

# Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

E. E. Antonov, Yu. P. Korchevoi, V. I. Lukashenko, Распад цезиевой плазмы в присутствии молекулярного азота,  
*TVT*, 1978, Volume 16, Issue 2, 235–239

<https://www.mathnet.ru/eng/tvt8666>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.168

May 21, 2025, 02:44:58



УДК 533.92.15

РАСПАД ЦЕЗИЕВОЙ ПЛАЗМЫ В ПРИСУТСТВИИ  
МОЛЕКУЛЯРНОГО АЗОТА*Антонов Е. Е., Корчевой Ю. П., Лукашенко В. И.*

Экспериментально исследована релаксация концентрации и температуры электронов, а также заселенностей различных уровней атомов цезия в процессе распада разрядной цезиевой и азотно-цезиевой плазмы. Показано, что в режимах, где существенно радиационное девозбуждение нижних уровней, возможно возникновение инверсии на  $(n+1)s-np$ -переходах. Примесь азота замедляет распад плазмы в этих режимах и выравнивает скорости релаксации уровней разных серий, вследствие чего наблюдаемая в чисто цезиевой плазме инверсная заселенность уровней исчезает.

Теоретически возможность реализации инверсной заселенности при резком уменьшении температуры электронов в низкотемпературной плазме показана давно (см. обзор [1]), причем весьма подробно рассмотрена щелочная плазма, где инверсность может возникать на оптически разрешенных  $(n+1)s-np$ -переходах вследствие различных скоростей столкновительного девозбуждения  $s$ - и  $p$ -состояний. Предложен также метод увеличения величины инверсии  $\varphi_{hi} = n_h g_i / n_i g_h$  путем введения в плазму примеси молекулярного газа, что должно приводить к обеднению нижних уровней переходов за счет химических реакций [2]. К сожалению, результаты расчетов величины  $\varphi_{hi}$  очень критичны к выбору сечений электронных переходов между возбужденными состояниями щелочного атома, а в примесной плазме — еще и к выбору констант скоростей химических реакций. Большинство же сечений и констант неизвестны, а оценить их с удовлетворительной точностью удается не всегда.

Возможность получения инверсной заселенности уровней в распадающейся щелочной плазме подтверждена экспериментально [3], однако влияние молекулярных примесей на величину  $\varphi_{hi}$  остается неизученным. Это и обусловило постановку данной работы.

Рассматривалась распадающаяся цезиевая и азотно-цезиевая плазма, которая создавалась при прохождении импульса тока через разрядную трубку. Схема экспериментальной установки и методика определения параметров плазмы подробно описаны в работах [4, 5]. Исследовалась релаксация концентрации  $n_e$  и температуры  $T_e$  электронов, а также заселенностей  $(8-10)s$ ,  $(6-9)p$ ,  $(5-9)d$  и  $(5-6)f$  уровней  $Cs^*$ .

Заселенности  $s$ -,  $d$ - и  $f$ -состояний находились из абсолютных интенсивностей соответствующих спектральных линий. При введении поправки на реабсорбцию учитывалось сверхтонкое расщепление уровней и их уширение электронным ударом.

Заселенности  $p$ -состояний в стационарной части разряда рассчитывались из заселенностей рядом расположенных  $s$ - и  $d$ -уровней. В распадающейся плазме временной ход заселенностей  $p$ -уровней находился из интенсивностей линий главной серии с учетом возрастания степени реабсорбции их вследствие сужения  $p$ -уровней по мере уменьшения концентрации зарядов. Отметим, что этот эффект весьма существен: например, для на-

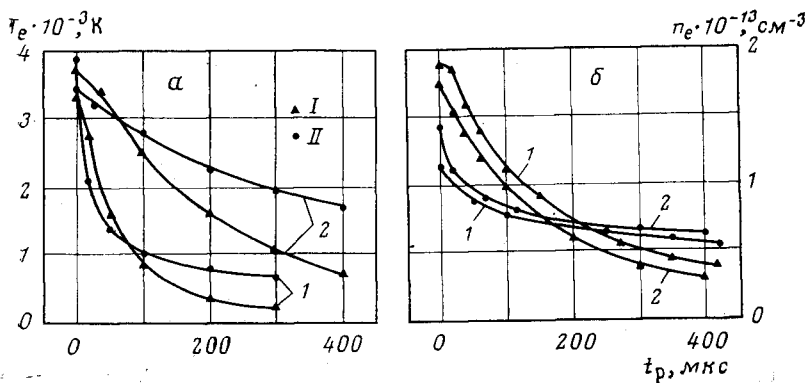
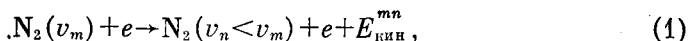


Рис. 1. Временной ход концентрации и температуры электронов в послесвечении цезиевой (кривые 1) и азотно-цезиевой плазмы (кривые 2): I —  $n_e$ , II —  $T_e$ ; а —  $P_a=0,667$  Па,  $P_m=133$  Па; б —  $P_a=6,67$  Па,  $P_m=667$  Па

чальной концентрации  $n_{e0} \sim 10^{14}$  см $^{-3}$  степень реабсорбции  $np$ — $6s$ -линий ( $n=7-9$ ) в процессе распада плазмы возрастает в несколько раз, и неучет этого может привести к кажущейся инверсии  $p$ -уровней относительно рядом расположенных  $s$ - и  $d$ -состояний.

Эксперименты проводились при  $n_{e0} = (5 \cdot 10^{12} - 5 \cdot 10^{14})$  см $^{-3}$ . Давление паров цезия  $P_a$  варьировалось в диапазоне  $(5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2})$  мм рт. ст., а максимальное давление молекулярного азота  $P_m$  составляло 15 мм рт. ст. При начальных концентрациях  $n_{e0} \gtrsim 10^{14}$  см $^{-3}$  распад плазмы близок к квазистационарному и лишь при меньших  $n_{e0}$  наблюдается различие в скоростях релаксации уровней различных серий. Поэтому все последующие эксперименты были выполнены при  $n_{e0} \lesssim (1-2) \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ . В этом диапазоне плотностей электронов влияние азота на скорость релаксации параметров плазмы при неизменном отношении  $P_m/P_a$  возрастает с уменьшением давления цезия. Это иллюстрируется рис. 1, на котором для разрядной трубки радиусом  $R=10$  мм при  $n_{e0} \approx 1,8 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$  приведены зависимости от времени после обрыва разряда  $t_p$  величин  $n_e$  и  $T_e$  при наличии азота (кривые 2) и без него (кривые 1) для двух давлений  $P_a$ : 0,667 (рис. 1, а) и 6,67 Па (рис. 1, б). Как показывают оценки, наблюдаемое значительное уменьшение скорости спада  $n_e$  и  $T_e$  при добавке  $N_2$  к цезиевой плазме низкого давления (рис. 1, а) обусловлено подогревом электронов в процессе распада плазмы при столкновениях с колебательно возбужденными молекулами азота



а также уменьшением эффективности диффузионного охлаждения электронов на стенках разрядной трубки.

При большем давлении паров цезия влияние азота на скорость релаксации  $n_e$  и  $T_e$  практически перестает ощущаться (рис. 1, б). Это может быть связано со следующими двумя обстоятельствами. С одной стороны, с ростом  $P_a$  вследствие реабсорбции излучения уменьшается скорость распада уровней  $Cs^*$ , с другой стороны, за счет соударений с атомами цезия возрастает скорость релаксации колебательных уровней азота

$$dN_2(v_m)/dt = \sum_{n=0}^{m-1} (\langle q_{mn}^e v_e \rangle n_e + \langle q_{mn}^a v_a \rangle n_a + \langle q_{mn}^m v_m \rangle n_m) N_2(v_m), \quad (2)$$

которая определяется столкновениями с электронами, атомами цезия и молекулами азота (первое, второе и третье слагаемые в (2) соответствен-

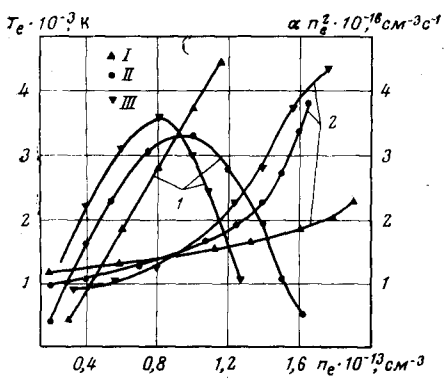


Рис. 2. Соотношение между величиной рекомбинационного потока (кривые 1), температурой электронов (кривые 2) и плотностью электронов в процессе распада цезиевой плазмы: I —  $P_a=6,67$  Па,  $R=10$  мм; II —  $0,667$  Па,  $10$  мм; III —  $0,667$  Па,  $5$  мм

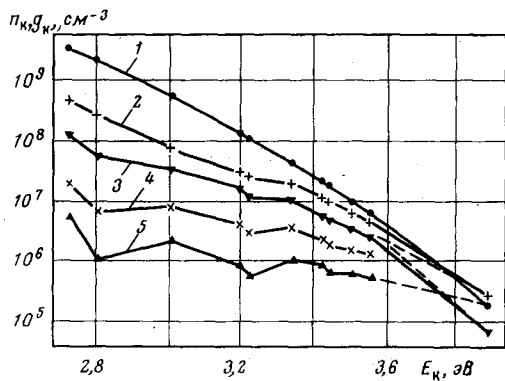


Рис. 3. Распределение атомов цезия по возбужденным состояниям для различных моментов в послесвечении чисто цезиевой плазмы,  $P_a=0,667$  Па,  $n_{e0}=1,8 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ ,  $T_{e0}=4400$  К,  $R=5$  мм: 1 —  $t_p=0$ ; 2 —  $20$  мкс; 3 —  $50$ ; 4 —  $100$ ; 5 —  $150$

но). В силу этого скорость релаксации колебательных уровней  $N_2$  сравнивается со скоростью распада уровней  $Cs^*$ , и процесс (1) по временным характеристикам оказывается неотличимым от подогрева электронов за счет ударов второго рода с атомами цезия. Скорость же распада уровней  $Cs^*$  в условиях рис. 1, б не меняется при добавке азота.

Наиболее благоприятные условия для получения инверсии (большие рекомбинационные потоки  $\alpha n_e^2$  при достаточно низких  $T_e$ , когда заселение уровней электронным ударом становится несущественным) в цезиевой плазме реализуются при малых давлениях паров цезия  $P_a$  и небольших размерах плазменного объема. Для иллюстрации этого на рис. 2 показано соотношение между температурой  $T_e$ , величиной рекомбинационного потока  $\alpha n_e^2$  и концентрацией электронов  $n_e$  для  $n_{e0}=1,8 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$  при двух давлениях  $P_a$  и двух радиусах  $R$  в процессе распада плазмы. Как видно из рис. 2, в далеком послесвечении величины потоков  $\alpha n_e^2$  при  $n_e = \text{const}$  с уменьшением  $P_a$  и  $R$  возрастают. Это связано с возрастанием скорости спада  $T_e$  вследствие более эффективного диффузионного охлаждения электронов на стенках разрядной трубки, скорость которого  $W_{\text{диф}} \sim (P_a R)^{-1}$ , а также вследствие увеличения скорости распада уровней  $Cs^*$  из-за уменьшения степени реабсорбции излучения.

В этих условиях в наибольшей степени проявляется различие в скоростях распада уровней разных серий. На рис. 3 представлено распределение атомов цезия по возбужденным состояниям для нескольких моментов времени  $t_p$  в послесвечении для одного из таких режимов. Как видно из рис. 3, скорости распада  $(n+1)s$ -уровней ( $n=7-8$ ) оказываются меньше, чем ниже расположенных  $np$ -состояний, и на оптически разрешенном переходе  $9s-8p$  наблюдается инверсия. Наибольшую скорость распада имеют  $7p$ - и  $6d$ -состояния. Этот факт объясняется тем, что для  $7p$ - и  $6d$ -уровней помимо столкновительного существенным является девозбуждение излучением. Так, радиационные времена жизни  $\tau_k^*$   $6d$ - и  $7p$ -уровней составляют  $6 \cdot 10^{-8}$  и  $1,2 \cdot 10^{-7}$  с соответственно и рассчитанная согласно [6] суммарная константа столкновительного девозбуждения этих состояний

$$\langle q_{\Sigma}^* v_e \rangle \approx 3 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}^{-1}, \text{ т. е. } \langle q_{\Sigma}^* v_e \rangle n_e \approx \sum_{6d, 7p} (\tau_k^*)^{-1} \text{ лишь при } n_e = 8 \cdot$$

$\cdot 10^{12}$  см $^{-3}$ , в то время как в условиях рис. 3 концентрация электронов  $n_e < 3 \cdot 10^{12}$  см $^{-3}$  при  $t_p > 50$  мкс.

Отметим, что чем ниже расположен уровень, тем больше скорость его релаксации. Это, по-видимому, связано с возрастанием роли излучения. Уровни, близко расположенные друг к другу, образуют своеобразные группы, в пределах которых при  $n_e \gtrsim 10^{12} \text{ см}^{-3}$  происходит интенсивное перемешивание за счет электронных ударов. Все уровни, входящие в такую группу, распадаются примерно с одинаковой скоростью независимо от серийной принадлежности, и поэтому реализовать для них инверсность в послесвечении разряда, по-видимому, невозможно. К наиболее характерным из таких групп следует отнести пары уровней  $7p+6d$ ,  $8p+7d$ , уровни  $9s+9p+8d$ , а также всю совокупность состояний с энергиями возбуждения  $E_k \gtrsim 3,5 \text{ эВ}$ .

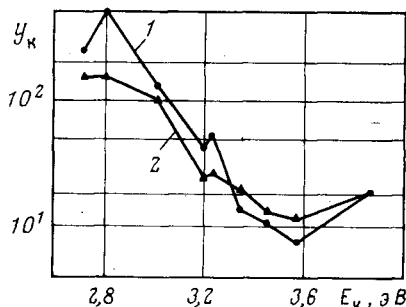


Рис. 4. Влияние  $N_2$  на распределение атомов цезия по возбужденным состояниям в распадающейся плазме;  $P_a=0,667 \text{ Па}$ ,  $R=10 \text{ мм}$ ,  $n_{e0} \approx 1,8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ; 1 —  $P_M=0$ ; 2 —  $133 \text{ Па}$

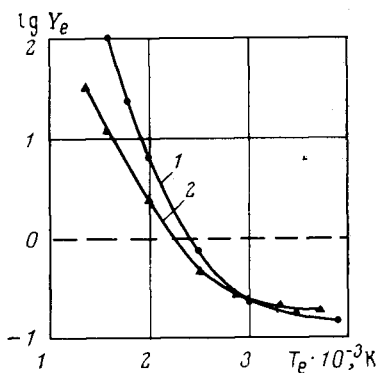
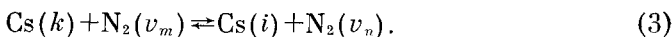


Рис. 5. Изменение величины  $Y_e = n_e/n_e \text{ Саха}$  по мере спада температуры электронов в процессе распада плазмы,  $P_a=0,667 \text{ Па}$ ,  $R=10 \text{ мм}$ ,  $n_{e0}=1,8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ; 1 —  $P_M=0$ ; 2 —  $133 \text{ Па}$

Добавка к чисто цезиевой плазме даже небольших количеств молекулярного азота заметно влияет на характер релаксации возбужденных состояний. Наиболее существенной особенностью является выравнивание скоростей распада уровней. Это иллюстрируется рис. 4, на котором показано, во сколько раз уменьшаются заселенности возбужденных состояний цезия  $y_k = n_k(0)/n_k(t_p)$  в цезиевой и в азотно-цезиевой плазме к моменту времени  $t_p$  в послесвечении, когда заселенность состояния  $k_\infty$ , непосредственно примыкающего к границе с электронным континуумом, уменьшается в 20 раз. Заселенность состояния  $k_\infty$  рассчитывалась по формуле Саха с использованием экспериментальных величин  $n_e$  и  $T_e$ . Как видно из рис. 4, различие в скоростях распада, например  $9s$ - и  $7p$ -уровней, достигающее в чисто цезиевой плазме  $\sim 40$  раз, при добавке  $N_2$  при давлении  $P_M=133 \text{ Па}$  уменьшается до  $\sim 10$  раз. Сближаются друг с другом по величине и скорости распада других уровней. Причиной такого выравнивания скоростей распада является обмен энергией между возбужденными атомами цезия и молекулами азота



Такой вывод следует из оценок скорости процесса (3) в рассматриваемых условиях на основе данных, приведенных в [7].

Подобное выравнивание скоростей распада уровней разных серий и увеличение связи между ними за счет процесса (3) приводит к исчезновению инверсности на переходе  $9s$ -,  $8p$ -, наблюдаемой в чисто цезиевой плазме и, с другой стороны, к более тесной связи между основным состоянием атомов цезия и электронным континуумом, т. е. к уменьшению степени неквазистационарности распада плазмы, характеризуемой величиной  $Y_e = n_e/n_e \text{ Саха}$  (см. рис. 5). Так, если при снижении температуры  $T_e$ .

например до 1600 К, в чисто цезиевой плазме величина  $n_e$  выше равновесной по Саха  $\sim$  в 100 раз (рис. 5, кривая 1), то в примесной при  $P_m = 133$  Па — лишь в 10 раз (кривая 2).

Как видно из рис. 4, выравнивание скоростей релаксации уровней приводит к увеличению скорости распада высоковозбужденных состояний с энергиями возбуждения  $E_k \gg 3,3$  эВ. Поскольку при реализующихся в наших экспериментах  $T_e \ll 0,4$  эВ именно здесь расположено «узкое» место для рекомбинационного потока, такое возрастание скоростей девозбуждения уровней, по-видимому, объясняет наблюдаемое экспериментально [5] увеличение коэффициента объемной рекомбинации зарядов в примесной плазме по сравнению с чисто щелочной при неизменных  $n_e$  и  $T_e$ .

Таким образом, полученные экспериментальные факты показывают, что при давлениях паров цезия  $P_a = (0,667-6,67)$  Па инверсность в распадающейся цезиевой плазме может быть реализована на  $(n+1)s - np$ -переходах в режимах, где существенно радиационное девозбуждение  $p$ -уровней. В наиболее благоприятных для возникновения инверсности условиях (малые  $P_a$  и  $R$ ) добавка азота к чисто цезиевой плазме приводит к уменьшению скорости ее распада и к выравниванию скоростей релаксации уровней разных серий. По этой причине молекулярный азот затрудняет реализацию инверсной заселенности уровней атомов цезия в распадающейся азотно-цезиевой плазме.

Институт электродинамики  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
10 V 1977

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. И. Гудзенко, Л. А. Шелепин, С. И. Яковленко. УФН, 114, № 3, 457, 1974.
2. Л. И. Гудзенко, С. И. Яковленко. ЖЭТФ, 59, № 5, 1863, 1970.
3. E. E. Antopov, Yu. P. Korchevov, V. I. Lukashenko. Contrib. papers of XI ICPIG, Prague, 1973, p. 39.
4. E. E. Антонов, Ю. П. Корчевой, В. И. Лукашенко. ТВТ, 14, № 6, 1151, 1976.
5. E. E. Антонов, В. И. Лукашенко. Препринт-126 ИЭД АН УССР, Киев, 1976; Укр. Физ. ж., 22, № 8, 1269, 1977.
6. В. А. Вайнштейн, И. И. Собельман, Е. А. Юков. Сечения возбуждения атомов и ионов электронами. «Наука», 1973.
7. А. Х. Миацканын. ТВТ, 12, № 4, 858, 1974.