

04;10;12

Генерация и транспортировка сильноточных низкоэнергетических электронных пучков в системе с газонаполненным диодом

© В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, П.М. Щанин

Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 26 июля 1996 г.)

В системе с газонаполненным диодом на основе плазменного катода проведены исследования по генерации и транспортировке сильноточного низкоэнергетического электронного пучка. При ускоряющем напряжении до 20 кВ и давлении $1-5 \cdot 10^{-1}$ Па в диоде с диаметром затянутого сеткой эмиссионного отверстия 8 см получен пучок с эмиссионным током 600 А, плотностью до 12 А/см^2 при длительности импульса $30 \mu\text{s}$. Пучок транспортируется в отсутствие внешнего магнитного поля на расстояние 20 см. За счет собственного магнитного поля пучок сжимается и на коллекторе плотность тока достигает 100 А/см^2 при диаметре пучка 3 см.

Введение

Одним из эффективных способов повышения эксплуатационных характеристик конструкционных материалов является обработка поверхности импульсными пучками заряженных частиц. Модификацию поверхности желательно осуществлять при высокой эффективности использования энергии, переносимой пучком, и равномерном распределении плотности тока по сечению пучка площадью до нескольких десятков квадратных сантиметров. Эти условия выполняются, если энергия пучка выделяется в тонком (порядка нескольких микрометров) слое при облучении с плотностью мощности $10^6-10^9 \text{ Вт/см}^2$. Энерговыведение в таком тонком слое обеспечивают сильноточные ионные импульсные пучки, используемые для исследования процесса модификации поверхности, где энергия ионов обычно составляет $100-300 \text{ кеВ}$ [1].

Сильноточные электронные пучки могут быть альтернативой ионным при импульсной термообработке, если они обеспечивают необходимую плотность мощности при энергии электронов, не превышающей $20-30 \text{ кеВ}$. Однако при низкой энергии электронов значительно затруднено получение высоких плотностей тока пучка вследствие ограничения тока в вакуумных диодах по закону "степени трех вторых", а также из-за появления при транспортировке интенсивных пучков как радиального, так и продольного провисания потенциалов, создаваемых собственным пространственным зарядом пучка. С другой стороны, в этом случае можно существенно уменьшить габариты источника и значительно упростить радиационную защиту, которая является важным фактором при разработке технологического оборудования.

Более высоким первенсом, чем вакуумные диоды, обладают газонаполненные и плазмонаполненные диоды, в которых ускорение электронов происходит в слое пространственного заряда, образующемся при определенных условиях между катодом и анодной плазмой. Так, в диоде со взрывоэмиссионным катодом и плазменным анодом [2] в микросекундном диапазоне длительностей

импульса получены плотности тока до 1 кА/см^2 . Высокой эмиссионной способностью обладают и плазменные эмиттеры с сеточной стабилизацией эмиссионной поверхности [3,4]. В квазистационарном режиме при длительности импульса $300 \mu\text{s}$ и токе 30 А достигнуты плотности тока эмиссии до 60 А/см^2 [4].

В данной работе проведены экспериментальные результаты по генерации и транспортировке квазистационарного низкоэнергетического электронного пучка в системе с плазменным катодом, обеспечивающем ток в сотни ампер.

Конструкция и принцип работы электронного источника

Конструкция электронного источника схематично представлена на рис. 1. В корпусе катодного узла 2, который одновременно является поджигающим электродом, установлены на фторопластовом изоляторе цилиндрический магниевый катод 1 диаметром 4 мм и длиной 15 мм и постоянный кольцевой магнит 3, создающий магнитное поле с индукцией 0.02 Т. Цилиндрический полый анод 5 диаметром 150 мм и длиной 160 мм имеет на торце эмиссионное окно 6 диаметром 80 мм, закрытое мелкоструктурной металлической сеткой с размером ячеек $0.1 \times 0.1 \text{ мм}$ и геометрической прозрачностью 40%. Полый анод соединен с поджигающим электродом через резистор $R = 75 \Omega$. Внутри полого анода на расстоянии 20 мм от катодного узла расположен сферический перераспределяющий электрод 4 диаметром 10 мм, находящийся под потенциалом поджигающего электрода. Электрод 4 улучшает равномерность распределения плотности эмиссионной плазмы вблизи сеточного электрода и соответственно равномерность распределения плотности эмиссионного тока, а также позволяет снизить или исключить проникновение материала катода в область формирования пучка и на обрабатываемую поверхность образцов. Ускоряющий электрод 7, выполненный в виде диафрагмы с отверстием

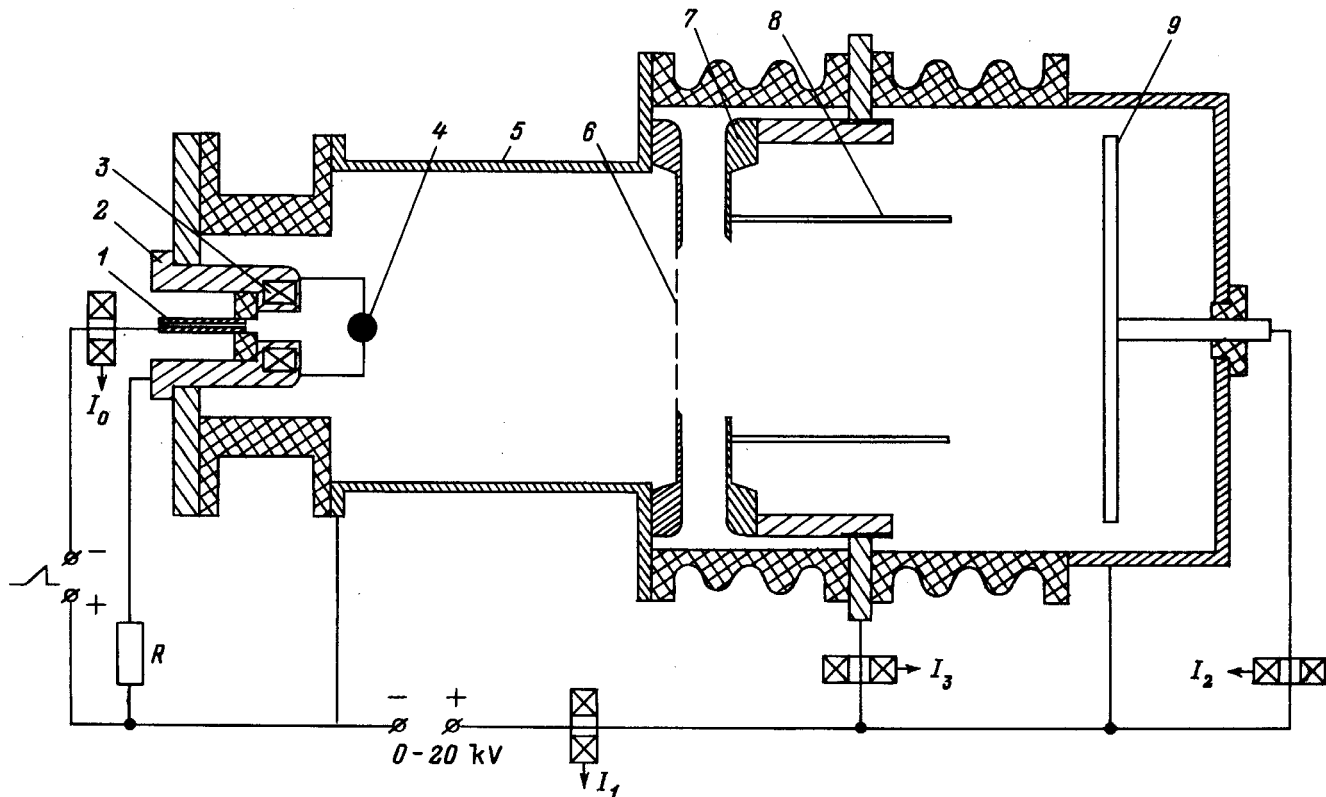


Рис. 1. Схема электронного источника.

диаметром 85 мм, расположен на расстоянии 5 мм от эмиссионного электрода и соединяется с трубой дрейфа 8 диаметром 100 мм и длиной 90 мм. Коллектор 9 установлен на расстоянии 100–600 мм от эмиссионного электрода. Напуск рабочего газа (воздух, гелий, аргон) с расходом до $30 \text{ мПа} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ осуществляется через канал в магниевом катоде. За счет напуска давление в системе регулируется в пределах от $5 \cdot 10^{-3}$ до 1 Па.

Измерение тока разряда I_0 , тока эмиссии I_1 , тока пучка на коллекторе I_2 и тока на ускоряющий электрод I_3 проводилось поясами Роговского, установленными в соответствующих цепях, с учетом влияния плазмы, образуемой электронным пучком на коллекторе [5]. Коллектор снабжался специальным охранным кольцом, препятствующим замыканию плазмой межэлектродных промежутков.

При подаче на катод регулируемого от 100 до 1000 А импульса тока длительностью $45 \mu\text{s}$, формирующегося при разрядке конденсатора на первичную обмотку импульсного трансформатора, возникает вначале разряд по поверхности изолятора между катодом и поджигающим электродом, который инициирует возникновение катодного пятна и зажигание дугового разряда между катодом и полым анодом. Плазма заполняет полый анод и извлеченные через ячейки сетки электроны поступают в ускоряющий промежуток. В рассматриваемом электронном источнике использование постоянного магнита в катодном узле и разделение катодной и анодной областей

разряда контрагирующим отверстием в поджигающем электроде позволяют значительно понизить напряжение зажигания дугового разряда за счет повышения давления в катодной области в результате перепада давления в контрагирующем канале и удлинения траектории электронов в магнитном поле.

В условиях газонаполненного диода извлеченные из катодной плазмы электроны эффективно ионизируют газ, создавая в области ускоряющего электрода и коллектора анодную плазму. Плазма приобретает потенциал, близкий к потенциалу анода [6], и между сеточным эмиссионным электродом и анодной плазмой образуется слой пространственного заряда, в котором ускоряются электроны. Первеанс плазмонаполненного промежутка превышает развеанс вакуумного вследствие компенсации отрицательного заряда ионами, поступающими из анодной плазмы. Для случая, когда ускоряющий промежуток заполнен плазмой перед подачей ускоряющего напряжения, механизм образования слоя и изменение развеанса рассмотрены в [2]. В рассматриваемом случае в отличие от [2] анодная плазма, ответственная за компенсацию пространственного заряда пучка и его формирование, создается в отсутствие внешнего магнитного поля в результате ионизации напускаемого рабочего газа электронами, извлеченными из плазменного катода на основе квазистационарного дугового разряда низкого давления, и сжатия пучка собственным магнитным полем.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены характерные осциллограммы токов эмиссии I_1 , тока в цепи коллектора I_2 и тока на ускоряющий электрод I_3 , а на рис. 3 — экспериментальные вольт-амперные характеристики газонаполненного диода при различных значениях разрядного тока (1–3) и зависимость тока от напряжения, рассчитанная по закону "степени трех вторых" для плоскопараллельного ваку-

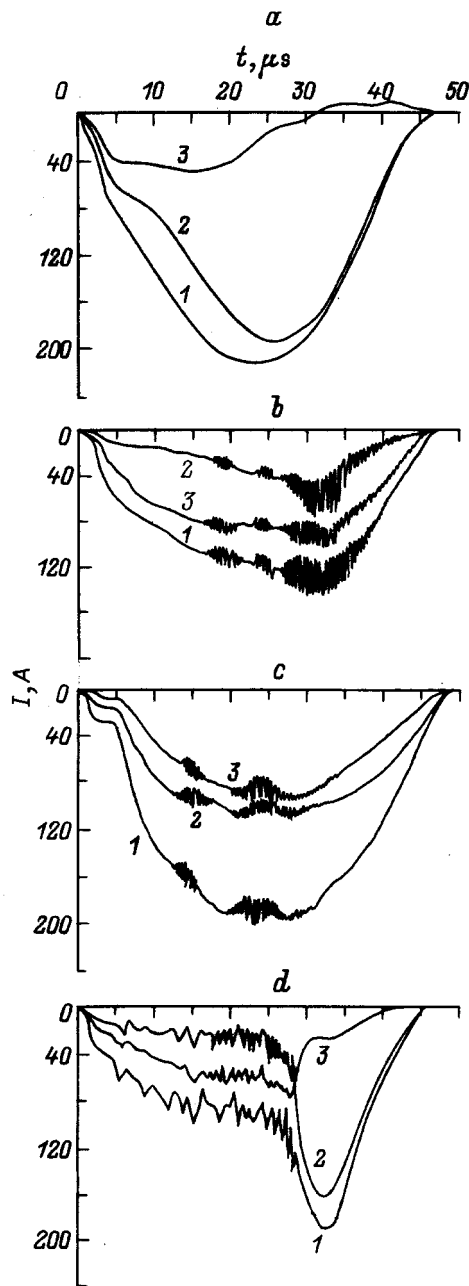


Рис. 2. Осциллограммы токов эмиссии I_1 (1), коллектора I_2 (2) и ускоряющего электрода I_3 (3) в отсутствие (a, b) и при наличии ускоряющей сетки (c). $I_0 = 300$ А; p , Па: a — $5 \cdot 10^{-1}$; b, c — $5 \cdot 10^{-2}$, d — $1 \cdot 10^{-2}$.

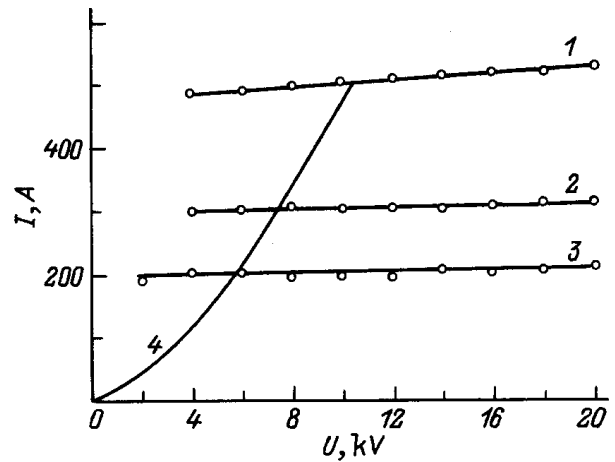


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики электронного источника. $p = 10^{-1}$ Па; I_0 , А: 1 — 600, 2 — 400, 3 — 270.

умного диода с зазором 5 мм (кривая 4). Как видно из рис. 3, диод работает в режиме насыщения, эмиссионный ток диода определяется током разряда и может значительно превышать ток вакуумного диода. Ускорение электронов происходит в слое пространственного заряда между сеткой плазменного эмиттера и подвижной границей анодной плазмы, создаваемой при ионизации газа электронами, поступающими из газоразрядной плазмы через отверстия в эмиттерном электроде. Увеличение первеанса диода при уменьшении ускоряющего напряжения происходит за счет перемещения анодной плазмы к эмиттерному электроду. Граница анодной плазмы устанавливается из условия равенства ионного тока насыщения из анодной плазмы и ионного тока в слое, определяемого из закона "степени трех вторых"

$$l \approx \sqrt{\varepsilon_0/n_e} U^{3/4} / (ekT_e)^{1/4}, \quad (1)$$

где l — ширина слоя пространственного заряда, ε_0 — диэлектрическая постоянная, U — ускоряющее напряжение, e — заряд электрона, k — постоянная Больцмана, T_e и n_e — температура и плотность электронов в плазме.

Если учесть, что, согласно [7,8], в аналогичных условиях плотность плазмы n_e , создаваемая пучком, может превышать на один–два порядка плотность электронов в пучке n_b , то при $n_b = 10^{10}$ см $^{-3}$, $T_e = 5$ –10 эВ и $n_e = 10^{11}$ см $^{-3}$ ширина слоя $l = 7$ мм, если $U = 10$ кВ, и 4 мм при $U = 5$ кВ. При давлениях выше 1 – 10^{-1} Па эффективность извлечения электронов (отношение тока эмиссии к току разряда $\alpha = I_{em}/I_0$) составляет $\alpha = 0.5$ – 0.7 и электронный пучок, входящий в трубу дрейфа, транспортируется в плазме к коллектору с малыми потерями при длине дрейфа, примерно равной 20 см (рис. 2, a). Высокая эффективность транспортировки свидетельствует о компенсации пространственного заряда пучка. Ток коллектора даже без внешнего магнитного поля значительно превышает предельный, рассчитанный

по формуле Богданкевича–Рухадзе ток для вакуумного случая

$$I_m = \frac{4\pi\epsilon_0 m_0 c^3 \left[(1 + eU/m_0 c^2)^{2/3} - 1 \right]^{3/2}}{e[1 + 2\ln(R/r)]}, \quad (2)$$

где m_0 — масса покоя электрона, c — скорость света, R и r — радиусы трубы дрейфа и пучка.

Компенсированный пучок сжимается собственным магнитным полем и диаметр пучка d , измеренный по прожигу тонких алюминиевых фольг, расположенных на различных расстояниях L от входного отверстия трубы, уменьшается в такой последовательности: $d_1 = 7$ см при $L = 2$ см, $d_2 = 5$ см при $L = 10$ см и $d_3 = 3$ см при $L = 20$ см.

На рис. 2, *a* приведены осциллограммы тока. В начале импульса в цепи трубы дрейфа протекает электронный ток, который формируется за счет ускоренных электронов, рассеиваемых на трубу, и плазменных электронов. Через некоторое время, зависящее от давления, ток падает до нуля и иногда даже меняет знак. Очевидно, можно считать, что в момент, когда ток на трубу дрейфа равен нулю, пространственный заряд пучка полностью скомпенсирован.

Определенная по осциллограммам зависимость времени τ , при котором ток в цепи трубы дрейфа становится равным нулю, от давления представлена на рис. 4. В этом случае, если в качестве рабочего газа использовался гелий, сечение ионизации которого меньше, чем азота, для компенсации пространственного заряда пучка требуется более высокое давление. Время τ_0 , за которое концентрация, создаваемая пучком в дрейфовом пространстве, сравнивается с концентрацией электронов в пучке, может быть определено из выражения

$$\tau_0 = \frac{1}{n_0 \sigma_i \sqrt{2eU/m}}, \quad (3)$$

где n_0 — концентрация нейтралов, σ_i — сечение ионизации.

В условиях эксперимента при плотности электронов пучка $n_b = 10^{10}$ см⁻³, $n_0 = 2.3 \cdot 10^{13}$ см⁻³, $U = 10$ кВ и $\sigma_i = 10^{-17}$ см², $\tau_0 = 3$ мкс. Несоответствие между расчетными и экспериментальными значениями времени компенсации можно объяснить как конечным временем нарастания электронного тока, так и тем, что уход плазменных электронов затруднен поперек собственного магнитного поля пучка и они могут покидать зону ионизации только вдоль пучка на коллектор, в то время как ионы уходят в ускоряющий промежуток и на боковую поверхность трубы дрейфа.

Характер извлечения и транспортировки пучка резко меняется (рис. 2, *b*), если давление в системе понижается. При неизменном разрядном токе уменьшаются в 1.5–2 раза токи эмиссии и коллектора, возникают значительные колебания токов и большая часть тока пучка замыкается на трубу дрейфа. Колебания связаны

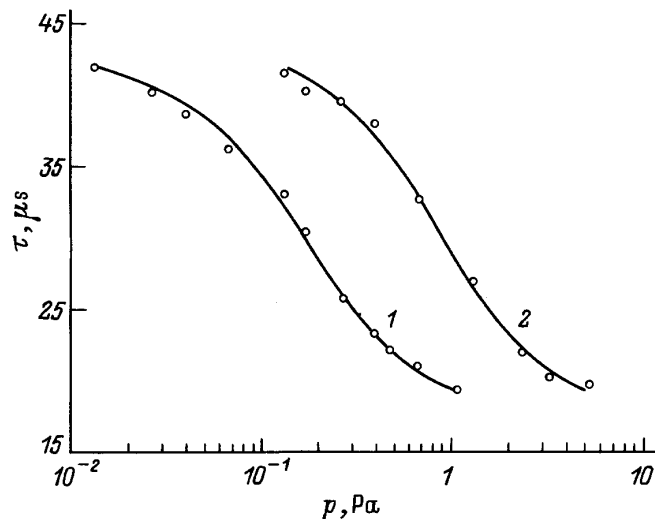


Рис. 4. Зависимость времени компенсации пространственного заряда пучка от давления рабочего газа — воздуха (1) и гелия (2). $I_0 = 600$ А, ускоряющее напряжение $U = 10$ кВ.

в основном с нестабильностью протекания тока в ускоряющем промежутке. При низком давлении в условиях роста разрядного тока и эмиссионной способности плазменного эмиттера анодная плазма из-за уменьшения частоты ионизации не обеспечивает стабильное существование слоя пространственного заряда в ускоряющем промежутке ($I_e \approx I_i(M/m)^{1/2}$). При давлении ниже $p = 10^{-2}$ Па снижается и эффективность транспортировки пучка, так как даже расчетное время компенсации пространственного заряда пучка превышает 10 мкс. Это подтверждается тем, что замена ускоряющего электрода в виде диафрагмы на сеточный с целью стабилизации границы анодной плазмы при низком давлении позволяет в ~ 1.5 раз увеличить ток эмиссии и ток коллектора и значительно уменьшить их колебания (рис. 2, *c*).

При промежуточных давлениях $1-2 \cdot 10^{-2}$ Па (рис. 2, *d*), если за время, сравнимое или меньшее длительности импульса разрядного тока, анодная плазма обеспечивала достаточное количество ионов для компенсации пространственного заряда пучка и стабильного существования слоя, то колебания эмиссионного и коллекторного токов прекращались и токи достигали значений, соответствующих измеренным при повышенных давлениях.

При уменьшении ускоряющего напряжения время компенсации в соответствии с выражением (3) уменьшается за счет увеличения сечения ионизации и момент перехода к бесколебательному режиму протекания тока сдвигается к началу импульса. Так, изменение ускоряющего напряжения от 10 до 5 кВ вызывает сдвиг момента перехода к бесколебательному режиму на 10 мкс. В условиях нашего эксперимента при давлениях свыше 10^{-1} Па мы в отличие от [6] не наблюдали развития нестабильностей и уменьшения тока в конце импульса.

Однако в экспериментах специальные исследования СВЧ излучения и диагностика плазмы не проводились.

Калориметрическими измерениями установлено, что при повышенных давлениях энергия, переносимая пучком в импульсе к коллектору, примерно на 20% меньше энергии, рассчитанной по осциллограммам напряжения на промежутке, и тока на коллектор. Высокая плотность тока, достигающая $60\text{--}100\text{ А/см}^2$, вызывает оплавление медного коллектора, расположенного на расстоянии 20 см от эмиттерного электрода. Полученный электронный пучок использовался в экспериментах по импульсной модификации поверхности металлов путем закалки из расплава.

Заключение

Проведены исследования газонаполненного диода с плазменным эмиттером на основе дуги низкого давления и осуществлена транспортировка сильнооточного электронного пучка с первеансом, значительно превышающим первеанс пучка вакуумного диода, рассчитанного для фиксированного промежутка. При давлении 10^{-1} Па вследствие относительно высокой ионизационной эффективности низкоэнергетичного пучка в пространстве дрейфа происходит компенсация его пространственного заряда. Скомпенсированный пучок сжимается собственным магнитным полем и транспортируется в трубе дрейфа в отсутствие внешнего магнитного поля на расстояние 20 см. За счет сжатия увеличивается в 6–8 раз плотность тока пучка на коллекторе, достигая $\sim 100\text{ А/см}^2$, что позволяет использовать его в экспериментах по импульсной модификации поверхности металлов путем закалки из расплава.

Список литературы

- [1] *Remnev G.E., Shulov V.A.* // *Laser and Particle Beams*. 1993. Vol. 11. N 4. P. 707–731.
- [2] *Назаров Д.С., Озур Г.Е., Проскуровский Д.И.* // *Изв. вузов. Физика*, 1994. № 3. С 100–114.
- [3] *Коваль Н.Н., Крейнделъ Ю.Е., Щанин П.М.* // *ЖТФ*. 1983. Т. 53. Вып. 9. С. 1846–1848.
- [4] *Жаринов А.В., Коваленко Ю.А., Роганов И.С., Тюрюканов П.М.* // *ЖТФ*. 1986. Т. 56. Вып. 4. С. 687–693.
- [5] *Лазаренко А.В., Чебуков Е.С., Энгелько В.И.* // *ЖТФ*. 1989. Т. 59. Вып. 7. С. 159–161.
- [6] *Власов М.А., Ельчин Ю.А., Жаринов А.В., Сафонов В.А.* // *Физика плазмы*. 1992. Т. 18. Вып. 12. С. 1617–1622.
- [7] *Аланакян Ю.Р., Штернов Н.П.* // *Физика плазмы*. 1992. Т. 18. Вып. 3 С. 355–361.
- [8] *Аланакян Ю.Р., Штернов Н.П.* // *Физика плазмы*. 1993. Т. 19. Вып. 1. С. 134–136.