

Методы измерения подвижности ионов и их применение

Г.В.Карачевцев

Московский физико-технический институт

141700 Долгопрудный Московской области, Институтский пер., 9, факс (095) 408–6869

Обобщены результаты исследований подвижностей ионов в газах, дающих информацию о потенциалах взаимодействия ионов с молекулами. Описаны принципы работы и характеристики спектрометров подвижности ионов. Приведены примеры применений плазменной хроматографии для исследования ионов. Библиография — 70 ссылок.

Оглавление

I. Введение	712
II. Подвижность ионов	712
III. Спектрометры подвижности и их применение	713
IV. Заключение	715

I. Введение

Подвижностью ионов называется отношение скорости их направленного равномерного движения через газ к напряженности электрического поля, вызывающего это движение. Величины подвижностей ионов в газах широко применяются как в фундаментальных, так и в прикладных областях науки. Например, по подвижностям ионов хрома, кобальта и никеля в гелии и неоне при различных температурах определены параметры потенциалов взаимодействия и получены энергии диссоциации связей, равновесные длины связей и частоты колебаний.^{1,2} Такая информация представляет интерес для изучения физических и химических характеристик низкотемпературной плазмы.

В последние годы разработаны аналитические приборы, основанные на измерении подвижности ионов. Эти приборы известны под различными названиями: спектрометры подвижности ионов,³ дрейфовые спектрометры, плазменные хроматографы.^{4,5} Методы анализа ионов в этих приборах заключаются в исследовании зависимости подвижности ионов от их массы, а в более общем случае — от типа ионов. Для таких установок не требуется создания высокого вакуума, что существенно упрощает их конструкцию по сравнению с другими аналитическими установками, в которых используются процессы ионизации (например, таких как масс-спектрометры и электронные спектрометры).

Схема дрейфового спектрометра приведена на рис. 1. Пакет ионов различной подвижности впрыскивается в дрейфовую трубку с однородным электрическим полем и повышенным давлением газа. При этом происходит разделение первоначального пакета на несколько пакетов, в соответствии с числом типов ионов в первоначальном пакете.

Ионизация в плазменных хроматографах так же, как и в масс-спектрометрах, может проводиться корпускулярным и

фотоизлучением, методами лазерной десорбции, электро- и термораспыления.^{6–9}

II. Подвижность ионов

Данные о подвижностях ионов в газах приведены в работах^{10–24}. Величины подвижностей ионов зависят от их массы, структуры, эффективности энергетического обмена при движении в электрическом поле в газах.

Для электрических полей, обычно применяемых в плазменной хроматографии при атмосферном давлении, коэффициент подвижности K не зависит от напряженности электрического поля E . Коэффициент подвижности связан с коэффициентом диффузии ионов D соотношением Эйнштейна

$$K = 1.16 \cdot 10^4 \frac{D}{T},$$

где K имеет размерность $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, D — $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, T — К.

Средняя энергия ионов в электрическом поле определяется параметром E/N (N — плотность газа), измеряемым в таунсендах ($1 \text{ Тд} = 10^{-17} \text{ В} \cdot \text{см}^2$). В плазменной хроматографии типичные значения величин E/N составляют 1–2 Тд.

В этих условиях упругое рассеяние ионов определяется поляризационным захватом, происходящим на расстояниях, значительно превышающих геометрические размеры моле-

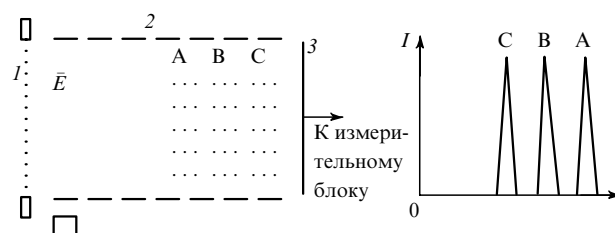


Рис. 1. Схема дрейфового спектрометра.

1 — ионный затвор, обеспечивающий проход ионов из ионного источника в дрейфовую трубку (2); 3 — детектор ионов; A, B, C — пакеты ионов с разной подвижностью.

Г.В. Карачевцев. Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры молекулярной физики МФТИ. Телефон: 408 — 5527
Область научных интересов: ионные процессы в газах.

Дата поступления 13 мая 1996 г.

кулы и иона. Коэффициент подвижности в нормальных условиях ($N = 2.69 \cdot 10^{19}$ молекул в 1 см^3 , $T = 273 \text{ К}$) можно получить, используя следующее выражение:

$$K = 13.85 \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{M} \right)^{0.5} \alpha^{-0.5},$$

где m — масса иона в ат. ед., M — масса молекулы в ат. ед., α — поляризуемость молекулы в $\text{\AA}^3$.

Подвижность связана с приведенной подвижностью K_0 соотношением

$$K_0 = K \frac{273}{T} \frac{P}{760}.$$

Здесь P — полное давление в мм рт. ст.

С повышением энергии относительного движения иона и молекулы радиус захвата иона молекулой уменьшается, при этом между молекулой и ионом начинают проявляться близкодйствующие обменные взаимодействия. Коэффициент подвижности начинает зависеть от величины электрического поля

$$K = K_{(0)} \left[1 + \alpha_1 \left(\frac{E}{N} \right)^2 \right].$$

Здесь $K_{(0)}$ — подвижность в нулевом электрическом поле, α_1 — коэффициент, учитывающий отклонение потенциала взаимодействия от поляризационного. Это отклонение на малых расстояниях обуславливает температурную зависимость коэффициентов подвижности. Например, с повышением температуры при дрейфе в гелии ионов Li^+ , когда близкодйствующие обменные силы являются отталкивающими, коэффициент подвижности возрастает, а при дрейфе ионов H^+ , когда близкодйствующими являются силы притяжения, уменьшается.²⁵

Отметим, что зависимость средней кинетической энергии ионов w от температуры газа и скорости дрейфа v определяется формулой Ванье

$$w = 1.5kT + 0.5mv^2 + 0.5Mu^2,$$

которая часто используется в кинетических исследованиях.

III. Спектрометры подвижности и их применение

Спектрометры, принцип работы которых основан на разделении ионов по их подвижности, могут применяться совместно с обычными высоковакуумными масс-спектрометрами. Такое совмещение требует преодоления значительных технических трудностей, согласования областей высокого и низкого давлений газа вдоль пути движения ионов,^{26,27} но зато обеспечивает возможность решения задач, недоступных для каждого метода в отдельности. Например, в работах^{28,29} описана установка, в которой на выходе плазменного хроматографа находится квадрупольный масс-анализатор (рис. 2). Такие установки позволяют точно идентифицировать ионы, составляющие тот или иной хроматографический пик.

Возможен также другой вариант, когда плазменный хроматограф устанавливается после масс-спектрометрического анализатора (рис. 3).³⁰ С помощью такой tandemной установки исследованы кластеры углерода C_n^+ , полученные при испарении графита под действием лазерного излучения в атмосфере гелия с последующим сверхзвуковым расширением.^{2,31} Ионы кластера C_n^+ ускорялись, проходили через масс-анализатор, замедлялись и впрыскивались в дрейфовую трубку. В этом случае удалось изучить строение ионов одинакового элементного состава. В частности, времена дрейфа кластеров $\text{C}_3^+ - \text{C}_6^+$ имеют только одно значение для каждого иона C_n^+ . Для ионов $\text{C}_7^+ - \text{C}_{10}^+$ имеются по два разрешенных пика подвижности, что соответствует наличию двух изомерных форм кластеров — циклических и

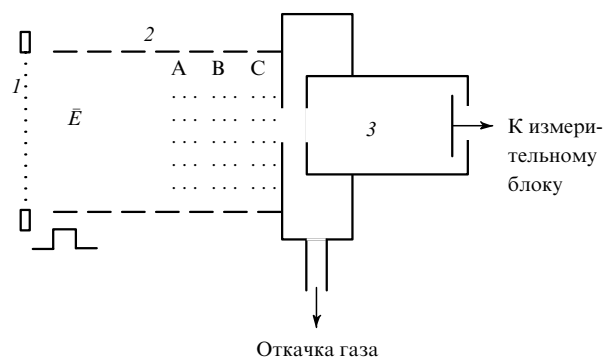


Рис. 2. Схема tandemной установки дрейфовый спектрометр – масс-спектрометр.

1, 2, A, B, C — то же, что на рис. 1; 3 — квадрупольный масс-анализатор.

линейных. Ионы циклических кластеров имеют большую подвижность, чем линейных. Для кластера C_{32}^+ оказалось, что моноциклические кольца составляют 23%, бициклические кольца — 71%, открытые фуллерены — 2.4% и фуллерены — 3.2%. Аналогичная информация имеется для всех кластеров вплоть до C_{61}^+ (рис. 4).³¹

Теория подвижности кластерных ионов углерода с учетом геометрии и колебательного возбуждения кластеров рассмотрена в работе³². Показано, например, что подвижность увеличивается с повышением колебательной энергии кластера. С помощью спектрометрии подвижности ионов обнаружено, что протонирование анилина в газовой фазе приводит к двум изомерным формам.³³ Наиболее предпочтительно присоединение протона к атому азота. С меньшей вероятностью происходит присоединение протона к фенильному кольцу. Такие ионы имеют большую подвижность, чем ионы, протонированные по атому азота.

Другие исследования изомеров с помощью плазменной хроматографии описаны в статье³⁴.

Плазменный хроматограф можно эффективно использовать в качестве высокочувствительного селективного детектора в газовой хроматографии.³⁵ Конструкции спектрометров, способы ввода образцов и интерпретация спектров детально описаны в работе³⁶. Плазменный хроматограф обычно состоит из двух последовательно установленных дрейфовых трубок. В первой находится источник радиоактивного излучения (фольга, содержащая ^{63}Ni). Эта трубка служит реактором для осуществления ионно-молекулярных реакций, в качестве газа-носителя обычно используется чистый азот, который можно получать из жидкого азота. Однако даже в хорошо очищенном азоте остаются примеси воды, которые в результате ионно-молекулярных реакций приводят к образованию стабильных положительных ионов типа $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_n$, $\text{NO}^+(\text{H}_2\text{O})_n$. При использовании в качестве газа-носителя вместо азота очищенного воздуха состав

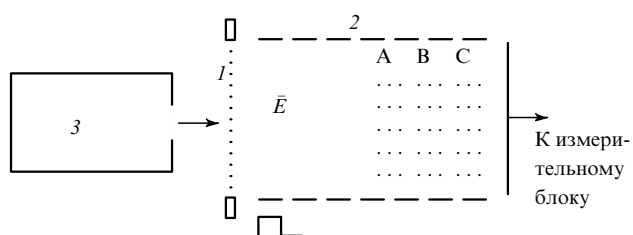


Рис. 3. Схема tandemной установки масс-спектрометр – дрейфовый спектрометр.

1, 2, A, B, C — то же, что на рис. 1; 3 — масс-анализатор.

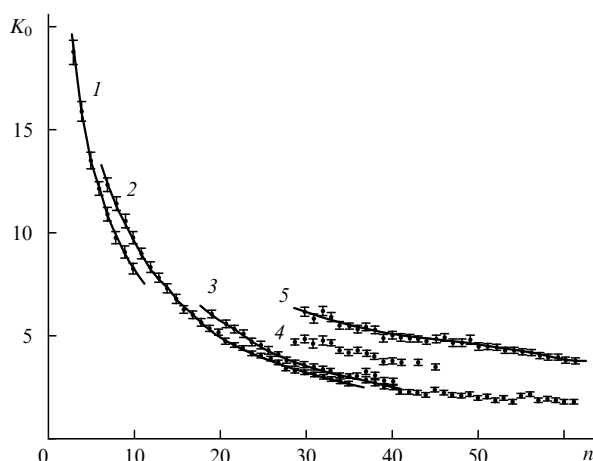


Рис. 4. Зависимости коэффициентов приведенной подвижности K_0 ионов C_n^+ от n для различных кластеров.

1 — линейные кластеры; 2 — моноциклические кластеры; 3 — плоские полициклические кластеры; 4 — открытые фуллерены; 5 — фуллерены.

положительных ионов почти не меняется, а отрицательные ионы имеют вид $O_2^-(H_2O)_n$.

Добавление органических веществ в следовых количествах в газ-носитель приводит к реакциям ионов газа-носителя с молекулами примеси; образующиеся продукты включают молекулу примеси. Вторая трубка, снабженная сеткой для инжектирования ионов, служит ионно-дрейфовым спектрометром для получения спектра ионов по их подвижностям в электрическом поле. Спектр получается при использовании слабого электрического поля, которое направляет образованные в реакторе ионы к дрейфовой трубке спектрометра. Пакет ионов-кластеров движется в инертной атмосфере чистого азота, направления потоков ионов и азота противоположны (чтобы уменьшить проникновение газа-носителя, содержащего примесь, в область анализатора). При движении ионов через дрейфовую трубку происходит их разделение на пакеты с разной подвижностью. Обычно более тяжелые ионы имеют меньшую подвижность. Импульсы ионов различных масс регистрируются с помощью электрометрического усилителя. Развертка одного спектра в диапазоне масс до 400 а.е.м. происходит за 20 мс. Обычно проводится суммирование и усреднение нескольких сотен таких спектров для повышения точности эксперимента. Для этого применяется синхронный детектор, который интегрирует сигнал в течение короткого временного интервала, медленно перемещающегося вдоль временной оси относительно инжектирующего импульса.

В последнее время в спектрометрии подвижности ионов используется преобразование Фурье.³⁷ Интерферограмма подвижности получается при одновременной передаче импульсов на модулирующие сетки на входе и выходе спектрометра подвижности. Импульсы подаются от генератора прямоугольных импульсов с разверткой по частоте. Применяя преобразование Фурье к интерферограмме, получают обычный спектр подвижности ионов. В работе³⁷ изложена теория метода и приведены примеры получения спектров подвижности (рис. 5). Этот метод может увеличить скорость регистрации спектра подвижности и чувствительность, что особенно важно в случае использования спектрометра подвижности в качестве детекторов для хроматографов.

Детектируемые количества примесей в 100 см^3 воздуха для плазменных хроматографов составляют 10^{-9} – 10^{-8} г. Использование больших масс образца (10^{-6} г и выше) приводит к насыщению отклика, полному расходу ионов

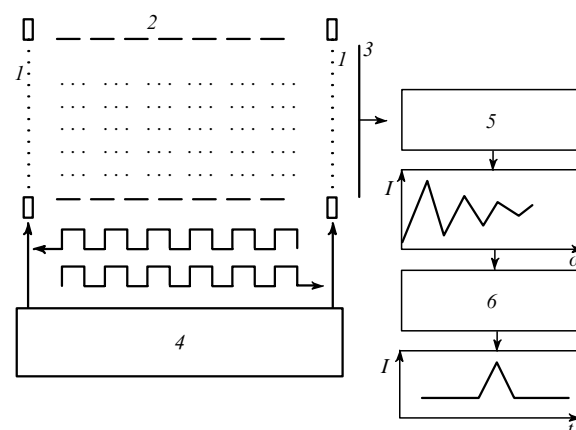


Рис. 5. Схема спектрометра подвижности с преобразованием Фурье.

1, 2 — то же, что на рис. 1; 3 — коллектор ионов; 4 — генератор прямоугольных импульсов с варьируемой частотой ω ; 5 — электрометрический усилитель, аналогово-цифровой преобразователь, запоминающее устройство, обеспечивающие получение интерферограммы подвижности ионов; 6 — Фурье-преобразователь, обеспечивающий получение спектра подвижности ионов.

ионов реагентов и образованию димерных ионов примеси. При этом интерпретация спектров подвижности становится затруднительной. Спектры подвижности ионов также сильно искажаются при использовании дрейфового газа, содержащего примеси веществ, которые могут вступать в ионно-молекулярные реакции с исследуемыми ионами. Возникает отличие от величин подвижности, предсказываемых классической теорией, когда в системе происходят быстрые обратимые ионно-молекулярные реакции за времена, меньшие времени дрейфа. Типичными примерами таких реакций являются сольватация и десольватация ионов молекулами воды, присутствующими в качестве примеси в дрейфовом газе.

Возможно и полезное использование процессов кластеризации ионов, например, для увеличения разрешающей способности плазменных хроматографов.³⁸ Если ионы близки по размерам и массам, но различаются скоростью образования кластеров, то добавление к газу-носителю кластерообразующего газа приводит к значительному различию масс анализируемых ионов, а следовательно, и их подвижностей. Кинетические характеристики ионно-молекулярных процессов в плазменной хроматографии и в масс-спектропии высокого давления аналогичны.^{39–42}

Справочные данные по кинетическим параметрам ионно-молекулярных процессов имеются в работах^{43,44}. Константы скоростей экзотермических бимолекулярных ионно-молекулярных процессов при малых энергиях ионов определяются дальнедействующими силами заряд–наведенный диполь и заряд–постоянный диполь. Величины этих констант обычно имеют порядок $10^{-9}\text{ см}^3\cdot\text{с}^{-1}$, и лишь в нескольких случаях найдены более низкие значения.⁴⁵

Константы скоростей тримолекулярных реакций ионно-молекулярной ассоциации определяются константами скоростей соответствующих бимолекулярных процессов и временами жизни образующихся ионно-молекулярных «столкновительных» комплексов.

Значения констант скоростей тримолекулярных ионно-молекулярных процессов ассоциации составляют 10^{-32} – $10^{-21}\text{ см}^6\cdot\text{с}^{-1}$ (см.^{43,46}).

Рассмотрим типичные условия работы плазменных хроматографов. С помощью источника радиоактивного излучения с активностью ~ 10 мКюри при атмосферном давлении можно получить $\sim 10^{11}$ ионов в секунду. При атмосферном давлении скорость потока газа-носителя $100\text{ мл}\cdot\text{мин}^{-1}$;

напряженность электрического поля $250 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$; инжектирующий ионы импульс имеет длительность 0.2 мс ; регистрирующий сканирующий импульс имеет такую же длительность. Спектры обычно получаются при температурах дрейфовой трубки $100\text{--}150^\circ\text{C}$, размер области дрейфа 8 см . Например, для иона Cl^- коэффициент подвижности при 150°C составляет $4.7 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Это дает значение времени дрейфа 8 мс . Авторы работы⁴⁷ детально изучили разрешающую способность плазменного хроматографа. Получена формула для определения разрешающей способности в идеальном случае (когда последняя лимитирована диффузией)

$$R = 2(EL)^{0.5},$$

где E — напряженность электрического поля в $\text{В} \cdot \text{см}^{-1}$, L — длина дрейфовой трубки в см .

В работе⁴⁷ исследовано влияние на величину разрешающей способности начальной ширины ионного пакета и объемного заряда ионов. Например, если учесть конечность длительности пакета ионов, то формула для разрешающей способности примет следующий вид:

$$R = \frac{L/v + t/2}{(48.4DL/v^3 + t^2)^{0.5}}.$$

Здесь t — длительность ионного пакета, v — скорость дрейфа ионов, D — коэффициент диффузии.

При малых напряженностях электрического поля

$$E < 4\pi eLn,$$

где n — концентрация ионов, может наблюдаться отрицательное влияние пространственного заряда ионов на разрешающую способность. Например, если $E = 2 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$, $L = 10 \text{ см}$, то заметное искажение E , обусловленное пространственным зарядом, будет при $n = 10^5 \text{ см}^{-3}$.

Для увеличения разрешающей способности широко используют математические методы реконструкции плохо разрешенных пиков. Таким способом удалось разрешить, например, спектры изотопов хлора и брома.⁴⁸ Для регистрации и обработки спектров различных типов широко используется ЭВМ.⁴⁹

Одним из основных элементов конструкции плазменных хроматографов является сеточный ионный затвор. Затворы бывают разных типов. Затвор Тиндаля состоит из двух близко расположенных проволоочных сеток, укрепленных перпендикулярно оси дрейфовой трубки. К сеткам приложено напряжение, т.е. между ними существует разность потенциалов. За счет этого ионы большую часть времени не пропускаются через сетку. Однако разность потенциалов, периодически меняет знак, что позволяет ионам пройти через сетку и войти в пространство дрейфа.

В работе⁵⁰ предложено модифицировать затвор Тиндаля за счет использования микроканальных пластин. Такие пластины начинают широко применяться в различных областях экспериментальной техники.⁵¹ Конструкция модифицированного затвора удобна при сборке, обеспечивает параллельность торцевых поверхностей, устойчива механически, не подвержена короткому замыканию при засорении проводящими частицами. Каналы в таких затворах имеют диаметры $40\text{--}80 \text{ мкм}$ и перпендикулярны поверхностям пластин (для обеспечения эффективного пропускания ионов).

Затвор Бредбери–Нильсона состоит из одной сетки, сделанной из проволочек, расположенных на небольших расстояниях друг от друга. Между чередующимися проволочками сетки прикладывается синусоидальное напряжение, причем среднее значение потенциала на каждой из проволочек равно потенциалу однородного дрейфового поля в плоскости сетки. Ионы, которые достигают сетки в момент, когда мгновенное значение переменного потенциала близко к нулю, проходят через затвор. Предложена модификация и

этого затвора, в которой вместо проволочек используются полоски фольги.⁵²

Выше рассмотрены спектрометры подвижности ионов, в которых векторы электрического поля и скорости потока газа были направлены в одну сторону. Предложены сепараторы ионов с направлением потока газа перпендикулярно электрическому полю, в которых осуществляется дрейф ионов (рис. 6).⁵³ Такая геометрия приводит к увеличению разрешающей способности. При этом, однако, требуется значительно более высокая стабильность скорости газового потока по сравнению с обычной геометрией.

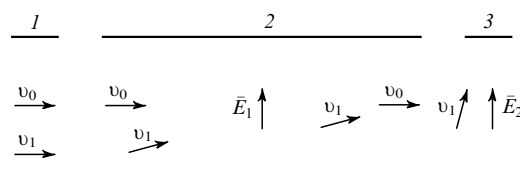


Рис. 6. Схема спектрометра подвижности ионов с перпендикулярным расположением векторов электрического поля и скорости газового потока.

1 — ионный источник; 2 — селектор ионов; 3 — регистратор ионов; v_0 — скорость газового потока; v_1 — скорость движения ионов; E_1, E_2 — напряженности электрических полей.

Другим вероятным достоинством этой схемы является получение спектра ионов без использования импульсной техники — путем регистрации постоянных ионных токов в различных точках плоскости коллектора. Ионы сносятя потоком газа с постоянной скоростью и дрейфуют в электрическом поле перпендикулярно скорости потока со скоростями, зависящими от массы иона. Тяжелые ионы достигают плоскости коллектора на большом расстоянии от входа, а легкие — на малом, так как скорость дрейфа легких ионов обычно больше скорости дрейфа тяжелых.

В работах^{54–56} предложен способ модификации метода разделения ионов при взаимно перпендикулярном расположении векторов скорости потока газа и напряженности электрического поля. Способ основан на воздействии на ионы постоянного и переменного электрических полей. При таком воздействии значительно увеличивается эффективность разделения, которая определяется не только различием подвижностей, но и различием первых производных подвижностей по электрическому полю. Спектрометры, в которых используется данный способ модификации метода разделения ионов, были изготовлены фирмой «Экотек» (Новосибирск). В работе⁵⁷ проведена оценка разрешающей способности спектрометра этого типа.

IV. Заключение

Исследования подвижностей ионов в газах, начатые в конце прошлого века Томсоном, Резерфордом, Таунсендом, Ланжевенном, до сих пор представляют интерес как для фундаментальной науки, так и для аналитической техники. В области фундаментальной науки такие исследования дают возможность получить данные о составе, строении и реакционной способности ионов, что позволяет глубже понять общие проблемы строения молекул и химической реакционной способности. Данные по газофазным ионам представляют также интерес для химии высоких энергий, включая радиационную химию и химию низкотемпературной плазмы. Например, скорость рекомбинации положительных и отрицательных ионов в плазме непосредственно определяется величинами подвижностей этих ионов.⁵⁸

В последнее время в совершенствовании методики экспериментов по исследованию подвижностей ионов наблюда-

ется определенный прогресс. Эксперименты, проведенные при низких температурах,^{59–61} показали, что при $T < 10$ К подвижность ионов в гелии резко уменьшается и становится ниже поляризационного предела, что может быть следствием проявления квантовых эффектов. Требуются дальнейшие теоретические и экспериментальные работы для выяснения природы наблюдаемых низкотемпературных эффектов. Они могут дать информацию о механизмах низкотемпературных химических процессов.

В исследованиях подвижностей ионов все больше начинает применяться лазерная техника и не только для получения ионов, но также для измерения распределения по скоростям дрейфующих ионов.⁶² Системы, в которых используется комбинация дрейфовой трубки – лазер может конкурировать с системами дрейфовой трубки – масс-спектрометр. Вероятно, следует ожидать расширения работ в этом перспективном направлении. Спектрометры подвижности все больше используются в аналитических целях. Кроме указанных выше работ по применению для исследования изомеров кластеров углерода, есть работы по исследованию изомеров кластеров металлоуглерода.^{63–65}

Показано, что атом металла может как включаться в углеродную сеть, так и размещаться в полости фуллерена. Возможно и дальнейшее усложнение объектов исследований. На протяжении многих лет ведутся работы по применению плазменной хроматографии для идентификации следовых количеств паров наркотиков и взрывчатых веществ. В последней работе по детектированию паров взрывчатых веществ методом плазменной хроматографии для создания ионов используется лазерная многофотонная ионизация.⁶⁶ Исследования дрейфа ионов в газах в электрическом поле продолжают интенсивно развиваться.^{67–70}

Литература

- G. Von Helden, P.R. Kemper, M.T. Hsu, M.T. Bowers. *J. Chem. Phys.*, **96**, 6591 (1992)
- M.T. Bowers, P.R. Kemper, G. Von Helden, P.A.M. van Koppen. *Science*, **260**, 1446 (1993)
- G.A. Eiceman, Z. Karpas. *Ion Mobility Spectrometry*. CRC Press, Boca Raton, FL, 1994
- T.W. Carr. *Plasma Chromatography*. Plenum, New York, 1984
- R.H. St. Louis, H.N. Hill, Jr. *Crit. Rev. Anal. Chem.*, **21**, 321 (1990)
- В.Е. Скурят. *Получение и исследование ионов нелетучих соединений в газовой фазе. (Сер. Итоги науки и техники. Радиационная химия)*. Изд-во ВИНТИ, Москва, 1988
- Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Methods and Mechanisms for Producing Ions from Large Molecule*. Plenum, Minaki, Canada, 1990
- C. Shumate. *Trends Anal. Chem.*, **13**, 104 (1994)
- G. Von Helden, T. Wyttenbach, M.T. Bowers. *Science*, **267**, 1483 (1995)
- И. Мак-Даниель, Э. Мэзон. *Подвижность и диффузия ионов в газах*. Мир, Москва, 1976
- E.A. Mason, E.W. McDaniel. *Transport Properties of Ions in Gases*. Wiley, New York, 1984
- Swarms of Ions and Elektrons in Gases*. (Eds W. Lindinger, T.D. Mark, F. Howorka). Springer-Verlag, Wien, 1984
- H.W. Ellis, R.Y. Pai, E.W. McDaniel, E.A. Mason, L.A. Viehland. *At. Data Nucl. Data Tables*, **17**, 177 (1976)
- H.W. Ellis, E.W. McDaniel, D.L. Albritton, L.A. Viehland, S.L. Lin, E.A. Mason. *At. Data Nucl. Data Tables*, **22**, 179 (1978)
- H.W. Ellis, E.W. McDaniel, M.G. Thackston, E.A. Mason. *At. Data Nucl. Data Tables*, **31**, 113 (1984)
- L.A. Viehland, E.A. Mason. *At. Data Nucl. Data Tables*, **41**, 37 (1995)
- F. Celli, G. Waddle, D.P. Ridge. *J. Chem. Phys.*, **73**, 801 (1980)
- Nonequilibrium Effects in Ion and Electron Transport*. (Eds J.W. Gallagher, D.F. Hadson, E.E. Kunhard, R.J. van Brunt). Plenum Press, New York, 1990
- J. Lin, T. Su. *J. Chem. Phys.*, **95**, 6471 (1991)
- Status and Future Developments in the Study of Transport Properties*. NATO ASI Ser. C. V.361. (Eds W.A. Wakham, A.S. Dickinson, F.R.W. McCourt, V. Versovic). Kluwer, Dordrecht, 1992
- Z. Berant, Z. Karpas. *J. Am. Chem. Soc.*, **111**, 3819 (1989)
- K. Giles, E.P. Crimrud. *J. Phys. Chem.*, **96**, 6680 (1992)
- E.A. Mason. *Science*, **260**, 43 (1993)
- N. Ikuta, E. Nishi, S. Nakajima. *J. Phys. Soc. Jpn.*, **61**, 4425 (1992)
- F. Howorka, F.C. Fehsenfeld, D.L. Albritton. *J. Phys. B, At. Mol. Phys.*, **12**, 4189 (1992)
- D. Smith, N.D. Adams. *In Gas Phase Ion Chemistry. V.1*. (Ed. M.T. Bowers). Academic Press, New York, 1979. P.2
- С.Л. Пожаров *Журн. тех. физики*, 2156 (1982)
- Z. Berant, O. Shahal, Z. Karpas. *J. Phys. Chem.*, **95**, 7534 (1991)
- Пат. 36211240 США (1971)
- S.H. Kim, K.R. Betty, F.W. Karasek. *Anal. Chem.*, **50**, 1784 (1978)
- G. Von Helden, M.T. Hsu, P.R. Kemper, M.T. Bowers. *J. Chem. Phys.*, **95**, 3835 (1991)
- L.D. Book, C. Xu, G.E. Scuseria. *Chem. Phys. Lett.*, **222**, 281 (1994)
- Z. Karpas, Z. Berant, R.M. Stimac. *Struct. Chem.*, **1**, 201 (1990)
- D.F. Hagen. *Science*, **260**, 115 (1993)
- H.N. Hill, Jr, M.A. Baim. *Science*, **260**, 143 (1993)
- G.E. Spangler, M.J. Cohen. *Science*, **260**, 1 (1993)
- F.J. Knorr, R.L. Eaterton, W.F. Siems, H.N. Hill, Jr. *Anal. Chem.*, **57**, 402 (1985)
- А.с. 1627984 СССР; *Бюл. изобрет.*, (6) 139 (1991)
- A.F. Harrison. *Chemical Ionization Mass Spectrometry*. CRC Press, Boca Raton, FL 1983
- А.А. Полякова, И.А. Ревельский, М.И. Токарев, Л.О. Коган, В.Л. Тальрозе. *Масс-спектральный анализ смесей с применением ионно-молекулярных реакций*. (Под ред. А.А. Поляковой). Химия, Москва, 1989
- М. Сигель, В. Файт. В кн. *Кинетическая масс-спектрометрия и ее аналитические применения*. Ин-т хим. физики, Москва, 1979. С.132.
- M.W. Siegel. *Science*, **260**, 95 (1993)
- Л.И. Вирин, Р.В. Джагацпаян, Г.В. Карачевцев, В.К. Потапов, В.Л. Тальрозе. *Ионно-молекулярные реакции в газах*. Наука, Москва, 1979
- J. Ikezo, S. Takebe, A. Viggiano. *Gas Phase Ion-Molecule Reactions Rate Constants Through 1986*. Ion Reaction Research Group of the Mass Spectroscopy Society of Japan, Tokyo, 1987
- Г.В. Карачевцев, А.З. Маруткин, В.В. Савкин. *Успехи химии*, **51**, 1849 (1982)
- В.М. Смирнов. *Ионы и возбужденные атомы в плазме*. Атомиздат, Москва, 1974
- P. Watts, A. Wilders. *Int. J. Mass Spectrom. Ion Process.*, **112**, 179 (1992)
- F.W. Karasek, R.J. Laub, E. de Decker. *J. Chromatogr.*, **93**, 123 (1974)
- В.В. Резников, М.О. Резникова. *Информационно-аналитическая масс-спектрометрия*. Наука, Москва, 1992
- А.с. 1737770 СССР; *Бюл. изобрет.*, (20), 239 (1992)
- Б.Н. Брагин, М.М. Бутелов, А.Н. Иванова, В.С. Малышева. *Приборы и техника эксперимента*, **1**, 192 (1975)
- K. Iinuma, M. Takebe. *Aust. J. Phys.*, **48**, 491 (1995)
- Пат. 3668388 США (1972)
- А.с. 966583 СССР; *Бюл. изобрет.*, (38), 208 (1982)
- А.с. 1337934 СССР; *Бюл. изобрет.*, (34), 210 (1987)
- А.С. Авакумов, И.А. Буряков, Е.В. Крылов. В кн. *Физика низкотемпературной плазмы. Материалы 7-й Всесоюз. конференции*. Фан, Ташкент, 1987. Ч.1. С. 21
- Г.В. Карачевцев, А.А. Ченцов. *Тр. МФТИ. Сер. физ. и квантовой электроники*. Москва, 1996 (в печати)
- Н.Л. Александров, Д.А. Новицкий. *Письма в ЖТФ*, **19** (13), 9 (1993)
- J. Sanderson, H. Tanuma, N. Kobayashi, Y. Kaneko. *J. Phys. B, At. Mol. Opt. Phys.*, **26**, L465 (1993)
- J. Sanderson, H. Tanuma, N. Kobayashi, Y. Kaneko. *J. Phys. B, At. Mol. Opt. Phys.*, **27**, L433 (1994)
- N. Saito, T.M. Kojima, N. Kobayashi, Y. Kaneko. *J. Chem. Phys.*, **100**, 5726 (1994)
- V.M. Bierbaum. *SASP-94. Symposium on Atomic, Cluster and Surface Physics. Contributions*. (Eds T.D. Mark, R. Schaittwieser, D. Smith). Hintermoos Maria Alm, Austria, 1994. P.29

63. G.von Helden, N.G. Gotts, P.Maitre, M.T.Bowers. *Chem. Phys. Lett.* **227**, 601(1994)
64. K.B.Shelimov, M.F.Jarrold. *J. Am. Chem. Soc.*, **117**, 6404 (1995)
65. K.B.Shelimov, D.E.Clemmer, M.F.Jarrold. *J. Rhys. Chem.*, **99**, 11376 (1995)
66. A.Clark, R.M.Deas, C.Kosmidis, K.W.D.Ledingham, A.Marshall, R.P.Singhal. In *Proceedings of the 6-th International Symposium on Advance Nucleas Energy Research «Innovative Laser Technology in Nuclear Energy». V.2, 1994*. P.521
67. *Fundamentals of Gas Phase Ion Chemistry. NATO ASI Ser.* (Ed. K.R. Jennings). Kluwer, New York, 1991
68. *Proccedings of the 1992 Workshop on Ion Mobility Spectrometry.* Mescalere, NM, 1992
69. *Proceedings of the 8-th International Seminar on Electron and Ion Swarms.* Trendheim, Norway, 1993
70. G.E.Srangler. *Anal. Chem.*, **65**, 3010 (1993)

METHODS OF ION MOBILITY MEASURING AND THEIR APPLICATIONS

G.V.Karachevtsev

Moscow Institute of Physics and Technology

9, Institutskii per., 141700 Dolgoprudnyi, Moscow Region, Russian Federation, Fax +7(095)408-6869

The results of investigations of ion mobility in gases which provide the information on the potentials of ion – molecule interactions are generalised. The principles of operation and characteristics of ion mobility spectrometers are described. Examples of using plasma chromatography for ion investigations are given. Bibliography — 70 references.

Received 13th May 1996