

The article describes the developed methods and application computer program for the evaluation of the inaccuracy of measurements in the process of mass standards verification.

Лопатик Роман Александрович, студент 5 курса, физико-технический факультет, ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь, romanlopatik@gmail.com.

Ровба Владимир Геннадиевич, студент 5 курса, физико-технический факультет, ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь, govba-v@mail.ru.

Научный руководитель – *Васильюк Геннадий Тимофеевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь, vasilyuk@grsu.by.

УДК 533.9.03

М. С. ЛУШАКОВА, О. И. ТИХОН

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЧ ПРЕДЫОНИЗАЦИИ НА УСЛОВИЯ ПРОБОЯ В МОЛЕКУЛЯРНЫХ ГАЗАХ В РАЗРЯДНОЙ СИСТЕМЕ Е-ТИПА

Проведено исследование характеристик возбуждения, поддержания и погасания разряда в молекулярных газах для селективного травления материалов плазмой низкочастотного разряда (10–30 кГц) Е-типа в условиях предыонизации плазмы СВЧ разрядом.

Для изготовления структур интегральных микросхем требуется обеспечить высокие скорости процесса формирования топологии изделия. Прямое увеличение мощности, вкладываемой в плазму разряда, в которой производится обработка, не всегда возможно, так как приводит к перегреву обрабатываемых поверхностей, связано с повышением радиационной дефектности обрабатываемых структур и т. д. [1]. Этого можно избежать при проведении предварительной ионизации плазмообразующего газа вне области обработки. Но этот подход недостаточно изучен и требует дополнительного теоретического и экспериментального исследования.

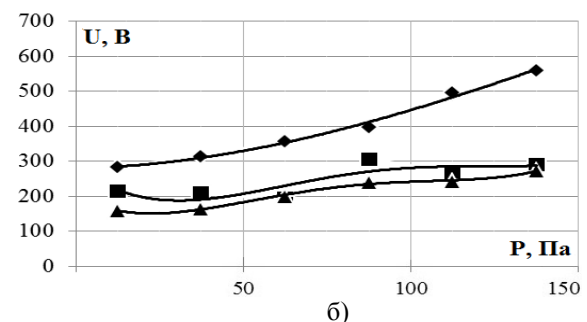
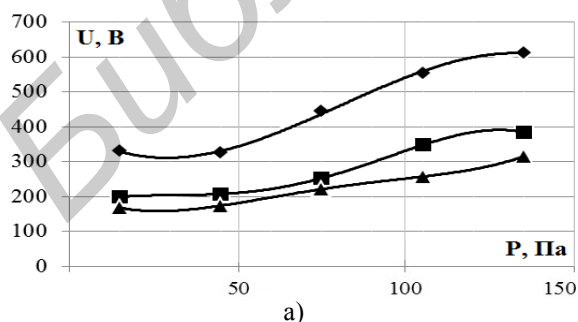
В качестве плазменного источника использовался СВЧ плазмотрон резонаторного типа, собранный на базе согнутого в кольцо прямоугольного волновода, имеющего на внутренней поверхности отверстия для поступления СВЧ энергии в резонирующую область. По оси волноводного излучателя располагалась кварцевая разрядная камера, в которой в условиях вакуума возбуждался газовый разряд. Обрабатываемые пластины размещались за пределами области СВЧ плазмообразования на горизонтальном подложкодержателе, являющимся элементом разрядной системы Е-типа.

Проведены эксперименты по зажиганию тлеющего разряда в вакуумной камере, с размещенной в ней кремниевой пластиной или без нее, в плазмообразующих газах – O_2 и N_2 , который получали с помощью генератора чистого азота, используемого совместно с блоком очистки воздуха.

Пробивное напряжение возбуждения и погасания разряда регистрировалось с помощью подключенного к компьютеру АЦП LA-1.5. Полученные данные обрабатывались с использованием программы PowerGraph 3.3 и по изменениям напряжения определялись моменты возбуждения разряда, установление стабильного горения и погасание разряда. Давление в вакуумной камере фиксировалось с помощью вакуумметра.

Из серий экспериментов получены зависимости пробивного напряжения разряда от давления для холостого хода перед возбуждением, напряжение поддержания разряда, нижний порог величины напряжения на разряде перед погасанием. Для экспериментов с пластиной использовались кремневые пластины диаметром 76 мм.

Представлены графические зависимости для плазмообразующих сред O_2 и N_2 , а также в среде O_2 при наличии в разрядной камере Si пластин диаметром 76 мм (рисунок 1 а, б, в).



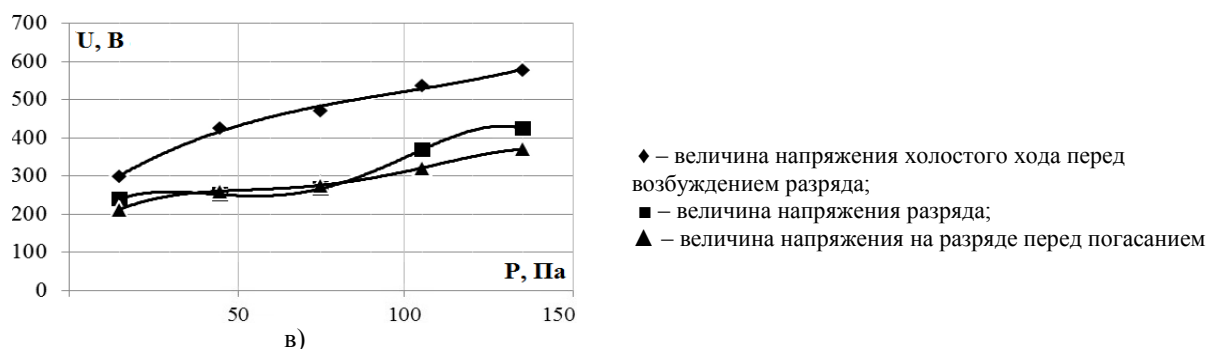


Рисунок 1 – Зависимость пробивного напряжения от давления без пластин в среде кислорода (а) и азота (б), с Si пластинами диаметром 76 мм в среде кислорода (в)

По полученным данным можно судить о резком спаде величины напряжения при зажигании разряда примерно на 120–140 В. Это можно пояснить тем, что до зажигания разряда необходима энергия для ионизации газа, а после того, как разряд уже зажегся, в плазме ионизация газа происходит за счет лавинных эффектов, которые требуют меньшего энерговклада и, следовательно, меньших значений напряжения.

Стабильность горения разряда довольно велика, чему соответствуют практически совпадающие величины напряжения разряда после загорания и перед потуханием. Характер зависимостей для O_2 и N_2 близок к линейному, небольшие различия в значениях напряжения объясняются различными физико-химическими свойствами молекулярных газов [2, 3].

Необходимо отметить, что графические зависимости пробивного напряжения от давления в камере без пластин и с пластинами не имеют существенных различий с учетом погрешности измерений (рисунок 1 в).

Экспериментально установлено, что по мере повышения давления в указанном диапазоне для исследованных газов степень влияния подводимой к области СВЧ разряда СВЧ мощности на величину пробивного напряжения для возбуждения разряда Е-типа снижается. На рисунке 2 приведен пример зависимости величины низкочастотного пробивного напряжения в среде O_2 от давления при разных значениях величины, генерируемой магнетроном СВЧ мощности.

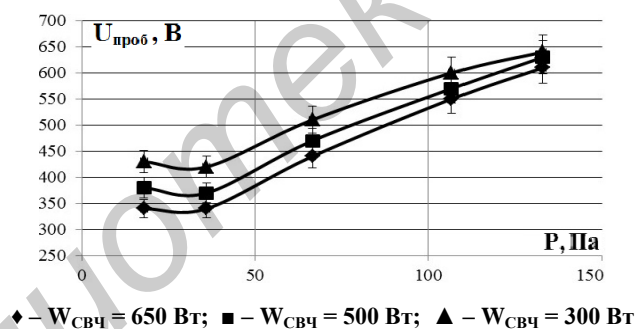


Рисунок 2 – Зависимость величины низкочастотного пробивного напряжения в среде O_2 от давления при разных значениях мощности СВЧ магнетрона, возбуждающего СВЧ разряд

Поведение кривых на графике в области низкого давления указанного диапазона (рисунок 2) характеризуется сильным влиянием дополнительной ионизации в области ближнего послесвечения плазмы СВЧ разряда. В области более высоких давлений указанного диапазона ввиду того, что вероятность столкновения и гибели электронов высокая и не может быть в достаточной степени компенсирована дополнительной ионизацией среды СВЧ разрядом, степень влияния СВЧ преддионизации на значения $U_{\text{проб}}$ значительно слабее.

Таким образом, для исследованных газов зависимости между величиной мощности СВЧ разряда и значением пробивного напряжения носят обратно пропорциональный характер и близки к линейным.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что разряд Е-типа в послесвечении плазмы СВЧ разряда имеет стабильные характеристики в интервале исследованных давлений 15–150 Па. Величина напряжения возбуждения разряда линейно возрастает по мере увеличения давления. Нахождение пластин диаметром 76 мм в камере не оказывает значительного влияния на процесс формирования плазмы. Эти данные позволяют осуществить выбор электрических режимов низкочастотного генератора для формирования разряда Е-типа применительно к условиям проведения процессов плазмохимической обработки материалов и изделий электронной техники в области послесвечения СВЧ разряда.

Список литературы

1. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники: в 3 т. / А. П. Достанко [и др.]. – Минск : ФУАинформ, 2001. – Т. 2. – 244 с.
2. Madveika, S. I. Theoretical analysis of low vacuum microwave discharge exciting and maintaining conditions in resonator type plasmatron / S. I. Madveika, S. V. Bordusau // Plasma Physics and Technology. – 2015. – V. 2, № 2. – P. 155–158.
3. Мадвейко, С. И. Исследование характеристик возбуждения и поддержания плазмы низкочастотного тлеющего разряда Е-типа в среде O_2 / С. И. Мадвейко, М. С. Лушакова, С. В. Бордусов // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций, РТ-2015 : материалы 11-й междунар. молодежной научн.-техн. конф., 16–20 ноября 2015 г. – Севастополь, 2015. – С. 121.

Investigation of the excitation, maintenance and extinction characteristics of the discharge in molecular gases for the selective etching of materials in low-frequency E-type plasma discharge (10–30 kHz) in conditions of preionization by microwave discharge has been performed.

Лушакова Мария Сергеевна, аспирант, факультет компьютерного проектирования, БГУИР, Минск, Беларусь, lushakova@bsuir.by.

Тихон Олег Игоревич, БГУИР, Минск, Беларусь.

Научный руководитель – Бордусов Сергей Валентинович, доктор технических наук, профессор, БГУИР, Минск, Беларусь, bordusov@bsuir.by.

УДК 621.039.587

ЛЭ ТХИ ЗИЕУ ХЬЕН

МОНТЕ-КАРЛО МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ВЫГОРАНИЯ МАТЕРИАЛА РАДИАТОРА ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЫ

Методами Монте-Карло исследовано изменение чувствительности ионизационной камеры деления со временем, обусловленное выгоранием делящегося вещества радиатора в нейтронных потоках. Приведены результаты зависимости чувствительности от времени для различных времен работы ионизационной камеры.

Наибольшее применение в ядерной энергетике при измерении потоков нейтронов получили ионизационные камеры деления (ИКД) [1, 2], чувствительные элементы которых содержат делящиеся вещества.

Одним из важных эффектов в ионизационной камере является выгорание материала радиатора, которое определяет изменение чувствительности ионизационной камеры со временем.

В настоящей работе с помощью Монте-Карло моделирования исследованы эффекты выгорания чувствительного материала со временем, рассчитано изменение чувствительности ИКД, вызванное этим выгоранием в нейтронных потоках различной интенсивности.

В простейшем случае ИКД состоит из двух электродов (плоских или цилиндрических), один из них (радиатор) покрывается тонким слоем делящегося вещества (обычно это ^{235}U). В цилиндрических камерах радиатор может быть как внешним электродом, так и внутренним электродом. Межэлектродное пространство заполнено рабочим газом, обычно это аргон с небольшой (~4 %) примесью азота или другого газа.

Для определенности, ниже рассмотрена Монте-Карло модель камеры типа КНТ-5, используемой в системе управления и защиты ядерных реакторов типа ВВЭР [2].

Эволюция ^{235}U в радиаторе ИКД может быть описана набором связанных кинетических интегро-дифференциальных уравнений. В этих условиях усредненные по спектру сечения деления и захвата нейтронов, также как и концентрацию ядер ^{235}U можно рассматривать как константы, не зависящие от радиуса.

В камере КНТ-5 уран наносится в виде оксида U_3O_8 , обогащенного изотопом ^{235}U на 90 %. Будем полагать, что нейтронный поток остается однородным в пределах ИКД и постоянным во времени, тогда эволюция ^{235}U в радиаторе может быть представлен в виде:

$$\frac{dN}{dt} = -\left(N(t)\Sigma_f + N(t)\Sigma_c + \lambda N(t)\right), \quad (1)$$

где $N(t)$ – число ядер ^{235}U в единице объема в момент t , Σ_f – усредненное по спектру сечение деления ^{235}U , Σ_c – усредненное по спектру сечение (без деления) захвата нейтрона ядром ^{235}U , λ – постоянная распада ^{235}U .

Начальные условия для решения этих уравнений : $N(t)_{t=0} = N_0$

Простейший способ решения этих уравнений – применение схемы Эйлера на временном шаге $(t, t + \Delta t)$. Этот подход позволяет использовать программу Монте-Карло моделирования переноса частиц в среде для