

## Влияние эффекта Рамзауэра на частоту упругих столкновений в плазме индуктивного ВЧ-разряда в инертных газах

Е. А. Кралькина<sup>а</sup>, П. А. Неклюдова<sup>б</sup>, В. Б. Павлов<sup>с</sup>, К. В. Вавилин

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физической электроники. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

E-mail: <sup>а</sup>ekralkina@mail.ru, <sup>б</sup>nekludova\_pa@mail.ru, <sup>с</sup>vb\_pavlov@mail.ru

Статья поступила 16.05.2013, подписана в печать 08.10.2013.

Представлены результаты исследования механизма поглощения ВЧ-мощности плазмой индуктивного ВЧ-разряда, приведены зависимости частоты столкновений электронов с атомами инертных газов (гелий, неон, аргон, криптон) от давления в плазме индуктивного ВЧ-разряда. В диапазоне частот столкновений  $3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$  значения эквивалентного сопротивления плазмы и энерговклад в плазму определяются величинами частоты столкновений и концентрации электронов в области скин-слоя и в пределах ошибки эксперимента не зависят от рода газа. При достижении температуры электронов  $\sim 1 \text{ эВ}$  энергия основной массы электронов находится в области рамзауэровского минимума сечений упругих столкновений. Это приводит к понижению частоты упругих столкновений тяжелых инертных газов по сравнению с гелием.

**Ключевые слова:** ВЧ-разряд, индуктивный ВЧ-разряд, энергетическое распределение электронов, концентрация электронов, эффективная температура электронов, частота упругих столкновений электронов, столкновительный механизм, эффект Рамзауэра, эквивалентное сопротивление плазмы.

УДК: 537.525.99. PACS: 52.80.Pi.

### Введение

В последние годы наметился устойчивый тренд к ужесточению требований к энергетической эффективности промышленных устройств, в частности, к энергетической эффективности ВЧ-индуктивных источников плазмы. Очевидно, что фундаментальной базой работы по оптимизации энерговклада в плазму индуктивного ВЧ-разряда является детальное исследование механизмов и закономерностей поглощения ВЧ-мощности плазмой. В работах [1, 2] показано, что при давлениях, превышающих 1 мторр, определяющий вклад в поглощение мощности плазмой индуктивного ВЧ-разряда вносит столкновительный механизм. При этом одним из основных факторов, определяющих эффективность поглощения ВЧ-мощности, является частота упругих столкновений электронов с тяжелыми частицами. Настоящая работа посвящена изучению зависимости частоты столкновений электронов с атомами инертных газов от давления в плазме индуктивного ВЧ-разряда, а также проанализировано влияние величины частоты столкновений на закономерности энерговклада в инертных газах.

### 1. Экспериментальная установка и методики измерений

Схема экспериментальной вакуумной установки показана на рис. 1. Подробное описание установки представлено в работе [3].

Индуктивный ВЧ-разряд поджигался в цилиндрическом источнике плазмы из кварцевого стекла диаметром 46 см и высотой 30 см. Для организации разряда на боковой поверхности источника располагалась спиральная антенна, к которой через автоматическую систему согласования подключался ВЧ-генератор YSR-10AF с частотой 2 МГц. Диапазон изменения мощности ВЧ-генератора  $P_{\text{ген}}$ : 0–500 Вт.

С помощью диагностического комплекса оборудования, которым оснащена экспериментальная установка, проводились измерения доли ВЧ-мощности [2, 4], поглощенной плазмой, зондовая и спектральная диагностики внутренних параметров плазмы [5–8].

Для определения доли ВЧ-мощности, поглощенной плазмой, и эквивалентного сопротивления плазмы  $R_{\text{pl}}$  [1, 2, 4] проводились измерения амплитуды ВЧ-напряжения  $V$  на концах антенны между точками  $A$  и  $B$  с помощью емкостного делителя (см. рис. 1), а также тока  $I$ , текущего через антенну, с помощью пояса Роговского при отсутствии разряда и при каждом конкретном условии эксперимента [4].

Методика измерения энергетического распределения, эффективной температуры и концентрации электронов подробно описана в работе [3].

Полученные экспериментальные данные затем были использованы для расчетов частоты столкновения по формуле

$$\nu = n_a \int f_M(\epsilon) \sigma(\epsilon) \sqrt{\epsilon} d\epsilon$$

усреднением эффективных сечений упругих столкновений по измеренному энергетическому распределению электронов. Значения соответствующих сечений упругих столкновений были взяты из работ [6, 9, 10].

Измерения проводились в гелии, неоне, аргоне и криптоне в диапазоне давлений 0.1–1000 мторр.

### 2. Результаты экспериментов

На рис. 2 показаны зависимости эффективной температуры  $T_e(p)$  и концентрации  $n_e(p)$  электронов от давления для всех рассмотренных инертных газов. Можно видеть, что зависимости  $n_e(p)$  и  $T_e(p)$  немонотонны. Максимум концентрации электронов в разряде в гелии достигается при давлении 0.1 торр, с ростом атомного номера газа положение максимума смещается

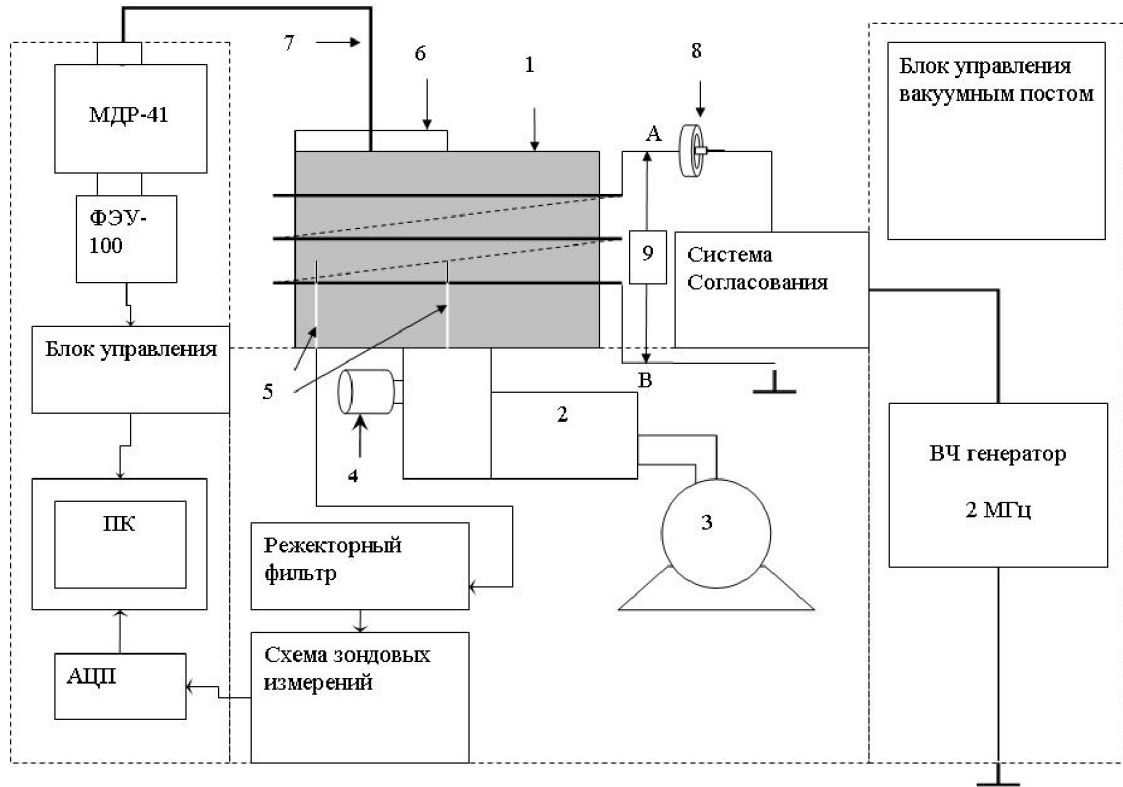


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — газоразрядная камера, 2 — турбомолекулярный насос, 3 — форвакуумный насос, 4 — широкодиапазонный датчик измерения давления, 5 — зонды Ленгмюра, 6 — линейка с отверстиями для фиксации световода, 7 — световод, 8 — пояс Роговского, 9 — емкостной делитель

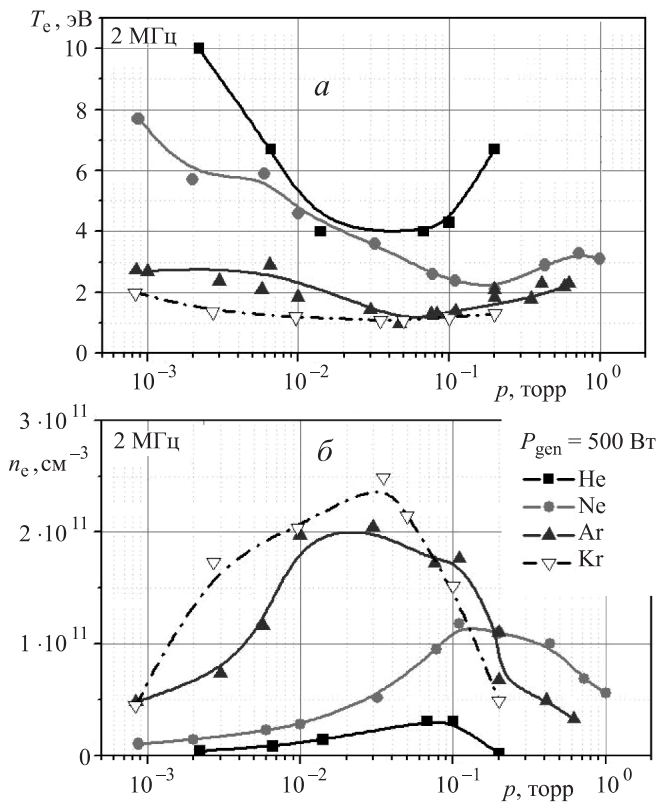


Рис. 2. Зависимости температуры  $T_e(p)$  (а) и концентрации  $n_e(p)$  (б) электронов от давления для всех рассмотренных инертных газов (гелий, неон, аргон, криптон) при мощности генератора  $P_{gen} = 500$  Вт

в область меньших давлений. Абсолютные значения концентрации максимальны в аргоне и криптоне, наименьшие значения  $n_e(p)$  характерны для гелия. Эффективная температура электронов с ростом давления инертных газов проходит через минимум. Наименьшие значения  $T_e$  характерны для криптона, наибольшие — для гелия. Обращает на себя внимание, что при давлениях более 0.1 торр эффективная температура электронов возрастает. Это может быть связано с усилением роли емкостной составляющей разряда.

На рис. 3 представлены частоты упругих столкновений, полученные на основании данных об эффективной температуре электронов  $T_e$ . Как видно, при давлениях, превышающих 0.01 торр, частоты упругих столкновений в тяжелых инертных газах ниже, чем в гелии, несмотря на то что максимальные значения частоты упругих столкновений выше в тяжелых инертных газах.

Для объяснения полученной закономерности заметим, что минимальная эффективная температура электронов  $T_e$  в криптоне достигает значения около 1 эВ. В области минимума температуры энергия основной массы электронов находится в области рамзауэровского минимума сечений упругих столкновений. Это приводит к понижению частоты упругих столкновений тяжелых инертных газов по сравнению с гелием. Таким образом, эффект Рамзауэра является причиной понижения частот упругих столкновений в тяжелых инертных газах в области давлений 0.01–0.2 торр.

Полученные значения частот упругих столкновений были использованы для интерпретации полученных

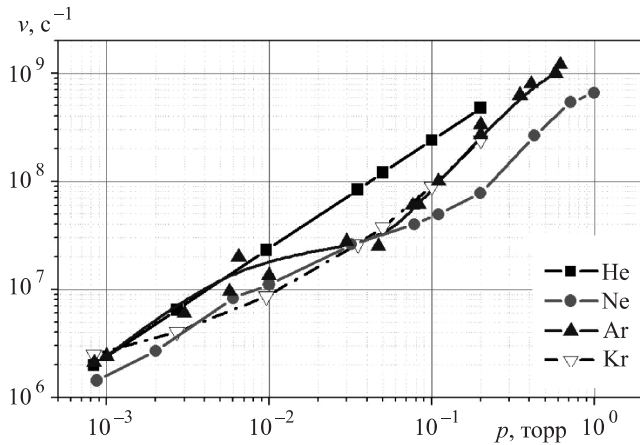


Рис. 3. Зависимость частоты упругих столкновений от давления инертных газов

закономерностей изменения эквивалентного сопротивления плазмы.

На рис. 4 представлены значения эквивалентного сопротивления плазмы  $R_{pl}$  всех рассмотренных инертных газов, соответствующие одинаковым значениям частоты упругих столкновений, в зависимости от концентрации электронов. Как видно, при условии, что частота упругих столкновений не превышает  $3 \cdot 10^7 \text{ c}^{-1}$  (рис. 4, а), значения эквивалентного сопротивления различных газов в пределах ошибки эксперимента (порядка 15%) ложатся на одну кривую.

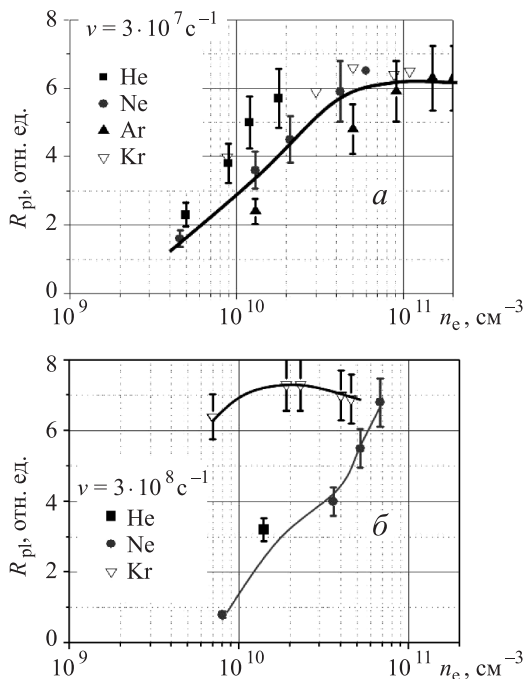


Рис. 4. Зависимость эквивалентного сопротивления плазмы всех рассмотренных инертных газов от концентрации электронов при фиксированных частотах упругих столкновений  $\nu = 3 \cdot 10^7 \text{ c}^{-1}$  (а) и  $\nu = 3 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$  (б)

В целом сначала наблюдается резкий рост  $R_{pl}$  с увеличением  $n_e$ , затем зависимость  $R_{pl}(n_e)$  насыщается. Рост частоты столкновений до величины  $3 \cdot 10^7 \text{ c}^{-1}$

приводит к увеличению абсолютной величины эквивалентного сопротивления при всех рассмотренных плотностях плазмы. Дальнейший рост частоты столкновений сопровождается смещением положения максимума эквивалентного сопротивления в область больших  $n_e$ . Полученные экспериментальные данные при малых значениях частот столкновений качественно совпадают с расчетом по модели [1].

При увеличении частоты столкновений до  $1 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$  (рис. 4, б) эквивалентное сопротивление криптона резко возрастает по сравнению с эквивалентным сопротивлением других газов, что расходится с результатами расчетов. Дополнительные эксперименты показали, что возрастание эквивалентного сопротивления плазмы типично для разряда, обладающего не только индуктивной, но и емкостной составляющей, — гибридного разряда [11, 12]. Таким образом, при давлениях криптона 0.1 торр и выше усиливается роль емкостной составляющей разряда, т.е., по сути дела, индуктивный разряд при данных условиях экспериментов становится гибридным.

### Заключение

Экспериментальные исследования индуктивного ВЧ-разряда показали, что в диапазоне частот столкновений  $3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7 \text{ c}^{-1}$ , когда основным механизмом поглощения ВЧ-мощности является столкновительный механизм, значения эквивалентного сопротивления плазмы и энергоклад определяются величинами частоты столкновений и концентрации электронов в области скин-слоя и в пределах ошибки эксперимента не зависят от рода газа. При давлениях 0.01–0.2 торр эффективная температура электронов в аргоне и криптоне достигает значений, близких к 1 эВ. В этом случае энергия основной массы электронов находится в области рамзауэровского минимума сечений упругих столкновений. Это приводит к понижению частоты упругих столкновений тяжелых инертных газов по сравнению с гелием.

При частотах столкновений, превышающих  $3 \cdot 10^7 \text{ c}^{-1}$ , емкостный канал индуктивного ВЧ-разряда при рассмотренных условиях экспериментов вносит существенный вклад в поглощение ВЧ-мощности, что приводит к понижению концентрации электронов.

Работа выполнена на оборудовании, полученном в рамках Программы развития МГУ ПНР-5, и при финансовой поддержке РФФИ (гранты 12-02-31760-мол\_а, 13-02-01089 а).

### Список литературы

1. Вавилин К.В., Рухадзе А.А., Ри М.Х., Плаксин В.Ю. // Физика плазмы. 2004. **30**, № 8. С. 739.
2. Кралькина Е.А. // Успехи физ. наук. 2008. **178**, № 5. С. 519.
3. Кралькина Е.А., Неклюдова П.А., Павлов В.Б., Вавилин К.В., Тараканов В.П. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2014. № 1. С. 79.
4. Александров А.Ф., Вавилин К.В., Кралькина Е.А. и др. // Физика плазмы. 2007. **33**, № 9. С. 802.
5. Чен. Ф. Диагностика плазмы / Под ред. Р. Хаддлстоуна, С. Леонарда. М., 1967.

6. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М., 1992.
7. Godyak V.A., Demidov V.I. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. **44**. P. 233001.
8. Шотт Л. Методы исследования плазмы / Под ред. В. Лохте-Хольтгревена. М., 1971.
9. Kieffer L.J., Dunn H.G. // Rev. Mod. Phys. 1966. **38**, N 1. P. 1.
10. Heer F.J. de, Jansen R.H., Kaay W. van der // J. Phys. B: Atom. Mol. Phys. 1979. **12**, N 6. P. 979.
11. Вавилин К.В., Гоморев М.А., Кралькина Е.А. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2012. № 1. С. 97.
12. Вавилин К.В., Гоморев М.А., Кралькина Е.А. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2012. № 1. С. 101.

### The impact of the Ramsauer effect on the frequency of elastic collisions in inductive RF discharges in inert gases

E. A. Kralkina<sup>a</sup>, P. A. Nekliudova<sup>b</sup>, V. B. Pavlov<sup>c</sup>, K. V. Vavilin

*Department of Physical Electronics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

*E-mail: <sup>a</sup>ekralkina@mail.ru, <sup>b</sup>nekludova\_pa@mail.ru, <sup>c</sup>vb\_pavlov@mail.ru.*

This paper presents the results of investigating the power absorption mechanism of an inductive RF discharge plasma. Dependences of the frequency of elastic electron collisions with inert gas atoms (helium, neon, argon, and krypton) on the pressure are given. In the frequency range of  $3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$ , an equivalent plasma resistance and the power input into the plasma are determined by the values of collision frequency and electron density within a skin layer and do not depend on the type of gas within the limits of experimental error. Upon reaching the electron temperature of  $\sim 1 \text{ eV}$ , the energy of the main part of electrons lies in the range of Ramsauer's minimum for elastic cross section. This leads to a decreasing elastic-collision frequency in heavy inert gases as compared to helium.

*Keywords:* RF discharge, inductive RF discharge, electron energy distribution, electron density, effective electron temperature, electron elastic collision frequency, collision mechanism, Ramsauer effect, equivalent plasma resistance.

PACS: 52.80.Pi.

*Received 16 May 2013.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 1(2014).

#### Сведения об авторах

1. Кралькина Елена Александровна — докт. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-47-73, e-mail: ekralkina@mail.ru.
2. Неклюдова Полина Алексеевна — аспирантка; тел.: (495) 939-47-73, e-mail: nekludova\_pa@mail.ru.
3. Павлов Владимир Борисович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-47-73, e-mail: vb\_pavlov@mail.ru.
4. Вавилин Константин Викторович — канд. физ.-мат. наук; тел.: (495) 939-47-73, e-mail: viline@inbox.ru.