

УДК 621.3.032.269.1: 546.36

© Ю. И. Хасин, М. А. Гаврик, М. И. Явор, В. Н. Демидов

ИМПУЛЬСНАЯ ЦЕЗИЕВАЯ ПУШКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МНОГООТРАЖАТЕЛЬНОГО ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО МАСС-АНАЛИЗАТОРА

Описана процедура разработки импульсной малогабаритной ионной цезиевой пушки, работающей в диапазоне низких энергий ионов и формирующей пучок с заданными параметрами. Источником ионов цезия служит нагреваемый алюминат цезия. Пушка предназначена для использования в качестве тестового ионного источника при исследовании свойств нового времяпролетного анализатора. Приводятся расчетные и измеренные на макете пушки параметры формируемого ею пучка. Описаны особенности работы пушки в режиме формирования коротких (меньше 1 мкс) импульсов. Проводилось моделирование процедуры формирования коротких импульсов с помощью программы SIMION. Показано, что эффект банчинга позволяет добиться существенной временной фокусировки ионных пакетов, однако не позволяет получить импульсы короче 100 нс. При этом в значительной степени возрастает разброс ионов по кинетической энергии.

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования любого масс-анализатора, а тем более такого уникального, каким является анализатор, описанный в статье [1] настоящего сборника, предполагают сочетание анализатора с источником ионов, отвечающим вполне определенным требованиям. В первую очередь это относится к параметрам пучка, формируемого этим источником ионов, которые должны соответствовать акцептансу исследуемого анализатора и режиму его работы. Кроме того, желательно, чтобы используемый источник ионов был прост в обращении и стабилен в работе и позволял бы тем самым сосредоточиться на проблемах анализатора. Выбор был сделан в пользу так называемой твердотельной цезиевой ионной пушки, в которой ионы образуются за счет термоионной эмиссии алюмината цезия. В процессе выбора принимался во внимание и тот факт, что в лаборатории имеется богатый практический опыт по использованию твердотельных ионных пушек на основе алюмината цезия в источниках ионов для вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) [2, 3]. Процесс образования ионов при нагревании композиций типа алюмината цезия в свое время был достаточно изучен [4, 5], начальные параметры образующихся ионов (их угловое распределение и распределение по энергии) известны. Все это делает расчет и конструирование таких пушек делом сравнительно несложным, а результаты — хорошо предсказуемыми. В данной работе к используемой цезиевой пушке предъявлялись и дополнительные, но очень существенные требования:

1) пушка должна работать при сравнительно

малых энергиях в диапазоне 10–100 эВ;

2) пушка должна быть малогабаритной;

3) пушка должна работать в импульсном режиме с короткими импульсами.

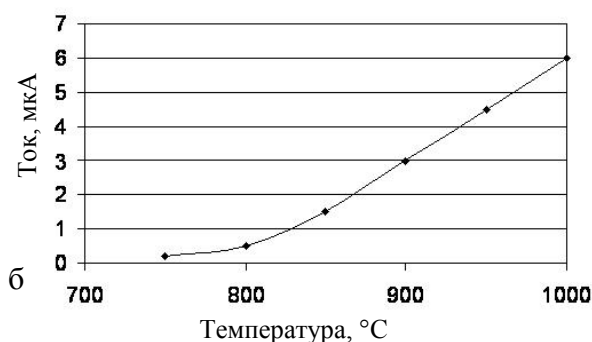
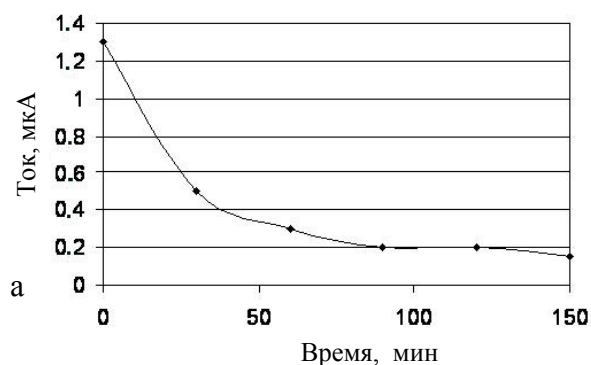


Рис. 1. Зависимости тока ионов Cs^+ от времени (а) и температуры (б)

Первое требование определяется особенностями работы исследуемого анализатора. Второе требование в случае его реализации позволяет установить пушку непосредственно в вакуумной камере анализатора, упрощая на данном этапе экспериментального исследования задачу согласования источника ионов с анализатором. Таким образом, задачей данной работы являются разработка, исследование свойств и особенностей работы малогабаритной ионной пушки, работающей в диапазоне малых энергий как в стационарном, так и в импульсном режиме.

ЦЕЗИЕВЫЙ ИОНИЗАТОР

В пушке использовался ранее разработанный ионизатор, входивший в состав высоковольтных пушек масс-спектрометрических ионных источников [3]. Особенности его работы в основных своих проявлениях: зависимость ионного тока от температуры, падение тока с течением времени — полностью соответствуют данным, известным из литературы [4–7]. На рис. 1 приведены график зависимости тока ионов цезия от времени работы при фиксированной температуре (рис. 1, а) и график зависимости тока ионов цезия от температуры (рис. 1, б). Разработанный нами ионизатор характеризуется более растянутой во времени кривой спада интенсивности ионного тока и более медленным ростом ионного тока с ростом температуры. Оба эти отличия связаны с конструктивной особенностью ионизатора, в котором алюминат цезия не наносится на металлическую поверхность, а содержится в замкнутом цилиндрическом контейнере, и образовавшиеся при нагреве контейнера ионы могут выходить лишь через отверстие диаметром 0.2 мм в торце контейнера.

Рабочая температура ионизатора — в пределах 850–1200 °С, а мощность нагревателя не превышает при этом 1.6 Вт. Двойной экран позволяет снизить температуру элементов крепления ионизатора до 40–50 °С.

Был определен качественный состав ионов в пучке, выходящем из ионизатора. В статическом режиме после двух часов непрерывной работы в пучке содержание ионов $^{39}\text{K}^+$ не превышало $(2-3) \cdot 10^{-5}$ от интенсивности ионов цезия, ионов $^{85}\text{Rb}^+$ не превышало $(5-6) \cdot 10^{-5}$.

ИОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПУШКИ

Ионно-оптическая система (ИОС) цезиевой пушки представляет собой стандартное сочетание иммерсионной и одиночной аксиально-симметричных линз. Иммерсионная линза образует промежуточный кроссовер в фокусе одиночной линзы. Из одиночной линзы при этом будет выхо-

дить почти параллельный ионный пучок, который ограничивается апертурой, определяющей диаметр пучка. На рис. 2 приведена схема реализации ионно-оптической схемы цезиевой пушки и формируемого ею пучка. Данная схема обеспечивает гибкую регулировку параметров ионного пучка и его интенсивности. Расчеты ионных траекторий, проведенные посредством компьютерной программы SIMION [10], демонстрируют, что при энергии ионов в 100 эВ и разбросе в 0.1–0.2 эВ пушка формирует пучок диаметром около 2 мм и полным угловым распределением порядка 0.6 град, что соответствует заложенным параметрам аксептанса проектируемого анализатора. Детальное представление о параметрах формируемого ионного пучка можно получить из фазовых диаграмм "координата—угол" (рис. 3).

Из приведенной на рис. 3 диаграммы видно, что, согласно расчету, полный угловой разброс формируемого пушкой пучка составляет $\pm 0.289^\circ$, а разброс по координате — ± 1.12 мм на расстоянии 100 мм от пушки. Эти результаты хорошо согласуются с заданными характеристиками, определяющими аксептанс анализатора (угловой разброс в пределах $\pm 0.3^\circ$, а ширина пучка — в пределах 1 мм на выходе пушки).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТА ПУШКИ

Для измерения пространственных и угловых характеристик пучка использовалась методика сканирования пучком по щелевой диафрагме и регистрации тока, проходящего через эту диафрагму на коллектор (рис. 4). При этом измерения осуществлялись следующим образом. При настройке пушки напряжение на отклоняющие пластины не подается, и они заземлены. Фиксация тока ионов и оценка степени фокусировки проводятся с помощью одновременного измерения токов

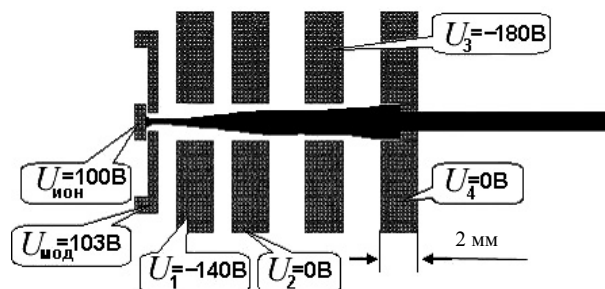


Рис. 2. Схема ионно-оптической системы ионной пушки. Указаны значения потенциалов на электродах для энергии пучка 100 эВ

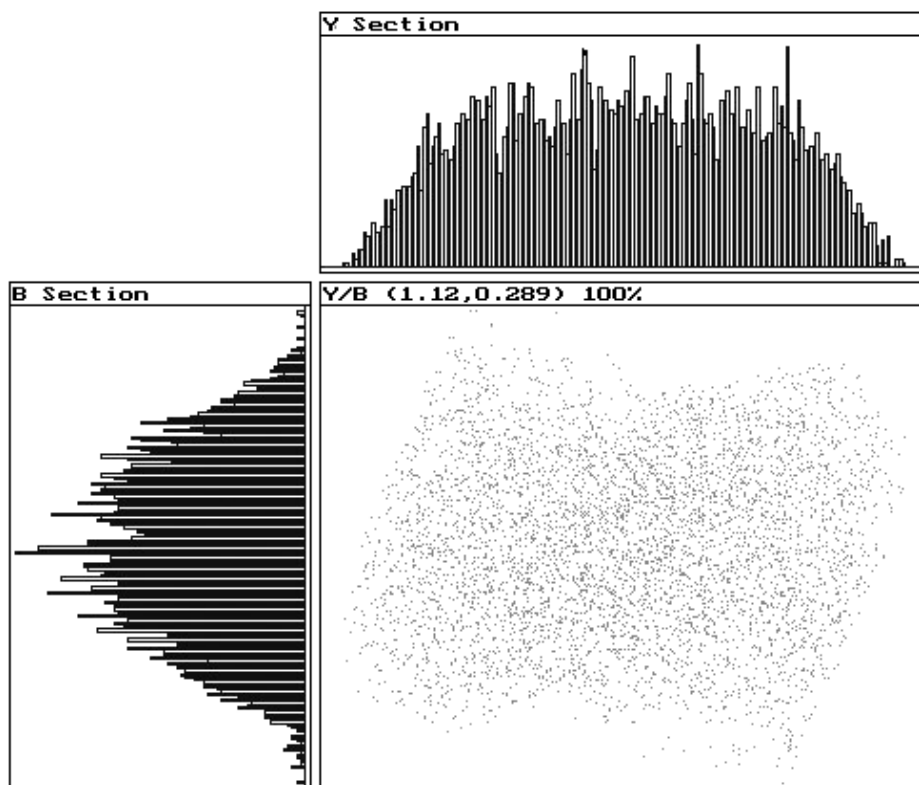


Рис. 3. Фазовая диаграмма и распределения интенсивности в плоскости координата—угол для пучка, формируемого пушкой

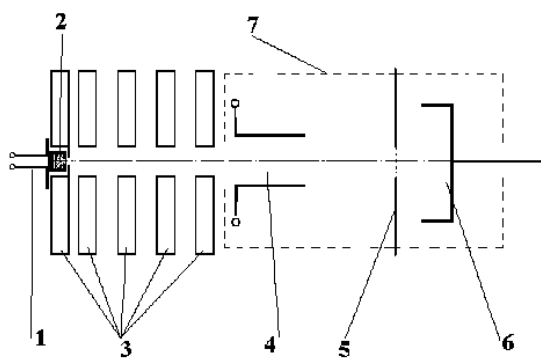


Рис. 4. Схема пушки для измерения пространственных характеристик.

1 — нагреватель ионизатора; 2 — ионизатор (алюминат цезия); 3 — электроды пушки; 4 — отклоняющие пластины; 5 — щелевая диафрагма; 6 — коллектор; 7 — экран

на коллекторе 6 и щелевой диафрагме 5. Суммарный ионный ток равен сумме токов, измеренных на обоих электродах. При фокусировке ионного пучка наблюдается возрастание тока на коллекторе при одновременном падении тока на щелевой диафрагме вплоть до нулевых значений, когда пучок проходит на коллектор полностью, не задевая диафрагму.

Анализ результатов первых экспериментов заставил предположить, что на величину реального углового расхождения могут оказывать существенное влияние дефекты на поверхности ионизатора. Для проверки этого предположения был изготовлен специальный ионизатор, степень заполнения которого алюминатом (особенно первого слоя) и качество эмитирующей поверхности контролировались с особой тщательностью под микроскопом до достижения плоской эмитирующей поверхности. При включении пушки применялся щадящий режим первичной термообработки ионизатора для исключения обильного газообразования и изменения поверхности ионизатора. В результате был получен ионизатор с существенно более плоской и качественной эмитирующей поверхностью

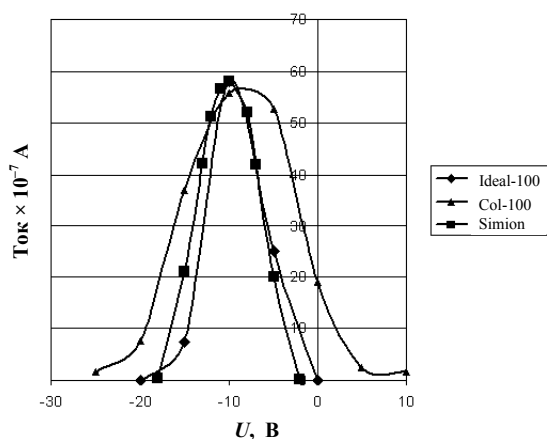


Рис. 5. Зависимость интенсивности ионного тока от величины отклоняющего напряжения

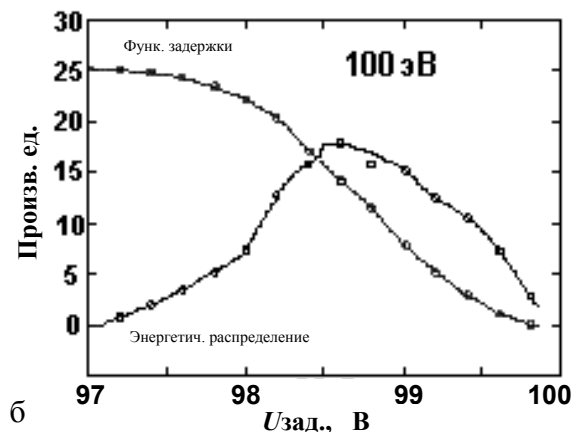
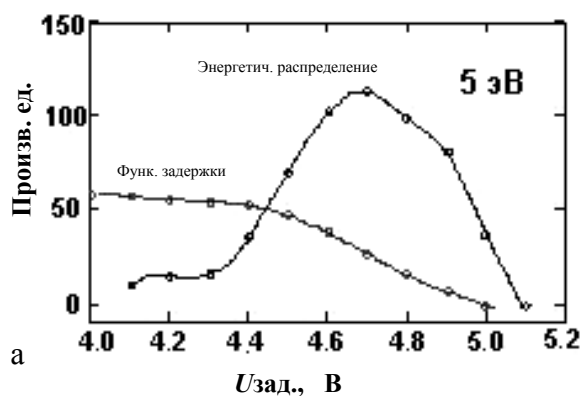


Рис. 6. Интегральные токовые кривые и кривые энергетического распределения для двух различных значений энергии. Для энергии пучка в 5 эВ (а) оптимальные значения потенциалов будут следующие: $U_{\text{ион}} = 5$ В, $U_{\text{мод}} = 5.2$ В, $U_1 = 50$ В, $U_2 = -6$ В, $U_3 = -15$ В, $U_4 = 0$ В. Для энергии пучка в 100 эВ (б) оптимальные значения потенциалов электродов пушки показаны на рис. 3

и полным отсутствием каверн и полостей на этой поверхности.

Для определения ширины пучка в сечении диафрагмы мы сравнивали экспериментальные данные с расчетными кривыми (рис. 5). Кривая Col-100 соответствует отклонению ионного пучка, сформированного пушкой с обычным ионизатором. Кривая Ideal-100 соответствует отклонению ионного пучка, сформированному пушкой со специально подготовленной поверхностью ионизатора. Кривая Simion соответствует моделированию процедуры отклонения ионного пучка с помощью программы SIMION 3D. Для этого была создана модель пушки с отклоняющими пластинами, диафрагмой и коллектором. Число траекторий, достигающих коллектора при нулевом отклоняющем напряжении, нормировалось максимумом экспериментальной кривой. Полученные данные позволяют утверждать, что качество эмитирующей поверхности ионизатора в пушке, работающей при энергии 100 эВ и меньше, является одним из основных факторов, определяющих параметры формируемого пучка.

ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ В ПУЧКЕ

Для оценки разброса по кинетической энергии ионов в пучке использовался простейший двухсекционный энергоанализатор с задерживающим полем. Измеренные кривые задержки (ток на коллектор в зависимости от величины напряжения задержки) дифференцировались с помощью написанной процедуры в программе MATHCAD. На рис. 6 приведены кривые задержки и распределения по энергии, измеренные для двух крайних на интервале значений энергии ионов, полученные приложением различных экстрагирующих напряжений $U_{\text{зад}}$ к ионизатору. Видно, что энергетическое распределение на полувысоте равно примерно 0.5 эВ для малого значения экстрагирующего напряжения и увеличивается с его ростом. Этот эффект обусловлен проникновением экстрагирующего поля в приповерхностную область на разную глубину. Очевидно, что для достижения минимального энергетического разброса нужно использовать небольшие значения экстрагирующих полей вблизи поверхности ионизатора с дальнейшим ускорением ионов до нужного значения энергии. Таким образом, величина экстрагирующего потенциала должна подбираться, исходя из оптимального соотношения между величиной энергетического разброса и интенсивностью тока пучка. В любом случае данные кривые можно использовать для оценки верхнего предела ширины энергетического распределения ионов в формируемом пушкой пучке.

ИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ

Импульсный режим работы пушки осуществлялся двумя способами. Кроме описанного выше метода модуляции с помощью отклонения пучка, использовалась модуляция отрицательным импульсом, наложенным на напряжение модулятора, которая и стала основным методом в дальнейшей работе.

На первом этапе использовались модулирующие импульсы длительностью от 5 до 25 мкс и амплитудой от 0 до 30 В. Для регистрации импульсов и наблюдения их формы в экспериментальном стенде на расстоянии 50 мм от пушки размещался детектор, представляющий собой вторичный электронный умножитель (ВЭУ) типа ВЭУ-6, снабженный экранами и сетками для устранения провисания поля. Пропускная способность сеток была не менее 90 % и не сильно влияла на регистрируемый ток. В измерительном тракте использовался широкополосный усилитель, стабильно работающий в полосе до 200 кГц. Фиксировались осциллограммы с помощью цифрового осциллографа TDS-3034B (Tektronix, USA). Осциллограммы типичных импульсов приведены на рис. 7. При этом минимальная длительность импульса без потери интенсивности составляла примерно 5 мкс (на рис. 7, а). Характерный выброс в конце токового импульса связан с особенностями измерительного тракта. Оценка же абсолютной интенсивности тока оказалась затруднена из-за сложности определения общего коэффициента усиления ВЭУ и усилителя. При повышении длительности импульса до 15 мкс форма импульса приобретает практически прямоугольную форму с крутизной фронта не хуже 2 мкс. (рис. 7, б).

Задачей следующего этапа работы были получение более коротких импульсов ионов и оценка формы импульса, входящего в зеркало. Для этого детектор (ВЭУ-6) поставлен дальше, на расстояние 250 мм от пушки, т. е. на то расстояние, где в реальном анализаторе находится зеркало. При этом использовался модулятор, способный создавать импульсную модуляцию длительностью до 500 нс. Необходимые изменения внесены в схему измерительного усилителя. Типичная осциллограмма сигнала представлена на рис. 8. Как хорошо видно, импульс состоит из двух пиков шириной 150 нс, при том что длительность задающих импульсов равна приблизительно 500 нс. Пик, стоящий раньше на временной шкале, образован ионами, имеющими более высокую энергию, чем основной пик. Разница в энергии ионов, образующих эти пики, могла составлять несколько эВ и зависела от амплитуды импульса модулятора. Оставался открытым вопрос, каким образом ионы смогли получить дополнительную, и столь большую по сравнению с тепловой, энергию? Воз-

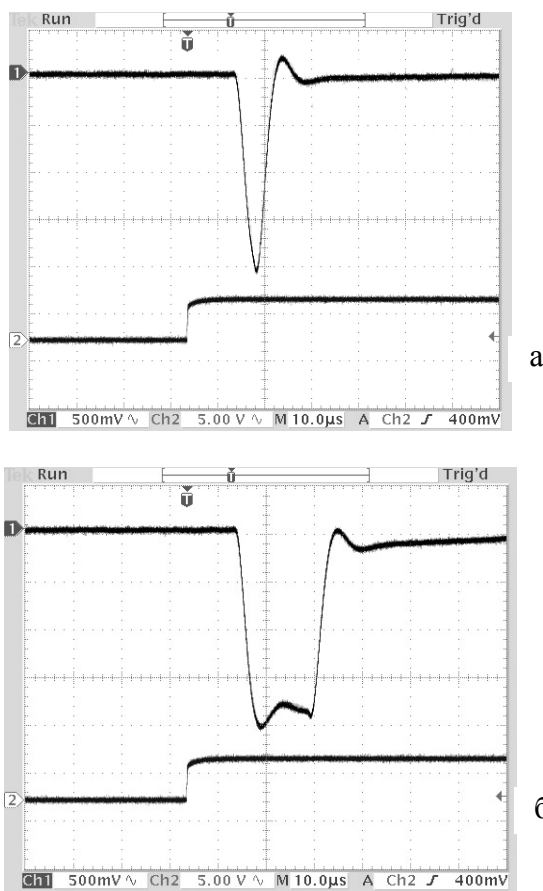


Рис. 7. Осциллограммы двух стабильных режимов работы пушки. Длительность импульса 5 мкс (а) и 15 мкс (б)

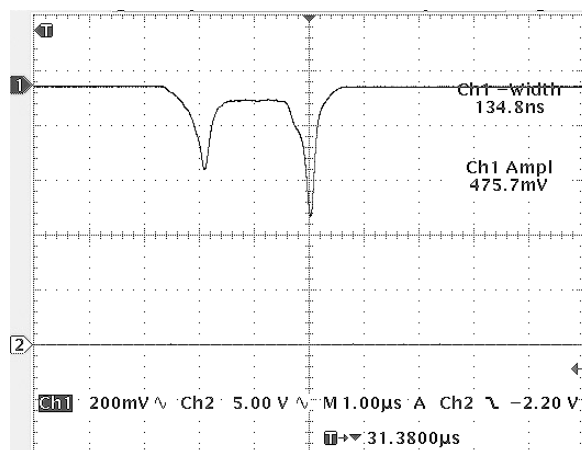


Рис. 8. Осциллограмма ионного тока с энергией ионов в 80 эВ

можным ответом на этот вопрос явилась гипотеза, что прибавку энергии ионы получают из-за так называемого эффекта банчинга, или доускорения, — достаточно широко применяемого в ядерной физике явления. Суть этого явления состоит в том,

что ионы, проходящие область быстроменяющегося потенциала, могут приобретать дополнительную энергию за счет поля, вызывающего это изменение. Пространственное положение ионов может быть таким, что "задние" ионы пакета приобретут дополнительную энергию и догонят на некотором расстоянии ранее прошедшие ионы, образуя в этом месте так называемый временной фокус. А дальше из-за разности в скоростях ионы снова должны разойтись. В нашем случае приобретать дополнительную энергию могут те ионы, которые проходят область модулятора в момент действия заднего фронта модулирующего импульса (см. рис. 4).

Проверка гипотезы осуществлялась при помощи моделирования процесса формирования импульса ионов. При моделировании использовался пакет SIMION 3D (v. 7.0). Была создана 3-мерная модель пушки и написана пользовательская программа, позволяющая задавать импульс модулирующего напряжения переменной длительности и регулируемой длительностью фронтов. По результатам моделирования строились энергетически-временные диаграммы, которые сравнивались с экспериментальными данными.

На рис. 9 представлены результаты эксперимента, а на рис. 10 — моделирования для энергии ионов 20 эВ. Это значение энергии ионов выбрано для демонстрации, т. к. при низких энергиях этот эффект должен проявляться наиболее ярко. Приведенные зависимости демонстрируют расширение ионного пакета во времени в зависимости от значения напряжения отрицательного импульса модуляции (менялся от 15 до 30 В).

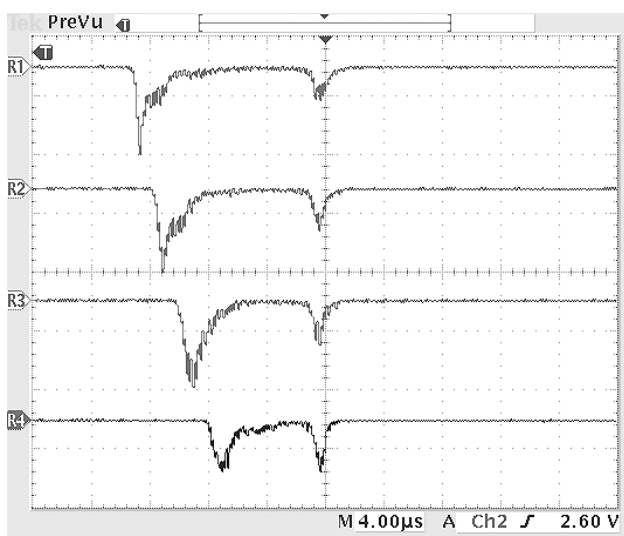


Рис. 9. Осциллограммы ионного тока в зависимости от напряжения отрицательного импульса модуляции (15–30 В)

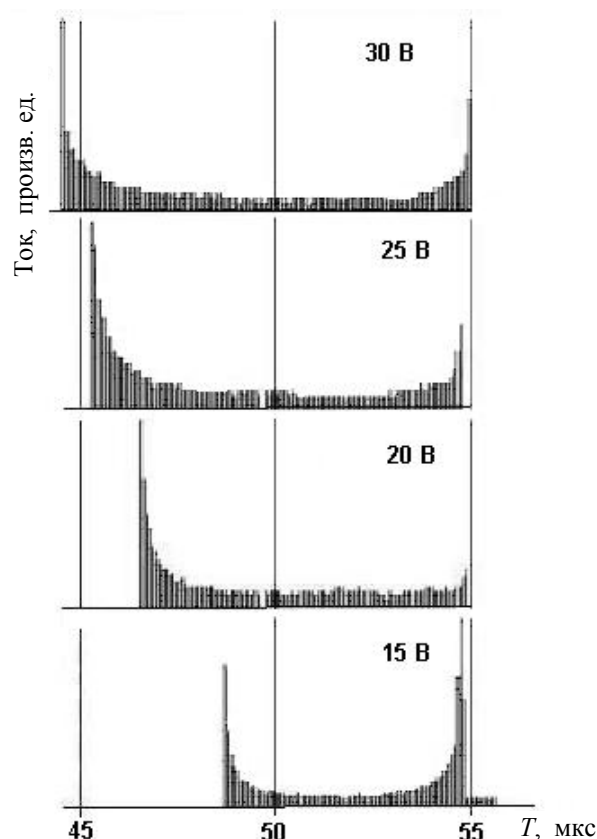


Рис. 10. Расчетные зависимости относительной интенсивности ионов и ширины пакета в зависимости от напряжения отрицательного импульса модуляции

Разница между результатами моделирования и экспериментальными значениями составляет не более 10 %. При этом хорошо видно, что чем выше значение напряжения импульса модуляции, а значит, выше значение градиента поля, тем больше и прибавка к энергии. Расчетная зависимость получаемой добавки к энергии от значения напряжения модуляции приведена на рис. 11. Как и ожидалось, эта зависимость имеет линейный характер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная твердотельная ионная цезиевая пушка (рис. 12) является миниатюрным источником ионов со стабильными гибко регулируемые параметрами формируемого ионного пакета:

- энергия ионов $10 \div 100$ эВ;
- угловое распределение в горизонтальной плоскости ± 0.3 град;

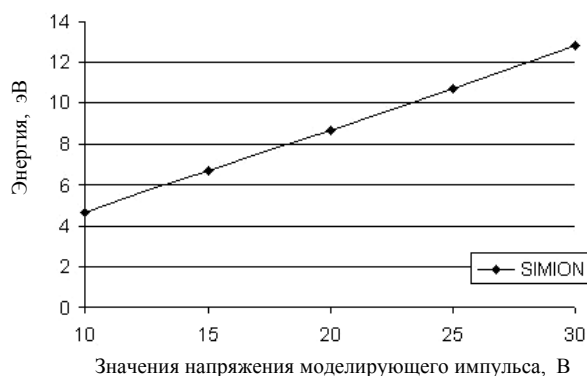


Рис. 11. Расчетная зависимость прибавки к энергии ионов от значения напряжения модулирующего импульса

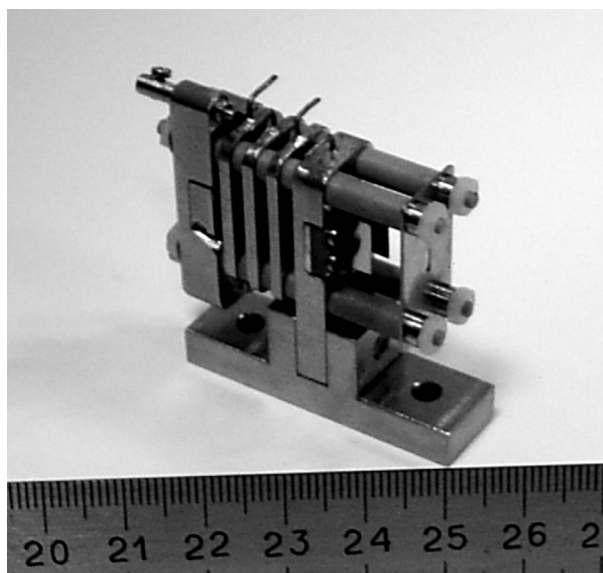


Рис. 12. Внешний вид миниатюрной цезиевой пушки

— диаметр сечения пучка	1.5 мм;
— энергетическое распределение	до 0.5 эВ (в статическом режиме);
— габариты пушки	13 × 26 × 40 мм (шир. × дл. × выс.).

Изучены различные режимы работы пушки в двух режимах формирования ионных импульсов. Минимальная длительность формируемого импульса достигает 150 нс. Рассмотрено влияние

процесса банчинга и проведено его исследование. Данный эффект необходимо учитывать при экспериментальном исследовании свойств ИОС масс-спектрометра.

Высокая стабильность и повторяемость характеристик позволяют рекомендовать использовать эту пушку как универсальный инструмент для экспериментального изучения различных характеристик разнообразных ионно-оптических систем.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Б.В. Бардину за разработку и создание широкополосного электрометрического усилителя сигналов и сотрудникам группы А.Ф. Кузьмина за определение малых количеств примесных ионов щелочных металлов, сопровождающих ионы цезия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хасин Ю.И., Веренчиков А.Н., Гаврик М.А., Явор М.И. Первые экспериментальные исследования планарного многоотражательного ВПМС // Здесь. С.59–71.
2. Rudat M.A., McEwen C.N. New on-source miniature atomic FAB and alkali ion SIMS sources // Int. J. Mass Spectrom. Ion Phys. 1983. V. 46. P. 351–354.
3. Хасин Ю.И., Дмитринок П.С., Елькин Ю.Н. Источник ионов с твердотельной цезиевой пушкой для анализа термолabile веществ // Сб. "Научное приборостроение". Формирование пучков заряженных частиц. 1990. С. 81–85.
4. Андреев А.К., Галль Л.Н., Дмитриев А.М. и др. Источник вторичных ионов для исследования биологических веществ на основе твердотельной пушки // Научное приборостроение. 1991. Т. 1, № 3. С. 118–123.
5. Еремин С.М., Кульварская Б.С. // Радиотехника и электроника. 1972. Т. 17, № 1. С. 145–148.
6. Кульварская Б.С., Поляков Ю.Г. Исследование термоионной эмиссии некоторых материалов // Радиотехника и электроника. 1968. Т. 13, № 6. С. 1146–1149.
7. Кульварская Б.С., Мантрова Г.М., Яковлев М.Н. Исследование термоионной эмиссии твердотельного источника ионов лития в импульсном режиме // Радиотехника и электроника. 1980. Т. 25, № 4. С. 823–827.
8. Pargellis A.N., Seidi M. Thermoionic emission of alkali ions from zeolites // J. Appl. Phys. 1978. V. 49, N 9. P. 4933.
9. Мантрова Г.М., Яковлева М.П., Кульварская Б.С. и др. Исследование процессов, происходящих при работе твердотельных источ-

ников ионов в импульсном режиме // Радиотехника и электроника. 1981. Т. 26, № 9. С. 2004–2011.

10. *Dahl D.A.* SIMION 3D v. 7.0 User's Manual. Idaho National Eng. Envir. Lab, 2000.

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург

Материал поступил в редакцию 7.04.2004.

PULSED CESIUM GUN FOR CHARACTERIZATION OF A MULTIREFLECTING TIME-OF-FLIGHT MASS ANALYZER

Yu. I. Khasin, M. A. Gavrik, M. I. Yavor, V. N. Demidov

Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg

A procedure for development of a compact pulsed cesium ion gun to form ion beams with specified parameters in a low ion energy range is described. The heated cesium aluminate serves as a cesium ion source. The gun was used as a test ion source to characterize a novel time-of-flight analyzer. The calculated and measured parameters of the beam formed by a gun are given. The specific features of the gun operation in the short (below 1 μ s) pulse mode are considered. The short pulse generation procedure was simulated using the SIMION program. It is shown that the effect of bunching is essential in time focusing of ion packets. However this does not allow pulses shorter than 100 ns to be obtained and considerably increases the spread of kinetic ion energies.