

МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНОЙ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ РАЗРЯДОВ В УПРАВЛЯЕМЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Е. Г. Костин, В. В. Усталов, О. А. Федорович

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Представлены результаты масс-спектрометрических исследований качественного состава химически активной плазмы, образующейся в плазмохимических реакторах (ПХР) при высокочастотных разрядах в скрещенных, регулируемых магнитных полях. Разработанная методика исследований позволила провести анализ качественного состава плазмы разряда в элегазе (SF_6) при давлениях 10^{-4} - 1 мм рт. ст., охватывающих весь диапазон рабочих давлений в ПХР. Обнаружена высокая эффективность диссоциации SF_6 в разрядах, радикалы и ионы которого обеспечивают высокие скорости травления материалов при низких энергиях ионов (50 - 200 эВ). Рассмотрены возможные механизмы, объясняющие особенности состава радикалов, наблюдающихся на масс-спектрограммах.

Введение

XXI век - век информационных технологий. Телевидение, радиовещание, вычислительная техника, связь (включая Интернет и спутниковую), современное приборостроение в качестве элементной базы используют микросхемы (БИС, СБИС и др.), а также другие элементы электронной техники, изготовление которых невозможно без использования плазмохимических технологий (ПХТ). Особенно актуально использование ПХТ при низких энергиях ионов, так как они являются предпочтительными при получении микронных, суб- и наномикронных размеров активных и пассивных элементов, входящих в состав интегральных схем (ИС). Уменьшение размеров элементов ИС позволяет увеличить быстродействие современных компьютерных систем, снизить потребление электроэнергии, уменьшить габариты компьютерной техники, увеличить объем памяти.

Степень интеграции постоянно увеличивается, и уже выпускаются БИС с пятью и даже с семью слоями металлизации (пленка из алюминия или других металлов толщиной ≤ 1 мкм) и межслойными соединениями контактов, где на каждый слой металлизации приходится еще, как минимум, четыре слоя: подслой, надслой и межслойные изоляции. Размеры отдельных элементов ИС составляли несколько лет назад $\leq 0,35$ мкм, т. е. обычные оптические микроскопы не имеют возможности различать эти детали. В настоящее время уже используются СБИС с линейными размерами элементов до 0,09 мкм.

Наряду с традиционными материалами для электронной техники, такими как кремний, поликремний, арсенид галлия, германий, пленки алюминия, вольфрама, молибдена, титана, оксида и диоксида кремния, в ИС появляются более сложные соединения: Si_3N_4 (нитрид кремния), TiSi_2 , MoSi_2 , WSi_2 , CoSi_2 , NiSi_2 (силициды титана, молибдена, вольфрама, кобальта, никеля), TiN (нитрид титана), а также соединения, содержащие медь. Эти соединения используются в качестве под- и надслоев металла, а иногда и для межслойных соединений токопроводящих шин. В качестве изоляции в основном используются окислы кремния и фосфорносиликатное стекло.

Естественно, что для селективного травления одних слоев по отношению к другим, а также для получения анизотропного травления требуется не только подбор соответствующих технологических газов или их смесей, содержащих различные фтор- и хлорсодержащие соединения, а также кислород, азот, аргон и др., но и наличие возможности регулирования энергии ионов химически активных газов в широких пределах (от 20 до 300 эВ). В связи с тем, что плазмохимическое травление происходит в галогеносодержащих газах, необходимо максимально использовать реагирующие газы для улучшения экологической чистоты

выхлопных газов плазмохимических реакторов (ПХР). Следовательно, необходимо получать максимальную диссоциацию реагирующих газов и иметь их высокую степень ионизации. Такую возможность дают высокочастотные разряды (с частотой $\geq 13,56$ МГц) в управляемых магнитных полях разной конфигурации. Для получения субмикронных размеров элементов толщина резистивных защитных масок, через которые происходит травление технологических слоев, должна быть сравнима с шириной самих обрабатываемых структур и выдерживать значительные тепловые нагрузки, возникающие при контакте с химически активной плазмой, в состав которой входят ионы и электроны с соответствующими энергиями. Для того чтобы происходило в основном химическое травление технологических пленок без физического распыления, очень важно максимально уменьшить энергию ионов, не теряя при этом производительности. Большинство промышленных установок имеют энергию ионов ≥ 300 эВ и не позволяют получать субмикронные размеры элементов из-за распыления и разрушения тонких фото-, электронно- и рентгенорезистивных масок [1]. При высоких энергиях ионов возникают также радиационные повреждения технологических слоев, межслойные пробои и перераспыление слоев и защитных масок, что приводит к нарушению работоспособности обрабатываемых структур.

Разработка и испытания низкоэнергетических ПХР является в настоящее время одной из главных задач, стоящих перед разработчиками плазмохимического оборудования.

В то же время химические процессы, протекающие в ПХР, многовариантны и очень сложны. Поэтому стандартные методики исследований не только не дают возможности разобраться в химическом составе, но и измерить основные параметры химически активной плазмы. Для этого требуется использование нескольких независимых методик измерений как параметров плазмы, так и определения ее состава. Наиболее подходящими являются оптическая спектроскопия и качественная масс-спектрометрия химически активной плазмы. Для отождествления оптических спектров излучения химически сложных молекул необходимо иметь табличные данные о длинах волн излучения отдельных молекул. Эти данные зачастую отсутствуют в справочниках из-за того, что в плазме высокочастотных разрядов в магнитных полях образуются сложные соединения и идут такие химические реакции, которые в обычных условиях не происходят. При взаимодействии химически активных молекул с поверхностью кристаллов также происходят химические реакции, что еще более усложняет спектральный анализ излучения. В данной статье для качественного анализа химических реакций в ПХР была использована разработанная нами масс-спектрометрическая методика исследований плазмы, образующейся при высокочастотных разрядах в химически активных газах с низкими энергиями ионов в регулируемых магнитных полях.

Особенности методики масс-спектрометрических исследований химически активной плазмы

Масс-спектрометрические исследования химически активной плазмы, характерной для ПХР с низкой энергией ионов, проводились на разработанном и изготовленном в нашей организации ПХР с замкнутым дрейфом электронов [2 - 5] (рис. 1), позволяющем обрабатывать до девяти пластин кремния или нанесенных на них технологических слоев с размерами $\leq \varnothing 102$ мм. При высокочастотном разряде между двумя электродами, образующими ПХР, в скрещенных электрическом и регулируемом магнитных полях образуется химически активная или химически нейтральная плазма.

Один из электродов является активным, он выполнен в виде трехгранной охлаждаемой призмы 1 с размерами грани 110×350 мм². На него подается высокочастотный потенциал от генератора с рабочей частотой 13,56 МГц мощностью 0,5 – 4 кВт. На гранях призмы 1 размещаются обрабатываемые изделия, а сама призма находится под отрицательным постоянным плавающим потенциалом (относительно заземленного электрода 2), величину которого можно регулировать с помощью управляемого магнитного поля при дру-

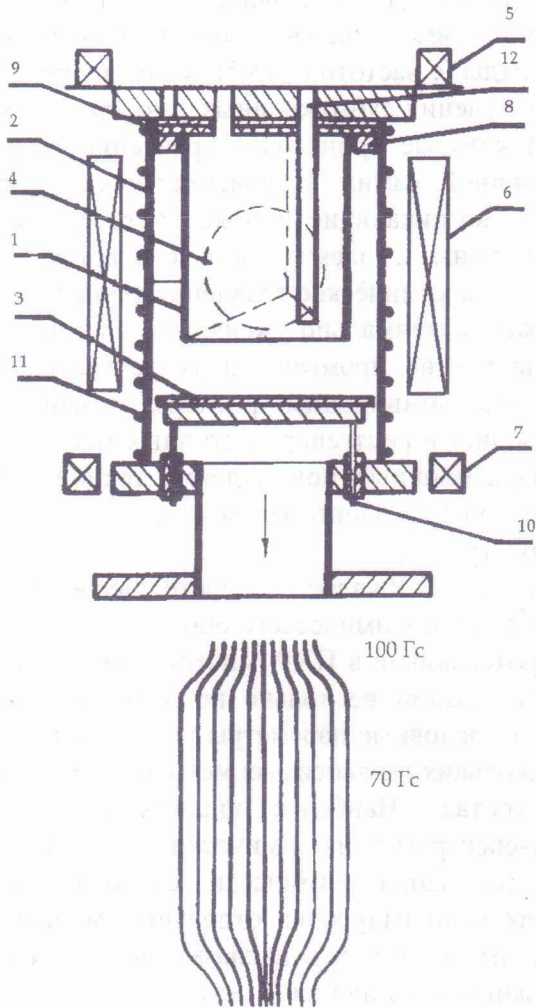


Рис. 1. ПХР для групповой обработки пластин, расположенных на активном электроде: 1 - трехгранная, охлаждаемая призма-электрод, к которой подключено высокочастотное напряжение и на которой размещаются пластины кремния при их травлении; 2 - цилиндрический заземленный охлаждаемый электрод; 3, 8 - изолированные охлаждаемые электроды, находящиеся под плавающим потенциалом; 4 - пластина кремния (обозначена пунктиром, так как призма показана в разрезе); 5, 6, 7 - катушки магнитного поля; 9 - изолятор; 10 - трубка охлаждения «плавающего» электрода; 11 - трубка охлаждения корпуса; 12 - трубка охлаждения активного электрода.

гих неизменных параметрах разряда. Наружный электрод представляет собой заземленный охлаждаемый цилиндр из немагнитного материала, являющийся одновременно корпусом вакуумной камеры. Магнитное поле образуется тремя катушками, позволяющими независимо регулировать напряженность магнитного поля и получать как «пробочную» конфигурацию поля, так и конфигурацию с расходящимся полем, в котором магнитные линии направлены на наружный электрод. Это позволяет переводить реактор из мягкого режима травления с энергиями химически активных ионов от 20 эВ до режима жесткого травления и распыления образцов с энергией ионов до 600 эВ. Использование дополнительного генератора с частотой 100 - 500 кГц позволяет снимать поверхностный заряд и распылять диэлектрики, повышать скорость травления металлических пленок, полупроводников и высокотемпературных сверхпроводников. Разряд осуществляется в химически активных газах, их смесях или в инертных газах в зависимости от решаемых задач. Замкнутый дрейф электронов позволяет частично избавиться от дрейфовых неустойчивостей и повысить равномерность травления по всей обрабатываемой площади [2 - 5].

Как отмечалось выше, химические процессы, протекающие в ПХР, требуют дальнейшего, более глубокого изучения с применением различных взаимодополняющих методик, таких как, например, оптическая спектроскопия и масс-спектрометрические исследования. На рис. 2 приведены результаты спектроскопических исследований излучения химически активной плазмы, образующейся в высокочастотном разряде с магнитным полем при напуске элегаза с примесями кислорода.

Из нескольких сотен линий излучения атомов и молекулярных полос удалось отождествить лишь малую часть атомных линий, принадлежащих атомам фтора, кислорода и

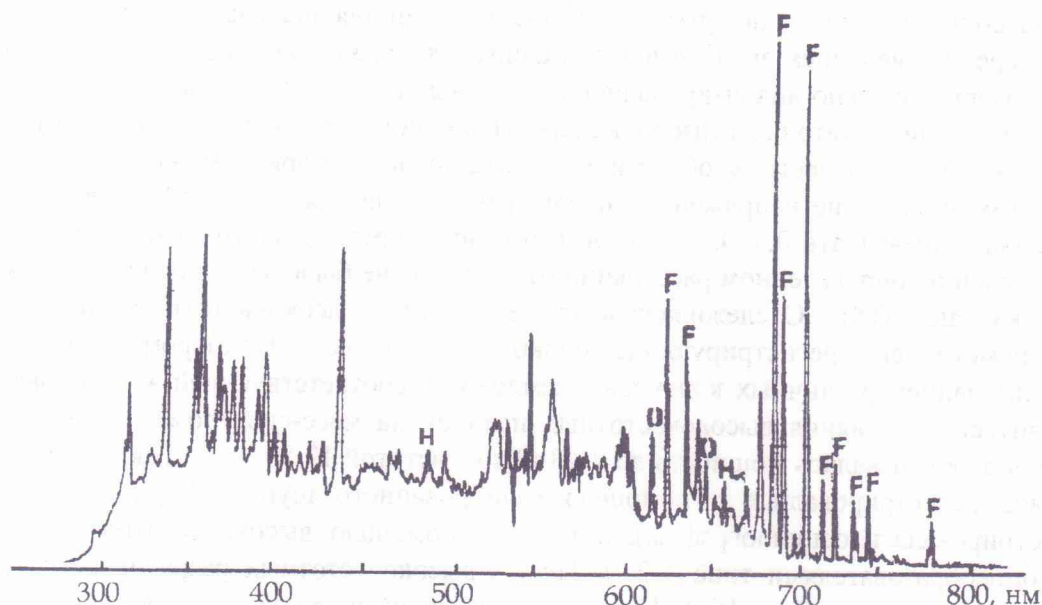


Рис. 2. Спектр излучения химически активной плазмы при высокочастотном разряде в элегазе в ПХР.

водорода, несмотря на использование всех доступных справочных изданий по длинам волн излучения атомов и полос молекулярных спектров [7 - 11], как двухатомных, так и многоатомных. Остальные линии, и особенно полосы, отождествить не удалось. Можно сделать вывод, что одних спектроскопических исследований эмиссионных спектров для изучения сложных химических реакций, происходящих в ПХР, недостаточно.

Наиболее подходящими методиками для исследований химического состава плазмы параллельно с спектроскопическими являются масс-спектрометрические. Для измерений масс-спектров химически активных газов, образующихся в ПХР, использовался времяпролетный масс-спектрометр типа МХ-7304, позволяющий регистрировать массы ионов от 1 до 200 атомных единиц. Необходимо отметить, что прямые измерения ионного состава плазмы разряда связаны с целым рядом нерешенных методических трудностей, попытка решения которых была предпринята в работе [6]. В этой работе анализатор из керамики с платиновой диафрагмой диаметром 20 мкм помещался непосредственно в плазму высокочастотного разряда. Однако измерить масс-спектры не удалось, по-видимому, из-за очень малого количества анализируемой плазмы, попадающей в масс-спектрометр, и невозможности регулировать количество газовых ионов, попадающих в ионизатор из-за фиксированного отверстия диафрагмы.

Анализовалась плазма, образующаяся в высокочастотных разрядах при давлениях $10^{-1} - 10^{-3}$ мм рт. ст. Остаточное давление в самом масс-спектрометре составляло 10^{-6} мм рт. ст., а откачка масс-спектрометра осуществлялась электроразрядным титановым насосом типа НМДО-01-1 (НОРД-100), позволяющим работать в диапазоне давлений $10^{-8} - 8 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. и предварительным разрежением $5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. Безмаслянная откачка масс-спектрометра позволила существенно избавиться от примесей органических соединений, присущих парам вакуумных масел, что улучшило возможности и точность исследований.

Для напуска химически активных газов в масс-спектрометр стандартный натекатель, который придается к нему, использовать не удалось, так как он рассчитан на напуск газа в анализатор масс-спектрометра из атмосферы, т.е. при давлении 760 мм рт. ст. Поскольку в анализатор газ поступал из вакуумной камеры с рабочим давлением $10^{-1} - 10^{-4}$ мм рт. ст., поэтому не удавалось получить достаточного количества анализируемых газов в датчике масс-спектрометра. Для решения данной задачи была сконструирована регулируемая

вакуумная задвижка, позволяющая регулировать поток газа из разрядной камеры в анализатор масс-спектрометра и получать в нем достаточный для анализа поток газа. Масс-спектрометр перед проведением эксперимента откачивался до давлений порядка 10^{-6} мм рт. ст.

Первоначально анализировались остаточные газы в самом масс-спектрометре. Далее следовал анализ остаточных газов в камере. Проводилась проверка влияния магнитного поля ПХР, величина которого в области высокочастотного разряда менялась от 0 до 200 Э. Допустимое значение напряженности магнитного поля для масс-спектрометра по паспорту не должно превышать 0,5 Э, т.е. магнитного поля Земли. Для этого масс-спектрометр был установлен на определенном расстоянии от ПХР, где не было заметного влияния магнитного поля катушек ПХР. Отслеживалось также влияние высокочастотных наводок на масс-спектрометр, его регистрирующие блоки и самописец. Подбором точек заземления, использованием различных контуров заземления и соответствующей экранировкой удалось избавиться от влияния высокочастотных наводок на масс-спектрометр, так как в плазму разрядов вкладывалась мощность до 2 - 3 кВт с частотой 13,56 МГц. Токи высокочастотного разряда регистрировались с помощью калиброванного шунта (форма и величина тока регистрировалась осциллографом), а также с помощью высокочастотных амперметров с термопреобразователями типа Т-210. Токи в высокочастотных разрядах регулировались и могли изменяться от 2 до 16 А. Напряжение высокой частоты и его форма измерялись при помощи калиброванного высокочастотного делителя и осциллографа или лампового высокочастотного вольтметра типа ВУ-15 или В7-26. При необходимости проводились измерения угла сдвига между током и напряжением ($\cos \varphi$) для определения активной мощности, вкладываемой в разряд. Напряжение автосмещения измерялось прокалиброванным вольтметром постоянного тока.

Рабочее давление газов в камере измерялось с помощью термопарных и ионизационных вакуумметров. Камера реактора откачивалась с помощью высоковакуумного масляного диффузионного насоса типа Н2Т со скоростью 2000 л/с до давлений 10^{-6} мм рт. ст. Напуск рабочего газа контролировался с помощью масляных расходомеров, не допуская длительной работы датчиков ионизационных вакуумметров с накаливаемой вольфрамовой нитью, так как из-за травления вольфрама в фторсодержащих газах они быстро выходили из строя. Скорость откачки камеры регулировалась ручной задвижкой высоковакуумного насоса. На установке проводились комплексные измерения параметров химически активной плазмы.

Результаты масс-спектрометрических исследований при разряде в элегазе

В качестве рабочего газа использовался элегаз (SF_6), который применяется в промышленности для травления интегральных схем, силовых полупроводниковых приборов (транзисторов, диодов, тиристоров, симисторов), приборов оптоэлектроники, датчиков давления, сверхвысокочастотных фильтров, изделий микромеханики, в технологиях нанoeлектроники и т.д.

На рис. 3 приведены результаты исследований масс-спектров из работы [12], полученные при анализе газов в высокочастотном разряде без магнитного поля. На рис. 4 приведены результаты измерений масс-спектров, полученные при напуске в камеру ПХР элегаза, но без разряда.

Как видно из сравнения этих результатов, эффективность высокочастотного разряда в ПХР без магнитного поля невелика: масс-спектры, полученные в работе [12] с высокочастотным разрядом, и масс-спектры, полученные в самом ионизаторе масс-спектрометра (без разряда в ПХР) у нас практически совпадают как по интенсивности пиков ионов SF_5^+ , SF_4^+ , SF_3^+ , SF_2^+ , SF^+ , так и по их составу.

При включении в ПХР высокочастотного разряда в скрещенном магнитном поле масс-спектры очень существенно меняются. При мощности высокочастотного генератора 1 кВт наряду с пиками ионов SF_5^+ , SF_4^+ , SF_3^+ , SF_2^+ , SF^+ в ПХР появляются SF_3O^+ , SF_2O_2^+ ,

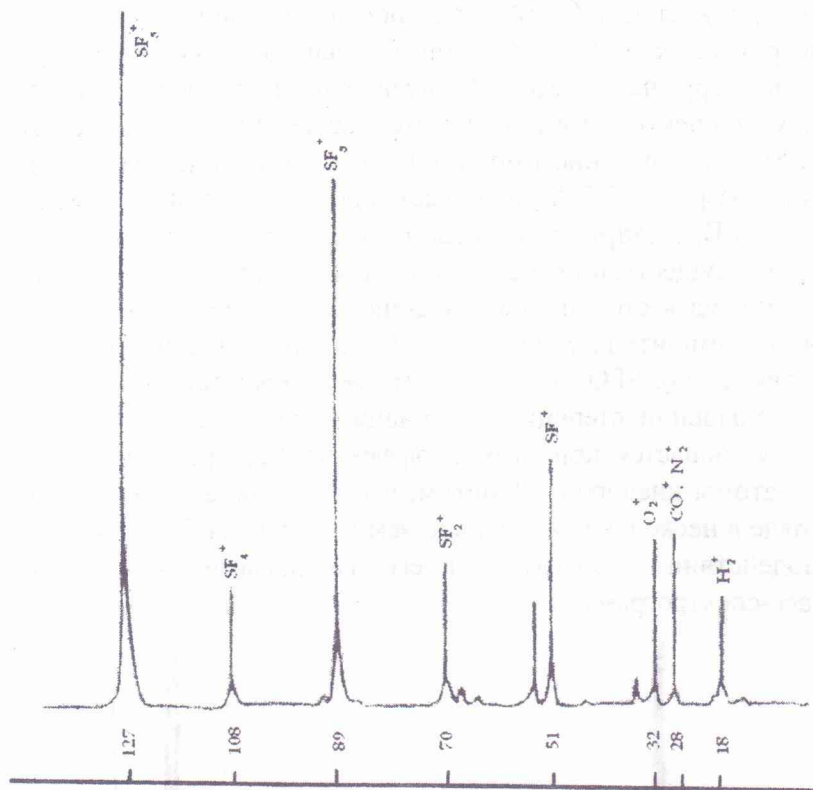


Рис. 3. Масс-спектр при высокочастотном разряде в SF₆ [12].

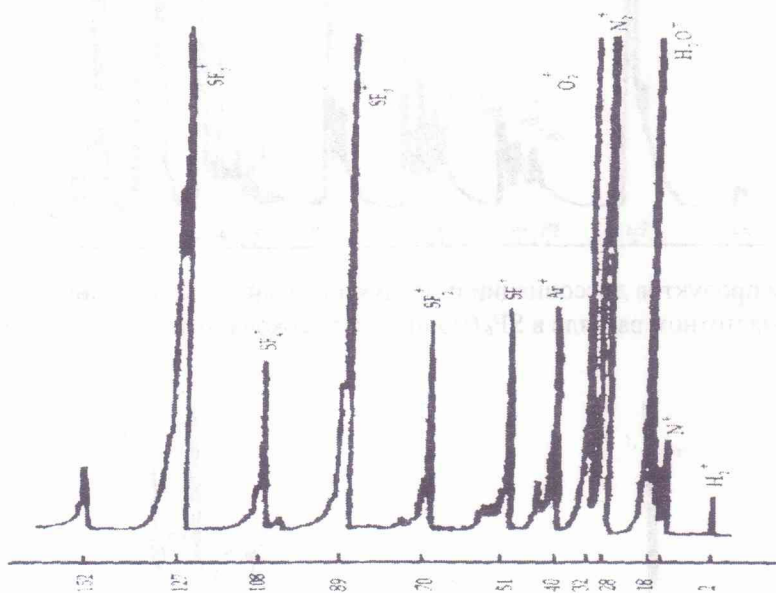


Рис. 4. Масс-спектр при напуске SF₆ в камеру ПХР.

SF₂O⁺, SFO₂⁺, SFO⁺, SO₂⁺, SO⁺ (рис. 5) несмотря на то, что в ПХР не добавляется кислород. Причем происходит перераспределение амплитуд пиков ионов: основные (без разряда) пики SF₅⁺, SF₄⁺, SF₃⁺, SF₂⁺, SF⁺ в несколько раз уменьшаются, а амплитуды ионов радикалов, содержащих кислород, становятся сравнимыми с амплитудами радикалов SF₄⁺, SF₃⁺, SF₂⁺, SF⁺. Амплитуды других ионов, например SFO⁺, становятся даже выше, чем SF₂⁺. Амплитуды пиков SF₅⁺ и SF₃⁺ в несколько раз уменьшаются, а амплитуды SF₂⁺, SF⁺ существенно увеличиваются, что свидетельствует об эффективности диссоциации элегаза в высокочастотном разряде в магнитном поле. О высокой эффективности диссоциации молекул SF₆ в

высокочастотном разряде в скрещенном магнитном поле свидетельствует появление на записях масс-спектрограмм пиков SO_2^+ , SO^+ . Пик S^+ совпадает с O_2^+ , поэтому отождествить однозначно атомарную серу не удастся. С включением разряда в плазмохимическом реакторе на записях масс-спектрограмм появляется также пик HF^+ с достаточно высокой амплитудой (см. рис. 5). С уменьшением мощности генератора в два раза и при неизменных других параметрах ток в разряде с 7,5 А уменьшается до 5 А, падение напряжения на разряде уменьшается со 150 до 90 В, а напряжение автосмещения – со 100 до 50 В. Характерно, что масс-спектры при этом существенно не отличаются, а происходит только небольшое перераспределение амплитуд в сторону уменьшения их к более простым ионам радикалов (например, уменьшается амплитуда SFO^+ , SF^+ , SO^+ и др.) (рис. 6). Уменьшаются также амплитуды ионов молекул SO_2 , SFO_2 , но при этом увеличиваются амплитуды SF_3 , SF_5 , что свидетельствует об уменьшении степени диссоциации элегаза с уменьшением мощности, вводимой в плазму. Уменьшается при этом и эффективность реакций замещения атомов фтора в радикалах на атомы кислорода. Заметим, что амплитуда молекулярного кислорода при включенном разряде в несколько раз меньше чем без разряда. Это свидетельствует о его эффективном взаимодействии с элегазом и его радикалами, что хорошо видно на нижеприведенных масс-спектрограммах.

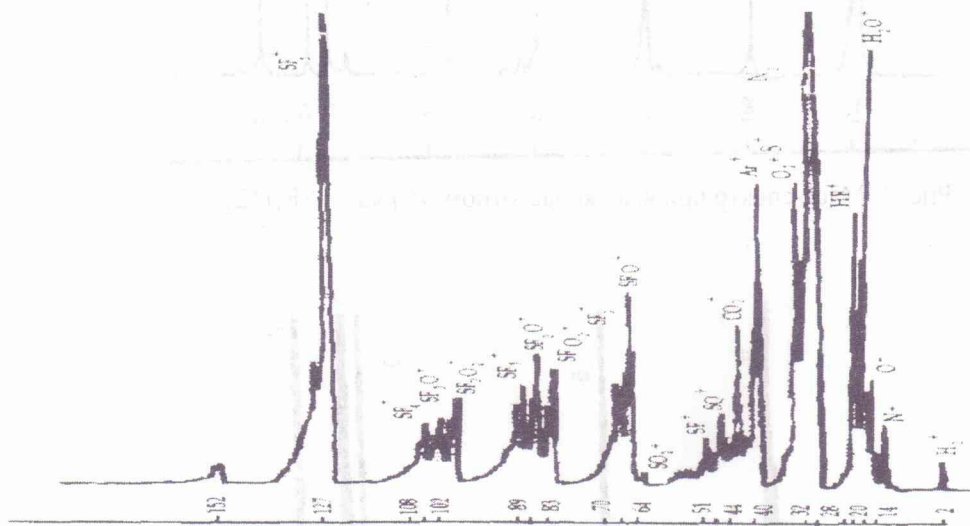


Рис. 5. Масс-спектры продуктов диссоциации и продуктов химических реакций, происходящих в ПХР при высокочастотном разряде в SF_6 (мощность высокочастотного генератора 1 кВт).

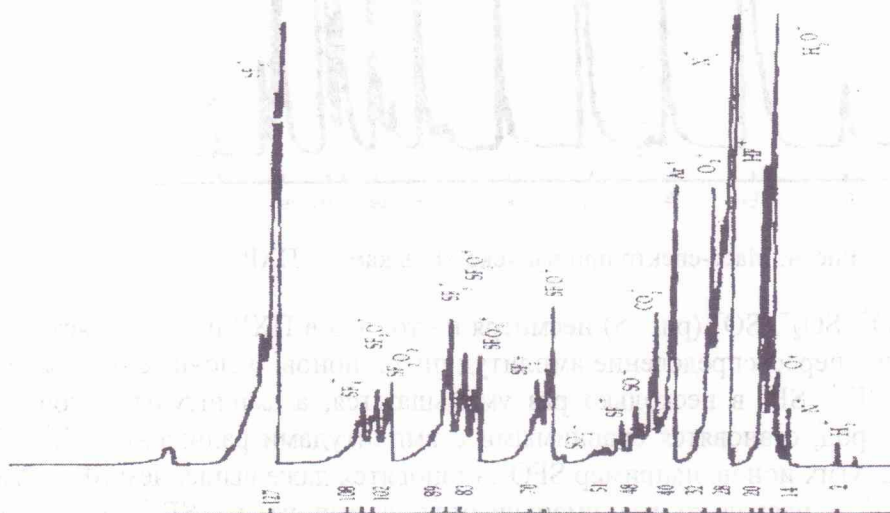
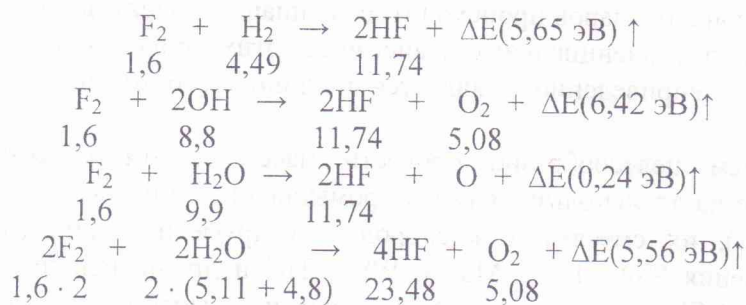
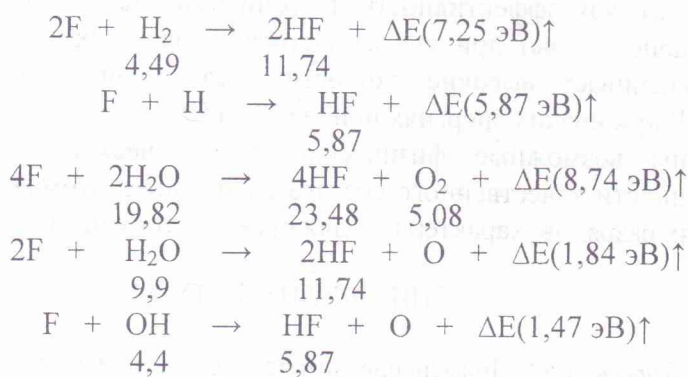


Рис. 6. Масс-спектры продуктов диссоциации и продуктов химических реакций, происходящих в ПХР при высокочастотном разряде в SF_6 (мощность высокочастотного генератора 0,5 кВт).

Характерной особенностью масс-спектров является отсутствие молекулярного фтора F₂. Вероятно, это связано с малой энергией связи в молекулах F₂ (E_{дис} = 1,6 эВ) и их диссоциацией в ПХР и ионизаторе масс-спектрометра под воздействием электронных ударов. Действительно, потенциал ионизации молекулы F₂ составляет 15,83 эВ [13], а энергия диссоциации 1,6 эВ [13, 14]. Вполне естественно, что молекула F₂ диссоциирует на два атома фтора под воздействием электронных ударов с определенной энергией в масс-спектрометре и плазмохимическом реакторе при включении высокочастотного разряда, так как энергии диссоциации и ионизации молекулы отличаются почти в 10 раз. Следует также учесть, что оба этих процесса имеют экспоненциальный характер зависимости от энергии, что еще более усиливает процесс диссоциации F₂. Возможны также экзотермические реакции F₂ с другими молекулами, например H₂O, OH, H₂ и др. (под уравнениями химических реакций приведены значения энергий диссоциации соответствующих молекул, эВ):



На эмиссионных спектрах излучения плазмы высокочастотного разряда в элегазе (см. рис. 2) наблюдается большое количество линий излучения атомарного фтора с большой интенсивностью. В то же время на масс-спектрограммах атомарный фтор с массой 19 обнаружить очень сложно из-за малой разрешающей способности масс-спектрометра МХ-7304 и наличия масс 16(O), 17(OH), 18(H₂O), 20(HF). Поэтому для его однозначной идентификации необходимо провести дополнительные исследования с очень высоким разрешением по исследуемым массам. Однако на масс-спектрограммах после включения высокочастотного разряда всегда наблюдается молекула HF (плавиковая кислота) с энергией диссоциации 5,87 эВ, интенсивность пиков которой всегда значительна. Если учесть, что и в остаточных газах в разрядной камере, и в масс-спектрометре всегда наблюдаются молекулы и атомы H₂O, OH, H₂, O₂, O, то образование HF из атомарного фтора и приведенных выше компонент возможно в результате следующих химических экзотермических реакций:



Характерно, что на масс-спектрограммах не наблюдается SF₆⁺. Аналогичный результат был получен в работе [12] и у других авторов. По-видимому, здесь происходит такой же процесс, что и с F₂. Рассмотрим более подробно причины этого явления. Как следует из работы [13], потенциал ионизации элегаза составляет 19,3 эВ. Энергия диссоциации (разрыва связи) в молекуле согласно работам [13, 14] рассчитывается по формуле

$$D = \sum \Delta H_{F^{\circ}(ar)} - \Delta H_{F^{\circ}(r)},$$

где D – энергия диссоциации молекулы, $\sum \Delta H_{\text{р(ат)}}$ – сумма теплот образования атомов в газообразном состоянии и для SF_6 составляет

$$D = 6 \cdot 0,826 + 2,84 - (-12,68) = 20,476 \text{ эВ},$$

так как теплота образования фтора составляет 0,826 эВ, а серы – 2,84 эВ. Соответственно, для молекулы SF_5

$$D_0 = 5 \cdot 0,826 + 2,84 - (-10) = 16,97 \text{ эВ}.$$

Следовательно, разница в энергиях диссоциации SF_6 и SF_5 составляет 3,51 эВ, что и является энергией разрыва связи фтора в молекуле SF_6 . Это приводит к тому, что под воздействием электронных ударов происходит диссоциация молекулы $\text{SF}_6 \rightarrow \text{SF}_5 + \text{F}$, а не ее ионизация, учитывая экспоненциальную зависимость этих процессов от энергии диссоциации и ионизации. Вышеприведенное и является причиной того, что на масс-спектрограммах не наблюдается SF_6 .

В дальнейшем целесообразно провести масс-спектрометрические исследования разрядов с наиболее часто используемыми в промышленном производстве газами SF_6 , CF_4 , хладоном-218 (C_3F_8), их смесями с кислородом и другими газами (используются для селективного травления SiO_2 , TiSi_2 , MoSi_2 , WSi_2 , TiN и др. по отношению к кремнию и алюминию), а также CCl_4 и его смесями с N_2 , аргоном и другими газами, используемыми для травления алюминия, арсенида галлия и других материалов.

Необходимо исследовать содержание продуктов травления в составе плазмы для оптимизации процессов травления и получения максимального использования галогенов при травлении для улучшения экологических характеристик ПХР.

Выводы

Разработана масс-спектрометрическая методика исследований качественного состава химически активной плазмы, образующейся в ПХР при высокочастотных разрядах в скрещенных регулируемых магнитных полях. Методика позволяет исследовать химический состав ионов радикалов и атомов в плазме ПХР в диапазоне давлений 10^{-4} – 1 мм рт. ст., охватывающем весь диапазон рабочих давлений работы ПХР.

Получена высокая эффективность диссоциации элегаза (SF_6) на радикалы и атомы (вплоть до атомарной серы) при высокочастотных разрядах в регулируемых магнитных полях, что обеспечивает высокие скорости плазмохимического травления различных материалов в ПХР при низких энергиях ионов (50 - 150 эВ).

Предложены возможные физические и химические механизмы, объясняющие некоторые особенности качественного состава радикалов и атомов, образующихся в плазме ПХР при условиях разрядов, характерных для практических применений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 264 с.
2. Попов А.Ю., Усталов В.В., Федорович О.А. Плазмохимический реактор с замкнутым дрейфом электронов и его технологические возможности // Материалы межотрасл. науч.-техн. сем. „Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике.” - М., 1991. - Т. 1. - С. 54 - 55.
3. Коновал В.М., Усталов В.В., Федорович О.А. Плазмохимический реактор с замкнутым дрейфом электронов для производства элементов с субмикронными размерами // Материалы 6-й Междунар. конф. ”СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии.” - Севастополь. Украина, 1996. - С. 285 - 287.

4. Усталов В.В., Федорович О.А., Вдовенков А.А., Левицкая С.К. Плазмохимический реактор с низкой энергией ионов для селективного травления материалов // Материалы 10-й Междунар. конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии." - Севастополь. Украина, 2000. - С. 434 - 435.
5. Коновал В.М., Попов А.Ю., Усталов В.В., Федорович О.А. Модернизированный плазмохимический реактор с замкнутым дрейфом электронов для травления датчиков пироприемников // Материали щорічної наукової конференції ІЯД НАН України. - Київ, 1995. - С. 173 - 176.
6. Макарчук В.Н., Квицинский В.А. Заключительный отчет о выполнении НИР "Определение качественного состава и парциальных концентраций ионного компонента плазмы в рабочей среде ВЧ-магнетронного ПХ реактора" / Институт проблем энергосбережения АН Украины, Киев, 1989. - 37 с.
7. Гейдон А., Пирс Р. Отождествление молекулярных спектров. - М.: Мир, 1950. - 240 с.
8. Хьюбер К.П., Герцберг Г. Константы двухатомных молекул. В 2 ч. - М.: Мир, 1984.
9. Герцберг Г. Электронные спектры и строение многоатомных молекул. - М.: Мир, 1969. - 772 с.
10. Зайдель А.Н., Прокофьев В.К., Райский С.М., Шрейдер Е.Я. Таблицы спектральных линий. - М.: Госиздат физ.-мат. литературы, 1962. - 608 с.
11. Стриганов А.Р., Одинцова Г.А. Таблицы спектральных линий атомов и ионов: Справ. - М.: Энергоиздат, 1982. - 312 с.
12. Плазменная технология в производстве СБИС / Под ред. Н. Айнспрука и Д. Брауна. - М.: Мир, 1987. - 470 с.; Wong L., Intel Corporation. Aloha. Oregon. Неопубликованные данные (1982).
13. Веденеев В.И., Гурвич Л.В., Кондратьев В.Н и др. Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону: Справ. - М., 1962. - 216 с.
14. Краснов К.С., Тимошинин В.С., Данилова Т.Г., Хандожко С.В. Молекулярные постоянные неорганических соединений: Справ. - Изд-во "Химия", Ленинградское отделение, 1968. - 254 с.

МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХІМІЧНО АКТИВНОЇ ПЛАЗМИ ВИСОКОЧАСТОТНИХ РОЗРЯДІВ У КЕРОВАНИХ МАГНІТНИХ ПОЛЯХ

Є. Г. Костін, **В. В. Усталов**, О. А. Федорович

Наведено результати мас-спектрометричних досліджень якісного складу хімічно активної плазми, яка утворюється в плазмохімічних реакторах (ПХР) при високочастотних розрядах у схрещених, регульованих магнітних полях. Розроблена методика досліджень дозволила провести аналіз якісного складу плазми розряду в елегазі (SF₆) при тисках 10⁻⁴ – 1 мм рт. ст., що охоплюють весь діапазон робочих тисків у ПХР. Одержано високу ефективність дисоціації SF₆ у розрядах, радикали та іони якого забезпечують високі швидкості травлення матеріалів при низьких енергіях іонів (50 - 200) еВ. Розглянуто можливі механізми, які пояснюють особливості складу радикалів, що спостерігаються на мас-спектрограмах.

MASS-SPECTROMETRIC INVESTIGATION OF CHEMICALLY ACTIVE PLASMA IN DISCHARGE WITH CONTROL MAGNETIC FIELDS

E. G. Kostin, **V. V. Ustalov**, O. A. Fedorovich

Qualitative composition of chemically active plasma which is formed in high-frequency (HF) plasmochemical reactor (PChR) has been investigation by mass-spectrometric methods. HF discharge in PChR was formed in crossed electric and controlled magnetic fields. The technique of mass-spectrometric investigation, which is proposed by the authors of this paper permitted to make the qualitative analyses of plasma in SF₆ gas discharge for working pressure in the interval 10⁻⁴ ÷ 1 torr. High efficiency of dissociation of SF₆ molecules and radicals ionization was received. This ions and radicals are responsible for high sputtering speed of materials. Ions energy is in interval 50÷200 eV. The physical mechanisms for ion-radicals contentment in mass-spectrograms are briefly reviewed.

Поступила в редакцію 04.06.04,
после доработки – 27.07.04.