

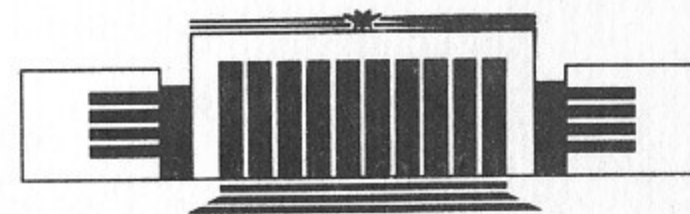
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР



С.Н. Чумаков, В.Г. Шамовский

**ДУОПЛАЗМАТРОН С ХОЛОДНЫМ
ПОЛЫМ КАТОДОМ**

ПРЕПРИНТ 91-42



НОВОСИБИРСК

С. Н. Чумаков, В. Г. Шамовский

ДУОПЛАЗМАТРОН С ХОЛОДНЫМ ПОЛЫМ КАТОДОМ

© Институт ядерной физики СО АН СССР

Интенсивное развитие ионно-лучевых технологий в промышленном производстве приборов современной микроэлектроники, машиностроении и приборостроении требует разработки современных ионно-лучевых промышленных установок работающих в широком диапазоне токов, масс и энергий заряженных частиц, обладающих высокой надежностью и большим ресурсом непрерывной работы.

Ионный источник является одним из основных элементов любой технологической ионно-лучевой установки.

От качества и надежности работы ионного источника, применяемого в ней, в существенной степени зависят все основные ее эксплуатационные характеристики. И хотя в настоящее время разработано большое количество ионных источников, различающихся по физическим принципам, положенным в основу их работы, конструкциям, выходным параметрам, в своей совокупности перекрывающих нужды ионно-лучевых технологий [1]-[6], анализ работы существующих ионно-лучевых установок показывает, что ионный источник является в них наиболее слабым звеном, в основном лимитирующим время их непрерывной работы, которое весьма существенно в технологических процессах при массовом производстве. В связи с этим, поиск конструкции ионного источника, обладающего достаточно высокой надежностью, экономичностью и большим ресурсом работы является весьма актуальной задачей.

Одним из наиболее совершенных типов ионных источников, известных в настоящее время, является дуоплазматрон. Он обладает практически рекордными эффективностью, газовой экономичностью и надежностью работы. К сожалению, использование

в обычных конструкциях накаливаемого термокатода не позволяет получить достаточно большой ресурс работы ионного источника, особенно при использовании в качестве рабочих веществ химически активных газов. Кроме того, накаливаемый термокатод требует дополнительной мощности питания для поддержания рабочей температуры катода, которая часто сравнима с мощностью потребляемой газовым разрядом в источнике.

С целью устранения этого недостатка и повышения ресурса работы ионного источника нами была разработана конструкция дуоплазматрона с холодным полым катодом, приведенная на рис. 1.

Разрядная камера дуоплазматрона состоит из медного водоохлаждаемого анода (1), в который впаяна молибденовая вставка (2) с эмиссионным отверстием (диаметр 0.8 мм), и полого медного водоохлаждаемого катода (3), прототипом которого выбрана конструкция, предложенная в [7]. Описанный здесь полый катод отличается большим ресурсом работы, высокой устойчивостью и надежностью при токах дугового разряда в диапазоне от нескольких десятков до сотен ампер. Этот диапазон токов, естественно, неприемлем для ионного источника работающего в непрерывном режиме. Для преодоления этого недостатка во внутреннюю образующую поверхность полого катода была впаяна втулка (4), выполненная из медновисмутового сплава, которая позволила снизить диапазон рабочих токов до приемлемых величин 5-10 ампер. Выбор состава вещества рабочей поверхности полого катода проводился из соображений минимальности тока в единичном катодном пятне и подбирался экспериментально.

Принятая конструкция катода обеспечивала устойчивое горение разряда и надежную непрерывную работу ионного источника в течение длительного времени, хотя для этого потребовалось несколько большей мощностью питания и расход газа, чем в дуоплазматронах традиционной конструкции с термонакаливаемыми катодами. На рис. 2 приведен пример вольт-амперных характеристик газового разряда в ионном источнике при различных величинах магнитного поля в магнитном зазоре. В качестве рабочего газа в данном случае использовался азот.

Экранирующий электрод (5) препятствует выходу из полого катода паров висмута, что необходимо для увеличения срока службы ионного источника, ограничивает диаметр плазменного столба на выходе из полого катода, препятствует перебросу разряда на промежуточный электрод (6). Конденсация паров висмута в канале экранирующего электрода, термо- и электроизолированного от остальных элементов конструкции исключена ввиду высокой температуры последнего, разогреваемого излучением газового разряда.

Необходимое для работы дуоплазматрона сильнонеоднородное магнитное поле формируется в зазоре между промежуточным электродом (6) и магнитным полюсом (7), выполненными из магнитомягкого железа и создается магнитной катушкой (8). Результаты измерения магнитного поля в зазоре, выполненные с помощью датчика Холла, при различных токах питания катушки приведены на рис. 3, где координата $X=0$ - соответствует положению магнитного полюса, а максимум магнитной индукции совпадает с положением эмиссионного отверстия анода.

Формирование ионного пучка производится с развитой плазменной границы в эспандере (9), находящемся под плавающим потенциалом, с помощью обычной двухэлектродной системы (10)-(11). Максимальная величина ускоряющего напряжения 25 киловольт.

Испытания ионного источника производились на стенде. Вакуумная камера откачивалась диффузионным насосом с эффективной скоростью откачки ~ 500 л/сек. Предельный вакуум $2.6 \cdot 10^{-3}$ Па.

Ионный ток генерируемый ионным источником измерялся непосредственно на выходе последнего цилиндром Фарадея; распределение плотности тока по сечению пучка измерялось подвижным коллектором расположенным на расстоянии 200 мм от выхода ионного источника. Контроль массового и зарядового состава ионного пучка производился с помощью масс-анализатора на постоянном магните, описанного в [8].

В качестве рабочих газов в основном использовались азот и аргон, хотя некоторые эксперименты проводились и на других инертных газах.

Приведем основные экспериментальные результаты, полученные при испытаниях ионного источника.

На рис. 4 приведены выходные его характеристики-зависимость тока ионов от величины магнитного поля в зазоре (тока в катушке), где параметром является ток разряда. На рис. 5 показаны семейства кривых, характеризующие зависимость тока ионов от изменения давления в вакуумной камере, связанного с расходом рабочего газа при различных величинах тока разряда и магнитного поля в зазоре.

Величина ионного тока существенно зависит от магнитного поля в зазоре, что связано с изменением плотности плазмы вблизи эмиссионного отверстия, и тока разряда, достигая в оптимальных условиях величины 20-25 ма при токах разряда 5-9 а. Изменение давления в вакуумной камере за счет натекания рабочего газа, соответствующее максимальному току ионов при фиксированных значениях тока разряда и магнитной катушки составляет величину $\sim 3.6 \times 10^{-3}$ Па. Непосредственные измерения расхода рабочего газа проведенные при этих условиях дают величину 50 см³/час, что соответствует газовой экономичности $\eta = 0.25$ и эффективности 0.03 ма/вт.

На рис. 6 приведены характерные спектры массового и зарядового состава ионных пучков, полученные с помощью масс-спектрометра, на различных рабочих газах. Как показывают измерения, при работе ионного источника на азоте, доля молекулярных ионов в полном токе ионного пучка слабо зависит от режимов его работы и не превышает величины 20%.

Доля же двух- и трехзарядных ионов существенно зависит от рода рабочего газа и режимов работы источника. Было выполнено большое количество измерений с целью оптимизации выхода двух- и трехзарядных ионов. В качестве рабочих газов в этой серии экспериментов использовались азот, неон, аргон и ксенон. Вся совокупность полученных экспериментальных результатов по измерению относительного выхода двухзарядных ионов в пределах точности эксперимента и в диапазоне реального изменения режимов работы источника может быть представлена выражением:

$$\xi_2 = \frac{I^{++}}{I^+} \sim F(M, Z) (I_{\text{магнита}})^{1/2} \cdot \frac{I_{\text{(разряда)}}}{\Delta P}$$

где ξ_2 - относительный выход двухзарядных ионов, $F(M, Z)$ - монотонно возрастающая функция обоих аргументов, M - масса иона, Z - атомный номер, $I_{\text{(магнита)}}$ - ток магнитной катушки, $I_{\text{(разряда)}}$ - ток разряда, $\Delta P = (P - P_0)$, P - рабочее давление в вакуумной камере, P_0 - остаточное давление.

В оптимальных, с точки зрения получения двухзарядных ионов, условиях работы ионного источника были получены следующие результаты:

аргон	$\xi_2 = 0.79$
неон	$\xi_2 = 0.12$
азот	$\xi_2 = 0.06$

Несколько иная картина имеет место при работе с ксеноном ($M = 133$). В этом случае достаточно эффективно образуются также и трехзарядные ионы ксенона и в оптимальных условиях $\xi_2 = 0.22$ и $\xi_3 = 0.27$, где ξ_3 - относительный выход трехзарядных ионов ксенона.

Как упоминалось выше, ионно-оптические характеристики пучка изучались с помощью подвижного зонда. На рис. 7 приведен пример измерения плотности тока $J(r)$ и вычисленной, с

$$\text{использованием последней, величины } k(r) = \frac{\int_0^r J(r) r dr}{\int_0^\infty J(r) r dr},$$

характеризующей долю пучка, прошедшего через круг радиуса r . Вид этого распределения, естественно, зависит от величины вытягивающего напряжения и полного тока ионного пучка. На рис. 8 приведены изолинии величины $K(R, U_{\text{ускор}})$ при двух различных значениях полного ионного тока. Как можно видеть, в оптимальных условиях до 70% полного ионного тока имеет угловую расходимость < 0.05 .

Ресурсные испытания ионного источника, проведенные в течение 100 часов его непрерывной работы, не показали каких-либо заметных разрушений элементов конструкции прибора, что позволяет надеяться на перспективность его применения в промышленных ионно-технологических установках.

В заключение авторы считают своим долгом выразить бла-

годарность Н.С. Диканскому за интерес к работе и Г.Ф. Балыкову за помощь в подготовке экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. J.H. Freeman. Nucl. Instr. and Meth. 22 (1963) 306.
2. B. Cobic, D. Tomic, B. Perovic. Nucl. Inst. and Meth. 24 (1963) 358.
3. G. Sidenius. Proc. Int. Conf. on Electromagnetic Isotop Separation Marburg (1979) 423.
4. J. Illigen, R.K. Kircnner and J. Shulte. IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-19 (1979) 35.
5. H. Baumann, K. Bethge. Nucl. Inst. and Meth. 189 (1981) 107.
6. N. Sakudo, K. Tokiguchi, I. Kanomata. Rev. Sci Inst. 48 (1977) 762.
7. В.И. Донин, А.Ф. Шупилов, В.А. Григорьев. Мощные непрерывные лазеры с увеличенным сроком действия. Квантовая электроника, т.6, N 2, 1979 г. стр. 359.
8. В.Г. Шамовский. Ионный источник с повышенным ресурсом работы. Препринт ИЯФ 88-21, Новосибирск, 1988.

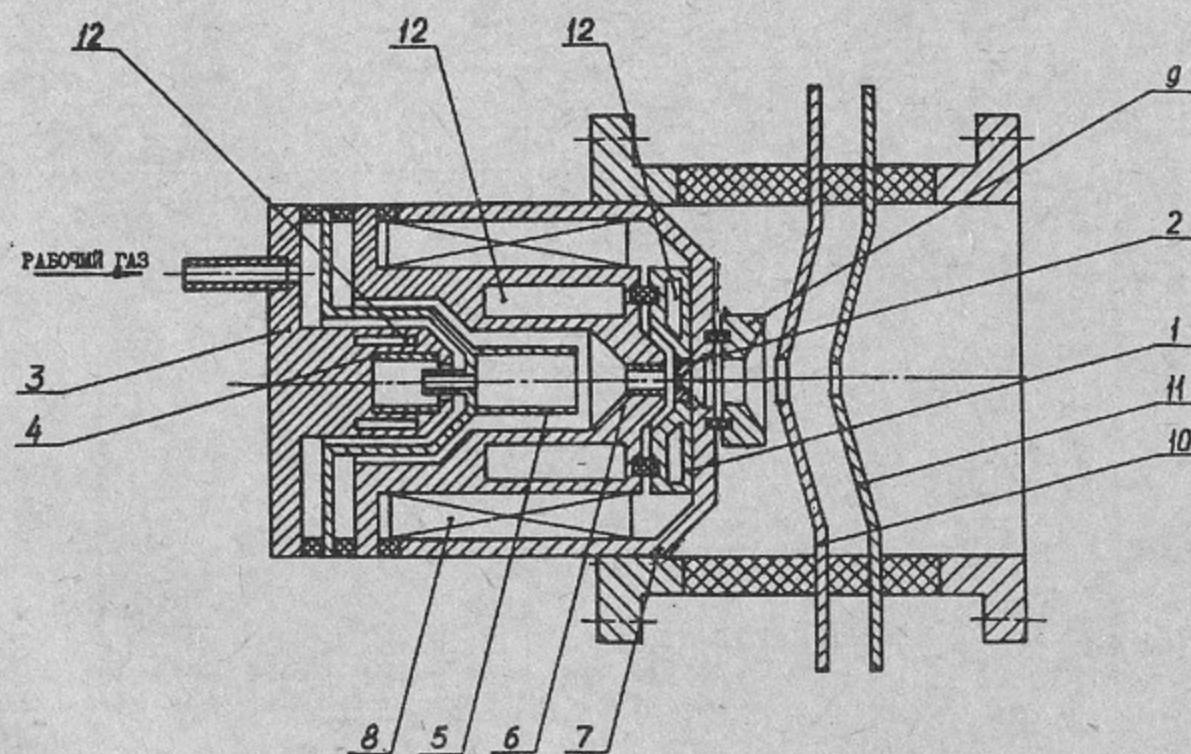


Рис. 1. Общий вид дуоплазматрона:

1 – анод; 2 – молибденовая вставка; 3 – катод; 4 – медномolibденовая втулка; 5 – экранирующий электрод; 6 – промежуточный электрод; 7 – полюс магнита; 8 – магнитная катушка; 9 – экспандер; 10, 11 – электроды системы формирования пучка; 12 – полости водяного охлаждения.

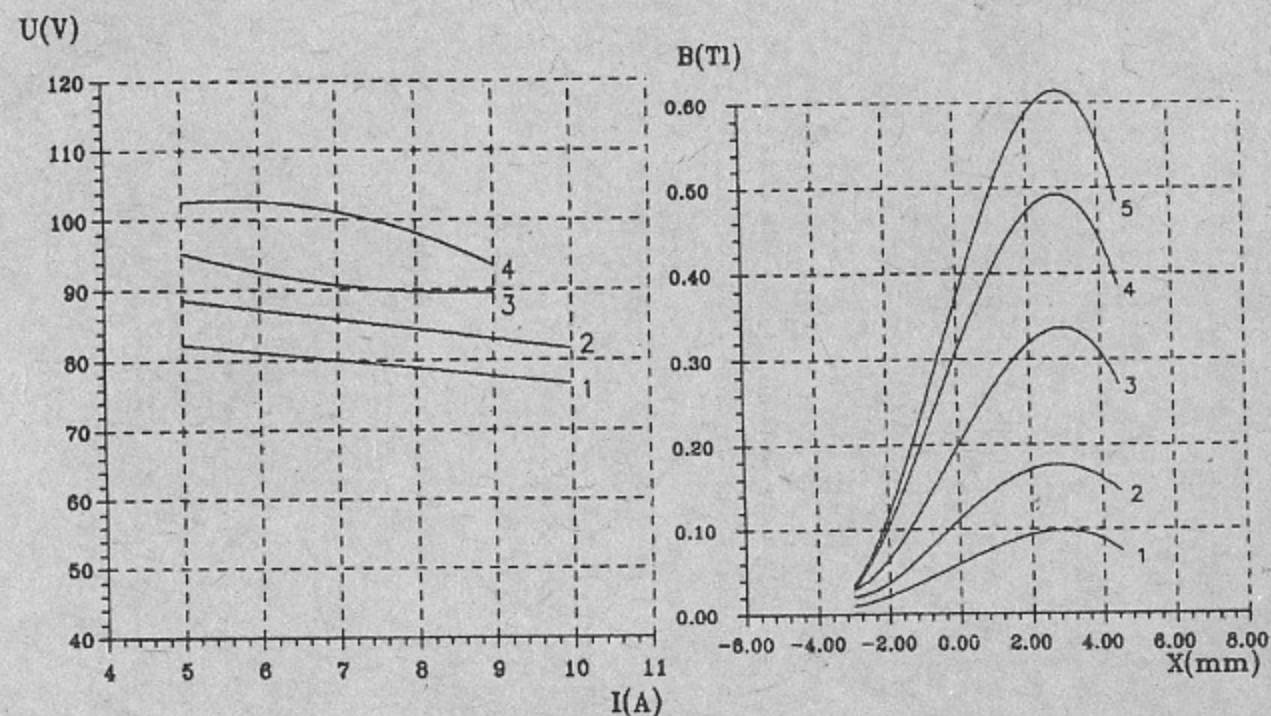


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики разряда ионного источника при различных значениях тока в магнитной катушке: 1 – $I_{\text{магнит}} = 0.5$ а; 2 – $I_{\text{магнит}} = 1.0$ а; 3 – $I_{\text{магнит}} = 1.5$ а; 4 – $I_{\text{магнит}} = 2.0$ а.

Рис. 3. Магнитное поле в зазоре ионного источника:

1 – $I_{\text{магнит}} = 0.5$ а; 2 – $I_{\text{магнит}} = 1.0$ а; 3 – $I_{\text{магнит}} = 2.0$ а; 4 – $I_{\text{магнит}} = 3.0$ а; 5 – $I_{\text{магнит}} = 4.0$ а.

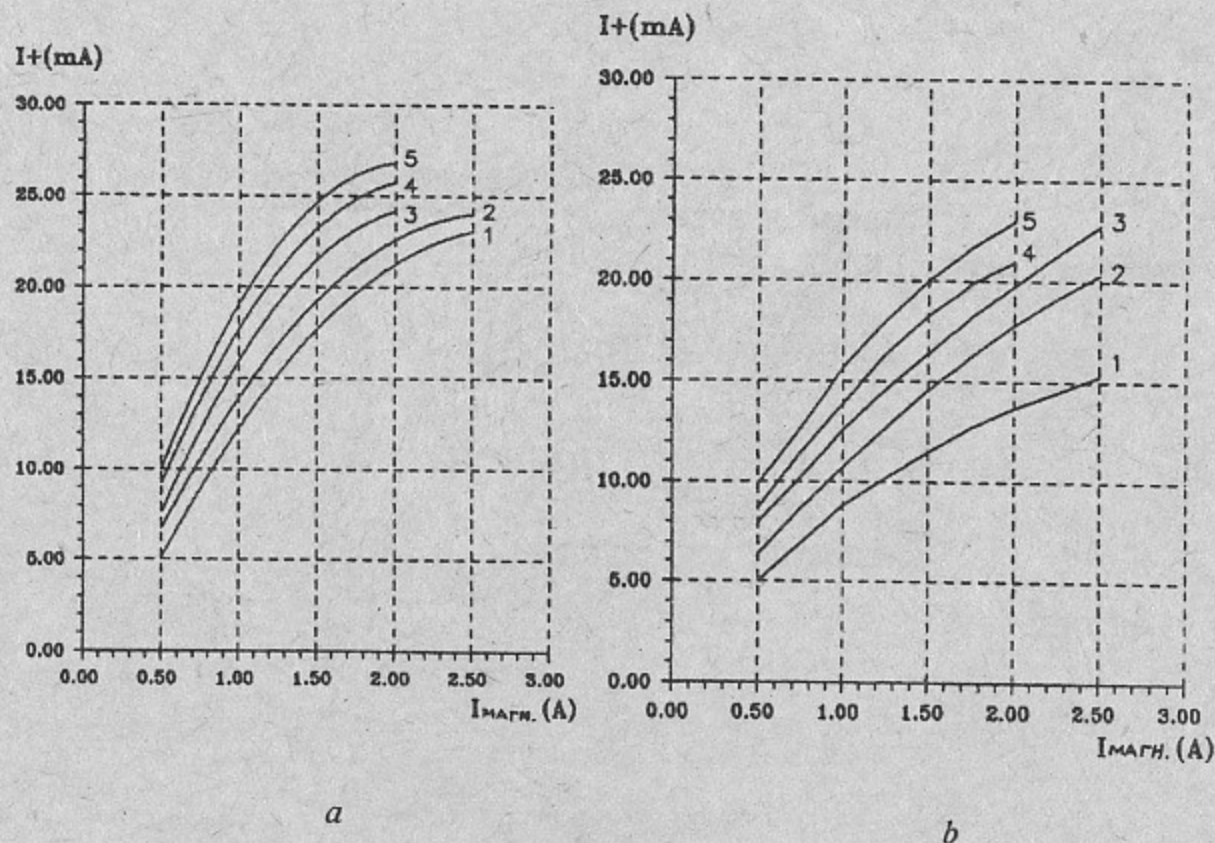


Рис. 4. Зависимость ионного тока источника от тока в магнитной катушке: а) — азот; б) — аргон.
 1 — $I_{\text{разряда}} = 5$ а; 2 — $I_{\text{разряда}} = 6$ а; 3 — $I_{\text{разряда}} = 7$ а; 4 — $I_{\text{разряда}} = 8$ а; 5 — $I_{\text{разряда}} = 9$ а.

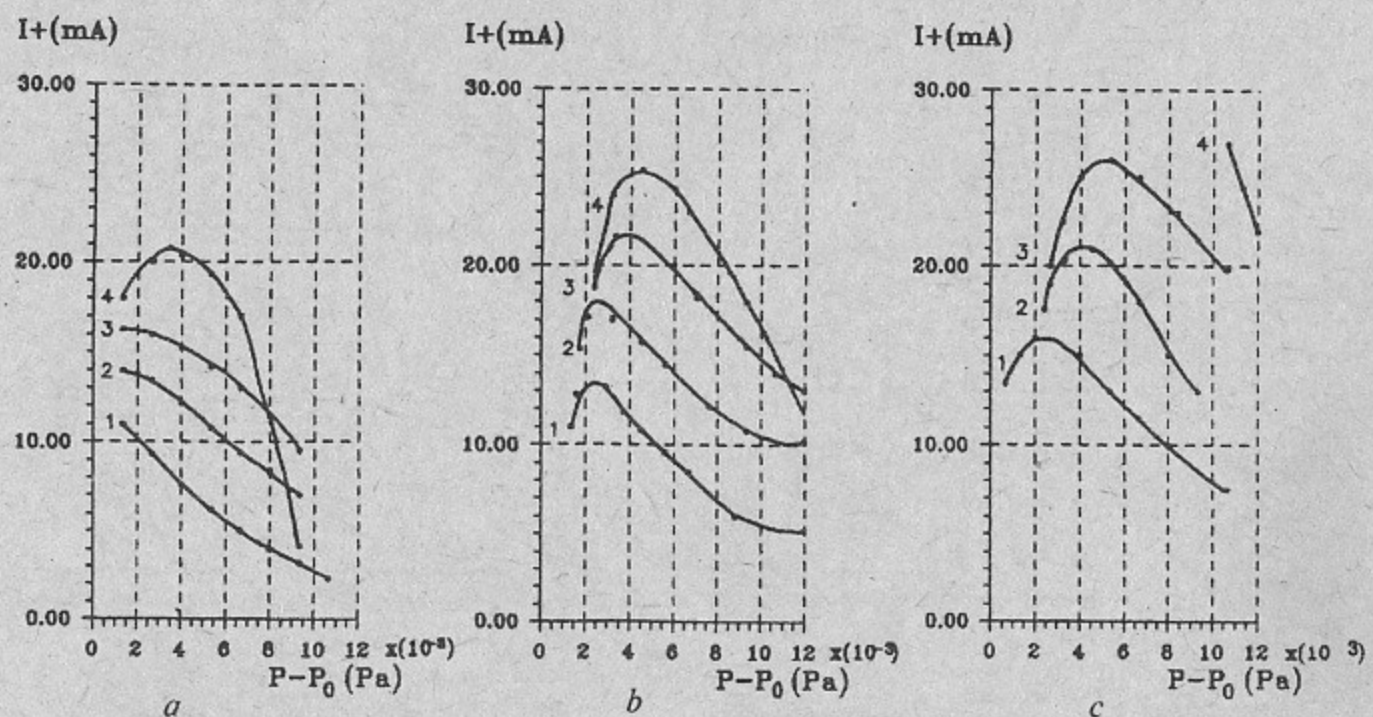


Рис. 5. Зависимость ионного тока источника от изменения давления в вакуумной камере: а) — $I_{\text{разряда}} = 5$ а; б) — $I_{\text{разряда}} = 7$ а; в) — $I_{\text{разряда}} = 9$ а.
 1 — $I_{\text{магн.}} = 0.5$ а; 2 — $I_{\text{магн.}} = 1.0$ а; 3 — $I_{\text{магн.}} = 1.5$ а; 4 — $I_{\text{магн.}} = 2.0$ а.

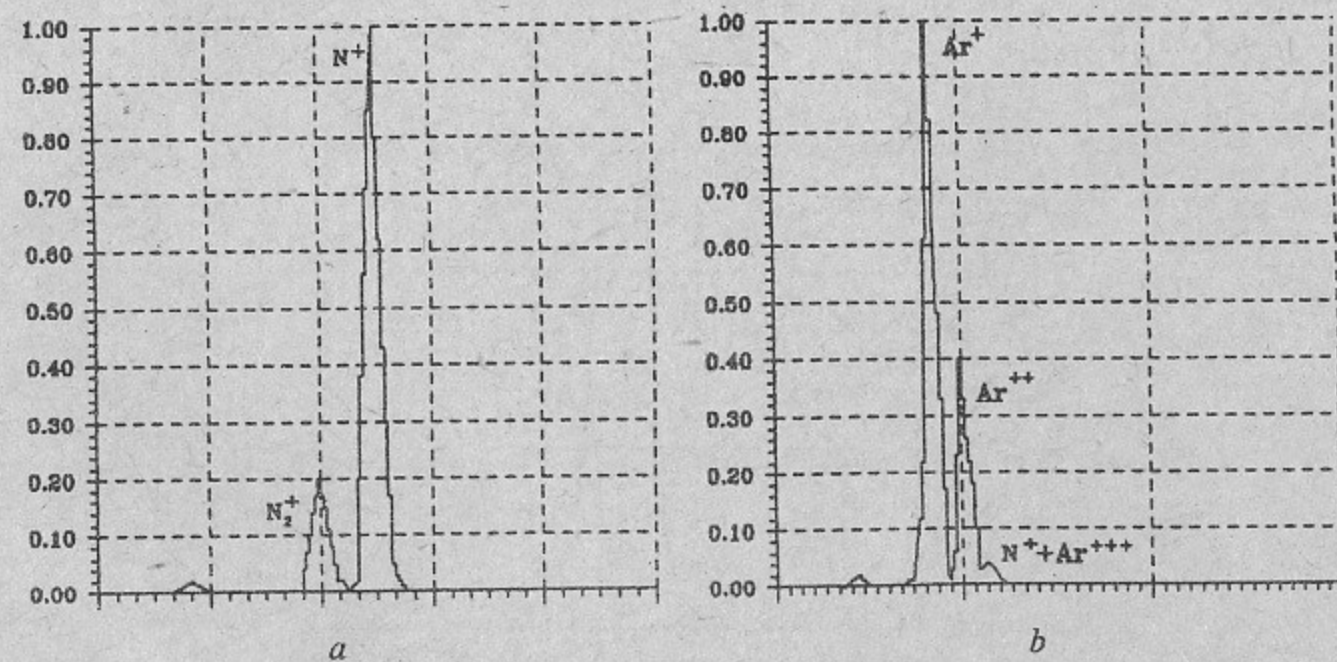


Рис. 6. Массовый и зарядовый состав ионных пучков: а) азот; б) аргон; в) ксенон.

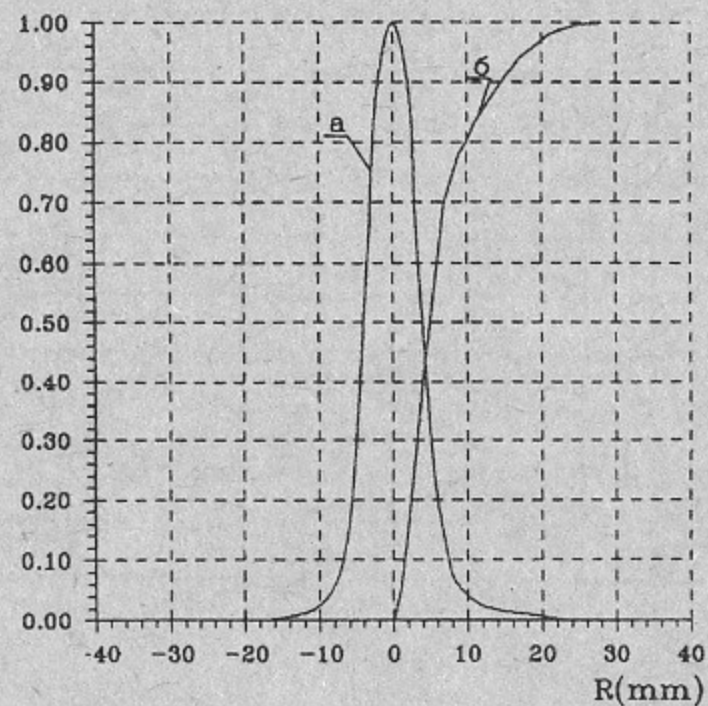


Рис. 7. а) $J(r)$; б) $K(r)$.

По оси абсцисс – поперечная координата положения зонда (база измерения 200 мм).

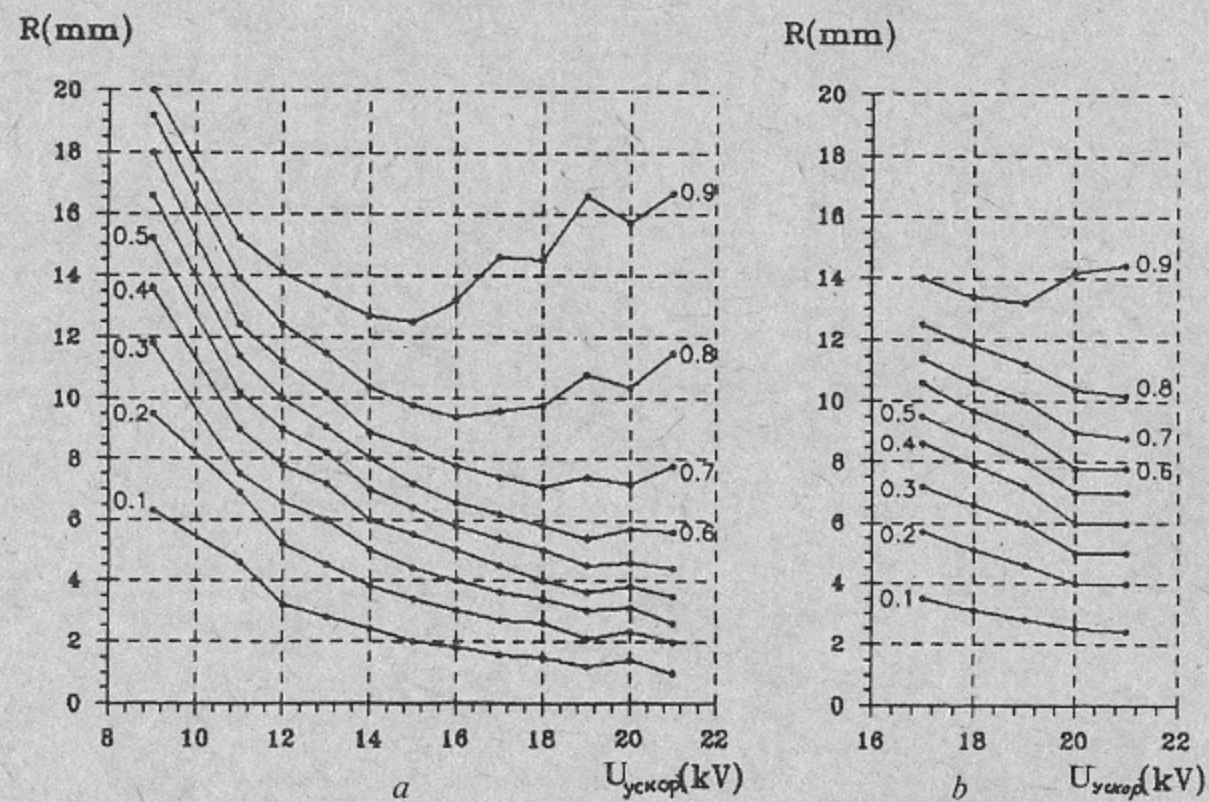


Рис. 8. Изолинии $K(r, U_{\text{ускор}})$:

а) $I^+ = 3$ ма; б) $I^+ = 6$ ма. (Параметром кривой принят уровень величины $K(r, U_{\text{ускор}})$).

С.Н. Чумаков, В.Г. Шамовский

Дуоплазматрон с холодным полым катодом

Ответственный за выпуск С.Г. Попов

Работа поступила 16 апреля 1991 г.
 Подписано в печать 16 апреля 1991 г.
 формат бумаги 60x90 1/16.
 Объем 1,1 печ. л., 0,9 уч-изд. л.
 Тираж 220 экз. Бесплатно. Заказ N 42.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР,
 г. Новосибирск, 90.