

04;12

О распределении тока положительных ионов по поверхности катода в разряде с осциллирующими электронами

© Р.П. Баберцян, Э.С. Бадалян, Г.А. Егиазарян, Э.И. Тер-Геворкян, В.Н. Оганнисян

Ереванский государственный университет,
375049 Ереван, Армения

(Поступило в Редакцию 17 марта 1999 г.)

Исследован механизм процессов, обуславливающих распределение положительных ионов по поверхности катода в разряде с осциллирующими электронами. При низких давлениях $P \leq 5 \cdot 10^{-5}$ Тор во всем интервале значений изменения длины анода $l_a = 0.5-11$ см распределение плотности ионного тока по радиусу катода $J_i(r)$ имеет единственный максимум в центре с быстрым спадом по расстоянию от оси. При давлениях $P = 1-4 \cdot 10^{-4}$ Тор распределение $J_i(r)$ для коротких анодов ($l_a < 6$ см) аналогично предыдущему, однако для длинных анодов ($l_a = 6-10$ см) обнаружены новые максимумы с большими значениями J_i . Предлагается физическое объяснение полученных результатов.

Распределение заряженных частиц по поверхности катодов в разряде с осциллирующими электронами связано со структурой пространственного заряда внутри трубки и определяется расположением областей интенсивной ионизации. Актуальность исследования этого вопроса связана с многочисленными применениями разряда данного типа в вакуумных насосах, источниках заряженных частиц, при получении тонких пленок и т. д.

В [1-5] показано, что максимальная плотность ионного тока на катод достигается в его центре и при $P = 2 \cdot 10^{-5}$ Тор уже на расстоянии 0.5 мм от оси разряда плотность ионного тока уменьшается вдвое. В работах [6,7] произведено разделение токов ионов и электронов, идущих на центральную часть катода. Для первого режима горения в [8] выведена формула распределения плотности ионного тока по радиусу катода. В нашей работе [9] получено распределение плотности частиц по поверхности катода в зависимости от длины анода $d_a = 20$ мм. Данная работа является логическим продолжением [9,10] для ячейки с $d_a = 31$ мм. Измерения проводились на установке, электродная система которой показана на рис. 1, а. Внутри цилиндрического анода 1, на неподвижном катоде 2 сделаны центральное и 8 радиальных отверстий с диаметром равным 2 мм, за которыми смонтированы изолированные друг от друга плоские молибденовые диски 4 одинакового диаметра (2 мм) для выделения токов, идущих из отверстий. Подвижный катод 3 дает возможность плавно менять длину разрядного промежутка l_a от 0.5 до 11 см без нарушения вакуума.

На рис. 1, с-е представлены кривые распределения плотности ионного тока в зависимости от расстояния до центра катода $J_i(r)$ при давлении остаточного газа $P = 5 \cdot 10^{-5}$ Тор. Магнитная индукция менялась в пределах $B = 300-600$ Гс, анодное напряжение $U_a = 2-3$ кВ. Параметром является длина анодного цилиндра l_a . Одновременно снимались зависимости разрядного тока $I_p(l_a)$ (рис. 1, б) и велось наблюдение за его переменной составляющей с помощью анализатора спектров и ос-

циллографа. Видно, что во всем интервале изменения длины анода $I_p(l_a)$ имеет один-единственный максимум. Соответствующие значения плотности $J_i(r)$ также принимают максимальные значения. Форма же кривых $J_i(r)$ всюду одинакова: J_i достигает максимального значения на центральном участке катода, а с удалением от центра быстро спадает. С увеличением анодного напряжения U_a токи I_p и J_i монотонно растут. При $B = 300$ Гс изменение U_a от 2 до 3 кВ приводит к росту $J_i(0)$ почти вдвое (рис. 1, с, д). Изменение же магнитной индукции от 300 до 600 Гс, наоборот, приводит к уменьшению J_i в два раза (рис. 1, д, е). Высокочастотные колебания отсутствуют.

Анализ зависимостей перечисленных электрических характеристик разряда показывает, что полученные результаты соответствуют условиям горения разряда с однородным электронным пространственным зарядом низкой плотности. Влиянием ионов на пространственный заряд пренебрегается из-за их бесстолкновительного, быстрого ухода на катоды при низких давлениях и под действием сильного продольного электрического поля (первый режим). В этом режиме распределение электрического потенциала по радиусу r и по оси z трубки с хорошим приближением экстраполируется квадратичной функцией. Потенциал центра U_0 разрядной камеры достаточно высок, ионизация происходит при движении электронов как по r , так и по z [10]. Амплитуда радиальных колебаний ионов не превышает радиуса точки их образования r_0 , и, очевидно, они могут попасть в те точки поверхности катода, расстояния r которых от центра не превышают r_0 ($r \leq r_0$). В центральный участок катода могут попасть ионы, возникшие на любом расстоянии от оси. Однако реальное место попадания иона определяется не только координатой точки его образования, но и его траекторией. Расчеты траекторий ионов [8] показывают, что ионы падают на катоды под различными углами и энергиями и в разных количествах. В первом режиме горения разряда плотность ионного тока центральной

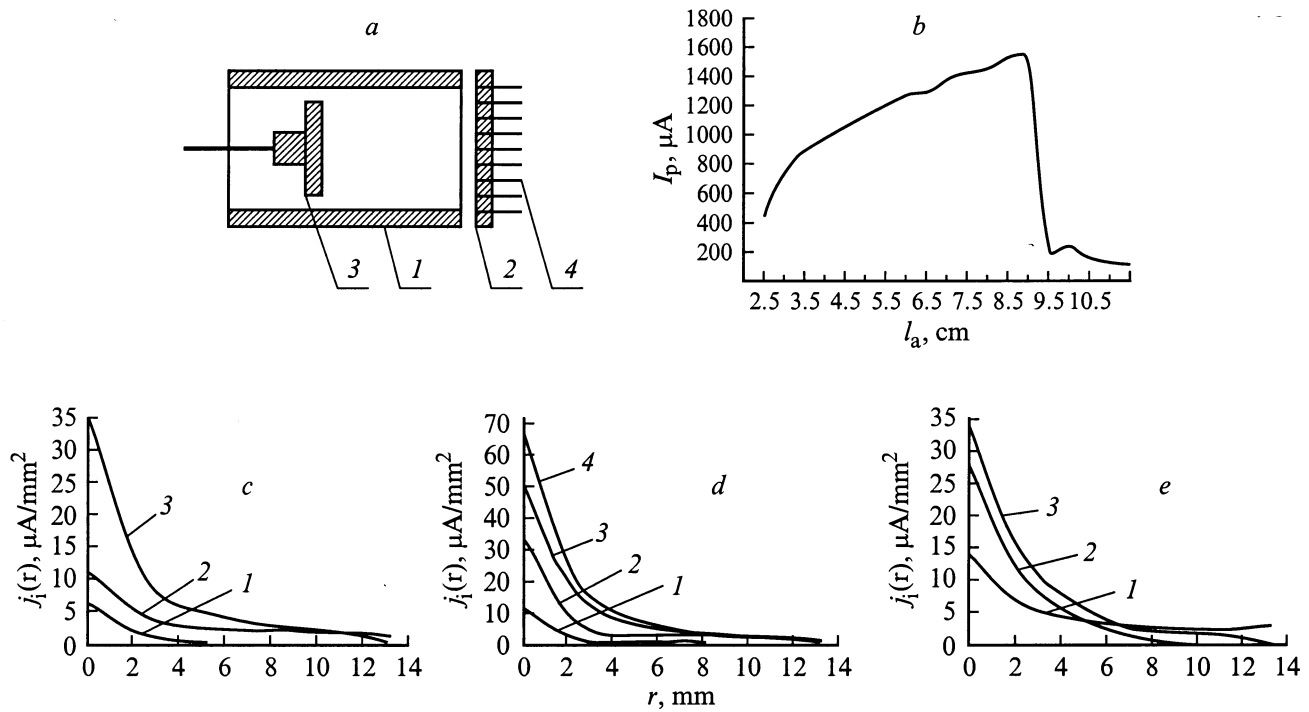


Рис. 1. Электронная система ячейки (а), зависимость разрядного тока от длины анода $I_p(l_a)$ (b), плотность ионного тока в зависимости от расстояния до центра катода (c, d, e). b — $U_a = 3$ kV, $B = 300$ Gs; c — $U_a = 2$ kV, $B = 300$ Gs; $l_a = 12$ (1), 3 (2), 8 cm (3); d — $U_a = 3$ kV, $B = 300$ Gs; $l_a = 12$ (1), 3 (2), 6 (3), 8 cm (4); e — $U_a = 3$ kV, $B = 600$ Gs; $l_a = 4$ (1), 10 (2), 6 cm (3). Давление $P = 5 \cdot 10^{-5}$ Тор.

части катода определяется выражением

$$J_i(r \leq \Delta r_k) = \frac{\nu_i n_e e}{\pi \cdot \Delta r_k^2} \cdot \Omega'_0, \quad (1)$$

где ν_i — частота ионизации; n_e — концентрация электронов, e — заряд электрона; Δr_k — радиус круга в центре катода, куда попадают осевые ионы из-за разброса их начальных скоростей; Ω'_0 — суммарный объем всех областей, из которых ионы идут в центр катода.

Рассмотрение величины и структуры Ω'_0 показывает, что основную долю ионов, идущих на центральную часть катода, составляют ионы, образованные внутри цилиндра радиуса Δr_k и длиной $l_a/2$, расположенного вдоль оси ячейки z , а также ионы, возникшие в областях (r, z), расположенных ближе к катодам (причем чем ближе область к катодам, тем больше она в размерах). Величины ν_i и n_e в данных условиях быстро растут с увеличением P и B (от U_a зависимость слабее), поэтому, согласно [1], можно утверждать, что плотность ионного тока J_i также растет с ростом давления и магнитной индукции. Максимум плотности центрального ионного тока тесно связан с интенсивной приосевой ионизацией, откуда все ионы непосредственно идут на центральный участок катода. Свою лепту вносит также и увеличение концентрации ионов n_i из-за роста их "времени жизни" вблизи оси из-за радиальных колебаний.

С ростом расстояния от центра катода уменьшается ширина области, откуда ионы могут попасть на

его данный участок. Поэтому на периферийные части катода попадает некоторая часть ионов, рожденных в небольшой прианодной области интенсивной ионизации. Здесь скорость ухода ионов больше, а концентрация n_i меньше. Соответствующая плотность ионного тока [8] выражается формулой

$$J_i(r > \Delta r_k) = \frac{4e\nu_i n_e l_a}{\pi^2} (r_a^2/r^2 - 1)^{1/2} \cdot \Omega'_0. \quad (2)$$

Кривые на рис. 1 согласуются с выражением (2). Действительно, одновременное уменьшение n_i по радиусу трубки и размеров соответствующих областей, откуда ионы попадают на данную точку поверхности катода с координатой r , приводит к существенному падению плотности ионного тока на периферии. Таким образом, для пеннинговской трубки диаметром 31 mm при давлении $P = 5 \cdot 10^{-5}$ Тор и значениях анодного напряжения и магнитной индукции, соответствующих первому режиму горения разряда, изменение длины анодного цилиндра l_a заметно отражается как на величине разрядного тока, так и на величине плотности ионного тока. Форма же $J_i(r)$ остается неизменной: для всего интервала значений $l_a = 0.5-11$ cm с максимумом в центре катода. В других же режимах распределение $J_i(r)$ коренным образом меняется.

Вышеизложенный механизм образования и распределения ионов подсказывает, что, установив локализацию отдельных пучков ионов по поверхности катода, можно

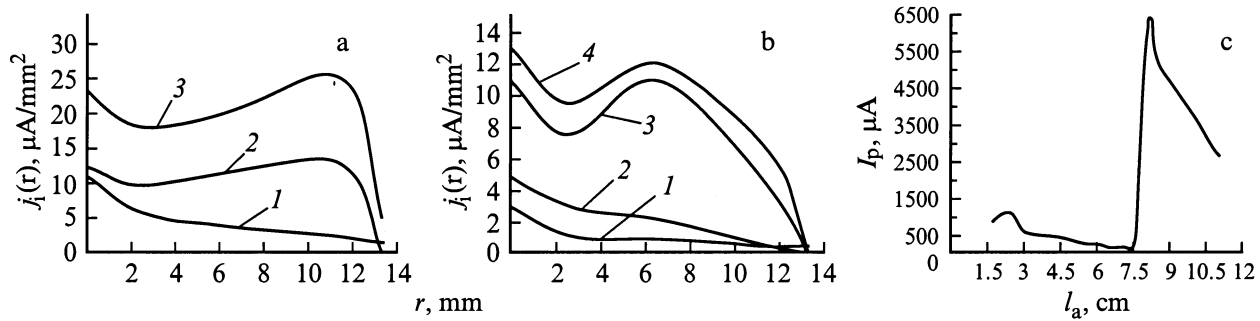


Рис. 2. Те же зависимости, что и на рис. 1, но при $U_a = 1 \text{ kV}$, $P = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Тор}$: *a* — $B = 300 \text{ Gs}$; $l_a = 4$ (1), 10 (2), 8 см (3); *b* — $B = 1200 \text{ Gs}$; $l_a = 3$ (1), 5 (2), 10.5 (3), 9.5 см (4); *c* — $B = 300 \text{ Gs}$.

ориентировочно определить области их формирования, т.е. воссоздать области интенсивной ионизации внутри анода. Наши опыты показывают, что связь эта лучше проявляется в условиях повышенного давления и длинны анодов. На рис. 2, *a, b* приведены кривые распределения плотности тока по радиусу катода $J_i(r)$ при $P = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Тор}$. Как видно, зависимость $J_i(r)$ по форме достаточно похожа на ход кривых при $P = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Тор}$, для коротких анодов ($l_a = 4 \text{ см}$, кривая 1 на рис. 2, *a*). Однако для трубок с длинными анодами распределение $J_i(r)$ существенно изменяется как по форме, так и по величине (кривые 2, 3). Плотность $J_i(r)$ резко увеличивается почти по всей поверхности катода с максимумом не только на центральном участке катода, но и на третьем диске. Заметен также некоторый спад $J_i(0)$, а на крайние участки периферии катода ионы практически не попадают: эти участки остаются нераспыленными.

Зависимости разрядного тока от длины трубки (рис. 2, *c*) показывают, что кривая 1 (рис. 2, *a*) соответствует условиям разряда, когда значения l_a находятся в интервале коротких анодов ($l_a \leq 4 \text{ см}$) до начала формирования второго максимума функции $I_p(l_a)$. Т.е. для коротких анодов как при $P = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Тор}$, так и при $P = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Тор}$ форма распределения $J_i(r)$ одинакова. Кривые же 2, 3 на рис. 2, *a* с новым распределением $J_i(r)$ соответствуют условиям второго максимума $I_p(l_a)$, т.е. условиям длинных анодов.

С увеличением давления газа и ростом частоты столкновений электронов с нейтралами растет и частота ионизации ν_1 . При этом из-за роста скорости ухода электронов на анод отношение n_e/n_i уменьшается. Тем самым увеличивается влияние ионов на пространственный заряд и соответственно меняется распределение потенциала внутри трубки $U(r, z)$. В частности, уменьшается радиальное падение $U_a - U_0$ и увеличивается продольное падение потенциала $U_0 - U_k$. Последнее обеспечивает увеличение числа вторичных электронов из-за увеличения энергии ионов, бомбардирующих поверхности катодов. Растет и энергия, набираемая приосевыми начальными электронами при их осцилляции между катодами. С другой стороны, удлинение анода также приводит к дополнительному росту $U(z)$ и уве-

личению роли прикатодных областей [10]. Продольная и радиальная ионизации, взаимно усиливая друг друга, протекают намного интенсивнее. В результате при больших P для длинных анодов резко растут разрядный ток и плотность ионного тока на катод с появлением второго максимума в $J_i(r)$. Радиальная ионизация неравномерна по радиусу трубки, вследствие чего внутри трубки формируется радиальный пояс интенсивной ионизации. Продольная же ионизация менее чувствительна к изменениям расстояния от оси трубки, поэтому на периферийные участки поверхности катода также попадает большое количество ионов (рис. 2). Как было отмечено выше, существует определенная связь между координатой образования иона и точкой его попадания на катод, поэтому можно утверждать, что именно рожденные в поясе интенсивной ионизации ионы достигают соответствующих точек поверхности катода и образуют второй максимум $J_i(r)$. Механизм формирования центрального ионного тока аналогичен вышеизложенному для условий рис. 1. Кривые, полученные при различных значениях магнитной индукции (рис. 2), показывают, что вышеизложенные закономерности сохраняются: в коротких трубках $J_i(r)$ содержит один-единственный максимум, в длинных — два максимума. Критическая длина анода, при которой происходит переход $J_i(r)$ от одной формы в другую, зависит от величины магнитной индукции B . В условиях удержания большого количества электронов (B — большое) осевой потенциал понижается и значительно уменьшаются все токи (рис. 2, *b*). Поэтому для восстановления достаточной продольной ионизации необходимо увеличение l_a (с удлинением анода относительная роль продольной ионизации растет). Однако все это проявляется и становится заметным лишь в определенных условиях длинного анода и повышенного давления, когда в результате большого усиления ионизации вдоль трубки в радиальных поясах интенсивность ионизации значительно возрастает, существенно растет концентрация ионов в них и на поверхности катодов ионы этих поясов формируют соответствующий профиль распределения плотности ионного тока.

С увеличением анодного напряжения ($U_a = 1.5; 2 \text{ kV}$) общая картина распределения $J_i(r)$ в целом не меняется,

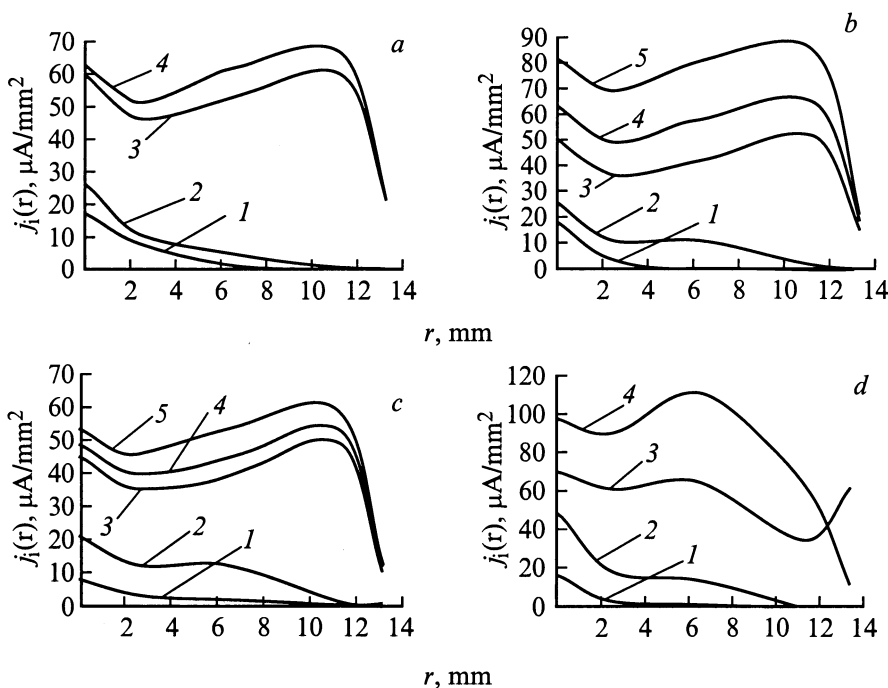


Рис. 3. Те же зависимости, что и на рис. 1, но при повышенных анодных напряжениях: *a* — $U_a = 1.5$ кВ, $B = 450$ Гс, $l_a = 6.5$ (1), 4 (2), 9.5 (3), 8 см (4); *b* — $U_a = 1.5$ кВ, $B = 750$ Гс; $l_a = 2$ (1), 4 (2), 10 (3), 8 (4), 7 см (5); *c* — $U_a = 1.5$ кВ, $B = 1050$ Гс; $l_a = 2$ (1), 5 (2), 10 (3), 9 (4), 8 см (5); *d* — $U_a = 2$ кВ, $B = 600$ Гс; $l_a = 1$ (1), 4 (2), 10 (3), 7 см (4).

абсолютные же значения токов I_a , J_i растут (рис. 3). С увеличением магнитной индукции центральный максимум плотности ионного тока $J_i(0)$ в длинных анодах ($l_a > 7$ см) постепенно уменьшается, сравнивается со вторым максимумом, затем становится заметно меньше него, т.е. плотность ионного тока на периферии катода становится больше, чем в его центре (кривые 3, 4 на рис. 3, *a*). На величине второго пика $J_i(r)$ изменение магнитной индукции отражается слабее. Это согласуется с вышеизложенным механизмом его образования. В случае $l_a = 10$ см, $B = 600$ Гс на распределении $J_i(r)$ появляется и третий максимум (рис. 3, *a*), т.е. внутри анода присутствуют три пояса интенсивной ионизации. На наличие радиальных поясов интенсивной ионизации указывают кольцевые картины распыления на катодах. Ширина этих колец и их радиус определяются соотношением между U_a , B и l_a . Меняя значения физических и геометрических параметров, можно добиться достаточно равномерного распределения плотности ионного тока по всей поверхности катода (рис. 3, *b, c*), что может играть существенную роль в получении однородных пленок различных материалов. Максимальная же плотность ионного тока достигается на втором диске при $U_a = 2$ кВ, $B = 600$ Гс, $l_a = 7$ см и равна $110 \mu\text{A}/\text{mm}^2$ (рис. 3, *d*).

Таким образом, для длинного анода ($6 \leq l_a \leq 10$ см) и при давлении $P = 2 \cdot 10^{-4}$ Тор перераспределение электрического потенциала таково, что соотношение радиальной и продольной ионизации становится оптимальным, все точки достигают максимальных значений.

При этом распределение плотности ионного тока по поверхности катода $J_i(r)$ существенно видоизменяется: формируются и побочные максимумы. В более длинных анодах ($l_a > 10$ см) оптимальное соотношение ионизаций нарушается и токи значительно падают.

Выводы

1. При низких давлениях пеннинговского разряда $P \leq 5 \cdot 10^{-5}$ Тор во всем интервале значений изменения длины анода $l_a = 0.5-11$ см и использованных в эксперименте значениях анодных напряжений и магнитной индукции распределение плотности ионного тока по радиусу катода $J_i(r)$ имеет колоколообразную форму с максимумом в центре и быстрым спадом по радиусу от оси.

2. При давлении $P = 1-4 \cdot 10^{-4}$ Тор распределение плотности ионного тока по радиусу катода аналогично предыдущему для коротких анодов ($l_a < 6$ см), однако для длинных анодов ($l_a = 6 \div 10$ см) распределение $J_i(r)$ скачком видоизменяется: в нем возникают новые максимумы с большими абсолютными значениями токов.

3. Скачкообразное изменение состояния разряда объясняется установлением оптимального соотношения радиальной и продольной ионизации. Оно наступает при определенном значении длинного анода для фиксированных U_a и B и проявляется только при повышенном давлении.

4. Возникновение побочных максимумов в распределении $J_i(r)$ связано с формированием внутри трубки радиальных поясов со значительным усилением ионизации в них. При давлениях $P < 10^{-4}$ Торг побочные максимумы ослаблены или вовсе не проявляются.

5. Выбором значений I_a , U_a , V и P можно добиться как образования узкого коллимированного ионного пучка, так и равномерного распределения плотности ионного тока по всей поверхности катода.

Список литературы

- [1] Крейндейль Ю.Е. // ЖТФ. 1963. Т. 33. Вып. 7. С. 883–885.
- [2] Крейндейль Ю.Е., Ионов А.С. // ЖТФ. 1964. Т. 34. Вып. 7. С. 1199–1207.
- [3] Крейндейль Ю.Е. // ЖТФ. 1965. Т. 35. Вып. 2. С. 315–316.
- [4] Курбатов О.К. // ЖТФ. 1966. Т. 36. Вып. 9. С. 1665–1668.
- [5] Рудницкий Е.М. // ЖТФ. 1967. Т. 37. Вып. 5. С. 927–931.
- [6] Кучеренко Е.Т., Саенко В.А. // ЖТФ. 1967. Т. 37. Вып. 1. С. 112–117.
- [7] Рейхрудель Э.М., Смирницкая Г.В., Мавлянов А.Н. // Вестник МГУ. Физика, Астрономия. 1969. Вып. 5. С. 49–56.
- [8] Смирницкая Г.В., Нгуен Хыу Ти // ЖТФ. 1969. Т. 39. Вып. 9. С. 1625–1630.
- [9] Баберцян Р.П., Егиазарян Г.А., Гарибян В.Х., Чобанян А.К. // Изв. НАН Армении. Физика. 1992. Т. 27. Вып. 2. С. 103–107.
- [10] Баберцян Р.П., Бадалян Э.С., Егиазарян Г.А., Тер-Геворкян Э.И. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 9. С. 29–32.