Сизых Сергей Васильевич,

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

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ВОЛНАХ ИОНИЗАЦИИ В ПЕРЕМЕННЫХ ПОЛЯХ

Sizykh S.V.

GAS DYNAMIC EFFECTS IN IONIZATION WAVES IN ALTERNATING FIELDS

Аннотация. Обсуждаются 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 discussed. 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.

Обсуждаются 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 [1], 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. Таким образом формируется волна ионизации с некоторыми значениями скорости и концентрации 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, определяющие баланс электронов во фронте волны, зависят от эффективной амплитуды электрического поля $E_{\text{эф}}/n$, 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 [2]. Использование системы уравнений СВЧ поля и теплопроводности позволяет удовлетворительно описать волну ионизации. 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.

На основе уравнения для температуры газа T с учётом поглощения СВЧ энергии электронами и теплопроводности при постоянном давлении получена оценка для относительной величины уменьшения давления P за фронтом волны

$$\Delta P/P \sim \rho V^2/P \sim (V/V_{3B})^2, \tag{1}$$

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

Таким образом, условие приближения постоянного давления можно записать в виде

$$(V/V_{3B})^2 \ll 1.$$
 (2)

В рассматриваемых условиях $V \sim 10^4$ см/сек, $V_{3B} \sim 10^5$ см/сек и, таким образом, (2) выполняется с точностью в несколько процентов.

При теплопроводностном механизме распространения волн ионизации, таким образом, как следует из условия постоянства давления ρ T=const, концентрация молекул газа n обратно пропорциональна температуре T. При нагреве газа за фронтом волны $E_{3\varphi}$./n растёт, что приводит к резкому росту скорости ионизации электронным ударом.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Мак-Доналд А. Сверхвысокочастотный пробой в газах. М.: Мир, 1969.
- 2. Райзер Ю.П. Лазерная искра и распространение разрядов. М.: Наука, 1974.