

УДК 621.384.8: 537.525

© Л. Н. Галль, А. Г. Кузьмин

## МАСС-СПЕКТРОМЕТР С ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ МСД-650ТЛР — НОВОЕ РАЗВИТИЕ МАСС-СПЕКТРОМЕТРОВ МСД-650

Для базовой модели масс-спектрометра с двойной фокусировкой МСД-650 разработан и изготовлен источник ионов с тлеющим разрядом, позволяющий проводить на этом приборе элементный анализ твердых образцов. Рассмотрены возможности усовершенствования базовой модели масс-спектрометра МСД-650 с целью оптимизации параметров нового элементного масс-спектрометра. Представлены результаты предварительных испытаний опытного образца масс-спектрометра с тлеющим разрядом МСД-650ТЛР и приведены масс-спектры элементного анализа твердых проб.

### ВВЕДЕНИЕ

Масс-спектрометр МСД-650 был разработан в ИАиП РАН как масс-спектрометрический детектор газового хроматометра высокого разрешения и с 1994 года серийно выпускается Экспериментальным заводом научного приборостроения РАН (ЭЗНП РАН). В комплексе с газовым хроматографом КРИСТАЛЛ-2000 масс-спектрометр МСД-650, снабженный источником ионов с ионизацией электронным ударом и химионизацией, позволил реализовать весь комплекс современных методик хромато-масс-спектрометрии летучих веществ. В 1996 году программа "Научное приборостроение" РАН приняла решение начать работы по расширению аналитических возможностей масс-спектрометра МСД-650 в направлении его использования для аналитического элементного анализа твердых образцов и финансировала разработку для этого прибора источника ионов с тлеющим разрядом.

Масс-спектрометрия тлеющего разряда (МСТЛР) применяется для прямого элементного анализа образцов в твердом состоянии без предварительной пробоподготовки. Физические процессы, происходящие в плазме тлеющего разряда, такие как катодное распыление и столкновительная передача энергии, приводят к атомизации, возбуждению и ионизации материала образца. Масс-спектрометрический анализ ионов, образующихся в плазме тлеющего разряда, позволяет определять количественный состав элементов, содержащихся в исследуемом образце.

По сравнению с другими масс-спектрометрическими методами прямого элементного анализа твердых образцов метод МСТЛР имеет большие преимущества [1]. Тлеющий разряд (ТЛР) обеспечивает гораздо более интенсивный и стабильный ток ионов материала образца, чем, например, искровой разряд — основной метод

ионизации искровой масс-спектрометрии (ИМС). Это позволяет в МСТЛР успешно применять электрическую регистрацию масс-спектра, тогда как в ИМС необходимо использовать пространственно-протяженный детектор (например, фотопластинку). Кроме того, ширина энергетического распределения ионов, экстрагируемых из плазмы тлеющего разряда, значительно (на порядок) меньше, чем при искровом разряде, что позволяет снизить ускоряющее напряжение и в некоторых случаях использовать более простой и дешевый масс-анализатор. Процессы атомизации и ионизации в плазме тлеющего разряда практически независимы друг от друга, поэтому матричный эффект (зависимость выхода ионов примесей от материала образца) очень незначителен. В результате коэффициенты относительной чувствительности (КОЧ) разных элементов в МСТЛР варьируются мало, тогда как для масс-спектрометрии вторичных ионов (ВИМС), также широко используемой для элементного анализа, вариации КОЧ составляют десятки раз именно из-за того, что атомизация и ионизация образца тесно связаны. В другом распространенном методе элементного анализа — масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП МС) — снижение матричного эффекта достигается за счет растворения пробы, но при этом, помимо усложнения процедуры пробоподготовки, возникает ряд проблем, связанных с химизмом процесса растворения, наличием в растворителе паспортизованных и не паспортизованных примесей и присутствием ионов материала растворителя в масс-спектрах. Как и в ИСП МС, тлеющий разряд горит в атмосфере аргона, однако давление аргона, а следовательно, и его расход при тлеющем разряде на три порядка меньше, чем в ИСП МС.

Однако, кроме явных достоинств, метод МСТЛР имеет и существенные недостатки. К ним относится, во-первых, необходимость использова-

ния дорогих стандартных образцов для обеспечения требуемой точности элементного анализа и, во-вторых, образование комплексных ионов материала матрицы с аргоном и молекулами остаточного газа, происходящее при ион-молекулярных реакциях в плазме разряда. Однако вклад этих ионов в масс-спектр невелик и он значительно меньше, чем при ионизации в ИСП МС. При использовании масс-анализаторов с достаточной разрешающей способностью и специальных программ обработки информации эти комплексные ионы не мешают проведению элементного анализа.

### ОСНОВЫ ТЕОРИИ МЕТОДА МСТЛР

Тлеющий разряд возникает при прохождении электрического тока между двумя электродами в газовой среде при низких давлениях ( $\approx 1$  мм рт. ст.). Типичные значения тока тлеющего разряда при давлениях 0.1–10 мм рт. ст. и напряжении между катодом и анодом  $V_s \approx 500$ –1500 В составляют 0.1–10 мА.

Существуют два вида тлеющего разряда: нормальный и аномальный. Нормальный тлеющий разряд характеризуется постепенным повышением интенсивности ионного тока при неизменном приложенном напряжении. В этом случае рост тока происходит за счет увеличения площади катода, покрываемой разрядом, тогда как плотность тока остается неизменной. Когда же разрядом покрывается вся поверхность катода, дальнейший рост интенсивности тока становится возможным только при увеличении приложенного напряжения за счет роста плотности тока. Этот режим называется аномальным. Он сопровождается более интенсивным распылением материала катода и является рабочим для разнообразных применений тлеющего разряда в аналитических устройствах. Вследствие его большей, чем у нормального, стабильности и более высоких аналитических возможностей, таких как чувствительность и воспроизводимость, этот режим реализуется практически во всех аналитических приборах на основе тлеющего разряда.

Наиболее важными процессами, происходящими в тлеющем разряде и обуславливающими его аналитические применения, являются: катодное распыление образца (атомизация), возбуждение атомов и их ионизация. Атомизация и процессы возбуждения—ионизации происходят в разных областях тлеющего разряда. В стационарном тлеющем разряде положительные ионы в разрядной плазме ускоряются в направлении катода (образца), при этом они частично рекомбинируют с оже-электронами, выбиваемыми с его поверхности. Ионы и образовавшиеся при рекомбинации высокоэнергетические нейтральные атомы бом-

бардируют катод, передавая его поверхности свою энергию и проникая в глубь образца на десятки ангстрем в зависимости от энергии и угла падения. Атомы образца, получившие энергию, большую энергии связи, покидают поверхность. В МСТЛР глубина, на которой передаваемая энергия превышает энергию связи, составляет 3–5 ангстрем [2]. Кроме нейтральных атомов, из поверхности катода выбиваются также вторичные электроны и положительные ионы. Положительные ионы возвращаются на катод, а вторичные электроны ускоряются к аноду и, попадая в зону отрицательного свечения тлеющего разряда, участвуют в процессах возбуждения и ионизации.

Процесс катодного распыления является определяющим с точки зрения аналитического применения тлеющего разряда, поскольку при этом создается представительная популяция атомов в газовой фазе непосредственно из твердого тела с концентрациями, пропорциональными составу образца. Последнее особенно важно при анализе многокомпонентных систем (образцов), содержащих различные примеси. В плазме тлеющего разряда первоначальный состав распыленных атомов имеет повышенное содержание тех элементов, эффективность распыления которых выше. Однако при этом поверхностная концентрация элементов с низкой эффективностью распыления возрастает, и их вклад в распыленное облако увеличивается. Таким образом, через некоторое время в тлеющем разряде процесс распыления приходит к равновесию, и элементный состав распыленного облака достаточно хорошо отражает состав поверхности твердого образца [3]. Распыленные атомы затем возбуждаются и ионизируются в процессе столкновений с электронами в отрицательном столбе разрядной плазмы.

В отрицательном столбе тлеющего разряда происходят три основных столкновительных процесса: столкновения с разрядными электронами, столкновения с возбужденными атомами и столкновения с разрядными ионами. Эти столкновения приводят к возбуждению, ионизации и рекомбинации распыленных частиц образца в разрядной плазме.

Разрядные электроны в отрицательном столбе тлеющего разряда различаются по своему происхождению и энергии и могут быть разделены на три класса [4]. Первые — быстрые электроны ( $E > 25$  эВ), рожденные на катоде и ускорившиеся при прохождении темного катодного пространства. Они вызывают ионизацию атомов в соответствии с уравнением  $A + e^- \rightarrow A^+ + 2e^-$ , поскольку их энергия превышает потенциалы ионизации любых элементов образца. Вторые — электроны, возникшие при ионизационных столкновениях в отрицательном столбе. Их энергия не превышает 7 эВ. Столкновения с этими электронами, энергия кото-

рых ниже потенциала ионизации, но выше потенциалов возбуждения атомов, приводят к возбуждению атомов, причем те возбужденные атомы, которые имеют достаточно большие времена жизни, при дальнейших столкновениях могут ионизоваться. Третьи — это электроны, отражающие электронную температуру плазмы тлеющего разряда. Столкновения с ними приводят к рекомбинации ионов разрядной плазмы.

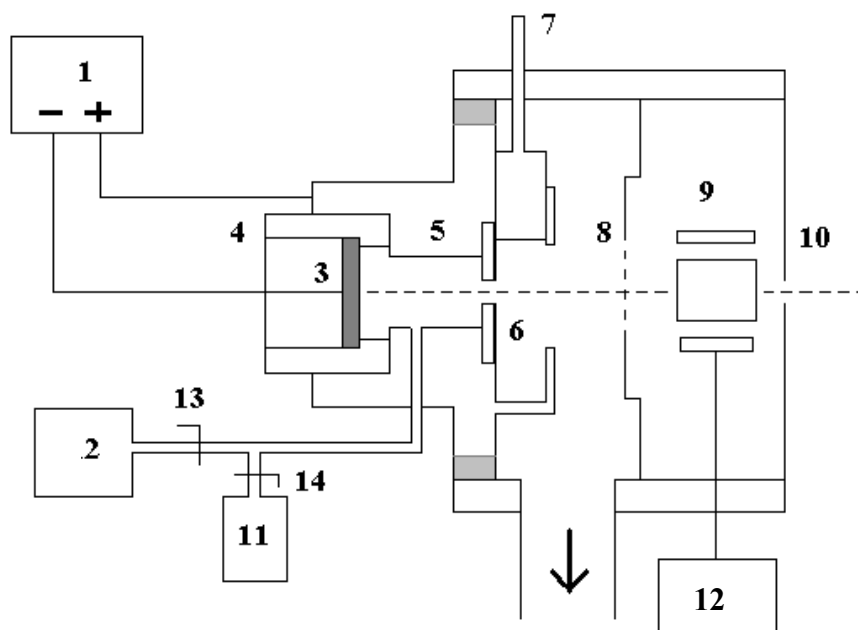
Столкновения с долгоживущими возбужденными атомами могут приводить к возбуждению или ионизации участников столкновения, при этом происходит передача в основном потенциальной энергии. Возможны два основных процесса такого рода, включающие метастабильные возбужденные атомы аргона ( $Ar^m$ ). Это ионизация Пеннинга  $Ar^m + A \rightarrow Ar + A^+ + e^-$  и ионизация с образованием ассоциатов  $Ar^m + A \rightarrow ArA^+ + e^-$ . Ионизация Пеннинга, которая считается основным механизмом ионизации для распыленных частиц в тлеющем разряде, происходит, когда энергия метастабильного атома превышает потенциал ионизации [5]. Аргон считается оптимальной газовой средой в масс-спектрометрии тлеющего разряда, т.к. его метастабильные состояния имеют потенциалы 11.5 эВ и 11.7 эВ. Это выше первых и ниже вторых потенциалов ионизации большинства элементов

твердых образцов и, кроме того, ниже первых потенциалов ионизации основных атмосферных газов. Таким образом, тлеющий разряд в аргоне формирует разрядную плазму, которая соответствует элементному составу материала поверхности катода и практически не содержит ионов атмосферных газов, что дает возможность получать представительные масс-спектры, не содержащие посторонних линий.

Столкновения с ионизованными частицами происходят преимущественно по схеме  $B^+ + A \rightarrow B + A^+$ . Этот канал образования ионов однако имеет несущественное значение, и его роль может возрастать только в некоторых специальных конфигурациях тлеющего разряда (таких как, например, тлеющий разряд с так называемым "полым" катодом [1]).

### ИСТОЧНИК ИОНОВ С ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ

Схема источника ионов с тлеющим разрядом представлена на рис. 1. На корпус ячейки 5 (анод) с образцом 4 (катод) подается ускоряющее напряжение масс-спектрометра до 5 кВ.



**Рис. 1.** Схема источника ионов с тлеющим разрядом для масс-спектрометра МСД-ТлР. 1 — блок питания тлеющего разряда, 2 — форвакуумный насос НВР-5, 3 — плоский образец, 4 — изолятор из фторопласта, 5 — корпус ячейки, 6 — выходное отверстие ячейки, 7 — вакуумный затвор, 8 — заземленная сетка, 9 — квадруполярная отклоняющая система для коррекции пучка ионов в направлении входной щели, 10 — входная щель масс-анализатора, 11 — баллон с аргоном для камеры источника ионов, 12 — блок питания отклоняющей системы, 13, 14 — вентили

Блок питания источника ионов с тлеющим разрядом обеспечивает поджиг тлеющего разряда на промежутке катод—анод в разрядной ячейке, регулирование напряжения разряда и стабилизацию тока разряда, регулирование энергии ионов в области разряда за счет подстройки потенциала анода источника ионов относительно ускоряющего напряжения масс-спектрометра. Кроме того, блок вырабатывает напряжение питания для электродов квадрупольной отклоняющей системы, корректирующей положение ионного пучка в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Основные параметры блока следующие: напряжение поджига — до 2500 В, пределы регулирования напряжения разряда — 500–1500 В, пределы регулирования тока разряда — 1–20 мА, максимально допустимый ток промежуточного электрода — 10 мА, пределы регулирования потенциала анода относительно ускоряющего потенциала —  $\pm 100$  В, пределы регулирования напряжений на электродах квадрупольной отклоняющей системы —  $\pm 200$  В.

В качестве образцов брались плоские диски из меди Моб диаметром 10 мм. Диаметр выходного отверстия в разрядной ячейке составлял 0,3 мм. Для поддержания тлеющего разряда использовался особо чистый аргон (99,99 %). Давление в разрядной ячейке в зависимости от скорости напуска аргона составляло 0,5–5 Тор, при этом давление в камере источника составляло  $0,5\text{--}1 \times 10^{-4}$  Тор. В серийном масс-спектрометре МСД-650 для обеспечения работы с источником с тлеющим разрядом была изменена настройка блокировки в блоке контроля вакуума, предел которой был снижен на порядок.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные масс-спектры от образцов меди представлены на рис. 2–4. По вертикальным осям на них отложены интенсивности спектральных линий в относительных единицах, а по горизонтальным осям — массовые числа в атомных единицах массы (а.е.м.). На фрагментах развернутого масс-спектра (рис.2) отчетливо видны линии изотопов меди  $\text{Cu}^{63}$  и  $\text{Cu}^{65}$ , а также аргона  $\text{Ar}^{40}$ . Линейные масс-спектры на рис. 3 и 4 получены при максимальном пропускании масс-спектрометра ( $R \approx 1000$ ). Наиболее интенсивный пик в масс-спектре дают ионы аргона  $\text{Ar}^{40}$ , причем их интенсивность в 50 раз превышает интенсивность пиков ионов материала матрицы. Аналогичная картина наблюдается в масс-спектрах всех элементных масс-спектрометров с тлеющим разрядом, таких как GLOWQUAD и VG-9000. Как видно из полученных масс-спектров (рис. 4), линии изотопов

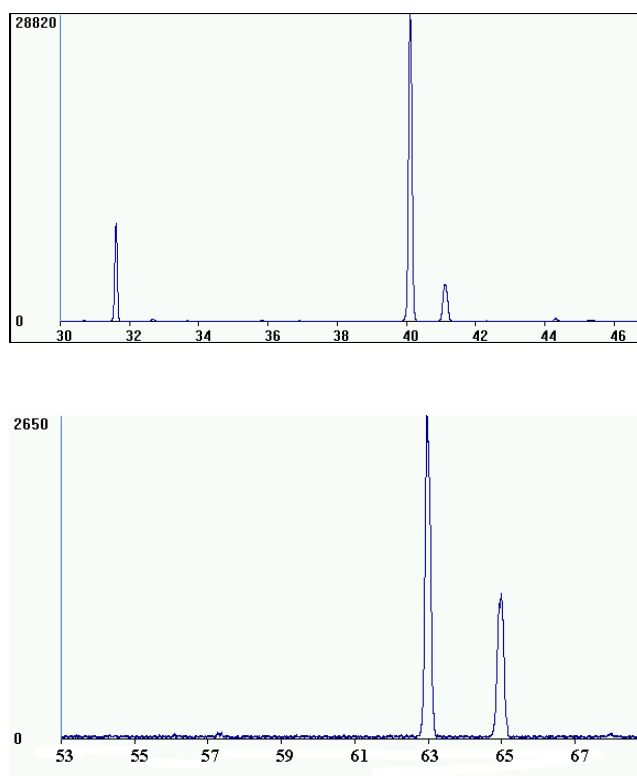
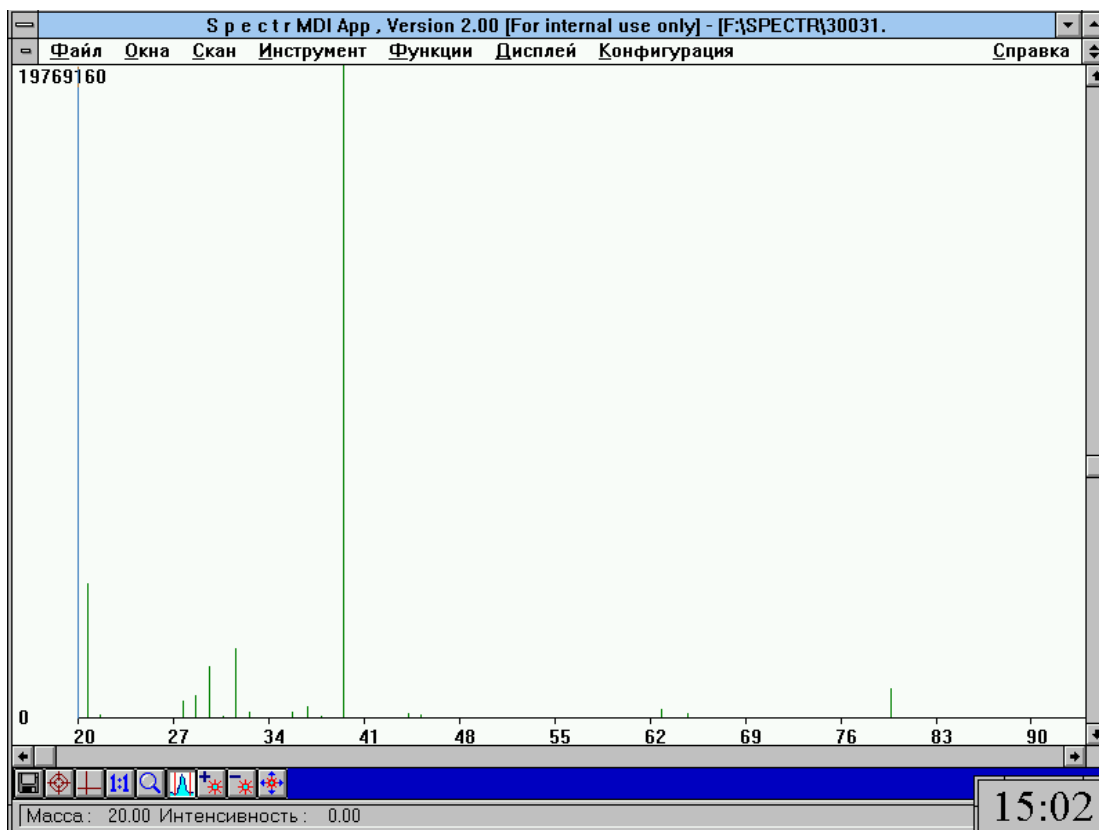
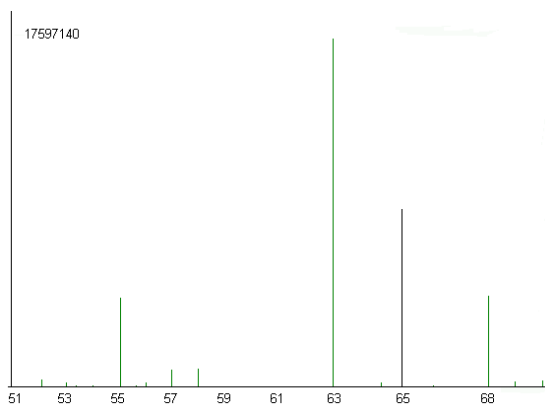


Рис. 2. Фрагменты масс-спектров образцов меди на МСД-ТлР с источником ионов с тлеющим разрядом

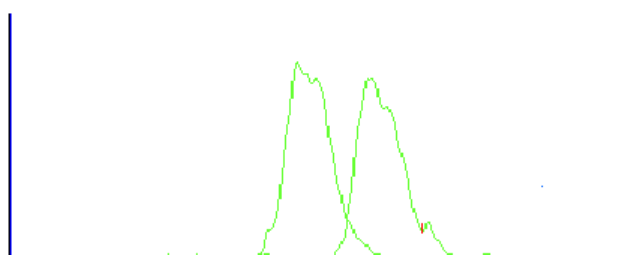
меди  $\text{Cu}^{63}$  и  $\text{Cu}^{65}$  имеют интенсивность в диапазоне  $(10 \div 30) \times 10^6$  отн. единиц при уровне фона порядка 10 отн. единиц, что соответствует возможности достижения пределов обнаружения микропримесей на уровне порядка 1 ppm. На рис. 5 представлены два контрольных сканирования по линии изотопа  $\text{Cu}^{63}$ , с приборно-задаваемым сдвигом по массе, соответствующим разрешающей способности 3000. Из этого рисунка видно, что прибор обеспечивает разрешающую способность, необходимую для разделения налагающихся линий изотопов различных элементов в масс-спектре. Таким образом, можно сделать вывод, что аналитические характеристики базовой модели масс-спектрометра МСД-650, дополненного источником ионов с тлеющим разрядом, являются достаточными для проведения на нем стандартного элементного анализа твердых образцов. Однако в масс-спектрах (рис. 2–4) одновременно с пиками ионов образца наблюдаются очень интенсивные пики ионов фрагментов масла во всем диапазоне регистрируемых масс. Как показали проведенные



**Рис. 3.** Линейный масс-спектр образца меди с источником ионов с тлеющим разрядом. (Разрешающая способность  $R=1000$ , напряжение питания ВЭУ  $U_{ВЭУ}=4$  отн. ед.)



**Рис. 4.** Линейный масс-спектр образца меди с источником ионов с тлеющим разрядом. (Разрешающая способность  $R=1000$ , напряжение питания ВЭУ  $U_{ВЭУ}=8$  отн. ед.)



**Рис. 5.** Два контрольных сканирования по линии изотопа  $\text{Cu}^{63}$ , со сдвигом по массе, соответствующим разрешающей способности 3000

эксперименты, эти ионы появляются вследствие использования в системе вакуумной откачки масс-спектрометра МСД-650 турбомолекулярных насосов ТМН-300 с подшипниками на масляной смазке и механических форвакуумных насосов и не могут быть устранены без изменения вакуумной системы. Пики "грязного вакуума" являются основным препятствием для реализации возможностей источника ионов с тлеющим разрядом в масс-спектрометре МСД-650.

### РАССМОТРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОЗДАНИЯ ЭЛЕМЕНТНОГО ПРИБОРА НА БАЗЕ МСД-650

Поскольку для разделения наложенных изотопов разных элементов, а также сопутствующих ионов — продуктов ион-молекулярных реакций, присутствующих в плазме тлеющего разряда, как правило, необходимо иметь достаточно высокое разрешение масс-спектрометра ( $R \approx 3000-4000$ ), то в МСТЛР, как правило, используются масс-анализаторы с двойной фокусировкой. При этом обычно применяют обращенную геометрию, т.е. расположение каскадов масс-анализатора  $M \rightarrow E$ , что при повышенном давлении в области анализатора позволяет уменьшить "хвосты" пиков, связанные с рассеянием ионов на молекулах остаточных газов, т.е. повысить изотопическую чувствительность [6]. Кроме того, в конструкции камеры масс-анализатора принимаются меры для предотвращения возможности столкновения ионного пучка со стенками камеры анализатора, что также способствует уменьшению "хвостов" пиков, т.е. увеличению изотопической чувствительности.

В масс-спектрометре МСД-650 использован статический, с двойной фокусировкой масс-анализатор прямой геометрии  $E \rightarrow M$ , обеспечивающий высокую разрешающую способность (до 10 000 на 10 % высоты пика), необходимую для химического анализа, но избыточную для элементного анализа. В этом анализаторе, однако, в соответствии с его назначением не было необходимости принимать меры для уменьшения фона рассеянных ионов, и потому для исполнения требований элементного анализа масс-анализатор должен быть доработан. Одним из рассмотренных вариантов доработки было увеличение зазора электромагнита, что позволяет увеличить пропускание и одновременно уменьшить рассеяние ионного пучка на стенках камеры анализатора. Численным моделированием магнитного поля с помощью специально адаптированных компьютерных программ для расчета двух- и трехмерных магнитостатических полей на основе методов пространственных интегральных уравнений и конечных элементов в работе [7] было показано, что увеличение зазора с 5 мм до 7 мм при сохранении существующей конструкции и геометрии элект-

ромагнита (прежде всего формы и материала полюсных наконечников) практически не изменяет ширину зоны однородности (3.5–4 см) вдоль всей центральной траектории ионного пучка, т.е. не влияет на предельно достижимую разрешающую способность. Изменения величины и протяженности краевого поля, связанные с увеличением зазора, также легко компенсируются юстировкой магнита. Максимальное пропускание ионного пучка одновременно с обеспечением его непопадания на стенки камеры анализатора обеспечивается ионной оптикой источника и установкой коллимирующих диафрагм на входном и выходном плечах магнитного анализатора. Таким образом, ионнооптические возможности масс-спектрометра МСД-650 вполне могут быть приведены в соответствие с требованиями элементного анализа методом ТЛР, поскольку, как следует из экспериментальных результатов, достигнутая чувствительность даже при существующем зазоре 5 мм позволяет обеспечить пределы обнаружения в 1 ppm.

Основным препятствием для проведения элементного анализа на масс-спектрометре МСД-650 и реализации возможных пределов обнаружения является загрязнение спектра масс примесными ионами "грязного" вакуума, что требует замены средств откачки, используемых в МСД-650, на безмасляные. Замена используемых в приборе турбомолекулярных насосов на аналогичные насосы с безмасляным подшипником либо с подшипником на магнитной подвеске и механических форвакуумных насосов на сорбционные полностью решило бы проблему фона "грязного" вакуума. Сорбционные насосы однако требуют использования жидкого азота, что усложняет и удорожает содержание прибора. Значительное по сравнению с обычными маслами улучшение качества вакуума может быть получено уже при использовании в механических форвакуумных насосах масел с низким давлением паров типа Edwards Ultra 19. Окончательный выбор системы откачки для МСД-650 ТЛР и решение о замене в нем существующих вакуумных средств определяется только возможностями финансирования.

Таким образом, путем указанной доработки аналитической и вакуумной частей МСД-650 можно обеспечить условия, достаточные для работы с источником ионов с тлеющим разрядом и проведения элементного анализа с пределами обнаружения не хуже чем  $10^{-4}$  %.

### РАССМОТРЕНИЕ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТРА МСД-650ТЛР

Дальнейшее развитие возможностей проведения элементного анализа на масс-спектрометре МСД-650 связано с созданием нового комбиниро-

ванного источника ионов, позволяющего анализировать любые твердые образцы независимо от их проводимости. Разработанный для МСД-650 описанный выше источник ионов с тлеющим разрядом постоянного тока (dc) позволяет проводить анализ только проводящих образцов. Однако в научных исследованиях, в промышленности, в геологии и других областях хозяйства существует широкий круг задач, в которых необходимо анализировать содержание и состав микропримесей в плохо проводящих материалах, таких как диэлектрики и полупроводники. Для элементного анализа плохо проводящих материалов также разработаны способы ионизации и созданы источники ионов. Один из них — это источник ионов с высокочастотным (rf) тлеющим разрядом [8, 9], где для инициирования тлеющего разряда используется высокочастотное напряжение с частотой порядка 10 МГц. На этой частоте тлеющий разряд легко вызывается между любыми проводящими и непроводящими электродами и производит их эффективную ионизацию. Использование источника ионов с высокочастотным тлеющим разрядом позволяет анализировать как диэлектрики, так и полупроводники. Другой способ элементного анализа, который был предложен в Институте аналитического приборостроения РАН, — это скользящий разряд, позволяющий анализировать любые диэлектрические материалы с очень высокой точностью [10–12]. Скользящий разряд — это специальный вид вакуумного разряда, который развивается по поверхности диэлектрика и производит эффективную ионизацию материала поверхности. Источник ионов со скользящим разрядом прост по конструкции и питанию и хорошо совмещается с масс-анализаторами с двойной фокусировкой. Для масс-спектрометра МСД-650 ТлР предполагается разработать комбинированный источник ионов, соединяющий в себе возможности не только постоянного тлеющего разряда, но и высокочастотного тлеющего, а также скользящего разрядов, что позволит проводить элементный анализ практически любых электропроводных и неэлектропроводных образцов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для серийного масс-спектрометра МСД-650 разработан новый источник ионов с тлеющим разрядом, позволяющий расширить аналитические возможности масс-спектрометра и применять его для рутинного элементного анализа. Экспериментально показано, что с разработанным источником разрешающая способность масс-спектрометра составляет 3000, пределы обнаружения микропримесей образца меди составляют 1 ppm. Рассмотрены

возможности модернизации ионно-оптической системы масс-спектрометра для увеличения его пропускания и снижения фона рассеянных ионов, а также необходимые доработки вакуумной системы масс-спектрометра. Предложено дальнейшее расширение аналитических возможностей МСД-650 ТлР путем разработки комбинированного источника ионов, реализующего возможности как постоянного, так и высокочастотного тлеющих разрядов, а также скользящего разряда, что позволит проводить элементный анализ практически любых электропроводных и неэлектропроводных образцов [8–12].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. King F.L., Harrison W.W. // Mass Spectrometry Reviews. 1990. N. 9. P. 285–317.
2. Honig R.E. // Adv. Mass Spectrom. 1974. N. 6. P. 337–349.
3. Coburn J.W. // J. Vac. Sci. Technol. 1976. N. 13. P. 1037–1041.
4. Райзер Ю.С. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
5. Coburn J.W., Kay E. // Appl. Phys. Lett. 1971. N. 18. P. 435–440.
6. Coburn J.W., Harrison W.W. // Appl. Spectrosc. Rev. 1981. N. 17. P. 95–105.
7. Кузьмин А.Г., Галль Л.Н., Зеленский Ю.Н. и др. Разработка масс-спектрометра для исследования твердых, жидких и газообразных веществ на базе масс-спектрометра МСД-650: Отчет о НИР ИАНП РАН / ВНИИЦентр. № ГР 012585. М., 2000. 71 с.
8. Галль Л.Н. // ЖТФ. 1969. Т. 59, № 6. С. 792–798.
9. Duckworth D.C., Marcus R.K. RF powered GD atomization/ionization source for solids MS // Anal. Chem. 1989. N. 61. P. 1879–1886.
10. Kouzmin A.G., Gall L.N., Muradimov M.Z. About some peculiarities of ionization in radio-frequency glow discharge (rfGD) // Fresenius J. Anal. Chem. 1996. N. 335. P. 866–867.
11. Галль Л.Н., Кузьмин А.Г. Скользящий разряд как метод ионизации искровой масс-спектрометрии // Журнал аналитической химии. 1995. Т. 50, № 5. С. 505–511.
12. Галль Л.Н., Кормилицын Д.В., Кузьмин А.Г. Анализ диэлектриков методом скользящего разряда в искровой масс-спектрометрии // Журнал аналитической химии. 1996. Т. 51, № 4. С. 445–447.
13. Галль Л.Н., Кузьмин А.Г., Птицын В.Э. Развитие методов элементного анализа диэлектриков // Известия Академии наук: Серия физическая. 1998. Т. 62, № 10. С. 2002–2008

*Институт аналитического приборостроения РАН,  
Санкт-Петербург*

Материал поступил в редакцию 24.01.2001.

## **GLOW-DISCHARGE MASS SPECTROMETER МСД-650 ТЛР — NEW DEVELOPMENT OF MASS SPECTROMETERS МСД-650**

**L. N. Gall, A. G. Kuzmin**

*Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg*

A glow-discharge ion source for the basic model of a double-focusing mass spectrometer МСД-650 is developed and made. This extends the capabilities of the instrument to elemental analysis of solid samples. The possibilities of improving the basic model of МСД-650 to optimize parameters of the new elemental mass spectrometer are considered. The results of preliminary tests of the МСД-650 ТЛР prototype are given and mass spectra of elemental analysis of solid samples are presented.