

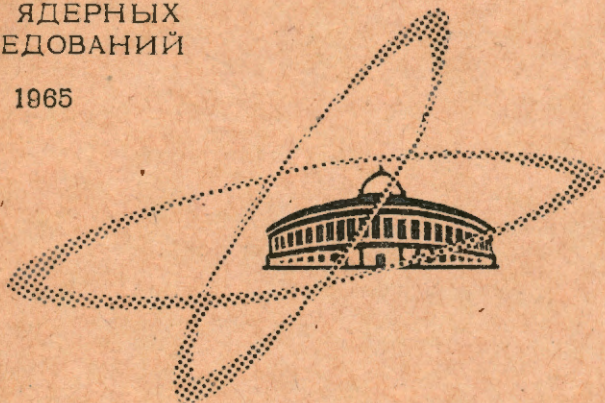
2043

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна 1965

P - 2043



Л.П. Кулькина, А.С. Пасюк

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ
КОНЦЕНТРАЦИИ АТОМОВ И ИОНОВ
ПО СЕЧЕНИЮ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА И ВДОЛЬ НЕГО
В ИСТОЧНИКЕ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

1965

P-2043

Л.П. Кулькина, А.С. Пасюк

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ
КОНЦЕНТРАЦИИ АТОМОВ И ИОНОВ
ПО СЕЧЕНИЮ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА И ВДОЛЬ НЕГО
В ИСТОЧНИКЕ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

Направлено в ЖТФ

**Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ**

При исследовании различных плазменных источников ионов для ускорителей обычно проводятся измерения количества извлеченных из источника ионов в зависимости от разных параметров. Большой интерес представляет также распределение концентрации различных ионов в самой плазме как вдоль разряда, так и по сечению его. Для этих целей успешно применяется спектрометрия излучения плазмы в экспериментах по управляемым термоядерным реакциям.

В работе ^{/1/} оптический метод применялся для определения выхода из источника ионов водорода в зависимости от интенсивности его спектральных линий.

С успехом может быть использован оптический метод и для исследования дуговых источников многозарядных ионов (м.э.и.). При выборе оптимальных условий работы таких источников для эксплуатации их на циклотронах существенную роль среди прочих параметров играет распределение концентрации атомов и ионов различных компонент плазменного столба.

Выявить характер распределения концентрации атомов и ионов по высоте и сечению дугового столба импульсного источника многозарядных ионов с осциллирующим разрядом ^{/2/} - цель данной работы.

Описание установки и методика измерений

Исследования ионного источника с помощью спектральных методов анализа проводились на стенде ^{/3/}. На рис. 1 изображена продольная геометрия газоразрядной камеры источника м.э.и. Во время всех опытов режим работы источника оставался постоянным: напряжение дуги - 600 в, ток дуги - 10 а. Потенциал катода и антикатода одинаковый, т.е. осуществлялась осцилляция электронов вдоль силовых линий магнитного поля. Исследуемые газы - неон, аргон и криптон - подавались через три отверстия, расположенные в центральной части газоразрядной камеры источника. Расход газа: неона - 1,6 см³/мин, аргона - 1,0 см³/мин, криптона - 0,7 см³/мин. Давление в середине газоразрядной камеры порядка 10⁻³ тор. Источник работал в однородном магнитном поле при напряженности 5 кэ.

Исследовался спектральный состав близкого ультрафиолетового излучения плазмы источника с помощью призменного спектрографа ИСП-28 с кварцевой оптикой. Регистрация спектров излучения - фотографическая, на высокочувствительные фотоматериалы.

Оптическая схема эксперимента выбиралась в зависимости от характера решаемой задачи. На рис. 2 приведены два варианта оптической схемы. Вариант а) применялся для изучения спектрального состава излучения плазмы источника. В этом случае источником излучения является эмиссионная щель (20 мм x 1,5 мм), увеличенное изображение которой проектируется в плоскости щели спектрографа. Вариант б) применялся для исследования распределения концентраций различных компонент плазменного столба по высоте источника. Здесь источник излучения - либо удлиненная эмиссионная щель (40 мм x 0,7 мм), либо ряд эмиссионных отверстий диаметром 1,5 мм, центры которых расположены по вертикали, параллельной оси камеры источника. В этом случае в плоскости щели спектрографа получаем резко сфокусированное уменьшенное изображение эмиссионной щели либо эмиссионных отверстий.

Обработка спектрограмм проводилась на нерегистрирующем микрофотометре МФ-2. Измерялась степень почернения спектральных линий и их отдельных участков. Переход от величины почернения линии к значению относительной интенсивности производился по характеристическим кривым, которые были построены для каждого вида фотоматериала с учетом исследуемой области длин волн и несоответствия закону взаимозаменяемости времени и интенсивности^{/4,5/}.

Результаты исследований

1. По оптической схеме варианта а) рис. 2 были получены спектрограммы неона, аргона и криптона с целью качественной расшифровки спектров излучения этих газов. С помощью табличных данных^{/8/}, а также данных работы^{/7/} были обнаружены и выбраны для исследований спектральные линии атомов и ионов до третьего заряда (таблица 1).

Т а б л и ц а 1

Атом или ион	Ne I	Ne II	Ne III	Ne IV	Ar I	Ar II	Ar III	Ar IV	Kr I	Kr II	Kr III
Длина волны в Å	3520,47	3777,16	2610,03	2357,96	3770,37	4013,87	3285,87	2808,44	3665,33	3920,14	3564,23
		3713,08	2580,04	2352,52	3608,52	3850,57	2724,84	2788,96		3875,44	3507,42
		3709,64		2350,84		3729,29		2757,92		3880,37	3439,46

2. По оптической схеме рис. 2 - вариант б) - был получен ряд спектрограмм, по которым построены кривые распределения относительной интенсивности спектральных линий Ne, Ar и Kr вдоль дугового разряда (рис. 3).

Все кривые, приводимые в настоящей работе, построены в координатах $[I/I_0; x]$. I/I_0 - относительная интенсивность, причем для каждой отдельной кривой величина $(I/I_0)_{max}$ приравнивается единице. x - расстояние по высоте дугового столба от катода к антикатоде. Необходимо отметить, что для всех трех газов наблюдается повторяемость хода кривых относительной интенсивности как атомов, так и ионов данного газа (рис. 4), поэтому нет необходимости приводить здесь все эти кривые. Каждая отдельная кривая построена в результате усреднения фотометрических данных по нескольким спектральным линиям данного атома или иона. Правомочность такого усреднения подтверждается хорошей воспроизводимостью (в пределах ошибки измерений) пересчитанных по характеристическим кривым данных фотометрирования спектральных линий, лежащих в различных областях длин волн и заэкспонированных с большим разбросом по времени экспозиция. Ошибка измерений, оцененная с учетом всех существенно влияющих на результаты спектрального анализа факторов^{/8/}, не превышает 15%.

3. В процессе работы было выяснено, что характер распределения относительной интенсивности спектральных линий газов существенно зависит от материала электродов. Естественно было предположить, что это явление связано с коэффициентом катодного распыления, характерным для каждого данного материала, и углом вылета выбитых частиц. Поскольку вариации в выборе материала катода ограничены жесткими требованиями, предъявляемыми к свойствам катодов, то с целью выявления характера зависимости распределения частиц газов от распыляемого материала исследовались антикатоде из различных металлов.

На основании имеющихся в литературе данных по распылению в качестве исследуемых материалов для антикатода были выбраны молибден, железо и медь, имеющие различные атомные веса, коэффициенты распыления и направленность вылета выбитых частиц^{/8,10/}. В этих опытах были получены спектрограммы Ne, Ar и Kr с молибденовым, стальным и медным антикатадами (катод во всех вариантах изготовлен из вольфрама). Измерялась относительная интенсивность спектральных линий материалов катода и антикатода, приведенных в таблице 2, и спектральных линий указанных газов.

Т а б л и ц а 2

Атом или ион	W I	W II	Mo I	Mo II	Cu I	Cu II	Fe I	Fe II
Длина волны в Å	4008,75	2397,09	3902,96	3122,00	3273,96	2837,55	3758,24	2779,30
			3864,11	3087,63	3247,54	2718,78	3733,58	
			3158,17					

Кривые распределения относительной интенсивности спектральных линий аргона и

различных материалов антикатода приведены на рис. 5. Для неона и криптона свдиги кривых в зависимости от материала антикатода аналогичны. На рис. 5 приведена также кривая распределения интенсивности спектральных линий катода. Точки этой кривой нанесены крестиками.

4. При дуговом разряде концентрация распыленных частиц материалов катода и антикатода сравнима с концентрацией частиц газа^{/12/}. Естественно, что в этом случае распыленные частицы влияют на распределение концентрации частиц газа. Поскольку число выбитых с катода и антикатода частиц пропорционально току разряда^{/12/}, то при тлеющем разряде их концентрация будет в несколько десятков раз меньше, чем при дуговом разряде. Значит, в тлеющем разряде влияние распыленных частиц на распределение концентрации частиц газа может быть сведено к минимуму. Были проведены исследования тлеющего разряда в неоне и аргоне с молибденовым и медным антикатадами. В этих опытах напряжение на разряде было 600 в; ток разряда: на неоне - 220-240 ма, на аргоне - 80-100 ма. Расход газа: неона - 1,5 см³/мин, аргона - 0,8-1,2 см³/мин.

Кривые распределения относительной интенсивности спектральных линий аргона и неона, построенные по спектрограммам излучения описанного тлеющего разряда, приведены на рис. 6. Видно, что независимо от материала антикатода распределение интенсивности спектральных линий газа симметрично относительно середины газоразрядной камеры.

5. Как уже указывалось, режим работы дугового источника м.э.и. на всех этапах исследований оставался постоянным, в том числе и место подачи газа в газоразрядную камеру. В процессе исследований источников на циклотронах и на стенде было отмечено^{/3,13/}, что на выход ионов оказывает влияние место подачи газа. Поэтому представляет интерес исследование распределения относительной концентрации ионов вдоль оси разряда при подаче газа в область катода в сравнении с распределением при подаче газа в середину газоразрядной камеры. Для большей наглядности спектрограммы излучения источника снимались в этом случае с газоразрядной камерой, длина которой 150 мм (во всех описанных выше опытах длина камеры 85 мм). Кривые распределения относительной интенсивности спектральных линий аргона, построенные по этим спектрограммам, приведены на рис. 7. Из рисунка видно, что максимум интенсивности смещается в сторону катода при подаче газа вблизи него.

6. Исследовалось распределение относительной интенсивности спектральных линий неона в поперечном сечении дугового разряда. Эмиссионной щелью в этом случае служила щель шириною в 1 мм, прорезанная перпендикулярно оси разряда. Результаты исследований представлены на рис. 8. Пунктирная кривая, нанесенная на рисунке совместно с кривой распределения интенсивности, показывает относительную распыляемость катода, измеренную в плоскости, проходящей через ось симметрии разрядного шнура и

середины противоположных граней катода. Эта кривая построена по точкам измерения глубины выработки катода. Измерения производились с помощью микрометрической головки.

Обсуждение результатов

1. Напомним, что под интенсивностью спектральной линии обычно понимают энергию, излучаемую в 1 сек единицей объема (эрг/см⁻³сек) в результате спонтанных переходов^{/14,15/}. Для перехода $i \rightarrow k$ эта величина равна

$$I_{ik} = h\nu_{ik} A_{ik} N_i^r$$

Здесь A_{ik} - коэффициент Эйнштейна для спонтанного излучения, N_i^r - концентрация частиц на уровне i ($r=0$ -нейтральный атом, $r=1$ -однократный ион и т.д.).

Если плотности малы, среда оптически тонкая и имеет место максвелловское или близкое к нему распределение электронов в плазме по скоростям (что, по-видимому, справедливо для исследуемого источника^{/16/}), то в этом случае можно пренебречь ударами второго рода с атомами и ионами, явлениями рекомбинации и поглощением фотонов. При таких условиях заселение и опустошение уровней осуществляется в основном за счет столкновений с электронами и со стенками, а также за счет спонтанных переходов. Таким образом, можно сделать вывод, существенный для рассмотрения экспериментальных данных настоящей работы: интенсивность спектральных линий в наблюдаемом месте пропорциональна концентрации атомов или ионов на основном уровне N_1 , зависит от концентрации электронов N_e и их температуры T_e .

Ось газового разряда исследовавшегося источника м.э.и. параллельна магнитным силовым линиям, вследствие чего изменение плотности ионов вдоль магнитного поля (имеются в виду как ионы газа, так и ионы распыляемых электродов) много меньше, чем изменение ее поперек поля^{/17/}. В первом приближении можно предположить, что плотность ионов вдоль магнитного поля постоянна. Из условия квазинейтральности плазмы вытекает, что и плотность электронов N_e вдоль магнитного поля должна быть постоянной.

Из рис. 4 видно, что отношение интенсивностей различных спектральных линий аргона постоянно по всей длине газового разряда (то же самое наблюдалось для неона и криптона), хотя значения потенциалов возбуждения соответствующих линий (таблица 3)^{/5/} колеблется в пределах от 15 до 37,7 эв. Если учесть, что возбуждение может происходить одновременно с ионизацией, то максимальное значение суммарной энергии достигает почти 80 эв.

Т а б л и ц а 3

Линия	Длина волны в А	Потенциал возбуждения (в эв)	Потенциал ионизации (в эв)	С у м м а
Ar I	3770,37	15,01	-	15,01
Ar II	3850,57	18,86	15,8	35,76
Ar III	2724,84	27,83	27,6	55,53
Ar IV	2757,92	37,73	41,0	78,73

Учитывая постоянство отношения интенсивностей линий аргона, а также тот факт, что в исследовавшемся источнике м.з.и. предполагается максвелловское или близкое к нему распределение электронов по скоростям^{/18/}, можно сказать, что температура электронов вдоль магнитного поля постоянна (исключая, конечно, прикатодный слой).

На основании всего вышеизложенного мы можем теперь утверждать, что экспериментально полученные кривые распределения относительных интенсивностей спектральных линий атомов и ионов отображают относительное распределение концентрации соответствующих атомов и ионов вдоль плазменного столба дугового источника м.з.и.

2. Из рис. 8 видно, что интенсивность спектральных линий, принадлежащих частицам газа, спадает от центра к границе плазмы круче, чем относительная распыляемость катода. Как было показано ранее^{/12/}, скорость распыления катода исследуемого ионного источника пропорциональна квадрату напряжения на дуге и току дуги в широких пределах этих параметров. Поскольку потенциал катода в любой точке одинаков, то скорость распыления различных участков грани катода, обращенной к плазме, будет пропорциональна плотности тока ионов в данном месте, то есть числу бомбардирующих частиц. Учитывая, что плотность тока ионов, приходящих на катод, пропорциональна их концентрации, и имея в виду сильное магнитное поле вдоль разряда, можно заключить, что пунктирная кривая рис.8 отражает распределение плотности ионов по сечению газоразрядного шнура.

Из условия квазинейтральности плазмы следует, что и концентрация электронов у границы плазмы будет меньше, чем на оси разряда. Поскольку интенсивность линий пропорциональна концентрации электронов и возбуждающихся ионов, то кривая интенсивности линий будет спадать к границе плазмы примерно как квадрат спада концентрации ионов. Это удовлетворительно совпадает с экспериментальными данными.

Причинами такого распределения концентрации плазмы по сечению может служить как уход зарядов на стенки газоразрядной камеры, так и разность температуры центра катода и краевых участков. Так, например, изменение температуры вольфрама от 3300°K до 3400°K приводит к изменению плотности тока эмиссии в 1,7 раза^{/18/}.

3. Результаты, приведенные на рис. 6, получены при тлеющем разряде, то есть в этом случае концентрацией распыленных частиц материалов катода и антикатода по сравнению с концентрацией частиц газа можно пренебречь. Здесь мы видим симметричное расположение максимума плотности частиц газа по отношению к катоду и антикатоде. Причем положение его не зависит ни от рода газа, ни от материала катода и антикатода. По сути дела, эти кривые отражают относительную плотность частиц нейтрального газа, определяющуюся местом подачи газа в газоразрядную камеру и местом ухода его из камеры (как указывалось выше, подача газа производилась в середину газоразрядной камеры, которая является почти открытой со стороны катода и антикатода).

На рис. 3 показаны данные распределения концентрации частиц различных газов при одном и том же антикатоде, в то время как на рис. 5 приведены данные, полученные при работе с одним газом, но с различными антикатадами. Из рис. 3 видно, что максимумы плотности частиц газа сдвинуты относительно середины газоразрядной камеры в сторону антикатода; причем чем больше атомный вес газа, тем больше отмеченный сдвиг максимума.

Из рис. 5 видно, что максимумы плотности частиц аргона совпадают при молибденовом и железном антикатоде, а при медном антикатоде максимум сдвинут далеко в сторону катода. Одновременно с этим мы видим, что частицы меди продвигаются значительно дальше, чем Mo и Fe. Имея в виду данные обоих этих рисунков, можно сказать, что в области катода и антикатода из распыленных частиц создаются дополнительные давления, смещающие частицы газа в ту или иную сторону. О влиянии частиц катодов на ионообразование делались предположения также в работе^{/18/}.

Из экспериментальных данных других авторов (см., например,^{/10,11/} известно, что коэффициенты распыления W, Mo и Fe почти одинаковы, а меди - в 5 раз больше. Полярная диаграмма направленности вылета частиц железа близка к сферической (близка к закону косинуса), молибдена - несколько приплюснута, а у меди, наоборот, вытянута вдоль оси, перпендикулярной к плоскости распыления.

Таким образом, из всех данных мы видим, чем больше скорость распыления материала катода или антикатода, чем больше атомный вес этого материала и чем сильнее направленность вылета частиц вдоль оси, перпендикулярной к плоскости распыления, тем дальше отодвигается максимум плотности частиц газа от этого электрода.

В ы в о д ы

1. Распределение плотности атомов и ионов газа вдоль дугового газового разряда в исследовавшемся источнике м.з.и. имеет максимум, расположенный вблизи середины газоразрядной камеры. Положение его зависит как от рода газа, так и от материала катода и антикатода. Из условия постоянства плотности ионов вдоль магнит-

ного поля следует, что недостающее число ионов газа в области катода и антикатада компенсируется ионами, получающимися из распыленных частиц этих электродов.

2 На оси разряда плотность зарядов больше, чем на границе плазмы.

В заключение авторы выражают благодарность Ю.П. Третьякову и Го Ци-цяню за помощь, оказанную при проведении экспериментов. Мы весьма признательны профессору А.Р. Стриганову и Г.В. Шолину, принимавшим участие в обсуждении полученных результатов.

Благодарим профессора Г.Н. Флерова за внимание к проводимой работе, а также за полезные советы при обсуждении результатов.

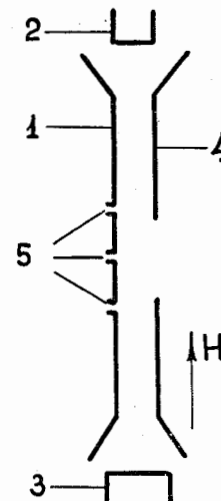
Л и т е р а т у р а

1. А.И. Настюха, А.Р. Стриганов и др. Атомная энергия, т. 8, вып. 1, 44 (1960).
2. А.С. Пасюк, И.А. Шелаев, Го Ци-цянь, Ю.П. Третьяков. ПТЭ, № 5, 23 (1963).
3. А.С. Пасюк, Го Ци-цянь, Ю.П. Третьяков. Препринт ОИЯИ, 1523, Дубна, 1964.
4. Э.Я. Вайнштейн. Методы количественного рентгеноспектрального анализа. Изд-во АН СССР, 1956.
5. Р. Соьер. Экспериментальная спектроскопия, ИЛ, Москва, 1953.
6. А.Н. Зайдель, В.К. Прокофьев и др. Таблицы спектральных линий. Физматгиз, Москва, 1962.
7. S.Goldsmitt and A.S.Kaufmann, Proc. Phys. Soc., 81, 544 (1963).
8. А.А. Бабушкин, П.А. Бажулин и др. Методы спектрального анализа. Изд-во Московского университета, 1962.
9. O.Almen and G.Bruce, Nucl. Instr. and Meth., 11, 257-278 (1961).
10. P.K.Rol, J.M. Fluit and J.Kistemaker. Proceedings of the International Symposium on Isotope Separation, North-Holland. Publishing Company-Amsterdam, 1958, p. 657.
11. G.Weigner and D.Rosenberg. J.Appl. Phys., 31, 177 (1960).
12. А.А. Пасюк, Ю.П. Третьяков, В. Станку. Препринт ОИЯИ, 1644, Дубна, 1964.
13. А.С. Пасюк, Го Ци-цянь. Препринт ОИЯИ 1522, Дубна, 1964; ПТЭ, № 1, 1965.
14. С.Э. Фриш. Оптические спектры атомов. Физматгиз, 1963.
15. И.И. Собельман. Введение в теорию атомных спектров. Москва, Физматгиз, 1963.
16. Ю.Д. Пигаров, П.М. Морозов. ЖТФ, т. 31, вып. 4, 476 (1961).
17. D.Bohm (The Characteristics of Electrical Discharges in Magnetic Fields, ed A.Guthrie and R.K. Wakerling, p. 100). Mc Grow Hill Book Comp., INC, 1949.

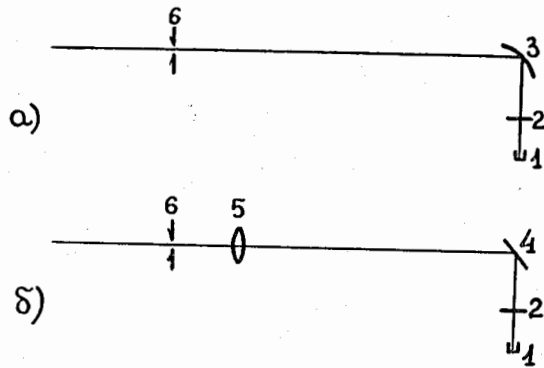
18. M.Von Ardenne. Tabellen der Elektronenphysik, Ionenphysik and Übermikroskopie, II Band, Randgebiete und Hilfsgebiete, 717. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1956.

19. Б.Н. Маков. Препринт ОИЯИ, Р-374, Дубна, 1959, стр. 169.

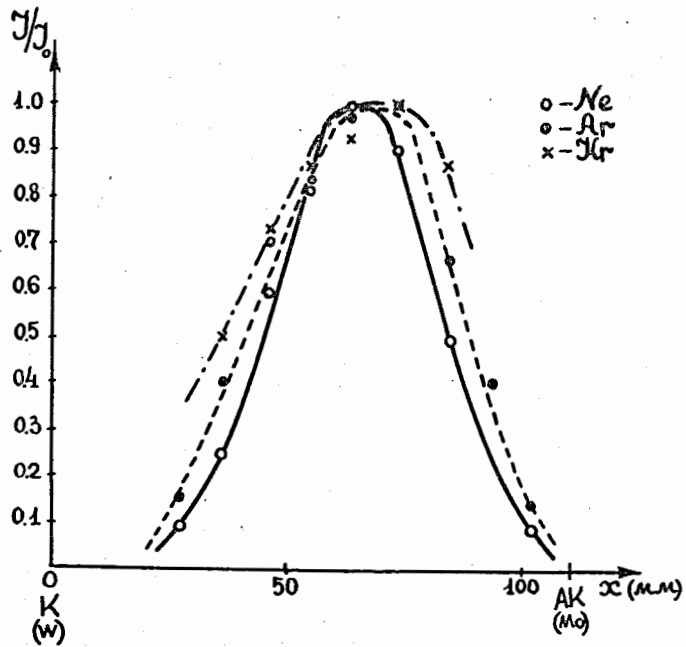
Рукопись поступила в издательский отдел
3 марта 1965 г.



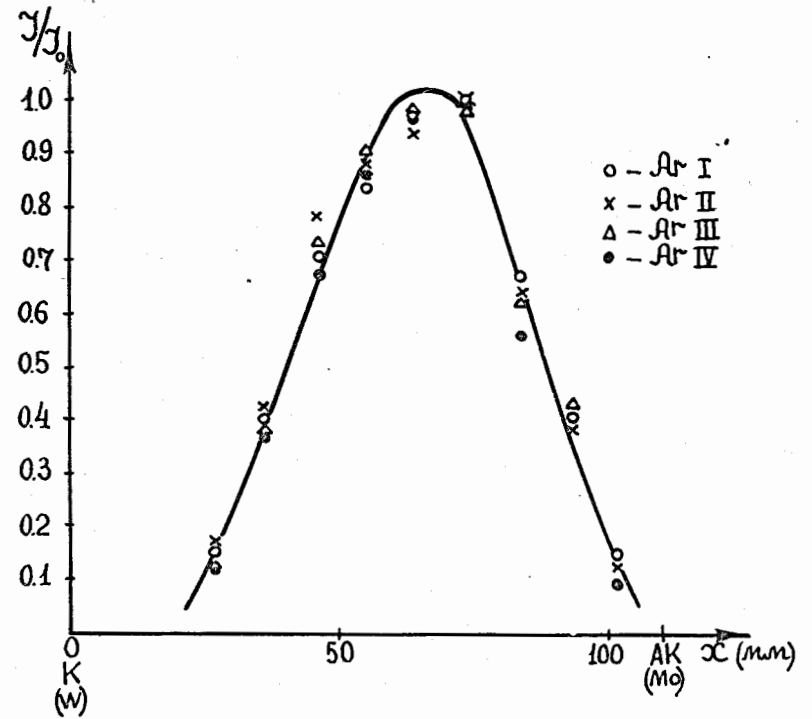
Р и с. 1. Геометрия газоразрядной камеры источника МЗИ. 1-анод; 2-катод (К); 3-антикатод (АК); 4-пластинка с эмиссионной щелью либо с эмиссионными отверстиями; 5-отверстия для подачи газа. Стрелкой отмечено направление магнитного поля Н. Сечение газоразрядного шнура так же, как и грань катода, обращенная к разряду, имеет размеры 7x7 мм.



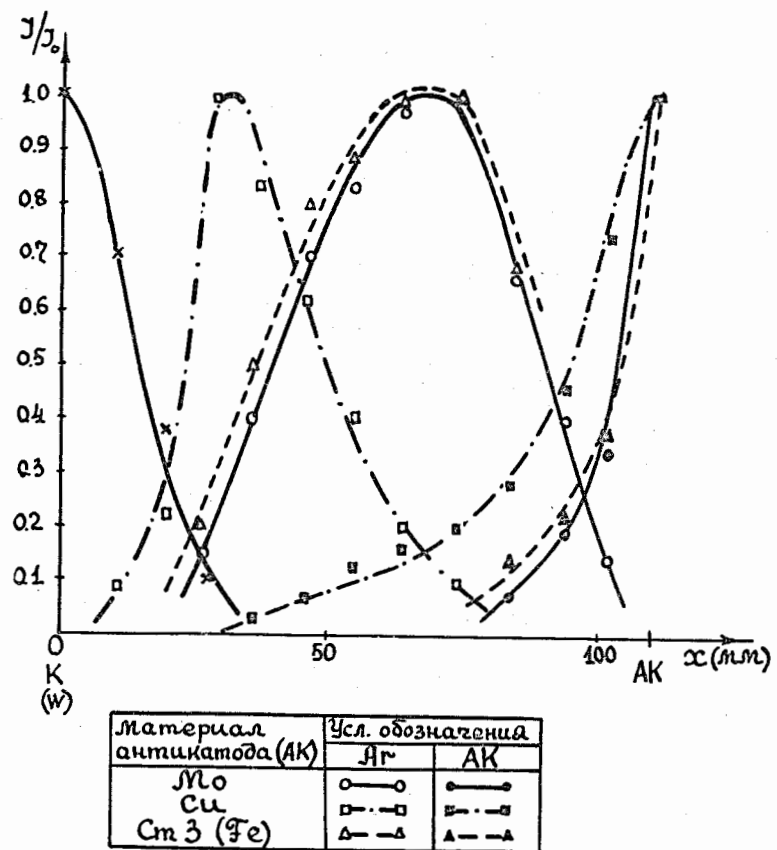
Р и с. 2. Оптические схемы эксперимента. 1 - эмиссионная щель либо эмиссионные отверстия; 2 - кварцевое окно; 3 - сферическое зеркало; 4 - плоское зеркало; 5 - кварцевый конденсор, $f = 150$ мм; 6 - щель спектрографа ИСП-28.



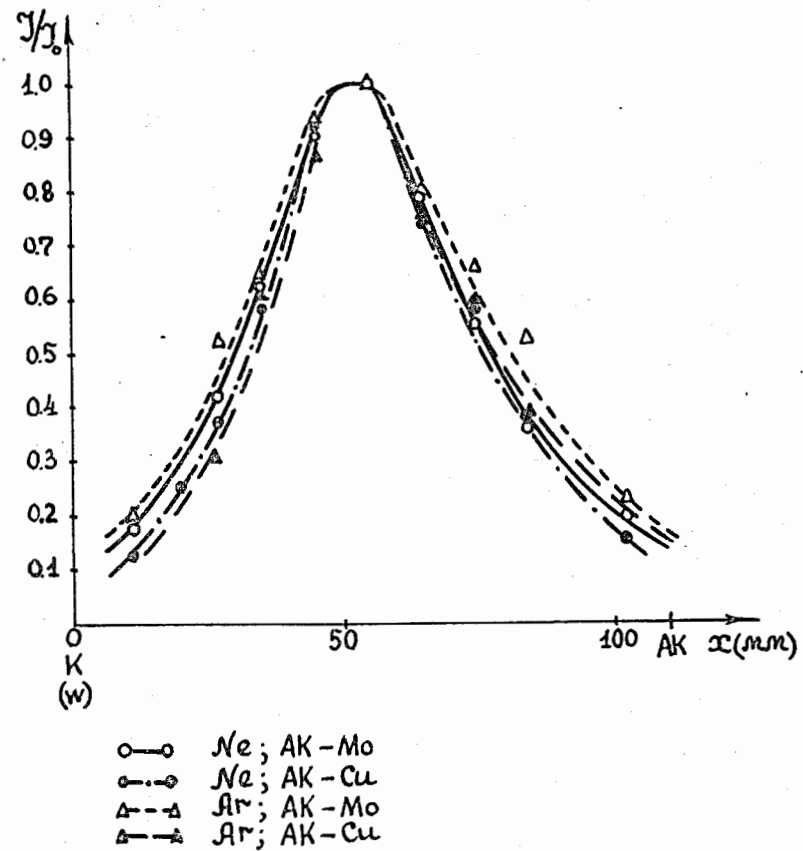
Р и с. 3. Распределение интенсивности спектральных линий Ne, Ar и Kr вдоль дугового разряда.



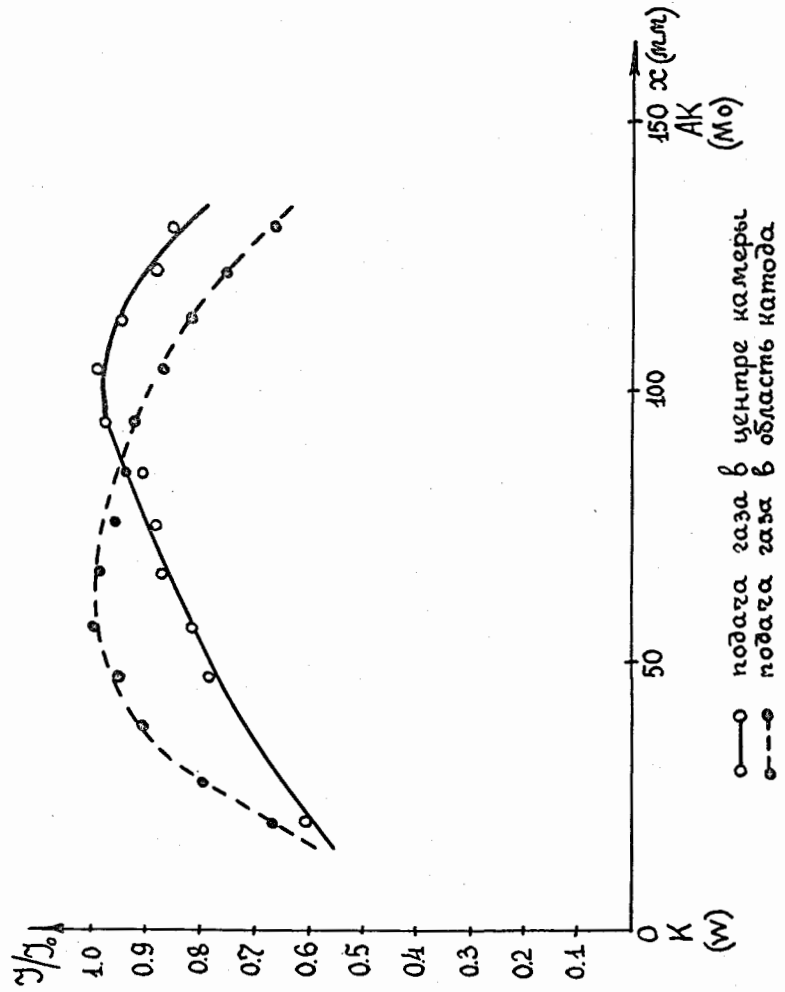
Р и с. 4. Распределение интенсивности спектральных линий Ar I, Ar II, Ar III, Ar IV вдоль дугового разряда.



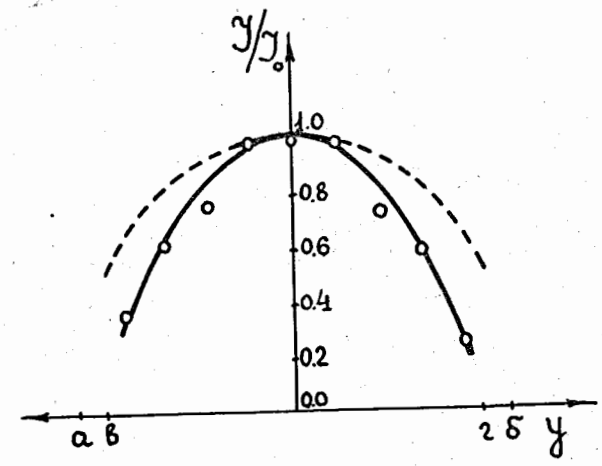
Р и с. 5. Зависимость распределения интенсивности спектральных линий аргона от материала антикатоды.



Р и с. 6. Распределение интенсивности спектральных линий аргона и неона в тлеющем разряде.



Р и с. 7. Зависимость распределения интенсивности спектральных линий аргона от места подачи газа в камеру дугового источника (длина камеры 150 мм).



Р и с. 8. Распределение интенсивности спектральных линий неона по сечению дугового разряда. Точки "а" и "б" на оси "у" обозначают стенки камеры, точки "в" и "г" — границы катода.