

## РАДИАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ПРОДОЛЬНОГО КОМБИНИРОВАННОГО РАЗРЯДА В SF<sub>6</sub>

**В.А. Лисовский, Н.Д. Харченко**

*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Украина*

Поступила в редакцию 10.09.2009

Данная работа посвящена экспериментальному изучению влияния высокочастотного электрического поля на радиальные зависимости плотности тока ионов разряда постоянного тока, а также постоянного напряжения на радиальные зависимости плотности тока высокочастотного разряда. В разрядной камере, содержащей электрод с коллекторами, экспериментально измерены радиальные зависимости плотности ионного тока продольного комбинированного разряда (высокочастотное и постоянное электрическое поля прикладываются к одним и тем же электродам) для разных давлений SF<sub>6</sub>, а также вольтамперные характеристики разряда. Определены оптимальные условия для проведения технологических процессов, используя комбинированный разряд в SF<sub>6</sub>.

**Ключевые слова:** высокочастотное и постоянное электрическое поле, плотность, электрод, комбинированный разряд, вольтамперные характеристики.

Цю роботу присвячено експериментальному вивченню впливу високочастотного електричного поля на радіальні залежності густини струму іонів розряду постійного струму, а також постійної напруги на радіальні залежності густини струму високочастотного розряду. В розрядній камері, що містить у собі катод з колекторами, були експериментально виміряні радіальні залежності густини струму поздовжнього комбінованого розряду (високочастотне та постійне електричні поля прикладались до одних і тих самих електродів) для різних тисків SF<sub>6</sub>, а також вольтамперні характеристики розряду. Визначені оптимальні умови для проведення технологічних процесів, що використовують розряд в SF<sub>6</sub>.

**Ключеві слова:** високочастотне та постійне електричне поле, щільність, електрод, комбінований розряд, вольтамперні характеристики.

This work is devoted to experimental study of the radio frequency (RF) electric field influence to the radial ion current density profiles of the direct current (DC) discharge, and the DC voltage influence to the radial ion current density profiles of the RF discharge. In the discharge chamber, which includes electrode with collectors radial ion current density profiles of the longitudinal combined discharge (RF and DC electric fields were applied to the same electrodes) were measured experimentally for different SF<sub>6</sub> pressures, and also current-voltage characteristics of the discharge were obtained. The optimal conditions for plasma technologies using combined discharge in SF<sub>6</sub> were defined.

**Keywords:** high-frequency and constant electric field, density, electrode, combined discharge, voltage-current characteristics

### ВВЕДЕНИЕ

Элегаз (шестифтористая сера, SF<sub>6</sub>) является искусственным газом, который широко используется в энергетике, производстве полупроводниковых устройств, как реактивный газ при повторной обработке алюминия для уменьшения его пористости, тепловой и звуковой изоляции, шинах самолетов, подводном плавании, каналах сверхзвукового потока газа и т.д. [1]. Газовый разряд в SF<sub>6</sub> широко применяется в плазмохимии, для проведения различных технологических процессов травления полупроводниковых материалов, а также для плазменной очистки газоразрядных

камер [2 – 6]. Поэтому экспериментальному и теоретическому исследованию ВЧ разряда в SF<sub>6</sub> посвящено большое количество работ. Известно, что высокочастотный (ВЧ) разряд в SF<sub>6</sub> может гореть в трех различных режимах: слаботочный α-режим, диссоциативный δ-режим и сильноточный γ-режим [7]. Диссоциативный δ-режим характеризуется высокой степенью диссоциации молекул SF<sub>6</sub> (до 35%) электронным ударом, высокими значениями таких параметров плазмы, как температура электронов, плотность плазмы и высоким током проводимости ВЧ разряда. Диссоциативный режим появляется, начиная с

некоторого порогового ВЧ напряжения, когда в ВЧ разряде имеется достаточное количество электронов высокой энергии, способных при столкновении с молекулами вызвать их диссоциацию. При этом потенциалы ионизации образовавшихся радикалов заметно меньше потенциала ионизации молекул, поэтому эти радикалы играют роль легкоионизируемой добавки.

Одним из перспективных технологических направлений в развитии физики низкотемпературной плазмы является изучение продольного комбинированного разряда, когда ВЧ и постоянное электрическое поля прикладываются к одним и тем же электродам. В комбинированном разряде высокочастотное электрическое поле играет основную роль в создании плотной плазмы, в то время как приложенное к электродам постоянное напряжение увеличивает энергию положительных ионов, поступающих на “катод”. В случае комбинированного разряда электроды подразделяются на катод и анод только для постоянного тока, а для ВЧ напряжения их полярность меняется каждые полпериода, поэтому их названия и далее будут взяты в кавычки. Постоянное напряжение сосредоточено преимущественно в “катодном” слое (вследствие его низкой проводимости), в то

время как значительная часть приложенного ВЧ напряжения “падает” на квазинейтральной плазме, контролируя частоту ионизации молекул газа электронным ударом. В отличие от высокочастотного емкостного разряда и разряда постоянного тока, в комбинированном разряде возможно независимо контролировать энергию ионов (с помощью постоянного напряжения  $U_{dc}$ ) и поток ионов на электрод (управляя плотностью плазмы с помощью ВЧ напряжения  $U_{rf}$ ). Такая особенность продольного комбинированного разряда может быть особо полезной при проведении технологических процессов с использованием  $SF_6$ .

Целью данной работы было изучение влияния постоянного напряжения на радиальные параметры горящего ВЧ разряда, а также влияние ВЧ напряжения на параметры разряда постоянного тока в  $SF_6$ , когда ВЧ и постоянное электрические напряжения прикладываются к одним и тем же электродам.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

Для того чтобы изучать радиальные распределения плотности ионного тока комбинированного разряда, нами была сконструирована разрядная камера, включающая в себя электрод со встроенными коллекторами. На рис. 1 показана схема нашей экспериментальной установки. Кварцевая трубка с внутренним диаметром 56 мм вакуумно уплотнялась между электродами, диаметр которых 55 мм. Расстояние между электродами из нержавеющей стали было 25 мм. Исследуемый газ  $SF_6$  подавался в камеру с помощью системы напуска через множество маленьких отверстий в “аноде”. Разрядная камера откачивалась через систему отверстий в этом же электроде. Для регистрации давления газа в диапазоне от  $10^{-3}$  Торр до атмосферного мы использовали вакуумный термоэлектрический датчик 13ВТ3-003. Откачка газа производилась с помощью форвакуумного и турбомолекулярного насосов, что обеспечивало предельный вакуум порядка  $10^{-6}$  Торр. Высокочастотный генератор подключался к “аноду” через согласующее устройство П-типа. Источник постоянного напряжения подключался к этому же электроду с помощью дросселя  $L_c = 4$  мГн,

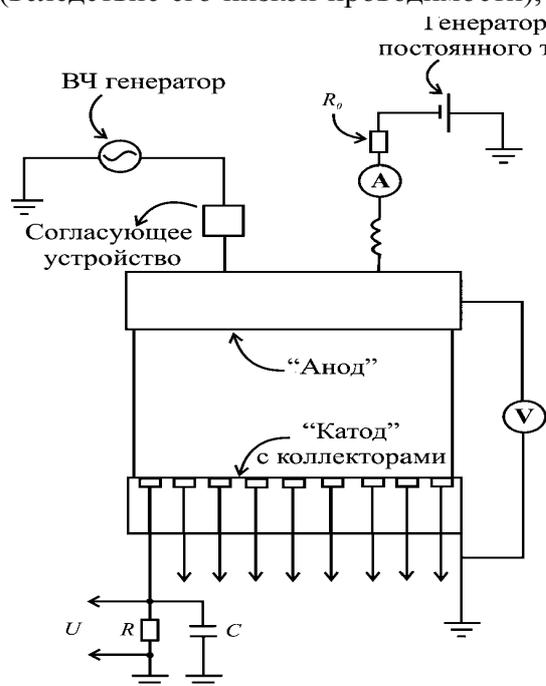


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. Диаметр электродов 55 мм, расстояние между электродами 25 мм.

чтобы предотвратить повреждение источника ВЧ током. По диаметру заземленного “катода” вдоль одной прямой линии располагались 9 коллекторов тока, каждый из которых имел диаметр 3 мм. Собирающая поверхность коллекторов находилась в одной плоскости с поверхностью катода. Выводы коллекторов были подключены к внешним резисторам величиной 1 кОм, затем падения напряжения на сопротивлениях оцифровывались и подавались на ПК. Величина разрядного тока регистрировалась цифровым амперметром, а напряжение на разряде – цифровым вольтметром. Токи на все коллекторы измерялись одновременно, при этом измерения проводились 20 раз и полученные результаты усреднялись. В разрядную цепь подключалось внешнее сопротивление величиной 50 кОм, которое ограничивало ток и препятствовало возникновению катодных пятен. Эксперименты проводились при давлениях SF<sub>6</sub>  $p = 0,07 - 1$  Торр в диапазоне постоянных напряжений  $U_{dc} \leq 1000$  В и ВЧ напряжений  $U_{rf} \leq 600$  В.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Нами были измерены радиальные профили плотности ионного тока комбинированного разряда в газе SF<sub>6</sub> низкого давления. В невозмущенном ВЧ разряде электроды бомбардируются положительными ионами в течение всего периода ВЧ поля, в то время как электроны приходят на электроды короткими импульсами в течение анодной фазы поля. Прикладывая отрицательное постоянное напряжение к одному из электродов, мы останавливаем электронный поток к этому электроду и можем измерять радиальные профили плотности ионного тока. На рис. 2 – 5 приведены радиальные профили ионного тока для различных давлений SF<sub>6</sub> и при различных комбинациях ВЧ и постоянного электрического полей. В работе [8] показано, что продольный комбинированный разряд может гореть в трех различных режимах в зависимости от соотношения ВЧ и постоянного напряжений: 1) ВЧ разряд, возмущенный постоянным электрическим полем; 2) “комбинированный разряд”; 3) разряд постоянного тока, возмущенный ВЧ электрическим полем.

На рис. 2 показано влияние постоянного напряжения на радиальные зависимости плотности ионного тока горящего ВЧ разряда при давлении SF<sub>6</sub> в камере, равном  $p = 0,07$  Торр, и ВЧ напряжении  $U_{rf} = 86$  В. При этом давлении SF<sub>6</sub> в камере данной геометрии ВЧ разряд горит в диссоциативном  $\delta$ -режиме [7]. В таком режиме степень диссоциации молекул SF<sub>6</sub> очень высока, поэтому интересно было бы изучить влияние постоянного напряжения на диссоциативный режим ВЧ разряда.

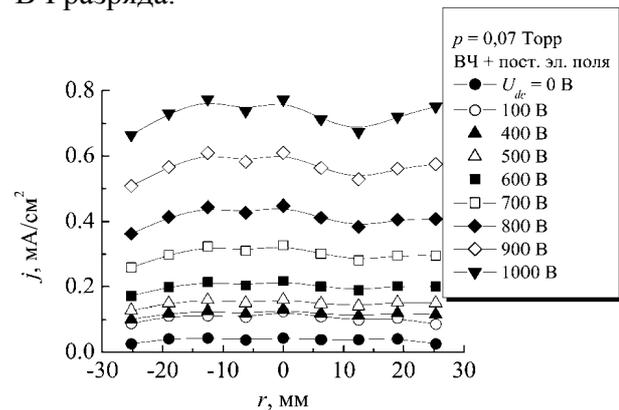


Рис. 2. Влияние постоянного напряжения на радиальные профили ионного тока ВЧ разряда при давлении SF<sub>6</sub>  $p = 0,07$  Торр,  $U_{rf} = 86$  В.

Из рис. 2 можем видеть, что наложение небольшого постоянного напряжения  $U_{dc} = 100$  В приводит к увеличению плотности тока равномерно по площади всего электрода. При дальнейшем увеличении постоянного напряжения на электродах вплоть до  $U_{dc} = 400$  В не оказывает заметного влияния на радиальные профили плотности ионов. При таких экспериментальных условиях наблюдается комбинированный разряд в SF<sub>6</sub>, горящий в первом режиме – ВЧ разряд, возмущенный постоянным электрическим полем. Из этого можно предположить, что в первом режиме комбинированного разряда скорость травления полупроводниковой пластины должна быть несколько выше, чем в самостоятельном ВЧ разряде, т.к. при низком давлении положительные ионы будут двигаться более направленным потоком. При этом ионная бомбардировка вызовет активацию поверхности полупроводниковой пластины и увеличит скорость травления по нормали к поверхности, а также повысит анизотропию травле-

ния. Но неизменность постоянного тока (см. рис. 6) и плотности ионного тока (рис. 2) указывают на то, что плотность плазмы в первом режиме комбинированного разряда слабо зависит от приложенного постоянного напряжения. Следовательно, концентрация химически активных частиц (атомов и молекул фтора), образующихся при диссоциации молекул SF<sub>6</sub> и дающих основной вклад в плазмохимическое травление, также должна сохраняться неизменной. Если приложить к горящему ВЧ разряду постоянное напряжение  $U_{dc} \geq 400$  В, то происходит переход разряда во второй режим – “комбинированный разряд”, и наблюдается быстрый рост плотности ионного тока, однако, радиальные профили становятся менее однородными.

На рис. 3 показано влияние ВЧ напряжения на радиальные зависимости плотности ионного тока разряда постоянного тока при давлении SF<sub>6</sub>  $p = 0,07$  Торр. При этих условиях разряд постоянного тока горит в аномальном режиме, занимая всю поверхность катода. Из рисунка видно, что приложение небольшого ВЧ напряжения  $U_{rf} = 86$  В слабо влияет на радиальный профиль плотности ионного тока разряда постоянного тока. При таком соотношении ВЧ и постоянного напряжений мы наблюдаем продольный комбинированный разряд, горящий в третьем режиме – разряд постоянного тока, возмущенный ВЧ электрическим полем. Если к разряду постоянного тока приложить ВЧ напряжение  $U_{rf} \geq 100$  В, то происходит переход комбинированного разряда из третьего во второй режим, который сопровождается быстрым ростом плотности ионного тока и постоянного тока (см. рис. 3 и рис. 7). Однако с увеличением

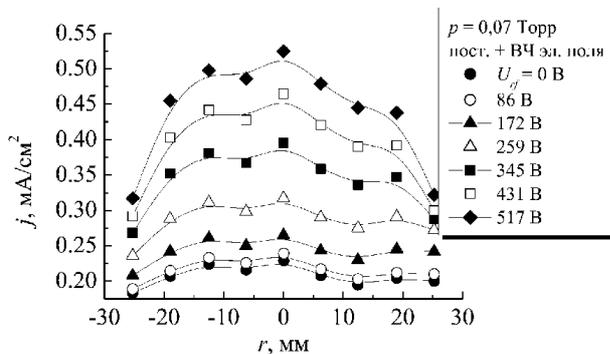


Рис. 3. Влияние ВЧ напряжения на радиальные профили ионного тока разряда постоянного тока при давлении SF<sub>6</sub>  $p = 0,07$  Торр,  $U_{dc} = 700$  В.

прикладываемого ВЧ напряжения на радиальных профилях ионного тока появляется резко выраженный максимум в центре разряда. Следовательно, такие экспериментальные условия не пригодны для однородного травления полупроводниковых пластин.

На рис. 4 приведены радиальные зависимости плотности ионного тока комбинированного разряда при различном соотношении ВЧ и постоянного напряжений при давлении SF<sub>6</sub>  $p = 1$  Торр и фиксированном ВЧ напряжении. При этих экспериментальных условиях невозмущенный ВЧ разряд горит в сильноточном  $\gamma$ -режиме. Если приложить к горящему ВЧ разряду постоянное напряжение  $U_{dc} \leq 400$  В, то можем наблюдать продольный комбинированный разряд, горящий в первом режиме. Постоянный ток с ростом  $U_{dc}$  увеличивается и достигает насыщения (рис. 6).

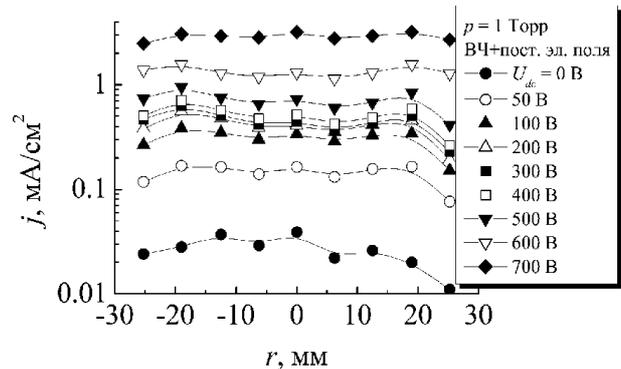


Рис. 4. Влияние постоянного напряжения на радиальные профили ионного тока ВЧ разряда при давлении SF<sub>6</sub>  $p = 1$  Торр,  $U_{rf} = 430$  В.

Как показано на рис. 4, профили плотности ионного тока при таких условиях довольно неоднородны. Однако при дальнейшем повышении постоянного напряжения комбинированный разряд переходит во второй режим, профили плотности тока становятся значительно более однородными, а постоянный ток через разряд быстро растет.

Следовательно, при давлении SF<sub>6</sub>, равном  $p = 1$  Торр, в камере данной геометрии проведение технологических процессов будет более однородным по поверхности, если зажечь комбинированный разряд во втором режиме. Однако при столь высоком давлении газа процесс травления будет изотропным. Поэтому целесообразно при таких условиях проводить, например, процесс плазменной очистки поверхности полупроводниковых

пластин и других материалов.

На рис. 5 показано влияние ВЧ напряжения на радиальный профиль плотности ионного тока разряда постоянного тока при давлении SF<sub>6</sub>  $p = 1$  Торр и фиксированном постоянном напряжении. При таких условиях разряд горит в виде плазменного шнура [9].

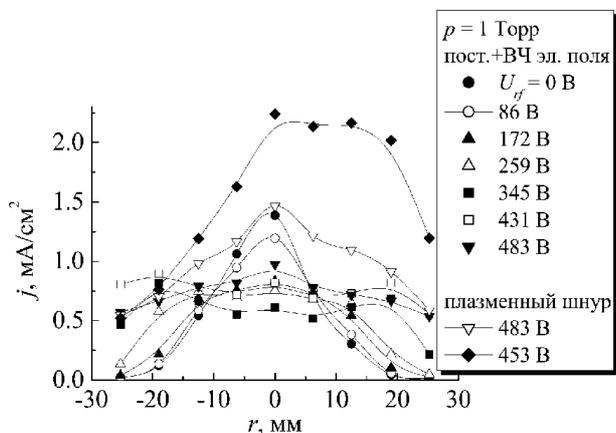


Рис. 5. Влияние ВЧ напряжения на радиальные профили ионного тока разряда постоянного тока при давлении SF<sub>6</sub>  $p = 1$  Торр,  $U_{dc} = 765$  В.

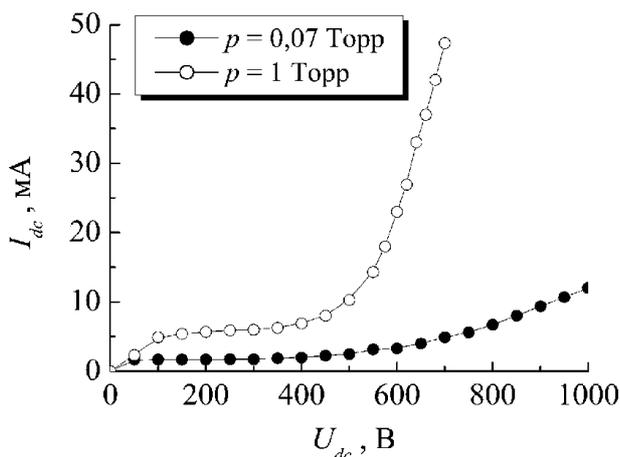


Рис. 6. Зависимость постоянного тока комбинированного разряда от приложенного постоянного напряжения для давлений SF<sub>6</sub>  $p = 0,07$  Торр ( $U_{rf} = 86$  В) и  $p = 1$  Торр ( $U_{rf} = 430$  В).

Приложение ВЧ напряжения  $U_{rf} \leq 260$  В к горящему разряду постоянного тока приводит к расширению плазмы по поверхности электродов, и разряд занимает весь объем камеры. По-видимому, здесь комбинированный разряд горит в третьем режиме – разряд постоянного тока, возмущенный ВЧ электрическим полем. Дальнейшее увеличение ВЧ напряжения на комбинированном разряде приводит к появлению сильноточного плазменного шнура в разрядной камере, и вольт-ам-

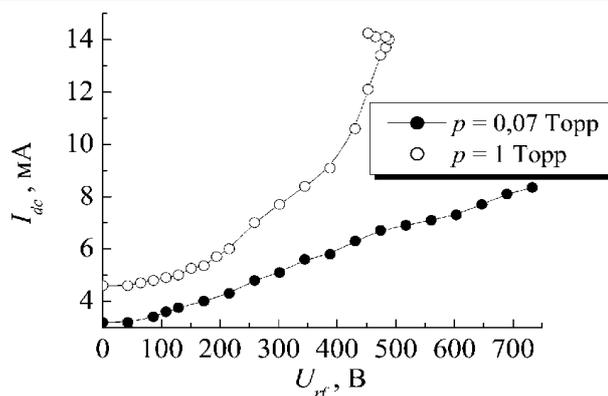


Рис. 7. Зависимость постоянного тока комбинированного разряда от приложенного ВЧ напряжения для давлений SF<sub>6</sub>  $p = 0,07$  Торр ( $U_{dc} = 700$  В) и  $p = 1$  Торр ( $U_{dc} = 765$  В).

перная характеристика разряда становится отрицательной. Такие экспериментальные условия в разрядной камере мало пригодны для плазменных технологических процессов микроэлектроники.

## ВЫВОДЫ

В данной работе экспериментально измерены радиальные профили плотности ионного тока, а также вольт-амперные характеристики продольного комбинированного разряда в SF<sub>6</sub> низкого давления. Изучено влияние как ВЧ напряжения на радиальные профили плотности тока разряда постоянного тока, так и влияние постоянного напряжения на радиальные профили плотности тока ВЧ разряда. Кроме того, предложены наиболее подходящие условия для проведения процессов травления в камерах схожей геометрии в разряде с SF<sub>6</sub>.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Christophorou L.G., Olthoff J.K., Van Brunt R.J. Sulfur Hexafluoride and the Electric Power Industry//IEEE Electrical Insulation Magazine. – 1997. – Vol. 13. – P. 20-24.
2. Booth J.P. Optical and electrical diagnostics of fluorocarbon plasma etching processes//Plasma Sources Sci. Technol. – 1999. – Vol. 8. – P. 249-257.
3. Shul R.J., Pearton S.J. Handbook of Advanced Plasma Processing Techniques. Berlin: Springer, 2000.
4. Sugawara M. Plasma Etching: fundamentals and applications. – Oxford: Oxford University Press, 1998.

5. Lieberman M.A, Lichtenberg A.J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing.— Hoboken: Wiley, 2005.
6. Лисовский В., Бут Ж.-П., Ландри К., Дуэ Д., Касань В. Плазменная очистка технологических камер в высокочастотном емкостном разряде//Физическая инженерия поверхности. – 2004. – Т. 2. – С. 168-183.
7. Lisovskiy V., Booth J.-P., Jolly J., Martins S., Landry K., Douai D., Cassagne V., Yegorenkov V. Modes of rf capacitive discharge in low-pressure sulfur hexafluoride//J. Phys. D: Appl. Phys. – 2007. – Vol. 40. – P. 6989-6999.
8. Lisovskiy V., Kharchenko N., Yegorenkov V. Modes of longitudinal combined discharge in low pressure nitrogen//J. Phys. D: Appl. Phys. – 2008. – Vol. 41. – P. 125207 (1-8).
9. Ogle D.B., Woolsey G.A. Diffuse and constricted glow discharges in SF<sub>6</sub>//J. Phys. D: Appl. Phys. – 1987. – Vol. 20. – P. 453-458.

*Лисовский Валерий Александрович – профессор кафедры физических технологий ХНУ имени В.Н. Каразина, ведущий научный сотрудник НИЛ ДППП (по совместительству).*

*Харченко Надежда Дмитриевна – аспирант кафедры физических технологий младший научный сотрудник НИЛ ДППП (по совместительству).*

© В.А. Лисовский, Н.Д. Харченко, 2009.