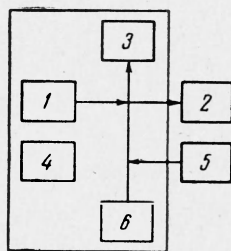


ИЗМЕРЕНИЕ ФУНКЦИЙ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ МЕТАЛЛОВ ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ

Г. М. Бейлина, С. И. Павлов, В. И. Раховский, О. Д. Сорокалетов

(Москва)

Разработана методика определения абсолютных значений эффективных сечений ионизации атомов веществ с низкой упругостью пара методом пересекающихся атомного и электронного пучков. Для устранения влияния остаточных газов производилась модуляция атомного пучка и измерение переменной составляющей ионного тока при помощи предварительно калиброванных электрометрического усилителя типа У1-2 и электронного осциллографа типа ЭНО-1 (С-1-4). Концентрация атомов исследуемого вещества в области ионизации определялась по весу конденсата на охлаждаемом коллекторе. Измерена функция ионизации атомов свинца электронным ударом в диапазоне энергий от порога ионизации до 150 эв. Величина сечения в максимуме функции ионизации равна $8 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ и находится при энергии 55 эв. Суммарная погрешность измерений не превышает 15% при монокинетичности электронного пучка не хуже 0,35 эв.



Фиг. 1

Эффективное сечение ионизации атома электронным ударом количественно характеризует процесс ионизации при взаимодействии электрона с атомом. Это одна из основных характеристик атома, значение которой необходимо как для выяснения строения электронной оболочки атома, так и для решения ряда задач прикладного характера. К числу последних можно отнести, например, расчеты процессов в катодной области дуги, применение масс-спектрометрии для количественных измерений компонентов смесей с сильно различающимися сечениями ионизации, расчеты, связанные с созданием эффективных ионных источников и мощных электронно-лучевых систем для сварки и плавки металлов, в которых вследствие ионизации паров металлов происходит компенсация объемного заряда и изменяется геометрия пучка, изучение процессов в термоэлектрических преобразованиях и т. д.

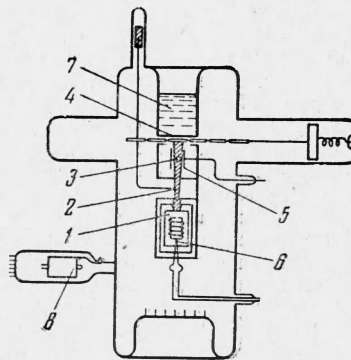
При этом интерес представляют главным образом абсолютные значения сечений ионизации в зависимости от энергии электронов — функции ионизации. В настоящее время изучено весьма ограниченное количество элементов. Функции ионизации с измерением абсолютных значений сечений ионизации получены для газов (H_2 , H_1 , He , Ne , Ar , N_2 , N , O_2 , O) и лишь трех металлов (Hg , Na , K) [1-4]. Измерение сечений ионизации Na и K выполнены Функом [5] методом атомного пучка. Вследствие сильного влияния остаточных газов они сделаны с низкой точностью. По мнению Г. Мессе и Е. Бархона [6], результаты Функа дают представление лишь о порядке величины сечения. В работе [7] было измерено сечение ионизации серебра, однако не была снята функция ионизации.

Наконец, для некоторых газов (Kr , Xe) и щелочных металлов (Li , Na , K , Rb , Cs) было измерено относительное изменение функции ионизации в зависимости от энергии электронов [1, 8]. Эти результаты имеют, естественно, ограниченную ценность.

В связи с вышеизложенным нами была проведена работа по созданию методики измерения абсолютных значений сечений ионизации, причем основное внимание было обращено на вещества с низкой упругостью пара, в частности на металлы. Последнее вытекало из практических задач, стоящих перед технической физикой.

Для определения абсолютного значения сечения ионизации электронным ударом необходимо измерить полное количество ионов, образовавшихся в результате прохождения электронного пучка известной интенсивности и энергии в пространстве, заполненном нейтральными атомами известной концентрации.

Основные погрешности в ранее выполненных работах заключались в отсутствии учета влияния остаточных газов [5], низкой точности измерения ионного и электронного токов [9], в измерении лишь доли ионного тока [10], в отсутствии измерений монокинетичности источника электронов,



Фиг. 2

Для устранения указанных источников погрешностей при измерениях предложена методика, которая поясняется при помощи схемы на фиг. 1, где 1 — источник электронов, 2 — измерение переменного ионного тока, 3 — коллектор нейтральных атомов, 4 — измерение вакуума, 5 — прерыватель атомного пучка, 6 — источник нейтральных атомов. Исследуемое вещество вводится в область ионизации в виде атомного пучка. Атомный пучок ионизируется поперечным пучком электронов заданной энергии и интенсивности. Количество образовавшихся ионов определяется путем измерения ионного тока. Концентрация нейтралов в области ионизации определяется гравиметрически по весу конденсата. Измеренные параметры позволяют определить сечение ионизации.

В качестве источника атомного пучка нами использовалась система, состоящая из кварцевого тигля с крышкой из молибденовой жести с щелью. Тигель нагревался бифилярной вольфрамовой спиралью и был снабжен молибденовыми экранами, уменьшающими потери на излучение. Система диафрагм вырезала атомный пучок заданного размера и интенсивности.

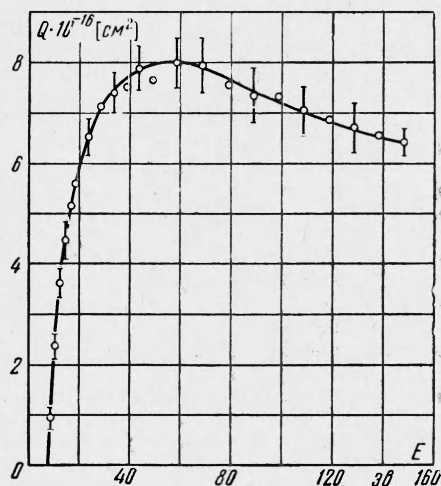
Для выделения ионного тока исследуемого вещества на фоне ионного тока остаточных газов применялась модуляция атомного пучка при помощи заслонки, перемещаемой с заданной частотой электромагнитом, который размещался вне колбы. Ионизация производилась при помощи электронной пушки с оксидным катодом и фокусировкой пучка электронов продольным магнитным полем. Наличие магнитного поля полностью устраняло упругое рассеяние электронов и фотоэмиссию с коллектора ионов. Для устранения пульсаций напряжения питание пушки осуществлялось от батарей. Измерение ионного тока производилось электрометрическим усилителем типа У1-2, напряжение с выхода которого подавалось на осциллограф с усилителем постоянного тока типа ЭНО-1 (С-1-4).

Концентрация нейтральных атомов в области ионизации определялась по скорости конденсации на коллекторе, охлаждаемом жидким азотом. Коллектор имел несколько подложек для проведения серии измерений интенсивности пучка. Подложки взвешивались до и после напыления на весах МА-20 с точностью 10^{-5} г.

Основной задачей настоящей работы являлась разработка методики измерения функции ионизации паров металлов электронным ударом. Поэтому в качестве объекта исследования нами был выбран свинец, который обладает относительно низкой упругостью пара, имеет низкую температуру плавления и практически одноатомный состав паров [11]. Таким образом, свинец можно было использовать для отработки методики измерения функции ионизации для веществ, обладающих достаточной упругостью пара лишь при $1000-1100^\circ\text{C}$.

Экспериментальная трубка, собранная из предварительно обезгаженных в вакууме деталей представлена на фиг. 2, где 1 — источник нейтральных атомов, 2 — прерыватель атомного пучка, 3 — электронный пучок, 4 — коллектор нейтральных атомов, 5 — коллектор ионов, 6 — термopара, 7 — охлаждение коллектора нейтральных атомов 8 — ЛМ-2. Исследуемый металл (свинец) подвергался тщательному обезгаживанию путем многократной переплавки в вакууме. После сборки трубка напайвалась на вакуумный пост, подвергалась вакуумно-технологической обработке, в процессе которой производились общий отжиг лампы, активировка оксидного катода электронной пушки и тренировочный прогрев испарителя. По окончании обработки лампа отпаивалась при давлении ниже $2 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст.

Измерение функции ионизации, в особенности на начальном участке, предъявляет высокие требования к монокинетичности источника электронов. Подавляющее большинство исследований вообще не определяло степени монокинетичности электронного пучка [1-4, 8, 9]. Это не позволяет судить о степени достоверности полученных ими результатов. Грубая оценка средней величины начального разброса электронов по энергии на основании учета температуры катода приводит к значительному занижению величины разброса. Поэтому нами предварительно было проведено определение степени монокинетичности разработанного источника электронов при помощи электростатического селектора. Кроме того, с целью учета величины контактной



Фиг. 3

разности потенциалов нами снимались кривые задержки, позволявшие одновременно оценить разброс электронов в пучке по энергиям. Результаты измерений показали, что монокинетичность разработанной системы оказалась не хуже 0.35 эв. Указанная монокинетичность достигалась при работе с токами до 10^{-6} а. Измерение тока пучка производилось при помощи гальванометра типа М-95.

Для получения абсолютных значений при измерении модулированного ионного тока электрометрический усилитель типа У1-2 калибровался при помощи специального калиброванного блока. Погрешность при измерении ионного тока составляла не более 8%.

Измерение функции ионизации проводилось следующим образом. Лампа подключалась к измерительной схеме, проверялась работа электронной пушки и проводилось измерение ионного тока остаточных газов.

После этого включалось питание нагревателя испарителя. В процессе выведения испарителя на рабочий режим производился непрерывный контроль ионного тока. По достижении рабочей температуры производилась отладка прибора в целом. Во время отладки прибора подбиралась величина поля, при котором все ионы вытягивались на коллектор. Затем производилась смена подложки коллектора конденсата, после чего несколько раз снималась функция ионизации при разных значениях электронного тока. Использование нескольких подложек показало, что скорость испарения свинца в процессе эксперимента оставалась постоянной с точностью не хуже 4%.

Результаты измерений, приведенные на фиг. 3, представляют среднее из двенадцати измерений. При этом разброс не превышает 8%, т. е. лежит в пределах погрешности измерений. Определение сечения ионизации производилось по формуле

$$Q = I_+ m t b v / I_- M \quad (1)$$

Здесь Q — эффективное сечение ионизации, I_+ — ионный ток, I_- — электронный ток, m — масса атома свинца, t — время напыления, b — ширина атомного пучка в зоне электронного пучка, v — средняя скорость атомов в пучке, M — масса конденсата за время опыта.

Начальный участок функции ионизации имеет крутизну $0.7 \cdot 10^{-16}$ см² эв⁻¹, т. е. относительно малую скорость изменения.

Функция ионизации достигает 50% от максимума при энергии электронов на 6 эв выше порога. Это позволяет утверждать, что наличие некоторого разброса энергии электронов (0.35 эв) не приводит к сильному искажению характера функции ионизации. Суммарная погрешность измерений, подсчитанная в соответствии с формулой (1), не превышает 15%.

В заключение авторы считают себя глубоко обязанными В. Л. Грановскому за руководство работой и многочисленные советы. Авторы благодарны З. И. Синициной и А. А. Малькову за работу по изготовлению экспериментальных трубок.

Поступила 29 X 1964

ЛИТЕРАТУРА

1. Atom und Molecularphysik, 1 teil, Atome und Ionen, Berlin Göttingen. Heidelberg, 1950, S. 343—345.
2. Fite W. L., Brackman R. T. Collisions of Electrons with Hydrogen Atoms. Phys. Rev., 1958, vol. 112, p. 1141.
3. Rothe E. W., Marino L. L., Neynaber R. H., Trujillo S. M. Electron Impact Ionization of Atomic Hydrogen and Atomic Oxygen. Phys. Rev., 1962, vol. 125, p. 582.
4. Smith A. C., Caplinger E., Neynaber R. H., Rothe E. W., Trujillo S. M., Electron Impact Ionization of Atomic Nitrogen. Phys. Rev., 1962, vol. 127, p. 1647.
5. Funk H. Über die Ionisierung von Alkaliatomen durch langsame Elektronen. Ann. Phys., 1930, vol. 4, p. 149.
6. Мессеи Г., Бархон Е. Электронные и ионные столкновения, Изд. иностр. литер., 1958.
7. Любимов А. П., Павлов С. И., Раховский В. И., Зайцев а Н. Г. Метод измерения эффективных сечений ионизации и коэффициентов ионизации атомов металлов при электронном ударе. Изв. АН СССР, сер. физ., 1963, т. 27, № 8, стр. 1060.
8. Brink G. O. Ionization of Alkali Atoms by Electron Bombardment. Phys. Rev., 1962, vol. 127, p. 1204.
9. Compton K. T. Van Voorhis C. C. Probability of Ionization of Gas Molecules by Electron Impact. Phys. Rev., 1926, vol. 27, p. 724.
10. Nottingham W. B. Ionization and Excitation in Mercury Vapor Produced by Electron Bombardment. Phys. Rev., 1939, vol. 55, p. 203.
11. Несмеянов А. Н. Давление пара химических элементов. Изв. АН СССР, 1961.