

Сизых Сергей Васильевич,  
к.ф.-м.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,  
e-mail: dmitriy4061@rambler.ru

## УСЛОВИЕ ПОСТОЯНСТВА ДАВЛЕНИЯ В ВОЛНАХ ИОНИЗАЦИИ В ПЕРЕМЕННЫХ ПОЛЯХ

Sizykh S.V.

## CONSTANT PRESSURE CONDITION IN IONIZATION WAVES IN ALTERNATING FIELDS

**Аннотация.** Определяются основные процессы развития ионизации в переменных электрических полях. Показана необходимость учета фотоионизации газа в расчетах развития волн ионизации. Получено условие постоянства давления во фронте волн.

**Ключевые слова:** волны ионизации в переменных электрических полях, фотоионизация.

**Abstract.** Basic processes of ionization in alternating electric fields are determined. It was shown the necessity of gas photoionization to be taken in account in developing ionization waves calculations. Constant pressure condition in wave front is determined.

**Keywords:** ionization waves in alternating electric fields, photoionization.

Рассмотрим волны ионизации в газе в переменных электрических полях СВЧ-диапазона. Механизмы распространения волн ионизации зависят от амплитуды поля. В допробойных полях осуществляется теплопроводностный механизм продвижения волн ионизации. При повышении СВЧ-мощности, согласно имеющимся в литературе предположениям, осуществляется фотоионизационный механизм, в котором определяющую роль играет образование электронов перед фронтом волны за счет фотоионизации газа неравновесным излучением из-за фронта волны. Для теоретического описания таких волн требуется учет неравновесной кинетики, определяющей баланс электронов в плазме разряда.

Обсудим условия развития СВЧ-разрядов в виде волн ионизации. При низких потоках СВЧ-мощности продвижение волн ионизации осуществляется в соответствии с теплопроводностным механизмом. Поглощение СВЧ-энергии происходит в нагретой области за фронтом с большой концентрацией электронов. Нагрев газа перед фронтом в результате теплопроводности приводит к увеличению в этой области концентрации электронов, которые также начинают поглощать СВЧ-энергию. По мере увеличения ионизованной области, вместе с ее границей смещается и область интенсивного поглощения волны, амплитуда которой уменьшается вглубь ионизованной области на характерной длине поглощения. В результате формируется волна ионизации с некоторыми значениями скорости и концентрацией электронов за фронтом, связанной с температурой нагретого газа.

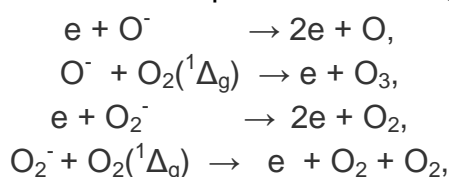
Кроме уравнений кинетики образования заряженных частиц, необходимо решать уравнения для СВЧ-поля и температуры газа. Различные процессы, оп-

ределяющие баланс электронов во фронте волны, зависят от амплитуды электрического поля  $E$ , его частоты и концентрации молекул газа  $n$ , которая, в свою очередь, зависит от газодинамических процессов изменения температуры и давления газа. В работе оценивается роль этих процессов в механизме продвижения волн ионизации.

При скоростях волн ионизации, значительно меньших скорости звука в газе, которой определяется скорость выравнивания давления, обычно используется приближение постоянного давления. Для малых потоков мощности СВЧ-излучения продвижение волн ионизации можно описывать на основе уравнения для амплитуды поля и уравнения теплопроводности, считая, что концентрация электронов равновесна и определяется температурой газа по формуле Саха. Использование системы уравнений СВЧ-поля и теплопроводности в определенных условиях позволяет удовлетворительно описать волну ионизации [1]. Как известно, при увеличении потоков мощности СВЧ-излучения, разряд становится неравновесным. Последнее означает, что уравнения для поля и температуры газа следует дополнить кинетическими уравнениями для концентраций электронов и ионов, которые уже не могут определяться температурой газа по формуле Саха.

Баланс отрицательных ионов определяется образованием ионов  $O_2^-$  в реакции трехтельного прилипания электронов к молекулам  $O_2$  при высоких давлениях и малых  $E/n$ , и образованием иона  $O^-$  при диссоциативном прилипании при больших  $E/n$ . После образования отрицательные ионы могут разрушаться с образованием электрона, вступать в реакции конверсии ионов, в результате которых образуются отрицательные ионы другого сорта.

Разрушение ионов  $O^-$  и  $O_2^-$  может протекать по следующим каналам:



где  $O_2(^1\Delta_g)$  – возбужденные молекулы кислорода, образующиеся при столкновении электронов с молекулами кислорода.

Образующиеся в обсуждаемых выше реакциях трехтельного прилипания электронов и перезарядки  $O^-$  на  $O_2$ , ионы  $O_2^-$ , также как и ионы  $O^-$ , могут разрушаться в столкновениях с молекулами газа.

Уравнение для температуры газа  $T$  с учётом поглощения СВЧ-энергии электронами и теплопроводности при постоянном давлении имеет вид:

$$\begin{aligned} C_p \rho (\partial T / \partial t + V \partial T / \partial x) &= W + \partial / \partial x (\lambda_T \partial T / \partial x), \\ W &= e^2 E^2 v n_e / (2m_e v_\omega^2), \quad v_\omega^2 = (\omega^2 + \nu^2), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $C_p$ ,  $\rho$ ,  $\lambda_T$  – теплоёмкость при постоянном давлении, плотность и теплопроводность газа;  $W$  – поглощаемая плазмой мощность;  $V$  – скорость движения газа в направлении оси  $x$ ;  $\nu$  – эффективная частота столкновений электронов с

молекулами газа,  $\omega$  – циклическая частота СВЧ-поля;  $e$  – элементарный заряд;  $m_e$ ,  $n_e$  – масса и концентрация электронов.

При решении уравнений (1) предполагается, что газ при нагревании расширяется только в аксиальном направлении. Для определения скорости движения газа в зависимости от координаты, используем уравнение постоянства давления:

$$\rho T = \text{const} \quad (2)$$

и уравнение непрерывности для  $\rho$ , которое в случае аксиального разлёта имеет вид

$$\partial \rho / \partial t + \partial(\rho V) / \partial x = 0. \quad (3)$$

Дифференцируя (2), можно найти:  $1/\rho(d\rho/dt) = -1/T(dT/dt)$ , где оператор  $d/dt = \partial/\partial t + V\partial/\partial x$ . Из уравнения (3) следует, что  $\partial V/\partial x = -1/\rho(d\rho/dt) = 1/T(dT/dt)$ .

Считая для определённости, что скорость газа при  $x \rightarrow -\infty$  равна нулю, для скорости газа в произвольной точке  $x$  найдём:

$$V = \int_{-\infty}^x 1/T(dT/dt) dx, \quad (4)$$

где  $dT/dt = \partial T/\partial t + V\partial T/\partial x$  определяется уравнением (1). По смыслу (4) определяет связь между скоростью газа в точке  $x$  и скоростью расширения газа на протяжении области нагрева.

Обсудим условия применимости приближения постоянного давления, используемого в (1)-(4). Уравнение движения газа имеет вид:

$$\partial V/\partial t + V\partial V/\partial x = -1/\rho(\partial P/\partial x), \quad (5)$$

где  $P$  — давление газа.

Учитывая, что во фронте волны ионизации характерные величины скорости  $V$ , времени  $\tau$  и ширина фронта  $\Delta$  связаны соотношением  $\Delta \sim V\tau$ , легко оценить, что два слагаемых в левой части (5) одного порядка величины. Опуская в оценках  $\partial V/\partial t$ , можно найти:

$$\rho V \partial V/\partial x \sim -(\partial P/\partial x).$$

Учитывая, что  $\rho V \approx \text{const}$  и интегрируя последнее уравнение, оценим перепад давления во фронте волны  $\Delta P \sim -\rho V^2$ , где  $\rho$ ,  $V$  – плотность и скорость газа за фронтом волны ионизации. Относительная величина уменьшения давления за фронтом волны:

$$\Delta P/P \sim \rho V^2 / P \sim (V/V_{3B})^2,$$

где  $V_{3B}$  – скорость звука в нагретом газе за фронтом волны,  $V$  – скорость волны относительно нагретого газа.

Таким образом, условие приближения постоянного давления можно записать в виде:

$$(V/V_{3B}) \ll 1. \quad (6)$$

В рассматриваемых условиях  $V \sim 10^4$  см/сек,  $V_{зв} \sim 10^5$  см/сек и, таким образом, (6) выполняется с точностью в несколько процентов.

При решении задачи о распространении волны ионизации, задаются начальные распределения температуры  $T_0(x)$  и концентрации электронов  $n_{e0}(x)$  по координате. Выбор этих распределений в значительной степени произволен и удовлетворяет только условию возникновения саморазвивающейся волны ионизации. При выборе, например, недостаточно высоких значений  $T_0(x)$ , эффективное поле и равновесная концентрация электронов будут слишком малы для развития волны ионизации.

При теплопроводностном механизме распространения волн ионизации, как следует из (2), концентрация молекул газа  $n$  обратно пропорциональна температуре  $T$ , так как давление постоянно. При нагреве газа за фронтом волны  $n$  падает, что приводит к резкому росту скорости ионизации электронным ударом. Также существенно изменяются скорости различных реакций с участием отрицательных ионов кислорода, например, скорости пороговых процессов разрушения ионов  $O^-$  и  $O_2^-$ .

С ростом мощности излучения реализуется фотоионизационный механизм волн ионизации, обсуждаемый в работе [2]. Согласно этой работе, скорость волны ионизации можно оценить по формуле  $u = v_i/k$ , где  $v_i$  - частота ионизации,  $k$  - минимальный коэффициент поглощения излучения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Райзер Ю.П. Лазерная искра и распространение разрядов. М.: Наука, 1974.
2. Сизых С.В. Скорость волн ионизации при наличии опережающей фотоионизации. - Сб. науч. трудов АГТА, Ангарск, 2005, т.1, с. 303.