

УДК 537.525.1

УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕТЕПЛОВОЙ КОНТРАКЦИИ
РАЗРЯДА В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ

А. В. ЕЛЕЦКИЙ

ИАЭ им. И. В. Курчатова

Р. В. ЧИФЛИКЯН

НИИ физики конденсированных сред ЕГУ

(Поступила в редакцию 27 февраля 1984 г.)

В качестве условия нетеплового сжатия разряда в инертных газах повышенного давления рассматривается требование, согласно которому средняя энергия электронов в разряде должна быть ниже некоторого критического значения. При выполнении этого требования имеет место резкая зависимость константы скорости возбуждения нижних резонансных уровней атомов K_v от степени ионизации плазмы N_e/N_a , приводящая, как известно, к возникновению радиальной неоднородности разряда. Критические значения приведенной напряженности электрического поля, при которых зависимость $K_v(N_e/N_a)$ становится резкой, с точностью до 10% совпадают с экспериментально наблюдаемыми значениями E/N_a , при которых разряд контрагирует.

1. Явление контракции разряда — его скачкообразного перехода из плавного радиального распределения в сжатое, резко неоднородное — хорошо известно в физике газоразрядной плазмы [1, 2]. Нетепловая контракция, подробно исследованная как в экспериментальном, так и в теоретическом отношении [3, 4], возникает при условиях, когда основным механизмом нейтрализации заряженных частиц является диссоциативная рекомбинация электронов и молекулярных ионов, а причиной резкой радиальной неоднородности константы K_v скорости возбуждения атомов электронным ударом служит сильная зависимость этого параметра от степени ионизации плазмы N_e/N_a . Последовательное решение задачи о нетепловой контракции разряда путем совместного решения уравнений для функции распределения электронов по энергиям, баланса для плотности и энергии электронов наталкивается на сложные вычислительные трудности, преодолеваемые только с помощью машинных методов [3, 4]. В настоящей работе развивается упрощенный подход к решению данной задачи, основанный на особенностях зависимости $K_v(N_e/N_a)$ в условиях сжатия разряда.

Как подробно было исследовано в предыдущей работе авторов [5], характер указанной зависимости определяется величиной отношения напряженности электрического поля E к плотности частиц газа N_a или однозначно связанной с этим параметром средней энергией электронов $\bar{\epsilon}_e$.

Действительно, резко возрастающая зависимость $K_b(N_e/N_a)$ имеет место лишь при значениях $\bar{\varepsilon}_e$, меньших некоторого критического значения $\bar{\varepsilon}_{e\text{кр}}$, определяемого типом инертного газа. Согласно расчетам [5] для Ne $\bar{\varepsilon}_{e\text{кр}} = 6,1$ эВ, для Ar $\bar{\varepsilon}_{e\text{кр}} = 5,1$ эВ. При $\bar{\varepsilon}_e > \bar{\varepsilon}_{e\text{кр}}$ величина K_b практически не зависит от N_e/N_a . В настоящей заметке в развитие предыдущей работы [5] показывается, что в качестве условия возникновения нетепловой контракции разряда инертного газа повышенного давления может рассматриваться требование $\bar{\varepsilon}_e < \bar{\varepsilon}_{e\text{кр}}$. Таким образом, задача об установлении условий контракции сводится к существенно более простой задаче определения зависимости средней энергии электронов в не-контрагированном разряде от параметров разряда.

2. Рассмотрим неконтрагированный разряд в инертном газе повышенного давления. В таком разряде основным сортом ионов являются молекулярные ионы, характерное время диссоциативной рекомбинации которых $\tau_{\text{дек}} = 1/\alpha_{\text{д.р.}} N_e$ много меньше времени амбиполярной диффузии ионов R^2/D_a на стенки разрядной трубки ($\alpha_{\text{д.р.}}$ — коэффициент диссоциативной рекомбинации, R — радиус трубки, D_a — коэффициент амбиполярной диффузии). Основным механизмом образования заряженных частиц в разряде рассматриваемого типа является ступенчатая ионизация через возбужденные состояния атомов. В этих условиях уравнение баланса для плотности электронов имеет вид [6]

$$D_a \Delta N_e + (K_b K_{\text{ст}} N_a \tau - \alpha_{\text{д.р.}}) N_e^2 = 0. \quad (1)$$

Здесь τ — эффективное время жизни возбужденного состояния атома, через которое осуществляется ступенчатая ионизация, с учетом эффекта пленения резонансного излучения, $K_{\text{ст}}$ — константа скорости ионизации данного состояния, N_a и N_e — плотности атомов и электронов.

Мы рассматриваем условия, в которых величина средней энергии электронов $\bar{\varepsilon}_e$ превышает свое «критическое» значение $\bar{\varepsilon}_{e\text{кр}}$, так что зависимость K_b от N_e практически отсутствует. Будем считать также, что радиальная неоднородность разряда, связанная с нагревом газа, также не существенна (это справедливо при токах, меньших 10^{-3} – 10^{-2} А). В этом случае все параметры в круглых скобках выражения (1) можно считать постоянными по радиусу трубки. В самом деле, параметр $d \ln \nu_{\text{ион}} / d \ln r$, определяемый неоднородным разогревом газа в аргоне, согласно экспериментальным данным [3], в доконтрагированном режиме не превышает 0,7. Следует отметить, что этот параметр в условиях аналогичных экспериментов [7], проводимых в условиях отсутствия нагрева газа, меньше 0,1, т. е. влияние температурной неоднородности на радиальную зависимость $\nu_{\text{ион}} = K_b K_{\text{ст}} N_a N_e \tau$ мало.

Обозначив выражение в круглых скобках (1) через A , используем для решения этого уравнения приближенный метод, предложенный в [6], а именно, будем искать решение (1) в виде

$$N_e(r) = N_e(0) \frac{\exp(-\delta r^2) - \exp(-\delta R^2)}{1 - \exp(-\delta R^2)} \quad (2)$$

с варьируемыми параметрами $N_e(0)$ и δ . Такая функция удовлетворяет граничным условиям

$$N_e(R) = \left. \frac{dN_e}{dr} \right|_{r=0} = 0$$

и качественно правильно передает радиальную зависимость $N_e(r)$ как в случае контрагированного ($\delta R^2 \gg 1$), так и неконтрагированного ($\delta R^2 \sim 1$) столбов разряда. Значения параметров $u = \delta R^2$ и $N_e(0)$ будем искать, подставив аппроксимацию (2) в уравнение (1) и решая это уравнение при $r = 0$, а также интегрируя уравнение по rdr от $r = 0$ до $r = R$.

Отметим, что использование данного метода решения уравнения баланса для уравнения Шоттки, которое решается аналитически, приводит к результату, практически совпадающему с точным решением [2]. Имеем

$$\frac{AN_e(0)R^2}{4D_a} = u, \quad (3)$$

$$\frac{AN_e(0)R^2}{4D_a} = \frac{\exp u (\exp u - 1)}{\frac{\exp 2u - 1}{4u} - \frac{\exp u - 1}{u} + \frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Полученная система уравнений легко сводится к одному уравнению относительно u , решение которого есть

$$u_0 = 1,75. \quad (5)$$

Соответствующее этому решению радиальное распределение плотности электронов сравнивается на рис. 1 с функцией Бесселя нулевого поряд-

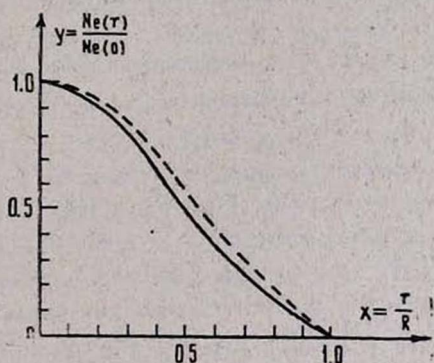


Рис. 1. Радиальное распределение плотности электронов, определяемое формулой (3) с $u = \delta R^2 = 1,75$. Пунктирная линия соответствует бesselовскому распределению.

ка. Подставив полученное решение в соотношение (3), получим связь между плотностью электронов и их средней энергией в неконтрагированном разряде:

$$\frac{4D_a u_0}{R^2} = (K_n K_{ct} N_a \tau - \alpha_{л.р.}) N_e(0). \quad (6)$$

Воспользуемся соотношениями (2), (6) для вычисления вольт-амперной характеристики (ВАХ) неконтрагированного разряда:

$$J = \int_0^R e w_{др.} N_e 2\pi r dr = \frac{4\pi e w_{д.р.} D_a}{K_b K_{ст.} N_a \tau - \alpha_{д.р.}} \left(1 - \frac{u}{\exp u - 1}\right). \quad (7)$$

Следует отметить, что знаменатель выражения перед скобками всегда положителен. На рис. 2 представлены ВАХ разряда в неоне и аргоне ($P = 100$ мм рт. ст.), вычисленные на основе соотношения (7). Необходимые

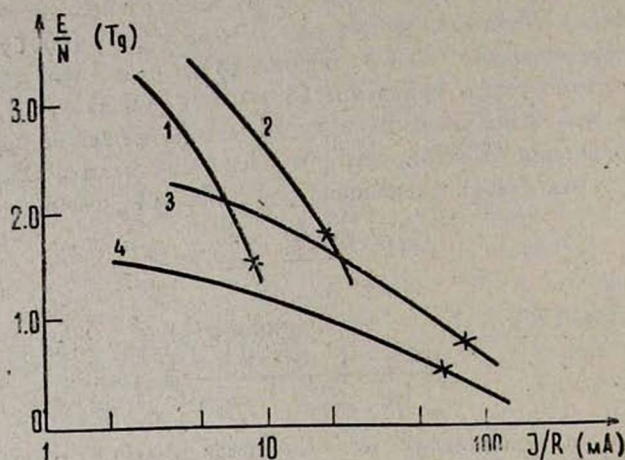


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики в неоне и аргоне ($P = 100$ Торр, $R = 1$ см): 1—аргон, эксперимент [3]; 2—аргон, наш расчет; 3—неон, наш расчет; 4—неон, эксперимент [3]. Крестиками отмечены моменты начала контракции.

для расчетов зависимости $w_{др.}$, D_a и $\alpha_{д.р.}$ от E/N_a брались из [8], а характерные значения $K_{ст.}$, τ и зависимости K_b от E/N_a и N_e/N_a — из [4, 5].

Область изменения E/N_a , в которой применимо выражение (7), ограничено условием $\bar{\varepsilon}_e > \bar{\varepsilon}_{e\text{кр}}$. При $\bar{\varepsilon}_e < \bar{\varepsilon}_{e\text{кр}}$, что соответствует $E/N_a < 1,1 Tg(\bar{\varepsilon}_{e\text{кр}} = 6,1 \text{ эВ})$ для Ne и $E/N_a < 1,8 Tg(\bar{\varepsilon}_{e\text{кр}} = 5,1 \text{ эВ})$ для Ar , возникает резкая зависимость $K_b(N_e/N_a)$ и выражение (7) становится неприемлемым. При этом ВАХ терпит излом, а разряд переходит в контрагированное состояние. Полученные нами значения отношения E/N_a , при которых разряд переходит в контрагированное состояние, близки к экспериментально наблюдаемым значениям [3]: $E/N_a = 0,9 Tg(\bar{\varepsilon}_{e\text{кр}} = 5,9 \text{ эВ})$ для Ne и $E/N_a = 1,6 Tg(\bar{\varepsilon}_{e\text{кр}} = 4,8 \text{ эВ})$ для Ar .

Полученные экспериментально [3] ВАХ разряда в инертных газах сравниваются на рис. 2 с результатами нашего расчета. Как видим, используемый подход к задаче об установлении условий сжатия разряда позволяет не только определить с точностью $\sim 10\%$ критическое значение напряженности электрического поля или средней энергии электронов, при которых наступает сжатие, но и получить ВАХ неконтрагированного разряда.

1. Елецкий А. В., Рахимов А. Т. В сб. «Химия плазмы» под ред. Б. М. Смирнова. М., 1977, вып. 4, с. 123.
2. Райзер Ю. П. Физика газоразрядных процессов. Изд. Наука, М., 1980.
3. Голубовский Ю. Б., Зонненбург Р. ЖТФ, 49, 295, 754 (1979).
4. Smith R. M., Prins M. Physica, 96C, 262 (1979).
5. Елецкий А. В., Чифликян Р. В. Физика плазмы, 9, 854 (1983).
6. Смирнов Б. Ж. Физика слабоионизованного газа. Изд. Наука, М., 1978.
7. Вагнер Л. С., Голубовский Ю. Б. ЖТФ, 48, 1042 (1978).
8. Dutton J. J. Chem. Phys. Ref. Data, 4, 577 (1975).

ՈՉ ԶԵՐՄԱՅԻՆ ԿՈՆՏՐԱԿՏԻԱՅԻ ԱՌԱՋԱՅՄԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐԸ
ԻՆԵՐՏ ԳԱԶԵՐԻ ՊԱՐՊՈՒՄՆԵՐՈՒՄ

Ա. Վ. ԵԼԵՏԿԻ, Ռ. Վ. ՉԻՖԼԻԿՅԱՆ

Էլեկտրոնների միջին էներգիան պարպումում ճորշ կրիտիկական արժեքից փոքր լինելու պայմանը դիտարկվում է որպես ոչ շերմային կոնտրակցիայի պայման իններո զազերում: Կառուցված է վոլտ-ամպերային բնութագիրը և էլեկտրոնների շառավղային բաշխումը ոչ կոնտրակցված ռեժիմում, զնահատված են անցման պարամետրերը:

ON THE CONDITIONS OF NONTHERMAL CONSTRICTION
INITIATION IN INERT GASES

A. V. ELETSEIJ, R. V. CHIEFLIKYAN

As a condition of nonthermal constriction in inert gases by means of pressure increase, a requirement is considered, according to which the mean energy of electrons in the discharge should be less than a certain critical value. The voltage-current characteristics of the discharge and radial distributions of electrons in the nonconstricted regime are presented and the transition parameters are estimated.