

## О РАСПРОСТРАНЕНИИ СВЧ РАЗРЯДОВ В ВОЗДУХЕ

А.Х. Мнацаканян, Г.В. Найдис, С.В. Сизых

УДК 537.52

*Учтены неравновесные эффекты во фронте волны ионизации, распространяющейся навстречу СВЧ полю. Показано, что их роль возрастает при увеличении плотности потока СВЧ излучения, приводя к ускорению движения разряда.*

Разряды в СВЧ поле при определенных условиях распространяются навстречу источнику излучения /1/. Предлагались различные механизмы распространения волны ионизации в СВЧ поле: теплопроводностный /1/, пробойный /2/, фотоионизационный /3/. Наиболее полно исследована теплопроводностная модель в предположении о равновесном характере ионизации. Однако с ростом плотности потока СВЧ излучения растет средняя энергия электронов во фронте волны ионизации, при этом становятся существенными неравновесные эффекты.

В настоящей работе для определения скорости и структуры фронта волны ионизации уравнения для амплитуды напряженности СВЧ поля  $E$  и для температуры тяжелых частиц  $T$  дополнены уравнениями кинетики основных компонент плазмы воздуха.

В результате система уравнений, описывающая процесс распространения плоской волны ионизации навстречу источнику СВЧ излучения (в отрицательном направлении оси  $x$ ), имеет вид:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon' E = 0, \quad \epsilon' = 1 - \frac{4\pi e^2 n_e}{m\omega(\omega - i\nu)}, \quad (1)$$

$$c_p \rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{e^2 E^2}{2m\nu(1 + \omega^2/\nu^2)} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} + \frac{\partial (n_j v)}{\partial x} = J_j, \quad (3)$$

где  $\omega$  и  $\nu$  — частоты СВЧ поля и упругих столкновений электронов с молеку-

лами;  $n_e$  — концентрация электронов;  $c_p$  — удельная теплоемкость при постоянном давлении;  $\rho$  — плотность газа;  $\lambda$  — теплопроводность;  $v$  — скорость газа, определяемая из условия постоянства давления  $\rho T = \text{const}$  и уравнения непрерывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v) = 0,$$

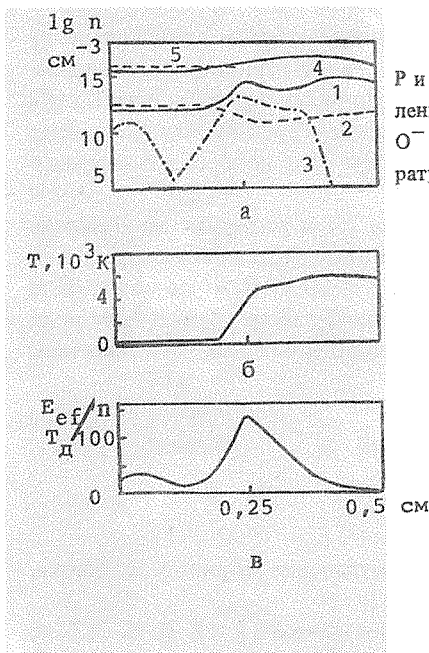
что дает

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

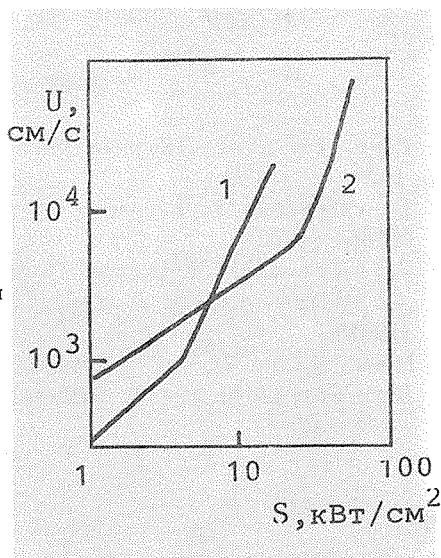
где  $dT/dt = \partial T/\partial t + v \partial T/\partial x$  определяется уравнением (2) (предполагается, что газ перед фронтом волны ионизации неподвижен). В системе кинетических уравнений (3) для концентраций  $n_j$ , где индекс  $j$  нумерует компоненты плазмы ( $e, O^-, O_2^-, O, O_2$  ( $^1\Delta$ )),  $J_j$  — скорость образования соответствующей компоненты в единичном объеме газа.

Источники  $J_j$  включают вклады реакций ионизации, прилипания, отлипания, диссоциации, электрон-ионной и ион-ионной рекомбинации. Учтены также процессы ионизации и диссоциации молекул  $O_2$  перед фронтом волны излучением возбужденных атомов  $O$  из области за фронтом волны, а также процесс термической (равновесной) ионизации. Для констант скоростей неравновесных процессов с участием электронов использовались зависимости от эффективной приведенной напряженности поля  $E_{ef}/n = (E/n\sqrt{2})(1 + \omega^2/\nu^2)^{-1/2}$  ( $n$  — концентрация молекул), рассчитанные в /4/. Константы скоростей реакций взаимодействия ионов, атомов и возбужденных молекул заимствованы преимущественно из /5/. Граничными условиями для уравнения (1) являются заданная амплитуда падающей волны при  $x \rightarrow -\infty$  и отсутствие отраженной волны при  $x \rightarrow +\infty$ . Граничные условия для (2) имеют вид:  $T(-\infty) = T_0 = 300$  K,  $dT/dx(+\infty) = 0$ . В качестве начальных условий задаются распределения температуры газа  $T_H(x)$  и концентрации электронов  $n_{e0}(x)$ . Начальная температура  $T_H(x)$ , отличная от  $T_0$ , задавалась на некотором ограниченном интервале таким образом, чтобы обеспечить формирование незатухающей волны ионизации. При этом структура образующейся волны не зависела от начальных условий и в системе отсчета, движущейся с фронтом волны, оставалась практически неизменной.

Обсудим результаты расчетов волн ионизации в условиях эксперимента /6/: давление воздуха  $P = 1$  атм, длина волны СВЧ излучения 0,35 см, плотность потока энергии СВЧ излучения  $S = cE^2/8\pi = 1 \div 60$  кВт/см<sup>2</sup>. При  $S \leq 30$  кВт/см<sup>2</sup> продвижение волны осуществляется в соответствии с теплопроводным механизмом /1/. При больших  $S$  становится существенной



Р и с. 1. Структура волны ионизации: а – распределения концентраций электронов (1),  $O_2^-$  (2),  $O^-$  (3),  $O_2(^1\Delta)$  (4), O (5); б – профиль температуры газа; в – распределение  $E_{ef}/n$ .



Р и с. 2. Скорость распространения волны ионизации: 1 – данные эксперимента /6/; 2 – расчет.

неравновесная ионизация во фронте волны. На рис. 1 показана структура волны ионизации при  $S = 60$  кВт/см<sup>2</sup> в системе отсчета, неподвижной относительно холодного газа. На рис. 1а представлены распределения концентраций различных компонент плазмы. Концентрация электронов перед фронтом достигает  $10^{11} \div 10^{12}$  см<sup>-3</sup>, что недостаточно для существенного поглощения СВЧ энергии и нагрева газа. По мере прогрева газа вследствие теплопроводности и увеличения  $E_{ef}/n$  до значений  $\sim 130 T_D$  ( $1T_D = 10^{-17}$  В·см<sup>2</sup>) (рис. 1в) во фронте волны происходит быстрый рост  $n_e$  за счет ионизации

электронным ударом. Этим определяется первый максимум в распределении  $n_e$  (рис. 1а). После некоторого спада устанавливается равновесное с температурой газа значение  $n_e$ . На рис. 1б показан профиль температуры газа. Излом в области возрастания  $T$  связан с нагревом газа электронами, возникающими вследствие неравновесной ионизации, возможная роль которой отмечалась в /2/.

На рис. 2 представлены экспериментальная /6/ и расчетная зависимости скорости распространения волны ионизации и относительно горячего газа от величины  $S$ . Отметим, что резкий рост и при  $S > 30$  кВт/см<sup>2</sup> не может быть объяснен теплопроводностной моделью /1/, а вызывается увеличением роли неравновесной ионизации и обусловленным ею поглощением СВЧ энергии и нагревом газа во фронте волны.

Институт высоких температур  
АН СССР

Поступила в редакцию  
28 декабря 1984 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Райзер Ю. П. Лазерная искра и распространение разрядов. М., Наука, 1974.
2. Батенин В. М., Зродников В. С., Климовский И. И. ЖЭТФ, 63, 854 (1972).
3. Бродский Ю. Я. и др. ЖЭТФ, 84, 1695 (1983).
4. Александров Н. Л. и др. Теплофизика высоких температур, 19, 485 (1981).
5. Мак-Ивен М., Филлипс Л. Химия атмосферы. М., Мир, 1978.
6. Бродский Ю. Я. и др. Письма в ЖТФ, 10, 187 (1984).