

войной; см. *Ионный проектор, Атомный зонд*). В этом случае, кроме измерения $Q_{\text{п}}$, коэф. диффузии, предэкспоненциального множителя в ур-нии диффузии, однозначно определяется механизм перемещения частиц.

Данные о П. д. важны для ряда техн. приложений, таких как ионные двигатели, точечные источники ионов, катоды и др., а также для решения смежных науч. задач: определения сил связи на поверхности, изучения двумерных фазовых переходов, кинетики каталитич. реакций, определения поверхностной энергии анизотропных твёрдых тел.

Лит.: Поверхностная диффузия и растекание. Сб. ст., под ред. Я. Е. Гегузина, М., 1969; Одишария Г. А., Шредник В. Н., Об автоматизированных методах количественного изучения поверхностной диффузии и самодиффузии, Труды 1-го Всесоюзного совещания по автономной микроскопии, Харьков, 1976, с. 81 (ХФТИ 76-43); Мюллер Э., Цонг Т., Полевая ионная микроскопия, полевая ионизация и полевое испарение, пер. с англ., М., 1980; Гегузин Я. Е., Кагановский И. Ю. С., Диффузионные процессы на поверхности кристалла, М., 1984; Naumovets A. G., Vedula Yu. S., Surface Diffusion of absorbates, «Surface Sci. Rep.», 1984, v. 4, p. 365.

В. Н. Шредник.

ПОВЕРХНОСТНАЯ ИОНИЗАЦИЯ — образование ионов в процессе термич. десорбции частиц с поверхности твёрдого тела. Путём П. и. могут образовываться положительные и отрицат. ионы (последние, если частица обладает *сродством к электрону*) атомов, молекул, радикалов и ассоциатов (частиц, образующихся присоединением к молекуле атома или др. частицы). П. и. — термический равновесный процесс, испаряющиеся частицы имеют больцмановское распределение по энергии с темп-рой T распределения, равной темп-ре твёрдого тела.

П. и. была открыта И. Ленгмюром и К. Х. Кингдоном (I. Langmuir, K. H. Kingdon, 1923), обнаружившими, что в заполненном парами Cs цилиндрич. диоде с анодом в виде накалённой вольфрамовой проволоки протекает ток положит. ионов. Они применили *Saha формулу* для термич. ионизации газа к описанию ионизации паров одноатомных веществ внутри однородно нагретой металлич. полости и нашли выражение для степени П. и. α , равной отношению концентраций ионов (n_+) и атомов (n_0) внутри полости:

$$\alpha_+ = n_+/n_0 = A_+ \exp[e(\varphi - V)/kT]. \quad (1)$$

Здесь A_+ — отношение статистич. весов состояний положит. ионов и атомов; e — элементарный заряд; $e\varphi$ — работа выхода электрона из стенки полости; V — потенциал ионизации атома; T — темп-ра стенок полости. Ф-ла (1) наз. ф-лой Саха — Ленгмюра. П. и. с образованием отрицат. ионов была обнаружена позднее. В этом случае:

$$\alpha_- = n_-/n_0 = A_- \exp[e(S - \varphi)/kT], \quad (2)$$

где S — сродство атома к электрону, A_- — отношение статистич. весов состояний отрицат. ионов и атомов.

Долгое время изучали и использовали П. и. на тугоплавких металлах атомов щелочных элементов (с наименьшими V) и атомов галогенов (с наибольшими S). В дальнейшем было установлено, что на нагретых твёрдых телах (металлах и полупроводниках) могут ионизироваться атомы многих элементов, ряд молекул (в т. ч. органич. соединений), а также частиц, образующихся в хим. реакциях на поверхности; первичные частицы сложного состава могут претерпевать реакции по многим каналам (напр., диссоциировать) и образовывать одновременно неск. видов ионов.

Для практич. использования важна П. и. частиц на открытых поверхностях, в условиях отбора ионного тока при действии внешних электр. полей, ускоряющих ионы в направлении от поверхности. При этом ионизация также может быть термически равновесной, если за время жизни частиц на поверхности между ними и твёрдым телом устанавливается тепловое равновесие. В этом случае под степенью П. и. понимают отношение числа заряд. частиц к числу нейтральных того же хим. состава в испаряющемся потоке частиц и применяют для

нахождения α_{\pm} соотношения статистич. термодинамики, учитывая, что ускоряющее поле уменьшает теплоту испарения ионов. При напряжённости поля E у поверхности

$$\alpha_{\pm}(E) = \begin{cases} A_+ \exp[e(\varphi - V + \sqrt{eE})/kT], \\ A_- \exp[e(S - \varphi + \sqrt{eE})/kT] \end{cases} \quad (3)$$

и может быть значительно большей, чем в отсутствие поля. В случае частиц сложного состава в (3) V — первый адиабатич. потенциал ионизации, A_{\pm} — отношение полных статистич. сумм состояний заряженной и нейтральной частиц при темп-ре T .

Т. к. величина α характеризует зарядовое равновесие в испаряющемся потоке частиц, она не зависит от способа поступления частиц на поверхность: они могут поступать из окружающего пара, в виде атомных и молекулярных потоков, быть частицами поверхностного слоя самого твёрдого тела или чужеродными частицами, предварительно нанесёнными на поверхность, а также объёмными примесями, диффундирующими к поверхности. В условиях теплового равновесия в слое частиц на поверхности различия в способах поступления частиц сказываются лишь на температурных и временных зависимостях поступающих и испаряющихся потоков и, соответственно, ионных токов. Сложившееся разделённое термически равновесной ионизации на нагретых поверхностях на П. и. (первые два способа) и на терм. ионизацию эмиссию (остальные способы) отражает лишь различие способов транспорта первичных частиц к ионизирующей поверхности.

В стационарных условиях при поступлении частиц извне поток ν поступающих частиц равен испаряющемуся ($\nu = \nu_{\pm} + \nu_0$), так что при $T = \text{const}$ и $\nu = \text{const}$ на поверхности устанавливается равновесное покрытие $N(T, \nu)$ первичными частицами; потоки ν_+ и ν_- , и, соответственно, ионные токи постоянны во времени:

$$\nu_{\pm} = NC \exp(-l_{\pm}/kT), \quad \nu_0 = ND \exp(-l_0/kT),$$

где l — энергия, необходимая для десорбции частиц, а C и D — слабо зависящие от T множители. Для вычисления плотностей j стаб. ионных токов вводят коэф. П. и. $\beta_{\pm} = \nu_{\pm}/\nu$, показывающий, какая часть поступающего потока частиц ионизируется, $\beta = \alpha/(1 + \alpha)$.

В случае первичных частиц сложного состава и поток ν к поверхности может превращаться в неск. (i) видов вторичных частиц в результате диссоциации, хим. реакции и т. д. Его можно представлять состоящим из i потоков ν_i и считать ионизацию частиц каждого вида независимой. При этом ν_i и ν связаны соотношением $\nu_i(T, E) = \gamma_i(T, E)\nu$, где γ_i — коэфф. выхода реакции на поверхности по i -му каналу. В общем случае $j_{\pm i} = e\nu(1-R)\gamma_i\beta_i$, где R — коэф. отражения первичных частиц от поверхности. Подставляя β_i , получим:

$$j_{+i} = \frac{e\nu(1-R)\gamma_i}{1 + A_{i+}^{-1} \exp[e(V_i - \varphi - \sqrt{eE})/kT]}, \quad (4)$$

$$j_{-i} = \frac{e\nu(1-R)\gamma_i}{1 + A_{i-}^{-1} \exp[e(\varphi - S_i - \sqrt{eE})/kT]}.$$

При П. и. атомных потоков $R = 0$, $\gamma = 1$.

Для трудноионизируемых веществ ($\alpha \ll 1$) выражения (4) упрощаются (рис. 1):

$$\begin{aligned} j_{+i} &\approx e\nu(1-R)\gamma_i A_{i+} \exp[e(\varphi + \sqrt{eE} - V_i)/kT], \\ j_{-i} &\approx e\nu(1-R)\gamma_i A_{i-} \exp[e(S_i - \varphi + \sqrt{eE})/kT]. \end{aligned} \quad (5)$$

Измеряя j , можно найти каждую из входящих в (5) величин. На этом основаны поверхностно-ионизационные методы исследований поверхности твёрдого тела и процессов взаимодействия частиц с твёрдым телом.

В случае $\alpha \gg 1$, когда $e(\varphi + \sqrt{eE} - V_i) \gg kT$ и $e(S_i + \sqrt{eE} - \varphi) \gg kT$, плотность ионного тока:

$$j_{\pm i} \approx e\nu(1-R)\gamma_i. \quad (6) \quad 645$$