

Измерение электронной концентрации в плазме диффузного разряда в гелии методом штарковского сдвига

Д.А. Сорокин^{}, Д.В. Белоплотов*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

^{}sdma-70@loi.hcei.tsc.ru*

Аннотация. При помощи метода, основанного на определении спектрального расстояния между запрещенными (447 и 492.07 нм) и разрешенными (447.15 и 492.2 нм) компонентами гелиевых атомарных линий, осуществлены измерения электронной концентрации в неравновесной низкотемпературной плазме диффузного разряда в гелии при давлениях 250–3000 мбар. Средние за время импульса значения электронной плотности изменяются от $\sim 10^{14}$ до $\sim 10^{16}$ см⁻³, что указывает на формирование данным способом возбуждения плотной плазмы, которая имеет высокий потенциал использования для решения различных практических задач. Выявлено влияние структуры зоны токопрохождения на величину концентрации электронов. Измеренные указанным способом значения параметра находятся в хорошем соответствии с данными измерений альтернативными методами.

Ключевые слова: диффузный разряд, гелий, электронная концентрация, штарковский сдвиг, оптическая эмиссионная спектроскопия, неравновесная низкотемпературная плазма

1. Введение

Высоковольтный наносекундный разряд в миллиметровых и сантиметровых газонаполненных промежутках с резко неоднородным распределением напряженности электрического поля [1, 2] является объектом, представляющим научную и практическую значимость. Благодаря особенностям стадии пробоя при высоких перенапряжениях [2, 3], в широком диапазоне условий зажигания и горение разряда происходит в диффузной форме при давлениях газа от единиц до тысяч мбар, в связи с чем данный тип электрического возбуждения может рассматриваться как средство коммутации [4], генерации высокоэнергетичных электронов и квантов рентгеновского излучения [3], а также способ генерации плотной неравновесной низкотемпературной «холодной» плазмы, востребованной в самых различных областях, например, медицине, микроэлектронике, материаловедении и др. [5, 6].

В зависимости от решаемых задач, в качестве плазмообразующей среды используют не только чистые газы, но и различные их комбинации. Так, например, представляющей интерес для ряда медицинских применений может выступать плазма диффузного разряда в гелии, поскольку данный атомарный газ не только принадлежит к классу инертных, но и обеспечивает возможность формирования плазмы с температурой тяжелых частиц, близкой к комнатной, при давлениях до 15 бар [1].

При этом для любого плазменного объекта, если он представляет прикладной интерес, важно знание его основных параметров. В частности, одним из таких параметров, в большой степени влияющим на кинетику процессов в плазме, является электронная концентрация. Существуют различные методы для измерения данного параметра в неравновесной низкотемпературной плазме [7], однако не все методы применимы к одному плазменному объекту или дают одинаковые результаты. Ранее в плазме диффузного разряда в гелии электронная плотность измерялась при помощи метода штарковского уширения линии атома водорода H β . Цель данной работы заключалась в измерении концентрации электронов в плазме высоковольтного наносекундного разряда в гелии в промежутке с сильно неоднородным распределением напряженности электрического поля методом штарковского сдвига атомарной линии гелия.

2. Экспериментальная установка и методы

Экспериментальная установка включала в себя систему откачки и напуска газов, на основе безмасляных пластинчато-роторного и турбомолекулярного насосов, к которой посредством металлических трубопроводов подключалась изготовленная из нержавеющей стали цилиндрическая разрядная камера. При проведении опытов камера заполнялась гелием высокой степени чистоты (99.9999%). Межэлектродный узел расположенного внутри камеры диода имел геометрию «острие-плоскость» и был образован разнесенными на расстояние 6 мм высоковольтным конусообразным (угол раствора 60° , радиус кривизны вершины 100 мкм, диаметром основания 6 мм) катодом и плоским заземленным анодом, изготовленными из дюралюминия. Катод надевался на высоковольтный ввод камеры, имеющий цилиндрическую форму и диаметр 5 мм. С противоположной стороны высоковольтный ввод представляет собой центральный проводник коннектора разрядной камеры, к которому подключается высоковольтный генератор импульсов напряжения ГИН-55-01 (FID Tech.) [9]. Генератор формировал импульсы напряжения отрицательной полярности с временем нарастания и длительностью на полувысоте ≈ 0.7 нс на согласованную нагрузку. Максимальная амплитуда напряжения в падающей волне достигала -40 кВ также на согласованную нагрузку. Частота следования импульсов могла достигать 60 Гц.

Возможность визуального наблюдения за процессом горения разряда в камере и вывода излучения плазмы из нее обеспечивалась установленными на ее боковых стенках кварцевыми окнами. Интегральные фотографии свечения плазмы разряда фиксировались при помощи цифровой фотокамеры Sony A100. Разрешенные во времени изображения свечения плазмы разряда, демонстрирующие динамику развития пробоя, фиксировались при помощи четырехканальной ICCD камеры HSFC-PRO (PCO Computer Optics GmbH) с минимальной экспозицией на канал 3 нс. Цифровой генератор задержек DG645 (Stanford Research Systems) позволял запускать ICCD камеру до момента прибытия импульса напряжения на промежуток, что давало возможность зафиксировать свечение плазмы стримера в предпробойной стадии разряда, длящейся меньше 1 нс.

Для измерения электронной плотности N_e в плазме разряда в гелии был выбран метод оптической эмиссионной спектроскопии, основанный на измерении смещения запрещенной (F) в дипольном приближении компоненты атомарной линии гелия с длиной волны относительно разрешенной (A) [10, 11]. В данном случае профиль спектральной линии формировался на матрице CCD камеры PI-MAX2 (Princeton Instruments), установленной на месте выходной щели монохроматора МДР-23 (ЛОМО), оснащенный дифракционной решеткой 2400 штр/мм, обеспечивающей, в совокупности с нормальной шириной входной щели (30 мкм), величину аппаратной функции ~ 0.25 Å. В этом случае при помощи оптической системы в плоскости входной щели монохроматора строилось изображение плазменного объекта.

С целью измерения электрофизических характеристик диффузного разряда в гелии, разрядная камера была оснащена ёмкостным делителем напряжения и токовым шунтом с субнаносекундным временным разрешением. Регистрация электрических сигналов с указанных датчиком производилась при помощи высокоскоростного цифрового осциллографа DSO-X6004A (Keysight Technologies, Inc.) с полосой пропускания до 6 ГГц.

3. Результаты и их обсуждение

Зажигание диффузного разряда в заполненной гелием разрядной камере осуществлялось в импульсном режиме посредством подачи на промежуток от генератора ГИН-55-01 импульсов напряжения с максимальной амплитудой равной -40 кВ на согласованную нагрузку 75 Ом или до -80 кВ на газоразрядную нагрузку (см. Рис.1а). В первые моменты

прибытия импульса напряжения на высоковольтный электрод с малым радиусом кривизны зазор представляет собой нагрузку с бесконечно большим сопротивлением, т.е. реализуется режим холостого хода. В этом случае падающая волна складывается с отраженной и напряжение на промежутке может достигать в пределе удвоенного значения. Резко неоднородное распределение напряженности электрического поля обеспечивает высокие (10^6 В/см и более) напряженности электрического поля вблизи острия даже при напряжении пробоя несколько десятков кВ, что приводит к генерации высокоэнергетичных, в том числе убегающих, электронов и рентгеновского излучения, производящих интенсивную предыонизации газа. Последнее обстоятельство способствует формированию и развитию стримера больших поперечных размеров (см. Рис. 1б), осуществляющего пробой межэлектродного промежутка на субнаносекундных масштабах времен [4]. Перечисленная последовательность физических процессов приводит к зажиганию диффузного разряда (см. Рис. 1в), характеризующегося сильно неравновесным состоянием формируемой низкотемпературной плазмы. Важно отметить при этом, что представленная на Рис.1в морфология разряда в гелии при атмосферном давлении сохраняется как при снижении, так и при увеличении последнего. Таким образом, применяя данный режим возбуждения появляется возможность формирования достаточно однородного по объему плазменного объекта. Конечно же, важно понимать какими параметрами он характеризуется, в частности, какова его плотность N_e .

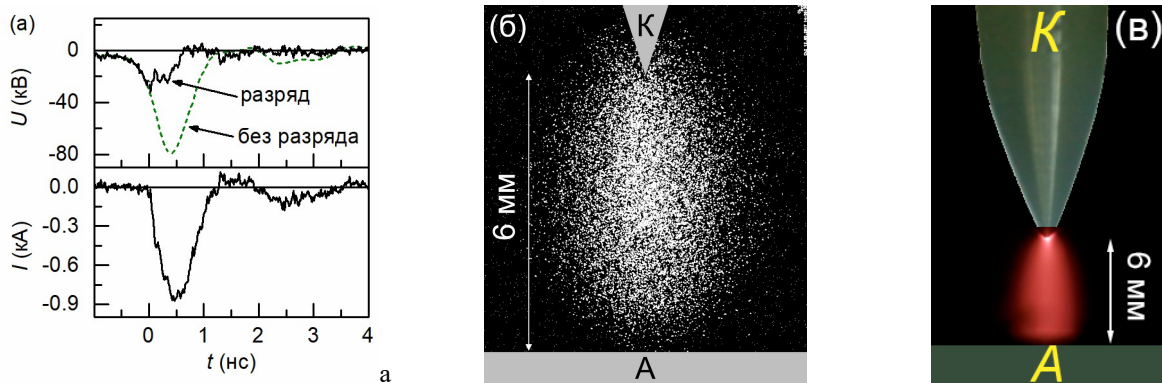


Рис. 1. (а) Осциллограммы напряжения на промежутке (режим холостого хода и при пробое) и тока разряда. (б) Изображение свечения плазмы стримера с большими поперечными размерами в промежутке в предпробойной стадии. (в) Интегральная фотография свечения плазмы разряда. Гелий, 1000 мбар. Высоковольтный конусный катод K и плоский заземленный анод A . Межэлектродное расстояние 6 мм. ГИН-55-01, амплитуда напряжения в падающей волне -40 кВ.

Как указывалось ранее, в качестве основного для измерения N_e был выбран метод, основанный на измерении спектрального расстояния S между двумя компонентами, разрешенной (A) и запрещенной (F) в дипольном приближении, линий атома гелия He I с длинами волн $\lambda = 447.15$ (переход 4^3D-2^3P) (Рис.2а) и 492.2 нм (переход 4^1D-2^1P) (Рис.2б). Возникновение в спектральном распределении энергии дополнительных компонент $\lambda = 447.0$ нм (переход 4^3F-2^3P) и 492.07 нм (переход 4^1F-2^1P) обусловлено Штарк-эффектом, проявляющемся вследствие влияния электрических микрополей, индуцируемых электронной компонентой плазмы. Очевидно, что данный эффект тем выраженней, чем выше электронная концентрация. Определение параметра N_e на основании измеренного значения S производится из соотношения (1):

$$\log(N_e) = 23.056 + 1.586 \cdot (S - 0.156) + 0.225 \cdot [(\log(S) - 0.156)]^2. \quad (1)$$

Представленный способ, вне зависимости от типа равновесия в плазме, позволяет измерять электронную концентрацию в диапазоне 10^{14} – 10^{16} см⁻³ с надежностью не хуже 15%.

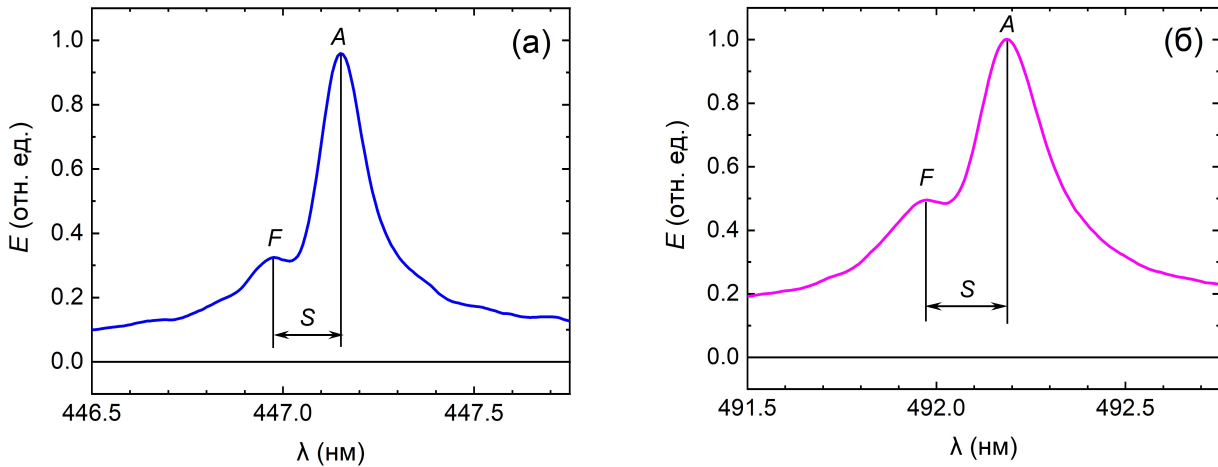


Рис. 2. Спектральное распределение энергии излучения плазмы диффузного разряда в гелии при давлении 1000 мбар, зарегистрированное из середины разрядного промежутка $z = 3$ мм. (а) Разрешенная (A) и запрещенная (F) компоненты линии атома гелия He I с длинами волн $\lambda = 447.15$ (4^3D-2^3P) и $\lambda = 447.0$ (4^3F-2^3P), соответственно. (б) Разрешенная (A) и запрещенная (F) компоненты линии атома гелия He I с длинами волн $\lambda = 492.2$ нм (переход 4^1D-2^1P) и 492.07 нм (4^1F-2^1P), соответственно.

Так, используя указанный метод штарковского сдвига были измерены средние во времени значения электронной плотности в различных сечениях разрядной области вдоль центральной оси, т.е. на различных расстояниях от острия высоковольтного электрода с малым радиусом кривизны в сторону заземленного анода. При этом, измерения были для различных давлений плазмообразующего газа He.

Результаты измерений средних значений N_e в плазме разряда в гелии вдоль координаты z (ось разрядного промежутка) в диапазоне давлений от 250 до 3000 мбар представлены на Рис.3. Поскольку получаемые на основании измеренного спектрального расстояния S значения концентрации электронов для обеих линий гелия, $\Delta\lambda = 447$ – 447.15 нм и $\Delta\lambda = 492.07$ – 492.2 нм, различались не более чем на 2–3 %, итоговый результат представлен в виде сводного набора зависимостей.

Из Рис.3 видно, что по мере увеличения давления плотность плазмы, ожидаемо, возрастает с величины $\approx 2 \cdot 10^{14}$ до $\approx 1 \cdot 10^{16}$ см⁻³, подтверждая тот факт, что формируемая высоковольтным наносекундным разрядом плазма является, действительно, плотной. Характер зависимостей N_e от координаты z позволяет заключить, что распределение концентрации электронов вдоль промежутка неоднородно. При этом в диапазоне давлений до 1000 мбар величина N_e в области вблизи высоковольтного острейного электрода ($z = 0$) ниже, чем в оставшейся части промежутка, а при давлениях He выше 1000 мбар наблюдается обратная ситуация – концентрация электронов вблизи острия оказывается выше. Данный экспериментальный факт вполне объясняется морфологией разряда и соотношением для нахождения величины разрядного тока (тока проводимости) I (2).

$$I = e \cdot N_e \cdot v_d \cdot S, \quad (2)$$

где e – элементарный заряд электрона, N_e – концентрация электронов, v_d – дрейфовая скорость электронов, S – поперечное сечение зоны токопрохождения.

Так, при давлениях выше атмосферного зона токопрохождения вблизи конусообразного катода имеет меньшее по сравнению с оставшейся частью поперечное сечение – область,

через которую протекает ток разряда имеет форму конуса, расходящегося от высоковольтного острия в сторону заземленного плоского анода (см. Рис.1а). При давлении гелия менее 1000 мбар зона токопрохождения вблизи потенциального катода имеет больший размер, что проявляется в наличии свечения плазмы на образующих конусообразного катода.

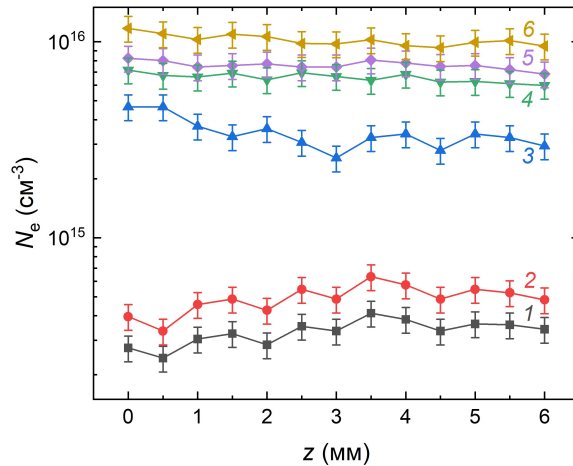


Рис. 3. Средние за время импульса значения электронной концентрации N_e в плазме диффузного разряда в гелии He в различных сечениях зоны разряда вдоль продольной оси (Oz) промежутка при различных давлениях плазмообразующего газа: 1 – 250 мбар; 2 – 500 мбар; 3 – 1000 мбар; 4 – 1500 мбар; 5 – 2000 мбар; 6 – 3000 мбар.

Для проверки валидности измеренных с использованием метода штарковского сдвига значений электронной плотности, был использован метод измерения N_e , заключающийся в измерении уширения атомарной линии водорода H_β с $\lambda = 486.1$ нм, возникающего в результате действия эффекта Штарка. Следует отметить, что данный метод ранее успешно был использован для подобных измерений в плазме диффузного разряда, формируемой при использовании более мощного генератора РАДАН-220 [12]. Для проведения измерений, в качестве плазмообразующего газа выступала смесь гелия He и водорода H_2 . Содержание последнего в смеси составляло $\approx 1\%$.

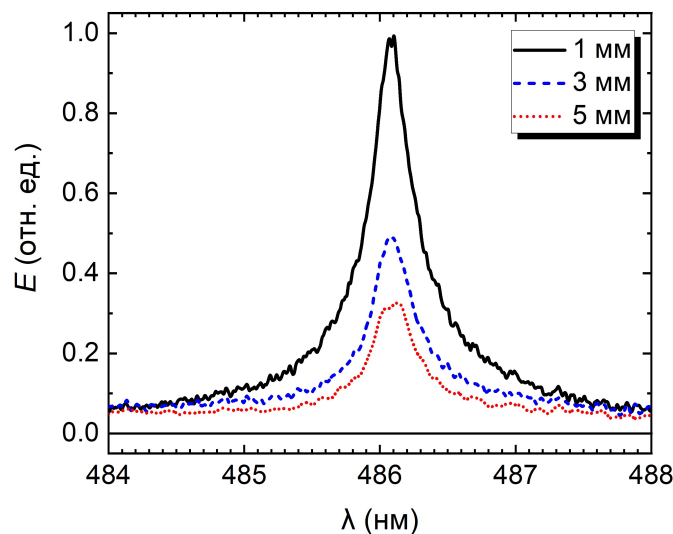


Рис. 4. Спектральное распределение энергии излучения плазмы диффузного разряда в смеси He- H_2 при общем давлении 1000 мбар, зарегистрированное из зон разрядного промежутка с координатами $z = 1, 3$ и 5 мм. (а) Линия атома водорода H_β с $\lambda = 486.1$ нм.

В качестве примера на Рис. 4 представлена линия водорода $H\beta$, зарегистрированная из плазмы разряда в смеси He- H_2 атмосферного давления, из различных областей межэлектродного промежутка ($z = 1, 3$ и 5 мм от острия). Оценки, основанные на измерении спектральной ширины данной линии на полувысоте, показывают, что по мере удаления от высоковольтного электрода с малым радиусом кривизны электронная концентрация уменьшается от $\approx 4 \cdot 10^{15}$ до $\approx 2.5 \cdot 10^{15}$ см^{-3} . Данный результат, с учетом точности метода ($\sim 30\%$), находится в хорошем согласии с результатом, полученным методом штарковского сдвига. Кроме того, полученные данные согласуются с результатами измерений других авторов, см. например [13].

Помимо методов оптической эмиссионной спектроскопии, для оценки электронной плотности были использованы данные электрофизических измерений, а именно сигнал в цепи, зарегистрированный токовым шунтом (Рис.1а). Концентрация электронов в этом случае может быть определена из соотношения (2). Так, например, произведенные для разряда в гелии при давлении 1000 мбар оценки позволили не только определить значение параметра N_e в активной фазе горения разряда, которое составило $\sim 10^{15}$ см^{-3} , но и электронную плотность в широком стримере на стадии пробоя $\sim 10^{14}$ см^{-3} , которая часто приводится в литературе.

4. Заключение

В рамках проведенной работы для плазмы высоковольтного наносекундного разряда в гелии, реализующегося в условиях высоких перенапряжений, был апробирован метод измерения электронной плотности, основанный на измерении спектрального смещения запрещенных компонент линий атомарного гелия с длинами волн 447 и 492.07 нм относительно разрешенных в дипольном приближении «соседей» 447.15 и 492.2 нм. Измерения показали, что средние за время импульса значения электронной концентрации в диапазоне давлений сотни-тысячи мбар находятся в диапазоне 10^{14} – 10^{16} см^{-3} , подтверждая тезис о том, что плазма диффузного разряда, формируемого в условиях сильно неоднородного распределения напряженности электрического поля является плотной, что важно для ряда практических приложений. Ожидаемо получена зависимость величины электронной плотности от морфологии разрядной области.

В дальнейшем планируется, используя данный метод, осуществить измерения во времяразрешенном режиме.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИСЭ СО РАН, проект № FWRM-2021-0014.

5. Список литературы

- [1] V.F. Tarasenko (ed.), *Runaway Electron Preionized Diffuse Discharges*. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2014.
- [2] Tao Shao and Cheng Zhang (eds.), *Pulsed Discharge Plasmas*, Springer Series in Plasma Science and Technology, Volume Part F1094. Singapore: Springer Nature, 2023, doi: 10.1007/978-981-99-1141-7
- [3] V.F. Tarasenko (ed.), *Generation of Runaway Electron Beams and X-Rays in High Pressure Gases*, Vol. 1 and Vol. 2. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2016.
- [4] D. Beloplotov, D. Sorokin and V. Tarasenko, High-voltage nanosecond discharge as a means of fast energy switching, *Energies*, **14**, 8449, 2021, doi: 10.3390/en14248449

- [5] Paul K. Chu and XinPei Lu (eds.), *Low temperature plasma technology: Methods and applications*. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [6] I. Adamovich, S. Agarwal, E. Ahedo et al., The 2022 Plasma Roadmap: low temperature plasma science and technology, *Journal Physics D: Applied Physics*, **55**, 373001, 2022, doi: 10.1088/1361-6463/ac5e1c
- [8] Дж. Бекефи (ред.), *Плазма в лазерах*. Москва: Энергоиздат, 1982.
- [9] Frank Sabath, D.V. Giri, Farhad Rachidi, Armin Kaelin (eds.), *Ultra Wideband, Short pulse electromagnetics 9*, Part 5, New York: Springer: 2010, doi: 10.1007/978-0-387-77845-7
- [10] A. Czernichowsky and J. Chapelle, Use of the 447 nm He I line to determine electron concentrations, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **31**, 427, 1985, doi: 10.1016/0022-4073(85)90129-3
- [11] H.G. Adler and A. Piel, Stark-broadening of the helium lines 447 and 492 nm at low electron densities, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **45**, 11, 1991, doi: 10.1016/0022-4073(91)90077-4
- [12] D.A. Sorokin, M.I. Lomaev, T.I. Banokina, V.F. Tarasenko, Determination of the electron concentration and temperature, as well as the reduced electric field strength, in the plasma of high voltage nanosecond discharge initiated in atmospheric pressure nitrogen by runaway electron beam, *Technical Physics*, **59**, 1119, 2014, doi: 10.1134/S1063784214080234
- [13] S. Yatom, A. Shlapakovski, L. Beilin, E. Stambulchik, S. Tskhai and Ya.E. Krasik, Recent studies on nanosecond-timescale pressurized gas discharges, *Plasma Sources Science and Technology*, **25**, 064001, 2016, doi: 10.1088/0963-0252/25/6/064001