

10;12

Формирование экстрагирующего электрического поля в электромембранном ионном источнике

© А.А. Балакин, Е.А. Буйдо, Л.И. Новикова

Филиал Института энергетических проблем химической физики РАН,
142432 Черноголовка, Московская область, Россия
e-mail: balakin@biner.ac.ru

(Поступило в Редакцию 12 января 2010 г.)

Рассмотрен механизм создания экстрагирующего электрического поля в ионном источнике, в котором интерфейсом между атмосферой и вакуумом служит полимерная трековая мембрана с наноразмерными каналами. Высокая напряженность электрического поля, необходимая для эффективной экстракции ионов в газовую фазу из жидкости, находящейся в каналах мембраны, поддерживается зарядкой вакуумной поверхности мембраны. Зарядку обеспечивают вторичные ионы противоположного знака, образующиеся при распаде первичных кластерных ионов на экстрагирующем электроде. Наблюдаемое снижение тока источника при разрядке вакуумной поверхности подтверждает этот механизм. Методом задерживающего потенциала получено распределение экстрагированных ионов по энергии в непосредственной близости от зоны экстракции. Обсуждаются процессы формирования ионного пучка в электромембранном ионном источнике.

Развитие новых методов экстракции ионов из растворов имеет большое значение как для фундаментальных исследований закономерностей перехода ионов из жидкости в газовую фазу, так и для выяснения возможностей применения полевых методов экстракции ионов в различных приложениях, использующих ионные пучки. Одно из таких применений — масс-спектрометрия, для которой генерация газофазных ионов анализируемой субстанции является необходимой стадией проведения анализа. В последнее время масс-спектральный анализ является незаменимым инструментом при проведении исследований во многих областях науки, включая исследования в интересах биохимии, биологии, медицины и экологии. Это стало возможным именно благодаря развитию новых методов генерации газофазных ионов сложных органических и биоорганических веществ.

Наибольшее развитие в современной масс-спектрометрии тяжелых органических молекул получил метод ионизации электрораспылением [1]. Метод основан на получении ионов сложных нелетучих органических веществ путем распыления их растворов в сильном электрическом поле. Ионизация молекул пробы этим методом представляет собой многоступенчатый процесс, включающий разбрызгивание раствора при атмосферном давлении, образование многозарядных капель, их распад на более мелкие капли из-за испарения молекул растворителя и, наконец, полевое испарение кластерных ионов пробы уже из более стабильных многозарядных капель субмикронных размеров [2,3]. В водных растворах требуется для полевого испарения ионов диаметр капель составляет несколько десятков нанометров [2].

Несмотря на широкое применение ионные источники на основе электрораспыления растворов имеют ряд недостатков. К основным недостаткам можно отнести, в частности, высокую степень фрагментации ионов анализируемых веществ, низкую эффективность их ввода

в вакуумную камеру анализатора, необходимость использования мощной системы откачки, поскольку ионы получаются в атмосферных условиях и вводятся в масс-спектрометр через небольшое впускное отверстие. Все это делает задачу разработки новых ионных источников с мягкой ионизацией актуальной.

Одной из возможных альтернатив источникам ионов с электрораспылением может стать электромембранный ионный источник (ЭМИИ), предложенный Б.С. Яковлевым и др. [4]. ЭМИИ позволяет вводить ионы из раствора, находящегося при атмосферном давлении, непосредственно в вакуумную камеру масс-спектрометра, используя в качестве интерфейса полимерную трековую мембрану с каналами субмикронного диаметра [5]. В таком источнике многоступенчатый процесс генерации газофазных ионов при электрораспылении заменен на прямой ввод ионов анализируемого вещества в вакуумную камеру масс-спектрометра без дополнительных потерь при напуске пробы. Использование трековых мембран с диаметром каналов менее 100 нм позволяет избежать разбрызгивания жидкости в сильных электрических полях. При этом создаются условия для полевого испарения ионов без фрагментации больших органических молекул. Это было продемонстрировано для растворов органических кислот в глицерине и водно-глицериновых смесях [4,6,7].

С точки зрения фундаментальных исследований применение этого метода экстракции ионов также представляется важным, поскольку позволяет изучать закономерности перехода ионов из жидкости в газовую фазу в сильных электрических полях на основе прямых экспериментальных данных. Так, в результате масс-спектральных исследований ионных пучков, генерируемых ЭМИИ, было показано, что основная часть выходящих из раствора заряженных частиц — это кластерные ионы, которые представляют собой ассоциат из иона анализи-

руемого вещества и нескольких молекул растворителя, число которых зависит от природы иона [4,6,7].

Считается, что для эффективного выхода ионов из растворов полярных веществ необходимы сильные электрические поля напряженностью $E > 1 \text{ MV/cm}$ [5]. При обычно используемых расстояниях между мембраной и экстрагирующим электродом в вакууме порядка 1 мм и экстрагирующего напряжения около 1 kV, средняя напряженность электрического поля составляет примерно 0.01 MV/cm , что существенно меньше величины напряженности электрического поля, необходимой для эффективной эмиссии ионов из раствора. Оценка, выполненная на основе экспериментальной зависимости тока ионов в ЭМИИ от экстрагирующего напряжения, приводит к величине напряженности экстрагирующего поля около 3 MV/cm [8].

Первоначально считалось, что сильное экстрагирующее поле на конце канала мембраны, заполненного жидкостью, может возникать из-за „эффекта острия“ [4]. В этом случае следует ожидать быстрого „отклика“ тока ЭМИИ на изменение экстрагирующего напряжения. Однако многочисленные эксперименты показали, что время установления тока источника после изменения экстрагирующего напряжения может составлять несколько минут [9]. Кроме того, из-за поверхностной проводимости полимерного материала мембраны „эффект острия“ должен со временем пропадать. Тем не менее, как было неоднократно показано, мембранный ионный источник способен обеспечивать эффективную эмиссию ионов на протяжении многих часов без существенного изменения величины тока.

Другой возможный механизм, обеспечивающий существование постоянного сильного электрического поля у поверхности жидкости в каналах мембраны, связан с зарядкой вакуумной поверхности мембраны. Теоретически такой механизм был рассмотрен в [10]. Его суть состоит в следующем. Часть кластерных ионов, выходящих из каналов мембраны, сталкивается с экстрагирующим сетчатым электродом, расположенным в вакууме вблизи мембраны, и распадается на заряженные фрагменты. Те фрагменты, которые имеют знак, противоположный знаку ионов, вышедших из жидкости, движутся в электрическом поле между экстрагирующей сеткой и мембраной по направлению к мембране, заряжая ее поверхность. Баланс тока зарядки поверхности мембраны вторичными ионами и тока разрядки по вакуумной поверхности мембраны через каналы, заполненные жидкостью, обеспечивают существование стационарного заряда на вакуумной поверхности мембраны.

Выполненные в [10] расчеты показали, что такой заряд может создать у поверхности жидкости локальное электрическое поле напряженностью свыше 1 MV/cm . Таким образом, в пространстве вблизи поверхности мембраны на расстояниях, сравнимых со средним расстоянием между каналами, электрическое поле сильно неоднородно, причем его напряженность максимальна у поверхности жидкости. На больших расстояниях электрическое

поле становится однородным, а его напряженность — на несколько порядков меньше, чем вблизи поверхности жидкости.

Для экспериментального подтверждения этого механизма формирования экстрагирующего поля в ЭМИИ необходимо убедиться, что изменение заряда на поверхности мембраны действительно приводит к изменению ионного тока источника. В частности, для частичной разрядки поверхности мембраны можно использовать ионы, экстрагированные из жидкости, направляя их на поверхность мембраны. Такой подход и был реализован в настоящей работе.

Хотя принципиальная возможность использования трековых мембран для полевого испарения ионов из жидкости была продемонстрирована достаточно давно, основные принципы генерации до сих пор изучены недостаточно. Существуют два источника получения экспериментальных данных о механизме формирования ионного пучка и его составе. Один из них связан с масс-спектральными исследованиями природы ионов, экстрагированных из жидкости [4,6,7]. Другим источником информации являются исследования кинетики тока ионного источника, а также энергетических характеристик ионного пучка [4,8]. Знание основных характеристик ионного пучка, формируемого ЭМИИ, в том числе распределения ионов по энергии, необходимо как при непосредственном применении этого источника, так и при разработке интерфейсов для ввода ионов в камеру анализатора, что особенно важно при проведении анализа на пределе чувствительности масс-спектрометра.

Уже в первых работах по ЭМИИ [4,8] было выявлено широкое распределение ионов по энергии. Такой вид распределения указывает на то, что покидающие жидкость кластерные ионы не являются стабильными и претерпевают в электрическом поле вблизи поверхности мембраны несколько мономолекулярных распадов с потерей части молекул растворителя, входящих в состав кластерной оболочки. Число таких распадов невелико [7], однако они существенно влияют на энергетическое распределение ионов в ЭМИИ. Следует отметить, что полученные ранее данные об энергетическом распределении ионов носят оценочный характер, поскольку ионный пучок анализировался вдали от источника с использованием не прямых методов регистрации энергии ионов [4,8]. В первой работе по ЭМИИ [4] сдвиг распределения ионов в область низких энергий объясняли падением напряжения при протекании тока через каналы мембраны, что должно было приводить к уменьшению истинного значения экстрагирующего напряжения. В настоящей работе предпринята, в частности, экспериментальная проверка этого предположения.

Основной целью настоящей работы являлась экспериментальная проверка предложенной модели формирования сильного экстрагирующего электрического поля у поверхности жидкости в каналах мембраны ЭМИИ, в которой главную роль играет зарядка вакуумной поверхности мембраны. Для изменения заряда этой

поверхности использовались ионы, экстрагированные из жидкости. Реализация такого подхода потребовала знания истинного распределения экстрагированных ионов по энергии. Поэтому в цели работы входило также получение распределения ионов по энергии в непосредственной близости от зоны экстракции. Кроме того, полученное распределение используется для обсуждения процессов формирования ионного пучка в ЭМИИ.

Экспериментальная часть

Общий вид экспериментальной установки приведен на рис. 1. В основу ее конструкции был положен мембранный ионный источник, ранее использовавшийся в [9,10] вместе с ортогональным времяпролетным масс-спектрометром.

Жидкий образец в виде капли располагался на внешней стороне мембраны, находящейся при атмосферном давлении. Электрическое поле, экстрагирующее ионы из раствора, создавали два электрода, один из которых был погружен в жидкий образец. Другой, в виде экстрагирующей сетки с размером ячейки 0.2×0.2 mm, размещался в вакууме. Минимальное расстояние между мембраной и экстрагирующей сеткой равнялось 0.4 mm. Диаметр окна, перекрываемого мембраной, около 3 mm.

Измерения проводились при отрицательной полярности напряжения на электроде, погруженном в жидкость, $\varphi_L = -1.5$ kV, при этом из жидкости экстрагировались отрицательно заряженные ионы.

Для получения распределения экстрагированных ионов по энергии поступательного движения был применен метод задерживающего потенциала. С этой целью ЭМИИ был модифицирован путем введения в его конструкцию дополнительных электродов. На расстоянии 10 mm за экстрагирующим электродом был размещен электрод, также представлявший собой плоскую металлическую сетку 0.2×0.2 mm. За ней располагался цилиндрический коллектор для измерения тока прошедших ионов. Чтобы избежать неоднородностей электрических полей в области прохождения ионного пучка, была введена дополнительная плоская сетка, соединенная с экстрагирующим электродом. Потенциал задерживающего электрода φ_R можно было изменять от нуля до потенциала электрода в растворе φ_L .

Установка (рис. 1) позволяла измерять независимо друг от друга полный ток ионного источника, ток экстрагирующего электрода (сеточный ток) и ток коллектора; при этом сумма токов коллектора и экстрагирующего электрода практически равнялась полному току источника.

Для изготовления трековых мембран (ядерных фильтров) применяли технологию химического травления полиэтилентерефталатной пленки толщиной $10 \mu\text{m}$, облуженной пучком ионов ксенона высокой энергии [11]. Средний диаметр образовавшихся сквозных каналов, оцененный по натеканию атмосферного воздуха через

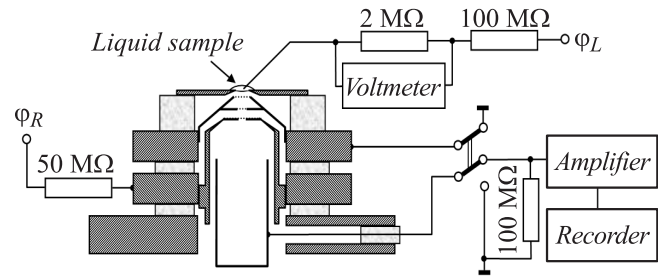


Рис. 1. Схема эксперимента для получения энергетического распределения ионов, экстрагируемых электрическим полем из каналов трековой мембраны. Постоянный потенциал жидкости $\varphi_L = -1.5$ kV.

сухую мембрану, равнялся примерно 70 nm, средняя поверхностная плотность каналов — 10^7 cm^{-2} .

Эксперименты проводили при комнатной температуре. Использовали растворы KI в водно-глицериновой смеси (соотношение объемов 50 : 50) с концентрацией 10^4 и 10^{-3} M.

Результаты

На рис. 2 приведена кривая задержки — экспериментальная зависимость относительной величины тока коллектора I_C/I_C^{max} (I_C^{max} — наибольшее измеренное значение I_C) от отношения задерживающего потенциала φ_R к потенциалу электрода в жидкости φ_L для $[\text{KI}] = 10^{-3}$ M. Распределение по энергии ионов, экстрагированных из раствора, получено численным дифференцированием кривой задержки и показано на рис. 3. По оси абсцисс отложена величина отношения энергии иона ε к его максимально возможной энергии $\varepsilon_{\text{max}} = e|\varphi_L| = 1.5$ keV.

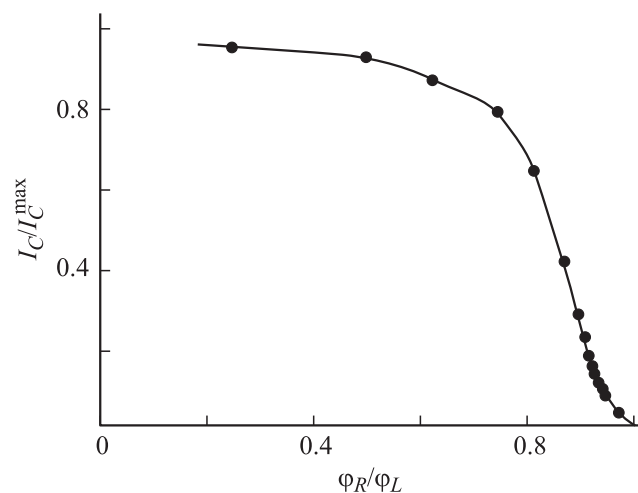


Рис. 2. Зависимость тока коллектора от потенциала отражающего электрода.

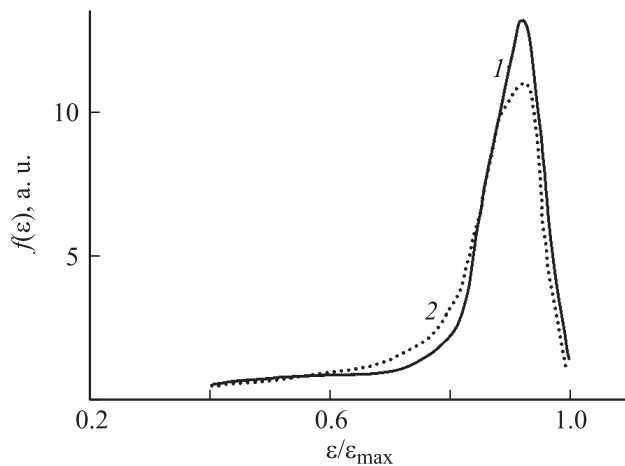


Рис. 3. Распределение экстрагированных ионов по энергии поступательного движения: 1 — $[KI] = 10^{-3}$, 2 — 10^{-4} М.

Видно, что при уменьшении концентрации KI в растворе до 10^{-4} М кривая задержки практически не изменилась. Это позволяет сделать вывод о том, что энергетическое распределение частиц, экстрагируемых из жидкой пробы в ЭМИИ, практически не зависит от концентрации ионов в растворе. Максимум распределения сдвинут относительно энергии ионов ε_{\max} примерно на 150 eV, ширина распределения на полувысоте также близка к 150 eV.

Было обнаружено, что при постоянной разности потенциалов между жидкостью и экстрагирующим электродом полный ток экстрагируемых из жидкости ионов I_S падает, если потенциал задерживающего электрода φ_R приближается к потенциалу электрода в жидкости φ_L . Это падение наблюдалось только для $|\varphi_L - \varphi_R| < 40$ В. Кинетика изменения полного тока источника и тока на экстрагирующую сетку при $\varphi_R = \varphi_L$, когда падение величины тока ЭМИИ максимально, приведена на рис. 4.

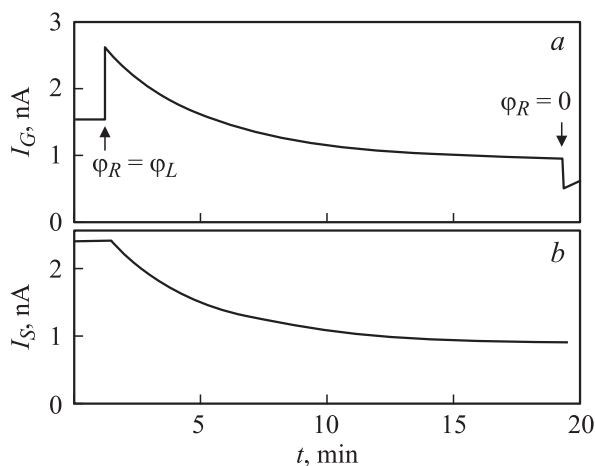


Рис. 4. Кинетика тока экстрагирующей сетки I_G (a) и полного тока ионного источника I_S (b) после подачи на задерживающий электрод потенциала $\varphi_R = \varphi_L$.

Как видно, полный ток ионного источника после подачи на задерживающий электрод потенциала жидкости φ_L постепенно падает до некоторого нового стационарного значения, которое примерно в три раза меньше исходного. При этом ток экстрагирующего электрода сначала резко увеличивается, а затем, как и I_S , медленно спадает до нового стационарного значения, которое также было меньше, чем до подачи отражающего потенциала. Характеристическое время установления новых значений полного тока источника и тока экстрагирующей сетки составляло примерно 4.3 min. Заземление задерживающего электрода ($\varphi_R = 0$) приводило к восстановлению токов I_G и I_S до первоначальных значений с тем же характеристическим временем.

Обсуждение результатов

Кинетика ионного тока

Изменение потенциала задерживающего электрода φ_R не влияет непосредственно на среднюю напряженность электрического поля в пространстве между мембраной и экстрагирующим электродом, поскольку поле этого электрода экранируется двумя заземленными сетками. Поэтому влияние потенциала задерживающего электрода на ток ЭМИИ естественно связать с изменением локальной напряженности электрического поля у поверхности жидкости в каналах за счет изменения величины поверхностного заряда вакуумной стороны мембраны. При потенциале задерживающего электрода, равного потенциалу электрода в жидкости, все ионы, экстрагированные из жидкости, отражаются в тормозящем поле и движутся обратно в сторону мембраны. Однако не все отраженные ионы способны достичь поверхности мембраны. Как показывает экспериментально полученное распределение экстрагированных ионов по энергии (рис. 3), лишь малая часть ионов имеет энергию, близкую к $\varepsilon_{\max} = e|\varphi_L|$ и, следовательно, может достичь поверхности мембраны и повлиять на ее заряд. Большинство отраженных ионов не достигает поверхности мембраны, а совершает колебательное движение около экстрагирующей сетки и, в конечном счете, падает на нее, увеличивая ток I_G в цепи этого электрода. С этим связано резкое возрастание тока экстрагирующей сетки при подаче задерживающего потенциала φ_R на тормозящий электрод (рис. 4).

Наблюдаемый спад полного тока ионного источника после подачи на задерживающий электрод отражающего потенциала $\varphi_R = \varphi_L$ является прямым экспериментальным доказательством того, что поверхностный заряд, находящийся на вакуумной стороне мембраны, является основным фактором при формировании сильного экстрагирующего электрического поля у поверхности жидкости, находящейся в каналах полимерной мембраны.

Вакуумная поверхность мембраны в стационарном состоянии имеет положительный поверхностный заряд,

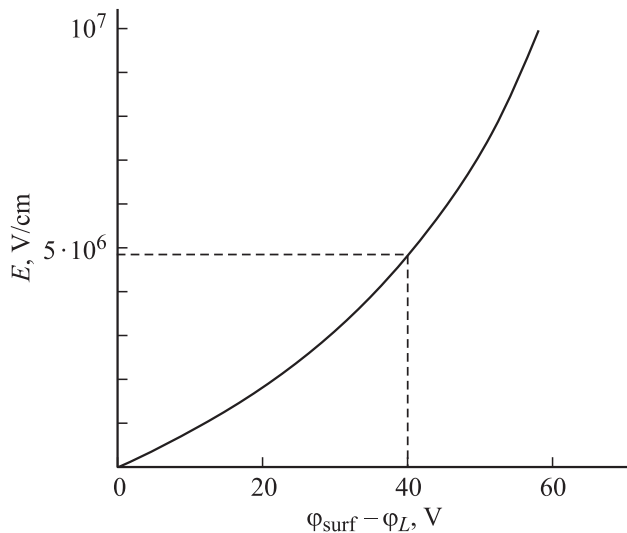


Рис. 5. Определение напряженности экстрагирующего электрического поля у поверхности жидкости в канале мембраны по разности потенциалов жидкости и вакуумной поверхности мембраны.

поддерживаемый ток вторичных ионов, образующихся на экстрагирующей сетке. Отрицательно заряженные ионы экстрагируемые из жидкости, энергия которых достаточна для достижения поверхности мембраны, уменьшают положительный заряд ее поверхности, уменьшая тем самым напряженность экстрагирующего электрического поля E у поверхности жидкости. Это приводит к уменьшению тока эмиссии ионов из жидкости, которое выражается в падении полного тока источника. Таким образом, через некоторое время после включения отражающего напряжения устанавливается новое, меньшее, стационарное значение потенциала поверхности мембраны, а следовательно, и новое значение полного тока ионного источника, которое также меньше первоначального.

Поскольку изменение тока источника наблюдалось при $|\varphi_L - \varphi_R| < 40$ В, можно заключить, что из всех отраженных задерживающим полем ионов поверхности мембраны достигают лишь те ионы, которые потеряли не больше 40 eV от максимально возможной энергии 1.5 keV. Это означает, что потенциал вакуумной поверхности мембраны φ_{surf} отличался в наших экспериментах от потенциала жидкости φ_L также примерно на 40 В.

Приведенное на рис. 5 сравнение с результатами модельных расчетов [10] показывает, что при $\varphi_{surf} - \varphi_L \approx 40$ В у вакуумной поверхности жидкости, находящейся в каналах мембраны, будет достигаться напряженность электрического поля около $5 \cdot 10^6$ В/см, которая обеспечивает эффективную эмиссию ионов из раствора.

Из экспериментально полученного распределения ионов по энергии видно, что лишь очень малая часть экстрагированных ионов (менее 0.1%) обладает поступа-

тельной энергией в интервале от $(\varepsilon_{max} - 40$ eV) до ε_{max} и, следовательно, может участвовать в процессе разрядки поверхности мембраны, однако этого оказалось достаточно, чтобы заметно изменить полный ток ЭМИИ.

Распределение ионов по энергии

Полученное распределение ионов по энергии поступательного движения позволяет сделать некоторые выводы о характере процессов, происходящих после выхода ионов из жидкости.

Во-первых, следует отметить, что вид распределения не связан с падением потенциала в каналах мембраны, как считалось ранее [4]. Электрическое сопротивление канала, заполненного раствором, обратно пропорционально концентрации растворенных ионов. Поэтому можно было ожидать, что падение потенциала в канале при протекании через него тока тоже будет меняться с изменением концентрации КИ водно-глицериновой смеси. Однако, как видно из рис. 3, величина концентрации ионов в растворе практически не влияет на энергетическое распределение кластерных ионов, выходящих из жидкости. Следовательно, вид энергетического распределения ионов определяется в основном процессами, протекающими вне жидкости уже после экстракции ионов в вакуум.

Этот вывод подтверждается также оценками величины падения потенциала в канале для чистого глицерина. Для мембран со средним диаметром рабочей части около 3 мм при полном токе ЭМИИ порядка 10^{-9} А и электрическом сопротивлении канала около $3 \cdot 10^{14}$ Ω падение напряжения в канале составляет примерно 1 В. Для растворов, содержащих КИ, это значение будет еще меньше.

Во-вторых, наблюдаемое энергетическое распределение нельзя объяснить рассеянием ионов на сетках экстрагирующего электрода. Анализ, проведенный с использованием программы численного моделирования движения ионов SIMION 6, показал, что размытие энергетического спектра ионов из-за рассеяния на сетках не превышает 15 eV.

Еще одной причиной, приводящей к сдвигу энергетического спектра, мог бы быть неосевой выход ионов из каналов мембраны. Как показано в [10], при определенном поверхностном заряде на вакуумной стороне мембраны максимальное значение напряженности электрического поля E может возникнуть на линии контакта жидкости с вакуумной поверхностью мембраны. Это значит, что в принципе ионы могут выходить из жидкости и не по оси канала, а из области, расположенной вблизи линии смачивания. В этом случае скорость иона после выхода из жидкости будет иметь не только составляющую вдоль оси канала, но составляющую вдоль перпендикулярного направления. Это обстоятельство также должно приводить к сдвигу функции распределения ионов по энергии, поскольку часть их поступательной энергии уйдет в поперечное движение. Анализ движения

ионов при неосевом выходе из жидкости показал, что энергия, уходящая в поперечное движение ионов в локальных электрических полях напряженностью порядка 10^7 V/cm не превышает 20 eV [12].

Поскольку ширина экспериментально полученного энергетического распределения ионов по поступательной энергии существенно больше, чем следовало бы ожидать с учетом всех рассмотренных выше причин, можно сделать вывод, что вид распределения ионов по поступательной энергии в основном определяют процессы, происходящие с ионами после их выхода из жидкости. В [7] было сделано предположение, что кластерные ионы, экстрагируемые из жидкости, не являются стабильными, и в процессе движения в экстрагирующем электрическом поле теряют часть своей кластерной оболочки. Для объяснения наблюдаемого распределения ионов по числу молекул растворителя в составе ионного кластера в [7] был сделан вывод о том, что среднее число молекул растворителя, теряемых кластерным ионом в процессе мономолекулярного распада, близко к единице.

Известно [7], что при экстракции из водно-глицериновых растворов отрицательно заряженных ионов иода Γ^- , наиболее интенсивный пик в масс-спектре имеет ион Γ^-G_3 , где буквой G обозначена молекула глицерина. Потеряв одну молекулу растворителя, кластерный ион теряет энергию $\Delta\epsilon$

$$\Delta\epsilon = qU(M_G/M_C), \quad (1)$$

где U — разность потенциалов между жидкостью и экстрагирующим электродом, q — заряд иона, M_C — исходная масса кластерного иона, M_G — масса молекулы глицерина. Для однозарядного иона Γ^-G_4 отношение $M_G/M_C \approx 0.2$ и при $U = 1.5$ kV $\Delta\epsilon = 300$ eV. Поскольку в нашем случае максимум энергетического распределения ионов смещен относительно ϵ_{\max} примерно на 150 eV, это означает, что вышедший из жидкости кластерный ион теряет в среднем молекулу растворителя примерно на середине расстояния между мембраной и экстрагирующей сеткой.

Для того чтобы попытаться детально описать наблюдаемое распределение ионов по поступательной энергии, надо учесть, что реально из жидкости выходит некий ансамбль кластерных ионов, в котором доля ионов с разным числом молекул растворителя различна. Кроме того, эти ионы имеют разные распределения по временам жизни относительно распада (потери молекулы растворителя), что дополнительно усложняет задачу. Для каждого кластерного иона средняя потеря энергии составит

$$\Delta\epsilon_k = (M_G/M_k)(qE\tau_k)^2/(2M_k), \quad (2)$$

где M_k и τ_k — масса и время жизни иона Γ^-G_k , E — напряженность электрического поля.

Пока нет возможности провести детальный анализ энергетического распределения ионов в ЭМИИ с этих позиций, однако ясно, что наблюдаемое распределение ионов по поступательной энергии вполне может быть качественно объяснено мономолекулярными распадами кластерных ионов в экстрагирующем электрическом поле. Внутренняя энергия, необходимая для отрыва молекул растворителя от кластерного иона, по-видимому, связана с деформацией ионного кластера в момент его выхода из жидкости.

Заключение

Таким образом, экспериментально показано, что высокая напряженность электрического поля, необходимая для эффективной экстракции ионов в газовую фазу из жидкости, находящейся в каналах мембраны ЭМИИ, поддерживается зарядкой вакуумной поверхностью мембраны. Разрядка поверхности мембраны приводит к снижению тока источника.

Полученное распределение ионов по поступательной энергии свидетельствует, что основным процессом, определяющим его вид, является мономолекулярный распад экстрагируемых кластерных ионов электрическом поле в ЭМИИ в вакууме.

Спецификой ЭМИИ является достаточно широкое распределение экстрагируемых ионов по энергии, что следует принимать во внимание при их использовании в масс-спектральных приборах. Для повышения чувствительности анализа необходимо предусматривать либо системы с энергонезависимыми анализаторами, либо использование дополнительных систем для преобразования ионных пучков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований президиума РАН „Создание и совершенствование методов химического анализа и исследования структуры веществ и материалов“.

Список литературы

- [1] Smith R.D., Loo J.A., Ogorzalek R.R., Busman M., Udseth H.R. // Mass Spectrom. Rev. 1991. Vol. 10. P. 359–451.
- [2] Iribarne J.V., Thomson B.A. // J. Chem. Phys. 1976. Vol. 64. N. 6. P. 2287–2294.
- [3] Fenn J.B., Mann M., Meng C.K., Wong S.F., Whitehouse C.M. // Mass Spectrom. Rev. 1990. Vol. 9. N 1. P. 37–70.
- [4] Yakovlev B.S., Talrose V.L., Fenselau C. // Anal. Chem. 1994. Vol. 66. N 10. P. 1704–1707.
- [5] Яковлев Б.С. // ХВЭ. 1995. Т. 29. № 6. С. 389.
- [6] Balakin A.A., Dodonov A.V., Novikova L.I., Talrose V.L. // Rapid Commun. Mass Spectrom. 1996. Vol. 10. N 5. P. 515–520.

- [7] *Balakin A.A., Dodonov A.V., Novikova L.I., Talrose V.L.* // Rapid Commun. Mass Spectrom. 2001. Vol. 15. N 5. P. 489–495.
- [8] *Balakin A.A., Gridin V.V., Schechter I.* // J. Phys. Chem. A. 1998. Vol. 102. N 47. P. 9470–9475.
- [9] *Balakin A.A., Dodonov A.V., Novikova L.I., Talrose V.L.* // J. Electrostatics. 1997. Vol. 40–41. P. 615–620.
- [10] *Balakin A.A., Buido E.A., Golcova E.A., Novikova L.I., Talrose V.L.* // J. Electrostatics. 2006. Vol. 64. P. 555–561.
- [11] *Флеров Г.Н., Барашенков В.С.* // УФН. 1971. Т. 114. С 351–353
- [12] *Balakin A.A., Buido E.A., Golcova E.A., Novikova L.I., Talrose V.L., Baldwin M.A.* // Proc. 52nd Ann. Conf. on Mass Spectrom. and Allied Topics of the American Society of Mass Spectrom. Nashville, USA. 2004.