

11. Виленчик Л.З., Куренбин О.И., Жмакина Т.П., Беленький Б.Г. // Высокомолекулярные соединения. — 1980. — А-22. — С. 2801.
12. Виленчик Л.З., Куренбин О.И., Жмакина Т.П., Нестеров В.В., Чубарова Е.В., Беленький Б.Г. // Высокомолекулярные соединения. — 1980. — А-22. — С. 2804.
13. Ishii D., Takeuchi T. // J. Chromatogr. 255, 349 (1983).
14. Takeuchi T., Ishii D., Mori S. // J. Chromatogr. 257, 327 (1983).
15. Kennedy R.T., Vorgenson Y.W. // J. microcolumn Sep. 2, 120 (1990).
16. Беленький Б.Г. // Журнал аналитической химии. — 1990. — Вып. 45. — С. 643.
17. Беленький Б.Г., Белло М.С., Кевер Е.Е., Королева Е.М. Проблемы микроколоночной высокоэффективной жидкостной хроматографии / В кн.: Синтез, структура и свойства полимеров. — Л., Наука, 1989. — С. 253.
18. Europäische patentanmeldung 85903448.0 03.06.87 Patentblatt 8/23.
19. J. Jamin. *Comp. Rend. Acad. Sci. Paris* v. 67 814 (1968).
20. Молочников Б.И. // ИКА. № 7-8 (29-30), 3 (1980).
21. Nagel L. // *Anal. Chem.* 50, 589 (1978).
22. Lebesque H.J.M., Blaise B.S. // *Optic.* B21, 574-579 (1964).
23. Matura K., Horita M., Yamamoto G., Hattori S. // *Optics and Laser Technology*, 9, 285 (1977).

Рукопись поступила 05.11.90

Л.Н. Галль, Н.В. Краснов

(Институт аналитического приборостроения АН СССР,
Ленинград)

РЕГИСТРАЦИЯ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ ВТОРИЧНО-ЭЛЕКТРОННЫМ УМНОЖИТЕЛЕМ

Часть I. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ИОНОВ
С ПОВЕРХНОСТЬЮ ТВЕРДОГО ТЕЛА.

МЕТОДИКА МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА
ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА
ИОН-ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

Взаимодействие частиц с поверхностью твердого тела разнообразно по физическому содержанию и включает в себя такие процессы, как перенос заряда через поверхность раздела частица—твердое тело, адсорбция и десорбция, обмен энергией между падающей частицей и поверхностью и т.д.

Развитие технических приложений науки стимулирует повышение интереса к роли взаимодействия частиц с твердым телом в таких, например, областях, как исследование взаимодействия плазмы с материалами первой стенки в физике термоядерного синтеза [1], в разработке быстродействующих детекторов тяжелых ионов высоких энергий [2], в исследовании распыления и коррозии космических аппаратов, в технике получения эпитаксиальных пленок и литографии [3], при разработке электронных умножителей и изучении состава и структуры поверхности и объема твердых тел [4, 5] и т.д. Ряд процессов, протекающих при ионной бомбардировке твердых тел, изучен явно недостаточно (например, проблема бомбардировки мишеней многозарядными ионами), в некоторых случаях отсутствуют четкие представления даже о механизме явления. Общее положение дел в этой области взаимодействия многоатомных ионов с твердым телом рассмотрено в работе [6].

Новые задачи в изучении взаимодействия частиц с твердым телом ставит развитие экспериментальных исследований в физике кластеров, биофизике и биохимии, широко использующих масс-спектрометрические методы анализа. В масс-спектрометрических приборах, применяемых для исследований, в качестве детектора, как правило, используются вторично-электронные умножители (ВЭУ) открытого типа или близкие к ним по принципу действия конверторные системы, позволяющие регистрировать ионные токи в большом динамическом диапазоне. Известно [7], что коэффициент ионно-электронной эмиссии γ , вызываемой атомарными ионами при их взаимодействии с поверхностью твердого тела, зависит от массы, энергии, электронной конфигурации, потенциала ионизации, зарядового состояния бомбардирующей частиц, работы выхода, чистоты поверхности облучаемого объекта и т.д.

Для количественной интерпретации масс-спектрометрических данных необходимо знание зависимости γ от массы и энергии анализируемых частиц. Однако, если для атомов и атомарных ионов такие данные, полученные в большом числе экспериментов, обобщены в специальных монографиях, теоретически описаны и обоснованы, то аналогичные экспериментальные данные о зависимости γ (M , E) для многоатомных ионов, в том числе ионизованных молекул биоорганических веществ и ионных кластеров различных типов, представлены очень ограниченно [8-10]. Из-за разнообразия регистрируемых объектов такого типа (ионные кластеры, квазимолекулярные и фрагментные ионы различного состава и пространственной конфигурации) методика сбора и обобщения экспериментальных данных в этом случае неприемлема, и особую роль для правильной интерпретации результатов приобретают обобщающие теоретические представления.

В последние годы появились новые теоретические модели взаимодействия частиц с поверхностью твердого тела, развита общая транспортная теория ионно-электронной эмиссии, включающая в себя известные теории как крайние случаи: теорию Штернгласса [11] для области высоких энергий (скорость на-

летающих частиц больше 10^8 см/с) и теорию Парилиса—Кишиневского [12–14] для области низких энергий частиц и, соответственно, меньших скоростей. В транспортной теории ионно-электронной эмиссии [15] считается, что выход электронов пропорционален энергии, выделенной на поверхности мишени; учитываются также вторичные процессы в передаче ими энергии электронам среды. В экспериментах, рассматриваемых в настоящей работе, скорости частиц, взаимодействующих с поверхностью твердого тела — первым динодом умножителя, — всегда меньше чем 10^7 см/с, что позволяет рассматривать процессы образования электронов с точки зрения Оже-нейтрализации Хэгструма [16] и теории Парилиса—Кишиневского [12–14]. Эмиссия электронов при бомбардировке поверхности твердого тела атомными частицами может происходить, в зависимости от зарядового состояния частицы, ее потенциала ионизации, энергии, либо за счет потенциальной энергии системы атомная частица — поверхность (потенциальное вырывание), либо за счет и потенциального вырывания и кинетического выбивания [17].

Основным механизмом потенциального вырывания электронов является Оже-нейтрализация иона, при его приближении к поверхности, электронами твердого тела. Процесс потенциального вырывания электронов из атомно-чистых поверхностей мишеней происходит только тогда, когда энергия, необходимая для нейтрализации иона, падающего на поверхность мишени, вдвое превышает работу выхода φ электронов из твердого тела (т.е. $eI > 2\varphi$, где eI — энергия ионизации падающего иона). Если это условие выполнено, что имеет место при падении ионов инертных газов на поверхность металлов, то потенциальная эмиссия происходит в широком диапазоне энергий падающих ионов. Коэффициент ионно-электронной эмиссии для случая только потенциального вырывания слабо зависит от кинетической энергии падающих ионов. Изменения величины $\gamma_{\text{пот}}$ с ростом энергии ионов можно объяснить, при-

нимая во внимание [18], смещением энергетических уровней атомной частицы при приближении ее к поверхности металла. Известно [16], что из-за указанного смещения уменьшается энергия, выделяющаяся при нейтрализации частицы у поверхности. С ростом скорости сближения иона с поверхностью уменьшается среднее расстояние, на котором происходит процесс нейтрализации частицы; поэтому уменьшается выделяющаяся энергия и, соответственно, величина $\gamma_{\text{пот}}$. Если же потен-

циальная энергия нейтрализации падающего иона меньше удвоенной работы выхода поверхности ($eI \ll 2\varphi$), то эмиссия электронов возможна только за счет кинетического выбивания. В этом случае наблюдается явная зависимость от энергии иона E (или от скорости V), причем эмиссия электронов имеет место, если энергия иона E превышает некоторую пороговую энергию [17]. При бомбардировке металлических поверхностей ионами щелочных или щелочно-земельных металлов, а также нейтральными атомами, при $E > E_{\text{пор}}$ эмиссия электронов во-

зникает только за счет кинетической энергии падающей частицы [17], и полный наблюдаемый в эксперименте коэффициент $\gamma_{\text{набл}}$ равен $\gamma_{\text{кин}}$, характеризующему кинетический механизм выбивания электронов. В работе [18] отмечено, что основная масса опубликованных сведений о кинетическом выбивании электронов ионами получена при облучении тугоплавких металлов сравнительно легкими частицами [17-20], при этом обычно отмечается, что результаты опытов удается относительно успешно описать с помощью теории кинетического выбивания электронов ионами, развитой в работах [12, 21]. В общем случае при $E > E_{\text{пор}}$ эмиттируемые электроны образуются одновременно за счет обоих механизмов: потенциального вырывания и кинетического выбивания, так что наблюдаемый в эксперименте коэффициент $\gamma_{\text{набл}}$ для металлических мишеней является суммой кинетического и потенциального коэффициентов: $\gamma_{\text{набл}} = \gamma_{\text{кин}} + \gamma_{\text{пот}}$. При уменьшении энергии E величина $\gamma_{\text{кин}}$ уменьшается, и при $E < E_{\text{пор}}$ наблюдаемую эмиссию электронов следует относить к потенциальной эмиссии, т.е. при этом $\gamma_{\text{набл}} = \gamma_{\text{пот}}$. С целью проверки применимости теории [12, 21] для описания явления в условиях сильно различающихся масс иона и частицы твердого тела в [19] было проведено сравнительное изучение выбивания электронов ионами водорода и ртути с энергиями 0.5 — 5 кэВ из различных металлических и полупроводниковых мишеней (Re, W, Ta, Mo, Nb, Cu, Ni, Fe, Ge, Si, C). Для протонов получено удовлетворительное согласие экспериментальной зависимости коэффициента ионно-электронной эмиссии $\gamma(Z_2)$, где Z_2 — заряд ядра мишени, с теоретической зависимостью $\gamma_{\text{к}}(Z_2)$ для ионов ртути обращались к анализу величины $f(Z_2) = d\gamma/dE_0$ на линейном участке зависимости $\gamma(E_0)$ (см. формулу 2 из [19]). Согласия экспериментальных данных, полученных в [19], с предсказываемой теорией зависимостью $f(Z_2) = d\gamma/dE_0$ нет. Это указывает на существенное отличие в изученных материалах процессов возбуждения электронов протонами и ионами ртути. В [19] авторы предполагают, что это отличие обязано своим происхождением дополнительному возбуждению электронов в мишени атомами отдачи. Оценка роли атомов отдачи в процессе возбуждения электронов, проведенная в [19], дает хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных и основание утверждать, что возбуждение электронов атомами отдачи действительно имеет место и что в ряде случаев (особенно при бомбардировке мишеней из легких элементов тяжелыми ионами) оно может играть важную роль, давая заметный вклад в полный поток электронов, выходящих в вакуум.

Классификация явлений [6], сопровождающих облучение твердого тела ионами, рассмотрение известных эксперимен-

тальных данных показывает, что явления, протекающие при бомбардировке твердых тел молекулярными ионами, можно разделить на две группы:

1) процессы, результат которых существенно не зависит от того, объединены ли атомарные частицы в молекулу или падают на поверхность мишени независимо друг от друга;

2) явления, для которых такая аддитивность резко нарушается.

Вне рамок этой классификации оказывается потенциальная ионно-электронная эмиссия. Для молекулярных ионов в этом случае характерно наличие еще одного канала потерь выделяющейся при нейтрализации иона энергии, связанного с возбуждением внутренних степеней движения в многоатомной системе и диссоциацией молекул, что резко снижает выход вторичных электронов [22, 23].

К первой группе следует отнести кинетическое выбивание электронов. Для этого явления и была впервые установлена характерная для молекулярных ионов аддитивность выхода вторичных электронов. Все явления, отнесенные в первую группу, возникают в результате электронного торможения первичных ионов и связаны с непосредственной передачей энергии электронам твердого тела [6]. Результаты экспериментов по изучению аддитивных явлений при ионно-электронной эмиссии, где молекулярные ионы выбивали столько же электронов, что и образующие их атомные частицы, движущиеся с той же скоростью, дали основание утверждать [19, 24], что уже в результате первых соударений с атомами мишени молекулярный ион распадается на атомарные частицы и дальше эти частицы движутся независимо друг от друга [6]. Учитывая, что энергия связи фрагментов в молекулярном ионе много меньше, чем энергия первичных ионов или энергия, передаваемая ими при столкновении с атомами мишени, то предположение представляется достаточно обоснованным.

Для случаев отступления от правил аддитивности для ряда явлений в каждом отдельном случае предлагаются дополнения и уточнения модели, при этом авторами [6] отмечены два механизма такого рода:

1) влияние пространственной корреляции частиц, объединенных в молекулу. При этом образуемые каждым ионом в твердом теле каскады столкновений частично перекрываются, что и приводит к различного рода нелинейным эффектам для явлений, связанных с ядерным торможением частиц в твердом теле.

2) при приближении молекулярного иона к поверхности образца в результате взаимодействия с нею (силы зеркального изображения, поляризационные силы и т.д.) создаются условия для преимущественной ориентации молекул. Это обстоятельство также может привести к нелинейным эффектам, например, к обмену энергией между атомными фрагментами при диссоциации молекул.

Нужно отметить, что все явления, отнесенные [6] в первую группу, возникают в результате электронного торможения пер-

вичных ионов и связаны с непосредственной передачей энергии электронам твердого тела.

Из работ, посвященных усовершенствованию и разработке теории взаимодействия ионов с твердым телом, необходимо отметить [25], авторы которой добились поразительно хорошего согласия теории и экспериментальных данных как своих, так и других авторов.

Следует отметить, что процессы и явления, сопровождающие взаимодействие многоатомных ионов с твердым телом, изучены очень слабо, так как практически все эксперименты проводились с ионизованными комплексами, содержащими лишь небольшое число атомных частиц, причем эксперименты проводились не систематически. Поэтому все рассуждения, приведенные выше, основаны на весьма ограниченном экспериментальном материале и нуждаются в дальнейшей проверке и разработке.

В статье рассматриваются и анализируются результаты измерений γ первого динода умножителя при бомбардировке его ионами инертных газов, щелочных металлов, проводится сравнение полученных результатов с известными экспериментальными и теоретическими данными для металлических мишеней, а также представлены и обсуждены результаты измерений γ для кластеров $H^+(H_2O)_N$ и $Cat^+(H_2O)_N$, где Cat^+ — катион щелочного металла, аминокислот, биополимеров, сахаров и кластеров $M^+(H_2O)_N$, где M^+ — квазимолекулярный протонированный ион аминокислот.

Обоснование выбранной методики измерений

Для проверки предлагаемого и используемого далее методического подхода на описанной ниже установке были проведены исследования закономерностей эмиссии электронов при взаимодействии ионов инертных газов с первым динодом вторично-электронного умножителя. Выразим коэффициент усиления умножителя как

$$\eta = I_{\text{умн}} / I_{\text{кол}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{умн}}$ и $I_{\text{кол}}$ — электронные токи, измеряемые на умножителе и на выдвижном коллекторе, соответственно. В то же время коэффициент усиления умножителя

$$\eta = \gamma \cdot \sigma^{n-1}, \quad (2)$$

где γ — коэффициент ионно-электронной эмиссии (коэффициент превращения) с первого динода (или любого иного конвертора) при данной энергии падающего иона; σ — коэффициент электрон-электронной эмиссии последующих динодов умножителя при данной разности потенциалов между динодами; $n-1$ — число

динодов умножителя, бомбардируемых электронами с предыдущего динода.

Из двух выражений (1) (2) для η получаем

$$\gamma = I_{\text{умн}} / I_{\text{кол}} \sigma^{n-1}.$$

Величина σ^{n-1} определялась экспериментально, для чего измерялся коэффициент усиления умножителя для ионов N_2^+ . Согласно [26] для иона N_2^+ при энергии, используемой в эксперименте, $E = 6$ кэВ, $\gamma = 0.41$ электрона / ион. Коэффициент усиления умножителя найден равным $1.35 \cdot 10^4$, откуда величина $\sigma^{n-1} = 3.3 \cdot 10^4$.

Используя величину σ^{n-1} , экспериментально найден коэффициент ионно-электронной эмиссии для протона $\gamma_{H^+} = 0.46$ электрона / ион, что хорошо совпадает с полученным в [27] значением $\gamma_{H^+} = 0.45$ электрона / ион. Во всех дальнейших экспериментах, связанных с измерением коэффициента γ для ионов различного типа, калибровка системы регистрации проводилась по величине γ для протона, поскольку в масс-спектрах всегда присутствовала линия атомарного водорода. Все измерения проводились многократно, и результаты усреднялись. Разброс величин $I_{\text{умн}}$ и $I_{\text{кол}}$ в экспериментах не превышал 10 %.

Экспериментальная установка

Измерения коэффициента γ выполнены на установке, схема которой представлена на рис. 1. Для получения ионов труднолетучих и термически нестабильных веществ при нормальных условиях использовался метод экстракции ионов из растворов при атмосферном давлении — ЭРИАД [28]. Метод заключается в том, что раствор исследуемого вещества в легколетучем растворителе (например, воде) с концентрацией от 10^{-5} до 10^{-2} М подается по металлическому капилляру (1) с объемной скоростью $Q = 10^{-1} - 10^{-3}$ мкл/с. Вблизи свободного торца капилляра, расположенного напротив входной диафрагмы (2) газодинамической системы, за счет разности потенциалов между диафрагмой и капилляром формируется сильное неоднородное электрическое поле, обеспечивающее эффективное электрогидродинамическое распыление исследуемого раствора. Микрокапли раствора диаметром 0.1–1 мкм, составляющие электрогидродинамическую струю, испаряются в области с атмосферным давлением (3), и образовавшиеся ионы исследуемого вещества транспортируются сверхзвуковой струей через первую ступень дифференциальной откачки (4) в высоковакуумную область масс-

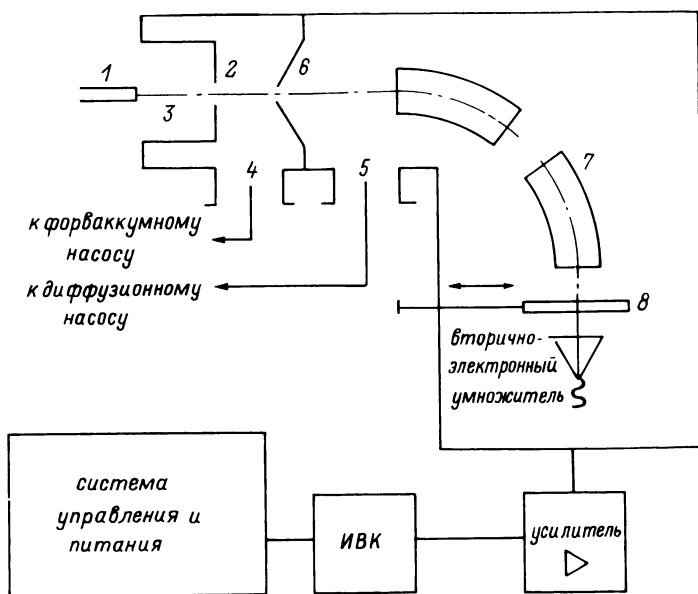


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
 1 — капилляр; 2 — входная диафрагма; 3 — область атмосферного давления, $P = 760$ мм. рт. ст.; 4 — первая ступень дифференциальной откачки, $P = 10$ мм. рт. ст.; 5 — область высокого вакуума масс-анализатора $P = 10^{-5} - 10^{-6}$ мм. рт. ст.; 6 — скиммер; 7 — масс-спектрометр MX1320; 8 — подвижной коллектор — цилиндр Фарадея

анализатора (5), отделенную от первой ступени дифференциальной откачки конической диафрагмой — скиммером (6). Между диафрагмами (2) и (6) подается регулируемое напряжение ΔU , позволяющее управлять, например, распределением кластеров по размерам или видом масс-спектра. Ионы, прошедшие через отверстие в скиммере, далее ускоряются, формируются в пучок и вводятся в анализатор (7) масс-спектрометра, где производится их разделение по массе и регистрация масс-спектра.

Для получения кластерных ионов воды использовался метод ионизации при атмосферном давлении [29]. Кластерные ионы типа $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_N$ образуются при конденсации паров воды, имеющих в спутном газе — воздухе, на первичных ионах в сверхзвуковой струе. Первичные ионы образуются в результате последовательных ион-молекулярных реакций в плазме коронного разряда, зажигаемого у конца острия (капилляра) в области при атмосферном давлении. Напряжение разряда 5 кВ, ток разряда 5 мкА. Газодинамическая система источника ионов обеспечивает возможность работы с высокими значениями ΔU вплоть до 1 кВ и с высокими ускоряющими потенциалами.

Откачка областей газодинамической системы производится механическим насосом со скоростью откачки 5 л/с до давления 1000 Па и паромасляным насосом НПМ-07 со скоростью откачки 700 л/с до давления 10^{-3} Па.

Для регистрации ионов использовался коллектор — цилиндр Фарадея (δ), и вторично-электронный умножитель ВЭУ-2А с динодами из Al_2O_3 [26]. Эксперименты с кластерами и тяжелыми ионами проводились на статическом двухкаскадном масс-спектрометре с двойной фокусировкой МХ1320 (энергия ионов при регистрации до 6 кэВ). Эксперименты с ионами инертных газов проводились на квадрупольном масс-спектрометре МС7303 с источником ионов с электронным ударом.

Для измерения ионных токов, поступающих на выдвинутой коллектор, использовался метод непосредственного интегрирования [30], позволяющий по сравнению с традиционными методами получить более высокую точность и расширить динамический диапазон измеряемых токов. Метод [30] реализован на основе электрометрического интегратора с бесконтактным разрядом измерительного конденсатора. Сигнал с вторично-электронного умножителя поступает на широкополосный усилитель и обрабатывается с помощью измерительно-вычислительного комплекса, входящего в состав масс-спектрометра.

Все измерения проводились в обычных условиях: умножитель находился при комнатной температуре и специально не прогревался. Получение чистой поверхности динода в том смысле, как это понимается в современной электронике, сопряжено с большими экспериментальными трудностями и попросту невозможно в условиях реального масс-спектрометрического эксперимента. При давлении реального напуска анализируемого вещества: 10^{-4} Па и ниже монослои атомов и молекул газов и паров, присутствующих в масс-анализаторе, образуются на поверхностях за время порядка 1 с и меньше и могут быть устранены только прогревом до высоких температур [31]. Поскольку состояние поверхности играет существенную роль в процессах ионно-электронной эмиссии под действием ионов средних энергий [17, 32], прямое сравнение результатов масс-спектрометрического эксперимента с литературными данными для чистых металлических мишеней, полученными в высоком вакууме, затруднено. Проблема была решена проведением „модельных“ экспериментов с известными и простыми объектами — например, ионами инертных газов. Измерения, сделанные

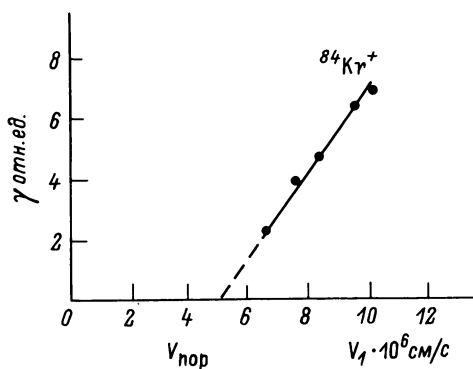


Рис. 2. Зависимость коэффициента γ для Kr^+ от скорости ионов. $E = \text{const} = 4 \text{ кэВ}$

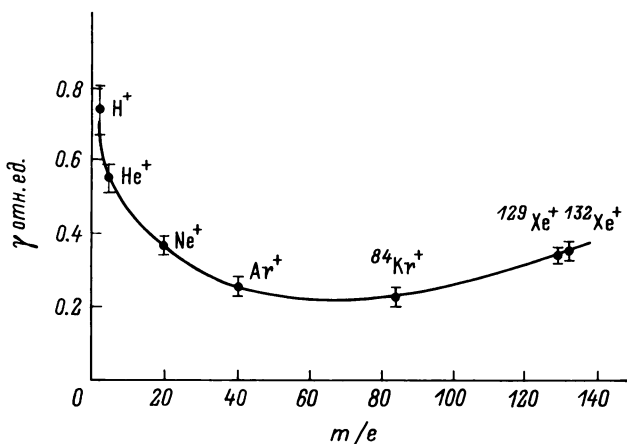


Рис. 3. Зависимость коэффициента γ от массы иона для смеси инертных газов и водорода при постоянной энергии взаимодействия с твердым телом

для ионов Kr^+ , взаимодействующих с первым динодом умножителя, показали, что в области скоростей ионов V от $6.5 \cdot 10^6$ см/с до $1.1 \cdot 10^7$ см/с (кинетическое выбивание) зависимость γ от скорости близка к линейной (рис. 2). Экстраполяция измеренного участка зависимости приводит к значению пороговой скорости кинетического выбивания $V_{\text{пор}} = 5.3 \cdot 10^6$ см/с. Эта величина близка к минимальной величине $V_{\text{пор}} = 5.5 \cdot 10^6$ см/с, полученной экспериментально в работе [33] для Cu-Be динода и несколько меньше предсказанной теоретически [12] величины $V_{\text{пор}} = 6-7 \cdot 10^6$ см/с. На рис. 3 представлена полученная по описанной методике зависимость γ от массы частицы для ионов инертных газов $^4\text{He}^+$, $^{20}\text{Ne}^+$, $^{40}\text{Ar}^+$, $^{84}\text{Kr}^+$, $^{129}\text{Xe}^+$ и протона H^+ при постоянной для всех ионов энергии взаимодействия с первым динодом умножителя $E = 4$ кэВ. Наблюдаемое уменьшение величины γ с увеличением атомного номера (массы) падающего иона полностью согласуется с результатами работы [34]. Увеличение значения γ для $^{129}\text{Xe}^+$ и $^{132}\text{Xe}^+$ по сравнению, например, с $^{84}\text{Kr}^+$ отмечено в работе [7] и связывается в ней с различием в структуре электронных оболочек атомарных ионов Xe^+ по сравнению с другими ионами инертных газов, приводящим к изменению величины $\gamma_{\text{пот}}$ по механизму потенциальной эмиссии.

Таким образом, по результатам экспериментов с ионами инертных газов можно сделать вывод, что при использовании ВЭУ в качестве детектора ионов при масс-спектрометрическом

анализе этих газов, конверсия ионного тока в электронный на поверхности первого динода происходит в соответствии с существующими теоретическими представлениями о механизме образования эмиттируемых электронов при ионной бомбардировке твердого тела и при этом зависимость от условий эксперимента достаточно хорошо количественно согласуется с известными экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Milora S.* // *J. Fusion Energy.* — 1981. — V. 1. — P. 15—19.
2. *Ковалев В.П., Харин В.П., Гордеев В.В.* // *Атомная энергия* — 1972. — Т. 32. — С. 342—348.
3. *Takagi T., Yamata I., Takaoka H.* // *Surface Science.* — 1981. V. 106. — P. 544—552.
4. *Ibach H.* / *Electron Spectroscopy for Surface Analysis.* Ed. by H. Ibach Berlin. Springer. — 1977.
5. *Петров Н.Н., Аброян И.А.* Диагностика поверхностей с помощью ионных пучков. — Л.: ЛГУ. — 1977. — С. 250.
6. *Дорожкин А.А., Петров Н.Н.* // *Труды ЛПИ. Физическая электроника.* — 1980. — N 371. — С.3—18.
7. *Kaminsky M.* / *Atomic and Ionic Impact Phenomena on Metal Surfaces.* Springer-Verlag. Berlin—Heidelberg—New York. — 1965. — 470 P.
8. *Recknagel E.* // *Ber. Bunsenges Phys. Chem.* — 1984. — V. 88. — P. 201—204.
9. *Николаев Е.Н., Танцире Г.Д., Сараев В.А.* // *ЖТФ.* — 1978. — Т. 48. С. 406—409.
10. *Александров М.Л., Галль Л.Н., Краснов Н.В. и др.* // *ДАН.* — 1984. — Т. 277. — С. 379—384.
11. *Sternglass E.* // *Phys. Rev.* — 1957. — V. 108. — P. 1—15.
12. *Кишиневский Л.М., Парилис Э.С.* // *ФТТ.* — 1961. — Т. 3. — С. 1219—1225.
13. *Кишиневский Л.М., Парилис Э.С.* // *Изв. АН СССР.* 1962. — Т. 26. — С. 1409—1417.
14. *Винокуров Л.Я., Кишиневский Л.М., Парилис Э.С.* // *Изв. АН СССР.* — 1976. — Т. 40. — С. 1745—1750.
15. *Schou Y.* // *Phys. Rev.* — 1980. — V. 22. — P. 2141—2246.
16. *Hagstrum H.* // *Phys. Rev.* — 1954. — V. 96. — P. 336—341.
17. *Аброян И.Я., Еремеев М.А., Петров Н.Н.* // *УФН.* — 1967. — Т. 92. — С. 105—187.
18. *Дорожкин А.А., Мишин А.Н., Аптемяев В.П.* // *Тр. ЛПИ. Физическая электроника.* — 1975. — № 345. — С. 18—21.
19. *Петров Н.Н., Дорожкин А.А., Мишин А.Н.* // *Изв. АН СССР.* — 1974. — Т. 38, N 2. — С. 249—253.
20. *Арифов У.А.* Взаимодействие атомных частиц с поверхностью твердого тела. — М.: Наука. 1968. — 159 с.

21. *Parilis E.* Survey of Phenomena in Ionized Gases, Invited Papers JAEA, Vienna. — 1968. — P. 309—323.
22. *Propst F., Luscher E.* // *Phys. Rev.* — 1963. — V. 132. — P. 1037—1044.
23. *Дорожкин А.А., Петров Н.Н.* // *ФТТ.* — 1975. — Т. 17. — С. 1848—1852.
24. *Петров Н.Н., Дорожкин А.А.* // *ФТТ.* — 1961. — Т. 3. — С. 53—58.
25. *Ferron J., Alonso E., Baragiolo R., Oliva-Florico A.* // *J. Phys. D. Appl. Phys.* — 1981. — V. 4. — P. 1707—1721.
26. *Айбунд М.П., Поленов Б.В.* / Вторично-электронные умножители открытого типа и их применение. — М.: Энергоиздат. 1981. — С. 138.
27. *Beuhler R., Friedman L.* // *Int. J. Mass Spect. Ion Phys.* — 1977. — V. 23. — P. 81—87.
28. *Александров М.Л., Галль Л.Н., Краснов Н.В. и др.* // *ЖАХ.* — 1984. — Т. 40. — С. 1160—1168.
29. *Horning E., Horning M., Carrol D. etc.* // *Anal. Chem.* — 1973. — V. 45. — P. 936—942.
30. *Гольдин А.А., Гузиков Е.С., Исаков Ю.А.* // Научное приборостроение: сб. научн. тр. — Л.: Наука, 1982. — С. 140—143.
31. *Зандберг Э.Я.* // *ЖТФ.* — 1955. — Т. 25, Вып. 10. — С. 1386—1392.
32. *Добрецов Л.Н.* Электронная и ионная эмиссия. ГИТТЛ. — 1952. — С. 350.
33. *Schram B., Voerboom A., Kleine W., Kistemaker J.* // *Physica.* — 1966. — V. 32. — P. 749—754.
34. *Петров Н.Н.* // *Изв. АН СССР.* — 1960. — Т. 24. — С. 673—680.