

резко уменьшается от  $V_a \approx 40$  В до 10 В при  $i \approx 15-20$  А. Из-за большой плотности тока анод в пятне испаряется (температура  $\approx 4200$  К), при этом дуга «шипит».

Для мощных ( $10^2-10^3$  кВт) электродуговых устройств важнейшей является проблема эрозии электродов, в осо-

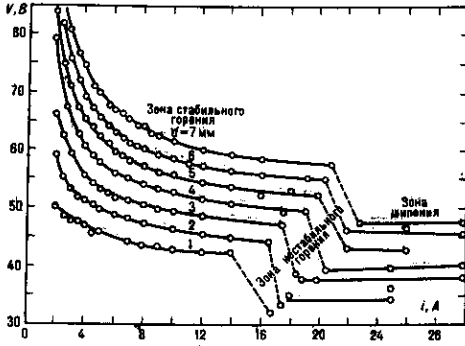


Рис. 7. ВАХ угольной дуги в воздухе;  $d$  — расстояние между электродами.

бенности катода. Даже тугоплавкие материалы, такие как вольфрам, подвержены разрушению и испарению, в особенности в катодных пятнах, где плотность тока достигает  $10^7$  А/см<sup>2</sup>. В катодных пятнах происходит термоавтоэлектронная эмиссия — сочетание действия температуры  $T \approx 3000-5000$  К и полевой эмиссии ( $E \geq 10^7$  В/см). Катодные пятна всегда образуются в вакуумных дугах с металлич. электродами, используемых в вакуумных переключателях. В дугах высокого давления ( $p \geq 10$  атм) в Hg, Xe подавляющая часть джоулева тепла уносится излучением, что используется для изготовления дуговых ламп (см. *Источники оптического излучения*). В ряде приборов применяется низковольтная дуга низкого давления ( $p \sim 1$  тор,  $V \approx 10-20$  В,  $i \sim 1$  А) с искусственно накаливаемым катодом.

**Высокочастотные разряды** бывают двух типов: индукционные (ВЧИ) и ёмкостные (ВЧЕ). Безэлектродный ВЧИ-разряд обычно зажигают внутри диэлектрич. трубки, вставленной в катушку (достаточно и неск. витков), по которой пропускается ВЧ-ток (рис. 8, а). В этом случае перем-

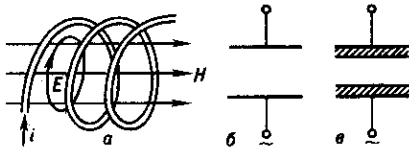


Рис. 8. Способы возбуждения ВЧ-разрядов: а — индукционный; б — ёмкостный; в — ёмкостный безэлектродный (изоляторы заштрихованы).

дольное магн. поле индуцирует в разрядной плазме кольцевые замкнутые поле  $E$  и токи. ВЧИ-разряды чаще зажигают при  $p \approx 1$  атм. Плазма ВЧИ-разряда равновесна, подобно плазме столба дуги,  $T \approx 8000-11000$  К. В устройствах небольшой мощности ( $\sim 1$  кВт) тепло отводится за счёт теплопроводности к охлаждаемым стенкам; в мощных устройствах ( $\sim 10-10^3$  кВт) по трубке продувают газ со скоростью  $u \sim 1$  м/с. Поток отжимает плазму от стенок и выносит тепло с плазменной струей. Режим горения оптимален при таких темп-ре  $T$ , проводимости  $\sigma(T)$  и радиусе плазменного столба  $R$ , что толщина скин-слоя  $\delta = c/\sqrt{2\pi\sigma\omega}$ , на который ВЧ-поле проникает в проводник, меньше, но сравнима с  $R \sim 1-2$  см.

ВЧЕ-разряд при низких и ср. давлениях ( $p \sim 10^{-1}-10^2$  тор) обычно зажигают, подавая ВЧ-напряжение на плоские электроды. Электроды могут быть и оголёнными, и изолированными от плазмы диэлектрич. пластинами (рис. 8, б, в). Весь разрядный объём в плоском промежутке

заполнен малоподвижными ионами. На их фоне электроны совершают дрейфовые колебания, так что граница плазмы, где  $n_e = n_+$ , также перемещается, поочерёдно касаясь одной из твёрдых поверхностей. При этом обнажается ионный слой положит. пространственного заряда около противоположной поверхности. Нехватка электронов в промежутке, отчего и получаются приэлектродные слои, возникает из-за того, что находившиеся вблизи поверхностей электроны в самом начале либо уходят в металл, либо прилипают к изолирующим электродам пластинам.

Существуют две формы горения ВЧЕ-разряда. В  $\alpha$ -форме приэлектродные слои практически лишены проводимости и плазменный ток замыкается на электроды токами смещения. Этому режиму соответствуют небольшие плотности тока  $j \sim 10$  А/см<sup>2</sup> при  $p \sim 20$  тор. При достаточно сильном общем токе и плотности зарядов в плазме  $n \geq 10^{10}$  см<sup>-3</sup> ( $\gamma$ -форма горения разряда) происходит таунсендовский пробой слоёв и у обоих электродов образуются слои с ионным током и вторичной эмиссией (в т. ч. и с диэлектрика, откуда срываются прилипшие электроны), очень похожие на катодный слой тлеющего разряда. В этой форме разряда ток  $j \sim 10^2$  А/см<sup>2</sup>, а толщина слоёв (при средних давлениях) на порядок меньше, чем в  $\alpha$ -режиме, и близка к  $d_n$  нормального тлеющего разряда. В этих слоях сочетаются ток проводимости и ток смещения. Когда ВЧ-напряжение подают на единств. электрод, возникает *факельный разряд*.

**СВЧ-разряды** зажигают в резонаторах, в диэлектрич. трубке, пересекающей волновод; в последнем случае обычно при  $p = 1$  атм. Как и в ВЧИ-разряде, через трубку продувают газ. Разрядная плазма квазиравновесна, но темп-ра при мощностях  $\sim 1$  кВт  $\approx 4000-6000$  К. Она не поднимается выше, т. к. от сильное ионизованной плазмы СВЧ-излучение отражается (см. также *Оптические разряды*).

**Искровой разряд.** Первой стадией этого разряда служит стримерный, а чаще лидерный пробой — прорастание тонкого плазменного канала от одного электрода к другому (см. *Стримеры, Пробой газа*). Потом канал превращается в искровой, способный пропустить сильный ток («короткое замыкание»). Важнейшим элементом искрового пробоя является стример, к-рый зарождается от мощной электронной лавины, в простейшем случае — около самого анода. Электроны, сосредоточенные вблизи переднего фронта лавины, уходят в анод, оставляя положительное заряженный ионный след. Возбуждённые в лавине молекулы испускают фотоны, к-рые производят фотоионизацию. Фотоэлектроны дают начало вторичным электронным лавинам, к-рые втягиваются в ионный след, являющийся источником сильного поля. Смешиваясь с ионами первичной лавины, электроны вторичных образуют плазму, а во вторичные ионные следы втягиваются лавины следующего поколения и т. д. Процесс происходит непрерывно, и от анода прорастает плазменный канал — стример.

Лавинно-стримерный переход может произойти лишь при сильном внеш. поле  $E_0$ , при к-ром поле пространственного заряда головки лавины достигает внешнего. Это случается, когда в лавине нарастает  $N \approx \exp[\alpha(E_0)d] \sim 10^8$  электронов или  $\alpha(E_0)d \approx 18-20$  (условие Мика). Радиус стримерного канала  $r \sim 10^{-2}-10^{-1}$  см; плотность зарядов в нём  $n \sim 3N/4\pi r^3 \sim 10^{13}-10^{14}$  см<sup>-3</sup>; ток стримера (нагнетание положит. заряда в канал и вершину)  $i_c \sim 10^{-3}-1$  А; скорость роста стримера  $v_c \sim 10^8$  см/с. Новые порции газа ионизируются благодаря сильному собств. полю стримерной вершины, и в этом смысле процесс — самоподдерживающийся. Но внеш. поле (4,7 кВ/см в канале в атм. воздухе) всё равно необходимо, ибо энергию поставляет источник тока. В воздухе из-за прилипания стримерный канал теряет свою проводимость на расстоянии  $v_c/v_a \sim 10$  см от вершины. Поэтому перекрытие стримером воздушного промежутка с  $d \geq 20$  см к пробую не приводит. В этих случаях действует лидерный механизм.

Лидер — плазменный канал, прорастающий со скоростью  $v_d \sim 10^6$  см/с, но обладающий гораздо более высокой проводимостью благодаря повыш. темп-ре газа