

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ.

Автаева С.В., Оторбаев Д.К., Скорняков А.В.

Кыргызско-Российский Славянский университет,

720000, Кыргызская республика, г. Бишкек, ул. Киевская 44. savtaeva@mail.ru

**Введение.** Работа посвящена исследованию характеристик тлеющего разряда в воздухе. Тлеющий разряд относится к наиболее изученным и часто применяемым на практике газовым разрядам. Низкотемпературная неравновесная плазма тлеющего разряда пониженного давления применяется для травления материалов и осаждения тонких пленок при изготовлении микросхем, для модификации свойств поверхностей, в качестве источника света и активной среды электроразрядных газовых лазеров и др. Наиболее полно тлеющий разряд изучен в инертных газах, азоте и парах ртути. Развитие методов плазмохимического травления материалов и осаждения тонких пленок стимулировало исследования плазмы тлеющих разрядов в газах содержащих галогены, углеводороды и силан. Тлеющий разряд в воздухе в настоящее время остается одним из наименее изученных. Это, с одной стороны, связано со сложностью физико-химических процессов в воздушной плазме, а с другой стороны, с отсутствием технологических приложений. В последнее время интерес к газовым разрядам в воздухе возрос. Например, исследуются возможности применения тлеющего разряда в воздухе для стерилизации медицинских инструментов.

**1. Экспериментальная установка.** Тлеющий разряд зажигался в рабочей камере ВУП-4 между медными никелированными электродами диаметром 30 мм, межэлектродное расстояние -60 мм. Нерабочие части электродов изолировались фторопластом. Камера откачивалась форвакуумным насосом до давления 10 Па, которое контролировалось с помощью термпарного датчика ПМТ-2. Подача высокого напряжения на электроды осуществлялась с помощью высоковольтного выпрямителя. Ток разряда варьировался в диапазоне 5 - 25 мА, напряжение горения разряда - 1000 -2600 В .

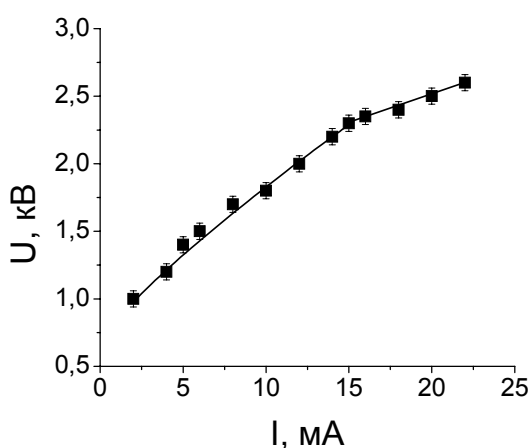


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика тлеющего разряда.

**2. ВАХ и распределение электрического поля в разряде.** Вольт-амперная характеристика разряда показана на рисунке 1. Напряжение горения разряда возрастает с ростом тока, что свидетельствует об аномальности разряда. При токе  $I=15$  мА ( $U=2300$  В) наклон ВАХ резко меняется, что, по-видимому, указывает на пороговый характер процессов в разряде.

Измерены распределения напряженности электрического поля вдоль оси и радиуса разряда. Измерения производились двумя зондами компенсационным методом. Результаты измерений показаны на рисунках 2(а) (аксиальное распределение) и 2(б) (радиальное распределение на расстоянии 40 мм от катода). Здесь и далее расстояние по

оси разряда отсчитывается от катода, а расстояние по радиусу - от оси разряда.

Как видно из рисунка, вблизи катода напряженность поля составляет ~230 В/см и спадает в направлении анода вплоть до расстояния 22 мм. Это, по-видимому, область катодного слоя и темного катодного пространства. Далее следует отрицательное свечение,

где поле равно нулю (22-27 мм), затем поле растет – фарадеево темное пространство (27-32 мм) и далее поле мало изменяется вплоть до 57 мм - положительный столб.

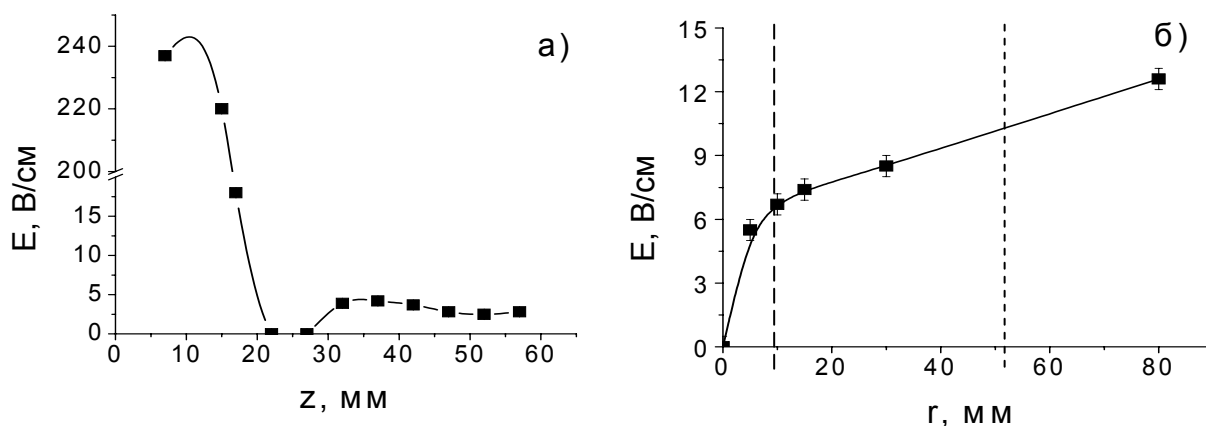


Рис. 2. Аксиальное (а) и радиальное (б) распределения электрического поля в тлеющем разряде. Штриховыми линиями показаны радиус электродов и граница зоны свечения

Радиальное распределение напряженности электрического поля соответствует классическому [1] в области положительного столба:  $E_r$  равно нулю на оси разряда и возрастает к периферии. Электрическое поле разряда проникает далеко за границы цилиндра с электродами в основаниях- радиальная напряженность электрического поля возрастает вплоть до стенок разрядной камеры.

**3. Температура электронов и концентрация заряженных частиц.** Температура электронов и концентрация заряженных частиц измерялись с помощью двойного зонда. Двойной зонд всегда находится под отрицательным потенциалом относительно плазмы, что минимизирует влияние отрицательных ионов на зондовый ток. По оценкам концентрация отрицательных ионов в исследуемом разряде может составлять 10-20 %  $n_e$ .

Зонды были изготовлены из молибденовой проволоки диаметром 0.14 мм и имели длину собирающей поверхности 4 мм. Нерабочая часть зонда помещалась в керамическую изоляцию. Зонд укреплялся на металлической стойке, конструкция которой позволяла устанавливать его в любом месте камеры. Обработка ВАХ производилась по методике, описанной в [2].

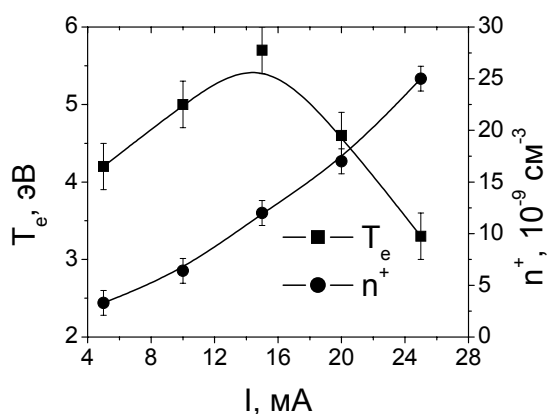


Рис.3. Зависимости температуры электронов и концентрации ионов от тока разряда.

Концентрация положительных ионов при удалении от оси разряда уменьшается (рис.4), радиальное распределение соответствует классической теории положительного столба (диффузионный режим) [1] лишь качественно. Это, вероятно, связано с тем, что

Зависимости температуры электронов и концентрации положительных ионов от величины разрядного тока приведены на рисунке 3.

Температура электронов при токе 15 мА максимальна. Концентрация положительных ионов  $n^+$  увеличивается с ростом тока разряда. При значении тока 15 мА на зависимости  $n^+(I)$  просматривается перегиб, концентрация положительных ионов начинает расти быстрее. Наблюдаемый экспериментально ход зависимостей  $T_e(I)$  и  $n^+(I)$ , также как и вид ВАХ разряда (рис.1), указывает на изменение характера физических процессов в разряде при превышении током разряда значения 15 мА.

разряд не ограничен стенками трубки. Этим обусловлено и то, что концентрация положительных ионов на расстоянии от оси порядка радиуса электродов ( $R_0=15$  мм) не спадает до нуля. Зона слабого свечения разряда при токе 10 мА заметна вплоть до расстояния 50 мм от оси разряда.

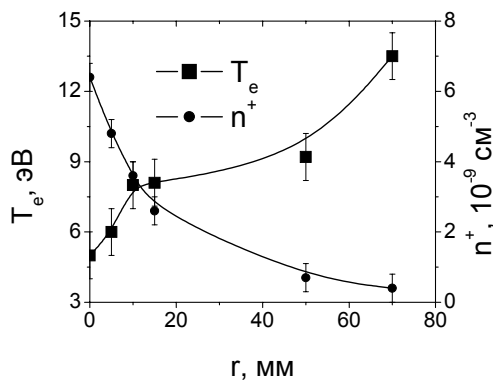


Рис. 4. Радиальные распределения температуры электронов и концентрации ионов.

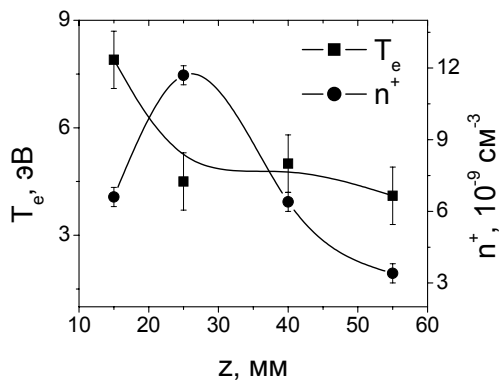


Рис. 5. Аксиальные распределения температуры электронов и концентрации ионов.

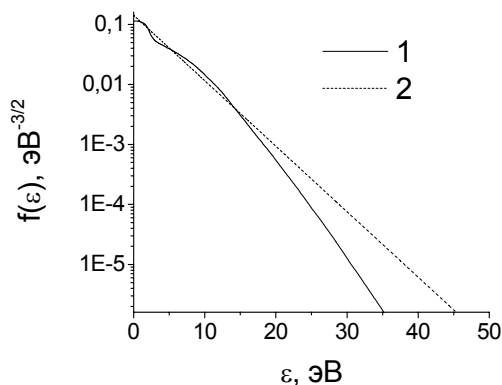


Рис. 6. ФРЭЭ в тлеющем разряде в смеси  $N_2:O_2:Ar$ ,  $E/n=240$  Тд, 1- рассчитанная, 2- максвелловская.

показан вид максвелловской ФРЭЭ, рассчитанной при той же средней энергии электронов  $\langle \epsilon \rangle = 4$  эВ.

**5. Температура газа.** Измерения температуры газа производились термопарой платинородий – платина. Температура газа в положительном столбе на оси разряда увеличивается от 320 до 420 К с ростом разрядного тока в диапазоне 5÷25 мА. В радиальном направлении температура газа уменьшается при удалении от оси разряда вплоть до комнатной вблизи стенок рабочей камеры.

Температура электронов при удалении от оси разряда растёт. По-видимому, это связано с ростом радиального электрического поля и выходом быстрых электронов за область разряда из-за отсутствия стенок, ограничивающих разряд.

Аксиальное распределение электронной температуры и концентрации положительных ионов показано на рисунке 5. Максимальная концентрация положительных ионов наблюдается в области отрицательного свечения, ближе к катоду, в темном катодном пространстве, она значительно ниже. В положительном столбе концентрация положительных ионов монотонно падает по направлению к аноду. Электронная температура (точнее средняя энергия электронов) максимальна в прикатодных областях, где имеется большое поле. Здесь температура электронов уменьшается вслед за уменьшением поля. В области фарадея темного пространства и положительного столба она практически не меняется, так как в этих областях поле невелико и изменяется слабо.

**4. Функция распределения электронов по энергиям.** Для экспериментальных значений  $E/n$  в положительном столбе тлеющего разряда рассчитаны ФРЭЭ. Расчеты проведены при помощи программы **BOLSIG** [3], позволяющей рассчитывать ФРЭЭ в двучленном приближении для локальных значений  $E/n$ . Состав воздуха моделировался смесью 78%  $N_2$ : 21%  $O_2$  : 1%  $Ar$ . По вычисленным ФРЭЭ находились значения средней энергии электронов, которые, в пределах погрешности, совпали с экспериментально измеренными значениями температуры электронов. На рис.6. показан типичный вид рассчитанной ФРЭЭ. Там же

**6. Спектральные измерения.** Изучен спектр излучения тлеющего разряда в диапазоне длин волн от 350 нм до 800 нм. Регистрация спектра осуществлялась с помощью спектрографа ДФС-8-3 с фотоэлектрической регистрацией. В спектре излучения тлеющего разряда отождествлены полосы первой и второй положительных систем молекул азота, первой отрицательной системы молекулярного иона азота, атмосферной системы молекулярного кислорода, первой отрицательной системы молекулярного иона кислорода, красной системы циана и системы Фокса-Даффенака-Баркера углекислого газа. Также были обнаружены линии серии Бальмера атомарного водорода.

Изучено распределение молекул азота по колебательным уровням возбужденного состояния  $N_2(C^3\Pi_u)$  по распределению интенсивностей излучения колебательных полос второй положительной системы азота (переход  $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ ), использовалась секвенция  $\Delta v = -2$ . Как оказалось, распределение молекул азота в состоянии  $C^3\Pi_u$  отлично от бальцмановского, поэтому состояние не может характеризоваться единой колебательной температурой.

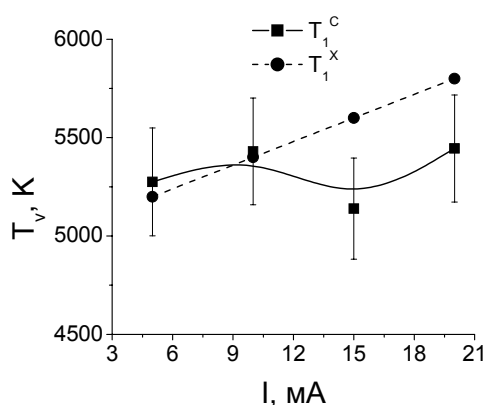


Рис. 7. Зависимости колебательных температур первого колебательного уровня состояний  $N_2(C^3\Pi_u)$  и  $N_2(X^1\Sigma_g^+)$  от тока разряда.

Были определены температуры первого и второго колебательных уровней состояния  $N_2(C^3\Pi_u)$ , относительно нулевого, в зависимости от тока разряда. Близкие к экспериментально измеренным значения относительных заселенностей  $0 \div 3$  колебательных уровней возбужденного состояния  $N_2(C^3\Pi_u)$  получены при расчете заселенностей согласно [4] в предположении триноровского распределения молекул азота по колебательным уровням основного состояния. По наилучшему совпадению рассчитанных и измеренных значений населенностей колебательных уровней состояния  $N_2(C^3\Pi_u)$  определена температура первого колебательного уровня основного состояния  $N_2(X^1\Sigma_g^+)$ , являющаяся параметром распределения Тринора (рис.7). Для второго

параметра- температуры газа использовались результаты термпарных измерений.

**Заключение.** Как и следовало ожидать, плазма тлеющего разряда в воздухе неравновесна ( $T_e \gg T_v \gg T_g$ ) и имеет сложный состав. Функции распределения электронов по энергиям и молекул азота по колебательным уровням отличаются от равновесных. Радиальные распределения температуры электронов и концентрации положительных ионов в положительном столбе разряда не соответствуют классической теории положительного столба в диффузионном режиме. Разряд сильно неоднороден по радиусу. Заряженные частицы и электрическое поле охватывают область, существенно превышающую размеры цилиндра с электродами в основаниях. На периферии разряда температура электронов растет при приближении к стенкам камеры и достигает значений  $\sim 10-15$  эВ. Распределение аксиального электрического поля в разряде типично для тлеющих разрядов. Аксиальные распределения концентрации заряженных частиц и температуры электронов также близки к типичным распределениям этих параметров в тлеющих разрядах в трубках.

#### ЛИТЕРАТУРА.

1. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука. 1971.
2. Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат. 1969.
3. W.L. Morgan, J.-P. Boeuf and L.C. Pitchford// KINEMA SOFTWARE & CPAT. <http://www.kinema.com>
4. Очкин В.Н., Савинов С.Ю., Соболев Н.Н.// В кн.: Электронно – возбужденные молекулы в неравновесной плазме М.:Наука. 1985. С.62. (Труды ФИАН. Т. 157).