

ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 537.5:543.51+53.088

**ИСТОЧНИК ИОНОВ В ИЗМЕРЕНИЯХ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ
ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ РЕЗОНАНСНОГО ЗАХВАТА
ЭЛЕКТРОНОВ МОЛЕКУЛАМИ**

©2025 г. В. Г. Лукин^{а,*}, О. Г. Хвостенко^а, Г. М. Туймедов^а

^аИнститут физики молекул и кристаллов

Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук

Россия, 450075, Уфа, просп. Октября, 151

*e-mail: lukin@anrb.ru

Поступила в редакцию 08.04.2025 г.

После доработки 03.06.2025 г.

Принята к публикации 08.07.2025 г.

Изучались образование, автоионизация и время жизни долгоживущих отрицательных молекулярных ионов нитробензола ($C_6H_5NO_2$), образующихся при резонансном захвате. Использовался переоборудованный для этих целей статический масс-спектрометр МИ-1201В. Проведена дополнительная модификация ионного источника для исключения попадания в пучок ионов, выходящих из щели крышки камеры ионизации, ионов, десорбированных с ее стенок, что приводило к искажению результатов измерения времени жизни (τ_a) ионов. Подтверждено отсутствие температурной зависимости времени жизни ионов в диапазоне 393–473 К, что свидетельствует, с одной стороны, об эффективном исключении интегрирования десорбированных ионов в пучок ионов, выходящих из щели крышки камеры ионизации, а с другой стороны, – о получении корректной величины $\tau_a = 50.0 \pm 1.0$ мкс.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема измерения времени жизни (τ_a) долгоживущего отрицательного молекулярного иона (ДОМИ) относительно автоотщепления электрона (автоионизации) как характеристики процесса захвата медленных электронов ($\epsilon_{эл} = 0\text{--}15$ эВ) молекулой до сих пор актуальна. Это связано с противоречивыми результатами для $\tau_a = 10\text{--}10^4$ мкс, полученными разными исследовательскими группами после выхода пионерской работы Эдельсона [1].

На сегодняшний день на основании исследований [2–6] установлено, что фундаментальная причина невоспроизводимости значений τ_a – следствие физической адсорбции ионов на поверхности крышки камеры ионизации (КИ) источника ионов (рис. 1). Адсорбция ДОМИ происходит при их приближении к щели в крышке КИ, предназначенной

для выхода пучка ионов, сформировавшегося в процессе ускорения при их выводе из области ионизации. Формирование и ускорение пучка ионов осуществляются выталкивающим полем, создаваемым небольшой разностью потенциалов между крышкой КИ и основанием выталкивающего электрода. Дополнительно ионы вытягиваются полем вытягивающего электрода, проникающим внутрь КИ через щель в ее крышке. Результатом процесса адсорбции ДОМИ на поверхности крышки КИ является либо нейтрализация ионов, либо их десорбция обратно в фазовое пространство КИ. Отметим, что десорбированные ДОМИ не способны отщепить добавочный электрон, поскольку, побывав на поверхности, такой ион стабилизируется, отдав ей свою колебательную энергию (часть или всю), исходно равную сродству молекулы к электрону, в результате чего оказывается ниже материнской молекулы по полной энергии, что делает автоотщепление электрона от иона невозможным [7]. Другими словами, такие ионы становятся “вечноживущими”. Часть из этих ионов, которая окажется в пределах области поля вытягивающего электрода, сможет интегрироваться в пучок не адсорбировавшихся на поверхности ионов и, таким образом, в комбинированном пучке будут присутствовать ионы, не способные к процессу автоионизации, следствием чего является искажение экспериментальной величины τ_a [5]. Таким образом, исследования [2–6] позволили выяснить причину невоспроизводимости τ_a , однако вопрос корректного измерения времени жизни ионов остался открытым.

Рис. 1. Источник ионов [9]...

В работе [8] была предложена методика измерения τ_a , которая позволила получать более объективные с физической точки зрения данные. Однако замена расщепленного электрода *10* (рис. 1) в источнике ионов (ИИ) [9] электродом такой же конструкции, что и крышка КИ, щель которого затянута мелкоструктурной сеткой от вторичного электронного умножителя (ВЭУ) ВЭУ-2А [10] с прозрачностью около 80%, привела к расфокусировке пучка ионов. В результате расфокусировки произошла существенная потеря интенсивности регистрируемого сигнала, что затруднило возможность получения качественного экспериментального материала на масс-спектрометре.

Исходя из изложенного выше, для того чтобы вернуть утерянную ранее фокусировку ионного пучка, в настоящей работе расщепленный электрод ИИ был восстановлен. Однако для борьбы с нежелательной добавкой к пучку десорбированных ионов были существенно изменены размеры, $0.7 \times 1.0 \text{ мм}^2$, щели крышки КИ, предназначенной для выхода из нее пучка ионов (рис. 1). Эта мера была предпринята для предотвращения интегрирования ионов, десорбированных с крышки КИ, в пучок не адсорбировавшихся ионов, поскольку размеры щели вытягивающего электрода существенно превышали размеры эффузионного отверстия крышки КИ [11]. Кроме того, была проведена

переустановка заводского расположения электродов: расщепленного *10* и вытягивающего *11* относительно друг друга (рис. 1), с целью получения поля, близкого к однородному [12]. Сборка ионной оптики ИИ выполнялась в следующем порядке: крышка КИ – вытягивающий электрод – расщепленный электрод.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводились на серийном статическом масс-спектрометре (СМС) МИ-1201В (АО Selmi, Украина) [13–15], модифицированном для изучения резонансных процессов образования отрицательных ионов. Техническая модернизация и методика проведения исследований подробно описаны в монографии Хвостенко [16], с незначительными изменениями – во многих работах, в том числе и в работе [8].

В отличие от традиционной масс-спектрометрии положительных ионов, образование отрицательных ионов резонансным захватом электронов молекулами накладывает жесткие требования к конструкции источника ионов, его режиму работы [17], а также к системе регистрации ионов, поскольку сечение σ образования ДОМИ большинства соединений, существенно меньше величины $\sigma = 10^{-14} \text{ см}^2$ [18], т.е. регистрация ионов в режиме масс-спектрографа невозможна.

В связи с этим масс-спектрометр укомплектован 17-каскадным вторичным электронным умножителем (ВЭУ) МС-17/А (Германия). Электростатическая фокусировка его медно-бериллиевых динодов корытообразной конструкции обеспечивает коэффициент усиления вторичных электронов, равный примерно 10^7 при величине напряжения $U_{\text{ВЭУ}} = 1.6 \text{ кВ}$. Схема включения ВЭУ такова: первый динод (катод) заземляется, а коллектор умножителя находится под потенциалом источника питания. Из альтернативных подключений ВЭУ в зависимости от того, заземлен первый или последний динод, предпочтительно заземление первого. В этом случае ионы и нейтральная компонента достигают первого динода с одинаковой энергией, и коэффициенты вторичной эмиссии для них близки (при условии, что диноды умножителя не покрыты адсорбированными молекулами).

Такая схема включения ВЭУ небезопасна, поскольку в используемом методе работы высокоомный вход электрометрического усилителя (усилитель постоянного тока и кабель, соединяющий его с электрометром) находится под высоким отрицательным потенциалом источника питания ВЭУ. Реализация такого включения ВЭУ требует двойного экранирования кабеля для защиты от наводок и токов утечки, а также применения устройств сопряжения с регистрирующими приборами [18]. При проведении измерений методом счета импульсов низкоомный вход импульсного усилителя [19] подключается через

разделительный конденсатор [20]. В обоих методах (и в измерениях на высокоомный вход электрометрического усилителя, и в методе счета импульсов) после дискриминации и усиления импульсы, одинаковые по форме и амплитуде, регистрируются счетным устройством лабораторного изготовления в стандарте КАМАК.

Именно такая схема включения ВЭУ обеспечивает получение более равномерных зонных характеристик первого динода [21] и взаимодействие с ним заряженных и нейтральных частиц как частиц с одинаковой кинетической энергией, что очень важно при проведении измерений τ_a . В то же время, автор работы [21] отмечает, что “когда энергия регистрируемых ионов ниже 10 кВ, как это обычно имеет место в масс-спектрометрах, эффективность счета ионов различных изотопов с помощью ВЭУ может быть неодинаковой, поскольку ионы разных изотопов будут выбивать из катода ВЭУ различное число электронов”. Поэтому при проведении измерений τ_a было важно, чтобы не наблюдалось заметного снижения относительной эффективности счета ионов и нейтральной компоненты (подобно разнице в случае изотопов), что и было обеспечено схемой включения ВЭУ, осуществленной в настоящей работе.

Методика измерения среднего времени жизни ДОМИ относительно автоотщепления электрона неоднократно описывалась в обзорных статьях, включая работу авторов [8]. В реальных условиях для проведения косвенных измерений τ_a необходимо записать сначала кривую эффективного выхода (КЭВ) суммарного тока (ток ионов + ток нейтральной компоненты), а затем КЭВ тока нейтральной компоненты (рис. 2). Запись КЭВ тока нейтральной компоненты осуществляется после сепарирования суммарного тока в электрическом поле, образующемся при подаче напряжения примерно 1.2 В на пластины плоского конденсатора, установленного перед ВЭУ. Развертка энергии ионизирующих электронов при записи КЭВ выполнялась с квантованием 4 мэВ. Наличие тока электронов на начальном участке вольт-амперной характеристики обусловлено тем, что часть электронов, эмитированных катодом, имеет начальные скорости, достаточные для преодоления отрицательного потенциала на катодной коробочке (рис. 1).

Рис. 2. Кривые эффективного выхода долгоживущих отрицательных молекулярных ионов ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-$) нитробензола и нейтральной компоненты ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^0$), вольт-амперная характеристика источника ионов

Для расчета τ_a ДОМИ обычно используется то же выражение, что и при определении постоянной распада отдельных нестабильных частиц [22]. В нашем случае это выражение имеет вид

$$\tau_a = -t / \ln (1 - N^0/N), \quad (1)$$

где N [с⁻¹] – число ДОМИ (метастабильных относительно автоощепления электрона) в начальный момент времени $t = 0$, которые входят в пространство (участок трубы масс-анализатора от электромагнита до ВЭУ [15]), свободное от электрических и магнитных полей (суммарный ток); N^0 [с⁻¹] = $[N - N^-(t)]$ – число ДОМИ в момент времени t , когда от иона отщепился добавочный электрон (ток нейтральной компоненты); $N^-(t)$ [с⁻¹] – число ДОМИ, не распавшихся за время t ; t [с] – время пролета ДОМИ пространства, свободного от электрических и магнитных полей.

Из формулы (1) следует, что основная ошибка в измерениях τ_a будет определяться только отношением интенсивностей тока нейтральной компоненты и суммарного тока. Однако на самом деле некоторые приборные характеристики также могли бы оказывать влияние на измерения τ_a . В частности, таковой могла быть неточность в оценке времени пролета ДОМИ по трубе масс-анализатора. Но в данном случае эта ошибка была исключена, поскольку указанная величина была определена в работе [23] с высокой точностью методом осциллографирования и составила $\Delta t = 0.005$ мкс. В то же время имеется другой приборный фактор, способный внести погрешность в измерение самой ключевой величины формулы (1) – в соотношение интенсивностей суммарного тока и нейтральной компоненты. Этот фактор был отмечен в монографии Яноши [22], где было показано, что “для определения отношения двух интенсивностей на измерение меньшей интенсивности выгоднее затрачивать больше времени, чем на измерение большей интенсивности. Наилучшим является такое соотношение, при котором времена измерения обратно пропорциональны квадратным корням из их интенсивностей”. Это замечание имеет прямое отношение к проблеме измерения τ_a ДОМИ, поскольку интенсивность нейтральной компоненты, как правило, значительно ниже интенсивности полного тока. Замечание было учтено в настоящей работе при измерениях двух указанных интенсивностей, что описано ниже.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении измерений τ_a ДОМИ нитробензола ($C_6H_5NO_2$) целесообразным было выбрать метод счета импульсов, поскольку только в этом случае измерения суммарного тока и тока нейтральной компоненты могут быть проведены в значительной мере независимо от коэффициента усиления ВЭУ, различия массовых чисел ионов регистрируемых пучков, молекулярного строения, строения электронных оболочек и других причин, оказывающих влияние на величины импульсов и средний ток электронов на выходе умножителя [24]. В то же время для проведения исследований были подобраны условия, исключающие проявление недостатков, присущих методу счета импульсов, связанных с возникновением просчетов импульсов из-за “мертвого времени” после единичного импульса, генерируемого ВЭУ при

попадании на него заряженной частицы (а); перекрыванием импульсов, следующих друг за другом и сливающихся в один (б); насыщением вследствие роста плотности потока ионов (в). Подбор условий проводился с учетом низкого сечения образования ДОМИ нитробензола $\sigma(\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2) = 10^{-17} \text{ см}^2$ [7]. Напуск вещества в КИ был таким, которому соответствовали максимальная плотность потока $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-$ в токовом эквиваленте около 10^{-14} А на выходе ВЭУ (рис. 2) и давление в камере ионизации около $6 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$.

Остаточное давление в трубе масс-анализатора, примерно равное $5 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$, обеспечивало условия однократных столкновений пучка электронов, монокинетичных по энергии, с молекулами $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$ в газовой фазе в КИ, где давление примерно на порядок выше [25]. С учетом наших целей запись КЭВ суммарного тока $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-$ и тока нейтральной компоненты как функции энергии ионизирующих электронов проводилась в диапазоне $\varepsilon_{\text{эл}}$ от -1.5 до -1.0 эВ (рабочий диапазон составлял $\varepsilon_{\text{эл}} = 0-14 \text{ эВ}$). Калибровка линейности шкалы энергии электронов проводилась по максимумам КЭВ ионов $\text{SF}_6^-/\text{SF}_6$ ($\varepsilon_{\text{эл}} \sim 0$) и $\text{Ph}^-/\text{C}_6\text{H}_6$ ($\varepsilon_{\text{эл}} = 8 \text{ эВ}$) [18].

Напуск исследуемого вещества в газовой фазе в КИ осуществлялся через дозирующий вентиль заводской комплектации [11] без реперного газа (гексафторида серы). По достижению стабильного давления в КИ и температуры ее стенок $T_{\text{КИ}} = 393.0 \pm 0.5 \text{ К}$ записывались КЭВ суммарного тока и тока нейтральной компоненты. Заданная температура КИ достигалась за счет нагревательного элемента, расположенного в основании выталкивающего электрода (рис. 1), и частично – радиационного излучения от катода. Нитробензол в газовой фазе, поступая в КИ через соосно-цилиндрические отверстия трубки напуска, нагревательного элемента и основания выталкивающего электрода, успевает приходить в тепловое равновесие со стенками анодной коробочки. Таким образом, молекулы нитробензола в области ионизации находились в тепловом равновесии со стенками КИ, температура которых примерно равна температуре средней части основания выталкивающего электрода как составной части анодной коробочки [26]. Контроль температуры осуществлялся термопарой типа L (хромель-копель), подключенной к микропроцессорному регулятору ТРМ-4 фирмы Autonics.

Выбор температуры, при которой проводились измерения $\tau_a(\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-)$, обусловлен тем, что, начиная с температуры $T_{\text{КИ}} = 393.0 \pm 0.5 \text{ К}$ и выше, исключается образование на диафрагмах и линзах источника ионов изолирующих пленок и последующего накопления заряда [27, 28]. Поверхностные заряды искажают распределение электронов в КИ, делают распределение нестабильным во времени и оказывают влияние на коллимацию ионного пучка в ионнооптической системе, что приводит к появлению дополнительных ошибок измерения. Так, в работе [29] для “ликвидации влияния поверхностных зарядов на

результаты экспериментального определения потенциалов ионизации сульфидов и дисульфидов камера анализатора и источник ионов прогревались во время эксперимента до температуры $t = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ”.

Так же, как и в работе [8], исследования проводились при “стандартных” условиях: установке номинальных потенциалов на диафрагмах электронной и линзах ионной оптики, соответствующих калибровке шкалы энергии электронов, и номинальной величины тока электронов (около 1 мкА), а также стабильного давления в КИ анализируемого вещества в газовой фазе и номинальной температуры КИ.

При проведении исследований зависимости $\tau_a(\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-)$ от температуры возникает необходимость стабилизации номинальной величины тока электронов, поскольку нагрев КИ до заданной температуры осуществляется посредством нагревательного элемента, радиационное излучение от которого влечет за собой нагревание и катода, приводящее к увеличению номинальной величины тока электронов. Поэтому уставка номинальной величины тока электронов после стабилизации заданной величины температуры поддерживалась регулированием потенциала на катодной коробочке. Таким образом контролировалась пропорциональность отношения интенсивности тока нейтральной компоненты к интенсивности суммарного тока.

Как видно на рис. 2, фронт КЭВ суммарного тока и фронт КЭВ тока нейтральной компоненты практически воспроизводят фронт вольт-амперной характеристики, что подтверждает линейную пропорциональность выхода ДОМИ из щели крышки КИ как результат исключения протекания нестабильных адсорбционных процессов на ее поверхности. Это стало возможным вследствие конструктивных изменений в ИИ, описанных во вводной части статьи. Также были исключены затруднения в получении экспериментального материала (при записи масс-спектра, но не в полном объеме) и необходимость в настройке ИИ на линейную часть вольт-амперной характеристики при измерении τ_a , как и в работе [8]. Результаты измерения времени жизни ионов $\tau_a(\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-)$, включая зависимость этой величины от энергии электронов в пределах резонанса в области $\varepsilon_{эл} = -0.5-0.5\text{ эВ}$, приведены на рис. 3 (шкала $\varepsilon_{эл}$ дана без поправки по пику SF_6). Как видно на рисунке, величина $\tau_a(\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-)$ в максимуме резонанса составила $\tau_a = 50 \pm 1\text{ мкс}$.

Для вычисления величины абсолютной погрешности $\Delta\tau_a(\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-)$ по методу переноса погрешностей [30] использовался линейный член разложения выражения формулы (1) в ряд Лорана. Ширину автоионизационной зоны (равную примерно 2.5 мкс) можно связать с вероятностным процессом распада ионов, обусловленным алгоритмом последовательной записи в два приема КЭВ сначала суммарного тока, а затем нейтральной компоненты.

Последующие измерения τ_a ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-$) с целью исследования его зависимости от температуры КИ в диапазоне 413–473 К выполнялись с шагом квантования $\Delta T = 20$ К. Среднеарифметическая величина времени жизни в пределах этого диапазона составила величину $\tau_a(\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-) = 45.8 \pm 1.0$ мкс. Измеренные величины в указанном температурном диапазоне согласуются с величинами $\tau_a(\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-) = 40$ мкс [31], $\tau_a(\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-) = (47.3 \pm 1.0)$ мкс [32] и $\tau_a(\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-) = 48$ мкс [33]. Отличия от величин $\tau_a(\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-) = 17.5$ мкс [34] и $\tau_a(\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-) = 90$ мкс [35] можно связать с разными условиями эксперимента (расположение термодпары, распределение электронов по энергии, конструкция выходной щели камеры ионизации и другие).

Рис. 3. Кривые эффективного выхода долгоживущих отрицательных молекулярных ионов ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-$) нитробензола и нейтральной компоненты ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^0$), автоионизационная зона времени жизни $\tau_a(\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-)$ в пределах резонанса.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе сообщаются результаты измерения времени жизни τ_a долгоживущих отрицательных молекулярных ионов нитробензола ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-$), полученные на статическом масс-спектрометре МИ-1201В с 90-градусным секторным магнитным полем, модифицированным для исследования отрицательных ионов, образующихся при резонансном захвате электронов молекулами. Измерения $\tau_a(\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-)$ проводились методом счета импульсов. Изменения, внесенные в конструкцию источника ионов, позволили исключить интеграцию десорбированных с крышки камеры ионизации ионов в пучок, фиксируемый системой регистрации масс-спектрометра. Таким образом, измеренная величина $\tau_a(\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-)$ на нижней границе температуры ионизационной камеры $T_{\text{КИ}} = 393$ К составила $\tau_a = (50 \pm 1)$ мкс, что в два раза меньше типичной величины, полученной ранее на этом приборе. Ширину автоионизационной зоны (равную примерно 2.5 мкс) можно связать с вероятностным процессом распада ионов, обусловленного алгоритмом последовательной записи в два приема КЭВ: сначала суммарного тока, а затем нейтральной компоненты.

Полученные результаты измерения времени жизни отрицательных ионов $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-$ в очередной раз подтверждают отсутствие зависимости τ_a от температуры ионизационной камеры в диапазоне $T_{\text{КИ}} = 413\text{--}473$ К. Наблюдаемое же падение интенсивности $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-$ в этом диапазоне температур связано с освобождением поверхности от адсорбированных молекул нитробензола и большей вероятностью адсорбции ионов $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$ на поверхности ионизационной камеры.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность генеральному директору ООО “Капиталстрой” А. Р. Якшибаеву за техническую помощь при проведении исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Edelson D. Griffiths J.E. McAfee K.B.* // J. Chem. Phys. 1962. V. 37. № 4. P. 917. <https://doi.org/10.1063/1.1733191>.
2. *Lukin V.G., Khvostenko O.G., Tuimedov G.M.* // Int. J. Mass Spectrom. 2016. V. 399–400. P. 17. <https://doi.org/10.1016/j.ijms.2016.02.005>.
3. *Лукин В.Г., Хвостенко О.Г., Туймедов Г.М.* // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. № 4. С. 96 <https://elibrary.ru/item.asp?id=25669738>.
4. *Лукин В.Г., Хвостенко О.Г., Туймедов Г.М.* // ЖТФ. 2017. Т. 87. № 7. С. 982. <https://doi.org/10.21883/JTF.2017.07.44666.1786>.
5. *Лукин В.Г., Хвостенко О.Г.* // УФН 2017. Т. 187. № 9. С. 981. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.01.038045>
6. *Мазур Д.М, Зименс М.Е., Латкин Т.Б. Ульяновский Н.В., Артаев А.Б., Лебедев А.Т.* // Масс-спектрометрия. 2019. Т. 16. № 3. С. 214. <https://doi.org/10.25703/MS.2019.16.35>.
7. *Хвостенко В.И., Толстиков Г.А.* // Успехи химии. 1976. Т. 45. № 2. С. 251.
8. *Лукин В.Г., Туймедов Г.М.* // ПТЭ. 2019. № 1. С. 51. <https://doi.org/10.1134/S0032816219010178>.
9. *Лукин В.Г., Туймедов Г.М.* // ПТЭ. 2013. № 5. С. 77. <https://doi.org/10.7868/S0032816213050066>.
10. *Тютиков А.М.* // УФН. 1970. Т. 100. № 3. С. 467.
11. *Сидоров Л.Н., Коробов М.В., Журавлева Л.В.* Масс-спектральные термодинамические исследования. Москва: Изд. МГУ, 1985.
12. *Галль Л.Н.* // ЖТФ. 1977. Т. 47. № 10. С. 2198.
13. *Барзилович П.П., Захарченко В.В., Зенкин В.И., Савин О.Р., Шкурдода В.Ф.* // Приборы и системы управления. 1971. № 1. С. 24.
14. *Савин О.Р., Симановский В.И., Стародуб Н.И., Доля В.Н., Коваль Н.А., Захарченко В.В., Постой В.А., Зенкин В.И.* // Приборы и системы управления. 1983. № 10. С. 13.
15. Техническое описание и инструкция по эксплуатации масс-спектрометра МИ-1201В. Сумы: Производственное объединение "Электрон". 1983.
16. *Хвостенко В.И.* Масс-спектрометрия отрицательных ионов в органической химии. Москва: Наука, 1981.

17. *Краснов Н.В., Мурадымов М.З., Хасин Ю.И.* // Научное приборостроение. 2001. Т. 11. № 2. С. 31.
18. *Хвостенко В.И., Мазунов В.А., Фалько В.С. Хвостенко О.Г., Чанбарисов В.Ш.* // Химическая физика. 1982. № 7. С. 915.
19. *Залкинд В.М., Сушко В.С., Тарасенко В.Н.* // ПТЭ. 1982. № 5. С. 110.
20. *Ковальский Е.* Ядерная электроника. Москва: Атомиздат, 1972.
21. *Акишин А.И.* Ионная бомбардировка в вакууме. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.
22. *Яноши Л.* Теория и практика обработки результатов измерений. Москва: Мир, 1965.
23. *Лукин В.Г., Воробьев А.С., Ломакин Г.С.* // ПТЭ. 2009. № 4. С. 121.
24. *White F.A., Collins T.L.* // Appl. Spectroscopy. 1954. V. 8. P. 17.
25. *Лебедев А.Т.* Масс-спектрометрия в органической химии. Москва: БИНOM, 2003.
26. *Танцырев Г.Д., Декабрун Л.Л., Тальрозе В.Л.* // ЖТФ. 1955. Т. XXV. вып. 11. С. 1983.
27. *Wobschall D.* // Review of Scientific Instruments. 1965. V. 36. №. 4. P. 466.
<https://doi.org/10.1063/1.1719601>
28. *Филатов В.Н., Сысоев А.А., Морозов О.В.* // ПТЭ. 1981. № 1. С. 179.
29. *Хвостенко В.И., Фурлей И.И.* Химия сераорганических соединений, содержащихся в нефтях и нефтепродуктах. М.-Л: Химия. 1964. Т. 7. С. 233.
30. *Морозов В.В., Сobotковский Б.Е., Шейнман И.Л.* Методы обработки результатов физического эксперимента. СПб.: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет. 2004, 64 с.
31. *Compton R.N., Christophorou L.G., Hurst G.S., Reinhardt P.W.* // J. Chem. Phys. 1966. V. 45. № 12. P. 4634. <https://doi.org/10.1063/1.1727547> .
32. *Harland P.W., Thynne J.C.J.* // J. Chem. Phys. 1971. V. 75. № 23. P. 3517.
33. *Хвостенко В.И., Фурлей И.И., Мазунов В.А., Костяновский Р.Г.* // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1973. Т. 3. С. 680.
34. *Naff W.T., Compton R.N., Cooper C.D.* // J. Chem. Phys. 1971. V. 54. № 1. P. 212.
<https://doi.org/10.1063/1.1674596> .
35. *Воробьев А.С., Асфандиаров Н.Л., Лукин В.Г., Ломакин Г.С.* // ЖТФ. 2009. Т. 79. № 9. С. 11. <https://elibrary.ru/item.asp?id=20323992>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Источник ионов [9]: 1 – экран (отражатель электронов), 2 – W-катод прямого накала, 3 – катодная коробочка, 4 – экранирующая диафрагма, 5, 6 – входная и выходная диафрагмы электронного пучка, 7 – выталкивающий электрод, 8 – приемник электронов, 9 – крышка камеры ионизации (включающей диафрагмы 5, 6, линзы 7, 9) размерами $8 \times 1 \text{ мм}^2$, 10 – расщепленный электрод ($\frac{1}{2}$ ВЛ — линза, вытягивающая ионы, $\frac{1}{2}$ ФЛ – линза, фокусирующая ионы), 11 – линза, вытягивающая ионы (ВЛ: $14 \times 1 \text{ мм}^2$), 12 – проходное отверстие под траверсу, 13 – четыре сборочных винта.
- Рис. 2.** Кривые эффективного выхода долгоживущих отрицательных молекулярных ионов ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-$) нитробензола и нейтральной компоненты ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^0$), вольт-амперная характеристика источника ионов.
- Рис. 3.** Кривые эффективного выхода долгоживущих отрицательных молекулярных ионов ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-$) нитробензола и нейтральной компоненты ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^0$), автоионизационная зона времени жизни $\tau_a(\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2^-)$ в пределах резонанса.

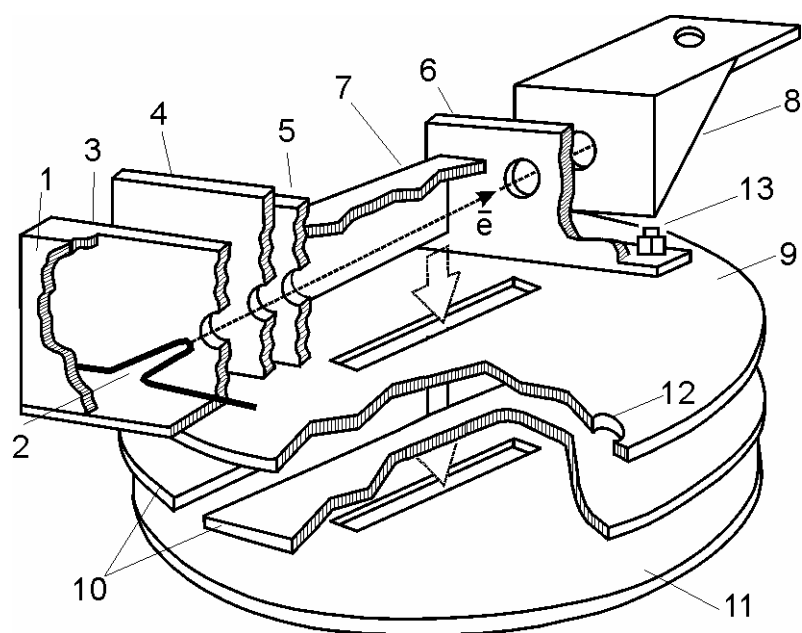


Рис. 1.

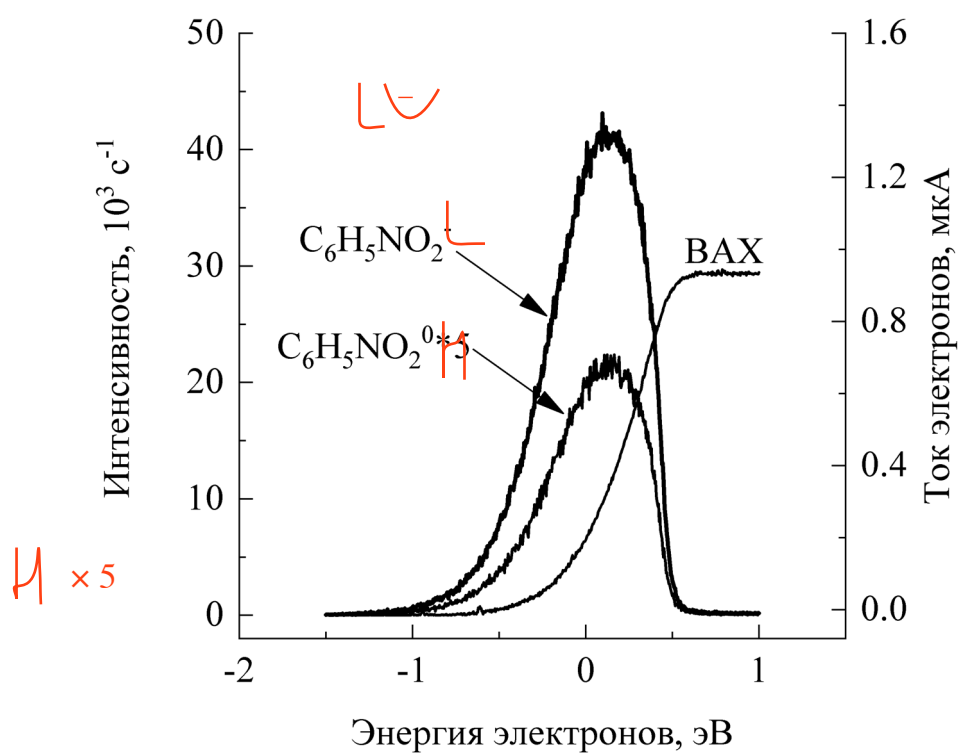


Рис. 2.

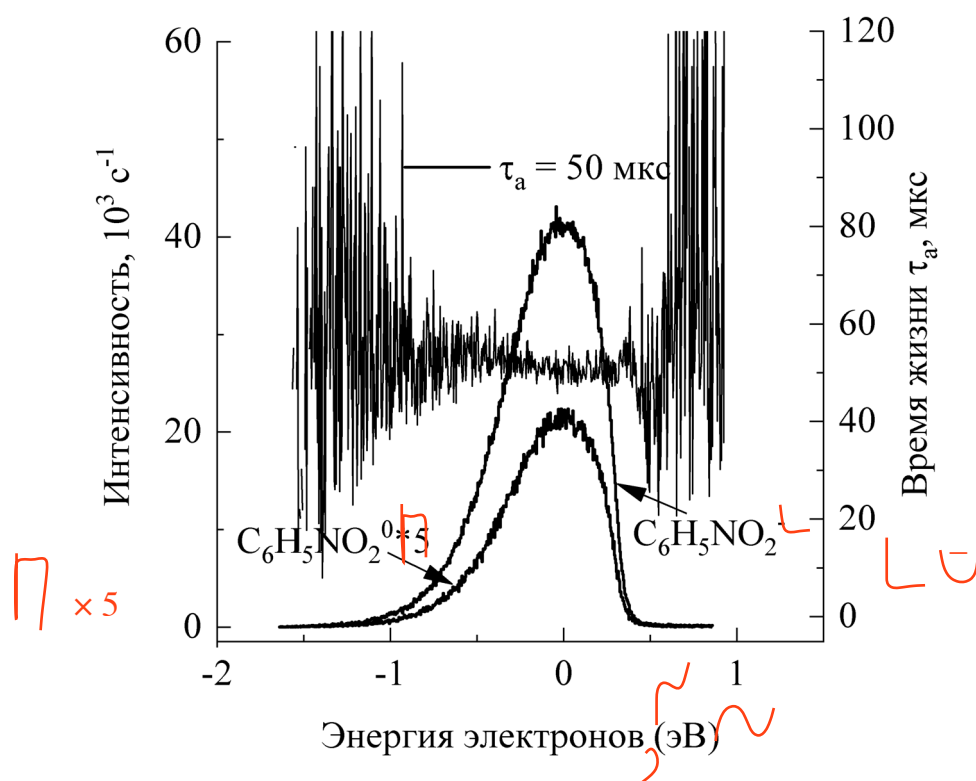


Рис. 3.