

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА С С.В.Ч.-Э.Ц.Р.-ПЛАЗМОЙ

© 1996 г. Н. П. Полуэктов, Ю. П. Царьгородцев

Московский государственный университет леса
141001, Мытищи-1 Московской области

Поступила в редакцию 19.10.95 г.

Описана экспериментальная плазменная технологическая установка, действующая на основе с.в.ч.-разряда в условиях электрон-циклотронного резонанса. Установка состоит из источника плазмы диаметром 150 мм, плазмохимического реактора и автоматизированной системы диагностики. Магнитное поле источника создается системой из двенадцати постоянных магнитов и трех электромагнитов. Поле электромагнитов характеризуется высокой однородностью и малым градиентом. Система диагностики на базе персонального компьютера и аппаратуры КАМАК позволяет проводить зондовые и спектральные измерения параметров плазмы, а также регистрировать рабочие параметры установки. На расстоянии 62 см от источника плазмы при с.в.ч.-мощности ≤ 1 кВт и давлении ≤ 1 мТорр достигнуты следующие характеристики разряда: плотность ионного тока насыщения 6 мА/см^2 с неоднородностью 5% на диаметре 15 см и 12 мА/см^2 с той же неоднородностью на диаметре 10 см.

Плазмохимический реактор с с.в.ч.-ионизацией и электрон-циклотронным нагревом предназначен для получения тонких пленок и травления полупроводниковых структур. Установки такого типа по сравнению источниками плазмы, которые традиционно используются в технологиях микроэлектроники, обладают рядом достоинств. Отсутствие накаливаемого катода позволяет длительно работать с химически активными газами; имеется возможность создания плазмы с высокой (10^{11} – 10^{13} см^{-3}) концентрацией при низком давлении; большая (до 10%) степень ионизации; низкая (10–50 эВ) и контролируемая энергия ионов позволяет изменять скорость и анизотропию травления без нарушения структуры подложки; высокая пространственная однородность плазмы дает возможность обрабатывать подложки диаметром 150–200 мм.

В описываемой установке используется магнитная система, состоящая из соленоидальных и постоянных магнитов, позволяющая в широких пределах изменять пространственное распределение концентрации плазмы.

Схема установки приведена на рис. 1. Вакуумная камера состоит из двух блоков: источника с.в.ч.-плазмы 1 и плазмохимического реактора 2 для проведения технологических процессов. Источник плазмы представляет собой цилиндрический резонатор диаметром 150 мм и длиной 250 мм, закрытый с одной стороны кварцевым стеклом и открытой с другой. Корпус плазмохимического реактора $\varnothing 350$ мм и длиной 650 мм имеет шесть боковых штуцеров с вакуумными уплотнениями. Держатель подложки 3 изолирован от вакуумной камеры, поэтому на подложку можно подавать

как постоянное напряжение, так и переменное частотой 13.56 МГц от генератора 26. Вакуумная камера изготовлена из листа нержавеющей стали X18N10T толщиной 2 мм и представляет собой разборную конструкцию, отдельные части которой соединяются при помощи фланцев с резиновыми уплотнениями. Фланец входного кварцевого окна и источник плазмы охлаждаются проточной водой.

Для создания вакуума в камере используются механический насос ВН-4 производительностью 50 л/с и два турбомолекулярных насоса ВМН-500 (з-д "Луч", г. Кострома), включенных параллельно, с производительностью 500 л/с каждый. Давление измеряется приборами ВИТ-2 и ВИ-14. Скорость откачки регулируется шиббером с приводом от электродвигателя. Остаточное давление в камере ≤ 1 мкТорр. Система подачи рабочего вещества имеет две одинаковые газовые магистрали, которые могут использоваться как вместе, так и по отдельности. Рабочий газ из баллона 4 проходит регулятор давления РДМ-1 (5), электронный расходомер-натекаль РРГ-1 (6) и поступает в вакуумную камеру вблизи входного кварцевого окна и, при необходимости, вблизи подложки. Рабочее давление составляет 0.05–10 мТорр, а расход газа – 1–100 $\text{см}^3/\text{мин}$.

С.в.ч.-система выполнена с учетом требований, которые обсуждались в литературе [1]. В качестве с.в.ч.-генератора частотой 2.45 ГГц используется магнетрон М-105 (7), у которого радиаторы воздушного охлаждения заменены на навитые на корпус магнетрона трубки водяного охлаждения. Такая доработка улучшает тепловой режим прибора при длительной непрерывной работе и позволяет

эксплуатировать его при выходной мощности до 1 кВт (паспортная мощность 650 Вт) без заметного уменьшения надежности. С.в.ч.-волна передается от генератора к источнику плазмы по прямоугольному волноводу сечением 90×45 мм² на волне TE_{10} . В волноводном тракте установлены водоохлаждаемые циркулятор с согласованной нагрузкой 8, с.в.ч.-ваттметр 9 и трехшлейфовый согласующий трансформатор штыревого типа 10. Импеданс-трансформатор предназначен для минимизации отраженной мощности при различных режимах работы установки. Для сопряжения волноводного тракта прямоугольного сечения с источником плазмы, корпус которого фактически представляет собой круглый волновод с основной модой TE_{11} , служит плавный переход 11. С.в.ч.-волна проходит внутрь источника плазмы через кварцевое окно толщиной 23 мм и $\varnothing 150$ мм.

Для питания генератора применяется доработанный серийный регулируемый высоковольтный источник КИЭ-5 (з-д "Луч", г. Кострома). Для уменьшения максимального выходного напряжения с 9 до 4,5 кВ в каждой вторичной обмотке силового трансформатора отключены две секции из четырех. В схему управления введена дополнительная плавная регулировка мощности. В схему накала магнетрона введен импульсный стабилизатор напряжения (3,15 В, 14 А), который при сопротивлении нагрузки ниже номинальной работает как стабилизатор тока на 18 А. Его применение не только повышает стабильность рабочего режима магнетрона, но и ограничивает на безопасном уровне ток через нить накала в момент включения, что существенно повышает ресурс магнетрона. Стабилизатор, а также его выпрямитель и фильтр размещены в высокочастотном блоке вместе с магнетроном и накальным трансформатором. При эксплуатации с.в.ч.-системы было замечено, что пульсации анодного напряжения магнетрона с уровнем ~3% и частотой 300 Гц (двухполупериодная трехфазная схема выпрямления) по данным зондовых измерений приводят к пульсациям концентрации плазмы с той же частотой, но с уровнем до 30%. Это объясняется, по-видимому, нелинейностями процессов поглощения с.в.ч.-мощности плазмой. Насколько этот эффект влияет на продолжительные по времени процессы травления и напыления, сказать сложно, но диагностика плазмы при этом чрезвычайно затруднена. Для снижения пульсаций анодного питания, а следовательно, и выходной мощности магнетрона в схему выходного фильтра добавлен конденсатор емкостью 50 мкФ. При этом пульсации напряжения снизились до уровня $< 0,2\%$, а пульсации концентрации плазмы на частоте сети — до неразличимого уровня (здесь не рассматриваются высокочастотные колебания, связанные с неустойчивостями плазмы).

Результаты многих опубликованных в последнее время исследований ясно показывают, что

важнейшие параметры э.ц.р.-плазмы, которые в целом определяют технологические характеристики установок данного класса, существенным образом зависят от пространственной конфигурации магнитного поля [2-4]. Расположение относительно подложки и форма эквивалентной поверхности 875 Гс, которая определяет зону электрон-циклотронного резонанса для частоты $f = 2,45$ ГГц (так называемый э.ц.р.-слой), влияют на радиальную однородность как концентрации плазмы, так и плотности ионного тока насыщения. Градиент магнитного поля определяет вид функции распределения ионов по энергиям, а также угловые распределения средней кинетической энергии направленного движения ионов. Последний факт имеет решающее значение для прецизионного травления подложек большого диаметра, когда, кроме высокой скорости, требуется высокая анизотропия и пространственная однородность процесса. Таким образом, изменяемая конфигурация магнитного поля в установке является инструментом для формирования параметров плазмы, необходимых или желательных для той или иной технологии.

Магнитное поле в нашей установке создается системой, состоящей из трех соленоидальных электромагнитов 13-15. Рассчитанная на э.в.м. для тока 240 А конфигурация поля, создаваемого электромагнитами, приведена на рис. 2. Радиальная неоднородность индукции составляет 4% на диаметре 150 мм. Середина первого магнита 13, имеющего наибольшее число витков — 120, расположена в сечении входного кварцевого окна. Второй магнит 14, имеющий 40 витков, расположен в выходном сечении источника плазмы. Поле, создаваемое этими двумя магнитами, имеет максимум (1080 и 1350 Гс при токах в обмотках 240 и 300 А соответственно) на внутренней поверхности входного окна, а магнитная поверхность 875 Гс, определяющая расположение э.ц.р.-слоя, находится от него на расстоянии 10 и 12 см соответственно.

Второй магнит уменьшает продольный градиент поля до 20-40 Гс/см в области магнитной поверхности 875 Гс и делает эту поверхность плоскопараллельной окну, что способствует получению однородной по радиусу плазмы (особенно, когда подложка расположена в непосредственной близости от э.ц.р.-зоны) [3]. Область в источнике плазмы, где магнитное поле больше резонансного, т.е. $B > B_{ce} = 875$ Гс, является зоной распространения электромагнитной волны типа "свист" (вистлер), которая затем поглощается в этой области [5, 6]. Создание вблизи входного окна зоны вистлер-нагрева позволяет в установках данного типа достигать концентраций больших, чем критическая ($7,4 \cdot 10^{10}$ см⁻³ для частоты $f = 2,45$ ГГц), и, кроме того, добиваться лучшего согласования с.в.ч.-тракта с источником плазмы.

магнитный усилитель, установленный в цепи первичной обмотки понижающего трансформатора.

Кроме электромагнитов, используется система из 12-ти постоянных Sm-Co-магнитов 12. Столбики постоянных магнитов размером 15 × 20 × 120 мм расположены (см. рис. 3) симметрично на внешней поверхности источника плазмы 1 между трубками водяного охлаждения 3 и окружены пластиной-магнитопроводом 4. Каждый столбик представляет собой набор из 18-ти пластинок размером 20 × 20 × 5 мм с одноименными в продольном направлении полюсами (см. рис. 1). По азимуту столбики располагаются чередующимися полюсами. Таким образом, имеется возможность работать с магнитным полем, создаваемым только электромагнитами, только постоянными магнитами и гибридным магнитным полем.

Все измерения на данной установке проводятся при помощи измерительно-вычислительной системы, собранной на базе компьютера PC/AT-286 и аппаратуры КАМАК. Основные параметры плазмы, такие как концентрация электронов и ионов, ионный ток насыщения, потенциал плазмы, плавающий потенциал, температура и функция распределения электронов по энергиям, определяются из зондовых измерений методом вольт-амперных характеристик (в.а.х.) [7]. Кроме плазменных параметров, регистрируются следующие данные: расход рабочего газа, падающая, отраженная и проходящая с.в.ч.-мощности, ток в первом электромагните и создается протокол эксперимента.

Используются электростатические зонды Ленгмюра, которые вводятся в плазму через уплотняемые штуцеры на корпусе вакуумной камеры. Первые два зонда расположены соответственно на расстоянии $z_1 = 30$ см (выходное сечение источника) и $z_2 = 60$ см (сечение подложки) от входного окна и передвигаются в радиальном направлении. Третий вводится через штуцер на торцевом люке и передвигается в осевом направлении. Зонды состоят из медной экранирующей трубки внешним диаметром 5 мм, внутри которой проходит W-проволока Ø0.35 мм, отделенная от экрана керамическим изолятором. Длина выступающей в плазму части зонда составляет 10 мм. Сверху на медный экран надета кварцевая трубка, что предотвращает загрязнение плазмы медью. Для уменьшения влияния магнитного поля рабочая часть зондов ориентирована перпендикулярно линиям индукции.

Регистрация в.а.х. проводится следующим образом (см. рис. 1). Линейно изменяющееся напряжение с цифроаналогового преобразователя ЦАП-10 подается на высоковольтный усилитель ВУ, который имеет следующие технические характеристики: максимальный диапазон выходного напряжения от -80 до +80 В при выходном

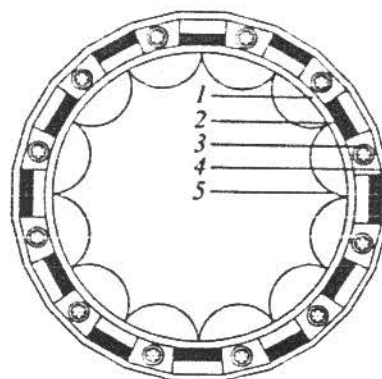


Рис. 3. Расположение постоянных магнитов. 1 – стенка источника плазмы, 2 – постоянные магниты, 3 – трубки охлаждения, 4 – магнитопровод, 5 – линии индукции магнитного поля.

токе до 500 мА, скорость нарастания выходного напряжения 10 В/мкс. Выходное напряжение с усилителя в пределах указанного диапазона через измерительный блок ИБ поступает на зонд 16. ИБ, в составе которого коммутируемые делители напряжения и токоизмерительные резисторы, а также два измерительных усилителя, выдает два напряжения, одно из которых пропорционально току на зонд, а другое – напряжению на зонде. Эти сигналы поступают на аналоговый мультиплексор МУЛ типа 752 и далее на АЦП₁ (типа АЦП-12). Поскольку токи на зонд при регистрации ионной и электронной ветвей в.а.х. отличаются более чем на порядок, требуется управлять чувствительностью токового измерительного усилителя в процессе регистрации. Это осуществляется по сигналу программы через модуль управления реле МУР (РУР-1). В.а.х. зонда, состоящая максимум из 320-ти пар точек “напряжение–ток”, регистрируется за время <2 с, что позволяет проводить измерения в химически активных средах в условиях образования твердых осадков. Программа зондовых измерений имеет в составе встроенную графику, что позволяет оперативно оценивать полученные данные и проводить их отбраковку. Программа обработки в.а.х. сглаживает данные сплайнами, вычисляет первую и вторую производные для определения соответственно потенциала плазмы и функции распределения электронов по энергиям, а также позволяет в режиме интерактивной графики искать характерные точки в.а.х. и ее производных.

Для измерения расхода рабочих газов сигналы с электронных регуляторов расхода газа б заводятся на аналоговый мультиплексор и далее поступают на АЦП₁. Для регистрации тока электромагнитов последовательно включается измерительный шунт 500 А/75мВ, аналоговый сигнал с которого приходит на АЦП₂ типа 701. Последний имеет гальваническую развязку по входу и

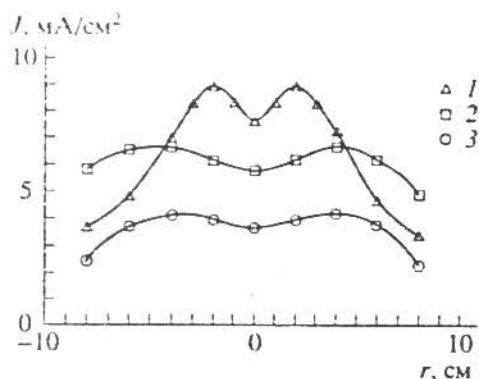


Рис. 4. Радиальное распределение плотности ионного тока насыщения на выходе источника при значениях магнитного поля и проходящей мощности: 900 Гс, 600 Вт (1); 1100 Гс, 600 Вт (2); 1100 Гс, 400 Вт (3). Аргон, $p = 0.32$ мТорр, $z = 30$ см.

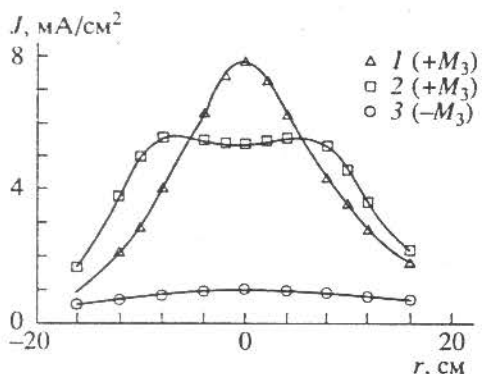


Рис. 5. Радиальное распределение плотности ионного тока насыщения на расстоянии $z = 62$ см от входного окна при значениях магнитного поля: 900 Гс (1); 1100 Гс (2, 3). $+M_3$ – дальний магнит включен, $-M_3$ – дальний магнит выключен. Проходящая мощность 600 Вт.

программно-переключаемые диапазоны, что делает его очень удобным для измерений в цепях большой мощности. С.в.ч.-мощность в волноводном тракте измеряется следующим образом. Ваттметр 9 (изготовлен в НПО НИИФТРИ) представляет собой отрезок волновода сечением 90×45 мм², в котором на определенном расстоянии друг от друга вдоль узких стенок установлены проволочные болометры. Вместе с термокомпенсирующими болометрами они соединены в четыре мостовые схемы, каждая из которых снабжена усилителем. Аналоговые сигналы с усилителей поступают на мультиплексор и АЦП₁. Падающая, отраженная и проходящая с.в.ч.-мощности вычисляются по этим значениям.

При измерении спектра плазмы ее излучение по кварцевому световоду 22 поступает на вход монохроматора МДР-12 и регистрируется ФЭУ-100 (23), сигнал с которого через усилитель У5-9 (25) и мультиплексор проходит на АЦП₁. Модуль МУШД уп-

равляет, шаговым двигателем, вращающим дифракционную решетку монохроматора. Температура ионов и нейтралов регистрируется по доплеровскому уширению спектральных линий. Для этого оптическое излучение плазмы выводится через один из смотровых штуцеров и при помощи зеркала 17 направляется на оптическую схему. Последняя состоит из линзы 18, монохроматора или интерференционного светофильтра 20 и интерферометра Фабри-Перо 19. Интерференционная картина регистрируется телевизионной камерой КТП-85 (21), входящей в комплект промышленной телевизионной установки ПТУ-64 (НПО "Волна", г. Новгород). В этой камере применяется супервидикон ЛИ-702-3 со встроенным электронно-оптическим усилителем, поэтому она может работать при малой освещенности – вплоть до 0.25 лк. Полный телевизионный сигнал с камеры поступает на модуль ВИДЕО-8 (ПО "Электроприбор", г. Чебоксары), который по команде управляющей программы запоминает кадр в виде $256 \times 256 \times 8$ бит за время 20 мс. Буферная память модуля рассчитана на запись четырех кадров изображения. Программа обработки интерферограмм имеет графическую часть и позволяет определять температуру ионов и нейтралов по обработанному контуру регистрируемых спектральных линий. В наших экспериментах температура нейтралов была в пределах 1000–2000 К, ионов – 2000–7000 К.

Одним из важнейших параметров в установках данного типа является распределение плотности ионного тока, так как во многих случаях именно ионы играют определяющую роль в реакциях, происходящих на подложке. На рис. 4 представлены радиальные распределения плотности ионного тока насыщения на расстоянии $z = 30$ см от окна в зависимости от магнитного поля электромагнитов в отсутствие постоянных Sm-Co-магнитов (здесь и далее указана величина поля на внутренней поверхности входного окна – B_w) и падающей мощности. На графике видно, что при магнитном поле $B_w = 900$ Гс разряд сильно неоднороден по радиусу. Визуально он проявляется в виде зерна с яркой приосевой областью. В этом состоянии э.ц.р.-слой локализован в непосредственной близости от входного окна, и интенсивный нагрев плазмы происходит в центральной его области, характеризующейся максимумом электрического поля волны для моды TE_{11} . При увеличении магнитного поля до значения $B_w = 1100$ Гс разряд становится более однородным, однако наблюдается провал плотности ионного тока, а значит и концентрации плазмы $\sim 10\%$ в приосевой области. Это соответствует расположению э.ц.р.-слоя на расстоянии около 10 см от окна и наличию зоны вистлер-нагрева в области между окном и слоем. Аналогичные радиальные распределения, соответствующие расстоянию $z = 62$ см от окна, показаны на рис. 5. Провал концентрации плазмы на

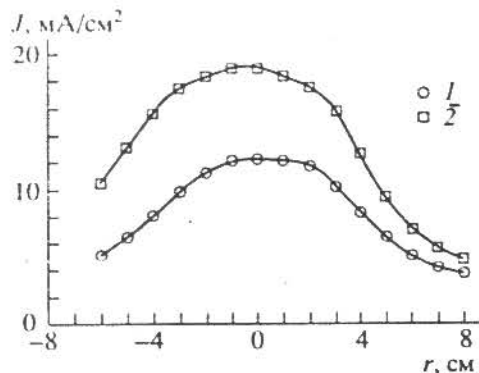


Рис. 6. Радиальное распределение плотности ионного тока насыщения на выходе источника при давлениях: 0.5 мТорр (1); 1.0 мТорр (2). Поле электромагнитов $B_W = 945$ Гс. Установлены постоянные магниты. Криптон, $P = 900$ Вт, $z = 30$ см.

оси, о котором говорилось выше, здесь выражен значительно меньше. Графики на рис. 5 иллюстрируют также положительное влияние третьего магнита, установленного на выходе плазмохимического реактора. Видно, что без этого магнита плотность ионного тока насыщения вследствие ухода плазмы на стенки падает в несколько раз.

Добавление постоянных магнитов приводит к двухкратному повышению плотности плазмы (плотность ионного тока насыщения 15 mA/cm^2), но при этом однородность ухудшается (рис. 6).

Описанная экспериментальная установка предназначена для проведения систематических исследований в области плазменных технологий микроэлектроники [8].

Работа выполнялась при поддержке фонда "Технические Университеты России".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Asmussen J.* // J. Vac. Sci. Technol. 1989. V. A7. P. 883.
2. *Matsuoka M., Ono K.* // J. Vac. Sci. Technol. 1988. V. A6. P. 25.
3. *Samukava S., Nakamura T.* // Japanese J. of Appl. Phys. 1991. V. 30. № 11B. P. 3147.
4. *Okuno Y., Ohtsu Y., Fujita H.* // J. Appl. Phys. 1993. V. 74. P. 5990.
5. *Popov O.A.* // J. Vac. Sci. Technol. 1991. V. A9. P. 711.
6. *Гинзбург В.Л.* Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967.
7. *Козлов О.В.* Электрический зонд в плазме. М.: Наука, 1969.
8. *Poluektov N.P., Kharchenko V.N., Zargorodzev Yu.P.* // Proc. 11-th Inter. Conf. Gas Discharges and their Applications. Tokyo. 11-15 Sept., 1995.