

УДК 539.196+531.662

ВРЕМЯПРОЛЕТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ НАДТЕПЛОВЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПУЧКОВ ГАЛОГЕНИДОВ ЩЕЛОЧНЫХ И ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ

© 2024 г. В. М. Азриель^а, В. М. Акимов^а, Е. В. Ермолова^а, Д. Б. Кабанов^а,
Л. И. Колесникова^а, Л. Ю. Русин^{а,*}, М. Б. Севрюк^а

^аИнститут энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе
Федерального исследовательского центра химической физики
им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук
Россия, 119334, Москва, Ленинский проспект, 38, корп. 2
*e-mail: rusin@chph.ras.ru

Поступила в редакцию 17.07.2023 г.

После доработки 14.11.2023 г.

Принята к публикации 06.12.2023 г.

Описан способ регистрации времяпролетных спектров надтепловых газодинамических примесных молекулярных пучков галогенидов щелочных и щелочноземельных металлов без необходимости определять и корректировать спектры с учетом временных аппаратных задержек. Метод основан на регистрации ионов, образующихся при столкновительно-индуцированной диссоциации молекул с ионной связью, двумя вторично-электронными множителями, расположенными на разных расстояниях от прерывателя по ходу пролета пучка.

DOI: 10.31857/S0032816224030203 EDN: OTCFSJ

Времяпролетный (ВП) метод определения энергетических характеристик молекулярных пучков успешно используется на протяжении нескольких десятилетий. Метод состоит в разбиении прерывателем пучка частиц на короткие по времени пакеты и регистрации времени их пролета от прерывателя до детектора. Чаще всего в качестве детектора используется масс-спектрометр, а прерывателем является тонкий вращающийся диск с равномерно расположенными щелями. При этом одновременно с каждым прерыванием пучка вырабатывается стартовый сигнал для ВП-измерений от фотоэлемента (состоящей, например, из светодиода и фотодиода), смонтированной диаметрально противоположно оси пучка на прерывателе.

Экспериментально измеренное положение максимума функции распределения по времени пролета частиц искажено в той или иной степени различными аппаратными задержками, о характере которых можно судить по временной

диаграмме от прерывания пучка до регистрации ВП-спектра (рис. 1). Импульс частиц пучка 1 соответствует положению у прерывателя, 3 — положение импульса в конце базы пролета при отсутствии возможных аппаратных задержек, 4 — регистрируемый импульс на финише регистрирующего тракта. Синхроимпульс 2 от фотодиода запускает начало развертки временных каналов, и на схеме изображена ситуация, когда импульс пучка генерируется раньше времени старта развертки на величину t_3 . Величина t_0 отвечает времени пролета частицами известной базы в идеальном случае при отсутствии временных задержек и определяется только скоростью частиц и длиной базы пролета. Значение t_p соответствует промежутку времени от образования ионов в ионном источнике масс-спектрометра до их регистрации вторично-электронным множителем, и, наконец, t_u — это время, измеренное с учетом задержек в запуске и регистрации. Таким образом, искомое время $t_0 = t_3 + t_u - t_p$.

Задержка t_3 может иметь положительное или отрицательное значение и определяется не только ошибкой из-за неодновременности прерывания пучка и света на фотодиод, но и задержками в формировании синхроимпульса и запуске временных счетных каналов.

Аналізу величин этих задержек, их зависимостей от параметров ВП-системы и их определению посвящен ряд работ [1–3]. Отметим, что точность положения максимума ВП-спектра зависит от количества и точности измерения этих задержек и требует их контроля в процессе эксперимента. Однако для некоторых соединений, образующих пучок, при определенных условиях, как показал наш опыт, возможна регистрация пучков без масс-спектрометра и без калибровки ВП-шкалы. К таким соединениям относятся молекулы галогенидов щелочных и щелочноземельных металлов с небольшой (несколько эВ) энергией диссоциации на ионы, которая становится возможной при столкновении частиц пучка с тяжелым атомом. В качестве примера можно привести процесс образования ионов при столкновительно-индуцированной диссоциации некоторых солей щелочных металлов с ксеноном в качестве атома-снаряда. Ранее [4] мы использовали это явление при измерении ВП-спектров пучка молекул CsCl, регистрируя ионы Cs⁺ от процесса



вторично-электронным умножителем ВЭУ-6, расположенным в конце базы пролета, без масс-спектрометра. Ниже мы кратко опишем усовершенствованный метод измерения ВП-спектров, разработанный на основе работы [4], и способ ВП-измерений надтеплового примесного газодинамического пучка молекул без необходимости определения аппаратных временных задержек.

В настоящей работе был использован пучок иодида калия из-за приемлемой массы и энергии диссоциации, легко достижимой для примесного пучка KI в молекулярном водороде. Схема измерений приведена на рис. 2. Источником пучка 1 являлась двухкамерная печь, конструкция которой описана в работе [5]. Источник обеспечивал получение примесного пучка KI при истечении небольшого количества соли в смеси с водородом ($P_{\text{KI}} = 0.01$ Торр, $P_{\text{H}_2} = 180\text{--}700$ Торр) через сопло диаметром 0.12 мм в вакуум с дальнейшим формированием пучка скиммером 2 и коллима-

тором 3. В предельном случае при истечении такой смеси скорость молекул KI возрастет до скорости газа-носителя с соответствующим увеличением энергии E согласно выражению

$$E = 7 kT M_{\text{KI}} / 4,$$

где k — постоянная Больцмана, T — температура сопла, M_{KI} — молекулярный вес KI. При $T = 1000$ К расчетная энергия молекул пучка KI составит 25 эВ.

Для ВП-измерений пучок прерывался диском 4 диаметром 100 мм со щелями шириной 1 мм и частотой вращения 250 Гц. При напуске в камеру ксенона до давления $5 \cdot 10^{-5}$ Торр и энергии пучка больше порога диссоциативной ионизации молекулы KI ее распад происходит вдоль всей траектории. Положительные ионы K⁺

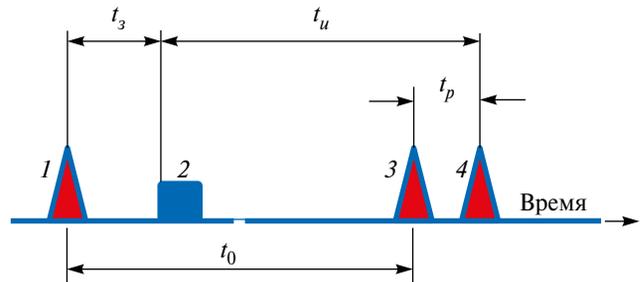


Рис. 1. Временная диаграмма прохождения аппаратных импульсов при регистрации ВП-спектров. Импульсы пучка 1, 3 и 4 — соответственно у прерывателя, в конце базы пролета и после масс-спектрометра. Синхроимпульс 2 запускает временные счетные каналы.

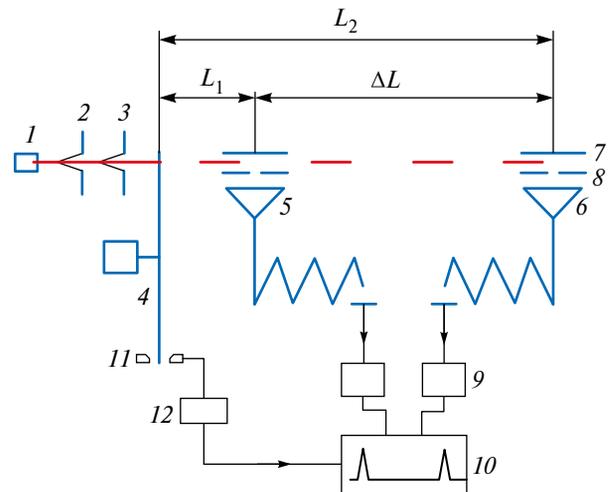


Рис. 2. Схема измерений: 1 — источник пучка, 2 — скиммер, 3 — коллиматор, 4 — диск-прерыватель, 5, 6 — умножители типа ВЭУ-6, 7 — электрод, 8 — диафрагма, 9 — усилитель-дискриминатор, 10 — ВП-модуль КАМАК, 11 — фотодиод, 12 — формирователь синхроимпульса.

регистрировались двумя умножителями 5 и 6 типа ВЭУ-6, установленными вдоль трассы пучка на расстоянии 14.5 см друг от друга с небольшим смещением относительно его оси. Электроды 7 и диафрагмы 8 служили для улучшения сбора ионов и пространственного разрешения. Сигналы с умножителей после усилителя-дискриминатора 9 поступали на ВП-анализатор 10 модуля КАМАК [6] с последующим накоплением и отображением ВП-спектра. Цикл работы многоканального временного анализатора инициировался импульсом от фото диода 11 через повторитель и формирователь 12. Измеренная умножителями 5 и 6 разность ΔT времен пролета пучка расстояний L_1 и L_2 соответственно не зависит от аппаратных задержек и позволяет напрямую определить наиболее вероятную скорость частиц:

$$L_1 / U = T_1 \pm T_d, L_2 / U = T_2 \pm T_d, U = \Delta L / \Delta T,$$

где U — наиболее вероятная скорость пучка, T_1 и T_2 — соответственно времена пролета от прерывателя до умножителей 5 и 6, T_d — суммарная аппаратная задержка, $\Delta L = L_2 - L_1$, $\Delta T = T_2 - T_1$.

На рис. 3 приведены ВП-спектры пучка KI при давлении в источнике $P_0 = 350$ Торр, измеренные с помощью умножителей 5 и 6.

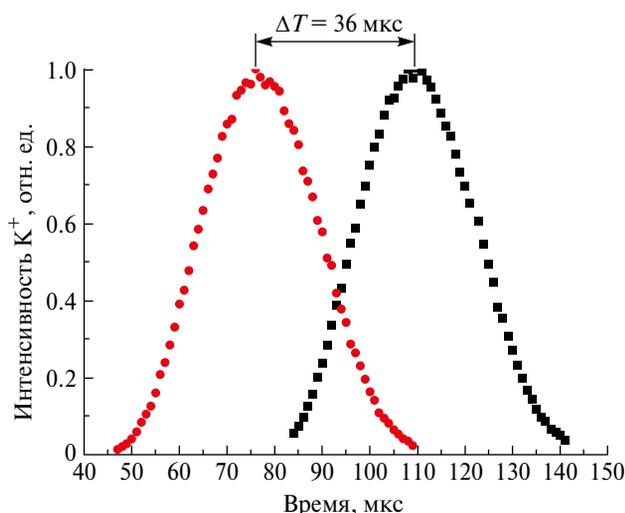


Рис. 3. ВП-спектры пучка молекул KI, измеренные умножителями ВЭУ-6 при регистрации положительных ионов калия. Спектры нормированы на равенство максимумов распределений.

Поступательная энергия частиц пучка при этом составляла 13.7 эВ, что приводит к относительной энергии столкновения с ксеноном, равной 5.9 эВ.

В заключение отметим, что предлагаемый способ определения наиболее вероятной скорости пучков, обладающих достаточной поступательной энергией и энергией диссоциации на ионы, равной единицам эВ, несмотря на известные ограничения, позволяет повысить точность ВП-измерений и избежать утомительной процедуры анализа и определения аппаратных задержек. Немаловажным фактором является также ненужность масс-спектрометра, отсутствие высокого вакуума в камере регистрации и селективность ионизации только молекул пучка.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук по теме “Физико-химические проблемы энергетики и экологии” (Госзадание 1.12).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Young W.S., Rodgers W.E., Knuth E.L. // Rev. Sci. Instrum. 1970. V. 41. № 3. P. 380. <https://doi.org/10.1063/1.1684521>
2. Beijerinck H.C.W., Moonen R.G.J.M., Verster N.F. // J. Phys. E: Sci. Instrum. 1974. V. 7. № 1. P. 31. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/7/1/009>
3. Pauly H. // Atom, Molecule, and Cluster Beams II. Cluster Beams, Fast and Slow Beams, Accessory Equipment and Applications. Berlin: Springer, 2000. Chap. 3.2. P. 156. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05902-9_3
4. Азриель В.М., Акимов В.М., Русин Л.Ю. // ПТЭ. 2007. № 3. С. 88. <https://doi.org/10.1134/S0020441207030128>
5. Азриель В.М., Акимов В.М., Ермолова Е.В., Кабанов Д.Б., Колесникова Л.И., Русин Л.Ю., Севрюк М.Б. // ПТЭ. 2020. № 6. С. 120. <https://doi.org/10.31857/S0032816220060026>
6. Huiskens F., Pertsch T. // Rev. Sci. Instrum. 1987. V. 58. № 6. P. 1038. <https://doi.org/10.1063/1.1139604>