

03;04;12

## Особенности функции распределения электронов в тлеющем разряде с полым катодом в смесях азота с электроотрицательными газами

© А.Г. Калужная, А.В. Рябцев, А.И. Щедрин

Институт физики НАН Украины,  
03028 Киев, Украина  
e-mail: ashched@iop.kiev.ua

(Поступило в Редакцию 2 апреля 2002 г.)

Исследуются функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) в тлеющем разряде с полым катодом в смесях азота с электроотрицательными газами. Показано, что при добавлении к азоту малой доли  $SF_6$  или  $CCl_4$  происходит существенное повышение концентрации электронов в интервале 2–6 eV, соответствующем инверсному участку на ФРЭЭ. В смеси азота с тем же количеством  $F_2$  или  $NF_3$  ФРЭЭ мало отличается от рассчитанной в чистом азоте. Вид ФРЭЭ в таких смесях существенно зависит от прилипания электронов к молекулам электроотрицательного газа.

### Введение

Возможность формирования инверсной ФРЭЭ в низкотемпературной плазме неоднократно исследовалась экспериментально и теоретически (см., например, [1–12] и ссылки, приведенные там). Среды с инверсными функциями распределения представляют значительный интерес, так как могут быть использованы для создания инверсной заселенности электронных уровней атомов и молекул примесей.

В [1–3] была теоретически представлена и экспериментально подтверждена возможность получения инверсной ФРЭЭ в области малых энергий в релаксирующей плазме тяжелых инертных газов. Необходимым условием формирования инверсии является наличие минимума Рамзауэра в сечении упругого рассеяния электронов на атомах рабочего газа. В слабоионизированной плазме инертного газа основным механизмом потерь энергии электронами в области малых энергий выступает упругое рассеяние. Поэтому электроны, первоначально распределенные равномерно, быстро покидают области интенсивного рассеяния и накапливаются вблизи минимума Рамзауэра. Возникающая при этом инверсия имеет место на временах порядка времени термализации плазмы.

Условия создания стационарной инверсной ФРЭЭ рассмотрены в [4–7]. Исследовалась смесь инертного и электроотрицательного газов, ионизируемая пучком быстрых электронов или рентгеновскими лучами. При этом генерация тепловых электронов происходит относительно однородно в широком энергетическом интервале. Инверсия ФРЭЭ обусловлена уходом из разряда низкоэнергетичных электронов в результате прилипания их к молекулам электроотрицательного газа и накоплением электронов вблизи минимума Рамзауэра.

В обоих рассмотренных случаях инверсия ФРЭЭ имеет место в области энергий 0–2 eV, что намного ниже характерных пороговых энергий электронного воз-

буждения. Поэтому подобные среды не могут быть использованы для создания инверсии заселенностей электронных уровней атомов или молекул.

Слабая инверсия ФРЭЭ вблизи 5 eV в плазме послесвечения азота была получена в [8–11]. Особенностью формирования ФРЭЭ в таких условиях является то, что нагрев электронного газа происходит благодаря столкновениям второго рода электронов с колебательно- и электронно-возбужденными молекулами. Локальный максимум ФРЭЭ, наблюдаемый на временах  $\sim 10^{-4}$  s, связан с ударами второго рода электронов с метастабильным электронным состоянием.

В [12] экспериментально и теоретически доказана возможность формирования стационарной инверсной ФРЭЭ в азоте в тлеющем разряде с полым катодом в диапазоне энергий 2–6 eV. Здесь инверсия ФРЭЭ обусловлена следующими факторами. С одной стороны, электроны с энергиями 4–7 eV не испытывают никаких неупругих взаимодействий с молекулами азота. При упругом рассеянии передача энергии молекулам идет достаточно медленно и в указанной области происходит накопление электронов. С другой стороны, в интервале 2–4 eV электроны быстро теряют энергию в ходе возбуждения колебательных уровней молекул азота и на ФРЭЭ образуется провал. Существенным условием формирования инверсии является малая величина напряженности электрического поля, что и реализуется в тлеющем разряде с полым катодом. Инверсный участок расположен в энергетическом диапазоне 2–6 eV. Однако количество электронов в этой области незначительно. Подавляющее число электронов имеет энергии, меньшие 2 eV, что снижает эффективность создания инверсной заселенности электронных уровней.

Целью настоящей работы является исследование условий повышения относительного числа электронов с энергиями, отвечающими инверсному участку ФРЭЭ. Предлагается использовать смесь азота с электроотрицательным газом. Обладая большим сечением прилипа-

ния в области малых энергий, примесный газ должен способствовать уходу низкоэнергетичных электронов из разряда, а следовательно, подъему ФРЭЭ на инверсном участке.

Был проведен численный расчет ФРЭЭ в смесях азота с такими газами, как SF<sub>6</sub>, F<sub>2</sub>, NF<sub>3</sub> и CCl<sub>4</sub>. Показано, что добавление к азоту малой доли веществ SF<sub>6</sub> или CCl<sub>4</sub> приводит к подъему ФРЭЭ на инверсном участке. В смесях азота с F<sub>2</sub> или NF<sub>3</sub> подобный эффект не наблюдается.

### Численное моделирование

Для нахождения ФРЭЭ решалось уравнение Больцмана в двучленном приближении [13]. Численный расчет проводился с учетом упругих и неупругих столкновений электронов с нейтральными частицами, электрон-электронного рассеяния, внешней ионизации газовой смеси пучком быстрых электронов. Вид уравнения и метод его решения подробно обсуждаются в [5].

Рассчитывалась ФРЭЭ в смесях азота и электроотрицательного газа, взятых в различных пропорциях при давлении ~ 0.1 Torr. Процессы взаимодействия электронов с молекулами азота, использованные при нахождении ФРЭЭ, перечислены в таблице; соответствующие сечения приведены в [14]. Сечения взаимодействия электронов с электроотрицательными газами взяты из работ [15–21].

При расчете учитывались параметры экспериментальной установки, использовавшейся в [12] для измерения ФРЭЭ в чистом азоте в тлеющем разряде с полым катодом. В таком разряде практически все приложенное напряжение падает в узком прикатодном слое. Электрическое поле в основной области разряда мало (~ 0.1 V/cm). Ионизация газа и нагрев электронов осуществляется пучком быстрых электронов с энергией 400 eV, вылетающих из прикатодного слоя. Плотность электронов, использованная в расчетах, составляет величину ~ 10<sup>10</sup> см<sup>-3</sup>, что соответствует измеренной в [12]. Для выяснения влияния напряженности электрического поля и плотности электронов на вид функции распределения были проведены расчеты ФРЭЭ в тех же смесях при значениях  $E = 1 \text{ V/cm}$  и  $n_e = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ .

1) Смесь N<sub>2</sub>:SF<sub>6</sub>. При расчете функции распределения в смеси N<sub>2</sub>:SF<sub>6</sub> использовались сечения процессов взаимодействия электронов с молекулами SF<sub>6</sub>,

Реакция	Пороговая энергия
$N_2 + e \rightarrow N_2(v) + e, v = 1 \dots 8$	1.5
$N_2 + e \rightarrow N_2(A^3\Sigma_u^+) + e$	7.63
$N_2 + e \rightarrow N_2(B^3\Pi_g) + e$	8.54
$N_2 + e \rightarrow N_2(W^3\Delta_u) + e$	9.11
$N_2 + e \rightarrow N_2(B^3\Sigma_u^-) + e$	9.83
$N_2 + e \rightarrow N_2(a^1\Pi_g) + e$	9.89
$N_2 + e \rightarrow N_2^+ + e + e$	15.6
$N_2 + e \rightarrow N + N + e$	9.76

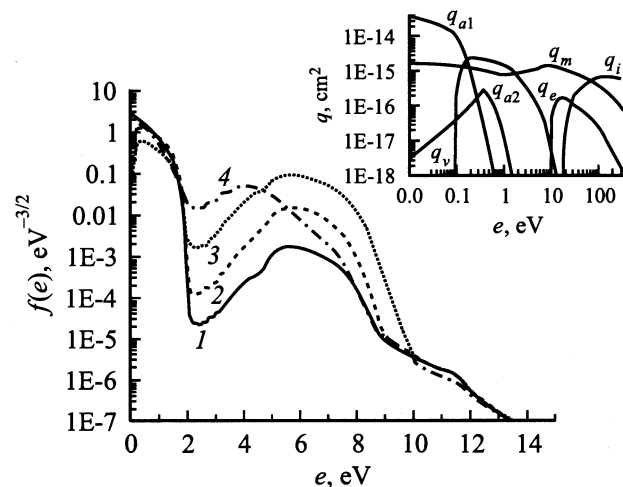


Рис. 1. ФРЭЭ в азоте и смеси N<sub>2</sub>:SF<sub>6</sub> при полном давлении  $p = 0.1 \text{ Torr}$ : 1 — N<sub>2</sub>:SF<sub>6</sub> = 1:0, 2 — N<sub>2</sub>:SF<sub>6</sub> = 1:0.01, 3 — N<sub>2</sub>:SF<sub>6</sub> = 1:0.1, 4 — N<sub>2</sub>:SF<sub>6</sub> = 1:1; вставка — сечения взаимодействия электронов с SF<sub>6</sub> [15]: q<sub>m</sub> — транспортное; q<sub>v</sub> — колебательное возбуждение; q<sub>e</sub> — электронное возбуждение; q<sub>i</sub> — ионизация; q<sub>a1</sub>, q<sub>a2</sub> — прилипание электронов с образованием SF<sub>6</sub><sup>-</sup>, SF<sub>5</sub><sup>-</sup>.

взятые из [15] (рис. 1, вставка). Как видно из рис. 1, в области малых энергий наиболее существенным является прилипание электронов.

При добавлении к азоту количества SF<sub>6</sub> (в соотношении 100:1) происходит значительный подъем инверсного участка ФРЭЭ (рис. 1). Этот эффект обусловлен интенсивным прилипанием низкоэнергетичных электронов к молекулам SF<sub>6</sub>, т.е. уходом их из разряда. В результате доля таких электронов снижается, а доля электронов в инверсной области возрастает. Таким образом, изменение ФРЭЭ отражает ее перенормировку при изменении числа низкоэнергетичных электронов.

Увеличение количества электроотрицательного газа в смеси приводит к конкуренции двух процессов. С одной стороны, прилипание в области малых энергий способствует дальнейшему повышению концентрации электронов в инверсной области. С другой стороны, возрастающее влияние колебательного возбуждения молекул SF<sub>6</sub> постепенно снижает саму инверсию: участие в этом процессе электронов с энергиями 4–7 eV препятствует их накоплению в указанном интервале, т.е. формированию пика ФРЭЭ.

Расчет показывает, что в смеси азота и SF<sub>6</sub>, взятых в соотношении 10:1, доминирующим процессом является прилипание электронов — происходит еще больший подъем ФРЭЭ в области инверсии. При концентрациях SF<sub>6</sub>, больших 0.5, роль колебательного возбуждения оказывается преобладающей и функция распределения становится практически монотонной (рис. 1).

Возбуждение электронных уровней и ионизация молекулы SF<sub>6</sub> практически не влияют на вид ФРЭЭ, так как пороговые энергии этих процессов достаточно велики

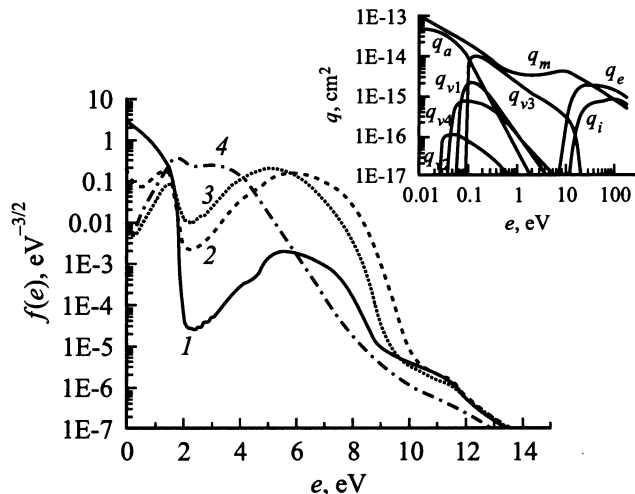
( $\sim 10$  eV). Использование при расчетах набора сечений взаимодействия электронов с SF<sub>6</sub> из [16] также не приводит к заметному изменению функции распределения.

2) Смесь N<sub>2</sub>:CCl<sub>4</sub>. Прилипание электронов к молекулам CCl<sub>4</sub> носит особенно интенсивный характер [17] (рис. 2, вставка). Поэтому исследуемый эффект проявляется в этой смеси очень ярко. Добавление малой доли CCl<sub>4</sub> к азоту сопровождается настолько значительным снижением числа низкоэнергетических электронов, что максимум ФРЭЭ на инверсном участке имеет практически ту же величину, что и максимум в области малых энергий (рис. 2).

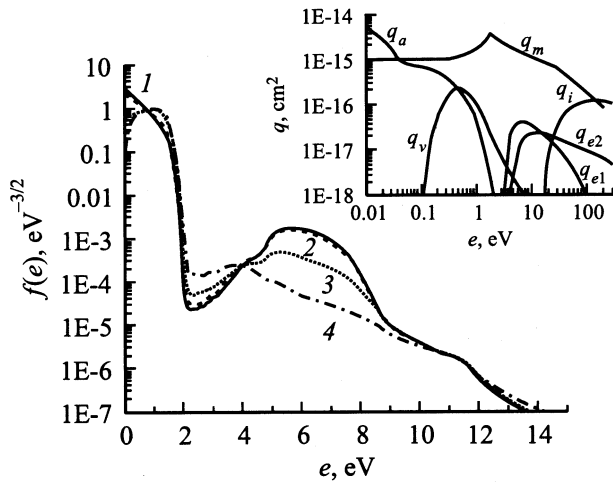
При увеличении концентрации электроотрицательно-го газа происходит сглаживание инверсного участка ФРЭЭ. Как и в рассмотренной ранее смеси, этот эффект обусловлен возрастающим влиянием колебательно-го возбуждения молекул примеси. Тем не менее в смеси N<sub>2</sub> и CCl<sub>4</sub>, взятых в соотношении 10:1, определяющим процессом является прилипание электронов: число их на инверсном участке выше, чем в области малых энергий. Дальнейшее повышение концентрации CCl<sub>4</sub> приводит к исчезновению инверсии в рассматриваемом интервале энергий (рис. 2).

3) Смесь N<sub>2</sub>:F<sub>2</sub>. Функция распределения, рассчитанная в смеси азота с малой добавкой фтора, практически не отличается от ФРЭЭ в чистом азоте (рис. 3). Таким образом, интенсивность прилипания низкоэнергетических электронов к молекулам фтора [19] недостаточно велика, чтобы заметно изменить их число. Расчет ФРЭЭ в той же смеси при завышенной величине сечения прилипания приводит к существенному подъему ее инверсного участка.

Последующее увеличение концентрации фтора в смеси нарушает инверсию ФРЭЭ. В данном случае этот



**Рис. 2.** ФРЭЭ в азоте и смеси N<sub>2</sub>:CCl<sub>4</sub> при полном давлении  $p = 0.1$  Torr: 1 — N<sub>2</sub>:CCl<sub>4</sub> = 1:0, 2 — N<sub>2</sub>:CCl<sub>4</sub> = 1:0.01, 3 — N<sub>2</sub>:CCl<sub>4</sub> = 1:0.1, 4 — N<sub>2</sub>:CCl<sub>4</sub> = 1:1; вставка — сечения взаимодействия электронов с CCl<sub>4</sub> [17,18]:  $q_m$  — транспортное;  $q_{v1}$ ,  $q_{v2}$ ,  $q_{v3}$ ,  $q_{v4}$  — колебательное возбуждение;  $q_e$  — электронное возбуждение;  $q_i$  — ионизация;  $q_a$  — прилипание.



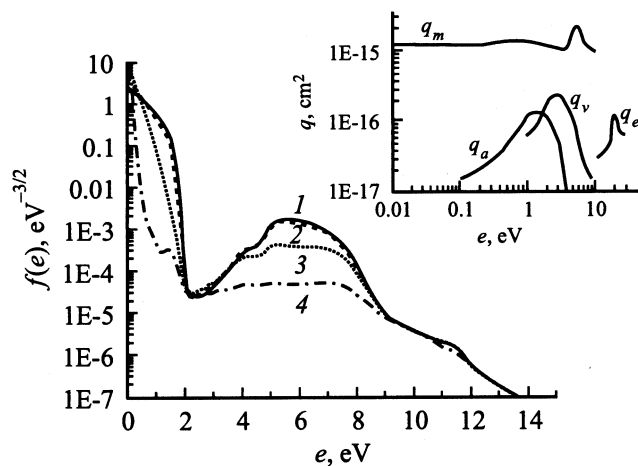
**Рис. 3.** ФРЭЭ в азоте и смеси N<sub>2</sub>:F<sub>2</sub> при полном давлении  $p = 0.1$  Torr: 1 — N<sub>2</sub>:F<sub>2</sub> = 1:0, 2 — N<sub>2</sub>:F<sub>2</sub> = 1:0.01, 3 — N<sub>2</sub>:F<sub>2</sub> = 1:0.1, 4 — N<sub>2</sub>:F<sub>2</sub> = 1:1; вставка — сечения взаимодействия электронов с F<sub>2</sub> [19]:  $q_m$  — транспортное;  $q_v$  — колебательное возбуждение;  $q_{e1}$ ,  $q_{e2}$  — электронное возбуждение уровней  $a^3\Pi_u$ ,  $A^1\Pi_u$ ;  $q_i$  — ионизация;  $q_a$  — прилипание.

эффект обусловлен прежде всего электронным возбуждением примесного газа. Фтор имеет низко расположенные уровни электронного возбуждения с порогами 3.16 и 4 eV [19] (рис. 3, вставка). Поэтому электроны с энергиями, большими пороговых, эффективно взаимодействуют с молекулами F<sub>2</sub>. Этот процесс препятствует накоплению электронов в интервале 4–7 eV и соответственно формированию пика функции распределения. Кроме того, отдавая энергию молекулам, электроны с наибольшей эффективностью перебрасываются в область 2–4 eV, соответствующую провалу ФРЭЭ в азоте. При равных количествах азота и фтора в смеси инверсный участок практически полностью исчезает (рис. 3).

4) Смесь N<sub>2</sub>:NF<sub>3</sub>. При расчете ФРЭЭ в смеси N<sub>2</sub>:NF<sub>3</sub> использовались сечения упругого рассеяния и электронного возбуждения NF<sub>3</sub> из [20] и сечения прилипания и возбуждения колебательных уровней из [21] (рис. 4, вставка).

Сечение прилипания электронов к молекулам NF<sub>3</sub> имеет относительно небольшую величину. Поэтому добавление малой доли этого газа к азоту, как и рассмотренной выше смеси, практически не меняет вида ФРЭЭ (рис. 4).

Увеличение концентрации NF<sub>3</sub> приводит к повышению роли неупругих столкновений электронов с его молекулами. Электронное возбуждение практически не сказывается на виде функции распределения, так как его пороговая энергия достаточно высока. Возбуждение колебательных уровней, напротив, оказывает существенное воздействие на ФРЭЭ. Причиной этого является низкая пороговая энергия процесса, а также достаточно большая величина кванта колебательного возбуждения NF<sub>3</sub>



**Рис. 4.** ФРЭЭ в азоте и смеси  $N_2:NF_3$  при полном давлении  $p = 0.1$  Торг: 1 —  $N_2:NF_3 = 1:0$ , 2 —  $N_2:NF_3 = 1:0.01$ , 3 —  $N_2:NF_3 = 1:0.1$ , 4 —  $N_2:NF_3 = 1:1$ ; вставка — сечения взаимодействия электронов с  $NF_3$  [20,21];  $q_m$  — транспортное;  $q_v$  — колебательное возбуждение;  $q_e$  — электронное возбуждение;  $q_i$  — ионизация;  $q_a$  — прилипание.

(1 eV по сравнению со значениями 0.1 eV, характерными для  $F_2$  и  $SF_6$ ). В результате электроны теряют энергию значительно эффективнее, чем в ранее рассмотренных смесях, и интенсивно перебрасываются в область малых энергий. Поэтому с повышением концентрации  $NF_3$  в смеси инверсия ФРЭЭ исчезает: практически все электроны имеют энергии, меньше порога колебательного возбуждения  $NF_3$  (рис. 4).

Были также проведены расчеты ФРЭЭ при завышенных значениях напряжения электрического поля и плотности электронов. Во всех смесях наблюдалась тенденция к сглаживанию инверсии ФРЭЭ. Эти эффекты отражают максвеллизирующую роль электрического поля и электрон-электронного рассеяния, что отмечалось ранее в [22].

## Выводы

Численный расчет ФРЭЭ в смесях азота с электроотрицательными газами в тлеющем разряде с полым катодом показал, что добавление к азоту  $SF_6$  или  $CCl_4$  может приводить к значительному повышению концентрации электронов на инверсном участке. Этот эффект обусловлен интенсивным прилипанием электронов с малыми энергиями к молекулам электроотрицательного газа. Изменение ФРЭЭ происходит в результате ее перенормировки при снижении числа низкоэнергетичных электронов. В смесях  $N_2:F_2$  и  $N_2:NF_3$  подъема инверсного участка не происходит: прилипание электронов к этим газам носит недостаточно интенсивный характер, чтобы заметно повлиять на функцию распределения.

При добавлении к азоту малых концентраций электроотрицательного газа изменение ФРЭЭ определяется

величиной сечения прилипания электронов к молекулам примеси. Другие неупругие взаимодействия электронов с примесным газом практически не оказывают влияния на функцию распределения. При увеличении концентрации примеси повышается роль колебательного и электронного возбуждения ее молекул. В каждой из рассмотренных смесей эти процессы приводят к сглаживанию инверсии и формированию монотонной ФРЭЭ.

Наибольший подъем ФРЭЭ в области инверсии достигается в смесях веществ  $N_2:SF_6$  и  $N_2:CCl_4$ , взятых в соотношениях 10:1.

Данная работа была поддержана Фондом фундаментальных исследований Министерства образования и науки Украины (договор № Ф7/298-2001).

## Список литературы

- [1] *Bragila G.L., Ferrari L.* // Nuovo Cimento. 1971. Vol. 4. P. 245–261.
- [2] *Warman J.M., Sowada V. and De Haas M.P.* // Phys. Rev. A. 1975. Vol. 31. P. 1974–1976.
- [3] *Рохленко А.В.* // ЖЭТФ. 1978. Т. 75. С. 1315–1319.
- [4] *Дятко Н.А., Кочетов И.В., Напартович А.П.* // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. С. 1457–1461.
- [5] *Головинский П.М., Щедрин А.И.* // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 1. С. 51–56.
- [6] *Rozenberg Z., Lando M., Rokki M.* // J. Phys. D. 1988. Vol. 21. P. 1593–1596.
- [7] *Rozenberg Z., Lando M., Rokki M.* // Phys. Rev. A. 1988. Vol. 37. P. 2569–2579.
- [8] *Горбунов Н.А., Колоколов Н.Б., Кудрявцев А.А.* ЖТФ. 1988. Т. 58. С. 1817–1819.
- [9] *Горбунов Н.А., Колоколов Н.Б., Кудрявцев А.А.* ЖТФ. 1991. Т. 61. С. 52–60.
- [10] *Dyatko N.A., Kochetov I.V., Napartovich A.P.* // J. Phys. D. 1993. Vol. 26. P. 418–423.
- [11] *Горбунов Н.А., Колоколов Н.Б., Латышев Ф.Е.* // Физика плазмы. 2001. Т. 27. С. 1143–1152.
- [12] *Баженев В.Ю., Рябцев А.В., Солошенко И.А. и др.* Физика плазмы. 2001. Т. 27. С. 859–864.
- [13] *Шкаровский И., Джонстон Т., Бачинский М.* Кинетика частиц плазмы. М.: Атомиздат, 1969. 396 с.
- [14] *Gillant C.J., Tennyson J., McLaughlin B.M. et al.* // J. Phys. B. 1996. Vol. 29. P. 1531–1547.
- [15] *Itoh H., Miura Y., Ikuta N. et al.* // J. Phys. D. 1988. Vol. 21. P. 922–930.
- [16] *Phelps A.V., Brunt R.J.* // J. Appl. Phys. 1988. Vol. 64. P. 4269–4277.
- [17] *Chutjian A., Alajajian S.H.* Ph. Rev. A. 1985. Vol. 31. P. 2885–2892.
- [18] *Pitchford L.C., McKoy B.V., Chutjian A. et al.* Electron Collision Cross Sections for Molecules Determined from Beam and Swarm Data. New York: Springer Verlag, 1987.
- [19] *Hayashi M., Nimura T.* // J. Appl. Phys. 1983. Vol. 54. P. 4879–4882.
- [20] *Rescigno T.N.* // Ph. Rev. A. 1995. Vol. 52. P. 329–333.
- [21] *Дятко Н.А., Капителли М., Лонго С. и др.* // Физика плазмы. 1998. Т. 24. С. 745–753.
- [22] *Головинский П.М., Щедрин А.И.* // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. С. 1162–1167.