

19
И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН С С С Р

ПРЕПРИНТ И Я Ф 39 - 73

Ю.И.Бельченко, Г.И.Димов, В.Г.Дудников

**ЭМИССИЯ ИНТЕНСИВНЫХ ПОТОКОВ
ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ С ПОВЕРХНОСТЕЙ,
БОМБАРДИРУЕМЫХ БЫСТРЫМИ ЧАСТИЦАМИ
ИЗ РАЗРЯДА**

Новосибирск

1973

ЭМИССИЯ ИНТЕНСИВНЫХ ПОТОКОВ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ
ИОНОВ С ПОВЕРХНОСТЕЙ, БОМБАРДИРУЕМЫХ БЫСТРЫМИ
ЧАСТИЦАМИ ИЗ РАЗРЯДА

Ю.И.Бельченко, Г.И.Димов, В.Г.Дудников

А Н Н О Т А Ц И Я

Из плазмы разряда в смеси водорода с цезием получен по-
ток ионов H^- с плотностью до $3,7 \text{ а.см}^{-2}$. Интенсивный поток ио-
нов H^- обусловлен их эмиссией с холодного катода, бомбарди-
руемого быстрыми частицами из разряда.

При исследовании эмиссии отрицательных ионов из водородной плазмы разряда в планотроне с холодным катодом были получены интенсивные потоки ионов H^- с плотностью тока до $0,75 \text{ а}\cdot\text{см}^{-2}$. Оценки показывают, что известные процессы образования ионов H^- в водородной плазме (диссоциативные столкновения электронов с невозбужденными и возбужденными молекулами и положительными молекулярными ионами водорода [1 - 4]) при учете известных механизмов разрушения ионов H^- в плазме [5 - 9] не могут обеспечить скорость их рождения, соответствующую наблюдаемому выходу из плазмы. Было обнаружено, что добавление паров цезия существенно интенсифицирует образование ионов H^- в разряде. Из разряда в планотроне с добавкой цезия удалось получить пучки ионов H^- с плотностью тока до $3,7 \text{ а}\cdot\text{см}^{-2}$. Для выяснения механизмов, поставляющих ионы H^- в плазму разряда, были поставлены специальные эксперименты. Совокупность полученных данных согласуется с предположением, что большая скорость образования ионов H^- обусловлена их эмиссией с поверхности катода разряда в планотроне. Ниже дано описание методики исследований и приведены результаты, обосновывающие этот вывод.

Были исследованы зависимости эмиссионных свойств и энергетического спектра извлеченного пучка ионов H^- от варьируемых параметров (ток разряда, средняя мощность разряда, плотность водорода, плотность паров цезия, материалы электродов, геометрия разрядной камеры и т.д.). Разрез источника со схемой вытягивания и схемой энергетического анализа пучка показан на рис.1. Газоразрядная камера помещена между полюсными наконечниками (4) электромагнита. Силовые линии магнитного поля параллельны образующим центральной пластины катода (3) и охватывающего её анода (2) планотрона, между которыми прикладывается напряжение, поддерживающее разряд (прямоугольные импульсы длительностью 10^{-3} сек.). Распространение плазмы вдоль магнитного поля ограничено боковыми щитками катода (6). Порции водорода впрыскиваются в газоразрядную камеру быстродействующим электромагнитным клапаном (1). Цезий подается в газоразрядный промежуток при нагревании смеси бихромата цезия с титаном, помещаемой в полость центральной пластины катода или в специальный контейнер. Плотность паров цезия регулируется за счет изменения температуры корпуса источника. Вытягивающий элек -

трод (5), соединенный с полюсами электромагнита (4), заземлен. Высокое напряжение отрицательной полярности подается на изолированный корпус планотрона. Отрицательные ионы вытягиваются из плазмы, ускоряются и формируются в пучок (8) электрическим полем, конфигурация которого определяется вытягивающим электродом (5) и эмиттирующей поверхностью плазмы, проникающей через эмиссионную щель (7). Пучок отрицательных ионов (8) разделяется по массам в магнитном поле источника и направляется на коллектор (9) или на пластину анализирующего конденсатора (10). Часть пучка ионов выбранной массы, прошедшая через входную щель конденсатора, поворачивается электрическим полем конденсатора на 90° и через выходную щель попадает на цилиндр Фарадея или первый диод вторично-электронного умножителя (11) с истоковым повторителем, сигнал с которого регистрируется осциллографом.

Сильноточный разряд в водороде с падением $5 - 6 \cdot 10^2$ в зажигается между катодом и анодом планотрона, если плотность водорода в газоразрядном промежутке больше 10^{16} мол·см⁻³ и напряженность магнитного поля больше $1,5 \cdot 10^3$ гаусс. При добавлении в разряд паров цезия падение напряжения уменьшается до $1 - 2 \cdot 10^2$ в (в некоторых случаях до 50 в). Минимальная плотность водорода и напряженность магнитного поля, необходимые для зажигания разряда, в присутствии паров цезия меньше, чем в чистом водороде ($3 \cdot 10^{15}$ мол·см⁻³ и 10^3 гаусс, соответственно).

Пучки ионов H^- с максимальной плотностью тока были получены из разрядов с "толстой" центральной пластиной катода из молибдена при зазоре между катодом и анодом 0,5 мм. Зависимость плотности потока ионов H^- от тока разряда (размеры катода $4 \times 6 \times 10$ мм³) в оптимизированных по всем параметрам условиях почти линейна до тока разряда 40 а (скорость прироста $0,6$ а см⁻² на 10 а тока разряда) и насыщается на уровне $3,7$ а·см⁻² при токе разряда 10^2 а в случае разряда с цезием. Для разряда в чистом водороде зависимость подобная, но скорость роста и предельная плотность тока в 5 раз меньше, а насыщение наступает при токе разряда $1,5 \cdot 10^2$ а. Интенсивность пучка примерно пропорциональна площади эмиссионной щели. Пучок ионов H^- с током $0,3$ а получен из источника с эмиссионной щелью 1×10 мм².

Интенсивность пучка ионов H^- уменьшается при увеличении напуска водорода сверх необходимого для стабильного горения разряда (необходимый расход водорода несколько увеличивается с ростом тока разряда). Увеличение зазора катод-анод уменьшает предельную плотность потока ионов H^- (необходимый расход водорода при этом несколько уменьшается). С катодами из тантала, титана, нержавеющей стали, вольфрама предельные токи ионов H^- меньше, а токи тяжелых ионов примесей больше, чем с катодом из молибдена (в последнем случае доля ионов примесей меньше 10%). Добавление в разряд паров калия и натрия уменьшало падение напряжения на разряде до $1,5 - 2 \cdot 10^2$ в, но не дало значительного прироста тока ионов H^- . Для эмиссионных свойств плазмы сильноточного разряда в пеннинговской геометрии, получающейся при удалении центральной пластины катода (3 на рис.1), были получены аналогичные зависимости, но ток ионов H^- в подобных условиях был примерно в 2 раза меньше, чем из разряда в планотроне.

При исследовании энергетического спектра пучков ионы H^- вытягивались из газоразрядной плазмы через эмиссионную щель шириной 0,2 - 0,5 мм (длина 1 - 10 мм). Длина вытягивающего промежутка 0,5 - 1 мм. Вытягивающее напряжение и напряжение на анализирующем конденсаторе были стабилизированы с точностью до 1 в на уровне 10^4 в. Для точных измерений этих напряжений использовались цифровые вольтметры Ц-1412 с прецизионными резистивными делителями. Быстрые изменения этих напряжений передавались на осциллографы через емкостные делители. Входная и выходная щели в пластине анализирующего конденсатора имели ширину $5 \cdot 10^{-2}$ мм, расстояние между ними 20 см. Расчетное энергетическое разрешение 5 эв при энергии пучка 10^4 эв. Для быстрого просмотра спектра предусмотрена пилообразная добавка к постоянному напряжению анализирующего конденсатора, позволяющая регистрировать энергетический спектр пучка в разные моменты работы источника за время 10^{-4} сек. Источник работает с частотой $0,1 \div 10$ гц при полной воспроизводимости особенностей от импульса к импульсу.

Примеры энергетических спектров ионных пучков, полученных из разряда с цезием в планотроне, показаны на рис.2 (приведены рисунки с осциллограмм; развертка калибровалась по смещению пиков при малых изменениях вытягивающего напряжения).

Энергетический спектр пучка планотрона состоит из двух пиков, разделенных провалом. В энергетическом спектре пучков из ряда с пеннинговской геометрией всегда наблюдался только первый пик. Энергетическая ширина первого пика (с меньшей энергией) сильно зависит от плотности водорода и амплитуды быстропеременной составляющей падения напряжения на разряде (шумы, ВЧ-колебания). Для разрядов с чистым водородом и в планотроне, и в пеннинговской геометрии были найдены условия, при которых в напряжении на разряде не обнаруживалось колебаний (разряд без шумов). Наблюдаемая энергетическая ширина 1-го пика пучка из разряда без шумов (рис.3) фактически соответствует разрешающей способности нашего анализатора. В падении напряжения на разряде с цезием практически всегда присутствовали шумы или сравнительно регулярные колебания, амплитуда и вид которых зависели от различных условий (плотность водорода и цезия, магнитное поле, геометрия камеры и т.д.). Энергетическая ширина 1-го пика пучка из разряда с шумами значительно больше, чем в случае разряда без шумов, и увеличивается пропорционально их амплитуде. Тщательные измерения показали, что энергия ионов в максимуме первого пика в пределах точности измерений (не хуже 0,1%) соответствует вытягивающему напряжению (анализирующий конденсатор калибровался по приращениям вытягивающего напряжения с настройкой на максимум 1-го пика). Таким образом, ионы 1-го пика, соответствующего потенциалу выемки в аноде, прилегающей к эмиссионной щели, имеют сравнительно малый энергетический разброс.

Энергетическая ширина пика с большей энергией (2-ой пик), значительно превышает ширину первого (см.рис.2). Расстояние между максимумами 1-го и 2-го пиков равно или несколько превышает величину напряжения на разряде, усредненного по времени регистрации. Это иллюстрируется спектрами на рис.2а, при регистрации которых напряжение на разряде варьировалось за счет изменения плотности цезия в разряде. В спектре пучков из ряда с цезием при минимальном напуске водорода почти все ионы сосредоточены во 2-ом пике. При увеличении напуска водорода интенсивность первого пика увеличивается, а интенсивность второго уменьшается (рис.2б). У пучка из разряда без цезия высота второго пика в 10^3 раз меньше высоты первого при минимальной подаче водорода (при этом разряд, как правило, с шумами). Расстояние между пиками совпадает с напряжением на разряде. При

больших подачах водорода второй пик не регистрируется.

На основании перечисленных данных был сделан вывод, что ионы второго пика образуются за счет вторичной отрицательно-ионной эмиссии с катода планотрона, бомбардируемого быстрыми частицами из разряда. Энергия части этих ионов больше напряжения на разряде за счет начальной кинетической энергии, полученной от бомбардирующих частиц. Энергией, меньшей напряжения на разряде, обладают ионы, образовавшиеся за счет резонансной перезарядки первичных ионов в слое прикатодного падения потенциала. При движении к эмиссионной щели ионы второго (катодного) пика проходят через слой плазмы с быстрыми электронами и положительными ионами. Из-за малого времени жизни отрицательных ионов в такой плазме (разрушение электронами, комбинация с ионами [5 - 7]) через этот слой могут пройти только быстрые ионы H^- . Основная доля ионов первого (анодного) пика образуется при резонансной перезарядке быстрых ионов H^- , принадлежавших катодному пику, на атомарном водороде в анодной выемке около эмиссионной щели. Быстрые электроны, попавшие в эту выемку, легко уходят на анод вдоль силовых линий магнитного поля, что существенно уменьшает вероятность разрушения медленных ионов H^- , образующихся здесь в результате перезарядки (электрическое поле, обусловленное амбиполярной диффузией, должно поджимать медленные ионы H^- к центру полости и фокусировать ионы катодного пика на эмиссионную щель). Перезарядка быстрых ионов H^- , летящих к эмиссионной щели через выемку в аноде (ее глубина 2 мм), становится существенной при плотности атомарного водорода 10^{15} см^{-3} (сечение резонансной перезарядки $5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ при энергии 10^2 эв [9]). При меньших плотностях пучок формируется из быстрых ионов, ускоренных падением напряжения на разряде, при больших - практически все ионы катодного пика преобразуются в ионы анодного, что и наблюдается при увеличении напуска водорода (рис.2б). Высокой плотностью водорода и большей степенью диссоциации можно объяснить сильное подавление катодного пика в спектре пучка из разряда без цезия. Появление ионов с энергией, меньшей, чем вытягивающее напряжение (в частности, ступенька на рис.3) обусловлено их рождением в вытягивающем промежутке при резонансной перезарядке. По плотности тока разряда на катоде можно оценить плотность прикатодной плазмы и время жизни ионов в

в такой плазме [5 - 7]. Разрушение ионов H^- , пролетающих слой плазмы толщиной 0,5 мм с энергией 10^2 в, должно стать существенным при токе разряда 10^2 а. В разряде с цезием поток H^- с катода планотрона составляет 10% от тока разряда. Из-за сильного разрушения ионов H^- трудно оценить эффективность их образования в разряде без цезия и в разряде с пеннинговской геометрией, однако она достаточно высокая.

Результаты описанных исследований позволяют создать эффективные поверхностно-плазменные источники ярких интенсивных пучков отрицательных ионов водорода. Несомненно, что этот метод пригоден для получения интенсивных пучков отрицательных ионов других элементов.

При исследовании вторичной отрицательно-ионной эмиссии в "чистых" условиях потоки вторичных отрицательных ионов малы [10, 11], тогда как с поверхностей, контактирующих с плазмой разряда, получают очень интенсивные потоки отрицательных ионов. Поскольку с отрицательными ионами связан один из очень эффективных процессов деионизации плазмы - квазирезонансная передача электрона от отрицательного иона к положительному [12], интенсивное образование отрицательных ионов должно влиять на многие процессы в газовом разряде. Возможно, что с рассмотренными процессами связано сильное ускорение деионизации при добавлении водорода в аргонные СВЧ-разрядники [13, 14], повышенная концентрация ионов H^- в плазме разряда, горящего в смеси натрия с водородом [3], и ряд других эффектов.

Л и т е р а т у р а

1. Хвостенко В.И., Дукельский В.М. ЖЭТФ, 33, 851 (1957).
2. Schulz G.J. "Phys. Rev." 113, 816 (1959).
3. Кучинский В.В. и др. " V В.К.Э.А.С., Ужгород, Тезисы докладов" 189 (1972).
4. Dubrovsky G.V., Ob'edkov V.D., Janev K.K. " V I.C.P.E.A.C., Leningrad, Abstracts", 342 (1967).
5. Rundel R.P., Harrison M.F. "V I.C.P.E.A.C., Leningrad, Abstracts", 36 (1967).
6. Walton D.S., Peart B., Dolder K.T., "J. Phys. B. Atom. Molec. Phys." 4, 1343 (1971).
7. Moseley J., Aberth W., Peterson J.R., "Phys. Rev. Let.," 24, 9, 435 (1970).
8. Hasted G.B., Phil D., Smit R.A. "Proc. Roy. Soc." A-235, 349 (1956).
9. Hummer D.G., Stebbings R.F., Fite W.L., "Phys. Rev.," 119, 668 (1960).
10. Фогель Я.М., УФН, 91, № 1, 75 (1967).
11. Арифов У.А. "Взаимодействие атомных частиц с поверхностью твердого тела", Москва, Наука (1968).
12. Bates, Massey, "N.S.W. Philos. Mag.," 45, III, (1954)
13. Walsh D., " J. Electronics", I, ser. I, 4, (1956).
14. Абрамова Т.С., Старик А.М. ЖТФ, 42, 1725 (1972).

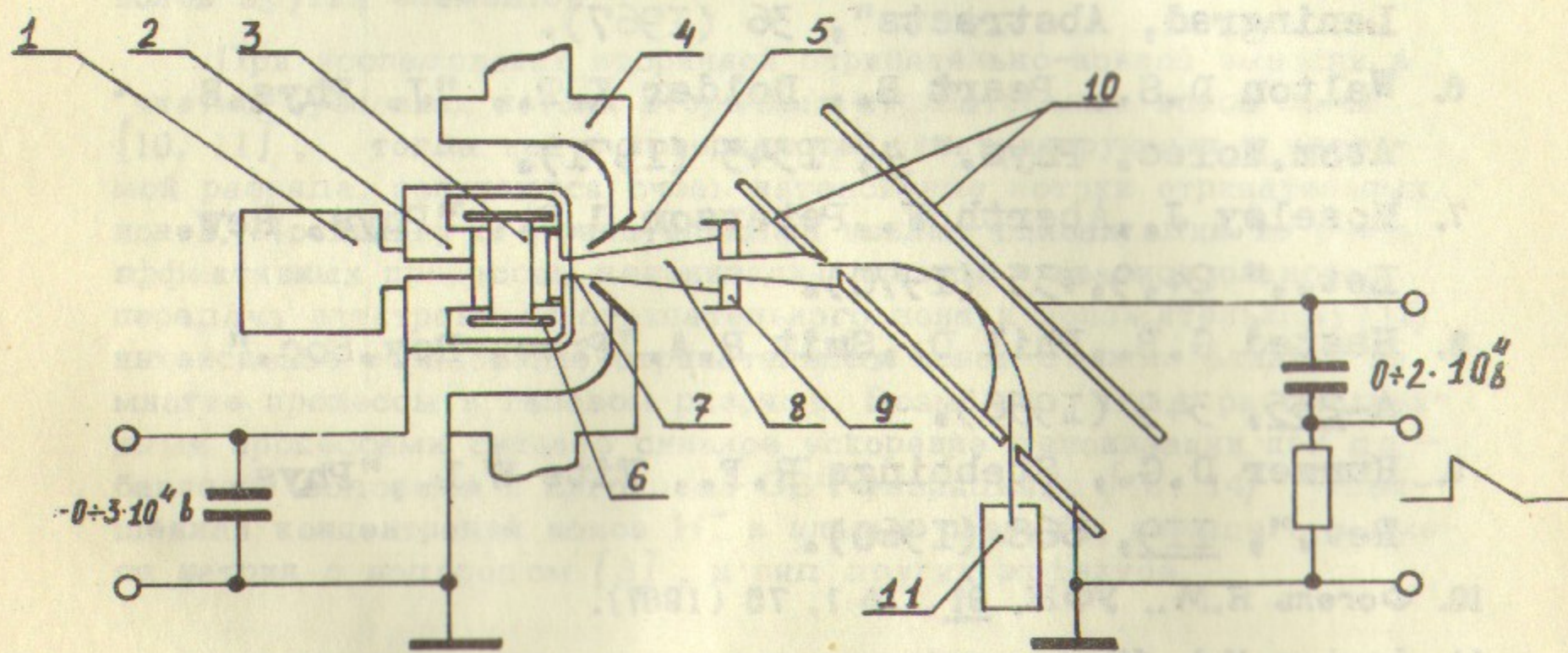


Рис.1. Схема получения и энергетического анализа пучка отрицательных ионов водорода.
 1 - импульсный дозатор водорода, 2 - анод источника, 3 - центральная пластина катода, 4 - полюсные наконечники электромагнита, 5 - вытягивающий электрод, 6 - боковые щитки катода, 7 - эмиссионная щель, 8 - пучок ионов H^- , 9 - коллектор ионов, 10 - пластины анализирующего конденсатора, 11 - коллектор анализатора (цилиндр Фарадея или ВЭУ).

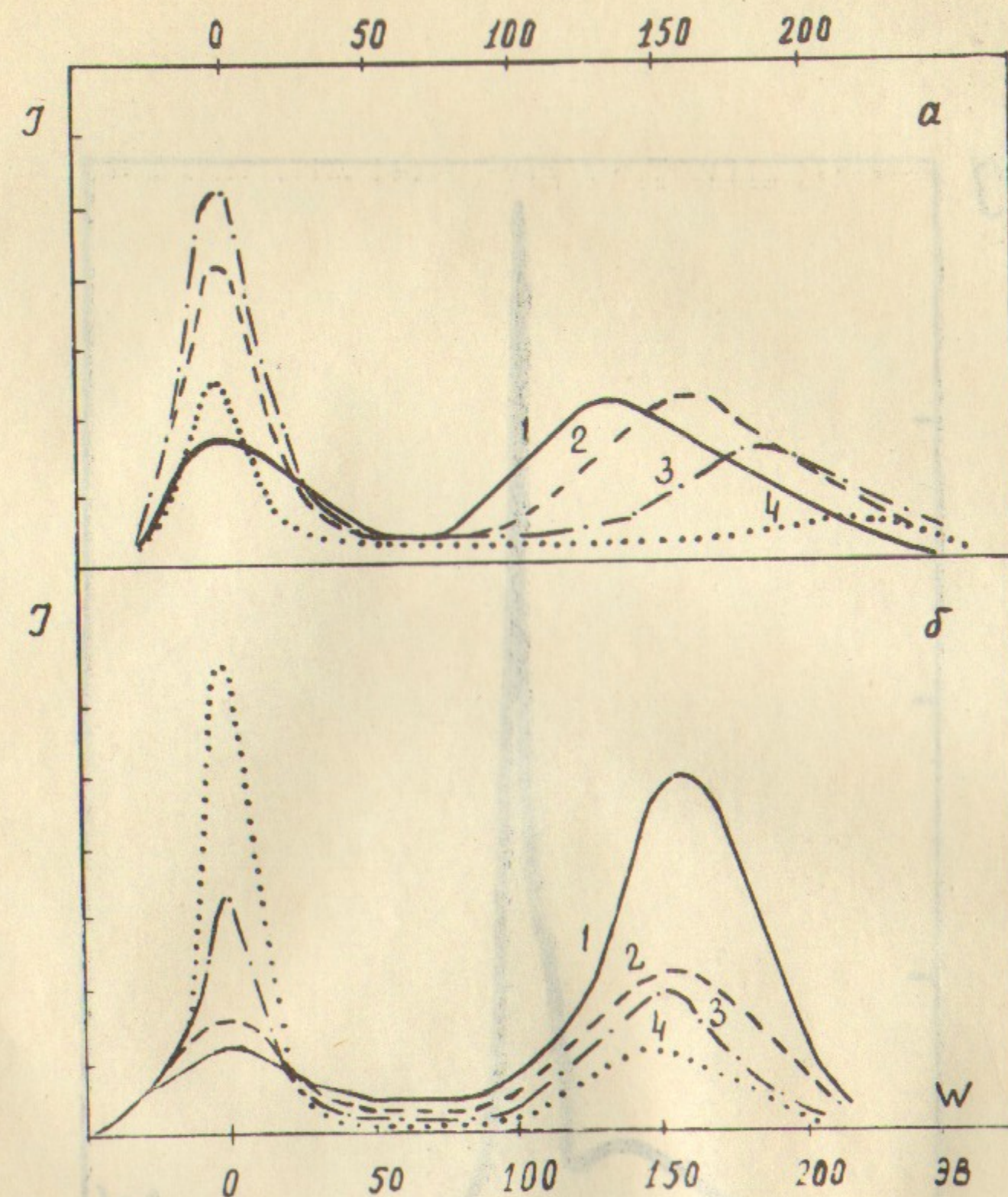


Рис.2. Энергетические спектры пучков, полученных из плазмы разрядов с цезием в планотроне:
 а) при различных падениях напряжения на разряде U_p ,
 1 - $U_p = 120$ в, 2 - $U_p = 150$ в, 3 - $U_p = 160$ в, 4 - $U_p = 210$ в;
 б) при различных напусках водорода Q молекул за импульс
 1 - $Q = 10^{16}$, 2 - $Q = 1,2 \cdot 10^{16}$, 3 - $Q = 1,7 \cdot 10^{16}$, 4 - $Q = 2,2 \cdot 10^{16}$.

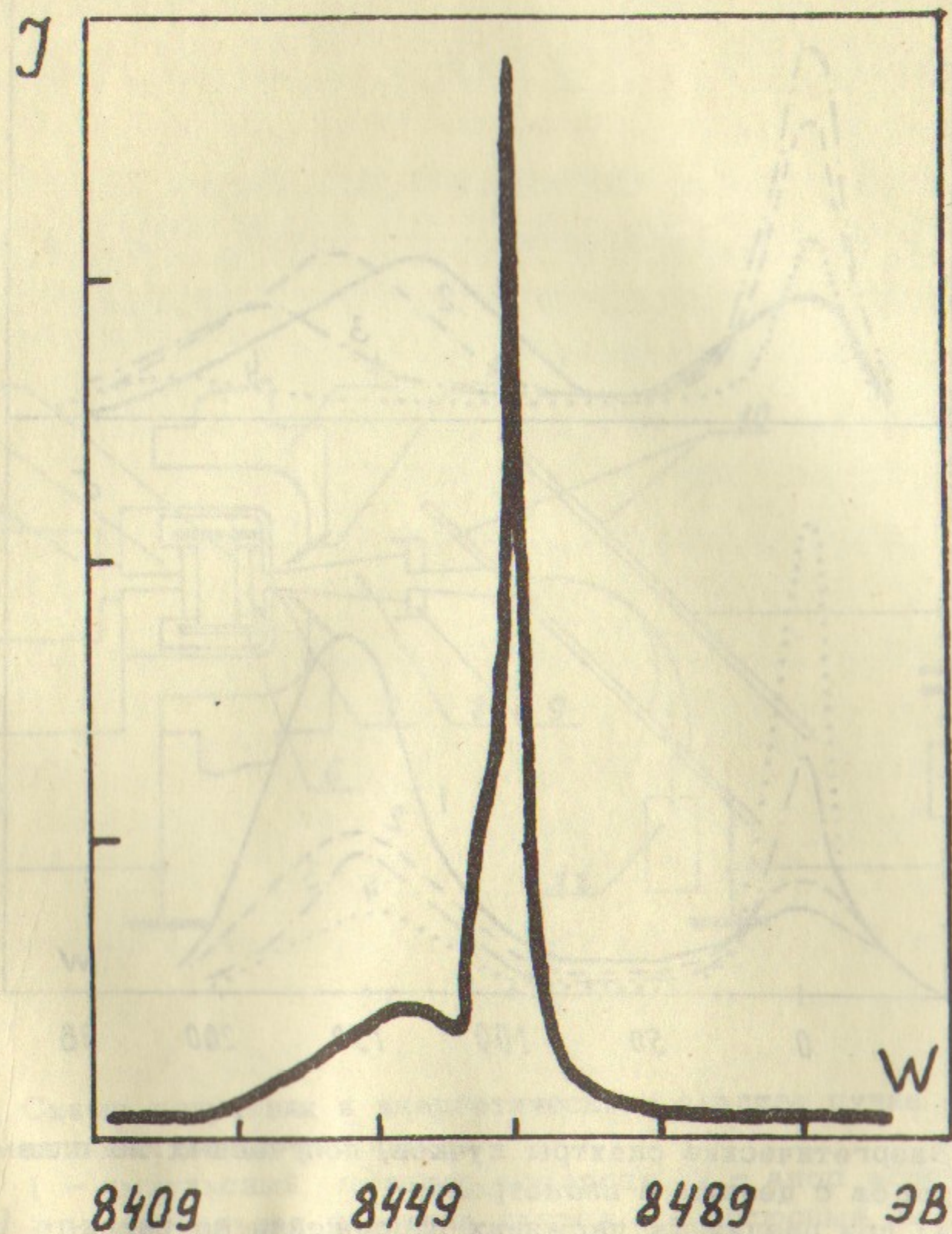


Рис.3. Анодный участок энергетического спектра пучка из разряда без шумов.

Ответственный за выпуск С.Н.Родионов
 Подписано к печати 16/У-73г. МН08253
 Усл. 0,7 печ.л., тираж 200 экз. Бесплатно.
 Заказ № 39 . ПРЕПРИНТ

Отпечатано на ротапринтере в ИЯФ СО АН СССР,нв.