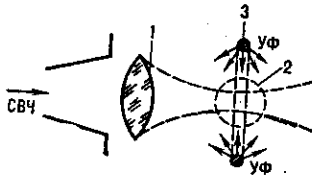


ностью такого разряда является несамостоятельный разряд, в котором ионизация поддерживается внешним (неполюсовым) источником, а энергия в ионизованную среду вводится с помощью сверхвысокочастотного электрич. поля, величина которого меньше порога пробоя (рис. 5). Разряды в пучках СВЧ-излучения ис-

Рис. 5. Несамостоятельный СВЧ-разряд в свободном пространстве: 1 — диэлектрическая линза; 2 — СВЧ-поле (меньше порога пробоя); 3 — кольцевой источник УФ-излучения.



пользуются в экспериментах, моделирующих локализованные искусственно ионизованные области над Землей, а также в плазмохимии для получения высокочистых продуктов реакции.

Пороги возбуждения. В СВЧ-разрядах энергия электромагн. волны передается плазме. Под действием электрич. поля электроны приобретают кинетич. энергию, которая затем в соударениях с ионами и атомами переходит как в энергию теплового движения самих электронов, так и в энергию возбуждения и тепловую энергию массивных частиц.

Характер физ. процессов С. р. (пробой газовой среды, динамика разряда, пространственная структура и т. д.) зависит от соотношения между эфф. частотой соударений электронов с атомами и молекулами газа ν_m и частотой электрич. поля ω . При $\nu_m/\omega < 1$ (высокие частоты поля и низкие давления газа) электроны движутся в электрич. поле почти как свободные. При $\nu_m/\omega > 1$ (низкие частоты поля, высокие давления газа) электроны дрейфуют в перем. электрич. поле СВЧ-волны, $E(t) = E_0 \cos \omega t$, со скоростью $u_e = eE_0 \cos \omega t / m_e \nu_m$, т. е. в каждый момент движутся с той же скоростью, что и в пост. электрич. поле, напряженность которого равна мгновенному значению перем. электрич. поля с амплитудой E_0 .

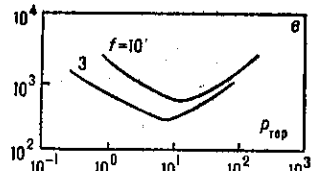
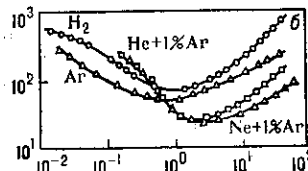
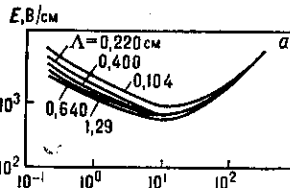
Энергия, приобретаемая электроном в СВЧ-поле,

$$w_e \approx e^2 E_0^2 / 2m_e \delta_e (\omega^2 + \nu_m^2), \quad (1)$$

где δ_e — ср. относит. доля энергии, передаваемая электроном атому или молекуле при столкновении с ними.

На рис. 6 приведены эксперим. зависимости порога возбуждения E_t самоподдерживающегося С. р. от давления рабочего газа p для разл. газов и при разных условиях. Зависимости всегда имеют минимум. На левой ветви, где порог падает с ростом давления, он тем ниже, чем больше размеры разрядного объема, характеризуемые диффузионной длиной Λ (рис. 6, а), и чем

Рис. 6. Измеренные пороги СВЧ-пробоя: а — воздух, частота $f = 9,4$ ГГц; б — несколько газов, $f = 0,99$ ГГц, $\Lambda = 0,63$ см; в — Нег-газ (гелий с добавкой паров ртути), $\Lambda = 0,6$ см.



меньше частота поля f (рис. 6, в). То же относится и к самой величине минимума. На меньших частотах минимум располагается при более низких давлениях. На правой ветви, где порог растёт с повышением давления, зависимость порогового поля от размеров и частоты становится всё менее заметной и в пределе больших давлений почти совсем исчезает — все кривые асимптотически сливаются.

Теория вполне удовлетворительно описывает пороговые характеристики С. р. Если СВЧ-поле включается достаточно быстро и параметры его сохраняются длит.

время (по сравнению с характерным временем развития ионизации), порог возбуждения СВЧ-разряда определяется след. «стационарным» критерием:

$$\nu_i(E_t) = \nu_d + \nu_a(E_t), \quad (2)$$

где ν_i — частота ионизации, ν_a — частота прилипания электронов к атомам и молекулам рабочего газа, ν_d — частота диффузионных потерь электронов ($\nu_d = D/\Lambda^2$, D — коэф. диффузии электронов).

В области высоких давлений диффузионные потери электронов незначительны и даже не слишком большая скорость ионизации обеспечивает пробой.

Т. к. при $\nu_m/\omega \ll 1$ энергия электронов (1) практически не зависит от ν_m и от давления, то с ростом давления и, следовательно, ν_m остаётся неизменной и частота ионизации ν_i . Однако с увеличением давления падает частота диффузионных потерь электронов, что приводит к уменьшению порогового электрич. поля E_t . При $\nu_m/\omega \gg 1$ энергия электронов $w_e \approx (1/2)e^2 E_0 / m_e \delta_e \nu_m^2 \propto (E_0/p)^2$, т. к. $\nu_m \propto p$. Поэтому с ростом давления растёт величина порогового поля E_t . Положение минимума кривой $E_t(p)$ можно установить на основании условия, разграничивающего предельные случаи $\nu_m \ll \omega$ и $\nu_m \gg \omega$, а именно, в случае равенства по порядку величины частот столкновений и поля: $\nu_m \approx \omega$.

В условиях короткой длительности импульса τ_f порог возбуждения разряда определяется «нестационарным» критерием: за время τ_f лавина электронной с нач. концентрацией электронов n_0 должна достичь до нек-рой конечной величины n :

$$\nu_i(E_t) - \nu_d - \nu_a = \tau_f^{-1} \ln n/n_0. \quad (3)$$

Ур-ние (3) обобщает «стационарный» критерий (2) и сводится к нему при $\tau_f \rightarrow \infty$. Обычно за конечную концентрацию принимается такая критич. концентрация $n_c = m_e(\omega^2 + \nu_m^2)/4\pi e^2$, при которой плазменное образование отражает СВЧ-излучение, как металлич. зеркало.

Для пробоя молекулярных газов при прочих равных условиях требуются более высокие поля, чем для атомарных, т. к. электрону приходится затрачивать энергию на возбуждение колебательных и др. более низлежащих электронных уровней в молекулах, и это тормозит набор энергии в поле. В электроотрицат. газах пороги СВЧ-пробоя также высокие, поскольку существуют дополнит. потери на прилипание.

Динамика сверхвысокочастотного разряда. Энергия СВЧ-волны, поглощаемая плазмой в разряде, передается атомам и молекулам, изменяя состояние газовой среды и меняя параметры самой плазмы в ходе развития газоразрядного процесса. Лишь совокупность спец.

мер позволяет добиться стационарности плазменного образования, так необходимой в ряде приложений.

В совр. технике применяются и волноводные источники стационарной газоразрядной плазмы (СВЧ-плазмотроны). Разряд возбуждается и поддерживается СВЧ-излучением мощностью в неск. кВт в пересекающей волновод диэлектрич. трубке с прокачиваемым через её объём газом. СВЧ-плазмотрон обладает высоким кпд — до 90%; разрядные условия близки к равновесным с темп-рой разрядной среды $T \approx 9000 - 10000$ К.