

ВОЛНА СВЧ ИОНИЗАЦИИ, ВЫЗЫВАЕМАЯ ТУРБУЛЕНТНЫМ НАГРЕВОМ
ЭЛЕКТРОНОВ В ОБЛАСТИ КРИТИЧЕСКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ
НА ЕЕ ФРОНТЕ

Д. М. Карфицов, Н. А. Лукина, К. Ф. Сергейчев

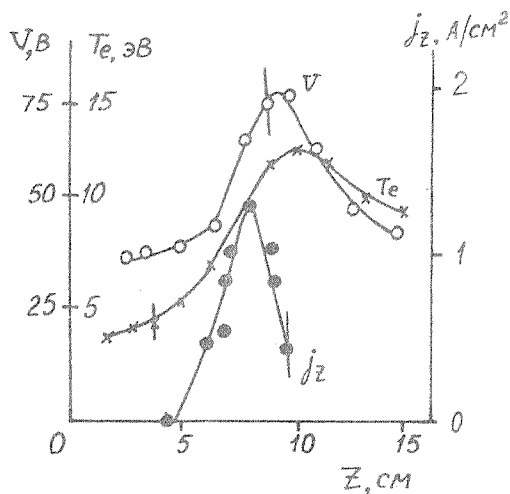
УДК 537.521 .

Исследовано распространение волны ионизации в допороговом для самостоятельного пробоя газа СВЧ поле. Механизм распространения волны связывается с нагревом электронов на ионно-звуковой турбулентности плазмы, обусловленной эмиссией ускоренных электронов из области плазмы с критической концентрацией.

Эффекты распространения и поддержания разрядов за счет энергии электромагнитного поля имеют место в лазерной искре, лежат в основе действия высокочастотных и сверхвысокочастотных плазмотронов. Как правило, эти процессы протекают при небольших напряженностях поля, существенно ниже пороговых для пробоя газа.

В данной работе исследован "плазменно-резонансный" /I/ механизм распространения волны ионизации в аргоне при давлении

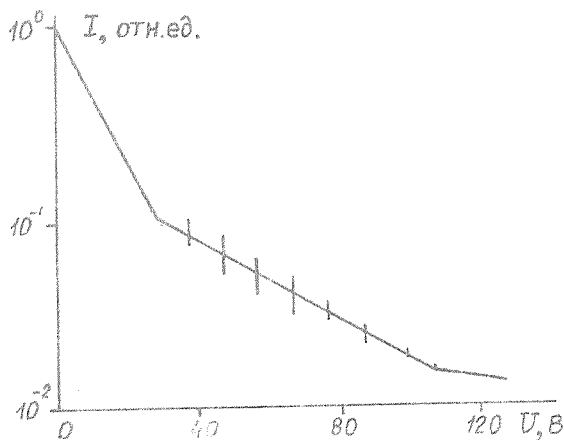
10^{-3} торр и допороговой (по отношению к самостоятельному пробую) напряженности электрического поля СВЧ волны ($E_0 \approx 2$ кВ/см). Пороговое поле превышает 10 кВ/см $/2/$. Для облегчения пробоя использовалось локальное повышение давления (концентрации молекул газа) до пробойных значений в заданном поле. Это достигалось за счет напуска газа в камеру в области максимальной напряженности СВЧ поля через керамическую трубку $d = 0,6$ см, снабженную узким соплом $d_s = 0,2$ см на конце. Пробой начинался в трубке, в которой поддерживалось давление $\sim 10^{-1}$ торр. Затем плазма, вытекающая из сопла, способствовала распространению ионизации на струю газа. Область повышенного давления газа в самой струе не выходила за пределы радиуса 4 см от сопла. Ионизация аргона при давлении 10^{-3} торр теперь становилась возможной благодаря медленному, амбиполяльному характеру диффузионных потерь электронов при наличии начальной плазмы. После достижения плазмой критической концентрации электронов $n_c = \frac{m\omega_0^2}{4\pi e^2}$ (ω_0 - круговая частота СВЧ поля; m , e - масса и



Р и с. 1. Скачок потенциала и температуры электронов плазмы в области взаимодействия СВЧ поля с плазмой. Распределение плотности обратного тока по оси z

заряд электрона) в районе сопла возникла волна ионизации, распространяющаяся навстречу источнику СВЧ излучения, скорость которой в однородном газе на расстоянии 10 см от сопла достигала $\sim 10^6$ см/с.

В области критической концентрации на фронте волны в [3] были зарегистрированы направленные вдоль электрического вектора \vec{E} потоки быстрых электронов, характеризующиеся эффективной температурой $T_{\text{eff}} \approx 200$ эВ, а также локальное повышение температуры основной массы электронов с $T_0 \approx 4$ эВ на периферии до $T_0 \approx 12$ эВ в слое плазмы критической концентрации (рис. 1). В той же области зарегистрированы низкочастотные ($\leq 10^6$ Гц) турбулентные флуктуации концентрации плазмы и локальный подъем положительного потенциала плазмы на $\Delta V_p = 45$ В. Возникновение постоянных электрических полей масштаба $E_z = dV_p/dz \approx 15$ В/см и градиентов температуры $dT_0/dz \approx 2$ эВ/см в рассматриваемой плазме с низкими частотами парных столкновений электронов $\nu_e \sim 10^7$ с $^{-1}$ возможно лишь при наличии сильной турбулентности, характеризующейся значительно более высокими эффективными частотами столкновений ν_{eff} порядка $10^8 + 10^9$ с $^{-1}$.



Р и с. 2. Характеристика ленгмюровского зонда в области плазмы с критической концентрацией

Как было показано в /3/, турбулентность плазмы создается квазистационарными электронными токами замещения, регулируемые скачком потенциала плазмы и направленными в область критической концентрации, являющуюся источником эмиссии быстрых электронов. Между токами эмиссии быстрых электронов и токами замещения под влиянием самосогласованного скачка потенциала устанавливается самоподдерживающийся баланс. Величина плотности тока замещения $J_z \approx 2 \text{ А/см}^2$ в поле $E_z \approx 15 \text{ В/см}$ прямо свидетельствует об аномально низкой проводимости плазмы, на 2 порядка меньшей $\sigma = ne^2/m\nu_0$. Вследствие нагрева части электронов на турбулентности функция распределения электронов по энергиям в области взаимодействия плазмы с СВЧ полем приобретает сложный немаксвелловский характер. Из рис. 2 следует, что можно выделить основную массу электронов с $n_0 \approx n_c$ и $T_0 \approx 12 \text{ эВ}$, электроны с плотностью $n'/n_c \approx 10^{-1}$, и $T' = 40 \text{ эВ}$ и направленные вдоль \vec{E} потоки быстрых электронов с эффективной температурой $T_h \approx 200 \text{ эВ}$ ($n_h/n_c \sim 10^{-3}$).

Уравнение кинетики ионизации без учета потерь электронов

$$dn/dt = \nu_{10} n_0 + \nu_1' n' + \nu_1^h n_h = (\nu_{10} + 10^{-1} \nu_1') n_0 + 10^{-3} \nu_1^h n_0 = \nu_1^{\Sigma} n_0,$$

где ν_{10} , ν_1' , ν_1^h - частоты ионизации, а n_0 , n' , n_h - концентрации, соответствующие фракциям электронов с температурами 12, 40 и 200 эВ, позволяет оценить скорость волны ионизации

$u = \nu_1^{\Sigma} L$, где $L = (d \ln n / dz)^{-1}$ - характерный размер неоднородности плазмы вблизи критической концентрации плазмы на фронте волны ионизации. Используя данные /4/ о зависимости $\nu_1(T)$, а также измеренную величину $L \approx 3 \text{ см}$, получаем $u \approx 3 \cdot 10^6 \text{ см/с}$, что удовлетворительно согласуется с наблюдаемой скоростью распространения волны ионизации 10^6 см/с .

Нетрудно видеть, что основной вклад в ионизацию дают электроны с температурами $T_0 = 12 \text{ эВ}$ и $T' = 40 \text{ эВ}$, обусловленными сильным локальным нагревом электронов из-за токовой турбулентности плазмы, которая, в свою очередь, является следствием эмиссии быстрых электронов из области критической концентрации на

фронте ионизации. Сами быстрые электроны не дают значительного вклада в ионизацию.

Поступила в редакцию
16 июня 1983 г.

Л и т е р а т у р а

1. Д. М. Карфидов, Физика Плазмы, 5, 679 (1979).
2. А. Мак-Доналд, Сверхвысокочастотный пробой в газе, "Мир", М., 1969 г.
3. Д. М. Карфидов, Н. А. Лукина, К. Ф. Сергейчев, Письма в ЖЭТФ, 34, 489 (1981).
4. Н. И. Алиновский и др., ЖТФ, 39, 139 (1969).

Краткие сообщения по физике № 2 - 1984 г.