

Электрический ток в газах

Темы кодификатора ЕГЭ: носители свободных электрических зарядов в газах.

При обычных условиях газы состоят из электрически нейтральных атомов или молекул; свободных зарядов в газах почти нет. Поэтому газы являются *диэлектриками* — электрический ток через них не проходит.

Мы сказали «почти нет», потому что на самом деле газах и, в частности, в воздухе всегда присутствует некоторое количество свободных заряженных частиц. Они появляются в результате ионизирующего воздействия излучений радиоактивных веществ, входящих в состав земной коры, ультрафиолетового и рентгеновского излучений Солнца, а также космических лучей — потоков частиц высокой энергии, проникающих в атмосферу Земли из космического пространства. Впоследствии мы вернёмся к этому факту и обсудим его важность, а сейчас заметим лишь, что в обычных условиях проводимость газов, вызванная «естественным» количеством свободных зарядов, пренебрежимо мала, и её можно не принимать во внимание.

На изолирующих свойствах воздушного промежутка основано действие переключателей в электрических цепях (рис. 1). Например, небольшого воздушного зазора в выключателе света оказывается достаточно, чтобы разомкнуть электрическую цепь в вашей комнате.

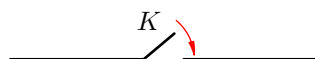


Рис. 1. Ключ K

Можно, однако, создать такие условия, при которых электрический ток в газовом промежутке появится. Давайте рассмотрим следующий опыт.

Зарядим пластины воздушного конденсатора и подсоединим их к чувствительному гальванометру (рис. 2, слева). При комнатной температуре и не слишком влажном воздухе гальванометр не покажет заметного тока: наш воздушный промежуток, как мы и говорили, не является проводником электричества.

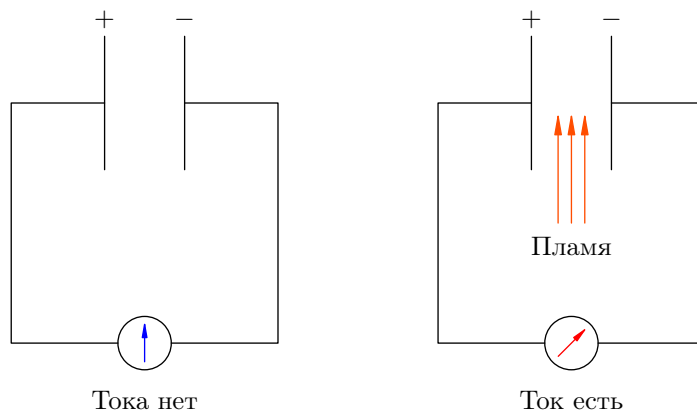


Рис. 2. Возникновение тока в воздухе

Теперь внесём в зазор между пластинами конденсатора пламя горелки или свечи (рис. 2, справа). Ток появляется! Почему?

Свободные заряды в газе

Возникновение электрического тока между пластинами конденсатора означает, что в воздухе под воздействием пламени появились *свободные заряды*. Какие именно?

Опыт показывает, что электрический ток в газах является упорядоченным движением заряженных частиц *трёх видов*. Это *электроны, положительные ионы и отрицательные ионы*. Давайте разберёмся, каким образом эти заряды могут появляться в газе.

При увеличении температуры газа тепловые колебания его частиц — молекул или атомов — становятся всё интенсивнее. Удары частиц друг о друга достигают такой силы, что начинается *ионизация* — распад нейтральных частиц на электроны и положительные ионы (рис. 3).

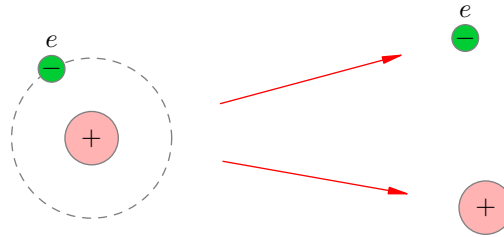


Рис. 3. Ионизация

Степенью ионизации называется отношение числа распавшихся частиц газа к общему исходному числу частиц. Например, если степень ионизации равна 40%, то это означает, что 40% исходных частиц газа распалось на положительные ионы и электроны.

Степень ионизации газа зависит от температуры и резко возрастает с её увеличением. У водорода, например, при температуре ниже 10000°C степень ионизации не превосходит 10%, а при температуре выше 20000°C степень ионизации близка к 100% (то есть водород почти полностью ионизирован¹).

Помимо высокой температуры имеются и другие факторы, вызывающие ионизацию газа. Мы их уже вскользь упоминали: это радиоактивные излучения, ультрафиолетовые, рентгеновские и гамма-лучи, космические частицы. Всякий такой фактор, являющийся причиной ионизации газа, называется *ионизатором*.

Таким образом, ионизация происходит не сама по себе, а под воздействием ионизатора. Одновременно идёт и обратный процесс — *рекомбинация*, то есть воссоединение электрона и положительного иона в нейтральную частицу (рис. 4).

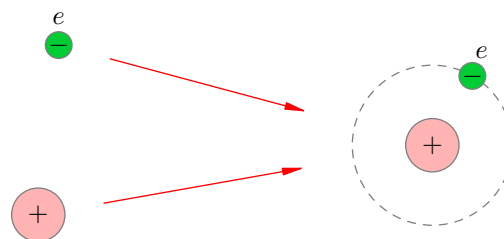


Рис. 4. Рекомбинация

Причина рекомбинации проста: это кулоновское притяжение противоположно заряженных электронов и ионов. Устремляясь навстречу друг другу под действием электрических сил, они встречаются и получают возможность образовать нейтральный атом (или молекулу — в зависимости от сорта газа).

¹Частично или полностью ионизированный газ называется *плазмой*.

При неизменной интенсивности действия ионизатора устанавливается динамическое равновесие: среднее количество частиц, распадающихся в единицу времени, равно среднему количеству рекомбинирующих частиц (иными словами, скорость ионизации равна скорости рекомбинации). Если действие ионизатора усилить (например, повысить температуру), то динамическое равновесие сместится в сторону ионизации, и концентрация заряженных частиц в газе возрастет. Наоборот, если выключить ионизатор, то рекомбинация начнет преобладать, и свободные заряды постепенно исчезнут полностью.

Итак, положительные ионы и электроны появляются в газе в результате ионизации. Откуда же берётся третий сорт зарядов — отрицательные ионы? Очень просто: электрон может налететь на нейтральный атом и присоединиться к нему! Этот процесс показан на рис. 5.

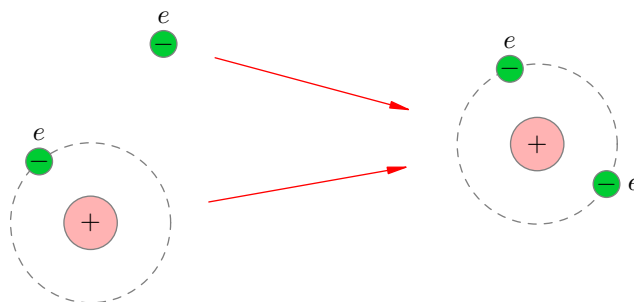


Рис. 5. Появление отрицательного иона

Образованные таким образом отрицательные ионы будут участвовать в создании тока наряду с положительными ионами и электронами.

Несамостоятельный разряд

Если внешнего электрического поля нет, то свободные заряды совершают хаотическое тепловое движение наряду с нейтральными частицами газа. Но при наложении электрического поля начинается упорядоченное движение заряженных частиц — *электрический ток в газе*.

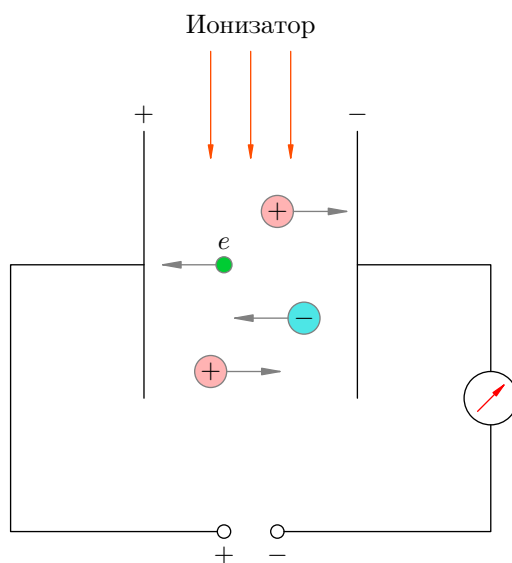


Рис. 6. Несамостоятельный разряд

На рис. 6 мы видим три сорта заряженных частиц, возникающих в газовом промежутке под действием ионизатора: положительные ионы, отрицательные ионы и электроны. *Электриче-*

ский ток в газе образуется в результате встречного движения заряженных частиц: положительных ионов — к отрицательному электроду (катоду), электронов и отрицательных ионов — к положительному электроду (аноду).

Электроны, попадая на положительный анод, направляются по цепи к «плюсу» источника тока. Отрицательные ионы отдают аноду лишний электрон и, став нейтральными частицами, возвращаются в обратный газ; отданный же аноду электрон также устремляется к «плюсу» источника. Положительные ионы, приходя на катод, забирают оттуда электроны; возникший дефицит электронов на катоде немедленно компенсируется их доставкой туда с «минуса» источника. В результате этих процессов возникает упорядоченное движение электронов во внешней цепи. Это и есть электрический ток, регистрируемый гальванометром.

Описанный процесс, изображённый на рис. 6, называется *несамостоятельным разрядом* в газе. Почему самостоятельным? Потому для его поддержания необходимо постоянное действие ионизатора. Уберём ионизатор — и ток прекратится, поскольку исчезнет механизм, обеспечивающий появление свободных зарядов в газовом промежутке. Пространство между анодом и катодом снова станет изолятором.

Вольт-амперная характеристика газового разряда

Зависимость силы тока через газовый промежуток от напряжения между анодом и катодом (так называемая *вольт-амперная характеристика газового разряда*) показана на рис. 7.

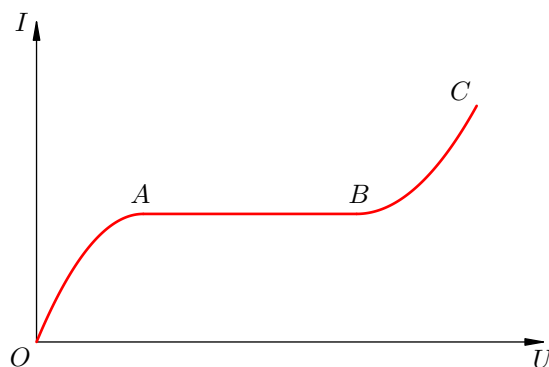


Рис. 7. Вольт-амперная характеристика газового разряда

При нулевом напряжении сила тока, естественно, равна нулю: заряженные частицы совершают лишь тепловое движение, упорядоченного их движения между электродами нет.

При небольшом напряжении сила тока также мала. Дело в том, что не всем заряженным частицам суждено добраться до электродов: часть положительных ионов и электронов в процессе своего движения находят друг друга и рекомбинируют.

С повышением напряжения свободные заряды развивают всё большую скорость, и тем меньше шансов у положительного иона и электрона встретиться и рекомбинировать. Поэтому всё большая часть заряженных частиц достигает электродов, и сила тока возрастает (участок OA).

При определённой величине напряжения (точка A) скорость движения зарядов становится настолько большой, что рекомбинация вообще не успевает происходить. С этого момента *все* заряженные частицы, образованные под действием ионизатора, достигают электродов, и *ток достигает насыщения* — а именно, сила тока перестаёт меняться с увеличением напряжения. Так будет происходить вплоть до некоторой точки B .

Самостоятельный разряд

После прохождения точки B сила тока при увеличении напряжения резко возрастает — начинается *самостоятельный разряд*. Сейчас мы разберёмся, что это такое.

Заряженные частицы газа движутся от столкновения к столкновению; в промежутках между столкновениями они разгоняются электрическим полем, увеличивая свою кинетическую энергию. И вот, когда напряжение становится достаточно большим (та самая точка B), электроны за время свободного пробега достигают таких энергий, что при соударении с нейтральными атомами ионизируют² их!

Начинается так называемая *ионизация электронным ударом*. Электроны, выбитые из ионизированных атомов, также разгоняются электрическим полем и налетают на новые атомы, ионизируя теперь уже их и порождая новые электроны. В результате возникающей электронной лавины число ионизированных атомов стремительно возрастает, вследствие чего быстро возрастает и сила тока.

Количество свободных зарядов становится таким большим, что необходимость во внешнем ионизаторе отпадает. Его можно попросту убрать. Свободные заряженные частицы теперь порождаются в результате *внутренних* процессов, происходящих в газе — вот почему разряд называется самостоятельным.

Если газовый промежуток находится под высоким напряжением, то для самостоятельного разряда не нужен никакой ионизатор. Достаточно в газе оказаться лишь одному свободному электрону, и начнётся описанная выше электронная лавина. А хотя бы один свободный электрон всегда найдётся!

Вспомним ещё раз, что в газе даже при обычных условиях имеется некоторое «естественное» количество свободных зарядов, обусловленное ионизирующим радиоактивным излучением земной коры, высокочастотным излучением Солнца, космическими лучами. Мы видели, что при малых напряжениях проводимость газа, вызванная этими свободными зарядами, ничтожно мала, но теперь — при высоком напряжении — они-то и породят лавину новых частиц, дав начало самостоятельному разряду. Произойдёт, как говорят, *пробой* газового промежутка.

Напряжённость поля, необходимая для пробоя сухого воздуха, равна примерно 30 кВ/см. Иными словами, чтобы между электродами, разделёнными сантиметром воздуха, проскочила искра, на них нужно подать напряжение 30 киловольт. Вообразите же, какое напряжение необходимо для пробоя нескольких километров воздуха! А ведь именно такие пробои происходят во время грозы — это прекрасно известные вам молнии.

²С помощью законов сохранения импульса и энергии можно показать, что именно электроны (а не ионы), ускоряемые электрическим полем, обладают максимальной способностью ионизировать атомы.