

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СВЧ И НЧ ГЕНЕРАТОРОВ НА ВОЗБУЖДЕНИЕ ПЛАЗМЫ КОМБИНИРОВАННОГО РАЗРЯДА

М.С. Лушакова, О.И. Тихон,

С.И. Мадвейко, канд. техн. наук, доц.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Беларусь*

Исследовано влияние электрических параметров СВЧ и НЧ генераторов, работающих на единую плазменную нагрузку в виде самостоятельного комбинированного разряда. Установлен оптимальный диапазон мощности НЧ генератора и выходной мощности источника питания СВЧ генератора при их синхронной работе.

Ключевые слова: *комбинированный разряд, СВЧ и НЧ генераторы, плазма.*

Значительное влияние на параметры и свойства газового разряда оказывают частота возбуждающего плазму электромагнитного поля и эффекты, связанные с возбуждением так называемых комбинированных разрядов, т.е. разрядов, возникающих при совместном действии, как правило, двух электромагнитных полей разной частоты. Потенциальные возможности таких разрядов и особенности их формирования изучаются, и уже можно говорить о ряде интересных эффектов, наблюдаемых как в объеме этих разрядов, так и в результате их воздействия на поверхность твердого тела.

Наличие у ионов заряда позволяет изменять энергию, с которой они достигают подложки, в широких пределах ($10 - 10^4$ эВ). Ионы с такими энергиями, бомбардируя поверхность подложки, могут участвовать в различных физических и физико-химических процессах, в частности, стимулировать химические реакции на поверхности, управлять скоростью, селективностью и анизотропией травления материалов. В разряде, формируемом под действием полей разной частоты, путем варьирования энергетических характеристик возбуждающих разряд полей и газодинамических параметров, возможно управление газофазными реакциями и процессами на границе плазма – твердое тело [1, 2].

Низкотемпературная плазма широко применяется в технологии производства изделий микроэлектроники для процессов реактивного ионно-плазменного травления полупроводниковых и диэлектрических материалов при среднем вакууме.

Кинетическая энергии ионов, влияющая на анизотропию травления полупроводников, увеличивается с уменьшением частоты, поэтому одним из наиболее перспективных способов создания плазмы для обработки материалов является самостоятельный комбинированный разряд, формируемый за счет наложения на СВЧ разряд электромагнитного поля НЧ диапазона. Дополнительное внешнее стимулирование плазмы СВЧ разряда, как части комбинированного разряда, НЧ разрядом ускоряет протекание плазменных процессов, позволяет эффективно управлять энергетическими характеристиками плазмы вблизи поверхности обрабатываемого материала, повышает равномерность

распределения плазмы в разрядной камере, улучшает качественные характеристики процесса обработки ввиду использования дополнительного способа управления [3].

В исследуемой конструкции разрядной системы комбинированного разряда плазменный объем сформирован таким образом, что СВЧ энергия поступает в вакуумную разрядную камеру посредством щелевых отверстий в кольцевом волноводе. В торцах разрядной камеры расположены два плоскопараллельных электрода – потенциальный и заземленный, подключенные к НЧ генератору. При одновременном взаимодействии СВЧ и НЧ полей с газом пониженного давления в разрядной камере формируется плазма самостоятельного комбинированного разряда [4].

Оценка работы обоих генераторов на плазменную нагрузку выполнялась с использованием двухканального осциллографа. На один канал подавались сигналы с ФЭУ, который фиксировал оптическое излучение из плазмы, на второй – данные с потенциального электрода НЧ генератора. Оптический сигнал с ФЭУ более информативно отражает формирование СВЧ плазмы, так как мощность СВЧ плазмы в разрядной камере выше мощности НЧ разряда.

В комбинированном разряде СВЧ (2,45 ГГц) составляющая обеспечивалась режимом работы источника питания СВЧ магнетрона от однополярных импульсов с частотой 50 Гц (рисунок 1 а). Основой источника питания СВЧ магнетрона является высоковольтный трансформатор, работающий в режиме насыщения, и схема удвоения напряжения, которые могут обеспечить его работу только в импульсном режиме [5].

Генератор НЧ разряда, используемого в исследуемой разрядной системе, может функционировать в прерывистом (рисунок 1 б-д) и непрерывном (рисунок 1 е) режимах работы. Ввиду необходимости синхронизации сигналов СВЧ и НЧ генераторов для формирования плазмы комбинированного разряда целесообразно использование работы НЧ генератора в прерывистом режиме пачками импульсов 50 Гц. НЧ излучение внутри пачек импульсов составляло 33 кГц.

Различные режимы формирования и поддержания плазмы комбинированного разряда могут обеспечиваться путем согласования временных характеристик импульсов электрических сигналов с частотой 50 Гц СВЧ и НЧ генераторов: попеременное следование импульсов электрических сигналов СВЧ и НЧ генераторов (рисунок 2 а); синхронизация импульсов электрических сигналов СВЧ и НЧ генераторов (рисунок 2 б).

Как показали проведенные исследования и анализ научно-технической литературы, для устойчивого формирования комбинированного разряда необходим одновременный энергозатрат в плазменный объем мощностей НЧ и СВЧ генераторов. Синхронная работа двух генераторов СВЧ и НЧ энергии на нестационарную плазменную нагрузку позволяет минимизировать энерго- и ресурсозатраты при проведении технологических процессов плазменного травления материалов электронной техники.

Для процесса реактивного ионно-плазменного травления материалов комбинированный разряд позволяет осуществлять независимую регулировку плотности потока и энергии ионов, бомбардирующей обрабатываемый материал за счет изменения выходной мощности источника питания СВЧ генератора и выходной мощности НЧ генератора. При этом важным является минимизация радиационных повреждений поверхности

обрабатываемого материала и в то же время, поддержание высокой скорости процесса обработки [6]. Поэтому было проведено исследование баланса мощностей генераторов, работающих на общую плазменную нагрузку.

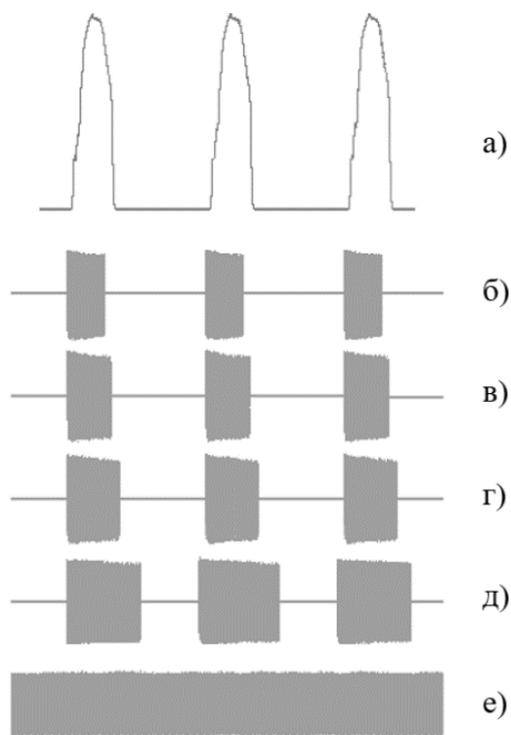


Рисунок 1. – Режимы работы СВЧ (а) и НЧ (б–е) генераторов

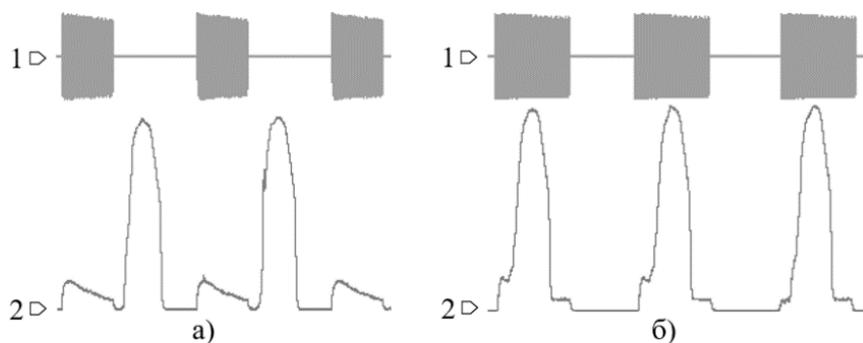


Рисунок 2. – Режимы асинхронного (а) и синхронного (б) формирования комбинированного разряда

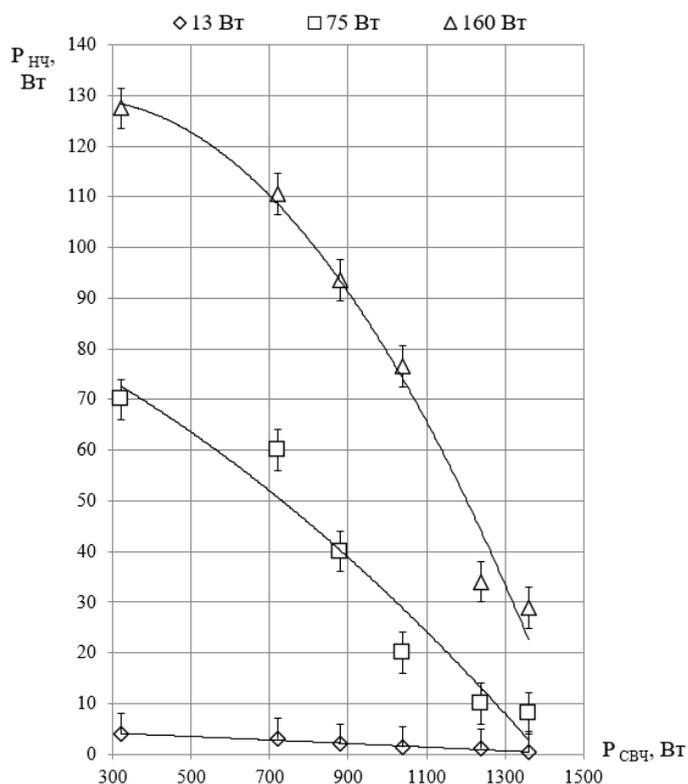
В процессе проведения исследований установлено самопроизвольное снижение мгновенной выходной мощности НЧ генератора при синхронной работе с СВЧ генератором. Данное явление может быть связано с схемотехническими особенностями работы НЧ генератора, а также с условиями формирования плазмы при комбинированном разряде, отличающимся от обособленного НЧ разряда.

На рисунке 3 представлены зависимости изменения вклада мгновенной выходной мощности НЧ генератора в плазму комбинированного разряда при различных значениях выходной мощности источника питания СВЧ генератора. Исходная выходная мощность НЧ генератора устанавливалась на трех основных уровнях – минимальном, среднем и максимальном, которые соответствовали выходным мощностям – 13 Вт, 75 Вт,

160 Вт. Зависимости имеют нисходящий характер при увеличении выходной мощности источника питания СВЧ генератора.

При минимальном и среднем уровнях выходных мощностей НЧ генератора, соответствующих 13 Вт, 75 Вт падение мгновенной выходной мощности НЧ генератора находится в интервале 5–70 Вт, что способствует условиям приоритетного формирования плазмы СВЧ разряда. Для формирования комбинированного разряда целесообразно использование выходной мощности НЧ генератора, соответствующей 160 Вт.

Рисунок 3. – Зависимости изменения вклада мгновенной выходной мощности НЧ генератора в плазму комбинированного разряда при различных значениях выходной мощности источника питания СВЧ генератора



Изменение выходной мощности источника питания СВЧ генератора находилось в интервале 300–1400 Вт. Минимальные значения мощности источника питания СВЧ генератора 300–600 Вт не могут поддерживать устойчивую СВЧ составляющую комбинированного разряда, а максимальные – выше 1100 Вт – значительно снижают мгновенную выходную мощность НЧ генератора. В соответствии с этим установлен оптимальный диапазон выходной мощности источника питания СВЧ генератора в интервале 700–1100 Вт, при котором падение мгновенной выходной мощности НЧ генератора в плазму комбинированного разряда при исходной мощности НЧ генератора 160 Вт находится в интервале ≈ 120 –70 Вт.

В работе исследованы особенности работы СВЧ и НЧ генераторов на единую плазменную нагрузку и определены оптимальные условия формирования плазмы комбинированного разряда, отличающиеся от обособленных самостоятельных НЧ и СВЧ разрядов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Charged particle dynamics and distribution functions in low pressure dual-frequency capacitively coupled plasmas operated at low frequencies and high voltages / P. Hartmann [et al.] // Plasma Sources Science and Technology. – 2020. – Vol. 29, № 7. – 075014.

2. Secondary electrons in dual-frequency capacitive radio frequency discharges / J. Schulze [et al] // Plasma Sources Science and Technology. – 2011. – Vol. 20, № 4. –045007.
3. Бордусов, С.В. Плазменные СВЧ технологии в производстве изделий электронной техники / Под ред. А.П. Достанко.– Мн.: Бестпринт, 2002. – 452 с.
4. Лушакова, М. С. Исследование влияния конструктивных характеристик плазменной камеры на режимы возбуждения СВЧ разряда / М. С. Лушакова, О. И. Тихон, С. И. Мадвейко // Приборостроение-2022: материалы 15-й Международной научно-технической конференции, 16-18 ноября 2022 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2022. – С. 287–289.
5. Тихон, О. И. Исследование влияния электрических параметров импульсного источника питания СВЧ магнетрона на режимы генерации плазмы СВЧ разряда / Тихон О. И., Мадвейко С. И., Бордусов С. В. // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – №3(52). – С. 42–47.
6. Галперин, В.А. Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях : учебное пособие – 3-е изд. / В.А. Галперин, Е.В. Данилкин, А.И. Мочалов. – Москва : Лаборатория знаний, 2015. – 286 с.