

Генерация ионов в импульсном ионном источнике с интерфейсом на основе полимерной трековой мембраны

© А.А. Балакин, С.Г. Хидиров, Е.А. Буйдо

Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе РАН,
142432 Черноголовка, Московская область, Россия
e-mail: balakin@biner.ac.ru

(Поступило в Редакцию 16 ноября 2015 г. В окончательной редакции 10 марта 2016 г.)

Используя источник с интерфейсом на основе полимерной трековой мембраны, исследованы время-пролетные спектры ионов, генерируемых при экстракции отрицательных ионов из раствора KI в водно-глицериновой смеси импульсами электрического поля высокой напряженности. Показано, что в наблюдаемые спектры значительный вклад вносят ионы, образующиеся во вторичных процессах бомбардировки поверхности мембраны. Установлено, что наибольшей интенсивностью в спектре обладают пики отрицательных ионов водорода, что свидетельствует об эффективной эмиссии таких ионов при обработке полиэтилентерефталата вторичными ионами с энергией около 6 keV. Намечены основные направления модификации мембранного интерфейса для уменьшения доли вторичных ионов в ионном пучке.

Введение

Недавно [1] были представлены первые результаты экспериментов по прямой экстракции ионов из полярных растворов импульсами электрического поля высокой напряженности. Для реализации условий эффективной экстракции ионов раствор помещали в каналы полимерной трековой мембраны. Малый (наноразмерный) диаметр каналов обеспечивал стабильность поверхности раствора в сильном электрическом поле. Было обнаружено, что наряду с ионами, экстрагируемыми из раствора, заполняющего каналы трековой мембраны, наблюдаются ионы, которые отсутствуют в исследуемых растворах, но дают тем не менее значительный вклад в общее число ионов, генерируемых таким электро-мембранным источником. Например, при экстракции отрицательных ионов из растворов солей в водно-глицериновой смеси наблюдаются компоненты легких частиц (электронов и отрицательно заряженных ионов), доля которых существенно превосходит долю более тяжелых ионов в регистрируемых времяпролетных спектрах. В спектрах присутствуют, хотя и с существенно более низкой интенсивностью, и другие ионы, существование которых в использовавшихся растворах трудно было ожидать.

В [1] было предположено, что за появление ионов, которых заведомо нет в растворе, ответственны вторичные процессы, происходящие на вакуумной поверхности мембраны. К появлению таких ионов может приводить бомбардировка вторичными ионами, образующимися при столкновении первичных ионных кластеров, выходящих из раствора, с металлическим сетчатым электродом, который служит для создания экстрагирующего электрического поля у поверхности раствора, заполняющего каналы мембраны. При столкновении с металлической сеткой эти ионные кластеры распадаются, образуя, в частности, положительно заряженные фрагменты, которые после ускорения в

электрическом поле бомбардируют поверхность мембраны. Таким образом, причиной появления ионов, не связанных с экстракцией из раствора, может являться вторичная ион-ионная эмиссия из полимерного материала мембраны. Образование ионов противоположного знака в столкновениях первичных ионов с сеткой привлекалось и для объяснения механизма формирования экстрагирующего поля высокой напряженности при использовании стационарного напряжения в [2,3].

Продукты вторичной ионной эмиссии из полимеров изучались ранее с использованием методов вторичной ионной масс-спектрометрии (SIMS) [4–7]. В [5] было показано, что при обработке лавсана (PET) (материала, из которого изготовлены трековые мембраны) положительно заряженными ионами аргона с энергией 2 keV в области малых масс доминируют отрицательно заряженные ионы C^- , CH^- , O^- , OH^- , C_2^- , C_2H^- . Судя по представленным масс-спектрам, наблюдаются также и ионы H^- , хотя они не являются доминирующими. Таким образом, наблюдение большого количества ионов H^- в экспериментах с мембранным интерфейсом [1] кажется достаточно неожиданным.

С точки зрения использования мембранного интерфейса с полевой импульсной экстракцией ионов для масс-спектрального анализа растворов генерация большого количества ионов, не имеющих прямого отношения к ионам в растворе, является нежелательной. Для того, чтобы в последующих конструкциях ионного источника для прямого ввода ионов из раствора в вакуум по возможности уменьшить долю побочных ионов, необходимо выяснить причины их появления.

Целью настоящей работы является более детальное исследование природы и механизма генерации отрицательно заряженных ионов в ионном источнике с мембранным интерфейсом, в частности механизма генерации легких ионов.

Методика эксперимента

В работе использовалась та же экспериментальная методика, что и в [1], дополненная анализатором энергии регистрируемых ионов (рис. 1).

В верхней части цилиндрической вакуумной камеры длиной 24.5 см располагался источник ионов с мембранным интерфейсом 1. Исследуемый раствор в виде капли помещали на внешнюю сторону лавсановой трековой мембраны, разделяющей атмосферную и вакуумную части интерфейса. В работе использовали $5 \cdot 10^{-4}$ М раствор KI в смеси глицерина и воды в объемной пропорции 50/50. Измерения проводились при комнатной температуре.

Мембрану наклеивали на металлический диск с отверстием в центре диаметром около 3 мм, который герметично закреплялся в верхней части вакуумной камеры. Толщина мембраны составляла около $10 \mu\text{m}$, плотность каналов — 10^7cm^{-2} , диаметр каналов, определенный из измерений воздушного потока через сухую мембрану, составлял около 50 нм.

Напряжение, стимулирующее выход ионов из раствора, прикладывали между электродом, погруженным в каплю, и экстрагирующим электродом, расположенным вблизи мембраны в вакууме. Электродом, погруженным в раствор, являлась тонкая металлическая сетка с ячейками $0.35 \times 0.35 \text{mm}^2$. Электрод в вакууме представлял собой полый металлический конус высотой около 10 мм, на усеченной вершине которого была натянута плоская металлическая сетка толщиной 0.05 мм. Шаг сетки — 0.125 мм, размер квадратного окна сетки — $0.1 \times 0.1 \text{mm}^2$. Минимальное расстояние плоскости сетки от поверхности мембраны составляло около 0.2 мм.

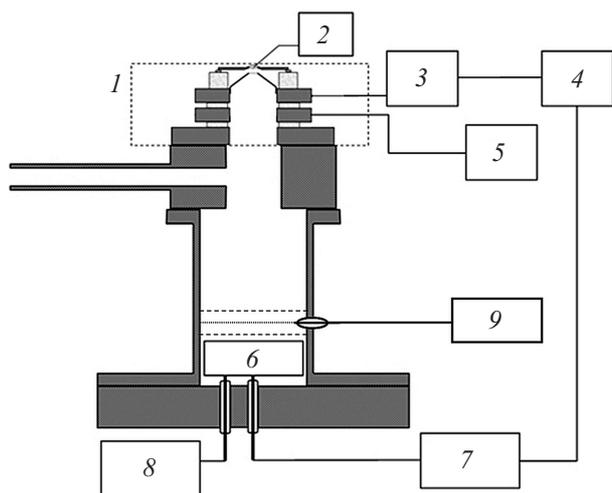


Рис. 1. Общая схема регистрации ионов, экстрагируемых из раствора: 1 — источник ионов, 2 — источник напряжения, прикладываемого к раствору, 3 — источник напряжения, прикладываемого к электроду в вакууме, 4 — задающий генератор, 5 — заземленный электрод, 6 — микроканальный детектор, 7 — система регистрации ионного тока, 8 — источник напряжения для микроканального детектора, 9 — электрод с задерживающим потенциалом.

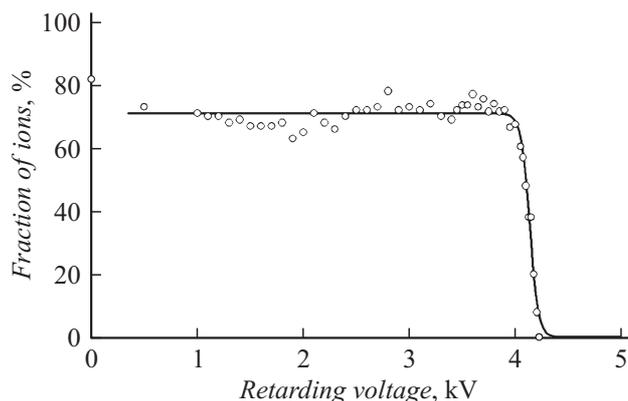


Рис. 2. Пропускание анализатора в зависимости от потенциала тормозящего электрода.

Для создания экстрагирующего ионы электрического поля к электроду, погруженному в раствор, подавали постоянное напряжение -3.6kV от источника 2. На сетчатый электрод в вакууме от высоковольтного генератора 3 с частотой повторения 10 Hz подавались импульсы напряжения положительной полярности амплитудой до 2.6kV длительностью 200 ns.

Анализатор энергии, в котором селекция ионов осуществлялась за счет подачи задерживающего потенциала, состоял из трех сетчатых электродов. Верхний и нижний электроды находились под потенциалом камеры дрейфа ионов и были заземлены. Они представляли собой плоские решетки из металлической проволоки диаметром 0.16 мм с шагом 2 мм, расстояние между плоскостями сеток составляло 12 мм. Посередине между заземленными электродами располагалась тонкая плоская металлическая сетка [9] с квадратными ячейками $1 \times 1 \text{mm}^2$, на которую подавался тормозящий потенциал.

Пропускание анализатора рассчитывали с помощью программы моделирования движения ионов SIMION 8 [8]. Пример кривой пропускания анализатора для пучка ионов с энергией 4 keV, падающих перпендикулярно плоскости сеток, приведен на рис. 2.

Ионы, прошедшие анализатор энергии, регистрировали с помощью микроканального детектора 6. Внешняя поверхность микроканального детектора поддерживалась при нулевом потенциале. Сигнал с детектора записывался цифровым осциллографом 7. В связи с тем, что число ионов, приходящих на детектор при действии одного экстрагирующего импульса, было мало, сигнал накапливался и усреднялся в цикле из 10^3 последовательных импульсов.

Экспериментальные результаты

После действия одиночного импульса экстрагирующего напряжения амплитудой до 2.6kV при постоянном напряжении на электроде в растворе -3.6kV наблюдался сигнал, состоящий из последовательности пиков, каждый

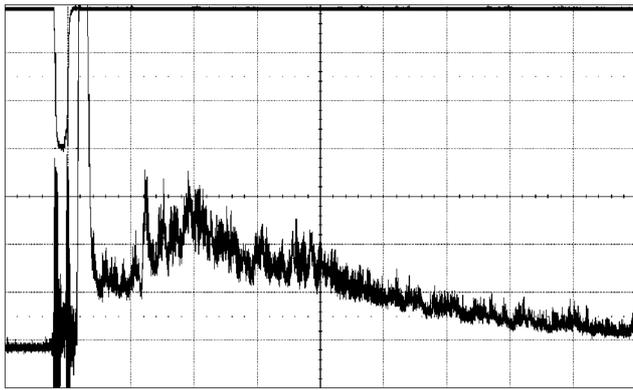


Рис. 3. Осциллограмма усредненного сигнала при экстракции импульсами электрического поля отрицательных ионов из раствора KI в водно-глицериновой смеси для суммарного экстрагирующего напряжения 6.2 kV. Развертка по горизонтали 1 $\mu\text{s}/\text{div}$, по вертикали — 2 mV/div.

из которых возникал при попадании одиночного иона на детектор. Число ионов, регистрируемых детектором после действия одного импульса напряжения, было невелико и обычно не превышало 20.

Как уже отмечалось в [1], при экстракции отрицательных ионов в регистрируемом сигнале присутствует электронная компонента, совпадающая по времени с импульсом напряжения на электроде в вакууме. При наложении в области дрейфа вакуумной камеры слабого внешнего магнитного поля ($\sim 10^{-2}$ Т) электронная компонента практически полностью пропадала, в то время как все остальные пики сохраняли свою интенсивность и время выхода. В отсутствие внешнего магнитного поля электронная компонента имела наибольшую интенсивность в наблюдавшихся времяпролетных спектрах. Зависимость интенсивности электронной компоненты от суммарного напряжения между раствором и экстрагирующим электродом в вакууме аналогична зависимости для интенсивности ионных пиков, наблюдавшихся ранее в [1]: электронный пик появляется при напряжения около 5 kV и резко возрастает при дальнейшем увеличении напряжения. Для суммарного напряжения экстракции 6.2 kV в области потенциалов торможения на энергетическом анализаторе около -3 kV наблюдается резкий спад интенсивности электронной компоненты.

На рис. 3 в увеличенном масштабе приведен времяпролетный спектр отрицательных ионов при наложении внешнего магнитного поля.

Как видно, в ионной части спектра наиболее интенсивным является пик наиболее легких ионов, который находится в области $0.1\text{--}0.4 \mu\text{s}$ после окончания импульса экстрагирующего напряжения. При нулевом потенциале тормозящего электрода форма пика этих ионов заметно отличается от формы пиков более тяжелых ионов. Он является суперпозицией двух составляющих: более широкой „медленной“ с временем появления около $0.1 \mu\text{s}$ и более узкой „быстрой“ с временем появления около $0.2 \mu\text{s}$. Вклад этих составляющих зависит

от потенциала тормозящего электрода. При суммарном экстрагирующем напряжении 6.2 kV изменение формы пика происходит при потенциале тормозящего электрода около -3 kV. Влияние тормозящего потенциала электрода на форму пика показано на рис. 4. На рис. 5 приведены зависимости максимальной интенсивности составляющих этого пика от потенциала торможения. Резкий спад „медленной“ составляющей наблюдается в области 2.5–3.0 kV, в то время как „быстрая“ составляющая сохраняется вплоть до потенциалов -6 kV.

При увеличении абсолютной величины потенциала тормозящего электрода анализатора наблюдается интегральное снижение интенсивности спектра. При этом

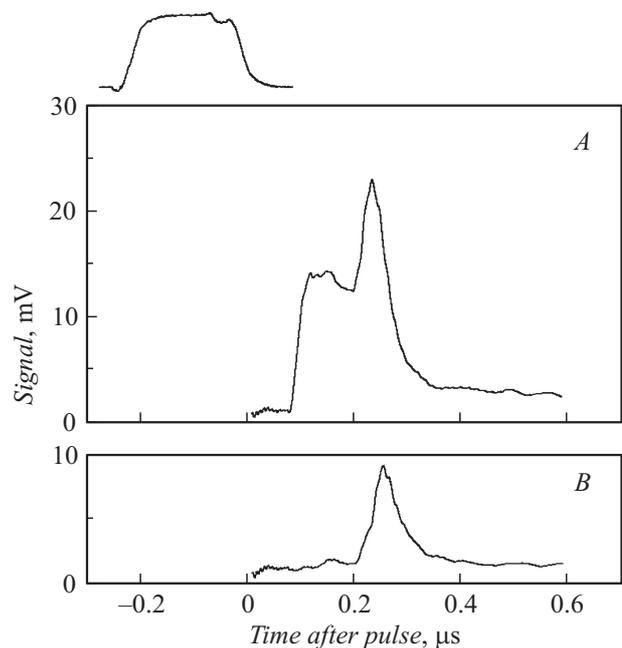


Рис. 4. Форма пика наиболее легких ионов для суммарного напряжения экстракции 6.2 kV без торможения ионов (A) и при потенциале тормозящего электрода — 3.0 kV (B). Импульс экстрагирующего напряжения показан сверху.

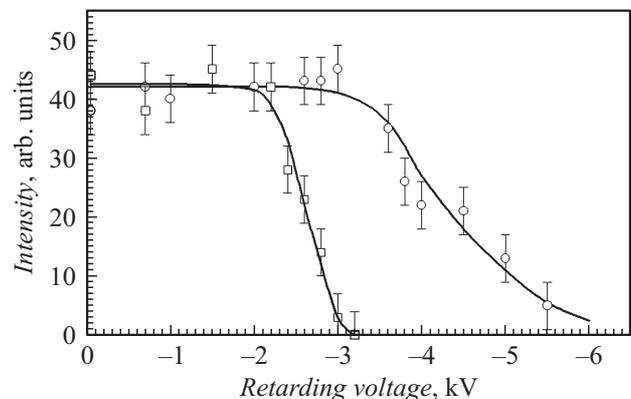


Рис. 5. Зависимость интенсивности „медленной“ (□) и „быстрой“ (○) составляющих пика наиболее легких ионов от потенциала тормозящего электрода для суммарного напряжения экстракции 6.2 kV.

меняется соотношение пиков в спектре. Следует отметить, что ионный спектр не пропадает даже тогда, когда абсолютная величина потенциала торможения превышает максимальное суммарное напряжение между раствором и экстрагирующим электродом в вакууме. Определить величину потенциала, при котором были бы задержаны все вышедшие из источника ионы, не удалось, поскольку при потенциале ниже -7 kV в спектре возникал шум из-за эмиссии электронов с тормозящей сетки, амплитуда которого превышала ионный сигнал.

Обсуждение результатов

Полученные времяпролетные спектры отрицательных ионов существенным образом отличаются от спектров, которые наблюдались ранее [9] при экстракции ионов из таких же растворов с использованием стационарных электрических полей. Для раствора KI полученные в стационарных условиях времяпролетные спектры представляли собой серию пиков кластерных ионов вида $\Gamma\text{-Glucose}_n$, в которой пики с максимальной интенсивностью наблюдались при $n = 2$. В спектрах, полученных в настоящей работе, присутствовало большое число пиков, заведомо не относящихся к ионам в растворе, в то время как пики кластерных ионов идентифицировать не удалось.

Можно предположить, что главной причиной этого является значительное различие величин напряжения, прикладываемого между раствором и экстрагирующим сетчатым электродом в вакууме. При использовании стационарной методики это напряжение находится вблизи 1 kV . Вторичные ионы, образующиеся в этом случае, попадая на поверхность мембраны, заряжают ее, создавая сильное экстрагирующее поле у поверхности раствора, заполняющего каналы мембраны [2,3]. Однако они не способны выбить из полимера заметное количество посторонних ионов. В случае импульсной экстракции сильное экстрагирующее электрическое поле образуется на конце канала за счет эффекта острия. В настоящей работе для достижения эффективной эмиссии ионов из раствора необходимое суммарное напряжение составляло не менее 5 kV . Энергии свыше 5 keV , которую приобретают положительно заряженные ионы, образующиеся при бомбардировке сетки, уже вполне достаточно для эффективной вторичной эмиссии различных ионов с поверхности мембраны, что и приводит к появлению в спектрах значительного количества пиков ионов, не содержащихся в исследуемом растворе.

Появление электронной составляющей во времяпролетном спектре также связано с использованием более высокого по сравнению с применявшимся в стационарных методиках напряжения экстракции.

Самый интенсивный ионный пик в наблюдаемых спектрах, соответствующий наиболее легким ионам, представляет особый интерес в связи с тем, что он имеет форму, зависящую от потенциала торможения анализатора. Сложная форма этого пика (рис. 4) связана

с тем, что в отличие от тяжелых ионов значительная часть легких ионов проходит тормозящее поле, возникающее у выхода из металлического конуса (рис. 1), во время действия импульса экстрагирующего напряжения. Таким образом, к моменту окончания импульса испытавшие торможение ионы имеют минимальную энергию $\varepsilon_{\min} = q\varphi_L$, где q — заряд иона, φ_L — потенциал раствора. Ионы, не успевшие к моменту окончания импульса выйти из зоны нулевого поля внутри конуса, имеют максимальную энергию $\varepsilon_{\max} = q\varphi_{\max}$, где φ_{\max} — максимальная разность потенциалов между поверхностью жидкости в каналах мембраны и электродом в вакууме. Этим и объясняется различная зависимость „быстрой“ и „медленной“ компонент пика от величины тормозящего потенциала. Как видно на рис. 5, „медленная“ компонента, связанная с ионами, имеющими минимальную энергию, перестает наблюдаться при потенциалах на тормозящем электроде ниже -3 kV , который близок к φ_L , в то время как „быстрая“ наблюдается вплоть до потенциала -6 kV , что практически соответствует φ_{\max} .

Пренебрегая временем движения иона в зазоре между мембраной и электродом, которое составляло несколько наносекунд, время выхода ионного пика τ_i можно связать с массой иона M_i соотношением

$$M_i = 2q\varphi_{\max}(\tau_i/L)^2, \quad (1)$$

где L — длина пролета от сетки электрода до входной поверхности детектора. Для наиболее интенсивных легких ионов с энергией $\varphi_{\max} = 6.2\text{ kV}$ время выхода после окончания импульса экстрагирующего напряжения, определенное из положения максимума „быстрой“ компоненты пика, составляет $\tau_i \approx 220\text{ ns}$, что приводит, согласно (1), к $M_i \approx 1\text{ Da}$ при использовании для q значения элементарного электрического заряда. Такой же результат можно получить и из обработки кинетики „медленной“ компоненты пика. Таким образом, естественно считать, что за наиболее интенсивный пик в наблюдаемых времяпролетных спектрах ответственны отрицательные ионы водорода.

Как уже отмечалось в [1], среди ионов, содержащихся в исследуемом растворе, ионов H^- нет. Появление этих ионов можно объяснить вторичными процессами, происходящими в мембранном ионном источнике. По-видимому, ионы H^- возникают при бомбардировке поверхности мембраны вторичными ионами, образующимися при распаде на сетке первичных кластерных ионов, выходящих из раствора. Их большой энергии (около 6 keV) вполне достаточно, чтобы выбить ион водорода из вторичного молекулярного иона (если они есть в его составе) или из материала мембраны, поскольку доля атомов водорода в лавсане достаточно велика.

Детальный механизм генерации H^- в таком процессе пока не ясен. Ситуация усложняется также тем, что неизвестно, какие положительно заряженные вторичные ионы образуются на сетке. При ударе о сетку первичных кластерных ионов, экстрагируемых из раствора, по-видимому, наиболее вероятно образование ионов H^+ ,

которые затем бомбардируют поверхность мембраны. Возможно также образование других положительно заряженных фрагментов первичных ионов. Важным является и то обстоятельство, что для генерации ионов H^- достаточно взаимодействия с поверхностью полимера только одного вторичного иона, поскольку общее число ионов, регистрируемых за один импульс экстракции, невелико.

Хорошо известно, что ионы H^- могут образовываться в водородной плазме в результате диссоциативного захвата электрона колебательно-возбужденными молекулами водорода [10]. Другой способ получения ионов H^- состоит в бомбардировке поверхности проводящих материалов ионами H^+ , которые получают при ионизации атомарного водорода электронным ударом [11]. Интерес к разработке эффективных способов генерации отрицательных ионов водорода связан с задачами развития ускорительной техники, а также с исследованиями в области управляемого термоядерного синтеза [12]. Высокий выход ионов H^- при обработке поверхности лавсана положительно заряженными ионами, наблюдавшийся в настоящей работе, может оказаться интересным также и в связи с этими задачами.

Таким образом, не все ионы, регистрируемые во времяпролетных спектрах, являются первичными ионами, экстрагированными из раствора. Как видно из рис. 3, наблюдаемые спектры содержат множество пиков, которые трудно приписать именно таким ионам. При используемой максимальной энергии ионов область времен пролета менее $2 \mu s$ соответствует массам ионов меньше 100 Da . Это та область, где, по-видимому, находятся пики легких ионов, наблюдавшихся ранее в [4–7] при использовании SIMS. В области $t_i > 2 \mu s$ находятся пики более тяжелых ионов, в частности, кластерных ионов йода. Поскольку выходящие из раствора ионы имеют энергию, близкую к ε_{\max} , можно ожидать, что их доля при увеличении потенциала торможения должна возрастать. Действительно, именно ионы в этой области времен пролета преобладают в спектрах при потенциалах торможения вблизи -6 keV .

Важным аргументом в пользу рассматриваемого механизма генерации побочных ионов, не связанных с полевой экстракцией из раствора, является также и то, что спектр, хотя и слабой интенсивности, наблюдается при потенциалах торможения анализатора, превышающих максимальное напряжение экстракции. Выбываемые из полимера вторичные ионы обладают некоторой начальной кинетической энергией, получаемой от ионов, бомбардирующих поверхность мембраны, поэтому их суммарная энергия после прохождения ускоряющего потенциала φ_{\max} оказывается больше ε_{\max} — максимальной энергии ионов, выходящих из раствора.

В связи с сильной зависимостью выхода ионов от напряженности электрического поля, присутствие большого числа вторичных ионов в наблюдаемом спектре могло бы быть связано с некоторой неоднородностью поля у поверхности мембраны, обусловленной сетчатой

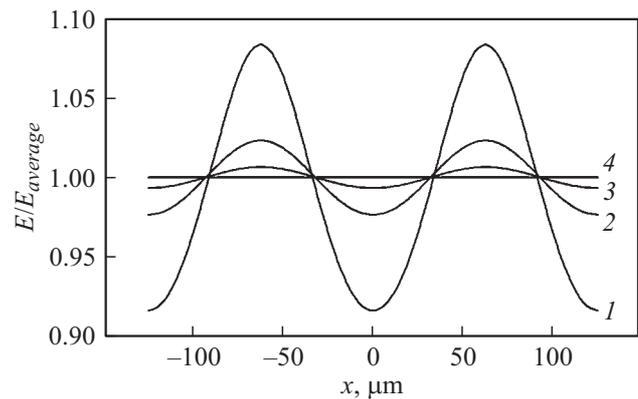


Рис. 6. Распределение напряженности электрического поля у поверхности мембраны для зазора между мембраной и экстрагирующим электродом в вакууме: 50 (1), 75 (2), 100 (3) и $200 \mu\text{m}$ (4).

структурой экстрагирующего электрода, расположенного с вакуумной стороны мембраны. Действительно, можно ожидать, что напряженность поля над металлическими прутиками сетки немного выше, чем в областях, расположенных над окнами сетки. В этом случае ионы, экстрагируемые из областей мембраны, расположенных над прутиками сетки, испытают соударения с сеткой и дадут большой вклад в регистрируемый спектр, в то время как существенно меньшая часть ионов, экстрагируемых из областей над окнами сетки, пройдет сетку, не испытав столкновений.

Для выяснения влияния неоднородности экстрагирующего ионы поля на генерацию вторичных ионов, не связанных с прямой экстракцией из раствора, были проведены модельные расчеты напряженности электрического поля вблизи поверхности мембраны с использованием программы SIMION 8 [8]. На рис. 6 показано, как меняется напряженность поля в зависимости от положения относительно середины окна сетки ($x = 0$). Как и следовало ожидать, максимумы напряженности находятся в областях, расположенных над прутиками сетки, в то время как минимумы соответствуют середине окна. Действительно, при зазорах между экстрагирующей сеткой и мембраной $50 \mu\text{m}$ относительные вариации поля у поверхности мембраны могут составлять около 20%. Однако с увеличением зазора до $200 \mu\text{m}$, используемого в настоящей работе, отклонение напряженности поля вблизи поверхности мембраны от среднего значения оказывается менее 1%. Это означает, что в условиях проводившихся экспериментов неоднородность электрического поля, связанная с использованием сетки, мала и не играет определяющей роли, а появление большого количества вторичных ионов обусловлено высоким значением коэффициента вторичной эмиссии с поверхности мембраны для ионов с энергией около 6 keV .

Таким образом, появление во времяпролетных спектрах, генерируемых импульсным электромембранным источником посторонних ионов, связано с использованием высокого импульсного напряжения, которое наряду

с экстракцией ионов из раствора, заполняющего каналы мембраны, приводит также к генерации вторичных ионов, дающих значительный вклад в наблюдаемый сигнал. По-видимому, подавление вторичной ионной эмиссии в используемой методике может быть достигнуто за счет понижения экстрагирующего напряжения при сохранении необходимой для эффективной экстракции ионов напряженности поля у поверхности раствора в каналах мембраны. Однако, принимая во внимание то, что в используемой методике зазор между мембраной и электродом в вакууме уже составляет несколько десятых долей миллиметра, такой подход вряд ли возможно реализовать, не меняя принципиальной конструкции интерфейса.

Возможно, более успешным может оказаться переход к использованию бессеточной конструкции ионного источника. Как отмечалось в [13], одним из подходов, обеспечивающих сохранение высокой напряженности экстрагирующего электрического поля при использовании импульсов напряжения порядка сотен вольт, является нанесение экстрагирующего электрода непосредственно на диэлектрическую мембрану. Перспективность этого направления развития импульсной полевой экстракции ионов, очевидно, нуждается в дополнительной экспериментальной проверке.

Еще один вариант преодоления возникших трудностей связан с использованием очень коротких импульсов экстрагирующего поля. Если импульс экстрагирующего напряжения сделать короче времени пролета ионов между экстрагирующим электродом в вакууме и мембраной, то можно обеспечить режим, когда первичные ионы будут выходить из источника, в то время как вторичные ионы не будут успевать достичь поверхности мембраны к моменту окончания импульса экстракции. Этот вариант подавления вторичных ионов, так же как и предыдущий, нуждается в проведении дополнительных экспериментов.

Заключение

В настоящей работе проведены исследования времяпролетных спектров отрицательных ионов, генерируемых в электромембранном импульсном источнике ионов, с использованием дополнительных возможностей за счет введения в конструкцию установки анализатора энергии. В частности, установлена связь формы пиков легких ионов с их распределением в пространстве дрейфа.

Показано, что основной вклад в наблюдаемые спектры дают вторичные ионы, образующиеся в процессах бомбардировки мембраны и экстрагирующей сетки ионами, экстрагируемыми из раствора, и их фрагментами. Намечены основные направления модификации мембранного интерфейса для увеличения доли истинных экстрагируемых первичных ионов.

Список литературы

- [1] Балакин А.А., Хидиров С.Г. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 11. С. 134–140.
- [2] Balakin A.A., Buido E.A., Golcova E.A., Novikova L.I., Talrose V.L. // J. Electrostatics. 2006. Vol. 64, P. 555–561.
- [3] Балакин А.А., Буйдо Е.А., Новикова Л.И. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 9. С. 118–124.
- [4] Briggs D. // Surf. Interface Anal. 1982. Vol. 4. P. 151–155.
- [5] Brown A., Vickerman J.G. // Surf. Interface Anal. 1986. Vol. 8. P. 75–81.
- [6] Legget G.J., Vickerman J.G., Briggs D. // Surf. Interface Anal. 1990. Vol. 16. P. 3–8.
- [7] Ramsden W.D. // Surf. Interface Anal. 1991. Vol. 17. P. 793–802.
- [8] SIMIONTM 8 ©Scientific Instrument services, Inc., Idaho National Laboratory. 2003–3007.
- [9] Balakin A.A., Dodonov A.F., Novikova L.I., Talrose V.L. // Rapid Commun. Mass Spectrom. 2001. Vol. 15. N 7. P. 485–495.
- [10] Bacal M., Hatayama A., Peters J. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2005. Vol. 33. P. 1847–1871.
- [11] Schiesko L., Carrère M., Cartry G., Layet J.-M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2008. Vol. 17. P. 035023.
- [12] Fantz U., Franzen P., Wunderlich D. // Chemical Physics. 2012. Vol. 398. P. 7–16.
- [13] Балакин А.А., Буйдо Е.А., Хидиров С.Г. // Патент на изобретение № 2537961. Приоритет: 15.05.2013. Бюл. № 1. 10.01.2015.