

С 412

29/кн-66

А-623

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P13 - 3020



Б. Амов

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОИОНИЗАЦИИ
НА НАКАЛЕННЫХ ОКИСЛАХ С ПОМОЩЬЮ
РАДИОАКТИВНЫХ ИНДИКАТОРОВ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

1966

Исследование термоионизации на накаливаемых окислах с помощью радиоактивных индикаторов

В статье даются результаты исследований термоионизационных свойств окислов В, Si, Mn, Y, Zr, Nb по отношению к радиоактивным изотопам редких земель и другим элементам.

В работе показано, что термоионизационные свойства окислов существенно зависят как от их состава, так и от материала подложки, на которую они наносятся. Коэффициенты ионизации указанных элементов на исследованных окисных слоях превосходят в 50-100 раз коэффициенты ионизации для вольфрамовой ленты. Опыты проводились с целью изучения возможности применения термически устойчивых окисных слоев для термоионизации более широкого круга элементов в масс-спектрометрических исследованиях.

Препринт Объединенного института ядерных исследований,
Дубна, 1966.

Investigation of Thermal Ionization by Incandescent Oxides Using Radioactive Indicators

The results of investigation of thermal ionization properties of В, Si, Mn, Y, Zr, Nb oxides with respect to the radioactive isotopes of rare earths and other elements are given. It is shown that the thermal ionization properties of oxides essentially depend on its compound as well as on material covering the backing. Ionization coefficients of the above elements for the investigated oxide layers exceed 50-100 times those of wolfram band. The experiments were aimed at studying the possibility of using the thermostable oxide layers for thermal ionization of more great number of elements in mass spectrometer investigations.

Preprint, Joint Institute for Nuclear Research,
Dubna, 1966.

P13 - 3020

Б. Амов

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОИОНИЗАЦИИ
НА НАКАЛЕННЫХ ОКИСЛАХ С ПОМОЩЬЮ
РАДИОАКТИВНЫХ ИНДИКАТОРОВ

4673/1 мр
1/5/79



1. В в е д е н и е

Термоионизация находит широкое применение в масс-спектрометрии при анализе малых количеств вещества в твердой фазе, в частности, продуктов ядерных реакций и радиоактивных изотопов.

Положительными сторонами термоионизационных ионных источников являются простота их конструкции, очень малый разброс энергии эмитированных ионов и возможность работы с неограниченно малыми количествами вещества.

Главным недостатком этих источников является селективность ионизации. Коэффициент ионизации зависит существенно от потенциала ионизации эмитируемых атомов или молекул и имеет большие значения только для небольшого числа химических элементов, главным образом, щелочных.

Нужно отметить, что селективная ионизация имеет и положительную сторону. Она дает возможность уменьшения или полного устранения фона посторонних ионов, что является очень важным при прецизионном изотопном анализе, идентификации изобаров и для чистоты разделения изотопов.

Следовательно, в ряде случаев при исследовании и разделении стабильных и радиоактивных изотопов термоионизационные ионные источники имеют преимущества перед остальными источниками, и поэтому необходимы поиски их дальнейшего усовершенствования. Основной проблемой при этом является увеличение коэффициента ионизации.

Как известно [1,2], степень ионизации $\frac{n_+}{n_0}$ при поверхностной ионизации на металлах определяется из уравнения Саха-Ленгмюра

$$\frac{n_+}{n_0} = \frac{q_+}{q_0} \exp\left(\frac{\Phi - eI}{kT}\right),$$

где n_+ и n_0 — число эмитированных в единицу времени положительных ионов и нейтральных атомов; q_+ и q_0 — статистические суммы ионного и атомного состояний; Φ — работа выхода металла; I — потенциал ионизации; e — заряд электрона; k — постоянная Больцмана; T — температура в абсолютных единицах.

При поверхностной ионизации на полупроводниках и диэлектриках в некоторых случаях этот закон сохраняется ^{/3/}, а в некоторых наблюдаются отклонения ^{/4,5/}. Но общая зависимость повышения степени ионизации с уменьшением потенциала ионизации испаряющихся атомов и повышением работы выхода поверхности всегда сохраняется.

Следовательно, главная задача усовершенствования термоионизационных ионных источников сводится к увеличению работы выхода эмитирующих поверхностей, накаливаемых до высоких температур.

Металлические поверхности имеют работу выхода не больше чем 5–5,5 эв. Но известно, что при адсорбции на их поверхности атомов и молекул электроотрицательных элементов, например, кислорода и галлоидов, работа выхода увеличивается. Повышенной работой выхода обладают и соединения этих элементов с некоторыми металлами. Преимуществом окислов по сравнению с галлоидными соединениями является их термостойкость (в некоторых случаях при температуре выше 2000°С).

Увеличение коэффициента ионизации при ионной эмиссии из накаливаемых окислов по сравнению с металлами было обнаружено рядом авторов. Добрецов, Стародубцев и др. ^{/6/} наблюдали более высокую степень ионизации кальция ($I = 8,08$ эв) и магния ($I = 7,61$ эв) на тонких слоях их окислов по сравнению с металлами. Панченков, Акишин и др. ^{/7-9/} получили интенсивную ионную эмиссию щелочных, щелочноземельных и некоторых других элементов из силикатных и алюмосиликатных ионообменников. Акишин и др. ^{/10/}, Зыков ^{/11/}, Пюранд ^{/12/} и Амов ^{/13/} исследовали термоионизацию свинца ($I = 7,4$ эв) на силикатных эмиттерах и применяли этот способ для его изотопного анализа. Крюч ^{/14/} использовал слои из окиси бора и окиси вольфрама для термоионизации таких элементов, как цинк ($I = 9,4$ эв), кадмий ($I = 9,0$ эв) и серебро ($I = 7,6$ эв).

Термоионизация из накаливаемых солей в виде нитратов и окислов на вольфрамовой ленте была применена Хайденом ^{/15/} для идентификации новых радио-

активных изотопов иттрия, рутения, стронция, бария, лантана и некоторых редкоземельных элементов. С помощью радиоактивных индикаторов он определил эффективности ионизации этих элементов, которые составляли десятые и сотые доли процента, но для лантана и празеодима достигали 16% и 12% соответственно.

Термоионизационный источник с накаливаемой графитовой мишенью был применен Бернасом и др. /16/ на масс-спектрометре в варианте „*on line*“, связанном с протонным ускорителем, а также и в обычном варианте для идентификации и определения сечения образования стабильных и радиоактивных изотопов лития, натрия и цезия. Применение термоионизации из накаливаемых окислов в таких случаях может расширить круг элементов, подходящих для подобных исследований, за пределы щелочной группы.

К сожалению, механизм термоионизации на окислах, в отличие от механизма термоионизации на металлах, еще не выяснен полностью, и это затрудняет создание более эффективных термоионизационных источников.

Целью настоящей работы является исследование и создание термически устойчивых окисных слоев, дающих возможность термоионизации более широкого круга элементов, с коэффициентом ионизации выше нескольких процентов и, таким образом, пригодных для применения в ионных источниках электромагнитных сепараторов радиоактивных и стабильных изотопов.

Химические элементы (исключая щелочные), для которых в настоящее время эта цель является достижимой, условно можно разделить на две группы: 1) элементы, требующие высоких температур для эмиссии в виде ионов ($\approx 2000^\circ\text{C}$), но имеющие небольшие потенциалы ионизации; 2) элементы с более высокими потенциалами ионизации, ионы которых эмитируются при не очень больших температурах. Как представители первой группы были исследованы редкоземельные элементы, а из второй группы — таллий и свинец.

2. Методика исследования

Окисные слои наносились в виде суспензии на металлические ленты (нагреватели) и после просушивания на воздухе накаливались в вакууме. Суспензия получалась при смешивании измельченных порошкообразных окислов с водой или этиловым спиртом.

До или после предварительного прокаливания в вакууме на окисные слои наносился азотнокислый раствор исследуемого радиоактивного элемента. Накал ленты и испарение осуществлялись после достижения вакуума порядка 10^{-4} мм.рт.ст. Температура нагревателя измерялась оптическим пирометром.

Для определения коэффициента ионизации и скорости испарения исследуемых элементов была использована модель ионного источника с простой ионнооптической системой линза-диафрагма. Схема и расположение электродов показаны на рис. 1. Экраны II и III находились под отрицательным потенциалом 4 кв относительно экрана I и ленты L, которые были заземлены. Все электроды были на равном расстоянии (5 мм) друг от друга, ширина первой щели - 4 мм, а второй - 3 мм. Провисание поля через щели в экранах создавало благоприятные условия для эффективного вытягивания и фокусирования эмитированных ионов. Они собирались практически только на третьем экране. Нейтральные атомы и молекулы попадали преимущественно на первый экран и меньше - на второй и третий. На экранах закреплялись съемные металлические фольги, на которых конденсировались, а по окончании опыта радиометрировались продукты испарения.

Условия конденсации на экранах контролировались по балансу между испаренной активностью с ленты и активностью на экранах. В случае редкоземельных элементов этот баланс всегда сохранялся. Для таллия и свинца при чистых металлических фольгах на экранах этот баланс не выполнялся, и лишь после покрытия этих фольг тонким слоем туши были получены хорошие результаты. По измеренной до и после испарения активности ленты определялось полное количество испаренного вещества, а по распределению активности - соотношение долей ионов и нейтралей.

На табл. I показано распределение испаренной активности на экранах при отсутствии и наличии электрического поля. Опыты по испарению Sr из окисного слоя с коэффициентом ионизации почти 100% указывают на высокую эффективность собирания ионов практически полностью на третьем электроде. Соотношения активностей нейтральных продуктов, осевших на экранах (на первом N'_0 , на втором N''_0 и на третьем N'''_0), при снятом вытягивающем поле измерялись в каждом эксперименте. С хорошей воспроизводимостью получались следующие значения: $\frac{N'_0}{N''_0} = 0,31 \pm 0,03$; $\frac{N''_0}{N'''_0} = 0,23 \pm 0,02$; $\frac{N'_0}{N'''_0} = 0,75 \pm 0,14$. Активность ионов, попавших на третий электрод N'''_+ , при испарении в электрическом поле определялась двумя независимыми способами по изменению соотношения

между активностью этого электрода N''' и активностью первого N' и второго N'' электродов.

$$1) N'_+''' = N''' - \frac{N_0'''}{N'_n} N'; \quad 2) N''_+''' = N''' - \frac{N_0'''}{N''_n} \cdot N''.$$

Коэффициент ионизации β определялся как отношение между активностью ионов, осевших на третьем экране, и полной активностью на трех экранах.

Абсолютная ошибка в определении β составляет $\Delta\beta = \pm 2\%$.

3. Экспериментальные результаты

Лучшие результаты для редкоземельных элементов были получены на слоях из смесей окиси циркония и окиси бора при весовом составе в суспензии 30% ZrO_2 , 70% B_2O_3 , нанесенных на ленты из тантала или сплава тантала и ниобия (95% Ta, 5% Nb).

В табл. 2 представлены результаты измерений на этих слоях для редкоземельных элементов при температуре нагревателя 2000°C . Во второй колонке даны значения коэффициента ионизации β испаренного вещества, а в третьей - отношение испаренной за 30 минут активности на трех экранах N_u к начальной активности ленты N_0 .

На табл. 3 представлены аналогичные результаты для испарения и ионизации самария при температуре 2000°C из окисных слоев разного состава на различных металлических нагревателях.

Радиоактивные изотопы редкоземельных элементов были получены при облучении танталовой мишени протонами с энергией 800 Мэв на синхроциклотроне ОИЯИ и последующем химическом разделении ионообменным методом. Для уменьшения доли дочерних продуктов в цепочке распада нейтронодефицитных ядер этих элементов испарение в вакууме и измерение активностей проводились в течение 2-3 часов после ионообменного разделения. Несмотря на это, в фракциях La, Ce, Pr и Nd, в которых преобладали короткоживущие изотопы, за время измерения накапливалась небольшая доля дочерних продуктов предыдущего элемента этого ряда. В остальных фракциях присутствовали долгоживущие изотопы, т.к. разделение проводилось после распада короткоживущих изотопов и дочерние продукты еще не успевали накопиться заметно или совсем не присутствовали.

Для таллия и свинца лучшие результаты были получены на слоях из 70% SiO_2 , 30% V_2O_5 (в весовых единицах), нанесенных на молибденовый нагреватель в виде суспензии с 10%-ной ортофосфорной кислотой. Количество последней должно быть не менее чем $0,1 \text{ см}^3$ на 10 миллиграмм смеси окислов кремния и бора.

В табл. 4 представлены эти результаты при температуре нагревателя 1400°C . Были использованы изотопы Tl^{204} и Pb^{212} (TlB). Изотоп свинца TlB периодом полураспада 10,6 часа получали из эманатора тория. Этот изотоп сопровождается своим дочерним продуктом Bi^{212} (TlC), период полураспада которого 60,5 минут. Поэтому измерение активности на экранах проводилось через 2-3 часа после испарения, когда в качестве дочерних продуктов присутствовали изотопы, полученные из распада только тех атомов TlB , которые осели на экранах. Таким образом, данные относятся к чистому свинцу.

4. Обсуждение результатов

Как видно из табл. 2, по степени термоионизации в области редкоземельных элементов выделяется две группы. Первая группа элементов от La до Eu характеризуется сравнительно большими коэффициентами ионизации (7-17%) и более быстрым испарением по сравнению со второй группой $\text{Tb} - \text{Tu}$, где значение коэффициента ионизации не превышает 3%. Это можно объяснить различием в атомных потенциалах ионизации, которые для первой группы лежат в интервале 5,4 - 5,7 эв, а для второй группы - в интервале 6,0 - 6,8 эв. Но бросается в глаза тот факт, что тербий, имеющий потенциал ионизации такой же, как у самария ($I = 5,6$ эв), ионизируется хуже не только самария, но и гадолиния ($I = 6,2$ эв). По-видимому, испарение редкоземельных элементов из накаливаемых окислов происходит преимущественно в виде моноокисных молекул, например, SmO , и в меньшей степени в атомарном состоянии, как это показано в работе /15/. В этом случае определяющими являются потенциалы ионизации окисных молекул, но, к сожалению, в литературе нет данных о них.

Была исследована возможность термоионизации элементов плутония, амерция и кюрия как представителей группы актинидов. Коэффициенты ионизации выше 3% не были замечены, что показывает на близость их свойств в отношении термоионизации ко второй группе редкоземельных элементов.

Сравнение между нашими данными и данными Хайдана /15/ показывает, что коэффициенты ионизации на наших окисных слоях превосходят в 50-100 раз коэффициенты ионизации на вольфрамовой ленте, за исключением La и Pr, для которых значения почти совпадают.

Результаты в табл. 3 показывают зависимость коэффициента ионизации самария от состава окисного слоя и материала нагревателя. Как видно, коэффициент ионизации имеет большие значения только на окисных слоях, в состав которых входит окись циркония на танталовом нагревателе. Сплав 95% Ta, 5% Nb дает те же результаты. При замене нагревателя вольфрамовым или молибденовым коэффициент ионизации падает и скорость испарения уменьшается. Добавление окиси ниобия к окиси циркония на вольфраме приводит к появлению ионизации в начальный момент, но затем коэффициент ионизации быстро падает со временем.

Замена окиси бора окисью фосфора или марганца, добавляемых к окиси циркония на тантале, тоже не изменяет существенно результатов. Следовательно, ответственными за улучшение термоионизации являются окиси тантала и ниобия, которые образуются в результате окисления нагревателя при прокаливании окисных слоев. На это указывает и внешний вид слоев, который на танталовом нагревателе имеет черный цвет, а на вольфрамовом и молибденовом — белый. Наверное, окиси вольфрама и молибдена, которые являются более летучими, испаряются из слоев при температурах 2000°C , а окиси тантала и ниобия частично задерживаются. Наши исследования показали, что чистые окиси вольфрама и молибдена испаряются полностью с нагревателя при температурах $1000-1100^{\circ}\text{C}$, а окиси ниобия — при температурах $1700-1800^{\circ}\text{C}$. Как видно из опытов на вольфрамовых и молибденовых нагревателях, окись циркония не обуславливает ионизации, но она выполняет роль связи, удерживающей окиси тантала и ниобия до температур порядка 2200°C . Окиси бора, фосфора и марганца являются неустойчивыми и при температуре 2000°C не могут влиять существенно на ионизацию, но они играют роль окислителей, ускоряющих процесс окисления тантала и ниобия.

Были исследованы и окисные слои в составе $50\% \text{Y}_2\text{O}_3; 50\% \text{V}_2\text{O}_5$, которые тоже являются устойчивыми до температур порядка 2200°C . Как на молибденовом, так и на танталовом нагревателе ионизация выше точности метода не наблюдалась.

При окисных слоях на танталовом нагревателе, а также и на сплаве 95% Ta, 5% Nb наблюдалась в некоторых случаях значительная диффузия радиоактивных атомов в глубину металла. Это сильнее было выражено при работе со второй группой менее летучих редкоземельных элементов Gd - Tu и проявлялось в значительном уменьшении активности испарителя после прокаливания (15-20 минут) при 2000°C и небольшой доле испаренной активности на экранах. Это было особенно заметно на Gd и смеси $\text{Er}^{160} + \text{Ho}^{160}$, имеющих сравнительно мягкое излучение, легко поглощающееся в толще слоя металла. После прокаливания в течение 30-40 минут активности, измеренные с лицевой и обратной сторон нагревателя, выравнивались и уменьшались медленнее по сравнению с увеличением испаренной активности на экранах. Диффузия проявлялась более заметно, когда радиоактивные изотопы наносились на предварительно прокаленный в вакууме окисный слой. Этот эффект замедляет скорость испарения редкоземельных элементов.

Из табл. 4 видно, что сравнительно высокие коэффициенты ионизации можно получить и для элементов с более высокими потенциалами ионизации:

Tl (6,1 эв) и Pb (7,4 эв). В этом случае в состав окисных слоев должны входить окиси кремния, бора и фосфора. Эти слои имеют повышенную работу выхода по сравнению со слоями из окиси циркония и бора, но являются менее устойчивыми и при температурах выше 1700°C разрушаются. Поэтому их можно применять для термоионизации более летучих элементов. Для свинца результаты получаются лучше, если сначала прокалить 30-60 минут до температуры 1000-1100°C, а затем повысить температуру до 1400-1500°C для испарения в виде ионов. Коэффициент ионизации свинца растет со временем и доходит до 30-40%, оставаясь в среднем равным 10-15%.

5. В ы в о д ы

Из полученных экспериментальных результатов видно, что с применением окисных слоев подходящего состава можно расширить круг элементов, эффективно ионизирующихся методом термоионизации, и применить этот метод, кроме масс-спектрометрического анализа, еще и для электромагнитного разделения радиоактивных и стабильных изотопов.

Число исследованных элементов было ограничено имеющимися в нашем распоряжении радиоактивными изотопами. Но на основании литературных данных по термоионизации можно надеяться получить аналогичные результаты еще для ряда элементов. На слоях из окиси циркония на танталовом нагревателе возможно ионизовать еще щелочноземельные элементы, как Sr, Ba, Ra, и, разумеется, щелочные элементы, а на слоях из окиси кремния, бора и фосфора — Bi, In, Ga, Ag, Sn.

Значительная диффузия редкоземельных элементов в окисленном тантале указывает на возможность применения танталовых лент с окисным слоем как мишеней, облучаемых протонами в ускорителях. При одновременном с облучением накаливании таких мишеней в варианте "on line" масс-сепаратора или при последующем накаливании в ионном источнике электромагнитного сепаратора обычного типа можно надеяться, что продукты ядерных реакций в области первой половины редкоземельных элементов будут легко диффундировать из объема к окисленной поверхности, откуда частично будут испаряться в виде ионов в соответствии с нашими экспериментальными результатами. Таким образом, не прибегая к химической обработке мишени, можно сократить время разделения радиоактивных изотопов.

Результаты настоящего исследования освещают и некоторые стороны механизма термоионизации на накаливаемых окислах. Повышение коэффициента ионизации наблюдается при наличии в слоях окислов тантала, ниобия, кремния, бора и фосфора, а при присутствии окислов циркония и иттрия ионизация уменьшается. Роль окиси фосфора и кремния в увеличении коэффициента ионизации свинца была исследована нами в работе ^{13/}. Там было показано также, что окись циркония и окись алюминия уменьшают эффективность ионизации. Из литературы известно, что боракс и борная кислота повышают коэффициенты ионизации некоторых элементов, а на смеси из окиси бора и окиси вольфрама ионизируются такие элементы, как Zr ($I = 9,4$ эв) и Cd ($I = 9,0$ эв). Сравнение свойств исследованных соединений показывает, что увеличение коэффициента ионизации имеет место для тех окислов, для которых металл, входящий в их состав, отличается большей электроотрицательностью по шкале Паулинга ^{17/}. Такими являются окиси кремния, бора, фосфора, окиси тугоплавких металлов — вольфрама, молибдена, тантала, ниобия и др. Увеличение работы выхода металлов с повышением их электроотрицательности показано убедительным образом

Горди и Томасом ^{/18/}. Окиси, для которых металл, входящий в их состав, имеет небольшую электроотрицательность, такие, как окиси циркония, иттрия, алюминия, окиси редкоземельных, щелочноземельных и щелочных элементов, приводят к уменьшению коэффициента ионизации. В соответствии с этим меняется и природа химической связи в этих двух типах соединений. Согласно представлению Паулинга, в первом типе преобладает ковалентная связь, а во втором – ионная, что и определяет различие в термостойкости. Окиси с преобладанием ковалентной связи легко разрушаются при нагреве в вакууме, испаряясь в виде окисных молекул. С увеличением ионной связи, устойчивость соединений растет, но, к сожалению, как показано, коэффициент ионизации уменьшается. Таким образом, повышение термической устойчивости окисного слоя и увеличение его работы выхода являются противоположными тенденциями.

Но смеси этих двух типов окислов имеют промежуточные свойства, и благодаря этому, варьируя их состав, можно увеличить термостойкости окисных слоев при повышенной работе выхода.

Исследование таких смесей с целью повышения их термостойкости при увеличении содержания электроотрицательных элементов является одним из путей дальнейшего усовершенствования термоионизационных ионных источников и расширения области их применения.

В заключение хочу выразить благодарность профессору Г.Н. Флерову и Н.И. Тарантину за оказанную помощь и содействие при проведении этих исследований в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ и товарищам Д. Христову и Н. Лебедеву за предоставление химически чистых редкоземельных изотопов.

Л и т е р а т у р а

1. Л.Н. Добрецов. Электронная и ионная эмиссия, ГИТТЛ, 1950.
2. Э.Я. Зандберг, Н.И. Ионов. УФН, 67, 4 (1959).
3. Э.Я. Зандберг, В.И. Пилаев. ЖТФ, 35, 11 (1965).
4. Н.Д. Моргулис. ЖТФ, 18, 587 (1948).
5. Г.М. Авакьянц. Труды ФТИ АН Узб. ССР, 1, 17 (1953).
6. Л.Н. Добрецов, С.В. Стародубцев, Ю.И. Тимохина. ДАН СССР, 55, 307(1948).

7. Г.М. Панченков, П.А. Акишин, Н.Н. Васильев. ДАН СССР, 104, 571(1955).
8. Г.М. Панченков, П.А. Акишин, Н.Н. Васильев, О.Т. Никитин, С. Моисеев. ЖФХ, 30, № 6 (1956).
9. П.А. Акишин, Г.М. Панченков, Н.Н. Васильев, О.Т. Никитин. ЖФХ, 30, № 6 (1956).
10. П.А. Акишин, О.Т. Никитин, Г.М. Панченков. Геохимия № 5, 1957.
11. С.И. Зыков, Н.И. Ступникова. Геохимия, № 5, 1957.
12. G. Durand, C.R. Acad. Sci., № 6, 254 (1962).
13. Б.Г. Амов. Известия на физическая институт с АНБ при БАН, 13, кн.1 (1965).
14. E.A.C. Crouch. Advances Mass Spectrom., 2, Pergamon Press, 1963.
15. R.J. Hayden. Phys. Rev., 74, № 6 (1948).
16. R. Betman, E. Gradstein, R. Klapisch, F. Yion and Ngyuen Long Den., Nucl. Instr. Methods, 37 (1965).
17. Л. Паулинг. Природа химической связи. Гостехиздат, 1947.
18. W. Gordy, W.J.O. Thomas. Journ. Chem. Phys., 24, N2 (1956).

Рукопись поступила в издательский отдел
14 ноября 1966 г.

Т а б л и ц а 1

Э к р а н	Испаренная активность, %		
	без эл. поля	с эл. полем	
	-	Ca	Sm
I	65	3	56
II	20	7	17
III	15	80	27

Т а б л и ц а 2

Э л е м е н т	$\beta = \frac{N_+'''}{N_u}$, %	$\left(\frac{N_u}{N_0}\right)_{t=30 \text{ мин}}^{\%}$
La	17	50
Ce	13	50
Pr	14	50
Nd	7	60
Pm	7	80
Sm	14	70
Eu	9	80
Gd	5	30
Tb	< 3	30
Dy	< 3	30
Er + Ho	< 3	30
Tm	< 3	30
Yb	< 3	90

Таблица 3

С л о й	Нагреватель	$\beta = \frac{N_u'''}{N_u}$, %	$(\frac{N_u}{N_0})_{t=30}$, %
ZrO ₂ + В ₂ О ₃	95% Та + 5% Nb	14	70
ZrO ₂ + Н ₃ РO ₄	95% Та + 5% Nb	14	70
ZrO ₂ + MnO ₂	95% Та + 5% Nb	12	70
ZrO ₂ + В ₂ О ₃ + 25% Nb ₂ O ₅	95% Та + 5% Nb	13	50
ZrO ₂ + В ₂ О ₃	Та	13	70
ZrO ₂ + В ₂ О ₃	Мо	< 13	15
ZrO ₂ + В ₂ О ₃	W	< 3	20
ZrO ₂ + В ₂ О ₃ + 50% Nb ₂ O ₅	W	7	15
Y ₂ O ₃ + В ₂ О ₃	Мо	< 3	10
Y ₂ O ₃ + В ₂ О ₃	95% Та + 5% Nb	< 3	50

Таблица 4

Э л е м е н т	$\beta = \frac{N_u'''}{N_u}$, %	Время нагрева, мин	$\frac{N_u}{N_0}$, %
Тл	13	5	80
Рь	10-15	30	50

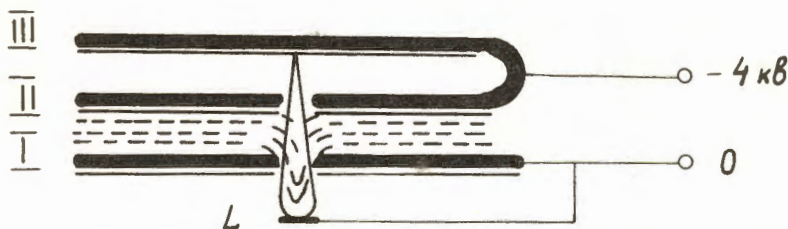


Схема ионного источника, используемого для определения коэффициента ионизации и скорости испарения.