На правах рукописи

Кириллов Юрий Владимирович

ГЕТЕРОГЕННАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ АТОМОВ ХЛОРА В ПЛАЗМЕ СМЕСЕЙ ХЛОРА С ИНЕРТНЫМИ И МОЛЕКУЛЯРНЫМИ ГАЗАМИ

02.00.04 – физическая химия

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Иваново - 2003

Работа выполнена на кафедре технологии приборов и материалов электронной техники ГОУВПО "Ивановский государственный химико-технологический университет".

Научный руководитель –

доктор химических наук, профессор

Светцов Владимир Иванович

Официальные оппоненты:

доктор химических наук, профессор

Максимов Александр Иванович (Институт химии растворов РАН)

кандидат физико-математических наук

Амиров Ильдар Искандерович (Институт микроэлектроники и информатики РАН)

Ведущая организация –

Ивановский государственный энергетический университет.

Защита состоится "15" декабря 2003 г. на заседании диссертационного совета К.221.063.01 в ГОУВПО "Ивановский государственный химико-технологический университет" по адресу:

153460, г. Иваново, пр. Ф. Энгельса, 7

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО "Ивановский государственный химико-технологический университет" по адресу: 153460, г. Иваново, пр. Ф. Энгельса, 10.

Автореферат разослан " 11 " ноября 2003 г.

Ученый секретарь диссертационного совета **Егорова Е.В.**

2003-А
18032

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Стремительное развитие электронной техники, в последнее время, напрямую связано с применением в производстве плазмохимических технологий. Большие технологические перспективы для процессов травления арсенида галлия и металлов представляет использование смесей хлора с инертными и молекулярными газами. Экспериментально было установлено, что скорость травления в смесях может в 2 - 5 раз превышать скорость травления в чистом хлоре, при его значительно меньшем парциальном давлении. Использование таких смесей позволяет в широких пределах варьировать технологические режимы и скорости травления, и вместе с тем эффективнее использовать хлор за счет уменьшения его расхода. Широкое применение таких смесей в технологии требует знания механизмов влияния состава смеси на скорость травления. Многочисленные исследования процессов образования атомов хлора показали, что эффект увеличения скорости травления не может быть полностью объяснен объемными процессами их образования. Одним из наиболее вероятных механизмов влияния добавляемых газов на концентрацию атомов следует считать изменение гетерогенных стадий процесса травления в смесях. В настоящее время имеется много работ, посвященных исследованию гетерогенной рекомбинации атомов в зоне послесвечения. В то же время, гетерогенные процессы в зоне плазмы изучены мало, а именно процессы в зоне плазмы наиболее интересны с технологической точки зрения. Как известно, в зоне послесвечения отсутствуют потоки ионов, и коэффициенты рекомбинации оказываются значительно меньше. Сведения же о коэффициентах гетерогенной рекомбинации в зоне плазмы в литературе практически отсутствуют. Таким образом, вопросы, связанные с прямыми измерениями коэффициентов гетерогенной рекомбинации и влиянием состава плазмы на поверхностные процессы, являются малоизученными и весьма актуальными.

Цель работы - Разработка метода определения коэффициента гетерогенной рекомбинации атомов хлора непосредственно в зоне плазмы, и исследование влияния состава смеси хлора с инертными и молекулярными газами на коэффициент гетерогенной рекомбинации.

РОС. НАЦИОНАЛЬНАЯ БИБЛИОТЕКА
С.Петербург
09 2003 авт

Научная новизна.

1. Разработана уникальная релаксационная методика определения коэффициента гетерогенной рекомбинации в условиях плазмы.
2. Разработано программное обеспечение для автоматизации анализа исходных экспериментальных данных и определения коэффициента рекомбинации.
3. Впервые получены зависимости коэффициента гетерогенной рекомбинации от состава смеси.
4. Проведено математическое моделирование газоразрядной плазмы хлора и его смесей с аргоном, кислородом, азотом и водородом с целью получения коэффициентов скоростей процессов с участием электронов, рассчитаны концентрации ионов, электронов, и их потоки на стенку реактора.
5. Предложен механизм влияния потока ионов на зависимость коэффициента гетерогенной рекомбинации от состава смеси.

Практическая значимость работы

1. Разработанная релаксационная методика позволяет получать коэффициент гетерогенной рекомбинации атомов в плазме хлора, и может быть использована для анализа состояния поверхности обрабатываемых материалов.
2. Методика может быть применена для исследования кинетики гибели атомов хлора на поверхности различных образцов, вводимых в зону плазмы.
3. Сведения о значениях коэффициентов гетерогенной рекомбинации, и их зависимости от состава плазмы могут использоваться в математическом моделировании, взамен коэффициентов, полученных расчетным путем.
4. Результаты работы могут быть использованы при разработке и реализации промышленных плазмохимических процессов и установок.

Апробация работы и публикации. По результатам работы опубликовано 5 статей и тезисы 8 докладов. Основные положения, результаты и выводы докладывались на III Всероссийской научной конференции "Молекулярная физика неравновесных систем". (28 мая – 1 июня 2001г., ИГХТУ); I-ой Международной научной конференции "Молекулярная биология, химия и физика неравновесных систем". (27 мая – 2 июня 2002

г., ИГХТУ); 3-ем Международном симпозиуме по теоретической и прикладной плазмохимии. (16 – 21 сентября 2002 г., Плес).

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, трех глав и списка литературы. Объем диссертации составляет 120 страниц, и включает 14 таблиц и 45 рисунков. Список литературы содержит 120 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, обозначены задачи и цели данной работы; показаны ее научная новизна и практическая значимость.

В первой главе рассматриваются основные процессы образования и гибели атомов хлора, а также процессы образования и рекомбинации других активных частиц в плазме смесей хлора с инертными и молекулярными газами. Проведен анализ влияния объемных и гетерогенных процессов на концентрацию атомов хлора. Отмечено, что одними только объемными процессами образования атомов не удается полностью объяснить наблюдаемую зависимость концентрации атомов хлора от состава смесей, а процессы дополнительной диссоциации вносят малый вклад. Показано, что важную роль в формировании стационарной концентрации атомов хлора играют гетерогенные процессы, в частности рекомбинация атомов хлора. В связи с этим, рассматриваются механизмы гетерогенной рекомбинации, методы измерения концентрации атомов хлора и методы определения коэффициента гетерогенной рекомбинации атомов. Приведены достоинства и недостатки описанных методов. Отмечается, что в настоящее время в литературе отсутствуют данные по рекомбинации атомов в зоне плазмы, более того, нет надежных методов их измерения. Среди методов определения коэффициента рекомбинации выделен релаксационный, который и использовался в данной работе как основной для исследования гетерогенной рекомбинации.

Во второй главе дано описание экспериментального оборудования и всех использованных методик исследования. В работе применялись: абсорбционная спектроскопия для определения степени диссоциации мо-

лекул хлора; эмиссионная спектроскопия для определения концентрации атомов при релаксационных измерениях; зондовые измерения напряженности электрического поля в плазме, релаксационный метод измерения коэффициента гетерогенной рекомбинации; математическое моделирование плазмы хлора и его смесей с аргоном, кислородом, азотом и водородом, для определения коэффициентов скоростей процессов с участием электронов, концентраций ионов и их потоков на стенку реактора. Исследование параметров плазмы проводилось на установке, вакуумная часть которой включала стеклянный плазмохимический реактор, приборы для измерения давления и скорости потока газа, а также емкости для хранения газов и приготовления смеси. Хлор получался термическим разложением соли $CuCl_2$, а добавляемые газы брались из баллонов с маркой "чистый" (МРТУ 51-77-66). Смесь газов готовилась объемным смешением непосредственно в вакуумной системе установки. Плазмохимический реактор представлял собой стеклянную трубку радиусом 1.8 см, закрытую на торцах оптическими окнами. Электроды располагались в боковых отростках, а длина активной зоны плазмы составляла 10 см. Давление газа контролировалось U - образным масляным манометром, а скорость расхода газа - капиллярным реометром. Установка откачивалась вращательным масляным насосом. Исследования плазмы проводились в следующем диапазоне параметров:

Давление газа, (Па)	- 10 - 250;
Ток разряда, (мА)	- 5 - 150;
Плотность тока разряда, ($мА/см^2$)	- 1.5 - 46;
Напряженность поля E/N_0, ($В \cdot см^2$)	- $(2 - 7) \cdot 10^{-15}$;
Температура газа, (К)	- 300 - 530;
Расход газа, ($см^3/с$)	- 0.9 - 1.4;

Важной частью установки была схема прерывания разряда, примененная в реализации импульсной методики. Для проведения экспериментов по релаксационно-импульсной методике был специально разработан и изготовлен высоковольтный блок питания, позволяющий получать на выходе прямоугольные импульсы тока высокого напряжения с заданной длительностью. Электрическая схема приведена на рис. 1. Источник при отсутствии прерывания позволял зажигать разряд постоянного тока, и устанавливать ток разряда до 150 мА. Поскольку исследование свойств

плазмы в зависимости от состава смеси требуется выполнять в одних и тех же условиях, все эксперименты по релаксационно-импульсной методике были проведены при токе разряда 25 мА. Для модулирования тока разряда использовался генератор прямоугольных импульсов точной амплитуды (Г) типа Г5-75 который позволял устанавливать длительности импульсов и пауз тока в пределах 0.1 мс – 10 с, напряжением до 10 В. Он использовался как задающий генератор и определял длительности горения и паузы разряда. Током разряда управляла лампа ГМИ-10. Важным моментом при эксплуатации установки было согласование низковольтного выхода генератора с достаточно высоким напряжением на управляющей сетке, и в то же время, требовалось достигнуть высокого быстродействия для получения прямоугольных фронтов импульсов, что является необходимым условием релаксационной методики.

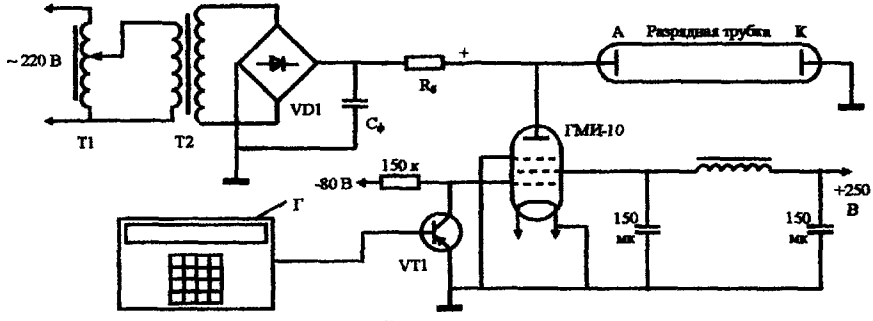


Рис. 1. Схема питания разряда.

Для определения коэффициента рекомбинации атомов на стекле, проводилось измерение интенсивности излучения атомов хлора на переднем фронте импульса тока разряда в различные промежутки времени, соответствующие различным временам паузы между импульсами тока. Импульсы тока контролировалась осциллографом. Излучение разряда на длине волны 452.62 нм (переход $5p^2p^0 3/2 \rightarrow 4s^2p3/2$, $E_{пор}$ = 11.95 эВ) регистрировалось фотоэлектронным умножителем ФЭУ 39Н, сигнал с которого преобразовывался в цифровую форму с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП), и непрерывно записывался в память компьютера. Специальное программное обеспечение позволяло строить на экране монитора график зависимости интенсивности излучения от времени, и фактически компьютер использовался как виртуальный ос-

циллограф. Быстродействие блока АЦП составляло 10000 выборок в секунду. Время одной выборки 0.1 мс. Методика может быть успешно осуществлена, если характерное время спада концентрации быстрых электронов и время перехода возбужденных частиц в основное состояние будет много меньше шага дискретизации АЦП по времени. Данные условия позволяют сделать вывод о прямой зависимости между интенсивностью спектральной линии атомов хлора и концентрацией атомов. Для газоразрядной плазмы это условие выполнялось, что и обеспечило успешность применения релаксационной методики. В режиме импульсной модуляции тока разряда, при паузе, достаточно короткой по сравнению с характерным временем гибели атомов, к моменту зажигания разряда, концентрация атомов не будет нулевой, и в излучении разряда будет наблюдаться резкий скачок. Рис. 2 иллюстрирует изменение концентрации атомов в паузе (пунктирная линия) и интенсивности излучения атомов (сплошная линия). Интересующие нас величины - это интенсивность стационарного излучения I_0, и величина скачка I. Время t_1 соответствует моменту выключения разряда, а время t_2 - моменту включения. Измеряя значение I при разном времени паузы можно построить кинетическую кривую гибели атомов (рис. 3). Для вычисления коэффициента рекомбинации строился график $\ln(I_0/I)$ от времени паузы, и по тангенсу угла наклона прямой определялся коэффициент гетерогенной рекомбинации атомов. Так как разряд в хлоре сопровождается интенсивными электрическими шумами, а излучение разряда нестабильно во времени, то был применен метод накопления полезного сигнала, с целью их уменьшения.

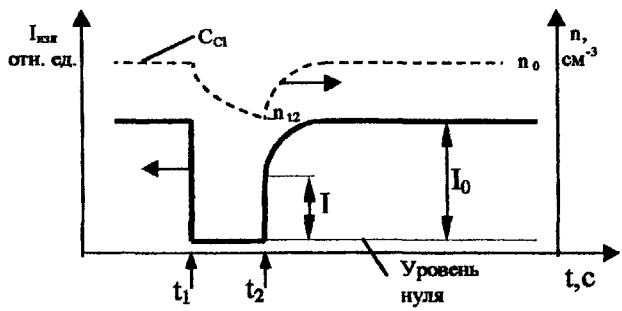


Рис. 2. Излучение атомов хлора при импульсной модуляции тока разряда.

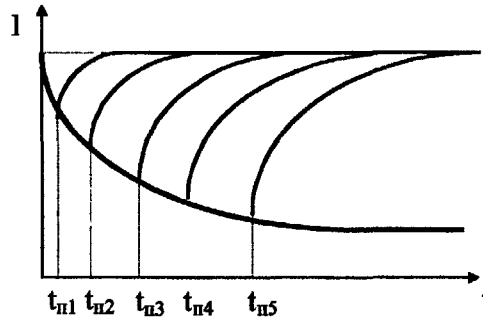


Рис. 3. Построение кинетической кривой гибели атомов, t- время паузы.

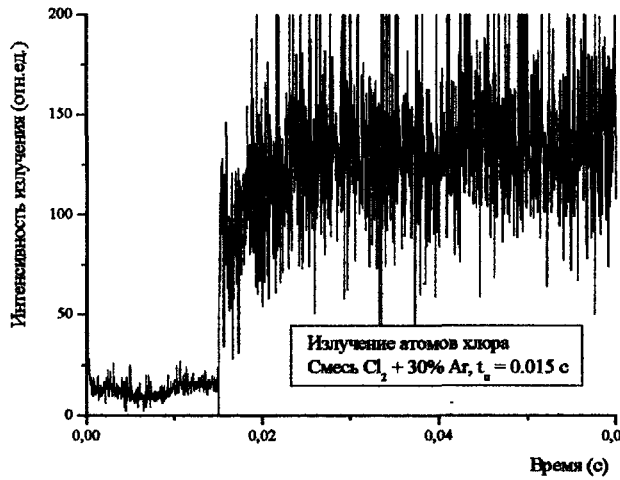


Рис. 4. Экспериментальная осциллограмма интенсивности излучения.

На рис. 4 приведена исходная осциллограмма, на которой виден большой шумовой фон, мешающий определению коэффициента рекомбинации. На рис. 5 приведена осциллограмма, полученная из исходной, путем обработки по методу накопления полезного сигнала. Получить такие осциллограммы с уменьшенным уровнем шума, позволяет программный пакет, работа которого основана на анализе нескольких сотен осциллограмм, записанных в одинаковых условиях и компенсации присутствующих на них шумов.

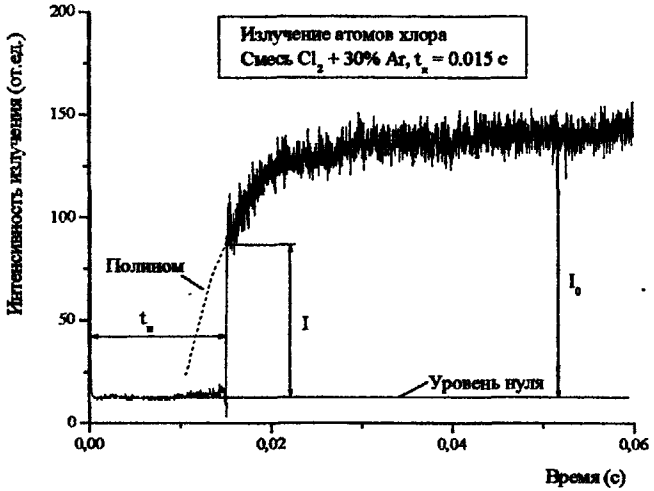


Рис. 5. Основные участки осциллограммы импульса. $t_п$ - время паузы, I - величина скачка интенсивности, I_0 - стационарная интенсивность.

Для определения коэффициента гетерогенной рекомбинации проводились серии из 10 измерений величины скачка на осциллограммах, полученных для 10 различных значений паузы. Длительности пауз выбирались в диапазоне 1 - 50 мс с шагом 5 мс. Для определения величины скачка и уровня стационарного излучения их обрабатывали полиномом 5 степени. Величина скачка I определялась от уровня нуля до точки пересечения полинома с вертикальным участком, соответствующим резкому возрастанию излучения в момент включения тока разряда. Несмотря на применение метода накопления полезного сигнала, уровень шумов оставался существенным. Кроме того, измеренные значения в некоторой степени являются субъективными, а процедура ручной обработки достаточно длительна, и сводит на нет все достоинства релаксационного метода как экспресс-метода. Поэтому, был разработан алгоритм и программа для автоматического анализа массива экспериментальных данных и нахождения величин скачка и стационара. Работа программы основана на анализе амплитудных спектров, в которые преобразуются исходные экспериментальные данные. Амплитудный спектр представляет собой зависимость

количества точек с данным значением от амплитуды. Поскольку данные АЦП дискретны и находятся в диапазоне 0..255, то для построения спектра из массива точек, соответствующего осциллограмме, извлекаются последовательно все точки. Значение каждой точки считается индексом в выходном массиве, и ячейка с данным индексом увеличивается на единицу. После обработки исходного массива, выходной массив с готовым спектром подвергается сглаживанию и нормализации по максимальному значению (255). Вид такого спектра изображен на рис. 6. Интересное свойство таких спектров заключается в том, что амплитуды наиболее часто встречающихся точек в исходном массиве изображаются максимумом. По ширине пика можно определить уровень шумов, а также определить участки на исходных осциллограммах с малым количеством точек. Поскольку на исходных осциллограммах можно выделить два уровня с постоянной амплитудой (уровень нуля и уровень стационара), то в спектре будет два максимума, по положению которых на оси x можно найти эти уровни. Максимум в области малых значений амплитуд соответствует уровню нуля, а в области больших амплитуд соответствует уровню стационара. Сами величины максимумов полезной информации не несут. Поскольку в области скачка находится очень мало точек, эта область изображается в спектре участком между двумя максимумами, где точки имеют нулевые или очень малые постоянные значения. Точка перехода большого максимума на горизонтальный участок соответствует скачку. Данный подход к обработке экспериментальных данных позволяет автоматизировать обработку больших объемов информации, и получать более точные значения коэффициента рекомбинации, так как исключается ошибка, связанная с субъективностью определения величины скачка интенсивности рабочей линии.

Заключительная часть главы посвящена математическому моделированию плазмы смесей, с целью нахождения коэффициентов скоростей процессов с участием электронов, в частности коэффициентов скоростей прямой диссоциации, диссоциативного прилипания, ионизации, коэффициенты диффузии ионов и электронов, а так же, расчетного коэффициента гетерогенной рекомбинации. Основные процессы приведены в таблице 1. Коэффициент рекомбинации рассчитывался из условия равенства скорости образования и гибели атомов. Для нахождения коэффициентов скоростей процессов с участием электронов численно решалось уравнение Больцмана методом Шермана. В результате решения рассчитывалась

функция распределения электронов по энергии (ФРЭЭ). Далее по ФРЭЭ и сечениям процессов вычислялись коэффициенты скоростей процессов с участием электронов. Сечения процессов были заимствованы из литературных данных. Концентрации электронов, ионов и их коэффициенты диффузии рассчитывались из системы балансных уравнений образования и гибели заряженных частиц.

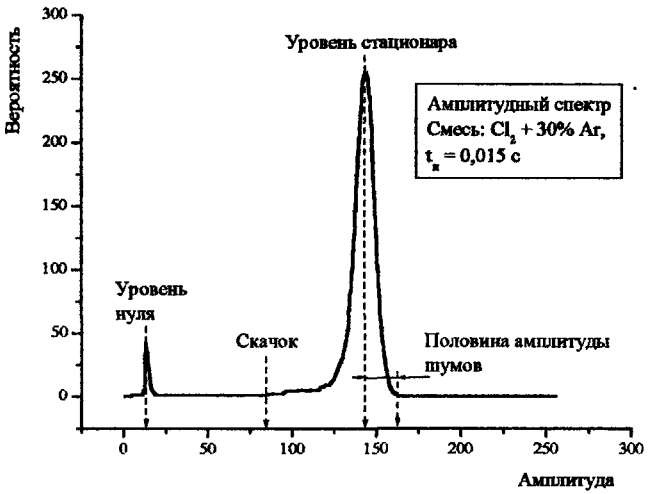


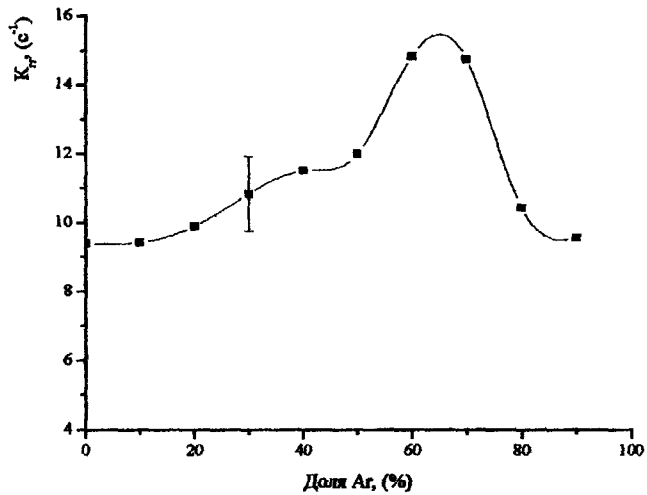
Рис. 6. Определение характерных точек на амплитудном спектре.

Таблица 1. Основные процессы образования и рекомбинации заряженных частиц (X - частицы газа - добавки).

ионизация	ион-ионная рекомбинация
$Cl_2 + e \rightarrow Cl_2^+ + 2e$	$Cl_2^+ + Cl^- \rightarrow 3Cl$
$Cl + e \rightarrow Cl^+ + 2e$	$Cl^+ + Cl^- \rightarrow 2Cl$
$X + e \rightarrow X^+ + 2e$	$X^+ + Cl^- \rightarrow X + Cl$
диссоциативное прилипание	**гетерогенная гибель**
$Cl_2 + e \rightarrow Cl + Cl^-$	$Cl_2^+ \rightarrow$ стенка
	$Cl^+ \rightarrow$ стенка
	$X^+ \rightarrow$ стенка
	$e \rightarrow$ стенка

В третьей главе приведены результаты экспериментального определения коэффициентов гетерогенной рекомбинации и математического моделирования плазмы смесей хлора с аргоном, кислородом, азотом и водородом. Рассмотрены зависимости концентраций основных частиц от состава смеси. В результате, было получено, что коэффициенты скорости прямой диссоциации изменяются в зависимости от состава смеси в диапазоне $(5.8 - 9.4)\cdot10^{-9}$ $см^3/с$, скорости диссоциативного прилипания $(2.1 - 2.5)\cdot10^{-10}$ $см^3/с$, гетерогенной рекомбинации (5 - 2) 1/с. Отмечается, что на кривых зависимостей концентрации молекул, концентрации электронов и коэффициентов прямой диссоциации от состава смеси нет явных максимумов, и характерных участков, с помощью которых можно было бы объяснить эффект поддержания концентрации атомов на постоянном уровне. Коэффициенты прямой диссоциации и диссоциативного прилипания растут при увеличении доли второго газа в смеси. Добавление в смесь малого количества аргона (до 10 %) приводит к резкому возрастанию скорости прямой диссоциации, в результате чего, скорость образования атомов становится больше чем в чистом хлоре.

Для других исследованных нами газов данный эффект не наблюдается. При увеличении содержания второго газа, скорость образования атомов хлора уменьшается. В смеси хлора с аргоном скорость их образования становится такой же, как и в чистом хлоре только при 40 % аргона. Зависимость коэффициента гетерогенной рекомбинации от доли второго газа, почти повторяет ход скорости образования атомов. Скорость процесса диссоциативного прилипания составляет не более 10 % от скорости прямой диссоциации молекул хлора, что позволяет считать основным процессом образования атомов прямую диссоциацию. Несмотря на то, что с увеличением содержания второго газа в смеси коэффициент скорости прямой диссоциации растет, сама скорость падает, так как концентрация молекул в исходной смеси изменяется много быстрее, чем изменяется концентрация электронов и коэффициент скорости. Тот факт, что концентрация атомов изменяется слабо, приводит к тому, что расчетный коэффициент рекомбинации повторяет ход скорости процесса образования атомов в процессе прямой диссоциации.



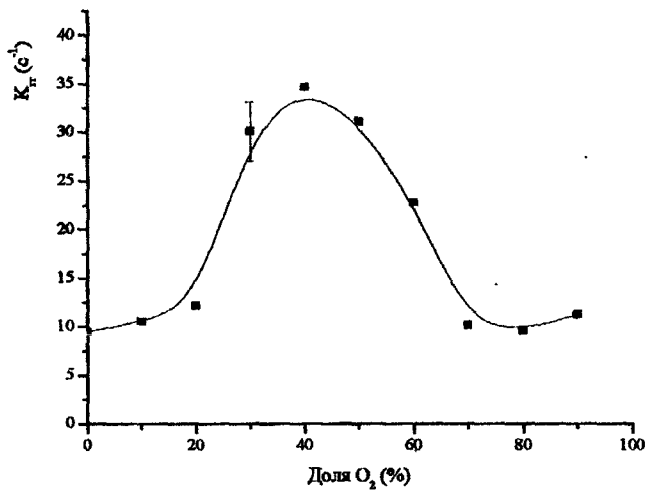


Рис. 7. Экспериментальная зависимость коэффициента гетерогенной рекомбинации от состава смеси.

Далее приведены экспериментально полученные зависимости коэффициента рекомбинации для смесей хлора с аргоном и кислородом (рис. 7). Зависимости характеризуются ярко выраженным максимумом. Положение максимума соответствует 65 % аргона в смеси Cl_2 - Ar и 40 % кислорода в смеси Cl_2 - O_2. Абсолютное значение коэффициента рекомбинации атомов хлора на стекле, наблюдаемое экспериментально, составляет для чистого хлора 10 c^{-1}. Это хорошо согласуется с данными, полученными при математическом моделировании с использованием концентраций атомов, измеренных в более ранних работах методом абсорбционной спектроскопии. Анализ результатов математического моделирования плазмы смесей хлора с аргоном, кислородом, азотом и водородом показал, что вычисленный с использованием ранее измеренных концентраций атомов хлора коэффициент гетерогенной рекомбинации, с увеличением доли газа - добавки уменьшается. Различие в ходе зависимости экспериментального и расчетного коэффициента рекомбинации атомов хлора от состава смеси связано в первую очередь с тем, что при математическом моделировании не учитывалось возможное влияние состава смеси на состояние поверхности стекла в зоне плазмы. При разряде в смесях на поверхность стекла наряду с атомами хлора воздействуют потоки УФ излучения, электронов, ионов, активных частиц газа - добавки. К последним относятся возбужденные атомы аргона в метастабильном состоянии, атомы и возбужденные молекулы водорода и кислорода. Величина и состав потоков активных частиц, ионов и УФ излучения зависят от состава смеси, что приводит к изменению состояния поверхности, ее температуры, поверхностной концентрации активных центров. Так как в процессе рекомбинации одной из стадий является десорбция молекулы Cl_2 в объем, можно предположить, что перечисленные выше потоки при взаимодействии с поверхностью могут вызвать изменение скорости образования активных центров и, соответственно, изменение коэффициента рекомбинации атомов хлора на стекле. На рис. 8 приведены данные по влиянию состава смеси на суммарный поток ионов. Аналогично потоку ионов изменяется и поток УФ излучения на поверхность. Для смесей Cl_2 - Ar и Cl_2 - H_2 зависимость потока ионов на поверхность от доли газа - добавки проходит через максимум, а для смесей Cl_2 - O_2 и Cl_2 - N_2 ярко выраженный максимум отсутствует. Очевидно, что учет влияния только ионной бомбардировки поверхности стекла на коэффици-

ент рекомбинации атомов хлора не объясняет в полной мере положение максимума на зависимости коэффициента рекомбинации от состава смеси, и требуется детальный анализ всех активирующих воздействий плазмы смесей на состояние и концентрацию поверхностных активных центров рекомбинации.

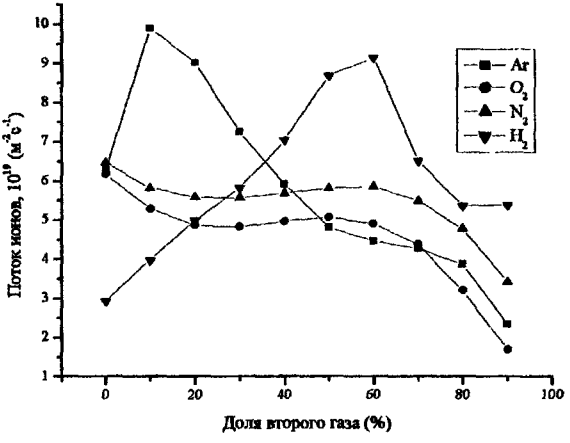


Рис. 8. Поток ионов (электронов) на стенку реактора.

Основные результаты и выводы:

1. Разработана экспериментальная установка для определения коэффициента гетерогенной рекомбинации атомов хлора непосредственно в зоне плазмы.
2. Разработан алгоритм автоматизированного анализа экспериментальных данных и определения коэффициента гетерогенной рекомбинации.
3. Впервые получены данные по коэффициенту рекомбинации атомов хлора на стекле, непосредственно в зоне плазмы, при разряде в чистом хлоре и его смесей с аргоном, кислородом, азотом и водородом. Полученное значение коэффициента рекомбинации для чистого хлора (10 1/с) хорошо согласуется с данными, полученными расчетным путем.

4. Установлено, что при изменении состава смеси коэффициент рекомбинации атомов хлора на стекле проходит через максимум, соответствующий 65 % содержанию аргона для смеси Cl_2 - Ar, и 40 % содержанию кислорода для смеси Cl_2 - O_2. Положение максимума для смеси Cl_2 - Ar соответствует максимуму скорости травления меди и золота в этой смеси.
5. Методами математического моделирования получены коэффициенты скоростей процессов с участием электронов в зависимости от состава плазмы.
6. Показано, что коэффициент скорости образования атомов хлора увеличивается с увеличением содержания второго газа в смеси, в то время как сама скорость образования уменьшается.
7. Из решения балансных уравнений образования и гибели заряженных частиц вычислены концентрации и потоки ионов на стенку, величина которых достигает до $9 \cdot 10^{19}$ $м^{-2}с^{-1}$.
8. Предложен механизм влияния состава смеси на коэффициент рекомбинации атомов хлора на стекле, связанный с изменением состава и величины потока ионов и нейтральных активных частиц на поверхность.

Основной материал диссертации изложен в следующих работах.

1. Балашов Д.И., Кириллов Ю.В. Ефремов А.М. Потоки УФ-квантов на поверхность в условиях плазмохимического травления в хлоре// Химия высоких энергий. – 1998. – Т 32, № 4. – С. 302 - 304.
2. Кириллов Ю.В., Ситанов Д.В., Светцов В.И. Исследование механизма образования атомов хлора в плазме смеси хлора с водородом// Химия высоких энергий. – 2000. – Т 34, № 3. – С. 147-151.
3. Кириллов Ю.В., Ситанов Д.В., Светцов В.И. Роль ионов и УФ-излучения в процессе травления арсенида галлия// Химия высоких энергий. – 2000. – Т. 34, № 5. – С. 377 - 381.
4. Кириллов Ю.В., Ситанов Д.В. Простой АЦП – приставка к ПК// Радио. – 2002. – № 4. – С. 17 - 19.
5. Ефремов А.М., Кириллов Ю.В., Светцов В.И. Потоки активных частиц на поверхность в плазме смеси хлор-аргон// Материалы IX конференции по физике газового разряда. – Рязань, 1998. – С. 34 - 35.

6. Шмачкова М.В., Кириллов Ю.В., Ситанов Д.В. Особенность релаксационной методики для исследования плазмы электроотрицательных газов// Молекулярная физика неравновесных систем: Материалы III Всероссийской научной конференции. – Иваново, 2001г. – С. 127 - 133.
7. Кириллов Ю.В., Ситанов Д.В. Параметры плазмы смесей хлора с аргоном, кислородом, азотом, водородом// Молекулярная биология, химия и физика неравновесных систем: Материалы I-ой Международной научной конференции. – Иваново, 2002. – С. 115 - 119
8. Кириллов Ю.В., Ситанов Д.В. Исследование параметров плазмы при импульсной модуляции тока разряда// Материалы 3-го Международного симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии. – Плес, 2002. – С. 392 - 395.
9. Кириллов Ю.В., Ситанов Д.В. Баланс атомов хлора в плазме смесей хлора с аргоном, кислородом, азотом, водородом// Материалы 3-го Международного симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии. – Плес, 2002. – С. 142 - 144.

Подписано в печать 6.11.2003 Усл. печ. л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ 14/11
Отпечатано в учреждении «Издательство ИГХТУ «Политех»
153460, г. Иваново, пр. Ф. Энгельса, 7.

2003-A
18032
* 18032