

Пробой газа начинается от случайных или искусственно впрыскиваемых нач. электронов, к-рые набирают в электр. поле энергию, а затем теряют её на возбуждение и ионизацию атомов. В результате ионизации вместо одного энергичного электрона появляются два медленных, они снова набирают энергию и т. д. — развивается лавина *электронная*. За 10^{-7} — 10^{-3} с ток вырастает на неск. порядков.

Дальнейший ход процесса зависит от ряда условий. При небольших давлениях ($\sim 10^{-1}$ — 10 тор) и очень большом электр. сопротивлении внеш. цепи Ω , ограничивающем ток величиной $\sim 10^{-6}$ А, зажигается тёмный (гаунсендовский) разряд (участок *BC* на рис. 1); при несколько меньших сопротивлениях — *тлеющий разряд* (участок *CF*). Для последнего характерны ток $i \sim 10^{-6}$ — 10^{-1} А (в трубках радиуса $R \sim 1$ см) и напряжение $V \sim 10^2$ — 10^3 В. При большом межэлектродном расстоянии образуется однородный светящийся столб (положит. столб разряда), представляющий собой плазму. Плазма тлеющего разряда неравновесная, электронная темп-ра $T_e \approx (1-3) \cdot 10^4$ К значительно больше газовой темп-ры $T \approx 300$ — 1000 К; степень ионизации χ плазмы тлеющего разряда низкая, $\approx 10^{-8}$ — 10^{-6} , в 10^2 — 10^4 раз меньше термодинамически равновесной, отвечающей T_e .

Если p порядка атмосферного, сопротивление мало, а источник тока мощный, то вскоре после пробоя зажигается *дуговой разряд*, для к-рого характерны сильный ток $i > 1$ А, низкое напряжение $V \sim 10$ — 100 В (участок *GH* на рис. 1), ярко светящийся столб.

В дуге выделяется большая мощность, стеклянная трубка быстро разрушилась бы от перегрева. Длительное подерживать дугу в замкнутом сосуде можно только при спец. охлаждении. Дугу часто зажигают в открытом воздухе. В дуговом разряде плазма чаще всего равновесная, с $T_e \approx T \sim 10^4$ К и соответствующей таким темп-рам степень ионизации $\chi \approx 10^{-4}$ — 10^{-1} . Какой разряд получится после пробоя, зависит от давления, напряжения и сопротивления и на графике определяется местом пересечения ВАХ разряда $V(i)$ нагрузочной прямой $\mathcal{E} = V + i\Omega$, где \mathcal{E} — эдс источника питания (рис. 1).

Классификация газовых разрядов. Среди стационарных самостоятельных разрядов в пост. поле наиб. важные и распространённые — тлеющий и дуговой. Они различаются механизмами катодной эмиссии, обеспечивающей возможность протекания пост. тока, поскольку осн. носителями тока являются электроны. В тлеющем и тёмном (гаунсендовском) разрядах катод холодный. Электроны вырываются из него положит. ионами (и фотонами). В дуговом разряде катод разогревается сильным током и происходит *термоэлектронная эмиссия*. В резко неоднородных полях, усиленных около острий, проводов линий электропередачи, возникает *коронный разряд*, самостоятельный и слаботочный. Среди быстротечных сильноточных разрядов особенно важен *искровой разряд*. Он возникает обычно при $p \sim 1$ атм, $d > 1$ — 5 см и достаточно высоком напряжении, превышающем напряжение зажигания короны, если поле сильно неоднородное. Искровой пробой газа происходит в результате возникновения и быстрого развития тонкого плазменного канала от одного электрода к другому; затем получается как бы короткое замыкание цепи высокопроводящим искровым каналом. Одна из форм искрового разряда — молния. В коронном и искровом разрядах катодная эмиссия особой роли не играет.

Несущественна роль электродных процессов и в большинстве разрядов в быстропеременных полях. Поэтому разряды можно классифицировать, и не учитывая признаки, связанные с электродными эффектами, а по состоянию плазмы разряда и частоте электр. поля. По характеру ионизац. состояния газа можно различать: 1) пробой; 2) поддержание электр. полем неравновесной плазмы; 3) поддержание равновесной плазмы. Электр. поля, вызывающие газовые разряды, делятся по частотам на: 1) постоянные, включая низкочастотные и не слишком кратковременные импульсные; 2) высокочастотные (ВЧ), с частотами $f \sim 10^2$ — 10^8 Гц; 3) сверхвысокочастотные (СВЧ),

с $f \sim 10^9$ — 10^{11} Гц и длинами волн $\lambda \sim 10^2$ — 10^{-1} см; 4) оптические (от далёкого ИК до УФ). Все $3 \times 4 = 12$ вариантов разрядов реализуются на опыте, многие нашли широкое применение в физ. эксперименте и технике (табл. 1).

Табл. 1.—Классификация разрядов

	Пробой	Неравновесная плазма	Равновесная плазма
Постоянное электрическое поле	Зажигание тлеющего разряда в трубке	Положительный столб тлеющего разряда	Положительный столб дуги высокого давления
Высокие частоты	Зажигание ВЧ-разряда в сосудах с разреженным газом	Емкостные ВЧ разряды в разреженных газах	Индукционная плазменная горелка
СВЧ-диапазон	Пробой в волноводах и резонаторах	СВЧ-разряды в разреженных газах	СВЧ-плазмотрон
Оптический диапазон	Пробой газов лазерным излучением	Завершающая стадия оптического пробоя	Непрерывный оптический разряд

Дрейф и энергия электронов в электр. поле. Ускоряясь в пост. поле E , электрон при каждом столкновении теряет приобретённую направленную скорость. На фоне хаотич. движения устанавливается ср. скорость направленного дрейфового движения $v_d = -\mu_e E$, где $\mu_e = e/mv_m$ — подвижность, v_m — эфф. частота упругих столкновений электрона, e — заряд, m — масса. В слабоионизованном газе, при $\chi \ll 10^{-3}$, частота столкновений $v_m = N\bar{v}\sigma_m$, где N — плотность атомов и молекул, \bar{v} — ср. скорость хаотич. движения электрона, $\sigma_m = \sigma_c(1 - \cos\theta)$ — транспортное сечение, σ_c — сечение упругих столкновений, $\cos\theta$ — ср. косинус угла рассеяния (обычно $\cos\theta \sim 0,1$). Транспортная длина пробоя $l = \bar{v}/v_m = (N\sigma_m)^{-1}$. При $\chi > 10^{-3}$ преобладают столкновения с ионами; N заменяется на плотность ионов n_+ , σ_m — на кулоновское сечение $\sigma_{кул} = (4\pi/9)e^4 \ln \Lambda / (kT_e)^2$, $\ln \Lambda \approx 5$ — 10 — *кулоновский логарифм*. При $T_e = 1$ эВ $\sigma_{кул} \approx 2,3 \cdot 10^{-13}$ см², тогда как $\sigma_m \sim 10^{-16}$ — 10^{-15} см². Столкновение электрона с электроном к потере направленного импульса не приводит. В слабоионизованном газе действует *подобия закон*: v_d зависит от отношения E/N . Если темп-ра газа мало отличается от комнатной, плотность N обычно характеризуют давлением; при $T = 293$ К давление $p = 1$ мм рт. ст. = 1 тор соответствует плотности $N = 3,3 \cdot 10^{16}$ см⁻³.

Плотность тока $j = -en_e v_d = \sigma E$, где $\sigma = e\mu_e n_e = e^2 n_e / m v_m$ — проводимость. Когда преобладают столкновения электронов с ионами, $\sigma \propto T_e^{3/2}$ и не зависит от n_e . Из-за большой массы подвижности ионов μ_+ в 10^2 — 10^3 раз меньше μ_e , поэтому в плазме, где $n_+ \approx n_e$, вклад ионов в ток пренебрежимо мал. В табл. 2 приведены эксперим. оценочные значения характеристик электронов в диапазонах E/p , свойственных плазме тлеющего разряда.

Табл. 2.—Оценочные значения параметров слабоионизованного газа

Газ	Диапазон, В E/p , см·тор	$\mu_e p$, $10^6 \frac{\text{см}^2 \cdot \text{тор}}{\text{В} \cdot \text{с}}$	v_m/p , $10^9 \text{с}^{-1} \times$ $\times \text{тор}^{-1}$	$\sigma p/n_e$, $10^{-13} \frac{\text{см}^2 \cdot \text{тор}}{\text{Ом}}$	$l p$, $10^{-2} \text{см} \times$ $\times \text{тор}$
He	0,6—10	0,86	2,0	1,4	6
Ne	0,4—2	1,5	1,2	2,4	12
Ar	1—13	0,33	5,3	0,53	3
H ₂	4—30	0,37	4,8	0,58	2
N ₂	2—50	0,42	4,2	0,67	3
Воздух	4—50	0,45	3,9	0,72	3
CO ₂	3—30	1,1	1,8	1,8	3
CO	5—50	0,31	5,7	0,5	2