

С. р., поджигаемые мощным импульсным СВЧ-излучением в свободном пространстве или внутри волноводов, обычно не горят в одном месте, а перемещаются навстречу излучению. В волноводах движение С. р. наблюдалось в широком интервале изменения давлений и плотностей потока СВЧ-излучения как в атомарных, так и в молекулярных газах и смесях. Если при  $E_0 < E_t$  в отдалённом от излучателя конце волновода стимулируется пробой, напр. вводом усиливающего электрич. поле острия, то навстречу излучению распространяется волна ионизации, приводящая при достаточно длит. импульсе к выходу разряда на окно СВЧ-генератора. Скорости движения зависят от мощности СВЧ-излучения, рода газа и его давления и лежат в интервале  $10^2 \div 10^4$  см/с. Наиб. скорости зарегистрированы в атомарных газах, наименьшие — в молекулярных.

Ионизационные волны характерны и для С. р. в свободном пространстве в сходящихся СВЧ-пучках. В надпороговых полях ( $E_0 > E_t$ ) разряд в виде светящегося слоя толщиной  $\sim \lambda$  со скоростью  $10^7 \div 10^8$  см/с движется от места возникновения (фокальная плоскость) навстречу излучению. Скорость фронта ионизации зависит от рода газа, давления, поля СВЧ-волны и сходимости СВЧ-пучка. В полях  $E_0 < E_t$  инициированный тем или иным способом разряд в виде неоднородного плазменного слоя с осевым размером  $\sim \lambda$  «убегает» от инициатора навстречу излучению со скоростями  $10^2 \div 10^5$  см/с, также зависящими от СВЧ-мощности, рода газа и давления.

В надпороговых полях динамика разряда определяется процессами, аналогичными оптическому пробую. Появление ионизационной волны связано с пространственной (аксиальной) неоднородностью пучка и падением амплитуды электрич. поля по мере смещения от фокуса к излучателю. Быстрая ионизация газа в области высоких полей и замедленная в области низких приводят к появлению кажущегося движения разряда вдоль оси с тем большей скоростью, чем слабее зависимость частоты ионизации от  $E_0$  и чем меньше угол сходимости пучка. Аксиальный размер области свечения определяется величиной ослабления («скинирования») интенсивности пучка созданной им же газоразрядной плазмой.

Перенос ионизации осуществляется разл. механизмами: диффузией возбуждённых и заряж. частиц, за счёт теплопроводности, собственного ионизирующего излучения разряда и т. д. В зависимости от условий один к.-л. процесс может играть определяющую роль, в соответствии с чем механизм распространения разряда наз. теплопроводным, диффузионным, фотоионизационным (или радиационным), газодинамическим и др.

Устойчивость и пространственная структура сверхвысокочастотного разряда. Как стационарные, так и движущиеся навстречу волне С. р. характеризуются сложностью формы, прежде всего наличием мелкомасштабной пространственной неоднородности. Неоднородность разряда, как правило, тем существенней, чем выше отношение  $v_m/\omega$ . Важную роль в формировании структуры разряда играют ионизационные неустойчивости, к-рые можно разделить на два класса: ионизационно-полевые (или электродинамические) и ионизационно-перегревные (или газодинамические).

Ионизационно-полевые неустойчивости характерны для разреженных газов и высокой частоты  $\omega$ . Физ. механизм возникновения этой неустойчивости основан на явлении плазменного резонанса: пока величина электронной концентрации остаётся ниже критической ( $n_e/n_c < 1$ ), её увеличение в тонком слое, перпендикулярном полю, сопровождается увеличением амплитуды поля ( $E_0 \propto e^{-1}$ , где  $e$  — диэлектрическая проницаемость плазмы:  $e = 1 - 4\pi n_e^2/n_c^2 m_0 \omega^2$ ). Это, в свою очередь, приводит

к возрастанию частоты ионизации  $\nu_i$  и, следовательно, к дальнейшему росту  $n_e$ . В результате в первоначально однородном разряде образуются плоские неподвижные слои (страты), перпендикулярные вектору электрич. поля (см. также Низкотемпературная плазма).

Ионизационно-перегревная неустойчивость связана с ростом скорости ионизации при увеличении темп-ры и характера для высоких давлений газа и малых частот СВЧ-излучения. Физ. механизм этой неустойчивости заключается в следующем: в области локального флуктуац. роста концентрации электронов повышается энерговыделение, растёт темп-ра газа, падает концентрация молекул (атомов) рабочего газа и, соответственно, растёт частота ионизации  $\nu_i$ , что приводит к дальнейшему росту концентрации  $n_e$ . Развитие неустойчивости приводит к распаду первоначально однородного разряда на отделившиеся (шнуры), вытянутые вдоль электрич. поля. Элим. волновая природа возбуждающего разряда излучения сказывается на периодичности возникновения шнуров и на параметрах плазмы, достижимых на конечной (нелинейной) стадии развития неустойчивости. Характерная фотография разряда в газе высокого давления в пучке СВЧ-волн, демонстрирующая сложную структуру плазменного образования в результате развития неустойчивости, приведена на рис. 7.

Вторичноэлектронные вакуумные сверхвысокочастотные разряды (ВЭР). К С. р. относятся и т. н. вторичноэлектронные (или «мультипликаторные») разряды, развивающиеся в вакууме у поверхностей взаимодействующих с СВЧ-излучением металлич. электродов, стенок волноводов и резонаторов, диэлектрич. преград. Явление ВЭР состоит в лавинообразном росте электронной концентрации у одиночной поверхности (односторонний разряд) или между двумя поверхностями (двусторонний разряд). Разряд развивается за счёт вторичной электронной эмиссии. ВЭР ограничивают интен-

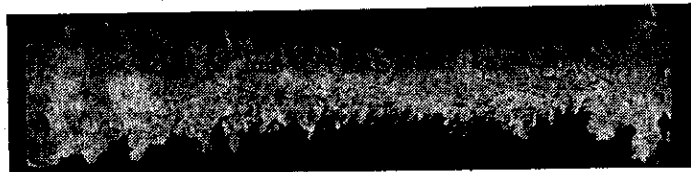


Рис. 7. Фотография СВЧ-разряда в воздухе, возбуждаемая пучком СВЧ-волн;  $f = 37$  ГГц; давление  $p = 300$  мм рт. ст.

сивность излучения мощных генераторных СВЧ-приборов, развиваясь в объёме самого прибора, на его входных окнах или в элементах транспортирующего излучение тракта.

Применение. С. р. широко применяются в совр. технике. Ряд плазмохим. процессов, таких, как получение чистого кварца, разл. соединений металлов, связывания азота с кислородом в воздухе, диссоциация углекислого газа и др., с высокой эффективностью протекают в разрядах, возбуждаемых СВЧ-полями. Преимущество СВЧ-разрядов в плазмохимии прежде всего связаны с возможностью построения реакторов для получения особо чистых веществ.

Относительно высокая устойчивость и специфика вида функции распределения электронов по энергиям обуславливают использование С. р. в технике молекулярных эксимерных и др. газоразрядных лазеров.

Уникальные свойства СВЧ-диапазона, позволяющие с мин. потерями передавать энергию по трассе Земля — космос с включением атм. участка, лежат в основе ряда проектов использования мощных СВЧ-пучков для создания свободно локализованных искусств. плазменных областей в атмосфере.

Лит.: Мак-Дональд А., Сверхвысокочастотный пробой в газах, пер. с англ., М., 1969; Батанов Г. М. и др., СВЧ разряды высокого давления, «Труды ФИАН», 1985, т. 160, с. 174; Райзер Ю. П., Физика газового разряда, М., 1987;