

Оптические и кинетические характеристики импульсного разряда в гелии с парами железа при атмосферном давлении

© В.С. Курбанисмаилов,¹ С.А. Майоров,^{2,3,4} О.А. Омаров,¹ Г.Б. Рагимханов^{1,¶}

¹ Дагестанский государственный университет,
367000 Махачкала, Россия

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
119991 Москва, Россия

³ Объединенный институт высоких температур РАН,
125412 Москва, Россия

⁴ Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики КазНУ им. аль-Фараби,
050040 Алматы, Казахстан

¶ e-mail: gb-r@mail.ru

(Поступило в Редакцию 26 июня 2018 г.)

При исследовании импульсного разряда в гелии атмосферного давления в спектре излучения прикатодной плазмы обнаружены линии паров материала электродов. Путем численного моделирования кинетики электронов методом Монте-Карло показано, что добавки атомов железа в гелий, начиная с долей процента, сильно влияют на ионизационно-дрейфовые характеристики электронов в газе.

DOI: 10.21883/JTF.2019.03.47173.251-18

Известно, что переходу от объемной формы горения к искровому каналу предшествует либо взрыв микроострий катодной поверхности, либо происходит инициирование эмиссионного центра при пробое диэлектрических включений [1]. Следовательно, в исходный газ может попадать некоторое количество атомов материала, из которого изготовлены электроды [2,3]. Хорошо известно [4,5], что добавление в инертный газ с большим потенциалом ионизации даже небольшого количества легко ионизируемого газа (например, аргон в гелий [4] или криптон в гелий [6]) может радикально менять кинетические характеристики разряда. При этом решающую роль играют два фактора: 1 — легко ионизируемые добавки приводят к изменению зарядового состава; 2 — ионы примеси при движении в несобственном газе не испытывают столкновений с резонансной перезарядкой, поэтому их функция распределения радикально отличается от случая, когда ионы дрейфуют в родительском газе [7].

Поэтому экспериментальное исследование спектрального состава излучения приэлектродной плазмы в Не атмосферного давления в режиме распыления материала катода представляет практический интерес. Изучению влияния малых концентраций паров материала электродов на кинетические характеристики разряда посвящена настоящая работа

Экспериментальная установка описана в работах [8,9]. Разряд создавался между электродами из нержавеющей стали (катод — сплошной, анод — сетчатый) диаметром 4 см, удаленными друг от друга на расстояние $d = 1$ см. Генератор импульсных напряжений (ГИН) давал импульсы напряжения с амплитудой до 30 кВ и фронтом нарастания ~ 10 ns. Источник УФ излучения вспомогательного разряда создавал в гелии начальную концентрацию электронов $n_e \approx 108 \text{ см}^{-3}$. Покадровая

съемка разряда осуществлялась с помощью электронно-оптического преобразователя (ФЭР-2) и позволяла проследить развития свечения, начиная с концентрации заряженных частиц $\sim 10\text{--}12 \text{ см}^{-3}$. Интегральные картины свечения промежутка снимались с помощью цифровой камеры с высоким пространственным разрешением. Для выявления наиболее ярких спектральных линий, возбуждаемых в разряде, регистрировался панорамный спектр с помощью монохроматора-спектрографа MS-3504i.

В настоящей работе исследовались закономерности формирования спектра оптического излучения объемного разряда в гелии при различных энерговкладах в разряд (в режиме однородного горения, разряд с катодными пятнами и привязанными к ним диффузными каналами, контрагированный разряд).

На рис. 1 приведен панорамный спектр разряда в области длин волн 300–800 nm, полученный при напряжении $U_0 = 12$ kV. Видно, что в спектре разряда наряду с линиями испускания гелия имеются интенсивные линии железа.

С увеличением энерговклада растет интенсивность спектральных линий, и появляются новые линии гелия и железа. Наблюдения показывают, что спектр линий железа появляется и при малых энерговкладах, когда разрядный промежуток представляет собой столб однородной плазмы. Это означает, что линии паров материала электродов появляются не только из-за взрывных процессов на катоде, но и из-за эрозии (распыления) катода за счет ионной бомбардировки. Следует отметить, что ранее в работе [10] исследован источник излучения на парах электродов из различных металлов, в том числе демонстрируется излучение линий железа в импульсно-периодическом разряде.

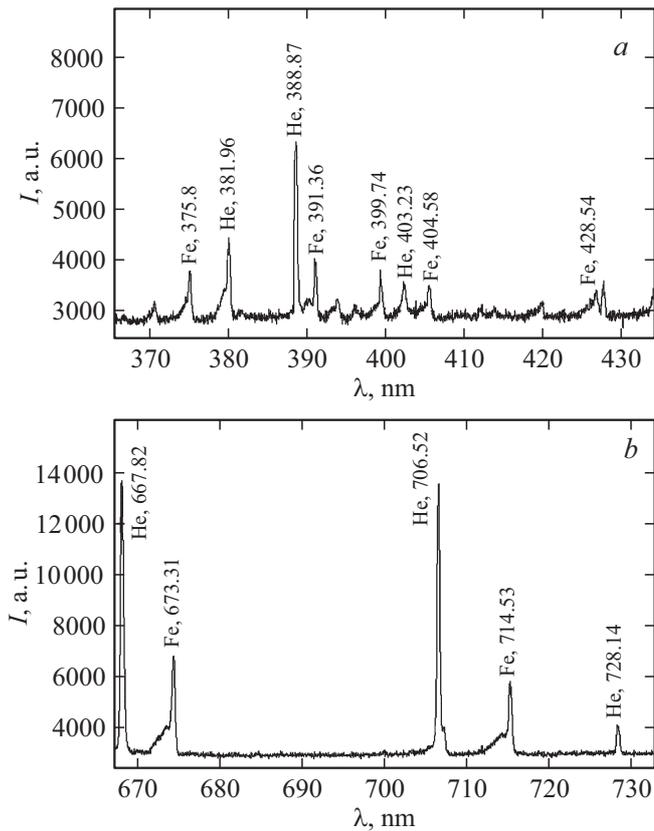


Рис. 1. Панорамный спектр разряда в гелии: $U_0 = 12$ кВ, $p = 0.1$ МПа.

Вычислительный эксперимент основан на рассмотрении ансамбля невзаимодействующих между собой электронов, движение которых определяется заданными полями и мгновенными столкновениями с атомами. Модель столкновений [7] использует процедуру генерации случайных чисел (метод Монте-Карло).

Розыгрыш электрон-атомных столкновений методом Монте-Карло позволяет учитывать энергобаланс электронов на основе элементарных актов, в том числе и неупругих. При розыгрыше столкновений учитывались известные зависимости сечений столкновений от энергии [11–13].

В настоящей работе рассчитывались значения скорости дрейфа, средней энергии электронов, характеристической энергии и ионизационного коэффициента Таунсенда с учетом примесей материала катода.

На рис. 2, *a* приведены зависимости скорости дрейфа электронов от приведенной напряженности электрического поля E/N в чистом гелии и в чистом паре железа, а также дрейф в гелии с добавкой 1, 10 и 50% атомов железа (от общего количества атомов). Графики зависимостей скорости дрейфа показывают, что при добавлении в гелий паров железа вплоть до 10% концентрации их атомов не приводит к заметному изменению скорости дрейфа, поскольку скорость дрейфа электронов при малых концентрациях железа определяется упругими

столкновениями электронов с атомами гелия. В отличие от случая, когда в аргон добавляются пары ртути [14], добавление малых примесей железа в гелий не приводит к увеличению скорости дрейфа электронов, поскольку у гелия отсутствует эффект Рамзауэра.

На рис. 2, *b* представлены зависимости приведенного ионизационного коэффициента Таунсенда ($\eta = \alpha/N$, который определяется как отношение числа пар, рожденных на 1 см, к числовой плотности атомов) от E/N . Результаты для ионизационного коэффициента Таунсенда рассчитаны в чистом гелии, в парах железа, а также с 0.1, 1, 2, 5, 10 и 50% содержанием атомов железа в гелии. Эти графики показывают, что даже 0.1% концентрации атомов железа при $4 \text{ Td} < E/N < 60 \text{ Td}$ полностью меняет зарядовый состав и значительно понижает порог поля, при котором начинается значительная ионизация атомов газа.

В эксперименте обычно косвенным образом измеряется характеристическая энергия Таунсенда, которая определяется отношением коэффициента поперечной диффузии к подвижности eD_{\perp}/μ от E/N , которая равна температуре только в случае распределения Максвелла,

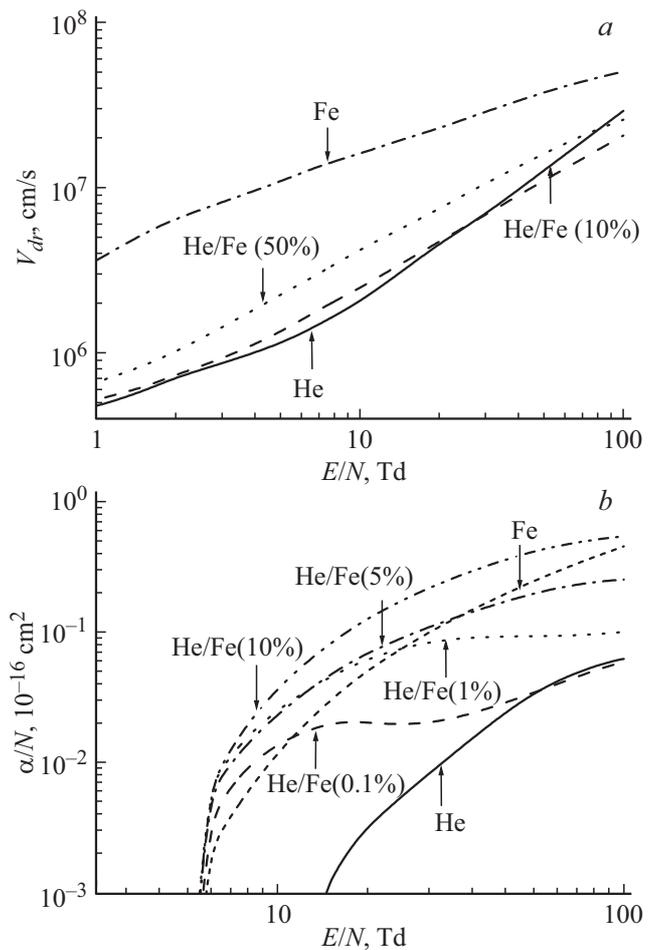


Рис. 2. Зависимости скорости дрейфа электронов (*a*) и приведенного ионизационного коэффициента Таунсенда α/N (*b*) от E/N .

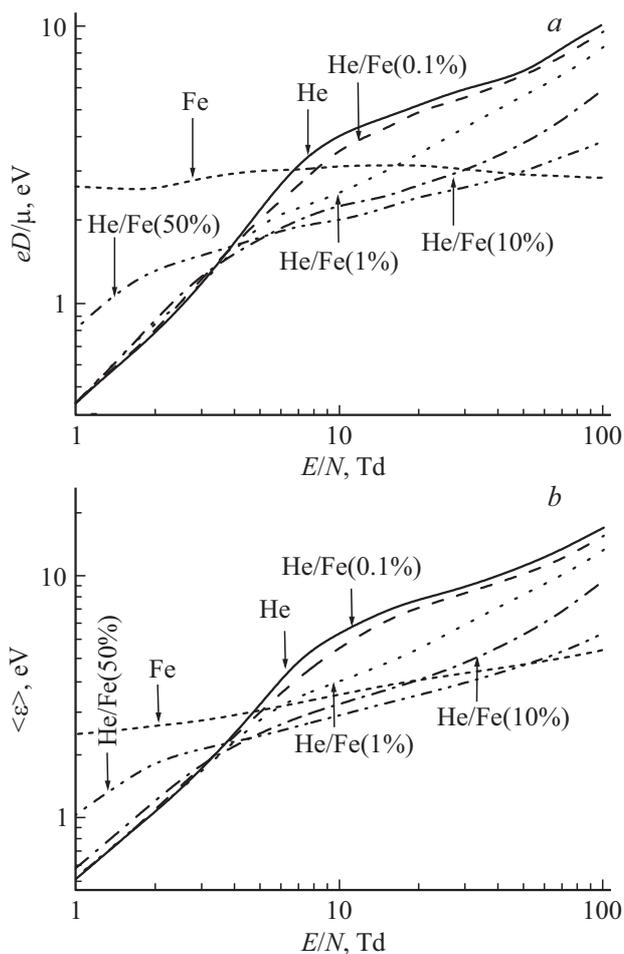


Рис. 3. Зависимости характеристической энергии Таунсенда eD_{\perp}/μ (a) и средней энергии (b) электронов от E/N .

а в реальности характеристическая энергия Таунсенда может значительно отличаться от двух третей средней энергии электронов.

На рис. 3,а приведены зависимости характеристической энергии Таунсенда, а на рис. 3,б зависимости средней энергии электронов от приведенной напряженности электрического поля E/N в чистом гелии, в парах железа и с 0,1, 1, 2, 5, 10 и 50% содержанием атомов примесей железа в гелии. Здесь обозначения аналогичны предыдущему рисунку. Приведенные на рис. 3 графики позволяют оценить разницу между температурой и характеристической энергией Таунсенда, а их анализ сделать следующие выводы:

1) небольшие добавки паров железа в гелий оказывают сильное влияние не только на зарядовый состав плазмы, но и на функцию распределения электронов по энергии и ее средние характеристики;

2) имеется значительное отклонение от широко используемого соотношения Нернста–Таунсенда–Эйнштейна (часто называемого соотношением Эйнштейна) [15] между температурой и характеристической

энергией Таунсенда eD_{\perp}/μ , которая обычно и является определяемой в эксперименте величиной.

Результаты расчетов дают достаточно полную картину о механизме влияния малых добавок паров железа на характеристики газового разряда в гелии. Наиболее интересным и важным с практической точки зрения фактом является сильное увеличение частоты ионизации при незначительной (порядка долей процента) добавке паров железа. Кроме того, следует отметить, что в этом случае преимущественно будут ионизоваться атомы железа соответственно в разряде будут в основном представлены ионы железа.

Приведенные результаты расчетов позволяют проследить за влиянием процентного состава атомов железа в гелии на характеристики дрейфа электронов в постоянном и однородном электрическом поле с напряженностями в интервале от 1 до 100 Td. Следует отметить, что распыление катода имеет место практически при любых экспериментах с разрядами, и приведенные расчеты показывают, что изменение характеристик разряда при малых добавках легко ионизируемой примеси может быть использовано при поиске новых активных сред для различных плазменных технологий в микроэлектронике, обработке материалов, нанесении тонких пленок, создании источников света, плазменных панелях, медицине.

Таким образом, разряд в гелии с парами железа обладает особенностями, которые могут быть полезны при поиске новых и более эффективных источников излучения, а возможность значительно влиять на параметры разряда с помощью выбора состава смеси и ее процентного соотношения представляется чрезвычайно интересной.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 18-08-00075а.

Список литературы

- [1] Королев Ю.Д., Месяц Г.А. // Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991. 224 с.
- [2] Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Арсланбеков М.А., Абакарова Х.М., Али Р.А.А. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 3. С. 234–242.
- [3] Ломаев М.И., Белоплотов Д.В., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф. // Опт. и спектр. 2016. Т. 120. № 2. С. 179–183.
- [4] Maiorov S.A., Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Jumabekov A.N., Dosbolaev A.N. // Phys. Plasmas. 2008. Vol. 15. P. 093701.
- [5] Бохан П.А., Закревский Д.Э. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 4. С. 25–31.
- [6] Antipov S.N., Vasil'ev M.M., Maiorov S.A., Petrov O.F., Fortov V.E. // J. Experiment. Theor. Phys. 2011. Vol. 112. N 3. P. 482–493.
- [7] Майоров С.А. // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 9. С. 869–880.
- [8] Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Абакарова Х.М., Али Р.А.А. // Физика плазмы. 2016. Т. 42. № 7. С. 680–692.

- [9] Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Терешонок Д.В. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 18. С. 73–81.
- [10] Бакиит Е.Х., Тарасенко В.Ф., Шутько Ю.В., Ерофеев М.В. // Квантовая электроника. 2001. Т. 42. № 2. С. 153–156.
- [11] Мак-Даниэль И. Процессы столкновений в ионизованных газах. М.: Мир, 1967.
- [12] Смирнов Ю.М. // Квантовая электроника. 2000. Т. 30. № 11. С. 1019–1024.
- [13] Bartlett P.L., Stelbovics A.T. // Phys. Rev. A. 2002. Vol. 66. P. 012707.
- [14] Golyatina R.I., Maiorov S.A. // Plasma Phys. Reports. 2018. N 4. P. 5–10.
- [15] Хаксли Л., Кромптон Р. Диффузия и дрейф электронов в газах. М.: Мир, 1977.