

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ В РЕАКТОРЕ НА БАЗЕ ВЧ ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА

С.В. Дудин

Харьковский национальный университет имени В.Н.Каразина
Украина

Поступила в редакцию 12.07.2006

Описана система автоматического мониторинга технологического процесса плазмохимического травления в реакторе на базе ВЧ индукционного разряда, позволяющая в условиях интенсивных ВЧ помех измерять основные параметры процесса, отображать на экране компьютера их текущие значения и временные зависимости, а также записывать протокол технологического процесса.

Опыт эксплуатации плазменного технологического оборудования свидетельствует, что высокое, повторяемое качество продукции могут гарантировать только устройства, в которых технологический процесс полностью автоматизирован [1]. При этом одним из ключевых факторов в достижении стабильного качества является оперативный контроль параметров технологического процесса и его подробное протоколирование [2]. Решение этой задачи в установках плазмохимического травления на базе ВЧ разрядов требует разработки специальных измерительных устройств, а также обычно осложнено высоким уровнем высокочастотных помех.

Настоящая работа посвящена описанию разработанной автором автоматизированной системы мониторинга технологического процесса плазмохимического травления в реакторе на базе ВЧ индукционного разряда, позволяющая в условиях интенсивных ВЧ помех измерять основные параметры процесса, отображать на экране компьютера их текущие значения и временные зависимости, а также записывать протокол технологического процесса.

Центральной частью установки является модуль плазмохимического и реактивного ионно-плазменного травления с реактором на базе комбинированного ВЧ индукционно-емкостного разряда, разработанный в Харьковском национальном университете имени В.Н. Каразина при поддержке Министерства промышленной политики Украины. Конструкция модуля предусматривает возможность независимого управления плотностью тока

ионов в диапазоне $0,1 - 10 \text{ мА/см}^2$ и их энергией в диапазоне $20 - 300 \text{ эВ}$ [3 - 5].

Принципиальная схема плазмохимического реактора изображена на рис. 1. Газоразрядная камера с металлическими стенками имеет радиус $R = 7 \text{ см.}$ и высоту $L = 6 \text{ см.}$ Крышка камеры из термостойкого стекла и трехвитковый медный индуктор охлаждаются потоком воздуха с помощью вентилятора, расположенного на крышке камеры. Рабочий объем откачивается турбомолекулярным насосом до остаточного давления порядка 10^{-6} Тор. Процесс травления проводится с использованием смесей аргона, кислорода, CF_4 и других газов при давлениях $10^{-3} \text{ Тор} < p < 10^{-1} \text{ Тор.}$

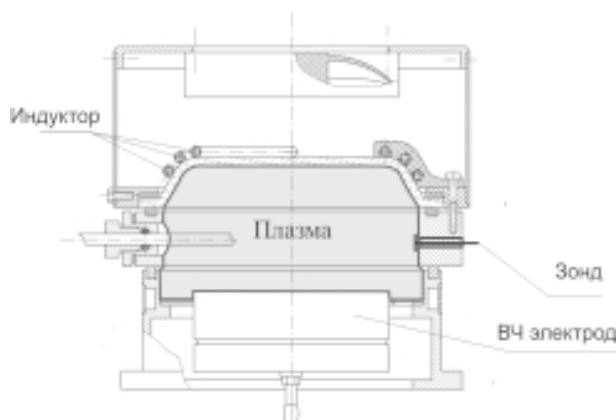


Рис. 1. Принципиальная схема плазмохимического реактора.

В нижней части камеры находится электрод-подложкодержатель из нержавеющей стали (диаметр рабочей области – 100 мм), на котором во время травления располагается обрабатываемая полупроводниковая пластина.

Блок-схема ВЧ питания и подключения измерительной системы показана на рис. 2. Высокочастотная мощность подводится к реактору от ВЧ генератора ГТВЭ-1000 (частота 13,56 МГц, мощность 0-1000 Вт) при помощи согласующего устройства (СУ), которое обеспечивает согласование фиксированного вещественного выходного сопротивления генератора с переменным комплексным импедансом плазменной нагрузки. Данное согласующее устройство одновременно обеспечивает ВЧ питанием как индуктор, создающий плазму в объеме реактора, так и электрод-подложкодержатель, что обеспечивает ускорение ионов плазмы в направлении обрабатываемой поверхности.

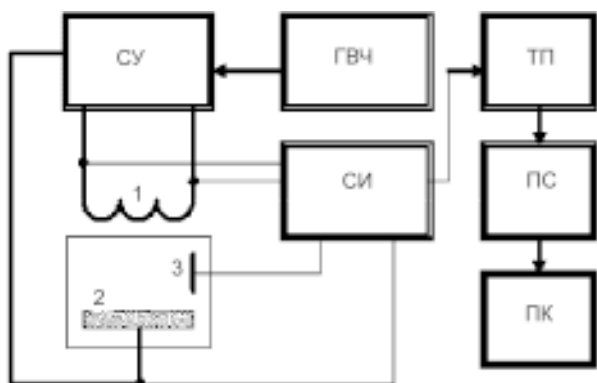


Рис. 2. Блок-схема подключения ВЧ питания и измерительной системы. 1 – индуктор, 2 – электрод-подложкодержатель, 3 – плоский зонд, ГВЧ – генератор высокой частоты, СУ – согласующее устройство, СИ – система измерения, ТП – терминальная плата, ПС – плата сопряжения, ПК – персональный компьютер.

Помимо давления газа и мощности ВЧ генератора, которые измеряются стандартными промышленными измерительными приборами, в данной системе необходимо контролировать еще 4 специфических параметра:

- амплитуда ВЧ напряжения на индукторе U_{ind} ;
- амплитуда ВЧ напряжения на электрод-подложкодержателе U_{AC} ;
- постоянное напряжение автосмещения на электрод-подложкодержателе U_{DC} ;
- плотность тока ионов из плазмы ВЧ индукционного разряда j_i .

Во избежание искажения сигналов и излучения высокочастотных помех проводники, которыми измерительная система подклю-

чается к ВЧ цепям, должны быть минимально возможной длины. В связи с этим система измерения разбита на несколько блоков: делители напряжения и детекторная часть расположены непосредственно на установке максимально близко к источникам измеряемых сигналов; затем сигнал (уже в виде постоянного напряжения) поступает на плату сопряжения с компьютером, расположенную на расстоянии нескольких метров от установки. Поскольку в системе присутствуют значительные ВЧ напряжения (до нескольких киловольт) и ВЧ токи (десятки ампер), особое внимание должно быть уделено защите от высокочастотных помех. Обязательным условием является экранирование детекторных цепей и ВЧ развязка между ними и платой сопряжения с компьютером.

Схема включения перечисленных устройств представлена на рис. 2, а их принципиальные электрические схемы показаны на рис. 3.

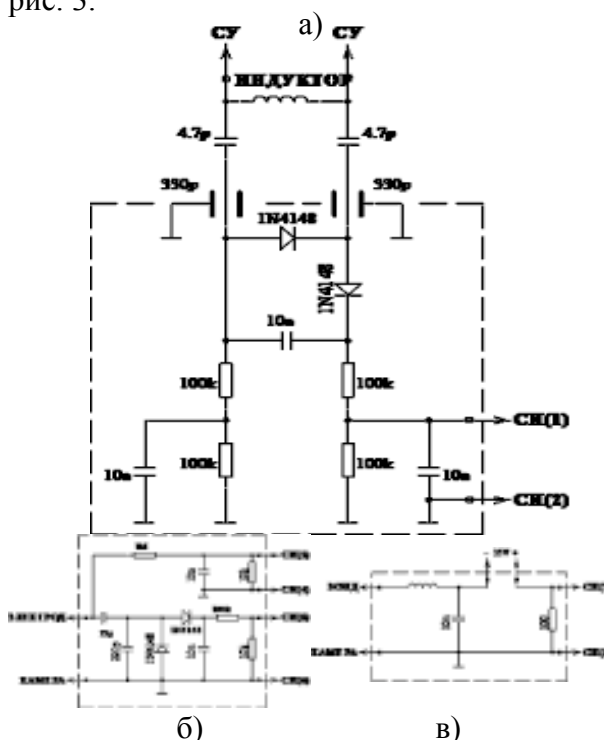


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема блоков измерения амплитуды ВЧ напряжения U_{ind} на индукторе (а), амплитуды ВЧ напряжения U_{AC} и постоянного напряжения автосмещения U_{DC} на электрод-подложкодержателе (б), постоянного тока зонда j_i (в).

Измерение амплитуды ВЧ напряжений на индукторе и потенциальном электроде производится с использованием амплитудных

детекторов ВЧ напряжения, схемы которых представлены на рис. 3а, б. Амплитудные детекторы выполнены по схеме емкостного делителя напряжения с последующим выпрямлением сигнала при помощи диодно-конденсаторной выпрямительной схемы с удвоением входного напряжения.

При измерении напряжения на индукторе возникает проблема: измеряемой величиной является переменная разность потенциалов между его выводами, причем ни один из них не подключен к корпусу, на обоих выводах присутствует ВЧ напряжение, которое может достигать нескольких киловольт. В то же время, выходной сигнал должен быть привязан к «земле». Для решения этой проблемы была применена измерительная схема, приведенная на рис. 3а. Для того, чтобы привести измеряемые сигналы к диапазону <100 В (максимальное рабочее напряжение используемых диодов) используются емкостные делители, собранные из высоковольтных конденсаторов типа КВИ и проходных конденсаторов КПП-2, выпрямленное напряжение при помощи резистивного делителя приводится в соответствие с диапазоном входных напряжений платы сопряжения с компьютером. Номиналы элементов схемы рис. 3а выбирались с учетом диапазона рабочих напряжений на индукторе (0,5 – 5 кВ).

При измерении постоянного напряжения автосмещения электрода-подложкодержателя основной проблемой является наличие на электроде ВЧ напряжения с амплитудой, превышающей измеряемое постоянное напряжение. Для блокирования переменной составляющей в описываемой системе применен простейший RC фильтр (рис. 3б), который позволяет снизить амплитуду ВЧ сигнала до уровня десятков милливольт. Эксперименты показали, что использование резистора для блокирования ВЧ сигнала более эффективно, чем применение индуктивных элементов, поскольку обеспечить их сопротивление переменному току более нескольких десятков килоом на частоте 13,56 МГц проблематично, тогда как использование резистора сопротивлением 1 МОм в данной схеме позволяет добиться желаемого результата.

Диапазон измерения амплитуды ВЧ напряжения на электроде определяется энергией ионов, необходимой для проведения различных технологических процессов (100 – 500 В). Этим определялись номиналы элементов схемы рис. 3б.

Измерения плотности тока ионов на стенке ГРК проводится при помощи плоского одиночного зонда площадью 1 см^2 , включенного в электрическую схему, изображенную на рис. 3в. На зонд подается постоянное напряжение -25В , что обеспечивает работу на участке ионного насыщения зондовой характеристики [6].

Компьютер подключен к системе измерения с помощью платы согласования PCI-1710HG производства компании Advantech, которая позволяет оцифровывать с 12-битным разрешением до 16 потенциальных или до 8 дифференциальных сигналов в диапазоне напряжения от 10 мВ до 10 В.

Входными сигналами для платы сопряжения с компьютером являются 4 сигнала, приведенных к стандартному уровню напряжения 0 – 5 В: постоянное и переменное напряжение на электроде-подложкодержателе, амплитуда напряжения на выводах индуктора и ток плоского зонда. Для повышения помехозащищенности все входы включены по дифференциальной схеме (используются 8 входов платы).

Специфической особенностью мощных высокочастотных систем является большой уровень высокочастотных помех, что является серьезной проблемой при измерениях. В данном случае конструирование системы измерения осложняется тем фактом, что корпус реактора, корпус согласующего устройства и «земля» системы измерения оторваны по высокой частоте от «земли» установки. Это сделано, чтобы избежать появления «земляных петель», приводящих к повышению уровня ВЧ помех. Таким образом, измеряемые сигналы (напряжение 1 – 5 В) замаскированы ВЧ наводкой, превышающей по амплитуде полезный сигнал на порядок (измеренная амплитуда 20 – 50 В).

Для подавления этих помех были применены RC фильтры, смонтированные на тер-

минальной плате PCLD-8710 производства компании Advantech. Все 8 фильтров имеют идентичную конструкцию и состоят из резистора сопротивлением 750 кОм, включенного последовательно с источником сигнала, и конденсатора емкостью 0,1 мкФ, шунтирующего аналоговые входы на аналоговую “землю” платы. Таким образом, постоянная времени фильтра составляет порядка 0,1 секунды, что позволяет эффективно подавить как ВЧ помехи частотой 13,56 МГц, так и сетевые помехи частотой 50 Гц.

Высокоомные резисторы на всех аналоговых входах выполняют еще и защитную функцию. Поскольку в данной системе присутствуют высокие напряжения (до нескольких киловольт), существует потенциальная возможность попадания этого напряжения на входы платы аналогового ввода при сбоях, неисправностях и т.п. В этом случае аналоговые входы платы, рассчитанные на максимальное напряжение 10 В, неизбежно выйдут из строя. В выбранной конфигурации системы фильтров абсолютно все цепи (включая «земляные») подключаются к плате через высокоомные резисторы, благодаря чему, даже при попадании на вход фильтра напряжения в несколько киловольт, входной ток не превысит нескольких миллиампер, что является безопасным для выбранной платы.

Программное обеспечение автоматизированной системы измерения разрабатывалось на базе системы ADAQVIEW компании Advantech. Данная система позволяет разрабатывать программное обеспечение измерительно-управляющих систем в виде структурных диаграмм при помощи графического интерфейса. В данном случае функции программного обеспечения достаточно просты и сводятся к масштабированию входных сигналов, построению временной зависимости и их записи в текстовый файл. Периодичность измерения выбрана 0,5 секунды, поскольку в системе отсутствуют более быстро меняющиеся сигналы.

Во время работы оператор взаимодействует с «передней панелью» автоматизированной системы измерения, изображенной на экране компьютера. Ее внешний вид показан

на рис. 4. В течение технологического процесса на экране компьютера в реальном масштабе времени отображаются измеренные значения основных параметров системы, а также их зависимость от времени. При нажатии на кнопку “Запись” происходит запись протокола процесса на жесткий диск компьютера.

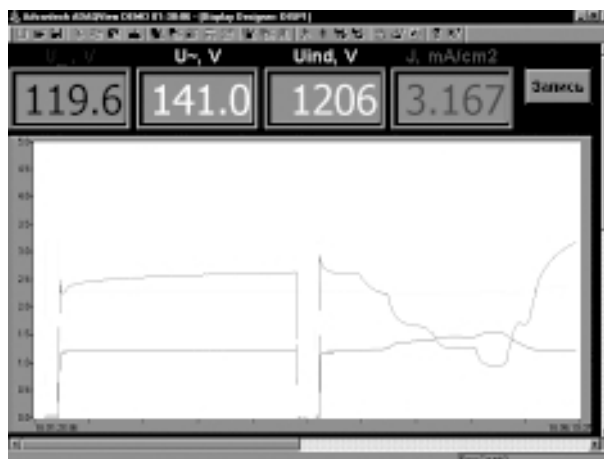


Рис. 4. Внешний вид разработанной “передней панели” автоматизированной системы измерения.

На рис. 5 в графическом виде представлен записанный протокол процесса травления оксида кремния. На временной зависимости хорошо видны основные стадии процесса: на 3 секунде был включен ВЧ генератор, на 20 секунде произошел пробой плазмы, затем следует процесс начального формирования параметров разряда в течение 10 – 20 сек, и стабильная фаза процесса травления.

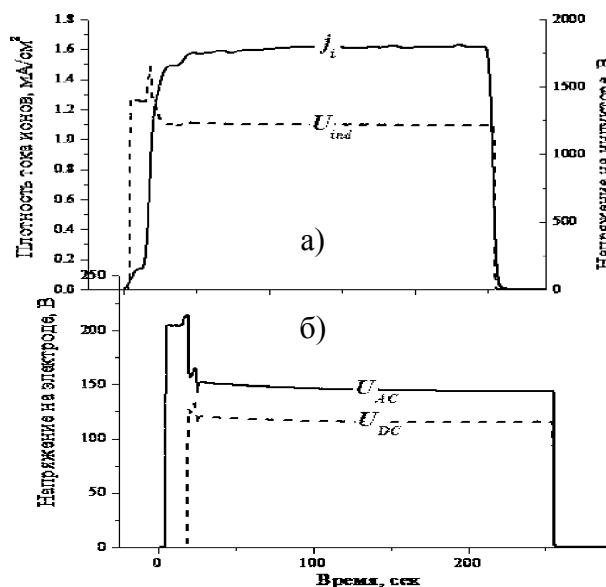


Рис. 5. Записанный протокол процесса настройки согласующего устройства.

Таким образом, применение описанной системы позволяет подробно изучить все стадии технологического процесса плазменного травления, включая быстротекущие переходные процессы, повысить точность и надежность измерения параметров разряда. Графическое представление временных зависимостей параметров разряда позволяет оценить стабильность основных технологических факторов, а запись протокола процесса может быть полезна при анализе результатов травления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Roth J. Reece. Industrial plasma engineering. – Institute of Physics Publishing, Bristol, UK, 2001.
2. Cooke M.J., Hassall G. Low-pressure plasma sources for etching and deposition//Plasma Sources Science and Technology. – 2002. – Vol. 11. – P. A74-A79.
3. I. Denysenko, S. Dudin, A. Zykov, N. azarenkov, “Ion flux uniformity in inductively coupled plasma sources,” *Physics of Plasmas*, vol. 9, no.11, pp. 4767-4775, Nov. 2002.
4. Gapon A.V., Dahov A.N., . Dudin S.V, Zykov A.V., Azarenkov N.A. 2D fluid model for interactive development of ICP technological tools// Problems of Atomic and Technology. – 2006. – No. 6. – P. 186-188.
5. Dudin S.V., Zykov A.V., Dahov A.N., Farenik V.I. Experimental research of ICP reactor for plasma-chemical etching//Problems of Atomic and Technology. – 2006. – No. 6. – P. 189-191.
6. Lieberman M.A., Lichtenberg A.J.//Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. – Wiley: New York, 1994.

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСА ПЛАЗМОХІМІЧНОГО ТРАВЛІННЯ В РЕАТОРІ НА БАЗІ ВЧ ІНДУКЦІЙНОГО РОЗРЯДУ

С.В. Дудін

Описано систему автоматичного моніторингу технологічного процесу плазмохімічного травління в реакторі на базі ВЧ індукційного розряду, яка дозволяє в умовах інтенсивних ВЧ перешкод вимірювати основні параметри процесу, відображати на екрані комп'ютера їх поточні значення та часові залежності, а також записувати протокол технологічного процесу.

AUTOMATED SYSTEM FOR REAL-TIME CONTROL OF PLASMA-CHEMICAL ETCHING PROCESS IN ICP REACTOR

S.V. Dudin

The system for automatic monitoring of the plasma-chemical etching process in the ICP reactor is described, which in conditions of intense RF interference allows measuring the main process parameters, displaying the parameters and its time dependencies on the computer monitor as well as recording the protocol of the technology process.