative to the flat surface of the probe, changing the nature of the ambipolar diffusion. Previous studies show that noise fluctuations in the saturation current to the probe occur at the head of the stratum in the hundreds of MHz range, which corresponds to ion-acoustic turbulence at the ion-acoustic plasma frequency for this discharge. Ambipolar diffusion is calculated taking plasma turbulence into account.

Keywords: *anomalous glow discharge, He-Ne plasma, gamma coefficient, magnetic insulation, plasma probe diagnostics, gas discharge stratification, ambipolar diffusion, ion-acoustic turbulence*

Введение. Исследование физики газового разряда и свойств низкотемпературной плазмы сохраняет свою высокую актуальность как в фундаментальной науке, так и в прикладных задачах создания плазменных приборов и технологических установок, например магнитная изоляция высокотемпературной плазмы, применяемой в термоядерных установках низкого давления типа Токмак или Стеларатор [1]. Особый интерес представляет поведение тлеющего разряда в магнитном поле, который является эффективной моделью для изучения процессов переноса заряженных частиц и удержания плазмы.

Важным процессом, существенно влияющим на параметры разряда, является стратификация разряда — самопроизвольное расслоение плазменного столба на чередующиеся светящиеся и темные области [2, 3]. В стратифицированной плазме радиальные потоки частиц и механизмы их диффузии существенно меняются по длине трубки, что, в свою очередь, может критически влиять на эффективность магнитной изоляции [4]. Проведенные ранее исследования показывают, что в головной части страты наблюдаются стохастические колебания концентрации электронов, связанные с развитием ионно-звуковой неустойчивости [5]. Количественная связь между развитием ионно-звуковой турбулентности, стратификацией и эффективностью магнитного требуют дальнейшего изучения.

Исследования проводились на установке «Плазма-2» с аномальным He-Ne тлеющим разрядом, являющаяся модернизированным вариантом установки «Плазма-1» с водородным несамостоятельным дуговым разрядом, где используется блок зондовой диагностики [6]. В ходе экспериментов установлено, что в определенном диапазоне удельных мощностей разряда эффективность магнитной изоляции плоского зонда у стенки газоразрядной трубки аномально падает.

Материалы и методы. Установка «Плазма-2» (рис. 1, а) имеет He-Ne наполнение в отношении 9:1, используемое в гелий-неоновых лазерах в каче-

стве активной среды (He-Ne плазма). Самостоятельный разряд (рис. 1, в) с токами разряда 5–10 мА и напряжением 300–600 В поддерживается ионной бомбардировкой алюминиевого полого холодного катода. Для зажигания разряда используется пьезо-электронный ignайтер. В состав установки входит адсорбционный узел восстановления рабочей среды газоразрядной трубки с напряжением накала 6,3 В и балластным резистором 5 кОм. Магнитное поле с индукцией 40–45 мТл создается постоянными магнитами (рис. 1, б).

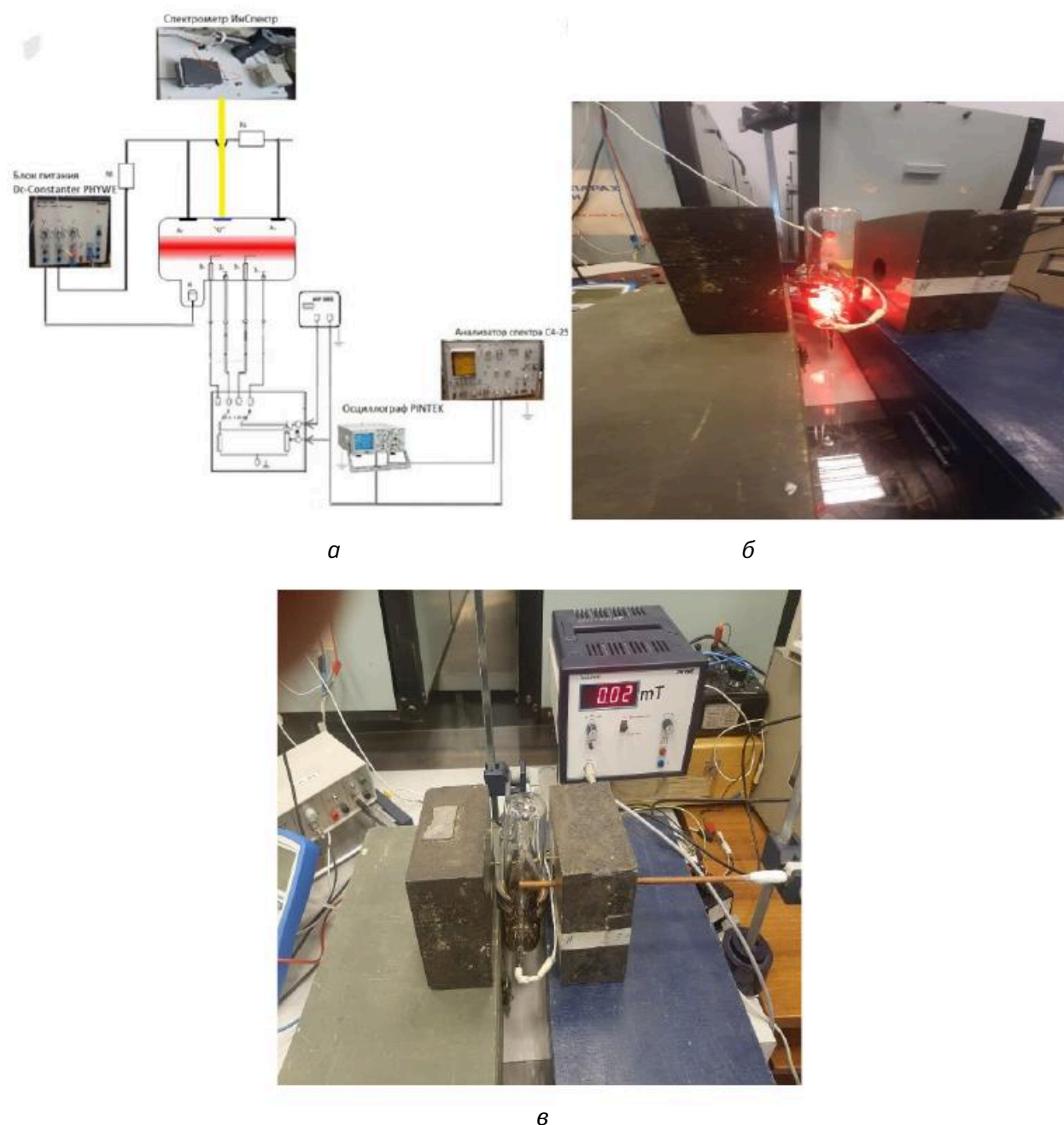


Рис. 1. Установка «Плазма-2»: а — схема установки с диагностическими плечами зондовой диагностики, радио спектральной диагностики и оптической диагностики; б — газоразрядная трубка с наложенным магнитным полем постоянных магнитов. При этом вектор магнитной индукции наложенного магнитного поля ориентирован вдоль поверхности плоского зонда; в — вид He-Ne разряда

Способ диагностики плазмы при помощи зондов Ленгмюра основывается на явлении поляризации плазмы, позволяющем определять концентрацию, температуру электронов в месте расположения зондов. Металлический проводник вводится в плазму, при этом его размеры значительно меньше характерного объема, занимаемого диагностируемым веществом. Для определения локальных параметров плазмы проводится обработка вольтамперной характеристики зондов, регистрируемой при проведении эксперимента. Ток на зонд складывается из токов электронов и тока ионов в плазме, причем, если зонд имеет положительный потенциал относительно плазмы в невозмущенном состоянии, то электроны притягиваются к нему, в противном случае — отталкиваются. Образованный слой пространственного заряда вокруг зонда экранирует остальную плазму от производимых им возмущений. Его толщина составляет несколько радиусов Дебая [6].

Результаты. Коэффициент гамма (γ) определяется как отношение радиального диффузионного потока электронов ($\Gamma_{rad,e}$) к дрейфовому потоку электронов, обусловленному радиальным электрическим полем (E_r) $\gamma = \frac{\Gamma_{rad,e}}{E_r}$. Если значение коэффициента γ велико, то имеет место преобладание амбиполярных диффузионных потоков электронов по сравнению с дрейфовыми потоками электронов в радиальном электрическом поле. На рис. 2 представлены экспериментальные результаты по определению коэффициента γ для двух серий экспериментов. Доверительная погрешность определялась с помощью программы, написанной на языке Python.

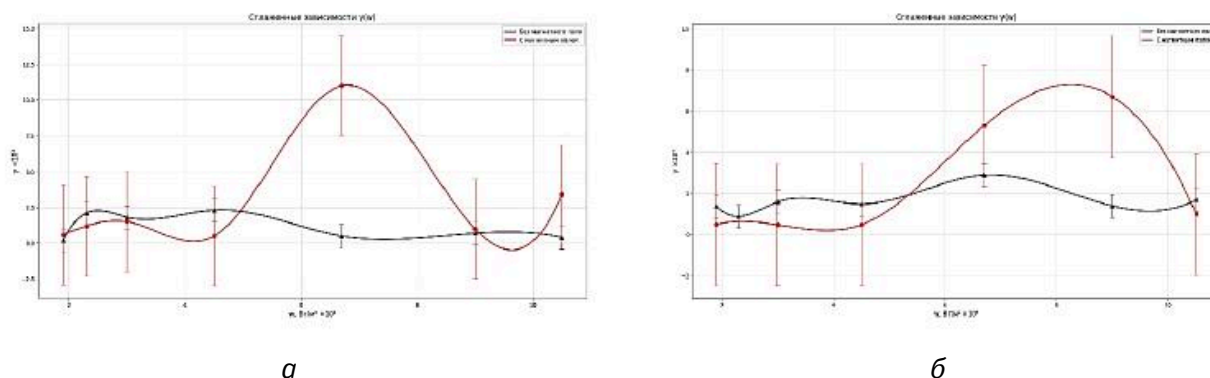


Рис. 2. Экспериментальные результаты по определению коэффициента γ для двух серий экспериментов: *а* — результаты, полученные в эксперименте № 5; *б* — результаты, полученные в эксперименте № 8. Зависимость коэффициента γ от удельной мощности разряда w для зондов 31 и 32; 31 — цилиндрический зонд, находится на оси трубки; 32 — плоский зонд, находится у стенки трубки. Черная кривая соответствует коэффициенту γ без магнитного поля, красная — с магнитным полем

Рис. 2, *а* и *б* показывают достаточно хорошую воспроизводимость результатов, хотя значения γ без магнитного поля на рис. 2, *а* изменяются в диапазоне от $\sim 1 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^3$, а на рис. 2, *б* — от ~ 0 до $2 \cdot 10^3$. Для значения γ с магнитным полем на рис. 2, *а* изменяются в диапазоне от $\sim 0,5 \cdot 10^3$ до $7,5 \cdot 10^3$, а на рис. 2, *б* от $\sim 1 \cdot 10^3$ до $11 \cdot 10^3$. Наличие эффекта магнитной

изоляции плоского зонда у стенки газоразрядной трубки определяется относительным уменьшением коэффициента γ , что соответствует областям графиков на которых красная кривая лежит ниже черной кривой.

Обсуждение полученных результатов. Полученные экспериментальные данные демонстрируют неоднозначное поведение коэффициента γ в зависимости от удельной мощности разряда в аномальном He-Ne тлеющем разряде. Наблюдаемый рост абсолютного значения γ с увеличением удельной мощности разряда w , более выражен для условий измерений в магнитоактивной плазме и связан с ухудшением эффективности магнитной изоляции, что соответствует резкому ухудшению эффективности магнитного удержания плазмы и усилению радиальных диффузионных потерь электронов.

Наиболее вероятным объяснением данного эффекта является влияние стратификации разряда, связанная с образованием в He-Ne разряде страт (рис. 3), параметры плазмы в которых (концентрация, температура, потенциал) резко неоднородны как вдоль, так и поперек разрядной трубки [3].



Рис. 3. Страты He-Ne плазмы при $w = 9 \cdot 10^4$ Вт/м³

При изменении мощности разряда положение головы (анодной области) страты изменяется относительно поверхности плоского зонда. Поскольку радиальные потоки частиц и механизмы диффузии в голове страты отличается от потоков в ее диффузном хвосте, то сдвиг страты относительно поверхности зонда приводит к изменению расчетного значения γ . При этом определяющим является положение страты относительно плоского зонда. Тогда, когда у плоского зонда находится голова страты с развитой ионно-звуковой турбулентностью коэффициент амбиполярной диффузии увеличивается, что приводит к ухудшению магнитной изоляции наблюдаемой в эксперименте в диапазоне удельных мощностей $5 \cdot 10^4 - 10 \cdot 10^4$ Вт/м³ для эксперимента № 5

и $5 \cdot 10^4 - 9 \cdot 10^4$ Вт/м³ для эксперимента № 8. В то время как у плоского зонда находится диффузный хвост страты, коэффициент амбиполярной диффузии уменьшается и магнитная изоляция улучшается, что соответствует диапазону удельных мощностей разряда $2 \cdot 10^4 - 6,5 \cdot 10^4$ Вт/м³ для эксперимента № 5 и $1 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^4$ Вт/м³ для эксперимента № 8.

Определяющим фактором, обуславливающим ухудшение магнитной изоляции в головной части страты, является развитие ионно-звуковой неустойчивости, исследованной в [7], которые показывают, что в данной области возникают интенсивные шумовые флуктуации тока насыщения на зонд в частотном диапазоне сотен МГц. Данный диапазон соответствует ионно-звуковым плазменным частотам для параметров He-Ne плазменного образования установки «Плазма-2».

Возникновение ионно-звуковой турбулентности приводит к изменению процессов переноса частиц плазмы. Турбулентные пульсации электрического поля значительно усиливают поперечный (по отношению к магнитному полю) перенос плазмы, эффективно «взбалтывая» ее и подавляя действие магнитной изоляции. В этом случае классическая модель амбиполярной диффузии [1] становится некорректной. Экстремальное значение $\gamma \approx 7,5 \cdot 10^3$ при удельной мощности $w = 8,8 \cdot 10^4$ Вт/м³ в эксперименте № 5 и $\gamma \approx 11 \cdot 10^3$ при удельной мощности $w = 7 \cdot 10^4$ Вт/м³ в эксперименте № 8 хорошо согласуются с моделью турбулентной амбиполярной диффузии, в которой аномально высокий поток частиц на стенку обусловлен совместным влиянием дрейфа в электрическом поле и турбулентным механизмом переноса.

Заключение. Полученные экспериментальные результаты позволяют описать и исследовать влияние эффекта магнитной изоляции на потоки заряженных частиц на стенки, ограничивающие плазменное образование газового разряда. Показано влияние стратификации разряда на магнитную изоляцию зонда у поверхности стенки и проведена идентификация характера диффузии заряженных частиц за счет учета развития ионно-звуковой турбулентности плазмы в голове страты.

Список источников

- [1] Лукьянов С.Ю. *Горячая плазма и управляемый ядерный синтез*. Москва, Наука, 1975.
- [2] Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. Москва, Интеллект, 2009, с. 734.
- [3] Голубовский Ю.Б., Некучаев В.О., Скобло А.Ю. Прогресс в исследовании страт в инертных газах. *Журнал технической физики*, 2014, т. 84, № 12, с. 50–62.
- [4] Козырев А.В., Афанасьев М.С. Лабораторная работа «Экспериментальное исследование амбиполярной диффузии магнитоактивной стратифицированной плазмы и эффекта магнитной изоляции». *Физическое образование в вузах*, 2025, т. 31, № 1, с. 97–112.
- [5] Кролл Н., Трайвелпис А. *Основы физики плазмы*. Москва, Мир, 1975, 525 с.
- [6] Козырев А.В., Шибеева А.Д. Лабораторная работа «Зондовый метод диагностики». *Физическое образование в вузах*, 2021, т. 27, № 1, с. 41–49.
- [7] Козырев А.В., Докукин М.Ю. Развитие неустойчивостей в неравновесной стратифицированной водородной плазме. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, № 2, с. 1–13. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2024-2-2335>