

5157

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна



13-5157

А.И. Владимиров, Е.Д. Воробьев, В.А. Саенко,
Ю.П. Третьяков

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАРЯДОВОГО СОСТАВА ИОНОВ
В СИСТЕМЕ "ПЛАЗМА-ПУЧОК"

1970

13-5157

А.И. Владимиров, Е.Д. Воробьев, В.А. Саенко,
Ю.П. Третьяков

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАРЯДОВОГО СОСТАВА ИОНОВ
В СИСТЕМЕ "ПЛАЗМА-ПУЧОК"**

Направлено в "Журнал технической физики"

**Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ**

Введение

Постановка работ по исследованию зарядового состава ионов плазмы, созданной ионизацией газа электронным пучком в магнитном поле, представляет значительный интерес как с точки зрения моделирования физических процессов, происходящих в положительном столбе дугового, отражательного и плазменно-пучкового разрядов, так и для ряда технических приложений (ионные и плазменные источники, ионные лазеры и современная ионно-электронная технология).

Распределение ионов по зарядностям в настоящее время исследовано только в дуговом и отражательном разрядах^{/1-5/}. Известно, что при заданных давлении, магнитной индукции и геометрии разрядного промежутка зарядовый состав ионов в положительном столбе этих разрядов зависит от подводимой мощности, которая определяет температуру плазменных электронов^{/1/}. Установлено экспериментально, что ионы высоких зарядностей появляются в спектре при увеличении разрядного напряжения^{/2/}. Оценки показывают, что основным механизмом образования многозарядных ионов (м.з.и.) в перечисленных разрядах низкого давления является ступенчатая ионизация атомов электронным ударом. Вероятности ионизации образования ионов высоких зарядностей до-

стигают максимума при энергии электронов в 3-5 раз выше ионизационного потенциала соответствующего зарядового состояния ^{/3-4/}, что составляет несколько килоэлектронвольт.

При обычной для таких разрядов температуре электронов в 10^{50} К число электронов в области 100 в составляет 10^{-5} от общего числа, а тепловые электроны с энергией больше нескольких сот вольт практически не существуют. Между тем в ряде работ показано, что в разрядах низкого давления присутствуют "аномально ускоренные", немасвелловские электроны в количестве 10^{-2} от общего числа электронов ^{/6-8/}. Можно предполагать, что они могут существенно влиять на зарядовый состав ионов в разряде. Наиболее удобной моделью для изучения влияния "немасвелловских" электронов на процесс образования м.з.и. является система "плазма-пучок" в продольном магнитном поле. Проведение таких исследований составляло цель настоящей работы.

Методика эксперимента

Схема экспериментального устройства показана на рис. 1. Стационарный электронный пучок диаметром $d_k = 5-7$ мм формировался электронной пушкой (1-3) в продольном магнитном поле H . Ток пучка $I_k = 0,1 + 3$ а, энергия электронов - $V_k = 1 + 4$ кв. Пучок электронов инжектировался в разрядную камеру (4) с каналом квадратного сечения (5) размером 8×8 мм² и высотой 250 мм, в средней части канал имел уширение сечением 12×14 мм² и высотой 35 мм. В центре камеры были расположены отверстие для напуска газа (6) и эмиссионная щель (7) размером 1×15 мм² для извлечения и анализа ионов. Расстояние между пушкой и камерой было равно 30 мм. На противоположном торце камеры находился коллектор электронов (8). Устройство помещалось в вакуумную камеру, находящуюся между полюсами элект-

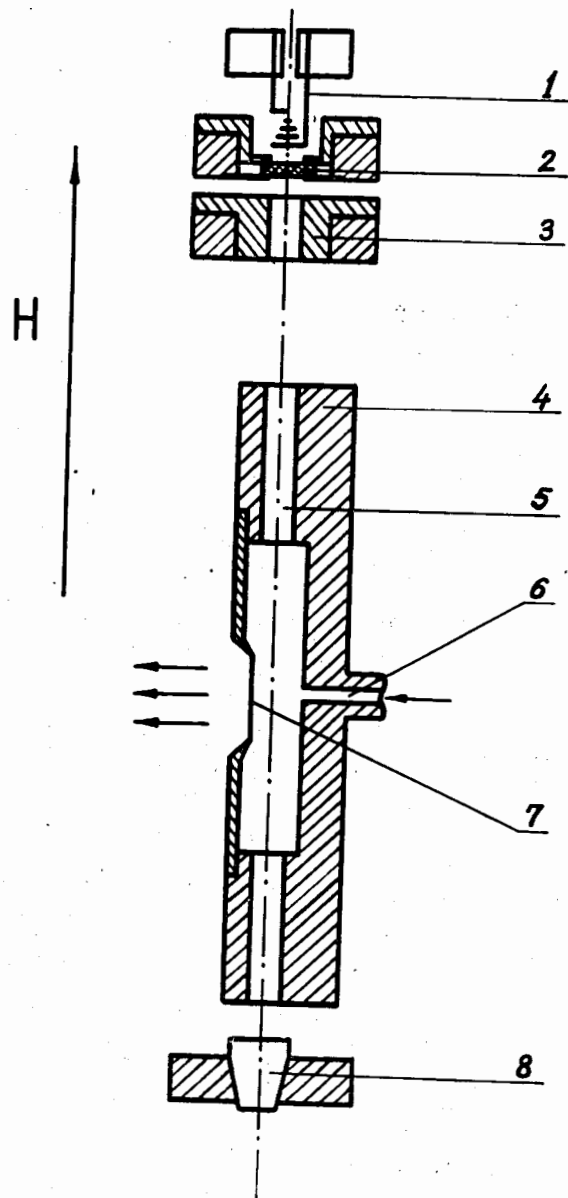


Рис. 1. Экспериментальное устройство. 1 - вспомогательный катод, 2 - катод электронной пушки (LaB₆), 3 - анодная диафрагма, 4 - разрядная камера, 5 - канал, 6 - отверстие для напуска газа, 7 - эмиссионная щель, 8 - коллектор электронов.

ромагнита диаметром 1 м. Предельный вакуум установки при включенной фреоновой ловушке составлял $P_0 = 3 \cdot 10^{-6}$ торр. Индукция магнитного поля изменялась в пределах $3 + 6,5$ кгс. В качестве рабочего вещества в разрядную камеру подавались аргон, криптон, ксенон, пары молибдена. Извлеченные из разряда ионы разделялись по отношению массы к заряду A/Z_1 после поворота в магнитном поле на 180° и попадали на коллектор ионов, перемещающийся в фокальной плоскости. Сигнал с коллектора ионов регистрировался самописцем ЭПП-09.

Результаты эксперимента

В зависимости от величины расхода газа (рис. 2) наблюдались три режима взаимодействия электронного пучка с плазмой, им образованной. При небольших расходах газа ($q \lesssim 0,5 \text{ см}^3/\text{мин}$) имел место квазивакуумный режим I (в соответствии с принятой ранее терминологией^{/8/}). Ток I_{AK} на коллектор электронов (кривая 1) при этом близок к величине инжектируемого тока пучка. Дальнейшее увеличение расхода газа при постоянстве остальных параметров пучка приводило к резкому возрастанию тока коллектора и извлекаемого из разряда ионного тока $I_{I\Sigma}$ (кривая 2). Свечение плазменного столба увеличивалось до размеров разрядного канала. В разрядной камере развивался высокотемпературный режим плазменно-пучкового разряда (режим II), в котором токи I_{AK} и $I_{I\Sigma}$ монотонно возрастали с увеличением расхода газа. При $q \gtrsim 1,4 \text{ см}^3/\text{мин}$ ток коллектора менял направление, преобладающим становился ионный компонент тока. Плазменно-пучковый разряд переходил в низкотемпературный режим III, который предшествовал развитию дугового разряда, когда независимое регулирование энергии и тока электронного пучка становилось невозможным. Указанные режимы взаимодействия электронного пучка с плазмой имели место независимо

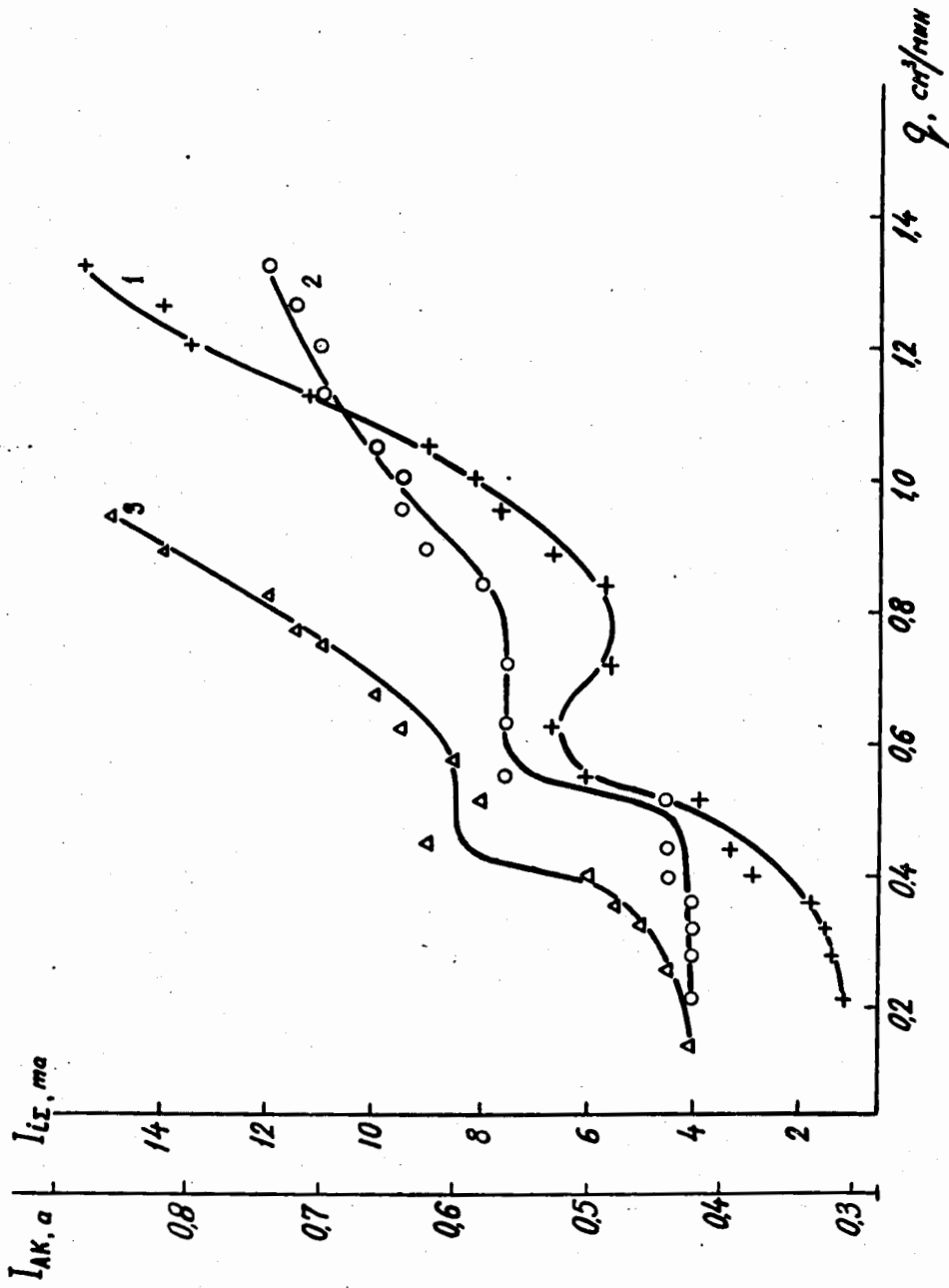


Рис. 2. Зависимости тока коллектора $I_{ак}$ (кривая 1) и извлекаемых из разряда ионных токов $I_{и}$ от расхода газа (криптон). $d_k = 7$ мм, $I_k = 0,24$ а, $V_k = 1,6$ кв, $H = 4$ кв, $V_{выт.} = 8$ кв; кривые 1, 2 - $V_{ак} = 0$, кривая 3 - $V_{ак} = V_k$.

от потенциала коллектора электронов V_{AK} . Подача на коллектор отрицательного потенциала, равного потенциалу катода пушки, облегчала зажигание разряда и увеличивала извлекаемый ионный ток (кривая 3).

Типичный спектр распределения ионов по зарядностям в режиме I показан на рис. 3. На основе таких спектров ток ионов каждой зарядности I_{z+} нормировался к току однозарядных ионов I_+ и строились кривые распределения ионов по зарядностям Z_i для различных режимов взаимодействия электронного пучка с плазмой. В режимах I, II увеличение расхода газа повышает количество многозарядных ионов в плазменном столбе (рис. 4). При переходе к режиму III, если ток и энергия электронов поддерживаются постоянными, количество м.э.и. в разряде уменьшается.

Зависимости извлекаемого тока ионов каждой зарядности от магнитной индукции, тока и энергии электронов пучка являются немонотонными. На рис. 5 показана в относительных единицах зависимость зарядового состава ионов от энергий электронов пучка V_K (ток ионов каждой зарядности нормирован к его максимальному значению). Увеличение V_K вызывает почти линейный рост суммарного вытянутого из разряда тока $I_{i\Sigma}$ (пунктирная кривая), однако, токи ионов высоких зарядностей проходят через максимум, который сдвигается в сторону высоких энергий при переходе к большим зарядностям.

Зарядовый состав ионов существенно зависит от распределения потенциалов на электродах в разрядном устройстве (рис. 6). В эксперименте стенки разрядной камеры были заземлены, а потенциалы анода пушки V_A и коллектора электронов V_{AK} могли изменяться. Эпюры напряжений в устройстве показаны в правом верхнем углу рис. 6. В случаях "а" и "б" создаются условия для отражения от коллектора и осцилляции в разряде плазменных электронов и первичных электронов пучка (в случае "б" с энергией ≤ 440 в). В положительном столбе образуется боль-

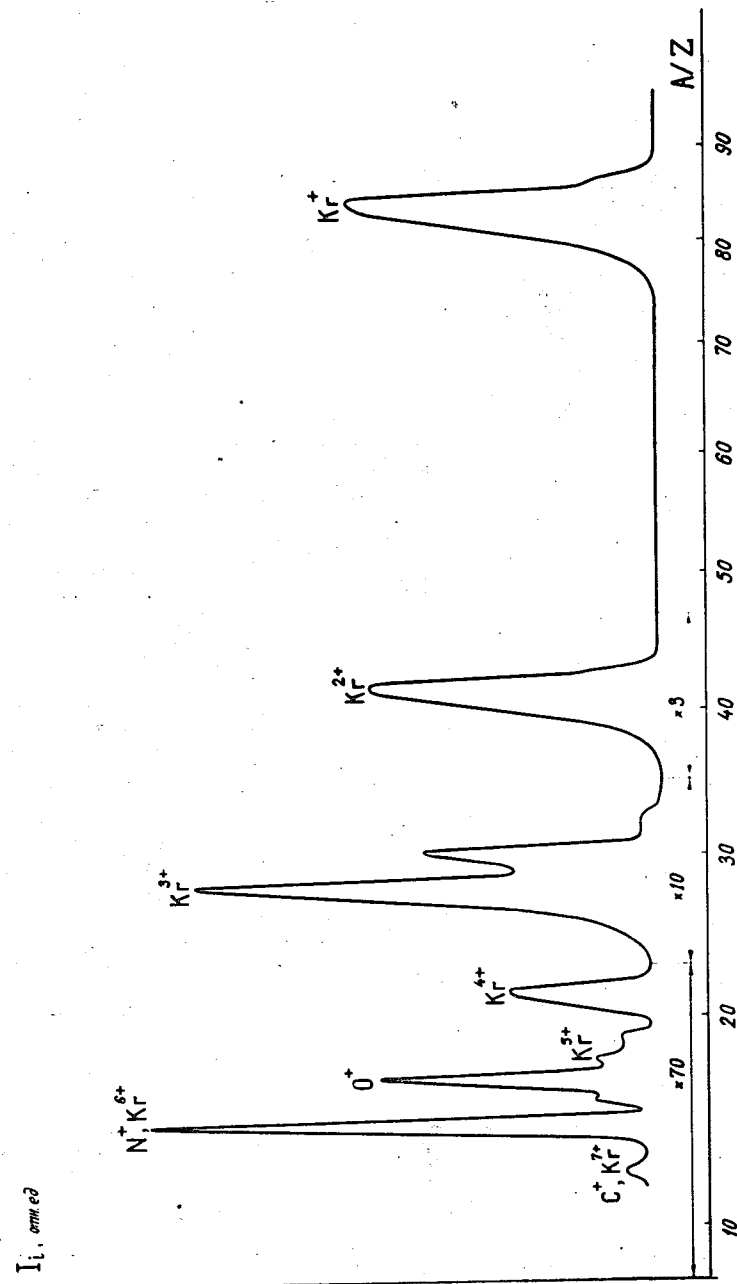


Рис. 3. Спектр распределения ионов по зарядностям. Криpton, $d_k = 7$ мм, $I_k = 0,24$ а, $V_k = 1,6$ кв, $\varphi = 0,45$ см³/мин, $H = 4$ кэ.

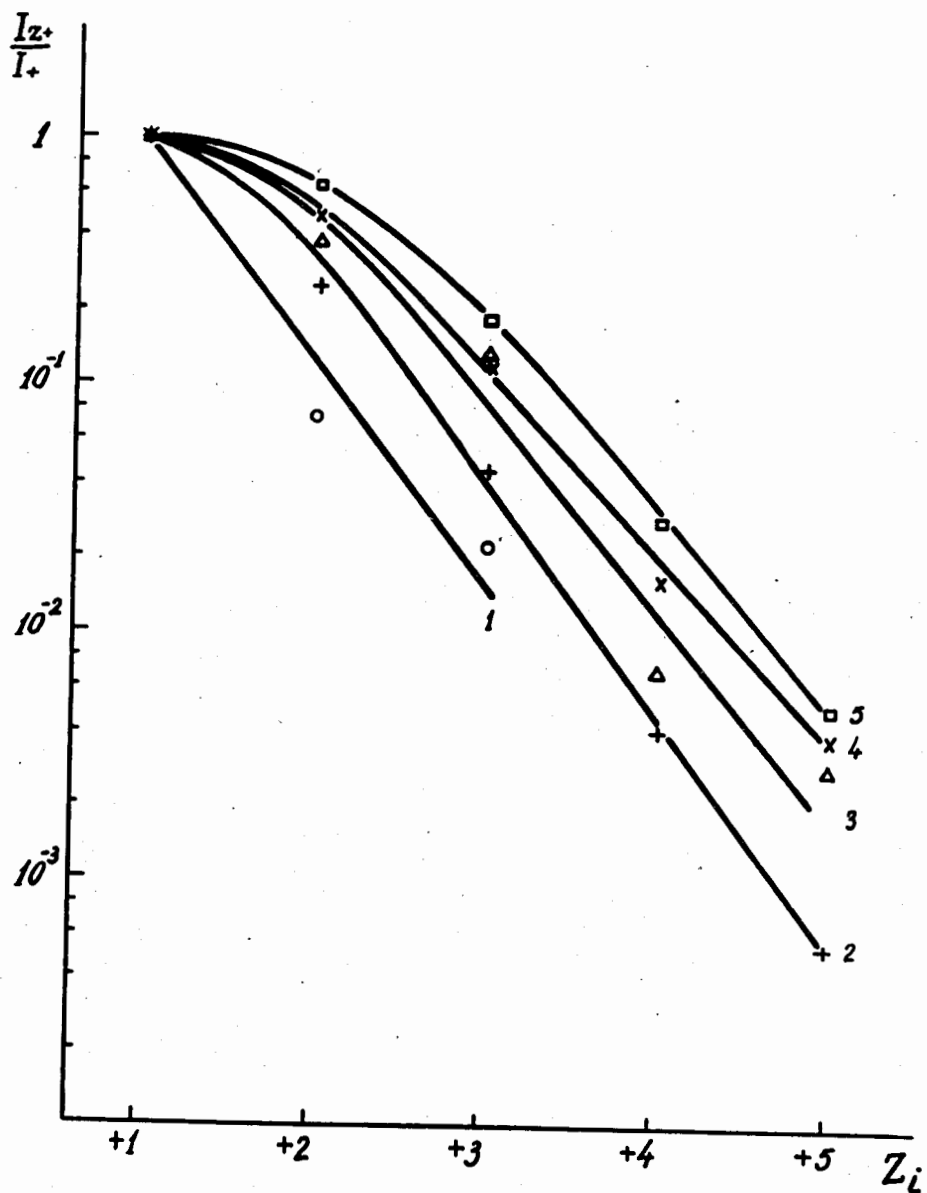


Рис. 4. Влияние расхода газа на зарядовой состав ионов. Криптон, 1 - $q = 0,25$, 2 - $q = 0,45$, 3 - $q = 0,62$, 4 - $q = 0,77$, 5 - $q = 0,88$ см³/мин.

ше многозарядных ионов, чем в случаях "в" и "г", когда облегчен уход электронов на торцы разрядной камеры.

Процентное содержание многозарядных ионов в плазменном столбе разряда значительно увеличивается при переходе к импульсному режиму работы электронной пушки (длительность импульса $\tau_u = 1$ мсек, частота посылок $f = 100$ гц). В таблице приведен зарядовый состав ионов для аргона, криптона и ксенона. Вытягивающее напряжение равно 15 кв (при этом ионы Kr^+ , He^+ и He^{2+} не регистрируются анализатором).

Таблица

Распределение ионов по зарядностям в импульсном режиме ($d_k = 5$ мм, $V_{AK} = V_k$)

Элемент	Н, кэ	Ток ионов, отн. ед.												
		+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9	+10			
Ar	4	1	1,46	0,75	0,16	0,065 ^x	0,004							
Kr	4		1	0,66	0,22	0,12	0,032 ^x	0,008 ^x	0,002					
Kr	6,5		1	0,76	0,45	0,38	0,15 ^x	0,06 ^x	0,018	0,008				
Xe	4			1	0,77	0,62	0,39	0,23	0,088 ^x	0,018 ^x	0,002			
Xe	6,5			1	1,3	0,96	0,71	0,35	0,13 ^x	0,04 ^x	0,005			

^xДанные приблизительные, точным оценкам мешают ионы примесей углерода, азота, кислорода.

Обсуждение результатов

Зарядовый состав ионов в системе "плазма-пучок" существенно зависит от режимов взаимодействия электронного пучка с плазмой. В квазивакуумном режиме I электронным пучком образуется слабионизи-

рованная "холодная" плазма, состоящая в основном из однозарядных ионов, концентрация которых близка к концентрации электронов в пучке. Наиболее широкий спектр зарядностей ионов наблюдается в высокотемпературном режиме плазменно-пучкового разряда, когда происходит эффективный нагрев плазменных электронов электронами пучка. Немонотонность зависимостей зарядового состава ионов в системе "плазма-пучок" от энергии электронов пучка (рис. 5), а также влияние потенциала торцевых электродов разрядной камеры (рис. 6) свидетельствуют о том, что в образовании ионов высоких зарядностей существенную роль играют электроны пучка. Этим, в частности, объясняется более плавный спад кривой "а" на рис. 5 по сравнению с кривой "б" в области $Z_1 > 4$.

Для увеличения спектра зарядностей ионов (что является важным, например, в источниках м.з.и. и ионных лазерах) необходимо увеличивать не только общую мощность, подводимую к разряду, но и повышать анодные напряжения. В плазменно-пучковом разряде возможно получение регулируемых высоких энергий первичных электронов и высоких температур плазменных электронов, поэтому разработка источника м.з.и. на основе разряда такого типа, по-видимому, будет перспективной. Электронная пушка ионного источника должна формировать пучок электронов максимальной плотности с энергией, при которой образование ионов необходимой зарядности имеет максимум вероятности. Для обеспечения эффективной передачи энергии от электронов пучка к плазменным электронам, ответственным за генерацию ионов низких зарядностей, в разрядной камере необходимо реализовать турбулентный режим взаимодействия электронного пучка с плазмой при минимальной низкочастотной неустойчивости плазменного столба.

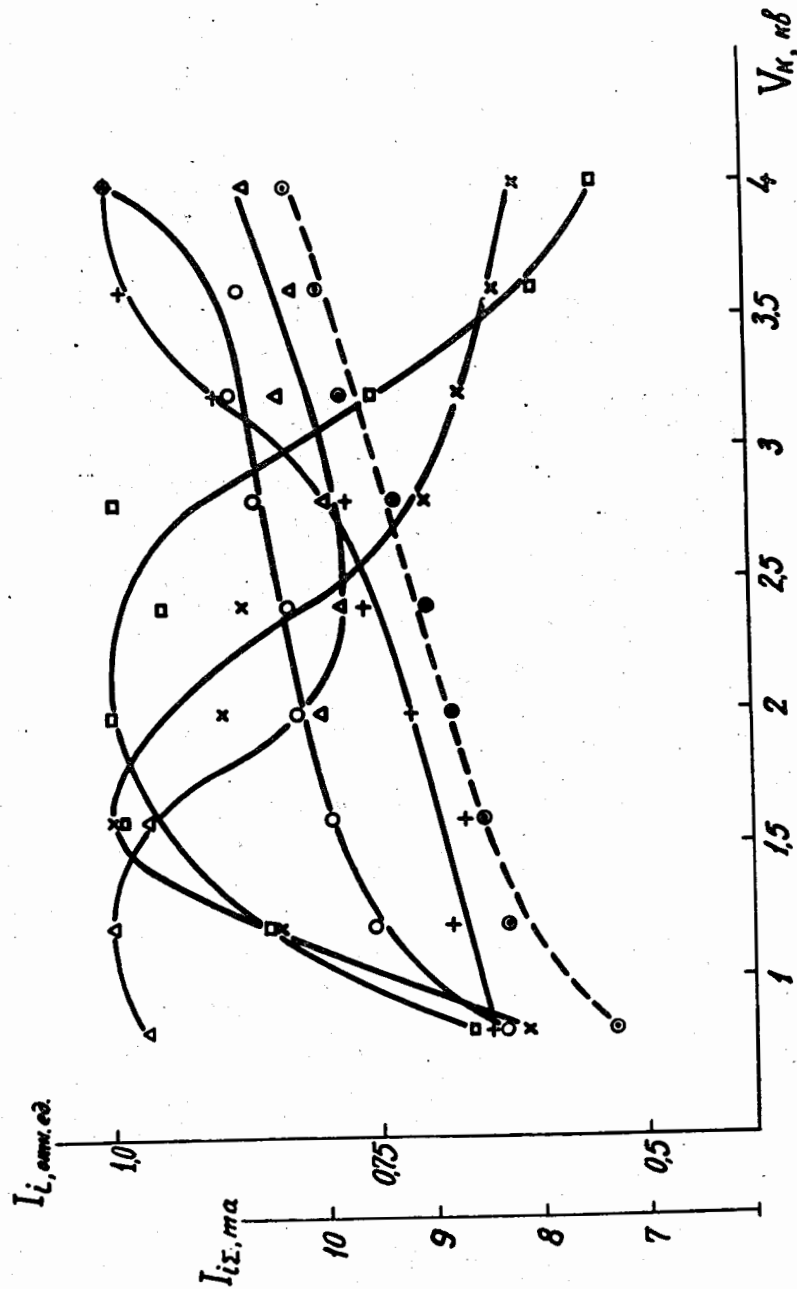


Рис. 5. Зависимость зарядового состава ионов от энергии пучка электронов V_k . Криптон, $q = 0,69 \text{ см}^3/\text{мин}$, $d_k = 5 \text{ мм}$, $I_k = 0,5 \text{ а}$, $V_{ак} = V_k$, $\ominus - I_{\Sigma}$, $\circ - \text{Kr}^+$, $+$ - Kr^{2+} , $\Delta - \text{Kr}^{3+}$, $\times - \text{Kr}^{4+}$, $\square - \text{Kr}^{5+}$.

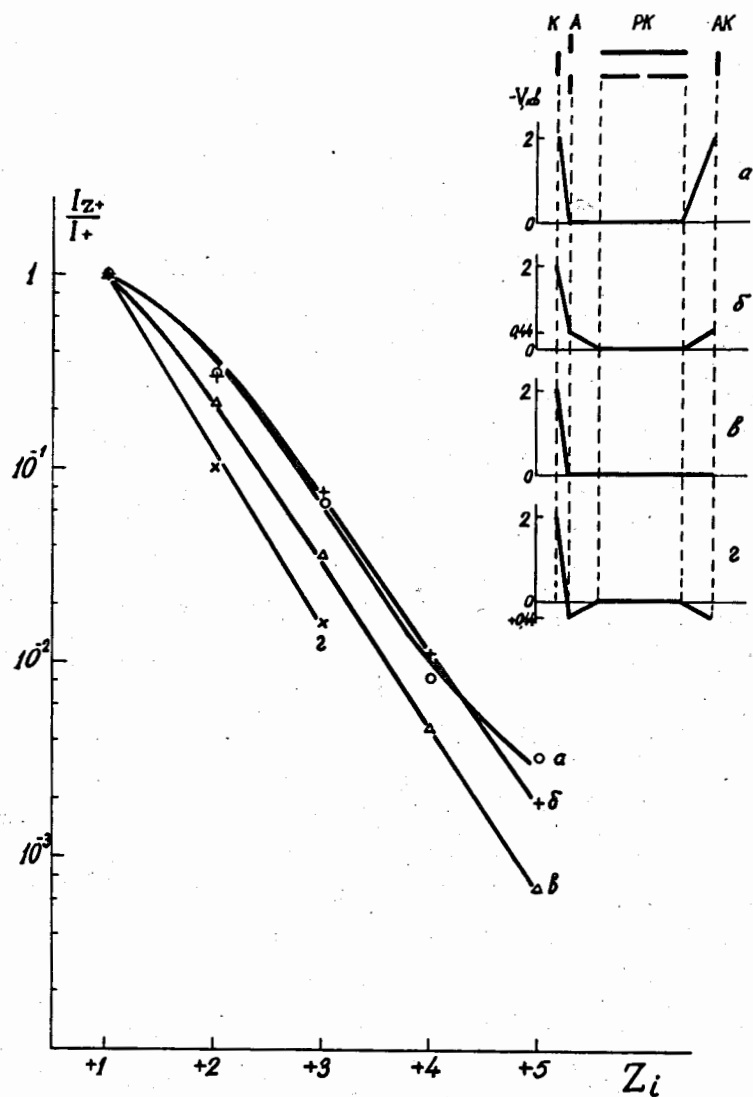


Рис. 6. Влияние потенциала торцевых электродов на зарядовый состав ионов. Криптон, $q = 0,4 \text{ см}^3/\text{мин}$, $d_k = 5 \text{ мм}$, $I_k = 0,62 \text{ а}$, $H = 4 \text{ кэ}$, $V_{AK} = V_k$.

Л и т е р а т у р а

1. Ю.Д. Пигаров, П.М. Морозов. ЖТФ, 31, 467, 476 (1961).
2. А.С. Пасюк, Ю.П. Третьяков, С.К. Горбачев. Атомная энергия, 24, 1, 21 (1968).
3. R. Basile, J.M. Lagrange. Nucl.Inst.Meth., 31, 195 (1964).
4. С.Е. Anderson, K.W. Ehlers. Rev.Sci.Inst., 27, 10, 809 (1956).
5. R.J. Jones, A. Zucker. Rev.Sci.Inst., 85, 6,562 (1954).
6. И.М. Поляк. Радиотехника и электроника, 6, 3, 395 (1961).
7. А.К. Березин, Г.П. Березина, Л.И. Болотин, Я.Б. Файнберг. Атомная энергия, 14, 3, 249 (1963).
8. В.А. Саенко, И.А. Дерюгин, Е.Т. Кучеренко. Труды IX международной конференции по явлениям в ионизированных газах, Бухарест, 1969. W.A. Sayenko, I.A. Deryugin, E.T. Kucherenko. IX International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Contributed papers, 579, Bucharest, 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел

5 июня 1970 года.