

ЛАБОРАТОРНАЯ  
ТЕХНИКА

УДК 539.196+531.662

**ВРЕМЯПРОЛЕТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ НАДТЕПЛОВЫХ  
МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПУЧКОВ ГАЛОГЕНИДОВ ЩЕЛОЧНЫХ И  
ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ**

©2024 г. В. М. Азриель<sup>а</sup>, В. М. Акимов<sup>а,\*</sup>, Е. В. Ермолова<sup>а</sup>,  
Д. Б. Кабанов<sup>а</sup>, Л. И. Колесникова<sup>а</sup>, Л. Ю. Русин<sup>а</sup>, М. Б. Севрюк<sup>а</sup>

<sup>а</sup> *Институт 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 умножителями, расположенными на разных расстояниях от прерывателя по ходу пролета пучка.

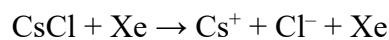
Времяпролетный (ВП) метод определения энергетических характеристик молекулярных пучков успешно используется на протяжении нескольких десятилетий. Метод состоит в разбиении прерывателем пучка частиц на короткие по времени пакеты и регистрации времени их пролета от прерывателя до детектора. Чаще всего 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 фотоячейки (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 умножителем, 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

Рис. 1

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<sup>+</sup> от процесса



вторично-электронным множителем 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. **Рис. 2** 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 коллиматором 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,  $M_{\text{KI}}$  — 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<sup>+</sup> регистрировались двумя множителями 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 множителей 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 фотодиода 11 через повторитель и формирователь 12. Измеренная множителями 5 и 6 разность  $\Delta T$  времен пролета пучка расстояний  $L_1$  и  $L_2$  соответственно не зависит от аппаратных задержек и позволяет напрямую определить наиболее вероятную скорость частиц:

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

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,  $\Delta L = L_2 - L_1$ ,  $\Delta T = T_2 - T_1$ .

**Рис. 3** На рис. 3 приведены ВП-спектры пучка KI при давлении в источнике  $P_0 = 350$  Торр, измеренные с помощью умножителей 5 и 6. 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 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](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>  
<https://doi.org/10.1134/S0020441220060020>
6. *Huisken F., Pertsch T.* // Rev. Sci. Instrum. 1987. V. 58. № 6. P. 1038.  
<https://doi.org/10.1063/1.1139604>

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

**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.

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

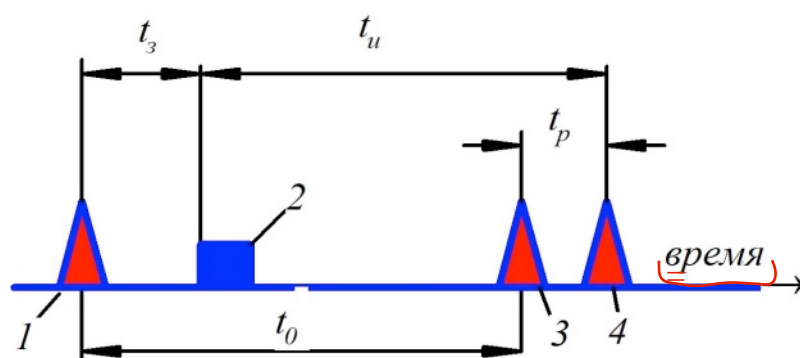


Рис. 1

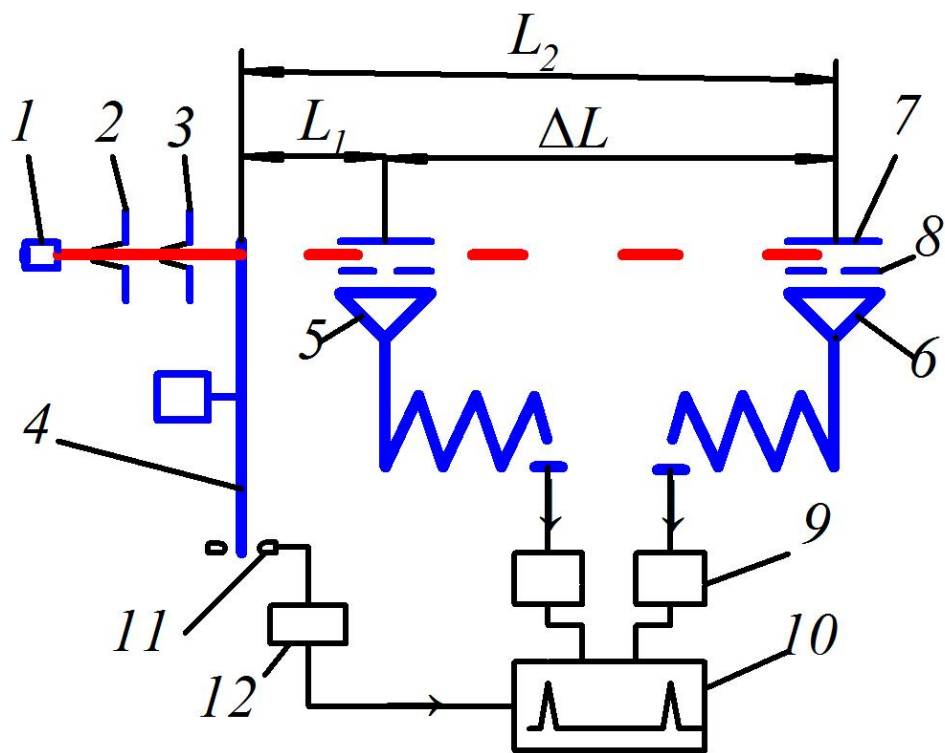


Рис. 2

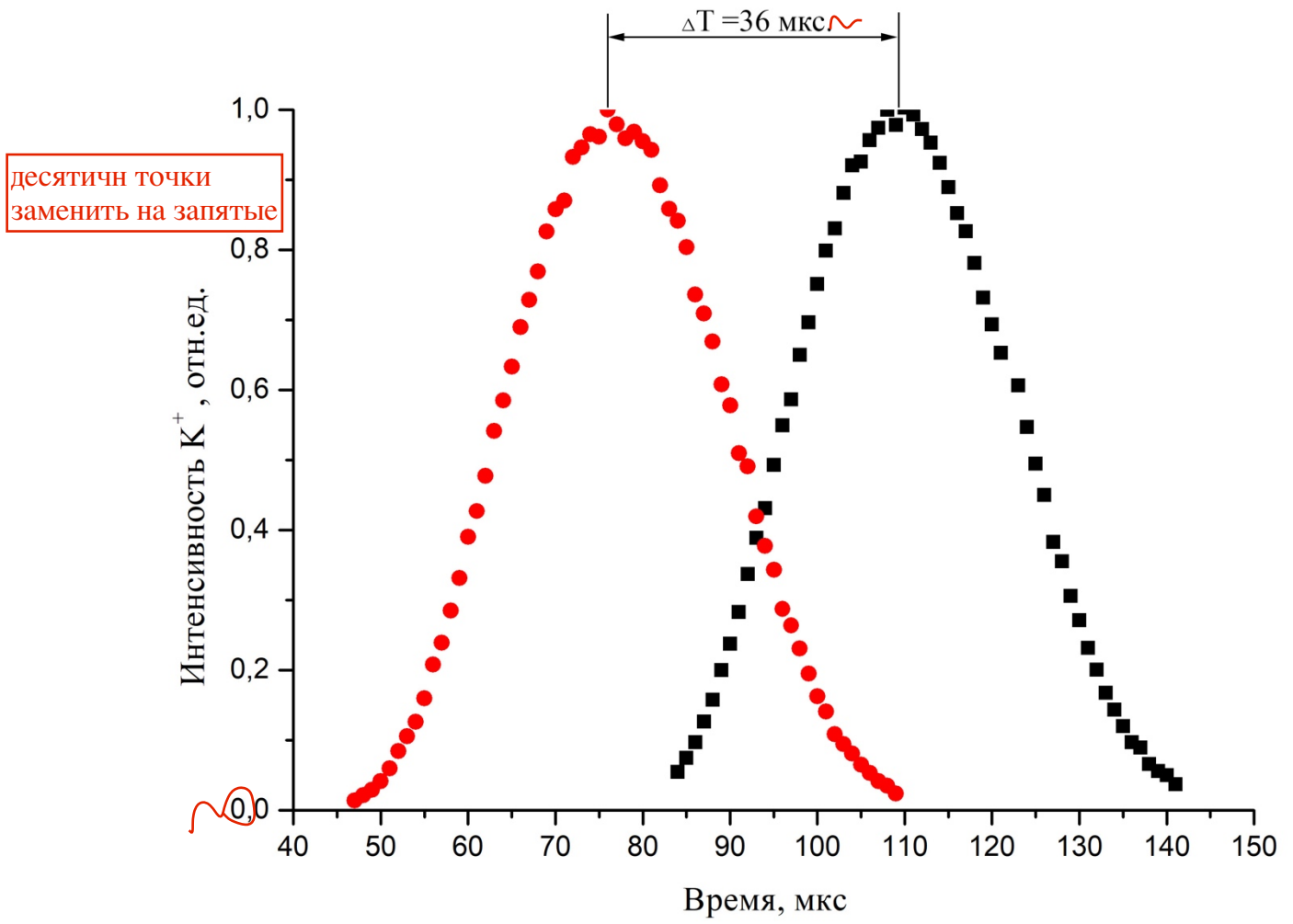


Рис. 3

Для связи с авторами:

**Акимов Вячеслав Михайлович**  
E-mail: [vyacheslav-akimov@rambler.ru](mailto:vyacheslav-akimov@rambler.ru)  
E-mail: [vakimov80@gmail.com](mailto:vakimov80@gmail.com)

Русин Лев Юрьевич  
E-mail: [lev.yu.rusin@yandex.ru](mailto:lev.yu.rusin@yandex.ru)

E-mail: [rusin@chph.ras.ru](mailto:rusin@chph.ras.ru)  
Севрюк Михаил Борисович  
E-mail: [2421584@mail.ru](mailto:2421584@mail.ru)

Для переводчика:

**Time-of-Flight Spectroscopy of Hyperthermal Molecular Beams of alkali and alkaline earth metal halides**

**V. M. Azriel<sup>a</sup>, V. M. Akimov<sup>a,\*</sup>, E. V. Ermolova<sup>a</sup>, D. B. Kabanov<sup>a</sup>, L. I. Kolesnikova<sup>a</sup>,  
L. Yu. Rusin<sup>a</sup>, and M. B. Sevryuk<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> *Tal'rose Institute for Energy Problems of Chemical Physics,*

*Semënov Federal Research Center of Chemical Physics,*

*Russian Academy of Sciences,*

*Moscow, 119334 Russia*

*\*e-mail: [rusin@chph.ras.ru](mailto:rusin@chph.ras.ru)*

Abstract:

We describe a method for recording time-of-flight spectra of hyperthermal gas-dynamic seeded molecular beams of alkali and alkaline earth metal halides. This method being free from the need to determine and adjust the spectra taking into account time hardware delays. The method is based on recording ions formed in collision-induced dissociation (CID) of molecules with an ionic bond by two secondary multipliers located at different distances from the beam chopper along the beam passage.

ПЕРЕВОД ТЕРМИНОВ

Времяпролетный (ВП) — time-of-flight (TOF), примесный пучок — seeded beam, прерыватель — chopper, надтепловой — hyperthermal, двухкамерная печь — double oven, скиммер — skimmer, газ-носитель — carrier gas, задержка — delay, столкновительно-индуцированная диссоциация — collision-induced dissociation .