

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Влисов

Лисовский Валерий Александрович

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ВЧ РАЗРЯДА Е-ТИПА.

01.04.08. - физика и химия плазмы.

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук.

Харьков - 1993

АВ 28.698

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена Харьковском государственном университете.

Научный руководитель - кандидат физико-математических наук
доцент Фареник Владимир Иванович.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Падалка Валентин Глебович, проф.ХАИ;
доктор физико-математических наук
Швец Олег Михайлович, ННЦ ХФТИ.

Ведущая Организация - Институт ядерных исследований АН
Украины, г. Киев.

Защита диссертации состоится "22" декабря 1993
в 17 часов на заседании специализированного Ученого
совета Д 053.06.01 Харьковского государственного универ-
ситета по адресу: ЗІОІОВ, г. Харьков, пр. Курчатова, ЗІ,
ауд.301.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной
библиотеке Харьковского государственного университета.

Автореферат разослан "22" ноября 1993 г.

Ученый секретарь специализированного
совета, доктор физико-математических
наук, профессор

Н.А. Азаренков Н.А. Азаренков

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00802625 (N)

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

AB-28.698

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Высокочастотный газовый разряд емкостного типа и комбинированный (ВЧ разряд с наложенным на него внешним постоянным электрическим полем) разряд широко используются при различных технологических процессах: плазменное травление и осаждение полупроводниковых материалов, анодизация кремния и алюминия, осаждение алмазоподобных тонких пленок, накачка газовых лазеров и т.д. При этом для оптимизации плазменных технологических процессов часто необходимо знать условия пробоя газа в разрядном устройстве, а также формы стационарного горения разряда. Поэтому численное моделирование и экспериментальное измерение кривых зажигания разряда в ВЧ однородном и комбинированных полях, а также параметров разряда при различных режимах горения представляет значительный интерес.

В работе Кихары [1] проведен математический анализ теории электрических разрядов в газах путем подбора соответствующих моделей, воспроизводящих процессы, возникающие при столкновении электронов с молекулами газа, и основанных на экспериментальных данных. Полученные результаты автор применил, в частности, к решению задачи о ВЧ пробое для однородного поля в диффузионном режиме. При этом возможная вторичная электронная эмиссия с поверхности электродов не учитывалась. Однако, полученное уравнение пробоя в ВЧ поле неудовлетворительно описывало экспериментальные кривые зажигания [2]. Сен и Гош [3], стремясь улучшить соответствие теории [1] экспериментальным данным [2], предложили изменить численные значения молекулярных констант, использованных в [1], определив их не из вида

[1] Kihara T. - Rev.Modern Phys., 1952, V.24, p.45.

[2] Oithens S. - Phys.Rev., 1940, V.57, p.822.

[3] Sen S.N. and Ghosh A.K. - Indian J.Phys., 1962, V.36, p.605.

принятых моделей, а на основании экспериментальных данных. Однако это не привело к предполагаемому существенному улучшению.

Как известно [4,5], в области малых давлений слева от минимума кривых зажигания ВЧ разряда имеется область неоднозначной зависимости пробойного ВЧ напряжения $U_{гг}$ от давления газа p . При понижении давления пробойное ВЧ напряжение сначала уменьшается, проходит через точку перегиба и минимум, затем растет и достигает первой точки поворота. Дальнейший рост пробойного ВЧ напряжения происходит при увеличении давления газа, т.е. на кривой зажигания ВЧ разряда наблюдается область неоднозначности. После прохождения второй точки поворота кривая зажигания ВЧ разряда отклоняется в область низких давлений. При этом после пробоя ВЧ разряд горит в сильноточной форме, остальные части кривых зажигания ответственны за появление слаботочной формы. Данную ветвь кривой зажигания часто называют резонансной, вторично-эмиссионной (в [2] она названа δ -модой пробоя), при этом основным механизмом рождения заряженных частиц является вторичная электронная эмиссия с поверхности электродов. Ветвь кривой зажигания от перегиба до точки поворота можно назвать диффузионно-дрейфовой, т.к. для ее моделирования используют теории, учитывающие диффузию и дрейф заряженных частиц в ВЧ поле [1]; при этом справа от минимума кривой зажигания с ростом давления p пробойное ВЧ напряжение $U_{гг}$ увеличивается по линейному закону (α -мода пробоя [2]). Однако, после прохождения точки перегиба [5] линейная зависимость $U_{гг}$ от p нарушается.

Вместе с тем, комбинированный разряд, соответствующий слабо-

[4] Левитский С.М. - ЖТФ, 1957, т.27, с.970.

[5] Кропотов Н.Ю., Качанов Д.А., Реука А.Г., Лисовский В.А., Егоренков В.Д. и Ференик В.И. - Письма в ЖТФ, 1988, т.14, с.359.

точной форме ВЧ разряда, характеризуется немонотонной зависимостью пробойного ВЧ напряжения U_{rf} от приложенного постоянного напряжения U_{do} . С увеличением постоянного напряжения пробойное ВЧ напряжение сначала растет [4,6-9], достигает максимума и затем уменьшается [4, 9]. В случае сильноточной формы ВЧ разряда наблюдается только монотонное уменьшение пробойного ВЧ напряжения [4].

Представляется целесообразным свести воедино многочисленные данные по пробоям в ВЧ и комбинированных полях и объединить их на основе достаточно простой численной модели, параметры которой следует определить из эксперимента.

Хорошо известно [4,10,11], что высокочастотный емкостной газовый разряд может гореть в одной из двух заметно различающихся форм. В слаботочном режиме (α - разряд) проводимость приэлектродных слоев, отделяющих электроды от плазмы, мала. Ток между плазмой и электродами разрядной камеры замыкается преимущественно током смещения, при этом плотность тока невелика. В сильноточном режиме (γ - разряд) проводимость приэлектродных слоев значительна, причем оба слоя ведут себя подобно катодному слою тлеющего разряда постоянного тока, а самоподдержание ионного тока на электрод обеспечивается за счет ион-электронной эмиссии и развития электронных лавин в слое.

[6] Kirohner F. - Ann. der Phys., 1925, V.77, p.287,298.

[7] Kirohner F. - Phys.Rev., 1947, V.72, p.348.

[8] Varela A.A. - Phys.Rev., 1947, V.71, p.124.

[9] Sen S.N. and Bhattaoharjee B. - Can.J.Phys., 1965, V.43, p.1543;
1966, V.44, p.3270.

[10] Яценко Н.А. - ЖТФ, 1981, т.51, с.1195.

[11] Яценко Н.А. - Инж.-физ.ж., 1992, т.62, с.739.

Слаботочная форма наблюдается при не слишком больших токах и ВЧ напряжениях на электродах, а сильноточная - при ВЧ напряжениях, превышающих некоторые критические величины. При средних давлениях ($p \approx 10$ Торр) ВЧ разряд переходит из α - в γ - режим скачкообразно [10-14], при низких ($p < 0.1$ Торр) давлениях - непрерывно [14,15], в то время как при промежуточных давлениях ($p \sim 1$ Торр) и достаточно больших межэлектродных расстояниях ($L \approx 4 - 5$ см) с ростом ВЧ напряжения наблюдается последовательный переход ВЧ разряда из слаботочного в $\alpha - \gamma$ гибридный и затем в сильноточный режим горения [15]. Переход разряда из α - в γ - режим [10-15] сопровождается значительным увеличением (в несколько раз) разрядного тока и плотности плазмы. Вместе с тем, при переходе ВЧ разряда в инертных газах из слаботочного в сильноточный режим наблюдается область отрицательной дифференциальной проводимости [16,17], т.е. с ростом ВЧ напряжения ток проводимости в цепи электродов уменьшается, достигает минимума и лишь затем быстро увеличивается. Представляет интерес выяснить физические процессы, происходящие в ВЧ разряде в инертных газах при переходе из α - в γ - режим горения.

В отличие от высокочастотного и тлеющего разрядов, структура которых изучена довольно детально, вопрос о структуре комбинирован-

[12] Vidaud P., Duttani S.M.A., Hall D.R. - J.Phys.D, 1988, V.21, p.57.

[13] Vitruk P.P., Baker H.J., Hall D.R. - J.Phys.D, 1992, V.25, p.1767.

[14] Райзер Ю.П. и Шнейдер М.Н. - Физика плазмы, 1987, т.13, с.471.

[15] Godyak V.A., Khanneh A.S. - IEEE Trans., 1986, V.PS-14, p.112.

[16] Кропотов Н.Ю., Лисовский В.А., Егоренков В.Д. и Фареник В.И. -

Мат. 2 Всес сов. по ВЧ разряду в волновых полях, Куйбышев, 1989, с.16.

[17] Кропотов Н.Ю., Лисовский В.А., Качанов Ю.А., Егоренков В.Д. и

Фареник В.И. - Письма в ЖТФ, 1989, т.15, в.21, с.17.

ного разряда остается открытым. Для поперечного комбинированного разряда ранее было получено [18], что в области давлений 10^{-4} – 10 Торр могут существовать три типа разрядов: тлеющий разряд постоянного тока, в котором под действием ВЧ поля создается незначительная дополнительная ионизация; типичный ВЧ разряд, в котором электроды постоянного поля действуют как двойной зонд и собирают токи, ограниченные пространственными зарядами; промежуточный тип разряда, в котором ВЧ поле создает достаточно ионов для значительного изменения катодного падения тлеющего разряда. Радиальный оптический эмиссионный профиль разряда постоянного тока, поперечного безэлектродного ВЧ разряда и их комбинации измерен в [19], а поведение постоянной составляющей потенциала плазмы продольного комбинированного разряда теоретически и экспериментально рассмотрено в [20] в двух предельных случаях: влияние постоянного напряжения на ВЧ разряд и влияние ВЧ напряжения на разряд постоянного тока.

Для выявления физических закономерностей высокочастотных систем емкостного типа и повышения эффективности их использования в технологии была сформулирована цель работы:

объединить разрозненные экспериментальные и теоретические данные и построить единую феноменологическую картину пробоя газа и структуры разряда в ВЧ и комбинированных полях.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих задач:

-
- [18] Yamamoto K., Okuda T. - Appl. Scient. Res. (Nagasaki), 1955, V. B5, p. 144.
[19] Golichman V.H., Goldfarb V.M., Tendler M.B. - Proc. 12th Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases (Eindhoven), 1976, p. 109.
[20] Kohler K., Coburn J.W., Horne D.E., Kay E. and Keller J.H. - J. Appl. Phys., 1985, V. 57, p. 59.

1. Экспериментально и теоретически исследовать пробой газа низкого давления в высокочастотном однородном поле и получить простые аналитические выражения, хорошо описывающие экспериментальные кривые зажигания ВЧ разряда в широком диапазоне давлений газа, ВЧ напряжений и межэлектродных расстояний.

2. Экспериментально и теоретически выяснить влияние постоянного электрического поля на ВЧ пробой газа низкого давления и исследовать структуру и формы существования возникающего продольного комбинированного разряда.

3. Изучить явления в газоразрядном промежутке, сопровождающие возникновение отрицательной дифференциальной проводимости ВЧ разряда в инертных газах при переходе из слаботоочного в сильноточный режим горения.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ.

1. Значения молекулярных констант и аппроксимационные выражения для экспериментальных кривых зажигания ВЧ разряда.

2. Факт существования точки перегиба на кривой зажигания разряда в постоянном электрическом поле и его теоретическое обоснование.

3. Существование области неоднозначности на кривой зажигания разряда в комбинированном поле и результаты исследования зависимости ширины области от постоянного электрического поля.

4. Выражения для уравнений пробоя в комбинированном поле для случаев слабого и сильного постоянного электрического поля.

5. Вывод о существовании трех форм горения продольного комбинированного разряда низкого давления.

6. Существование немонотонного поведения плотности плазмы в ВЧ разряде в аргоне в области промежуточных давлений.

Практическая ценность работы.

Результаты данной работы могут быть использованы при разработке плазменного технологического оборудования для реактивного ионно-лучевого травления полупроводниковых и диэлектрических материалов.

Основные материалы диссертации опубликованы в работах [1* - 8*] и докладывались на VI Всесоюзной конференции по взаимодействию электромагнитных излучений с плазмой (Душанбе, 1991), II Межотраслевом научно-техническом семинаре "Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике" (Харьков, 1991) и Международной конференции "Физика на Украине" (Киев, 1993).

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав с двумя таблицами и 30 рисунками, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 74 наименования. Общий объем работы 92 страниц.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

В первой главе описана экспериментальная установка, диагностическая аппаратура и методы исследования. Указаны диапазоны давлений газа, ВЧ и постоянного напряжений, в которых проводились исследования разрядных характеристик.

Во второй главе экспериментально и теоретически исследован пробой газа низкого давления в однородном высокочастотном поле, а также в постоянном электрическом поле. На основе анализа уравнения

Кривые для ВЧ пробоя и экспериментальных кривых зажигания составлены на таблица молекулярных констант для десяти газов и паров. Из экспериментальных кривых зажигания методом наименьших квадратов получены аппроксимационные формулы, описывающие различные участки (вторично-эмиссионный, диффузионно-дрейфовый участки и участок справа от точки перегиба) кривых зажигания. Теоретически предсказано и экспериментально подтверждено наличие точки перегиба на кривой зажигания разряда в постоянном электрическом поле, а также выведены простые соотношения между напряжениями и давлениями в точке перегиба и минимуме, соответственно.

Третья глава посвящена влиянию постоянного электрического поля на кривые зажигания ВЧ разряда, в частности, на область неоднозначной зависимости пробойного ВЧ напряжения от давления газа. Выведены уравнения пробоя, описывающие экспериментальные кривые зажигания при различном соотношении величин постоянного и ВЧ напряжений для двух предельных случаев: случай слабого и случай сильного постоянного электрического поля. Исследованы формы горения; осевая структура и вольт-амперные характеристики продольного комбинированного разряда низкого давления.

В четвертой главе рассмотрены особенности перехода ВЧ разряда низкого давления в аргоне из слаботочного в сильноточный режим горения в диапазоне давлений, при которых наблюдается отрицательная дифференциальная проводимость. Экспериментально обнаружена и исследована область немонотонного поведения плотности плазмы в центральной части ВЧ разряда, а также измерены параметры возникающей при этом ионизационной неустойчивости. Изучено влияние молекулярной добавки (воздуха) в аргоне на характеристики ионизационной неустойчивости и на область немонотонного поведения плотности плазмы. На

основе полученных результатов предложено распространить область существования $\alpha - \gamma$ гибридного ВЧ разряда в диапазон низких давлений газа и небольших межэлектродных промежутков.

В заключении кратко сформулированы основные результаты работы.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.

1) Исследован пробой газа низкого давления в однородном ВЧ поле и в постоянном электрическом поле.

1) Проанализировано уравнение Кихары для ВЧ пробоя газа и выведены выражения, связывающие величины молекулярных констант, используемых в уравнении Кихары, с положением минимума и точки перегиба кривой зажигания ВЧ разряда. На основании полученных выражений и экспериментальных кривых зажигания составлена таблица молекулярных констант для десяти газов и паров жидкостей. Проведен анализ экспериментальных кривых зажигания и методом наименьших квадратов найдены аппроксимационные формулы, описывающие различные ветви (вторично-эмиссионную и диффузионно-дрейфовую ветви, а также ветвь справа от точки перегиба) ВЧ кривых зажигания.

2) Теоретически предсказано и экспериментально подтверждено наличие точки перегиба на кривой зажигания разряда в постоянном электрическом поле. На основе анализа уравнения пробоя в постоянном поле выведены простые соотношения, связывающие напряжения пробоя и давления газа в минимуме и точке перегиба, соответственно. Показано, что отношение поля пробоя к давлению газа в точке перегиба равно половине величины молекулярной константы V_0 , а ионизационная способность электрона в той же точке в $e/2$ раза меньше, чем в минимуме кривой зажигания.

II) Проведено теоретическое и экспериментальное исследование пробоя газа низкого давления в комбинированном (ВЧ + постоянное электрическое) поле.

1) Экспериментально показано, что небольшое постоянное напряжение вызывает заметное увеличение пробойного ВЧ напряжения на правой ветви кривой зажигания, при этом относительная ширина области неоднозначности с ростом постоянного напряжения уменьшается примерно по линейному закону вплоть до нуля, а минимум кривой зажигания смещается в область более высоких давлений. При больших постоянных напряжениях, когда постоянное поле вносит вклад в ионизацию газа, минимум кривой зажигания смещается в область низких давлений, а на левой ветви кривой зажигания снова появляется область неоднозначности, причем ее относительная ширина с ростом постоянного напряжения линейно увеличивается.

2) Для случая слабого постоянного поля, не вносящего вклад в ионизацию газа, на основании уравнения Кихарн и выражения для диффузионной длины разрядной камеры при совместном действии ВЧ и небольшого постоянного электрического поля, выведено уравнение пробоя газа низкого давления в комбинированном поле. Рассмотрен предельный случай промежуточных и средних давлений и не очень малых постоянных напряжений, когда полученное уравнение пробоя можно упростить. Данное уравнение пробоя позволяет рассмотреть влияние постоянного поля на область неоднозначности.

3) Для случая сильного постоянного электрического поля, когда постоянное напряжение близко к потенциалу зажигания разряда на постоянном токе, получены три уравнения пробоя, описывающие различные участки кривых зажигания разряда в комбинированном поле. Первое уравнение выведено на основании уравнения пробоя в постоянном поле,

в котором вместо постоянного поля введено эффективное поле, и описывает участок «вблизи и справа от минимума кривой зажигания». Второе уравнение выведено для случая низких давлений и небольших ВЧ напряжений, в нем учтено влияние ВЧ осцилляций электронов на пробой газа в постоянном поле. Третье уравнение описывает повторное появление области неоднозначности при больших постоянных напряжениях, низких давлениях и амплитудах ВЧ напряжения, превышающих величину постоянного напряжения.

III) Проведено исследование структуры и форм существования продольного комбинированного разряда низкого давления. Получено, что комбинированный разряд в зависимости от соотношения величин ВЧ и постоянного напряжений может гореть в одной из трех возможных форм: ВЧ разряд, возмущенный постоянным полем; самостоятельный разряд на постоянном токе с поддержанием ионизации ВЧ полем; самостоятельный тлеющий разряд на постоянном токе. Были измерены осевые распределения плотности плазмы и вольт-амперные характеристики разряда во всех трех режимах горения. Показано, что при промежуточных давлениях ВЧ разряд переходит из первой стадии во вторую скачком, при этом резко увеличивается активный ВЧ и постоянный токи в цепи электродов; при низких давлениях переход из первой стадии во вторую происходит плавно и непрерывно. Проведено сравнение ВЧ разряда с автосмещением и комбинированного разряда. Показано, что пространственный профиль плотности плазмы для ВЧ разряда с разомкнутыми по постоянному току электродами (ВЧ разряд с автосмещением) качественно совпадает с профилем плотности плазмы для первой стадии комбинированного разряда (ВЧ разряд, возмущенный постоянным электрическим полем).

IV) Исследованы явления в газоразрядном промежутке, сопровож-

дающие возникновение немонотонного поведения активного ВЧ тока в цепи электродов (отрицательной дифференциальной проводимости) в инертных газах. Показано, что в ВЧ разряде низкого давления в аргоне наблюдается область немонотонного поведения плотности плазмы в центральной части разряда. При низких давлениях аргона немонотонное поведение плотности плазмы наблюдается одновременно с отрицательной дифференциальной проводимостью, при промежуточных же давлениях эти два явления существуют в разных диапазонах ВЧ напряжений. Получено, что в области немонотонного поведения плотности плазмы в ВЧ разряде возникает низкочастотные шумы и колебания повышенной амплитуды (ионизационная неустойчивость). Определены области существования ионизационной неустойчивости, а также параметры плазменных шумов и низкочастотных колебаний, при различных концентрациях воздуха в аргоне. Показано, что наиболее ярко немонотонное поведение плотности плазмы выражено в чистом аргоне, при концентрации аргона в воздухе меньше 20% этот эффект не наблюдается. При возникновении низкочастотных колебаний в ВЧ разряде появляются бегущие страты. Немонотонное поведение плотности плазмы в центре разряда объяснено экранировкой ВЧ поля областями повышенной плотности плазмы на границах приэлектродных слоев. Предложено распространить область существования $\alpha - \gamma$ гибридного режима ВЧ разряда в диапазон низких давлений и небольших межэлектродных расстояний.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- [1*] Лисовский В.А. Комбинированный разряд низкого давления. - Мат. 6 Всес. конф. по взаимодействию электромагнитных излучений с плазмой, Душанбе, 1991, с.106.
- [2*] Лисовский В.А. Отрицательная дифференциальная проводимость в

слаботочной форме ВЧЕ-разряда. - Мат. 2 Межотраслевого науч. технического семинара "Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике", Харьков, 1991, с.48-49

- [3*] Лисовский В.А. Разряд низкого давления в комбинированных полях. - Там же, с.46 - 47.
- [4*] Лисовский В.А. и Егоренков В.Д. Пробой газа низкого давления в комбинированных полях. - Письма в ЖТФ, 1992, т.18, в.17, с.66-71.
- [5*] Лисовский В.А. Структура разряда низкого давления в комбинированных полях. - Письма в ЖТФ, 1992, т.18, в.19, с.15 - 20.
- [6*] Lisovsky V.A. and Yegorenkov V.D. Low pressure gas breakdown in RF and DC fields. - Proc. International Conference "Physics in Ukraine", Contributed Papers, Plasma Physics, Kiev, 1993, p.156 - 159.
- [7*] Lisovsky V.A. and Yegorenkov V.D. RF and DC currents in low pressure combined discharge. - Там же, p. 160 - 163.
- [8*] Лисовский В.А. Пробой газа низкого давления в комбинированных полях. - Сборник научных работ аспирантов ЛГУ, Естественные науки, Физико-математические науки, Харьков: Основа, 1992, с. 144 - 148.
- [9*] Лисовский В.А., Егоренков В.Д., Красников О.В. α - γ переход и НЧ неустойчивость ВЧ разряда низкого давления. - Письма в ЖТФ, 1993, т.19, в.21, с.21.

АВ 28.698

Подл. к печ. 15.11.83 Формат 60×84¹/₁₆. Бумага тип. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0
Уч.-изд. л. 1,0 Тираж 100 экз. Зак. № 2412 Бесплатно.

Харьковское межвузовское арендное полиграфическое предприятие.
310093, Харьков, ул. Свердлова, 115.