

О ВОЗМОЖНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ РАЗВИТИЯ ЛАВИНЫ ИОНИЗАЦИИ В ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

А. В. Игнатъев, А. А. Рухадзе

УДК 533.537.5

В работе получены условия на форму импульса сильной электромагнитной волны, позволяющие экспериментально измерить постоянную развития лавины ионизации. На ЭЭМ рассчитано семейство кривых ионизации газа в импульсных полях различной амплитуды и длительности.

I. Величина постоянной развития лавины ионизации  $\gamma$  имеет фундаментальное значение для понимания всей картины пробоя газа в электромагнитных полях. Теоретическому и экспериментальному изучению этой важной величины посвящен ряд работ [1,2/]. Однако большинство этих работ в СВЧ диапазоне длин волн ограничивается определением величины  $\gamma$  в интервале полей  $10^2 + 5 \cdot 10^3$  В/см. Более широкий интервал (до  $10^6$  В/см) рассмотрен в [3-5/]. В этих работах на основании модели среднего электрона строится качественная теория СВЧ пробоя газов в условиях, когда энергия осцилляций электронов  $\epsilon_0 = e^2 E_0^2 / 4m(\omega^2 + \nu_{ef}^2)$ , где  $E_0$  - амплитуда высокочастотного поля  $E = E_0 \sin \omega t$  с частотой  $\omega$  - велика по сравнению со средним потенциалом ионизации атома I:  $\epsilon_0 \gg I$ . Постоянная развития лавины ионизации  $\gamma(E_0)$  в таких сильных полях увеличивается с ростом напряженности поля  $E_0$ , достигает максимума, а затем медленно падает. Такая зависимость  $\gamma(E_0)$  позволяет выдвинуть гипотезу о том, что переход в область сверхсильных СВЧ полей может оказаться полезным с точки зрения оптимизации распространения СВЧ энергии через газы.

Первым шагом в проверке указанной гипотезы является экспериментальное подтверждение уменьшения постоянной развития лавины  $\gamma(E_0)$  при больших амплитудах поля  $E_0$ . Однако при этом возникает вопрос о том, каковы должны быть требования к экспериментальной установке и условиям проведения эксперимента. Настоящая работа представляет собой попытку ответить на поставленные вопросы.

2. В реальных экспериментальных установках импульс поля имеет трапециoidalную или колоколообразную форму, т.е. достаточно протяженный передний фронт. Именно в связи с этим и возникает вопрос о возможности экспериментального измерения спадающей ветви  $\gamma(E_0)$ , на которой значения  $\gamma$  падают с ростом амплитуды поля  $E_0$ . Другими словами, не будет ли происходить пробой на переднем фронте импульса, в области малых значений поля.

Рассмотрим трапециoidalный импульс электромагнитного поля общей длительностью  $T_u$  с длительностью переднего фронта  $\tau$

$$E_0(t) = \begin{cases} E_0 t / \tau & , \quad 0 \leq t \leq \tau, \\ E_0 & , \quad \tau < t < T_u - \tau, \\ E_0 (T_u - t) / \tau & , \quad T_u - \tau \leq t \leq T_u, \end{cases} \quad (1)$$

где  $E_0(t)$  - амплитуда поля в момент времени  $t$ ,  $E_0$  - амплитуда плато. Проанализируем развитие лавины ионизации на переднем фронте импульса.

Скорость движения электрона в поле  $E(t)$  без учета релятивистских поправок равна:

$$v = \frac{e}{m} \int_{t_0}^t E(t) \sin \omega t dt. \quad (2)$$

Здесь  $t_0$  - момент рождения электрона (предполагается, что электрон рождается с нулевой скоростью), а верхний предел интегрирования  $t$  - рассматриваемый момент времени.

Допустим, что период поля  $T = 2\pi/\omega \ll \tau$  или, другими словами, что амплитуда поля  $E_0(t)$  от периода к периоду меняется незначительно. Для частоты поля  $\omega = 6 \cdot 10^{-10} \text{ с}^{-1}$  это возможно

при длительности переднего фронта  $\tau \geq 10^{-9}$  с. Тогда для скорости движения электронов из (2) получим:

$$v = (eEt/m\omega v)(\cos \varphi_0 - \cos \varphi), \quad (3)$$

где  $\varphi = \omega t - \text{фаза}$ , в которой находится электрон в рассматриваемый момент времени,  $\varphi_0$  - начальная фаза рождения электрона.

Учтем теперь равномерное распределение электронов по начальным фазам  $\varphi_0$  /3/ и постоянную развития лавины запишем в виде

$$\chi(E(t)) \cong \bar{v}_1 = N_0 \frac{2}{\pi^2} \int_0^{\pi} d\varphi_0 \int_{\varphi_0}^{\pi} \sigma(v(\varphi, \varphi_0)) v(\varphi, \varphi_0) E(t) d\varphi. \quad (4)$$

Здесь  $\sigma(v)$  - сечение ионизации. В борновском приближении в нерелятивистском случае имеем

$$\sigma(v) = (\alpha/v^2) \ln(v/v_1), \quad (5)$$

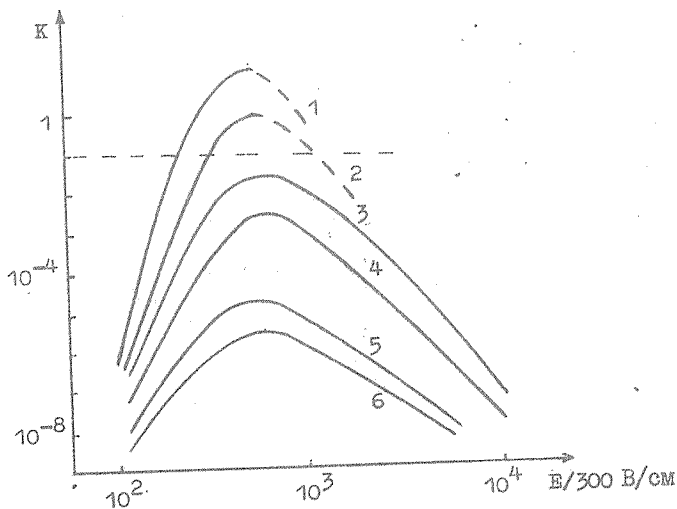
где  $v_1$  - скорость ионизации, а  $\alpha$  - константа, различная для различных газов.

Рост концентрации электронов за время действия переднего фронта импульса определяется формулой

$$n = n_0 \exp(\Gamma(\tau)), \quad \Gamma(\tau) = \int_0^{\tau} \chi(E(t)) dt, \quad (6)$$

где  $n_0$  - начальная концентрация электронов,  $n_0 = 1$ .

Введем коэффициент  $K = n/n_c$ , где  $n_c$  - критическая концентрация для данной частоты  $\omega$ . Коэффициент  $K$  характеризует степень ионизации передним фронтом импульса. Тогда, если  $K \leq 0,1$ , т.е. если за время действия переднего фронта концентрация остается существенно ниже критической, то развитая лавина полностью определяется амплитудой плато  $E_0$  и постоянная развития лавины  $\gamma$  дается формулой /3/. При этом на длительность плато импульса накладывается единственное условие: она должна быть достаточной для того, чтобы за это время пробой успевал полностью развиться. В этом случае задний фронт импульса не оказывает влияния на развитие пробоя.



Р и с. I. Зависимость степени ионизации передним фронтом от поля при  $\tau = 10^{-7}$  с (1),  $\tau = 9 \cdot 10^{-8}$  с (2),  $\tau = 8 \cdot 10^{-8}$  с (3),  $\tau = 7 \cdot 10^{-8}$  с (4),  $\tau = 5 \cdot 10^{-8}$  с (5),  $\tau = 4 \cdot 10^{-8}$  с (6)

Расчет на ЭВМ проводился для различных значений амплитуды плато  $E_0$ , длительности переднего фронта  $\tau$  и широкого диапазона давлений при  $\omega = 6 \cdot 10^{10}$  с $^{-1}$ . На рис. I представлены характерные зависимости  $K(E)$  для  $\tau = 10^{-7} - 10^{-8}$  с и концентрации нейтральных атомов  $N_0 = 10^{16}$  см $^{-3}$  ( $P \approx 0,3$  тор). Из рисунка видно, что для данного давления можно экспериментально снять зависимость  $\gamma(E)$  во всем диапазоне изменения поля ( $10^4 \div 10^6$  В/см) при длительности переднего фронта импульса  $\tau \leq 8 \cdot 10^{-8}$  с. Если  $\tau > 8 \cdot 10^{-8}$  с, то пробой будет происходить на переднем фронте импульса. Из этих же расчетов следует, что данное давление является оптимальным для  $\tau = 8 \cdot 10^{-8}$  с, поскольку для этого значения  $\tau$  общая длительность импульса  $T_u$  будет минимальной.

Из сказанного следует, что варьируя параметры экспериментальной установки — амплитуду плато импульса  $E_0$ , длительность переднего фронта  $\tau$ , давление в камере  $P$  (или концентрацию

нейтралов  $N_0$ ), можно предотвратить пробой газа на переднем фронте импульса и экспериментально получить зависимость постоянной развития лавины  $\gamma$  (или времени развития лавины) от поля в сверхсильных полях ( $E \lesssim 10^6$  В/см). Например, при давлении  $P \approx 0,5$  тор ( $N_0 = 10^{16}$  см $^{-3}$ ) эксперимент можно проводить для  $\tau \lesssim 8 \cdot 10^{-8}$  с. Для успешного проведения экспериментов при  $\tau > 8 \cdot 10^{-8}$  с необходимо уменьшать давление. Величина давления, при которой можно проводить эксперимент, в каждом конкретном случае определяется по указанной выше методике.

Поступила в редакцию  
II марта 1981 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. Ю. В. Афанасьев и др., ЖЭТФ, 57, 580 (1969).
2. Ю. А. Лупан, ЖТФ, 46, № II, 2321 (1976).
3. С. Г. Арутюнян, А. А. Рухадзе, Физика плазмы 5, № 3, 702 (1979).
4. S. G. Arutunian et al., Journ. de Physique, 40, 219 (1979).
5. С. Г. Арутюнян, А. В. Игнатъев, А. А. Рухадзе, Краткие сообщения по физике ФИАН № 7, 17 (1980).