

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
“НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ”

ФИЗИКА.
ИОНИЗАЦИЯ ГАЗОВ. РАЗРЯД В ГАЗАХ

для студентов всех специальностей по дисциплине «Физика»

Днепро
НГУ
2016

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
“НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ”



ФАКУЛЬТЕТ СТРОИТЕЛЬСТВА
Кафедра физики

Л.И. Барташевская, А.С. Зайцев

ФИЗИКА.
ИОНИЗАЦИЯ ГАЗОВ. РАЗРЯД В ГАЗАХ

для студентов всех специальностей по дисциплине «Физика»

Днепро
НГУ
2016

Физика. Ионизация газов. Разряд в газах. Методические указания для студентов всех специальностей./ Л.И. Барташевская, А.С. Зайцев. – Д.: Государственный ВУЗ «Национальный горный университет», 2016. – 8 с.

Авторы:

Л.И.Барташевская, А.С. Зайцев., кандидаты физ.-мат. наук.

Утверждено методической комиссией для специальности 184. «Горное дело» (протокол № от) по представлению кафедры физики (протокол № от).

Методические указания предназначены для самостоятельной подготовки студентов всех инженерных специальностей по разделу «Электричество и магнетизм».

Рассмотрены механизмы ионизации газов, условия возникновения и виды самостоятельных разрядов, некоторые применения разрядов.

Рекомендации ориентированы на активацию учебной деятельности студентов.

Ответственный за выпуск заведующий кафедрой физики канд. физ.-мат. наук, проф. И.П. Гаркуша.

Целью данной работы является рассмотрение условий, при которых в газах, являющихся при нормальных условиях изоляторами, может протекать ток, а также описание некоторых видов разрядов и возможности их применения.

Газ состоит из электрически нейтральных атомов и молекул. При нормальных условиях газ – изолятор. Но, если газ ионизовать, то есть превратить электрически нейтральные частицы – атомы, молекулы в положительные ионы и электроны, то в газе появятся носители зарядов (рис. 1а). Ион – электрически заряженная частица, образующаяся при отрыве или присоединении одного или нескольких электронов к атому, молекуле. В некоторых случаях атомы и молекулы могут присоединять электроны, образуя отрицательные ионы (рис. 1б). После ионизации газ становится проводником электрического тока. Электрическим током называется упорядоченное движение электрических зарядов. В металлах носители зарядов – электроны, в проводящих жидкостях (электролитах) – ионы.

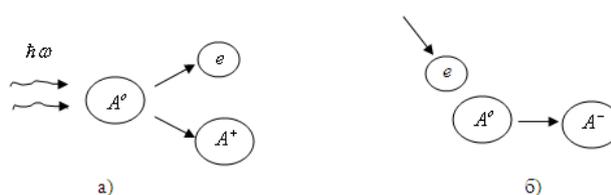


Рис. 1

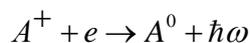
A^+ , A^- – положительный и отрицательный ионы, A^0 - нейтральный атом, e – электрон, $\hbar\omega$ - квант энергии.

Процесс прохождения тока через газ, сопровождающийся совокупностью электрических и тепловых явлений, называется электрическим разрядом. В зависимости от того, за счёт каких факторов в газе образуются заряженные частицы, необходимые для существования разряда, различают несамостоятельный и самостоятельный разряды. Для поддержания несамостоятельного разряда необходимо пополнение зарядов за счёт внешних воздействий – ионизаторов. Ионизаторами могут быть потоки электронов, протонов, α -частиц, рентгеновское или ультрафиолетовое излучения. Ионизация атомов и молекул газа происходит также в электрических полях большой напряженности и при сильном нагреве газа.

Количественной характеристикой действия ионизатора служит скорость ионизации q , измеряемая числом пар противоположных по знаку заряженных частиц, возникающих в единице объёма газа за единицу времени.

При действующем ионизаторе число заряженных частиц в газе не может увеличиваться бесконечно. Параллельно идёт процесс их исчезновения – рекомбинация. Положительные ионы и электроны, встречаясь, образуют нейтральные молекулы и атомы.

На ионизацию атома (молекулы) затрачивается энергия, поэтому положительный ион и электрон имеют после ионизации энергию в сумме большую, чем атом (молекула). Процесс рекомбинации протекает по схеме



и сопровождается электромагнитным излучением.

В зависимости от того, какой из процессов: ионизация или рекомбинация преобладает, наблюдается либо увеличение количества заряженных частиц, либо их

уменьшение. Если скорость ионизации q , а вследствие рекомбинации будет исчезать в единице объёма за единицу времени αn^2 пар зарядов, то уравнение баланса заряженных частиц можно записать так:

$$\frac{dn}{dt} = q - \alpha n^2 \quad (1)$$

где n - концентрация пар заряженных частиц, α - коэффициент рекомбинации, зависящий от природы газа.

В состоянии динамического равновесия $\frac{dn}{dt} = 0$, $n = \text{const}$, а $q = \alpha n^2$. Следовательно,

равновесная концентрация n_0 пар заряженных частиц $n_0 = \sqrt{\frac{q}{\alpha}}$.

Оценим равновесную концентрацию пар ионов в воздухе при нормальных условиях. Суммарная мощность естественных ионизаторов (радиоактивное излучение веществ, находящихся на поверхности Земли и космическое излучение, проникающее в земную атмосферу) $q = 10^6 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$, коэффициент рекомбинации воздуха $\alpha = 10^{-12} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$.

Тогда $n = 10^9 \text{ м}^{-3}$. Это ничтожная доля концентрации молекул воздуха, которая при нормальных условиях, равная $3 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$.

Для количественного изучения разряда рассмотрим экспериментальную зависимость тока разряда от напряжения.

Простейшее устройство для получения зависимости $I = f(U)$ показано на рис. 2.

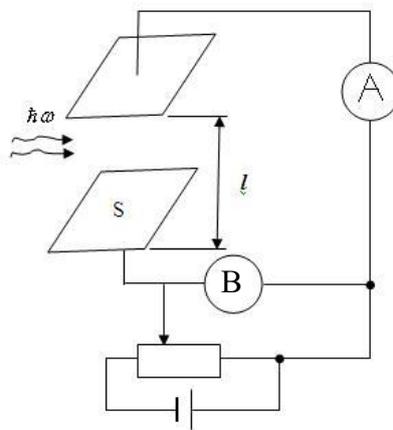


Рис. 2

Объём $V = l \cdot S$ заполнен воздухом при нормальных условиях. Число пар ионов при этих условиях очень мало, поэтому измерения лучше проводить с искусственным ионизатором. Можно, например, облучать пространство между пластинами ультрафиолетовым светом.

Повышая напряжение на пластинах от нуля, получим вольтамперную характеристику (рис. 3).

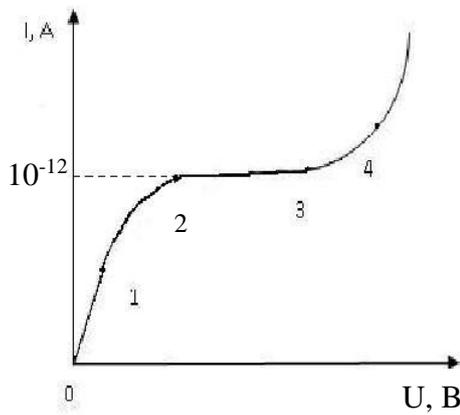


Рис. 3

На участке 0-1 очень слабый ток практически линейно растёт с напряжением, т.е. выполняется закон Ома. Ток на этом участке можно выразить формулой

$$I = e \cdot n(b^+ + b^-)S \cdot E,$$

где e – элементарный заряд, n – концентрация пар заряженных частиц, b^+ , b^- – подвижности ионов и электронов, E – напряженность электрического поля.

На участке 1-2 закон Ома нарушается, а зависимость тока от напряжения становится сложной. Задав напряженность электрического тока в разрядном промежутке 1 В/м, а значение усредненной (по ионам и электронам) подвижности заряженных частиц $b^+ = b^- = b = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$, площадь пластины $S = 10^{-2} \text{ м}^2$, концентрацию вследствие действия ионизации 10^{12} м^{-3} можно получить силу тока в начальной части разряда (когда действует закон Ома), $I = 10^{-13} \text{ А}$

Дальнейшее увеличение напряжения (после точки 2) не приводит к увеличению тока. Это происходит потому, что из разрядного промежутка пары заряженных частиц исчезают не только за счёт рекомбинации, но и за счёт уноса их из разрядного промежутка током. При постоянной мощности внешнего ионизатора условие динамического равновесия теперь будет таким

$$\frac{d}{dt}(nSl) = qSl - \alpha n^2 Sl - \frac{jS}{e}$$

Так как $S \neq 0$; $e \neq 0$, то после деления на Se левой и правой части этого уравнения получим:

$$\frac{dn}{dt} = q - \alpha n^2 - \frac{j}{el} \quad (2)$$

Электроны и ионы ускоряются до таких скоростей, что успевают прийти к пластинам раньше, чем происходит их рекомбинация. Поэтому можно считать, что $\frac{j}{el} \gg \alpha n^2$.

Тогда условию равновесия будет соответствовать выражение

$$\frac{dn}{dt} = q - \frac{j}{el} = 0.$$

Ток разряда I равен:

$$I = qelS = qeV.$$

Он не зависит от напряжения на разрядном промежутке и называется током насыщения. Зависит ток насыщения от мощности ионизатора (являясь поэтому мерой ионизирующего действия ионизатора) и объёма ионизованного газа. На вольтамперной характеристике соответствует участку 2-3. Если взять $l=10^{-6}$ м, $q=10^{10}$ м⁻³, то $I_{\text{нас.}}=10^{-10}$ А.

Он больше на два порядка, чем начальный ток, но все ещё очень мал.

Увеличение напряжения (участок 3-4) приводит к увеличению тока. На этом участке проявляется новый, внутренний ионизатор – быстрые электроны. Появляются они вследствие ускорения их электрическим полем. Ускоряясь, электроны приобретают энергию, достаточную для ионизации молекул электронным ударом. Возникает пара зарядов: положительный ион и электрон (рис. 4).

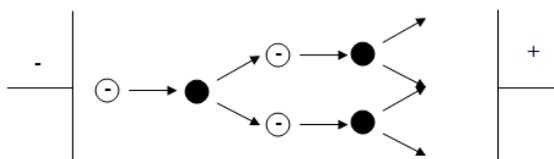


Рис. 4

Продолжая двигаться в поле, появившиеся электроны вновь приобретают энергию, достаточную для ионизации. Число электронов возрастает до четырёх. Такой режим нарастания числа носителей называется лавинным. Лавина электронов уходит на положительный электрод, образуя электронную составляющую тока. Однако, внешний ионизатор для существования разряда остаётся необходимым. Если убрать внешний ионизатор, разряд продолжится только до тех пор, пока все электроны не достигнут положительно заряженного электрода (анода). Разряд, вызванный действием внешнего ионизатора, называется несамостоятельным газовым разрядом.

Несамостоятельный разряд перейдёт в самостоятельный тогда, когда концентрация зарядов будет увеличиваться в результате протекающих внутри разряда процессов. Такими процессами могут быть: 1) ионизация положительными ионами; 2) ионно-электронная эмиссия из катода; 3) фотоионизация и т.д.

После возникновения в разрядном промежутке непрерывно нарастающей лавины электронов, наступает момент, когда положительные ионы на длине свободного пробега приобретают энергию, достаточную для ионизации молекул. Односторонняя лавина заменяется двусторонней. При рекомбинации большого числа ионов освобождается энергия – возникает электромагнитное излучение. Оно состоит из фотонов, энергия которых ϵ равна $\hbar\omega$ (\hbar - постоянная Планка, ω - циклическая частота). Молекула поглощает фотон, его энергия идёт либо на возбуждение молекулы, либо на её ионизацию, которую называют фотоионизацией.

В результате действия внутренних ионизаторов ток скачкообразно увеличивается на несколько порядков, и в исследуемом объёме зажигается самостоятельный разряд. Напряжение на электродах разрядного промежутка в этот момент называется напряжением пробоя газа $U_{\text{пр}}$. Если это напряжение приложить к пластинам скачком, то зажигания разряда будет происходить без предварительного развития несамостоятельного разряда. Напряжение пробоя по закону Пашена зависит от произведения давления газа p на длину l разрядного промежутка:

$$U_{\text{пр}} = f(pl)$$

Этот закон выполняется тем точнее, чем меньше p и l .

В зависимости от процессов образования ионов в газе, формы электродов, давления газа различают такие типы самостоятельных разрядов: тлеющий, искровой, дуговой, коронный. Характер разряда зависит от химической природы газа, температуры, давления газа, от расположения, формы, материала электродов, от напряженности электрического поля. Поэтому разряд приобретает разнообразные формы, сопровождается излучением электромагнитных волн (света), звуковыми эффектами – треском, шорохом, громом.

Изучение различных форм самостоятельного разряда затруднено из-за большого числа различных элементарных процессов, протекающих в нём. Поэтому описание самостоятельного разряда основано на экспериментальном исследовании соответствующих вольтамперных характеристик $I_p = f(U)$.

Самостоятельный разряд получить в разреженном газе гораздо легче, чем при атмосферном давлении. Это объясняется тем, что при низких давлениях длина свободного пробега ионов и электронов увеличивается, и даже в слабых полях они приобретают достаточную энергию для ионизации атомов и молекул.

Опишем тлеющий разряд в воздухе, наблюдая его возникновение в стеклянной трубке длиной 40÷50 см. На электроды, впаянные в торцы трубки, подают напряжение в несколько сот вольт. При атмосферном давлении приложенного напряжения недостаточно для зажигания разряда. Поэтому давление в трубке понижают примерно до 100 мм рт.ст., наблюдая возникновение разряда в виде светящегося шнура. Дальнейшее уменьшение давления приводит к расширению шнура и заполнению разрядом всего пространства между анодом и катодом.

Для получения вольтамперной характеристики разряда собирают цепь, изображенную на рис. 5. Для устойчивости разряда последовательно с разрядным промежутком включено балластное сопротивление R , на котором с ростом тока растёт падение напряжения. Вольтамперная характеристика самостоятельного разряда показана на рис. 6.

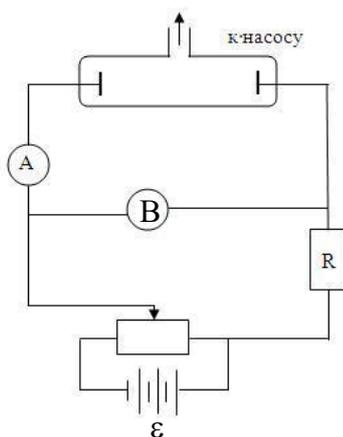


Рис. 5

Первая форма самостоятельного разряда (ей соответствует участок 4-5) называется тёмным разрядом. Свечение газа ещё очень слабое.

Следующая форма разряда называется тлеющим разрядом (участок 6-7-8). Возникает при давлениях порядка 40÷50 мм рт.ст. Разряд на участке 7-8 носит название аномального.

Начиная с тока, соответствующего точке 8, катод разогревается и становится заметной термоэлектронная эмиссия с поверхности катода. Количество электронов сильно увеличивается и разряд переходит в форму дугового (участок 9-10). Область 8-9 соответствует неустойчивой форме разряда.

Для дуговой формы разряда характерны большие токи и малые падения напряжения на разряде. Вольтамперная характеристика дуги – падающая: с увеличением тока напряжение на дуге уменьшается (рис. 6). Поэтому для регулирования тока и необходимо включать балластное сопротивление R .

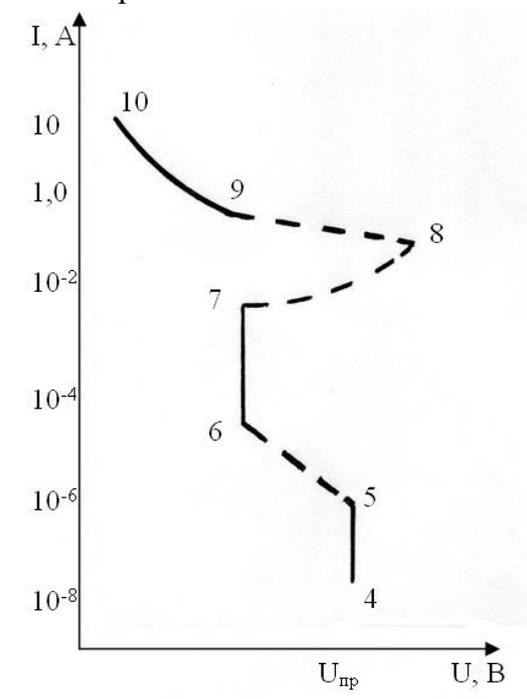


Рис. 6.

Дуги возникают как при низких (миллиметры рт.ст.), так и при высоких давлениях. Различают три вида дуговых разрядов: термоэлектронные, газотронные и автоэлектронные.

У термоэлектронных дуг катод изготавливают из тугоплавких материалов. Типичным представителем этого типа дугового разряда является дуга Петрова с графитовыми электродами. Дуга Петрова горит при атмосферном давлении. При работе на постоянном токе температура катода достигает 3000°C , а анода – до 4000°C . Графитовые электроды сгорают не одинаково быстро. Катод сгорает в два раза медленнее анода, при этом заостряется, а на аноде образуется углубление, называемое кратером.

Если катод изготавливается из тугоплавких металлов (вольфрама, молибдена), то дуга может гореть при пониженном давлении. Дуга Петрова горит и на переменном токе. Для получения газотронных дуг используют катоды косвенного нагрева. Рабочее давление для таких дуг порядка $10^{-2} \div 10^{-3}$ мм рт.ст.).

У автоэлектронных дуг катоды изготавливают из легкоплавких материалов (медь, ртуть).

Применение газовых разрядов.

У распространенных источников света – ламп накаливания есть основной недостаток – низкий коэффициент полезного действия (около 4%). Это привело к созданию более экономичных источников света – газоразрядных.

У газоразрядных источников света «рабочим телом» в отличие от раскаленной нити накала служит плазма различных типов газовых разрядов. Плазма – частично или полностью ионизированный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы.

Газоразрядные источники света делятся на газосветные и люминесцентные. У первых источником света является плазма тлеющего разряда, у вторых – люминофор, возбуждаемый излучением плазмы разряда.

Газосветные лампы выполнены из стеклянной трубки, заполненной газом. Внутри трубки, на её торцах расположены электроды. Под действием электрического поля, созданного в трубке, электроны, ускоренные полем, вызывают возбуждение атомов газа. Возбуждённые атомы, переходя в основное состояние, излучают фотоны (свет). Спектр излучения зависит от газа-наполнителя. Неон даёт оранжево-красный свет, аргон – синий, гелий – жёлтый. Возможность придавать трубкам форму букв, знаков, рисунков, цифр позволяет использовать их в рекламном, декоративном освещении, сигнализации.

Люминесцентные источники света используют для освещения помещений. Такие источники дают спектр излучения близкий к дневному. В основе принципа действия таких ламп лежит идея С.И. Вавилова – превращение ультрафиолетового излучения газосветных ламп в дневной свет с помощью люминесценции. Для этого на внутреннюю поверхность трубок газосветных ламп наносят слой специально подобранного люминофора. Его назначение – преобразовать ультрафиолетовое излучение плазмы разряда в искусственный дневной свет. Для усиления излучения плазмы в ультрафиолетовой части спектра в лампу вводят небольшое количество ртути (в современных энергосберегающих лампах около 4 мг).

Ультрафиолетовое излучение используют в медицине для обеззараживания помещений и медицинских инструментов. Соответствующие лампы называются бактерицидными.

В мощных лампах дневного света используют дуговые разряды в парах ртути при высоких давлениях. Люминофор подбирают так, чтобы он хорошо поглощал ультрафиолетовое излучение и превращал его в оранжево-красное, которого практически нет в спектре дугового разряда. Такие лампы называют сокращённо ДРЛ (дуговая, ртутная, люминесцентная).

Широко используются также водородные, натриевые лампы. Излучение водородной лампы создаётся атомами и молекулам водорода, возбуждёнными при разряде в газе. Натриевые лампы дают интенсивное излучение в желтой области спектра. Используют для освещения улиц, площадей.

Плазма газовых разрядов используется как активная среда оптических квантовых генераторов (лазеров). Лазеры – качественно новые источники света. Особенности газовых лазеров связаны с выбором рабочего газа или смеси газов и способа создания инверсного состояния. В большинстве газовых лазеров инверсное состояние создаётся при возникновении разряда в газе, поэтому такие лазеры называли газоразрядными.

В гелий-неоновом лазере активной средой является разряд в смеси гелия и неона, взятых в отношении 10:1 при общем давлении $p=1$ мм рт.ст.

В лазере на углекислом газе активной средой является разряд в смеси углекислого газа, азота, гелия. «Рабочим» же веществом является углекислый газ. Он ответственен за генерацию лазерного излучения.

При горении *дугового разряда* излучение света интенсивно. Но поскольку 85% излучения приходится на анод, 10% на катод, а остальные 15% на самую дугу, то она не может быть отнесена к газоразрядным источникам света. Тем не менее, дуговой разряд имеет широкое применение в технике. Мощное излучение кратера дуги используют в прожекторах проекционных киноаппаратов.

Кроме этого мощный дуговой разряд используют в плазмотронах. Плазмотрон – устройство для создания плотной низкотемпературной плазмы с помощью электрических разрядов в газах. В работающем плазмотроне газ (воздух, аргон, азот, водород) непрерывно продувают через область, где горит дуга. Газ ионизуется и превращается в плазму, вытекающую из области разряда в виде струи. С помощью плазмотронов производится плазменное нанесение покрытий, плазменная резка, сварка.

В плазмохимии плазмтроны используют для получения ультрадисперсных порошков, плёнок органических и неорганических материалов, для травления, модификации поверхностей изделий.

Коронный разряд – не полностью развившийся искровой разряд. Наблюдается в сильно неоднородном электрическом поле у заостренных концов металлических проводников. Второй электрод, практически произвольной формы должен быть расположен достаточно далеко, чтобы не развился искровой разряд. Это пример тлеющего разряда при атмосферном давлении.

Искровой разряд – неустойчивый самостоятельный разряд, имеющий вид тонкого изогнутого канала с множеством разветвлений. Возникает обычно при давлениях газа порядка атмосферного в электрическом поле, близком к однородному, между двумя электродами. Для воздуха при нормальных условиях значения напряженности поля, необходимое для пробоя $E_{пр} \approx 3 \cdot 10^6$ В/м.

Примером искрового разряда является молния. Сила тока в молнии от 10 до 10^3 кА. Напряжение между облаком и Землёй перед возникновением молнии порядка $10^8 \div 10^9$ В. Длительность одного разряда $\tau \approx 10^{-6}$ с. Заряд, переносимый молнией $q = 10^{-2}$ Кл \div 1 Кл.

В результате прохождения импульса тока через канал искры (молнии) выделяется большая энергия. Из-за этого газ в искровом промежутке нагревается до высоких температур (10^4 К), ионизуется, а последующая рекомбинация приводит к свечению газа. Резкое повышение температуры ведёт к повышению давления газа. Это фиксируется на слух в виде потрескивания в слабых разрядах и в виде грома, сопровождающего разряды в виде молнии.

Используют газовый разряд для воспламенения горючей смеси в двигателях внутреннего сгорания, электроискровой обработки материалов, применяют в качестве предохранителей от перенапряжений в электрических линиях, для регистрации заряженных частиц в искровых камерах, измерения высоких напряжений.

Качественное объяснение механизма искрового разряда даёт стримерная теория. Согласно ей электронная лавина, идущая от катода, возбуждает и ионизирует атомы и молекулы газа, которые испускают кванты света, распространяющиеся к аноду со скоростью света. Эти кванты ионизируют на своем пути молекулы и атомы, вызывая новую лавину электронов. В газе появляются стримеры – слабо светящиеся области ионизированного газа. Соединяясь, стримеры образуют каналы, по которым движутся лавины электронов. Догоняя друг друга, лавины, сливаясь, образуют канал искрового разряда.

Литература

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. У 3 т. Т. 2 Електрика та магнетизм – К.: «Техніка», 2006. – 452 с.
2. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф.: Курс фізики. У 2 кн.: Кн.1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. К.: «Либідь», 2001. – 448 с.
3. Трофімова Т.І. Курс фізики. – М., «Академия», 2005. – 560 с.

Баргашевская Людмила Ивановна
Зайцев Анатолий Семёнович

ФИЗИКА.
ИОНИЗАЦИЯ ГАЗОВ. РАЗРЯД В ГАЗАХ
для студентов всех специальностей по дисциплине «Физика»