

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ИОННО-ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ПЛАЗМОЙ КОМБИНИРОВАННОГО РАЗРЯДА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220027, Республика Беларусь*

В современной технике формирования и обработки тонких пленок все более широкое применение начинает находить плазма газового разряда, возбуждаемая под действием электромагнитных полей диапазона сверхвысокой частоты (СВЧ) [1, 2]. Это обусловлено тем, что СВЧ разряд обеспечивает повышенную эффективность ионизации и соответственно высокие скорости газоплазменных реакций ионизированной среды с поверхностью твердого тела [3, 4].

Одной из разновидностей СВЧ разряда является комбинированный разряд, формируемый путем наложения на СВЧ разряд электромагнитного поля низкочастотного (НЧ) или высокочастотного (ВЧ) диапазона, обеспечивающего возбуждение самостоятельного газового разряда. При таком способе поддержания плазмы появляется возможность дополнительного управления энерговкладом в плазменный объем и энергией заряженных плазменных частиц [5], что в свою очередь существенно изменяет физико-химические процессы в объеме неравновесной плазмы и на границе раздела плазма – твердое тело.

Совместное воздействие разночастотных полей ускоряет протекание плазменных процессов, позволяет эффективно управлять качественным составом и энергетическими характеристиками плазмы вблизи поверхности подложки, способствует достижению более равномерного распределения характеристик плазмы в зоне формирования разряда или обработки подложек, повышает качество процесса за счет введения дополнительного, легко автоматизируемого канала управления процессом обработки.

Комбинированные разряды этого типа являются новым, малоизученным явлением, которое требует всестороннего исследования для понимания протекающих в нем процессов, разработки инженерных методов расчета разрядных узлов и выработки обоснованных рекомендаций по их применению в процессах вакуумной плазменной обработки материалов.

Исследования проводились с использованием разрядного устройства на базе цилиндрического резонатора в форме замкнутого в кольцо волновода, на внутренней стенке которого имеются щели для излучения СВЧ энергии. Внутри резонатора размещена вакуумируемая кварцевая камера, закрытая с торцов металлическими крышками. В верхнем торце расположен изолированный электрод, на который подается НЧ потенциал. На нижнем торце располагается заземленный подложкодержатель – электрод.

Схема исследуемого разрядного устройства представлена на рис.1.

В качестве СВЧ генератора использовался магнетрон с частотой генерации 2,45 ГГц, питаемый высоковольтным импульсным напряжением частотой 50 Гц.

Выбор СВЧ и НЧ разрядов обусловлен характером поглощения электромагнитных волн в разрядах, механизмами процессов, протекающих в объемных и электродных планарных плазменных реакторах, возможностью эффективного управления ходом технологического процесса обработки образца. Объемная СВЧ–разрядная система служит для эффективной диссоциации и ионизации молекул плазмообразующего газа, а низкочастотная емкостная система с плоскопараллельными электродами позволяет организовать прецизионную плазменную обработку образца направленным потоком химически активных частиц.

Перед проведением экспериментов была выявлена оптимальная конфигурация элементов разрядной системы, при которой наблюдалось стабильное горение СВЧ разряда и удовлетворительное согласование СВЧ поля с газовым разрядом. Такой конфигурации удалось добиться путем поиска наилучшего расположения электродов, создающего оптимальные условия для возбуждения и

горения СВЧ разряда. При этом эффективность поглощения СВЧ энергии плазмой газового разряда составляла около 55–60%.

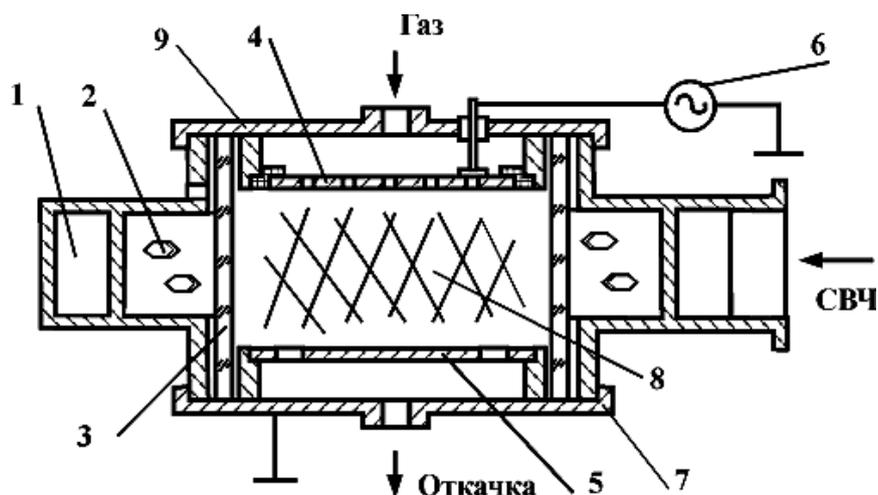


Рис. 1. Схема комбинированного разрядного устройства: 1 – волновод; 2 – отверстия связи; 3 – кварцевая камера; 4 – потенциальный электрод; 5 – заземленный электрод; 6 – НЧ генератор; 7 – нижняя крышка; 8 – плазма; 9 – съемная верхняя крышка.

Эксперименты по травлению монокристаллического кремния в плазме разрядов CF_4 и SF_6 показали следующее.

На рис. 2 представлены результаты изучения зависимости скорости травления кремния от мощности СВЧ излучения.

Эксперимент проводился при давлении в рабочей камере плазмотрона $p = 10$ Па и значении НЧ-потенциала $U_{\text{нч}} = 600$ В. Из полученных зависимостей видно, что с увеличением мощности СВЧ излучения скорость травления возрастает. Причем при одинаковых мощностях СВЧ излучения скорость травления в плазме CF_4 оказывается больше, чем в плазме SF_6 .

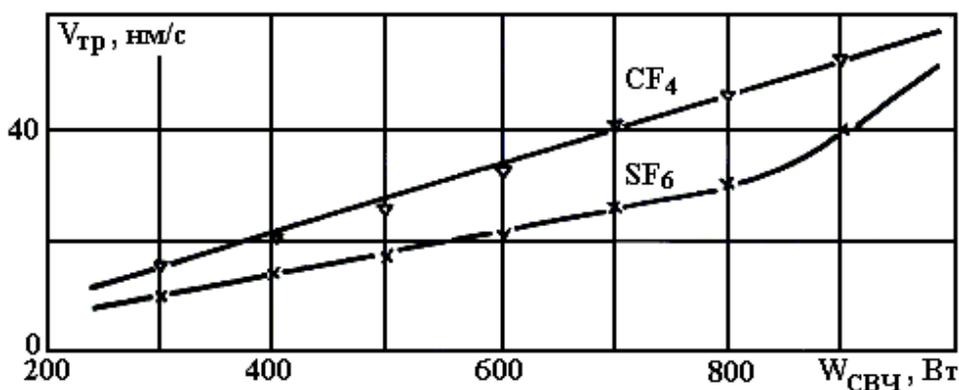


Рис. 2. Зависимость скорости травления кремния от мощности СВЧ излучения.

На рис. 3 приведены зависимости скорости травления от давления в рабочей камере. Обработка проводилась при мощности СВЧ излучения $W_{\text{СВЧ}} = 700$ Вт и НЧ потенциале $U_{\text{нч}} = 600$ В.

Из представленных зависимостей видно, что максимальная скорость травления для плазмы CF_4 наблюдается при давлении $p = 10$ Па, а для плазмы SF_6 – при $p = 5$ Па. С изменением как в большую, так и в меньшую сторону скорость травления падает. Это можно объяснить следующим образом. Понижение рабочего давления приводит к заметному уменьшению степени ионизации, в результате чего разряд “гаснет”. При определенной величине энергии СВЧ излучения ионизироваться может только определенное количество газа, причем максимальная скорость травления наблюдается в случае оптимального сочетания степени ионизации и длины свободного пробега частиц. При постоянных мощностях СВЧ излучения и потенциала на подложкодержателе–электроде с увеличением давления газа степени диссоциации и ионизации газа не изменяются, концентрация

молекул в объеме камеры увеличивается, вследствие чего уменьшается длина свободного пробега частиц и скорость травления падает.

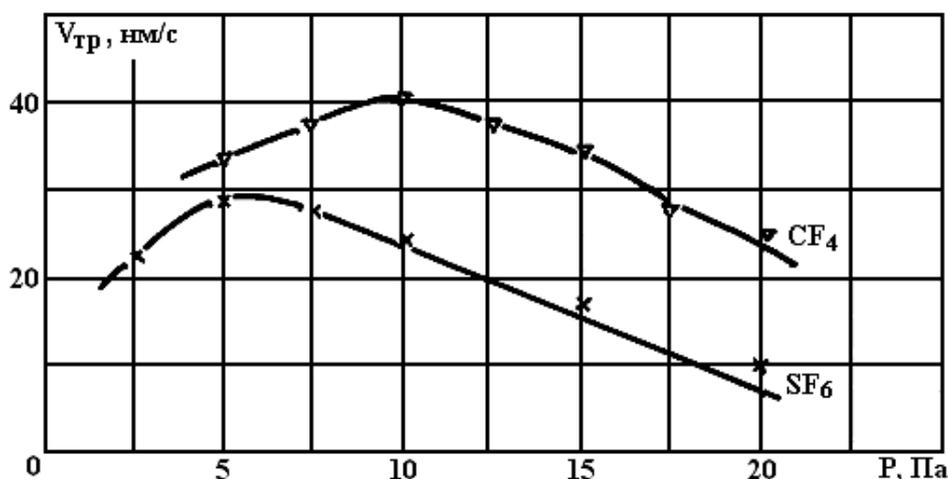


Рис. 3. Зависимость скорости травления кремния от давления в рабочей камере.

На рис. 4 приведены зависимости скорости травления кремния от величины НЧ потенциала на подложкодержателе–электроде.

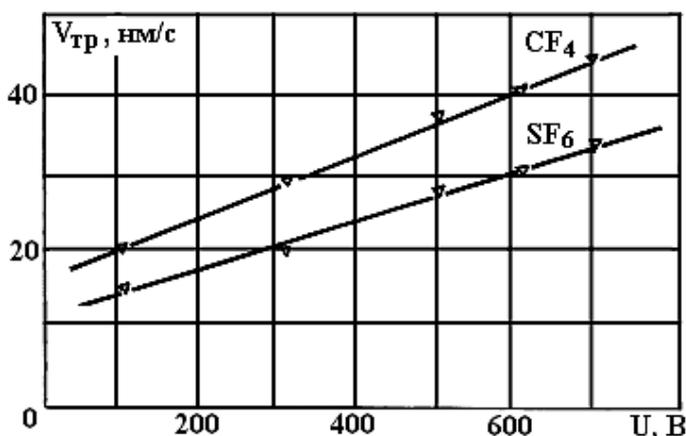


Рис. 4. Зависимость скорости травления кремния от величины НЧ потенциала на подложкодержателе–электроде.

Исследования проводились при мощности СВЧ излучения $W_{\text{свч}} = 700$ Вт и давлении $p = 10$ Па. Как видно из представленных данных, скорость травления возрастает с увеличением НЧ потенциала.

Однако чрезмерное повышение НЧ потенциала, прикладываемого к подложкодержателю – электроду, может привести к переходу разряда из тлеющего в дуговой, что способствует резкому увеличению температуры частиц и к разрушению поверхности образца.

Для установок плазменного травления чрезвычайно важна воспроизводимость энергетического состояния плазмы во времени и от цикла к циклу обработки. Поэтому были проведены эксперименты по травлению 14 образцов в плазме CF_4 . Результаты этих экспериментов приведены на рис. 5. Как видно из графика, воспроизводимость результатов от цикла к циклу обработки является достаточно высокой.

Изменение частоты поля, прикладываемого к подложкодержателю–электроду, оказывает значительное влияние на профиль и морфологию дна лунки травления кремния. Эксперименты показали, что при частоте ВЧ напряжения $f_{\text{вч}} = 13,56$ МГц профиль травления получается более пологим, чем при частоте $f_{\text{нч}} = 35$ кГц. Таким образом, изменяя частоту электромагнитного сигнала, подаваемого на подложкодержатель–электрод, можно получать профили травления необходимой конфигурации, то есть обеспечивать требуемую анизотропию травления. При этом необходимо учитывать тот факт, что по мере понижения частоты этого сигнала возрастает степень дефектности дна лунки

травления, обусловленной эффектами химического и физического взаимодействия тяжелых заряженных частиц с обрабатываемым материалом.

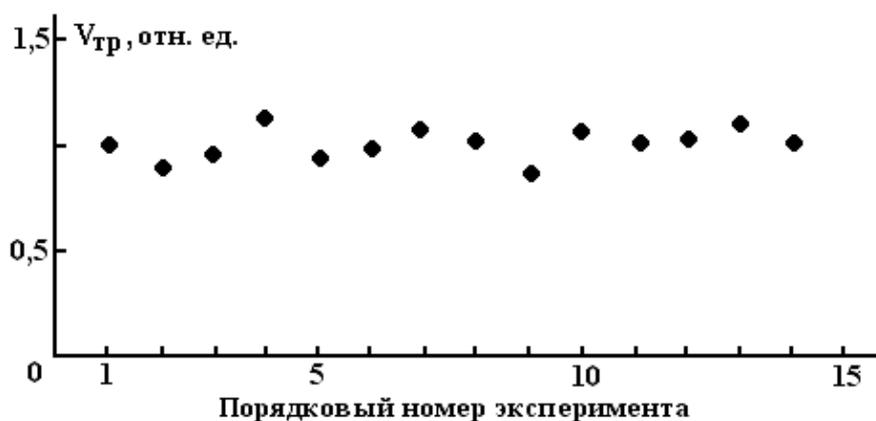


Рис. 5. Воспроизводимость результатов плазменной обработки от цикла к циклу (травления кремния в CF_4).

Результаты экспериментов показали, что разработанное разрядное устройство реализует процесс, сходный с ионно–химическим травлением образцов в плоской электродной системе, но отличающийся от обработки в традиционных планарных реакторах количественными и качественными показателями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев Ю.Ф., Яфаров Р.К. Микроволновое ЭЦР вакуумно-плазменное воздействие на конденсированные среды в микроэлектронике (физика процессов, оборудование) // Зарубежная электронная техника. 1997. № 1. С. 77–120.
2. Достанко А.П., Бордусов С.В., Свадковский И.В. и др. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. В 3-х т. Том 2. / Под общ. ред. А.П. Достанко. Минск, ФУАинформ, 2001.
3. Батенин В.М., Климовский И.И., Лысов Г.В., Троицкий В.Н. СВЧ-генераторы плазмы: Физика, техника, применение. М., 1988.
4. Лебедев Ю.А. Химическая активность неравновесной плазмы. Состояние и перспективы исследований // Химическая физика. 1996. Т. 15. № 5. С. 95–100.
5. Бордусов С.В., Кулинович В.А. Оптическая характеристика комбинированного (СВЧ и НЧ поля) разряда в условиях низкого вакуума // Известия Белорусской инженерной академии. 2001. №1(11)/3. С. 176–178.

Поступила 27.05.2002

Summary

The results of technological tests of the designed and manufactured discharge device intended for a plasma etching of materials used in microelectronic fabrication are presented. The main feature of the process, realized in that device, is a controllable action on a material surface by chemically active particles, formed in a combined (microwave and low frequency fields) discharge. The experimental results demonstrated high quantitative and qualitative performances of processes of removing materials (in particular etching of monocrystalline silicon) in the designed discharge device.