

УДК 533. 915

НОРМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ ВЧ РАЗРЯДА В АММИАКЕ

В.А. Лисовский

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, 61077, Харьков, пл. Свободы 4, Украина

Поступила в редакцию 15 сентября 2008 г.

В данной работе представлены вольт-амперные характеристики слаботочного режима ВЧ разряда в аммиаке для частот ВЧ электрического поля 13,56 МГц и 27,12 МГц. Получено, что только аномальный режим горения наблюдается при низких давлениях, когда рост тока сопровождается повышением ВЧ напряжения с полным покрытием разрядом площади электродов. Нормальный режим появляется при более высоких давлениях газа, когда рост тока происходит при увеличении площади, занимаемой разрядом на электродах. Разряд горит в аномальном режиме после полного покрытия поверхности электродов. Получено, что нормальная плотность тока увеличивается с повышением давления газа и частоты ВЧ электрического поля. Представлена аналитическая модель, предсказывающая пропорциональность нормальной плотности тока давлению в степени 5/6 и частоте в степени 11/6, что удовлетворительно описывает результаты экспериментов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: высокочастотный емкостный разряд, слаботочный режим, нормальный режим, аномальный режим, вольт-амперная характеристика, аммиак.

Аммиак широко применяется в различных плазменных технологических процессах. Так ВЧ разряд в аммиаке используется для азотирования металлов [1], упрочняющая изделия (инструменты для обработки металлов) и создавая защитные покрытия на поверхности твердых тел. Разряд в NH_3 может использоваться для модификации поверхности оксидных пленок SiO_2 [2]. Смеси NH_3 с CO (или с CO_2) применяются для травления магнитных материалов [3]. Особенно широко NH_3 используется в процессах осаждения пленок нитрида кремния (в смесях с силаном SiH_4 [4-10]). Поэтому изучение процессов, происходящих в газовом разряде в аммиаке, представляет значительный интерес.

В то же время ВЧ разряд в аммиаке остается недостаточно исследованным. Авторы работы [11] измерили интенсивности излучения молекул NH^* и N_2^* в непрерывном ВЧ (13,56 МГц) и модулированном (ВЧ напряжение модулировалось прямоугольными импульсами килогерцового диапазона) разрядах в NH_3 . В работе [12] была разработана гибридная Монте-Карло / гидродинамическая модель, с помощью которой предсказаны характеристики плазмы ВЧ разряда в смесях нескольких технологических газов, в том числе и в смеси SiH_4/NH_3 . Было показано, что благодаря более низкому потенциалу ионизации NH_3 и быстрой скорости перезарядки, приводящей к формированию ионов NH_4^+ , даже разряды с 50 % силана близки по характеристикам к плазме в чистом NH_3 . Авторы [13] измерили кривые зажигания ВЧ разряда в аммиаке в широком диапазоне зазоров между электродами.

Однако до сих пор в литературе не были представлены даже вольт-амперные характеристики ВЧ разряда (зависимость активного ВЧ тока $I_{rf} \cos \phi$ от приложенного ВЧ напряжения, где ϕ - угол сдвига фазы).

Хорошо известно [6, 14, 15], что разряд постоянного тока может существовать в нормальном и аномальном режимах. В нормальном режиме напряжение на электродах и плотность тока слабо зависят от полного тока. При этом нормальная плотность тока $J_n \propto p^2$, т.е. отношение J_n / p^2 является постоянной величиной, выводимой из принципа подобия. В нормальном режиме при низких токах плазма контактирует только с частью поверхности катода. С ростом тока площадь контакта увеличивается, пока разряд не заполнит всю поверхность катода. После этого разряд переходит в аномальный режим, в котором напряжение увеличивается с ростом тока.

Целью данной работы было исследование режимов горения и электрических характеристик ВЧ емкостного разряда в аммиаке. Были измерены вольт-амперные характеристики разряда в слаботочном режиме горения при различных давлениях газа для двух частот ВЧ электрического поля. Показано, что при достаточно высоком давлении аммиака при наименьших ВЧ токах наблюдается нормальный режим горения ВЧ разряда. Получено, что нормальная плотность тока увеличивается с ростом давления газа и частоты ВЧ электрического поля. Представлена аналитическая модель, удовлетворительно описывающая результаты экспериментов.

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В нашей исследовательской камере (см. рис.1) емкостный ВЧ разряд зажигался при частотах ВЧ поля $f = 13,56$ МГц и $f = 27,12$ МГц. Эксперименты проводились в аммиаке в диапазоне давлений $p \approx 0,04 - 6$ Торр при расстоянии между электродами $L = 20$ мм. Плоские параллельные электроды из алюминия имели диаметр 143 мм. ВЧ напряжение с амплитудой $U_{rf} < 1000$ В от генератора подавалось через согласующее устройство к потенциальному электроду, в то время как другой электрод был заземлен. Электроды располагались внутри кварцевой трубки с внутренним диаметром 145 мм. Аммиак напускался внутрь камеры через маленькие отверстия в одном из электродов и затем откачивался через зазор между вторым электродом и стенкой

кварцевой трубки. Эта разрядная камера была полностью окружена заземленной сеткой и помещалась внутри большой заземленной камеры диаметром 315 мм и высотой 231 мм (см. рис.1). Заземленная сетка, кварцевая трубка вокруг электродов и более низкое давление газа (на 1-2 порядка величины) в большой камере препятствовали зажиганию самостоятельного ВЧ разряда в ней. Внешняя камера имела достаточно большое окно из кварцевого стекла, позволяющее наблюдать поведение разряда в различных режимах горения.

ВЧ напряжение U_{rf} измерялось с помощью так называемого “ВЧ зонда” (RF probe Z’SCAN, Advanced Energy). Этот ВЧ зонд располагался на минимально возможном расстоянии от ВЧ электрода. Z’SCAN позволял регистрировать величины ВЧ напряжения, активного ВЧ тока (далее мы будем сокращенно называть его “ВЧ током”), угла сдвига фазы между током и напряжением φ и активную ВЧ мощность для основной частоты. При проведении экспериментов использовались ВЧ генераторы RF5S (RF Power Products Inc., $f=13,56$ МГц, с номинальной мощностью 500 Вт) и Advanced Energy ($f=27,12$ МГц, с номинальной мощностью 2000 Вт) и согласующее устройство PFM matching box (Huettinger Elektronik GmbH) L-типа.

Давление газа измерялось с помощью емкостных манометров-баратронов (MKS Instruments) для 10 и 1000 Торр. Напуск газа был равен $5 \text{ см}^3/\text{мин}$ и устанавливался с помощью контроллера потока, а давление газа регулировалось с помощью контроллера давления газа, автоматически поддерживающим выбранную фиксированную величину давления газа при любых условиях в разрядной камере.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В настоящей работе были измерены вольт-амперные характеристики ВЧ разряда для различных давлений аммиака и двух частот ВЧ электрического поля (см. результаты для $f=13,56$ МГц и $f=27,12$ МГц на рис.2 и рис.3, соответственно). При низких давлениях газа разряд во всем диапазоне ВЧ напряжений занимает всю поверхность электродов и горит только в аномальном режиме. При этом увеличение ВЧ напряжения сопровождается ростом ВЧ тока. Однако, начиная с некоторого давления газа, рост ВЧ тока происходит при слабо изменяющемся ВЧ напряжении, при этом увеличивается площадь, занимаемая разрядом на электроде. В этом случае ВЧ

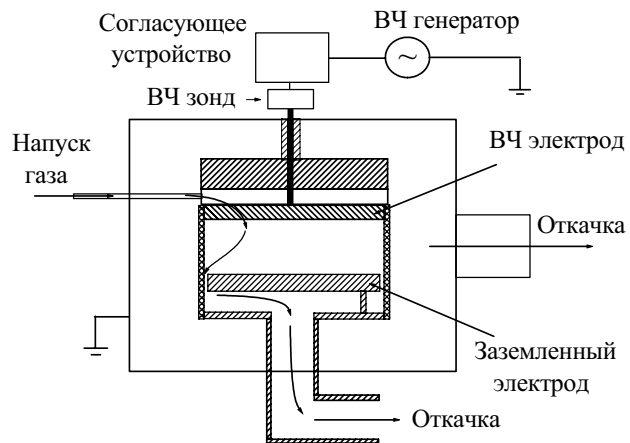


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

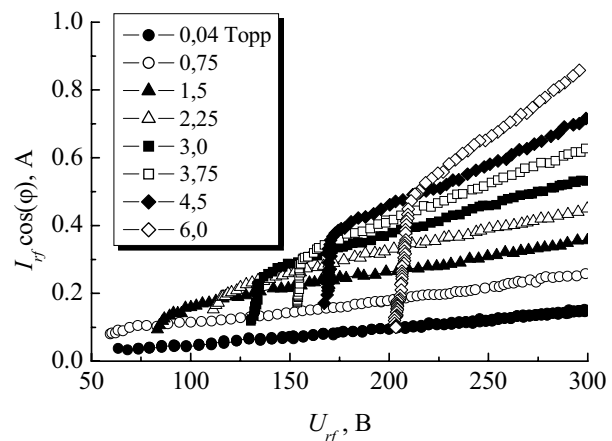


Рис.2. Вольт-амперные характеристики ВЧ разряда при различных давлениях аммиака и частоте ВЧ электрического поля $f=13,56$ МГц.

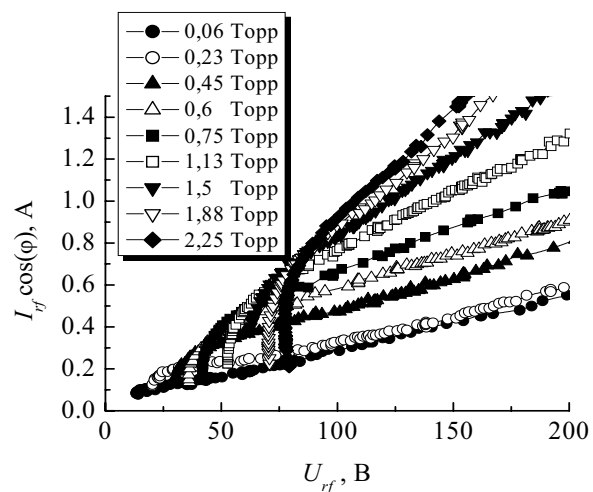


Рис.3. Вольт-амперные характеристики ВЧ разряда при различных давлениях аммиака и частоте ВЧ электрического поля $f=27,12$ МГц.

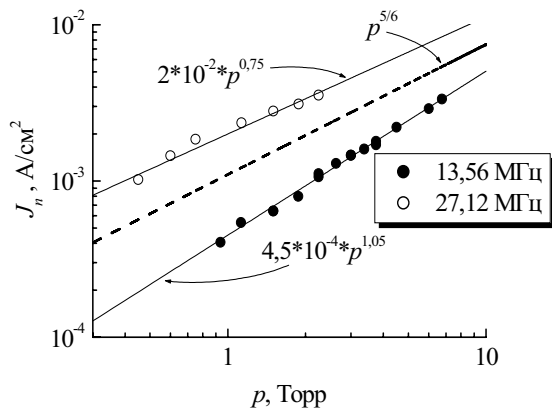


Рис.4. Зависимость нормальной плотности тока от давления газа для частот ВЧ электрического поля 13,56 МГц и 27,12 МГц. Пунктирная прямая – график функции $p^{5/6}$.

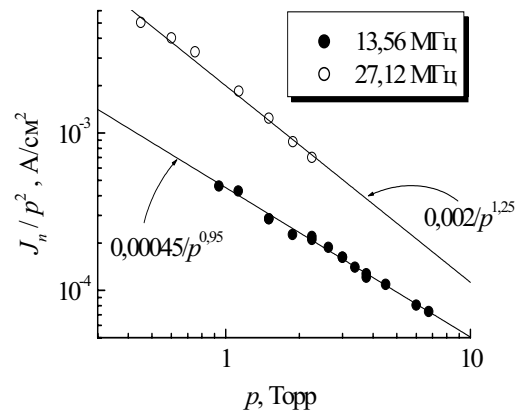


Рис.5. Зависимость отношения J_n/p^2 от давления газа для частот ВЧ электрического поля 13,56 МГц и 27,12 МГц.

разряд горит в нормальном режиме. Когда разряд покрывает всю поверхность электрода, происходит переход из нормального в аномальный режим.

Из рис.2 и 3 видно, что напряжение погасания разряда (наименьшее ВЧ напряжение, при котором возможно поддержание разряда) уменьшается при увеличении частоты ВЧ электрического поля. При этом ВЧ ток при частоте $f=27,12$ МГц в несколько раз больше, чем при $f=13,56$ МГц. Нормальный режим горения при 13,56 МГц наблюдается, начиная с давления $p \approx 0,9$ Торр, а при 27,12 МГц - начиная с $p \approx 0,45$ Торр. Следовательно, увеличение частоты в 2 раза привело к понижению наименьшего давления, при котором появляется нормальный режим, примерно вдвое.

На вольт-амперной характеристике при переходе из нормального в аномальный режим виден излом. Измеряя величину тока при ВЧ напряжении, как только разряд покрывал всю поверхность электрода, можно определить нормальную плотность тока. На рис.4 показаны величины нормальной плотности тока, полученные нами, от давления газа. Представленные на этом рисунке данные для 13,56 МГц и 27,12 МГц, построенные в логарифмическом масштабе, хорошо описываются зависимостями $p^{1,05}$ и $p^{0,75}$, соответственно. Нормальная плотность тока для 27,12 МГц оказалась в несколько раз выше, чем для 13,56 МГц.

На рис.5 представлена зависимость отношения нормальной плотности тока к квадрату давления газа от величины давления. В разряде постоянного тока величина J_n/p^2 считается постоянной [6, 14, 15], не зависящей от давления газа. В случае ВЧ разряда мы видим монотонное уменьшение J_n/p^2 с ростом давления газа. Причины различного поведения нормальной плотности тока в ВЧ разряде и в разряде постоянного тока будут названы ниже.

На рис.6 показаны значения нормальной плотности тока J_n при частотах ВЧ электрического поля $f=13,56$ МГц и $f=27,12$ МГц для нескольких давлений аммиака. Так как измерения выполнены только для двух частот, то для каждого давления газа имеется по две экспериментальные точки. Из рисунка видно, что увеличение частоты приводит к росту нормальной плотности тока (о чем выше упоминалось при пояснении данных на рис.4).

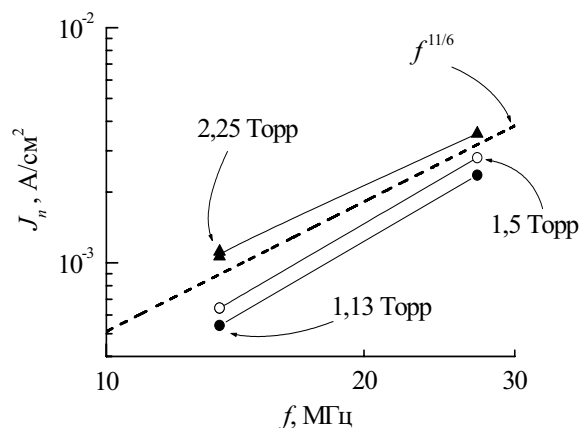


Рис.6. Величины нормальной плотности тока при частотах ВЧ электрического поля $f=13,56$ МГц и $f=27,12$ МГц для различных давлений газа. Пунктирная прямая – график функции $f^{-11/6}$.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В разряде постоянного тока нормальный режим связан с существованием минимума на вольт-амперной характеристике катодного слоя. В ВЧ разряде в слаботочном α - режиме причиной появления нормального режима является наличие минимума на вольт-амперной характеристике всего разряда в целом [16]. Вольт-амперная характеристика плазменного объема является падающей (в [16] для падения ВЧ напряжения на

плазме принято выражение $U_{pl} = C \cdot p \cdot L \cdot J^m$, где C и m - константы). В приэлектродных слоях вольт-амперная характеристика растущая, через слои течет ток смещения. Падение ВЧ напряжения на слоях U_{sh} выражается формулой

$$U_{sh} = \frac{4\pi d_{sh}}{\omega} J, \quad (1)$$

где d_{sh} – толщина слоя, $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота ВЧ электрического поля, J – плотность ВЧ тока. Между ВЧ напряжением на слоях U_{sh} и плазме U_{pl} имеется сдвиг фаз $\pi/2$ (т.к. через них текут, соответственно, ток смещения и активный ВЧ ток), поэтому ВЧ напряжение на электродах U_{rf} в [16] представлено в виде

$$U_{rf} = (U_{sh}^2 + U_{pl}^2)^{1/2}. \quad (2)$$

Соотношения между активным ВЧ током и током смещения при различных условиях можно найти в [16].

Авторами [16] получена формула для минимальной (нормальной) плотности тока J_n :

$$J_n = \left(\frac{\omega C p L \sqrt{m}}{4\pi d_{sh}} \right)^{1/(m+1)}. \quad (3)$$

Недостатком этой формулы является наличие неопределенных величин C и m . Поэтому из (3) можно сделать только качественные выводы о росте J_n с частотой ω и давлением газа p (при этом скорости роста остаются неизвестными).

В данной работе предложена простая аналитическая модель, позволяющая уточнить зависимость нормальной плотности тока J_n от частоты ω и давления газа p .

Запишем выражение для плотности тока положительных ионов J_i :

$$J_i = e n_s u_s, \quad (4)$$

где e – элементарный заряд, n_s и u_s – плотность и скорость ионов на границе слоя, соответственно. Плотность n_s в диффузионном приближении связана с плотностью плазмы в центре ВЧ разряда n_0 соотношением [6]

$$n_s = n_0 \cdot \left[1 + \left(\frac{L}{\pi} \cdot \frac{u_B}{D_a} \right)^2 \right]^{-1/2}, \quad (5)$$

где L – расстояние между электродами, u_B – боровская скорость (скорость ионного звука), $u_B = \sqrt{kT_e/M}$ (k – постоянная Больцмана, T_e – температура электронов, M – масса иона), D_a – коэффициент амбиполярной диффузии [6, 15]:

$$D_a = D_i \cdot \left(1 + \frac{T_e}{T_i} \right), \quad (6)$$

D_i – коэффициент свободной диффузии ионов, T_i – температура ионов.

Для скорости ионов u_s имеем [6]:

$$u_s = u_B \cdot \left(1 + \frac{\pi \lambda_{De}}{2 \lambda_i} \right)^{-1/2}, \quad (7)$$

где λ_{De} – дебаевский радиус для электронов, λ_i – длина свободного пробега ионов для процесса перезарядки.

Анализ будем проводить для случая $\lambda_i \ll \lambda_{De}$. Это справедливо для диапазона давлений газа $p > 1$ Торр. Например, при обычной для ВЧ разряда температуре электронов $T_e = 2$ эВ и плотности плазмы в слаботочном α -режиме $n_e \sim 10^9 \text{ см}^{-3}$ $\lambda_{De} = 2,3 \cdot 10^{-2}$ см. Для длины свободного пробега ионов λ_i в аммиаке имеем при $p = 1$ Торр $\lambda_i = \sqrt{2} \cdot 3,35 \cdot 10^{-3} / p \approx 4,4 \cdot 10^{-3}$ см. Увеличение давления газа усиливает неравенство $\lambda_i \ll \lambda_{De}$.

Запишем также закон Чайльда-Ленгмюра (закон “трех вторых”) для столкновительного ВЧ слоя [6, 15]:

$$J_i = a \cdot \sqrt{\frac{2e\lambda_i}{M}} \cdot \frac{\bar{V}^{3/2}}{d_{sh}^{5/2}} = a \cdot \sqrt{\frac{2e\lambda_i}{M}} \cdot \frac{U_{sh}^{3/2}}{d_{sh}^{5/2} \cdot 2^{3/2}}. \quad (8)$$

Здесь мы предполагаем (в согласии с [6, 15]), что постоянное падение напряжения на приэлектродном слое $\bar{V} = U_{sh}/2$. Константа $a = 0,064$ [15]. Приравняем выражения (4) и (8) с учетом (5), (7) и условия $\lambda_i \ll \lambda_{De}$ (при этом число ионов, пришедших из плазменного объема к границе слоя, равно числу ионов, вошедших в слой):

$$J_i = e \cdot n_0 \cdot u_B \cdot \left[1 + \left(\frac{L}{\pi} \cdot \frac{u_B}{D_a} \right)^2 \right]^{-1/2} \cdot \left(\frac{2\lambda_i}{\pi \lambda_{De}} \right)^{1/2} = a \cdot \sqrt{\frac{2e\lambda_i}{M}} \cdot \frac{U_{sh}^{3/2}}{d_{sh}^{5/2} \cdot 2^{3/2}} \quad (9)$$

и выразим плотность плазмы в центре разряда:

$$n_0 = \left(\frac{a^4 \cdot \pi}{256 \cdot e^4 \cdot M \cdot u_B} \right)^{1/5} \cdot \frac{U_{sh}^{6/5}}{d_{sh}^2} \cdot \left[1 + \left(\frac{L}{\pi} \cdot \frac{u_B}{D_a} \right)^2 \right]^{-2/5}. \quad (10)$$

Плотность ВЧ тока в плазменном объеме можно записать в виде [15]:

$$J_{pl} = \frac{e^2 n_0 E_{pl}}{m \cdot \sqrt{\omega^2 + \nu_m^2}} = \frac{e^2 n_0 U_{pl}}{m \cdot (L - 2d_{sh}) \cdot \sqrt{\omega^2 + \nu_m^2}}, \quad (11)$$

где E_{pl} – ВЧ электрическое поле в плазме, ν_m – транспортная частота столкновений электронов с молекулами газа. Через плазменный объем течет активный ВЧ ток с плотностью J_{pl} , который в слоях замыкается током смещения J_{cm} . Очевидно, что для непрерывности тока должно выполняться равенство $J_{pl} = J_{cm} = J$.

Выразим из (11) падение ВЧ напряжения на плазме:

$$U_{pl} = J \cdot \frac{m \cdot (L - 2d_{sh}) \cdot \sqrt{\omega^2 + \nu_m^2}}{e^2 \cdot n_0} \quad (12)$$

и подставим сюда n_0 из (10) и U_{sh} из (1):

$$U_{pl} = \frac{m \cdot (L - 2d_{sh}) \cdot \sqrt{\omega^2 + \nu_m^2}}{e^2} \cdot \left(\frac{256 \cdot e^4 \cdot M \cdot u_B^2}{a^4 \cdot \pi} \right)^{1/5} \cdot \left(\frac{\omega}{4\pi} \right)^{6/5} \cdot \frac{d_{sh}^{4/5}}{J^{1/5}} \cdot \left[1 + \left(\frac{L}{\pi} \cdot \frac{u_B}{D_a} \right)^2 \right]^{-2/5}. \quad (13)$$

Теперь из (1), (2) и (13) определим вольт-амперную характеристику $U_{rf}(J)$ всего разрядного промежутка:

$$U_{rf} = \sqrt{C_1 \cdot J^2 + \frac{C_2}{J^{2/5}}}, \quad (14)$$

где величины C_1 и C_2 равны, соответственно:

$$C_1 = \left(\frac{4\pi}{\omega} \right)^2 d_{sh}^2,$$

$$C_2 = \frac{m^2 \cdot (L - 2d_{sh})^2 \cdot (\omega^2 + \nu_m^2)}{e^4} \cdot \left(\frac{256 \cdot e^4 \cdot M \cdot u_B^2}{a^4 \cdot \pi} \right)^{2/5} \cdot \left(\frac{\omega}{4\pi} \right)^{12/5} \cdot d_{sh}^{8/5} \cdot \left[1 + \left(\frac{L}{\pi} \cdot \frac{u_B}{D_a} \right)^2 \right]^{-4/5}.$$

Продифференцируем (14) по плотности тока J и найдем минимальную (нормальную) плотность тока J_n :

$$J_n = \left(\frac{1}{5} \cdot \frac{C_2}{C_1} \right)^{5/12} = \left(\frac{\omega}{4\pi} \right)^{11/6} \cdot \frac{d_{sh}^{13/12}}{e} \cdot \left(\frac{256 \cdot M \cdot u_B^2}{a^4 \cdot \pi} \right)^{1/6} \cdot [m \cdot (L - 2d_{sh})]^{-5/6} \cdot (\omega^2 + \nu_m^2)^{5/12} \cdot \left[1 + \left(\frac{L}{\pi} \cdot \frac{u_B}{D_a} \right)^2 \right]^{-1/2}. \quad (15)$$

Оценим транспортную частоту столкновений ν_m электронов с молекулами аммиака из данных работы [13]. При характерных для ВЧ разряда температурах электронов $T_e = 1-5$ эВ средняя величина частоты при давлении аммиака 1 Торр $\nu_m \approx 3 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$. Циклическая частота для 13,56 МГц равна $8,5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$, а для 27,12 МГц – $1,7 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$. Уже при давлении газа выше 0,5 Торр выполняется соотношение $\nu_m \gg \omega$ для обеих частот ВЧ электрического поля. Так как вошедшая в выражение (15) толщина приэлектродного слоя d_{sh} слабо меняется при $p > 1$ Торр (см. рис.7), а транспортная частота пропорциональна давлению газа $\nu_m \propto p$, то при $\nu_m \gg \omega$ мы имеем следующую зависимость нормальной плотности тока J_n от циклической частоты ω ВЧ электрического поля и давления p :

$$J_n \propto \omega^{11/6} \cdot p^{5/6}. \quad (16)$$

При этом уменьшающаяся с ростом частоты толщина слоя может ослабить зависимость J_n от ω , однако, для уточнения этого нужны дополнительные исследования.

Из рис.4 и 6 видно, что предсказанные формулой (16) зависимости $J_n(p, \omega)$ хорошо согласуются с результатами наших экспериментов. Определить абсолютную величину нормальной плотности тока с помощью

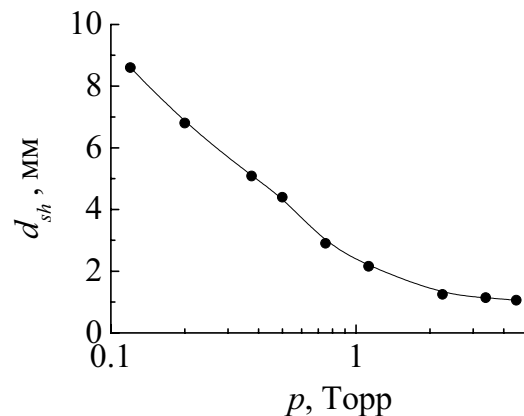


Рис.7. Зависимость толщины приэлектродного слоя в слаботочном режиме горения от давления газа для частоты ВЧ электрического поля 13,56 МГц.

формулы (15) не удается, т.к. неизвестна величина температуры электронов в ВЧ разряде (которая входит в боровскую скорость и при этом зависит от давления газа), а также в литературе отсутствуют данные о коэффициенте свободной диффузии D_i ионов аммиака в собственном газе.

Отметим, что в случае произвольного соотношения λ_i и λ_{De} данная задача аналитически не решается, т.к. вместо формулы (10) для плотности плазмы в центре разряда получается уравнение 5-й степени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе экспериментально исследован ВЧ емкостный разряд в аммиаке. Показано, что при низких давлениях разряд горит только в аномальном режиме и занимает всю поверхность электродов. При более высоких давлениях ВЧ разряд горит сначала в нормальном режиме, при этом повышение тока сопровождается увеличением площади, занимаемой разрядом на электродах, при слабо изменяющемся ВЧ напряжении. После полного покрытия поверхности электродов разряд переходит в аномальный режим. Получено, что наименьшее давление, при котором появляется нормальный режим, уменьшается с увеличением частоты ВЧ электрического поля. Отношение нормальной плотности тока и квадрата давления газа не сохраняется в ВЧ разряде, а уменьшается с ростом давления. Увеличение частоты ВЧ электрического поля приводит к росту нормальной плотности тока. Представлена простая аналитическая модель, с помощью которой получено, что нормальная плотность тока пропорциональна $p^{5/6}$ и $f^{11/6}$. Результаты расчетов хорошо описывают экспериментальные данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bellakhal N. Nitriding of titanium by NH_3 RF plasma: a study of the corrosion resistance and the mechanical properties of the protective films formed at the solid surface // *Materials Research Bulletin*. - 2002. - Vol. 37. - P. 2539-2546.
2. Dimitrova T., Atanassova E., Beshkov G., Pazov J. Thin thermal SiO_2 after NH_3 or N_2O plasma action under plasma-enhanced chemical vapor deposition conditions // *Thin Solid Films*. - 1994. - Vol. 252. - P. 89-97.
3. Shul R.J., Pearton S.J. *Handbook of Advanced Plasma Processing Techniques*. - Berlin: Springer, 2000. - 654 p.
4. Alexandrov L.N., Belousov I.I., Efimov V.M. Regularities of growth and electrical properties in the plasma-enhanced deposition of silicon nitride // *Thin Solid Films*. - 1988. - Vol. 157. - P. 337-343.
5. Gonzalez J.M., Luna R.G., Tudanca M., Sanchez O., Albella J.M., Martinez-Duart J.M. Plasma enhanced chemical vapour deposited Si_3N_4 thin films for optical waveguides // *Thin Solid Films*. - 1992. - Vol. 220. - P. 311-314.
6. Lieberman M.A., Lichtenberg A.J. *Principles of plasma discharges and materials processing*. - New York: Wiley, 1994. - 572 p.
7. Takechi K., Takagi T., Kaneko S. The mechanism at work in 40 MHz discharge $\text{SiH}_4/\text{NH}_3/\text{H}_2$ plasma chemical vapor deposition of SiN_x films at very high rates // *Jpn. J. Appl. Phys.* - 1998. - Vol. 37. - P. 1996-2001.
8. Ohta H., Nagashima A., Hori M., Goto T. Effect of ions and radicals on formation of silicon nitride gate dielectric films using plasma chemical vapor deposition // *J. Appl. Phys.* - 2001. - Vol. 89. - P. 5083-5087.
9. Sansonnens L., Bondkowski J., Mousel S., Schmitt J.P.M., Cassagne V. Development of a numerical simulation tool to study uniformity of large area PECVD film processing // *Thin Solid Films*. - 2003. - Vol. 427. - P. 21-26.
10. Kim B., Kim D.W., Han S.S. Refraction properties of PECVD of silicon nitride film // *Vacuum*. - 2004. - Vol. 72. - P. 385-392.
11. Cicala G., Creatore M., Favia P., Lamendola R., d'Agostino R. Modulated rf discharges as an effective tool for selecting excited species // *Appl. Phys. Lett.* - 1999. - Vol. 75. - P. 37-39.
12. Sommerer T.J., Kushner M.J. Numerical investigation of the kinetics and chemistry of rf glow discharge plasmas sustained in He, N_2 , O_2 , $\text{He}/\text{N}_2/\text{O}_2$, $\text{He}/\text{CF}_4/\text{O}_2$, and SiH_4/NH_3 using a Monte Carlo - fluid hybrid model // *J. Appl. Phys.* - 1992. - Vol. 71. - P. 1654-1673.
13. Lisovskiy V., Martins S., Landry K., Douai D., Booth J.-P., Cassagne V. Electron drift velocity in NH_3 in strong electric fields determined from rf breakdown curves // *J. Phys. D: Appl. Phys.* - 2005. - Vol. 38. - P. 1-5.
14. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. - М.: Наука, 1971. - 544 с.
15. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. - М.: Наука, 1987. - 592 с.
16. Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А. Высокочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения. - М.: Изд-во МФТИ; Наука-Физматлит, 1995. - 320 с.

NORMAL MODE OF RF DISCHARGE IN AMMONIA

V.A. Lisovskiy

Kharkov National University by V.N. Karazin, 61077, Kharkov, sq. Svobody 4, Ukraine

This paper reports the current-voltage characteristics of a weak-current mode of the RF discharge in ammonia for the RF electric field frequencies of 13.56 MHz and 27.12 MHz. The only abnormal mode of burning is found to be observed at low pressure i.e. the current growth is accompanied by the RF voltage increase with a complete coverage of the electrode area by the discharge. The normal mode occurs at higher gas pressure i.e. the current growth takes place on increasing the area occupied by the discharge on the electrodes. The discharge burns in the abnormal mode after the electrode surface is completely covered with the discharge. The normal current density is found to increase with the growth of gas pressure and RF field frequency. An analytical model is reported predicting that the normal current density is proportional to the pressure to 5/6 power and to the frequency to 11/6 power furnishing the satisfactory description of the experimental results.

KEY WORDS: radio frequency capacitive discharge, weak-current mode, normal mode, abnormal mode, current-voltage characteristic, ammonia.